

更具开发前景的浅成天然气水合物

刘玉山,祝有海,吴必豪

(中国地质科学院矿产资源研究所,北京 100037)

摘要:浅成天然气水合物呈致密块状赋存在海床面上或海床附近,在全球大陆坡上有广范的分布,由于其饱和度高及赋存部位浅因而被认为更适于开采。与甲烷渗漏、气体烟囱和水合物丘密切相伴的浅成天然气水合物,是在构造活动带由高通量的富甲烷流体以集束方式沿断层或断裂破碎带上升形成的。推测在我国南海北坡也可能存在浅成天然气水合物。

关键词:浅成天然气水合物;气体烟囱;水合物丘

中图分类号:P618.13

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2016.04004

1 浅成块状天然气水合物分布广泛

浅成天然气水合物是指赋存于海床面上或海床附近及之下几十米浅部的天然气水合物。近几年来在水合物的勘查研究中,发现在陆缘近海的水合物赋存区中广泛分布着浅成水合物,它们以产出部位浅,饱和度高以及易于开采而受到越来越多的关注。

早在 2000 年,在温哥华岛外海渔民就发现海床上有巨大的块状物,后查明是块状水合物堆积。在墨西哥湾水合物勘探中也发现“海床上普遍存在高饱和度的水合物”,有些块状水合物呈丘状,直径 5~6 m^[1,2](图 1)。近 4~5 年来,日本、韩国和中国也相继发现了大面积的浅成水合物储藏,且规模巨大。初步看,浅成水合物在全球有着广泛的分布,如喀斯卡迪亚^[3]、波佛特海^[4]、墨西哥湾、安哥拉近海^[5]、印度陆缘、鄂霍茨克海、日本海的上越盆地、韩国的郁陵盆地^[6]以及南海珠江口外均发育有浅成块状水合物^[7]。



图 1 墨西哥湾海床上巨大的天然气水合物丘(据文献[1])

Fig. 1 A natural gas hydrate mound on the seafloor of GoM(from reference [1])

日本工贸省(METI)认为海床上的气体烟囱结构是极具潜力的高饱和度水合物的赋存构造。日韩已经把发育有喷气孔和烟囱结构的海域定为今后天然气水合物勘查的重点区^[8]。

海洋水合物可分为深成侵染状水合物和赋存于海床附近的块状水合物,后者即属于浅成水合物。海洋水合物约占全球天然气水合物总量的 90%以上,但其中赋存于不具渗透性泥岩中的深成侵染状水合物占了 99%,因此,具开采价值的高饱和度水合物少之又少。从这点出发,将浅成水合物作为一种具有开采价值的对象对水合物勘

收稿日期:2015-12-09

基金项目:青藏高原天然气水合物调研项目(B0812)

作者简介:刘玉山(1935—),男,研究员,主要从事实验岩石矿物学、大洋结壳以及天然气水合物方面的研究工作。E-mail:2410198826@qq.com

探和开采是很有必要的。

Boswell 等从资源角度对天然气水合物进行了分类,在其“水合物资源金字塔”中,块状和裂隙充填型水合物均属于浅成水合物(图 2)^[9,10],资源量虽不大,但均位于金字塔的上部,说明其具有较高的资源价值。因为天然气水合物的质量在塔顶最高(可作为能源资源),向下递减,而资源的数量则向下递增(TCF,万亿立方英尺)。

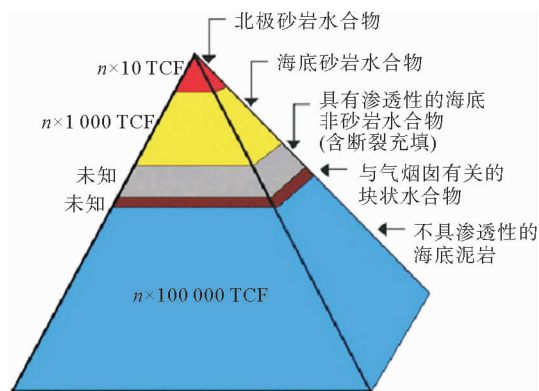


图 2 Boswell 等的“天然气水合物资源金字塔”(据文献[9])

