

末次盛冰期以来西沙海槽天然气水合物储库变化及其对环境的影响

王淑红^{1,3}, 颜文^{1,3}, 宋海斌^{2,3}

1. 中国科学院南海海洋研究所边缘海地质重点实验室, 广东广州 510301

2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

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: 利用 Milkov 和 Sassen 的模型计算了目前及末次盛冰期时西沙海槽天然气水合物的稳定带(GHSZ)厚度及资源量, 讨论了末次盛冰期以来海洋底水温度增加和海平面升高对西沙海槽天然气水合物储库变化的影响. 计算结果表明, 底水温度增加使 GHSZ 厚度减薄, 资源量减少; 而海平面上升使 GHSZ 厚度增加, 资源量增加, 但底水温度变化对 GHSZ 厚度和资源量的影响比海平面变化的影响更大. 西沙海槽末次盛冰期时 GHSZ 平均厚度约为 299 m, 天然气水合物资源量约为 $2.87 \times 10^{10} \text{ m}^3$, 甲烷数量约为 $4.71 \times 10^{12} \text{ m}^3$; 目前的 GHSZ 平均厚度约为 287 m, 天然气水合物资源量约为 $2.76 \times 10^{10} \text{ m}^3$, 甲烷数量约为 $4.52 \times 10^{12} \text{ m}^3$. 由此可见, 自末次盛冰期以来西沙海槽的 GHSZ 平均厚度减薄了 $\sim 12 \text{ m}$, 大约 $1.1 \times 10^9 \text{ m}^3$ 的天然气水合物分解释放了 $1.9 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 的甲烷, 这些甲烷可能对环境产生了重要影响.

关键词: 天然气水合物; 末次盛冰期; 底水温度; 海平面; 西沙海槽.

中图分类号: P736

文章编号: 1000-2383(2008)01-0074-09

收稿日期: 2007-05-16

The Change of Gas Hydrate Reservoir and Its Effect on Environment in Xisha Trough since the Last Glacial Maximum

WANG Shu-hong^{1,3}, YAN Wen^{1,3}, SONG Hai-bin^{2,3}

1. Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China

2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

3. Guangzhou Center for Gas Hydrate Research, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

Abstract: In this article, Milkov and Sassen's model is selected to calculate the thickness of the gas hydrate stable zone (GHSZ) and the amount of gas hydrate in the Xisha Trough at present and at the last glacial maximum (LGM), respectively, and the effects of the changes in the bottom water temperature and the sea level on these were also discussed. The average thickness of the GHSZ in Xisha Trough is estimated to be 287 m and 299 m based on the relationship between the GHSZ thickness and the water depth established in this study at present and at LGM, respectively. Then, by assuming that the distributed area of gas hydrates is 8 000 km² and that the gas hydrate saturation is 1.2% of the sediment volume, the amounts of gas hydrate are estimated to be $\sim 2.76 \times 10^{10} \text{ m}^3$ and $\sim 2.87 \times 10^{10} \text{ m}^3$, and the volumes of hydrate-bound gases are $\sim 4.52 \times 10^{12} \text{ m}^3$ and $\sim 4.71 \times 10^{12} \text{ m}^3$ at present and at LGM, respectively. The above results show that the thickness of GHSZ decreases with the bottom water temperature increase and increases with the sea level increase, wherein the effect of the former is larger than that of the latter, that the average thickness of GHSZ in Xisha Trough had been reduced by $\sim 12 \text{ m}$, and that $1.9 \times 10^{11} \text{ m}^3$ of methane is released from approximately $1.1 \times 10^9 \text{ m}^3$ of gas hydrate since LGM. The released methane should have greatly affected the environment.

Key words: gas hydrate; last glacial maximum (LGM); bottom water temperature; sea level; Xisha Trough.

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 40706022, 40676043); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(No. KZCX2-YW-211); 中国科学院南海海洋研究所青年人才领域前沿项目及中国科学院边缘海地质重点实验室基金(No. MSGLO703).

作者简介: 王淑红(1977-), 助理研究员, 从事海洋天然气水合物研究. E-mail: wshhsbq@scsio. ac. cn

天然气水合物是一种类冰状的笼形结晶化合物,它通常由水分子形成笼形结构,而气体分子充填在其中(Sloan, 1998). 自然界中的天然气水合物主要存在于具有适宜的高压、低温以及充足甲烷供给的海洋沉积物的 间中(Kvenvolden, 1993). 因此,天然气水合物的稳定性受温度和压力等条件的影响,温压的变化将引起天然气水合物与天然气之间的相互转化,这一过程是一动态过程,影响了沉积圈—水圈—大气圈中甲烷和碳的平衡,并在地质时期曾多次发生过,对全球气候变化与全球碳循环产生了重要影响(宋海斌等, 2003). 近年来,有关地质历史演变中的天然气水合物演化研究蓬勃发展(Bains *et al.*, 1999; Norris and Röhl, 1999; Hesselbo *et al.*, 2000; Jacobsen, 2001; Kennedy *et al.*, 2001).

