

TOUGH+HYDRATE 水合物模型参数敏感性分析

刘丽强¹, 徐 军¹, 李 雁², 夏 真³, 苏 钰⁴, 苏 洁¹

(1. 河海大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 中山大学 海洋学院, 广东 广州 510006; 3. 广州海洋地质调查局, 广东 广州 510075; 4. 南京大学 地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210046)

摘要: 运用国际上较为先进的水合物开采模拟软件 TOUGH+HYDRATE(T+H)对我国南海水合物藏竖井降压开采假设进行数值模拟, 采用 LH-OAT 全局敏感性分析方法, 对模型中 19 个普遍应用的水合物层参数进行了敏感性分析, 并对参数敏感性从重到轻进行了极敏感、敏感、一般敏感和不敏感 4 个水平的等级划分。研究表明: T+H 的参数敏感性随评价目标、时间和空间位置的不同而不同。对 CH₄ 气体累积产量有显著影响的参数有: Stone 指数(n)、固相渗透率缩减指数(PRE)、绝对渗透率(Permeabilities)、流体临界饱和度(CMPS)。随着模拟时间的增加, 参数对水合物饱和度的整体敏感度提高。在空间分布上, 随着与井壁水平距离的增加, 所有参数对水合物饱和度的敏感度降低。敏感参数的确定对提高模型的准确性有重大意义。在实际应用中要有针对性地调节参数, 以获得最优效果。

关键词: 天然气水合物; 数值模拟; TOUGH+HYDRATE(T+H)模型; LH-OAT 方法

中图分类号: P736

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2014)06-0052-08

doi: 10.11759/hyxx20130627002

天然气水合物是天然气分子固态化合物, 存在于由水分子形成的笼形晶体结构中, 在物理表现上与雪或冰相似, 特定的温压条件下才能维持稳定。在 0℃、26 个标准大气压条件下, 单位体积的甲烷水合物可分解为 164 个体积的天然气。20 世纪 70 年代, 在海洋沉积物地区和永久冻土地带发现了天然气水合物储层^[1], 潜在的天然气储备量超过 $1.5 \times 10^{16} \text{m}^3$, 估计是已知常规天然气和石油储备量的几倍, 可满足全球未来 1 000 a 的能源需求^[2-3]。近年来包括美国、加拿大、俄罗斯、印度和日本在内的许多国家政府对天然气的开发非常感兴趣, 在探索商业方法开采天然气方面已经做了相当大的努力^[4]。目前天然气水合物开采的方法主要有降压法、热激法和注化学剂法, 其中降压法是一种简单高效的开采方法, 在经济性和环境影响方面具有很大的优势^[5-6]。

由于水合物储层地质系统的复杂特性, 参数的测量非常困难^[7]。利用数值模拟方法可以对天然气水合物藏的开采潜力进行预测^[8], 特别是对认识开发过程中各因素的敏感性以及对水合物藏的产气量进行初步估计等都具有重要意义^[9]。TOUGH+HYDRATE(T+H)是美国劳伦斯-伯克利国家实验室(LBNL)在通用地下水渗流模拟软件(TOUGH V2.0)的基础上开发的模拟计算软件, 可模拟复杂地质体中水合物储层的非等温反应、相平衡以及流体和热的流动^[10]。与其他

地质模拟软件一样, T+H 使用大量的参数来描述水合物及其储层系统, 由于时空变异性、测量误差等, 许多参数的值并不能确切获得。为了使模拟和实际情况尽量吻合, 模型需要匹配优化其内部参数^[11], 敏感性分析方法旨在得到对输出结果影响较大的参数^[12], 并在今后的研究中重点分析这些参数, 这对建立准确模型和指导今后的研究工作都有重要意义^[13]。关于敏感性分析方法, 一般可分为局部分析法和全局分析法^[14], 局部分析法是关注局部参数对模型输出的影响, 全局分析法则检验多个属性对模型结果产生的总影响。国内外学者已经提出了很多局部敏感性分析方法, 而全局敏感性分析方法较少, 关于全局敏感性分析方法是一个研究趋势^[15]。水合物开采模型的参数敏感性分析研究方面, 李淑霞等人^[16]利用自编的数值模拟软件进行了水合物开采过程中的参数敏感性研究, 分析了渗透率、初始天然气水合

收稿日期: 2013-06-27; 修回日期: 2013-10-12

基金项目: 国家 127 专项(GZH201100311-01-04); 国家自然科学基金(41072182); 广东省科技计划(8151027501000008)

