

文章编号: 1000-0550 (2005) 02-0323-06

海底天然气渗漏系统演化特征及对形成水合物的影响

陈多福^{1,2} 冯 东^{1,2} 陈光谦¹ 陈先沛¹ Lawrence M Cathles³

1 (中国科学院广州地球化学研究所与南海海洋研究所边缘海地质重点实验室 广州 510640)

2 (中国科学院广州天然气水合物研究中心 广州 510640)

3 (Department of Earth & Atmospheric Sciences, Cornell University, Ithaca, New York 14853-1504, USA)

摘要 通过天然气沉淀水合物的动力学模拟计算,研究了墨西哥湾 GC185区 Bush Hill海底天然气渗漏系统的演化特征及对水合物沉淀的影响。渗漏早期,天然气渗漏速度大 ($q > 18.4 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{a}$),海底沉积以泥火山为主,渗漏天然气具有与气源天然气几乎一致的组成,形成的水合物具有最重的天然气成分。渗漏晚期,天然气渗漏速度很慢 ($q < 0.55 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{a}$),在海底附近没有水合物沉淀,主要以冷泉碳酸盐岩发育为主,水合物产于海底之下一定深度的沉积层中。介于二者间的渗漏中期 ($q: 0.55 \sim 18.4 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{a}$),海底发育水合物、自养生物群为特征,渗漏速度控制了水合物和渗漏天然气的组成及沉淀水合物的天然气比例。Bush Hill渗漏系统近 10 年的深潜重复采样显示,渗漏天然气和水合物天然气的化学组成在时空上是多变的,相对应的渗漏速度在时间上的变化约为 3 倍,在空间上的变化近 2 个数量级。

关键词 天然气渗漏系统的演化 天然气渗漏特征 水合物沉淀

第一作者简介 陈多福 男 1962 年出生 研究员 天然气水合物

中图分类号 TE122.1⁺1 **文献标识码** A

1 引言

海底天然气渗漏 (gas venting) 在全球是一个广泛分布的自然现象^[1-7]。深水天然气渗漏系统是水合物形成的合适场所^[6-7]。在合适的海底环境 (温度和压力),部分渗漏天然气将沉淀为水合物^[8]。冷泉碳酸盐岩、化学自养生物、天然气水合物、海底天然气喷溢等标志着海底天然气渗漏系统的发育^[9-18]。美国墨西哥湾是天然气渗漏发育的典型地区,已发现有几百个海底天然气渗漏系统^[19-20],水合物广泛发育于水深超过 440 m 海底沉积中,其中约 80% 产于渗漏活动的断裂系统中^[21],已在 50 余个渗漏系统海底采集到水合物样品^[18; 22-26]。事实上,热成因天然气渗漏始终与断裂伴生,与石油有关的烃类气体通过这些断裂从深部的烃源岩和储藏运移至海底^[18; 24-28]。海底地质填图和载人深潜观测表明渗漏系统的天然气渗漏速度是多变的,同时,物理、化学和生物特征也不断变化^[16-19]。海底天然气渗漏系统的快速阶段喷出大量的碎屑沉积物和富碳氢化合物,形

成泥火山和呈层状分布于海底的泥流沉积。渗漏系统的中等速度阶段,以化学自养生物群、近海底的水合物沉淀广泛发育为主,有少量的小型泥火山。渗漏系统的慢速阶段常是丘状或烟囱状的自生碳酸盐岩、硬底、板片、结核和一些特殊的自生沉积如重晶石等。尽管不完全如此,至少一些地区海底渗漏系统存在从快向慢速演化的过程,如 GC 338 地区的重晶石烟囱建立于更新世泥流沉积之上^[16]。

Bush Hill 是墨西哥湾也可能是世界上研究最好的处于中速演化阶段的天然气渗漏系统。海底天然气渗漏系统发育于 GC 185 块区与生长断裂相连的逆断层系中,海底正在喷溢天然气和沉淀水合物,同时海底冷泉生物群非常发育^[8-11; 22],海底回声探测能清晰地观测到海底喷溢的天然气在水体中形成的羽状体^[18-19]。

