

非常规天然气

琼东南盆地疑似泥底辟与天然气水合物 成矿成藏关系初探

张 伟^{1,2}, 何家雄¹, 卢振权³, 苏丕波⁴, 李晓唐^{1,2}, 刘志杰^{1,2}

(1. 中国科学院广州地球化学研究所边缘海地质重点实验室, 广东 广州 510640;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100029;

4. 广州海洋地质调查局, 广东 广州 510075)

摘要:根据琼东南盆地构造沉积特征, 区域地球物理调查与油气勘探成果, 分析研究了该区疑似泥底辟发育与分布特征及其与天然气水合物富集成矿成藏之间的关系。结果表明: 疑似泥底辟与天然气水合物均主要展布于盆地凸起和凹陷构造单元过渡带或沉积凹陷中心等区域, 二者分布位置上具有一定的重叠性, 而沉积有机质生成的浅层生物气及亚生物气与深部热解气等, 均可通过泥底辟及气烟囱或断层裂隙构成的气源供给输导系统, 在深水区高压低温稳定域富集成矿形成天然气水合物, 表明泥底辟及气烟囱等构成的气源供给运聚通道系统与天然气水合物成藏具有一定的时空耦合配置关系。预测研究区存在“生物气—亚生物气自源自生自储原地成矿成藏、热解气他源断层裂隙输导下生上储异地成矿成藏、热解气他源泥底辟及气烟囱输导下生上储异地成矿成藏”3 种类型天然气水合物成矿成藏模式。

关键词:疑似泥底辟; 天然气水合物; 气源供给系统; 水合物成矿成藏模式; 琼东南盆地

中图分类号: TE122.3 文献标志码: A 文章编号: 1672-1926(2015)11-2185-13

引用格式: Zhang Wei, He Jiaxiong, Lu Zhenquan, *et al.* Preliminary study of the relationship between the suspected mud diapir and natural gas hydrate in the Qiongdongnan Basin, northern South China Sea[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(11): 2185-2197. [张伟, 何家雄, 卢振权, 等. 琼东南盆地疑似泥底辟与天然气水合物成矿成藏关系初探[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(11): 2185-2197.]

0 引言

泥底辟构造是指快速沉积充填的厚层欠压实泥页岩, 在密度倒转的重力作用体系下发生塑性流动, 向浅层上拱刺穿上覆地层薄弱带或断裂带而形成的一种特殊地质体。当塑性泥物质向上刺穿地表或海底形成泥火山丘建造时为泥火山; 当底辟及其流体上侵活动导致上覆地层含气即气侵, 地震波发生畸变, 则在地震剖面上可形成类似烟囱形态的现象, 称之为气烟囱。在地震反射剖面上, 通过泥底辟体地

震反射层通常会发生畸变, 呈现出无反射、模糊反射、杂乱反射特征。通常, 泥底辟顶部及周围伴有大量底辟断层裂隙, 可作为流体的运移通道^[1-2]。

通过对天然气水合物(水合物, 下同)发现区及BSR(Bottom Simulating Reflection, 似海底反射)显示区的地质构造及沉积特征观察研究发现, 泥底辟、泥火山构造与水合物形成及富集成矿成藏之间具有较为密切关系^[3-10]。首先, 形成泥底辟、泥火山的厚层泥源层(泥页岩)本身就是烃源岩, 具备良好生烃条件, 能为水合物形成提供气源; 其次, 泥底辟体、气

收稿日期: 2015-04-16; 修回日期: 2015-05-29.

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 41176052); 中国科学院科技先导项目(编号: XDA03030301)联合资助.

作者简介: 张伟(1987-), 男, 湖北赤壁人, 博士研究生, 主要从事海洋地质、油气勘探与地质综合研究. E-mail: zhangwei@gig.ac.cn.

通讯作者: 何家雄(1956-), 男, 湖北天门人, 研究员, 博士, 主要从事油气勘探与地质综合研究. E-mail: hejx@gig.ac.cn.

烟囱及伴生的底辟断层、裂隙可作为深部气体向浅层运移通道。再次,泥底辟、泥火山、气烟囱还可以引起地热异常和生物化学异常,在泥火山口通常存在特殊生物群落,这些因素均直接或间接地指示了天然气水合物的形成与成矿成藏。

Ginsburg 等^[4]第一次提到了水合物与海底泥火山的关系问题。Reed 等^[5]认为,海底沉积物负荷与甲烷气体共同作用导致泥火山的发育或有助于附近泥底辟的发育演化,随着甲烷气体的聚集浓度增加,最终促使天然气水合物的形成与富集。此后,陆续在里海、黑海、挪威海、地中海、鄂霍次克海、巴巴多斯近海、尼日利亚近海和墨西哥湾、巴伦支海、日本南海海槽、冲绳海槽发现了水合物,且水合物在泥火山或泥底辟上覆浅层地层系统中较富集^[6-10],这些现象说明天然气水合物赋存及成矿成藏与泥火山关系密切。