作者简介: 刘丽强(1988-), 女, 吉林敦化人, 硕士, 主要从事天然气水合物开采的数值模拟研究, E-mail: lirica_2013@126.com; 李雁, 通信作者, 中山大学海洋学院副教授, 博士, 主要从事污染物地下水运移机制、数值模拟方法及地下水污染控制与修复技术方面的研究, E-mail: eesly@mail.sysu.edu.cn

物饱和度及生产压力对开采效果的影响; Matthew 等^[17]运用 T+H 数值模拟软件分析了孔隙度、各向异性、井距等对气体生产的影响。本文应用 T+H 计算软件,以广州地质调查局在神狐海域 SH2、SH3 和 SH7 站位的钻探、测井数据为基础,建立实际水合物藏分层地质模型,模拟神狐海域水合物竖井降压开采过程,首次通过 LH-OAT 全局敏感性分析法对参数进行分析研究,识别出对模拟结果有重要影响的参数,帮助建模者确定调参方向,为建立准确模型和指导今后的研究工作奠定基础。

1 模型简介及研究区概况

T+H 模拟器包括水合物形成和分解过程中的平衡和动力学模型,模型中考虑四相(气、液、冰、水合物)、四组分(水合物、水、甲烷、盐等水溶性抑制剂)以及拟组分热焓,各组分存在于各相中^[10]。该模型通过求解质量和热平衡的耦合方程,可模拟非等温气体释放、各相特征、复杂地质介质中的液体和热流量以及地下天然气水合物藏的产出^[10]。模拟中要将模拟区域进行离散化,划分出的每一个子域都遵守 Pruess 等^[18]提出的质量和能量平衡方程:

$$\frac{d}{dt} \int_{v_n} M^k dv = \int_{s_n} F^k nds + \int_{v_n} q^k dv$$

其中, v 和 v_n 分别表示体积、子区域 n 的体积 $[m^3]$; M^k 表示组分 k 的质量累积比 $[kg/m^3]$; s_n 表示子区域 n 的表面积 $[m^2]$; F^k 表示组分 k 的达西通量 $[kg/(m^2 \cdot s)]$; q^k 表示组分 k 的源/汇项; t 表示时间。

模拟区域为南海神狐海域,位于西沙海槽与东沙群岛之间(图 1)。近年来广州海洋地质调查局在神狐海域进行了钻探取心研究,证明了 SH2、SH3 和 SH7 钻位沙泥沉积中甲烷水合物的存在,水合物饱和度高达 48%,研究区含天然气水合物的沉积层段位于海底以下 153~225m,厚度为 18~34m^[6]。

2 研究方法

2.1 水合物藏模型建立

将模拟区概化为半径 950 m, 厚 235 m 的圆柱体,从上至下分为三层,分别是上覆层、水合物层和下覆层,厚度分别为 195, 20, 20 m, 开采井井口半径 r_w 为 0.10 m, 穿上覆层和水合物层并深入下覆层 5 m 处(图 2)。水合物储层系统之上是 1 230 m 深、盐度 33.4

