

编号: 0258-7106(2011)01-0156-07

南海西沙海槽 6 Ma 以来天然气水合物稳定带演化初探

金春爽¹, 汪集旻², 卢振权³

(1 国土资源部油气资源战略研究中心, 北京 100034; 2 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 3 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘要 水深、海底温度、地温梯度是影响天然气水合物稳定带的重要因素。文章通过海平面变化、底栖有孔虫氧同位素、构造热演化资料分析了水深、海底温度、地温梯度的变化, 进而探讨了南海西沙海槽地区 6 Ma 以来天然气水合物稳定带的演化。结果表明, 南海西沙海槽地区 6 Ma 以来天然气水合物稳定带经历了稳定、缓慢减薄、快速增厚、小幅度变化和减薄的一个过程。海底温度的变化对天然气水合物稳定带厚度影响最大, 热历史的影响次之, 海平面变化的影响最小。

关键词 地质学, 天然气水合物稳定带, 演化, 西沙海槽, 南海

中图分类号: P618.13

文献标志码: A

A tentative discussion on the evolution of the natural gas hydrates stable zone in Xisha Trough of South China Sea since 6 Ma B. P.

JIN ChunShuang¹, WANG JiYang² and LU ZhenQuan³

(1 Strategic Research Center for Oil and Gas Resources, Ministry of Land and Resources, Beijing 100034, China; 2 Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3 Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract

Based on the changes of sea level, oxygen isotope of benthic foraminifer and thermal evolution, this paper analyzed the changes of water depth, sea bottom temperature and geothermal gradient of Xisha Trough since 6Ma B. P., then predicted the evolution of the natural gas hydrates stable zone. The result shows that the natural gas hydrates stable zone has gone through stable stage, slowly attenuating stage, relatively quick incassation stage, gently changing stage and quickly attenuating stage. The sea bottom temperature change has most strongly affected the natural gas stable zone, sea level variation has had the weakest influence and geothermal gradient has exerted the intermediate influence.

Key words: geology, Natural gas hydrate stability zone, evolution, Xisha Trough, the South China Sea

南海西沙海槽位于南海西北部, 近 EW 走向, 介 西部水深 1 500 m, 东部加深至 3 400 m。西沙海槽于华南陆缘与西沙、中沙群岛之间, 海槽长 420 km, 具有良好的沉积构造条件, 邻近盆地烃源岩在晚中

新世(约6 Ma)已达到成熟(于永生,2001),具备了形成天然气水合物的气源条件;同时,西沙海槽位于水合物形成的温压区域内(Jin et al.,2002,金春爽等,2004)。近年来在该区开展了与天然气水合物相关的地质勘查工作,发现了大量的能够指示天然气水合物存在的地球物理指标:明显的似海底反射层(BSR)(孙春岩等,2005,杨涛等,2006)。由此可见,西沙海槽具备了天然气水合物存在的条件。

天然气水合物由于其巨大的能源意义,对全球气候的影响,以及分解后可能导致的地质灾害等原因,越来越引起许多国家的广泛关注,而研究天然气水合物稳定带的演化对于了解天然气水合物的形成、保存、演化及其对气候的影响都具有重要意义。影响天然气水合物稳定带的主要地质因素有水深、海底温度、地温梯度、天然气的组成和孔隙水盐度(金春爽等,2005)。本文在选取海水环境下气体组成为甲烷的条件基础上,通过分析水深、海底温度、地温梯度的变化来探讨南海西沙海槽地区天然气水合物稳定带的演化,以及上述三种因素对稳定带演化的影响程度。

1 水深变化

海平面升降反映了水深变化,升降幅度与 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变动相对应,Chappell等(1986)通过研究氧同位素值的变化,指出末次盛冰期的全球海平面在现今海平面以下114 m左右。Haq等(1987)绘出了35 Ma以来的全球海平面变化曲线(图1)。陈欣树等(1990)在研究珠江口外陆架第四纪最低海平面时,发现末次冰期海平面在现今海平面以下131 m。朱袁智等(1994)在研究南沙群岛永暑礁第四纪珊瑚礁成岩作用与海平面变化关系时,指出南沙群岛永暑礁地区末次盛冰期海平面可能在现今海平面以下142 m。这表明,随着气候的变化,南海海平面也是不断变化着的,由于目前尚无文献资料记录西沙海槽地区水深连续变化情况,本文主要通过全球海平面变化,结合现今水深情况来分析水深变化。