近 10 年来 5 次利用载人深潜器对 Bush Hill 海底天然气渗漏系统观测表明海底渗漏天然气、表层水合物天然气、海底水温变化明显 (表 1)^[22, 23, 26, 29, 30]。

海底渗漏系统天然气沉淀水合物的动力学模型

分析表明,在 Bush Hill 近 10ka 的海底天然气渗漏系统的活动中,平均有 9% 的渗漏天然气沉淀为水合物,并且渗漏天然气沉淀为水合物的量、水合物和渗漏天然气的组成主要由渗漏速度所控制^[8]。本文的目的是运用动力学模型确定渗漏系统的演化特征及对形成水合物的影响。

2 海底天然气渗漏系统的演化阶段

2.1 海底天然气渗漏系统水合物沉淀动力学模型

海底天然气渗漏是深部气源天然气向上运移和沉淀水合物的过程,渗漏天然气的质量由于水合物沉淀而将随时间减少,并可描述为^[8]:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -k(X_{3+4}^{v-gas} - X_{3+4}^{equ}) \exp\left[\frac{E}{R}\left(\frac{1}{T^*} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (1)$$

式中 m 为形成水合物的天然气质量。 k 是一个反应动力学常数。 X_{3+4}^{v-gas} 代表渗漏天然气 $C_3 + C_4$ 组分的质量分数。 X_{3+4}^{equ} 为选定的温度和压力下与水合物处于平衡态的天然气的 $C_3 + C_4$ 质量分数。 E 代表该反应的活化能。 R 是气体常数。 T^* 为参照温度 273.15 K。 T 为渗漏天然气所在深度处的温度 (K)。若 $X_{3+4}^{v-gas} > X_{3+4}^{equ}$, 渗漏天然气沉淀水合物,渗漏天然气的质量减小;若 $X_{3+4}^{v-gas} < X_{3+4}^{equ}$, 水合物(如果存在的话)溶解,渗漏天然气的质量增加。

对于渗漏系统中天然气沉淀水合物比例计算,首先用热力学方法确定渗漏天然气形成水合物稳定带深度 (GHSZ)^[8],然后,把 GHSZ 分成若干等距深度区间,渗漏天然气向上运移穿过第一个(最深的)深度区间(从 z_1 到 z_2),由式 (1) 计算形成水合物的渗漏天然气量。然后剩余渗漏天然气继续向上运

移,进入第二个深度区间(从 z_2 到 z_3)。重复这种方法到达海底,使深部气源天然气(如 Bush Hill 渗漏系统深部的 Joliet 油气藏天然气 $X_{3+4}^{j-gas} = 0.04675$)转变为海底观测到的渗漏天然气组成 ($X_{3+4}^{v-gas} = 0.02645$) 为止。详细的计算过程见文献 [8]。

2.2 影响海底渗漏天然气和水合物天然气化学组成的因素

海底渗漏系统气源天然气 (X_{3+4}^{j-gas}),海底温度 (T_{sf}),海底之下地温梯度 (G),天然气渗漏速度 (q) 控制了渗漏天然气和水合物天然气的化学组成^[8]。美国 GC185 区的 Bush Hill 渗漏系统是 Joliet 油气藏天然气沿断裂向上运移,部分渗漏天然气沉淀为水合物,部分渗漏天然气进入水体。Joliet 油气藏天然气的 $C_3 + C_4$ 质量分数 X_{3+4}^{j-gas} 为 0.031 ~ 0.06 (作为气源)。墨西哥湾 GC185 块区 Bush Hill 海底 540 m 水深测定的温度为 6 ~ 11, 平均为 7^[21,22], 河流引起的海底环流可以使 500 m 水深的温度达 14^[15-16,22], 因此,动力学模拟计算中选择 Bush Hill 的海底温度参数变化为 6 ~ 14。Bush Hill 海底钻孔实测地温梯度为 20 / km, 墨西哥湾海底渗漏系统的急速渗漏可能引起地温梯度的变化^[15,16], 一些泥砂喷溢地区的快速渗漏可使海底温度上升 > 10^[15,31], 因此, 15 ~ 50 / km 应该是 Bush Hill 可能出现的地温梯度范围。控制海底渗漏天然气和水合物天然气化学组成(表 1)变化的参数见表 2。海底渗漏系统的渗漏速度变化于 0.55 ~ 55 kg/m²-a, 这是 Bush Hill 合理的变化范围。