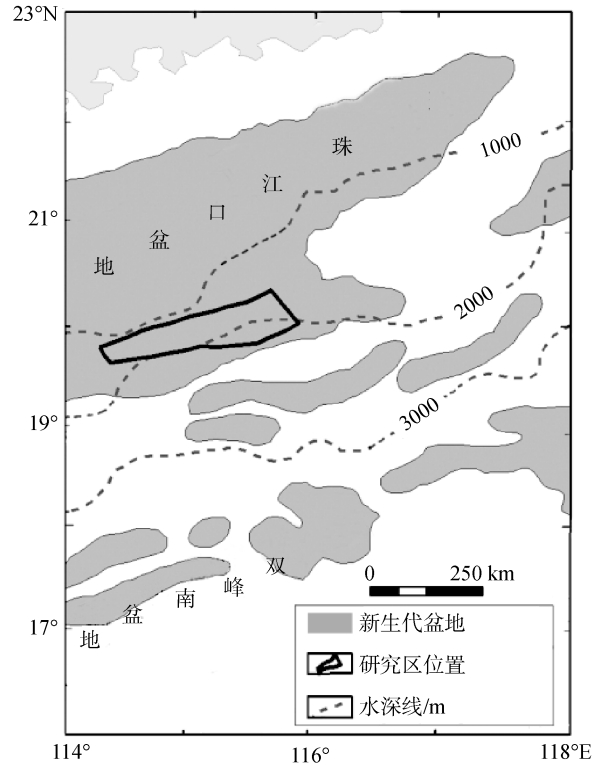


图 1 南海神狐海域地理位置

Fig.1 Location of Shenhu area, the South China Sea

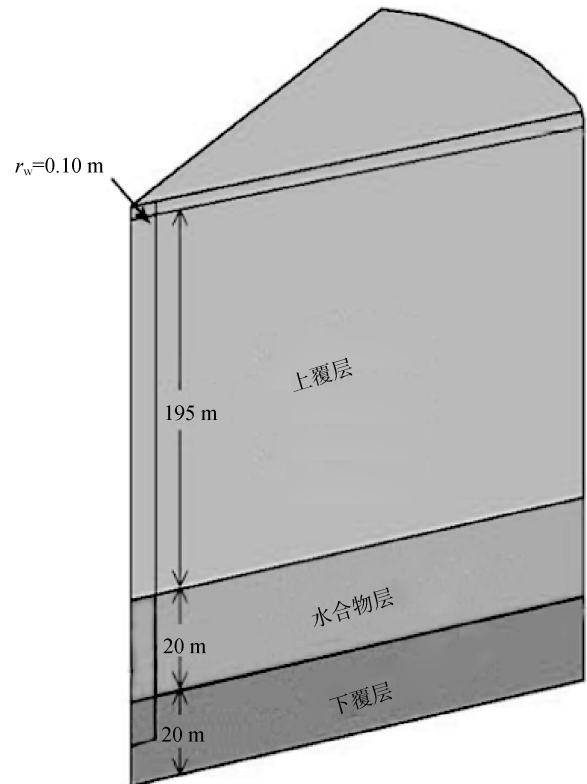


图 2 神狐水合物藏模型示意图

Fig. 2 A schematic depiction of Shenhu hydrate deposit

的海水,海水底部温度为 3.8℃,海底沉积物的平均温度梯度是 0.04℃/m,99%以上的天然气是甲烷,水合物饱和度的范围由 0 到 48%^[19]。

应用 Moridis 等^[10]研发的 Meshmaker 将模拟区划分为 112 行×117 列,共 13 104 个单元和 13 334 个单元连接(图 3),转化为 T+H 输入文件。定义开采井区域的第一列单元连接储气藏,以获得产出的天然气。水平方向前三列单元的长度分别是 0.001, 0.005 和 0.01 m,第四列至第八列单元的长度均为 0.05 m,从第 9 列到第 112 列单元的长度按对数比例增长;上覆层前两行单元的厚度分别为 0.001 m 和 2.999 m,该层其他单元厚度均为 3 m,在 20 m 厚的水合物层,所有单元的厚度均为 0.5 m;20 m 厚的下覆层,除了下边界被定义为 0.001 m,其余所有单元厚度都定义为 2.0 m。由于开采过程中,物质能量的变化主要集中在井口附近区域和水合物层,所以开采井附近和水合物层的网格划分较细密。

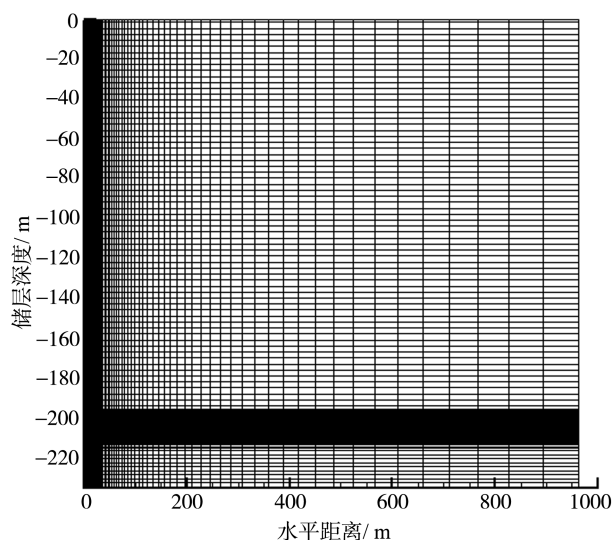


图 3 研究区部分模型网格系统

Fig.3 Mesh system of the study area in the cross-section

2.2 LH-OAT 敏感性分析方法介绍

敏感性分析中常用的 One-at-time (OAT)方法是 Morris 提出的局部分析向全局分析过渡的敏感性分析方法,每次只改变一个因素或变量,其他值保持不变。其优点是可以将输出结果的变化明确地归因于某一个特定输入参数值的变化,缺点是某一特定输入参数值的变化引起的输出结果敏感度大小依赖于模型其他参数值的选取,需要对许多输入参数值的矩阵进行重复计算^[20]。Latin-Hypercube (LH)采样

