

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2019091802

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

黄伟^{1,2}, 张伟^{1,2}, 梁金强^{1,2}, 尚久靖^{1,2}, 孟苗苗^{1,2}, 林霖^{1,2}, 徐梦婕^{1,2}

1. 自然资源部海底矿产资源重点实验室, 广州 510760

2. 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广州 510760

摘要:南海北部陆坡尖峰北盆地发育良好的气源及含气流体运聚疏导条件,具备较好的天然气水合物成藏潜力。为深入揭示尖峰北盆地水合物的成藏地质特征,基于高精度三维多道地震、浅地层剖面、多波束资料,深入分析了研究区深、浅部含气流体运聚疏导通道的地质、地球物理特征及对水合物成藏的控制作用。详细刻画了研究区深、浅部主要含气流体疏导通道的形态特征、发育规模、分布特点及对含气流体运聚的控制作用;重点剖析了深、浅部含气流体疏导通道组合特征及与水合物分布的耦合关系,最后结合水合物成藏地质条件,探讨了研究区水合物的成藏模式及影响因素。研究表明:尖峰北盆地的含气流体疏导通道主要以断裂型为主,亮点反射、反射空白带、BSR、声空白、声浑浊等含气流体运聚及水合物赋存指示标志多出现在沟源断层、古隆起伴生断层、多边形断层的顶部及邻近区域。以T3反射界面为界,其下伏沟源断层、古隆起伴生断层与上覆多边形断层构成的深、浅部含气流体疏导通道在垂向上相连通,沟通了深部气源层与浅层水合物稳定域,形成了“沟源断层—多边形断层”与“古隆起伴生断层—多边形断层”两种含气流体运移与水合物成藏模式。多边形断层的存在一方面促进了含气流体向浅层发生“中继疏导”,控制水合物富集成藏;另一方面,在多边形断层密集发育段,强烈的流体充注会引起局部温压平衡破坏和水合物分解、渗漏,导致“断续型”BSR的产生。浅层气体的渗漏和扩散可以持续作用至海底并对海底形态进行改造,导致海底滑塌、断裂、麻坑、丘状体等一系列海底微地貌的形成。

关键词:多边形断层;含气流体;运移通道;水合物;尖峰北盆地;中国南海北部

中图分类号:P736.1

文献标识码:A

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

HUANG Wei^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}, LIANG Jinqiang^{1,2}, SHANG Jiuqing^{1,2}, MENG Miaomiao^{1,2}, LIN Lin^{1,2}, XU Mengjie^{1,2}

1. MNR Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510760, China

2. Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou 510760, China

Abstract: The Jianfengbei Basin, located on the northern slope of the South China Sea, has high potential of gas hydrate accumulation. There are abundant gas sources and good conditions for migration and accumulation of gas-bearing fluids. In order to reveal the geological characteristics of gas hydrate accumulations in the basin, various types of data, such as high-precision 3D multi-channel seismic data, sub-bottom profiles and multi-beam data are collected and analyzed, and the geological and geophysical characteristics of the deep and shallow pathways for gas-bearing fluid migration and accumulation as well as their controlling effects on gas hydrate accumulation are carefully studied. Morphology, size and distribution patterns of the main gas-bearing fluid migration pathways in both the deep and shallow parts and their controlling factors are described in details. The combination characteristics of the deep and shallow gas-bearing fluid migration pathways and their coupling relationship with gas hydrate distribution are analyzed. Finally, in consideration of the geological conditions for the formation of gas hydrate, accumulation models and influencing factors are discussed. The study shows that the pathways for gas-bearing fluid migration in the Jianfengbei Basin are dominated by faults. All the features, such as bright-spot reflection, reflective blank zone, BSR, acoustic blank, acoustic turbidity and other geophysical characteristics, suggest that gas-bearing fluid migration and gas hydrate mostly occur on the top and/or

资助项目:国家自然科学基金青年科学基金项目“琼东南盆地双似海底反射层成因及其与天然气水合物动态成藏关系研究”(41806071);地质调查项目(DD20190222)

作者简介:黄伟(1991—),男,硕士,主要从事天然气水合物地质研究, E-mail: acahw_1991@foxmail.com

通讯作者:梁金强(1967—),男,教授级高级工程师,从事天然气水合物勘查研究工作, E-mail: ljqiang@hydzn.cn

收稿日期:2019-09-18; **改回日期:**2019-11-15. 蔡秋蓉编辑

in the places near the source connected faults, paleo-uplifts associated faults or polygonal faults. Bounded by T3 reflection interface, the gas-bearing fluid migration pathways composed of the faults mentioned above linked vertically the deep gas source layer to the gas hydrate stability zone in the shallow part. Based upon the above, two gas-bearing fluid migration and hydrate accumulation models, "source -connected fault-polygonal fault" and "paleo-uplift associated faults -polygonal fault" are proposed in this paper. The existence of polygonal faults has two functions, On one hand, it promotes gas-bearing fluids "inherited migration" into the shallow layers and controls the accumulation of gas hydrates; on the other hand, in the layer where polygonal faults densely developed, strongly fluid charging may cause the destruction of local temperature and pressure balance which leads to gas hydrate decomposition and leakage, and "intermittent" BSR. The continuing effect of shallow gas leakage will modify the seabed morphology, and lead to the formation of submarine micro-geomorphology, such as seabed slumping, seabed faults, pockmarks and mound-like features.

Key words: polygonal fault; gas-bearing fluid; migration pathway; gas hydrate; Jianfengbei Basin; northern South China Sea

天然气水合物是 21 世纪最具商业开发前景的清洁能源之一, 广泛分布于深水陆坡、陆隆和海台地区^[1-3]。在世界范围内, 主动及被动大陆边缘盆地经勘查及钻探证实了水合物具有巨大的勘探前景^[4-6]。据估算, 全球天然气水合物储量约为 $1.5 \times 10^{16} \text{ m}^3$, 其中 97% 储量在海底^[7]。

长期以来, 人们普遍认为断裂、古河道、气烟囱、管状通道、泥底辟、盐底辟等构造或通道与流体运移及水合物藏的形成具有密切联系^[8-13], 在地震剖面中常伴随出现 BSR、空白带、反射同相轴下拉、增强反射等一系列指示水合物运聚成藏的地球物理响应^[14-16]。近年来, 随着地震勘探精度的不断提高及三维地震勘探资料的广泛应用, 在世界多个深水沉积盆地中发现广泛存在多边形断层^[17-19], 并已被证实是浅层流体运移的有效疏导通道, 对水合物的富集成藏具有重要控制作用^[20-21]。流体疏导通道常单独存在或相互配置组合, 形成深、浅部流体疏导通道的优势组合, 共同控制深部流体持续向浅层运移聚集, 对水合物的富集及分布具有重要影响^[22-24]。温度和压力条件是影响水合物稳定赋存的最重要因素, 构造运动、沉积效应、地温梯度、海平面变化等均会引起水合物稳定域的改变, 制约水合物成藏甚至导致早期水合物藏的分解破坏^[25-26]。水合物分解释放的甲烷气体在海底浅层发生聚集和渗漏, 在浅地层剖面中出现声浑浊、声空白等声学响应^[27-28]。气体的持续渗漏和逸散会对海底地形产生改造, 形成海底麻坑、丘状体等一系列微地貌^[29-30], 逸散出海底进入海水中的甲烷气体形成羽状流, 甚至进一步发展形成海底冷泉系统^[31]。

本文研究区位于南海北部陆坡尖峰北盆地, 其在构造及沉积演化上与北部邻区神狐海域类似。勘探实践表明, 神狐海域发育一系列指示水合物富集的地质、地球物理、地球化学异常响应, 并经钻探获取了多成因类型、多产状的水合物实物样品^[3,32], 揭示出巨大的水合物勘探前景。神狐海域水合物

成藏特征显示: 水合物矿体分布与下伏活跃的流体疏导系统如泥火山、底辟、断层、气烟囱等具有良好的空间耦合关系, 热解气、生物气多气源供给及多类型含气流体疏导组合是控制水合物富集成藏的重要因素。受限于地震勘探资料精度, 前人对尖峰北盆地的研究多集中于构造、沉积等基础地质及深部油气地质特征方面^[33], 而较少关注晚中新世以来(T3 以上)浅部地层的地质结构特征, 鲜有对浅层含气流体运聚疏导条件及与水合物富集成藏关系的研究。尖峰北盆地自区域沉降阶段以来, 在断裂疏导条件较微弱的情况下, 浅层流体运聚疏导通道的分布特点, 深、浅部含气流体疏导通道的组合特征及对水合物富集的控制作用等问题仍有待深入探究。2016 年广州海洋地质调查局在尖峰北盆地采集的高精度三维多道地震资料, 为深入刻画尖峰北盆地含气流体运聚疏导系统、揭示研究区水合物成藏特征提供了有利条件。本文依托高精度三维地震、浅地层剖面、多波束资料, 对尖峰北盆地深水区开展详细的地质、地球物理研究, 以明确研究区发育的含气流体疏导通道类型、特征及不同疏导通道间的配置组合联系, 揭示含气流体运聚疏导组合对水合物富集的控制作用, 为尖峰北盆地水合物成藏研究提供参考和借鉴。