Fig. 2 The gas hydrate resource pyramid, by Boswell(from reference [9])

2 浅成水合物的特征(以日本海上越水合物为例)

日本海上越浅成水合物是近几年才发现和探明的。2003 年在勘探佐渡岛近海石油天然气时就发现海床下几米处赋存有块状水合物,但未引起重视。直至若干年后东京大学的松本(Matsumoto)^[11]在对上越盆地进行物探测量时才通过钻探取样证实了该区存在浅成水合物。

上越浅成水合物位于日本海东缘的上越盆地,佐渡岛西南。在地质构造上,盆地处在由北美板块与欧亚板块汇聚构成的构造活动带南端。盆地大约形成于 2~3 Ma 前活动带由扩张向挤压转换时期。盆地内发育有新近纪上新世富含有机物的巨厚沉积。

2013 年,日本石油天然气部自然资源和能源局(Agency for Natural Resources and Energy (ANRE))组织启动了一次为期 3 年的全方位的地质—地球物理专题考查(FY2013),旨在调查上

越冲和西能登(Joetsu knoll 和 west Noto)海域约 15 000 km² 范围内的浅成水合物资源(图 3)^[12]。除常规地震测量外,调查还使用水下声呐和水下遥控摄像以观测海床地形地貌和海底生态,对水合物有关的地质体执行了活塞钻探取样。在研究区范围内,发现了大小 225 个气体烟囱结构(gas chimneys)、渗漏、喷气孔和麻坑(pockmarks)以及碳酸盐岩和水合物丘^[12]。许多气体烟囱结构直接暴露于海床上,有些凸起成海丘。对较大烟囱结构的近距离观察和研究首次确认在气体烟囱内部和上方赋存有高饱和度的水合物,并首次确认气体烟囱结构是水合物的容岩。

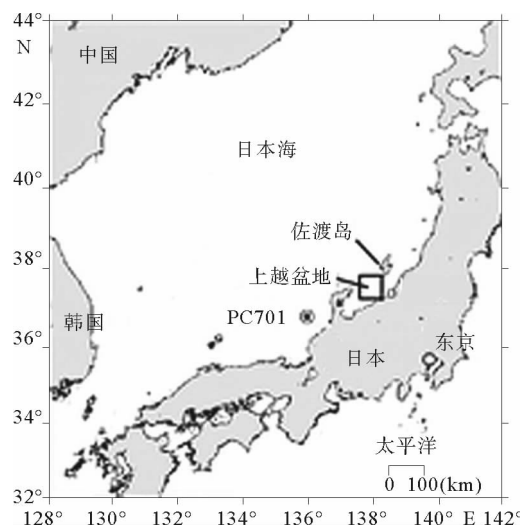


图 3 日本海上越盆地的地理位置(据文献[8,13]修改)

Fig. 3 Location of the Joetsu Basin of the Japan Sea (modified from references [8,13])

松本对上越浅成水合物及其相关气体烟囱结构的地质地球化学特征进行了较深入的研究。处在活动带的上越盆地水合物赋存区水深约 1 000 m,海床下的地温梯度较大,为 10 °C/100 m。地震测量得出,研究区的 BSR 面约在海床下 150~200 m,由地温梯度测算的水合物稳定带基底(BGHSZ)约在海床下 150 m。海床上发育有上百个烟囱结构、羽状流和喷气口,喷流可高达几十米。一些烟囱结构非常庞大,直径 200~500 m,个别甚至达 900 m。烟囱结构上部发育有块状和瘤状水合物,有一些则暴露于海床之上,水合物堆积或坍塌形成水合物丘。曾对烟囱结构和水合物丘进行活塞钻探取样,钻进到十几米取到

的岩心为块状水合物或水合物与碳酸盐岩混杂物(图 4)。



图 4 上越盆地活塞取样取出的块状水合物岩心(据文献 [1])