目前对于气候变化的研究主要集中在大气中温室气体的变化上. 有研究表明,晚第四纪时大气甲烷的快速增加与气候的快速变暖有关,而且这种变化大多出现在冰期结束时. 从末次盛冰期到全新世大气中的甲烷浓度增加了大约两倍(即从 350 ppbv 增加到 700 ppbv),而这种变化是在几十年时间内完成的(Severinghaus and Brook, 1999; Kennett *et al.*, 2003). 很多学者(Dickens *et al.*, 1997; Katz *et al.*, 1999)已经开始进行深海沉积物以及冰芯中地球化学的相关研究,并用这些研究来解释地质时期的快速气候变化,同时寻找与大气中温室气体变化有关联的控制因素. 目前被广泛接受的观点是甲烷水合物储库变化在第四纪气候历史中具有重要地位,其中几个短暂的全球变暖的起因都与水合物分解释放甲烷进入大气有关(Matsumoto, 1995; Dickens *et al.*, 1995, 1997, 2000; Retallack, 2001). 因此,冻土带和海洋沉积物中天然气水合物的形成和分解是影响大气中温室气体变化的一个关键因素(Chen and Cathles, 2003; Cathles and Chen, 2004). 目前,海洋和陆地的碳同位素记录表明了甲烷水合物是影响全球气候变化的一个重要因素. Dickens(2001)认为天然气水合物中释放的甲烷在古新世末增温事件(LPTM)中起了重要作用;同时已经有人用甲烷水合物快速分解释放甲烷来解释早侏罗世沉积(Hesselbo *et al.*, 2000)、晚侏罗世沉积(Padden *et al.*, 2001)及古新世海洋和大陆碳酸盐成分中(Koch *et al.*, 1992; Dickens *et al.*, 1995; Haq, 1998; Katz *et al.*, 1999; Hesselbo *et al.*, 2000; Dickens, 2001;

Jahren *et al.*, 2001; Padden *et al.*, 2001) $\delta^{13}\text{C}$ 的负偏移现象. Nisbet(1990)将现今的全球变暖与 13 500 a 前最近的一个主要冰期结束时天然气水合物中甲烷的释放相联系,指出在全球温暖期,极地天然气水合物分解并释放出甲烷进入大气圈,导致全球环境进一步变暖.

末次冰期是地质历史上最近的一次全球性冰期,根据氧同位素记录可以将 17~18 ka 作为末次冰期最盛时期,目前已有许多学者对末次冰期的结束进行了相关研究. 研究表明末次冰期的结束伴随着大气中甲烷和二氧化碳浓度的增加(Petit *et al.*, 1999). 最初大气中的甲烷浓度是缓慢增加的,但在冰期结束时出现了突然的快速增加(Monnin *et al.*, 2001). 天然气水合物分解对全球变化的影响是在 20 年前提出的(MacDonald, 1982; Chamberlain *et al.*, 1983),近期引起了广泛讨论(Brewer, 2000). 现已提出 3 种水合物分解的触发机制:极地地区地表温度(MacDonald, 1990a)与海洋地区底水温度的升高(Chamberlain *et al.*, 1983)均会导致天然气水合物稳定带底界的温度超过天然气水合物的稳定条件;地质历史时期海平面下降(MacDonald, 1990a)和快速沉积(Kvenvolden and Barnard, 1983)引起的压力变化也会使天然气水合物不稳定;目前的相关研究表明海底滑塌也会引起天然气水合物分解(Katz *et al.*, 1999). 由于甲烷和二氧化碳的正常排放并不会引起大气中温室气体的突然的快速的增加,因此天然气水合物所含温室气体(主要是甲烷)的释放及随后在大气中氧化成二氧化碳被认为是引起地质历史时期全球尺度的气候变化的原因.

末次盛冰期(18 ka)以来海平面及海洋底水温度的变化,极大地影响了南海天然气水合物稳定性. 虽然国内很多研究者(姚伯初, 2001; 方银霞等, 2002; 曾维平和周蒂, 2003; 陈多福等, 2004)已经使用不同方法计算了中国不同海域天然气水合物的稳定带(GHSZ)厚度和资源量,但他们都没有讨论外界条件变化对 GHSZ 厚度和资源量的影响. 本文利用 Milkov and Sassen(2001)的模型计算了目前及末次盛冰期时西沙海槽的 GHSZ 厚度及资源量,据此讨论了末次盛冰期以来海平面升高 115 m(中国科学院南沙综合科学考察队, 1993; Hantoro, 1995)和海洋底水温度增加 2 °C(Kienast *et al.*, 2001; Jeffrey *et al.*, 2002)对西沙海槽天然气水合物储库变化的影响.

1 西沙海槽地质背景

西沙海槽(图 1)位于中国南海北部,海南岛和西沙群岛之间偏东的一个近东西向条形、槽式区域,是一条近 EW 走向,介于华南陆缘与西沙、中沙群岛之间的现代海槽。

西沙海槽可分为北部斜坡、中部拗陷、南部隆起和东南拗陷 4 个二级构造单元,分别与西沙海槽的北部斜坡、槽底和南部斜坡 3 大地貌单元相适应,地壳性质从东到西由洋壳逐渐过渡为陆壳。西沙海槽地处南海北部大型油气田区中,其西部为莺歌海—琼东南大型天然气盆地,东北部为珠江口大型油气盆地。该地区为新生代沉积盆地,盆地自形成以来接受了广泛的浅海相、海陆过渡相沉积,累计沉积厚度较大(冯文科等,1988;陈铃等,1995)。该地区浅表层沉积物有机碳含量高,能形成较丰富的微生物气,相邻地区深部有机质含量高,热成因气充足,并具备良好的、有利于形成天然气水合物的温压条件(祝有海等,2005)。

综上所述,西沙海槽具有天然气水合物形成的地形、地貌、沉积等各种条件,而且目前已在该海域圈定了水合物远景区(杨涛等,2006)。然而自末次盛冰期(LGM)以来,南海适于水合物稳定存在的各种条件都发生了极大的变化。如末次冰期与间冰期的南海古地理构架产生了明显的变化。冰期阶段,南海海域明显缩小,特别是距今约 18 ka 的末次冰期鼎盛时期,南海海平面下降幅度最大可达 100~130 m

(中国科学院南沙综合科学考察队,1993),由此导致南边的卡里马塔海峡、马六甲海峡,东边的巴拉巴克海峡及北东向的台湾海峡的关闭,而巴士海峡、民都洛海峡也变浅和变窄;同时海洋底水温度比目前低大约 2 °C (Kienast *et al.*, 2001; Jeffrey *et al.*, 2002)。西沙海槽海域也经历了同样的变化,而这些变化对海底天然气水合物的稳定产生了很大的影响。因此,研究末次盛冰期以来西沙海槽天然气水合物储库变化具有重要意义。