1 地质背景

尖峰北盆地位于南海北部大陆边缘南部, 属于典型的新生代沉积盆地, 位于水深 1 000~3 000 m 的陆坡深水区, 地形变化较大^[33](图 1a, 1b)。其北部是珠江口盆地珠二坳陷, 南部是南海中央海盆, 西部为双峰盆地, 东部为潮汕坳陷。研究区位于尖峰北盆地的南部(19°06'~19°18'N、115°30'~115°45'E), 距离海南省三亚市以东约 700 km(图 1a)。海底地形呈北西—南东倾向, 水深范围约为 2 600~3 000 m, 水深线走向大体与海岸线平行。海底地貌

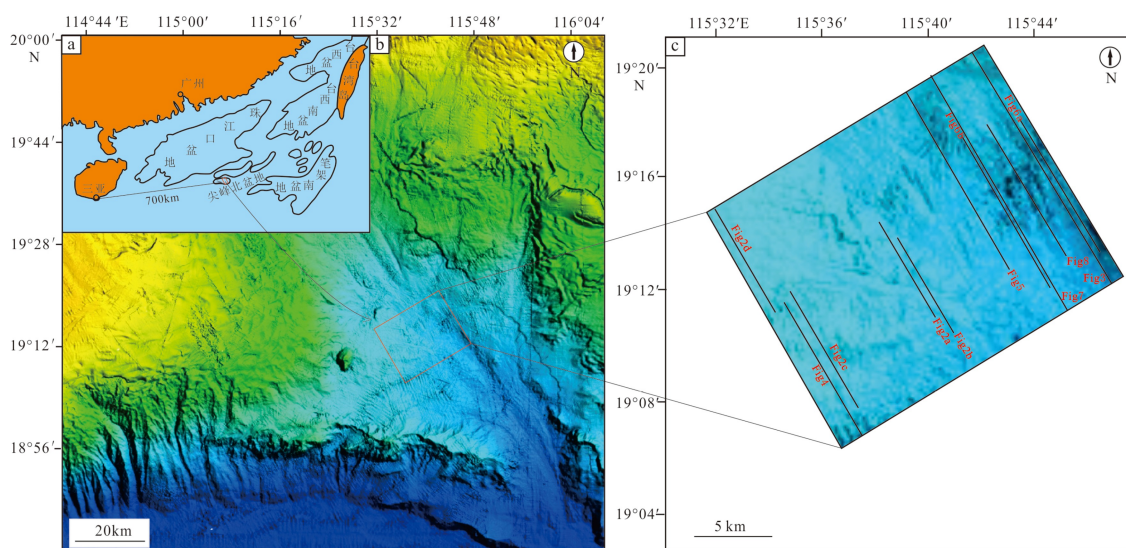


图1 研究区区域位置图(a)及多波束地形图和局部放大图(b、c)

Fig.1 a. The location of study area, b. Multi-beam topographic map of the study area, c. Partially enlarged (b)

形态复杂多样,包括海底峡谷、深海斜坡、海槽、海脊、海山、滑坡扇等多种类型^[32,34](图1b, 1c)。

尖峰北盆地新生代构造、沉积演化特征与珠江口盆地白云凹陷较相似,总体上分为3个阶段:古新世—始新世为断陷盆地演化阶段,盆地内部接受广泛的中—深湖相沉积及辫状河三角洲沉积;渐新世—中中新世盆地进入拗陷演化阶段,沉积物由陆相逐步过渡为海陆过渡相和海相;晚中新世—全新世为区域沉降阶段,盆地及其围区以稳定的浅海—半深海相沉积为主^[33,35]。通过与北部邻区神狐海域进行地层对比,尖峰北盆地新生代以来自下而上可划分出Tg、T8、T7、T6、T5、T4、T3、T2、T1等层序界面,其中T6界面以下广泛发育三角洲、深湖—半深海沉积,构成尖峰北盆地深部重要生烃层系^[33,35]。

尖峰北盆地地质构造复杂,断裂活动发育。古近纪底部断裂多集中在凸起和凹陷边界,形成控凹边界断层,将古近系分割成多个孤立箕状断陷^[24];沉积凹陷内部发育一系列板状正断层,通常切割深部生烃层系并延伸至浅部地层。受前新生代构造—岩浆活动影响,新生代基底分布多处基岩古隆起并诱发形成一系列古隆起伴生断层。晚渐新世形成的区域性厚层泥岩中广泛发育多边形断层。活跃的构造运动常引起深部海相超压泥质岩类的塑性流动,为大规模流体活动,如泥火山、泥底辟、气烟囱及其他伴生构造的形成提供了丰富的物质基础及动力条件^[36]。勘探实践表明,尖峰北盆地古近系最大沉积厚度超过4 500 m,发育充足的生烃物质基础、良好的储盖及含气流体运聚疏导条件,具备较

好的油气及水合物勘探潜力^[33]。

2 数据和方法

2.1 多波束

多波束资料的采集采用EM122多波束测深系统,工作频率为12 kHz,测深范围为20~11 000 m,波束角为1°×1°,每条带波束数为288,最大覆盖角度为150°。EM122多波束测深系统具有大覆盖宽度、高分辨率、高测量精度及获取高质量海底底质和水体信息的特征。在多波束图中可识别出海底冲沟、冲沟脊、海底麻坑、海底丘等海底构造现象(图1b, 1c)。

2.2 浅地层剖面

浅地层剖面测量采用德国ATLAS公司生产的Atlas Parasound P70型深水参量浅层剖面仪完成。浅层剖面仪发射频率为PHF18~33 kHz,最大发射能量为70 kW,脉冲长度为0.167~25 ms。设备工作水深为10~11 000 m,适用于全海域范围海底地质结构的调查分析。在浅层地震剖面中识别出“声浑浊”、“声空白”等指示浅层游离气渗漏、逸散的声学响应及海底麻坑、丘状体、海底滑塌、海底断裂等海底微地貌。

2.3 三维多道地震

三维地震资料由广州海洋地质调查局“奋斗四号”船于2016年度采集完成,三维覆盖面积为340 km²。

地震采集系统应用震源容量为 540 Cu.in 的气枪作为震源,震源压力为 2 000 PSI,气枪沉放深度为 5 m,电缆沉放深度为 5 m。接收道数为 360 道,覆盖次数为 45 次,道间距为 6.25 m,采样率为 1.0 ms。采集的地震数据经过简单流程处理后加载到 Geofram4.5 上进行地质解释,主要识别出 BSR、沟源断层、古隆起伴生断层、多边形断层、增强反射、反射空白带等指示气体运聚及水合物富集的地震反射现象。

3 结果

3.1 海底典型微地貌结构及声学响应特征

海底浅层沉积物多处于未成岩阶段,沉积物疏松多孔,多为未胶结或弱胶结状态,海底形态易受浅层构造、流体活动及底流改造的影响。通过对浅

地层剖面的观察和解释,在研究区识别出海底滑塌、海底断裂、海底麻坑、丘状体等微地貌结构,其在浅地层剖面上的响应特征如下:①海底地层倾角相对较大的斜坡位置,在特定地质因素触发下,斜坡上部沉积物发生失稳滑动并在坡脚形成滑塌堆积体(图 2a);②受海底浅层构造及流体活动影响,诱发海底断裂的产生,断裂倾角约为 80~85°(图 2b);③广泛分布于海底,形态较规则的海底麻坑和丘状体。它们在浅地层剖面中多独立分布,呈近似对称的“V”型形态。相邻麻坑和丘状体之间的距离约 2~3 km,单个麻坑和丘状体直径约为几十米至数百米,深度约为几米至十几米(图 2c, 2d)。这些异常海底微地貌的下部均发育“声空白”、“声浑浊”等声学异常响应,它们由浅层气体对声波能量的散射和吸收所形成,并导致浅层地震反射同相轴不连续。“声空白”、“声浑浊”的根部位

