

南海天然气水合物稳定带厚度及资源量估算

葛 倩^{1,2}, 王家生², 向 华^{1,2}, 胡高伟^{1,2}

1. 中国地质大学研究生院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

摘要: 中国的南海一直被人们认为蕴藏着丰富的天然气水合物资源, 综合中国南海的水深、地热梯度及底部水温等地质资料, 运用 Visual Basic . Net 编程分析在该海域范围内天然气水合物稳定带厚度, 讨论其分布特征, 并以此来评估该区域的水合物资源量。结果表明当地热梯度为 $0.06\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$, 在区域 1 中可能存在天然气水合物, 其稳定带的最大厚度可达 400 m, 天然气水合物分布较为规则, 从外向内逐渐增厚。但在区域 2 中由于受到水深和地热等因素的影响不存在天然气水合物, 此时天然气水合物的资源量约为 $0.55 \times 10^4\text{ km}^3$; 当地热梯度随机取值时, 该区的天然气水合物资源量约为 $0.57 \times 10^4\text{ km}^3$ 。通过对地热梯度取不同的值, 估算得到在该研究区天然气水合物的资源量约为 $0.6 \times 10^4\text{ km}^3$ 。

关键词: 天然气水合物; 南海; 稳定带厚度; 资源量。

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2006)02-0245-05

收稿日期: 2005-04-19

Computation of Thickness of Gas Hydrate Stability Zone and Potential Volume of Gas Hydrate in South China Sea

GE Qian^{1,2}, WANG Jia-sheng², XIANG Hua^{1,2}, HU Gao-wei^{1,2}

1. Graduate School, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The South China Sea has long been regarded as abundant in the resource of gas hydrate. Having integrated the data of the depth of the overall South China Sea, and that of geological conditions such as geothermal gradient and bottom water temperature, a Visual Basic . Net program is proposed to compute the thickness of the gas hydrate stability zone and potential volume of gas hydrate in the region. We find that in area 1 gas hydrate may exist, and the maximum thickness of the gas hydrate stability zone is about 400 m when geothermal gradient is $0.06\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$. The distribution of gas hydrate is very equal, the trend is being thicker from outside to inner. But in area 2 there is a lack of gas hydrate because of the depth, geothermal gradient and other factors, and the potential volume of gas hydrate is about $0.55 \times 10^4\text{ km}^3$. When the geothermal gradient is random, the potential volume of gas hydrate is about $0.57 \times 10^4\text{ km}^3$. Through getting the different geothermal gradients, we can calculate that the potential volume of gas hydrate in the South China Sea is about $0.6 \times 10^4\text{ km}^3$.

Key words: gas hydrate; South China Sea; gas hydrate stability zone; potential volume of gas hydrate.

0 引言

天然气水合物也称甲烷水合物, 通常是在一种特定的高压低温条件下由天然气(主要为甲烷)和水形成的似冰状白色固态晶体, 其外貌很像冰雪或

固体酒精, 点火可燃烧, 因此有人称其为“可燃冰”(金庆焕, 2000)。天然气水合物在世界各地分布广泛, 大多沿陆坡、陆隆或海台区展布。自然界产出的天然气水合物是 20 世纪 60 年代发现于西伯利亚的 Messoyakha 气田(Sloan, 1998)。20 世纪 70~80 年

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(No. 40232025); 国家自然科学基金项目(No. 40272052; 40472063); 教育部地质学理科基地班基金项目。

作者简介: 葛倩(1983—), 男, 中国地质大学(武汉)硕士研究生, 专业方向为海洋地质学。

E-mail: gq980447@163.com

代,天然气水合物在世界各地相继被发现,其作为一种潜在的未开发能源受到世界各国政府和学者的广泛关注。20 世纪 80 年代以来,由于天然气水合物形成和分解对全球气候变化和地质灾害引发是一种十分敏感的因素,使天然气水合物研究成为现今地学界一个活跃的前缘研究热点(Miles, 1995; Rao *et al.*, 1998)。

目前,普遍接受的天然气水合物资源量为 $10^5 \sim 10^7 \text{ km}^3$,葛倩等(2004)以布莱克海岭的地质背景为例,估算得到海底的天然气水合物资源量约为 $3.97 \times 10^5 \text{ km}^3$ 。

南海是西太平洋最大的边缘海之一,位于欧亚板块、太平洋板块以及印度洋板块的交汇处。三大板块的相互作用使该区地壳受到多方面的构造应力作用,形成了独特的地球物理场和边界构造特征(王宏斌等,2003)。目前普遍认为南海深水陆坡区蕴藏着丰富的天然气水合物资源。

