

DOI: 10. 16562/j. cnki. 0256-1492. 2017. 05. 010

日本海天然气水合物气源成因及主控因素探讨

龚建明^{1,2}, 廖晶^{1,2}, 何拥军^{1,2}, 杨传胜^{1,2}, 孙治雷^{1,2}, 陈志强³, 程青松⁴

(1. 国土资源部天然气水合物重点实验室, 青岛 266071; 2. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071;

3. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 保定 071051; 4. 长江大学资源与环境学院, 武汉 430100)

摘要:为了探讨日本海天然气水合物的气源成因及其控制因素, 收集和整理了日本海西南郁陵盆地和日本海东缘上越盆地及邻近的相关资料。结果显示, 上越盆地及邻近海域甲烷羽状流、麻坑、自生碳酸盐岩及地震剖面上“气烟囱”和 BSR 等发育, 块状水合物出露海底为热解成因; 郁陵盆地羽状流不太发育, 而自生碳酸盐岩和地震剖面上的“气烟囱”较发育, 钻孔发现的水合物主要为生物成因。结合日本海构造演化特征综合分析认为, 日本海东缘热解成因水合物的主控因素是近 S—N 向和近 E—W 向交互断裂作用以及 NE—SW 向的晚期构造挤压; 日本海西南海域生物成因为主兼热解成因水合物的主控因素是 NEE—SWW 向的晚期构造挤压; 而日本海西北海域构造定型早且缺少晚期构造挤压, 因此, 推测其水合物气源应该主要为生物成因, 热成因的可能性很小。

关键词:气源成因; 交互断层; 郁陵盆地; 上越盆地; 日本海

中图分类号: P738

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2017)05-0102-07

日本海为一夹持于东亚大陆与日本列岛之间的弧后盆地, 面积约 1 000 000 km², 为一半封闭的边缘海(图 1), 平均水深约 1 350 m。日本海主要由东南部的大和盆地(Yamato Basin)、北部的日本盆地(Japan Basin)、西南部的郁陵盆地(Ulleung Basin)及大和海脊(Yamato Rise)组成(图 1)。盆地之间被 500 m 高的海底高地所分隔, 如朝鲜海底高原, 隐岐海底堤坝以及大和海脊^[1-10]。

通常认为, 渐新世末, 日本列岛开始从欧亚大陆分离, 新近纪伴随西太平洋板块的持续向东俯冲, 日本海弧后盆地持续拉开, 中中新世海侵规模最大, 随后日本海仅有小规模的变化而保持现今的构造格局及地貌特征。据 5 Ma 西北太平洋边缘板块重建^[10], 中新世末到现在日本海整体处于右旋拉张而保持拉分裂谷形态(图 1)。另外, 中新世末的构造应力场在郁陵盆地由拉伸变为挤压, 在盆地的南缘和西缘形成逆冲断层和褶皱。此次构造运动以后直到现在, 郁陵盆地开始沉降, 并沉积了大量碎屑沉积物。

到目前为止, 日本和韩国分布在日本海的东缘和西南缘进行了多年的水合物勘探, 发现了许多与

水合物有关的地球物理和地球化学标志(图 1), 例如: BSR、空白带、气烟囱、麻坑、羽状流、甲烷渗漏点等^[11]。目前, 韩国通过二次水合物钻探(UBGH-1、UBGH-2)在郁陵盆地发现了水合物实物样品, 测试结果显示其水合物为生物成因^[12, 13]。日本通过多次水合物地球物理调查和 ROV 采样在上越盆地发现了裸露于海底的水合物样品^[1-7], 测试结果显示其水合物为热解成因^[6, 14]。

1 日本海天然气水合物气源成因

1.1 日本海东缘上越盆地

日本海东缘的上越盆地(Joetsu Basin)位于日本海东北部新潟县富山湾(Toyama Bay)与左渡岛(Sado)之间的近海海域, 相邻陆域有新潟油田和山形油田(图 1)。2008 年和 2013—2016 年, 东京大学利用日本海洋-地球科学研究所(JAMSTEC)的调查船对日本海东北部的上越盆地进行了单道、热流、深拖、ROV、旁扫、多波束和活塞取样。调查结果显示, 该区存在 36 个羽状流、6 个直径在 150~500 m 的麻坑、大量“气烟囱”、菌席、自生碳酸盐岩以及裸露海底的块状表层型水合物(图 2)^[7]。根据实测热流换算的地温梯度为 10 °C/100 m, 水合物稳定带基底在海底之下 150 m 左右。裸露海底的块状水合物岩心由大块的水合物和小块的碳酸盐岩结核组成。水合物化学组分中甲烷含量>99%, 甲烷 $\delta^{13}\text{C}_1$