于海底以下 30~40 m,顶端延伸至海底并终止于海底滑塌、海

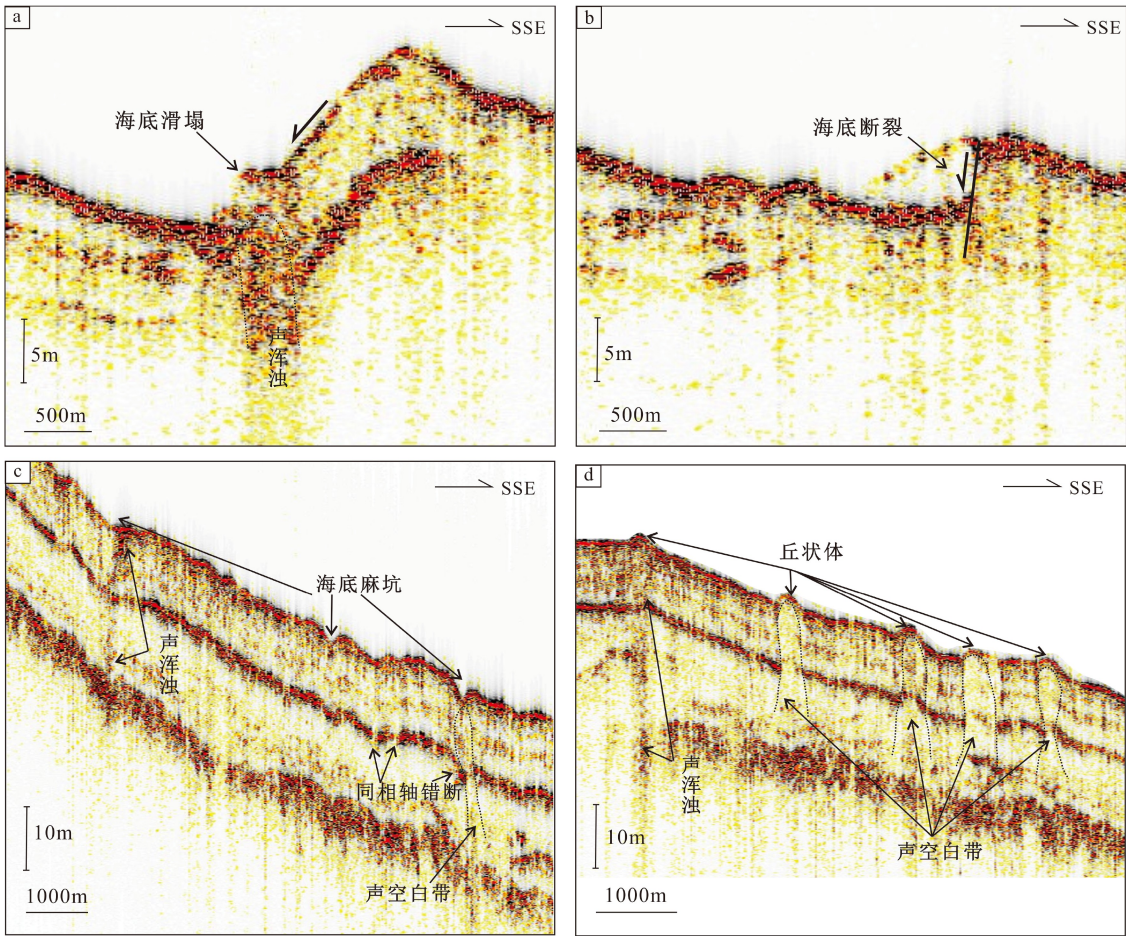


图 2 尖峰北盆地海底典型微地貌结构及声学响应特征浅地层剖面图
a. 海底滑塌, b. 海底断裂, c. 海底麻坑, d. 海底丘状体。

Fig.2 A sub-bottom profile showing typical micro-geomorphic and acoustic response characteristics of the seabed in the Jianfengbei Basin
a. seabed slumping, b. seabed fault, c. seabed pockmark, d. seabed mound-like features.

底麻坑、丘状体的正下方,是浅层气体渗漏的重要指示标志。

3.2 流体运聚疏导通道

3.2.1 沟源断层

沟源断层通常指沟通深部生烃层系、控制深部流体向浅层运移聚集的构造断层。研究区沟源断层主要发育于古近纪沉积凹陷内部,在地震剖面中呈板状形态并成组分布。研究区沟源断层规模较大,向下切割T7层序界面与古近系生烃层系相连通;向上可延伸至T3层序界面,断层垂向延伸长度约数千米,垂向最大断距可达122 m。在沉积凹陷与古隆起的边界发育局部不整合,不整合面下端延伸至沉积凹陷内部与深部生烃层系相连通,上端收敛于T5层序界面(图3)。

3.2.2 古隆起伴生断层

受中生代末期强烈构造活动影响,尖峰北盆地新生代基底发育多个构造古隆起。古隆起主要分布于沉积凹陷边界位置,与围岩地层在地震反射特征上具有显著差异,其内部呈杂乱—模糊反射特征,侧缘局部位置呈强振幅反射,其上部由于沉积间断通常出现地层缺失(图3,图4)。古隆起的形成及周期性活动引起围岩地层发生明显的牵引变

形,导致浅部地层中背斜构造的形成,并在顶部及侧翼诱发形成一系列伴生断层。相较于沟源断层,古隆起伴生断层规模相对较小,长度通常为250~300 m。古隆起侧翼伴生断层向上延伸至T3界面,向下切割T5层序界面及深部生烃层系;古隆起顶部伴生断层规模及密度较大,少数断层可与其上覆多边形断层相贯通,延伸至T2界面以上(图4)。

3.2.3 多边形断层

多边形断层常形成于泥岩、页岩等细粒沉积物中,通常被认为是非构造断层,在南海北部深水沉积盆地中广泛分布^[21,37-38]。研究区广泛发育多边形断层,它们在地震剖面中具有倾向不一、断距较小、层间分布的特征(图5)。多边形断层长度平均为90~150 m,断距3~8 m,断裂密度约为12条/km、倾角约为80~90°,具有明显的层间分布特征,几乎全部分布于T2与T3之间,但在局部构造位置,多边形断层与其下伏构造断层相贯通并延伸至T2界面以上(图4)。多边形断层上部地层具有较连续的低频、弱反射特征,局部位置发育反射空白带;下部地层为中—强振幅连续反射沉积,并被深部构造断层所切割(图5)。T3不整合面的形成导致上覆地层发育“丘”、“凹”相间的沉积特征,多边形断层的发育密度在不同位置呈现明显差异性:在“丘顶”位

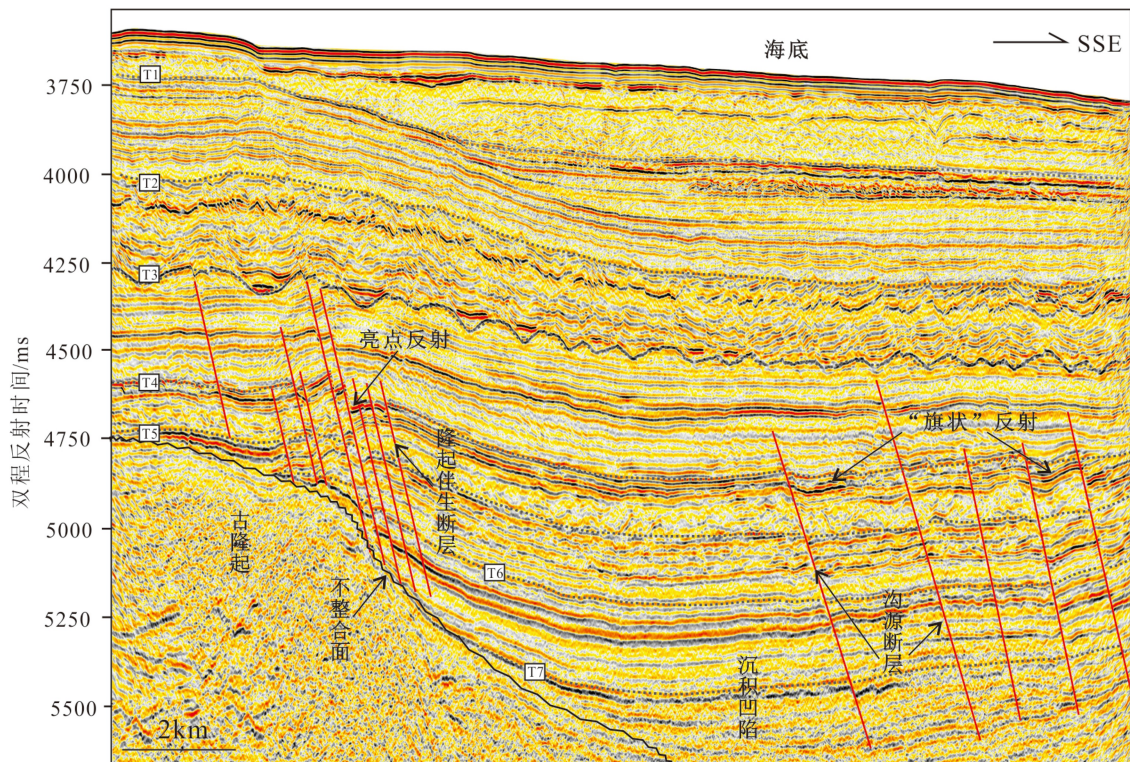


图3 尖峰北盆地沟源断层发育特征多道地震剖面图

Fig.3 The multi-channel seismic profile showing source-connected faults in the Jianfengbei Basin

