

海洋天然气水合物双层（或多层） BSR 结构成因探讨

罗 伟

中国地质大学（北京），北京，100083

天然气水合物（gas hydrate）俗称可燃冰，是在低温高压环境下，由甲烷（ C_1 ）等低分子烃类气体（ C_{2+} ）和水分子形成的化合物（Kvenvolden, 1995; Sloan, 1998; Sloan 等, 2010）。Bottom-simulating reflector（似海底反射层）通称 BSR 是反振幅、反极性（reversal polarity）、低频率，并通常与沉积层面斜交，基本平行于海底的在地震强反射层。被认为是天然气水合物的沉积层与含游离气沉积层或含水沉积层的相边界（Shiply 等, 1979），即是天然气水合物稳定带（gas hydrate stability zone - GHSZ）的底界。

目前，发现 BSR 分布的大陆边缘（主动大陆边缘和被动大陆边缘），观察双层（或多层）BSR。例如，在 Storegga 滑塌区（Posewang 和 Mienert, 1999; Andreassen 等, 2000; Bouria 等, 2003; Bünze 和 Mienert, 2004），布莱克海台（The Blake Ridge）（Hornbach 等, 2003），Nankai slope（Ashi 等, 2002; Foucher 等, 2002），西罗斯海（the western Ross Sea）（Geletti 和 Buseti, 2011），和水合物海岭（Hydrate Ridge）（Bangs 等, 2005）均观测到双层 BSR；在黑海（the Black Sea）则观测到多达五层的 BSR（Popescu 等, 2006）。双层（或多层）BSR 较独特且少见，所报道的双层（或多层）BSR 多来自不同地区、采用不同采集系统而获得的地震剖面结果，主要表现为斑状无规律分布，这一特征不同于可以连续追踪的层间岩性反射、气泡脉冲、多次波和微曲多次反射波或者常见的 BSR。

对双层（或多层）BSR 成因或形成机制的解释主要有两种：（1）由温压条件改变而引起的 GHSZ 迁移所残留下的反射标志，即非化学成因；（2）由气体组分改变而引起的两个活动相边界，即化学成

因。

双层（或多层）BSR 非化学成因认为，形成天然气水合物的烃类气体成分稳定、单一，在区域内不存在其他类型的天然气水合物。双层（或多层）BSR 是由于地史时期内区域内温度、压力的改变造成 GHSZ 迁移，进而“残留”下的“古代 BSR”。在这一系列天然气水合物埋藏的物理条件的变化过程中，温度的主要因素是海水底层水温度的变化，海水底层水的温度传导到海底表层沉积物，进而改变地温梯度的初始温度。地温梯度稳定的情况下，初始温度的升高或者下降影响同一深度地层温度的上升或者下降。原始 BSR 深度温度的升高使得该深度天然气水合物脱离 GHSZ，天然气水合物分解，GHSZ 上移；原始 BSR 深度温度减低使得 BSR 层下部进入 GHSZ，形成新的天然气水合物，GHSZ 下移。而造成海水底层水温度变化的主要影响因素是全球冰期-间冰期的气候变化。受到沉积物沉积、剥蚀速率，构造抬升、下降，海平面的上升、下降的影响，其中沉积物沉积、构造抬升和海平面下降使得地温梯度的初始深度变浅，原始 BSR 层脱离 GHSZ，天然气水合物分解，GHSZ 上移；与此相反，沉积物的侵蚀、构造沉降、海平面下降，会影响 GHSZ 下移。

其中化学成因认为：在海底的温度、压力和孔隙水盐度稳定的情况下，双层 BSR 由于天然气水合物形成过程的化学分异作用，纯甲烷的 GHSZ 的底界为 BSR。在 BSR 层下部，含有较重烃类或者混和烃类气体形成天然气水合物，其稳定带的底界即认为是第二层 BSR。