基金项目:国家青年科学基金“南海北部神狐海域深水水道演化与水合物成藏的关系”(41406080); 国家自然科学基金“祁连山冻土区天然气水合物气源成因研究”(41273066)

作者简介:龚建明(1964—), 男, 研究员, 主要从事海洋油气与天然气水合物研究, E-mail: gongjianm@aliyun.com

收稿日期: 2017-06-21; **改回日期:** 2017-07-18. 蔡秋蓉编辑

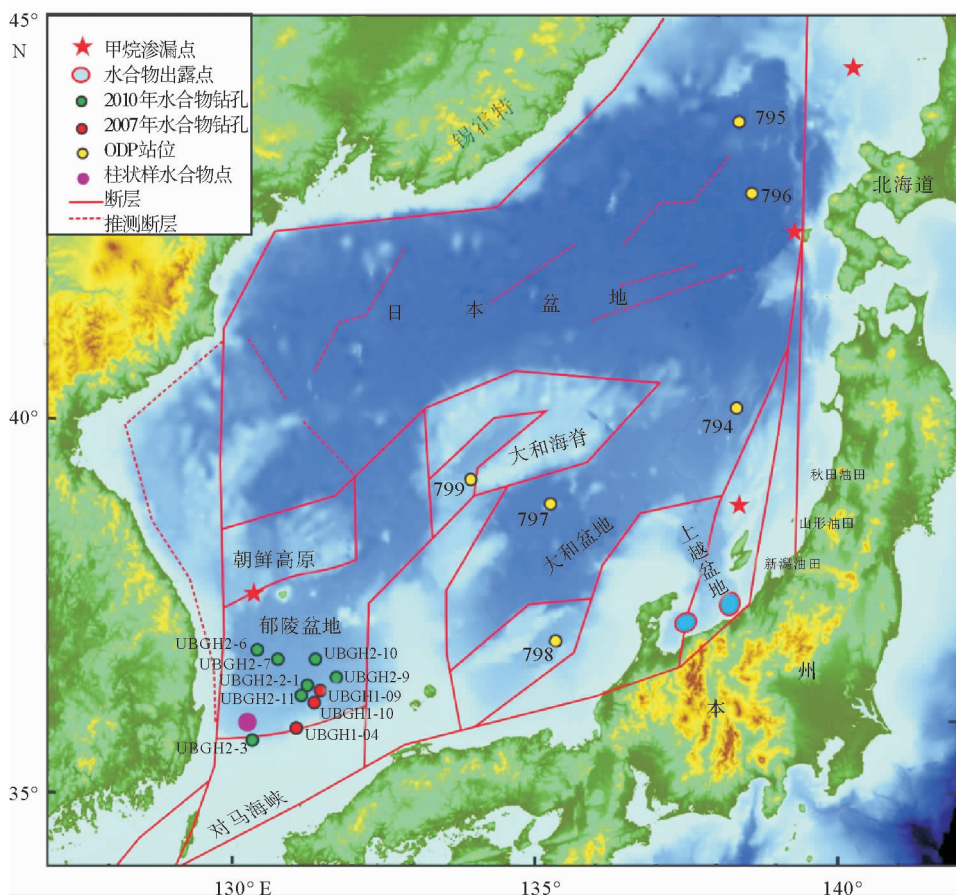


图1 日本海沉积盆地和拉张裂谷运动学的构造纲要图(据文献[1-10]修改)

Fig. 1 Tectonic map of the Sea of Japan showing geometry and rifting kinematics of sedimentary basins (modified from references [1-10])

