

非烃类气体对琼东南盆地深水区水合物稳定带厚度的影响

何勇^{1,2,3}, 苏正^{1,3}, 吴能友^{1,3}

1. 中国科学院广州能源研究所, 可再生能源与天然气水合物重点实验室, 广东 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院广州天然气水合物研究中心, 广东 广州 510640

摘要: 天然气水合物在未来的能源、环境及海洋地质灾害等方面有着重要意义, 是当前研究的热点。根据琼东南盆地的实际地质条件, 结合琼东南盆地深水区的海水盐度和地温梯度等, 在不同水深条件下计算不同组分气体所形成的水合物稳定带厚度, 研究非烃类气体对水合物稳定带厚度的影响。结果表明, 琼东南盆地的水合物稳定带厚度随着海水深度的增加而增加, 混合气体中的 CO_2 对水合物稳定带厚度的影响不仅与其含量有关, 还受海水深度影响。当水深小于或等于 1.3 km 时, 混合气体所形成的水合物稳定带厚度随 CO_2 含量的增加先增大后减小; 当水深大于或等于 1.55 km 时, CO_2 使水合物稳定带厚度减小, 并随 CO_2 含量的增加影响越大。 CH_4+N_2 混合气体中的 N_2 使水合物稳定带厚度减小, 混合气体中的 N_2 每增加 1% 时, 所形成的水合物稳定带厚度将减少 4 m。

关键词: 天然气水合物; 稳定带厚度; 琼东南盆地; 非烃类气体

中图分类号: P736.41; P618.13 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5470(2012)05-0062-08

Effect of nonhydrocarbon gas on thickness of hydrate stability zone under deep water in Qiongdongnan Basin

HE Yong^{1,2,3}, SU Zheng^{1,3}, WU Neng-you^{1,3}

1. Key Laboratory of Renewable Energy and Gas Hydrate, Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Guangzhou Center for Gas Hydrate Research, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

Abstract: Natural gas hydrate is a hot spot of study at present, which may play a very important role in energy, environment and disasters. According to actual geological conditions in the Qiongdongnan Basin, the influence of nonhydrocarbon gas to the thickness of hydrate stability zone (HSZ) is numerically studied for component gases at various depths, combined with the salinity of ocean waters and geothermal gradient in the deep-water area within the basin. The results show that the thickness of HSZ in the Qiongdongnan Basin increases with water depth, and that CO_2 in mixed gas of CH_4+CO_2 alters the hydrate stability. The effect of CO_2 is not only related to CO_2 content but also to water depth. The thickness of HSZ increases at a shallow depth and then falls as CO_2 content increases for water depth less than or equal to 1.3 km. When water depth is more than or equal to 1.55 km, input of CO_2 decreases the HSZ thickness, and the influence enhances as the CO_2 content grows. The results also indicate that N_2 in mixed gas of CH_4+N_2 decreases the thickness of the HSZ. A 1% increase of N_2 in the mixture can lead to 4 m reduction in the thickness of the HSZ.

Key words: natural gas hydrate; hydrate stability zone; Qiongdongnan Basin; nonhydrocarbon gas

收稿日期: 2011-07-28; 修订日期: 2011-11-07。林强编辑

基金项目: 国家自然科学基金委员会-广东联合基金项目(U0933004); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KGCX2-YW-805); 国家重点基础研究计划(“973”) (2009CB2019506)

作者简介: 何勇(1984—), 男, 湖北省荆州市人, 硕士研究生, 从事天然气水合物成藏机制研究。

通信作者: 苏正, 博士, 副研究员, 主要从事流体动力学数值模拟研究。E-mail: suzheng@ms.giec.ac.cn

天然气水合物(natural gas hydrate, 简称 gas hydrate)是一种由天然气分子与水分子在一定条件下组成的类冰的、非化学计量的、笼型结晶固态化合物, 其中的天然气主要由 CH_4 及少量的 C_2H_6 、 CO_2 等气体组成^[1]。天然气水合物主要分布于大陆边缘、深水盆地及永久冻土带, 在资源、环境及灾害等方面都具有重要的作用^[2]。

天然气水合物在全球范围内广泛存在, 储量巨大。标准状态下, 1 单位体积的天然气水合物可以分解释放 164 单位体积的 CH_4 。全球天然气水合物中 CH_4 的总碳量相当于当前已探明化石燃料总碳量的两倍^[3]。 CH_4 是一种极强的温室气体, 天然气水合物藏中大量的 CH_4 释放可能引起大气组分的改变, 从而影响全球气候^[4]; 另外, 天然气水合物的稳定与温度和压力有着密切关系, 一旦水合物藏周围的温度和压力发生变化将会引起其分解, 从而成为海底滑坡等地质灾害的重要诱因^[5-6]。

