

## 海域天然气水合物钻探研究进展及启示(I): 站位选择\*

苏明<sup>1,2</sup>, 匡增桂<sup>3</sup>, 乔少华<sup>1,2</sup>, 沙志彬<sup>3,4</sup>, 魏伟<sup>5</sup>, 张金华<sup>5</sup>,  
苏丕波<sup>3</sup>, 杨睿<sup>1,2</sup>, 吴能友<sup>1,2†</sup>, 丛晓荣<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院天然气水合物重点实验室, 广州 510640; 2. 中国科学院广州天然气水合物研究中心, 广州 510640;

3. 广州海洋地质调查局, 广州 510760; 4. 中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉 430074;

5. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北 廊坊 065007)

**摘要:** 本文通过对国外海域天然气水合物钻探的调研, 选取布莱克海台、水合物脊、墨西哥湾、日本南海海槽、韩国郁龙盆地、印度大陆边缘等区域, 从水合物站位选择目的和站位选择依据这两个方面进行归纳总结和系统对比。研究指出, 根据水合物的实际产出和赋存, 可将其划分为两大类型: 赋存于海底浅表层的水合物(一般在海底之下100 m范围内)和赋存于海底之下中-深层的水合物(一般在海底之下100~400 m范围内)。前者的主要识别依据为海水异常、含气流体运移通道和异常地形地貌特征, 而后者主要识别依据为地球物理异常反射特征、含气流体运移通道和有利沉积体。因此, 如果将水合物的形成、聚集和分布比喻为一个有机的整体, 那么“运”和“聚”就构成了这个系统的“骨骼”和“血液”, 它们将控制远景区内的水合物分布。将“水合物识别标志”、“有利沉积体展布”和“流体运移通道”三者有机地结合在一起, 可以达到更准确地预测和描述水合物矿体的目的, 这是今后海域水合物钻探站位选择依据的主要发展方向。

**关键词:** 天然气水合物; 含气流体运移; 有利沉积体; 水合物钻探站位选择

中图分类号: TK01; TE1; P736

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.2095-560X.2015.02.007

## The Progresses and Revelations of Marine Gas Hydrate Explorations (I): Purposes and Selection Evidences of the Hydrate Drilling Sites

SU Ming<sup>1,2</sup>, KUANG Zeng-gui<sup>3</sup>, QIAO Shao-hua<sup>1,2</sup>, SHA Zhi-bin<sup>3,4</sup>, WEI Wei<sup>5</sup>,  
ZHANG Jin-hua<sup>5</sup>, SU Pi-bo<sup>3</sup>, YANG Rui<sup>1,2</sup>, WU Neng-you<sup>1,2</sup>, CONG Xiao-rong<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Gas Hydrate, Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. Guangzhou Center for Gas Hydrate Research, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 3. Guangzhou Marine

Geological Survey, Guangzhou 510760, China; 4. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

5. Research Institute of Petroleum Exploration and Development-Langfang, Hebei Langfang 065007, China)

**Abstract:** In order to better understanding the progresses of marine gas hydrate explorations, this study summarized the hydrate drill site objectives and drill site selections through some analyses on Blake Ridge, Hydrate Ridge, Gulf of Mexico, Nankai Trough, Ulleung Basin, and Indian continental margin. According to the actual occurrences, marine gas hydrates might be classified as two types, hydrates in the shallow layers near seafloor (generally within the range of 100 m below the seafloor), and hydrates in the relatively deep sediments (generally within the range of 100~400 m below the seafloor). The main indicators for site selection of hydrates in the shallow layers are anomalies in seawater, migrations of gas-bearing fluids and specific seafloor topographic features. On the contrast, the main indicators for site selection of hydrates in the deep layers are geophysical anomalies, migrations of gas-bearing fluids and distributions of favorable sediments. Therefore, for the marine gas hydrates system, fluids migrations and potential reservoirs could be referred to as bones and bloods, which might control the distribution of marine gas hydrates in the promising prospecting areas. In combination of anomalies related to hydrates, migrations of gas/fluids and favorable deep-water sediments, the predictions would be more accurate, which could be suggested as the developing trend of site selections for marine gas hydrates.

**Key words:** gas hydrate; gas-bearing fluids migration; favorable deep-water sediments; site selections for marine gas hydrates

## 0 引言

天然气水合物(以下简称“水合物”)是一种在高压低温条件下由烃类气体分子和水分子构成的笼型似冰状晶体物质<sup>[1]</sup>, 俗称“可燃冰”。作为一种非常规性的能源, 水合物中蕴含着丰富的天然气资源, 据估计, 其天然气资源总量已经超过了目前所发现的所有油气藏的资源总和<sup>[2]</sup>。此外, 海域水合物在海底地质灾害、气候演变和环境效应等方面也具有重要的研究意义<sup>[3-5]</sup>。

近年来, 为了查明海域水合物的赋存位置、产

出特征及地质控制因素, 一系列钻探计划相继实施(图1), 如大洋钻探计划(Ocean Drilling Program, ODP) 164 和 204 航次<sup>[6,7]</sup>、综合大洋钻探计划(Integrated Ocean Drilling Program, IODP) 311 航次<sup>[8]</sup>、墨西哥湾“联合工业计划”(Joint Industry Project, JIP)<sup>[9,10]</sup>、南海海槽“日本甲烷水合物开发计划”(Japan's Methane Hydrate Exploitation Program, JMHEP)<sup>[11,12]</sup>、“郁龙盆地水合物勘探计划”(Ulleung Basin Gas Hydrate Expedition, UBGHE)<sup>[13,14]</sup>以及“印度国家水合物计划”(India National Gas Hydrate Program, INGHP)<sup>[15,16]</sup>等。



图1 永久冻土区和海洋沉积物中已知的和推测的天然气水合物区域(修改自 Kvenvolden, 1993; Collett, 2002<sup>[1,2]</sup>)

Fig. 1 Locations of known and inferred gas hydrate occurrences in permafrost regions and oceanic sediments (after Kvenvolden, 1993; Collett, 2002<sup>[1,2]</sup>)

上述海域水合物钻探计划的成功实施, 不仅证明了水合物在这些区域的存在, 还为研究水合物形成、产出和聚集提供了大量的第一手地质资料, 使得海域水合物的勘探技术和成藏理论得到了飞速的发展, 从而能更好地回答“水合物如何分布”和“水合物分布的控制因素”这两个关键科学问题。本文系统回顾了这些水合物钻探研究的结果, 总结了在不同地质背景下水合物钻探站位的布置和水合物的赋存特征, 进而对影响海域水合物形成和聚集的主要控制因素进行归纳和对比, 从产出分类的角度探

讨海域水合物远景区内钻探站位的选择依据, 希望为我国海域水合物成藏理论和实际钻探提供借鉴。

## 1 布莱克海台

布莱克海台位于北美东南部被动大陆边缘, 是一个大型的新近纪至第四纪沉积物牵引体, 主要由粉砂及富泥的半远洋/等深流沉积组成<sup>[17]</sup>。作为海域水合物的第一次实际钻探, ODP164 航次的主要科学目标在于评估水合物资源量、了解水合物和似海底反射(Bottom simulating reflectors, BSRs)之间

的关系, 以及水合物在富集区内的空间分布变化。ODP164 航次共设置了 7 个站位, 其中 991、992、993 和 996 站位位于北部夏洛琳娜-布莱克海脊 Cape Fear 底辟和海底滑坡之上, 994、995 和 997 站位则位于南部布莱克外脊 (图 2a)。在布莱克海台区域, 底辟构造非常发育, 造成了上覆地层的扰动并破坏了正常的沉积序列, 因此, 此处设置的浅钻, 如 991、992、993 和 996 站位 (钻探深度 50~67 m), 其目的是研究这些扰动地层的物理性质和含气流体运移的特征。此外, BSRs 在这一区域分布广泛, 此处设置的深钻 994、995 和 997 是为了研究水合物、含水合物沉积物及其与 BSRs 的关系<sup>[6]</sup>。下面将选择位于底辟区的 996 站位和位于 BSRs 区的 994 和 997 站位进行回顾。

### 1.1 996 站位

996 站位位于布莱克海脊底辟构造的顶部, 水深约为 2 170 m (图 2b)。该站位的主要目的是调查麻坑构造的断裂带中甲烷的运移及水合物的形成、分析海底渗漏的气体来源、研究流体运移对沉积物结构和稳定性的影响。从过该站位的地震剖面中可

以观察到盐底辟构造是非常清晰的, 主要表现为杂乱的地震反射特征, 并导致上覆地层产生了上倾, 甚至在海底也形成了轻微的隆起特征 (图 2b)。盐底辟构造及其内部的断裂系统将为含气流体的运移提供通道, 导致甲烷在近海底处发生渗漏或喷溢, 形成具有似火山口状的海底凹陷, 即麻坑构造, 并可见沿着喷溢口的断裂 (图 2b)。此外, 盐底辟构造内部上涌的盐体将引起传导热场与对流热场 (热液物质流动与交换) 的叠加, 导致水合物稳定带的变化, 如 BSRs 的向上迁移 (图 2b), 从底辟周缘的约 400 mbsf (meters below the seafloor) 减薄至底辟中心的约 245 mbsf<sup>[18]</sup>。盐底辟构造的存在影响了 996 站位处的水合物形成和分布, 热量的增加可能会导致底辟构造中心位置处水合物 (图 2b 中的空白反射带) 发生分解, 含气流体将会沿着断裂体系向浅部的地层发生运移, 在近海底处形成新的水合物层 (图 2b)。因此, 地震资料上含气流体运移通道 (如底辟构造和断裂体系) 和明显的地形异常 (如地形的隆起和麻坑构造) 是确定 996 站位的主要依据。

