

引用格式:赵克斌,孙长青,郭嘉琪,等.墨西哥湾天然气水合物富集特征与成藏机制——以WR313和GC955研究区为例[J].油气藏评价与开发,2021,11(5):669-679.  
ZHAO Kebin, SUN Changqing, GUO Jiaqi, et al. Enrichment characteristics and accumulation mechanism of natural gas hydrate in the Gulf of Mexico: Cases study of study area WR313 and GC955[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(5): 669-679.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2021.05.002

## 墨西哥湾天然气水合物富集特征与成藏机制 ——以WR313和GC955研究区为例

赵克斌,孙长青,郭嘉琪,吴传芝

(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:**作为全球天然气水合物热点研究区,墨西哥湾水合物勘探研究已进行了数十年,特别是在WR313和GC955区集中开展了水合物富集成藏特征研究。基于大量水合物勘探成果,分析总结了这两个研究区水合物纵向上的分布特征、有利储层的岩相特征以及水合物富集成藏机制,从整体上反映了该海湾天然气水合物勘探研究的最新进展。WR313和GC955研究区水合物主要存在砂层孔隙充填型与泥层裂隙充填型两种赋存类型。较深部相对粗粒富砂层含有孔隙充填型水合物,饱和度通常大于80%,可高达95%;而较浅部泥层裂隙充填型水合物饱和度极低,平均饱和度一般低于5%。同时,讨论了水合物富集成藏研究面临的问题,强调水合物富集成藏是一个受诸多因素影响的复杂作用过程,指出在水合物富集区优选过程中,局部富砂体的识别应受到特别重视。

**关键词:**天然气水合物;分布特征;储层岩相;成藏机制;墨西哥湾

中图分类号:TE122

文献标识码:A

### Enrichment characteristics and accumulation mechanism of natural gas hydrate in the Gulf of Mexico: Cases study of study area WR313 and GC955

ZHAO Kebin, SUN Changqing, GUO Jiaqi, WU Chuanzhi

(Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, Sinopec Petroleum Exploration and Production Research Institute, Wuxi, Jiangsu 214126, China)

**Abstract:** As a hot area in global gas hydrate research field, the hydrate exploration in the Gulf of Mexico has been carried out for decades. Especially in the selected key exploration targets, study area WR313 and GC955, the hydrate accumulation and enrichment features have been studied. Based on the gas hydrate exploration results of these two study areas, the vertical distribution, the lithofacies features of favorable reservoirs are summarized, and the hydrate accumulation mechanisms have been analyzed to reflect the latest gas hydrate exploration and research progress in this gulf. The gas hydrate exploration results indicate that there are mainly two occurrence types of gas hydrates existing in these study areas, namely, the pore-filling type in sand and the fracture-filling type in mud. The pore-filling type occurs in the deeper sand-rich sediments with relatively coarse grains, and the hydrate saturation is normally greater than 80%, and may be up to 95%; whereas the fracture-filling type occurs in the shallower clay dominant sediments with the low gas hydrate saturation generally less than 5%. In addition, the main problems existing in the research of the gas hydrate accumulation mechanisms also have been discussed, emphasizing that the accumulation of gas hydrate is a complex process influenced by many factors. Meanwhile, it is also pointed out that the identification of local sand-rich bodies deserve special attention during gas hydrate accumulation selection.

**Keywords:** natural gas hydrate, distribution features, reservoir lithofacies, accumulation mechanism, Gulf of Mexico

收稿日期:2021-01-28。

第一作者简介:赵克斌(1964—),男,博士,正高级工程师,主要从事油气地球化学勘探与天然气水合物研究。地址:江苏省无锡市滨湖区蠡湖大道2060号无锡石油地质研究所,邮政编码:214126。E-mail: zhaokb.syky@sinopec.com

基金项目:中国石化科技部项目“天然气水合物动态跟踪”(P19003);中国石化科技部项目“天然气水合物资源评价与选区研究”(P20040-1)。

墨西哥湾油气资源丰富,是世界深水区油气勘探开发“金三角”之一,也是全球天然气水合物勘探开发研究一个举足轻重的热点区。2000年以来,美国能源部明显加快了墨西哥湾北部水合物勘探开发研究步伐,设置了包括“联合工业项目”在内的一系列大型水合物研究项目,内容涵盖了水合物声纳/多波束测量、地震勘探、地球化学研究、电磁测量、钻探测井与取心研究等多个方面,获得了包括地震BSR在内的多种水合物存在证据。迄今已在墨西哥湾北部深水区发现水合物BSR标志100多处<sup>[1]</sup>,揭示该区水合物分布广泛,具有巨大的资源潜力。2005年以来,在墨西哥湾北部海域实施了多个天然气水合物钻探航次,发现了WR313和GC955水合物富集区<sup>[2]</sup>。近年,针对这2个研究区开展了水合物富集机理与储集特征研究<sup>[3-4]</sup>,进一步强化了对墨西哥湾天然气水合物分布特征与富集成藏的认识。

利用大量国内外相关研究资料,总结出墨西哥湾WR313和GC955研究区天然气水合物分布特征与成藏机理,分析了现阶段水合物成藏研究面临的主要问题,展现了墨西哥湾水合物研究的最新进展,以期为我国海域天然气水合物勘探研究提供参考与借鉴。

## 1 墨西哥湾天然气水合物富集成藏特征

利用测井与岩心分析资料,对墨西哥湾北部WR313和GC955研究区水合物纵向分布与水合物富

集区储层岩相特征进行了比较深入的研究,明确了研究区水合物主要存在浅部泥层裂隙充填型与深部砂层孔隙充填型2种赋存类型,富砂储层有利于水合物富集成藏。

### 1.1 重点研究区天然气水合物纵向分布特征

#### 1.1.1 WR313研究区水合物分布特征

WR313研究区位于墨西哥湾北部沃克岭区(Walker Ridge)西北部<sup>[5]</sup>(图1),前期地震勘探在WR313研究区泥质层中识别出了多个砂层单元<sup>[3-4,6]</sup>。这些砂层单元为水合物的形成提供了良好的储集空间,有利于水合物富集成藏。通过WR313-G和WR313-H两口井的钻探测井与取心研究,深化了对该区水合物赋存与分布特征的认识。

WR313-G井目标水合物藏位于由薄砂层与粉砂质薄层互层组成的蓝色砂层单元(图2a),水合物主要以孔隙充填态赋存于薄砂层之中。目标水合物藏分布于海底以下852~874 m层段,其中砂层净厚度约为9 m,砂层中水合物饱和度达80%以上<sup>[3,7]</sup>,甚至可高达90%<sup>[8-9]</sup>。浅部钻遇厚层裂隙型水合物层段(图2a),水合物充填于黏土层近垂向裂隙之中,饱和度较低,平均饱和度小于10%<sup>[7,10]</sup>。