为-39‰,为热成因气^[14]。碳酸盐结核直径在1~5 cm之间,X射线衍射分析结果为自生碳酸盐中的菱方解石和文石。

1.2 日本海西南郁陵盆地

日本海西南的郁陵盆地位于韩国郁陵岛南部海域。郁陵盆地的天然气水合物勘探始于 1996 年, 1998 年在地震剖面上识别出 BSR。到目前为止, 2D 地震 22 000 km, 3D 地震 900 km², 多波束 46 300 km², 岩心样品近 100 个。其中, 2007 年和 2010 年分别在郁陵盆地进行了水合物钻探^[8,15] (图 3)。

2007年6月,KIGAM在日本海西部大陆坡采集到3.2 m长的07-4柱状样(36.09°N、130.08°E,水深1450 m)(图1),在其最底部发现了大约5 cm厚的块状天然气水合物。结构分析为I型水合物,含99%的甲烷。但是,徐兆凯等(2009)通过对该柱状样中碳酸盐结核的矿物组成和碳同位素值测试分析认为,研究区的甲烷很可能为生物成因甲烷和热解成因甲烷组成的混合气^[9]。

2007年9—11月,韩国利用 M/V Rem Etime 调查船在郁陵盆地进行了郁陵盆地第一次水合物钻探(UBGH1),在5个站点中有3个站点发现了水合物样品(图1、图3),其中,2个站点的水合物主要以裂隙充填的形式富集在泥质沉积物中,另外1个站点的水合物分布在稳定带底界之上的薄砂层中,深度在海底之下194 m。

2010年,韩国利用 Synergy 调查船在郁陵盆地进行了第二次水合物钻探(UBGH2),在13个站位中有10个站位发现了水合物(图1、图3)^[8,16]。通过对UBGH2-7水合物发现孔岩心样品测试分析得出,该钻孔沉积物顶空气的甲烷碳同位素在 $-73.7\text{‰} \sim -70.3\text{‰}$ 之间,孔隙气的甲烷碳同位素在 $-72.5\text{‰} \sim -60.83\text{‰}$ 之间,水合物气的甲烷碳同位素在 $-67.9\text{‰} \sim -62.0\text{‰}$ 之间,而来自UBGH2航次的孔隙气和水合物气的 C_1/C_{2+} 分别为592和463,由此表明该区水合物的气源主要来自生物气^[13]。

另外,在郁陵盆地第二次水合物钻探中,为了检

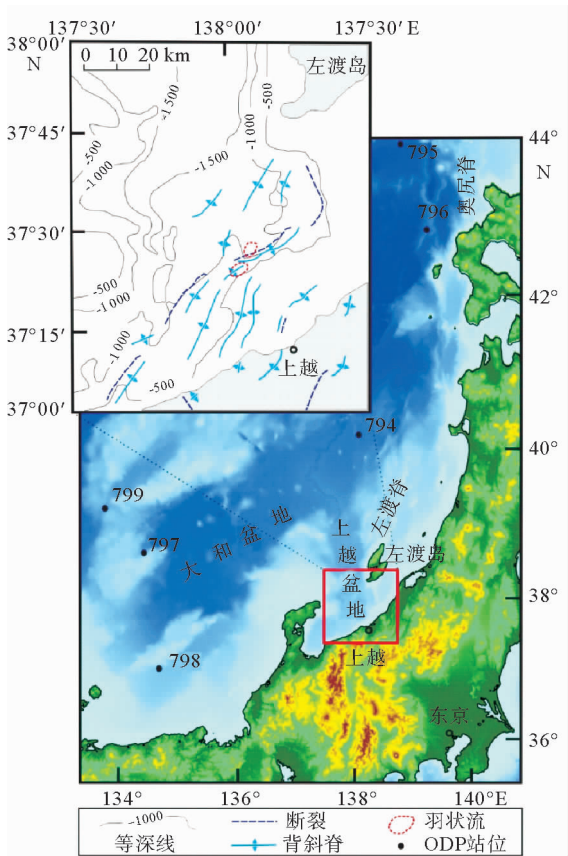


图2 上越盆地羽状流、ODP 站点及
NNE 向断层和褶皱分布图^[7]

Fig. 2 Location maps of gas plume sites, ODP
drilling sites and faults and folds in NNE direction
in Joetsu Basin

测热解成因水合物的存在,在商业气田(Donghae-1(东海气田))附近设置了UBGH2-3井,该井在海底之下6.0~95.5 m见到了块状、结核状和脉状水合物,但测试结果仍然是生物成因的水合物^[9]。