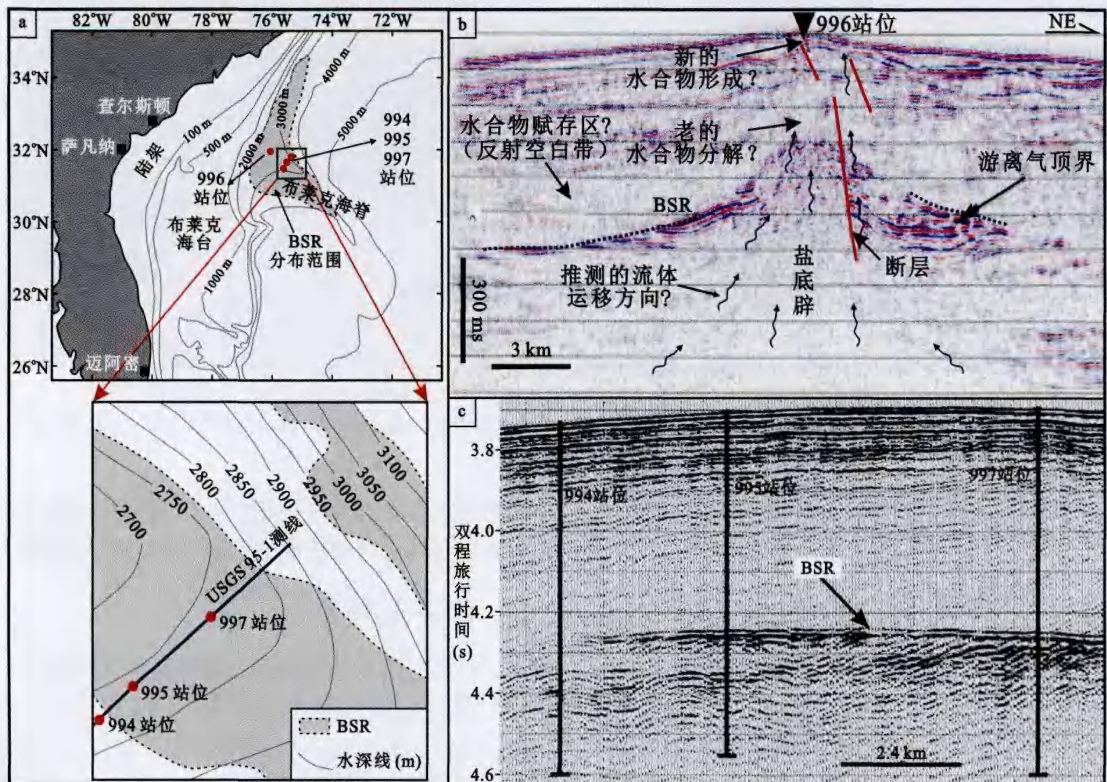


图 2 (a) ODP 164 航次站位位置; (b) 过 996 站位的地震剖面; (c) 过 994、995 和 997 站位的地震剖面 (修改自 Paull 等, 1996<sup>[6]</sup>)  
Fig. 2 (a) Locations of the sites in ODP Leg 164; (b) the seismic profile crossing Site 996; (c) the seismic profile crossing Sites 994, 995 and 997 (after Paull et al., 1996<sup>[6]</sup>)

水合物在 996 站位赋存在近海底的浅表层地层中, 主要呈现为 3 种不同的产出形态<sup>[6]</sup>: ①块状水合物碎片, 呈柱状至圆形, 长 5~8 cm, 位于岩心最上部 9 mbsf 以内; ②板状水合物脉, 呈脉状充填于近垂直的裂缝中, 厚 1~4 mm, 位于大多数岩心 30 mbsf 之下; ③杆状水合物瘤, 直径约 1 cm, 长 3~12 cm, 向下逐渐变小, 位于 996 站位岩心 50 mbsf 处。

## 1.2 994 和 997 站位

994 和 995 站位位于布莱克海脊侧部, 997 站位位于海脊脊部(图 2a), 3 个站位的水深在 2 800 m 左右。从过 994、995、997 站位的 USGS95-1 地震剖面中可以发现, 自北向南, 从布莱克海脊的翼部到脊部, BSRs 从不发育到非常明显(图 2c)。布置这一系列站位的重要目标是确定水合物、下伏游离气与 BSRs 之间的关系, 了解水合物的空间部分变化, 并测试含水合物沉积物的物性参数。因此, 水合物存在的地球物理证据(BSRs)是这一系列站位的主要选择依据。

从地震反射特征来看, 3 个站位的剖面地层岩性变化不大, 994 站位处水合物的获取既表明水合物可以在无明显 BSRs 分布的地方产出, 也说明水合物稳定带之下游离气的富集可能是产生 BSRs 的主要原因。水合物的产出主要表现为 3 种形态<sup>[6]</sup>: ①孔隙充填型, 测井资料和孔隙水盐度资料表明, 从 180 mbsf 至水合物稳定带底界 440~470 mbsf 都可见这类水合物的存在, 是布莱克海台区域最为典型的水合物产出类型; ②瘤状结核结壳型, 如 164-994C-31X-7 岩心段(259 mbsf)产出水合物呈白色瘤状, 体积为 4~25 cm<sup>3</sup>; ③块状晶体型, 如 164-994D-4X-1 岩心段(261 mbsf)产出水合物呈微小块状, 体积小于 1 cm<sup>3</sup>。在 997 站位 331 mbsf 的地方发现了一大块纯的块状水合物, 直径约 5 cm, 长约 14 cm。该区域发育的近垂直的小型断层<sup>[19]</sup>可能是 997 站位处块状水合物赋存的主要因素。

## 2 水合物脊

水合物脊位于卡斯卡迪亚增生楔北端向海外延处(图 3a), 是增生变形前缘的第二个逆冲隆起, 由浊积物和半远洋沉积物覆盖<sup>[20,21]</sup>。ODP204 航次是首个研究增生复合体中水合物成藏的航次, 也是首个采用包括数字红外扫描(图 3)和随钻测井等技术的航次。该航次的主要科学目标是查明增生脊及周

缘陆坡盆地中水合物的分布和含量、研究烃类气体向稳定带内的运移机制、确定含水合物沉积物原位物性参数<sup>[7]</sup>。ODP204 航次在水合物脊共布置了 9 个站位, 其中 1244~1247 站位位于脊顶北部, 1248~1250 站位为脊部, 1251 和 1252 站位则位于脊顶东部的陆坡盆地之上(图 3a)。这样布置的站位有利于综合对比研究复杂地质构造和沉积背景下流体运移特征和水合物分布特征<sup>[7]</sup>。下面分别选取脊顶北部的 1245 站位、脊部的 1250 站位以及陆坡盆地的 1251 站位进行回顾。

### 2.1 1245 站位

1245 站位位于水合物脊西翼 870 m 水深处, 距南水合物脊峰约 3 km。此处站位设计的目的是评估水合物脊脊部稳定带内水合物的分布和含量、查明强反射层“A层”、“B层”和“Y层”对流体活动和水合物成藏的影响。从地震剖面中可以观察到明显的 BSRs, 分别切穿强反射层“A层”、“B层”和“Y层”(图 3b)。这些强反射层被视为水合物脊良好的流体运移通道, 能够将烃类气体运移至水合物稳定带之内<sup>[22]</sup>, 而位于稳定带之内的强反射层也可以作为潜在的储层, 位于强反射层之内的水合物往往具有更高的饱和度<sup>[23]</sup>。因此, 水合物存在的地球物理证据(BSRs)、良好的含气流体运移通道(强反射层)和潜在的有利储层(强反射层)是 1244、1245、1246 站位的重要选择依据。

水合物在这 3 个站位中的分布和产出都很相似, 以低饱和度(约 2%~10%)、浸染状形式赋存, 同时也包含少量水合物结核结壳, 以及裂缝充填型水合物<sup>[7]</sup>。

### 2.2 1250 站位

1249 和 1250 站位分别位于南水合物脊峰 778 m 和 792 m 水深处, 钻探取心中存在明显的数字红外低温异常, 可以用于指示含水合物层的深度和厚度等信息。这 2 个站位用于查明南水合物脊峰的水合物分布特征, 并研究甲烷气泡在水合物-水二相区的运移过程。在地震剖面中, 能够识别出 2 类异常反射: ①位于近海底浅表层的强振幅反射, 厚度约为 30 m; ②位于大约 115 mbsf 附近的 BSRs。此外, 深潜器及高频回声探测揭示的海底羽状气泡流<sup>[24]</sup>、具有上拉且杂乱反射特征的碳酸盐岩丘(海底高地)(图 3c)也指示了水合物的存在。因此南水合物脊峰的站位选择依据主要有水合物存在的地球

物理证据 (BSRs、异常地震反射)、水合物存在的温度异常 (数字红外低温异常)、特殊的海水异常 (海底羽状气泡流) 和异常海底地形地貌 (碳酸盐岩丘/海底高地)。

水合物主要以块状的形式赋存于海底浅表层, 饱和度较高, 如 1250 站位在海底至 30 mbsf 的深度

段内获取了 25% ~ 40% 的水合物<sup>[7]</sup>, 对应于地震剖面中海底之下的强振幅反射层 (图 3c)。这类水合物的形成可能与较为集中的流体活动 (focused fluids) 相关, 如含气流体的向上输送将为浅层提供丰富的甲烷, 导致碳酸盐岩丘的形成 (图 3c), 并在海底发生甲烷的逃逸, 形成海底羽状气泡流<sup>[25]</sup>。

