



琼东南盆地渗漏型天然气水合物识别与差异成藏特征

谢莹峰, 任金锋, 邓 炜, 陆敬安, 匡增桂, 康冬菊, 曲长伟

Identification and the differential accumulation of leakage-typed gas hydrate in the Qiongdongnan Basin, northern South China Sea

XIE Yingfeng, REN Jinfeng, DENG Wei, LU Jing'an, KUANG Zenggui, KANG Dongju, and QU Changwei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2024091102>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

北极波弗特—马更些三角洲盆地天然气水合物成藏模式

Accumulation model of natural gas hydrate in the Beaufort–Mackenzie Delta Basin, the Arctic

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(6): 146–158

尖峰北盆地含气流体运聚疏导组合特征及对水合物成藏的控制作用

Characteristics of gas-bearing fluid migration and accumulation system and their control on gas hydrate accumulation in the Jianfengbei Basin of South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(4): 148–161

非线性层析技术在琼东南天然气水合物成像中的应用

Application of non-linear tomography technology to gas hydrate imaging in the Qiongdongnan area

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(3): 206–213

南海神狐海域非均质性天然气水合物储层的分频反演

Frequency-divided inversion method of heterogenous natural gas hydrates reservoir in the Shenhu area, South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(6): 106–120

琼东南盆地新生代东西分块差异构造演化及控藏意义

Differential control of structures over reservoirs and its significance in Qiongdongnan Basin

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(4): 157–169

水合物藏的类型、特点及开发方法探讨

Gas hydrate reservoir types, characteristics and development methods

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(1): 194–213



关注微信公众号，获得更多资讯信息

谢莹峰, 任金锋, 邓炜, 等. 琼东南盆地渗漏型天然气水合物识别与差异成藏特征 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(6): 1-11.
XIE Yingfeng, REN Jinfeng, DENG Wei, et al. Identification and the differential accumulation of leakage-typed gas hydrate in the Qiongdongnan Basin, northern South China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(6): 1-11.

琼东南盆地渗漏型天然气水合物识别与差异成藏特征

谢莹峰¹, 任金锋¹, 邓炜¹, 陆敬安¹, 匡增桂¹, 康冬菊¹, 曲长伟²

1. 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广州 511458
2. 斯伦贝谢中国地球科学与石油工程研究院, 北京 100015

摘要:南海北部琼东南盆地中央凹陷带松南低凸起之上的研究区的管状渗漏通道内普遍发育渗漏型天然气水合物, 岩芯中可见块状、脉状以及结核状等产状水合物发育。为了探究渗漏型天然气水合物的综合识别方法以及不同渗漏型水合物矿体成藏是否存在差异, 结合地震、测井以及岩芯资料, 开展了多类型含水合物储层识别以及流体渗漏分布研究。研究表明, 渗漏型水合物综合识别方法中, 地震反射同相轴上拉以及方差地震属性异常指示了流体渗漏通道的存在; 侧向和感应电阻率曲线分离, 电阻率成像图上见高亮和高角度变形层理, 为渗漏型水合物测井响应。根据水合物钻探和地震解释结果, 划分了 3 个与渗漏型水合物相关的水合物矿体, 其中的 1 个水合物矿体钻遇了砂质高饱和度扩散型水合物。砂体发育导致水合物矿体的流体渗漏强度明显减弱, 砂体既作为良好的储层, 也是储能泄压载体。未发育砂体的水合物矿体中, 渗漏通道内渗漏型水合物发育显著, 远离渗漏通道, 水合物钻探显示差。砂体和渗漏通道是琼东南盆地渗漏型天然气水合物差异成藏的主控因素。

关键词: 渗漏型天然气水合物; 综合识别; 差异成藏; 砂体; 渗漏通道; 琼东南盆地

中图分类号: P736 文献标识码: A DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2024091102

Identification and the differential accumulation of leakage-typed gas hydrate in the Qiongdongnan Basin, northern South China Sea

XIE Yingfeng¹, REN Jinfeng¹, DENG Wei¹, LU Jing'an¹, KUANG Zenggui¹, KANG Dongju¹, QU Changwei²

1. Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou 511458, China
2. SLB China, Beijing 100015, China

Abstract: Leakage-typed gas hydrates occurs in the form of block, vein, nodule in the core and are developed widely in tubular leakage passage in the Songnan low uplift in the central depression of the Qiongdongnan Basin in the northern South China Sea. To explore a comprehensive identification method for the leakage-typed gas hydrate and their differences in the accumulation for various ore bodies of leakage-typed gas hydrate. Identification for multiple types of gas hydrate reservoirs and fluid leakage distribution were studied combining seismic, logging well drilling, and borehole data. In the comprehensive identification methods, seismic reflection phase axis pull-up and variance seismic attribute anomalies indicate fluid leakage channels; the separation of lateral and induced resistivity logging curves, the bright and high-angle deformation layers seen in the resistivity image are the logging responses of leaky hydrates. Based on the borehole data and seismic profiles, three gas-hydrate ore bodies related to leakage gas hydrates were identified, and one of them encountered high-saturation diffusion gas hydrates in sandy sediment. The deposition of sand bodies significantly weakened the fluid leakage intensity of the hydrate ore bodies, during which sand sediments served as good reservoirs, and also energy storage with pressure relief. In hydrate ore bodies without developed sand bodies, seepage-type hydrates are significantly developed in seepage channels, while far away from the seepage channels, the hydrate drilling indication is poor. However, in the absence of sand sediment, leakage gas hydrates well developed in the leakage channels, while far away from the channels, the hydrate drilling indication is poor. Therefore, sand bodies and the leakage channels are the main controlling factors for the differential accumulation of leakage-typed gas hydrate in the Qiongdongnan Basin.

Key words: leakage-typed gas hydrate; comprehensive identification methods; differential accumulation; sand sediment; leakage channel; Qiongdongnan Basin

资助项目: 国家自然科学基金联合基金项目“南海北部高富集天然气水合物储层特征与成藏控制机理研究”(U224420148); 自然资源部中国地质调查局地质调查项目(DD20230063, DD20221700)

作者简介: 谢莹峰(1992年—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事天然气水合物地质调查与研究, E-mail: xieyingfeng_gmgs@163.com

收稿日期: 2024-09-11; **改回日期:** 2024-11-01. 张现荣编辑

按水合物的宏观产状,可将其划分为分散状、块状、脉状以及结核状,分散状水合物肉眼不可见,是孔隙充填作用的结果,块状、脉状以及结核状水合物肉眼可识别,是裂隙充填作用的结果^[1-3]。一些学者从流体疏导方式提出了将水合物藏划分为扩散型和渗漏型两种水合物成藏模式^[4-7]。地层深部高通量天然气沿断层、裂隙或孔缝等通道向海底渗漏,其中部分渗漏的天然气运移至稳定域内聚集成渗漏型水合物藏,部分渗漏的天然气通过微生物活动转化为二氧化碳,沉淀为自生冷泉碳酸盐岩,还有一部分天然气喷溢进入海水中^[8]。浅层生物气、水合物稳定带之下的游离气或深部热解气以低通量扩散形式运移至稳定域内聚集成扩散型水合物藏,矿藏呈层状分布在稳定域底部。在地震剖面上,游离气带与水合物稳定带之间常常见指示水合物底界的强反射-似海底反射(Bottom Simulating Reflector, 简称BSR)^[9-11]。渗漏成因水合物藏主要发育块状、脉状以及结核状的裂隙型水合物,而扩散成因水合物藏主要发育分散状的孔隙充填型水合物。南海北部琼东南盆地^[12-14]、大西洋海域北美东南部的布莱克海台^[15]、日本南海海槽^[16]、韩国郁龙盆地^[17-18]以及印度克里希纳-戈达瓦里盆地(Krishna-Godavari, 简称K-G)^[19-20]等地的水合物钻探中均钻获了渗漏型水合物,目前主要通过岩芯X射线扫描图像以及取芯来识别这种可视的裂隙充填型水合物^[12-21],通过测井识别此类渗漏型水合物的研究少有报道。本文利用地震、测井和岩芯资

