

日本南海海槽东部天然气水合物产出与富集特征

赵克斌

(中国石化石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126)

摘要: 根据日本南海海槽东部天然气水合物钻探与综合大洋钻探计划研究成果, 分析总结了该区天然气水合物形成的地质背景与赋存特征。南海海槽区作为构造活动强烈的会聚式大陆边缘, 大型增生楔与断裂系统十分发育, 富含重力流沉积物。特别是该海槽北部向陆斜坡水深 2 000 m 以浅海域, 发育一系列弧前盆地, 盆地内第四系未固结沉积物广泛分布, 沉积速率较高, 为水合物的形成提供了良好的环境。水合物钻探取心分析揭示, 南海海槽东部天然气水合物为 I 型结构, 水合物分解气中甲烷组分占比普遍高达 99.9% 以上, 甲烷碳同位素分析显示为典型的生物成因气。水合物主要以孔隙填充型产出, 优先选择在富砂层中富集, 富砂层段水合物饱和度一般为 50%~60%, 可高达 80%~90%, 泥质层中水合物饱和度极低。

关键词: 天然气水合物; 发育背景; 赋存特征; 富集区; 南海海槽; 日本

中图分类号: TE122.11

文献标识码: A

Occurrence and accumulation characteristics of natural gas hydrate in the eastern Nankai Trough, Japan

ZHAO Kebin

(Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China)

Abstract: The geological setting and occurrence characteristics of natural gas hydrate in the eastern Nankai Trough offshore Japan have been analyzed and summarized based on the research of gas hydrate drilling expeditions and the Integrated Ocean Drilling Program conducted in this area. As part of the convergent continental margin with strong tectonic activity, the Nankai Trough has well-developed fault and fracture systems, and is rich in gravity flow sediments. Especially in the continental slope of the northern trough with water depth shallower than 2 000 m, a series of fore-arc basins exist, filled with widely distributed unconsolidated Quaternary sediments. The deposition rate of these young sediments is rather high, providing favorable conditions for the formation of gas hydrate. Analyses of the drilling cores taken from this area indicate that the gas hydrate is type I, comprising 99.9% or more methane. The carbon isotopic analysis shows that methane forming the gas hydrate is typically microbial. The gas hydrate occurs commonly in a dispersive state, filling in the pores of the sediment, preferentially accumulating in the sand-rich sediments. The hydrate saturation in the sand-rich intervals is commonly 50%–60% and can reach as high as 80%–90%; whereas the hydrate saturation in the shale layers is extremely low.

Key words: gas hydrate; developing settings; occurrence characteristics; accumulation zone; Nankai Trough; Japan

日本南海海槽作为日本天然气水合物研究的重点区域, 迄今已持续进行了 20 多年水合物研究工作^[1-3], 其间开展了大量地质调查、地震勘探、地球化学勘探、海洋电磁测量以及钻探研究, 并实施了 2 次水合物开采试验, 是日本乃至全世界最为突出的天然气水合物热点研究区之一。特别是在南海海槽东部海域, 自 1999 年以来开展了多轮水合物钻探测井与取心研究^[1, 3-6]; 同时, 大洋钻探计划 (ODP) 与综合大洋钻探计划 (IODP) 也在该海域开

展了多个钻探航次^[7]。通过上述研究, 加深了对该海域天然气水合物发育背景与赋存特征的认识, 初步查明了水合物富集区与富集层段分布规律。

本文基于日本南海海槽东部天然气水合物钻探与综合大洋钻探计划研究成果, 对该海域水合物发育背景与赋存特征进行了分析, 明确了南海海槽东部水合物富集区分布特征, 指出在气源充足的前提下, 富砂储层是形成水合物富集区的关键因素, 强调砂质储层与泥质盖层的合理配置有利于形成

高品位水合物资源,我国天然气水合物富集区优选可以借鉴这些认识。

1 水合物发育的地质背景

1.1 构造背景与沉积环境

日本南海海槽位于日本岛弧西南,从本州岛中部骏河湾海域一直延伸到四国岛以南海域,再延伸到九州岛东南海域。该海槽形成于上新世以来菲律宾板块向欧亚板块的俯冲作用^[8]。菲律宾板块在此以每年3~5 cm的速度俯冲到欧亚板块之下,伴随着强烈的构造活动,使南海海槽成为现今构造活动最活跃的地带之一。菲律宾板块俯冲及其后的一系列构造挤压和再沉积作用在南海海槽区形成了一个平行于海沟的巨大增生楔形体。在板块俯冲过程中,因增生楔形体的不断扩大使弧间岩石圈挠曲并下沉从而形成了多个弧前盆地,如位于南海海槽东北部的熊野盆地与远洲海槽等。这些弧前沉积盆地以早期形成的增生楔为基底^[9](图1),分布于水深约800~2 000 m的海槽向陆侧斜坡区^[8],具备海域天然气水合物形成所要求的基本水深条件。

海槽向陆侧因一系列脊隆和脊间阶地的抬升作用而延伸到九州、四国和本州岛近海的外陆架区。在海槽北部向陆侧斜坡区,弧前盆地内重力流沉积物非常丰富^[9]。盆地填充地层年代较新,上新世沉积层厚约1 km^[8],富砂层较为发育,具备良好的水合物储集条件。根据IODP钻探研究资料,该区斜坡盆地可划分出3套地层:(1)底部楔形块体流沉积层,包括早期沉积的块体流沉积和后期夹有层状砂、粉砂和火山灰的绿色—灰色粉砂质黏土层;(2)中部浊积流沉积层,主要为夹有绿色—灰色粉砂质黏土和火山灰层的粗粒浊积层;(3)表层块体流沉积层,主要为含有火山灰和砂质粉砂的半