本文以西沙海槽地区C41测点(水深为2 447 m)的数据为基础,依据全球海平面变化(图1)推断西沙海槽区6 Ma以来水深的变化,所用公式为:

$$Z_{0t} = W_d + S_c$$

其中, Z_{0t} 是6 Ma以来某一时间的水深, W_d 是现今水深, S_c 是海平面变化数据,将 $W_d(2\,447\text{ m})$,

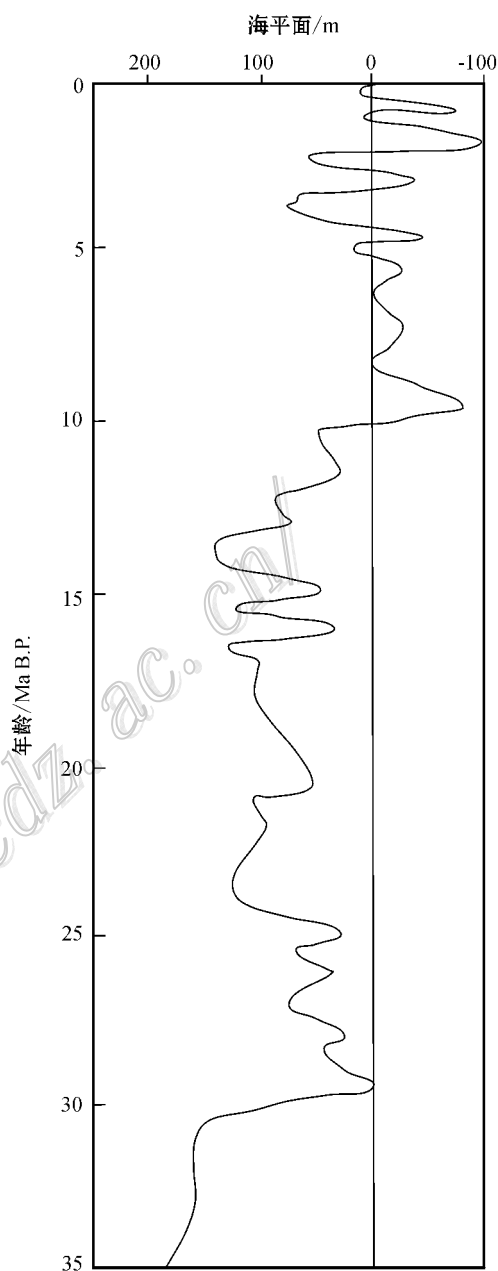


图1 35 Ma以来的全球海平面变化曲线
(据 Haq et al.,1987)

Fig. 1 Global sea level changes since 35 Ma
(after Haq et al.,1987)

S_c (从图1中读出)代入上述公式,求出6 Ma以来该点的水深变化(表1),在计算时,主要以0.2 Ma为时间间隔,考虑到后面计算海底温度和地温梯度时部分时间段内数据变化较大,为了最后计算天然气水合物稳定带时提供统一的时间、水深、海底温度、地温梯度基础数据,在一些时间段进行了加密取点(具体见表1),下文中不再重述。推算出6 Ma以来水深

