文章编号:1673-5005(2019)06-0088-10 doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2019.06.010

海域天然气水合物水平井储层关键参数反演方法

张 鑫[1], 黄芳飞[2], 谭玉阳[3], 梁前勇[2], 董一飞[2], 何 川[1]

(1. 北京大学地球与空间科学学院,北京 100871; 2. 中国地质调查局广州海洋地质调查局,广东广州 510760;
3. 中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室,山东青岛 266100;)

摘要:应用测斜仪监测技术进行海域天然气水合物水平井开采的产气量动态评价时,不同井段体积参数间的互补性可能导致目标函数陷入较大的收敛区域,此时反演方法所能达到的精度将直接影响反演结果。提出一种基于邻域算法的储层关键参数反演方法,以中国南海神狐海域实际地质情况为基础,利用合成的海底倾斜场数据对水平井不同井段的体积参数进行反演试算,并研究不同噪声程度和模型间距对反演结果的影响。结果表明:与直接网格搜索法相比,提出的方法在保证收敛效果的前提下计算效率更高,实时性更强;与模拟退火法相比,提出的方法反演精度更高;当不同井段的产水和出砂量较小或占该段储层变化体积的比例一致时,该方法可为海域天然气水合物水平井产气量的动态评价提供算法基础。

关键词:天然气水合物; 参数反演; 倾斜场; 邻域算法

中图分类号:TE 53 **文献标志码**:A

引用格式:张鑫,黄芳飞,谭玉阳,等. 海域天然气水合物水平井储层关键参数反演方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2019,43(6):88-97.

ZHANG Xin, HUANG Fangfei, TAN Yuyang, et al. Inversion method of key reservoir parameters for horizontal well production of marine gas hydrate[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science),2019,43(6):88-97.

Inversion method of key reservoir parameters for horizontal well production of marine gas hydrate

ZHANG Xin[1], HUANG Fangfei[2], TAN Yuyang[3], LIANG Qianyong[2], DONG Yifei[2], HE Chuan[1]

(1. *School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing* 100871, *China*;
2. *Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou* 510760, *China*;
3. *MOE Key Laboratory of Submarine Geoscience and Prospecting Techniques, Ocean University of China, Qingtao* 266100, *China*)

Abstract: A tilt-meter monitoring method can be used to evaluate the dynamic gas output in horizontal wells during marine gas hydrate exploitation, while the objective function may fall into a large convergence area because of the complementarity between the volume parameters of different well sections. Thus, the accuracy of the inversion method will directly affect its results. In this work, a key reservoir parameter inversion method based on neighborhood algorithm was proposed, and a case study was carried out based on the geological conditions of Shenhu area in the South China Sea. The volume parameters of different sections of horizontal wells were inverted and calculated using the synthesized seabed tilt field data, and the influence of different noise levels and model spacing on the inversion results was studied. The results show that, compared with the direct grid search method, the proposed method has higher computational efficiency and better real-time performance on

收稿日期:2019-04-02

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0307702,2017YFC0307605);中国地质调查局国家天然气水合物专项(0733-19180292/21)

作者简介:张鑫(1991-),男,博士研究生,研究方向为海域天然气水合物开采的变形监测及产量评价。E-mail:zxin@pku.edu.cn。

通信作者:何川(1974-),男,研究员,研究方向为压裂监测及天然气水合物专用仪器研制开发及综合处理技术。E-mail:chuanhe_pku@163.com。

the premise of ensuring the convergence effect. Compared with the simulated annealing method, the proposed method also has higher inversion accuracy. When the output of water and sand form different well sections are small or the proportion of them to the changing volume of the reservoir is the same, this method can provide a better algorithm basis for the dynamic evaluation of marine gas hydrate production via horizontal wells.

Keywords: natural gas hydrates; parameters inversion; tilt field; neighborhood algorithm

天然气水合物是甲烷等小型气体分子在低温高压条件下与水分子结合形成的似冰状固体,绝大部分赋存于大陆边缘陆坡的海底沉积层中,被认为是21 世纪理想的替代能源[1-3]。2002 年以来,加拿大[4]、美国[5]、日本[6]和中国进行了一系列天然气水合物开采试验。相比陆上,海域天然气水合物直井开采试验取得了重大突破[7-8],但距离海域水合物经济可行的开采目标仍有很大差距[9-10],而利用水平井进行海域天然气水合物开发是提高单井产气量的有效手段。水平井开采时,需要对不同井段的产气量进行动态评价。常规油气藏开发所使用的产能评价方法(如试井分析法、示踪剂分析法等)均假定目标井段在分段处理时被完全隔离[11-13],无法将其直接应用于海域天然气水合物的产量评价。测斜仪是一种测量地层倾斜场(位移场的梯度)变化的仪器[14-17],由于海域天然气水合物储层通常埋藏较浅[18],开采过程中的储层体积变化会导致较大幅度的地层变形,继而引发海底倾斜场的变化,这就使得测斜仪监测技术成为解决海域水合物开采产气量评价问题的可行手段。应用测斜仪进行储层参数反演时,水平井不同井段体积参数间的互补性可能导致目标函数陷入较大的收敛区域,此时反演方法所能达到的精度将直接影响着反演结果的好坏。常用的反演算法(如直接网格搜索算法、梯度法和模拟退火法等)[19-21]对此无法取得良好效果。笔者提出一种基于邻域算法[22-23]的储层参数反演方法,以南海神狐海域为例,研究不同噪声程度和模型间距对反演结果的影响,并与直接网格搜索算法、模拟退火法的反演结果进行对比,以验证提出方法的有效性。