四个参数 (X_{3+4}^{j-gas} , T_{sf} , G , q) 可组合成 6 种变化,图 1 显示了计算的海底渗漏天然气组成可能出现的变化范围。首先图 1 表示了油气藏天然气 $C_3 + C_4$ 范围

表 1 Bush Hill 海底天然气渗漏系统海底渗漏天然气和水合物天然气成分观测值

Table 1 Observed composition of vent and hydrate gases in the Bush Hill gas vent system

渗漏天然气	时间	$T/$	C_1	C_2	$C_3 + C_4$	水合物气	C_1	C_2	$C_3 + C_4$
V-a	1993	7.35	88.0	8.0	0.036	H-1	83.1	7.6	0.092
V-b	1993	7.35	88.0	7.5	0.038	H-2	71.7	10.6	0.169
V-1	1995	9.10	93.2	4.3	0.024	H-3	80.2	9.40	0.101
V-2	1995	9.10	93.5	4.3	0.020	H-4	72.1	12.4	0.153
V-3	1995	9.10	94.7	3.9	0.013	H-5	85.7	6.30	0.080
V-4	1995	9.10	94.6	3.8	0.013	H-6	71.8	3.40	0.248
V-5	1995	9.10	91.1	4.8	0.034	H-7	73.9	4.90	0.211
V-6	1997	7.00	90.4	4.5	0.049	H-8	72.1	10.5	0.166
V-7	1997	7.00	95.9	2.4	0.015	平均	76.33	8.1375	0.1525
V-8	1998	7.00	93.4	4.1	0.023				
V-9	2000	6.50	92.7	4.6	0.026				
平均		7.00	92.32	4.75	0.02645				

V-9 样品及采样时的温度为 Sassen 未发表资料。其它据文献 [21 ~ 22; 26; 29 ~ 31]

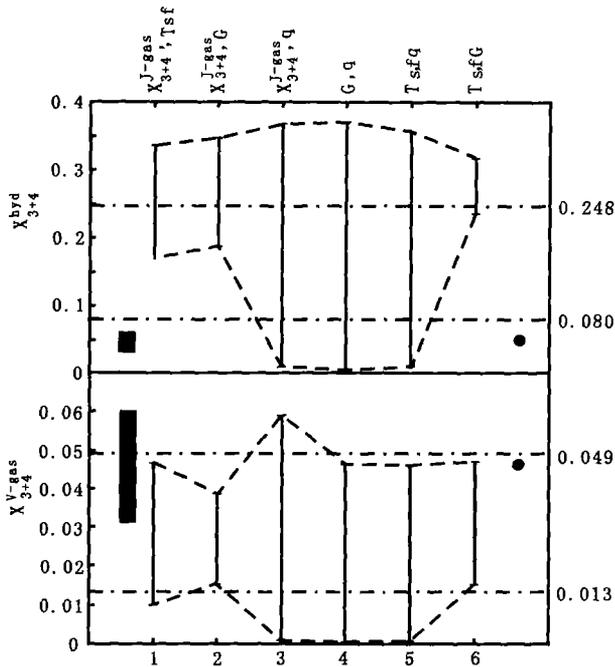


图 1 根据表 2 中的控制参数变化模拟水合物和渗漏天然气组成范围

点划线区表示海底观测渗漏天然气和水合物天然气组成范围。黑色区 Joliet 油气藏天然气组成,黑点为其平均组成。横坐标上的数字为表 2 中第一行的参数变化组合编号,组合内具体参数标于图的顶部,其变化范围见表 2。垂直线所示范围为该组合参数变化范围计算的海底渗漏天然气和水合物天然气 $C_3 + C_4$ 质量分数的变化范围。