料,重点研究渗漏型水合物的测井识别方法,形成渗漏型水合物的综合识别方法。

南海北部琼东南盆地中央凹陷带松南低凸起之上的研究区已钻遇QDN-W07-2018、QDN-W08-2018、QDN-W09-2018等3个显著发育渗漏型水合物的站位^[12-14,21-22],前人根据水合物稳定条件(温度和压力)、气体来源、流体运移通道和沉积条件等的水合物成藏要素,提出了渗漏型水合物^[12,14,23]以及砂质孔隙充填型^[13]水合物聚集成藏模型。研究发现了水合物主要发育在流体渗漏通道内,而远离渗漏通道时水合物钻探显示差,渗漏通道是该区渗漏型水合物差异成藏的主控因素^[12]。然而砂体发育与渗漏型水合物差异成藏是否存在联系?本文将在研究区内,利用地震和测井资料,划分和对比不同水合物矿体的渗漏型水合物和砂质扩散型水合物分布范围,综合分析渗漏型水合物差异成藏特征。

1 区域背景

研究区水深约在1 600~1 830 m,位于中国南海北部陆缘西部的琼东南盆地中央凹陷带的松南低凸起之上(见图1),邻近区已探明了LS17-2、LS18-1、LS18-2和YL8-3等气田^[24-25],其天然气来源于渐新统崖城组煤系烃源岩^[26-27]。研究区内水合物相关气体表现为以甲烷为主,同时检测到丙烷、异丁烷、丁烷和异戊烷等高分子量烃类气体组分,表

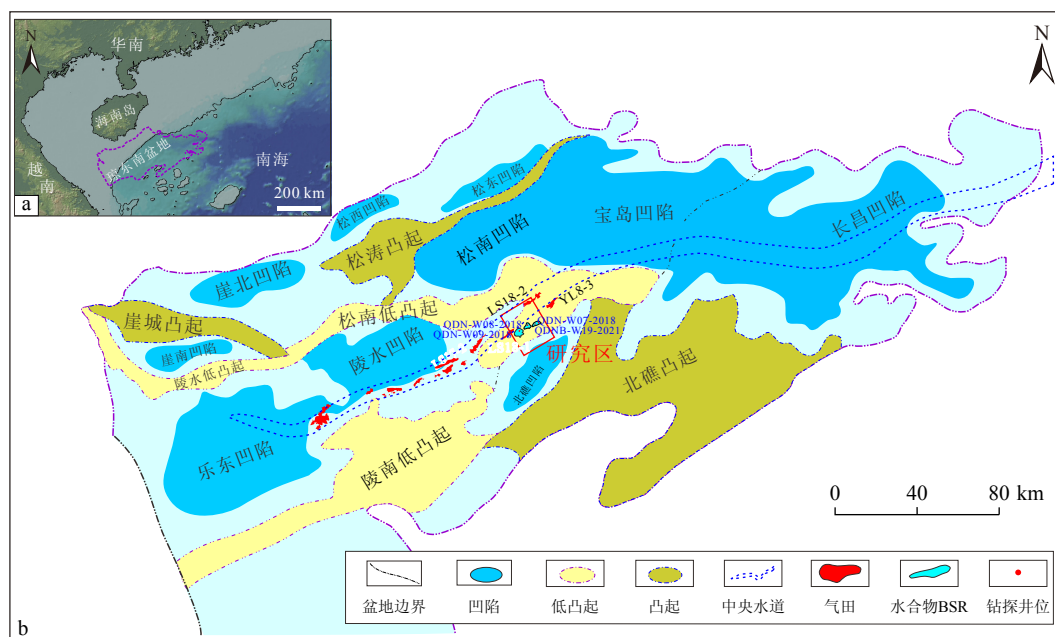


图1 研究区位置和地质构造位置

Fig.1 Geographical location and geological background of the research area

明水合物气体是热成因气与生物成因气混合成因, 其中的 C_{2+} 以上气体组分主要来自深部热成因气源^[28-29]。深部大断层以及广泛发育的泥底辟、气烟囱为碳氢化合物从深层迁移到浅层天然气水合物稳定区提供了有利的垂直通道^[23, 30-31]。研究区内发现了与流体渗漏相关的麻坑、海底泥丘、冷泉生物群落、冷泉碳酸盐等海底地形地貌^[12,22]。

广州海洋地质调查局 2018 年 GMGS5 水合物钻探航次在研究区的 QDN-W07-2018、QDN-W08-2018、QDN-W09-2018 三个站位钻获渗漏型水合物, 如图 2 和图 3 所示, 保压岩芯 X 射线扫描图像以及非保压岩芯均见块状、脉状及结核状水合物发育。2019 年 GMGS6 水合物钻探航次在已发现的 QDN-W08-2018、QDN-W09-2018 渗漏型水合物站位附近 3 km 范围内实施了随钻测井钻孔, 发现远离渗漏通道, 水合物钻探显示差^[12]。2021 年 GMGS7 水合物钻探航次以及 2022—2023 年 GMGS8 水合物钻探航

次在 QDN-W07-2018 渗漏型水合物站位附近 3 km 范围内实施了随钻测井和取芯钻孔^[13], 获取了低温显示的砂质型分散状水合物样品(图 4)。

2 数据与方法

研究区已完成了全覆盖的三维地震调查, 地震资料采集主频 40~50 Hz, 分辨率约为 10~12.5 m, 采样间隔为 1 或 2 ms, 原始面元大小 12.5 m×25 m。以 12.5 m×6.25 m 的处理面元, 开展了噪声压制、多次波压制以及叠前深度偏移等地震数据处理。2018、2019、2021 以及 2022 年广州海洋地质调查局的水合物钻探 GMGS5-GMGS8 航次先后在研究区钻获了随钻测井数据(包括了侧向电阻率、电阻率成像、井径、自然伽马、体积密度、补偿中子孔隙度、感应电阻率、纵波时差以及横波时差等)、原位温压测试数据、各类分析测试数据以及水合物样品。

