

何丽娟, 雷兴林, 张 毅. 南海北部神狐海域天然气水合物形成聚集的数值模拟研究. 地球物理学报, 2011, 54(5): 1285~1292, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.05.017

He L J, Lei X L, Zhang Y. Numerical modeling of gas hydrate accumulation in the marine sediments of Shenhu Area, Northern South China Sea. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(5): 1285~1292, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.05.017

南海北部神狐海域天然气水合物形成 聚集的数值模拟研究

何丽娟¹, 雷兴林², 张 毅¹

1 中国科学院地质与地球物理研究所 中国科学院油气资源研究重点实验室, 北京 100029

2 日本产业技术综合研究所, 筑波 305-8567

摘 要 利用 2D 数值方法对南海北部陆坡神狐海域水合物形成聚集过程进行了模拟, 对气烟囱、泥底辟与水合物成藏间的关系进行研究. 模拟结果表明, 来自深部的甲烷热解气在向上运移过程中以垂向运动为主, 且局限在某一狭窄的范围内, 故在地震剖面上显示为气烟囱及顶部 BSR. 只有当其越过水合物稳定带底界, 才能形成水合物, 此时 BSR 等于水合物稳定带底界. 而一旦水合物形成, 该地层即成为封堵层, 从而阻止甲烷继续向上运移. 因此, 水合物仅仅在水合物稳定带底界上方很薄的一层, 饱和度却可以很高. 此后如果深部气源停止供气, 那么气烟囱会逐渐消失, 只留下水合物存在. 因此, 气烟囱的存在并不一定对应着水合物存在. 另外, 模拟结果还显示, 断裂流体活动(泥底辟)对水合物形成并不十分有利. 来自深部的甲烷流量与流体流量之间的匹配很重要, 在甲烷流量一定的情况下, 流体流量越大, 越不容易形成水合物.

关键词 天然气水合物, 数值模拟, 神狐海域, 气烟囱

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.05.017

中图分类号 P314

收稿日期 2010-08-26, 2011-04-07 收修定稿

Numerical modeling of gas hydrate accumulation in the marine sediments of Shenhu Area, Northern South China Sea

HE Li-Juan¹, LEI Xing-Lin², ZHANG Yi¹

1 Key Laboratory of Petroleum Resources Research, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2 National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tsukuba City, Ibaraki-ken, 305-8567, Japan

Abstract Shenhu is located in the middle of northern South China Sea. The bottom simulating reflector (BSR) exists widely in the area, and the strong BSR appears mostly in the diapiric structure or at the top of gas chimney. Drilling showed that gas hydrate was only distributed in the upper 10~25 m range above the bottom of hydrate stability zone (BHSZ), but with the maximum saturation of up to 48%. We designed a 2D numerical model to simulate the formation and accumulation in the marine sediments, aiming to understand this unique feature of gas hydrate, as well as to study the relationship between gas chimneys, mud diapirism and gas hydrate reservoir. Modeling results indicate that the methane from deep moves upward vertically

基金项目 国家自然科学基金项目(40774033)资助.

作者简介 何丽娟, 女, 1968 年生, 博士. 中国科学院地质与地球物理研究所研究员, 1996 年毕业于中国科学院地质研究所, 现主要从事地热学、盆地模拟、天然气水合物数值模拟等方面的研究. E-mail: ljhe@mail.iggcas.ac.cn

and is confined to a rather narrow range, which is shown as gas chimney in the seismic section and BSR at its top. During the process of slow movement of gas, the BSR (top of gas chimney) is always lower than the BHSZ controlled by temperature and pressure. Unless it crosses the BHSZ hydrate cannot form. In case the hydrate forms, the stratum becomes a sealing layer, thereby preventing the continued migration of methane. Consequently, the hydrate only forms within a very thin layer above the BHSZ, but the saturation can be very high. After that, if the gas supply from deep stops, the gas chimney will gradually disappear, leaving only the hydrate. So, the existence of gas chimney does not necessarily correspond to hydrate. In addition, the modeling results also show that the fracture fluid activity (diapir) is not always favorable to the hydrate formation. If the fluid flow from deep is very large, all the methane may dissolve in fluid once produced, and is taken away. Thus, no free gas and hydrate is able to form. Only when the methane flow matches the fluid flow can the hydrate form. Therefore, the larger the fluid flow, the more difficult to form hydrate.

Keywords Gas hydrate, Numerical modeling, Shenhu area, Gas chimney

1 引言

天然气水合物是在高压低温环境下由甲烷等低分子量气体与水分子结合形成的固态物质,主要存在于陆地永久冻土带和水深超过 300 m 的海洋沉积物中. 它作为一种具有前景的新型能源, 相关研究直接关系到我国经济、社会的可持续发展, 战略意义重大, 也是世界科学研究的前沿之一. 近年来, 我国大力开展在南海海域天然气水合物勘查评价工作, 并发现了天然气水合物存在的地质^[1]、地球物理^[2~4]、地球化学^[5~7]等多种证据, 显示出良好的矿藏前景^[8]. 2007 年 4~6 月, 中国地质调查局首次组织实施了南海天然气水合物钻探工程, 在神狐海域八个钻孔进行钻探, 其中三个钻孔中取得了天然气水合物实物样品. 但是我国海域天然气水合物诸多方面的研究仍面临着巨大的挑战, 尤其对海洋沉积物中天然气水合物形成机理认识不够深入, 关于水合物的气源与成藏模式还有不同认识^[4, 9~11].