1　方法原理

1.1　海底倾斜场正演模拟方法

图 1 为水平井开采单段模型与测斜仪观测系统示意图。以该水平井射孔段中心点在海底面的投影点为笛卡尔坐标系的原点,定义 X 轴、Y 轴、Z 轴的正方向分别为正东、正北和竖直向上方向。海域天然气水合物水平井开采时,赋存于储层孔隙或充填于岩石骨架中的固态水合物率先在射孔段附近发生分解,并逐渐在一定范围内形成以射孔段为中心的水合物分解区域。考虑到边际效应,可不失一般性地假定该水合物分解区域以射孔段为中心呈圆柱状水平展布。在该区域内,由固态水合物分解的部分天然气和水将与储层中的自由水和可能存在的游离气一起沿着气水通道产出。开采过程中,实际产出的天然气包括固态水合物分解的天然气产出的部分和储层中可能赋存的游离气,产出的水包括固态水合物分解水产出的部分和储层中的自由水。除此之外,开采过程中还可能伴随一定的出砂(骨架颗粒),而气、水、砂的产出将导致该分解区域的储层体积变化,进而引起海底面的倾斜场变化。

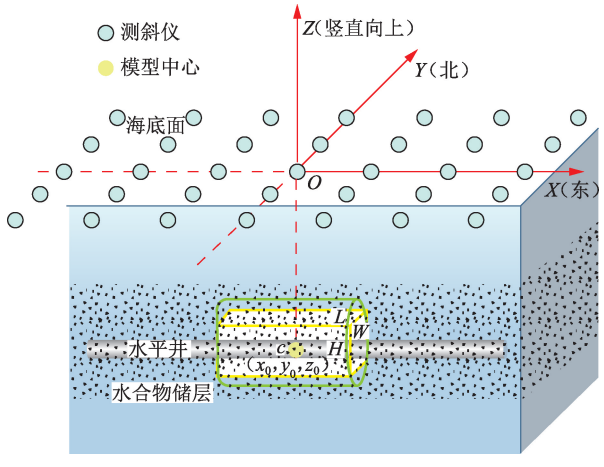


图 1　水平井开采单段模型与测斜仪观测系统示意图

Fig. 1　Single section model of horizontal well exploitation and schematic diagram of tiltmeter observation system

基于 Okada[24-25]和张鑫等[26]的研究,本文中用块状模型等效水合物分解区域内因气、水、砂产出而导致的储层体积变化,模型体积即为水合物分解区域内产出的气、水、砂所占据的全部孔隙空间之和。模型长度 L 为该水平井段的射孔段长度,且该模型的宽 W 和高 H 可认为相等,模型中心为射孔段中心点位置 $c(x_0, y_0, z_0)$。此时,开采过程中该水合物分解区域在海底面产生的倾斜场变化可由块状模型产生的倾斜场变化等效表示。因此水平井多段开采导致的海底面倾斜场变化可通过将各段模型引起的倾斜场变化进行矢量叠加得到。

海域天然气水合物水平井开采时,可实时获取总产气量、总产水量和总出砂量,而难以直接获取不同井段的产气、产水和出砂量,这就为多段开采的产

气量评价带来困难。考虑到开采过程中水合物分解区域内气、水、砂的产出将导致储层的体积变化。当不同井段产水和出砂量较小或占该段储层变化体积的比例一致时,不同井段的产气量与该段水合物分解区域内的储层体积变化呈正相关性。此时,可通过海底测斜仪监测到的因储层体积变化导致的倾斜场变化来反演不同井段的储层体积变化量,继而进行海域天然气水合物水平井开采的多段产气量评价。

1.2 邻域算法

1.2.1 算法简介

邻域算法[22-23]用于在多维参数空间中寻找到可较好拟合观测数据的模型集合,其基本元素为 Voronoi 单元,通过将 Voronoi 单元中每个点对应的目标函数设为常数,可得目标函数值的一个近似,称为 NA 面。NA 面提供了对参数空间中不规则点分布的简单非光滑插值方法。

假设通过某种方法可以产生新的样本,这些新样本能够局部地改变 Voronoi 单元的大小,从而改善 NA 面的局部分辨率。

1.2.2 目标函数

目标函数的建立是地球物理反演问题的关键,本文中目标函数定义为测斜仪所记录的观测值与模型理论值之间的相对拟合差,其计算公式为

$$\varphi = \frac{\sum_{i=1}^{N} C_i \| M_{\mathrm{obs}i} - M_{\mathrm{cal}i} \|}{\sum_{i=1}^{N} C_i \| M_{\mathrm{obs}i} \|} . \tag{1}$$

式中, N 为观测点个数;$M_{\mathrm{obs}i}$ 和 $M_{\mathrm{cal}i}$ 分别为第 i 个观测点处倾斜场的实际观测值和理论计算值; C_i 为权重系数, 取值范围为 0 ~ 1, 其数值取决于观测数据的质量。

1.2.3 算法流程

采用邻域算法进行体积参数反演的具体步骤可归纳如下:

(1)首先在体积参数的合理区间范围内随机产生 N_s 个初始体积模型 $M_1 = \{m_1, m_2, \cdots, m_{N_s}\}$。

(2)计算每个体积模型对应的目标函数值。

(3)选择出目标函数最小的 N_r 个体积模型 $M_2 = \{m_1, m_2, \cdots, m_{N_r}\}$。

(4)在 M_2 决定的 Voronoi 单元内再次随机生成 N_s 个体积模型,即每个单元内新生成的体积模型数目为 N_s/N_r。

(5)依照上述方法重复迭代,每一次都选择出 N_r 个最佳体积模型,最佳体积模型的 Voronoi 单元也随之不断更新改变。

(6)当某次迭代产生的新体积模型满足收敛条件时,输出该模型作为最终结果。

2 模型试算

2.1 倾斜场正演模拟

图 2 为海域天然气水合物水平井开采的简化地质模型。长度为 300 m 的水平井包含 A、B 两个井段,分别用蓝色和红色表示。假定水平井沿东西向展布,以其中点在海底面上的投影为笛卡尔坐标系的坐标原点,X 轴、Y 轴、Z 轴分别对应着正东、正北和竖直向上方向。忽略开采区域海底的地势起伏,35 个海底测斜仪(依次编号为 1 ~ 35)以原点为中心呈网格状均匀布设,网格间距 100 m。