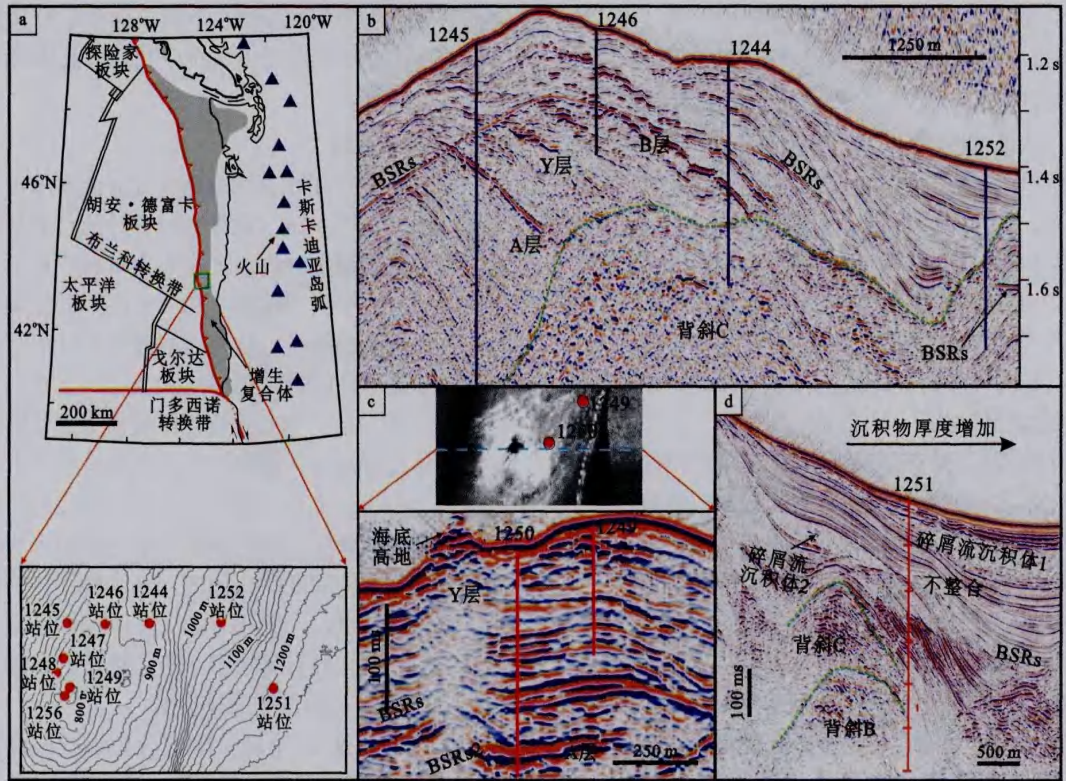


图 3 (a) ODP 204 航次站位位置; (b) 过 1245、1246、1244 和 1252 站位的地震剖面; (c) 海底高地处的背散射图及过 1250 和 1249 站位的地震剖面; (d) 过 1251 站位的地震剖面 (修改自 Tréhu 等, 2003<sup>[7]</sup>)

Fig. 3 (a) Locations of the sites in Leg ODP 204; (b) the seismic profile crossing Sites 1245, 1246, 1244 and 1252; (c) backscatter map in the pinnacle and the seismic profile crossing Sites 1250 and 1249; (d) the seismic profile crossing Sites 1251 (after Tréhu et al., 2003<sup>[7]</sup>)

### 2.3 1251 站位

1251 站位位于水合物脊脊峰以东 5.5 km 的陆坡盆地, 水深为 1 210 m。由于陆坡上沉积物将沿着坡降方向发生输送和堆积, 陆坡-盆地的地层厚度发生了明显的增加, 因此该站位的主要目的是研究高沉积速率背景下水合物的气体来源、水合物在陆坡盆地中的分布。由于水深的增加, BSRs 在 1251 站位的深度下移至 200 mbsf 附近 (图 3d)。在地震剖面上还可以识别出 2 套杂乱的地震反射层, 解释为碎屑流沉积体 (图 3d), 并认为处于深水背景中的这 2 套沉积单元可能是水合物的良好储层。因此,

水合物存在的地球物理证据 (BSRs) 和有利的沉积体 (碎屑流沉积体) 是 1251 站位的主要选择依据。

水合物在 1251 站位主要以浸染状形态分布于 BSRs 之上的有利沉积单元 (紧邻 BSRs 以上的地层和 90 ~ 110 mbsf 两个深度区间) 之中, 底部的饱和度较高, 可达 18%, 上部的饱和度较低, 平均为 3%<sup>[7]</sup>。水合物的形成和产出的主要控制因素为岩性 (沉积单元)。

## 3 墨西哥湾

墨西哥湾盆地以盐底辟和新生代沉积充填为主

要地质背景，是美国重要的海上油气资源区，也是世界上水合物研究程度最高的海域之一(图 4a)。JIP 计划于 2000 年启动，开始对墨西哥湾水合物进行了详尽的研究，其主要目的是研究与含水合物沉积钻并相关的灾害，开发和测试预测天然气水合物勘探与开发的地质与地球物理工具，以及钻取含水合物沉积物样品用以获取海洋天然气水合物资源开采问题所需的物理数据<sup>[9,10]</sup>。

### 3.1 JIPI 航次

JIPI 航次将研究目标限定在 Atwater Canyon 13/14 区块 (AT13/14) 和 Keathley Canyon 151 区块 (KC151) (图 4a)<sup>[9]</sup>。区域内海底地形显示存在大量轻微隆起的地形地貌及近圆形海底凹陷，被解释

为水合物丘和麻坑(图 4b 和 4c)<sup>[26]</sup>，指示了水合物的存在。特别是水合物丘，在地震剖面上表现为近海底的异常反射，其下部有时并不能观察到明显的 BSRs，但可见高阻抗同相轴(图 4d)，可能指示了相对高热流体向上的快速运移<sup>[26,27]</sup>。与墨西哥湾北部经典的 BSRs 不同，JIPI 航次识别出了同样具有水合物存在指示意义的地震反射异常<sup>[28]</sup>，如流体喷口之下的负阻抗差异地震反射、阻抗差异较大的不连续层、反射同相轴在稳定带附近的定向终止(图 4e)<sup>[26]</sup>、稳定带内正波阻抗差等。因此，JIPI 航次中，海底浅表层的水合物丘和水合物存在的地球物理证据 (BSRs、同相轴的定向终止、稳定带内的强振幅反射同相轴) 是钻探站位的主要选择依据。

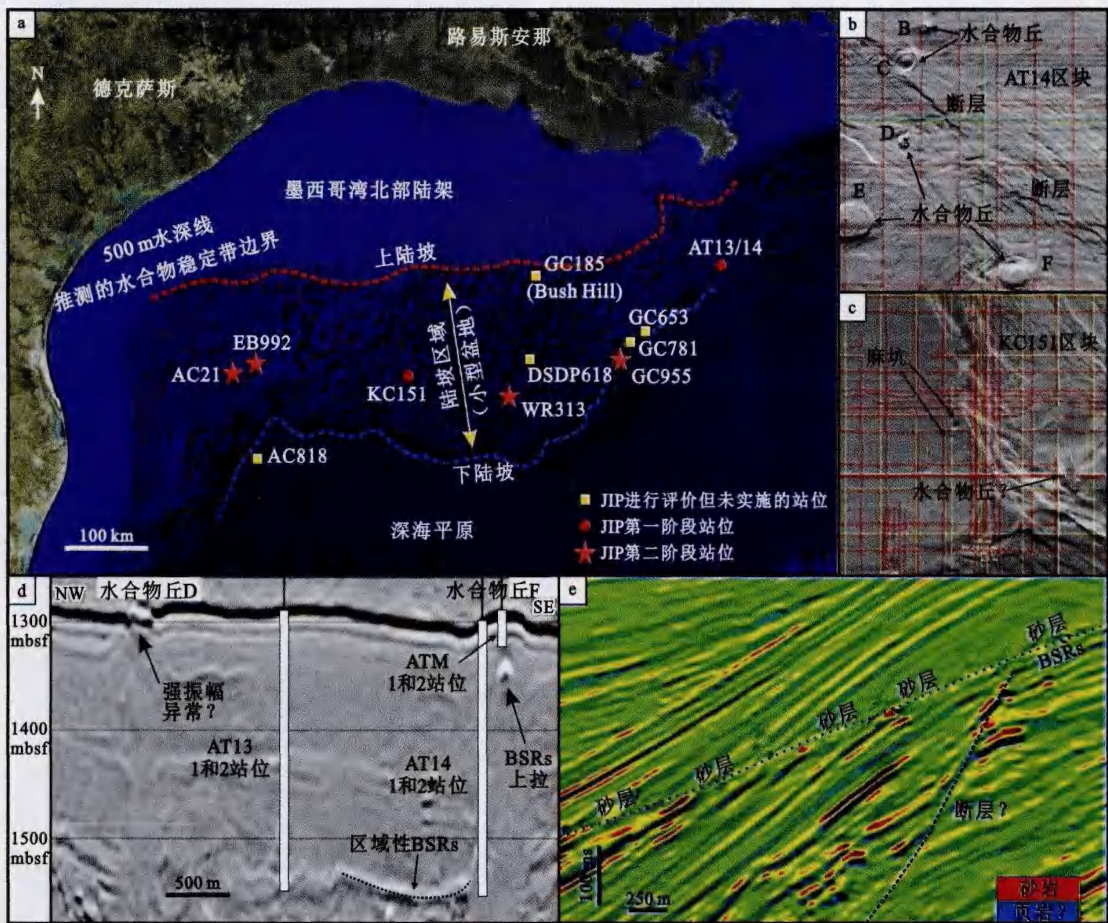


图 4 (a) 墨西哥湾 JIP 计划水合物钻探站位位置; (b) AT14 区块海底地形图揭示了水合物丘及断层; (c) KC151 区块海底地形图揭示了水合物丘和麻坑构造; (d) 过 AT13 和 AT14 站位的 NW-SE 向地震剖面揭示了水合物丘 D 和 F; (e) KC151 地震属性剖面显示了砂层的定向终止，并依此来定义 BSRs (修改自 Dai 等, 2008<sup>[26]</sup>)