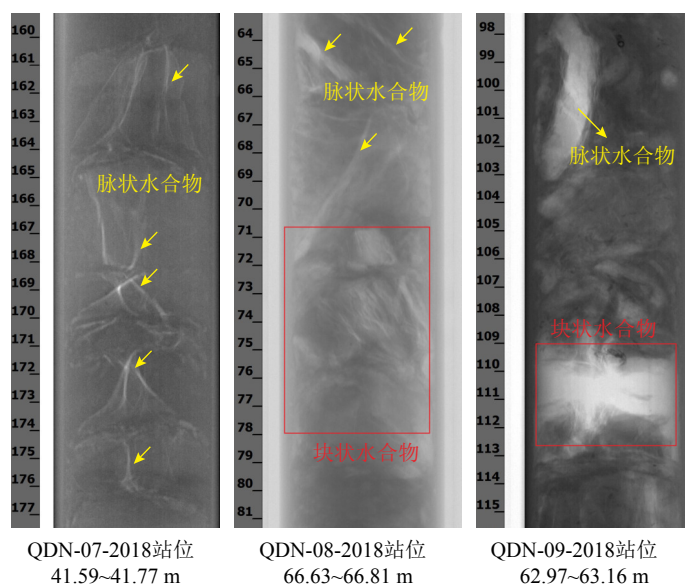


图 2 保压岩芯 X 射线扫描图像

Fig.2 X-ray scanning image of pressure-retaining core

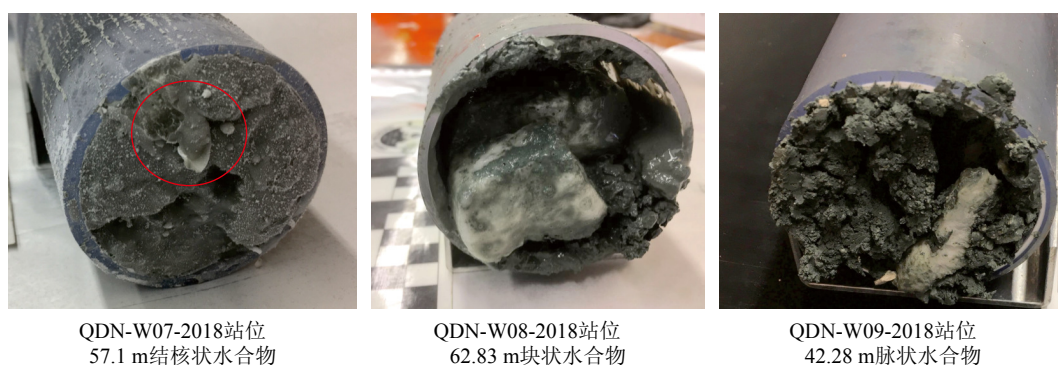


图 3 渗漏型水合物岩芯

Fig.3 The cores of leakage-typed gas hydrate

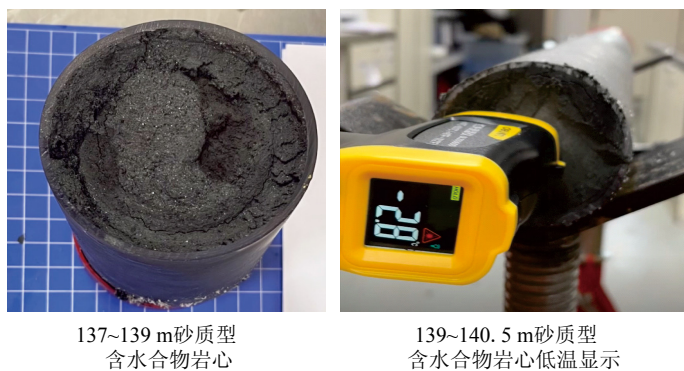


图 4 QDNB-W19-2021 站位砂质型含水合物岩芯
Fig.4 A sandy gas hydrate core in the QDNB-W19-2021 Site

2.1 水合物及其相关构造的地震反射特征识别

BSR 是常规用于识别含天然气水合物层的地球物理标志,在地震剖面上表现为与海底近似平行。特别是当含水合物层作为盖层,下伏地层伴生游离气时,在含水合物层底部和含气层顶部会形成 BSR。研究区内发育明显气烟囱,气烟囱是含气流体垂向运移在地震剖面上表现出的地震反射异常,即出现地震反射成像明显变差或空白反射条带,其形状可为柱状、锥状或椭圆状;气烟囱因内部含气导致速度降低,在地震剖面上易形成同相轴下拉现象^[30-31]。当气烟囱之上的地震剖面出现明显的渗漏点强反射,地震反射同相轴出现上拉^[12],指示了含气流体渗漏通道。

2.2 地震属性识别水合物及游离气

含水合物地层与围岩、含气层都存在明显的波阻抗差,在地震剖面上表现为强振幅特征。振幅类属性能够很好地刻画水合物和游离气的分布特征,如均方根振幅、平均绝对振幅、最大峰值振幅、平均峰值振幅及属性聚类分析等^[32-34]。含水合物沉积地层的地震波反射频率具有相对高频的特点,而含游离气地层高频强烈衰减。当 BSR 下部地层出现反射频率急剧下降的现象时,表明含有一定量的游离气。因此可以利用瞬时频率属性来刻画游离气的分布^[35-36]。

2.3 含水合物测井识别

较高的电阻率和较小的纵波时差是识别天然气水合物储层最为直观的方法(表 1)。结构 I 型天然气水合物的密度略小于水,中子含氢指数略大于水。沉积物孔隙中的流体种类和含量会影响其弹性参数;孔隙空间中发育水合物,沉积物的体积模

量和剪切模量明显增大,沉积物的纵波和横波速度明显增大^[37-38],见公式(1)和公式(2)。

$$V_p = \sqrt{\frac{k + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad (1)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2)$$

式中, V_p 、 V_s 为地层纵波速度和横波速度,单位为 m/s; k 为地层体积模量,单位为 Pa; μ 为地层剪切模量,单位为 Pa; ρ 为地层密度,单位为 kg/m^3 。

2.4 渗漏型水合物测井识别

研究区内钻遇渗漏型水合物,为裂隙充填的结果,电阻率成像图像上可明显识别出块状、脉状以及结核状水合物,呈高亮显示。深部流体渗漏至地层浅部,甚至渗漏至海底,易形成高角度微裂缝,在地层倾角结果上可识别出高角度变形层理。感应电阻率测井为井内各部分介质(包括井眼、侵入带、原状地层和围岩)电阻并联的结果;相反,侧向电阻率测井为电阻串联的结果^[39-40]。由于侧向电阻率测井的横向探测深度较浅,因而对近井筒内充满低电阻率泥浆滤液的垂直裂缝反应灵敏;而感应电阻率测井横向探测深度大,且基本不受垂直裂缝的影响。因此在渗漏型水合物地层中,侧向测井的电阻率比感应测井的电阻率低。

表 1 水合物、水及天然气的测井响应特征

Table 1 The logging response characteristics of hydrate, water, and natural gas

物质	电阻率 /($\Omega \cdot \text{m}$)	密度 /(g/cm^3)	中子(HI) /(m^3/m^3)	纵波时差 /($\mu\text{s}/\text{ft}$)	横波时差 /($\mu\text{s}/\text{ft}$)
水合物(结构I型)	高	0.92	1.06	小	小
水	低	1.00	1.00	200	0
天然气	高	低	低	大	0

2.5 含气测井识别

电阻率变大、密度和中子含氢指数均减小是指示地层含天然气的显著特征。沉积物含气时声波幅度衰减变大, 因此含气地层的纵波时差增大, 疏松砂岩气层会出现周波跳跃现象。横波不能在流体中传播, 沉积物中含气或含水均不改变岩石本身的剪切模量, 但沉积物含气时其密度会降低^[39-40]。因此沉积物在含气时的横波速度比含水时略高, 但比含水合物时明显降低。

2.6 水合物与游离气共存层测井识别

水合物层作为盖层, 其下伏地层中存在水合物与游离气共存的现象。神狐海域 GMGS3/5-SH17 站位含气层中的非保压取芯分析发现了氯离子浓度异常降低的现象^[41-43], 这是水合物存在的标志; 美国俄勒冈岸外水合物脊 ODP204 水合物钻探航次 1249 站位保压水合物岩芯释压过程中发现, 在释气初期其温度不变, 仍存在大量游离气释出^[44], 这两

种现象证实了水合物和游离气的共存。在前文叙述的含水合物和含气测井识别的基础上, 研究得到了水合物与游离气共存层的测井识别方法: 水合物层下伏含气地层仍具有较高的横波速度和剪切模量, 指示了水合物和游离气共存^[41-43]。

3 渗漏型水合物综合识别

如图 5a 所示, 研究区内水合物的发育受控于与气体运移有关的底辟型构造(也称为气烟囱)。自第四纪以来地层浅部发育了 3 套块体流沉积(Mass Transport Deposits, 简称 MTD), 对流体起到了封堵作用。流体聚集区压力达到一定程度后, 突破块体流(MTD)地层, 形成管状渗漏通道, 在稳定域内形成渗漏型水合物。如图 5b 所示, QDN-W08-2018 及 QDN-W09-2018 站位气烟囱之上的地震剖面出现明显的渗漏点强反射现象, 地震反射同相轴出现上拉现象, 且两站位附近可见多处管状渗漏通道发育。