Fig. 4 A sample of massive gas hydrate from Joetsu Basin(from reference [1])

地震测量和海底摄像能够识别出与水合物密切相关的气体烟囱结构。在地震剖面上,烟囱结构表现为声波混乱区的垂直叠加,因为含甲烷气体的流体沿断层或破碎带上升,致使上升区岩石密度和物理性质发生了改变(图 5)^[12]。

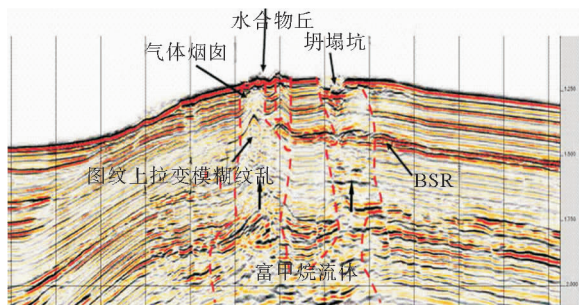
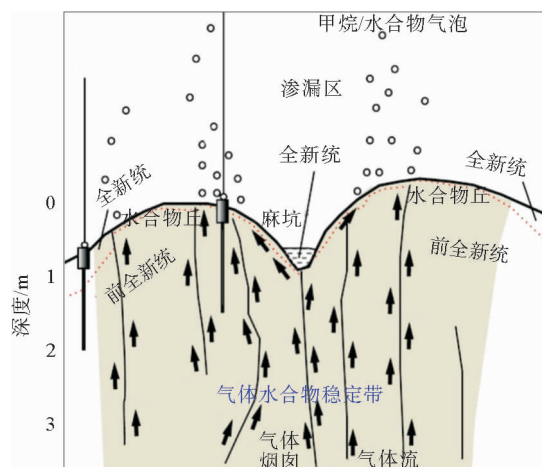


图 5 气体烟囱结构的地震剖面(据文献 [12])

Fig. 5 Gas chimney structure on seismic profiles (from reference [12])

地震测量和摄像还揭示水合物区发育有深部和浅部断裂破碎带,它们对浅成水合物形成和分布起着控制作用。研究揭示^[13],盆地的气体烟囱结构、羽状流和喷气口以及相伴的浅成块状水合物均是由深部气源层热解烃类气体上升形成的,断层或断裂破碎带为流体上迁提供了良好的通道。当富甲烷流体上升到达水合物稳定带时,即可在气体烟囱结构的上部(海床下几米至几十米处)生成浅成水合物。如若海床处在水合物稳定带范围内,则富甲烷流体上升到海床上,也能够海床上形成水合物堆积。但水合物在海水中是不稳定的,很容易发生分解,析出甲烷气体而形成渗漏和羽状流(图 6)。



注:气体流沿构造通道上升,进而形成烟囱结构,并在其上部 and 周围形成块状水合物堆积、水合物丘、渗漏和麻坑

图 6 上越盆地气体烟囱结构示意图(据文献[13])

Fig. 6 The schematic diagram showing the fluid raising through faults to form gas chimney, Hydrate mound and pockmark(from reference [13])

上越盆地浅成水合物的形成均发生在全新世。在气体烟囱结构范围内水合物和碳酸盐岩堆积往往打乱了年龄为 14~24 ka 沉积层的正常层序,表明烟囱上部 and 周围的块状水合物形成的年龄小于 14 ka。

对海床上的渗漏甲烷及活动烟囱结构相伴的块状水合物还进行了同位素测定,结果显示,水合物丘中的水合物甲烷及渗漏甲烷的碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值多为 $-59\text{‰} \sim -31\text{‰}$,属热解烃气。但是

一些海床上的块状水合物和麻坑中水合物气体也显示为生物—热解混合成因。学者据此认为,形成上越盆地浅成水合物的烃类气体主要为来自深源的热解气体,同时也有生物成因的甲烷参与。