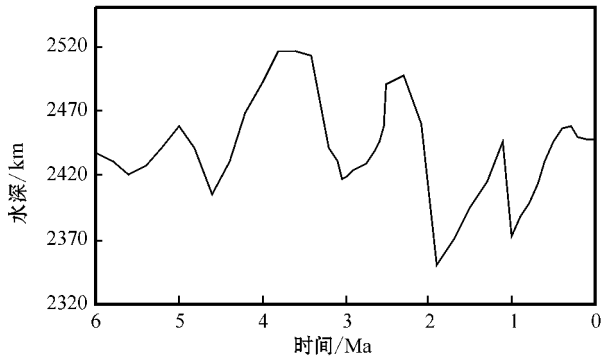


图2 南海西沙海槽区6 Ma以来水深变化曲线

Fig. 2 Water depth changes in Xisha Trough of the South China Sea since 6 Ma

变化,如图2,可见6 Ma以来,西沙海槽地区水深在2 350~2 516 m之间变化。

2 海底温度的变化

底栖有孔虫 *C. wuellerstorfi* 的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录通常被用来指示极地冰盖体积和底层水温的变化。1999年大洋钻探第184航次1148站位在南海采取了大量岩芯。该站位水深约3 279 m,底部年龄约3.2 Ma,提供了晚渐新世以来相对连续的古环境剖面(Wang, 2000)。翦知湜等(2001)完成了该站位2000余个浮游和底栖有孔虫样品的稳定同位素测试,并研究了最晚古新世近6 Ma以来的氧同位素变化。南海北部1148站位底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 的曲线呈明显的阶段性(图3),晚中新世、早上新世约3.1~6.0 Ma和中更新世以来0~0.9 Ma为两个相对稳定

的端员,其平均值分别为2.12‰和3.50‰,其间则发生了两次大的 $\delta^{18}\text{O}$ 变重:一次为3.1~2.5 Ma之间的阶梯状逐渐变重,另一次为中更新世时期的突然变重。约3.1 Ma之前,南海深层水 $\delta^{18}\text{O}$ 值波动不大($<0.9\text{‰}$),也说明深层水温度相对稳定,与这一时期全球气候相吻合。在3.1~2.5 Ma之间,南海深层水 $\delta^{18}\text{O}$ 增大约1.2‰,则表示北半球冰盖在这一时期形成。特别是,距今约2.7 Ma前,南海深层水 $\delta^{18}\text{O}$ 值变重到全新世水平,说明北半球冰盖在约2.7 Ma时就已经增大到现代的水平,由于3.1~2.5 Ma之间的 $\delta^{18}\text{O}$ 变重仅见于底栖有孔虫的记录中,说明南海的深层水曾发生明显降温,但考虑到冰盖体积效应,其降温幅度应小于3.8~4.9℃(温度变化1℃相当于 $\delta^{18}\text{O}$ 变化0.21‰~0.27‰)(翦知湜等2001)。

根据上述底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征,将6 Ma以来底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 变化发生阶段性变化(见图3)的时间分为几个时间段:0~0.01 Ma(全新世)、0.01~0.9 Ma、0.9~1.0 Ma、1.0~2.5 Ma、2.5~3.1 Ma、3.1~6.0 Ma,计算6 Ma以来海底温度,所用公式为:

$$t_{0t} = t_0 + (O_0 - O_t) / E_0$$

这里 t_{0t} 是6 Ma以来某一时间的海底温度, t_0 是现今海底温度(C41测点现今海底温度为2.4℃), O_0 是现今底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 值(取2.82‰), O_t 是某一时间的底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 值(从图3上读出), E_0 是温度变化1℃时 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化(这里取0.25‰),将相关数据代入上述公式,求出6 Ma以来的海底温度变化(表1,图4),可见,海底温度在1.4~5.192℃之间变化。

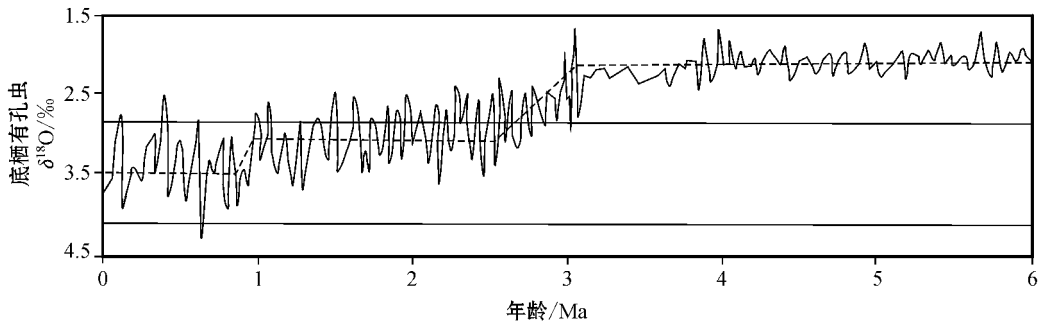


图3 ODP1148站位近6 Ma以来的底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 值(据翦知湜等2001)