海洋沉积物中天然气水合物的形成与海洋的生物—物理—化学环境、沉积过程、温压条件和孔隙流体流动等众多因素有关. 数值模拟技术是研究海洋沉积物中天然气水合物形成聚集过程的重要手段. 近十几年来, 国际上逐步在开展相关数值模拟研究, 取得了长足的发展^[12~20]. 在我们已有数值模型^[19]基础之上, 雷兴林开发了“孔隙道(Kongxi_Tao)”软件(<http://staff.aist.go.jp/xinglin-lei/> [2010-07-12]). 该软件平台具有细致的界面和多样化的可视化功能. 现已集成了孔隙介质物性模型分

析模块、时间序列统计分析模块、AE/微震活动分析模块、热与流体相互耦合的多成分多相流计算模块等. 在多相流和水合物相转换计算上, 嵌入了 LBNL 开发的 TOUGH+HYDRATE V1.0 程序^[21].

本文利用该软件对神狐海域海洋沉积物中天然气水合物形成聚集过程进行数值模拟, 拟解决以下几个方面的问题. 首先, 地震勘探显示似海底反射层(BSR)广泛存在于神狐海域的海底滑坡区, 强振幅的 BSR 大多位于泥底辟或气烟囱构造的顶部. 那么, 这些泥底辟或气烟囱构造的顶部是否一定存在水合物? 什么情况下会形成水合物? 第二, 尽管理论上水合物稳定带厚达几百米, 为何勘探表明水合物只有薄薄的一层? 第三, 钻探结果揭示水合物最大饱和度达到 25%~48%, 而国际上传统理论认为扩散型水合物饱和度一般 < 7%, 神狐海域水合物的成藏机制是什么?

2 地质概况与热流背景

神狐海域位于南海北部陆坡中段, 即西沙海槽与东沙群岛之间海域, 构造上位于北部最大的含油气盆地(珠江口盆地)珠二坳陷的白云凹陷(图 1). 白云凹陷天然气资源丰富, 2006 年实施的 LW3-1-1 井钻探获得天然气的重大突破, 初步估算天然气资源超过 1000 亿立方米^[11, 22]. 区内水深 1000~3000 m, 是南海北部陆坡和中央海盆的过渡带. 新生代沉积厚度达 1000~7000 m, 有机碳含量 0.46%~1.9%. 中中新世以来, 研究区整体进入构造沉降阶段, 沉积了以海相沉积为主导的区域性沉积层, 形成了良

好的天然气水合物成藏地质条件^[10].

神狐海域断裂极其发育. 新生代断层从下到上越来越发育, 古近纪底部断裂主要发育在现代凸起和凹陷边界, 实际上将古近系分割成多个孤立箕状断陷, 是裂谷断陷期沉积的主控因素. 这些基底断裂在裂后热沉降过程中, 断裂作用不断加强, 特别是 1.5~2 Ma 出现断裂活动高峰, 派生出许多羽状排列的北西西及近东西向断裂. 因此, 神狐海域是南海北部新构造运动最活跃的地区之一. 新构造运动改造、形成了大量的晚期构造圈闭, 同时诱发了较

深部海相超压泥质岩类的塑性流动, 形成了规模巨大的泥底辟活动带^[10].

神狐海域热流背景较高. 近年来为配合水合物勘探在南海北部陆缘进行了大量的热流测量工作^[23, 24]. 截至目前南海北部陆缘共有热流数据 433 个, 变化范围在 25~120 mW/m²(图 1), 其中神狐研究区热流变化在 60~100 mW/m². 而在钻井井位所在区域热流大概为 65~80 mW/m², 其中发现天然气水合物的三口井(SH-2、SH-3 和 SH-7)所在的位置热流大概在 65~70 mW/m², 明显低于未探

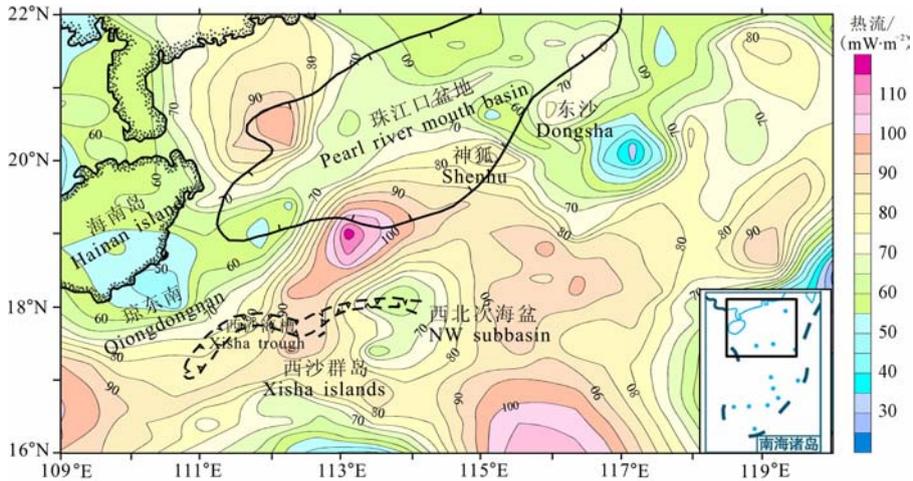


图 1 南海北部陆缘热流等值线图及神狐海域的位置

Fig. 1 Heat flow contour of the northern South China Sea and the location of Shenhu

测到天然气水合物的地区^[25].