QDN-W09-2018 井、QDN-W08-2018 井以及

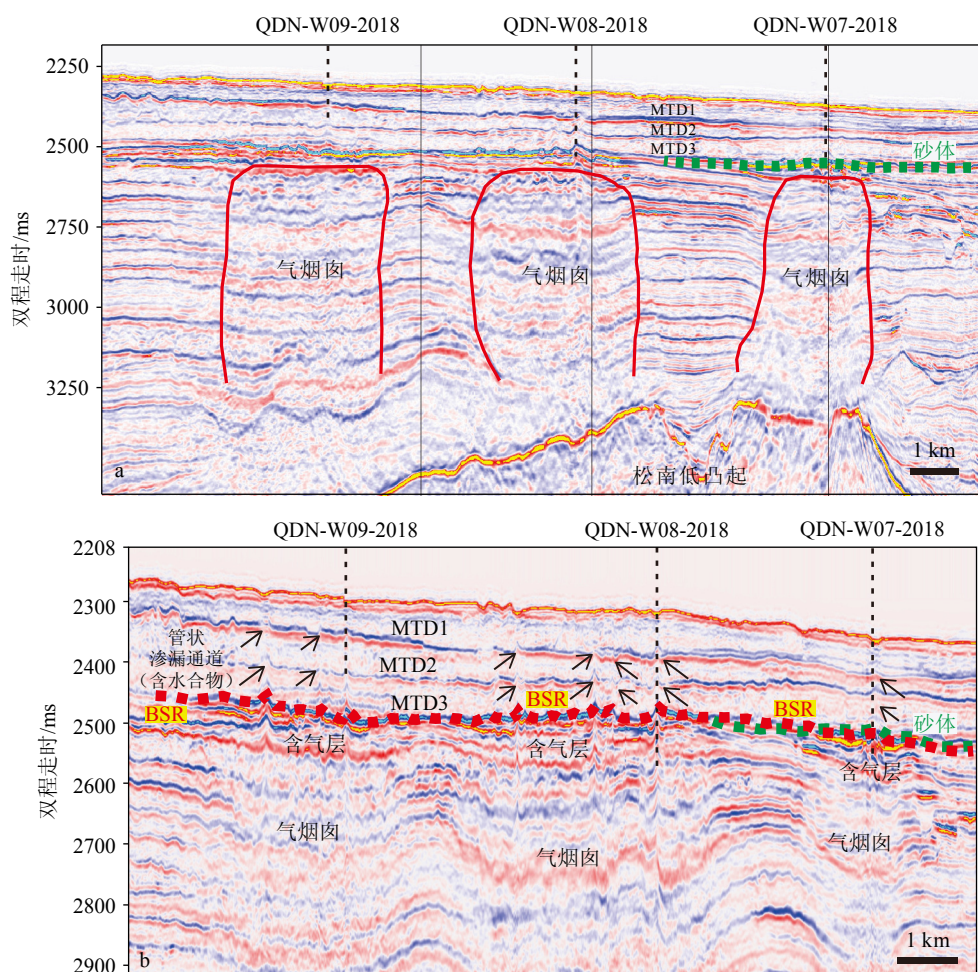


图 5 研究区地震剖面解释图

Fig.5 Interpretation of seismic profile in the study area

QDN-W07-2018 井浅部地层均表现为高电阻率(图 6), 且深探测电阻率与电磁波相位衰减电阻率存在分离现象, 深探测电阻率值低。QDN-W08-2018 井未获取到电阻率成像图像, QDN-W09-2018 井和 QDN-W07-2018 井的电阻率成像图像上可见高亮、幅度中等的正弦或余弦曲线, 指示变形层理。其中, QDN-W07-2018 井变形层理倾向为 NW 和 NE 向, 地层倾角集中分布于 $70^{\circ} \sim 85^{\circ}$; QDN-W09-2018 井中变形层理倾向主要为 NW 和 NE 向, 少量 SE 向, 地层倾角变化范围为 $10^{\circ} \sim 78^{\circ}$ 。综上, 根据高亮和高角度变形层理的电阻率成像特征, 可识别出渗漏型水合物。

4 渗漏型水合物储层差异成藏特征

4.1 渗漏型水合物储层差异分布

离 8 号矿体含渗漏型水合物层 QDN-W08-2018

井 0.96 km 的 QDNE-W09-2019 井中钻遇低饱和度含水合物层(深探测电阻率均值 $2.6 \Omega \cdot \text{m}$)以及低饱和度含气层(深探测电阻率均值 $2 \Omega \cdot \text{m}$, 受含气影响, 声波衰减变大, 纵波信号变弱)(图 7)。离 9 号矿体含渗漏型水合物层 QDN-W09-2018 井 2.39 km 的 QDNE-W02-2019 井中无明显水合物显示(图 8)。由此观之, 研究区渗漏型水合物储层横向展布不连续, 非均质性强, 远离渗漏通道, 水合物钻探显示差。

4.2 水合物矿体分布

图 5b 中地震同相轴呈现出强反射、连续性较好、与海底近似平行以及与海底极性相反的特征, 由此识别出 BSR。BSR 之下呈现同相轴下拉、强反射和频率衰减, 解释为含气层。明显的空白反射带、同相轴下拉以及频率衰减指示了气烟囱。沿 BSR 界面上下各取 30 ms 范围的时窗, 提取地震均方根振幅属性。如图 9 所示, 红色和黄色区域为高均方