天然气是水合物成藏的物质基础, 目前认为自然界中形成水合物的气体有两种来源, 一是生物成因气, 另一种是热解成因气。生物成因气基本上以 CH_4 构成, 而热解成因气中除 CH_4 外, 还可能含有少量其他气体, 如 C_2H_6 、 CO_2 、 N_2 和 H_2S 等^[7-8]。Sloan 等^[1,9]和 Tréhu 等^[10]研究表明, 除 CH_4 等烃类气体以外, 其他非烃气体的存在对水合物的相平衡曲线有一定影响, 并因此影响对水合物形成条件及存在区域的预测^[11]。因此, 探讨非烃类气体对水合物稳定带厚度的影响及水合物分布区域, 有利于目标区水合物资源量的精确预测, 对天然气水合物资源评价具有重要意义。

南海北部陆坡是在中生代活动陆缘的基础上, 经过新生代早期裂谷拉张和海底扩张、晚期强烈挤压改造形成的被动大陆边缘, 自西向东发育了琼东南、珠江口、台西南等含油气沉积盆地, 构造和岩浆活动频繁, 陆坡滑塌构造发育, 热流高(平均约 $75\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$), 盆地内热解气和浅层生物气发育。南海北部陆坡是天然气水合物发育的理想场所, 初步评价认为南海北部陆坡水合物天然气资源量约 185 亿吨油当量, 并经钻探获取了天然气水合物的岩芯样品。但南海北部含油气盆地的非烃气体相当丰富, 在莺琼盆地、珠江口盆地许多天然气气藏中 CO_2 、 N_2 及 H_2S 的含量奇高, 甚至形成 90% 以上的 CO_2 气藏。

非烃类气体组分必然对水合物的形成和稳定性

产生影响。 CO_2 、 N_2 与 H_2S 等非烃气体如何影响天然气水合物成藏, 是南海北部陆坡天然气水合物资源勘探评价中必须解决的问题。本文利用 Sloan 等^[1]的 CSMHYD 计算程序, 研究琼东南盆地深水水合物中非烃类气体对水合物稳定带的影响, 以利于琼东南盆地深水水合物资源潜力的科学评价。

1 地质条件

1.1 构造环境

琼东南盆地深水水合物位于南海北部大陆边缘, 是新生代形成的断陷盆地, 盆地内断裂发育主要为北东向断裂, 部分近东西向。盆地形成后经历了古近纪以断陷为主和新近纪以坳陷为主的 2 次发育阶段。在新生代时期, 褶皱运动、地层的倾斜及局部构造不明显。随着板块活动, 在南海海盆拉张的同时发生断裂, 盆地经历了断陷和坳陷两个发育阶段, 盆地范围由小变大^[12]。琼东南盆地深水水合物(水深 $>300\text{m}$)主要包括中央坳陷及其以南海域, 如图 1 所示, 主要有 5 个凹陷和 3 个凸起, 即乐东—陵水凹陷、松南—宝岛凹陷、长昌凹陷、北礁凹陷、华光凹陷、陵南低凸起、松南低凸起和北礁凸起, 水深最大达 3200m ^[13]。

琼东南海域基底构造复杂、洼陷边缘断裂带、滑塌构造、底辟构造等特殊局部构造环境及地质体发育, 新构造运动活跃, 流体活动强烈, 对深部烃类气体向上运移进入水合物稳定带相当有利^[14-15]。琼东南洼陷边缘断裂带具有地形坡降大、地层厚度变化显著、深部断裂发育等特点, 又靠近主力气源区, 有利于气体的运移和聚集到浅部地层中^[12]。并且琼东南洼陷边缘断裂带岩性较粗, 储集体较发育, 可以捕集到大量流体, 是天然气水合物储存的有利场所。

1.2 沉积条件

沉积速率是控制水合物聚集的重要因素之一。形成天然气水合物的气源分为生物成因气和热解成因气, 其中, 生物成因气是厌氧微生物将沉积物中的有机质分解而成, 大多数水合物都是由生物成因气形成的^[16], 沉积速率高的地方沉积厚度较大, 并且快速地聚积了大量的有机碎屑物, 并能在未被氧化的情况下很好地保存下来, 从而通过厌氧微生物作用形成 CH_4 , 为天然气水合物的形成提供物质基础^[10]。