Fig. 3 $\delta^{18}\text{O}$ values of benthic foraminifer in ODP site 1148 since 6 Ma (after Jian et al., 2001)

表 1 6 Ma 以来南海西沙海槽区水深、海底温度和地温梯度

Table 1 Water depth, sea bottom temperature and geothermal gradient in Xisha Trough of the South China Sea since 6Ma

时间/Ma	水深 Z_{0t}/m	海底温度 $t_{0t}/^{\circ}C$	地温梯度 GT $(^{\circ}C/km)$	时间/Ma	水深 Z_{0t}/m	海底温度 $t_{0t}/^{\circ}C$	地温梯度 GT $(^{\circ}C/km)$
6	2438	5.19	79.01	2.65	2440	2.24	92.54
5.8	2432	5.19	78.87	2.6	2445	2.08	92.64
5.6	2420	5.19	78.73	2.55	2459	1.91	92.74
5.4	2427	5.19	78.59	2.5	2491	1.75	92.84
5.2	2441	5.19	78.45	2.3	2496	1.75	92.76
5	2459	5.19	79.77	2.1	2460	1.75	92.67
4.8	2441	5.19	81.09	1.9	2350	1.75	92.59
4.6	2406	5.19	82.41	1.7	2371	1.75	92.20
4.4	2431	5.19	83.81	1.5	2396	1.75	91.80
4.2	2467	5.19	85.28	1.3	2415	1.75	91.57
4	2491	5.19	86.75	1.1	2446	1.75	91.34
3.8	2516	5.19	87.95	1	2373	1.75	91.12
3.6	2515	5.19	89.15	0.9	2388	1.40	90.99
3.4	2512	5.19	90.10	0.8	2399	1.40	90.86
3.2	2442	5.19	90.80	0.7	2414	1.40	90.73
3.1	2430	5.19	91.15	0.6	2432	1.40	90.61
3.05	2417	4.84	91.49	0.5	2445	1.40	90.48
3	2419	4.49	91.84	0.4	2455	1.40	90.38
2.95	2421	4.15	91.94	0.3	2457	1.40	90.28
2.9	2423	3.80	92.04	0.2	2449	1.40	90.18
2.85	2425	3.45	92.14	0.1	2448	1.40	90.08
2.8	2427	3.10	92.24	0.01	2447	2.40	89.98
2.75	2429	2.75	92.34	0	2447	2.40	90.22
2.7	2434	2.40	92.44				

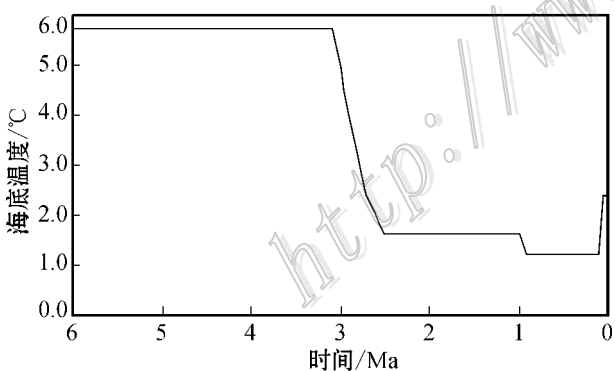


图 4 南海 6 Ma 以来的海底温度变化曲线

Fig. 4 Sea bottom temperature changes since 6Ma

3 地温梯度的变化

沉积物的热状态是随着构造热演化的不同阶段而不同的。本文通过分析西沙海槽地区构造热演化对热流的影响,研究该区 6 Ma 以来地温梯度的变化,进而分析天然气水合物稳定带的演化。