远洋泥质沉积层^[9]。

在早期增生楔内部,断裂系统十分发育,形成了弧前盆地边界断层带、多分支断层带、叠瓦状断层带、前缘逆冲断层带等多个断裂分布单元^[9]。增生楔形成过程中伴随着明显的富烃流体排放作用,这些富含甲烷的地层流体可沿断裂与沉积层颗粒间孔隙向上流动,对浅部沉积层中水合物的形成起到了很大促进作用^[10]。断裂系统的广泛发育,不仅可为深部热成因气,也可为浅部生物成因气提供良好运移通道,有利于天然气水合物稳定带之内水合物的形成与富集。

增生楔构造、断裂系统与重力流富砂沉积层的广泛发育,使得南海海槽区具备形成水合物的天然气运移与储集的优良环境,为该区天然气水合物的形成与富集奠定了良好的物质基础,提供了有利的储集空间。

1.2 水合物钻探区地质特征

海槽区水深介于4 500~4 900 m,海槽西南部较深,向东北变浅。迄今为止,南海海槽天然气水合物研究主要集中于海槽东北部的槽坡区,在熊野滩、第二渥美海丘以及日本东海海域(图2)都进行了多轮钻探研究^[11-13]。

作为南海海槽北部斜坡区最大的弧前盆地^[14],熊野盆地及其邻近区是南海海槽天然气水合物研究的重点区域。早年IODP315航次在熊野盆地的钻探研究揭示,该盆地第四系富砂沉积物广泛分布,沉积速率通常大于800 m/Ma^[7]。该航次在熊野盆地西南边缘C0002站位的钻探研究中,实施了2口井的钻探工作并分别在海底以下0~204 m和475~1 057 m 2个层段开展了取心研究。根据2口井岩性特征,将取心层段分为上弧前盆地、下弧前盆地、弧前盆地基底和上部增生楔4种地层单元。相比而言,上弧前盆地和下弧前盆地单元砂质

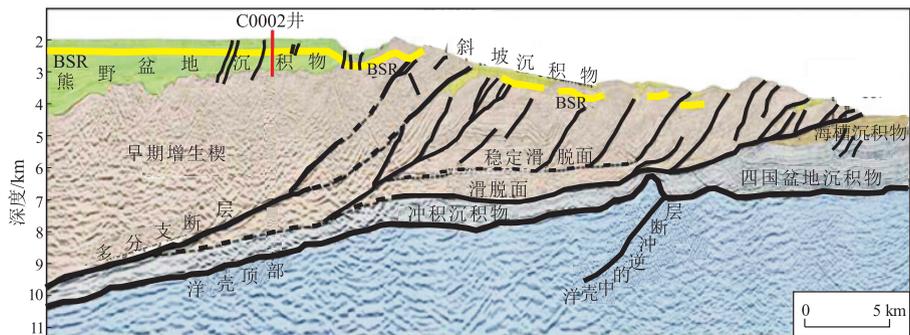


图1 日本南海海槽东部增生楔构造及地层学特征

据参考文献[7],修改。

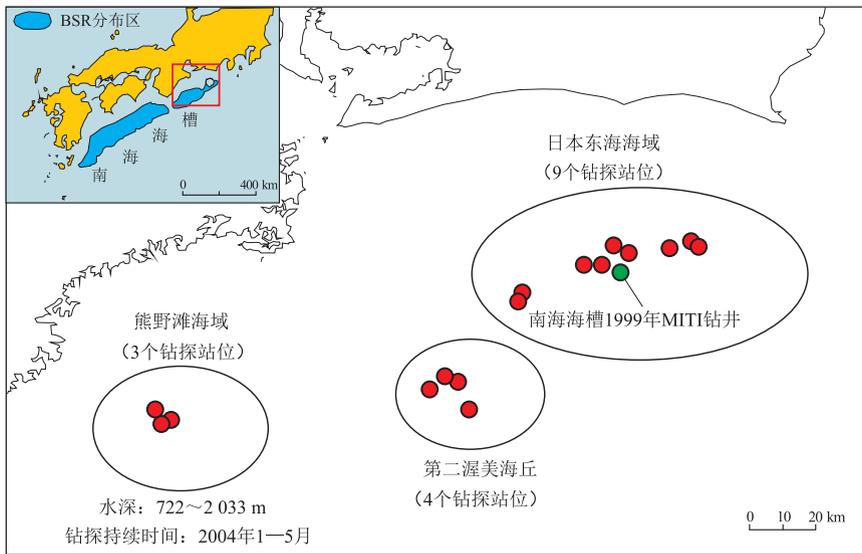


图2 日本南海海槽东部2004年天然气水合物钻探区分布^[13]

Fig.2 Main gas hydrate drilling areas during the 2004 offshore expedition in eastern Nankai Trough, Japan

与粉砂质沉积物含量更为丰富,沉积速率更高。从C0002D井研究结果看,该井钻遇的上弧前盆地地层单元和下弧前盆地地层单元均为第四系。上部取心单元岩性为半深海泥质与粉砂质沉积物以及富含火山灰的细砂与粉砂质沉积物;下部取心单元岩性也为半深海泥质与粉砂质沉积物以及细砂与粉砂质沉积物,但很少含有火山灰^[7]。从岩性纵向分布看,上部黏土层较为发育,下部砂质含量较丰富(图3)。