3 BSR 与水合物稳定带底界

BSR 一般被指示为水合物稳定带的底界. 自 1999 年以来, 我国采用高分辨率多道地震勘探技术在南海北部深水盆地区开展了天然气水合物资源调查工作, 先后在神狐等海域发现了特征清晰的 BSR. 这些 BSR 具有或强或弱的振幅, 仅在局部地区出现与地层斜交的现象. 强振幅的 BSR 大多位于泥底辟或气烟囱构造的顶部(图 2). 弱 BSR 被认为可能是水合物下方的游离气含量过低所致. 在神狐海域 BSR 一般在海底以下 230~640 m.

然而, 基于实测热流数据进行的温、压条件研究表明, 神狐海域水合物稳定带底界在 148~518 mbsf 左右^[26], 与 BSR 相比, 普遍要浅一些. 但在神狐北部地区情况有所不同. 该地区能与地震测线匹配的热流测站有 19 个, BSR 深度从 92 mbsf 到 259 mbsf, 计算所得的水合物稳定带底界深度为

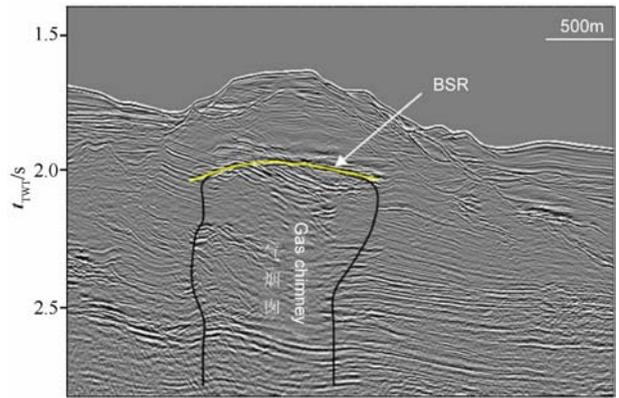


图 2 气烟囱构造顶部的强 BSR (引自文献^[41])

Fig. 2 Strong BSR above the gas chimney (from Ref. ^[41])

99~240 mbsf, 二者基本一致^[26].

2007 年 4~6 月, 中国地质调查局首次组织实施了南海天然气水合物钻探工程, 在神狐北部进行钻探, 并在大致位于 1200 m 水深的 SH-2、SH-3 和 SH-7 三个钻孔中取得了天然气水合物实物样品. 钻获的天然气水合物样品以分散方式或以胶结方式充

填在泥质沉积物孔隙中. 天然气水合物的气体组成为甲烷, 其含量 99.7%, 且不含 CO_2 , 其中 SH_2 钻位含天然气水合物的沉积厚度为 18 m, 天然气水合物饱和度平均为 20%, 最高达 48%^[4, 27].

4 模型

本文利用二维数值方法, 通过求解动量、流体物质、能量和质量守恒等非线性耦合方程来模拟天然气水合物在海洋沉积物中的形成聚集过程(详见文献[19]). 在多相流和水合物相转换计算上, 嵌入了 LBNL 开发的 TOUGH+HYDRATE V1.0 程序^[21]. 为研究神狐海域天然气水合物成藏机制, 我们设计了以下几个模型.

4.1 气烟囱模型

该模型不考虑沉积物原位生物生成气, 只考虑来自深部的热解气, 为消除水平方向边界效应, 模型长取为 20 km, 厚 800 m, 水深 1250 m. 模型网格大小为 20m~10 m, 自动时间步长. 模型上边界(海底)温度为 3.4 °C^[28], 甲烷浓度为 $10^{-8} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 边界热流为 70 mW/m². 在模型底部中间设置一气源区, 宽 60 m, 甲烷流量为 $1.585 \times 10^{-10} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[29]. 各成份的热力学参数均随温度压力而变化(详见文献[21]). 沉积物初始孔隙度为 0.4, 水合物的形成将减小有效孔隙率. 渗透系数为有效孔隙率的函数, 初始渗透系数为 $1.0 \times 10^{-16} \text{ m}^2$. 另外水合物的分解形成在平衡条件下进行.