WR313-H井目标水合物藏位于橙色砂层单元(图2a)。橙色砂层单元由砂层与泥层互层组成。水合物纵向上分布与WR313-G井相似,较浅部泥质层

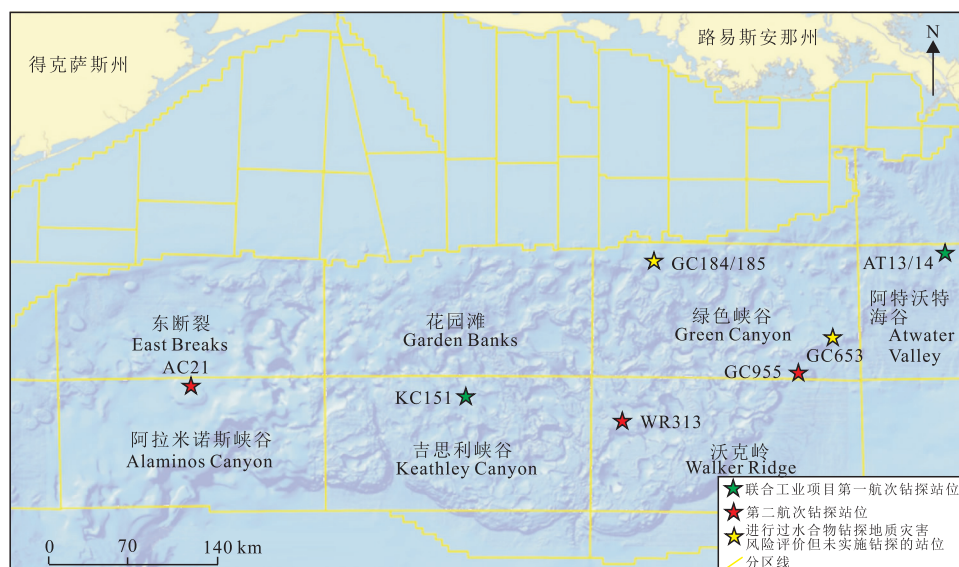


图1 墨西哥湾深水区“联合工业项目”天然气水合物钻探站位分布<sup>[5]</sup>

Fig. 1 Distribution of drilling sites for gas hydrate exploration in deep water Gulf of Mexico during the Joint Industry Project<sup>[5]</sup>

中存在裂隙充填型水合物,平均饱和度约为5%<sup>[7]</sup>;较深部砂层单元水合物呈孔隙充填型,饱和度大于85%,甚至可高达95%,形成水合物富集区<sup>[3,8,11]</sup>。

### 1.1.2 GC955 研究区水合物分布特征

GC955 研究区位于墨西哥湾北部绿色峡谷区(Green Canyon)东南部(图1),迄今已在该研究区完成5口天然气水合物研究井钻探研究工作,揭示水合物也存在浅部泥层裂隙充填型与深部砂层孔隙充填型2种赋存方式(图2b)<sup>[12]</sup>。但泥层与砂层也存在不含水合物的情况,表明该区天然气水合物形成与分布更为复杂。

GC955-H 井较浅部泥质层段近垂向裂隙中充填有天然气水合物(图2b),裂隙中水合物呈不均匀态分布<sup>[7,13]</sup>。深部目标富砂单元为水道与堤岸沉积体,由砂层与粉砂层、泥层互层组成,以砂层与粉砂层为主<sup>[7]</sup>。这一富砂单元的上部23 m为饱水层。水合物赋存于海底以下414~450 m层段的富砂单元,被2个不含水合物的饱水砂层所分隔(图3a)<sup>[3,7,9]</sup>,3个含水合物薄砂层厚度分别约为27,4,1 m<sup>[14]</sup>。富砂层中水合物饱和度介于50%~80%;而浅部泥质层裂隙充填型水合物饱和度平均值仅为5%<sup>[7,13]</sup>。

GC955-I 井同样钻遇浅部泥质沉积层与深部富砂层。目标富砂单元位于海底以下约362~479 m<sup>[3,7]</sup>。与WR313 研究区2口井情况不同,GC955-I 井浅部泥层中未发现裂隙充填型水合物。深部砂层单元由

上、下2个厚度分别为46 m和40 m的砂层组成,中间夹杂一厚30 m的泥质层;但2个砂层均不含水合物。在2个砂层之间的泥质层中夹有3个薄砂层,总厚度6.5 m。水合物以孔隙充填态赋存于这3个薄砂层中,饱和度小于50%,成为GC955-I 井仅有的富含水合物层段<sup>[3,7]</sup>。

GC955-Q 井钻遇的浅部泥质层中也未发现水合物存在证据(图2b)。与GC955-H 井情况类似,该井深部富砂单元上部为饱水层,下部为含水合物薄砂层与泥质层互层单元(图3b)<sup>[3]</sup>,砂层中水合物饱和度最高可达75%。

### 1.2 重点研究区天然气水合物富集层段岩相特征

通过WR313 和GC955 研究区水合物岩心录井分析与沉积物粒径分布特征研究,确定了孔隙充填型水合物及其上方裂隙充填型水合物储层的岩性组成<sup>[14-15]</sup>,探索了储层岩相性质对水合物富集成藏的影响。

采用保压岩心分析与转移系统对所采集岩心段进行了P波速度、伽马密度测量以及X射线扫描分析,在GC955 研究区识别出3种岩相。其中岩相1表现为高密度(2~2.1 g/cm<sup>3</sup>)、低P波速度(约1 500~1 700 m/s)特征;岩相2具有低密度(1.7~1.9 g/cm<sup>3</sup>)、高P波速度(3 000~3 250 m/s)特征;岩相3测值介于岩相1和岩相3之间,具有较高密度值(1.9~2.1 g/cm<sup>3</sup>)与较低P波速度值(约1 700 m/s)<sup>[16]</sup>。

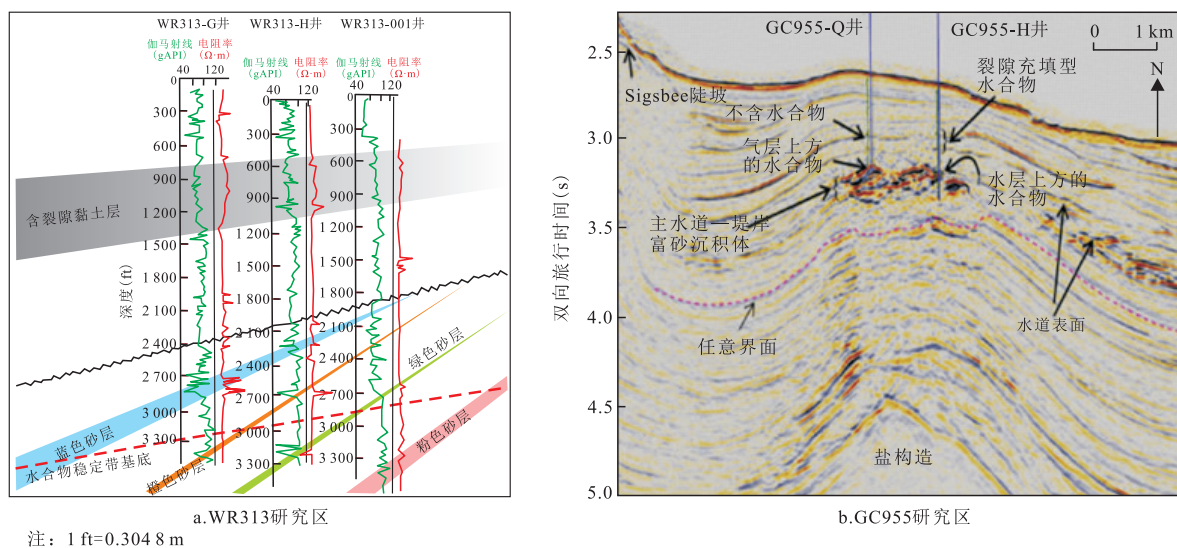


图2 墨西哥湾天然气水合物重点研究区水合物钻探井、目标砂体与水合物纵向分布<sup>[6,12]</sup>  
Fig. 2 Drilling wells, target sand intervals and vertical gas hydrate distribution features in the key study areas, Gulf of Mexico<sup>[6,12]</sup>

通过对保压岩心样品粒度分析,进一步证实了GC955研究区水合物富集单元存在3种岩相特征。从样品粒度分析结果看,岩相1样品由黏土和粉砂组成,以黏土为主,为粉砂质黏土;岩相2样品主要由粉砂与砂组成,以粉砂为主,为砂质粉砂;岩相3主要由黏土与粉砂组成,以粉砂为主,为黏土质粉砂<sup>[14,16-17]</sup>(图4a)。