由于西沙海槽处于南海北部陆坡区,其水深范围为 350~3 400 m,具有天然气水合物形成的各种适宜条件,因此本文的研究区域确定为 111.5°E~113.5°E、17°N~19°N 范围内。

2 西沙海槽 GHSZ 厚度及资源量计算方法

2.1 GHSZ 厚度计算方法

GHSZ 是海底以下一个具有特殊温压条件的区域,在该区域内天然气水合物能够稳定存在(Booth *et al.*, 1998)。研究表明,水深、底水温度、沉积物中的压力和地温梯度、孔隙水盐度、气体组成等都会影响 GHSZ 厚度。另外,沉积物的性质及矿物组成也会影响天然气水合物的稳定性(Clennell *et al.*, 1999)。Milkov and Sassen(2001, 2003)已提出描述这些影响的定量模型,并将之应用于墨西哥湾的 GHSZ 厚度计算中。

研究区的等深线如图 1 所示,水深变化范围为 350~3 400 m。根据南海已知的水深和底水温度数据可以得到图 2a(用于图中计算的数据来自网上公开数据(<https://128.160.23.42/gdemv/gdemv.html>)),从图 2a 中可以看到南海的底水温度在水深 100~200 m 时为 15 °C~20 °C,水深达到 1 000 m 时变为 4 °C~5 °C,水深与底水温度之间的关系可以用指数函数表示:

$$T_w = 373.41 \times B^{-0.6269}, \quad (1)$$

式(1)中, T_w 是底水温度,°C; B 是水深(海平面以下的深度),mbsl。在西沙海槽的相关计算中,也使用该方程。

南海不同区域的地温梯度相差很大,西沙海槽的地温梯度也存在一定的差异。有研究表明,西沙海槽的水深大约为 350~3 400 m,底水温度为 1 °C~

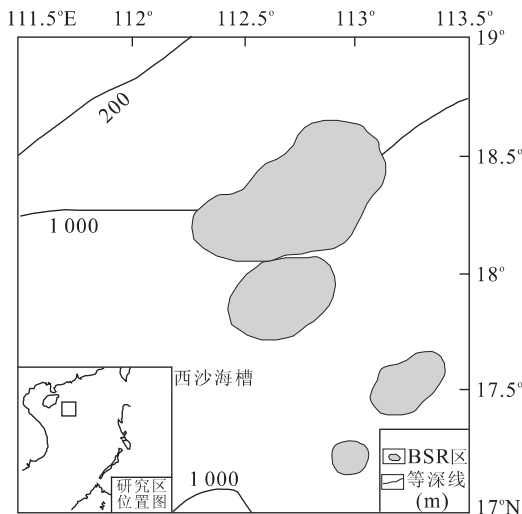


图 1 西沙海槽地理位置(杨涛等,2006)

Fig. 1 Location of the Xisha Trough

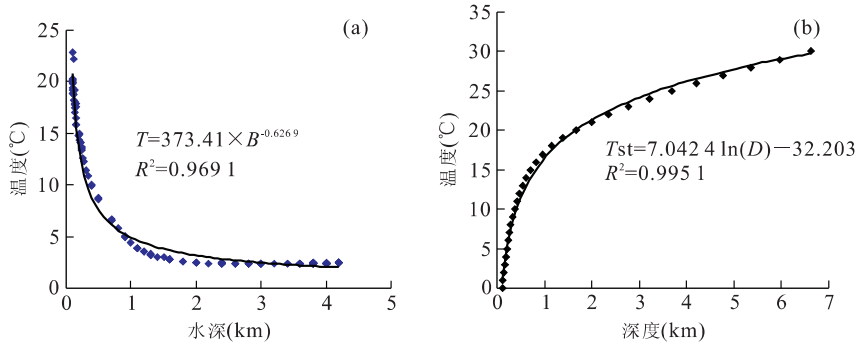


图 2 南海海底水温度与水深关系图(a)和西沙海槽天然气水合物相平衡曲线(b)

Fig. 2 Plot of bottom water temperature vs. water depth in South China Sea (a) and phase-equilibrium curves of gas hydrates in Xisha Trough (b)

5 °C(平均 3 °C),热流变化范围是 42~121 mW/m²,平均热流为 79 mW/m²,而地温梯度达到 40 °C/km (Yao *et al.*, 1994);ODP184 航次 1145、1148 井的地温梯度分别为 83 °C/km、90 °C/km(Wang *et al.*, 2000),而 1144、1146 井的地温梯度分别为 24 °C/km、59 °C/km (Spanger and Hayes, 1995; Gong and Li, 1998). 根据以上结果及计算的方便,笔者假定研究区域的地温梯度为 60 °C/km.

由于南海的孔隙水盐度变化较小,一般都大于 33×10^{-3} (薛万俊等, 1991; 曾维平和周蒂, 2003; 陈多福等, 2004),在本研究中假定其为 35×10^{-3} .

卢振权等(2002)利用陆上油气地球化学勘查方法(酸解烃、热释烃、蚀变碳酸盐方法)对西沙海槽海底浅表层沉积物各项测试指标进行了分析. 测试结果表明,西沙海槽各站的气体组成中甲烷大约占了 95%左右,其他气体为 5%. 根据以上结果,笔者在计算过程中假定西沙海槽天然气水合物中的气体组分包括甲烷、乙烷和丙烷,它们所占百分比分别为 95%、3%和 2%.

图 2b 显示了用 Sloan(1998)的 CSMHYD 水合物程序计算的孔隙水盐度为 35×10^{-3} 时研究区的天然气水合物的相平衡条件. 图 2b 的对数函数能够很好的反映研究区的天然气水合物稳定曲线.

$$T_{st} = 7.0424 \times \ln(D) - 32.203, \quad (2)$$

式(2)中, T_{st} 是天然气水合物在深度为 D (m)时的稳定温度,°C; D (m)是根据水柱和沉积物中的静水压力梯度 10 MPa/km 由压力转换而来.