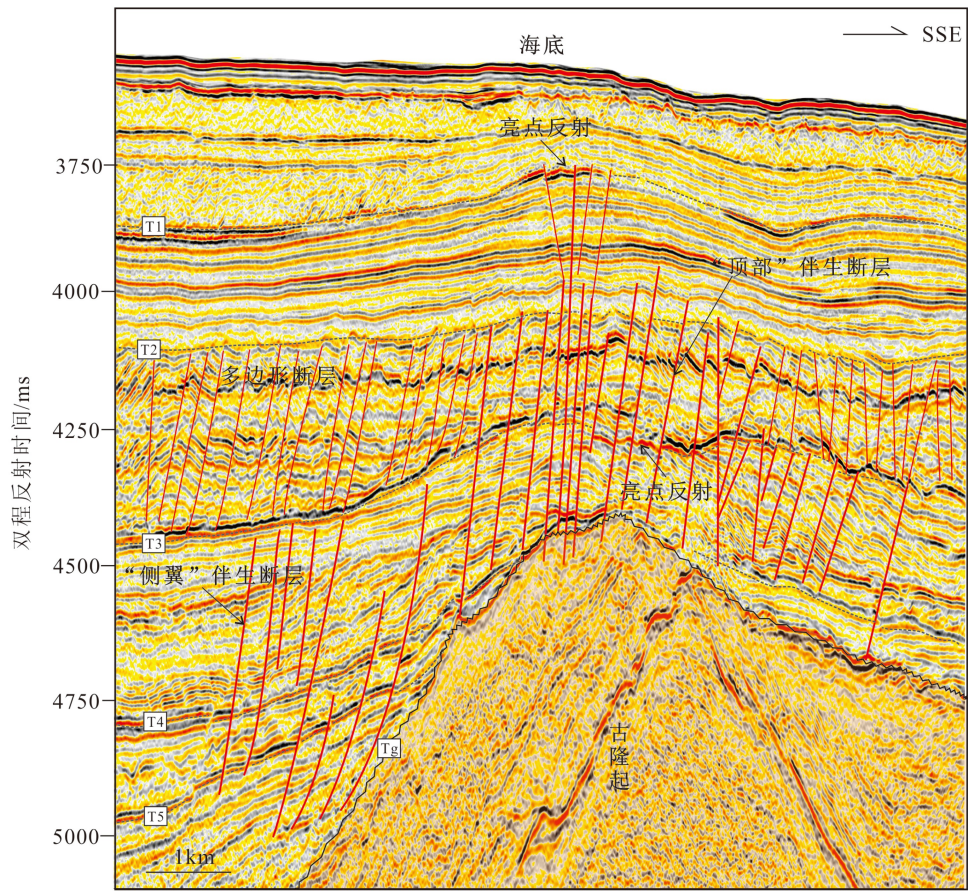


图 4 尖峰北盆地古隆起伴生断层发育特征多道地震剖面图

Fig.4 The multi-channel seismic profile showing paleo-uplift associated faults in the Jianfengbei Basin

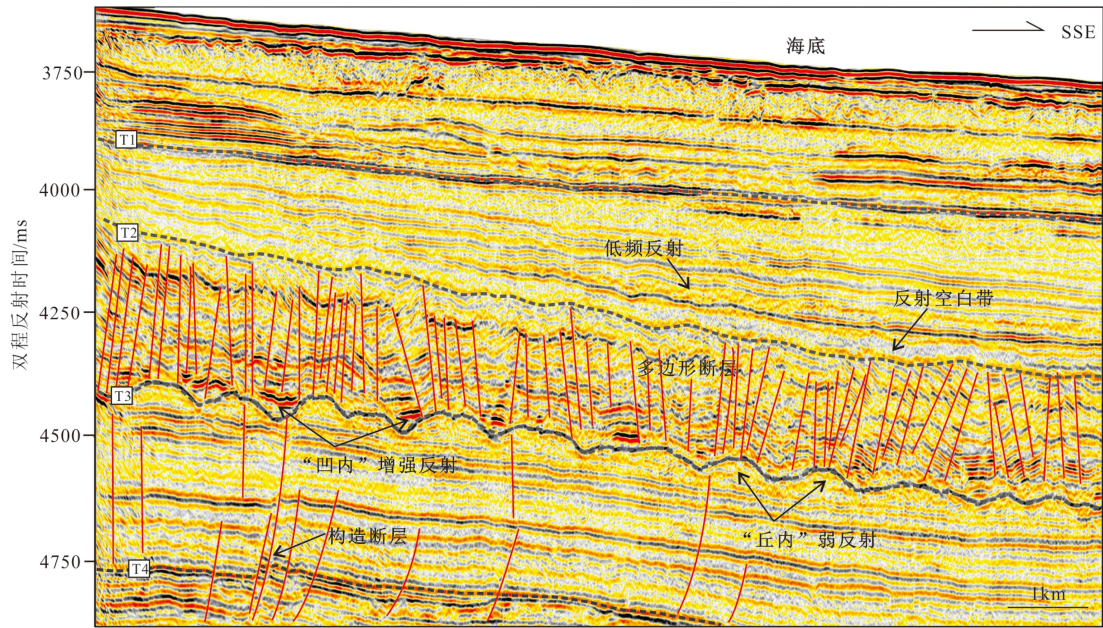


图 5 尖峰北盆地多边形断层发育特征多道地震剖面图

Fig.5 The multi-channel seismic profile showing polygonal faults in the Jianfengbei Basin

置,多边形断层密度较大,“丘内”呈弱振幅反射特征;在“凹内”多边形断层密度较小,呈强振幅反射特征(图 5)。

3.3 “连续型”和“断续型”BSR

通常,似海底反射(Bottom Simulating Reflector,

BSR)是水合物稳定域的底界,其形态特征、振幅强度、分布范围通常是反映水合物富集程度的有利标志^[3]。研究区 BSR 主要分布于 T1 之上,埋藏深度为海底以下 200~260 ms, 近似平行于沉积地层和海底(图 6)。根据 BSR 的形态特征及侧向连续性的差异,在研究区识别出“连续型”和“断续型”两种 BSR 类型。“连续型”BSR 具有与海底极性相反、强振幅反射、侧向连续分布的特点,BSR 延伸长度约 10 km(图 6a)。受深部古隆起及地层局部变形的影响,沿地层上倾方向,BSR 的振幅强度逐渐减弱。BSR 下部呈杂乱的低频反射特征,上部发育厚层弱振幅反射带,侧向延伸十几千米。海底以下 60~250 ms 范围内地层呈弱连续、杂乱反射特征,横向延伸距离约数十千米,为典型的厚层块体流沉

积(Mass Transported Deposits, MTDs),内部可见显著的地震反射同相轴滑动变形构造。“断续型”BSR 振幅强度较弱、侧向连续性较差,延伸长度约 5 km,BSR 在局部位置出现反射间断特征(图 6b)。这些反射间断位置的下部发育明显的气体向上渗漏突破特征,其上部具有低频、模糊反射特征及浅层气体渗漏响应,海底对应位置发育海底滑塌、海底丘等一系列微地貌。

4 讨论

4.1 疏导通道与含气流体运移

4.1.1 深部层系含气流体疏导特征

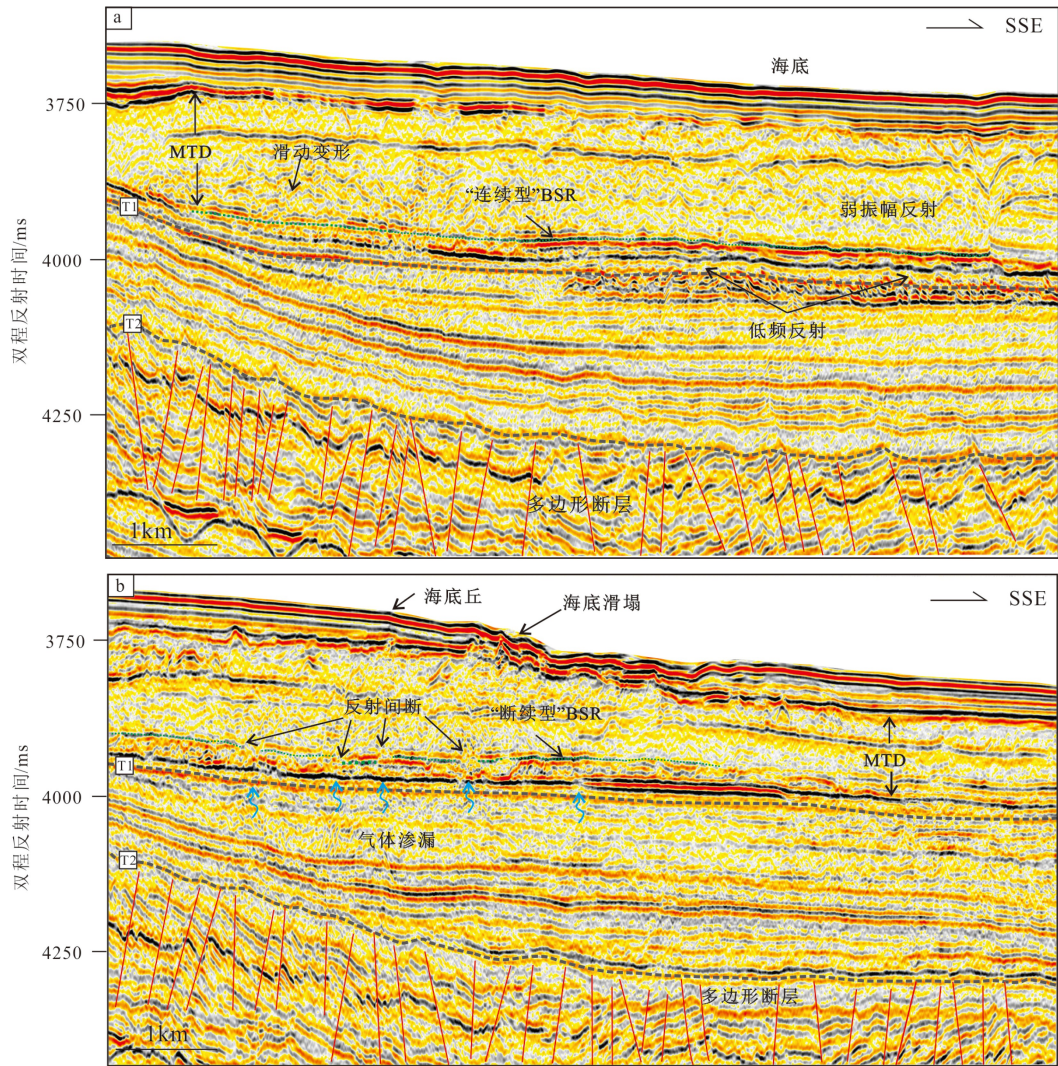


图 6 尖峰北盆地 BSR 分布特征多道地震剖面图
a. “连续型”BSR 分布, b. “断续型”BSR 分布。

Fig.6 A multi-channel seismic profile showing BSR distribution in the Jianfengbei Basin
a. “continuous” BSR distribution, b. “discontinuous” BSR distribution.