模拟结果(图 3)显示, 甲烷的运动以垂向为主, 横向运移并不明显. 尽管模型中沉积物是均匀的, 甲烷的运动却基本上局限在 60 m 宽的范围. 好像在气源区的上方出现一 60 m 宽的通道. 该“假通道”一直向上通至水合物稳定带底界(这里约是 240 mbsf). 甲烷在沿“假通道”向上运移时, 一部分溶解在水中, 而另一部分以游离气的形式存在. 游离气基本上只出现在“假通道”内, 而溶解在水中的甲烷范围在对流与扩散作用下略宽于“假通道”. 正是由于游离气的存在, 该“假通道”在地震剖面上显示为气烟囱, 并在其顶部形成 BSR.

当甲烷气越过水合物稳定带底界而进入水合物稳定带范围内时, 开始形成水合物. 只有在此时, BSR 等于由温压条件决定的水合物稳定带底界. 而在此之前, BSR 始终是深于水合物稳定带底界. 一旦水合物开始形成, 沉积物的渗透系数迅速变小(图 4), 该地层即成为封堵层, 从而阻止甲烷继续向

上运移. 因此, 尽管水合物稳定带范围有几百米, 实际上水合物却只能在稳定带底界上方形成很薄的一层, 但水合物饱和度却可超过 40%.

当水合物封堵层在气烟囱上方形成以后, 甲烷开始向两边运移. 只要底部气源一直存在, 水合物层可以不断地向两边扩展, 形成薄而宽的水合物带(图 3i). 如果由于某种原因, 气源停止向上供应甲烷, 那么水合物的形成停止, 却可长期地保留此处(不考虑温压条件的改变). 而气烟囱内的气体则会在对流与扩散作用下慢慢溶解扩散掉, 这可解释为何在某些情况下只有水合物而没有气烟囱.

在该模型中, 气源深度在 800 m, 形成完整气烟囱并伴有顶部水合物形成的时间至少是 $3.6 \sim 10^5 \text{ yr}$. 如果气源深度更深的话, 需要的时间会更长. 如果气烟囱时代很新, 甲烷气尚未越过水合物稳定带底界, 那么在地震剖面上仅能观测到气烟囱和 BSR, 却无水合物存在. 此时 BSR 的深度要深于水合物稳定带的底界. 只有当 BSR 等于水合物稳定带底界时, 水合物才有可能存在. 因此, 必须将气烟囱/BSR 与温压条件结合起来, 才能更好地判别气烟囱和水合物的关系.

4.2 断裂(泥底辟)模型

仍然利用上述模型, 只是在模型中间设置一垂直断裂, 断裂宽 100 m, 断裂内部渗透系数为 $1.0 \times 10^{-14} \text{ m}^2$, 是其外部地层渗透系数的 100 倍. 断裂底部甲烷与流体的流量分别为 $1.585 \times 10^{-10} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $5.0 \times 10^{-8} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. 模拟结果(图 5)显示, 尽管在该模型中设置的气源甲烷流量和气烟囱模型中的大小一致, 却无法象气烟囱模型

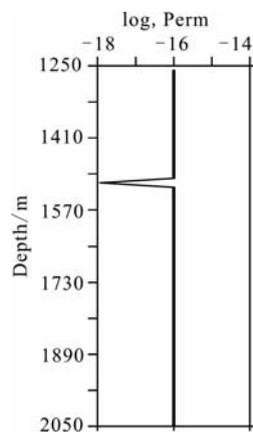


图 4 在 $t=3.6 \times 10^5 \text{ yr}$ 时刻模型中间沉积层的渗透系数

Fig. 4 Permeability of sediments in the central of model at time of $3.6 \times 10^5 \text{ yr}$