根据式(1)(底水温度)和研究区的地温梯度值可以得到海底以下沉积物中任意深度处的温度计算方程:

$$T_s = 60 \times A/1000 + 373.41 \times B^{-0.6269}, \quad (3)$$

式(3)中, T_s 是海底以下深度 A (mbsf)处沉积物的温度. GHSZ 的底界出现在函数 3 和 2 的交叉点上,解决这个问题时可以使式(4)的函数为零:

$$f(B) = -60 \times C/1000 - 373.41 \times B^{-0.6269} + 7.0424 \times \ln(C+B) - 32.203. \quad (4)$$

为了研究 LGM 以来西沙海槽 GHSZ 厚度及资源量的变化情况,本文假定 LGM 时的海平面和海洋底水温度分别比目前低 115 m 和 2 °C. 海平面下降 115 m 时的简单模型如式(5)所示:

$$f(B) = -60 \times C/1000 - 373.41 \times (B-115)^{-0.6269} + 7.0424 \times \ln(C+B-115) - 32.203. \quad (5)$$

由于 LGM 时南海海平面下降 115 m 的同时底水温度降低了 2 °C,因此伴随着海平面下降的水温降低可能抵消了海平面下降对于天然气水合物稳定性的影响. 式(6)描述了海平面下降 115 m 和水温降低 2 °C 时对 GHSZ 的共同影响:

$$f(B) = -60 \times C/1000 - 373.41 \times (B-115)^{-0.6269} + 2 + 7.0424 \times \ln(C+B-115) - 32.203. \quad (6)$$

式(6)中, C 是 GHSZ 厚度,m. 计算时利用牛顿方法使这些函数为零.

2.2 天然气水合物资源量计算方法

西沙海槽天然气水合物资源量可以用式(7)计算:

$$V = M \times \Delta Z \times S, \quad (7)$$

式(7)中, V 为天然气水合物的体积,m³; M 为天然气水合物分布面积,km²,西沙海槽目前已圈定的水合物远景区面积为 5 000~8 000 km²,本文在计算过程中取其最大值(即 $M=8 000$); ΔZ 为水合物稳定带平均厚度,m; S 为天然气水合物在沉积物中的

饱和度, %。Milkov(2004)研究提出,天然气水合物在沉积物中的饱和度的全球平均值为 0.9%~1.5%,本文在计算中取其中间值,即 1.2%。

天然气水合物中的甲烷量 Q (标准状态下天然气水合物中天然气体积)为:

$$Q = V \times E. \quad (8)$$

式(8)中 V 代表天然气水合物的体积, m^3 ; E 为天然气水合物的容积倍率,取理论值 164(Satoh *et al.*, 1996)。

3 末次盛冰期以来西沙海槽天然气水合物储库变化

3.1 末次盛冰期以来海平面升高和底水温度增加对 GHSZ 厚度的影响

根据研究区已知的水深、地温梯度等数据,利用式(1)~(6)可以计算得到西沙海槽目前及末次盛冰期时 GHSZ 厚度与水深之间的关系(图 3)。图 3 可以说明研究区任意深度处的 GHSZ 厚度,但这只是一个理论模型,并没有考虑沉积物中可能存在的局部变化(流体温度、孔隙水盐度、气体组成和流动速率),而这些因素都可能会改变 GHSZ 厚度的理论值(Milkov and Sassen, 2000)。根据图 3 所显示的水深与稳定带厚度之间的关系,计算得到的研究区末次盛冰期及目前 GHSZ 厚度如图 4 所示。从图 3、4 中可以看到,末次盛冰期以来西沙海槽的 GHSZ 厚度是减薄的。

为了研究末次盛冰期时海平面下降和底水温度降低对 GHSZ 厚度的影响,笔者还计算了海平面下降 115 m 时 GHSZ 厚度变化情况(见图 3)。从图 3 中可以看到海平面下降 115 m 时研究区的 GHSZ 厚度减薄了~4.3%。由于 LGM 时海平面下降 115 m 的同时底水温度降低了 2 °C,因此伴随着海平面下降的水温降低可能抵消了海平面下降对于天然气水合物稳定性的影响。由图 3 还可以看到,末次盛冰期时研究区的 GHSZ 厚度增加了~4.1%,这表明天然气水合物在海平面较低时期可能是更加稳定的。冰期时,由于冰盖形成产生的海平面下降导致了水合物的局部分解(Maslin *et al.*, 1998),而底水温度的降低抵消了这种影响(Buffet, 2000),因此温度变化对于 GHSZ 的影响比压力变化的影响更大。

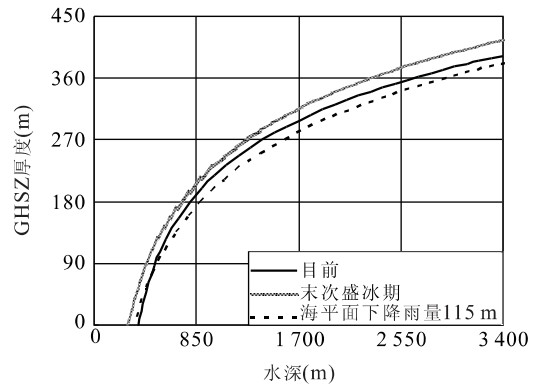


图 3 西沙海槽末次盛冰期及目前 GHSZ 厚度与水深关系图
Fig. 3 Calculated thickness of GHSZ vs. water depth at LGM and present in Xisha Trough