Fig. 4 (a) Locations of the gas hydrate drilling sites in JIP; (b) the seafloor of AT14 area showing the hydrate mounds and faults; (c) the seafloor of KC151 area revealing possible hydrate mound and pockmarks; (d) NW-SE trending seismic profile crossing Sites AT13 and AT14 showing Hydrate Mounds D and F; (e) KC151 amplitude profile revealing bright sand terminations defining the BSRs (after Dai et al., 2008<sup>[26]</sup>)

尽管 JIPI 航次并没有获取水合物实物样品, 但孔隙水盐度、电阻率、地震波速度等资料均指示了水合物的存在。靠近水合物丘处, 水合物多富集在近海底浅表层, 如 AT14 站位 65 mbsf 至海底的深度段内、ATM 站位 55 mbsf 至海底的深度段内<sup>[29]</sup>。而在 KC151 站位, 水合物赋存深度可能较深, 约在 220 ~ 330 mbsf 深度段内, 水合物饱和度为 1% ~ 12%<sup>[29,30]</sup>, 随着沉积物中微裂隙的增加, 水合物饱和度可增至 20%<sup>[31]</sup>。

### 3.2 JIPII 航次

为了证实墨西哥湾深海环境中富砂质沉积体中水合物的形成, JIPII 航次尝试运用水合物含油气系统 (gas-hydrate petroleum system) 的思想<sup>[32]</sup>, 开始以砂质储层为主要钻探目标<sup>[10]</sup>, 自西向东在墨西哥湾 Alaminos Canyon、Walker Ridge 和 Green Canyon 分别设置了 AC21、WR313 和 GC955 站位 (图 4a)。这些站位分别位于带水道供给的海底扇、水道及天

然堤复合体、块体流沉积体 (Mass transport complex, MTC) 等深水沉积背景 (图 5a)<sup>[33,34]</sup>。

WR313 站位的 2 口钻井以砂体为钻探目标, 主要揭示蓝色砂体单元和橙色砂体单元, 与图 4c 揭示的同相轴终止特征一致, 含砂层将会依次发生地震反射同相轴的终止 (图 5b)<sup>[33]</sup>, 起到类似 BSRs 的指示作用, 被解释为下伏含游离气层与上覆含水层或含水合物层的相边界<sup>[35]</sup>。水合物在 2 套砂层中的平均饱和度为 50% ~ 60%, 最大值可达 90%<sup>[36]</sup>。在 WR313 站位浅部地层中 (200 ~ 400 mbsf) 的含裂隙粘土质沉积层也发现了水合物的存在, 饱和度约为 20%<sup>[36]</sup>。GC955 站位位于一个断层十分发育的地形突起之上, 以水道-天然堤复合体中的砂体为钻探目标 (图 5c), 并在 GC955-H 井和 GC955-Q 井水合物稳定带之上 20 m 附近钻遇这一套砂体, 水合物在砂体中的富集主要受到迁移的浊积水道及相伴的天然堤的控制<sup>[34]</sup>。水合物的形成将可能阻碍含甲烷

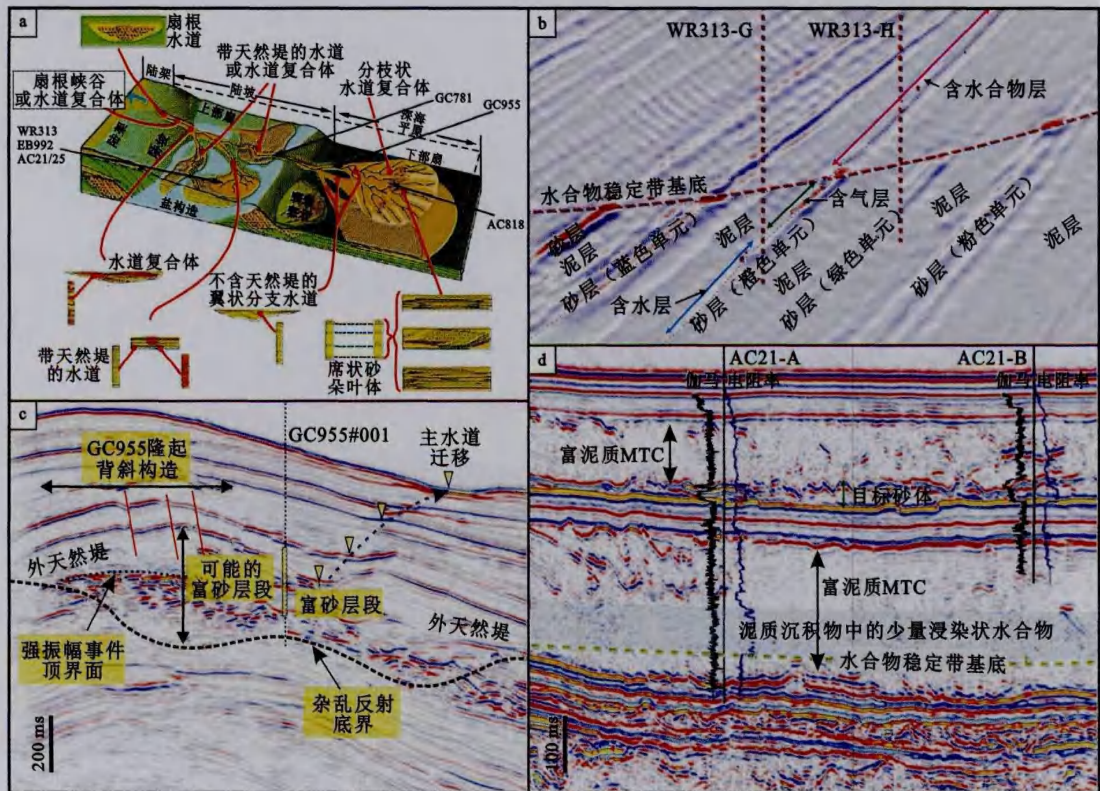


图 5 (a) 墨西哥湾 JIPII 航次站位位置及沉积环境背景; (b) 过 WR313 站位的地震剖面显示了强反射砂层的定向终止; (c) 过 GC955 站位的地震剖面显示出迁移水道-天然堤对砂体的控制; (d) 过 AC21 站位的地震剖面显示 MTC 和目标砂体的特征 (修改自 Boswell 等, 2012<sup>[33,34]</sup>)

Fig. 5 (a) The locations of the JIPI Leg II in Gulf of Mexico and the generalized depositional setting; (b) the seismic profile crossing Sites WR313 showing the sand terminations with high-amplitude reflectors; (c) the seismic profile crossing Site GC955 revealing migrating channels-levee system controlling the distribution of sands; (d) the seismic profile crossing Site AC21 showing the characters of MTC and target sands (after Boswell et al., 2012<sup>[33,34]</sup>)

流体的向上运移, 因此, 水合物并未在该地形突起的浅部发生富集<sup>[37]</sup>。AC21 站位以强振幅反射的浅层砂体和紧邻 BSRs 之上的 MTC 为钻探目标(图 5d)<sup>[34]</sup>。AC21-A 和 AC21-B 在 120 mbsf 附近钻遇了粘土质沉积物中的目标砂体, 最大厚度超过 40 m, 但水合物饱和度不高, 约 8%~28%<sup>[33]</sup>。JIPII 航次 3 个站位中砂质储层中的水合物资源量估算为 WR313 站位  $5.1 \times 10^9 \text{ m}^3$  (180bcf)、GC955 站位  $5.5 \times 10^8 \text{ m}^3$  (20 bcf)、AC21 站位  $3.5 \times 10^{10} \text{ m}^3$  (1 200 bcf)<sup>[34,38]</sup>。因此, 有利沉积体的识别(砂体、浊积水道及天然堤、MTC)以及水合物存在的地球物理证据(BSRs、强振幅反射同相轴)是确定这些站位最为直接的依据。

## 4 日本南海海槽

南海海槽位于日本岛西南方向, 沿着菲律宾海板块和日本岛弧系的俯冲带从西南至东北延伸超过 900 km。南海海槽已经开展的水合物勘探计划包括 1999-2000 年的“日本南海海槽计划”、2004 年的“日本 Tokai-oki 至 Kumano-nada 计划”以及 2012-2013 年的“21 世纪南海海槽水合物开采计划”(图 6a)<sup>[39]</sup>。前两期研究计划的主要目标是了解南海海槽水合物的分布特征并估计其资源量。在此基础上, 第三期研究计划的主要目标在于水合物的勘探开发, 在南海海槽中部海域设置了 AT1 站位, 是世界上首个海域水合物开采测试井。

### 4.1 南海海槽计划(1999~2000年)

以南海海槽广泛发育的 BSRs 为主要依据, 1999 年在南海海槽北部 945 m 水深处实施了钻井(称南海海槽钻井), 其中包括 1 个主钻孔(Main hole, MH)、2 个定位孔(Pilot hole, PH)和 3 个后期井(Post survey well, PSW)。这些钻井都设置在 Ryuyo 峡谷西侧的一个背斜构造之上(图 6b), 相距不超过 100 m<sup>[12]</sup>。因此, 在南海海槽第一阶段的研究中, 水合物存在的地球物理证据(BSRs)是确定站位最重要的依据。