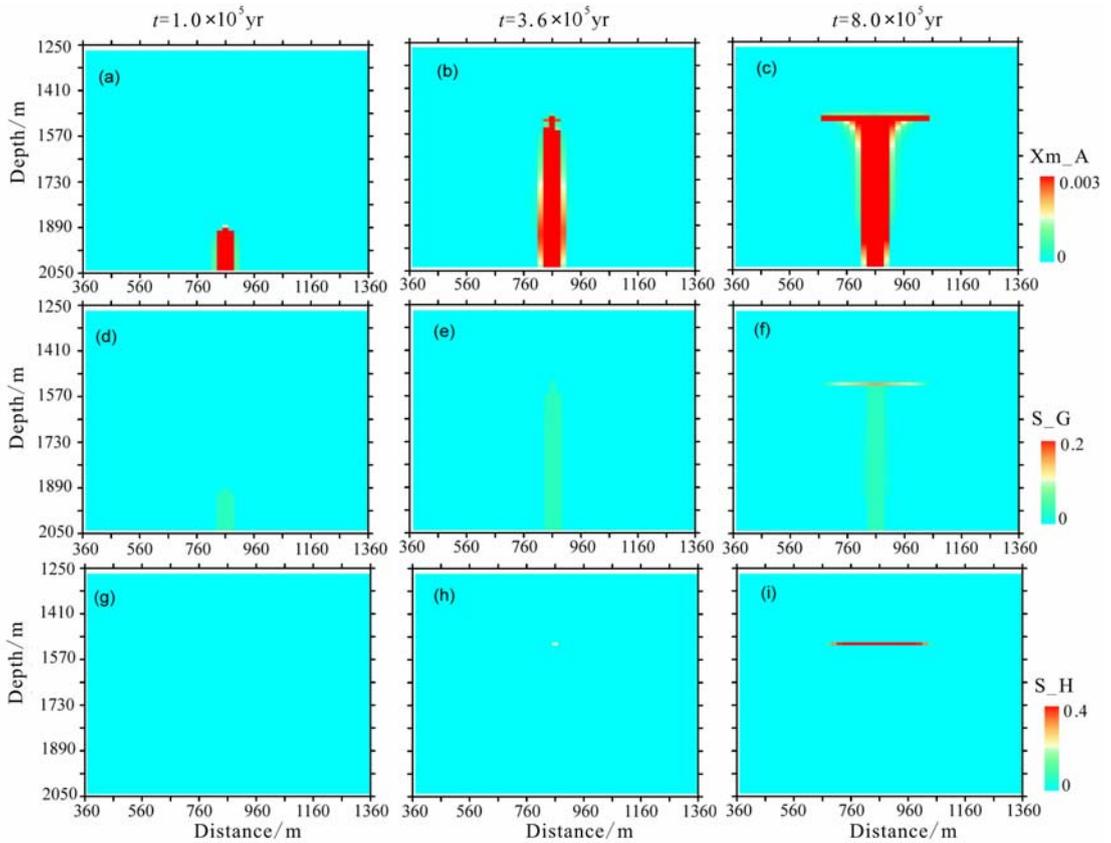


图3 气烟囱模型的模拟结果

(a)~(c)分别显示的是在 $t=1.0 \times 10^5$ yr, 3.6×10^5 yr, 和 8.0×10^5 yr 三个不同时刻溶解在流体中的甲烷浓度(X_{m-A});
(d)~(f)分别显示的是在三个不同时刻甲烷游离气饱和度($S-G$);(g)~(i) 分别显示的是在三个不同时刻甲烷水合物饱和度($S-H$) .

Fig. 3 Modeling results of gas chimney model

(a), (b), and (c) show the methane solubility (X_{m-A}) in the aqueous phase at time of 1.0×10^5 yr, 3.6×10^5 yr, and 8.0×10^5 yr, respectively. (d), (e) and (f) indicate the gas saturation ($S-G$) distribution at time of 1.0×10^5 yr, 3.6×10^5 yr, and 8.0×10^5 yr, respectively.

(g), (h), and (i) reflect the hydrate saturation ($S-H$) distribution at time of 1.0×10^5 yr, 3.6×10^5 yr, and 8.0×10^5 yr, respectively

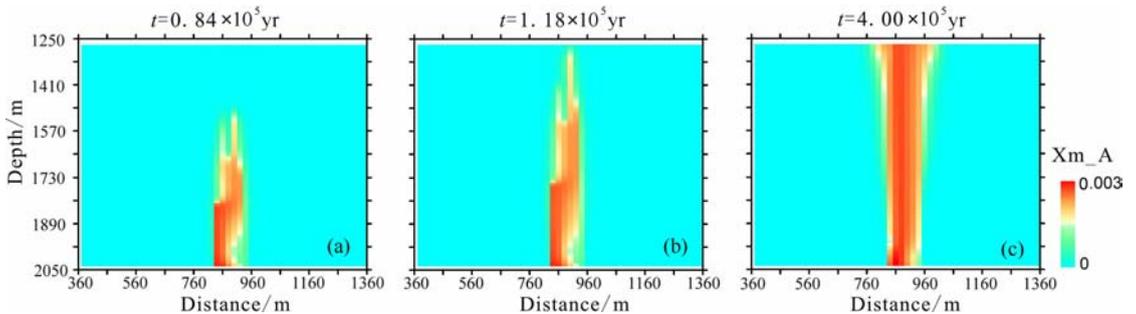


图5 断裂(泥底辟)模型的模拟结果

(a)~(c)分别显示的是在 $t=0.84 \times 10^5$ yr, 1.18×10^5 yr, 和 4.0×10^5 yr 时刻溶解在流体中的甲烷浓度(X_{m-A})

Fig. 5 Modeling results of diapiric model

(a), (b), and (c) show the methane solubility in the aqueous phase at time of 0.84×10^5 yr, 1.18×10^5 yr, and 4.0×10^5 yr, respectively

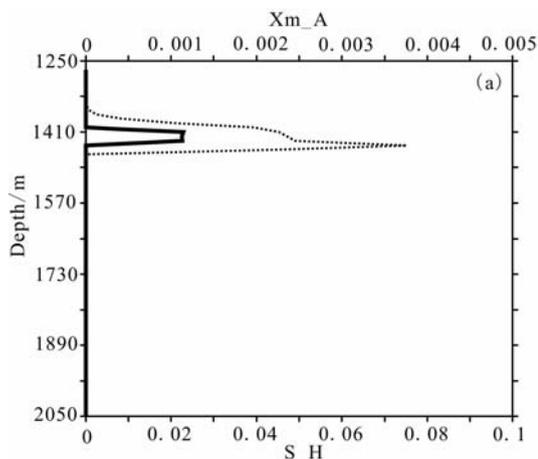
一样形成水合物. 这是由于流体流量很大, 甲烷一经产生即被流体溶解并带走. 在流体作用下, 溶于流体中的甲烷迅速向上移动, 在 0.84×10^5 yr 达到稳定带边界, 在 1.18×10^5 yr 到达海底表面, 却始

终无法形成游离气和水合物形成.