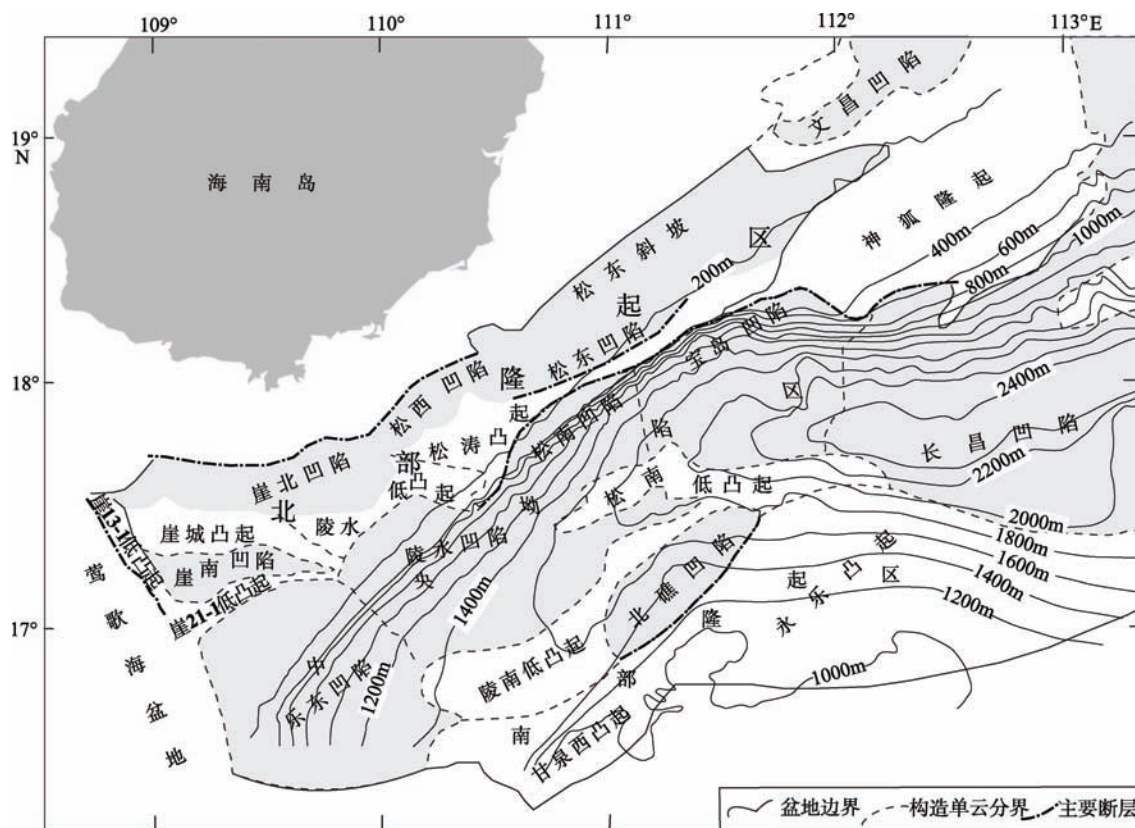


图 1 研究区域地质背景(据雷超等^[12, 17-18]修改)

Fig. 1 Geological setting of the field experiment (modified from Lei, et al.^[12, 17-18])

琼东南海域自晚渐新世以来处于坳陷沉降期, 以滨、浅海—半深海沉积环境为主, 陆源碎屑供给充足, 沉积速率较大, 沉积物快速堆积, 厚度较大, 粒度上总体中等偏细, 有机质含量较高^[19]。琼东南盆地的沉积相和沉积特征对水合物的形成相当有利。

1.3 气源条件

充足的气源条件是水合物聚集成藏的最基本条件。琼东南盆地发育在中生代末至新生代早期, 神狐运动使一系列北东向张性断裂开始发育, 产生一系列北东向地堑, 并在之后发育了湖相沉积。直至始新世末, 热沉降作用使陆缘逐渐沉于水下, 广泛接受海陆交互作用和海相沉积, 沉积盆地成型。始新世时, 湖底接受了富含有机质的烃源岩, 形成分布广泛的古近系中湖相烃源岩。目前已经证实琼东南盆地主力烃源岩为海陆过渡相煤系, 推测其含有中深湖相泥岩烃源岩, 并且盆地内有机质含量丰富, 沉积体普遍处于异常高地温和高压条件下, 具有良好的形成天然气的地质条件^[17, 20]。在琼东南盆地发现的崖城 13-1(YC13-1)气田是我国最大的海上气田, 表明琼东南盆地内有形成水合物的良好气源条件。

此外, 盆地内断裂构造十分发育, 地震剖面显示有许多断层穿到海底, 有利于深部气体向上运移形成水合物矿藏^[15]。

2 计算方法

2.1 温度与压力

温度是影响天然气水合物形成和稳定存在的重要因素之一。本文根据琼东南盆地深水海底温度及地温梯度计算沉积层的温度。南海北部陆坡海底温度与水深有一定的相关性, 当水深大于 2.8km 时, 海底温度趋于稳定(2.2℃); 当海底水深小于 2.8km 时, 存在以下线性拟合关系(图 2)^[21]:

$$\ln(d) = -1.3361 \ln(t) + 2.0339 \quad (1)$$

式中, d 为海水深度, 单位为 km; t 为海底温度, 单位为℃。

琼东南盆地海底的地温梯度分布比较集中, 介于 35—45.5℃·km⁻¹。其中崖北、松西、松东凹陷的地温梯度为 35—38℃·km⁻¹, 崖南凹陷的地温梯度为 41—42.5℃·km⁻¹, 松南凹陷的地温梯度为 45.5℃·km⁻¹, 宝岛、陵水、乐东凹陷的地温梯度为 42.5℃·km⁻¹^[22]。在本文计算中取其地温梯度为 40