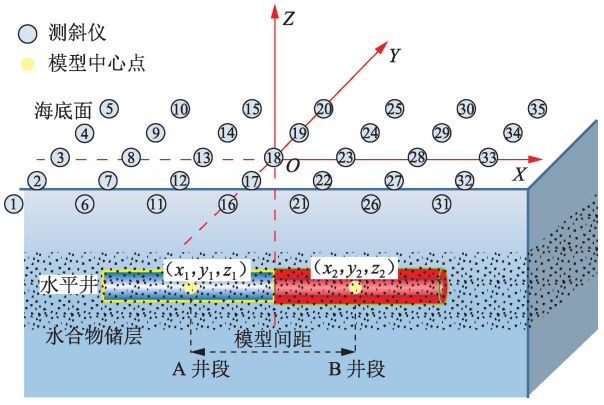


图 2 海域天然气水合物水平井开采简化地质模型

Fig. 2 Simplified geological model for gas hydrate horizontal well exploitation in sea area

以中国南海神狐海域的天然气水合物储层为例,该储层深度范围在 201 ~ 278 m (海底以下深度),中心深度为 240 m,储层饱和度为 33%、孔隙度为 33%[8]。2017 年南海天然气水合物试采的总产气量为 3.09×10^6 m^3。标准状态下,1 m^3 的固态水合物可分解为 164 m^3 天然气。若试采产出的天然气完全来自于储层中固态水合物的分解,那么储层中分解的固态水合物体积约为 1 884 m^3。由于储层中 1 m^3 的固态水合物分解为 0.2 m^3 天然气和 0.8 m^3 水,故此时造成的储层体积变化为 376.8 m^3。根据理想气体状态方程,在神狐海域储层原位温度压力状态下,1 m^3 的游离气在标准状态下的产出的天然气体积为 130 m^3。若试采产出的天然气完全来自于储层中的游离气,此种情况下储层的体积变化为2 377 m^3。因此试采造成的储层体积变化区间为 376.8 ~ 2 377 m^3。考虑到水平井开采能够进一步增大产能,本文中取模型的等效区间为1 000 ~ 4 000 m^3。为便于对比模型体积对正演结果的影响,取 A、B 井段产气量的等效体积分别为 2 000 和 3 000 m^3。若射孔段长度为 50 m,则

模型 A 的长、宽、高分别为 50、6.3 和 6.3 m,模型 B 的长、宽、高分别为 50、7.7 和 7.7 m。对应的等效模型中心点坐标(如图黄色圆点所示)分别为(-100, 0, -240)和(100, 0, -240),即等效模型间距 200 m。

图 3 为 A、B 井段在各观测点产生的倾斜场变化。

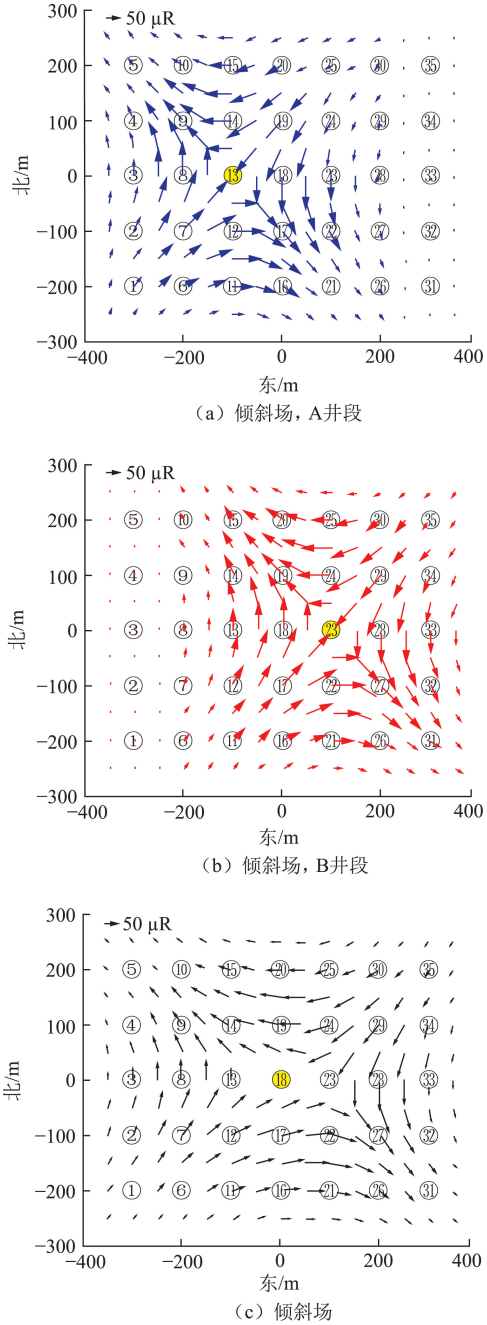


图 3　倾斜场正演模拟结果

Fig. 3　Forward modeling of tilt field

倾斜场矢量(用箭头表示)是由东西向与南北向这两个方向的倾斜场分量合成得到的,数值单位为微弧(μR),它指的是该位置处地层倾斜的角度值。黄色圆点表示水平井不同井段射孔段中心位置在海底面上的投影。可以看出,不同井段在海底面产生的倾斜场以其中点在海底面的投影为中心,存在明显的边界区域。A、B 井段产生的倾斜场集中分布于观测系统西、东两侧。图 3(c)是 A、B 井段各自倾斜场的矢量叠加,黄色圆点表示观测系统的中心位置。在其他参数一致的情况下,由于 B 井段相比 A 井段等效体积更大,对总倾斜场的贡献更大,因此倾斜场表现为自观测系统中心向东的偏移特征。

2.2　模型参数反演

为了排除体积参数选取的特殊性对反演结果的影响,在 1 000 ~ 4 000 m^3 的体积区间内随机生成 100 组体积参数分别作为不同井段等效体积的真实值并正演模拟得到各观测点处的倾斜场值作为反演的输入值,再结合诸如射孔位置、储层厚度、地层参数等已知信息,采用本文中提出的邻域算法选取适当参数(在本文中,邻域算法的两个调节参数 N_s 和 N_r 的取值分别为 50 和 5)进行地球物理反演得到模型的体积参数(反演解),如图 4 所示。反演解与真实值高度重合,表明应用邻域算法进行天然气水合物储层参数反演的可行性。