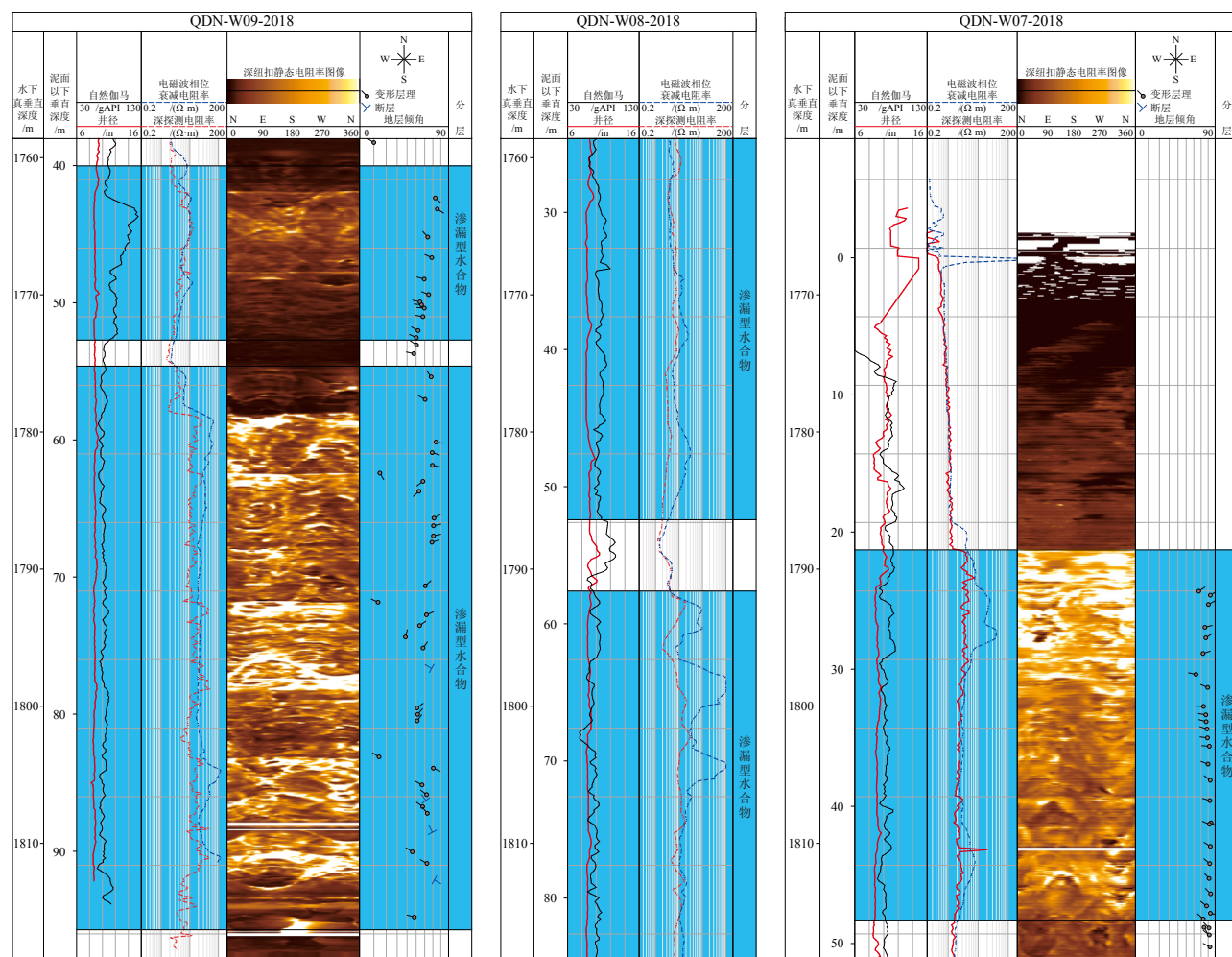


图 6 渗漏型水合物测井识别图

Fig.6 Identification of leakage-typed gas hydrate on well logging

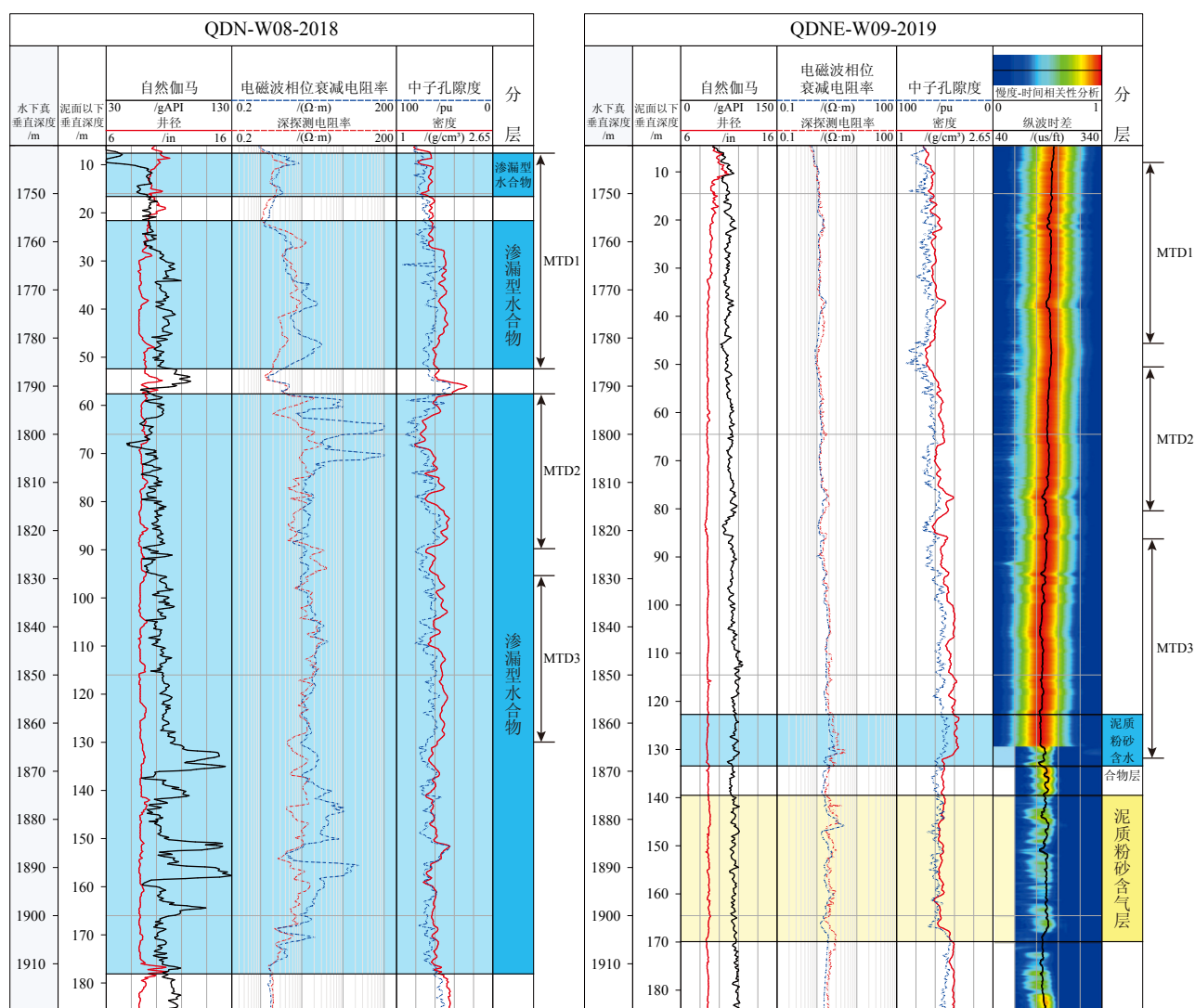


图 7 8 号矿体含水合物储层连井剖面

Fig.7 The cross-well section of gas hydrate reservoir in No. 8 gas hydrate ore body

根振幅属性异常区域,表明在 BSR 附近波阻抗变化差异明显,由水合物和游离气之间的速度差引起,由此圈定了 3 个水合物和伴生游离气富集区,分别是 7 号矿体、8 号矿体和 9 号矿体。

如图 10 所示,与上覆泥岩层相比,根据自然伽马降低、中子孔隙度减小和密度增大的测井响应特征,识别出研究区 7 号矿体的砂层。QDN-W07-2018 井浅层钻遇渗漏型水合物(图 6),深部井径曲线扩径严重,钻遇砂质含气层(图 10)。QDNB-W02-2022 井钻遇砂质含气层(自然伽马降低、电阻率增大、中子孔隙度减小、密度减小、剪切模量无明显变化),QDNB-W03-2022 井钻遇砂质含水合物层(自然伽马降低、电阻率增大、中子孔隙度减小、密度增大、剪切模量增大)以及砂质水合物和游离气共存层(电阻率增大、中子孔隙度减小、密度减小、剪切模量增大),QDNB-W08-2021 井钻遇砂质含水合

物层。砂质含水合物层具有较高的电阻率,最高值超过 $100 \Omega \cdot m$,指示了高水合物饱和度。

7 号矿体发育“席状”砂体,为流体的横向运移提供了高渗透通道。块体流(MTD)的发育阻碍了流体的垂向运移,进而促进了流体的横向运移。气烟囱内流体运移活跃,温度测量发现,气烟囱内地温梯度高,远离气烟囱则地温梯度低^[13,21]。前人对研究区砂质含水合物层的成藏机制取得了深入认识,在动力学和热力学机制的共同影响下^[13],研究区内天然气水合物和伴生气同层分布、横向过渡,形成了“中心游离气+水合物和游离气共存过渡+边缘水合物”的成藏模式。