2 讨论

众所周知,日本海形成于弧后扩张,但形成的时间和过程仍存争议。Mitsuo Shimazu 等研究认为^[17],日本海的打开主要经历了2个阶段,其中,第1期(主要在渐新世)的张裂形成了日本海盆,第2期(主要在早中新世)的张裂形成了大和盆地,中中新世之后日本海盆基本保持不变,而大和盆地经历了来自西太平洋的构造挤压,因此,在日本海周边古近纪-中中新世火山岩分布图中,日本海东缘火山岩分布广,而日本海西南和西北海域只有少量的第四纪碱性火山岩分布^[17],例如:韩国浦项市(Pohang)和朝鲜 Gilju-Myeongcheon。由此可见,中新世之后日本海东缘的构造活动性强于日本海西南海域和西北海域。

前已述及,日本海的打开始于渐新世^[18],中新世达到鼎盛,晚中新世日本海由拉张转变为挤压,上新世至更新世,水平挤压造成日本海东缘抬升,在日本东北的上越(Joetsu)和颈城(Kubishi)油气田区形成NNE—SSW的褶皱和断裂(图2)^[19],因此,日本海东缘是一个正在活动的构造变动带(表1、图4)^[20-23]。

目前日本海东缘上越盆地处于近S—N向和近E—W向断层的交汇处,地震剖面上气烟囱、断裂和褶皱发育、海底甲烷渗漏和羽状流发育(图1),相邻陆域和海域古近纪-中中新世火山岩分布广,相邻陆域为新潟油区和地震多发区(图1),因此,推测该区热解成因的天然气水合物气源主要受交汇断层控制。

虽然郁陵盆地西侧两条近S—N向的走滑断层

表1 日本海构造演化简表^[18,24,25]
Table 1 Tectonic evolution of Sea of Japan

演化时间		演化特征
5~0 Ma	上新世至更新世	隆起加速,速率>500 m/ma。郁陵盆地南缘逆冲断层和褶皱。水平挤压造成日本海东缘抬升,形成日本奥尻逆冲构造。
10~7(或8) Ma	晚中新世晚期	隆起开始,拉张转变为挤压
12.5~10 Ma	晚中新世早期	缓慢沉降
15~12.5 Ma	中中新世	快速沉降,沉降速率>900 m/ma。日本盆地出现洋壳。郁陵盆地和大和盆地地壳减薄。
23~19 Ma	早中新世	郁陵断裂和对马岛断裂活动。
>23 Ma	晚渐新世	地壳减薄、初始沉降,非海相和火山碎屑岩广泛沉积