本文中采用高斯白噪声探究随机噪声对反演结果的影响,它是一类概率密度函数服从高斯分布(即正态分布)的随机噪声,均值 μ 为 0,标准差 σ 为 1。在反演过程中,分别将 5%、10%、15% 这 3 组不同程度的随机噪声加入到真实值中作为实际观测值进行模型参数反演。图 5 和 6 分别为不同噪声水平下采用邻域算法(NE)和直接网格搜索算法(GS)对 100 组体积参数进行反演得到的反演解与真实值的对比及其误差统计。其中图 5 为从 100 组体积参数中以每 5 组为间隔选取 20 组反演结果得到的。图 6 的纵坐标及误差棒分别代表了误差的平均值及其标准差。可以看出,反演效果随着噪声程度的增大而变差。噪声程度达到 15% 时,大部分反演解仍与真实值保持较高的吻合度,表明邻域算法具有良好的抗噪性。两种反演方法的误差基本相等,而直接网格搜索算法的反演误差稍大(图 6(d))的原因在于该算法采用等网格剖分,其搜索结果仅位于有限划分的网格点上。

上述结果是利用处理器为 i5-8250U、主频为 1.6 GHz 的笔记本电脑计算得到的,邻域算法反演的平均计算耗时约 37 s,而直接网格搜索算法的平均计算耗时约 293 s。虽然理论上当网格搜索算法的网格剖分足够密集时,可以搜索到全局最优解,但其计算耗时巨大,实时性差。邻域算法利用的是模

型目标函数值排序,因而只需将目标函数的相对值计算出来即可,这一做法大大降低了计算难度,提高了计算效率,节省计算耗时。

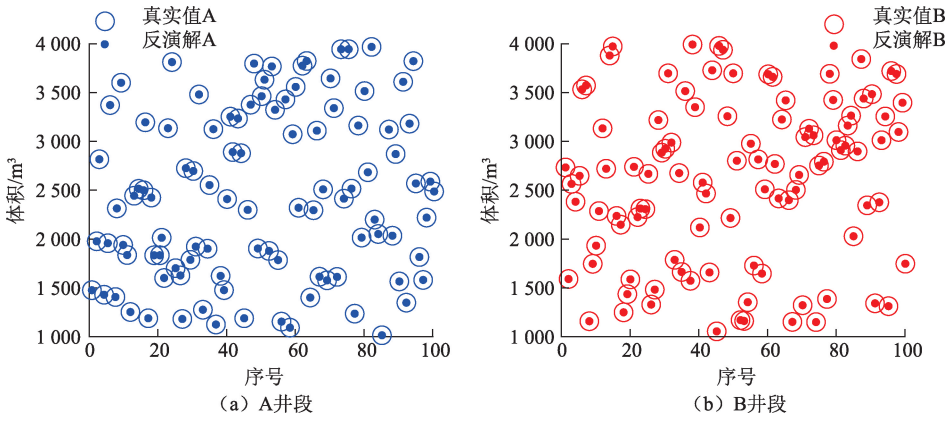


图 4　无噪声条件下 A、B 井段的体积参数反演结果

Fig. 4　Volume parameters inversion results of A and B sections without noise

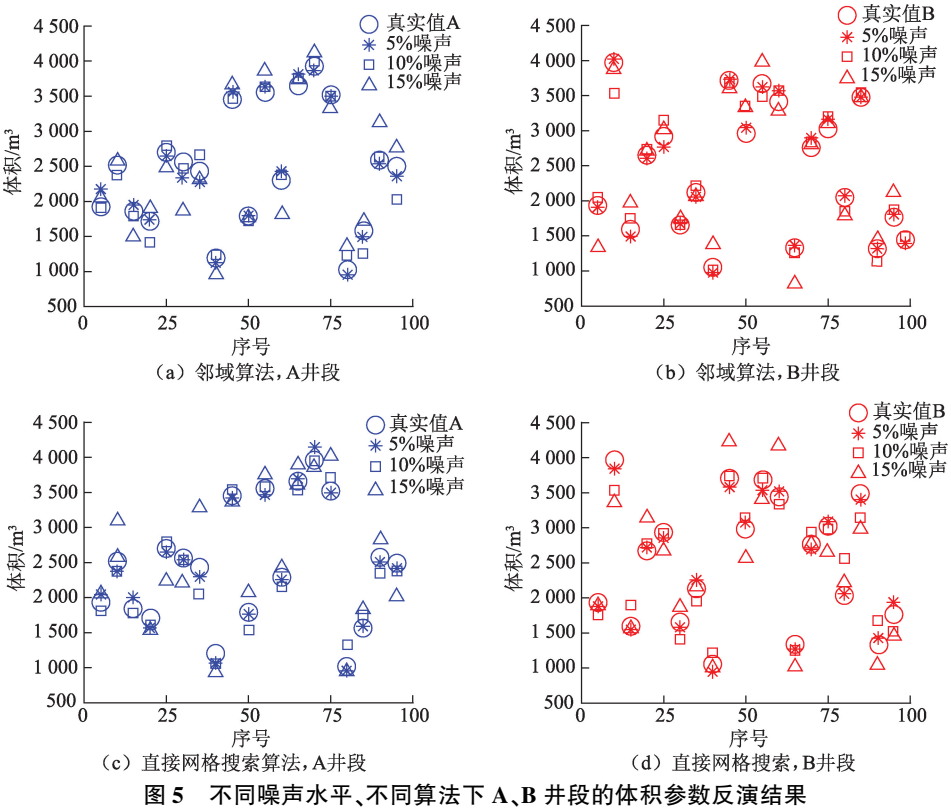


图 5　不同噪声水平、不同算法下 A、B 井段的体积参数反演结果

Fig. 5　Volume parameters inversion results of A and B sections by different algorithms at different noise levels

为定量探究不同噪声水平下模型间距对反演结果的影响,当水平井划分为两个井段时,在 20 ~ 280 m 的模型间距范围内取步长为 20 m,在随机生成的 100 组模型体积参数(真实值)正演得到的倾斜场值中加入不同程度的随机噪声,接着通过不同反演算法进行体积参数反演并统计分析反演结果。图 7 为无噪声时分别运用邻域算法和模拟退火算法(SA)进行体积参数反演的结果误差统计。可以看出,当等效模型间距约大于 80 m 时,两种方法的反演误差近乎相等,但当等效模型间距较小(小于 80 m)时,利用模拟退火法进行参数反演的结果误差较大,反演结果与真实值相偏离,而此时,利用邻域算法进行模型参数反演的结果与真实值更为接近。