Fig 1 Ranges in vent gas and hydrate composition computed for the parameter ranges defined in Table 2

表 2 控制海底渗漏天然气和水合物天然气化学组成变化的计算参数范围

Table 2 Ranges of parameters used to calculation of the chemical changes of vent and hydrate gas

	1	2	3	4	5	6
X_{3+4}^{J-gas}	0.031 ~ 0.06	0.031 ~ 0.06	0.031 ~ 0.06	0.04675	0.04675	0.04675
$T_{sf} / (^\circ C)$	5 ~ 15	7	7	7	5 ~ 15	5 ~ 15
$G / (^\circ C / km)$	20	15 ~ 50	20	15 ~ 50	20	15 ~ 50
$q / (kg/m^2 \cdot a)$	1.84	1.84	0.55 ~ 55.26	0.55 ~ 55.26	0.55 ~ 55.26	1.84

X_{3+4}^{J-gas} 为 Joliet 油气藏天然气组成测定范围^[17]; $T_{sf} (^\circ C)$ 为海底温度; $G (^\circ C / km)$ 为海底地温梯度; $q (kg/m^2 \cdot a)$ 天然气渗漏通量, 1.84 $kg/m^2 \cdot a$ 是 Bush Hill 渗漏系统的平均计算值, 0.55 $kg/m^2 \cdot a$ 是 Bush Hill 渗漏系统海底没有水合物沉淀时的边界值, 55.26 $kg/m^2 \cdot a$ 是 Bush Hill 渗漏系统沉淀水合物后到达海底的剩余天然气组成与气源天然气 X_{3+4}^{J-gas} 几乎一致时的计算值。第一行中的数字为参数变化组合编号, 对应于图 1 中横坐标上垂直线的数字, 组合编号的参数变化范围列于相应的列中, 模拟计算的海底渗漏天然气和水合物天然气组成变化范围在图 1 中用标有相应数字的垂直线表示。

变化。如果天然气组成差异是渗漏天然气流量变化所引起, 这种空间上的流量变化几乎达二个数量级, 时间上的变化达约三倍 (图 2b 右侧纵坐标及表 3)。慢速渗漏到达海底的天然气 $C_3 + C_4$ 含量很低, 快速

是近 10 年 Bush Hill 海底渗漏天然气实测范围的一半, 海底水合物天然气 $C_3 + C_4$ 测定值均大于油气藏天然气 $C_3 + C_4$ 值, 表明在水合物结晶时, 重的气体组成产生分馏优先进入水合物晶格, 使油气藏天然气通过沉淀水合物转变为海底渗漏的天然气。但最重的海底渗漏天然气比平均 Joliet 油气藏天然气 $C_3 + C_4$ 稍富, 渗漏天然气在渗漏途中必须加入比油气藏天然气平均组成重的天然气, 才能符合海底渗漏天然气比 Joliet 油气藏天然气平均组成重的事实。

图 1 中的垂直线表示了表 2 中所列出的计算参数在可能的变化范围内, 计算的海底渗漏天然气和水合物天然气的组成范围。仅有渗透速度的变化 (q) 可以解释所有海底观测到的水合物和渗漏天然气的组成范围。尽管对于全部的海底渗漏天然气仍需气源天然气组成稍有变化, 但最重要的是近二个数量级的渗透速度变化是控制渗漏天然气组成变化的根本原因, 这一个控制因素能解释几乎所有海底水合物和渗漏天然气实测组成的变化。