方法是 Monte Carlo 方法的替代法,需要大量的随机样本,将每个参数划分为 N 个间隔,其优点在于能够有效的计算^[21],但这种方法假定的是多元线性分析,不能对某个特定的参数进行敏感性分析^[22]。LH-OAT 敏感度分析方法结合了 OAT 设计和 LH 采样法^[23],每次模型运行的输出变化都可以清楚归结到输入参数的变化,从而保证参数敏感性分析的有效性^[24]。

LH-OAT 方法将每个参数划分为 N 个间隔,在一个区间范围内,同 OAT 方法一样,每改变一个参数, LH 样本点要改变 P 次。参数的敏感度 S_i 计算公式如下^[25]:

$$S_i = \frac{\sum_{j=1}^N |M(e_{1,j}, e_{2,j}, \dots, e_{i,j}(1+f_j), \dots, e_{p,j}) - M(e_{1,j}, e_{2,j}, \dots, e_{i,j}, \dots, e_{p,j})|}{N f_j M(e_{1,j}, e_{2,j}, \dots, e_{i,j}, \dots, e_{p,j})}$$

式中, e_i 为模型参数, M 为 T+H 模型目标函数, f_i 为参数 $e_{i,j}$ 变化产生的微小扰动, j 为 LH 的一个抽样点。LH-OAT 方法的计算次数由参数个数和参数间隔数决定,当有 P 个参数和 N 个间隔时,总共需要计算 $N(P+1)$ 次。在 LH-OAT 敏感性分析方法中,所用到的参数范围和描述见表 1,参数的取值范围来源于已发表的文献和 T+H 代码中的信息,部分参数值在文献中并没有相关介绍,以 T+H 代码中的默认值为准,在此基础上缩小和扩大 10%作为该值的取值范围^[26]。参数被划分为 6 个间隔,扰动 f_i 取值为 0.5%。

3 模型参数敏感性分析结果与讨论

运用 LH-OAT 方法将 T+H 模型的 19 个参数分成 6 层进行 LH 抽样,然后对抽样参数进行 OAT 分析运算。分别对模拟的两个目标函数(气体累积产量、水合物饱和度)、两个模拟时间(0.5, 1.5 d)和不同位置点(CD056, CD065, CM056)处的参数敏感度进行分析。

3.1 对气体累积产量的影响研究

用 LH-OAT 方法计算了 19 个参数对气体累积产量的敏感度,列出 7 个敏感度最高的参数及每次运算结果的标准差(表 2),其中 n 、PRE、Permeabilities、CMPS 对气体累积产量有显著影响。 n 在 Stone 方程中决定着液相相对渗透率的大小^[13], PRE 决定了固相系统中渗透率对孔隙度的影响^[10],即最为敏感的 4 个参数中有 3 个参数与渗透率有关,可见渗透率是影响天然气水合物累积产量的重要因素。

表 1 T+H 参数及其取值范围

Tab. 1 Parameters and the range of their values

参数	参数缩写	单位	最小值	最大值	数据来源
流体临界饱和度	CMPS	无量纲	0.005	0.500	文献[10]
Van Genuchten 指数	λ	无量纲	0.450	0.77437	文献[8, 26]
毛细管压力下的剩余水饱和度	CPSirA	无量纲	0.190	0.290	文献[10]
膨胀系数	Expansivity	无量纲	0.100	10	文献[10]
干多孔介质中的热导率	FHC	W/(m · °C)	0.500	1	文献[5, 10]
饱和湿多孔介质中的热导率	FHCfully	W/(m · °C)	2.900	3.10	文献[5, 19]
克林肯伯格参数	Klinpara	无量纲	3950	760000	文献[27]
Stone 指数	n	无量纲	2.587	10.762	文献[10]
初始毛细管压力	P_0	无量纲	5.0×10^3	1.0×10^5	文献[26, 28]
三轴绝对渗透率	Permeabilities	m ²	1.64×10^{-16}	8.85×10^{-11}	文献[29]
最大毛细管压力	$P_{\max}$	Pa	1.0×10^5	1.0×10^7	文献[10]
孔隙压缩系数	P compressibility	无量纲	1.0×10^{-6}	5.0×10^{-6}	文献[10]
孔隙度	Porosity	无量纲	0.33	0.48	文献[30]
固相渗透率缩减指数	PRE	无量纲	2	15	文献[6, 31]
岩石颗粒密度	RGD	kg/m ³	2650	2750	文献[32]
岩石颗粒比热	RGSH	J/(kg · °C)	600	1500	文献[32]
剩余水饱和度	SirA	无量纲	0.2	0.3	文献[10, 33]
剩余气体饱和度	SirG	无量纲	0.01	0.03	文献[10, 33]
曲折系数	Tortuosity	无量纲	3	6	文献[34]