通过对保压岩心样品水合物分解脱气量进行定量研究,并计算不同岩相样品水合物饱和度<sup>[17]</sup>,探索了不同岩相储层对水合物富集的影响。岩相1样品水合物饱和度极低,甚至可低至0.5%;岩相2水合物饱和度可高达90%以上;岩相3水合物饱和度较低,

介于0.5%~30%(图4b)。由此可见,水合物富集单元储层主要由岩相2和岩相3构成,其中岩相2水合物饱和度明显较高(图5),对于水合物富集成藏起着更为重要的作用<sup>[14,18]</sup>。

墨西哥湾北部天然气水合物富集单元岩相与水合物饱和度相关性研究表明,水合物富集成藏明显受控于储层岩相,水合物总是优先发育于相对粗粒沉积层中,砂质粉砂层中水合物饱和度可高达90%。研究同时揭示,该海域最有利于水合物富集成藏的“富砂”储层并不是通常意义的“砂”层,从岩相上看应为砂质粉砂层。

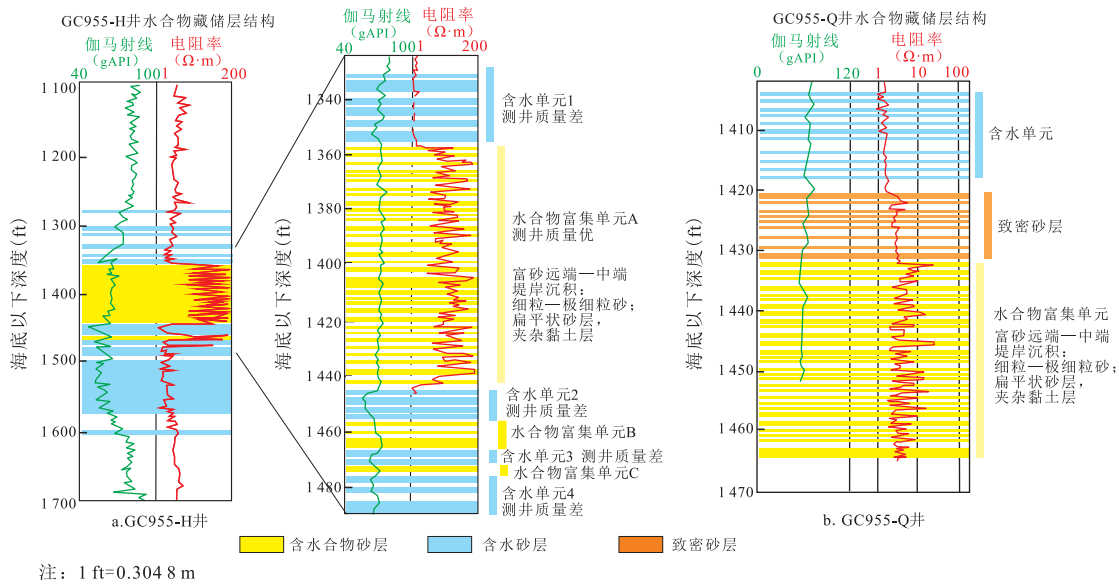


图3 墨西哥湾GC955研究区测井资料识别的富砂单元构成与砂层孔隙充填性质<sup>[9]</sup>  
Fig. 3 Sand-rich units and fluid-filling features identified from logging data in GC955 study area, Gulf of Mexico<sup>[9]</sup>

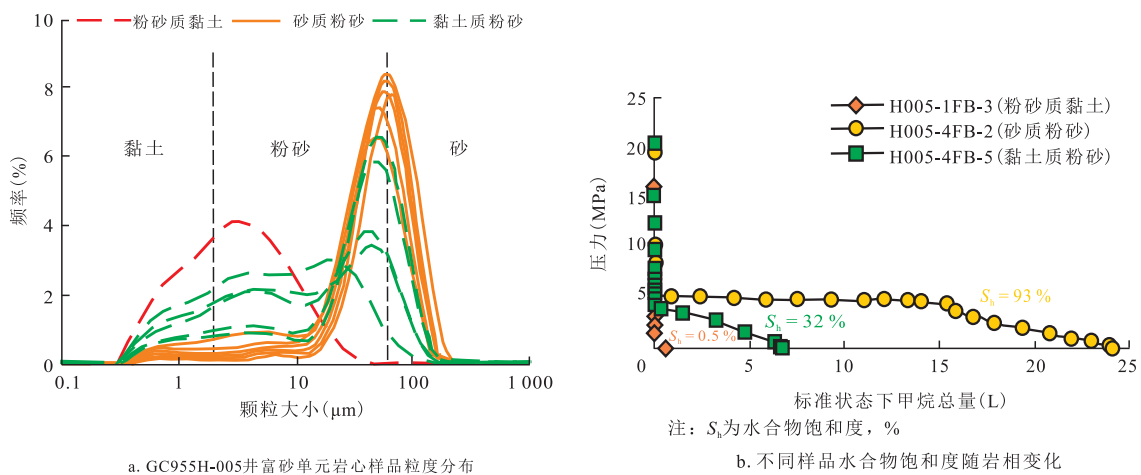


图4 墨西哥湾GC955研究区富砂单元岩心样品粒度分布与水合物饱和度变化<sup>[14,17]</sup>  
Fig. 4 Particle size distribution of core samples from sand-rich units and changes of gas hydrate saturation with sample lithofacies in study area GC955, Gulf of Mexico<sup>[14,17]</sup>