从 20 世纪 90 年代末开始,国际大洋钻探和国内一些科学家的研究工作已经提供了一些南海具有水合物矿藏的证据(孙春岩等,2004)。1999 年 2 月—4 月,“JOIDES·决心号”在南海实施了深海钻探。以“东亚季风史在南海的记录及其全球气候意义”为主题的 ODP184 航次历时 2 个月,在南海南北 6 个深水站位钻孔 17 口,从水深 2 km 到 3.3 km 的海底钻入地层,取得了一些水合物的科学资料。2004 年 6—7 月间,德国“太阳号”科考船在南海进行中德合作项目《南海北部陆坡甲烷和天然气水合物分布、形成及其对环境的影响研究》SO-177 航次的考察,首次发现了南海天然气水合物气体“冷泉”喷溢形成的巨型碳酸盐岩(430 km^2),命名为“九龙甲烷礁”,并在“九龙甲烷礁”区碳酸盐结壳裂隙中发现了天然气水合物甲烷气体喷溢形成的菌席和双壳类生物,证实了“冷泉”仍在活动之中,同时取得了在南海北部陆坡的东沙东南海域浅表层沉积物中存在着天然气水合物的直接证据。

目前估算海底天然气水合物中甲烷资源量一般考虑天然气水合物分布范围、水合物稳定带厚度、沉积层的孔隙度、水合物在空隙中的浓度以及水合物分解甲烷的膨胀系数等因子,所以水合物稳定带厚度在天然气水合物资源评估中具有重要意义(Xu and Ruppel, 1999)。本文根据中国南海的水深、底部水温及地热梯度等数据资料,以先前的工作为基础运用 Visual Basic . Net 编程估算得出该海域不

同地区的水合物稳定带厚度分布特征以此来评估水合物的资源量,并对其进行分析。

1 中国南海陆缘构造特征

南海在早白垩世末、始新世末和中中新世末发生过 3 次构造运动,对陆坡区地质构造演化起了重要作用,尤以中中新统之下沉积盖层断裂构造发育,有些断裂自基底断至海底,既控制着陡坡地形的形成,又有利于烃气向上远距离输送;而晚中新世以来的构造活动趋于平静。长期平静有利于水合物的保存,具备形成水合物的地质构造环境(张光学等,2002)。南海北部陆坡位于华南地块和南海地块的衔接带上,南临南海地块的主体部分,西部为印支地块,东靠台湾—菲律宾岛弧,平均宽度达 550 km。陆坡地形复杂,海槽、海山、陡坎发育,许多大中型新生代沉积盆地跨越了陆坡区,最大沉积厚度超过 1×10^4 米,展示出了良好的天然气水合物勘探前景。南海东缘位于南海中央海盆洋壳与菲律宾岛弧之间,走向近南北。中央海盆洋壳沿此线向东插入岛弧地壳之下,形成明显的马尼拉海沟—吕宋火山岩带(弧)—西吕宋和北吕宋海槽的沟—湖—盆构造体系。越东—万安东断裂带构成了南海的西部边缘,走向近南北。该断裂为一条左旋走滑断裂,其南端在万安盆地的东缘,在南海西部边缘沿走滑断裂带发育有多个新生代含油气盆地,这些盆地呈狭长型,没有明显的分割性,早期以拉张断块作用为主,与板内断陷盆地相似;后期以剪切挤压作用为主,断裂、褶皱及底辟构造发育,沿边界主断裂可见到大规模的第四纪和现代的构造滑塌体。卢泊尔缝合带构成了南海的南部边缘,该带位于南海南部边缘、南沙地块曾母地幔异常隆起型陆壳之间,走向 NW。南海南部陆缘区发育有众多的新生代沉积盆地,不仅具有新生代沉积厚度大,断裂、褶皱、底辟构造发育的特点,而且海山、海台、海槽发育,对水合物的成藏非常有利(王宏斌等,2003)。

2 天然气水合物稳定带厚度及资源量的估算

天然气水合物稳定带厚度是资源量估算中最重要的参数,Dickens (2001)提出了海底天然气水合物资源量与水的活度、大陆坡深度、大陆架转折端的

表 1 南海天然气水合物稳定带厚度估算部分数据

Table 1 Part of data used in the computation of the thickness of gas hydrate stability zone in South China Sea

点号	水深(m)	地热梯度(℃·m ⁻¹)	底部水温(℃)	稳定带厚度(m)	稳定带底界温度(℃)
P ₁	2 350	0.092	4	182.34	20.78
P ₂	2 863	0.080	4	229.52	22.36
P ₃	2 882	0.092	4	199.27	22.33
P ₄	2 844	0.083	4	220.36	22.29
P ₅	2 332	0.113	4	146.95	20.61
P ₆	2 465	0.049	4	360.15	21.65

地热梯度及水深数据资料来源:www.ngdc.noaa.gov(美国国家地球物理数据中心).