2.3 海底渗漏系统天然气沉淀水合物的量

自 1993 年以来, 通过载人深潜对 Bush Hill 海底天然气渗漏系统的表层水合物和正在喷溢的渗漏天然气样品进行了采集。表 1 列出了所有的分析值。海底出露有水合物表示渗漏系统处于中速演化阶段。图 2 显示了海底渗漏天然气 $C_3 + C_4$ 质量分数随采样时间的变化。在同一时间采样获得的渗漏天然气组成变化范围很大, 不同时间采集的渗漏天然气组成也存在着

渗漏到达海底的天然气 $C_3 + C_4$ 含量很高。

表 3 显示了应用气源天然气组成 (Joliet 油气藏天然气) 转变为海底观测到的水合物天然气所表现出的详细情况, 并列出了渗漏天然气沉淀水合物的质

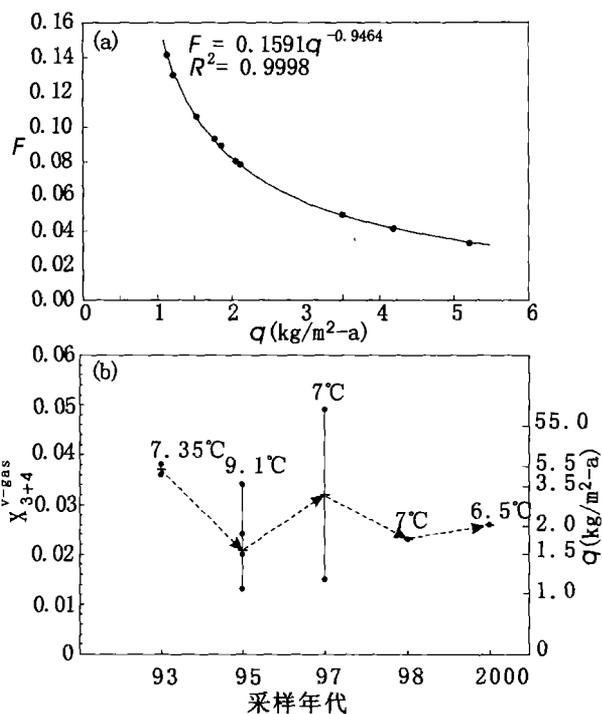


图 2 海底天然气渗漏系统渗透速度与天然气组成和沉淀水合物的量

(a). 海底天然气渗漏系统渗透速度 (q) 与天然气沉淀水合物的质量分数 (F)。 (b). Bush Hill 渗漏系统天然气组成 (X_{3+4}^{V-gas})、渗透速度 (右侧纵坐标表示了相对于天然气组成的渗透速度 q) 与采样时间的关系

Fig 2 Gas flux, vent gas compositions and mass fraction of venting gas crystallized hydrate

量分数 (F) 和渗透通量。Bush Hill 渗漏系统中沉淀水合物的渗透天然气的量主要受渗透速度的控制, 约 0 ~ 14% 的渗透天然气沉淀为水合物 (图 2a)。

3 讨论

动力学计算结果表明渗透系统渗透速度高, 海底渗透天然气的 $C_3 + C_4$ 含量较高, 沉淀富 $C_3 + C_4$ 的水合物。天然气渗透速度低, 海底渗透天然气和沉淀的水合物 $C_3 + C_4$ 含量较低。因此, 我们推测同一时间内 (特别是 1995 和 1997 采样时) 在不同空间上的天然气组成差异是不同的渗透速度所引起。

渗透系统水合物沉淀动力学模型中渗透速度控制水合物和渗透天然气化学组成的结论可以通过测定单个渗透喷口的渗透通量和天然气组成间关系来证实。天然气渗透速度和组成在时空上的变化, 可以帮助深入理解测定起来非常困难的海底渗透系统的变化。