表 2 T+H 模型中影响气体累积产量的主要参数敏感度

Table 2 Sensitivity values of the main parameters for cumulative gas production in T+H model

参数	各参数敏感度		各参数敏感度标准差	
	0.5 d	1.5 d	0.5 d	1.5 d
n	3.277	2.963	0.156	0.146
PRE	2.359	1.176	0.126	0.093
Permeabilities	2.047	2.573	0.057	0.039
CMPS	2.034	2.261	0.164	0.113
SirG	0.791	1.212	0.048	0.013
SirA	0.721	1.184	0.057	0.041
RGSH	0.463	0.572	0.034	0.024

参数总趋势是 1.5 d 的敏感度比 0.5 d 的敏感度高, 说明水合物开采初期, 随着时间的推移, 气体产量的变化量越来越大。而 n 和 PRE 则在第 1.5 天的时候敏感度有所下降。 n 、PRE、CMPS 的标准差较大(>0.1), 说明水合物开采过程中这些参数对气体产量的影响并没有一个稳定的趋势, 会随着其他参数的变化而变化^[25], 其余 4 个参数对产量影响的趋势较为稳定。

3.2 不同时间的对比研究

本文将参数对水合物饱和度的敏感度进行分级如表 3, 将敏感度从大到小划分为 1~28 个级别。敏

感度等级为 1 的参数为极敏感参数; 敏感度等级 2~6 的为敏感参数; 敏感度等级 7~28 的为一般敏感参数; 敏感度等级为 28 的则为不敏感参数, 对模型的输出结果没有影响^[22]。最后的“综合”列是参数在两个模拟时间的最高敏感度等级。

从上表可以看出, 0.5 d 时共有 5 个参数表现出极敏感和敏感特性: CMPS、 n 、Permeabilities、PRE、SirA; 而到 1.5 d 极敏感和敏感特性参数上升为 10 个, 这些参数是: CMPS、 λ 、CPSirA、 n 、Permeabilities、Pcompressibility、Porosity、PRE、RGD、SirA。结合图 5, 可见参数总体趋势是第 1.5 天的敏感度要高于第 0.5 天的, 其中 Permeabilities、Pcompressibility、

表 3 TOUGH+HYDRATE 模型参数敏感度分析结果

Tab.3 Sensitivity analysis results of parameters used in TOUGH+HYDRATE model

参数	水合物饱和度							
	CD056		CD065		CM056		综合	
	0.5 d	1.5 d	0.5 d	1.5 d	0.5 d	1.5 d	0.5 d	1.5 d
CMPS	5	2	14	7	5	2	5	2
λ	12	5	26	13	12	5	12	5
CPSirA	21	3	26	23	21	3	21	3
Expansivity	19	21	24	26	18	22	18	21
FHC	25	28	25	28	25	28	25	28
FHCfully	20	17	25	25	20	19	20	17
Klinpara	28	28	28	28	28	28	28	28
n	1	1	17	3	1	1	1	1
P_0	9	13	25	25	9	14	9	13
Permeabilities	5	1	20	14	5	1	5	1
$P_{\max}$	26	17	27	25	26	19	26	17
Pcompressibility	7	2	25	21	7	1	7	1
Porosity	16	1	26	20	15	1	15	1
PRE	3	3	11	7	3	3	3	3
RGD	12	8	24	23	12	6	12	6
RGSH	15	16	25	24	14	12	14	12
SirA	4	2	22	22	4	2	4	2
SirG	12	23	24	26	12	23	12	12
Tortuosity	13	21	24	26	14	21	13	21

Porosity 在 0.5 d 为不敏感参数, 在 1.5 d 时敏感度则大大提高, 表现为极敏感参数。说明水合物开采初期, 随着模拟时间的增长, 参数对水合物的敏感度整体提高。