深度、大陆坡坡度、底部水温以及地热梯度有着较为明显的关系,其中前 3 个参数中任何一个减小或者后 3 个参数中任何一个增大都会导致水合物资源量的减少.

天然气水合物稳定带的厚度主要受控于水深,一般情况下,水深越大,稳定带厚度也越大,另外海底温度和地热梯度也是其主要影响因子,因此在估算水合物稳定带厚度时,必须考虑水深、海底温度和地热梯度这 3 个主要参数.天然气水合物的相平衡条件和相应的压力—温度方程是计算海底天然气水合物稳定带厚度的理论基础(方银霞等,2002).Duan *et al.* (Duan *et al.*, 1992; Handa, 1990; Zatsepina and Buffett, 1997)通过大量实验得到的天然气水合物稳定带底界(BGHS)的热力学温度以及压力 P 在三相平衡曲线中的表达式分别为:

$$T = [T_b + G(z - z_{sf})] + 273.15, \tag{1}$$

$$\ln(P/P_0) = A + B/T + C \ln T. \tag{2}$$

(1)、(2)式中: T_b 为海底底部水温(℃); G 为地热梯度(℃/m); z 和 z_{sf} 分别代表沉积物和海底分别相对于标准海平面的深度(m); P_0 为一个标准大气压(0.101 325 MPa); A 、 B 和 C 为常数,在纯甲烷—纯水系统中分别为 -1 205.907、44 097 和 186.759 4 (Handa, 1990).随着系统中组分浓度的改变, A 、 B 和 C 也会发生变化.本文采用海水盐度为 35×10^{-3} 时,通过编程拟合得出 A 、 B 和 C 的值分别为 -1 218.184、44 401 和 188.771 5.

另外压强与深度的关系为:

$$P = \rho_{sw} g z. \tag{3}$$

(3)式中: ρ_{sw} 是海水的密度、 g 为重力加速度.

由于缺少深部的地热梯度,在本文中假设地热梯度 G 在同一点上不随深度的增加而改变.对于给定的海底温度 T_b 、水深 z_{sf} 、地热梯度 G 以及常数 A 、 B 、 C ,可运用牛顿法迭代法求解非线性方程组

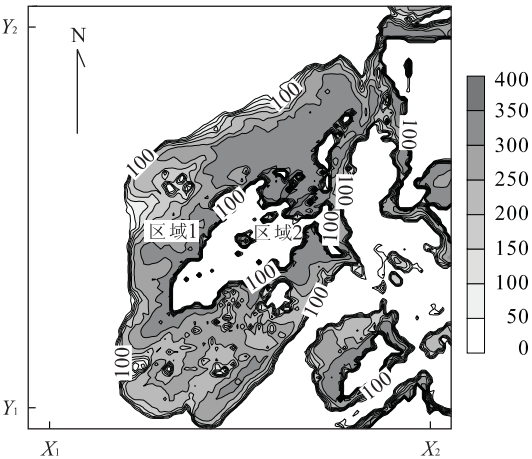


图 1 中国南海天然气水合物稳定带区域分布($G = 0.06 \text{ } ^\circ\text{C/m}$)

Fig. 1 Isopach of gas hydrate stability zone in South China Sea ($G = 0.06 \text{ } ^\circ\text{C/m}$)

(1)~(3),得到天然气水合物稳定带底界的深度 z ,从而可求出天然气水合物稳定带厚度 h :

$$h = z - z_{sf}. \tag{4}$$

再根据已有的地形数据和地热梯度等数据,运用数值积分方法可求得研究区域内天然气水合物的稳定带体积.其中,对于水深大于 4 km 的区域一般认为不太可能存在天然气水合物(Dickens, 2001),故在计算过程中视水深超过 4 km 的区域稳定带厚度为 0.

根据上述原理得到的数值算法,用 Visual Basic .Net 编程加以实现,完成了一个操作简单、运算方便的实用程序“海底天然气水合物稳定带厚度、资源量估算”,并结合南海海域范围内(图 1)的 240×240 个地形数据,以及地热梯度和底部水温等参数,对南海的水合物稳定带厚度和资源量作理论上的估算,以探讨天然气水合物在该海域的分布特征.