表 3 计算的天然气渗透通量 (q) 和沉淀为水合物的渗透天然气量 (F)

Table 3 Gas mass flux (q) and mass fraction (F) of venting gas crystallized hydrate calculated for observed venting gas composition (X_{3+4}^{V-gas}) on the seafloor

样品号 (渗透通道)	Year	X_{3+4}^{V-gas}	F	$q / (kg/m^2-a)$	
				q_a	q_b
V-a	1993	0.036	0.041	4.19	3.83
V-b	1993	0.038	0.033	5.21	4.74
V-1	1995	0.024	0.089	1.87	0.99
V-2	1995	0.020	0.106	1.54	0.81
V-3	1995	0.013	0.141	1.13	0.59
V-4	1995	0.013	0.141	1.13	0.59
V-5	1995	0.034	0.049	3.50	1.89
V-6	1997	0.049	N	>55	>55
V-7	1997	0.015	0.130	1.23	1.23
V-8	1998	0.023	0.093	1.78	1.78
V-9	2000	0.026	0.080	2.07	2.32
平均	1993 - 2000	0.0264	0.09	2.12	2.12

F 是观测的海底渗透天然气的 $C_3 + C_4$ 质量分数。 F 是 Jolliet 油气藏天然气平均组成转变为海底观测的渗透天然气组成时渗透天然气沉淀为水合物的量。 天然气通量 q_a 是依平均海底温度为 7 计算, q_b 是以海底采样时的温度计算 (表 1)。 N 表示平均 Jolliet 油气藏天然气不能转为海底渗透天然气。 计算过程中的海底温度为采样时的实测温度, 如果没有实测温度取海底平均温度 7, 气源天然气为 Jolliet 油气藏平均天然气组成 [17]。

Bush Hill 海底天然气渗透速度变化相当大, 在 2000 年 8 月海底回声探测记录了 Bush Hill 渗透天然气在水体中的羽状体几乎到达海面, 但在 2002 年 5 月羽状体在上覆水体中仅有三分之一的高度。 此外, 2002 年在 Bush Hill 海底考察过程中观察到渗透以天然气的气泡流为主, 同时, 在附近存在快速的喷流, 这些事实证明了渗透速度在空间上的变化。

4 结论

海底渗透系统的演化早期 (高速渗透阶段), 在海底仅形成泥火山, 天然气则主要进入水体; 在演化的中期 (中速渗透阶段), 海底或附近才可能产出水合物, 并发育自养生物群, 海底渗透天然气和水合物天然气的组成主要受渗透速度的控制; 在演化的晚期 (低速渗透阶段), 水合物形成于海底之下的一定深度, 海底仅形成冷泉碳酸盐岩。

Bush Hill 海底渗透系统近 10 年来的观测表明, 渗透天然气和沉淀水合物的化学组成是多变的, 是渗透速度在时空上的变化之果, 同时这种渗透速度的变化控制了沉淀为水合物的天然气量。

参考文献 (References)