从 PSW-1 和 PSW-3 的取心结果来看, 水合物实际产出带厚度达 100 m, 顶界则受到砂岩夹层的控制, 显示出浊积砂体对水合物成藏和分布的控制作用<sup>[12]</sup>。浅部地层中, 水合物仍分布在 3 套薄砂层中, 总厚度为 12~14 m, 水合物饱和度约 80%<sup>[40]</sup>。

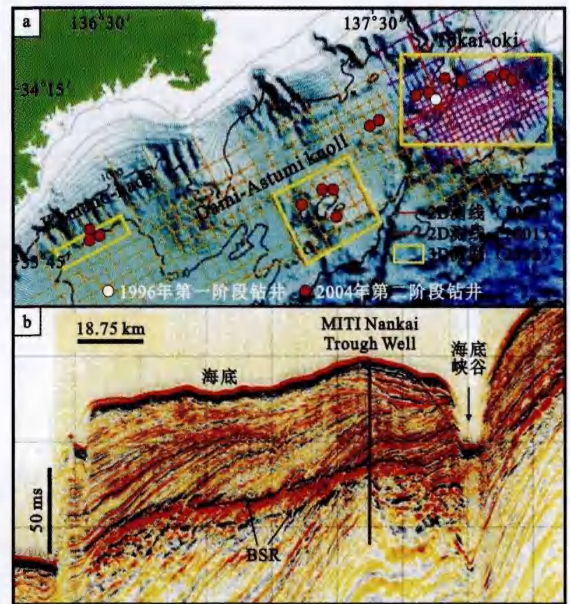


图 6 (a) 日本南海海槽水合物钻探站位位置; (b) 过 MITI 南海海槽井的地震剖面(修改自 Tsuji 等, 2004; Noguchi 等, 2011<sup>[12,39]</sup>)

Fig. 6 (a) Locations of the gas hydrate drilling sites in the Nankai Trough, Japan; (b) the seismic profile crossing Sites MITI Nankai Trough Well (after Tsuji et al., 2004; Noguchi et al., 2011<sup>[12,39]</sup>)

### 4.2 Tokai-oki 至 Kumano-nada 计划(2004年)

南海海槽计划指示证实了水合物在浊积砂体中的存在, 在此基础上, 研究人员重新审视了 BSRs 的分布特征, 选取了 Tokai-oki、Daini-Astumi knoll 和 Kumano-nada 三个区域作为重点靶区。2004 年, 沿着南海海槽从南至北共设置了 16 个站位, 其中 4 个站位进行了取心并钻获水合物<sup>[41]</sup>。在 3 个靶区中, 具有良好横向连续性的 BSRs 是确定远景区的首要依据<sup>[42]</sup>, 过  $\beta 1$  井的地震剖面也显示出明显的 BSRs 特征(图 7a)<sup>[39]</sup>。有些站位中尽管没有明显的 BSRs, 但水合物稳定带内存在的地震反射高速异常体也被当作站位选择的重要依据之一<sup>[42]</sup>。基于对区域地质背景和深水沉积过程的分析, 这些高速异常体被解释为一系列的浊积水道砂体(图 7b)<sup>[39]</sup>。因此, 水合物存在的地球物理证据(BSRs、高速异常体)和有利沉积体的解释(浊积水道砂体)是这一阶段水合物钻探站位的主要选择依据。

钻探结果显示, 水合物主要赋存于浊积水道砂体中, 总厚度接近 80 m, 水合物饱和度超过 55%。有部分水合物赋存于粉砂质沉积物之中, 或以结核



结壳-裂填充的形式赋存于粘土质沉积物之中。水合物垂向分布与 BSRs 没有必然的联系,一些有明显 BSRs 特征的站位未能钻获水合物。但水合物的

聚集和分布与浊积水道砂体具有良好的空间匹配关系,这些浊积砂体也被称为“水合物富集带”,其地质储量占了整个南海海槽的一半<sup>[43]</sup>。

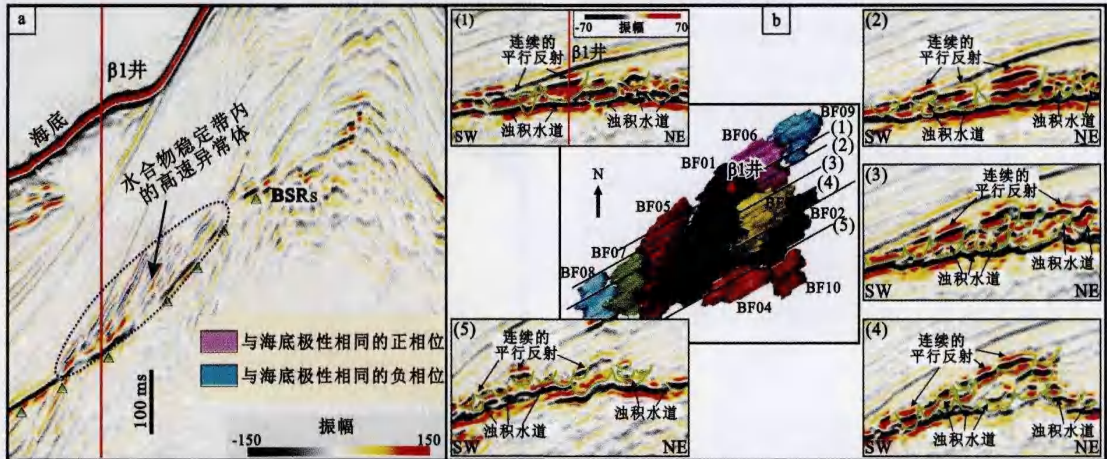


图 7 (a) 过  $\beta 1$  井的地震剖面揭示了 BSRs 之上的高速异常体; (b)  $\beta 1$  井附近浊积水道特征 (修改自 Noguchi 等, 2011<sup>[39]</sup>)  
Fig. 7 (a) The seismic profile crossing Well  $\beta 1$  showing the high velocity anomaly body above BSRs; (b) the seismic reflectors of the gas hydrate-bearing turbidites channels near Well  $\beta 1$  in Naikai Trough (after Noguchi et al., 2011<sup>[39]</sup>)

## 5 韩国郁龙盆地

郁龙盆地是一个晚渐新世深水弧后盆地,北部以南韩海为界,西部以朝鲜半岛为界,盆地内更新世以来的沉积充填由半远洋沉积和块体流沉积体所构成<sup>[44,45]</sup>。2007 年和 2010 年在郁龙盆地开展了 UBGH1 和 UBGH2 两期水合物钻探计划(图 8a)<sup>[13,14]</sup>,前者在于证实水合物在郁龙盆地的存在并初步探讨水合物和空白反射带的关系,后者的研究目标在于评价郁龙盆地的水合物资源潜力,并为水合物的开采测试选择站位<sup>[46]</sup>。

### 5.1 UBGH1

多道地震剖面揭示的 BSRs 被认为是郁龙盆地可能存在水合物的重要证据之一,后来的重力活体取样和钻探航次证实了这一推断<sup>[13]</sup>。UBGH1 航次的钻探重点目标是海底柱状地震空白构造 (columnar seismic blanking zone, 又称“气烟囱”),通常具有明显的高速异常(图 8b)<sup>[13,47]</sup>。这些气烟囱大部分终止于海底以下的沉积物中,少量刺穿海底形成冷泉并造成了沉积层变形或海底地形变化<sup>[48]</sup>,包括水合物帽 (hydrate cap)、水合物丘 (hydrate mound) 等(图 8c 和图 8d)<sup>[49]</sup>。因此,水合物存在的地球物理证据 (BSRs、柱状地震空白构造) 和含气流体运移的解释 (气烟囱) 是这一阶段水合物钻探站位的主要选择依据。

UBGH1 选择了 3 个站位进行钻探取心,结果表明这 3 个站位中都有厚度不等的含水合物层,最厚可达 130 m,是一套砂质和粘土沉积物的互层。水合物通常以 2 种形式产出:①裂缝充填或层状赋存于粘土骨架中,如 UBGH1-09 和 UBGH1-10 站位<sup>[50]</sup>;②以孔隙充填形式赋存于粉砂/砂质沉积物之中,如 UBGH1-04<sup>[51]</sup>。

### 5.2 UBGH2

在 UBGH1 的基础上,为了圈定水合物在郁龙盆地的详细分布范围、准确评估水合物资源量,韩国在 2010 年开展了第二阶段的水合物钻探,希望在郁龙盆地识别出适合试开采的含水合物砂质储集体<sup>[14]</sup>。因此 UBGH2 更加注重水合物油气系统思想在水合物站位选择中的运用,加强了对地震相的识别和沉积环境的解释<sup>[52]</sup>,特别是 MTC 分布范围的圈定<sup>[53,54]</sup>。站位主要布置在气烟囱和 MTC 发育的区域(图 8e)<sup>[54]</sup>,其选择的依据包括:①水合物存在的地球物理证据 (BSRs);②含气流体运移的解释 (气烟囱);③有利沉积体的解释 (MTC)<sup>[14]</sup>。

UBGH2 共设置了 13 个站位,其中 11 个站位获取了直接或间接指示水合物存在的证据。水合物主要有以下 3 种赋存方式:①赋存于砂质沉积物中的孔隙充填型;②裂缝充填和结核结壳型,常位于近海底浅表层;③泥质沉积物中的浸染状充填型<sup>[46]</sup>。