4.3 砂体发育与渗漏通道的联系

如图 11 所示,通过 2 400 ms 方差地震属性异常,在研究区的 7 号矿体识别出 1 个渗漏通道,8 号

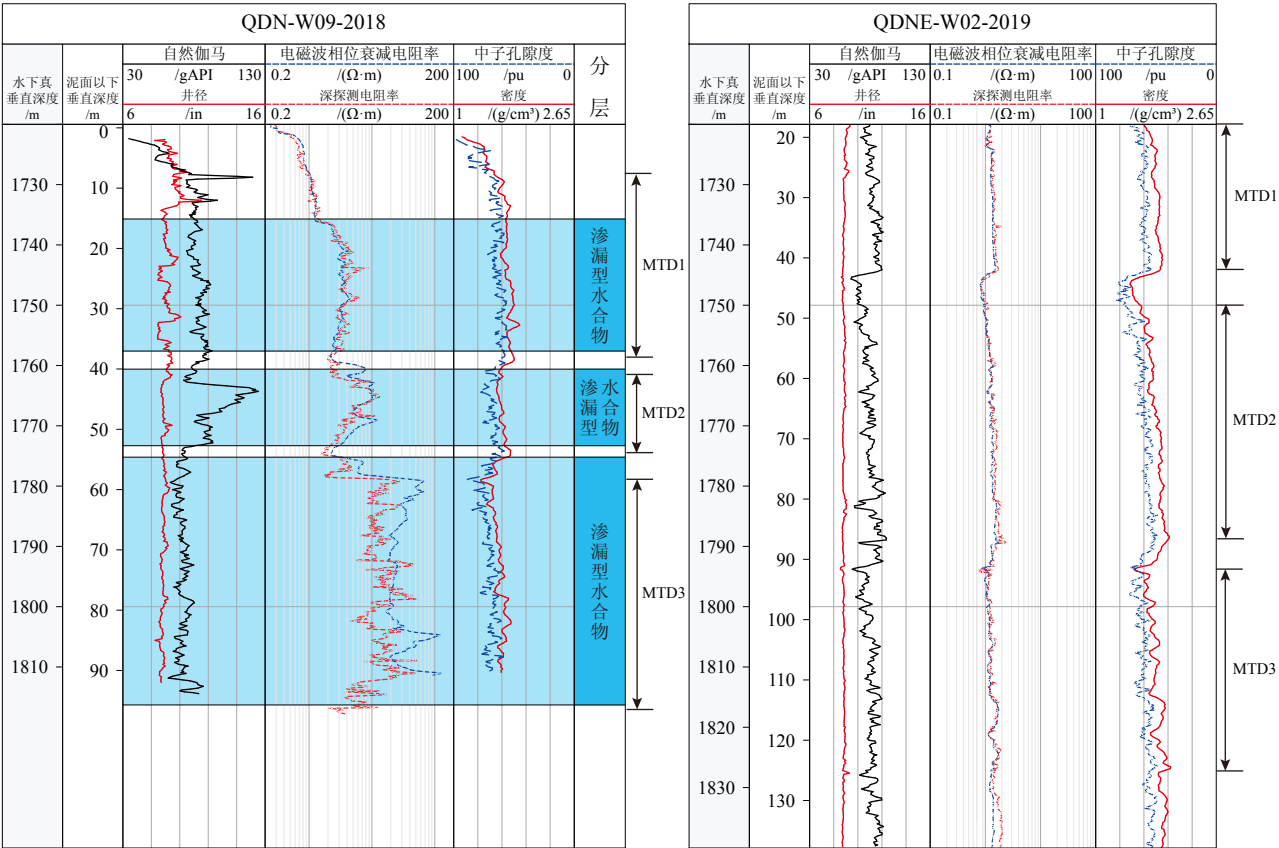


图 8 9 号矿体含水合物储层连井剖面

Fig.8 The cross-well section of gas hydrate reservoir in No. 9 gas hydrate ore body

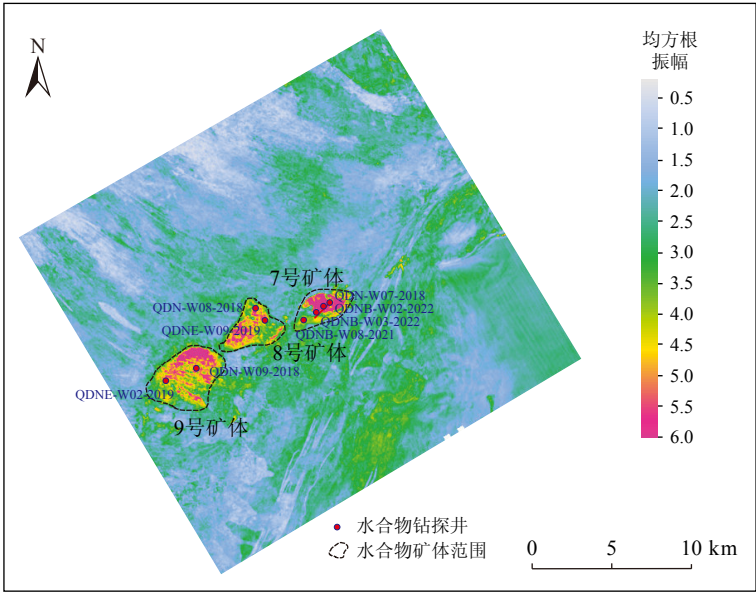


图 9 研究区水合物矿体平面分布图

Fig.9 Planar distribution of the gas hydrate ore bodies in the research area

矿体识别出 9 个渗漏通道, 9 号矿体识别出 7 个渗漏通道。数量较多的气体渗漏通道以及 7 号矿体高饱和度砂质含水合物层的发现, 指示了研究区具有充足的气源。7 号矿体发育砂体, 具有最少的气体渗漏通道, 从而推测在气源充足的条件下, 砂体

是储能泄压载体。

5 水合物矿体刻画

研究区水合物矿体的刻画应分成两种情况:

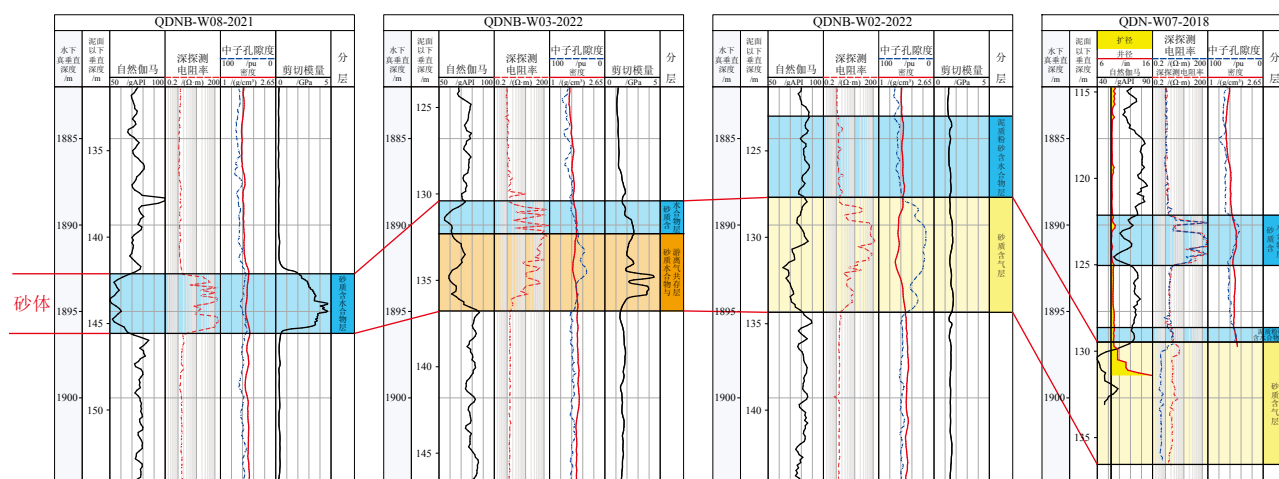


图 10 7 号矿体含水合物储层连井剖面

Fig.10 The cross-well section of gas hydrate reservoir in No. 7 gas hydrate ore body