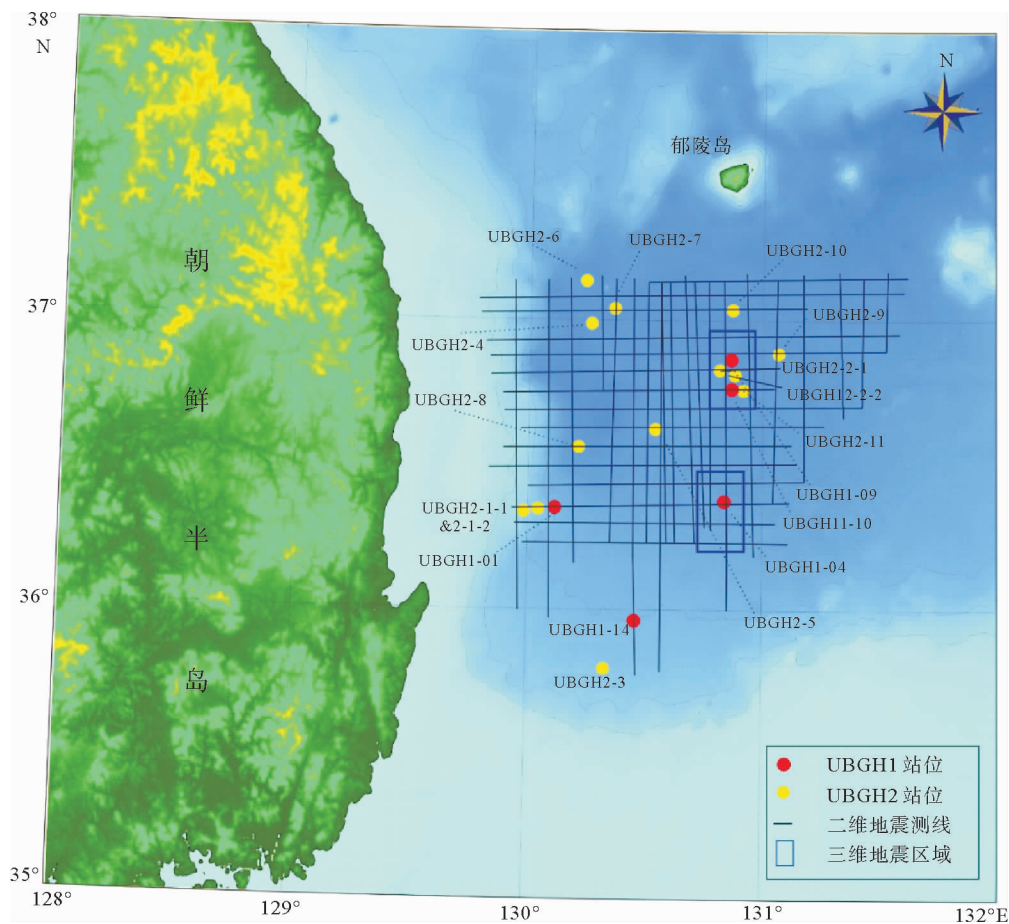
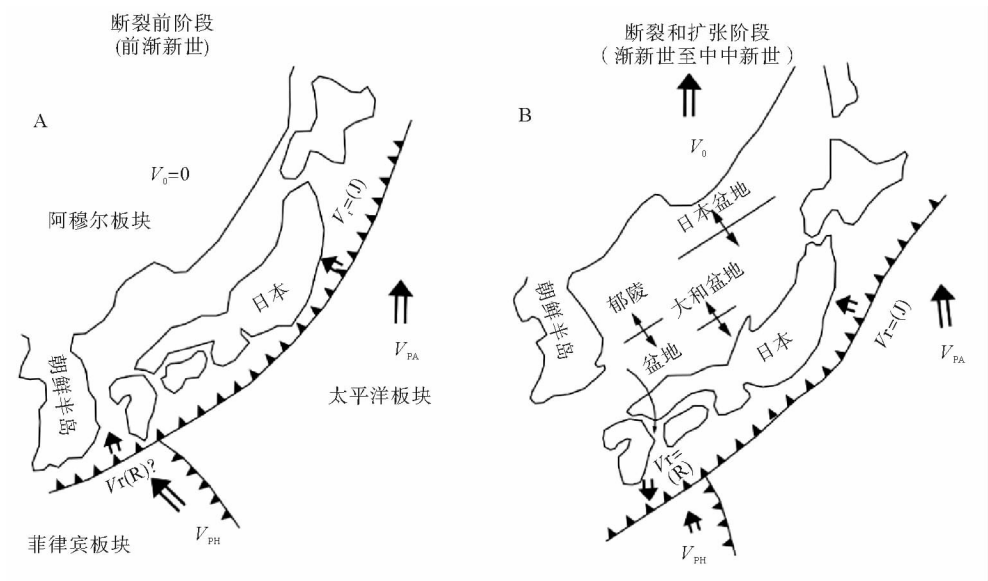
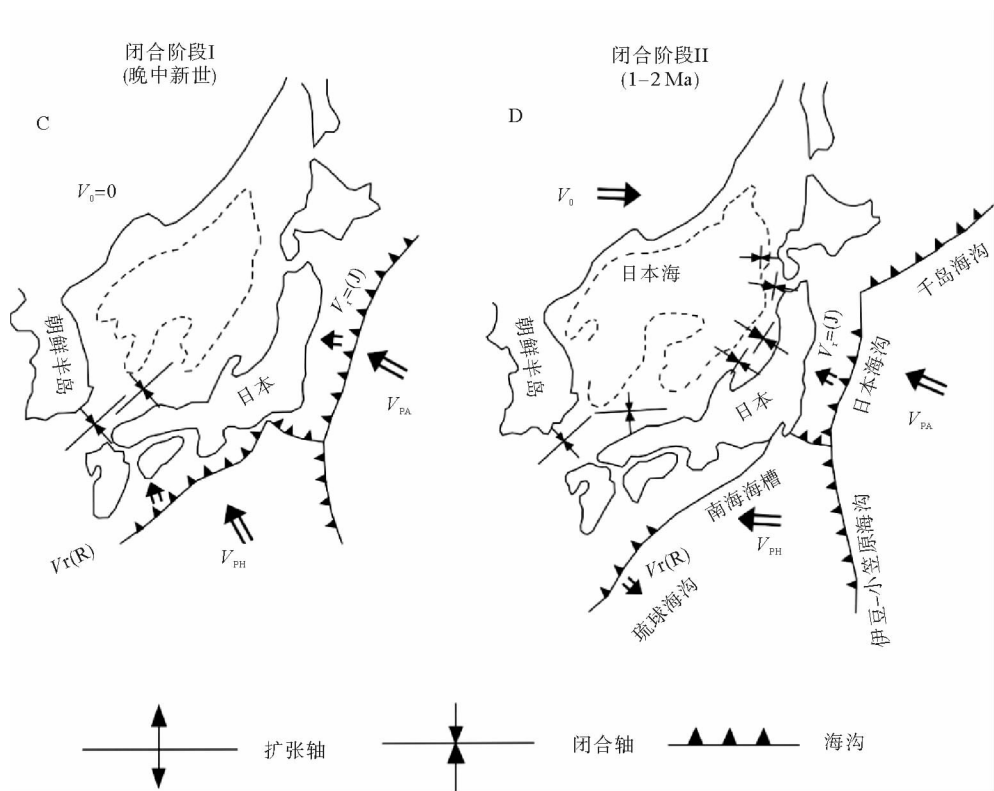