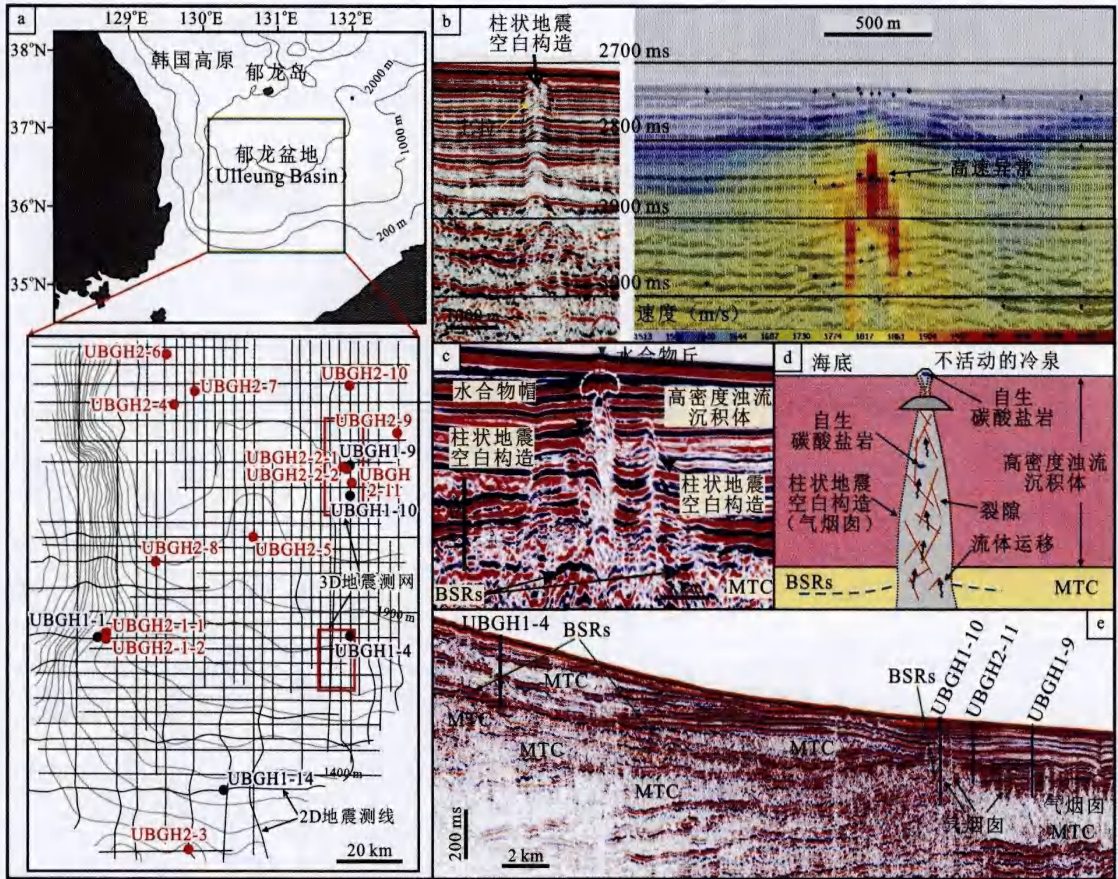


图 8 (a) 韩国郁龙盆地水合物钻探站位置；(b) 柱状地震空白构造的地震反射及速度特征；(c) 水合物帽及水合物丘的地震反射特征；(d) 气烟囱-水合物帽-水合物丘的地质模式图；(e) 地震剖面揭示了气烟囱和 MTC 的特征 (修改自 Ryu 等, 2009, 2013; Kim 等, 2011; Chun 等, 2011; Riedel 等, 2013<sup>[13,14,47,49,54]</sup>)

Fig. 8 (a) Locations of the drilling sites of gas hydrate in Ulleung Basin; (b) the seismic features and velocity characters of columnar seismic blanking zone; (c) the seismic characteristics of hydrate cap and mound; (d) the generational geological model of gas chimney-hydrate cap-mound; (e) the seismic profile showing gas chimneys and MTC (after Ryu et al., 2009; 2013; Kim et al., 2011; Chun et al., 2011; Riedel et al., 2013<sup>[13,14,47,49,54]</sup>)

## 6 印度大陆边缘

印度的水合物研究先后经历了 2006 年的 NGHP01 航次和 2013 年的 NGHP02 航次, 自西向东横跨印度半岛被动大陆边缘和安达曼汇聚大陆边缘。NGHP01 航次共设置了 21 个站位 (图 9a), 其中 1 个位于印度半岛西岸的 Kerala-Konkan 盆地, 4 个位于东岸的 Mahanadi 盆地, 15 个位于东岸的 Krishna-Godavari (KG) 盆地, 还有一个位于安达曼大陆边缘西侧的安达曼深海区域<sup>[55]</sup>。

BSRs 是 NGHP01 航次中站位选择的最重要的依据 (图 9b 和图 9c)<sup>[16]</sup>, 但 BSRs 的存在并不意味着水合物一定存在, 如 NGHP-01-02 和 03 站位。作为流体通道的活动断层可能也是站位选择的依

据之一<sup>[56]</sup>, 不同延伸方向的断层在 NGHP-01-10 站位处形成一个“三角形” (图 9d)<sup>[57]</sup>, 含气流体的运移被认为是此处水合物聚集的关键因素。水合物主要以大小不一的结核结壳或透镜状产出, 少量水合物颗粒直径小于 1 cm, 胶结于沉积物的裂缝中<sup>[57]</sup>。这一特征被用于预测新的水合物远景区 (图 9d 和图 9e)<sup>[57]</sup>, 并推测水合物主要以裂缝充填型为主。基于地震数据的地震相识别和沉积环境的分析也是站位布置中考虑的重要因素之一, 如 NGHP-01-15 站位被布置在水道东侧的天然堤之上<sup>[58]</sup>。钻探结果表明水道-天然堤复合体系中砂质沉积物的分布直接控制了水合物的产出, 即水合物更趋于在泥质沉积物中的砂层中富集 (图 9f 和图 9g)。这个站位的设计不仅考虑了水合物稳定条件、气体来源和运移

通道等因素,更重点分析了圈闭(砂层)和盖层(上覆泥质沉积物),是水合物油气系统在 KG 盆地的首次运用<sup>[58]</sup>。因此,在 NGHP01 航次中,水合物

存在的地球物理证据(BSRs)、含气流体运移的解释(断层)、有利沉积体的解释(水道-天然堤系统)是站位选择的主要依据。

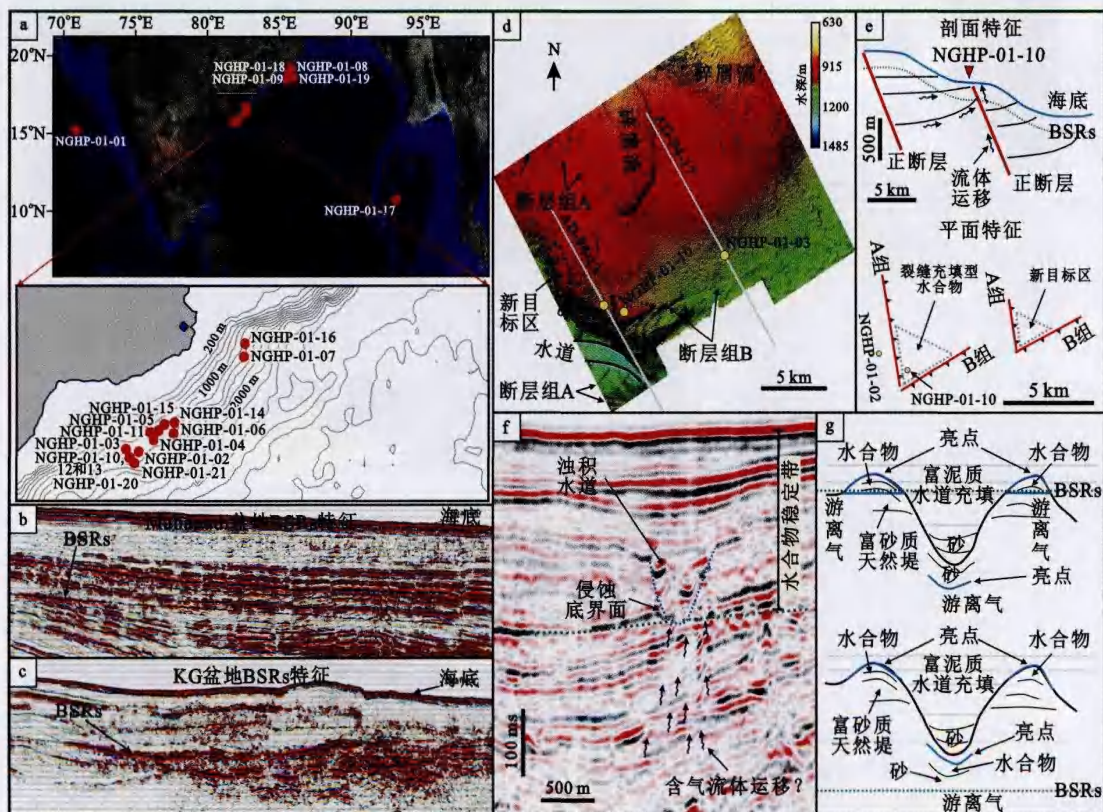


图 9 (a) 印度 NGHP 01 水合物钻探站位位置; (b) Mahanadi 盆地 BSRs 特征; (c) Krishna-Godavari 盆地 BSRs 特征; (d) 海底地形特征展示了 2 组正断层的平面展布特征; (e) NGHP-01-10 站位处剖面及平面特征揭示了 2 组正断层对水合物聚集的影响; (f) 地震剖面展示了水合物稳定带之内发育的浊积水道; (g) 浊积水道与水合物演化的地质模式(修改自 Collett 等, 2008; Sain 等, 2012; Riedel 等, 2010, 2011<sup>[16,55,57,58]</sup>)

