

葛家旺, 赵晓明, 樊奇, 等. 世界热点地区高饱和度天然气水合物有利沉积储集条件[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(4): 1-13.

GE Jiawang, ZHAO Xiaoming, FAN Qi, et al. Preliminary study on depositional and reservoir characteristics of high-saturation gas hydrate worldwide[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(4): 1-13.

世界热点地区高饱和度天然气水合物 有利沉积储集条件

葛家旺^{1,2}, 赵晓明^{2*}, 樊奇¹, 方小宇³, 宋鹏⁴, 向柱²

(1 天然气水合物国家重点实验室, 北京 100028; 2 西南石油大学地球科学与技术学院, 成都 610500;

3 南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江), 湛江 524000; 4 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 湛江 524057)

摘要:天然气水合物是全球未来能源的接替资源, 高饱和度 ($S_h > 50\%$) 水合物储层是未来面向工业化开采的首要选择。截止到目前, 高饱和度天然气水合物有利沉积相带与储层条件之间的关系仍缺乏系统研究。根据公开发表的文献资料, 系统总结了墨西哥湾、日本南海海槽、韩国郁陵盆地、印度 Krishna-Godavari 盆地以及南海神狐海域等全球 5 个天然气水合物热点钻探区 64 口井取芯及井-震联合资料, 对含水合物储层岩性、沉积环境、水合物饱和度等参数进行的详细总结分析表明: 在必要的温压环境和气源条件下, 深海平原区块体搬运沉积和浊流等高沉积速率的深水砂质沉积物赋存孔隙型水合物, 水合物可分布在砂岩、极细砂岩、粉砂岩、粉砂质黏土和泥等粒级沉积物中, 但高饱和度水合物主要赋存于粉砂-细砂岩中, 储层孔隙度与饱和度具有一定的正相关性。中国南海神狐海域发现含有孔虫黏土质粉砂或粉砂质黏土这种特殊的细粒沉积物, 其水合物饱和度可达到中高水平 (20%~76%)。上述研究成果及认识奠定了下一步寻找优质天然气水合物储层的地质基础, 也可为高饱和度水合物商业化勘探开发提供理论依据。

关键词:天然气水合物; 沉积体系; 储集条件; 高饱和度; 世界范围

中图分类号: P744.4; P618.13

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2021.273

0 引言

天然气水合物(以下简称水合物)是低温高压环境下由天然气与水形成的类冰状结晶物质, 遇火即燃, 又被成为“可燃冰”^[1]。其资源密度高、全球分布广泛(通常赋存于水深 300~500 m 以深的海底和永久冻土带), 拥有非常可观的潜在商业开采价值。在水深 > 300 m 的海底, 水合物在地震剖面上常表现为近似平行于海底、并与海底反射波极性

相反的地震反射(似海底反射界面, 简称为 BSR)。水合物成矿带通常是物性相对均匀的高速地质体, 其下伏是含游离气的低速地层^[2]。研究表明, 相比高纬度或高原区冻土带水合物, 海洋环境形成的水合物资源量巨大, 是国际能源界关注的热点议题。

合适的温度压力是水合物形成的先决条件^[2-3]。饱和度(S_h)是指水合物占据储层孔隙空间的百分比, 它是水合物资源量估算的关键参数, 亦是经济评价中的重要指标。作为水合物的载体, 沉积储层对水合物的富集扮演着重要的角色; 水合物的赋存方式多样, 主要包括球状分布、孔隙型充填、裂缝型充填以及块状分布等^[3-5]。如何寻找超富集型、高饱和度的水合物资源是能源工业的首要问题。不同沉积环境下形成的水合物饱和度高低不等, 沉积环境与水合物形成和储集的关系引发了水合物地质研究领域的诸多讨论。不同水合物储层其资源量及

收稿日期: 2021-11-12

资助项目: 天然气水合物国家重点实验室开放基金(CCL2022RCPS 0785RQN)

作者简介: 葛家旺(1988—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事层序地层学及沉积学方面的科研及教学工作。E-mail: gjwddn@163.com

* 通讯作者: 赵晓明(1982—), 男, 博士, 教授, 主要从事深水沉积学及开发地质学方面的科研及教学工作。E-mail: zhxm98@163.com

开采难度迥异,对水合物未来商业化及工业化具有重要的影响^[6]。鉴此,本文选取了美国大西洋墨西哥湾盆地、日本南海海槽、韩国郁陵盆地、印度 Krishna-Godavari 盆地(简称 KG 盆地)以及中国南海神狐海域等 5 个水合物钻探热点区(表 1),

全面分析对比了不同地区水合物储集条件差异,重点剖析了水合物富集的有利相带与含水合物的储集层特征以及与水合物饱和度的关系,在此基础上,深入探讨了沉积环境与水合物储集之间的耦合关系。

表 1 本文选取的世界水合物勘探热点地区

Table 1 The hot spots of hydrate exploration areas worldwide selected in this study

国家	实例区	航次	取样深度/mbsf	水合物钻井	来源
日本	南海海槽	MITI	0.31~318.25	12	YONEDA等, 2015 ^[7]
墨西哥	Keathley峡谷	JIP leg I	/	1	BOSWELL等, 2009 ^[8]
	Green 峡谷	JIP Leg II	/	2	SSH等, 2017 ^[9]
	Alaminos峡谷	/	/	4	PORTNOV等, 2009 ^[10] ; BOSWELL等, 2012 ^[11-12]
	Walker 脊	/	/	2	HILLMAN等, 2017 ^[13]
中国	神狐海域	GMGS1	153~224.5	3	吴时国等, 2015 ^[14]
		GMGS3	47~257	5	张伟等, 2017 ^[15]
		GMGS4	45~221	3	WEI等, 2017 ^[16]
		UBGH1		3	BAHK等, 2009 ^[17]
韩国	郁陵盆地	UBGH2	0.8~236.2	8	RYU等, 2013 ^[18]
		KG盆地	NGHP1	29~213	13
印度	Mahanadi盆地	/	/	6	
	Andaman群岛	NGHP2	57~508	1	WINTERS等, 2014 ^[20]
	KK盆地	/	/	1	

1 水合物赋存的有利地质条件

1.1 气源条件

已获研究成果及海底水合物实物样品分析表明,水合物气体来源包括沉积物中微生物成因甲烷(生物气)、有机质热降解生成的烃类气(热解气)以及这 2 种气体构成的以某种气为主的混合气。全球水合物烃类气体及其碳同位素分析数据结果显示,大多数水合物为微生物成因气,混合成因气次之,少数地区为热解气^[21]。水合物气源供给是其形成的必备条件或“硬核”条件。

1.2 运移条件

受活动断裂、泥底辟、泥火山、多边形断层、气烟囱和海底滑坡等地质因素的影响和制约,水合物的运移过程具有不均一性特征^[22]。活动断裂是连接气源上升至水合物稳定域的重要通道,同时,泥底辟构造在深部气源向上运移过程中扮演着重要角色,能够提供有效的流体纵向运聚通道系统。而且,细粒层沉积物中常发育平面上多边形、具有微

小断距的张性断层系^[23],这种多边形断层既是层内气体释放压力的通道,也是烃类气体运移至浅部的通道^[23]。气烟囱亦是水合物垂向运移的重要通道,剖面上具有明显的柱状外形,头部可成花状,其与不同成因类型水合物富集成藏均存在密切的相关性^[24-25]。

1.3 沉积条件

中国南海神狐海域水合物实例研究发现,粗粒沉积物中砂、粗粉砂含量高的层位与高饱和度水合物矿体呈良好的对应关系^[26]。但水合物饱和度与沉积物孔隙度并未完全呈正相关关系,含水合物层沉积物松散未固结,实测的沉积物孔隙度自下而上逐渐增加,而水合物饱和度表现为时高时低。水合物饱和度不仅受孔隙度控制还受气体通量、孔隙类型和大小、沉积物渗透性等因素的影响。细粒、特细粒沉积物(粉砂质泥、泥质粉砂岩)虽然孔渗性差,但在裂缝发育区亦可形成裂缝充填型水合物储层^[26]。