3.2 末次盛冰期以来西沙海槽天然气水合物储库变化及其对环境的影响

根据已知条件可以计算得到研究区末次盛冰期时的 GHSZ 平均厚度为~299 m;天然气水合物资源量为~ $2.87 \times 10^{10} m^3$;甲烷数量为~ $4.71 \times 10^{12} m^3$;研究区目前的 GHSZ 平均厚度为~287 m,天然气水合物资源量分别为~ $2.76 \times 10^{10} m^3$,甲烷数量为~ $4.52 \times 10^{12} m^3$ 。

对比图 4a, 4b 及上面计算得到的数据可以看到,自末次盛冰期以来南海的 GHSZ 平均厚度减薄了~12 m,大约 $1.1 \times 10^9 m^3$ 的天然气水合物分解释放了 $1.9 \times 10^{11} m^3$ 的甲烷。格陵兰冰芯记录(Severinghaus *et al.*, 1998; Severinghaus and Brook, 1999)表明末次冰期时的海水温度出现了非常快速的增加,这种快速变化必然会引起天然气水合物的迅速分解,进而引起海平面的升高,最终使水合物分解释放的天然气进入海洋和大气圈。Kennett *et al.* (2000, 2003)也指出,很多地质证据表明冰期和冰退期结束时甲烷的突然增加很可能是由甲烷水合物分解引起的,同时末次冰期时低海平面条件下海水温度的快速变化引起的甲烷水合物分解导致了大气中甲烷含量的增加。Nisbet (1990)和 MacDonald(1990b)认为甲烷水合物的大量分解是导致冰期结束的主要原因,而海平面下降导致的静水压力降低和底水温度变暖是造成水合物分解的重要因素(Summerhayes *et al.*, 1979; Carpenter, 1981)。因此可以认为末次盛冰期以来从西沙海槽天然气水合物储库中分解释放的甲烷可能对环境产生了重要影响。

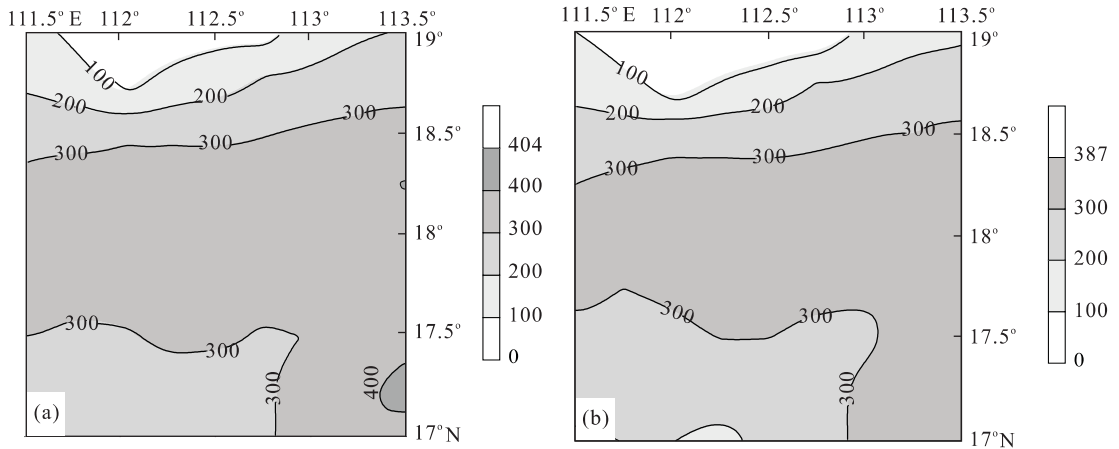


图 4 西沙海槽末次盛冰期时(a)和目前(b)天然气水合物稳定带等厚度图(单位:m)

Fig. 4 Maps of the calculated thickness of the GHSZ (in meters) of Xisha Trough at LGM (a) and at present (b)

目前有关天然气水合物释放的甲烷气体的去向问题已引起了很多学者的关注. 一般认为, 沉积物中甲烷流体/气向上运移的方式有 3 种: (1) 在沉积物中广泛分布的分散式运移; (2) 沿沉积物裂隙和断层面的中心式运移; (3) 海底滑坡或塌陷引发的大规模快速排放(陈忠等, 2006).

分散式运移是甲烷向上排放的主要形式, 在沉积物表层一般不形成排放口或特征地貌, 也不存在热异常以及可观察到的生物指标, 而重要指标是 BSR(Novosel *et al.*, 2005); 中心式运移是甲烷排放的重要方式, 可在接近排放口附近沉积物中形成与硫酸盐和甲烷有关的大量特征生物(Sibuet and Olu, 1998)、麻坑、泥底辟并发育碳酸盐和硫化物沉积(于晓果和李家彪, 2004)等特征; 甲烷大规模快速排放会引起海底地质灾害, 并对全球气候产生影响(Leifer and MacDonald, 2003).

根据前面的计算结果, 末次盛冰期以来西沙海槽有大约 $1.1 \times 10^9 \text{ m}^3$ 的天然气水合物分解释放了 $1.9 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 的甲烷. 这些甲烷的去向如何? 这里仅做一简单分析. 西沙海槽处在南海北部被动大陆边缘, 为主要受近东西向断裂控制的裂谷带. 自晚渐新世形成以来, 曾多次发生构造运动, 一直到第四纪仍然有构造活动的痕迹. 在地震剖面上, 可以看到断层一直切到第四系, 甚至到海底. 这些张性断层为深部热解成因气提供了良好的通道(王宏语等, 2005); 另外, 近期已在该海域发现并采集到少量的冷泉碳酸盐结壳. 基于以上证据, 可以初步认为西沙海槽的甲烷气体的排放很可能以中心式运移为主. 但由于在该区目前还没有找到大量的冷泉碳酸盐沉积或其

他证据, 因此, 甲烷气体的排放也可能存在其他两种方式, 这还需进一步的研究予以证实.