Fig. 9 (a) Locations of the drilling sites of gas hydrate in NGHP 01, India; (b) BSRs in Mahanadi Basin; (c) BSRs in KG Basin; (d) the seafloor topography showing the distributions of two sets of normal faults; (e) the cross-section view and planar view near the Site NGHP-01-10 revealing two sets of normal faults controlling the accumulation of gas hydrates; (f) the seismic profile showing the turbidite channels developing in the gas hydrate stability zone; (g) the geological models revealing the relations between turbidite channels and gas hydrate (after Collett et al., 2008; Sain et al., 2012; Riedel et al., 2010, 2011<sup>[16,55,57,58]</sup>)

## 7 海域水合物钻探站位选择依据小结

通过对近年来国际海域水合物实际钻探结果的系统总结和分析(表 1),可以发现存在以下特征:(1) BSRs 是站位选择的重要依据之一,这个界面代表了含水合物层和下伏不含水合物层之间的声波反射界面,其存在将受到下伏游离气、卤水饱和的沉积物以及水合物沉积层的弹性模量等的影响。在一些国家层面的水合物研究计划中,BSRs 的确定往往应用于水合物远景区域的确定,如 1999-2000 年的日本南海海槽计划、韩国郁龙盆地 UBGH1 水合物

钻探计划中都是确定了 BSRs 的分布,并分别为下一阶段的水合物钻探计划提供了基础;(2) 实际钻探的结果表明,仅仅依靠 BSRs 来进行站位选择不一定可靠,水合物的赋存与 BSRs 之间并非一一对应,如 NGHP-01-02 站位、UBGH2-08 等站位,钻前预测均在地震剖面中可见 BSRs,但实际钻探并未获取水合物的实物样品,而 ODP164 航次 994 站位处 BSRs 并不明显,却获取了水合物;(3) 随着研究程度的不断细化,一些地震异常反射的精细刻画成为了水合物钻探站位选择的重要依据,它们在某种程度上具有和 BSRs 相同的水合物存在指示意义。

如墨西哥湾 KC151 站位和 WR313 站位处地震反射强振幅的定向终止、墨西哥湾 GC955 站位处的地震反射强振幅、日本南海海槽  $\beta 1$  井处水合物稳定带内存在的地震反射高速异常体等；(4) 从墨西哥湾水合物联合工业计划开始，水合物油气系统的思想开始广泛应用，它既考虑了物理化学条件对水合物形成的影响，又考虑了实际的地质条件，通过单独评估每一个成藏的关键要素和因素的综合分析来降低地质勘探的不确定性和站位选择的准确性。

从水合物的实际产出和赋存来看，主要存在两大类型：赋存于海底浅表层的水合物（一般在海底之下 100 m 的范围之内）和赋存于海底之下中-深层的水合物（一般在海底之下 100 ~ 400 m 的范围之内）（表 1）。钻后的分析显示，这两类水合物的形

成、赋存和分布受不同因素的影响和控制：(1) 海底浅表层的水合物往往与汇聚型流体的运移有直接的关联，流体的运移将在地震剖面 and 海底地形上形成典型的特征，如 ODP164 航次 996 站位处的底辟构造和海底麻坑、ODP204 航次 1250 站位处的碳酸盐岩丘、墨西哥湾 AT14 区块的水合物丘、韩国郁龙盆地的气烟囱、水合物帽、水合物丘等；(2) 海底之下中-深层的水合物，其形成与温压条件和气体来源有关，而其分布则主要受到含气流体运移和有利沉积体的控制，如 ODP164 航次 997 站位处近垂直的小型断层、ODP204 航次 1245 站位处的强反射层、ODP204 航次 1251 站位处的碎屑流沉积体、墨西哥湾 KC151 站位的断层和砂层、墨西哥湾 WR313 站位的砂层、墨西哥湾 GC955 站位的水道-天然堤、

表 1 典型区域海域水合物钻探站位选择依据及水合物产出特征  
Table 1 The evidences for drill sites selection and occurrences of marine gas hydrates

钻探区域	站位	站位选择依据	水合物产出特征
布莱克海台	991、992、993	底辟构造、海底滑坡、侵蚀陡崖	浅钻，未钻遇水合物
	996	底辟构造、断层、麻坑	以块状、板状、杆状等赋存于 50 mbsf 之上
	994、995、997	BSRs	以浸染状、瘤状和块状赋存于 180 ~ 470 mbsf
水合物脊	1244、1245、1246	BSRs、强反射层	以浸染状赋存，含少量结核结壳、裂缝充填型
	1249、1250	BSRs、异常地震反射、羽状气泡流、碳酸盐岩丘、数字红外异常	以块状和浸染状的形式赋存于海底浅表层
	1251	BSRs、碎屑流沉积体	以浸染状赋存于 BSRs 以上和 90 ~ 110 mbsf
墨西哥湾	KC195	BSRs、强振幅同相轴的定向终止	无水合物实物样品，推测赋存于含裂隙沉积物
	AT13	近海底异常地震反射	无水合物实物样品，推测赋存于 65 mbsf 之上
	WR313	砂层、强振幅同相轴的定向终止	主要赋存于砂体之中，饱和度为 50% ~ 60%
	GC955	水道-天然堤沉积体、强振幅同相轴	赋存于稳定带之上约 20 m 厚的砂体中
	AC21	富砂质 MTC	赋存于 120 mbsf 的砂体中
日本南海海槽	MITI 南海海槽井	BSRs	无水合物实物样品，推测赋存于浊积砂体中
	Tokai-oki 至 Kumano-nada 计划	BSRs、地震反射高速异常体、浊积砂体	大部分水合物以高饱和度形式（大于 80%）赋存于浊积砂体之中
韩国郁龙盆地	UBGH1-04	BSRs	以浸染状赋存于层状砂体中
	UBGH1-09、10	横向连续高振幅反射、气烟囱	以裂缝和层状赋存于含裂隙的粘土骨架中
	UBGH2-02、03、07、11	BSRs、气烟囱、异常地震反射	大部分水合物以裂缝充填型赋存于气烟囱中
	UBGH2-01、06、09、10	BSRs、MTC	主要以高饱和度的裂缝充填型赋存于砂层中
	UBGH2-04、08	BSRs、异常地震反射	未钻遇水合物
印度大陆边缘	NGHP-01-02、03	BSRs	未钻遇水合物
	NGHP-01-10	BSRs、断层	主要以结核结壳或透镜状胶结于裂缝中
	NGHP-01-15	BSRs、水道-天然堤沉积体	水合物更趋于在泥质沉积物中的砂层中富集

墨西哥湾 AC21 站位的富砂质 MTC、日本南海海槽的浊积水道、韩国郁龙盆地的 MTC、印度大陆边缘的断层和水道。对应于上述两种类型水合物的划分,不难发现,在实际的水合物站位选择中,应该将二者区分对待,不同类型水合物的站位选择主要依据也存在不同:海底浅表层水合物的主要依据为海水异常、含气流体运移通道、异常地形地貌、特殊生物记录等特征,其勘探可以依赖高分辨地震/浅剖地震、多波束、数字红外、海底摄像等资料;海底之下中-深层水合物的主要依据为地球物理异常反射特征、含气流体运移通道和有利沉积体,其勘探主要依赖高分辨地震资料,包括地球物理处理、运移通道解释、有利沉积体成因分析等。

因此,认为对于已知的水合物潜力区,特别是范围有限的水合物靶区而言,水深、温度、气体来源等可能变化不会太大,表现出较为均一的特征;而深水沉积体的类型、成因机制、分布和演化,以及含气流体运移通道,则会表现出差异性,“天然气水合物运聚体系”这一概念就显得非常重要了<sup>[59,60]</sup>。也就是说,如果将水合物的形成、聚集和分布比喻为一个有机的整体,那么“运”和“聚”就构成了这个系统的“骨骼”和“血液”,它们将控制远景区内的水合物分布。将“水合物识别标志”、“有利沉积体展布”和“流体运移通道”三者有机地结合在一起,可以达到更准确预测和描述水合物矿体的目的,这是今后海域水合物勘探站位选择依据的主要发展方向。