中美合作南海综合地球物理调查的西地学断面

穿过西沙海槽地区,姚伯初等(1994)对南海西地学断面进行了沉降史分析,该区发生了 4 次拉张事件,分别发生在距今约 5.2 Ma、15.2 Ma、36 Ma、54 Ma 几个时期。He 等(2001)对南海西地学断面北部沉降史和构造热演化进行了模拟研究,并对该断面各个时期的基底热流进行了计算(图 5)。在图 5 中,线段 6 穿过西沙海槽地区,该区 6 Ma 以来热流经历了降低、快速升高、降低 3 个阶段。

西沙海槽现今基底热流为 72 mW/m^2 ,沉积层厚约 $200 \sim 7000 \text{ m}$,沉积层生热率为 $2.0 \times 10^{-6} \text{ W/m}^3$ (He et al., 2001)。本文以西沙海槽地区 C41 测点为基础,该点海底热流为 83 mW/m^2 ,新生界沉积层厚约 5600 m ,基底热流为 72 mW/m^2 ,沉积层生热率对热流的贡献 11 mW/m^2 ,浅层沉积物热导率校正后平均为 $0.92 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 。

这里以热流变化来推算地温梯度的变化,所用的公式如下:

$$GT = (H_b + H_c) / T_c$$

其中,GT 是地温梯度, H_b 是基底热流, H_c 是沉积层

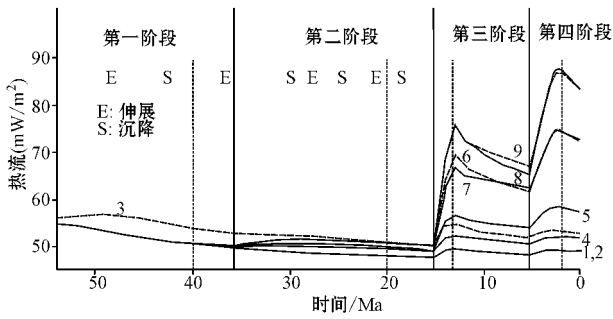


图5 南海西地质断面北部基底热流演化模型 (据 He et al. 2001 修改)

Fig. 5 The heat flow evolution model of western geological transect of the South China Sea (modified after He et al. , 2001)

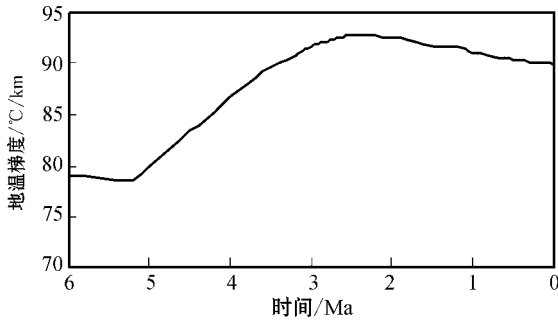


图6 南海西沙海槽地区 6 Ma 以来地温梯度的变化幅度
Fig. 6 Geothermal gradient changes in Xisha Trough of the South China Sea since 6 Ma

热流 H_c 是热导率。

这里 H_c 数据从图 5 中线段 6 中读出 H_c 为 11 mW/m^2 , T_c 为 $0.92 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 将 H_c 、 H_c 、 T_c 数据代入上述公式 求出 6 Ma 以来的地温梯度数据(表 1), 地温梯度在 $78.45 \sim 92.84^\circ\text{C}$ 之间变化,同时根据上述数据画出 6 Ma 以来地温梯度变化曲线,如图 6。

4 天然气水合物稳定带的演化

根据 6Ma 以来水深变化、海底温度变化和地温梯度变化数据(表 1) 按如下方法计算出天然气水合物稳定带厚度。计算时,采用了 Miles(1995)提出的海水中甲烷稳定边界曲线方程:

$$P = 2.8074023 + at + bt^2 + ct^3 + dt^4 \quad (1)$$

式中: $a = 1.559474 \times 10^{-1}$, $b = 4.8275 \times 10^{-2}$, $c = -2.78083 \times 10^{-3}$, $d = 1.5922 \times 10^{-4}$, P 是压力 (MPa) , t 是温度 ($^\circ\text{C}$)