4 结论

本文利用 Milkov and Sassen(2001) 的模型估算了末次盛冰期以来西沙海槽的天然气水合物储库变化情况, 同时讨论了底水温度降低和海平面下降对 GHSZ 厚度及资源量的影响, 通过计算得到以下结论和认识:

末次盛冰期时西沙海槽海平面下降 115 m 使得 GHSZ 厚度减薄, 而底水温度降低 $2 \text{ }^\circ\text{C}$ 则使得 GHSZ 厚度增加, 并抵消了海平面下降 115 m 引起的 GHSZ 厚度减薄, 可见底水温度变化对 GHSZ 厚度的影响比海平面(压力)变化的影响更加明显.

西沙海槽末次盛冰期时的 GHSZ 平均厚度为 $\sim 299 \text{ m}$, 天然气水合物资源量为 $\sim 2.87 \times 10^{10} \text{ m}^3$, 甲烷数量为 $\sim 4.71 \times 10^{12} \text{ m}^3$; 目前的 GHSZ 平均厚度为 $\sim 287 \text{ m}$, 天然气水合物资源量为 $\sim 2.76 \times 10^{10} \text{ m}^3$, 甲烷数量为 $\sim 4.52 \times 10^{12} \text{ m}^3$. 自末次盛冰期以来西沙海槽有大约 $1.1 \times 10^9 \text{ m}^3$ 的天然气水合物发生了分解, 并释放了大约 $1.9 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 的甲烷, 这些甲烷可能主要以中心式运移的方式排放, 部分在海底浅部通过氧化还原反应形成冷泉碳酸盐等沉积, 而大部分可能扩散到大气环境中, 这部分甲烷气体有可能对环境产生重要影响.

References

- Bains, S., Corfield, R. M., Norris, R. D., 1999. Mechanisms of climate warming at the end of the Paleocene. *Science*, 285:724–727.
- Booth, J. S., Winters, W. J., Dillon, W. P., et al., 1998. Major occurrences and reservoir concepts of marine clathrate hydrates; Implications of field evidence. In: Henri- et, J. P., Mienert, J., eds., Gas hydrates; Relevance to world margin stability and climate change. *Geol. Soc. London Spec. Publ.*, 137:113–128.
- Brewer, P. G., 2000. Gas hydrates and global climate change. In: Holder, G. D., Bishnoi, P. R., eds., Gas hydrates; Challenges for the future. *Am. N. Y. Acad. Sci.*, 912:195–199.
- Buffet, B. A., 2000. Lathrate hydrates. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28:477–507.
- Carpenter, G., 1981. Coincident sediment slump/clathrate complexes on the U. S. Atlantic continental slope. *Geo. Mar. Lett.*, 1:29–32.
- Cathles, L. M., Chen, D. F., 2004. A compositional kinetic model of hydrate crystallization and dissolution. *J. Geophys. Res.*, 109;B08102.
- Chamberlain, J. W., Foley, H. M., MacDonald, G. J., et al., 1983. Climate effects of minor atmospheric constituents. In: Clark, W. C., ed., Carbon dioxide review, 1982. Oxford Univ. Press, New York, 255–277.
- Chen, D. F., Cathles, L. M., 2003. A kinetic model for the pattern and amounts of hydrate precipitated from a gas steam; Application to the Bush Hill vent site, green canyon block 185, gulf of Mexico. *J. Geophys. Res.*, 108(B1):2058.
- Chen, D. F., Li, X. X., Xia, B., 2004. Distribution of gas hydrate stable zones and resource prediction in the Qiongdongnan basin of the South China Sea. *Chinese Journal of Geophysics*, 47(3):483–489 (in Chinese with English abstract).
- Chen, L., Peng, X. C., Miu, W. C., 1995. Stratimagic interpretation in northern slope of South China Sea(7). China University of Geosciences Press, Wuhan, 92–106 (in Chinese).
- Chen, Z., Yan, W., Chen, M. H., et al., 2006. Advance in gas hydrate dissociation and fate of methane in marine sediment. *Advances in Earth Science*, 21(4):394–400 (in Chinese with English abstract).
- Clennell, M. B., Hovland, M., Booth, J. S., et al., 1999. Formation of natural gas hydrates in marine sediments 1. Conceptual model of gas hydrate growth conditioned by host sediment properties. *J. Geophys. Res.*, 104:22985–23003.
- Dickens, G. R., 2000. Methane oxidation during the late Paleocene thermal maximum. *Bull. Soc. Geol. Fr.*, 171:37–49.
- Dickens, G. R., 2001. On the fate of past gas: What happens to methane released from a bacterially mediated gas hydrate capacitor? *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2:5.
- Dickens, G. R., Castillo, M. M., Walker, J. C. G., 1997. A blast of gas in the latest Paleocene: Simulating first-order effect of massive dissociation of oceanic methane hydrate. *Geology*, 25:259–262.
- Dickens, G. R., O'Neil, J. R., Rea, D. K., et al., 1995. Dissociation of oceanic methane hydrate as a cause of the carbon excursion at the end of the Paleocene. *Paleoceanography*, 10:965–971.
- 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).
- Feng, W. K., Xue, W. J., Yang, D. Y., et al., 1988. Geo-environment of northern South China Sea in Late Quaternary. Guangdong Science and Technology Press, Guangzhou, 42–43, 62 (in Chinese).
- Ge, Q., Wang, J. S., Xiang, H., et al., 2006. Computation of thickness of gas hydrate stability zone and potential volume of gas hydrate in South China Sea. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(2):245–249 (in Chinese with English abstract).
- Gong, Z. S., Li, S. T., 1998. Continental margin basin analysis and hydrocarbon accumulation in the northern South China Sea. Science Press, Beijing, 510.
- Hantoro, W. S., 1995. The Sunda and Sahul continental platform: Lost land of the last glacial continent in the SE Asia. *Quat. Inter'l*, 29/30:129–134.
- Haq, B., 1998. Gas hydrates: Greenhouse nightmare? Energy panacea, or pipedream? *GSA Today*, 8:1–6.
- Hesselbo, S. P., Groecke, D. R., Jenkyns, H. C., et al., 2000. Massive dissociation of gas hydrate during a Jurassic oceanic anoxic event. *Nature*, 406:392–395.
- Jacobsen, S. B., 2001. Gas hydrates and deglaciations. *Nature*, 412:691–693.
- Jahren, A. H., Arens, N. C., Sarmiento, G., et al., 2001. Terrestrial record of methane hydrate dissociation in the Early Cretaceous. *Geology*, 29(2):159–162.
- Jeffrey, P., Atanas, V., Lyobomir, D., 2002. Changes of the Black Sea gas hydrate reservoir from the last glacial maximum to present. Proceeding of the fourth international conference on gas hydrates, Yokohama, 19–23.
- Katz, M. E., Pak, D. K., Dickens, G. R., et al., 1999. The source and fate of massive carbon input during the latest Paleocene thermal maximum. *Science*, 286(5444):1531–1533.