图 3 郁陵盆地水合物钻探航次及站位分布^[8,15]

Fig. 3 Gas hydrate drilling expedition (UBGH) area of Ullung Basin and drill sites of holes UBGH1 and UBGH2





V_0 —上驮阿穆尔板块运动方向; $V_r(J)$ 和 $V_r(R)$ —分别为日本和琉球海沟的运动方向; V_{PA} 和 V_{PH} 分别是太平洋和菲律宾板块的俯冲方向;海沟位于上驮板块上;点线代表 2 000 m 水深

图 4 日本海构造演化^[21]

Fig. 4 Tectonic evolution of Sea of Japan

V_0 —motion of overriding Amurian plate; $V_r(J)$ and $V_r(R)$ —hinge migrations of Japan and Ryukyu Trenches, respectively; V_{PA} and V_{PH} —vectors of subducting Pacific and Philippine Sea plates, respectively. Dotted line demotes 2 000 m contour line

(分别为郁陵断层和后浦断层)已在上新世停止活动^[26],然而,郁陵盆地南侧目前发育 NE 向的上新世-更新世的逆冲断层和褶皱(表 1、图 4)。同时,由于该区附近存在热解成因的东海商业气田(Dong-hae-1)以及 07-4 柱状样的混合成因气,因此,推测日本海西南缘水合物的气源除了目前已证实的生物成因气外,还可能存在热解成因的水合物。

与上述两个海区相比,日本海西北缘构造稳定,中新世以来断裂和火山不发育,因此,推测其水合物的气源主要为生物成因,热解成因的气源可能性小。

3 结论

(1) 日本海东缘上越盆地及邻近海域甲烷羽状流、麻坑、自生碳酸盐岩、“气烟囱”和 BSR 等发育,出露海底的块状水合物 $\delta^{13}C_1$ 为 -39% ,为热解成因。

(2) 日本海西南郁陵盆地“气烟囱”和 BSR 也

很发育,钻孔中的水合物 $\delta^{13}C_1$ 在 -67.9% ~ -62.0% 之间,整个 UBGH2 航次孔隙气和水合物气的 C_1/C_{2+} 均值为 527,主要为生物气。

(3) 日本海东缘近 S—N 向和近 E—W 向交互断裂作用以及晚期构造挤压形成的 NNE—SSW 向断裂和褶皱是热解成因水合物的主控因素。

(4) 日本海西南海域,特别是郁陵盆地南部,晚期构造挤压可能是生物成因为主热解成因为辅的水合物气源的主控因素;而日本海西北海域因缺少晚期构造挤压,其水合物气源可能主要为生物成因,热成因的可能性很小。

参考文献(References)

[1] Matsumoto R, Kakuwa Y, Snyder G, et al. Occurrence and origin of thick deposits of massive gas hydrate, eastern margin of the Sea of Japan. pdfs (No. 2019)[C]//9th International Conference on Gas Hydrates. Denver, Colorado USA, 2017.