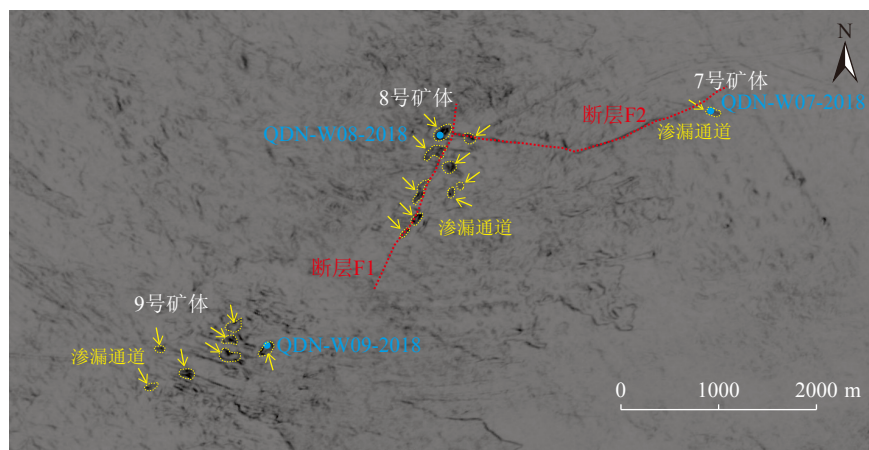


图 11 研究区水合物矿体的渗漏通道发育图

Fig.11 The distribution of the leakage channels in the gas hydrate ore bodies of the research area

(1)对于 BSR 上下范围内连续发育的含水合物储层及含游离气储层,可结合地震及测井资料,开展岩石物理建模和弹性敏感参数分析,在此基础上通过地震反演开展地震储层预测,分析含水合物层及含游离气层的储层厚度、孔隙度以及饱和度空间分布,实现储层精细刻画。

(2)渗漏型水合物储层主要发育在渗漏通道内,渗漏通道在地震上表现为垂直管状构造,直径几十到数百米,横向上不连续。因此应先完成管状渗漏通道的地震识别及空间展布刻画,在此基础上综合地震与测井资料,完成储层精细刻画。

6 结论

(1)保压岩芯 X 射线扫描图像以及岩芯可直观识别出块状、脉状以及结核状的渗漏型水合物,同时可通过地震反射同相轴上拉、方差地震属性异

常、侧向和感应电阻率曲线分离、电阻率成像图上表现出的高亮和高角度的变形层理等地球物理特征来综合识别渗漏型水合物。

(2)琼东南盆地研究区的泥质粉砂块体流沉积物(MTD)是良好的盖层,流体聚集压力达到一定程度后,突破盖层垂向运移,形成管状气体渗漏通道,在稳定域内形成渗漏型水合物。水合物横向展布非均质性强,远离渗漏通道,水合物发育差。渗漏通道是渗漏型水合物矿体差异成藏的主控因素。

(3)砂体即作为良好的储层,也是储能泄压载体。琼东南盆地研究区内砂体发育的水合物矿体中,流体渗漏强度明显减弱,砂体也是渗漏型水合物矿体差异成藏的主控因素。

参考文献 (References)

[1] 张光学,陈芳,沙志彬,等.南海东北部天然气水合物成藏演化地质

- 过程[J]. *地学前缘*, 2017, 24(4): 15-23. [ZHANG Guangxue, CHEN Fang, SHA Zhibin, et al. The geological evolution process of natural gas hydrate reservoirs in the northeastern South China Sea[J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(4): 15-23.]
- [2] Zhang G X, Yang S X, Zhang M, et al. GMGS2 expedition investigates rich and complex gas hydrate environment in the South China Sea[J]. *Fire in the Ice*, 2014, 14(1): 1-5.
- [3] 张光学, 梁金强, 陆敬安, 等. 南海东北部陆坡天然气水合物藏特征[J]. *天然气工业*, 2014, 34(11): 1-10. [ZHANG Guangxue, LIANG Jinqiang, LU Jing'an, et al. Characteristics of natural gas hydrate reservoirs on the northeastern slope of the South China Sea[J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(11): 1-10.]
- [4] Tréhu A M, Ruppel C, Holland M, et al. Gas hydrates in marine sediments: Lessons from scientific ocean drilling[J]. *Oceanography*, 2006, 19(4): 124-142.
- [5] 梁金强, 张光学, 陆敬安, 等. 南海东北部陆坡天然气水合物富集特征及成因模式[J]. *天然气工业*, 2016, 36(10): 157-162. [LIANG Jinqiang, ZHANG Guangxue, LU Jing'an, et al. Accumulation characteristics and genetic models of natural gas hydrate reservoirs in the NE slope of the South China Sea[J]. *Natural Gas Industry*, 2016, 36(10): 157-162.]
- [6] 陈多福, 苏正, 冯东, 等. 海底天然气渗漏系统水合物成藏过程及控制因素[J]. *热带海洋学报*, 2005, 24(3): 38-46. [CHEN Duofu, SU Zheng, FENG Dong, et al. Formation and its controlling factors of gas hydrate reservoir in marine gas vent system[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2005, 24(3): 38-46.]
- [7] 苏丕波, 何家雄, 梁金强, 等. 南海北部陆坡深水天然气水合物成藏系统及其控制因素[J]. *海洋地质前沿*, 2017, 33(7): 1-10. [SU Pibo, HE Jiaxiong, LIANG Jinqiang, et al. Natural gas hydrate migration and accumulation system and its controlling factors on northern deep water slope of the South China Sea[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2017, 33(7): 1-10.]
- [8] MacDonald I R, Guinasso N L Jr, Sassen R, et al. Gas hydrate that breaches the sea floor on the continental slope of the Gulf of Mexico[J]. *Geology*, 1994, 22(8): 699-702.
- [9] 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.
- [10] Su M, Sha Z B, Zhang C M, et al. Types, characteristics and significances of migrating pathways of gas-bearing fluids in the Shenhu area, northern continental slope of the South China Sea[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2017, 91(1): 219-231.
- [11] 苏丕波, 梁金强, 张子健, 等. 神狐海域扩散型水合物在地震反射剖面上的“亮点”与“暗点”分析[J]. *地学前缘*, 2017, 24(4): 51-56. [SU Pibo, LIANG Jinqiang, ZHANG Zijian, et al. Analysis on the bright spots and dim out of seismic section for diffusion-type hydrate in Shenhu area[J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(4): 51-56.]
- [12] 张伟, 梁金强, 陆敬安, 等. 琼东南盆地典型渗漏型天然气水合物成藏系统的特征与控藏机制[J]. *天然气工业*, 2020, 40(8): 90-99. [ZHANG Wei, LIANG Jinqiang, LU Jing'an, et al. Characteristics and controlling mechanism of typical leakage gas hydrate reservoir forming system in the Qiongdongnan Basin, northern South China Sea[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(8): 90-99.]
- [13] Kuang Z G, Cook A, Ren J F, et al. A flat-lying transitional free gas to gas hydrate system in a sand layer in the Qiongdongnan Basin of the South China Sea[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(24): e2023GL105744.
- [14] Liang J Q, Zhang W, Lu J A, et al. Geological occurrence and accumulation mechanism of natural gas hydrates in the eastern Qiongdongnan Basin of the South China Sea: Insights from site GMGS5-W9-2018[J]. *Marine Geology*, 2019, 418: 106042.
- [15] Paull C K, Matsumoto R, Wallace P J. Gas hydrate sampling on the Blake Ridge and Carolina Rise[R]//Proceedings of the Ocean Drilling Program. Texas: Ocean Drilling Program, College Station, 1996.
- [16] Fujii T, Nakamizu M, Tsuji Y, et al. Methane-hydrate occurrence and saturation confirmed from core samples, eastern Nankai Trough, Japan[M]//Collett T, Johnson A, Knapp C, et al. Natural Gas Hydrates: Energy Resource Potential and Associated Geologic Hazards. AAPG, 2009, 89: 385-400.
- [17] 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.
- [18] Kim G Y, Narantsetseg B, Ryu B J, et al. Fracture orientation and induced anisotropy of gas hydrate-bearing sediments in seismic chimney-like-structures of the Ulleung Basin, East Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 47: 182-194.
- [19] 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: Solid Earth*, 2009, 114(B7): B07102.
- [20] 钱进, 王秀娟, 董冬冬, 等. 裂隙充填型天然气水合物储层的各向异性饱和度新估算及其裂隙定量评价[J]. *地球物理学进展*, 2019, 34(1): 354-364. [QIAN Jin, WANG Xiujuan, DONG Dongdong, et al. New estimation of anisotropic saturation and fracture quantitative evaluation for fracture-filling gas hydrate reservoir[J]. *Progress in Geophysics*, 2019, 34(1): 354-364.]
- [21] Wei J G, Liang J Q, Lu J A, et al. Characteristics and dynamics of gas hydrate systems in the northwestern South China Sea: Results of the fifth gas hydrate drilling expedition[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 110: 287-298.
- [22] Deng W, Liang J Q, Zhang W, et al. Typical characteristics of fracture-filling hydrate-charged reservoirs caused by heterogeneous fluid flow in the Qiongdongnan Basin, northern South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, 124: 104810.
- [23] Ren J F, Qiu H J, Kuang Z G, et al. Deep-large faults controlling on the distribution of the venting gas hydrate system in the middle of the Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. *China Geology*, 2024, 7(1): 36-50.
- [24] 施和生, 杨计海, 张迎朝, 等. 琼东南盆地地质认识创新与深水领域天然气勘探重大突破[J]. *中国石油勘探*, 2019, 24(6): 691-698. [SHI Hesheng, YANG Jihai, ZHANG Yingzhao, et al. Geological understanding innovation and major breakthrough to natural gas exploration in deep water in Qiongdongnan Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(6): 691-698.]