然而也有个别参数表现出相反的趋势, 可观察到 Expansivity、FHC、 P_0 、Tortuosity 会随着模拟时间的增加, 敏感度下降。

此外还总结出对模型影响很小的参数如下: Expansivity、FHC、FHCfully、 $P_{\max}$ 、Tortuosity 对水合物分解的影响很小; Klinpara 参数对模型并不产生影响。

3.3 不同空间位置的对比研究

在水合物层, 我们选取了 3 个点处的输出结果进行分析, 点的分布示意图如图 4, 点 CD056(15, 10)、CD065(30, 10)位于水合物层的中部, 分别距井壁 15 和 30 m, 点 CM056(15, 15)距水合物层上边界 15 m, 位于水合物层的中下方, 水平方向距井壁 15 m。

参数在 3 个空间点处的水合物饱和度敏感度见图 5, 显然参数敏感度的总体趋势是距井壁 15 m 的参数敏感度明显高于距井壁 30 m 的敏感度。距井壁

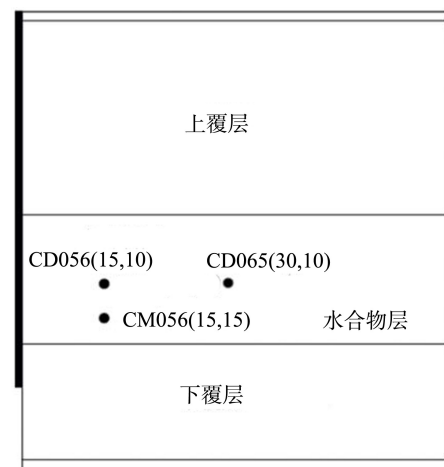


图 4 目标点的分布示意图

Fig. 4 Distribution of the target points

15 m 处水合物分解剧烈, 水合物饱和度变化明显, 有 4 个参数表现出极敏感特性: n 、Permeabilities、P compressibility、Porosity; 6 个参数表现为一般敏感性: CMPS、 λ 、CPSirA、PRE、RGD、SirA; 还有一个不敏感参数: Klinpara 参数。

30 m 处只有参数 n 表现出敏感特性, 其余参数

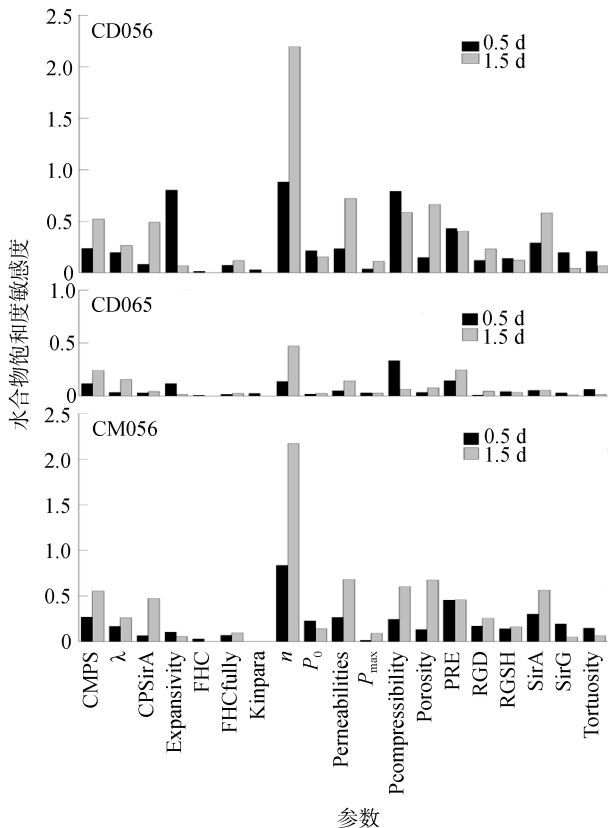


图5 参数敏感度的时空分布

Fig. 5 The spatial and temporal distribution of parameter sensitivity values

为一般敏感或不敏感。此外，水合物层中下部的点CM056(15, 15)与中部点CD056(15, 10)的敏感度几乎接近，并没有明显变化，两个点与井壁的水平距离相等，说明当与井壁水平距离相同时，不同空间点处的参数敏感度则没有明显的变化。在1.5 d的模拟时间内，水合物的分解主要集中在井口附近区域，随着与井壁水平距离的增加，所有参数对水合物饱和度的敏感度降低。