如果我们降低流体流量, 取值为 $5.0 \times 10^{-10} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 重新进行模拟. 模拟结果显示, 由于降低了流体流量, 来自深部的甲烷只有其

中一部分溶解于流体中, 而另一部分以游离气的形式存在. 当甲烷气到达水合物稳定带底界时, 水合物开始形成. 而沉积物中一旦有水合物形成, 其渗透系数迅速降低, 从而阻碍流体和气体的向上运移. 此后, 流体与游离气开始向两边侧向运移, 而上部沉积物孔隙流体中原先溶解的甲烷浓度因缺乏补给而慢慢扩散、降低而最终消失.

因此, 断裂(泥底辟)并不总是有利于水合物的形成. 来自深部的甲烷流量与流体流量之间的匹配很重要, 在甲烷流量一定的情况下, 流体流量越大, 越不容易形成水合物.



4.3 生物气模型

上述几个模型只考虑了来自深部热解成因气, 而没有考虑沉积物中的生物成因气. 在本节的模型中, 假定在 1410~1460 m 深度范围的沉积物可以原位生成甲烷. 生物甲烷气的数量级一般在 $10^{-14} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ [15, 19], 这里模型取 $5 \times 10^{-14} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$.

在生物成因甲烷气作用下, 尽管也可以形成薄薄的一层水合物, 但模拟结果(图 6a)显示, 在经过 2.5 Ma 以后, 沉积物中的甲烷水合物的饱和度仍不足 3%. 此时, 该层沉积物渗透系数略有下降, 但温度变化并不明显(图 6b).

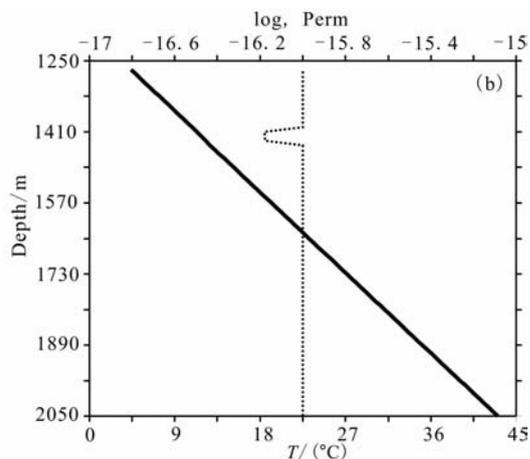


图 6 生物成因气模型的模拟结果. (a) 中显示的分别是沉积物孔隙中甲烷水合物的饱和度(实线)与流体中甲烷浓度(虚线), (b) 中显示的分别是沉积物温度分布(实线)与渗透系数(虚线)

Fig. 6 Modeling results of biogenic methane model. (a) shows the hydrate saturation (solid curve) and the methane solubility in the aqueous phase (dot curve). (b) indicates the temperature line (solid) and the permeability distribution (dot line)

实际上, 2.5 Ma 已经超过了水合物所在层位沉积物的年龄. 因此, 生物成因气不大可能是神狐海域高饱和度水合物的成藏机制.

5 讨论与结论

依据以上数值模拟结果, 并结合其他地质、地球物理资料, 我们这里对神狐海域天然气水合物的成藏模式作一些讨论.

(1) 神狐海域天然气水合物的形成与气烟囱密切相关. 神狐海域毗邻珠江口含油气盆地, 深部气藏不成问题. 同时, 神狐海域又是南海北部新构造运动最活跃的地区之一, 1.5~2 Ma 以来的断裂活动有可能造成深部气藏开启. 深部甲烷热解气在向上输送过程中, 一部分溶解于流体(水)中, 另一部分以游离气的形式存在. 气体运移以垂向为主, 且被局限在某一狭窄的范围, 故在地震剖面上表现为

气烟囱的形态. 甲烷越过水合物稳定带底界而进入水合物稳定带范围内时, 开始形成水合物. 一旦水合物形成, 该地层渗透系数迅速降低即成为封堵层, 从而阻止甲烷继续向上运移. 因此, 水合物仅在水合物稳定带底界上方很薄的一层, 但饱和度可以达到很高.

然而, 气烟囱的存在并不意味着水合物一定存在. 如果气烟囱时代很新, 甲烷气还未越过水合物稳定带底界, 那么即便在地震剖面上显示有气烟囱, 也没有水合物存在. 此时, 要正确识别气烟囱与水合物的关系, 还必须借助热流数据. 利用温压条件计算水合物稳定带底界, 和气烟囱上方 BSR 作对比, 只有二者吻合时, 气烟囱上方才有可能存在水合物. 如果气烟囱时代很老, 甲烷气已越过水合物稳定带底界且已形成水合物, 但深部气源早已停止供气, 那么此时在地震剖面上可能并未显示明显气烟囱, 但却有水合物存在. 因此, 没有气烟囱