## 参考文献

- [1] Kvenvolden K A. Gas Hydrates—Geological perspective and global change[J]. *Reviews of Geophysics*, 1993, 31(2): 173-187.
- [2] Collett T S. Energy resource potential of natural gas hydrates[J]. *AAPG bulletin*, 2002, 86(11): 1971-1992.
- [3] Maslin M, Owen M, Day S, et al. Linking continental-slope failures and climate change: Testing the clathrate gun hypothesis[J]. *Geology*, 2004, 32(1): 53-56.
- [4] Maslin M, Owen M, Betts R, et al. Gas hydrates: Past and future geohazard?[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2010, 368(1919): 2369-2393.
- [5] Archer D. Methane hydrate stability and anthropogenic climate change[J]. *Biogeosciences*, 2007, 4(4): 521-544.
- [6] Paull C K, Matsumoto R, Wallace P J. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Vol. 164, Initial Reports, Gas Hydrate Sampling on the Blake Ridge and Carolina Rise[M]. Ocean Drilling Program, College Station, TX, 1996.
- [7] Tréhu A M, Bohrmann G, Rack F R. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Vol. 204, Initial Reports, Drilling Gas Hydrates on Hydrate Ridge, Cascadia Continental Margin[M]. Ocean Drilling Program, College Station, TX, 2003.
- [8] Riedel M, Collett T S, Malone M J. Proceedings of the Integrated Ocean Drilling Program, Vol. 311, Expedition Reports, Cascadia Margin Gas Hydrates[M]. Integrated Ocean Drilling Program, U.S. Implementing Organization Science Services, TX, 2005.
- [9] Ruppel C, Boswell R, Jones E. Scientific results from Gulf of Mexico Gas Hydrates Joint Industry Project Leg 1 drilling: Introduction and overview[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2008, 25(9): 819-829.
- [10] Collett T S, Boswell R. Resource and hazard implications of gas hydrates in the Northern Gulf of Mexico: Results of the 2009 Joint Industry Project Leg II Drilling Expedition[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, 34(1): 1-3.
- [11] 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.
- [12] Tsuji Y, Ishida H, Nakamizu M, et al. Overview of the MITI Nankai Trough Wells: A Milestone in the Evaluation of Methane Hydrate Resources[J]. *Resource Geology*, 2004, 54(1): 3-10.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Ramana M, Ramprasad T, Paropkari A, et al. Multidisciplinary investigations exploring indicators of gas hydrate occurrence in the Krishna-Godavari Basin Offshore, East Coast of India[J]. *Geo-Marine Letters*, 2009, 29(1): 25-38.
- [16] Sain K, Gupta H. Gas hydrates in India: Potential and development[J]. *Gondwana Research*, 2012, 22(2): 645-657.
- [17] Borowski W S. A Review of methane and gas hydrates in the dynamic, stratified system of the Blake Ridge Region, Offshore Southeastern North America[J]. *Chemical Geology*, 2004, 205(3/4): 311-346.
- [18] Hornbach M J, Ruppel C, Saffer D M, et al. Coupled geophysical constraints on heat flow and fluid flux at a salt diapir[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(24), L24617. doi: 10.1029/2005GL024862.
- [19] Rowe M M, Gettrust J F. Faulted structure of the bottom simulating reflector on the Blake Ridge, Western North-Atlantic[J]. *Geology*, 1993, 21(9): 833-836.
- [20] McNeill L C, Goldfinger C, Kulm L D, et al. Tectonics of the Neogene Cascadia forearc basin: Investigations of a deformed late Miocene unconformity[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2000, 112(8): 1209-1224.
- [21] Johnson J E, Goldfinger C, Suess E. Geophysical constraints on the surface distribution of authigenic carbonates across the Hydrate Ridge region, Cascadia margin[J]. *Marine Geology*, 2003, 202(1/2): 79-120.
- [22] Teichert B M A, Torres M E, Bohrmann G, et al. Fluid sources, fluid pathways and diagenetic reactions across an accretionary prism revealed by Sr and B geochemistry[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 239(1/2): 106-121.
- [23] Torres M E, Wallmann K, Tréhu A M, et al. Gas hydrate

- growth, methane transport, and chloride enrichment at the southern summit of Hydrate Ridge, Cascadia Margin Off Oregon[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 226(1/2): 225-241.
- [24] Heeschen K U, Tréhu A M, Collier R W, et al. Distribution and height of methane bubble plumes on the Cascadia Margin characterized by acoustic imaging[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(12): 1643. doi:10.1029/2003GL016974.
- [25] Suess E, Torres M E, Bohrmann G, et al. Sea floor methane hydrates at Hydrate Ridge, Cascadia Margin[M]. Washington DC: American Geophysical Union, 2001.
- [26] Dai J C, Snyder F, Gillespie D, et al. Exploration for gas hydrates in the deepwater, Northern Gulf of Mexico: Part I. A seismic approach based on geologic model, inversion, and rock physics principles[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2008, 25(9): 830-844.
- [27] Wood W T, Hart P E, Hutchinson D R, et al. Gas and gas hydrate distribution around seafloor seeps in Mississippi Canyon, Northern Gulf of Mexico, using multi-resolution seismic imagery[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2008, 25(9): 952-959.
- [28] Cooper A K, Hart P E. High-resolution seismic-reflection investigation of the northern Gulf of Mexico gas-hydrate-stability zone[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 19(10): 1275-1293.
- [29] Kastner M, Claypool G, Robertson G. Geochemical constraints on the origin of the pore fluids and gas hydrate distribution at Atwater Valley and Keathley Canyon, northern Gulf of Mexico[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2008, 25(9): 860-872.
- [30] Lee M W, Collett T S. Integrated analysis of well logs and seismic data to estimate gas hydrate concentrations at Keathley Canyon, Gulf of Mexico[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2008, 25(9): 924-931.
- [31] Cook A E, Goldberg D, Kleinberg R L. Fracture-controlled gas hydrate systems in the Northern Gulf of Mexico[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2008, 25(9): 932-941.
- [32] Collett T S. Gas hydrate petroleum systems in marine and arctic permafrost environments[C]. GCSSEPM Proceedings, 2009. <http://gcsproceedings.sepmonline.org/content/gcs029/1/SEC8.body.pdf>.
- [33] 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.
- [34] 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*, 2012b, 34(1): 134-149.
- [35] McConnell D, Zhang Z. Using acoustic inversion to image buried gas hydrate distribution[J]. *Fire in the Ice*, 2005, 5(4): 3-5.
- [36] 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(1): 41-61.
- [37] Shelander D, Dai J C, Bunge G, et al. Estimating saturation of gas hydrates using conventional 3D seismic data, Gulf of Mexico Joint Industry Project Leg II[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, 34(1): 96-110.
- [38] 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(1): 150-168.
- [39] 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.
- [40] Akihisa K, Tezuka K, Senoh O, et al. Well log evaluation of gas hydrate saturation in the MITI Nankai-Trough Well, offshore South East Japan[C]. Proc. SPWLA 43th Ann. Logging Symp., 2002, 1-14.
- [41] 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): 1-6.
- [42] Inamori T, Hato M. Detection of methane hydrate-bearing zones from seismic data[J]. *Resource Geology*, 2004, 54(1): 99-104.
- [43] Fujii T, Nakamizu M, Tsuji Y, et al. Methane-hydrate occurrence and saturation confirmed from core samples, eastern Nankai Trough, Japan[M]. In: Collett T, Johnson A, Knapp C, Boswell R, eds., *Natural gas hydrates—Energy resource potential and associated geologic hazards*. AAPG Memoir 89, 2009, 385-400.
- [44] Yoon S H, Chough S K. Regional strike slip in the eastern continental margin of Korea and its tectonic implications for the evolution of Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan)[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1995, 107(1): 83-97.
- [45] Lee G H, Kim H J, Han S J, et al. Seismic stratigraphy of the deep Ulleung Basin in the East Sea (Japan Sea) back-arc basin[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2001, 18(5): 615-634.
- [46] Bahk J J, Kim D H, Chun J H, et al. Gas hydrate occurrences and their relation to host sediment properties: Results from second Ulleung Basin Gas Hydrate Drilling Expedition, East Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 47: 21-29.
- [47] Bahk J J, Kim J H, Kong G S, et al. Occurrence of near-seafloor gas hydrates and associated cold vents in the Ulleung Basin, East Sea[J]. *Geosciences Journal*, 2009, 13(4): 371-385.
- [48] Kim G Y, Yi B Y, Yoo D G, et al. Evidence of gas hydrate from downhole logging data in the Ulleung Basin, East Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(10): 1979-1985.
- [49] Chun J H, Ryu B J, Son B K, et al. Sediment mounds and other sedimentary features related to hydrate occurrences in a columnar seismic blanking zone of the Ulleung Basin, East Sea, Korea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(10): 1787-1800.
- [50] Bahk J J, Um I K, Holland M. Core lithologies and their constraints on gas-hydrate occurrence in the East Sea, offshore Korea: Results from the site UBGH1-9[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(10): 1943-1952.
- [51] Park K, Bahk J J, Kwon Y G, et al. Korean National Program Expedition confirms rich gas hydrate deposits in the Ulleung Basin, East Sea[J]. *Fire in the Ice*, 2008, 8(2): 6-9.
- [52] Riedel M, Collett T S, Kim H S, et al. Large-scale depositional characteristics of the Ulleung Basin and its impact on electrical resistivity and Archie-parameters for

- gas hydrate saturation estimates[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 47: 222-235.
- [53] Scholz N A, Riedel M, Bahk J J, et al. Mass transport deposits and gas hydrate occurrences in the Ulleung Basin, East Sea e Part 1: Mapping sedimentation patterns using seismic coherency[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, 35(1): 91-104.
- [54] 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.
- [55] Collett T S, Riedel M, Cochran J R, et al. Indian continental margin gas hydrate prospects: Results of the Indian National Gas Hydrate Program (NGHP) Expedition 01[C]. *International Conference on Gas Hydrates (ICGH 2008)*, Vancouver, British Columbia, Canada, 2008.
- [56] Dewangan P, Sriram G, Ramprasad T, et al. Fault system and thermal regime in the vicinity of Site NGHP-01-10, Krishna-Godavari Basin, Bay of Bengal[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(10): 1899-1914.
- [57] Riedel M, Collett T S, Kumar P, et al. Seismic imaging of a fractured gas hydrate system in the Krishna-Godavari Basin Offshore India[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2010, 27(7): 1476-1493.
- [58] Riedel M, Collett T S, Shankar U. Documenting channel features associated with gas hydrates in the Krishna-Godavari Basin, Offshore India[J]. *Marine Geology*, 2011, 279(1/4): 1-11.
- [59] 苏明, 乔少华, 魏伟, 等. 墨西哥湾天然气水合物油气系统[J]. *新能源进展*, 2013, 1(2): 65-72.
- [60] 乔少华, 苏明, 杨睿, 等. 运聚体系——天然气水合物不均匀性分布的关键控制因素初探[J]. *新能源进展*, 2013, 1(3): 245-256.

#### 作者简介:

苏明(1983-), 男, 博士, 副研究员, 目前主要从事深水沉积体系及资源效应、海域天然气水合物成藏地质条件分析等方面的科研工作。

吴能友(1965-), 男, 博士, 研究员, 目前主要从事海洋天然气水合物成藏机制和资源评价、海洋石油天然气资源评价等方面的科研工作。