## 2 墨西哥湾天然气水合物成藏条件与富集机制

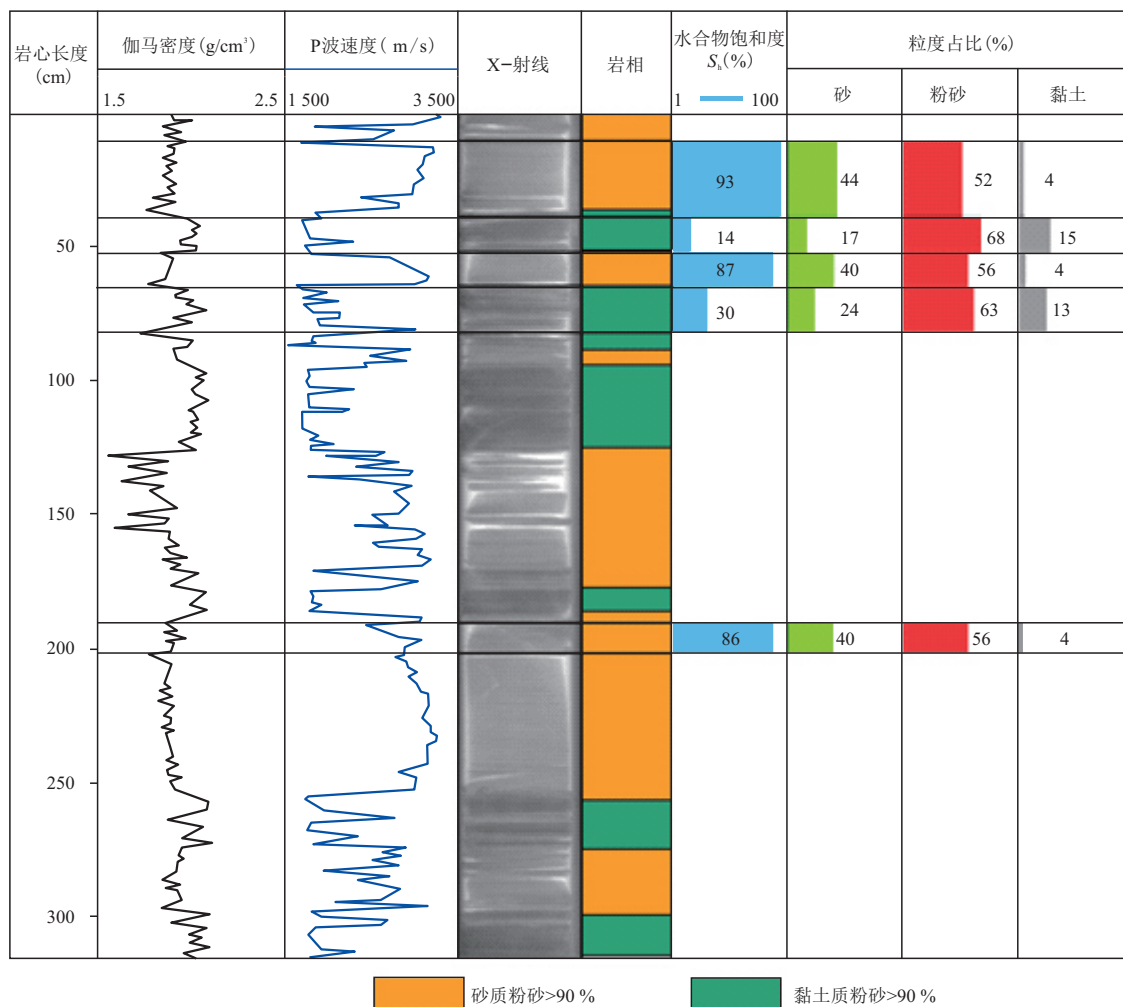
墨西哥湾北部天然气水合物研究区位于水深大于500 m的海域,具备水合物形成与赋存的温压条件。勘探研究表明,该海域具有较充足的气源与良好的输导体系,水合物稳定带之内发育局部富砂单元(图6—图8),为天然气水合物形成与富集成藏提供了有利条件。

### 2.1 水合物成藏的气源条件

墨西哥湾深水海底深部蕴藏着丰富的常规油气资源,水深大于500 m的海域作为常规油气勘探开发的重点区域,分布有众多油气井(图6)<sup>[19]</sup>,深部热成因气十分充足,为该区天然气水合物的形成提

供了气源保障。早年水合物勘探研究揭示,墨西哥湾绿色峡谷区(Green Canyon)与密西西比峡谷区(Mississippi Canyon)都曾发现热成因气水合物<sup>[21-23]</sup>。而且,墨西哥湾海底存在众多油气渗漏点与水合物丘<sup>[1, 24]</sup>,同时还发现了H型水合物<sup>[25-26]</sup>,揭示热成因气在墨西哥湾水合物形成中的作用不容忽视。另一方面,墨西哥湾北部具有较快的沉积速率,海底沉积层总有机碳含量较高,海底浅部生物气也相当可观<sup>[27-28]</sup>,成为该海域形成水合物的重要气源。

墨西哥湾DSDP航次与水合物钻探航次取心分析结果证实,该海湾既存在热成因气水合物也存在生物成因气水合物,但以生物成因气水合物为主。近年GC955研究区水合物钻探取心研究也揭示,该区水合物所含甲烷主要为微生物成因气,可能存在微量热成因气混入<sup>[17]</sup>。



注:岩心样品编号为H005-04FB,取自GC955-H005井海底以下421.54~424.75 m深度范围。

图5 墨西哥湾GC955-H005井压录井、岩相与水合物饱和度分布<sup>[14]</sup>

Fig. 5 Distribution of pressure core logging, lithofacies and gas hydrate saturation of Well-GC955-H005, Gulf of Mexico<sup>[14]</sup>

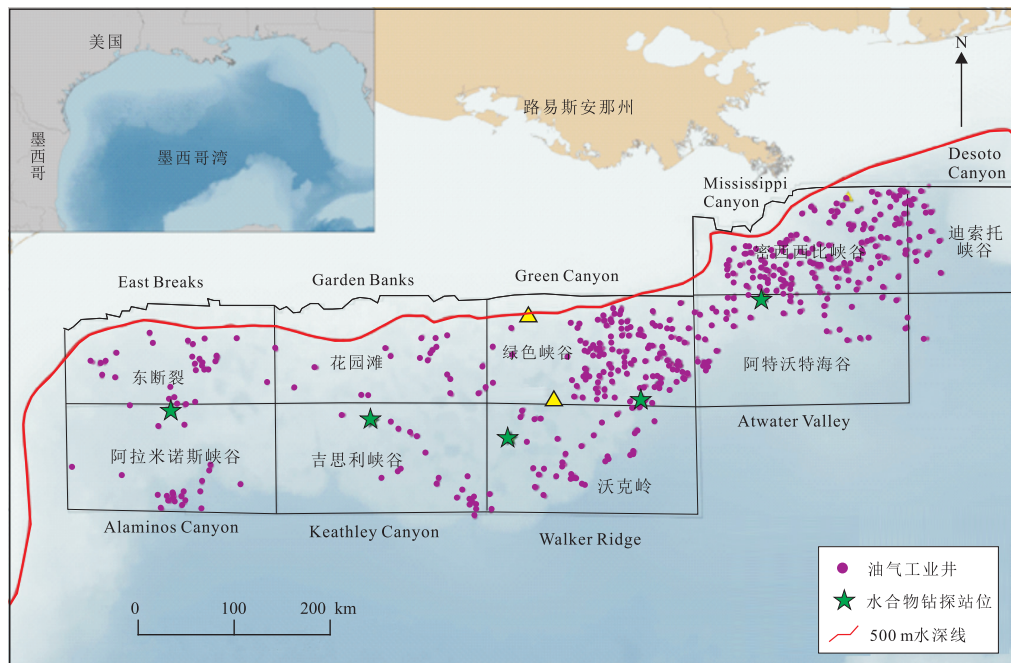
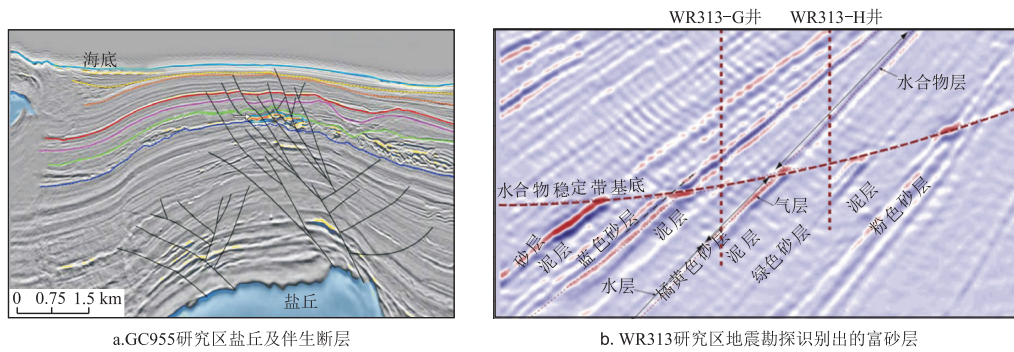


图6 墨西哥湾北部油气井与天然气水合物钻探站位分布<sup>[19]</sup>

Fig. 6 Distribution of the existing oil wells and the natural gas hydrate drilling sites in northern Gulf of Mexico<sup>[19]</sup>



a.GC955研究区盐丘及伴生断层

b. WR313研究区地震勘探识别出的富砂层

图7 墨西哥湾北部重点研究区天然气水合物富集成藏的构造与储集条件<sup>[3,14]</sup>

Fig. 7 Structural and reservoir elements controlling gas hydrate accumulation in key areas, northern Gulf of Mexico<sup>[3,14]</sup>