[2] Oi T, Sato M, Matsumoto R. Types of gas chimney structures

- in southeastern parts of the Sea of Japan. pdfs (No. 2028) [C]//9th International Conference on Gas Hydrates. Denver, Colorado USA, 2017.
- [3] Ohkawa S, Hiruta A, Yanagimoto Y, et al. Characterization of gas chimneys systems in Joetsu Area, eastern margin of the Sea of Japan, using High-Resolution 3-Dimension (HR3D) seismic data. pdfs (No. 1905)[C]//9th International Conference on Gas Hydrates. Denver, Colorado USA, 2017.
- [4] Tanahashi M, Morita S, Kyouna S, et al. Physical properties obtained by LWD for thick, massive gas hydrate in the off-shore-Joetsu Area, eastern margin of Japan Sea. pdfs (No. 1636)[C]//9th International Conference on Gas Hydrates. Denver, Colorado USA, 2017.
- [5] Kakuwa Y, Ohkawa S, Tanahashi M, et al. Occurrence of methane hydrate in Joetsu Area, the eastern margin of Japan Sea. pdfs (No. 1689)[C]//9th International Conference on Gas Hydrates. Denver, Colorado USA, 2017.
- [6] Matsumoto R, Freire A F, Satoh M, et al. Shallow gas hydrate accumulation in the eastern margin of Japan Sea: A potential natural gas resources[C]//AAPG International Conference and Exhibition. Cape Town, South Africa: AAPG, 2008.
- [7] Hiruta A, Snyder G T, Tomaru H, et al. Geochemical constraints for the formation and dissociation of gas hydrate in an area of high methane flux, eastern margin of the Japan Sea [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 279(3-4): 326-339.
- [8] Ryu B J, Collett T S, Riedel M, et al. Scientific results of the Second Gas Hydrate Drilling Expedition in the Ulleung Basin (UBGH2)[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 47: 1-20.
- [9] 徐兆凯, 崔镇勇, 林东日, 等. 日本海西部大陆坡自生碳酸盐的特征与成因[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(2): 41-47. [XU Zhaokai, CUI Zhenyong, LIN Dongri, et al. Character and origin of authigenic carbonates in the western continental slope of the East Japan Sea[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2009, 29(2): 41-47.]
- [10] Xu J Y, Ben-Avraham Z, Kelty T, et al. Origin of marginal basins of the NW Pacific and their plate tectonic reconstructions[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 130: 154-196.
- [11] Yoo D G, Kang N K, Yi B Y, et al. Occurrence and seismic characteristics of gas hydrate in the Ulleung Basin, East Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 47: 236-247.
- [12] Ryu B J, Riedel M, Kim J H, et al. Gas hydrates in the western deep-water Ulleung Basin, East Sea of Korea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26(8): 1483-1498.
- [13] Choi J, Kim J H, Torres M E, et al. Gas origin and migration in the Ulleung Basin, East Sea: results from the Second Ulleung Basin Gas Hydrate Drilling Expedition (UBGH2) [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 47: 113-124.
- [14] Nakajima T, Kakuwa Y, Yasudomi Y, et al. Formation of pockmarks and submarine canyons associated with dissociation of gas hydrates on the Joetsu Knoll, eastern margin of the Sea of Japan[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 90: 228-242.
- [15] Park K P, Bahk J J, Kwon Y, et al. Korean national program expedition confirms rich gas hydrate deposit in the Ulleung Basin, East Sea[J]. *Fire in the Ice: Methane Hydrate Newsletter*, 2008, 8(2): 6-9.
- [16] Bahk J J, Kim G Y, Chun J H, et al. Characterization of gas hydrate reservoirs by integration of core and log data in the Ulleung Basin, East Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 47: 30-42.
- [17] Shimazu M, Yoo S, Tateishi M. Tectonics and volcanism in the Sado-Pohang Belt from 20 to 14 Ma and opening of the Yamato Basin of the Japan Sea[J]. *Tectonophysics*, 1990, 181(1-4): 321-330.
- [18] Jolivet L, Tamaki K. Neogene Kinematics in the Japan Sea Region and Volcanic Activity of the Northeast Japan arc [M]//Tamaki K, Suyehiro K, Allan J, et al. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 127/128, Part 2. College Station, TX: Ocean Drilling Program, 1992: 1311-1331.
- [19] Okamura Y. Fault-related folds and an imbricate thrust system on the northwestern margin of the northern Fossa Magna region, central Japan[J]. *Island Arc*, 2003, 12(1): 61-73.
- [20] 金性春. 大洋钻探与西太平洋构造[J]. *地球科学进展*, 1995, 10(3): 234-239. [JIN Xingchun. Ocean drilling program and tectonics of the western Pacific Region[J]. *Advances in Earth Science*, 1995, 10(3): 234-239.]
- [21] Chough S K, Barg E. Tectonic history of Ulleung basin margin, East Sea (Sea of Japan)[J]. *Geology*, 1987, 15(1): 45-48.
- [22] Kakuwa Y, Nakajima T, Matsumoto R. Submarine landslide identified in MD179 cores, off-Joetsu area, eastern margin of the Sea of Japan[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 90: 218-227.
- [23] Freire A F M, Matsumoto R, Santos L A. Structural-stratigraphic control on the Umitaka Spur gas hydrates of Joetsu Basin in the eastern margin of Japan Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(10): 1967-1978.
- [24] Ingle Jr J C, Suyehiro K, von Breymann M T, et al. *Proc. ODP. Init. Repts[R]*. College Station, TX: Ocean Drilling Program, 1990.
- [25] Tamaki K, Suyehiro K, Allan J, et al. Tectonic Synthesis and Implications of Japan Sea ODP Drilling[M]//Tamaki K, Suyehiro K, Suyehiro K, et al. *Proceedings of ODP, Scientific Results*, 127/128, Part 2. College Station, TX: Ocean Drilling Program, 1992: 1333-1348.
- [26] Yoon S H, Sohn Y K, Chough S K. Tectonic, sedimentary, and volcanic evolution of a back-arc basin in the East Sea (Sea of Japan)[J]. *Marine Geology*, 2014, 352: 70-88.