根据上越及郁陵盆地水合物的地质地球化学资料,总结出浅成水合物具以下特征:①位于主动或被动陆缘近海,特别是断层—断裂构造活跃的主动陆缘的陆坡;②水合物区发育的沉积盆地沉积厚度大,沉积速率高,并且流体活动强烈,流体流通量高;③海床上发育有渗漏、冷泉、喷气孔及烟囱结构、底辟构造,特别是见有自生碳酸盐岩丘和水合物丘;④地震剖面上缺失 BSR,或 BSR 不规则,显示有烟囱或底辟结构;⑤盆地深部存在有油气储层或石盐层。

3 浅成气体水合物的形成

海洋天然气水合物可以划分为深成和浅成 2 种类型,前者赋存于海床下几百米的沉积层中,后者则生成、堆积在海床上和海床附近,或者赋存于海床下十几米至三四十米的浅部沉积层中^[13]。两者不仅赋存部位不同,而且成因和形成机制也各不相同。深成水合物主要是由生物成因甲烷气体在海底岩层中原位生成的(即所谓“自生”auto-gene),而浅成水合物则主要是由深源烃沿构造带上升至海床附近生成并堆积而成(即所谓“异生”allogene)(图 7)。

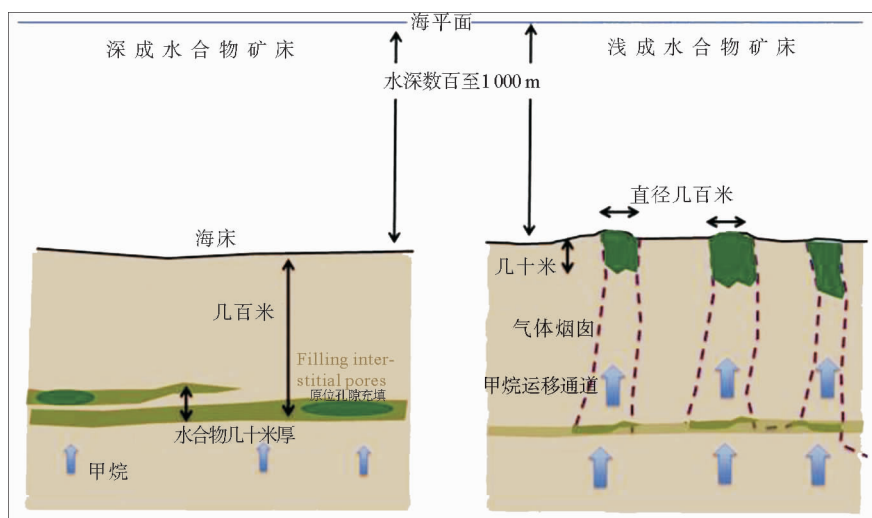


图 7 2 种类型的海洋水合物的赋存深度和特征示意图(据文献[12])

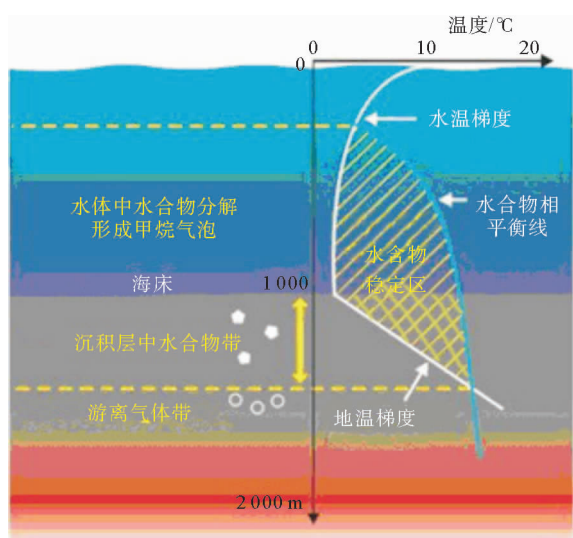
Fig. 7 Two types of marine gas hydrates and their characteristics(from reference [12])