全球海域获取的水合物岩芯沉积物时代和沉积速率研究表明,含水合物地层的沉积速率一般较快,常常 $>30 \text{ m/Ma}$ ^[27-28],如东太平洋海域中美海槽

赋存水合物的新生代沉积层和西太平洋美国大陆边缘的 3 个水合物聚集区, 沉积速率均 $>160 \text{ m/Ma}$ [29]。总的来说, 高沉积速率有利于水合物的形成和富集, 原因有二: ①快速沉积的半深海沉积区赋存大量有机碎屑物, 可为水合物层提供微生物分解甲烷 [30]; ②快速沉积区域易形成欠压实区, 为沟通底部气源和上部水合物层提供良好通道 [31]。

2 全球热点地区高饱和度水合物储集特征

2.1 墨西哥湾北部海域

墨西哥湾北部海域一直是全球水合物勘探和研究的热点区域。2005 年, 水合物工业联合项目 (以下简称 JIP) 第 1 次钻探计划的实施首次证实了墨西哥湾海域水合物的存在。2009 年, JIP 第 2 航次自西向东分别在墨西哥湾 Alaminos 峡谷 (以下简称 AC) 21 区块、Walker 脊 (以下简称 WR) 313 区块和 Green 峡谷 (以下简称 GC) 955 区块 3 个靶区钻探了 7 口井 (图 1), 获得若干水合物第一手实际资料。其中, 在 4 口井的砂岩储层中发现了高饱和度 ($S_h > 50\%$) 的水合物, 剩下的 3 口井中发现了中低饱和度 ($20\% < S_h < 50\%$) 疑似水合物 [13, 32-33]。

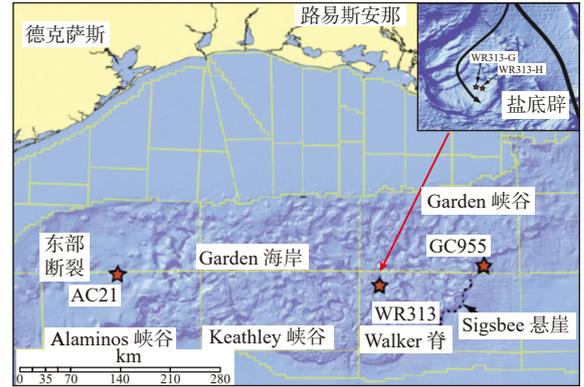


图 1 墨西哥湾 JIP Leg II 站位平面分布图 [11]

Fig.1 The distribution of JIP Leg II drilling wells in the Gulf of Mexico [11]

墨西哥湾 JIP 第 2 航次在 WR313 区块获得 3 口钻井, 分别是 WR313-G、WR313-H 和 WR313-#001, 共发现 3 套含水合物层 (自上而下命名为层 A、层 B 和层 C) [13], 水合物赋存特征如下:

(1) 层 A 该层深度约为 472 mbsf, 含水合物层厚度约 120 m, 水合物产状均为裂缝充填型。WR313-G 井层 A 沉积物为泥岩和粗粉砂频繁互层, WR313-H 井层 A 沉积物主体为半深海-深海泥岩。BSR 为连续型, 水合物层位于推测的稳定带底界面 (以下简称 BGHS) 之上数十米。WR313-#001 井未在层 A 发现水合物 (图 2)。

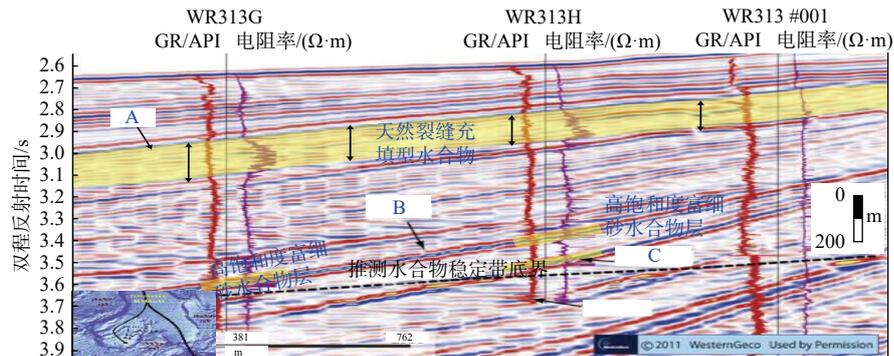


图 2 墨西哥湾 Terrebonne 盆地过 WR313-G 和 WR313-H 的井-震联合剖面以及 WR313-#001 工业井 [11]

Fig.2 The well-seismic joint profile of WR313-G and WR313-H and the WR313-#001 industrial well in the Terrebonne Basin in the Gulf of Mexico [11]

(2) 层 B 该层深度约为 872 mbsf, 水合物层厚度为 11 m, 位于 BGHS 之上约 60 m, 水合物产状为孔隙充填型。WR313-G 井层 B 岩性以细砂为主 (水道-朵叶沉积物), 水合物饱和度高达 80%; 在 WR313-H 井中, 沉积物孔隙度约 33% [32-33], 水合物饱和度通常 $>60\%$ (图 2)。

(3) 层 C 该层深度约为 1 012 mbsf, 分为上

段和下段。WR313-H 井层 C 主要为细砂岩, 对应深水朵叶沉积, 总厚度为 9 m, 位置靠近 BGHS; 朵叶沉积物的孔隙度约 37%~40%, 水合物饱和度主要为 30%~60%, 最高达 90% [32-33]。

AC 区块主要包括 AC818 和 AC21 区块, 其中, AC818 区块水合物聚集带分布面积约为 0.8 km^2 , 天然气资源量约 $8 \times 10^8 \text{ m}^3$ [8]。2009 年 JIP Leg II 在

AC21 区块获取 AC21-A 和 AC21-B 2 口钻井资料 (图 3)。AC-21 区块水合物稳定带内发育 2 套

MTDs 沉积物和水合物层(自上到下命名为层 A 和层 B)^[11]。

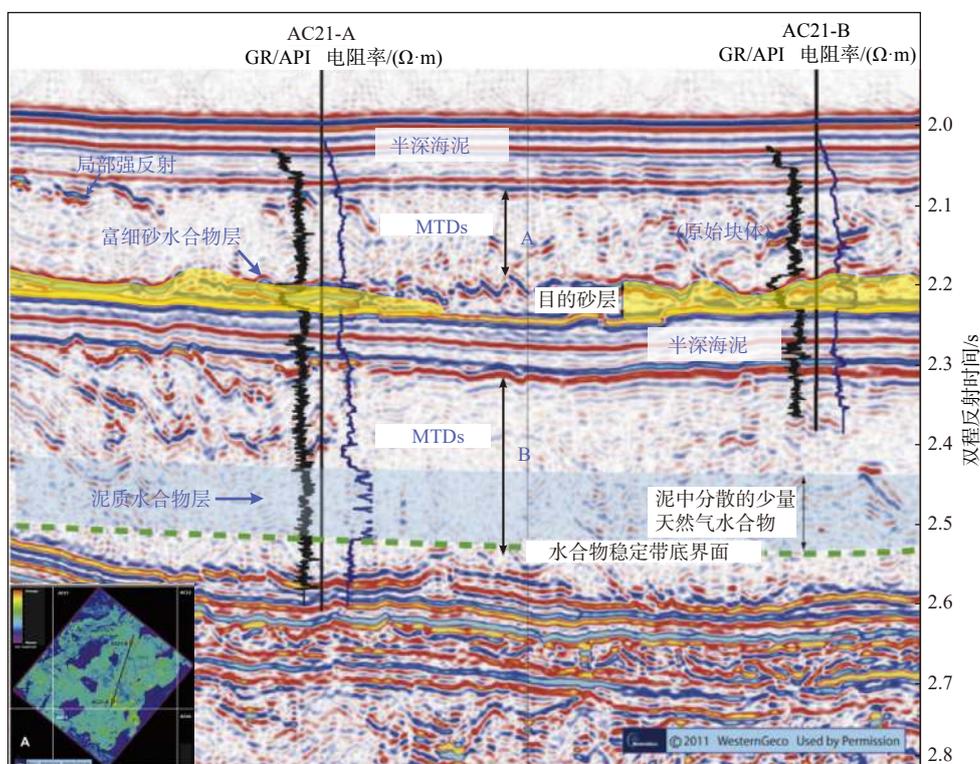


图 3 墨西哥湾 Alaminos 峡谷过水合物钻井 AC21-A 和 AC21-B 的井-震联合剖面^[11]