在熊野盆地东部第二渥美海丘北坡天然气水合物勘探过程中确定了一个面积约12 km²的水合物富集区(即β水合物藏),迄今已实施2次水合物试采研究。β水合物藏分布水深介于857~1 405 m,水合物开采井水深约1 000 m,水合物富集层段位于海底以下275~337 m^[15]的第四系中—上更新统小笠群深水浊积河道系统之中^[5, 16-17],其下部以不整合方式与挂川群地层单元相接触。地震地层学研究将β水合物藏从下向上依次划分为Og-a—Og-i共9个单元^[18],其中Og-b砂质沉积单元构成了该水合物藏的下部富集层段,Og-c砂层—泥层互层单元构成了该水合物藏的上部富集层段^[19],Og-c单元上方为Og-d—Og-h泥质沉积层(图4)^[16, 19]。

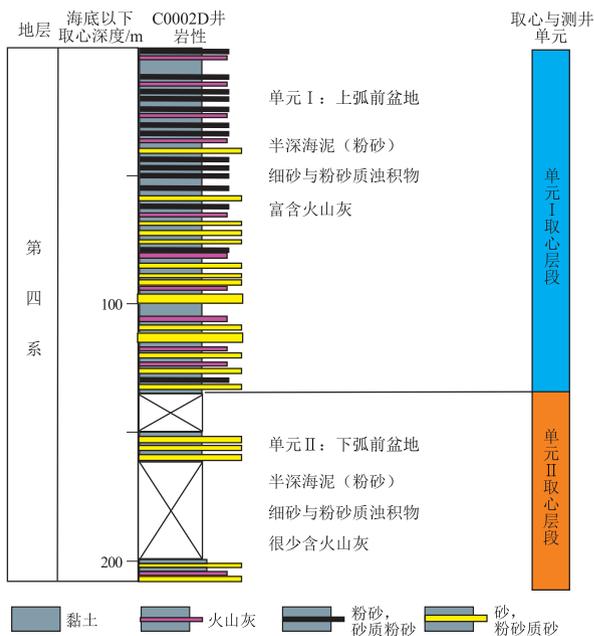


图3 日本南海海槽熊野盆地西南边缘IODP315航次C0002站点C0002D井岩性分布^[7]

Fig.3 Lithology distribution of well C0002D drilled during IODP Expedition 315 on southeastern edge of Kumanonada Basin, Nankai Trough, Japan

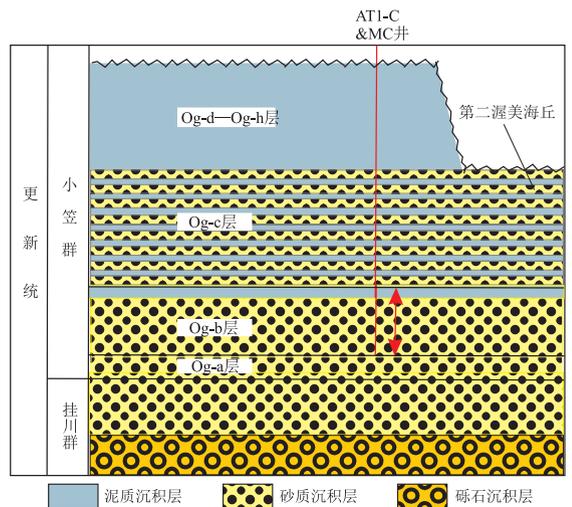


图4 日本南海海槽东部第二渥美海丘天然气水合物藏地层分布^[19]

Fig.4 Stratigraphic columns of Daini-Atsumi Knoll natural gas hydrate reservoir in eastern Nankai Trough, Japan

β 水合物藏钻探揭示的地层分布,与早年综合大洋钻探计划 C0002 站位获得的熊野盆地地层岩性分布具有较好的相符性,表明该海域深部发育富砂沉积层,上部存在连续性良好的泥质沉积层,可对形成水合物的气体起到较好的封存作用,有利于深部富砂层形成较高资源品位水合物藏。

2 水合物产出与赋存特征

2.1 水合物产出特征

海槽第二渥美海丘的钻探取心研究证实,天然气水合物分布具有明显的不均匀性,优先赋存于多孔浊积砂层之内,以孔隙填充型产出^[5-6, 11-12, 18],泥质沉积层中未发现肉眼可见的脉状与层状水合物^[15]。早年在日本东海海域 MITI 井的水合物钻探取心研究,也揭示水合物赋存于夹杂有粉砂层与泥质层的细粒—中等粒度砂层,填充于粒间孔隙之中,极少赋存于泥质沉积层^[4]。海槽东部迄今为止已实施了数十口井的水合物钻探研究,仅在熊野滩海域的泥质沉积层中采出了肉眼可见的块状水合物样品^[11]。整体看来,海槽区天然气水合物主要产于第四系未固结富砂储层中,孔隙填充型水合物占据绝对优势^[20]。富砂储层孔隙发育良好,储气能力强,易于形成水合物富集区(表 1)。根据不同研究者不同时期的研究结果,海槽东部富砂储层中水合物饱和度一般介于 50%~60%,可高达 80%~90%^[1, 20-21]。