水合物的生成,除需气体和水外,还须具备适合的温度—压力条件。由温度梯度和甲烷相平衡曲线所圈定的气体水合物稳定带(GHSZ)就是水合物形成和稳定的温度—深度范围(图 8)^[14]。相图显示,在水深 1 000 m 的海域,水合物的稳定带范围较大,从海床到海床下几百米深的岩层,都可以是水合物生成和稳定存在的区间。海床之上的部分水体虽亦属稳定带,但水合物在水中不稳定,会因浮力上升而分解,形成甲烷气泡流。

浅成水合物的形成除需满足相平衡限定的温压条件外,还必须有充足的富甲烷流体供给。其

补给可经由扩散(diffused)和集束(focused)流 2 种方式传送。深海沉积层为渗透性差的泥质岩,气体只能在岩石粒间孔隙慢速扩散(浸润),形成间隙充填型低饱和度的侵染状水合物(深成水合物)。海床附近的浅成水合物属高饱和度的块状水合物,其形成需要高通量的流体——集束流,以保持沉积层和间隙水中甲烷的高浓度^[12,13]。只有在这种环境中,水合物才可能不断形成生长,堆积成块状水合物,并避免分解。这种高通量的流体只能通过断层或破碎构造带才能从深部烃源层上升运移到海床浅部,这就是构造活跃带流体

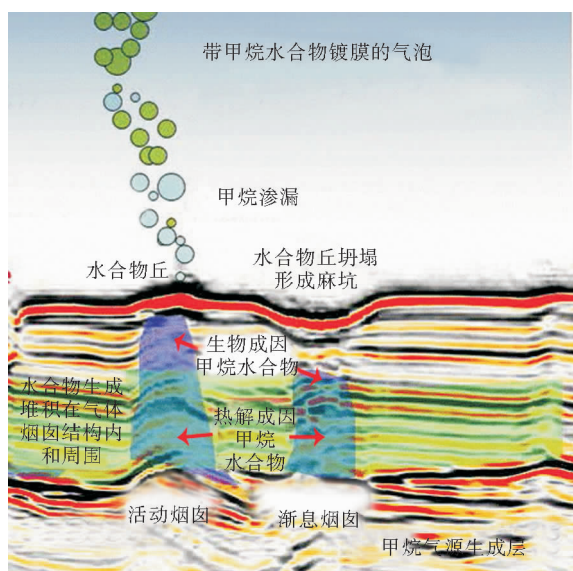
的集束传输(focused migration)。浅成水合物形成的环境可示意于图 9。



注:图中黄色菱形格区为水合物的稳定区

图 8 海洋环境中水合物稳定带的温度—深度相平衡图(据文献[12]修改)

Fig. 8 The GHSZ in the temperature-depth phase diagram(modified from reference [12])



注:流体流量大时形成烟囱构造和与之相伴的水合物堆积,流量减小导致水合物丘坍塌形成麻坑

图 9 浅成水合物及烟囱构造形成的示意图(据文献[12])

Fig. 9 The schematic diagram showing gas chimneys and gas hydrate accumulations in Joetsu Basin (from reference [12])

浅成水合物的赋存形式是多样的,多数高饱和度的块状水合物赋存在气体烟囱结构的上部和周围。当气体烟囱结构通达海床面时,水合物可以呈瘤状和致密块状堆积在海床上或构成水合物丘。某些情况下浅成水合物可以呈层状、透镜状发育于海底沉积层中,埋藏深度多为海床下几米至十几米,已知最深的达 40~50 m。这类浅成水合物多与自生碳酸盐岩共生,或在其上覆盖着碳酸盐层。碳酸盐中的 CO_2 来自甲烷在浅部的氧化。