Fig.3 The well-seismic joint profile of the hydrate-drilling AC21-A and AC21-B in the Alaminos Canyon in the Gulf of Mexico^[11]

(1) 层 A 该层深度约 180 mbsf, 水合物层厚度约 21 m, 水合物产状为孔隙充填型。AC21-A 井层 A 中水合物储层厚度为 4 m 和 17 m(被 5 m 厚页岩分割), 水合物层的岩性主要为细砂岩, 对应于 MTDs 中的滑移块体。AC21-B 井层 A 的水合物储层厚度为 39 m, 其水合物饱和度较低(8%~28%), 这可能是运移通道不畅所致。

(2) 层 B 该层深度约 400 mbsf, 水合物呈分散状且含量低, 水合物层位于 BGHS 之上数十米的位置, 水合物储层以泥岩为主, 对应于 MTDs 中碎屑流沉积物。

Perdido 峡谷是已知的墨西哥湾最大的水合物富集区。Perdido 峡谷位于墨西哥湾北部, 分为西北和东南 2 个区块^[10]。Perdido 峡谷西北区块含水合物层厚约 225 m, 岩性分别以泥岩(半深海泥)和细砂(海底扇沉积物)为主, 发育水合物产状为深海泥岩裂缝型充填和海底扇砂岩孔隙型充填型, 对应簇状的 BSR。Perdido 峡谷东南区块水合物层厚度为 30 m, BSR 以下主要由微生物气体逐渐过渡到 1 000~2 000 mbsf 以下的热成因气体; 海底扇浊积体孔隙中水合物含量高, 饱和度高达 75%。更新世

以来, Green 峡谷一直是富砂沉积物的有利通道, 为大型水道-天然堤复合体系提供了绝佳的沉积条件; GC955 钻探结果显示, 水合物主要储集体为水道-天然堤砂体, 水合物储层厚约为 30 m, 饱和度高达 95%^[34-35]; 与此类似, Mississippi 的水合物储集体亦为水道-天然堤砂体, 估算水合物饱和度范围为 50%~90%^[10]。

2.2 韩国郁陵盆地

郁陵盆地位于朝鲜半岛东部和韩国高原的陡峭大陆斜坡区, 2007 年 9—11 月, 韩国启动国家水合物计划项目, 在韩国郁陵盆地进行了 5 次钻孔取样和测试。UBGH1-09、UBGH1-10 和 UBGH1-04 等站位钻探显示, 水合物赋存的深度范围为 55.7~231.7 mbsf。UBGH1-09 和 UBGH1-10 井取芯显示水合物赋存方式为泥质脉状充填型, UBGH1-04 井中水合物以层状浊积砂孔隙充填型为主。

2010 年韩国通过对郁陵盆地水合物钻探调查, 在 UBGH2 站位新钻探 2 口井, 为 UBGH2-2 和 UBGH2-6 井。UBGH2-2 井中的水合物层深度均

在 155 mbsf^[36]。基于孔隙水中氯的含量, 估算出 UBGH2-6 井中水合物饱和度为 12%~79%, 平均饱和度为 52%; UBGH2-2 站点的水合物饱和度介于 15%~65%, 平均饱和度约为 37%。以上 2 个钻井的岩芯和测井数据分析认为, 水合物储层平均孔隙

度介于 65%~71%, 主要发育在 MTDs 以及夹浊积砂岩的半深海泥质沉积物中(图 4、5)^[36-37]。其中, 薄层的含水合物浊积粗砂—细砂岩分选良好, 其水合物属于孔隙型充填型, 饱和度可达 70% 及以上。

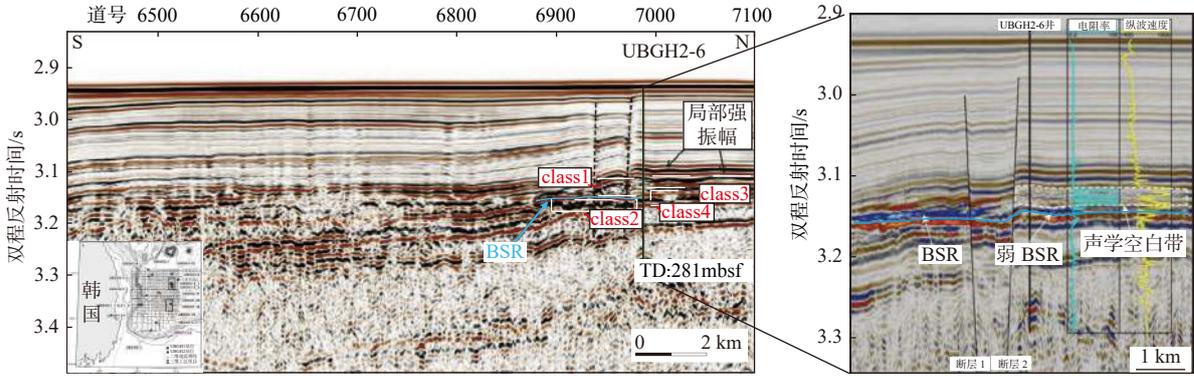


图 4 韩国郁陵盆地过 UBGH2-6 井的井-震联合剖面^[36]

Fig.4 Well-seismic joint section through Well UBGH2-6 in Ulleung Basin, Korea^[36]

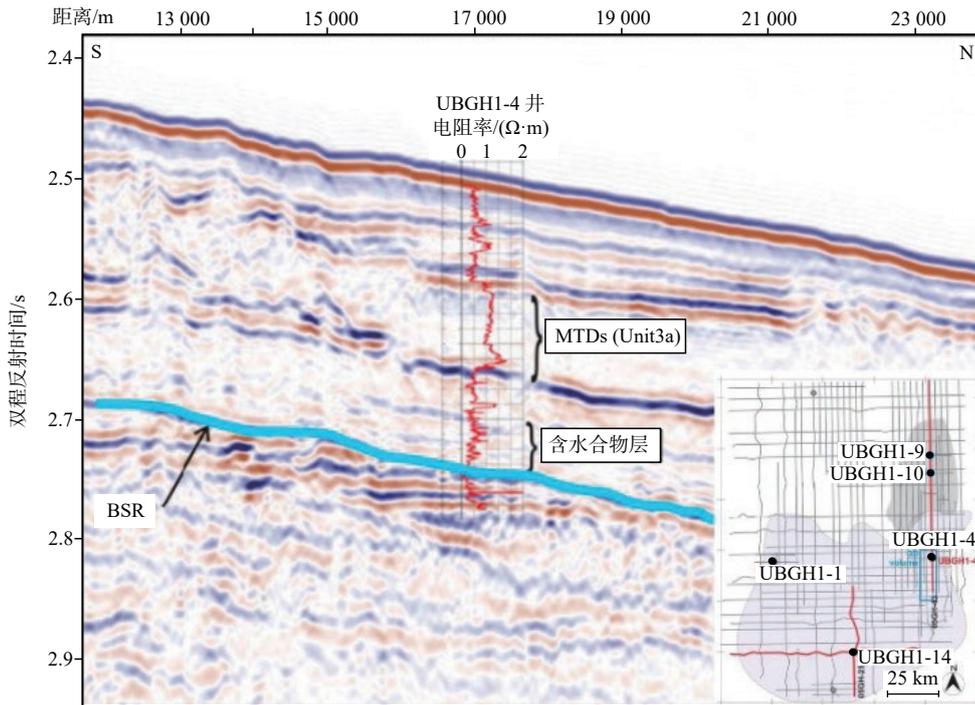


图 5 韩国郁陵盆地过 UBGH1-4 井的井-震联合剖面^[37]

Fig.5 Well-seismic joint section through Well UBGH1-4 in Ulleung Basin, Korea^[37]

2.3 日本南海海槽

日本南海海槽区晚期的构造活动为水合物的赋存提供了良好的气源及运移条件, 该地区发育多套快速沉积的重力流砂体储层, 其良好的孔渗条件有利于水合物的储集与高饱和度水合物矿体形成。自 1999 年以来, 日本在多地开展了多轮针对水合