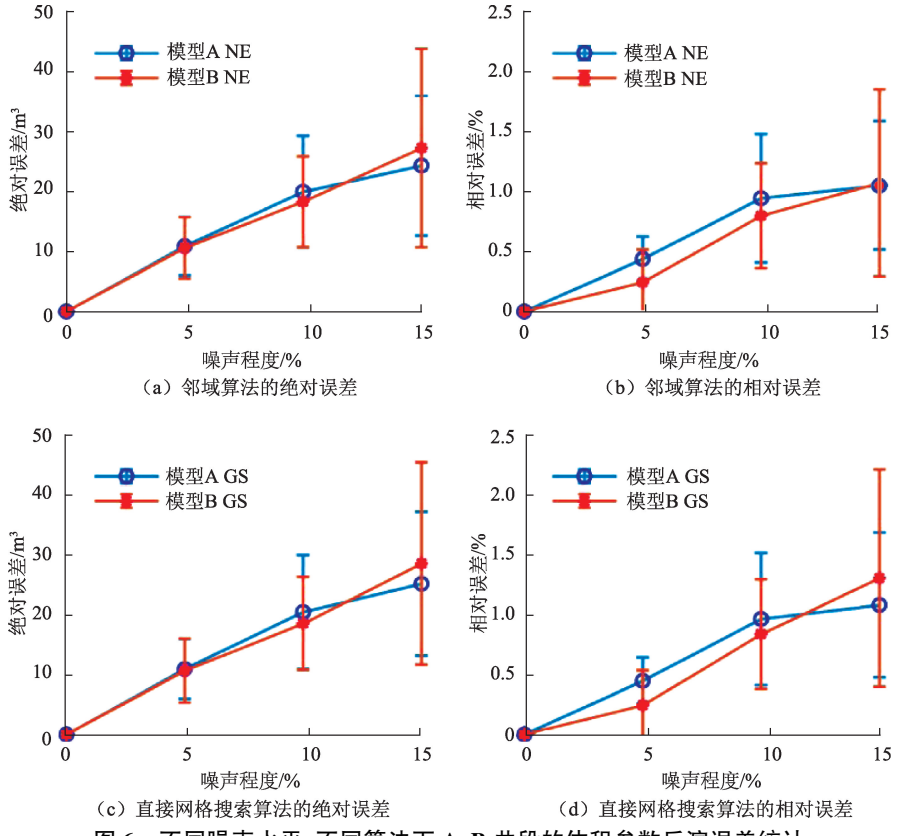


图 6　不同噪声水平、不同算法下 A、B 井段的体积参数反演误差统计

Fig. 6　Error statistics of volume parameters inversion results of A and B sections by different algorithms at different noise levels

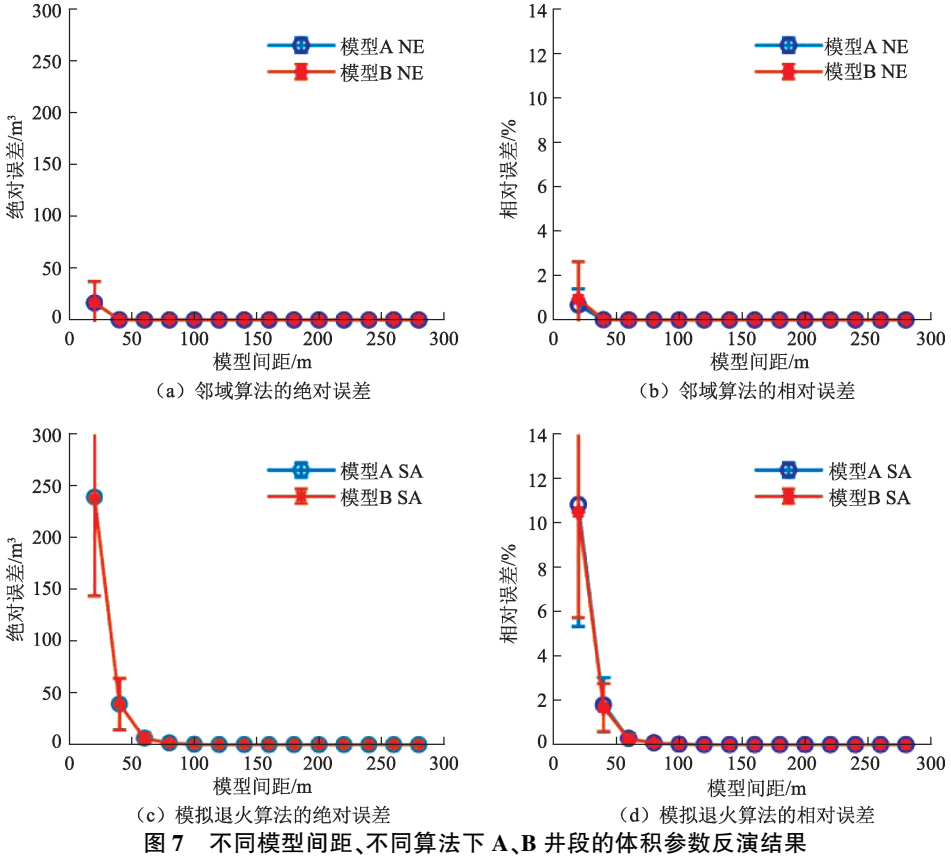
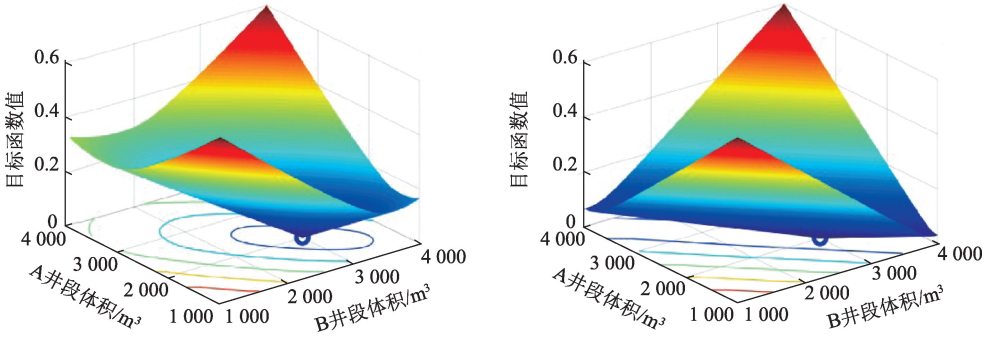