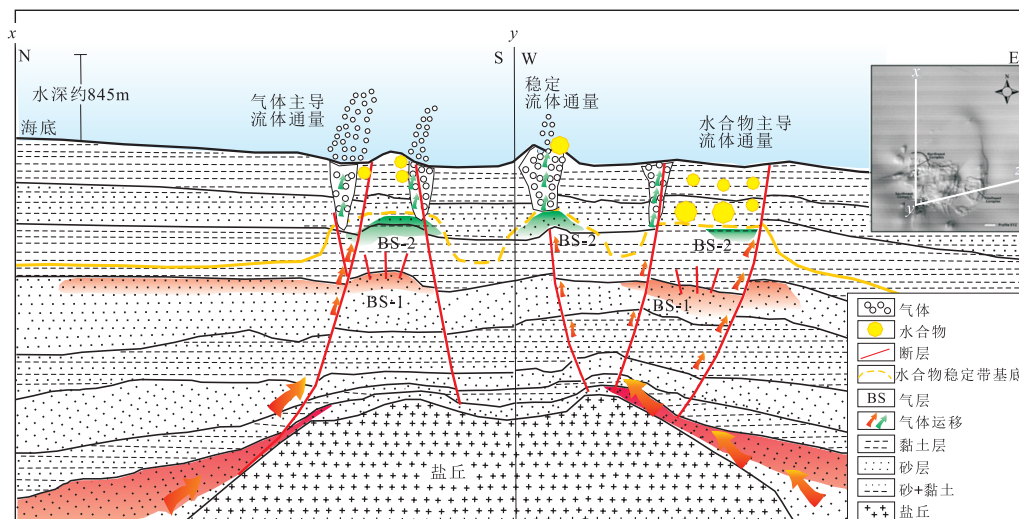


图8 墨西哥湾北部MC118区伍尔西海丘深源流体运移模式(据参考文献[20]修改)

Fig. 8 Migration models of the deep-sourced fluids in Woolsey Mound, MC118 Block in northern Gulf of Mexico (Modified from reference [20])

## 2.2 水合物成藏的气体输导条件

墨西哥湾北部海底天然气运移通道十分发育,以盐底辟及其伴生断裂、起源于深部的断层系统以及渗透性富砂沉积单元为主的运移体系,为天然气向水合物稳定带运移提供了良好的输导条件。

墨西哥湾北部广泛发育断裂与盐底辟,尤其是深水区盐底辟构造十分常见<sup>[29-30]</sup>。这些底辟体沟通了深源热成因气与浅部水合物稳定带,为包括深源热成因气在内的深部流体提供了良好的运移通道。同时,盐底辟在上侵过程中会刺穿上覆地层,并在其上方与邻近区形成大量断层与裂隙网络<sup>[31]</sup>,进一步增强了底辟体对流体的输导作用(图7a、图8)。另一方面,墨西哥湾深水区源自深部的断层对于深源气也具有良好的输导作用。以GC955研究区为例,地震勘探识别出多条起源于水合物稳定带之下的断层<sup>[9]</sup>,这些断层向上延伸到水合物稳定带,成为气体向水合物稳定带运移的又一重要通道。此外,深部天然气也可沿倾斜分布的富砂层向水合物稳定带运移。

## 2.3 水合物成藏的储集条件

在墨西哥湾北部,陆坡区受重力流沉积影响形成了较厚的富砂沉积层,深海平原区常发育富砂浊积扇。该海域广泛发育盐构造,复杂的盐构造运动产生了众多盐边凹陷,在重力流作用下,这类盐边凹陷内可形成厚层富砂沉积体,加大了陆坡区发育粗粒沉积层的可能性<sup>[3]</sup>。墨西哥湾北部常规油气井的随钻测井资料揭示,海底以下610 m以浅存在区域性砂层单元<sup>[27]</sup>;IODP308航次在2个盆地的钻探研究也证实海底浅部发育砂质浊积层<sup>[32]</sup>。

WR313与GC955研究区水合物勘探研究也证实该海域具有良好的水合物储集条件。WR313研究区分布于墨西哥湾北部陆坡小型盆地区的泰勒博恩(Terrebonne)盆地,该盆地是一个受控于盐丘构造的次生沉积盆地,碎屑沉积物以幕式沉积方式充填到盆地之中<sup>[6]</sup>。盆地内发育水道—堤岸沉积系统,在封闭盆地中沉积了大量砂体<sup>[33]</sup>。钻于该盆地翼部的WR313-G和WR313-H水合物研究井在深部钻遇多个富砂沉积单元(图7b)<sup>[3,41]</sup>。GC955研究区分布于墨西哥湾深海平原区上部锡格斯比海沟(Sigsbee)陡坡向陆端,位于盐核背斜上方。受盐构造运动与盐丘影响,在盐丘上方发育南北向的水道—堤岸沉积系统、

块体搬运沉积体以及盆底扇—席状砂体(图9)。GC955研究区的水道—堤岸沉积系统已为区内常规油气井与水合物钻井结果所证实,GC955-H、GC955-I与GC955-Q水合物勘探井均在深部发现富砂沉积单元<sup>[14-15]</sup>。整体上看,墨西哥湾北部海底发育富砂沉积单元,十分有利于天然气水合物在局部富集成藏。

## 2.4 水合物富集成藏机制

墨西哥湾WR313和GC955研究区天然气水合物主要富集于富砂储层之中。甲烷气的来源以及甲烷如何运移到局部富砂储层中形成水合物富集区,成为水合物富集成藏基础研究的主要内容。针对WR313研究区泥层裂隙型与砂层孔隙型水合物富集成藏的地质背景,前人研究提出了多种可能的甲烷运移机制<sup>[4, 9, 33, 35-36]</sup>,整体上可归纳为水合物稳定带之内细粒泥层中原地生物甲烷气体的短距离扩散运移机制和水合物稳定带之外深源甲烷气体的长距离平流运移机制。

短距离运移机制的情形之一是在泥层单元中缺乏砂层的情况下,原地生物甲烷通过扩散作用进入泥层裂隙之中形成裂隙型水合物(图10a)。短距离运移机制的另一种情形是在泥层中夹杂有局部砂层时,泥层原地生物气会优先运移进入砂层,占据砂层孔隙形成砂层孔隙型水合物(图10b)。此外,泥层产生的甲烷还可运移到泥层邻近地层中的砂体中形成水合物富集区(图10c)。如果泥层中存在多个互相独立的薄砂层,而砂层之间的泥层又很薄,则泥层产生的生物甲烷很可能不足以充填砂层的所有孔隙。在这种情况下砂层就会“争夺”泥层中的溶解甲烷,导致泥层溶解甲烷达不到其溶解饱和度,并最终使得泥层裂隙中不能生成水合物,如图10d所示。