古新世—始新世时期,尖峰北盆地处于断陷作用演化阶段,盆地发育多凸多凹的构造格局,断陷及断裂活动频繁^[24]。沉积凹陷内部沟源断层的形成一方面受深部构造活动的控制,另一方面,随着沉积凹陷内部生烃层系压力不断积聚,达到沟源断层的启动压力时,深部含气流体即沿着沟源断层向上发生排驱泄压,并在有利位置发生聚集。研究区在古近纪广泛发育陆相、海陆过渡相沉积,除形成区域性厚层泥质沉积外,盆地内还广泛分布浊积砂体、河道砂体等,构成深部流体聚集的有利场所^[33]。沟源断层两侧的“旗状”反射(图3)及T3不整合界面“凹内”强振幅反射(图5)即可能是深部含气流体沿沟源断裂发生运移并在有利砂质储层中聚集的结果。沟源断层构成连通深部生烃层系与浅部有利储集层的重要疏导通道。

古隆起伴生断层主要受深部构造运动及古隆起活动影响,其中少数“侧翼”伴生断层可与深部生烃层系相沟通,发挥“沟源断层”的作用;大多数古隆起伴生断层虽未直接切割深部生烃层系,但其顶部及侧翼密集的伴生断裂形成构造薄弱带,构成压力排驱及含气流体运移的有效疏导通道,在一定程度上加剧了深部含气流体的疏导能力和影响范围。古隆起顶部浅层背斜中的“亮点”反射即可能是深部含气流体沿古隆起伴生断层垂向运移聚集的结果(图4)。

除沟源断层、古隆起伴生断层等构造断层疏导通道外,沉积凹陷与古隆起边界的局部不整合也是深部含气流体向浅层运移的有效通道。地质历史时期古隆起暴露地表,经历长期风化淋滤改造,发育较好的孔渗结构,且其下倾端与深部生烃层系相连通,构成深部含气流体运移的优势通道。此外,沉积凹陷内部横向连通的浊积砂体构成含气流体侧向运移的有效通道,在遇到切割砂体的构造断层时,含气流体继而转为沿断层向浅层发生垂向运移(图7)。

4.1.2 浅部层系含气流体疏导特征

沟源断层及古隆起伴生断层是尖峰北盆地断陷—拗陷演化阶段深部流体向浅层运移的主要疏导通道。但晚中新世以来,随着沉积盆地进入稳定的区域沉降阶段,构造活动趋于平缓,深部构造断层活动性大大减弱。沟源断层及古隆起伴生断层形成的流体疏导通道多终止于T3界面以下,无法直接将深部含气流体疏导至浅部地层。因而,浅部层系尤其是中中新世以来含气流体疏导条件成为影响气体进一步运移及水合物藏形成的关键因

素。越来越多的研究表明在沉积盆地区域沉降阶段,泥页岩中广泛分布的多边形断层是流体运移的有效通道^[39-40]。Chen^[38]等通过水合物稳定域的定量计算证实了多边形断层对含气流体疏导及水合物分布的控制作用。尽管多边形断层的延伸距离短、断距小,但其平面分布往往是整个区域甚至是盆地尺度,流体疏导能力和影响范围是十分广泛的^[39]。多边形断层的活动及流体疏导具有典型的幕式特征^[41]:当其内部或下伏地层流体压力积累到一定程度后,多边形断层即可活化开启,并进一步诱发浅层微裂隙的产生,多边形断层与伴生的微裂隙共同构成浅部地层流体疏导通道;随着流体的排驱及地层压力传导释放,多边形断层随即闭合继而形成区域性封盖层,直至下一次大规模流体活动及地层超压的产生使其重新活化开启。除多边形断层以外,第四纪以来广泛发育的块体流(MTDs)沉积也构成含气流体运移的有效通道,浅层游离气沿着块体流(MTDs)底界或内部局部高孔渗带以渗漏或扩散形式运移^[42],在温度、压力条件适宜的区域发生稳定聚集,并最终形成水合物藏。

4.1.3 含气流体疏导组合类型及水合物富集成藏

油气及天然气水合物勘探实践表明,深、浅部有效的流体疏导通道组合是控制油气及水合物成藏的关键^[3,23,34]。结合研究区构造地质特点及深、浅部流体疏导通道的分布特征,总结出以下两种流体疏导组合类型:

(1)“沟源断层—多边形断层”流体疏导组合

沉积凹陷内部古近系烃源岩形成的热成因含气流体在地层超压作用下向外发生流体排驱。一方面,深部含气流体在浮力作用下沿凹陷内部横向连通砂体发生侧向运移,在遇到切割砂体的断层时转为沿断层垂向运移;另一方面,含气流体在地层压力驱动下优先沿沟源断层向浅部地层发生垂向疏导,当沟源断层持续疏导深部含气流体至T3界面时,与上覆活化的多边形断层在垂向上相连通。多边形断层继而“接替”沟源断层并继续向浅层疏导含气流体,二者共同构成“沟源断层—多边形断层”垂向流体疏导组合(图7a)。

(2)“古隆起伴生断层—多边形断层”流体疏导组合

古隆起侧翼伴生断裂下倾端多切割深部地层,直接沟通深部烃源岩层系与浅层多边形断层,与上述“沟源断层—多边形断层”的流体疏导组合特征相似,但两类断层的成因机制及发育位置具有差异(图4)。古隆起顶部伴生断裂的发育受深部构造活

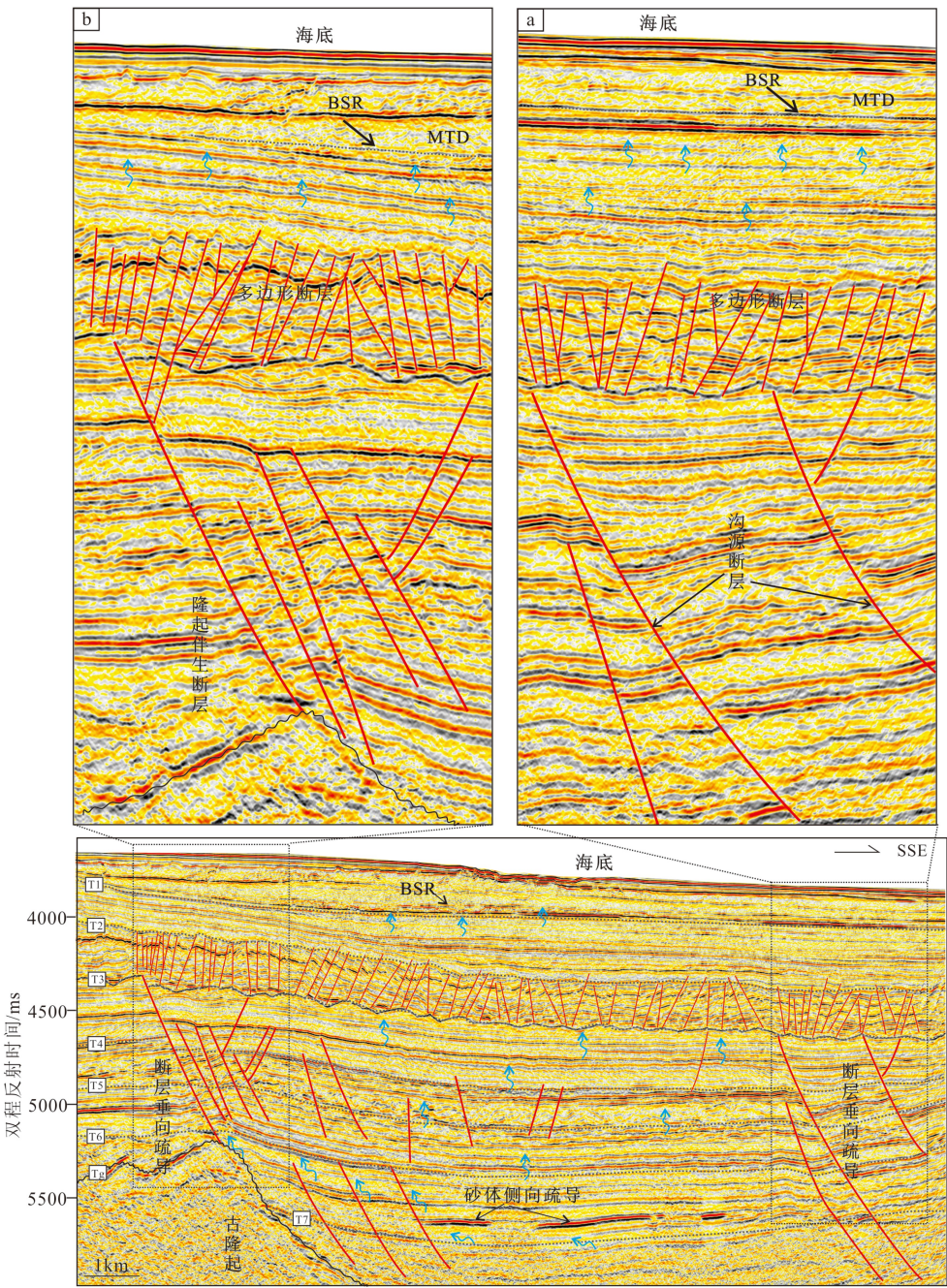


图 7 尖峰北盆地深、浅部地层含气流体疏导组合多道地震剖面图
a. 沟源断层—多边形断层疏导组合, b. 古隆起伴生断层—多边形断层疏导组合。

Fig.7 The multi-channel seismic profile showing gas-bearing fluid migration combination between deep and shallow layers in the Jianfengbei Basin