$^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$ 。

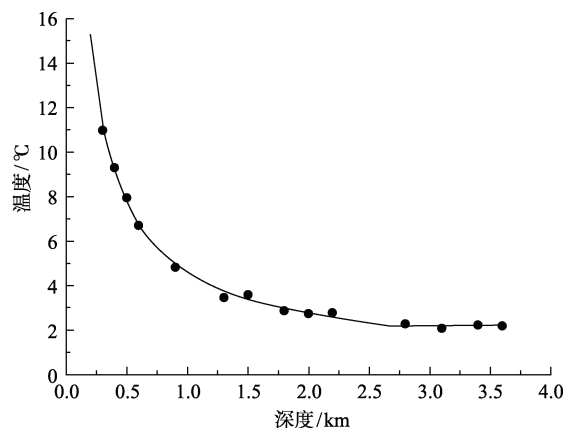


图 2 琼东南深水水合物稳定带水深与海底温度关系曲线

Fig. 2 Relationship between depth and seafloor temperature in the deep-water zone of the Qiongdongnan Basin

在一定温度条件下, 水合物形成和保存需要适宜的高压环境。Kaul 等^[23]认为在松散的海底沉积物内, 孔隙水相互连通并与底层水相连, 沉积物中孔隙水的压力即为静水压力, 可以采用如下经验方程进行计算^[21]:

$$P_{\text{hyd}} = P_{\text{atm}} + \rho_{\text{sw}} g(h+z) \times 10^{-6} \quad (2)$$

P_{hyd} 为静水压力, P_{atm} 为大气压力, ρ_{sw} 为海水的密度, g 为重力加速度, h 为海水深度, z 为海底沉积物距海底的深度。

2.2 盐度与沉积物粒度

海水盐度是影响水合物形成的另一重要因素, 它通过改变水合物系统相平衡特征而影响水合物的形成分布。前人研究表明^[1, 24-25], 盐类体系对水合物的生成有抑制作用, 对水合物的相平衡曲线有较大影响。有关南海盐度的相关文献指出^[26-27], 南海的盐度一般都大于 3.3%。在本文的计算中, 可以近似选取盐度值为 3.5%。

在海底沉积物中, 由于沉积物间存在孔隙, 且沉积物又具有较大的比表面积, 流体与孔隙壁面间存在着界面张力和毛细管力, 使得沉积物对天然气水合物的形成和相平衡均产生影响, 从而影响天然气水合物稳定带厚度。

Xu 等^[28]以及 Brewer 等^[29]曾研究过沉积物粒径对水合物形成及相平衡的影响, 研究结果表明, 粒径小的沉积物对天然气水合物的形成具有抑制作用, 但影响不是十分明显, 并且海底正常沉积物的粒径大小对水合物形成条件影响不大。在本文的计算中, 为简化计算, 暂不考虑沉积物粒径对水合物稳定带

厚度的影响。

2.3 稳定带厚度

水合物稳定带是指一特定区域, 在该区域内的温度和压力处于天然气水合物形成的热力学范围, 水合物能够稳定存在。水合物稳定带控制着水合物的分布范围, 甚至影响到水合物矿藏资源的潜力, 因而, 水合物稳定带厚度在水合物资源评估中有重要意义。

水合物稳定带一般采用水合物相平衡温度结合地温梯度计算得到, 如图 3 所示。该图为海洋天然气水合物的稳定带的温度压力图^[30], 实线为水合物的相边界曲线, 虚线为温度曲线。两条曲线相交所形成的区域为水合物热力学稳定存在区域, 但是在海水中水合物会发生溶解, 因此, 通常所指的水合物稳定带只是海底以下的沉积体, 而地温曲线与水合物相边界曲线的交点指示了水合物稳定带的最大深度。

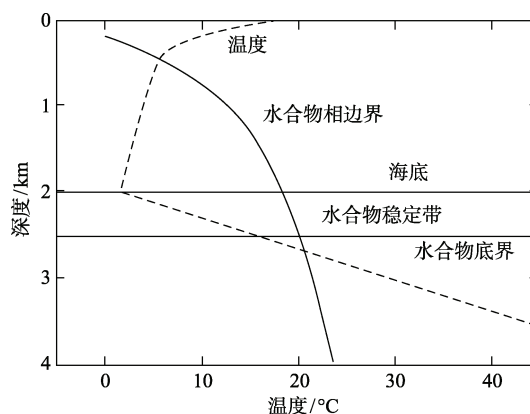


图 3 海底温度和压力控制的水合物稳定带(据 Max^[30]修改)

Fig. 3 Marine hydrate stability zone controlled by temperature and pressure below seafloor (modified from Max^[30])

3 计算结果

海洋水合物稳定带分布主要受到水深、温度、压力、地温梯度, 孔隙流体的盐度以及气体组分等因素的影响^[1, 31]。在本文中, 我们根据琼东南盆地的实际地温梯度、水深条件及海水盐度, 假定气源充足, 考虑气体组分对水合物稳定域的影响。