南海的地热梯度相对于地形数据来说非常少,但在水合物的稳定带厚度和资源量的估算中起到比

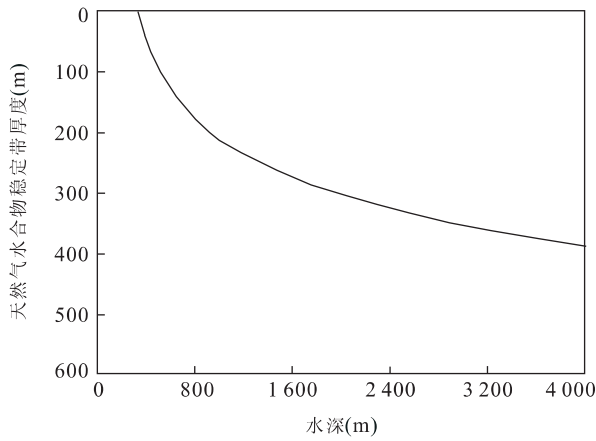


图 2 中国南海天然气水合物稳定带厚度与水深关系
($G=0.06\text{ }^{\circ}\text{C/m}$)
Fig. 2 Relationship between gas hydrate stability zone and depth in South China Sea ($G=0.06\text{ }^{\circ}\text{C/m}$)

较大的作用,所以我们采用了美国国家地球物理数据中心(NGDC)关于南海的地热梯度数据,在计算时取地热梯度的平均值 $0.06\text{ }^{\circ}\text{C/m}$ 来估算水合物的稳定带厚度和资源量,同时运用其数据得到了表 1,但由于篇幅所限,只列了部分数据.

另外由于在该区域内的地热梯度的变化比较明显,因此我们也取地热梯度在该区域内是随机分布的,主要是为了估算水合物的资源量,并与地热梯度取 $0.06\text{ }^{\circ}\text{C/m}$ 所得的水合物资源量进行对比,底部水温则基本稳定在 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$,得到了 $G=0.06\text{ }^{\circ}\text{C/m}$ 时的天然气水合物稳定带区域的分布图(图 1),以及天然气水合物稳定带与水深的关系图(图 2).

从图 1 可以清晰地看出,区域 1(阴影部分)中有天然气水合物分布,当地热梯度为 $0.06\text{ }^{\circ}\text{C/m}$,水合物稳定带最大厚度可达 400 m 左右,且分布较为规则,而在区域 2 的部分范围内则没有天然气水合物存在,同时计算得到研究区天然气水合物的资源量约为 $0.55\times 10^4\text{ km}^3$.

再通过对地热梯度进行随机取值分析,得到研究区天然气水合物资源量约为 $0.57\times 10^4\text{ km}^3$. 综合以上数据,可以得出在南海天然气水合物的稳定带最大厚度约为 400 m ,水合物资源量约为 $0.6\times 10^4\text{ km}^3$.

从图 2 中也可以看出水深与天然气水合物稳定带厚度的关系. 以地热梯度等于 $0.06\text{ }^{\circ}\text{C/m}$ 为例,水深对天然气水合物稳定带厚度的影响比较明显,随着水深的增加,天然气水合物稳定带厚度逐渐增大,但其曲线的斜率却逐渐减小.

3 讨论

在中国南海,天然气水合物分布广泛. 本文综合南海的水深、地热梯度及底部水温等地质资料,运用 Visual Basic . Net 编程完成了程序“海底天然气水合物稳定带厚度、资源量估算”,并采用美国国家地球物理数据中心(NGDC)关于南海的地热梯度数据,分析了在南海海域范围内天然气水合物的稳定带厚度和资源量,在计算过程中取地热梯度的平均值 $0.06\text{ }^{\circ}\text{C/m}$. 从天然气水合物稳定带厚度分布来看,在区域 1 的部分海域中可能存在天然气水合物,其稳定带厚度特征表现为外围薄,往中心逐渐变厚的趋势,但在区域 2 的部分海域没有天然气水合物分布,这主要是因为该海域位于南海的中央海盆,平均水深约为 4 km ,由于地热升温及构造运动,使水合物固体状态遭到破坏分解,无法形成一定厚度的水合物稳定带. 在南海海域稳定带最大厚度可达 400 m 左右,天然气水合物的资源量约为 $0.55\times 10^4\text{ km}^3$;当地热梯度随机取值时,该区的天然气水合物资源量约为 $0.57\times 10^4\text{ km}^3$. 通过对地热梯度取不同的值,我们估算得到在该研究区天然气水合物的资源量约为 $0.6\times 10^4\text{ km}^3$,相当于 $6\times 10^{10}\text{ t}$ 油当量,且水深对天然气水合物稳定带厚度的影响较明显,随着水深的增加,天然气水合物稳定带厚度的增大趋势逐渐变小.