的地方仍有存在水合物的可能。

(2)断裂流体活动对水合物形成并不十分有利。来自深部的热解气在流体作用下向上运移,只有当流体流量较小时,来自深部的甲烷一部分溶解于流体中而另一部分以游离气的形式存在。溶解了甲烷的流体随时间的推移向上运移,与此同时甲烷游离气也向上运移,当到达水合物稳定带底界时,水合物开始形成。而沉积物中一旦有水合物形成,其渗透系数开始降低,从而阻碍流体和气体的向上运移。自此,流体与游离气开始向两边侧向运移。

如果流体流量很大,甲烷一经产生即被流体溶解并带走,将始终无法形成游离气和水合物。因此,断裂(泥底辟)并不总是有利于水合物的形成。来自深部的甲烷流量与流体流量之间的匹配很重要,在甲烷流量一定的情况下,流体流量越大,越不容易形成水合物。

(3)来自深部的热解气尽管可以形成饱和度较大的水合物,但只能在水合物稳定带底界附近形成薄薄的一层水合物。只有当生物气存在时,才有可能在水合物稳定带内形成较厚(但饱和度很低)的水合物分布。从神狐海域水合物勘探结果来看,只是在水合物稳定带底界附近有薄薄的一层水合物,且水合物饱和度很高,表明其成因应该是热解气成因为主。

参考文献(References)

- [1] 苏新,陈方,于兴河等.南海陆坡中新世以来沉积物特性与气体水合物分布初探.现代地质,2005,19:1~13
Su X, Chen F, Yu X H, et al. A pilot study on Miocene through Holocene sediments from the continental slope of the South China Sea in correlation with possible distribution of gas hydrates. *Geoscience* (in Chinese), 2005, 19:1~13
- [2] 姚伯初.南海北部陆缘天然气水合物初探.海洋地质与第四纪地质,1998,18(4):11~18
Yao B C. Preliminary exploration of gas hydrate in the northern margin of the South China Sea. *Marine Geology and Quaternary Geology* (in Chinese), 1998, 18(4):11~18
- [3] 宋海斌,耿建华, Hong-King 等.南海北部东沙海域天然气水合物的初步研究.地球物理学报,2001,44:687~695
Song H B, Geng J H, Hong-King, et al. A preliminary study of gas hydrates in Dongsha region north of South China Sea. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2001, 44(5):687~695
- [4] 吴时国,董冬冬,杨胜雄等.南海北部陆坡细粒沉积物天然气水合物系统的形成模式初探.地球物理学报,2009,52(7):1849~1857
Wu S G, Dong D D, Yang S X, et al. Genetic model of the hydrate system in the fine grain sediments in the northern

continental slope of South China Sea. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(7):1849~1857

- [5] 陈多福,黄永祥,冯正等.南海北部冷泉碳酸盐岩和石化微生物细菌及地质意义.矿物岩石地球化学通报,2005,24:185~189
Chen D F, Huang Y Y, Feng Z, et al. Seep carbonate and preserved bacteria fossils in the northern of the South China Sea and their geological implications. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry* (in Chinese), 2005, 24:185~189
- [6] 蒋少涌,杨涛,薛紫晨等.南海北部海区海底沉积物中孔隙水的 Cl 和 SO₄²⁻浓度异常特征及其对天然气水合物的指示意义.现代地质,2005,19:45~54
Yang S Y, Yang T, Xue Z C, et al. Chlorine and sulfate concentrations in pore waters from marine sediments in the north margin of the South China Sea and their implications for gas hydrate exploration. *Geoscience* (in Chinese), 2005, 19:45~54
- [7] 祝有海,饶竹,刘坚等.南海西沙海槽 S14 站位的地球化学异常特征及其意义.现代地质,2005,19:39~44
Zhu Y H, Rao Z, Liu J, et al. Geochemical anomalies and their implication from site 14, the Xisha Trough, the South China Sea. *Geoscience* (in Chinese), 2005, 19:39~44
- [8] 张光学,黄永祥,祝有海等.南海天然气水合物的成矿远景.海洋地质与第四纪地质,2002,22(1):75~81
Zhang G X, Huang Y Y, Zhu Y H, et al. Prospect of gas hydrate resources in the South China Sea. *Marine Geology and Quaternary Geology* (in Chinese), 22(1):75~81
- [9] 吴能友,梁金强,王宏斌等.海洋天然气水合物成藏系统研究进展.现代地质,2008,22:356~362
Wu N Y, Liang J Q, Wang H B, et al. Marine gas hydrate system; *State of the Art*. *Geoscience* (in Chinese), 2008, 22:356~362
- [10] 吴能友,杨胜雄,王宏斌等.南海北部陆坡神狐海域天然气水合物成藏的流体运移体系.地球物理学报,2009,52(6):1641~1650
Wu N Y, Yang S X, Wang H B, et al. Gas bearing fluid influx sub-system for gas hydrate geological system in Shenhu Area. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(6):1641~1650
- [11] 吴时国,龚跃华,米立军等.南海北部深水盆地油气渗漏系统及天然气水合物成藏机制研究.现代地质,2010,24:433~440
Wu S G, Gong Y H, Mi L J, et al. Study on hydrocarbon leakage system and associated gas hydrate reservoirs in the deep water basin of northern South China Sea. *Geoscience* (in Chinese), 2010, 24:433~440
- [12] Rempel A W, Buffett B A. Formation and accumulation of gas hydrate in porous media. *J Geophys Res*, 1997, 102:10151~110164
- [13] Rempel A W, Buffett B A. Mathematical models of gas hydrate accumulation. In: Henriot J P, Mienert J, eds. Gas