图 7　不同模型间距、不同算法下 A、B 井段的体积参数反演结果

Fig. 7　Volume parameters inversion results of A and B sections by different inversion algorithms at different model spacing

图 8 为不同模型间距时反演的目标函数分布。可以看到,反演的目标函数呈“单峰”状。当模型间距为 100 m 时,全局最优解落在相对较小的收敛区域内。此时,采用模拟退火法和邻域算法均可得到较好的反演效果。而当模型间距为 20 m 时,全局最优解所在的收敛区域相对较大。此时,随着迭代次数的增加,邻域算法可实现对目标区域更高精度的搜索。因此相比模拟退火法,邻域算法的反演结果更接近真实值。

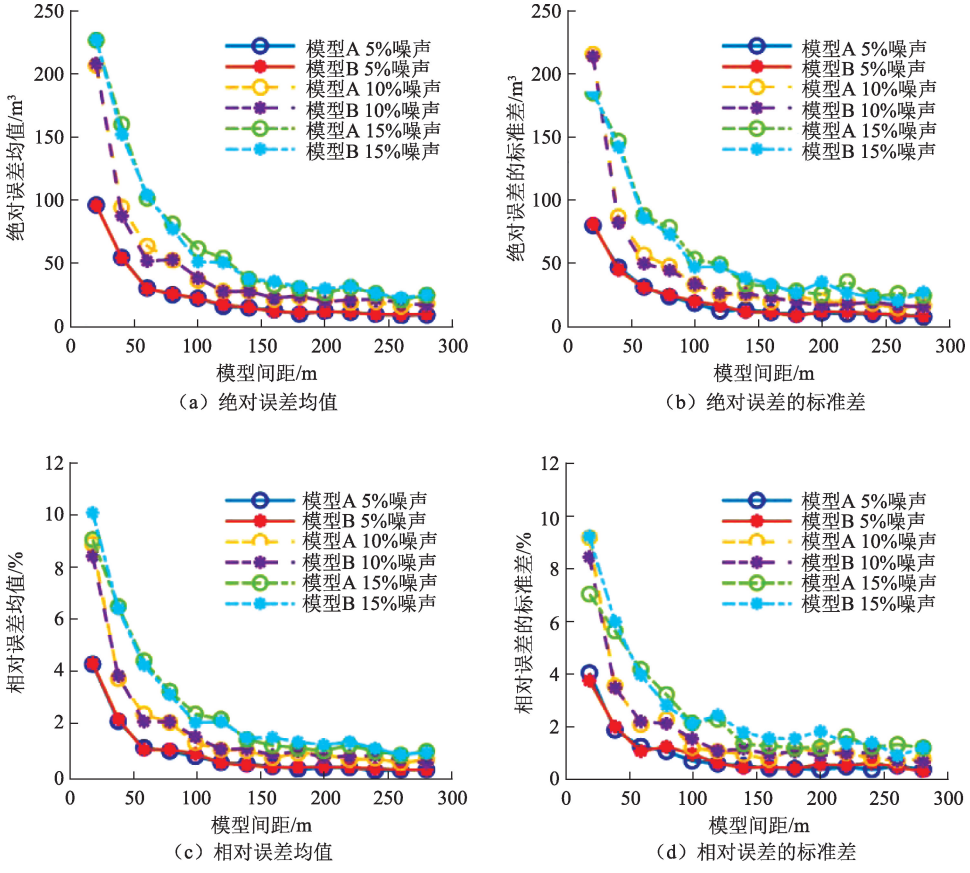
图 9 为不同噪声水平、不同模型间距下,利用邻域算法反演的 A、B 井段体积参数与真实值的误差统计。可以发现,反演误差随着噪声程度的增大而增大,随着模型间距的增大而减小,即反演误差与噪声程度呈正相关性,与模型间距呈负相关性。



(a) 模型间距100 m　　(b) 模型间距20 m

图 8　不同模型间距下反演目标函数对比

Fig. 8　Contrast diagram of inversion objective function at different model spacing



(a) 绝对误差均值　　(b) 绝对误差的标准差

(c) 相对误差均值　　(d) 相对误差的标准差

图 9　不同噪声水平、不同模型间距下 A、B 井段的体积参数反演误差统计

Fig. 9　Error statistics of volume parameters inversion results of A and B sections at different noise levels and different model spacing

当长度为 300 m 的水平井包含自西向东展布的 A、B、C 3 个井段时,等效模型中心坐标分别为(-100,0,-240)、(0,0,-240)和(100,0,-240),等效模型间距 100 m。此时对随机生成的 100 组体积参数在不同噪声水平下运用邻域算法进行反演,并统计分析反演结果(图 10)。同样可以发现,反演的体积误差随着噪声程度的增大而增大。相比 A 和 C 井段,中间井段 B 的误差均值与标准差都更大,这是由于 B 井段受到 A 和 C 井段的体积互补效应。

当水平井划分为 3 个井段时,在 10 ~ 140 m 的模型间距范围内取步长为 10 m。图 11 为无噪声条件下运用邻域算法对不同模型间距下的体积参数进行反演的结果误差统计。图 12 为不同噪声水平不同模型间距下,采用邻域算法所得体积参数的反演结果误差统计。同样可以发现,反演误差与噪声程度呈正相关性,与模型间距呈负相关性。由于体积的互补特性,中间井段的反演误差偏大。