物的钻探及工业化测试, 包括熊野盆地 (Kumano Basin)、第二渥美海丘北坡 (Second Atsumi Hill) 和日本东海海域^[38-40], 最后圈定了 16 处水合物资源富集带作为未来水合物开采试验备选区, 初步估算水合物资源量为 $6 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。其中, 大洋钻探计划 IODP315 航次在熊野盆地钻探发现, 该盆地第四系广泛分布富砂沉积物, 沉积速率通常 $>800 \text{ m/Ma}$ ^[38]。

熊野盆地东部的第二渥美海丘发现了一处 12 km^2 的水合物矿区,水合物主要赋存于海底以下 $275 \sim 337 \text{ m}$ 的深水浊积水道沉积物中^[39-40];该套砂体尚未固结成岩,孔隙充填型水合物占据绝对优势,饱和度多数介于 $50\% \sim 60\%$,最高可达 $80\% \sim 90\%$ ^[41],而与之相邻的泥质夹层中水合物饱和度极低($<10\%$)。

日本南海海槽在 2012 年钻探 8 口井水合物勘探均获成功。水合物储层包括黏土质粉砂、砂质粉砂、极细砂和细砂岩。以 AT1-MC 井为例,水合物稳定带内上部发育一套泥质层,下部主要为水道-朵叶砂岩储层^[42-43](图 6)。上部泥质/粉砂质层位于

$275 \sim 337 \text{ mbsf}$,水合物储层厚度约 50 m 且饱和度低($<15\%$)。下部一套 60 m 厚的水道-朵叶细砂岩水合物储层,地震剖面上 BSR 为连续型,水合物层位于 BSR 上方约 20 m ,水合物饱和度高($50\% \sim 80\%$)。2013 年 3 月,日本率先开展了水合物试开采并获得巨大的成功,极大地促进了世界范围内水合物工业化及商业化进程。日本南海海槽水合物中含气总量大约为 $1.1 \times 10^{12} \text{ m}^3$,其中一半富集在浊积砂岩储层中^[42]。在为期 6 天的开采过程中,单井水合物分解产气累积约为 $120\,000 \text{ m}^3$,产气速率为 $20\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ ^[43]。

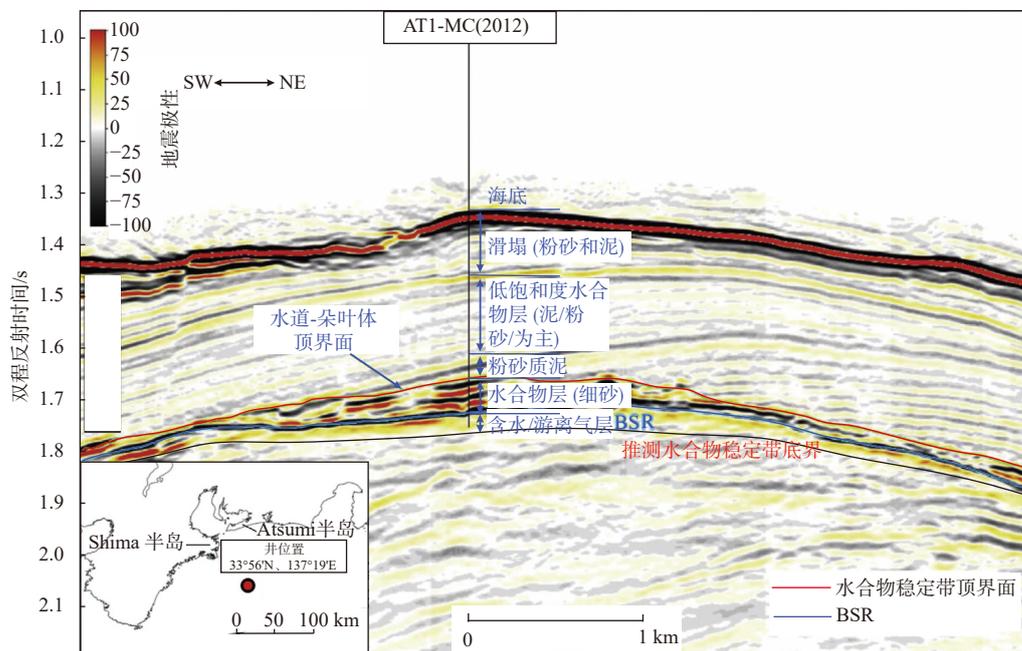


图 6 日本南海海槽过 AT1-MC 井的井-震联合剖面^[43]

Fig. 6 A well-seismic joint profile through the Well AT1-MC in the Nankai Trough, Japan^[43]

2.4 印度 KG 盆地

2006 年,印度启动了第 1 次国家水合物探索工程,在印度半岛被动大陆边缘和 Adaman 汇聚边缘开展了水合物勘探系列作业,在 21 个站点共获得 39 口井样品。该航次在印度海首次发现水合物矿体,水合物大部分分布在粉砂质黏土和砂质黏土中,以裂缝充填型为主^[19]。

2015 年,印度启动了第 2 次国家水合物探索工程,在印度大陆东部边缘 KG 盆地选取 25 个站点共钻探 42 口井。位于 KG 盆地南部的 E 区(位于向陆倾斜的斜坡上,在 KD 和 D3 区块,距 Kakinada 海岸约 180 km)的 NGHP-02-01C 站点显示,水合物储层主要分为 2 种类型:①粉砂质黏土;②砂质粉

砂和砂质黏土的混合物。综合研究表明,砂泥岩互层的浊积层是良好的水合物储层段,水合物饱和度 S_h 高达 50% 。印度 KG 盆地过井 NGHP2-17、NGHP2-23、NGHP2-16、NGHP2-20、NGHP2-24 的井-震分析认为(图 7),水合物稳定域内发育大套的 MTDs 沉积体系,MTDs 内部储层的非均质性导致了水合物赋存方式的差异性,其中 BSR 为簇状,水合物主要位于稳定带底界面之上 $5 \sim 20 \text{ m}$ ^[44]。下部水合物储层类型为 MTDs 的原始块体沉积物,岩性为细砂岩,水合物层厚度为 $10 \sim 50 \text{ m}$,深度位于 $255 \sim 315 \text{ mbsf}$,水合物饱和度较高($S_h > 50\%$)。上部水合物储层主体为黏土质粉砂和粉砂质黏土,对应 MTDs 碎屑流沉积物,水合物以裂缝充填型为主,饱和度较低($S_h < 25\%$),水合物层厚度为 $25 \sim 180 \text{ m}$,深度

位于 60~248 mbsf(图 7)。

2.5 南海神狐海域

南海地处欧亚板块、太平洋板块、印-澳板块的交接地带,南海北部陆坡区涉及东沙地区、神狐地区、西沙地区 and 琼东南地区,其整体呈 NE 向展布(图 8)。

1999 年以来,中国地质调查局广州海洋地质调查局(以下简称“广海局”)等单位对中国南海北部陆坡区域开展了详细的地质-地球化学-地球物理学调查。在神狐海域(水深介于 1 000~1 700 m)开展

了 5 次水合物钻探和 2 次水合物试采。前期研究表明,神狐海域第四系以泥质粉砂和粉砂质泥等细粒沉积物为主^[45-48]。目前,广海局已在该海域实施了 GMGS1、GMGS3、GMGS4、GMGS5 等多个航次的水合物科学钻探(图 8),钻井 50 余口并获取了大量的水合物实物样品,证实了该区域存在千亿立方米级天然气储量的水合物矿藏^[49-51]。

2007 年 GMGS1 航次在 SH2、SH3 和 SH7 钻孔获取了宝贵的水合物实物样品,揭示含水合物聚集层约 11~33 m,主要为偶含有孔虫的粉砂质黏土沉积物^[52-54],深度在 200 mbsf 以内。水合物以孔隙