2.2 水合物富集层段岩性特征

通过研究水合物赋存层段岩相及其粒度分布特征,明确了沉积层岩性与水合物富集区之间的关系。研究中对采自第二渥美海丘 β 水合物藏的岩心样品依其岩性特征进行了分类,确定了 A、B、C、D 计 4 种不同的岩相类型。其中 A 类样品为块状

表 1 日本南海海槽东部 α 和 β 水合物富集区水合物产出特征^[11-12, 20]

Table 1 Gas hydrate occurrence properties of α and β hydrate concentration zones in Nankai Trough, Japan

项目	特征	
结构类型	I 型水合物	
产出形态	孔隙填充型	
赋存储层	海底浊积体系的未固结富砂层	
储层颗粒	极细—细粒,中等粒度	
储层	砂层	40~50
孔隙度/%	泥层	36~40
水合物饱和度/%	砂层	50~60(最高可达 90)
	泥层	极少含水合物
	砂层—泥层界面	1~3
富砂储层	初始渗透率	1~10
渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	绝对渗透率	100~1 000

砂质粉砂—粉砂质砂,颗粒较粗,分选性较差;B 类样品为具有平行或交叉层理的砂层—砂质粉砂层互层,其中砂层中富含云母矿物;C 类样品为具有粒序层理的砂质粉砂薄层,呈近平行向分布;D 类样品为整块状黏土质粉砂层,有生物扰动痕迹。结合 β 水合物藏纵向地层分布,可以看出,A 类样品均采自水合物藏最下部的河道填充浊积层;B 类样品主要分布于河道填充浊积层上方具有砂层—泥层互层的薄层状浊积层;C 类样品分布范围从底部河道浊积层到其上方薄层状浊积层;D 类样品主要采自水合物藏上方的泥质盖层^[18-19]。天然气水合物富集区主要分布于砂质含量较高、颗粒较粗的下部河道填充浊积层和中部薄层状浊积层之中^[22],形成了上下 2 个水合物富集单元。将上述水合物岩心样品岩相特征叠置于 Shepard 岩性分布三元图(图 5)上,可更直观地看出水合物富集区与储层岩性之间的相关性。采自水合物富集层的 A 类、B 类和 C 类样品主要由砂、粉砂质砂和砂质粉砂组成,而采自水合物上方盖层的 D 类样品则主要为黏土质粉砂。

通过考察取心层段孔隙水氯离子浓度、岩心温度、水合物饱和度以及储层岩性分布特征,同时结合测井结果,从另一角度展现了水合物富集区与富砂层之间的相关性。早年在南海海槽东部日本东海海域 MITI 水合物井钻探研究中,分析了 MITI 主井及 BH-1 钻前勘测井岩心样品的岩性与孔隙水氯离子浓度分布。结果表明,采自黏土与粉砂质沉积层的岩心样品孔隙水氯离子浓度整体上近似于海水,

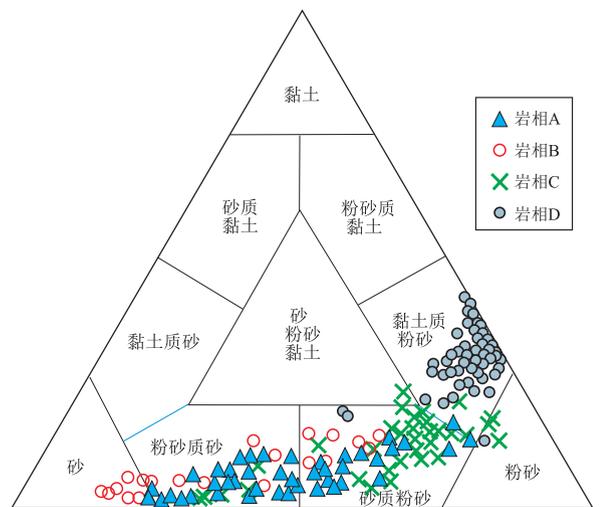


图 5 日本南海海槽东部第二渥美海丘 β 水合物藏岩心样品岩性分布三元图^[22]

Fig.5 Ternary diagram showing lithological features of core samples taken from β gas hydrate reservoir in eastern Nankai Trough, Japan

而砂层岩心样品孔隙水氯离子浓度大多出现低值异常,粉砂层岩心样品氯离子浓度也有部分表现为低值异常(图6)^[1],表明相对于黏土层与粉砂层,水合物更倾向于富集在砂层中。从图6还可以看

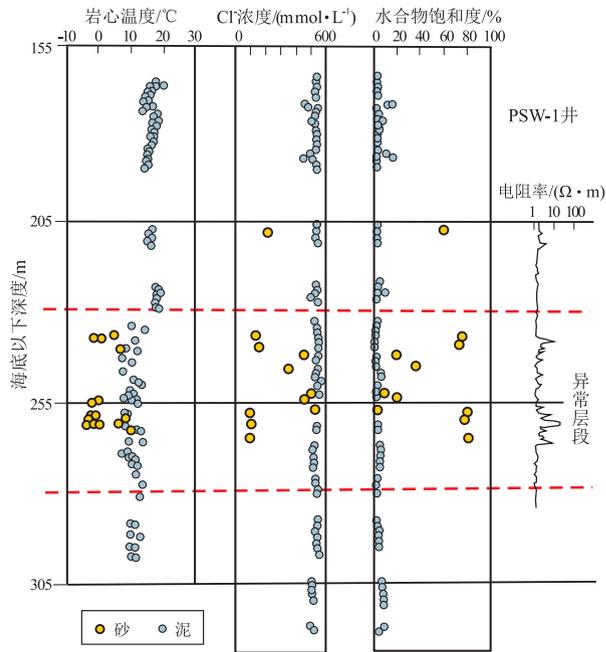


图6 日本南海海槽东部水合物富集区钻探主井岩心测量结果与PSW-1钻后研究井电阻率测井曲线据参考文献[4]修改。

Fig.6 Core temperature, pore-water chloride concentration and gas hydrate saturation of main hole with resistivity log data of post-survey well PSW-1, showing gas hydrate saturation change with lithology, eastern Nankai Trough, Japan