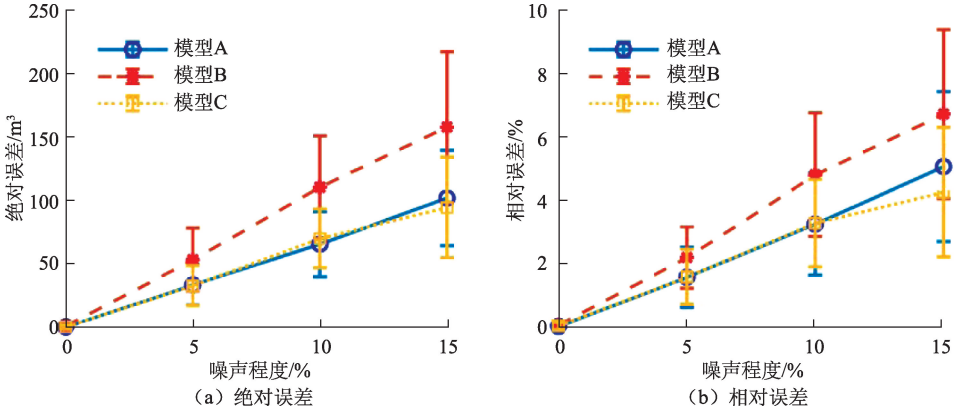


图 10　不同噪声水平下 A、B、C 井段的体积参数反演误差统计

Fig. 10　Error statistics of volume parameters inversion results in A, B and C sections at different noise levels

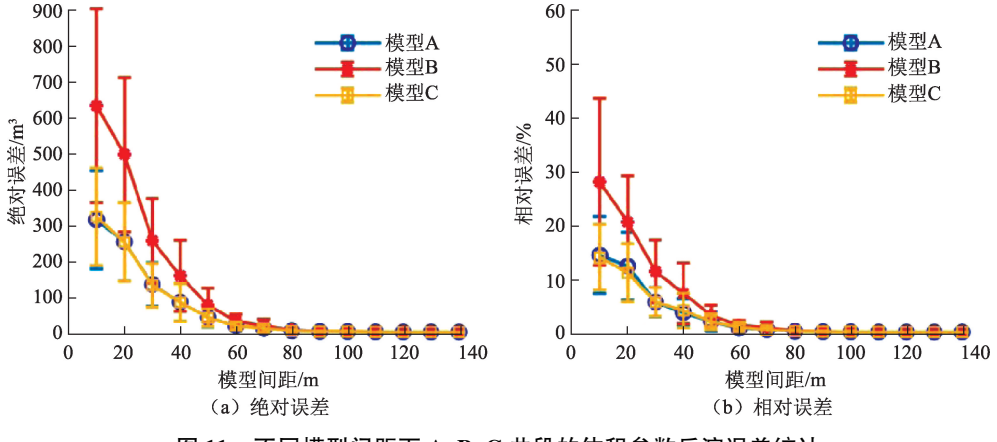


图 11　不同模型间距下 A、B、C 井段的体积参数反演误差统计

Fig. 11　Error statistics of volume parameters inversion results in A, B and C sections at different model spacing

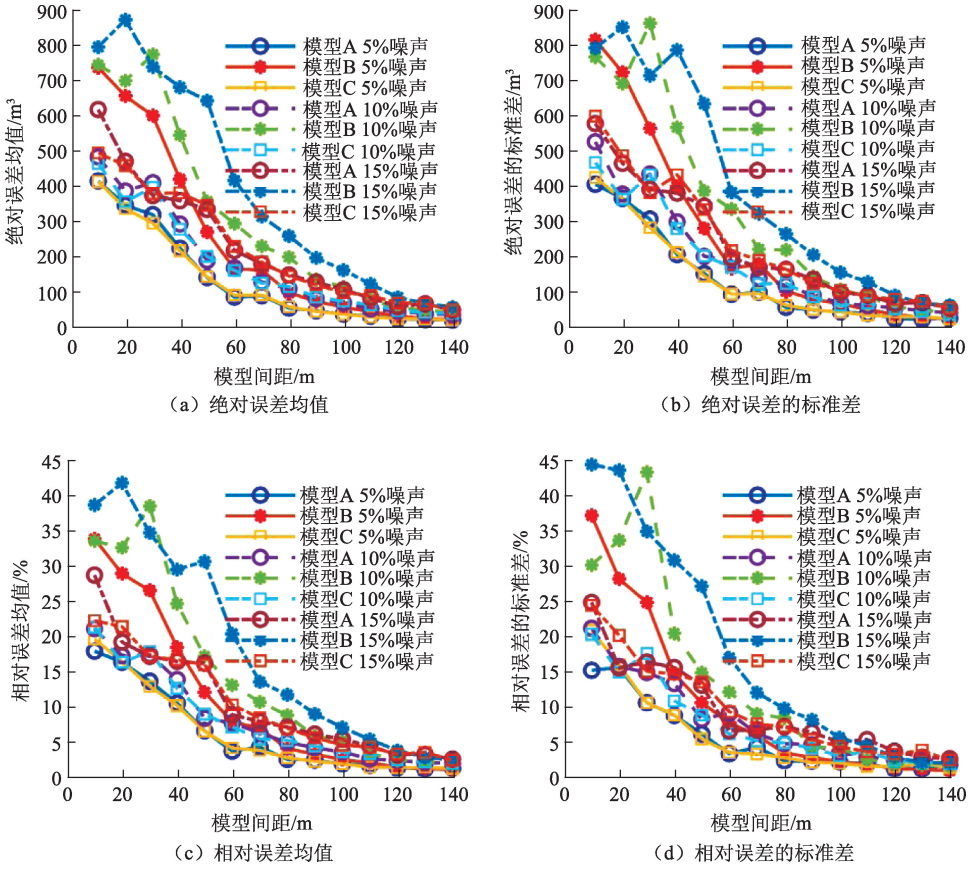


图 12　不同噪声水平不同模型间距下 A、B、C 井段反演的结果误差统计

Fig. 12　Error statistics of inversion results of A, B and C sections at different noise levels and different model spacing

3　结　论

(1)与直接网格搜索法相比,提出的方法在保证收敛效果的前提下计算效率更高,实时性更强;与模拟退火法相比,提出的方法在模型间距较小时,反演精度更高。

(2)通过提出的方法进行参数反演时,反演误差与噪声程度呈正相关性,与模型间距呈负相关性。

(3)当不同井段的产水和出砂量较小或占该段储层变化体积的比例一致时,提出的方法可为海域天然气水合物水平井产气量的动态评价提供算法基础。

参考文献:

[1] KVENVOLDEN K A. Gas hydrates—geological perspective and global change[J]. Reviews of Geophysics, 1996, 31(2):173-187.