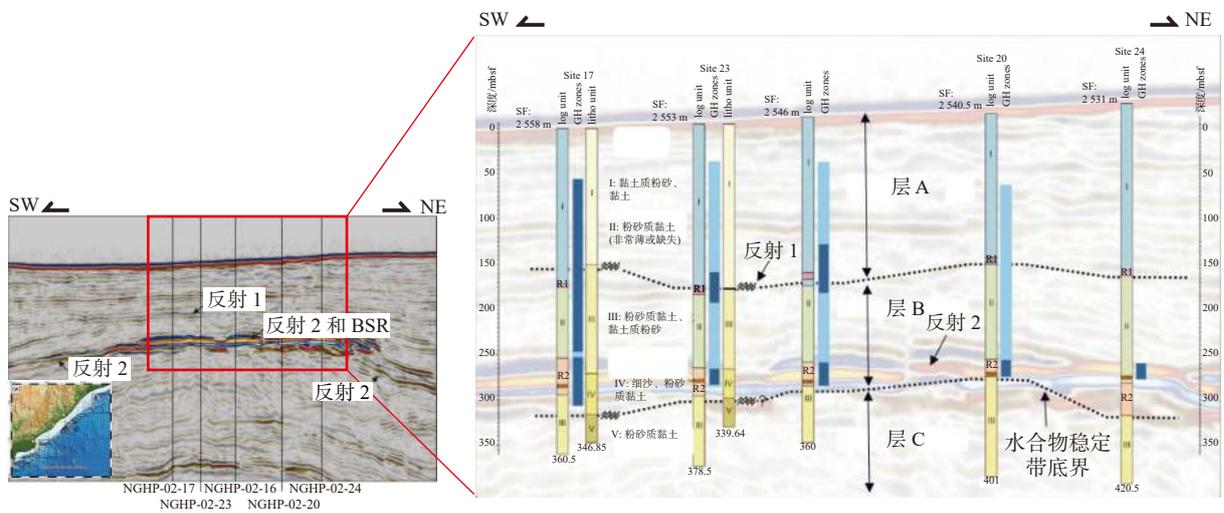


图 7 印度 KG 盆地过井 NGHP2-17、NGHP2-23、NGHP2-16、NGHP2-20、NGHP2-24 的井-震联合剖面^[44]

Fig.7 Well-seismic joint profile across NGHP2-17, NGHP2-23, NGHP2-16, NGHP2-20, NGHP2-24 wells in KG Basin, India^[44]

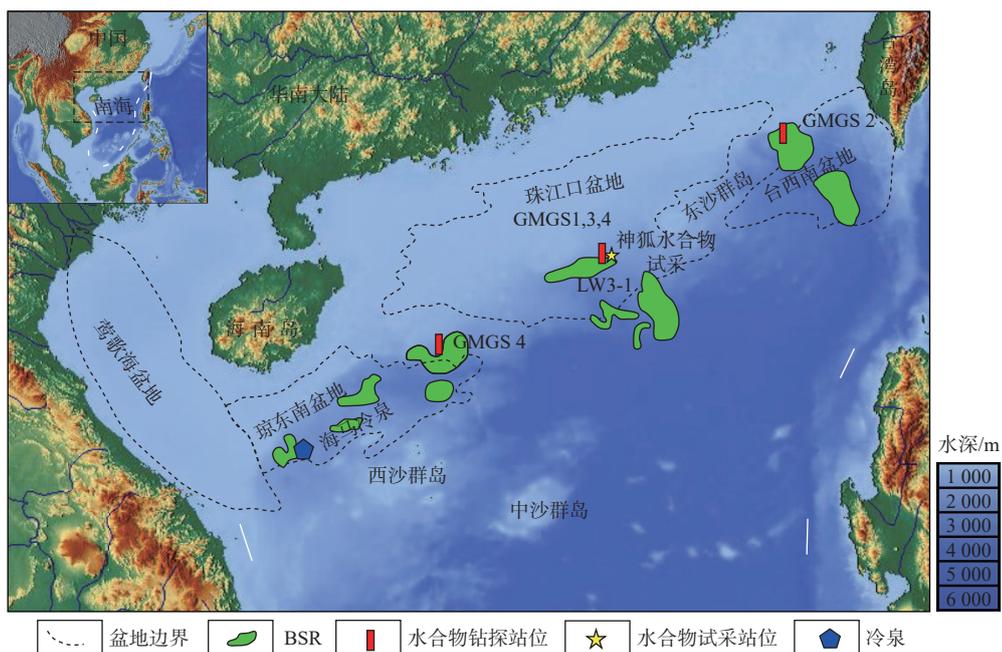


图 8 中国南海神狐海域 GMGS1-4 水合物钻探井位置图^[45]

Fig.8 Location of GMGS1-4 hydrate drilling wells in Shenhu area, South China Sea^[45]

充填型赋存于泥质沉积物中,水合物饱和度多集中在 20%~40%(表 2)。2015 年 7—9 月 GMGS3 航次在南海北部神狐海域 23 个站位开展了随钻测井作业,测井资料解释结果表明在每个站位都均发现了水合物,圈定水合物面积约 128 km²,预测资源量超过 1.5×10¹¹ m³。取芯样品显示了 5 种水合物

赋存状态,分别是厚层状水合物、分散状水合物、斑状水合物、断层附近水合物和薄层状水合物^[55]。水合物储集层厚度变化大,介于 2~80 m;水合物饱和度介于 0~76%,多个站位(例如 Wa、Wb、Wc、Wd)发现饱和度>60%的水合物^[56],该类型水合物储层可能为富含有孔虫的黏土质粉砂沉积物。

表 2 中国南海神狐海域部分水合物取芯井统计^[14-16, 49-54]

Table 2 Statistics of sampling analysis for hydrate core in the Shenhu area, South China Sea^[14-16, 49-54]

年份	井位	含水合物层厚度/m	含水合物层深度/msbf	地震剖面特征	水合物饱和度/%		储层岩性描述
					平均值	最大值	
2007	SH2	33.5	191~225	强BSR	25	47	黏土质粉砂、粉砂质黏土
	SH3	11	190~201	强BSR	12.5	25.5	黏土质粉砂、粉砂质黏土
	SH7	27	0~194	强BSR	48	/	黏土质粉砂、粉砂质黏土
2015	W02	20.1	127~151	强BSR	13.7	/	黏土质粉砂、粉砂质黏土
	W07	14.3	140~156	强振幅	39	66	富含孔虫的粉砂质黏土
	W11	77.3	47~216	强振幅	22.9	53	富含孔虫的粉砂质黏土
	W17	45	207~257	强—中强振幅	19.4	76	富含孔虫的粉砂质黏土
	W18	16	50~174	强振幅	25	63	富含孔虫的粉砂质黏土
	W19	29.3	138~168	强—中强振幅	45.2	71	含硅质的钙质黏土质粉砂
	SC1	22	57~190	强BSR	/	66	以粉砂质黏土和有孔虫砂为主
2016	SC2	28	94~189	强BSR	/	68	以粉砂质黏土和有孔虫砂为主
	SC3	>90	45~221	强BSR	/	72	以粉砂质黏土和有孔虫砂为主

2016 年在神狐海域开展的 GMGS4 航次的水合物钻探,获得了 GMGS4-SC1、GMGS4-SC2 和 GMGS4-SC3 站位样品,结果显示,水合物主要位于 100~221 msbf,岩性为粉砂质黏土和少量有孔虫砂,气体成因类型为微生物气-热成因混合气,以热成因气占主导^[57]。

3 讨论

3.1 水合物分布与沉积相带之间对应关系

综合全球 5 个国家 11 个水合物勘探热点区的研究结果发现,水合物矿藏可形成或赋存于各种沉积环境中。众多国家已经针对水合物成功开展了勘探及钻探试采作业,其中,墨西哥湾地区已探明水合物主要赋存于 MTDs、海底扇、浊积水道-天然堤复合体和半深海泥质沉积物中;韩国郁陵盆地勘探发现的水合物主要位于 MTDs 和半深海泥中;日本南海海槽中水合物储层对应于水道-朵叶复合体沉积体系;印度 KG 盆地则证实勘探获得的水合物多数赋存于 MTDs 中;中国南海北部陆坡区水合物主要发育在斜坡水道-天然堤和等深流沉积物中。