4 结论

1) LH-OAT方法简单，运算次数少，能够对模型参数敏感性进行详尽分析，适用于T+H模型参数敏感性分析，其对模型参数推求，减小模型不确定性的影响，对提高模型模拟精度等工作有指导意义。

2) 基于T+H模型，对南海水合物藏竖井降压开采假设进行了数值模拟，对模型中普遍应用的19个水合物层参数进行了敏感度计算，并对参数从重到轻进行了极敏感、敏感、一般敏感和不敏感4个水平的等级划分。

3) 敏感性分析表明：T+H模型参数敏感性不是一成不变的，受模型评价目标、选取时间点及空间点的影响。 n 、PRE、Permeabilities、CMPS是影响气体累积开采量最为关键的参数。而对参数敏感性的时空分布分析表明：水合物开采初期，随着模拟时间的增加，参数对水合物饱和度的整体敏感度提高；随着与井壁水平距离的增加，所有参数对水合物饱和度的敏感度降低。

4) 敏感参数的判明将为建立准确模型，在开采过程中获得最佳产量提供直接依据。需要指出的是，本研究以南海神狐海域实验区开采假设为例，使用LH-OAT全局敏感性分析方法分析T+H模型的水合物层参数。在实际应用中需要根据模型的应用目的、研究区特性等有针对性地调节参数，以期获得最优的效果。本文所提出的方法和思路可以提供借鉴。

参考文献:

- [1] Sloan Jr E D, Koh C. Clathrate hydrates of natural gases[M]. Florida: CRC press, 2007: 10-15.
- [2] Makogon Y F, Holditch S A, Makogon T Y. Natural gas-hydrates-A potential energy source for the 21st Century[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2007, 56(1): 14-31.
- [3] Demirbas A. Methane-Gas Hydrate[M]. New York: Springer, 2010: 113-114.
- [4] Englezos P, Kalogerakis N, Bishnoi R P. A systematic approach for the efficient estimation of interaction parameters in equations of state using binary VLE data[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 1993, 71(2): 322-326.
- [5] 李小森, 陈琦, 李刚, 等. 海底水合物矿藏降压开采与甲烷气体扩散过程的数值模拟[J]. 现代地质, 2010, 24(3): 598-606.
- [6] 吴能友, 张海敏, 杨胜雄, 等. 南海神狐海域天然气水合物成藏系统初探[J]. 天然气工业, 2007, 27(9): 1-6.
- [7] Collett T S. Energy resource potential of natural gas hydrates[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1971-1992.
- [8] 李刚, 李小森. 单井热吞吐开采南海神狐海域天然气水合物数值模拟[J]. 化工学报, 2011, 62, (2): 458-468.
- [9] 胡立堂, 张可霓, 高童. 南海神狐海域天然气水合物