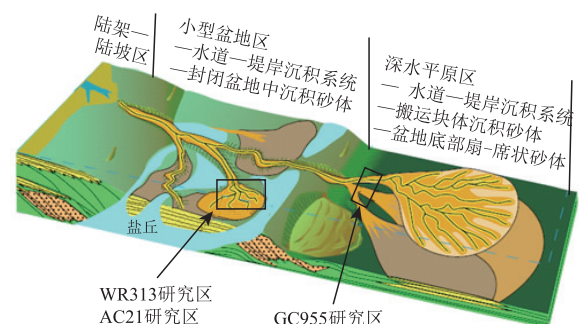
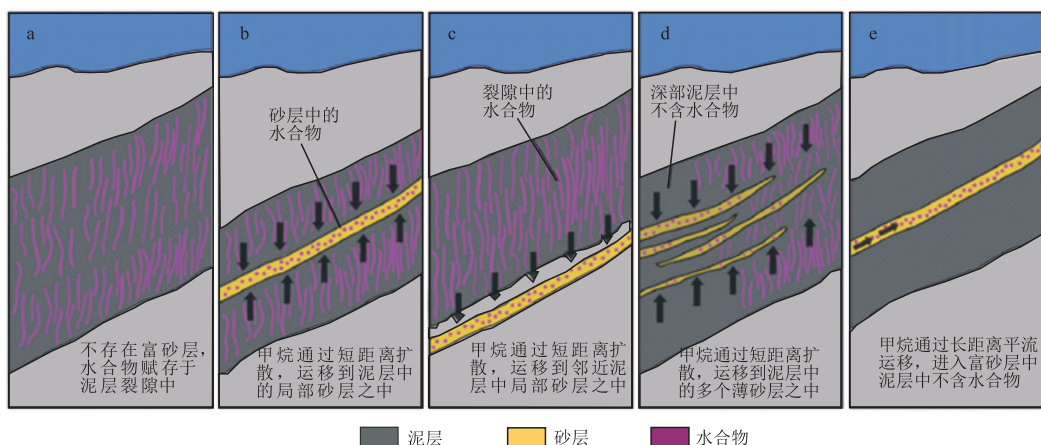


图9 墨西哥湾WR313和GC955研究区地质环境与沉积特征<sup>[33-34]</sup>

Fig. 9 Geological environments and sedimentary features in study area WR313 and GC955, Gulf of Mexico<sup>[33-34]</sup>



注:a.不存在砂层的情况下,泥层单元中原地甲烷形成裂隙型水合物;b.原地甲烷短距离运移到泥层单元内的局部砂层中形成孔隙型水合物;c.泥层中的甲烷运移到泥层附近的砂体之中形成孔隙型水合物;d.泥层中的甲烷运移到多个砂层之中,导致深部砂泥互层单元的泥质夹层中不含水合物;e.深部甲烷通过长距离运移进入砂层,并以砂层作为运移通道进入水合物稳定带,在砂层中形成孔隙型水合物。

图10 墨西哥湾WR313研究区可能的甲烷气体运移模式与天然气水合物富集成藏机制<sup>[4]</sup>

Fig. 10 Possible methane transport models and gas hydrate accumulation mechanisms in study area WR313, Gulf of Mexico<sup>[4]</sup>

在短距离扩散运移机制下,甲烷生成于水合物稳定带之内的原地泥层,是微生物对泥层有机物再矿化作用的终端产物。泥层中的生物甲烷往往只通过数米就能运移到邻近的相对粗粒储层或者裂隙之中。

相对于短距离扩散运移机制中甲烷为水合物稳定带之内的原地生物甲烷,长距离平流运移机制下的甲烷则来源于水合物稳定带之外,需要经过较长距离的运移才能从深部进入水合物稳定带之内。深部来源的甲烷气体可能是热成因气,也可能是生物成因气。深部热成因气、热成因气的生物降解气,以及水合物稳定带之下地层产生的微生物气,在有利的运移条件下,都可运移到水合物稳定带形成水合物。深部甲烷可呈游离态或溶解态向浅部运移,断层、裂隙、盐丘、泥火山以及延伸到水合物稳定带的高渗砂层(图10e)均可作为甲烷向浅部运移的通道。长距离运移由于气源可能存在深部热成因气,并且在运移过程中往往会汇集不同来源的气体,因此,一般气体通量相对较大,可为形成水合物富集区提供充足的气源。

墨西哥湾北部富砂单元天然气水合物富集成藏机理研究表明,在水合物稳定带之内的富砂储层中,甲烷气体的来源及其运移对于富砂储层中高饱和度水合物的形成具有重要影响。在气源方面,甲烷气体可源自水合物稳定带之内的原地生物甲烷,也可源自水合物稳定带之外的深部甲烷。但不论何种来源的甲烷气体,总是优先从水合物稳定带中的泥层向砂层运移,为砂层中高饱和度水合物的形成提供

了气源保障。从运移条件方面看,断层、裂隙以及砂层都可充当深源甲烷长距离运移通道;而泥层原地生物甲烷则以扩散方式进入砂层之中<sup>[4,37-38]</sup>。

### 3 讨论

经过数十年天然气水合物勘探研究,油气工业界对于水合物分布的广泛性及其巨大的资源潜力已达成了共识,但在特定水合物藏的气源性质、储层性质对水合物成藏的影响以及水合物成藏的复杂性等方面,还存在诸多不确定性因素。

#### 3.1 水合物富集成藏的气源性质

充足的气源是天然气水合物形成与富集成藏的物质基础。世界各大天然气水合物勘探热点区样品地球化学分析结果表明,水合物样品分解气中甲烷均占据绝对优势,且以生物成因为主,伴随着少量热成因气的混入。日本南海海槽东部天然气水合物试采区岩心样品分解气中甲烷占比高达99.9%以上,同时甲烷碳同位素值较轻( $\delta^{13}\text{C}_1 \leq -57\% \sim -69\%$ ),属典型的微生物成因气<sup>[39]</sup>。印度近海3个水合物富集区(B区、C区和E区)的保压岩心样品地球化学分析同样表明水合物具有明显的生物成因特征<sup>[40]</sup>。在墨西哥湾海域,早年深海钻探计划、水合物联合工业项目以及近年墨西哥湾新一轮钻探研究所采水合物样品,所含气体均具有以生物成因气为主的性质<sup>[17]</sup>。我国南海北部神狐海域水合物试采区所采水合物样

品分解气也以生物成因气为主,近年水合物样品地球化学分析检测到了相对较高的乙烷和丙烷含量,有些样品甚至检出了丁烷和戊烷,表明深部热成因气对于神狐水合物藏的形成具有一定贡献<sup>[41]</sup>。

从甲烷含量与甲烷碳同位素分析结果来看,生物成因气对于这些海域水合物热点研究区水合物的形成与富集成藏具有主导性贡献。但上述海域水合物研究区大多分布于常规油气富集区,热成因气源充足,断裂、底辟等各类油气运移通道发育,浅部水合物稳定带应存在丰富的热成因气,因此热成因气理应在水合物形成与富集成藏中具有更明显的贡献。为何在油气富集区上方水合物形成气源仍然以生物成因气为主,这其中的原因值得开展更深入的探讨。

### 3.2 储层岩相与水合物富集成藏

在气源与气体输导条件相同的情况下,储层岩相会直接影响天然气水合物的产出形态,并进而影响水合物的富集特征与资源潜力。

孔渗性能良好、相对粗粒沉积体为天然气水合物富集提供了有利的储集条件,沉积层中局部富砂单元在各地水合物富集成藏过程中发挥了重要作用。如前所述,美国墨西哥湾 WR313 和 GC955 研究区的水合物钻探研究揭示,水合物主要富集于砂质粉砂层与黏土质粉砂层<sup>[8-9]</sup>。日本南海海槽区水合物试采目标  $\beta$  水合物藏分布于局部水道浊积体的上部,储层岩相主要由砂、粉砂质砂和砂质粉砂组成<sup>[42-44]</sup>。我国南海北部神狐海域多口水合物井测井与取心研究揭示,水合物储集于黏土质粉砂、粉砂质黏土、含粉砂黏土等多种沉积层段,主要富集于黏土质粉砂层中<sup>[45-46]</sup>。相比而言,国外海域热点区水合物一般富集于砂质粉砂与粉砂质砂等较粗粒储层,而我国南海神狐海域水合物则主要富集于颗粒较细储层。但神狐海域水合物富集特征研究也揭示,水合物饱和度较高层段与细粒沉积层中砂与粗粉砂含量相对较高层段具有良好对应关系,水合物饱和度与包括粒径在内的沉积物粒度参数呈正相关<sup>[47-48]</sup>。上述研究表明,只要是相对于周围沉积层形成了相对粗粒的沉积体,就会有利于形成局部水合物富集区。因此,水合物稳定带中相对粗粒沉积体的识别应成为水合物富集成藏研究的重要内容。