而且,墨西哥湾 Perdido 峡谷 AC818 站位、Terrebonne 盆地 WR313-G 站位、Green 峡谷 GC955 站位、Alaminos 峡谷 AC21 站位、Mississippi 峡谷 127 及 128 站位取得的高饱和度($S_h > 50%$)水合物储层样品,均主要赋存于浊积砂体和水道-天然堤复合体等高沉积速率的沉积体系之中(表 3),这就充分表明了水合物赋存富集乃至分布均与沉积环境及沉积相带密切相关。

水合物资源量及沉积环境综合分析表明,在气源充足的前提下,富砂沉积体系是形成孔隙充填型水合物富集带的关键地质因素。墨西哥湾 Perdido 峡谷、Terrebonne 盆地 Green 峡谷、Mississippi 峡谷以及日本南海海槽的富砂储层水合物饱和度平均>70%。砂质储层与泥质盖层的合理配置是高饱和度水合物形成的最佳选择,而水道体系和席状朵叶体是深海背景下最优质的孔隙型水合物储集相带。

3.2 高饱和度水合物富集的有利储集条件

世界热点区水合物取样结果显示,水合物赋存的沉积物粒级跨度较大,从砂岩到泥岩等不同粒级沉积物中均有发现(图 9)。其中,墨西哥湾和日本

表 3 世界水合物热点钻探区水合物储层沉积环境及储集特征等相关参数统计^[7-19,23]Table 3 Statistics of reservoir characteristics and depositional environments in hot hydrate drilling areas worldwide^[7-19,23]

钻探位置	航次	站位	海底以下深度 /mbsf	BSR特征	分布范围		储集特征
					厚度/m	面积/km ²	
Perdido峡谷	JIP Leg II	AC818	275~325	强振幅, 簇状BSR	10~18	0.8	分布在浊积砂体和深海泥的裂缝中, 平均饱和度80%, 地层孔隙度42%
Terrebonne盆地	JIP Leg II	WR313-G	106~134	强振幅, 发育断裂、 气烟囱	1~34	16	分布在细粒砂体中, 且砂体被泥质沉积物包围, 水合物饱和度通常>60%
墨西哥湾	Green峡谷	JIP Leg II	GC955	强振幅, 发育底辟	21~30	7.5	分布在浊流沉积的水道-天然堤砂体中, 平均水合物饱和度和约80%
	Alaminos峡谷	JIP Leg II	AC21	强振幅	18~30	0.8	分布在砂体中, 低渗透性富黏土的MTDs覆盖在砂体上, 水合物饱和度12%~15%
Mississippi峡谷	JIP Leg II	MC127, MC128	250~300	强振幅, 簇状BSR	30	12.6	分布在富砂单元中, 据估算水合物饱和度50%~90%
日本南海海槽	MH21	KIGAM	205~268	强BSR, 发育气烟囱、 麻坑	0.1~24	12	以孔隙型充填产出, 分布在富砂层中, 水合物饱和度50%~60%, 最高达80%~90%
	UBGH1	UBGH1-9	63~151	强BSR	70	/	沉积环境为披覆泥和低密度浊流沉积相为主
韩国郁陵盆地	UBGH2	UBGH2-2	68~155	强BSR, 发育气烟囱	12.7	12	分布在含浊积砂的半深海泥中, 粗粉砂至细砂为主, 水合物饱和度约37%
	UBGH2	UBGH2-6	110~155	强BSR, 发育气烟囱	12.7	12	分布在含浊积砂的半深海泥中, 粗粉砂至细砂为主, 水合物饱和度约52%
印度KG盆地	NGHP-02	NGHP-02	200~300	强BSR, 发育断裂和 浊积层	30~43	5	分布在砂体中, 交替有泥、黏土、砾岩, 水合物饱和度50%
	GMGS-1	SH2	191~224.5	强BSR	33.5	63	分布在黏土质粉砂细粒沉积物中, 富含孔虫壳体, 水合物饱和度25%~46%
中国南海 神狐海域	GMGS-1	SH3	190~201	强BSR	11	63	分布在黏土质粉砂细粒沉积物中, 富含孔虫壳体, 水合物饱和度12.5%~25.5%
	GMGS-1	SH7	153~180	强BSR	27	63	分布在黏土质粉砂细粒沉积物中, 富含孔虫壳体, 水合物饱和度20%~43%
	GMGS-3	W19	134~202	强-中强BSR, 发育 气烟囱、杂乱反射、 空白反射带等	68	63	分布在钙质黏土质粉砂岩、钙质粉砂岩、含钙质和硅质的黏土质粉砂岩及含硅质的钙质黏土质粉砂岩, 平均饱和度46.2%

南海海槽等已证实的水合物资源主要分布在粉砂或细砂体中(表 3), 而中国南海神狐海域水合物主要富集于含有孔虫的黏土质粉砂和粉砂质黏土等细粒沉积物中(表 2)。全球 5 大热点地区 64 口井钻探结果表明, 孔隙充填型水合物更趋于富集在细粒沉积物的粗粒夹层中, 体现了岩性对孔隙充填型水合物赋存具有重要的控制影响作用。粗粒沉积物往往表现出更高的水合物饱和度^[57-59], 相比细粒沉积物而言, 粗粒沉积物极佳的孔渗条件, 更适合水合物的规模化赋存富集。迄今为止的世界水合物勘探实践表明, 砂岩特别是粗粉砂和细砂储层是深海水合物最有利的储集体, 例如墨西哥湾 Perdido 峡谷、Green 峡谷、Alaminos 峡谷、Mississippi 峡谷等(表 3); 其次是裂缝型黏土质粉砂(中国南海神狐海域的水合物)和含浊积砂的半深海泥细粒储

层(韩国郁陵盆地)。中国南海神狐海域的水合物 SH2 和 SH7 站点的黏土质储层中发现的高饱和度水合物具有一定的特殊性, 其高饱和度水合物赋存主要与储层沉积物中有孔虫分布密切相关: ①有孔

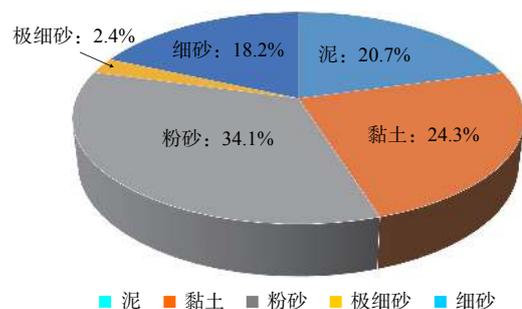
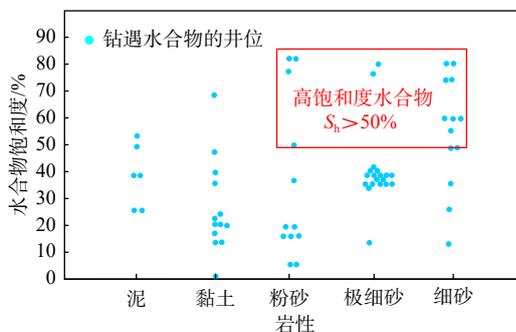


图 9 全球热点钻探区水合物储层沉积物的岩性特征
Fig.9 Distribution of hydrate reservoirs in different lithologies in drilled areas around the world

虫存在能增加黏土沉积物的有效孔隙,为水合物富集提供良好的粒内孔隙型储集空间;②有孔虫壳体大小主要相当于砂粒级,有孔虫的存在一方面增加沉积物砂质的含量,另一方面增加沉积物的孔隙度,提供了水合物形成所需的赋存空间^[26]。