出,岩心热红外低温异常、孔隙水氯离子浓度低值异常与电阻率测井高值异常吻合性较好,高饱和度水合物发育区与富砂层分布区之间密切相关^[4]。

2.3 水合物组分特征与结构类型

为了研究南海海槽区形成水合物的气体的来源与水合物结构类型,进一步加深对该区水合物成因、成藏特征的认识,在2013年该海槽区首次水合物试采研究之前,对采自β水合物藏的28个岩心样品进行了组分与结构方面的详细分析。采用气相色谱仪、质谱仪、核磁共振分光仪以及拉曼分光仪等仪器研究了水合物分解气的气体组成、甲烷碳同位素特征以及水合物晶体结构。结果表明,水合物样品不论是直接降压分解还是经降压—快速淬火处理后分解,所产气体中甲烷成分都占据绝对优势。表2列出了部分水合物岩心样品分解气成分与甲烷碳同位素组成^[23],可以看出,所有样品中甲烷含量都高达99.9%以上,且均含有少量乙烷,经淬火处理的样品中还检出了少量乙烷以上的气态烃。甲烷碳同位素介于-57‰~-69‰。从水合物分解气含量纵向分布看,乙烷含量在海底以下290~295 m和314~317 m层段有所增加,同时,这些层段C₁/C₂比值有所降低(图7),指示有少量热成因气混入的可能。¹³C单脉冲核磁共振光谱分析出现1个主峰与1个次峰,分别指示水合物晶体中较大与较小2种笼体中的甲烷分子。拉曼光谱分析结果同样出现一大一小2个光谱峰,对应着水合

表2 日本南海海槽区水合物岩心样品分解气组分与甲烷碳同位素比值

Table 2 Molecular and isotopic composition of hydrocarbon gases released from hydratebearing core samples taken from eastern Nankai Trough, Japan

样品编号	水合物分解气组分/%							δ ¹³ C _{VPDB} /‰	备注
	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	<i>i</i> -C ₄ H ₁₀	<i>n</i> -C ₄ H ₁₀	neo-C ₅ H ₁₂	<i>i</i> -C ₅ H ₁₂		
8P(190-198)	99.998 4	0.001 6	-	-	-	-	-	-62	
10P(33-93)	99.995 1	0.004 9	-	-	-	-	-	-65	
10(177-187)	99.994 9	0.005 1	-	-	-	-	-	-69	
12P(139.5-145.5)	99.992 8	0.007 2	-	-	-	-	-	-68	
12P(191.5-198.5)	99.988 2	0.011 8	-	-	-	-	-	-66	样品降压后未经淬火处理
14P(26.5-36.5)	99.998 2	0.001 8	-	-	-	-	-	-59	
18P(153-186)	99.994 8	0.005 1	-	-	-	0.000 1	-	-59	
18P(198.5-231)	99.993 2	0.006 8	-	-	-	-	-	-57	
20P(120-136)	99.974 7	0.025 8	-	-	-	0.000 1	-	-58	
20P(136-145)	99.979 7	0.020 3	-	-	-	-	-	-65	
10P(0.5-5.5)	99.992 8	0.005 5	0.000 8	0.000 9	<0.000 1	-	-		
12P(3-6.5)	99.993 0	0.004 4	0.001 0	0.001 3	0.000 1	<0.000 1	<0.000 1		
12P(1-6)	99.994 6	0.004 4	0.000 5	0.000 4	0.000 1	-	-		样品降压后经液氮快速淬火处理
20P(179-182)	99.981 4	0.017 0	0.000 8	0.000 7	-	-	-		
20P(202-208)	99.972 5	0.023 9	0.000 4	0.002 8	-	0.000 2	0.000 1		
20P(208-214)	99.965 1	0.024 6	0.000 4	0.008 4	<0.000 1	0.000 2	0.000 2		

注:表中数据据参考文献[23],有修改。

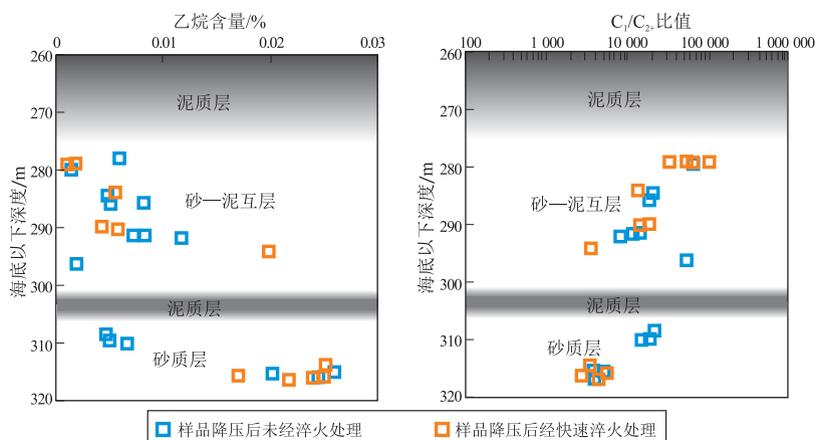


图 7 水合物样品中乙烷浓度(a)与 C_1/C_2 比值(b)随深度变化^[23]