热解成因气中, 不仅含有 CH_4 , 还可能包含其他气体组分, 如 C_2H_6 、 H_2S 、 CO_2 及 N_2 等。图 4 为不同气体在盐度为 3.5% 的溶液中形成气体水合物的相平衡曲线, 可以看出, 在 CH_4 、 CO_2 、 H_2S 和 N_2 四种气体中, H_2S 最易形成水合物, N_2 最难形成水合

物, 在一定的温度范围(低于 282K)内, CO_2 较 CH_4 易形成水合物, 当温度高于 282K 时, CO_2 较 CH_4 更难形成水合物, 需要更高的压力条件。

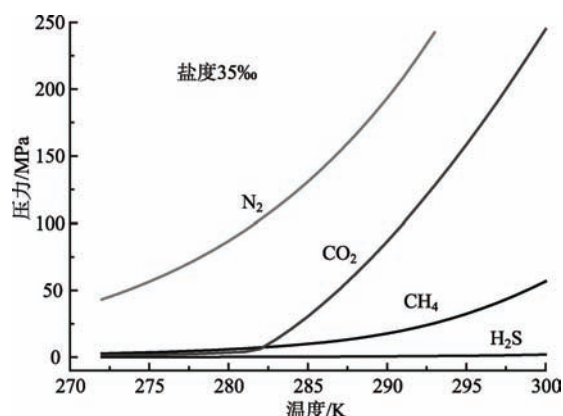


图 4 不同气体水合物的相平衡曲线对比

Fig. 4 Phase equilibrium curves of different gas hydrates

甲烷水合物形成受到温压条件的控制, 并一般成藏于海底几百米的沉积物中。与传统天然气藏相比, 水合物层的分布相对要浅一些。如果由于构造活动, 深部含非烃类的天然气藏沿断裂通道向上渗漏, 必然会对浅层水合物发育产生影响。对于 CO_2 组分含量高的气藏, 由于 CO_2 较 CH_4 来说更容易形成水合物, 也更稳定, 除了快速形成 CO_2 水合物外, 还可能发生置换水合物中的 CH_4 这一过程。而对于 N_2 含量高的气藏, 由于 N_2 较 CH_4 更难形成水合物, CH_4 与 N_2 的混合气体, 可能难以形成水合物藏。

在琼东南盆地深水区的油气勘探和开采中, 目前在 BD15 和 BD19 含气构造中均获得 CH_4 , 并且崖 13 气田是我国第一个进行商业开采的海上气田。琼东南盆地内断层和构造十分发育, 为气体的运移提供了良好的通道, 崖 13 气田和 BD15、BD19 构造的深部气体均有可能通过断层或其它构造运移到盆地内其他区域。本文选取琼东南盆地崖 13 气田、BD15 与 BD19 构造中 CO_2 与 N_2 含量有代表性的气体组分数据计算其在琼东南深水区形成水合物稳定带厚度。不同气田/构造的气体组分数据见表 1。

本文的计算中, 考虑到琼东南盆地深水区的水深, 从 0.3km 水深开始计算, 以 0.25km 水深为间隔, 定量说明不同气体组分在不同水深条件下对水合物稳定带厚度的影响, 结合琼东南盆地的地温梯度及海水盐度, 并取琼东南盆地深水区的平均地温梯度 $40^\circ\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$, 海水盐度为 35‰, 计算不同组分气体形成水合物的稳定带厚度。在计算过程中, 为简化气

体组分, 将采用 C_2H_6 代替多碳类(C_2^+)烃类气体进行计算, 其结果列入表 2 和图 5。

表 1 不同气田或构造的气体组成(单位: %)^[32-33]

Tab. 1 Gas composition(units: %) in different gas field

气体组成	气田或构造					
	纯 CH_4	崖 13 气田				BD19-2 BD15-3
	1	2	3	4	5	6
CH_4	100	86.53	84.58	84.18	9.84	1.32
C_2^+	0	1.76	4.49	3.09	0.74	0
CO_2	0	11.5	8.73	10.79	87.92	98.32
N_2	0	0.1	1.76	1.04	1.5	0.28
总量	100	99.89	99.56	99.1	100	99.92

从表 2 和图 5 中可看出, 崖 13 气田中气体组分差异较小, 在相同水深条件下所形成的水合物稳定带厚度差异不大, 而 BD15 和 BD19 含气构造中气体组分差异较大, 所形成的水合物稳定带厚度差异也较大。在崖 13 气田的 3 组气体中, 其 CH_4 含量相差不大, CH_4 含量均在 85% 左右, 非烃类气体 CO_2 含量为 8.73%—11.5%, N_2 含量较低, 相同水深条件下, 3 组气体各自的水合物稳定带厚度较纯 CH_4 的水合物稳定带厚度大。BD19 含气构造中 CH_4 含量较低, CO_2 含量为 87.92%, 当水深为 800m 时, 其形成的水合物稳定带厚度大于纯 CH_4 形成水合物稳定带厚度; 而水深大于或等于 1.3km 时, 所形成的水合物稳定带厚度却小于纯 CH_4 形成水合物稳定带厚度。在 BD15 含气构造获得的气体组分中, 其 CH_4 和 N_2 含