从已获取 64 口钻井资料来看,高饱和度($S_h > 50\%$)水合物储层厚度一般在几十厘米到几十米范围波动,均位于海底以下 50~400 m,如墨西哥湾 Perdido 峡谷、Terrebonne 盆地、Green 峡谷等水合物钻探区(表 3)。海洋能源管理局对墨西哥湾水合物系统进行了初步评估,得出的水合物估量为 $607 \times 10^{12} \text{ m}^3$,其中大约有 1/3 富集于高孔渗的砂质储层中。JIP 在 Alaminos 峡谷、Walker 脊和 Green 峡谷所钻的 7 口井中的砂岩储层中均发现了高饱和度水合物。综上所述,水合物在各种地质环境中均有报道,亦可赋存在多种粒级沉积物内,包括泥、黏土、粉砂(泥质)、极细砂、细砂等(图 10)。其中,高饱和度、适合开采的潜在水合物储层应该是高孔渗性砂岩,特别是粗粉砂及细砂岩粒级。统计表明,水合物储层的孔隙度与饱和度具有一定的正相关性(图 11)。需要指出的是,在影响水合物饱和度的因素中,沉积物的孔隙度起到了重要作用(图 11),如中国南海神狐海域的天然气储层多数以黏土质粉砂或粉砂质黏土的细粒沉积物为主,砂含量偏低($< 10\%$),而水合物饱和度能达到中等水平($20\% \sim 48\%$),其中的有孔虫壳体提供了良好的粒内孔隙空间,为高饱和度水合物提供了良好储集条件。需要注意的是,并不是所有的砂质储层都富集高饱和度水合物,例如墨西哥湾 Alaminos 峡谷和韩国郁陵盆地部分区域发现有砂质储层中的水合物饱和度较低^[32-33]($S_h < 25\%$),这可能与水合物运移匹配及气源充足程度等复杂地质因素有关。



数据来自世界范围 64 个已取得水合物取芯的站点

图 10 岩性与水合物饱和度的关系

Fig.10 The relationship between lithology and hydrate saturation

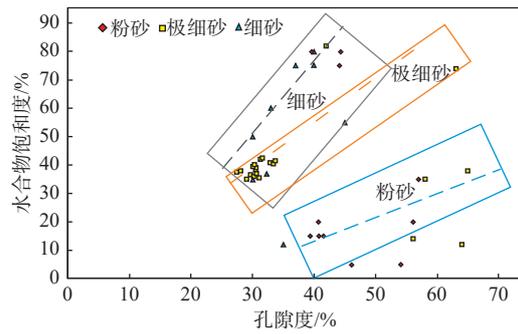


图 11 砂岩水合物饱和度与孔隙度的关系

Fig.11 Relationship between saturation and porosity of sandstone hydrate

4 结论

(1)从世界范围内 5 个海域水合物区 64 口井的钻探结果来看,不同地区水合物赋存的沉积环境存在差异;墨西哥湾、韩国郁陵盆地以及印度 KG 盆地的水合物主要沉积体系为 MTDs 和浊流,日本南海海槽的水合物沉积环境主要为天然堤及朵叶沉积体系,中国神狐海域水合物主要赋存于半深海泥环境。

(2)在必要的温压和气源条件下,水合物可发育于各种沉积体系,包括海底扇(水道-天然堤、朵叶)、MTDs、深海泥岩等,深海平原区的 MTDs 中砂质原始块体和浊流等高沉积速率的深水沉积物赋存高饱和度孔隙型水合物矿藏。

(3)水合物可赋存在多粒级沉积物中,包括泥、黏土、粉砂(泥质)、极细砂及细砂等,其中,高饱和度、适合商业开采的潜在水合物储层应该是高孔渗的砂岩,特别是粗粉砂-细砂岩,这种孔隙充填型水合物储层的孔隙度与水合物饱和度具有一定的正相关性。

参考文献:

- [1] PAULL C K, DILLON W P. Natural gas hydrates: occurrence, distribution, and detection[M]. Woods Hole: American Geophysical Union, 2001.
- [2] 徐华宁, 杨胜雄, 郑晓东, 等. 南中国海神狐海域天然气水合物地震识别及分布特征[J]. 地球物理学报, 2010, 53(7): 1691-1698.
- [3] LEE M W, COLLETT T S. Gas hydrate saturations estimated from fractured reservoir at Site NGHP-01-10, Krishna-Godavari Basin, India[J]. Journal of Geophysical Research, 2009, 114: 261-281.
- [4] BOSWELL R, SHIPP C, REICHEL T, et al. Prospecting for marine gas hydrate resources[J]. Interpretation, 2016, 4: 13-24.
- [5] ZHANG G X, YANG S X, ZHANG M, et al. GMG2 expedition

- investigates rich and complex gas hydrate environment in the South China Sea[J]. *Fire in the Ice: Methane Hydrate Newsletter*, 2014, 14(1): 1-5.
- [6] 吴能友, 黄丽, 胡高伟, 等. 海域水合物开采的地质控制因素和科学挑战[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37(5): 1-11.
- [7] YONEDA J, MASUI A, KONNO Y, et al. Mechanical properties of hydrate-bearing turbidite reservoir in the first gas production test site of the Eastern Nankai Trough[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 66: 471-486.
- [8] BOSWELL R, SHELANDER D, LEE M, et al. Occurrence of gas hydrate in Oligocene Frio sand: Alaminos Canyon Block 818; Northern Gulf of Mexico[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26: 1499-1512.
- [9] HAINES S S, HART P E, COLLETT T S, et al. High-resolution seismic characterization of the gas and gas hydrate system at Green Canyon 955, Gulf of Mexico, USA[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 82: 220-237.
- [10] PORTNOV A, COOK A E, SAWYER D E, et al. Clustered BSRs: evidence for gas hydrate-bearing turbidite complexes in folded regions, example from the Perdido Fold Belt, northern Gulf of Mexico[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2019, 528: 115843.
- [11] BOSWELL R, COLLETT T S, FRYE M, et al. Subsurface gas hydrates in the northern Gulf of Mexico[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, 34(1): 4-30.
- [12] BOSWELL R, FRYE M, SHELANDER D, et al. Architecture of gas-hydrate-bearing sands from Walker Ridge 313, Green Canyon 955, and Alaminos Canyon 21: northern deepwater Gulf of Mexico[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, 34(1): 134-149.
- [13] HILLMAN J I T, COOK A E, DAIGLE H, et al. Gas hydrate reservoirs and gas migration mechanisms in the Terrebonne Basin, Gulf of Mexico[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 86: 1357-1373.
- [14] 吴时国, 王秀娟, 陈端新, 等. 天然气水合物地质概论[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [15] 张伟, 梁金强, 陆敬安, 等. 中国南海北部神狐海域高饱和度天然气水合物成藏特征及机制[J]. *石油勘探与开发*, 2017, 44(5): 670-680.
- [16] WEI J G, FANG Y X, LU H L, et al. Distribution and characteristics of natural gas hydrates in the Shenhu Sea Area, South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, 98: 622-628.
- [17] BAHK J J, UM I K, HOLLAND M. Core lithologies and their constraints on gas hydrate occurrence in the Ulleung Basin, East Sea of Korea: results from the Site UBGH1-9[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28: 1943-1952.
- [18] 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.
- [19] COLLETT T S, BOSWELL R, COCHRAN J R, et al. Geologic implications of gas hydrates in the offshore of India: results of the National Gas Hydrate Program Expedition 01 [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 58: 1-2.
- [20] WINTERS W J, WILCOX-CLINE R W, LONG P, et al. Comparison of the physical and geotechnical properties of gas-hydrate-bearing sediments from offshore India and other gas-hydrate-reservoir systems[J]. *Marine and petroleum geology*, 2014, 58: 139-167.
- [21] 苏丕波, 梁金强, 沙志彬, 等. 神狐深水海域水合物成藏的气源条件[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2014, 36(2): 1-8.
- [22] 张伟, 何家雄, 卢振权, 等. 琼东南盆地疑似泥底辟与天然气水合物成矿成藏关系初探[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(11): 2185-2197.
- [23] GAY A. Are polygonal faults the keystone for better understanding the timing of fluid migration in sedimentary basins? [C]. *EPJ Web of Conferences*, 2017, 140: 12009.
- [24] 何家雄, 苏丕波, 卢振权, 等. 南海北部琼东南盆地天然气水合物气源及运聚成藏模式预测[J]. *天然气工业*, 2015, 35(8): 19-29.
- [25] 于兴河, 王建忠, 梁金强, 等. 南海北部陆坡水合物沉积成藏特征[J]. *石油学报*, 2014, 35(2): 253-264.
- [26] 陈芳, 周洋, 苏新, 等. 南海神狐海域含水合物层粒度变化及与水合物饱和度的关系[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2011, 31(5): 95-100.
- [27] CLAYPOOL G E, KAPLAN I R. The origin and distribution of methane in marine sediments[J]. *Natural Gases in Marine Sediments*, 1974: 99-139.
- [28] KVENVOLDEN K A, MCMENAMIN M A. Hydrates of Natural Gas: A Review of Their Geologic Occurrence[M]. Arlington, Massachusetts: United States Geological Survey, 1980, 825: 1-11.
- [29] MOUNTAIN G S, TUCHOLKE B E. Mesozoic and Cenozoic geology of the US Atlantic continental slope and rise[M]//PO-AG C W. *Geologic Evolution of the United States Atlantic Margin*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1985: 293-341.
- [30] 黄霞, 祝有海, 卢振权, 等. 南海北部水合物钻探区烃类气体成因类型研究[J]. *现代地质*, 2010, 24(3): 576-580.
- [31] DILLON W P, DANFORTH W W, HUTCHINSON D R, et al. Evidence for faulting related to dissociation of gas hydrate and release of methane off the southeastern United States[J]. *Geological Society London Special Publications*, 1998, 137(1): 293-302.
- [32] COLLETT T, LEE M, LEWIS R, et al. Gulf of Mexico gas hydrate joint industry project Leg II logging-while-drilling data acquisition and analysis[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, 34: 41-61.
- [33] FRYE M. Gas hydrate resource potential in the Terrebonne Basin, Northern Gulf of Mexico[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, 34(1): 150-168.
- [34] BOSWELL R, COLLETT T S. Current perspectives on gas hydrate resources[J]. *Energy and Environmental Science*, 2011,