水合物丘是浅成水合物主要的赋存形式,具有一定规模和开采价值的高饱和度块状水合物多赋存在烟囱结构上部和水合物丘中。根据水合物丘或碳酸盐岩丘的形态和特征还可揭示浅成水合物形成—分解的发展阶段(图 10)。Serie 等^[5]曾分别总结出了水合物丘发生发展各阶段的特征:①边界形态平滑清晰且具有较强的 BSR 层的海丘预示海床下面存在烟囱结构,其上或有水合物丘;②海床岩层呈圆丘状凸起的,或表示水合物丘正在形成(高通量流体沿断层通道上升、在浅部岩层中水合物不断形成和堆积,致使上覆岩层膨胀和上抬);③如果区内同时存在 2 种形态的海丘,一种形状和边界平滑陡直,另一种海丘粗糙不规则、不具内部结构和基底反射,但伴有 BSR,并且呈微微下沉,则区内海丘多为水合物丘;④地震剖面中海床面强烈的振幅代表坍塌的水合物丘,振幅可能是由残存的水合物透镜体和自生碳酸盐岩体所引起。

在已知浅成水合物中,烃类气体的化学成分和成因类型是比较多样的。由化学和同位素研究结果得知,上越盆地浅成水合物中的烃类气体主要为热解成因的,而在郁陵盆地,浅成水合物中的甲烷主要为生物成因的。更常见的情况是,形成水合物的烃类气体多为生物—热解混合成因。

浅成水合物形成和堆积的机制比较复杂,现在的认识尚不够一致。一些学者认为水合物在海床—水体界面上不稳定,处于动态平衡;但是大家也有共识,那就是浅成水合物的赋存和堆积需要高通量的富甲烷流体,尤其是块状高饱和度的水合物是由高通量流体经由断层或断裂构造通道以集束流形式向上运移至海床附近形成的。

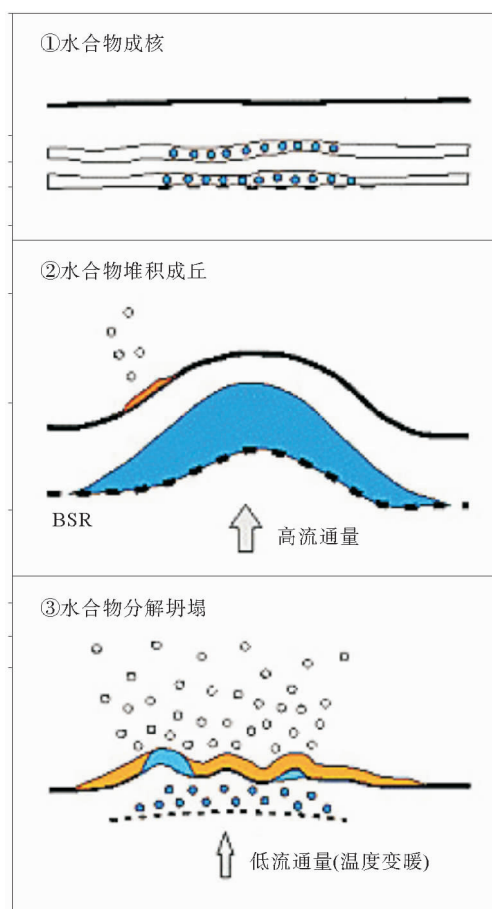


图10 浅成水合物中水合物丘的形成和发展示意图(据文献[5])

Fig. 10 The formation and development of gas chimneys for shallow gas hydrate deposits(from referenc [5])

4 结论

广泛分布的浅成水合物以其产出深度浅、饱和度高而成为更适于开采的对象。它们主要赋存于断层—断裂构造活跃的近海陆缘盆地。海床上广泛生成发育的渗漏、喷气孔、烟囱结构和底辟构造是这类水合物赋存的地质地貌标志。而大型烟囱结构、水合物丘及水合物—碳酸盐岩丘的形态和特征则可指示其形成发展的阶段和资源前景,其中,最有价值的可能是水合物丘类型。南海北缘珠江口等盆地具有浅成水合物生成的地质构造特征,我国业已在东沙取得了重要的发现^[15]。现在的研究区位于北缘陆坡地壳变形减薄带的中部,海底莫霍面隆起也较高,地幔流体的活动相对