- Hydrates: Relevance to World Margin Stability and Climate Change. London: Geological Society, 1998, **137**:63~74
- [14] Xu W, Ruppel C. Predicting the occurrence, distribution, and evolution of methane gas hydrate in porous marine sediments. *J Geophys Res*, 1999, **104**:5081~5095
- [15] Davie M K, Buffett B A. A numerical model for the formation of gas hydrate below the seafloor. *J Geophys Res*, 2001, **106**: 497~514
- [16] Davie M K, Buffett B A. A steady state model for marine hydrate formation: Constraints on methane supply from pore water sulfate profile. *J Geophys Res*, 2003, **108**(B10):2495, doi:2410.1029/2002JB002300
- [17] Gering K, Cherry R S, Weunberg D M. Mechanisms for methane gas accumulation under hydrate deposits in sediments. *Ann NY Acad Sci*, 2000, **912**: 623~632
- [18] Gering K. Simulations of methane hydrate phenomena over geologic timescales. Part I: Effects of sediment compaction rates on methane hydrate and free gas accumulations. *Earth Planet Sci Lett*, 2003, **206**:65~81
- [19] He L, Matsubayashi O, Lei X. Methane hydrate accumulation model for the Central Nankai accretionary prism. *Marine Geology*, 2006, **227**:201~214
- [20] Garg S K, Pritchett J W, Katoh A, et al. A mathematical model for the formation and dissociation of methane hydrates in the marine environment. *J Geophys Res*, 2008, **113** (B01201);doi:10.1029/2006JB004768
- [21] Moridis G J, Kowalsky M B, Pruess K, eds. Tough + Hydrate v1.0 User's Manual: A Code for the Simulation of System Behavior in Hydrate-Bearing Geological Media. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2008
- [22] 张功成, 米立军, 吴时国等. 深水区—南海海洋油气勘探的新领域. *石油学报*, 2007, **28**:15~21
Zhang G C, Mi L J, Wu S G, et al. Deepwater area—the new prospecting targets of northern continental margin of South China Sea. *Acta Petrol Ei Sinica* (in Chinese), 2007, **28**:15~21
- [23] 徐行, 施小斌, 罗贤虎等. 南海西沙海槽地区的海底热流测量. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, **26**(4):51~58
Xu X, Shi X B, Luo X H, et al. Heat flow measurements in the Xisha trough of the South China Sea. *Marine Geology and Quaternary Geology* (in Chinese), 2006, **26**(4): 51~58
- [24] 徐行, 陆敬安, 罗贤虎等. 南海北部海底热流测量及分析. *地球物理学进展*, 2005, **20**(2):562~565
Xu X, Lu J A, Luo X H, et al. The marine heat flow survey and the result discussion in the northern part of South China Sea. *Progress in Geophys.* (in Chinese), **20**(2):562~565
- [25] 张毅. 南海北部陆坡天然气水合物成矿的地温场及成藏动力学初步研究[博士论文]. 北京:中国科学院地质与地球物理研究所, 2010
Zhang Y. Preliminary studies on the temperature field and formation mechanism of gas hydrate in the norther margin of the South China Sea [Ph. D. thesis]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2010
- [26] 张毅, 何丽娟, 徐行等. 南海北部神狐海域甲烷水合物 BHSZ 与 BSR 的比较研究. *地球物理学进展*, 2009, **24**(1): 183~194
Zhang Y, He L J, Xu X, et al. The disagreement between BSRs and the base of methane hydrate stability zones in the Shenhu Area north of the South China Sea. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 2009, **24**(1):183~194
- [27] 吴能友, 张海敞, 杨胜雄等. 南海神狐海域天然气水合物成藏系统初探. *天然气工业*, 2007, **27**(9):1~6
Wu N Y, Zhang H Q, Yang S X, et al. Preliminary discussion on natural gas hydrate reservoir system of Shenhu Area, north slope of South China Sea. *Natural Gas Industry* (in Chinese), 2007, **27**(9):1~6
- [28] Guan J, Liang D, Wu N Y, et al. The methane hydrate formation and the resource estimate resulting from free gas migration in seeping seafloor hydrate stability zone. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, **36**:277~288
- [29] 杨涛, 蒋少涌, 葛璐等. 南海北部神狐海域浅表层沉积物中孔隙水的地球化学特征及其对天然气水合物的指示意义. *科学通报*, 2009, **54**: 3231~3240
Yang T, Jiang S Y, Ge L, et al. Geochemical characteristics of pore water in shallow sediments from Shenhu area of South China Sea and their significance for gas hydrate occurrence. *Chinese Science Bulletin*, 2010, **55**(8):752~760

(本文编辑 胡素芳)