通过以上的实验模拟,笔者认为天然气水合物资源量估算过程中的主要问题在于各个研究区需要建立符合实际情况的数学模型,虽说一些典型区域的模型具有较强的代表性,例如布莱克海岭,但在参数选择等方面还是存在差异,不可一味照搬,所以为了能更好地进行水合物稳定带厚度及资源量估算,下一阶段的工作重心应放在对估算模型的修改上,并且和其他研究程度较高的区域进行对比.

致谢:在数据的收集及论文修改阶段,得到了中科院地质与地球物理研究所宋海斌副研究员、国土资源部广州海洋地质调查局杨木壮教授级高工、国家海洋局第二海洋研究所方银霞研究员和中国地质大学(武汉)郭九麟同学的大力帮助,特在此表示衷心的感谢.

References

Dickens, G. R. , 2001. The potential volume of oceanic methane hydrates with variable external conditions, *Organic Geochemistry*, 32:1179—1193.

- Duan, Z., Moller, N., Greenberg, J., et al., 1992. The prediction of methane solubility in natural waters to high ionic strengths from 0 °C to 250 °C and from 0 to 1 600 bar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56:1451—1460.
- Fang, Y. X., Shentu, H. G., Jin, X. L., 2002. Computation of thickness of hydrate stability zone in Okinawa Trough. *Mineral Deposits*, 21(4): 414—418 (in Chinese with English abstract).
- Ge, Q., Wang, J. S., Xiang, H., et al., 2004. Calculation of potential volume of gas hydrate and its environmental effects. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 24(4): 127—133(in Chinese with English abstract).
- Handa, Y. P., 1990. Effect of hydrostatic pressure and salinity on the stability of gas hydrates. *Journal of Physical Chemistry*, 94:2652—2657.
- Jin, Q. H., 2000. Gas hydrate: A new future energy. *Engineering Science*, 2(11): 29—34 (in Chinese with English abstract).
- Miles, P. R., 1995. Potential distribution of methane hydrate beneath the European continental margins. *Geographic Research Letters*, 22(23): 3179—3182.
- Rao, Y. H., Reddy, S. I., Khanna, R., et al., 1998. Potential distribution of methane hydrates along the Indian continental margins. *Current Science*, 74(5): 466—468.
- Sloan, E. D., 1998. Clathrate hydrates of natural gases. Marcel Dekker, Inc., New York, 1—628.
- Sun, C. Y., Wang, H. Y., Niu, B. H., et al., 2004. Geochemical prospecting of gas hydrate at Xisha ocean trough. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(2): 135—140 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H. B., Zhang, G. X., Yang, M. Z., et al., 2003. Structural circumstance of gas hydrate deposition in the continental margin, the South China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 23(1): 81—86 (in Chinese with English abstract).
- Xu, W., Ruppel, C., 1999. Predicting the occurrence, distribution, and evolution of methane gas hydrate in porous marine sediments. *Geophys. Res.*, 104: 5081—5096.
- Zatsepina, O. Y., Buffett, B. A., 1997. Phase equilibrium of gas hydrate: Implications for the formation of hydrate in the deep sea floor. *Geophysical Research Letters*, 24: 1567—1570.
- Zhang, G. X., Huang, Y. X., Zhu, Y. H., et al., 2002. Prospect of gas hydrate resources in the South China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 22(1): 75—81 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 方银霞, 申屠海港, 金翔龙, 2002. 冲绳海槽天然气水合物稳定带厚度的计算. *矿床地质*, 21(4): 414—418.
- 葛倩, 王家生, 向华, 等, 2004. 海底天然气水合物资源量计算及环境效应评估. *海洋地质与第四纪地质*, 24(4): 127—133.
- 金庆焕, 2000. 天然气水合物——未来的新能源. *中国工程科学*, 2(11): 29—34.
- 孙春岩, 王宏语, 牛滨华, 等, 2004. 西沙海槽研究区天然气水合物地球化学勘探. *地球科学——中国地质大学学报*, 29(2): 135—140.
- 王宏斌, 张光学, 杨木壮, 等, 2003. 南海陆坡天然气水合物成藏的构造环境. *海洋地质与第四纪地质*, 23(1): 81—86.
- 张光学, 黄永祥, 祝有海, 等, 2002. 南海天然气水合物的成矿远景. *海洋地质与第四纪地质*, 22(1): 75—81.