- 4(4): 1206-1215.
- [35] FLEMINGS P B, PHILLIPS S C, COLLETT T, et al. Hydrate Pressure Coring Expedition Report[R]. Austin, TX: University of Texas Institute for Geo-physics, 2018.
- [36] KIM K J, YI B Y, KANG N K, et al. Reservoir characterization of gas hydrate in the northwestern part of the Ulleung Basin, East Sea[J]. *Marine Georesources and Geotechnology*, 2017, 35(2): 226-235.
- [37] RIEDEL M, BAHK J J, SCHOLZ N A, et al. Mass-transport deposits and gas hydrate occurrences in the Ulleung Basin, East Sea - Part 2: Gas hydrate content and fracture-induced anisotropy[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, 35(1): 75-90.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] TAKAHASHI H, TSUJI Y. Japan explores for hydrates in the Nankai Trough[J]. *Oil and Gas Journal*, 2005, 103(33): 48-53.
- [41] 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.
- [42] TSUJI Y, FUJII T, HAYASHI M, et al. Methane-hydrate occurrence and distribution in the eastern Nankai Trough, Japan: findings of the Tokai-Okai 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.
- [43] 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.
- [44] KAN-HSI H, SANIATSU S, TOSHIYA K, et al. Regional stratigraphic framework and gas hydrate occurrence offshore eastern India: core-log-seismic integration of National Gas Hydrate Program Expedition 02 (NGHP-02) Area-B drill sites[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 108: 206-215.
- [45] 吴时国, 王吉亮. 南海神狐海域天然气水合物试采成功后的思考[J]. *科学通报*, 2018, 63(1): 2-8.
- [46] LI J F, YE J L, QIN X W, et al. The first offshore natural gas hydrate production test in South China Sea[J]. *China Geology*, 2018, 1(1): 5-16.
- [47] LIU C L, YE Y G, MENG Q G, et al. The characteristics of gas hydrates recovered from Shenhu area in the South China Sea[J]. *Marine Geology*, 2012, 307: 22-27.
- [48] SUN J X, ZHANG L, NING F L, et al. Production potential and stability of hydrate-bearing sediments at the Site GMGS3-W19 in the South China Sea: a preliminary feasibility study[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 86: 447-473.
- [49] YANG S X, LEI Y, LIANG J Q, et al. Concentrated gas hydrate in the Shenhu area, South China Sea: Results from drilling expeditions GMGS3 & GMGS4[C]//Proceedings of 9th International Conference on Gas Hydrates. 2017: 25-30.
- [50] WANG X J, COLLETT T S, LEE M W, et al. Geological controls on the occurrence of gas hydrate from core, downhole log, and seismic data in the Shenhu area, South China Sea[J]. *Marine Geology*, 2014, 357: 272-292.
- [51] ZHANG W, LIANG J Q, WEI J G, et al. Geological and geophysical features of and controls on occurrence and accumulation of gas hydrates in the first offshore gas-hydrate production test region in the Shenhu area, northern South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 114: 104191.
- [52] WU N Y, ZHANG H Q, SU X, et al. High concentrations of hydrate in disseminated forms found in very fine-grained sediments of Shenhu area, South China Sea[J]. *Terra Nostra*, 2007, 1: 236-237.
- [53] WU S G, WANG X J, WONG H K. Low-amplitude BSRs and gas hydrate concentration on the northern margin of the SCS[J]. *Marine Geophysical Researches*, 2007, 28: 127-138.
- [54] 王静丽, 梁金强, 宗欣, 等. 南海北部神狐海域水合物差异性分布的控制因素[J]. *海洋地质前沿*, 2015, 31(1): 24-30.
- [55] YANG S X, ZHANG M, LIANG J Q, et al. Preliminary results of China's third gas hydrate drilling expedition: a critical step from discovery to development in the South China Sea[J]. *Fire Ice*, 2015, 15: 1-5.
- [56] 张伟, 梁金强, 苏丕波, 等. 南海北部陆坡高饱和度水合物气源运聚通道控藏作用[J]. *中国地质*, 2018, 45(1): 1-14.
- [57] 郭依群, 杨胜雄, 梁金强, 等. 南海北部神狐海域高饱和度水合物分布特征[J]. *地学前缘*, 2017, 24(4): 24-31.
- [58] BÜNZ S, MIENERT J, BERNDT C. Geological controls on the Storegga gas-hydrate system of the mid-Norwegian continental margin[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 209(3/4): 291-307.
- [59] TRÉHU A M, LONG P E, TORRES M E, et al. Three-dimensional distribution of gas hydrate beneath southern Hydrate Ridge: constraints from ODP Leg 204[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 222(3/4): 845-862.

Preliminary study on depositional and reservoir characteristics of high-saturation gas hydrate worldwide

GE Jiawang^{1,2}, ZHAO Xiaoming^{2*}, FAN Qi¹, FANG Xiaoyu³, SONG Peng⁴, XIANG Zhu²

(1 State Key Laboratory of Natural Gas Hydrates, Beijing 100028, China; 2 School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 3 Guangdong Laboratory of Southern Marine Science and Engineering(Zhanjiang), Zhanjiang 524000, China;

4 Zhanjiang Branch of CNOOC(China) Ltd., Zhanjiang 524057, China)

Abstract: Natural gas hydrate resources have been a popular replacement object of global energy in the future. High-saturated ($S_h > 50\%$) hydrate reservoir is the first choice for industrial exploration and exploitation. However, relationship between saturation of gas hydrate and its reservoir facies lacks of systematic investigation at present. Based on published literatures, five gas hydrate-exploration hotspot areas in the world are systematically summarized, including the Gulf of Mexico, the Nankai Trough in Japan, the Ullung Basin in South Korea, the Krishna-Godavari basin in India, and the Shenhu area of the South China Sea. The cores and logs of 64 penetrated wells were used to analyze the lithology, sedimentary environment, hydrate saturation and other parameters of the hydrate reservoir in detail. The results show that under suitable temperature and pressure conditions associated with gas sources, the deposits of MTDs (mass transport deposits) and turbidite in deep marine areas are facilitated with good gas hydrate resources. The reservoirs of gas hydrate include fine-grained sandstone, very fine-grained sandstone, siltstone, and silty mud and mud sediments. However, the high saturation hydrate mainly occurs in siltstone and fine-grained sandstone. The porosity and saturation of the gas hydrate reservoir have a relatively positive correlation. The Shenhu area of the South China Sea is mainly composed of fine-grained sediments, including clayed silt or foraminifera-rich silty clay. The sand content is low (less than 10%), but the hydrate saturation can reach a medium-to-high level (20%-48%). This study provides a geological base for large-scale exploration and development of high-quality and high-saturation hydrates gas reservoirs.

Key words: gas hydrate; depositional system; reservoir conditions; high saturation; worldwide