- Kennedy, M. J. , Christie-Blick, N. , Sohl, L. E. , 2001. Are Proterozoic cap carbonates and isotopic excursions a record of gas hydrate destabilization following earth's coldest intervals? *Geology*, 29: 443—446.
- Kennett, J. P. , Cannariato, K. G. , Hendy, I. L. , et al. , 2000. Carbon isotopic evidence for methane hydrate instability during Quaternary interstadials. *Science*, 288: 128—133.
- Kennett, J. P. , Cannariato, K. G. , Hendy, I. L. , et al. , 2003. Methane hydrates in Quaternary climate change. *AGU*, 1—217.
- Kienast, M. , Steinke, S. , Stattegger, K. , et al. , 2001. Synchronous tropical South China Sea SST change and greenland warming during deglaciation. *Science*, 291: 2132—2134.
- Koch, P. L. , Zachos, J. C. , Gingerich, P. D. , 1992. Correlation between isotope records in marine and continental carbon reservoirs near the Palaeocene/Eocene boundary. *Nature*, 359: 319—322.
- Kvenvolden, K. A. , 1993. Gas hydrates-geological perspective and global change. *Rev. Geophys.*, 31: 173—187.
- Kvenvolden, K. A. , Barnard, L. A. , 1983. Hydrates of natural gas in continental margins. In: Watkins, J. S. , Drakem C. L. , eds. , Studies in continental margin geology. *Am. Assoc. Pet. Geol. Mem.* , 34: 631—640.
- Leifer, I. S. , MacDonald, I. , 2003. Dynamics of the gas flux from shallow gas hydrate deposits: Interaction between oily hydrate bubbles and the oceanic environment. *Earth and Planetary Science Letters* , 210: 411—424.
- Lu, Z. Q. , Wu, B. H. , 2002. Experimental research on geochemical methods for prospecting gas hydrates in marine sediments. *Geoscience*, 16(3): 229—304 (in Chinese with English abstract).
- MacDonald, G. J. , 1982. The long-term impacts on increasing atmospheric carbon dioxide levels. Ballinger, Cambridge, MA.
- MacDonald, G. J. , 1990a. Role of methane clathrates in past and future climates. *Clim. Change*, 16: 247—281.
- MacDonald, G. J. , 1990b. The future of methane as an energy resource. *Ann. Rev. Energy*, 15: 53—83.
- Maslin, M. A. , Mikkelsen, N. , Vilela, C. , et al. , 1998. Sea-level and gas-hydrate-controlled catastrophic sediment failures of the Amazon fan. *Geology*, 26: 1107—1110.
- Matsumoto, R. , 1995. Causes of the $\delta^{13}\text{C}$ anomalies of carbonates and a new paradigm 'Gas-Hydrate Hypotheses'. *J. Soc. Japan*, 101: 902—924.
- Milkov, A. V. , Sassen, R. , 2000. Thickness of the gas hydrate stability zone, Gulf of Mexico continental slope. *Mar. Pet. Geol.* , 18: 981—991.
- Milkov, A. V. , Sassen, R. , 2001. Estimate of gas hydrate reservoir, northwestern Gulf of Mexico continental slope. *Marine Geology*, 179: 71—83.
- Milkov, A. X. , Sassen, R. , 2003. Two-dimensional modeling of gas hydrate decomposition in the northwestern Gulf of Mexico: Significance to global change assessment. *Global and Planetary Change* , 36: 31—46.
- Milkov, A. V. , 2004. Global estimates of hydrate-bound gas in marine sediments: How much is really out there? *Earth-Science Reviews* , 66: 183—197.
- Monnin, E. , Indermühle, A. , Dällenbach, A. , et al. , 2001. Atmospheric CO_2 concentrations over the last glacial termination. *Science*, 291: 112—114.
- Nisbet, E. G. , 1990. The end of the ice age. *Canadian Journal of Earth Science* , 27: 148—157.
- Norris, R. D. , Röhl, U. , 1999. Carbon cycling and chronology of climate warming during the Palaeocene/Eocene transition. *Nature*, 401: 775—778.
- Novosel, I. , Spence, G. D. , Hyndman, R. D. , 2005. Reduced magnetization produced by increased methane flux at a gas hydrate vent. *Marine Geology* , 216(4): 265—274.
- Padden, M. , Weissert, H. , De Rafelis, M. , 2001. Evidence for Late Jurassic release of methane from gas hydrate. *Geology*, 29(3): 223—226.
- Petit, J. R. , Jouzel, J. , Raynaud, D. , et al. , 1999. Climate and atmospheric history of the past 420 000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, 399: 429—436.
- Retallack, G. J. , 2001. A 300-million-year record of atmospheric carbon dioxide from fossil plant cuticles. *Nature* , 411: 287—290.
- Satoh, M. , Maekawa, T. , Okuda, Y. , 1996. Estimation of amount of methane and resources of natural gas hydrates in the world and around Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, 102: 959—971.
- Severinghaus, J. P. , Brook, E. J. , 1999. Abrupt climate change at the end of the last glacial period inferred from trapped air in polar ice. *Science*, 286: 930—933.
- Severinghaus, J. P. , Sowers, T. , Brook, E. J. , et al. , 1998. Timing of abrupt climate change at the end of the younger Dryas interval from thermally fractionated gases in polar ice. *Nature*, 391: 141—146.
- Sibuet, M. , Olu, K. , 1998. Biogeography, biodiversity and fluid dependence of deep-sea cold-seep communities at active and passive margins. *Deep-Sea Research Part II* , 45: 517—567.
- Sloan, E. D. , 1998. Clathrate hydrates of natural gases. Marcel-Dekker, New York.
- Song, H. B. , 2003. Researches on dynamic evolution of gas