### 3.3 水合物富集成藏的复杂性

天然气水合物富集成藏理论研究目前还处于探

索之中,水合物稳定带内水合物富集区的形成涉及复杂的作用过程,面临着一些难以解释的问题。如前所述,墨西哥湾 GC955 研究区 GC955-H、GC955-I 和 GC955-Q 这 3 口井相距很近,具有相似的气源条件;而且均钻遇了富砂层,具有水合物富集成藏的有利储集条件,但部分砂层层段并不存在水合物。早年在美国阿拉斯加北坡热冰 1 井(Well Hot Ice1)水合物研究中,研究区邻近库帕勒克河油田与普拉德霍湾油田,且附近已发现塔恩(Tarn)水合物藏,表明该区形成水合物的气源充足;在冻土层基底处存在富砂层,表明水合物储集条件良好。该井预期在砂层中会钻遇水合物富集层段,但最终在目标砂层中却采出了游离气,并未发现水合物存在证据<sup>[49]</sup>。由此可见,天然气水合物富集成藏受控于诸多因素的影响,其形成过程往往比预期更为复杂。这些研究成果表明,在气源、水源与储集条件都满足的情况下,也不能保证就一定能够形成局部水合物富集区,运移通道发育程度、局部热流变化等因素,都会影响水合物富集区的形成与稳定<sup>[50]</sup>。不同研究区因地质条件的不同,影响局部水合物富集区形成的因素也会存在差异,水合物富集区识别中应根据研究区特有的气源、运移与储集特征进行具体分析,同时还应考虑局部热流异常对水合物稳定性的影响。

## 4 结论与认识

1) 墨西哥湾北部天然气水合物存在较浅部泥层裂隙充填型和较深部砂层孔隙充填型 2 种类型,水合物主要富集于较深部砂层单元之中。水合物富集单元岩相特征研究揭示,WR313 研究区水合物以孔隙充填型富集于由薄砂层与粉砂质薄层、砂层和泥层互层所构成的富砂单元;GC955 研究区水合物主要富集于砂质粉砂与黏土质粉砂层构成的富砂单元。富砂层水合物饱和度大于 80%,可高达 95%。整体上看,富砂层构成了墨西哥湾北部水合物富集成藏的主要储层。

2) 天然气水合物成藏机理研究表明,充足的气源、有利的运移通道与良好的储集条件构成了水合物富集成藏的基本前提。WR313 研究区的水合物成藏机制研究揭示,在天然气水合物稳定带之内,天然气总是倾向于从泥层向颗粒较粗的砂层运移,从而为砂层中水合物富集成藏提供了物质保障。墨西哥湾水合物藏储层岩相特征研究揭示,该海域最有利

于水合物富集成藏的“富砂”储层从岩相上看为砂质粉砂层。

3) 相对粗粒储层作为天然气水合物富集成藏的有利储层,在水合物勘探研究中应受到足够的重视。美国墨西哥湾、日本南海海槽以及韩国东海郁龙盆地水合物有利区研究中,都十分注重对局部富砂体的识别。通过利用水合物勘探资料,结合常规油气勘探资料,确定水合物稳定带内局部富砂单元的分布,有利于明确水合物富集区勘探目标,是一个值得借鉴的水合物富集区勘探方法。

4) 天然气水合物富集成藏理论研究目前还处于初步探索阶段,近年通过对已发现水合物藏测井与取心分析,明确了水合物富集成藏有利储层的岩相特征,但远没有解决水合物富集成藏研究面临的所有问题。天然气水合物富集成藏是一个涉及诸多因素的复杂作用过程,需要进一步加强研究。

#### 参考文献

- [1] SHEDD W, BOSWELL R, FRYE M, et al. Occurrence and nature of “bottom simulating reflectors” in the northern Gulf of Mexico[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, 34(1): 31-40.
- [2] BOSWELL R, COLLETT T S, MCCONNELL D, et al. Joint Industry Project Leg II discovers rich gas hydrate accumulations in sand reservoirs in the Gulf of Mexico[J]. *Fire in the Ice*, 2009, 9(3): 1-5.
- [3] 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: 4-30.
- [4] HILLMAN J, 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.
- [5] MCCONNELL D R, ZHANG Z J, BOSWELL R. Review of progress in evaluating gas hydrate drilling hazards[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, 34: 209-223.
- [6] FRYE M, SHEDD W, BOSWELL R. Gas hydrate resource potential in the Terrebonne Basin, Northern Gulf of Mexico[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, 34: 150-168.
- [7] COLLETT T S, LEE M W, ZYRIANOVA M V, 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.
- [8] KOU W W. Direct seismic indicators of gas hydrates in the walker ridge and green canyon areas, deepwater Gulf of Mexico [C]// Paper presented at the Deepwater and Ultra Deepwater Reservoirs in the Gulf of Mexico session, AAPG Geoscience Technology Workshop, Houston, Texas, March 17, 2010.
- [9] 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: 134-149.
- [10] LEE M W, COLLETT T S. Three types of gas hydrate reservoirs in the Gulf of Mexico identified in LWD data[A]. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Gas Hydrates (ICGH 2011)*. Edinburgh, United Kingdom: July 17-21, 2011.
- [11] BOSWELL R. DOE’s natural gas hydrates program[R]. Methane Hydrate Federal Advisory Committee, Galveston, TX, 2014.
- [12] 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.
- [13] LEE M W, COLLETT T S. Pore-filling and fracture-filling gas hydrate reservoirs in the Gulf of Mexico Gas Hydrate Joint Industry Project Leg II Green Canyon 955 H well[J]. *Journal of Marine and Petroleum Geology*, 2012, 34: 62-71.
- [14] FLEMINGS P B, PHILLIPS S C, BOSWELL R, et al. Pressure coring a Gulf of Mexico deep-water turbidite gas hydrate reservoir: Initial results from The University of Texas-Gulf of Mexico 2-1 (UT-GOM2-1) Hydrate Pressure Coring Expedition[J]. *AAPG Bulletin*, 2020, 104: 1847-1876.
- [15] MEAZELL P K, FLEMINGS P B, SANTRA M, et al. Sedimentology and stratigraphy of a deep-water gas hydrate reservoir in the northern Gulf of Mexico[J]. *AAPG Bulletin*, 2020, 104(9): 1945-1970.
- [16] FLEMINGS P B, PHILLIPS S C, COLLETT T S, et al. UT-GOM2-1 Hydrate Pressure Coring Expedition (Chapter 1. Expedition Summary)[R/OL]. <https://www.osti.gov/servlets/purl/1647223/>, 2018.
- [17] PHILLIPS S C, FLEMINGS P B, HOLLAND M E, et al. High concentration methane hydrate in a silt reservoir from the deep-water Gulf of Mexico[J]. *AAPG Bulletin*, 2020, 104: 1971-1995.
- [18] THOMAS C, PHILLIPS S C, FLEMINGS P B, et al. Pressure coring operations during the University of Texas-Gulf of Mexico 2-1 (UT-GOM2-1) hydrate pressure coring expedition in Green Canyon Block 955, northern Gulf of Mexico[J]. *AAPG Bulletin*, 2020, 104: 1877-1901.
- [19] MAJUMDAR U, COOK A E, SCHARENBERG M, et al. Semi-quantitative gas hydrate assessment from petroleum industry well logs in the northern Gulf of Mexico[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 85: 233-241.
- [20] MACELLONI L, BRUNNER C A, CARUSO S, et al. Spatial distribution of seafloor bio-geological and geochemical processes as proxies of fluid flux regime and evolution of a carbonate/hydrates mound, northern Gulf of Mexico[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2013, 74(1): 25-38.
- [21] SASSEN R, SWEET S T, MILKOV A V, et al. Geology and geochemistry of gas hydrates, central Gulf of Mexico continental slope[J]. *Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions*, 1999, 49: 462-468.
- [22] ORCUTT B N, BOETIUS A, LUGO S K, et al. Life at the edge of methane ice: Microbial cycling of carbon and sulfur in Gulf of Mexico gas hydrates[J]. *Chemical Geology*, 2004, 205: 239-251.
- [23] ZHANG Z J, HAN D H, YAO Q L. Quantitative interpretation for gas hydrate accumulation in the eastern Green Canyon Area, Gulf of Mexico using seismic inversion and rock physics transform[J]. *Geophysics*, 2011, 76: 139-150.
- [24] MILKOV A, SASSEN R. Estimate of gas hydrate resource, northwestern Gulf of Mexico continental slope[J]. *Marine Geology*, 2001, 179: 71-83.
- [25] SASSEN R, MACKONALD I R. Evidence of structure H