表 2 不同组成气体形成水合物稳定带厚度

Tab. 2 Thicknesses of hydrate stability zone of different gas composition

水深/m	计算的稳定带厚度/m					
	1	2	3	4	5	6
300	0	0	0	0	0	0
550	0	48	77	64	91	49
800	156	196	222	214	166	110
1050	249	279	292	287	220	156
1300	311	332	346	339	253	172
1550	358	375	382	375	261	185
1800	395	411	422	415	278	211
2050	427	437	450	441	316	231
2300	454	458	460	466	319	240
2550	478	484	485	486	328	252
2800	497	504	512	517	346	261

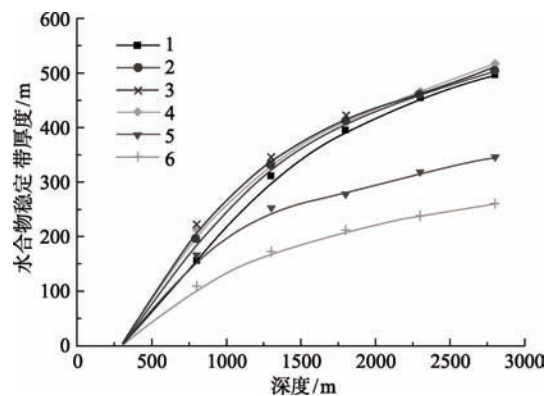


图 5 不同气体组成在不同水深条件下计算的水合物稳定带厚度

Fig. 5 Calculated thicknesses of hydrate stability zone of different gases as a function of water depth

量均很低, CO₂ 含量高达 98% 以上, 水深大于或等于 0.8km 时, 其形成的水合物稳定带厚度较纯 CH₄ 水

合物稳定带厚度要小。

4 讨论

利用琼东南崖 13 气田、BD19-2 与 BD15-3 构造的气体组成, 计算在不同水深条件下的水合物稳定带厚度, 显示非烃类气体(CO₂、N₂)对水合物稳定带厚度有一定影响, 但仍未定量确定非烃类气体多大程度上改变水合物稳定带厚度。为定量确定 CH₄ 混合气体中 CO₂ 和 N₂ 对水合物稳定带厚度的影响, 分别计算了不同组分的 CH₄+CO₂ 和 CH₄+N₂ 混合气体形成水合物的稳定带厚度。在琼东南盆地深水区气体中, N₂ 含量变化范围较小, 本文只考虑 N₂ 含量在 1%—5% 的变化; 而 CO₂ 含量变化范围较大, 最高含量甚至达到 90% 以上。不同组分混合气在不同水深下对水合物稳定带厚度的具体影响见表 3。

表 3 不同组分气体在不同海水深度下水合物稳定带厚度

Tab. 3 Thickness of hydrate stability zone of different gas compositions at different depth

		水合物稳定带厚度/m									
100%CH ₄	0	0	156	249	311	358	395	427	454	478	497
90%CH ₄ +10%CO ₂	0	9	178	262	319	363	395	426	452	479	497
80%CH ₄ +20%CO ₂	0	38	188	269	323	365	398	424	448	461	488
70%CH ₄ +30%CO ₂	0	61	198	273	324	363	392	419	441	460	479
60%CH ₄ +40%CO ₂	0	72	203	277	331	355	383	411	433	454	464
50%CH ₄ +50%CO ₂	0	88	205	268	313	347	376	403	423	441	457
40%CH ₄ +60% CO ₂	0	90	200	262	309	339	363	379	407	425	449
30%CH ₄ +70% CO ₂	0	92	191	253	284	321	354	371	388	406	419
20%CH ₄ +80% CO ₂	0	93	176	249	270	301	322	346	360	374	388
10%CH ₄ +90% CO ₂	0	88	160	209	229	256	269	302	314	331	341
100%CO ₂	0	36	95	132	157	177	194	208	221	233	242
99%CH ₄ +1%N ₂	0	0	151	246	306	355	392	425	451	475	493
98%CH ₄ +2%N ₂	0	0	147	243	302	351	388	421	448	471	489
97%CH ₄ +3%N ₂	0	0	144	240	298	348	385	417	445	468	486
96%CH ₄ +4%N ₂	0	0	141	236	294	345	382	414	441	465	482
95%CH ₄ +5%N ₂	0	0	136	233	292	342	379	411	438	462	479
水深/km	0.3	0.55	0.8	1.05	1.3	1.55	1.8	2.05	2.3	2.55	2.8

通过对不同非烃类气体与 CH₄ 混合形成气体水合物的稳定带厚度进行计算, 在不同水深条件下, 对不同含量 CO₂ 与 CH₄ 混合气体形成的水合物稳定带厚度作图(图 6)。混合气体所形成的水合物稳定带厚度随水深的增加而增加, 水合物稳定带厚度的增长是通过增加压力而实现的。当水深小于或等于 1.3km 时, CH₄ 与 CO₂ 气体形成的气体水合物其稳定