- [25] 张功成, 纪沫, 陈莹, 等. 琼东南盆地“气聚集带”的成藏特征与勘探潜力[J]. *石油学报*, 2024, 45(1): 226-240. [ZHANG Gongcheng, JI Mo, CHEN Ying, et al. Accumulation characteristics and exploration potentials of gas accumulation belt in Qiongdongnan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2024, 45(1): 226-240.]
- [26] 张功成, 曾清波, 苏龙, 等. 琼东南盆地深水陵水 17-2 大气田成藏机理[J]. *石油学报*, 2016, 37(增刊 1): 34-46. [ZHANG Gongcheng, ZENG Qingbo, SU Long, et al. Accumulation mechanism of LS 17-2 deep water giant gas field in Qiongdongnan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(S1): 34-46.]
- [27] 张迎朝, 徐新德, 甘军, 等. 琼东南盆地深水大气田地质特征、成藏模式及勘探方向研究[J]. *地质学报*, 2017, 91(7): 1620-1633. [ZHANG Yingzhao, XU Xinde, GAN Jun, et al. Study on the geological characteristics, accumulation model and exploration direction of the giant deepwater gas field in the Qiongdongnan Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91(7): 1620-1633.]
- [28] Lai H F, Qiu H J, Liang J Q, et al. Geochemical characteristics and gas-to-gas correlation of two leakage-type gas hydrate accumulations in the Western Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2022, 96(2): 680-690.
- [29] Lai H F, Fang Y X, Kuang Z G, et al. Geochemistry, origin and accumulation of natural gas hydrates in the Qiongdongnan Basin, South China Sea: Implications from site GMGS5-W08[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, 123: 104774.
- [30] Zhang W, Liang J Q, Su P B, et al. Distribution and characteristics of mud diapirs, gas chimneys, and bottom simulating reflectors associated with hydrocarbon migration and gas hydrate accumulation in the Qiongdongnan Basin, northern slope of the South China Sea[J]. *Geological Journal*, 2019, 54(6): 3556-3573.
- [31] Zhang W, Liang J Q, Yang X L, et al. The formation mechanism of mud diapirs and gas chimneys and their relationship with natural gas hydrates: insights from the deep-water area of Qiongdongnan Basin, northern South China Sea[J]. *International Geology Review*, 2020, 62(7-8): 789-810.
- [32] 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. [XU Huaning, YANG Shengxiong, ZHENG Xiaodong, et al. Seismic identification of gas hydrate and its distribution in Shenhu Area, South China Sea[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(7): 1691-1698.]
- [33] 靳佳澎, 王秀娟, 陈端新, 等. 基于测井与地震多属性分析神狐海域天然气水合物分布特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37(5): 122-130. [JIN Jiapeng, WANG Xiujuan, CHEN Ruixin, et al. Distribution of gas hydrate in Shenhu Area: identified with well log and seismic multi-attributes[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2017, 37(5): 122-130.]
- [34] 沙志彬, 梁金强, 郑涛, 等. 地震属性在天然气水合物预测中的应用[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33(5): 185-192. [SHA Zhibin, LIANG Jinqiang, ZHENG Tao, et al. The application of seismic attributes to the prediction of gas hydrates[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2013, 33(5): 185-192.]
- [35] 孙运宝. 南海北部陆坡神狐海域含水合物沉积层时频特征提取及识别方法[J]. *地球物理学进展*, 2013, 28(4): 2155-2163. [SUN Yunbao. Time-frequency signature extraction and recognition of unconsolidated sediments containing gas hydrate and free gas in Shenhu area, Northern South China Sea[J]. *Progress in Geophysics*, 2013, 28(4): 2155-2163.]
- [36] Oliveira S, Vilhena O, da Costa E. Time-frequency spectral signature of Pelotas Basin deep water gas hydrates system[J]. *Marine Geophysical Researches*, 2010, 31(1-2): 89-97.
- [37] 孙建孟, 罗红, 焦滔, 等. 天然气水合物储层参数测井评价综述[J]. *地球物理学进展*, 2018, 33(2): 715-723. [SUN Jianmeng, LUO Hong, JIAO Tao, et al. Review of the well logging assessment of natural gas hydrate reservoir parameters[J]. *Progress in Geophysics*, 2018, 33(2): 715-723.]
- [38] 钟广法, 张迪, 赵峦. 大洋钻探天然气水合物储层测井评价研究进展[J]. *天然气工业*, 2020, 40(8): 25-44. [ZHONG Guangfa, ZHANG Di, ZHAO Luanxiao. Current states of well-logging evaluation of deep-sea gas hydrate-bearing sediments by international scientific ocean drilling (DSDP/ODP/IODP) programs[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(8): 25-44.]
- [39] 洪有密. 测井原理与综合解释[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2007. [HONG Youmi. Logging Principles and Comprehensive Interpretation[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2007.]
- [40] 楚泽涵, 高杰, 黄隆基, 等. 地球物理测井方法与原理(上册)[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007. [CHU Zehan, GAO Jie, HUANG Longji, et al. Geophysics Well Logging Methods and Principles (Volume I)[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007.]
- [41] 谢莹峰, 陆敬安, 匡增桂, 等. 南海神狐海域水合物三相混合层测井评价方法研究[J]. *现代地质*, 2022, 36(1): 182-192. [XIE Yingfeng, LU Jing'an, KUANG Zengui, et al. Well logging evaluation for three-phase zone with gas hydrate in the Shenhu Area, South China Sea[J]. *Geoscience*, 2022, 36(1): 182-192.]
- [42] Xie Y F, Lu J A, Cai H M, et al. The in-situ NMR evidence of gas hydrate forming in micro-pores in the Shenhu area, South China Sea[J]. *Energy Reports*, 2022, 8: 2936-2946. doi: 10.1016/j.egy.2022.01.097.
- [43] Kang D J, Lu J A, Zhang Z J, et al. Fine-grained gas hydrate reservoir properties estimated from well logs and lab measurements at the Shenhu gas hydrate production test site, the northern slope of the South China sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 122: 104676.
- [44] Milkov A V, Dickens G R, Claypool G E, et al. Co-existence of gas hydrate, free gas, and brine within the regional gas hydrate stability zone at Hydrate Ridge (Oregon margin): evidence from prolonged degassing of a pressurized core[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 222(3-4): 829-843.