- 注热降压开采数值模拟研究[J].现代地质, 2011, 25(4): 675-681.
- [10] Moridis G J, Kowalsky M B, Pruess K. TOUGH+HYDRATE v1. 0 user's manual: a code for the simulation of system behavior in hydrate-bearing geologic media[R].Berkeley: LawrenceBerkeley National Laboratory, 2008.
- [11] Holvoet K, Van Griensven A, Seuntjens P, et al. Sensitivity analysis for hydrology and pesticide supply towards the river in SWAT[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2005, 30(8): 518-526.
- [12] Spear R C, Hornberger G M. Eutrophication in Peel Inlet—II. Identification of critical uncertainties via generalized sensitivity analysis[J]. Water Research, 1980, 14(1): 43-49.
- [13] Hamby D M. A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 1994, 32, 2: 135-154.
- [14] Saltelli A, Chan K, Scott E M. Sensitivity Analysis [M]. New York: Wiley, 2000.
- [15] 蔡毅, 邢岩, 胡丹. 敏感性分析综述[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2008, 44(1): 9-16.
- [16] 李淑霞, 陈月明, 杜庆军. 天然气水合物开采数值模拟的参数敏感性分析[J]. 现代地质, 2005, 19(1): 108-112.
- [17] Reagan M, Moridis G, Zhang K. Sensitivity analysis of gas production from class 2 and class 3 hydrate deposits [R]. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2008.
- [18] Pruess K, Moridis G J, Oldenburg C. TOUGH2 user's guide, version 2.0[M]. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 1999.
- [19] 李刚, 李小森, 陈琦, 等. 南海神狐海域天然气水合物开采数值模拟[J]. 化学学报, 2010, 68(11): 1083-1092.
- [20] 田雨, 雷晓辉, 蒋云忠, 等. 水文模型参数敏感性分析方法研究评述[J]. 水文, 2010, 4: 9-12.
- [21] Vandenbergh V, Van Griensven A, Bauwens W. Sensitivity analysis and calibration of the parameters of ESWAT: application to the river Dender[J]. Water Science & Technology, 2001, 43(7): 295-301.
- [22] Van Griensven A, Meixner T, Grunwald S, et al. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models [J]. Journal of Hydrology, 2006, 324(1): 10-23.
- [23] Holvoet K, Van Griensven A, Seuntjens P, et al. Sensitivity analysis for hydrology and pesticide supply towards the river in SWAT[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2005, 30(8): 518-526.
- [24] 徐会军, 陈洋波, 李昼阳, 等. 基于 LH-OAT 分布式水文模型参数敏感性分析[J]. 人民长江, 2012, 43(7): 19-23.
- [25] Jung Y W, Oh D S, Kim M, et al. Calibration of LEACHN model using LH-OAT sensitivity analysis[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2010, 87(2): 261-275.
- [26] Moridis G J. Evaluation of a deposit in the vicinity of the PUB L-106 Site, North Slope, Alaska, for a potential long-term test of gas production from hydrates[R]. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2010.
- [27] Wu Yushu, Pruess K. Gas flow in porous media with Klinkenberg effects[J]. Transport in Porous Media, 1998, 32(1): 117-137.
- [28] Moridis G J, Reagan M T. Strategies for gas production from oceanic Class 3 hydrate accumulations[R]. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2007.
- [29] Freeze R A, Cherry J A. Groundwater[M]. London: Prentice-Hall, 1979: 28-30.
- [30] Li Gang, Moridis G J, Zhang Keni, et al. Evaluation of gas production potential from marine gas hydrate deposits in Shenhu area of South China Sea[J]. Energy & Fuels, 2010, 24(11): 6018-6033.
- [31] Kumar A, Maini B, Bishnoi P R, et al. Experimental determination of permeability in the presence of hydrates and its effect on the dissociation characteristics of gas hydrates in porous media[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2010, 70(1): 114-122.
- [32] Waples D W, Waples J S. A review and evaluation of specific heat capacities of rocks, minerals, and subsurface fluids. part 1: minerals and nonporous rocks[J]. Natural

Resources Research, 2004, 13(2): 97-122.

- [33] Su Zheng, He Yong, Wu Nengyou, et al. Evaluation on gas production potential from laminar hydrate deposits in Shenhu Area of South China Sea through depressurization using vertical wells[J]. Journal of Petroleum

Science and Engineering, 2012, 86: 87-98.

- [34] Iwata M, Hikosaka T, Morita M, et al. Performance analysis of planar-type unit SOFC considering current and temperature distributions[J]. Solid State Ionics, 2000, 132(3): 297-308.

Parameters sensitivity analysis of TOUGH+HYDRATE model

LIU Li-qiang¹, XU Jun¹, LI Yan², XIA Zhen³, SU Yu⁴, SU Jie¹

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. School of Marine Sciences, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510006, China; 3. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China; 4. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210046, China)

Received: Jun., 27, 2013

Key words: gas hydrate; numerical simulation; TOUGH+HYDRATE (T+H) model; LH-OAT method

Abstract: TOUGH+HYDRATE(T+H) is one of advanced softwares widely used in the simulation of the hydrate production. In this paper, T+H is employed to simulate the hydrate dissociation and gas production process in the South China Sea with the vertical well depressurization. Based on the simulation, the LH-OAT method is used to analysis the sensitivity values of 19 parameters used in the model, and the parameters were ranked to 4 levels including extremely sensitive, sensitive, general sensitive and non-sensitive under different conditions. The results indicate that the parameter sensitivity is not immutable. It can be influenced by different evaluation objects, simulation time, and different space positions. The stone equation index(n), permeability reduction exponent for solid phase bearing system(PRE), absolute permeabilities along the three principal axes(Permeabilities) and critical mobile phase saturation(CMPS) were key parameters which affected the CH₄ gas cumulative production. The general trend of parameter sensitivity for the hydrate saturation enhanced over simulation time, and the sensitivity decreased along with the increase of distance from the wellbore. The determination of sensitive parameters is very important to improve the accuracy of the model. In practical application, the parameters should be adjusted under different conditions in order to obtain optimal effect.

(本文编辑: 刘珊珊 李晓燕)