带厚度随 CO₂ 含量的增加呈抛物线变化, 随着 CO₂ 含量的增加, 形成的水合物稳定带厚度先增加后减少, 但在水深大于或等于 1.55km 时, CH₄ 与 CO₂ 形成的气体水合物其稳定带厚度随 CO₂ 的含量增加而减小。说明 CO₂ 对水合物稳定带厚度的影响不仅与混合气中 CO₂ 含量有关, 还与水深有关, 这决定于高压条件下 CH₄ 和 CO₂ 混合气体形成的晶体水合物

特征。研究区内的 CH_4+N_2 的混合气体中 N_2 含量总体较少, 但 N_2 的混入使水合物稳定带厚度减小, 混

合气体中每增加 1% 的 N_2 , 水合物稳定带理论厚度减少约 4m。

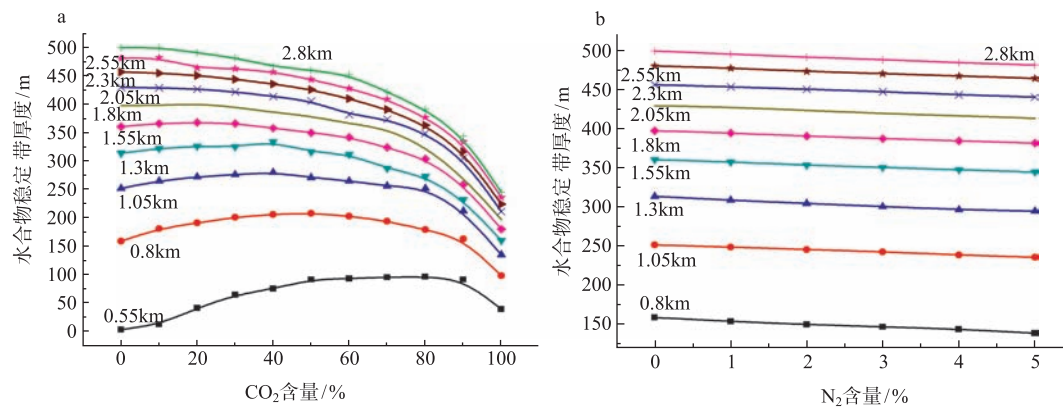


图 6 CH_4+CO_2 (a)与 CH_4+N_2 (b)混合气体在不同水深条件下的水合物稳定带厚度

Fig. 6 Thickness of hydrate stability zone of $\text{CH}_4+\text{CO}_2/\text{N}_2$ at different water depth

5 结论

琼东南盆地是我国重要的油气分布区, 具有良好的天然气水合物发育条件, 但天然气中非烃气体的存在可能改变水合物稳定带厚度, 并对该区水合物资源潜力评价产生影响。本文以钻探获得的气体组分数据为依据, 结合琼东南盆地深水区的实际地热梯度和盐度条件, 分别计算 CO_2 与 N_2 在不同水深条件下的水合物稳定带厚度, 并获得以下认识。

1) 对于同组分气体, 其形成水合物稳定带的厚度随着水深的增加而不断增加, 但水深对水合物稳

定带厚度的影响随着水深的增加而趋于平缓。

2) 混合气体中的 CO_2 对水合物稳定带厚度的影响不仅与 CO_2 的含量有关, 还依赖于水深。在水深小于或等于 1.3km 条件下, CH_4 与 CO_2 气体所形成的气体水合物其稳定带厚度随 CO_2 含量的增加呈抛物线变化, 随着 CO_2 含量的增加, 形成的水合物稳定带厚度先增加后减少; 当水深大于等于 1.55km 时, CO_2 混入使水合物稳定带厚度减小, 并随着 CO_2 含量的增长而不断减小。