强烈,是寻找浅成水合物矿藏的有利区段。客观地说,对这类浅成矿藏的资源评价和开采技术的研究还刚开始,与水道砂体、浊积体水合物类型的矿藏相比,还有很多工作要做。

参考文献:

- [1] Boswell R. Gulf of Mexico gas hydrate drilling and logging expedition underway[J]. Fire in the Ice, 2009, 9(2): 1-16.
- [2] Brooks J M, Anderson A L. Hydrate occurrences in shallow subsurface cores from continental slope sediments[J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2006, 715(1): 381-391.
- [3] Chapman R, Pohlman J, Coffin R. Thermogenic gas hydrates in the northern Cascadia margin[J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 2004, 85(38): 361-368.
- [4] Paull C K, Ussler W III, Dallimore S R. Origin of pingo-like features on the Beaufort Sea shelf and their possible relationship to decomposing methane gas hydrates[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(1): L01603.
- [5] Serié C, Huuse M, Schödt N H. Gas hydrate pingoes: Deep seafloor evidence of focused fluid flow on continental margins, Geological Soc. of America[J]. Geology March, 2012, 40(3): 207-210.
- [6] Choi J. Gas geochemistry for gas hydrate in the Ulleung Basin, East Sea[C] // Proceedings of the 7th International Conference on Gas Hydrates (ICGH 2011), Edinburgh, Scotland, United Kingdom, July 17-21, 2011.
- [7] Wu N Y, Zhang G X, Liang J Q, et al. Progress of gas hydrate research in Northern South China Sea[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2013, 1(1): 80-94.
- [8] METI. Survey for Shallow Methane Hydrate Resources was Conducted in FY2013 [R]. ANRE, Japan, 2013.
- [9] 刘玉山, 祝有海, 吴必豪. 海洋天然气水合物勘探与开采研究进展[J]. 海洋地质前沿, 2013, 29(6): 23-31.
- [10] Boswell R, Collett T S. The gas hydrate resource pyramid [J]. Fire in the Ice, Methane Hydrate R&D Program Newsletter, Fall 2006.
- [11] Matsumoto R. Formation and collapse of gas hydrate deposits in high methane flux area of the Joetsu Basin, eastern margin of Japan Sea[J]. Journal of Geography, 2009, 118(1): 43-71.
- [12] Matsumoto R, Freire A F M, Sotoh N. Shallow gas hydrate accumulation in the eastern margin of Japan Sea: A potential natural gas resource[C] // AAPG International Conference and Exhibition, At Cape Town, South Africa, 2014.
- [13] Freire A F M, Matsumoto R, Akiba F. Geochemical analysis as a complementary tool to estimate the uplift of sediments caused by shallow gas hydrates in mounds at the

- seafloor of Joetsu Basin, eastern margin of the Japan Sea [J]. *Journal of Geological Research*, 2012, 2012: 839-840. doi:10.1155/2012/839840.
- [14] Gorman A L, Senger L K. Defining the up dip extent of the gas hydrate stability zone on continental margins with low geothermal gradients[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115: B07105.
- [15] 杨胜雄, 张光学, 梁金强, 等. 中国南海东沙区的复合水合物体系, GMGS-II 钻探结果[C]// 第 8 届国际天然气水合物会议文集. 北京: 中国地质调查局 (CGS), 2014 (英文版).

SHALLOW GAS HYDRATES, A TYPE OF HYDRATE DEPOSITS MORE SUITABLE FOR PRODUCTION

LIU Yushan, ZHU Youhai, WU Bihao

(Institute of mineral resources, CAGS, Beijing 100037, China)

Abstract: Shallow gas hydrates occur as massive aggregates on the seafloor or in near-surface sediments, and are widely distributed on the continental slopes. They are characterized by high saturation and shallow occurrence, and therefore are considered more suitable for production. Shallow gas hydrates are closely associated with methane seeps, gas chimneys and hydrate mounds, and formed by high flux fluid migrated through faults in the tectonic settings. It is inferred that shallow gas hydrate deposits may occur in the SCS.

Key words: shallow gas hydrates; gas chimneys; hydrate mounds