- 1 Aharon P. Geology and biology of modern and ancient submarine hydrocarbon seeps and vents: An introduction. *Geo-marine Letters*, 1994, 14: 69 ~ 73
- 2 Dimitrov L I. Mud volcanoes—the most important pathway for degassing deeply buried sediments. *Earth-Science Reviews*, 2002, 59: 49 ~ 76
- 3 Milkov A V, Sassen R, Apanasovich T V, Dadashev F G. Global gas flux from mud volcanoes: a significant source of fossil methane in the atmosphere and the ocean. *Geophysics Research Letter*, 2003, 30: 10.1029/2002GL016358
- 4 Kopf A J. Global methane emission through mud volcanoes and its past and present impact on the Earth's climate. *Int. J. Earth Sciences (Geol Rundsch)*, 2003, 92: 806 ~ 816
- 5 Judd A G, Hovland M, Dimitrov L I, *et al*. The geological methane budget at continental margins and its influence on climate change. *Geofluids*, 2002, 2: 109 ~ 126
- 6 Mazurenko L L, Sobviev V A. Worldwide distribution of deep-water fluid venting and potential occurrences of gas hydrate accumulations. *Geo-Marine Letter*, 2003, 23: 162 ~ 176
- 7 Milkov A V. Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates. *Marine Geology*, 2000, 167: 29 ~ 42
- 8 李莉, 陈多福, Cathles L M. 海底天然气渗漏形成水合物的线性动力学模型. *地球化学*, 2002, 31 (4): 395 ~ 401 [Li L, Chen D F, Cathles L M. A kinetic model of hydrate formation to calculate the fraction of venting gas precipitated beneath seafloor: An example of the Bush Hill Vent Site, GC 185, Gulf of Mexico. *Geochimica*, 2002, 31 (4): 395 ~ 401]
- 9 陈多福, 陈先沛, 陈光谦. 冷泉流体沉积碳酸盐岩的地质地球化学特征. *沉积学报*, 2002, 20 (1): 35 ~ 40 [Chen Duofu, Chen Xianpei, Chen Guangqian. Geology and geochemistry of cold seepage and venting-related carbonates. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20 (1): 35 ~ 40]
- 10 Brooks J M, Cox H B, Bryant W R, *et al*. Association of gas hydrates and oil seepage in the Gulf of Mexico. *Organic Geochemistry*, 1986, 10: 221 ~ 234
- 11 Brooks J M, Kennicutt I I M C, Fay R R, *et al*. Thermogenic gas hydrates in the Gulf of Mexico. *Science*, 1984, 225: 409 ~ 411
- 12 Kennicutt I I M C, Brooks J M, Denoux G J. Leakage of deep, reservoir petroleum to the near surface of the Gulf of Mexico continental slope. *Marine Chemistry*, 1988, 24: 39 ~ 59
- 13 Roberts H H, Aharon P. Hydrocarbon-derived carbonate buildups of the northern Gulf of Mexico continental slope: a review of submersible investigations. *Geo-Marine Letter*, 1994, 14: 135 ~ 148
- 14 Roberts H H. Surficial geology of the middle and upper continental slope, northern Gulf of Mexico; the important role of episodic fluid venting. *AAPG Bulletin*, 1996, 80 (9): 1511
- 15 Roberts H H, Camey R S. Evidence of episodic fluid, gas, and sediment venting on the northern Gulf of Mexico continental slope. *Economic Geology*, 1997, 92: 863 ~ 879
- 16 Roberts H H. Fluid and gas expulsion on the Northern Gulf of Mexico continental slope. Mud-pione to mineral-pione responses. In: Paull C K, Dillon W P, eds. *Natural gas hydrates: Occurrence, distribution, and detection*, American Geophysical Union, Washington DC, 2001. 145 ~ 161
- 17 Sassen R, Losh S L, Cathles I I L M, *et al*. Massive vein-filling gas hydrate: Relation to ongoing gas migration from the deep subsurface in the Gulf of Mexico. *Marine and Petroleum Geology*, 2001, 18: 551 ~ 560
- 18 MacDonald I R, Leifer I, Sassen R, *et al*. Transfer of hydrocarbons from natural seeps to the water column and atmosphere. *Geofluids*, 2002, 2: 95 ~ 107
- 19 MacDonald I R, Guinasso N L Jr, Ackleson S G, *et al*. Natural oil slicks in the Gulf of Mexico visible from space. *Journal of Geophysics Research*, 1993, 98 (C9): 16351 ~ 16364
- 20 Milkov A V, Sassen R. Estimate of gas hydrate resource, northwestern Gulf of Mexico continental slope. *Marine Geology*, 2001, 179: 71 ~ 83
- 21 Sassen R, MacDonald I R. Evidence of structure H hydrate, Gulf of Mexico continental slope. *Organic Geochemistry*, 1994, 22 (6): 1029 ~ 1032
- 22 MacDonald I R, Guinasso N L Jr, Sassen R, *et al*. Gas hydrate that breaches the sea floor on the continental slope of the Gulf of Mexico. *Geology*, 1994, 22 (8): 699 ~ 702
- 23 Kennicutt I I M C, Brooks J M, Bidigare R R, *et al*. Vent type taxa in a hydrocarbon seep region on the Louisiana slope. *Nature*, 1985, 317: 351 ~ 353
- 24 Booth J S, Rowe M M, Fischer K M. Offshore gas hydrate sample database, U. S. Geological Survey Open-File Report, 1996, 96 (272): 1 ~ 17
- 25 Sassen R, Sweet S T, Milkov A V, *et al*. Stability of thermogenic gas hydrate in the Gulf of Mexico: Constraints on models of Climate Change. In: Paull C K, Dillon W P, ed. *Natural gas hydrates: Occurrence, distribution, and detection*. American Geophysical Union, Washington DC, 2001, 131 ~ 143
- 26 Sassen R, MacDonald I R, Guinasso N L Jr, *et al*. Bacterial methane oxidation in sea-floor gas hydrate: Significance to life in extreme environments. *Geology*, 1998, 26 (9): 851 ~ 854
- 27 Komacki A S, Kendrick J W, Berry J L. Impact of oil and gas vents and slicks on petroleum exploration in the deepwater Gulf of Mexico. *Geo-Marine Letters*, 1994, 14: 160 ~ 169
- 28 Sassen R, Joye S, Sweet S T, *et al*. Thermogenic gas hydrates and hydrocarbon gases in complex chemosynthetic communities, Gulf of Mexico continental slope. *Organic Geochemistry*, 1999, 30: 485 ~ 497
- 29 Sassen R, Sweet S T, Milkov A V, *et al*. Geology and geochemistry of gas hydrates, Central Gulf of Mexico continental slope, Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions, 1999, XLIX: 462 ~ 468
- 30 Sassen R, MacDonald I R. Hydrocarbons of experimental and natural gas hydrates, Gulf of Mexico continental slope. *Organic Geochemistry*, 1997, 26 (3/4): 289 ~ 293