DISCUSSION ON GAS ORIGINS AND MAIN CONTROLLING FACTORS
FOR GAS HYDRATES IN THE SEA OF JAPAN

GONG Jianming^{1,2}, LIAO Jing^{1,2}, HE Yongjun^{1,2}, YANG Chuansheng^{1,2},
SUN Zhilei^{1,2}, CHEN Zhiqiang³, CHEN Qingsong⁴

(1. Key Laboratory of Gas Hydrate, Ministry of Land and Resources, Qingdao 266071, China;

2. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, China;

3 Center For Hydrogeology and Environmental Geology, China Geological Survey, Baoding 071051, China;

4 College of Resource and Environment, Yangtze University, Wuhan 430100, China)

Abstract: In order to understand the gas origins and controlling factors for the gas hydrate in the Sea of Japan, data from both the Ulleung and Joetsu Basins are collected and studied. It is found that methane plumes, pockmarks, authigenic carbonates, gas chimneys, BSR and massive hydrate outcrops are quite popular in the Joetsu Basin of northeast Japan Islands, indicating a thermogenic gas origin. However, in the Ulleung Basin, methane plumes are rare, but rich in authigenic carbonates and gas chimneys, and the gas hydrates encountered so far by drilling wells are biogenic. Integrated with the tectonic evolution of the Sea of Japan, it is concluded that thermogenic gas hydrates occurred on the eastern margin of the sea of Japan are mainly controlled by the interaction of the near S—N faults and the near E—W faults, and the later tectonic compression derived by the activity of the faults in NNE—SSW direction. The biogenic gas hydrates with a few thermogenic gas hydrates on the southwestern margin of the Sea of Japan are mainly controlled by the late tectonic compression with a direction of NEE—SWW. Biogenic gas hydrates may dominate the northwestern margin since it was formed earlier and lack of late tectonic compression.

Key words: gas origins; main controlling factors; interaction Faults; the Ulleung Basin; the Joetsu Basin; Sea of Japan