a. source-connected fault-polygonal fault pathway combination, b. paleo-uplift associated faults-polygonal faults pathway combination.

动及上覆沉积层差异压实作用影响,上端延伸至T3界面与多边形断层相沟通,下端与古隆起边界的不整合相连通,而不整合自身即构成深部含气流体运移的优势通道(图7b)。古隆起顶部及侧翼伴生断层与多边形断层在垂向上有序配置,间接连通了深部生烃层系与浅层水合物稳定域,共同构成“古隆起伴生断层—多边形断层”流体疏导组合模式。

尽管前人多认为多边形断层属于非构造成因,但也有证据表明其发育演化一定程度上受深部构造如底辟、古隆起活动的影响。Sun^[41]认为多边形断层的活化开启具有典型幕式特征,与其内部及下伏地层流体压力的积聚与释放具有密切成因联系,而通过深部构造断层疏导至浅层的含气流体很可能是导致浅部地层形成超压并诱发多边形断层活

化的直接因素。笔者结合研究区深、浅部含气流体疏导通道的发育特征认为:深部沟源断层、古隆起伴生断层与浅层多边形断层不仅在空间上具有良好的组合关系,在构造活动及流体疏导特征上也具有较强的同步性及连续性,正是由于沟源断层与隆起伴生断层的幕式活动及伴随的含气流体排驱诱发了浅层多边形断层的活化开启,才使得含气流体可以由深部烃源层持续疏导至浅层,并最终在水合物稳定域内聚集形成水合物藏(图7)。

值得说明的是,通过深部构造断层疏导至浅层的含气流体通常为热成因流体。前人研究表明晚中新世以来发育的厚层海相沉积自身即为有利的生物气源岩^[38,43-44],具有一定的生物成因气贡献。因而多边形断层可能同时起到控制深部热成因气“中继疏导”及浅部生物成因气“初次运移”的双重疏导作用^[45]。

4.2 含气流体活动对BSR分布的影响

地层温度、压力条件是影响天然气水合物稳定域的最重要因素,沟源断层、古隆起伴生断层、多边形断层等含气流体疏导通道组合一方面能促进深部热成因气、浅层生物气向水合物稳定域运聚并形成水合物藏^[3];但另一方面,深部构造运动及热液流体活动会引起浅层多边形断层及微裂隙的活化开启和热流体上侵,导致水合物稳定域内出现局部温度和压力异常,甚至造成已形成水合物藏的分解^[46]。

流体疏导通道的发育特征及其控制下的含气流体活动特点是造成水合物差异分布的主要因素。图8所示,a区BSR平直且连续、振幅较强、BSR之上发育大套空白反射,可能指示稳定、厚层的水合物聚集;c区BSR总体较连续,但振幅强度明显较弱,反映水合物的饱和度较a区低,这可能与a区位置相对较高,浅层游离气优先向构造高部位运聚有关;b区BSR连续性较差且振幅较弱,表现出“断续型”分布特点,可能指示水合物饱和度较低,矿体分布不连续。值得强调的是,b区下伏多边形断层发育密度明显高于a区和c区,造成b区“断续型”BSR分布可能有两点原因:①多边形断层构成的高效疏导通道促使深部含气流体向浅层急剧充注,并在某些构造薄弱位置突破上覆水合物层的封堵,形成局部渗漏低压区;②受古隆起及深部断裂活动影响,深部含气流体通常具有较高温度,这些热液流体在向浅层渗漏过程中会导致水合物稳定域内出现局部高温异常,造成水合物稳定域的局部破坏^[46]。水合物在这些局部高温、低压区分解为水

和气体,导致水合物层与其下伏游离气层的波阻抗差异减小,局部同相轴振幅明显变弱或“消失”,使得BSR在局部位置表现为“断续型”地震反射特征(图6b,图8b)。

4.3 水合物分解渗漏与浅表层地质异常耦合特征

水合物分解导致的浅层气体渗漏会改造海底地形,形成海底麻坑、丘状体、泥火山等微地貌,含气流体渗漏出海底还可以形成冷泉活动系统^[29-31]。指示水合物发生局部分解的“断续型”BSR分布区(b区)对应的海底位置出现多处海底麻坑和丘状体,这些地质体下部具有显著的气体渗漏指示标志,浅地层剖面中呈现明显的“声空白带”及同相轴“错断”现象,指示浅层气体发生持续且强烈的渗漏作用(图8d, 8e, 8f)。b区下部密集分布的多边形断层、BSR的断续型反射、海底微地貌在垂向上显示良好的耦合关系,且BSR上“反射间断点”的分布位置与海底麻坑、海底丘状体具有较好的对应关系。据此认为,水合物的局部分解及浅层气体持续渗漏导致了海底微地貌的产生,而其下部深、浅层相互联系的复杂流体活动系统及其对水合物稳定域的制约作用是导致水合物局部分解、渗漏及海底微地貌形成的根本控制因素。

4.4 流体疏导组合及水合物运聚成藏模式

通过上述分析,结合研究区构造地质特点及含气流体疏导组合特征,总结出研究区水合物的成藏模式(图9)。受前新生代盆地构造活动影响,相邻古隆起间控制的沉积凹陷构成研究区有利的生烃灶,凹陷内部烃源岩产生的含气热液流体沿着沟源断裂、古隆起伴生断裂、凹陷内部横向连续砂体及古隆起边界不整合等疏导通道持续向浅部运移。当深部热成因含气流体运移至T3界面时,诱发上覆地层中多边形断层活化开启并与下伏构造疏导通道相沟通,并与浅部海相泥岩地层形成的生物成因气发生混合,共同沿着T2与T3之间广泛分布的多边形断层及其诱发的浅层微裂隙、块体流(MTDs)底界及局部高孔渗带以渗漏和扩散的形式向水合物稳定域运移聚集,并最终在温度、压力适宜的区域聚集形成水合物藏。深、浅部含气流体疏导通道的广泛发育及有效配置组合一方面提高了含气流体运聚疏导效率,促进了水合物藏的形成;但另一方面,受深部流体活动影响,浅层密集的疏导通道及剧烈的含气流体活动常导致浅层局部温压异常的产生及水合物稳定域的变化,水合物发生