海底温度 (t_{0t}) 和地温梯度所确定的温度—深度函数为:

$$t_z = t_{0t} + GT \times Z \quad (2)$$

式中 t_z ($^\circ\text{C}$) 是沉积物深度 $D = Z_0 + Z$ (海底以下深度, 单位为米) 处的温度, Z_{0t} 为水深 (m) , GT 为地温梯度。

压力 P (MPa) 与深度 D (m) 的关系为:

$$P = [(1 + C_1)D + C_2D^2] \times 10^{-2} \quad (3)$$

式中 $C_1 = (5.92 + 5.25\sin^2(\text{Lat})) \times 10^{-3}$, Lat 为纬度 $C_2 = 2.21 \times 10^{-6}$, 将 (2) 式转化为 Z 的函数并代入 (3) 式得:

$$P = \{ [1 + C_1] Z_0 + (t_z - t_0) / GT \} + C_2 \{ Z_0 + ((t_z - t_0) / GT) \}^2 \times 10^{-2} \quad (4)$$

公式 (4) 是单位沉积物中静水压力与温度的关系,可以在一个算法中找到式 (4) 与式 (1) 的同解。

西沙海槽 C41 测点纬度为 $18^\circ 19'$, 由此算出 $C_1 = 6.0936 \times 10^{-3}$ 。将 C_1 、 C_2 以及表 1 中的海底温度 (t_{0t}) 地温梯度 (GT) 和海水深度 (Z_{0t}) 代入 (1) 式和 (4) 式联立的方程、求解 选取其中的正实数解作为 t 的值。将 t 值代入公式 (2) 求出 Z 的值,即西沙海槽区 6 Ma 以来天然气水合物稳定带的厚度(表 2 图 7)。

表 2 南海西沙海槽区 6 Ma 以来天然气水合物稳定带厚度计算结果

Table 2 Thickness of the gas hydrates stable zone in in Xisha Trough of the South China Sea since 6 Ma B. P.

时间/Ma	6	5.8	5.6	5.4	5.2	5	4.8	4.6	4.4	4.2	4	3.8	3.6	3.4	3.2	3.1
稳定带厚度/m	199.2	198.9	198.7	199.3	199.8	199	197	194.2	193.7	193.6	193.5	193.2	192.3	191.4	188.5	187.7
时间/Ma	3.05	3	2.95	2.9	2.85	2.8	2.75	2.7	2.65	2.6	2.55	2.5	2.3	2.1	1.9	1.7
稳定带厚度/m	191.6	196.3	200.7	205.1	209.5	214.3	218.7	223.4	225.4	227.8	230.4	233.8	234	232.7	229	230.1
时间/Ma	1.5	1.3	1.1	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.01	0	
稳定带厚度/m	231.2	232.2	233.5	231.1	236.2	236.8	237.5	238.3	238.8	239.4	239.5	239.4	239.5	226.1	226.1	

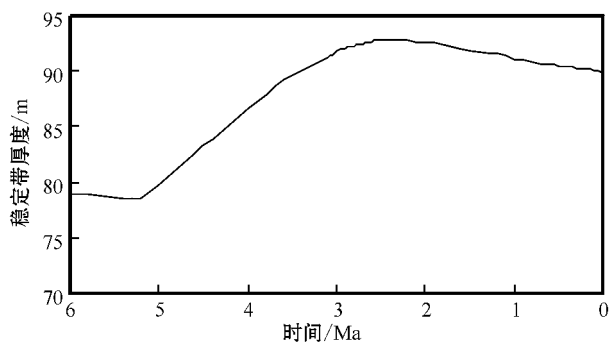


图7 南海西沙海槽6 Ma以来天然气水合物稳定带的演化

Fig. 7 The evolution of the gas hydrates stable zone in Xisha Trough of the South China Sea since 6 Ma