Evolution of Marine Gas Venting System and Impact on Gas Hydrate Crystallization

CHEN Duo-fu^{1, 2} FENG Dong¹ CHEN Guang-qian¹ CHEN Xian-pei¹ Lawrence M Cathles³

1(Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Guangzhou Institute of Geochemistry and South China Sea Institute of Oceanology,
Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640) 2(Guangzhou Center for Gas Hydrate Research, Guangzhou 510640)

3(Department of Earth & Atmospheric Sciences, Cornell University, Ithaca, New York 14853-1504, USA)

Abstract Based on the kinetic model of hydrate crystallization from venting gas in gas vent system, the evolution characteristics and the impacts on gas hydrate crystallization in the Bush Hill gas vent system in GC 185 of Gulf of Mexico were studied. The venting rates are fast (gas flux $q > 18.4 \text{ kg/m}^2\text{-a}$) in the earlier stage of the gas vent system, mud volcano occurred on the seafloor, the vent gas has almost the same composition as the source gas, and the heaviest possible hydrates are crystallized near the surface. The venting rates are slow (gas flux $q < 0.55 \text{ kg/m}^2\text{-a}$) in the later stage, hydrate crystallization will not reach the sea floor, seep carbonate will be occurred on the seafloor. Between these extremes gas hydrate and seep community is developed on the seafloor of the gas vent system, and the vent and hydrate gas compositions, and the mass fraction of venting gas crystallized hydrate depend strongly on venting rate. Changes in vent and hydrate gas chemistry observed at multiple submersible visits to the Bush Hill vent system suggest the variations of venting rates between different submersible visiting time and different locations over the last 10 years.

Key words evolution of gas vent system, gas vent characteristics, gas hydrate