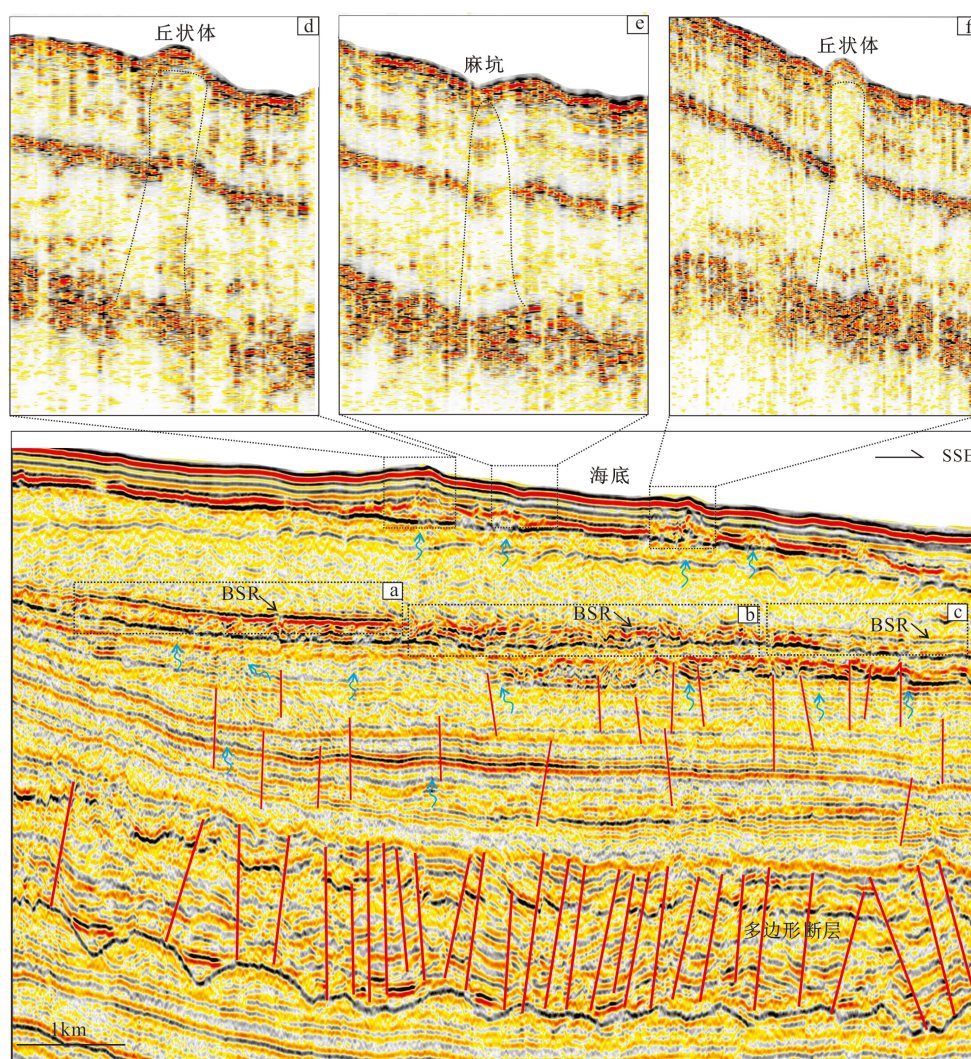


图8 浅层含气流体运移与BSR分布及海底微地貌综合响应特征

a. “强振幅—连续型”BSR, b. “弱振幅—断续型”BSR, c. “弱振幅—连续型”BSR, d. 海底丘状体, e. 海底麻坑, f. 海底丘状体。

Fig.8 Distribution patterns of shallow gas-bearing fluid migration and BSR distribution as well as the comprehensive response of seabed micro-geomorphology

a. strong amplitude-continuous BSR, b. weak amplitude-discontinuous BSR, c. weak amplitude-continuous BSR,

d. seabed mound, e. seabed pockmark, f. seabed mound.

局部分解及气体渗漏和逸散, 最终导致海底麻坑、丘状体、海底断裂等微地貌的产生。

5 结论

(1) 在尖峰北盆地识别出亮点反射、旗状反射、反射空白带、声空白、声浑浊、“连续型”BSR、“断续型”BSR等多种指示含气流体运移及水合物富集的地球物理指示标志。

(2) 研究区主要发育沟源断层、古隆起伴生断层和多边形断层3类含气流体疏导通道, 它们在空间分布及形成机制上具有密切联系, 共同构成“沟源断层—多边形断层”及“古隆起伴生断层—多边

形断层”两种深、浅部含气流体运聚疏导组合类型。这些垂向断裂疏导组合与古隆起边界不整合、凹陷内部侧向连续砂体、浅部微裂隙、块体流(MTDs)底界等含气流体疏导通道直接或间接连通, 共同构成连接深部烃源岩及浅层水合物稳定域的含气流体疏导系统, 控制含气流体运移及水合物藏的形成。

(3) 受深部构造运动及流体活动影响, 浅部地层常诱发剧烈的含气流体活动导致水合物稳定域的局部破坏及水合物分解渗漏, 并对海底地形形成改造, 造成“海底麻坑”、“海底丘状体”、“海底滑塌”、“海底断裂”等一系列微地貌的产生。

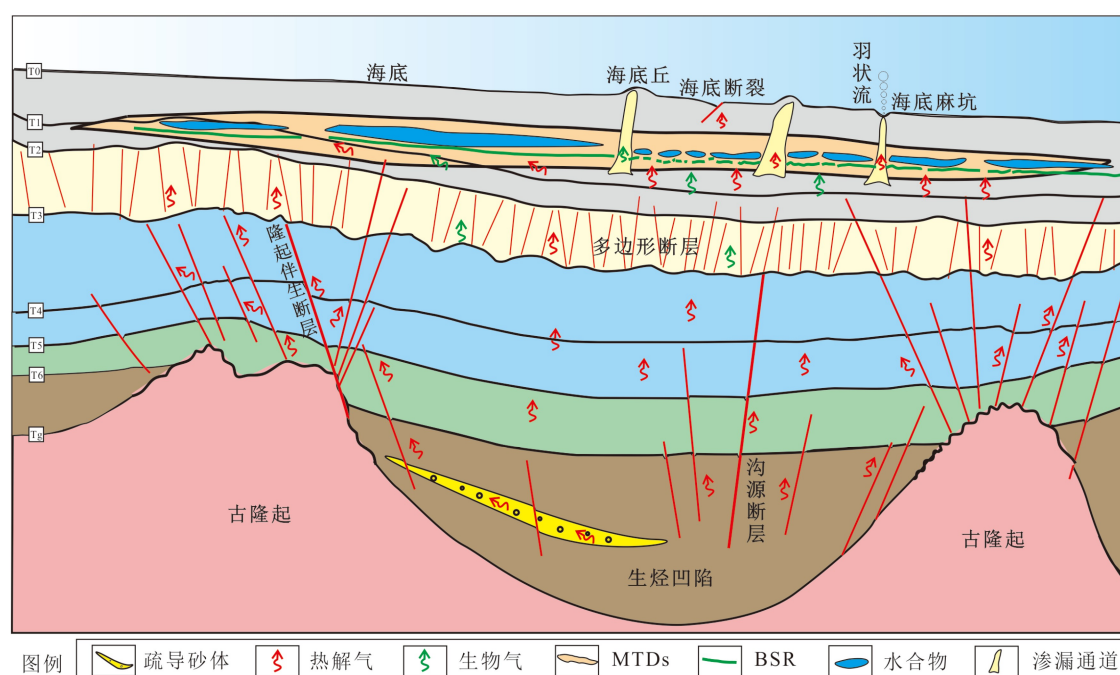


图 9 尖峰北盆地天然气水合物成藏模式图

Fig.9 Gas hydrate accumulation model of the Jianfengbei Basin.

参考文献 (References)

- [1] Collett T S, Bird K J, Kvenvolden K A, et al. Geologic interrelations relative to gas hydrates within the North Slope of Alaska[R]. Open-File Report 88-389, U.S. Geological Survey-Department of Energy, 1988.
- [2] Hornbach M J, Saffer D M, Holbrook W S, et al. Three-dimensional seismic imaging of the Blake Ridge methane hydrate province: evidence for large, concentrated zones of gas hydrate and morphologically driven advection [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113 (B7): B07101.
- [3] 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.
- [4] Milkov A V, Sassen R. Thickness of the gas hydrate stability zone, Gulf of Mexico continental slope [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2000, 17(9): 981-991.
- [5] Freifeld B, Kneafsey T, Pruess J, et al. X-ray scanner for ODP Leg 204: drilling gas hydrates on hydrate ridge, Cascadia continental margin[R]. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2002.
- [6] Tinivella U, Loreto M F, Accaino F. Regional versus detailed velocity analysis to quantify hydrate and free gas in marine sediments: the South Shetland Margin case study[M]//Long D, Lovell M A, Rees J R, et al. *Sediment-Hosted Gas Hydrates: New Insights on Natural and Synthetic Systems*. Geological Society, London, Special Publications, 2009.
- [7] Makogon Y F. Natural gas hydrates – A promising source of energy [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2010, 2(1): 49-59.
- [8] Taylor M H, Dillon W P, Pecher I A. Trapping and migration of methane associated with the gas hydrate stability zone at the Blake Ridge Diapir: new insights from seismic data [J]. *Marine Geology*, 2000, 164(1-2): 79-89.
- [9] Løseth H, Gading M, Wensaas L. Hydrocarbon leakage interpreted on seismic data [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26(7): 1304-1319.
- [10] Berndt C. Focused fluid flow in passive continental margins [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2005, 363(1837): 2855-2871.
- [11] Gay A, Lopez M, Cochonat P, et al. Isolated seafloor pockmarks linked to BSRs, fluid chimneys, polygonal faults and stacked Oligocene-Miocene turbiditic palaeochannels in the Lower Congo Basin [J]. *Marine Geology*, 2006, 226(1-2): 25-40.
- [12] López C, Spence G, Hyndman R, et al. Frontal ridge slope failure at the northern Cascadia margin: margin-normal fault and gas hydrate control [J]. *Geology*, 2010, 38(11): 967-970.
- [13] 李磊, 裴都, 都鹏燕, 等. 海底麻坑的构型、特征、演化及成因——以西非木尼河盆地陆坡为例[J]. *海相油气地质*, 2013, 18(4): 53-58. [LI Lei, PEI Du, DU Pengyan, et al. Architecture, character, evolution and genesis of seabed pockmarks: a case study to the continental slope in Rio Muni basin, West Africa [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2013, 18(4): 53-58.]
- [14] Cathles L M, Su Z, Chen D F. The physics of gas chimney and pockmark formation, with implications for assessment of seafloor hazards and gas sequestration [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2010, 27(1): 82-91.