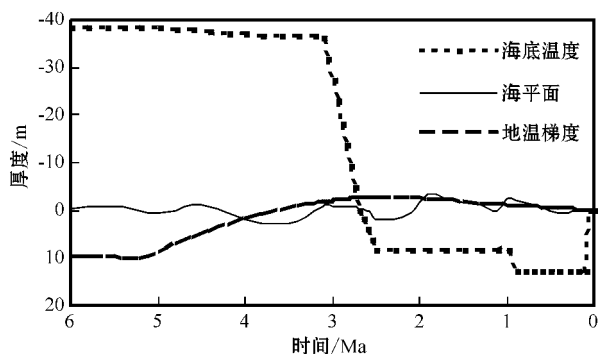


图8 海平面、海底温度以及地温梯度对天然气水合物稳定带厚度的影响

Fig. 8 The influence of sea level, sea bottom temperature and geothermal gradient on the gas hydrates stable zone

可见6 Ma以来西沙海槽地区天然气水合物稳定带变化范围为:187.7~239.5 m,现今厚度为226.1 m。距今3.1 Ma时,天然气水合物稳定带最薄,当时水深2 430 m,海底温度最高、地温梯度较高,分别为5.19℃和91.15℃/km;距今0.3 Ma时,天然气水合物稳定带最厚,当时水深2 457 m,海底温度最低、地温梯度相对较低,分别为1.4℃和90.28℃/km。

整体来看,6 Ma以来西沙海槽地区天然气水合物稳定带经历了基本不变(6~5.2 Ma)、缓慢减薄(5.2~3.1 Ma)、快速增厚(3.1~2.5 Ma)、小幅度变化(2.5~0.05 Ma)和减薄(0.05 Ma~现今)的一个过程。现今厚度不是历史上水合物稳定带最厚的时期,表明现今的温压条件不是最有利的,由此推测南海形成的天然气水合物在历史上曾经历过分解过程。

5 讨论与结论

6 Ma以来,西沙海槽地区水深在2 350~2 516 m之间变化,海底温度在1.4~5.192℃之间变化,地温梯度在78.45~92.84℃之间变化。通过对海平面、海底温度及构造热演化史的分析,计算出天然气水合物稳定带的演化,研究表明,南海西沙海槽区6 Ma以来天然气水合物稳定带厚度是不断变化的,天然气水合物在历史上曾经历过分解过程,现今的温压条件不是最有利的,这一变化过程也指示了南海北部天然气水合物稳定带的可能变化趋势。

为了进一步定量地讨论水深、海底温度、地温梯度几种因素在地质历史上对天然气水合物稳定带厚度的影响程度,本文分别计算了3种单因素变化时天然气水合物稳定带的厚度:第一种情况为只有海平面发生变化,而海底温度和地温梯度不变;第二种情况为只有海底温度发生变化,而海平面和地温梯度不变;第三种情况为只有地温梯度发生变化,海平面和海底温度不变。计算结果见图8,结果表明,海平面变化对天然气水合物稳定带演化影响最小,厚度变化范围在-3~2 m;地温梯度对水合物稳定带演化的影响较大,厚度变化范围在-6~22 m;海底温度变化对水合物稳定带的影响最大,厚度范围在-36~11 m。

志 谢 衷心感谢审稿专家对本文提出了许多建设性的意见和建议。

References

- Chappell J and Shackleton N J. 1986. Oxygen isotopes and sea level[J]. *Nature*, 324: 137-140.
- Chen X S, Bao L Y, Chen J R and Zhao X T. 1990. Discovery of lowest sea level in late Quaternary at the continental shelf off Pearl River Mouth[J]. *Tropic Oceanology*, 9(4): 73-77 (in Chinese with English abstract).
- Haq B U, Hardenbol J and Vail P R. 1987. Chronology of the fluctuating sea level since the Triassic[J]. *Science*, 235: 1156-1167.
- He L J, Wang K L, Xiong L P and Wang J Y. 2001. Heat flow and thermal history of the South China Sea[J]. *Physics of the Earth Planetary Interiors*, 126: 211-220.
- Jin C S and Wang J Y. 2002. A preliminary study of the gas hydrate stability zone in the South China Sea[J]. *Acta Geologica Sinica*, 76(4): 423-428.