Fig.7 Distribution of ethane concentration (a) and C_1/C_2 ratios (b) of hydrate dissociation gases with depth

物结构中 2 种规格笼体中的甲烷分子。综合水合物岩心样品 ^{13}C 核磁共振与拉曼光谱特征分析结果,以及水合物分解气甲烷占比与甲烷碳同位素组成特征,推断该海域天然气水合物为主要由生物成因气形成的 I 型水合物,水合数为 6.1^[23]。

关于南海海槽区天然气水合物组分与气源特征,早年在该海槽其他海域的研究也获得了相似的结果。1999—2000 年间,在南海海槽东北部的日本东海海域开展的第一轮天然气水合物钻探研究,就已发现该区水合物分解气中甲烷占据绝对优势,仅出现少量乙烷, C_1/C_2 值介于 4 392 ~ 5 363^[6],水合物分解气甲烷碳同位素比值介于 $-96‰ \sim 63‰$,具有明显的生物成因气特征^[6]。在生物成因气水合物气源方面,研究认为海槽东部形成水合物的生物气主要源于 CO_2 微生物分解作用。但相关研究表明,该区第四系地层有机碳含量普遍较低, β 水合物藏所处的更新统有机碳含量约为 0.5%^[2],生物气如何能够为该区 $1.1 \times 10^{12} m^3$ 的水合物估算资源量提供充足的气源,仍是一个有待研究的问题。

4 结论与启示

4.1 结论

(1) 日本南海海槽区强烈的构造活动为天然气水合物的形成与储集提供了良好的气源、运移与储集条件。南海海槽地处菲律宾板块和欧亚板块的汇聚边界,强烈的板块碰撞作用形成了一个巨大的增生楔,并在从海槽槽底到海槽北部向陆侧斜坡区形成了多种类型断层带,海槽北部斜坡水深较浅区发育多个弧前盆地,重力流富砂沉积丰富,沉积速率快,地层孔渗条件较好,有利于形成水合物的

气体运移、储集与高饱和度水合物藏的形成。

(2) 海槽东部第二渥美海丘区天然气水合物产出形态以孔隙填充型为主,在河道砂浊积层及其上部薄层状浊积层中形成了 2 个水合物富集单元。海槽东部 β 水合物藏钻探取心与测井研究表明,水合物主要以分散态填充于富砂层颗粒之间的孔隙之中,产出形态以孔隙填充型占绝对优势。水合物富集于河道填充浊积层与其上部由砂—泥互层构成的薄层状浊积层之内,富砂层中水合物饱和度最高可达 90%,泥质层段水合物饱和度极低。

(3) 海槽东部天然气水合物气源以生物成因气为主导,结构类型为 I 型。综合水合物分解气中甲烷含量、甲烷碳同位素比值以及水合物样品 ^{13}C 核磁共振与拉曼光谱特征分析结果,推断南海海槽东部天然气水合物为 I 型结构水合物,气源主要为生物成因气,但也存在少量热成因气混入的可能性。

4.2 启示

(1) 构造活动强烈的近海陆坡区是海域天然气水合物富集的有利场所。陆坡区沉积速率较快,沉积物含有有机质丰富且颗粒相对较粗,为生物气的形成与天然气的储集提供了优良的沉积环境。特别是在构造活动强烈的区域,如海底增生楔、断裂带、底辟以及泥火山发育区,天然气运移通道条件较好,使得天然气能够顺利进入浅部水合物稳定带。相对于深海平原,近海陆坡区往往更易于形成具有较高资源品位的天然气水合物藏。

(2) 局部富砂储层的发育是形成天然气水合物富集区的关键因素。全球半个世纪的天然气水合物勘探研究表明,分散状是自然界天然气水合物最主要的赋存状态。分散状水合物的资源潜力,不

能仅通过水合物饱和度进行判断,必须同时考虑水合物储层的孔渗性能。在天然气水合物稳定带之内,局部富砂层具有较强的形成水合物的气体储集能力,导致水合物富集区往往优先发育于富砂层段。因此,富砂层水合物藏应成为水合物富集区优选的重点目标。

(3)局部富砂储层与泥质盖层的合理配置有利于形成高品位水合物资源。若要形成具有资源品位的水合物藏,储集层具有合适的孔渗条件与较强的储气能力是重要前提。储集层上方存在封盖性能良好的地层,无疑有利于储集层中气体的保存与高品位水合物资源的形成。自然界天然气水合物通常在未固结富砂储层中发生富集,水合物富集区往往上覆具有一定厚度的低渗透性泥质沉积层。在气源充足的前提下,局部富砂储层与区域性泥质盖层的合理配置是形成高品位水合物资源的有力保障。

参考文献:

- [1] MATSUMOTO R, TOMARU H, LU Hailong. Detection and evaluation of gas hydrates in the eastern Nankai Trough by geochemical and geophysical methods [J]. *Resource Geology*, 2004, 54 (1): 53-67.
- [2] NOUZÉ H, HENRY P, NOBLE M, et al. Large gas hydrate accumulations on the eastern Nankai Trough inferred from new high-resolution 2-D seismic data [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31 (13): 27-30.
- [3] TAKAHASHI H, TSUJI Y. Japan explores for hydrates in the Nankai Trough [J]. *Oil & Gas Journal*, 2005, 103 (33): 48-53.
- [4] UCHIDA T, LU Hailong, TOMARU H, et al. Subsurface occurrence of natural gas hydrate in the Nankai Trough area; implication for gas hydrate concentration [J]. *Resource Geology*, 2004, 54 (1): 35-44.
- [5] FUJII T, NAKAMIZU M, TSUJI Y, et al. Methane-hydrate occurrence and saturation confirmed from core samples, eastern Nankai Trough, Japan [C] // COLLETT T S, JOHNSON A, KNAPP C, et al. Natural gas hydrates; energy resource potential and associated geologic hazards. AAPG memoir, 2009, 89: 385-400.
- [6] TSUJI Y, FUJII T, HAYASHI M, et al. Methane-hydrate occurrence and distribution in the eastern Nankai Trough, Japan; findings of the Tokai-Oki to Kumano-Nada methane hydrate drilling program [C] // COLLETT T S, JOHNSON A, KNAPP C, et al. Natural gas hydrates; energy resources potential and associated geological hazards. AAPG memoir, 2009, 89: 228-246.
- [7] TOBIN H, KINOSHITA M, ASHI J, et al. NanTroSEIZE stage 1 expeditions 314, 315, and 316; first drilling program of the Nankai Trough seismogenic zone experiment [J]. *Scientific Drilling*, 2009, 8 (8): 4-17.
- [8] 孔秀, 李琦, 胡俊杰. 日本南海海槽 IODP C0004C 岩芯样品热释光信号特征及其对古气候变化的响应 [J]. *应用海洋学报*, 2015, 34 (1): 34-40.
- [9] KONG Xiu, LI Qi, HU Junjie. Thermoluminescent signal of the core C0004C from Nankai Trough and its response to the paleoclimate change [J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2015, 34 (1): 34-40.
- [9] 孙辉, 姜涛, 李春峰, 等. 日本南海海槽斜坡盆地重力流沉积特征及其对俯冲构造的响应 [J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2014, 39 (10): 1283-1294.
- [10] SUN Hui, JIANG Tao, Li Chunfeng, et al. Characteristics of gravity flow deposits in slope basin of Nankai Trough and their responses to subduction tectonics [J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 2014, 39 (10): 1283-1294.
- [10] YAMADA Y, BABA K, MIYAKAWA A, et al. Granular experiments of thrust wedges; insights relevant to methane hydrate exploration at the Nankai accretionary prism [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 51: 34-48.
- [11] MH21Research Consortium. Japan's methane hydrate R & D program; phase 1; comprehensive report of research results [R/OL]. [2019-08-01]. <http://www.mh21japan.gr.jp/english/wp/wp-content/uploads/ca434ff85adf34a4022f54b2503d86e92.pdf>.
- [12] MASUDA Y, YAMAMOTO K, TADAAKI S, et al. Japan's methane hydrate R & D program progresses to phase 2 [J]. *Fire in the Ice*, 2009, 9 (4): 1-5.
- [13] MH21Research Consortium. Japan's national methane hydrate R&D program; overview and status [DB/OL]. [2009-03-05]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.178.6264&rep=rep1&type=pdf>.
- [14] TALADAY K B, MOORE G F. Concentrated gas hydrate deposits in the Kumano Forearc Basin, Nankai Trough, Japan [J]. *Fire in the Ice*, 2015, 15 (1): 1-4.
- [15] SUZUKI K, SCHULTHEISS P, NAKATSUKA Y, et al. Physical properties and sedimentological features of hydrate-bearing samples recovered from the first gas hydrate production test site on Daini-Atsumi Knoll around eastern Nankai Trough [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 66: 346-357.
- [16] NOGUCHI S, SHIMODA N, TAKANO O, et al. 3-D internal architecture of methane hydrate-bearing turbidite channels in the eastern Nankai Trough, Japan [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28 (10): 1817-1828.
- [17] FUJII T, SUZUKI K, TAKAYAMA T, et al. Geological setting and characterization of a methane hydrate reservoir distributed at the first offshore production test site on the Daini-Atsumi Knoll in the eastern Nankai Trough, Japan [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 66: 310-322.
- [18] EGAWA K, NISHIMURA O, IZUMI S, et al. Bulk sediment mineralogy of gas hydrate reservoir at the East Nankai offshore production test site [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 66: 379-387.
- [19] KOMATSU Y, SUZUKI K, FUJII T. Sedimentary facies and paleoenvironments of a gas-hydrate-bearing sediment core in the eastern Nankai Trough, Japan [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 66: 358-367.

2017,39(3):383-389.

[25] 杨尚儒,高岗,张永超,等.南堡2号构造带中浅层油源对比及原油运聚模式[J].油气地质与采收率,2018,25(1):30-36. YANG Shangru,GAO Gang,ZHANG Yongchao, et al. Oil-source correlation and model of migration and accumulation of shallow-middle crude oil in No.2 Structural Belt,Nanpu Sag[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2018,25(1):30-36.

[26] 齐玉民,郝鹏,王渝,等.渤中凹陷西次洼陡坡带精细油源对比[J].断块油气田,2018,25(2):151-156. QI Yumin,HAO Peng,WANG Yu, et al.Oil-source rock correlation of steep slope of western subsag of Bozhong Sag[J].Fault-Block Oil and Gas Field,2018,25(2):151-156.