3) N_2 混入 CH_4 会使水合物稳定带厚度减小, N_2 含量每增加 1%, 混合气体的水合物稳定带将减少约 4m。

参考文献

- [1] SLOAN E D, KOH C A. Clathrate hydrates of natural gases (Third edition)[M]. Florida: CRC Press, 2008: 1-28.
- [2] 王秀娟. 南海北部陆坡天然气水合物储层特征研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2006: 1-21.
- [3] KVENVOLDEN K A. Methane hydrate in the global organic carbon cycle[J]. Terra Nova, 2002, 14(5): 302-306.
- [4] KVENVOLDEN K A. Gas hydrates geological perspective and global change[J]. Reviews of Geophysics, 1993, 31(2): 173-187.
- [5] 甘华阳, 王家生. 天然气水合物潜在的灾害和环境效应[J]. 地质灾害与环境保护, 2004, 15(4): 5-8.
- [6] 王淑红, 宋海斌, 颜文. 天然气水合物的环境效应[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2004, 23(2): 160-165.
- [7] COLLETT T S. Natural-gas hydrates: Resource of the twenty-first century?[M]. Tulsa: AAPG, 2002: 74, 85-108.
- [8] COLLETT T S. Natural-gas hydrates of the Prudhoe Bay and Kuparuk river area, north slope, Alaska [J]. AAPG Bulletin-American Association of Petroleum Geologists, 1993, 77(5): 793-812.
- [9] SLOAN E D, KOH C A, SUM A K. Gas hydrate stability and sampling: The future as related to the phase diagram[J]. Energies, 2010, 3(12): 1991-2000.
- [10] TREHU A M, RUPPEL C, HOLLAND M, et al. Gas hydrates in marine sediments: Lessons from scientific ocean drilling [J]. Oceanography, 2006, 19(4): 124-142.
- [11] 陈祖安, 白武明, 徐文跃. 多组分天然气水合物在海底沉积层中稳定区及存在区的预测[J]. 地球物理学报, 2005, 04: 870-875.
- [12] 雷超, 任建业, 裴健翔, 等. 琼东南盆地深水区构造格局和幕式演化过程[J]. 地球科学, 2011, 36(1): 151-162.
- [13] 张功成, 米立军, 吴景富, 等. 凸起及其倾没端——琼东南盆地深水区大中型油气田有利勘探方向[J]. 中国海上油气, 2010, 06: 360-368.
- [14] 吴时国, 张光学, 郭常升, 等. 东沙海区天然气水合物形成及分布的地质因素[J]. 石油学报, 2004, 4: 7-12.

- [15] 吴时国, 孙启良, 吴拓宇, 等. 琼东南盆地深水区多边形断层的发现及其油气意义[J]. 石油学报, 2009, 01: 22–26.
- [16] KVENVOLDEN K A, MCMENAMIN M A. Hydrates of natural gas: A review of their geologic occurrence[J]. US Geological Survey Circular, 1980, 825:11.
- [17] 朱伟林, 张功成, 钟锴, 等. 中国南海油气资源前景[J]. 中国工程科学, 2010, 05: 46–50.
- [18] 姚根顺, 袁圣强, 马玉波, 等. 琼东南华光凹陷深水重力搬运沉积体系及其油气勘探[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2009, 3: 471–476.
- [19] 许东禹, 刘锡清, 张训华, 等. 中国近海地质[M]. 北京: 地质出版社, 1997: 13–42.
- [20] 万志峰, 夏斌, 蔡周荣, 等. 南海北部油气成藏区带的划分与勘探前景[J]. 天然气工业, 2010, 08: 4–8.
- [21] 王宏斌, 张光学, 梁劲, 等. 南海北部陆坡构造坡折带中的天然气水合物[J]. 沉积学报, 2008, 26(2): 283–293.
- [22] 黄保家. 琼东南盆地天然气潜力及有利勘探方向[J]. 天然气工业, 1999, 19(1): 34–39.
- [23] KAUL N, ROSENBERGER A, VILLINGER H. Comparison of measured and BSR-derived heat flow values, Makran accretionary prism, Pakistan[J]. Marine Geology, 2000, 164(1-2): 37–51.
- [24] 顾锋, 赵会军, 王树立. 盐类体系中天然气水合物相平衡条件的研究[J]. 石油与天然气化工, 2008, 37(2): 149–151.
- [25] 孙志高, 郭开华, 樊栓狮, 等. 含乙二醇和盐体系气体水合物相平衡测定与预测[J]. 上海交通大学学报, 2002, 36(10): 1509–1512.
- [26] 曾维平, 周蒂. GIS 辅助估算南海南部天然气水合物资源量[J]. 热带海洋学报, 2003(6): 35–45.
- [27] 袁叔尧, 邓九仔. 南海北部的温盐热结构[J]. 南海研究与开发, 1997(3): 19–24.
- [28] XU W Y, RUPPEL C. Predicting the occurrence, distribution, and evolution of methane gas hydrate in porous marine sediments[J]. Journal of Geophysical Research-Solid Earth, 1999, 104(B3): 5081–5095.
- [29] BREWER P G, ORR F M, FRIEDERICH G, et al. Deep-ocean field test of methane hydrate formation from a remotely operated vehicle[J]. Geology, 1997, 25(5): 407–410.
- [30] MAX M D. Gas hydrate and acoustically laminated sediments: Potential environmental cause of anomalously low acoustic bottom loss in deep-ocean sediments[R]. Washington D C: Naval Research Lab, 1990: 1–67.
- [31] 陈多福, 李绪宣, 夏斌. 南海琼东南盆地天然气水合物稳定域分布特征及资源预测[J]. 地球物理学报, 2004, 47(3): 483–489.
- [32] 何家雄, 祝有海, 姚永坚, 等. 南海北部边缘盆地二氧化碳地质及资源化利用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009: 45–163.
- [33] 陈多福, 赵振华, 解启来, 等. 琼东南盆地崖 13 气田天然气形成水合物的温压条件和厚度计算[J]. 地球化学, 2001, 30(6): 585–591.