- hydrate, Gulf of Mexico continental slope[J]. *Organic Geochemistry*, 1994, 22(6): 1029–1032.
- [26] 陈多福,王茂春,徐文新,等.墨西哥湾西北陆坡天然气水合物资源评价[J]. *海洋地质动态*, 2003, 19(12): 14–17.  
CHEN Duofu, WANG Maochun, XU Wenxin, et al. Assessment of resources and economic potential of gas hydrate in the Northwestern Gulf of Mexico Continental Slope[J]. *Marine Geology Letters*, 2003, 19(12): 14–17.
- [27] BOSWELL R, COLLET T, FRYE M, et al. Gulf of Mexico gas hydrate joint industry project leg II: Technical summary[R/OL]. (2009–04–16)[2020–12–09].<https://www.boem.gov/sites/default/files/documents/MMS2008–004.pdf>.
- [28] HUTCHINSON D, RUPPEL C, ROBERTS H, et al. Gas hydrates in the Gulf of Mexico[A]. In: Holmes C (eds.). *Gulf of Mexico: Its Origin, Waters, and Biota*[C]. Texas: Texas A&M University Press, 2011.
- [29] WORRALL D M, SNELSON S. Evolution of the northern Gulf of Mexico, with emphasis on Cenozoic growth faulting and the role of salt[A]. In: Bally A W and Palmer A R (eds.). *The geology of North America: An review*[C]. Houston: Geological Society of America, 1989.
- [30] 杨传胜,李刚,龚建明.墨西哥湾北部陆坡天然气水合物成藏系统[J]. *海洋地质动态*, 2010, 26(3): 35–39.  
YANG Chuansheng, LI Gang, GONG Jianming. Accumulation system of gas hydrate in the Northern Gulf of Mexico Slope[J]. *Marine Geology Letters*, 2010, 26(3): 35–39.
- [31] ROWAN M G, JACKSON M P A, TRUDGILL B D. Salt-related fault families and fault welds in the northern Gulf of Mexico[J]. *AAPG Bulletin*, 1999, 83(9): 1454–1484.
- [32] 李前裕,蒋少涌.探索墨西哥湾深水沉积的超高压和流体流动过程与机理——IODP308航次钻探成果[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(3): 6, 20, 30.  
LI Qianyu, JIANG Shaoyong. Exploration of the ultra-high pressure and the fluid flow fluid flow process and mechanism in deepwater sediments of Gulf of Mexico – Drilling results from IODP 308Leg[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2006, 26(3): 6, 20, 30.
- [33] BOSWELL R, COLLET T, FRYE M, et al. Gulf of Mexico gas hydrate joint industry project leg II: Technical summary[R/OL]. (2009–04–16)[2020–12–09].<https://www.boem.gov/sites/default/files/documents/MMS2008–004.pdf>.
- [34] BOSWELL R. Gulf of Mexico gas hydrate drilling and logging expedition underway[J]. *Fire in the Ice*, 2009, 9(2): 1–6.
- [35] COOK A E, MALINVERNO A. Short migration of methane into a gas hydrate bearing sand layer at Walker Ridge, Gulf of Mexico[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2013, 14(2): 283–291.
- [36] NOLE M, DAIGLE H, COOK A E, et al. Short-range, over-pressure driven methane migration in coarse-grained gas hydrate reservoirs[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43: 9500–9508.
- [37] DAIGLE H, MOHANTY K, COOK A, et al. Mechanisms for methane transport and hydrate accumulation in coarse-graded reservoirs[R]. Final Scientific/Technical Report, September 1, 2013 – March 31, 2018.
- [38] YOU K H, FLEMINGS P B. Methane hydrate formation in thick sand reservoirs: 1. Short-range methane diffusion[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, 89: 428–442.
- [39] 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.
- [40] COLLETT T S, BOSWELL R, WAITE W F, et al. India National Gas Hydrate Program Expedition 02 Summary of Scientific Results: Gas hydrate systems along the eastern continental margin of India[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 108: 39–142.
- [41] 苏丕波,梁金强,张伟,等.南海北部神狐海域天然气水合物成藏系统[J]. *天然气工业*, 2020, 40(8): 77–89.  
SU Pibo, LIANG Jinqiang, ZHANG Wei, et al. Natural gas hydrate accumulation system in the Shenhu sea area of the northern South China Sea[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(8): 77–89.
- [42] 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: 1–10.
- [43] 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.
- [44] MASUDA Y, YAMAMOTO Y, TADAAKI S, et al. Japan's methane hydrate R&D program progresses to phase 2[J]. *Fire in the Ice*, 2009, 9(4): 1–6.
- [45] 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.  
ZHANG Wei, LIANG Jinqiang, LU Jing'an, et al. Accumulation features and mechanisms of high saturation natural gas hydrate in Shenhu Area, northern South China Sea[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(5): 670–680.
- [46] 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.  
WU Shiguo, WANG Jiliang. On the China's successful gas production test from marine gas hydrate reservoirs[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63(1): 2–8.
- [47] 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.  
CHEN Fang, ZHOU Yang, SU Xin, et al. Gas hydrate saturation and its relation with grain size of the hydrate-bearing sediments in the Shenhu area of Northern South China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2011, 31(5): 95–100.
- [48] 杨承志,罗坤文,梁金强,等.南海北部神狐海域浅层深水沉积体对天然气水合物成藏的控制[J]. *天然气工业*, 2020, 40(8): 68–76.  
YANG Chengzhi, LUO Kunwen, LIANG Jinqiang, et al. Control effect of shallow-burial deepwater deposits on natural gas hydrate accumulation in the Shenhu sea area of the northern South China Sea[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(8): 68–76.
- [49] WILLIAMS T E, MILLHEIM K, LIDDELL B. Methane hydrate production from Alaskan permafrost final report[R]. Texas: Maurer Technology Inc. and Anadarko Petroleum Corp., 2005: 1–37.
- [50] ROBERT H H, HARDAGE B A, SHEDD W W, et al. Seafloor reflectivity: An important seismic property for interpreting fluid-gas expulsion geology and the presence of gas hydrate[J]. *The Leading Edge*, 2006, 25(5): 620–627.

(编辑 常燕)