- hydrate system (D): Its development in geological history. *Progress in Geophysics*, 18(2): 188—196 (in Chinese with English abstract).
- Spanger, N. S., Hayes, D. E. 1995. Gravity, heat flow, and seismic constraints on the processes of crust extension; Northern margin of the South China Sea. *Journal of Geophysical Research*, 100: 22447—22483.
- Summerhayes, C. P., Bornhold, B. D., Embley, R. W., 1979. Surficial slides and slumps on the continental slope and rise of south west Africa; A reconnaissance study. *Mar. Geol.*, 31: 265—277.
- The Multidisciplinary Oceanographic Expedition Team of Academia Sinica to Nansha Islands, 1993. Quaternary sedimentary geology of Nansha Islands and adjacent sea area. Hubei Science and Technology Press, Wuhan, 1—383 (in Chinese).
- Wang, H. Y., Sun, C. Y., Zhang, H. B., et al., 2005. Origin and genetic model of potential gas hydrates in Xisha Trough, South China Sea. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 25(4): 85—91 (in Chinese with English abstract).
- Wang, P., Prell, W. L., Blum, P., et al., 2000. Proc ODP, Init Repts, 184 [CD-ROM]. Ocean drilling program. Texas A&M University, College Station TX 77845—9547, USA.
- Xue, W. J., Huo, C. L., Si, G. X., 1991. The paleoclimate and paleoceanography of Late Quaternary in northern South China Sea. *Marine Geology Research*, 4: 1—96 (in Chinese with English abstract).
- Yang, T., Jiang, S. Y., Ge, L., et al., 2006. Geochemical characteristics of sediment pore water from site XS-01 in the Xisha Trough of South China Sea and their significance for gas hydrate occurrence. *Quaternary Sciences*, 26(3): 442—448 (in Chinese with English abstract).
- Yao, B. C., 2001. The gas hydrate in the South China Sea. *Journal of Tropical Oceanography*, 20(2): 20—28 (in Chinese with English abstract).
- Yao, B., Zeng, W., Hayes, D. E., et al., 1994. The geological memoir of South China Sea surveyed jointly by China & USA. China University of Geosciences Press, Wuhan, 1—102.
- Yu, X. G., Li, J. B., 2004. Advances in gas hydrate dissociation and effects on the ecology and environment. *Advances in Earth Science*, 19(6): 947—954 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, W. P., Zhou, D., 2003. GIS-aided estimation of gas hydrate resources in southern South China Sea. *Journal of Tropical Oceanography*, 22(6): 35—45 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Y. H., Rao, Z., Liu, J., et al., 2005. Geochemical anomalies and their implication from site 14, the Xisha Trough, the South China Sea. *Geoscience*, 19(1): 39—44 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈多福, 李绪宣, 夏斌, 2004. 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. *地球物理学报*, 47(3): 483—489.
- 陈铃, 彭学超, 廖宛岑, 1995. 南海北部陆坡区地震地层解释. *南海地质研究(七)*. 武汉: 中国地质大学出版社, 92—106.
- 陈忠, 颜文, 陈木宏, 等, 2006. 海底天然气水合物分解与甲烷归宿研究进展. *地球科学进展*, 21(4): 394—400.
- 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.
- 冯文科, 薛万俊, 杨达源, 等, 1988. 南海北部晚第四纪地质环境. 广州: 广东科技出版社, 42—43, 62.
- 葛倩, 王家生, 向华, 等, 2006. 南海天然气水合物稳定带厚度及资源量估算. *地球科学——中国地质大学学报*, 31(2): 245—249.
- 卢振权, 吴必豪, 2002. 海底水合物地球化学探测方法的试验研究. *现代地质*, 16(3): 229—304.
- 宋海斌, 2003. 天然气水合物体系动态演化研究(I): 地质历史演变. *地球物理学进展*, 18(2): 188—196.
- 王宏语, 孙春岩, 张洪波, 等, 2005. 西沙海槽潜在天然气水合物成因及形成地质模式. *海洋地质与第四纪地质*, 25(4): 85—91.
- 薛万俊, 霍春兰, 司桂贤, 1991. 南海北部晚第四纪古气候及古海洋学. *南海地质研究*, 4: 1—96.
- 杨涛, 蒋少涌, 葛璐, 等, 2006. 南海北部陆坡西沙海槽 XS-01 站位沉积物孔隙水的地球化学特征及其对天然气水合物的指示意义. *第四纪研究*, 26(3): 442—448.
- 姚伯初, 2001. 南海的天然气水合物矿藏. *热带海洋学报*, 20(2): 20—28.
- 于晓果, 李家彪, 2004. 天然气水合物分解及其生态环境效应研究进展. *地球科学进展*, 19(6): 947—954.
- 曾维平, 周蒂, 2003. GIS 辅助估算南海南部天然气水合物资源量. *热带海洋学报*, 22(6): 35—45.
- 中国科学院南沙综合科学考察队, 1993. 南沙群岛及其临近海区第四纪沉积地质学. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1—383.
- 祝有海, 饶竹, 刘坚, 等, 2005. 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*, 19(1): 39—44.