由于含有 C_{2+} 气体的 II 型和 H 型天然气水合物含有较重的烃类气体在沉积层中稳定态的温压条

件不同, 因此具有不同的稳定带的底界, 与纯甲烷气体构成的 I 型天然气水合物 GHSZ 底界相比 II 型和 H 型天然气水合物 GHSZ 底界要深 (Sloan 等, 1998; 2000; 2010)。通过利用科罗拉多矿业学院 Sloan 和 Koh 开发的 CSMHyd 天然气水合物相平衡稳定方程, 可以计算纯烃类气体、混合混合烃类气体、混合非烃类气体在相平衡时的温压条件。利用这一程序计算得出该处发现的双层 BSR 分别为纯甲烷天然气水合物和 96% 甲烷混合有 3% 乙烷和 1% 丙烷天然气水合物稳定带的底界。特别注意的是在进行化学成因双层 (或多层) BSR 在解释时, 需要有相应的地球化学资料, 例如: 顶空气、酸解烃等结果进行支撑。

此外, 个别研究者在利用 CSMHyd 程序对天然气水合物稳定的边界变化对天然气水合物相平衡曲线及 GHSZ 厚度的研究中, 提出给定组分的混合烃类气体稳定带底界与纯甲烷稳定带底界间的厚度, 随水深的加深而变浅 (龚建明等, 2010)。

目前, 对于双层 (或多层) BSR 的解释仍处于探讨阶段, 不同的研究区、不同的地质背景下存在多种可能的解释。

参 考 文 献 / References

- 龚建明, 李慧君, 张莉, 闫桂京, 张剑. 2010. 水深对海洋天然气水合物双 BSR 的控制作用. 海洋地质动态, 26 (7): 7~11.
- Andreassen K J, Mienert P, Bryn S C. 2000. A double gas-hydrate related bottom simulating reflector at the Norwegian continental margin, in Gas hydrates: Challenges for the future. Acad. Sci., 912: 126~135.
- Ashi J, Tokuyama H, Taira A. 2002. Distribution of methane hydrate BSRs and its implication for the prism growth in the Nankai Trough. Marine Geology, 187: 177~191.
- Bangs N L, Musgrave R J, Tréhu A. M. 2005. Upward shift in the southern Hydrate Ridge gas hydrate stability zone following postglacial warming, offshore Oregon. Geophys. Res., 110, B03012, doi:10.1029/2004JB003293.
- Bouriak B, Volkonskaia A, Galaktionov V. 2003. 'Split' strata-boundary gas hydrate BSR below deposits of the Storegga Slide and at the southern edge of the Vøring Plateau. Marine Geology, 195: 301~318.
- Bünz S, Mienert J. 2004. Acoustic imaging of gas hydrate and free gas at the Storegga Slide. Geophys. Res., 109, B04102, doi:10.1029/2003JB002863.
- Foucher J, Nouzé H, Henry P. 2002. Observation and tentative interpretation of a double BSR on the Nankai slope. Marine Geology, 187: 161~175.
- Geletti R, Busetti M. 2011. A double bottom simulating reflector in the western Ross Sea, Antarctica. Geophys. Res., 116, B04101, doi:10.1029/2010JB007864.
- Kvenvolden K A. 1995. A review of the geochemistry of methane in natural gas hydrate. Organic Geochemistry, 23 (11-12): 997~1008.
- Popescu I, Batist M D, Lericolais G, Nouzé H, Poort J, Panin N, Versteeg W, Gillet H. 2006. Multiple bottom-simulating reflections in the Black Sea: Potential proxies of climate conditions. Marine Geology, 227: 163~176.
- Posewang J, Mienert J. 1999. The enigma of double BSRs: indicators for changes in the hydrate stability field?. Geo-Marine Lett., 19: 157~163.
- Shipley T H, Houston M H, Buller R T. 1979. Seismic evidence for wide-spread possible gas hydrate horizons on continental slopes and margins. Am. Assoc. Pet. Geol. Bull. 63: 2204~2213.
- Sloan E D, Koh C A, Sum A K. 2010. Gas Hydrate Stability and Sampling: The Future as Related to the Phase Diagram. Energies, 3, 1991~2000.
- Sloan E D. 1998. Clathrate Hydrates of Natural Gases. New York: Marcel, 1998:705.