- Jin C S, Wang J Y, Wang Y X and He L J. 2004. Geothermal field characteristics in the areas of gas hydrate distribution[J]. Chinese Journal of Geology, 39(3): 416-423 (in Chinese with English abstract).
- Jin C S, Wang J Y and Zhang G X. 2005. Factors affecting natural gas hydrate stability zone in the South China Sea[J]. Mineral Deposits, 24(4): 388-397 (in Chinese with English abstract).
- Miles P R. 1995. Potential distribution of methane hydrate beneath the Europe continental margins[J]. Geophysical Research Letters, 22(23): 3179-3182.
- Sun C Y, Niu B H and Wang H Y, et al. 2005. A study of gas hydrate geochemical exploration and deposit formation patterns in the Xisha ocean[J]. Earth Science Frontiers, 12(1): 243-251 (in Chinese with English abstract).
- Wang P X, Prell L and Blum P. 2000. Proceedings of the Ocean Drilling Program, initial reports V184[R]. College Station: Ocean Drilling Program. 1-103.
- Yang T, Jiang S Y, Ge L, Yang J H, Lin H F, Wu N Y, Zhang G X, Liu J and Chen D H. 2006. Geochemical characteristics of sediment porewater from site xs-01 in the Xisha Trough of south china sea and theirs significance for gas hydrate occurrence[J]. Quaternary Sciences, 26(3): 442-448 (in Chinese with English abstract).
- Yao B C, Zeng W J, Hayes D E and Spangler S. 1994. The geological memoir of South China Sea surveyed jointly by China & USA[M]. Wuhan: China University of Geoscience Press. 117-134 (in Chinese).
- Yu Y S. 2001. Thermal history modeling in Yinggehai Basin and Zhu III depression, Pearl River Mouth Basin (postdoctoral dissertation) [R]. Advisor: Wang J Y. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences. 11-43 (in Chinese).
- Zhu Y Z, Wang Y Q, Zhao H T and Sha Q A. 1994. The relationship between diagenesis of Quaternary coral reef of Yongshu reef in Nasha Islands and sea level changes [J]. Tropic Oceanology, 13(2): 1-8 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈欣树, 包砾彦, 陈俊仁, 赵希涛. 1990. 珠江口外陆架第四纪最低海面的发现[J]. 热带海洋, 9(4): 73-77.
- 翦知湓, 成鑫荣, 赵泉鸿, 王吉良, 汪品先. 2001. 南海北部近 6Ma 以来的氧同位素地层与事件[J]. 中国科学(D辑), 31(10): 816-822.
- 金春爽, 汪集暘, 王永新, 何丽娟. 2004. 天然气水合物地热场分布特征[J]. 地质科学, 39(3): 416-423.
- 金春爽, 汪集暘, 张光学. 2005. 南海天然气水合物稳定带的影响因素[J]. 矿床地质, 24(4): 388-397.
- 孙春岩, 牛滨华, 王宏语, 黄新武. 2005. 西沙海槽研究区天然气水合物地球化学勘探及成藏模式研究[J]. 地学前缘, 12(1): 243-251.
- 杨涛, 蒋少涌, 葛璐, 杨競红, 凌洪飞, 吴能友, 张光学, 刘坚, 陈道华. 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[J]. 第四纪研究, 26(3): 442-448.
- 姚伯初, 曾维军, Hayes D E, Spangler S. 1994. 中美合作调研南海地质专报[M]. 武汉: 中国地质大学出版社. 117-134.
- 于永生. 2001. 沉积盆地热史模拟分析-以莺歌海盆地和珠江口盆地珠三坳陷为例说明(博士后出站报告)[R]. 导师: 汪集暘. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所. 11-43.
- 朱袁智, 王有强, 赵焕庭, 沙庆安. 1994. 南沙群岛永暑礁第四纪珊瑚礁成岩作用与海平面变化关系[J]. 热带海洋, 13(2): 1-8.