- [15] Cartwright J, Santamarina C. Seismic characteristics of fluid escape pipes in sedimentary basins: implications for pipe genesis [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 65: 126-140.
- [16] Paganoni M, Cartwright J A, Foschi M, et al. Relationship between fluid-escape pipes and hydrate distribution in offshore Sabah (NW Borneo) [J]. *Marine Geology*, 2018, 395: 82-103.
- [17] Lonergan L, Cartwright J, Jolly R. The geometry of polygonal fault systems in Tertiary mudrocks of the North Sea [J]. *Journal of Structural Geology*, 1998, 20(5): 529-548.
- [18] Dewhurst D N, Cartwright J A, Lonergan L. The development of polygonal fault systems by syneresis of colloidal sediments [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1999, 16(8): 793-810.
- [19] Cartwright J, Wattus N, Rausch D, et al. Recognition of an early Holocene polygonal fault system in Lake Superior: implications for the compaction of fine-grained sediments [J]. *Geology*, 2004, 32(3): 253-256.
- [20] Hustoft S, Mienert J, Bünz S, et al. High-resolution 3D-seismic data indicate focussed fluid migration pathways above polygonal fault systems of the mid-Norwegian margin [J]. *Marine Geology*, 2007, 245(1-4): 89-106.
- [21] Sun Q L, Wu S G, Lü F L, et al. Polygonal faults and their implications for hydrocarbon reservoirs in the southern Qiongdongnan Basin, South China Sea [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 39(5): 470-479.
- [22] 孙启良, 吴时国, 陈端新, 等. 南海北部深水盆地流体活动系统及其成藏意义[J]. *地球物理学报*, 2014, 57(12): 4052-4062. [SUN Qiliang, WU Shiguo, CHEN Duanxin, et al. Focused fluid flow systems and their implications for hydrocarbon and gas hydrate accumulations in the deep-water basins of the northern South China Sea [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(12): 4052-4062.]
- [23] 杨涛涛, 吴敬武, 王彬, 等. 琼东南盆地华光凹陷构造特征及沉积充填[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(5): 13-18. [YANG Taotao, WU Jingwu, WANG Bin, et al. Structural pattern and sediment filling in Huaguang sag of southern Qiongdongnan basin [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2012, 32(5): 13-18.]
- [24] 吴能友, 杨胜雄, 王宏斌, 等. 南海北部陆坡神狐海域天然气水合物成藏的流体运移体系[J]. *地球物理学报*, 2009, 52(6): 1641-1650. [WU Nengyou, YANG Shengxiong, WANG Hongbin, et al. Gas-bearing fluid influx sub-system for gas hydrate geological system in Shenhu Area, Northern South China Sea [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(6): 1641-1650.]
- [25] Nigmatulin R I, Shagapov V S, Syrtlanov V R. Self-similar problem of decomposition of gas hydrates in a porous medium upon depression and heating [J]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1998, 39(3): 421-427.
- [26] Golmshtok A Y. The impact of faulting on the stability conditions of gas hydrates in Lake Baikal sediments [J]. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2014, 50(4): 528-542.
- [27] Jones A T, Greinert J, Bowden D A, et al. Acoustic and visual characterisation of methane-rich seabed seeps at Omakere Ridge on the Hikurangi Margin, New Zealand [J]. *Marine Geology*, 2010, 272(1-4): 154-169.
- [28] 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 Ullung Basin, East Sea, Korea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(10): 1787-1800.
- [29] Hovland M, Svensen H, Forsberg C F, et al. Complex pockmarks with carbonate-ridges off mid-Norway: products of sediment degassing [J]. *Marine Geology*, 2005, 218(1-4): 191-206.
- [30] Pilcher R, Argent J. Mega-pockmarks and linear pockmark trains on the West African continental margin [J]. *Marine Geology*, 2007, 244(1-4): 15-32.
- [31] 栾锡武, 刘鸿, 岳保静, 等. 海底冷泉在旁扫声纳图像上的识别[J]. *现代地质*, 2010, 24(3): 474-480. [LUAN Xiwu, LIU Hong, YUE Baojing, et al. Characteristics of cold seepage on side scan sonar sonogram [J]. *Geoscience*, 2010, 24(3): 474-480.]
- [32] 苏丕波, 梁金强, 沙志彬, 等. 南海北部神狐海域天然气水合物成藏动力学模拟[J]. *石油学报*, 2011, 32(2): 226-233. [SU Pibo, LIANG Jinqiang, SHA Zhibin, et al. Dynamic simulation of gas hydrate reservoirs in the Shenhu area, the northern South China Sea [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(2): 226-233.]
- [33] 钟广见, 易海, 林珍, 等. 尖峰北盆地地质构造及油气勘探潜力[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28(1): 105-110. [ZHONG Guangjian, YI Hai, LIN Zhen, et al. Geologic structure of Jianfengbei basin and its prospect for petroleum exploration [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2008, 28(1): 105-110.]
- [34] 梁金强, 王宏斌, 苏新, 等. 南海北部陆坡天然气水合物成藏条件及其控制因素[J]. *天然气工业*, 2014, 34(7): 128-135. [LIANG Jinqiang, WANG Hongbin, SU Xin, et al. Natural gas hydrate formation conditions and the associated controlling factors in the northern slope of the South China Sea [J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(7): 128-135.]
- [35] 钟志洪, 施和生, 朱明, 等. 珠江口盆地构造-地层格架及成因机制探讨[J]. *中国海上油气*, 2014, 26(5): 20-29. [ZHONG Zhihong, SHI Hesheng, ZHU Ming, et al. A discussion on the tectonic-stratigraphic framework and its origin mechanism in Pearl River Mouth basin [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2014, 26(5): 20-29.]
- [36] 龚再升. 中国近海含油气盆地新构造运动与油气成藏[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2004, 29(5): 513-517. [GONG Zaisheng. Neotectonics and petroleum accumulation in offshore Chinese basins [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2004, 29(5): 513-517.]
- [37] 吴时国, 孙启良, 董冬冬. 深水盆地中多边形断层的几何特征与形成机制探讨[J]. *地质力学学报*, 2008, 14(3): 231-240. [WU Shiguo, SUN Qiliang, DONG Dongdong. The geometrical characteristics and formation mechanism of polygonal faults in deep-water basin [J]. *Journal of Geomechanics*, 2008, 14(3): 231-240.]
- [38] CHEN D X, WU S G, WANG X J, et al. Seismic expression of polygonal faults and its impact on fluid flow migration for gas hydrates formation in deep water of the South China Sea [J]. *Journal of Geological Research*, 2011, 2011: 1-7.
- [39] Cartwright J. Diagenetically induced shear failure of fine-grained sediments and the development of polygonal fault systems [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(9): 1593-1610.
- [40] Andresen K J, Huuse M. 'Bulls-eye' pockmarks and polygonal faulting

- in the Lower Congo Basin: relative timing and implications for fluid expulsion during shallow burial [J]. *Marine Geology*, 2011, 279 (1-4): 111-127.
- [41] Sun Q L, Wu S G, Yao G S, et al. Characteristics and formation mechanism of polygonal faults in qiongdongnan basin, northern south china sea [J]. *Journal of Earth Science*, 2009, 20 (1): 180-192.
- [42] 何玉林, 匡增桂, 徐梦婕. 北康盆地第四纪块体搬运沉积地震反射特征及成因机制[J]. 地质科技情报, 2018, 37 (4): 258-268. [HE Yulin, KUANG Zenggui, XU Mengjie. Seismic reflection characteristics and triggering mechanism of mass transport deposits of quaternary in Beikang basin [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2018, 37 (4): 258-268.]
- [43] 王建桥, 祝有海, 吴必豪, 等. 南海ODP1146站位烃类气体地球化学特征及其意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25 (3): 53-60. [WANG Jianqiao, ZHU Youhai, WU Bihao, et al. Geochemistry of hydrocarbon gases from site 1146, ODP leg 184, the south china sea and the implications [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2005, 25 (3): 53-60.]
- [44] 何家雄, 马文宏, 祝有海, 等. 南海北部边缘盆地天然气成因类型及运聚规律与勘探新领域[J]. 海洋地质前沿, 2011, 27 (4): 1-10. [HE Jiaxiong, MA Wenhong, ZHU Youhai, et al. Genetic types, migration and accumulation of gas in the north marginal basins of south china sea and new exploration targets [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2011, 27 (4): 1-10.]
- [45] 吴时国, 孙启良, 吴拓宇, 等. 琼东南盆地深水区多边形断层的发现及其油气意义[J]. 石油学报, 2009, 30 (1): 22-26, 32. [WU Shiguo, SUN Qiliang, WU Tuoyu, et al. Polygonal fault and oil -gas accumulation in deep-water area of Qiongdongnan Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30 (1): 22-26, 32.]
- [46] 王力峰, 沙志彬, 梁金强, 等. 晚期泥底辟控制作用导致神狐海域SH5钻井未获水合物的分析[J]. 现代地质, 2010, 24 (3): 450-456. [WANG Lifeng, SHA Zhibin, LIANG Jinqiang, et al. Analysis of gas hydrate absence induced by the late-stage diapir domination in the borehole SH5 of Shenhu area [J]. *Geoscience*, 2010, 24 (3): 450-456.]