[27] EL DIASTY W S,GHONAIM A A A,MOSTAFA A R, et al. Biomarker characteristics of the Turonian-Eocene succession, Belayim oilfields, central Gulf of Suez, Egypt[J].Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences,2016,19:91-100.

[28] 田德瑞,吴奎,张如才,等.渤海湾盆地辽西凸起北段锦州20油田原油地球化学特征及油源对比[J].石油实验地质,2018,40(3):410-417. TIAN Derui,WU Kui,ZHANG Rucai, et al.Geochemical features and oil-source correlation of crude oils from JZ20 oil field on the northern margin of Liaoxi Uplift, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment,2018,40(3):410-417.

[29] WOLFF G A,LAMB N A,MAXWELL J R.The origin and fate of 4-methyl steroid hydrocarbons. I. Diagenesis of 4-methyl sterenes[J].Geochimica et Cosmochimica Acta,1986,50(3):335-342.

[30] 彼得斯 K E,沃尔特斯 C C,莫尔多万 J M.生物标志化合物指南[M].张水昌,李振西,译.北京:石油工业出版社,2011. PETERS K E,WALTERS C C,MOLDOWAN J M.The biomarker guide[M].ZHANG Shuichang,LI Zhenxi, trans. Beijing: Petroleum Industry Press,2011.

[31] BOREHAM C J,SUMMONS R E,ROKSANDIC Z, et al.Chemical, molecular and isotopic differentiation of organic facies in the Tertiary lacustrine Duinga oil shale deposit, Queensland, Australia [J]. Organic Geochemistry,1994,21(6/7):685-712.

[32] 咎灵,张枝焕,王顺华,等.4-甲基甾烷在油源对比中的应用:以渤南洼陷北部陡坡带为例[J].沉积学报,2012,30(4):770-778. ZAN Lin,ZHANG Zhihuan,WANG Shunhua, et al.Application

of 4-methyl steranes in oil-source correlation:a case study from northern steep slope zone of Bonan Sag[J].Acta Sedimentologica Sinica,2012,30(4):770-778.

[33] FU Jiamo,SHENG Guoying,XU Jiayou, et al.Application of biological markers in the assessment of paleoenvironments of Chinese non-marine sediments[J].Organic Geochemistry,1990,16(4/6):769-779.

[34] DONG Tian,HE Sheng,YIN Shiyun, et al.Geochemical characterization of source rocks and crude oils in the Upper Cretaceous Qingshankou Formation, Changling Sag, southern Songliao Basin[J].Marine and Petroleum Geology,2015,64:173-188.

[35] CHENG Xiong,MAO Zhichao,MAO Rong, et al.Families of reservoir crude oils from the Cangdong Sag, Bohai Bay Basin, China[J].Organic Geochemistry,2018,122:115-125.

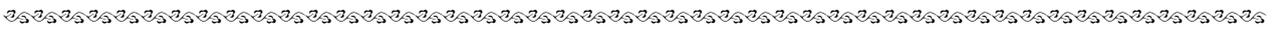
[36] 张海,雷华伟,张涛,等.鄂尔多斯盆地靖边油田西部延9原油地球化学特征与油源[J].石油实验地质,2018,40(6):836-842. ZHANG Hai,LEI Huawei,ZHANG Tao, et al. Geochemical characteristics of Yan 9 crude oil and oil-source correlation in western Jingbian Oil Field,Ordos Basin[J].Petroleum Geology & Experiment,2018,40(6):836-842.

[37] 王权,王道军,邹华耀,等.霸县凹陷古近系烃源岩生物标志化合物特征及对油气成藏的贡献[J].油气地质与采收率,2017,24(6):17-24. WANG Quan,WANG Daojun,ZOU Huayao, et al.Development characteristics of biomarkers in Paleogene source rocks and its significance to petroleum accumulation in the Baxian Sag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2017,24(6):17-24.

[38] 彭清华,杜佰伟,谢尚克,等.羌塘盆地昂达尔错地区侏罗系烃源岩生物标志物特征及其指示意义[J].石油实验地质,2017,39(3):370-376. PENG Qinghua,DU Baiwei,XIE Shangke, et al.Biomarker characteristics of Jurassic source rocks in Angdaro area in Qiangtang Basin and their significance [J].Petroleum Geology & Experiment,2017,39(3):370-376.

[39] 林红梅.渤海湾盆地车镇凹陷下古生界烃源岩生物标志物特征[J].石油实验地质,2017,39(2):230-237. LIN Hongmei.Biomarker characteristics of Lower Paleozoic source rocks in Chezhen Sag,Bohai Bay Basin[J].Petroleum Geology & Experiment,2017,39(2):230-237.

(编辑 韩 彧)



(上接第 837 页)

[20] YAMAMOTO K. Production techniques for methane hydrate resources and field test programs [J].Journal of Geography, 2009,118(5):913-934.

[21] COLWELL F, MATSUMOTO R, REED D. A review of the gas hydrates, geology, and biology of the Nankai Trough [J]. Chemical Geology, 2004, 205(3/4):391-404.

[22] ITO T, KOMATSU Y, FUJII T, et al. Lithological features of hydrate-

bearing sediments and their relationship with gas hydrate saturation in the eastern Nankai Trough, Japan [J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 66:368-378.

[23] KIDA M, JIN Y, WATANABE M, et al. Chemical and crystallographic characterizations of natural gas hydrates recovered from a production test site in the eastern Nankai Trough [J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 66:396-403.

(编辑 黄 娟)