[2] 董怀民,孙建孟,林振洲,等. 基于 CT 扫描的天然气水合物储层微观孔隙结构定量表征及特征分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2018,42(6):40-49.
DONG Huaimin, SUN Jianmeng, LIN Zhenzhou, et al. Quantitative characterization and characteristics analysis of microscopic pore structure in natural gas hydrate based on CT scanning[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2018,42(6):40-49.

[3] BOSWELL R, COLLETT T S. Current perspectives on gas hydrate resources[J]. Energy & Environmental Science, 2011,4(4):1206-1215.

[4] TOMARU H, FEHU U, LU Z, et al. Halogen systematics in the Mallik 5L-38 gas hydrate production research well, Northwest Territories, Canada: implications for the origin of gas hydrates under terrestrial permafrost conditions[J]. Applied Geochemistry, 2007,22(3):656-675.

[5] HUNTERR B, COLLETT T S, BOSWELL R, et al. Mount Elbert gas hydrate stratigraphic test well, Alaska North Slope: overview of scientific and technical program[J]. Marine & Petroleum Geology, 2011,28(2):295-310.

[6] YAMAMOTO K. Overview and introduction: pressure core-sampling and analyses in the 2012—2013 MH21 offshore test of gas production from methane hydrates in the eastern Nankai Trough[J]. Marine & Petroleum Geology, 2015,66:296-309.

[7] SU M, SHA Z, ZHANG C, et al. Types, characteristics and significances of migrating pathways of gas-bearing fluids in the shenhu area, Northern Continental Slope of the

South China Sea[J]. Acta Geologica Sinica, 2017,91(1):219-231.

[8] LI J F, YE J L, QIN X W, et al. The first offshore natural gas hydrate production test in South China Sea[J]. China Geology, 2018,1(1):5-16.

[9] KONNO Y, FUJII T, SATO A, et al. Key findings of the world's first offshore methane hydrate production test off the coast of Japan: toward future commercial production [J]. Energy & Fuels, 2017,31(3):2607-2616.

[10] SLOAN D E. Fundamental principles and applications of natural gas hydrates[J]. Nature (London), 2003,426(6964):353-363.

[11] 冯福平,黄芮,雷扬,等. 基于能量理论的体积压裂工程改造效果评价模型及应用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2019,43(1):81-89.
FENG Fuping, HUANG Rui, LEI Yang, et al. Evaluation of engineering effectiveness of volume fracturing based on energy conservation principles and its application[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2019,43(1):81-89.

[12] REN J, LIANG Z, REN S, et al. Multi-branched horizontal wells for coalbed methane production: field performance and well structure analysis[J]. International Journal of Coal Geology, 2014,131:52-64.

[13] LUO W, WANG X, LI F. Productivity of horizontal wells with segmental perforation[J]. Petroleum Exploration & Development, 2009,36(1):97-102.

[14] BLUMP A, SALEH B. Monitoring of fracture propagation by quartz tiltmeters [J]. Engineering Geology, 2005,79(1):33-42.

[15] STAUDIGEL H, WYATT F K, ORCUTT J O. Ocean bottom tiltmeter developed for submarine volcano monitoring[J]. Eos Transactions American Geophysical Union, 1991,72(27):289-295.

[16] WADGE G, HORSFALLJ A C, BRANDER J L. Tilt and strain monitoring of the 1974 eruption of Mount Etna [J]. Nature, 1975,254(5495):21-23.

[17] HE Y Y, ZHANG B P, DUAN Y T, et al. Numerical simulation of surface and downhole deformation induced by hydraulic fracturing[J]. Applied Geophysics, 2014,11(1):63-72.

[18] 何涛,卢海龙,林进清,等. 海域天然气水合物开发的地球物理监测[J]. 地学前缘,2017,24(5):368-382.
HE Tao, LU Hailong, LIN Jinqing, et al. Geophysical techniques of reservoir monitoring for marine gas hydrate exploitation[J]. Earth Science Frontiers, 2017,24(5):368-382.

[19] UIEDA L, BARBOSA V C F. Robust 3D gravity gradient inversion by planting anomalous densities[J]. Geophysics, 2012,77(4):G55-G66.

[20] 张洪亮,何川,谭玉阳,等. 基于模拟退火法的水力压裂裂缝参数反演[J]. 北京大学学报(自然科学版),2013,49(4):585-590.
ZHANG Hongliang, HE Chuan, TAN Yuyang, et al. Simulated annealing based inversion of hydraulic fracture parameters[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2013,49(4):585-590.

[21] 闫鑫,胡天跃,何怡原. 地表测斜仪在监测复杂水力裂缝中的应用[J]. 石油地球物理勘探,2016,51(3):480-486.
YAN Xin, HU Tianyue, HE Yiyuan. Application of surface tiltmeter in monitoring complicated hydraulic fractures[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2016,51(3):480-486.

[22] SAMBRIDGE M. Geophysical inversion with a neighbourhood algorithm—I: searching a parameter space [J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 2010,138(2):479-494.

[23] SAMBRIDGE M. Geophysical inversion with a neighbor hood algorithm—II: appraising the ensemble [J]. Translated World Seismology, 2010,138(3):727-746.

[24] OKADA Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1985,75(4):1135-1154.

[25] OKADA Y. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1992,82(2):1018-1040.

[26] 张鑫,张洪亮,周雷,等. 基于测斜仪的天然气水合物开采海底变形监测[J]. 北京大学学报(自然科学版),2019,55(4):635-642.
ZHANG Xin, ZHANG Hongliang, ZHOU Lei, et al. Seafloor deformation monitoring based on tiltmeters for natural gas hydrate production [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2019, 55(4):635-642.

(编辑　李志芬)