通过地球物理调查及油气勘探,在东海盆地、台湾西南盆地、珠江口盆地、琼东南盆地及莺歌海盆地等区域均发现了泥底辟或疑似泥底辟,除莺歌海盆地外,在这些盆地均陆续发现了与泥底辟相关的天然气水合物赋存的现象及证据。例如,赵汗青等^[11]对所获取的高分辨率地震资料研究发现,东海冲绳海槽南部西侧槽坡附近及海槽内部发育了一系列泥火山构造(或疑似泥底辟),在泥底辟顶部发现存在有明显的似海底反射(BSR),其与海底反射波组极性相反,在BSR之上则存在振幅空白带,且速度谱上出现速度异常,这些现象指示了该区存在与泥火山相关的天然气水合物。刘坚等^[12]、邬黛黛等^[13]研究了东沙海域水合物区浅表层沉积物特征,亦发现存在水合物赋存的证据。郭跃华等^[14]、匡增桂等^[15]对神狐海域水合物区进行了研究并建立了水合物成藏模式。台湾学者^[16]也在台西南盆地内泥火山附近发现了与天然气水合物有关的BSR。

Milkov^[6]认为,适合于天然气水合物形成与成矿成藏的高压—低温条件的深水泥火山地区都局限在陆坡、岛坡和内陆海深处。琼东南盆地南部属于南海北部陆坡深水区,其与南海北部神狐海域和东沙海域及世界其他水合物发育地区一样,具有天然气水合物形成特定的高压低温稳定域环境和不同成因类型的气源供给条件,亦是我国深水海域天然气水合物勘探最具资源潜力的区域之一。通过近期海洋地质及地球物理勘查,迄今已在该海域发现了一些天然气水合物存在的地质、地球物理及地球化学证据及其指示标志,表明其具有较好的天然气水合

物资源勘探前景。李胜利等^[17]、蒲燕萍等^[18]、孙春岩等^[19]对琼东南盆地构造沉积、地球化学特征研究表明,该区具备天然气水合物形成与富集成藏的基本条件。邬黛黛等^[20]发现琼东南盆地的沉积物样品中有指示天然气水合物和甲烷泄漏的自生碳酸盐、硫酸盐和草莓状黄铁矿及孔隙水化学组成异常,亦暗示着琼东南盆地可能有天然气水合物藏。陈多福等^[21]模拟计算了琼东南盆地天然气水合物形成和稳定分布的地球化学边界条件及其分布区。何家雄等^[22]初步评价与预测了琼东南盆地水合物气源及资源量。

必须强调指出,琼东南盆地油气勘探程度整体较低,泥底辟、泥火山研究程度则更低,仅有少量的地球物理勘查资料揭示可能存在泥底辟、泥火山发育的条件和证据,且泥底辟、泥火山识别和解释还存在争议和不确定性,目前尚缺少地质地球物理及地球化学和钻探的可靠资料及证据确证其就是泥底辟或泥火山。鉴此,本文以“疑似泥底辟”(下文同)描述和讨论该区可能存在的泥底辟或泥火山。总之,本文拟在现有地质地球物理资料分析基础上,结合前人研究成果,初步对琼东南盆地疑似泥底辟发育演化特征与天然气水合物富集成矿成藏关系进行深入分析研究,在此基础上总结和建立不同类型天然气水合物运聚成矿成藏模式,以期对其天然气水合物资源评价预测与勘查部署有所裨益。

1 区域地质背景

琼东南盆地属于南海北部准被动大陆边缘伸展裂谷型盆地,其主体位于南海北部陆坡,整体呈NE走向展布,由一系列NE向和NEE向坳陷和隆起组成。根据琼东南盆地构造地质背景及地球动力学条件和构造幕式演化特点,结合盆地南北分带、东西分块的基本构造格局,可以将盆地主要构造单元划分为北部坳陷、北部(中部)隆起、中央坳陷和南部隆起及南部坳陷5个一级构造单元,在此基础上可进一步将其划分为不同凹陷和凸起等次一级构造单元(图1)^[23-25]。盆地新生代沉积最大地层厚度超过12km,最大的生烃凹陷面积超过9000km²。中央坳陷带主体及南部隆起带与南部坳陷带几乎全部处在陆坡深水区,最大水深超过3000m。

琼东南盆地构造演化可以明显分为2个阶段^[23-24]:即古近纪裂陷期和新近纪及第四纪拗陷期。新近系上新统及第四系海相泥岩具有较好生物气形成条件,在油气勘探录井过程中2300m以深的上

新统及第四系中均见有明显的生物气显示;而渐新统煤系生源母质及浅海相陆源母质丰富,有机质丰度高且处在成熟—高熟热演化阶段,具有形成热成因天然气(热解气)的良好地质条件,迄今为止在浅水区崖南凹陷周缘邻区及南部深水区陵水凹陷南部斜坡带,均陆续发现了一些以成熟煤型气为气源的大中型气田及含油气构造。

琼东南盆地南部深水区与相邻的莺歌海盆地及珠江口盆地泥底辟/泥火山(或疑似泥底辟)发育区一样^[26-29],具有高沉降沉积速率等区域地质背景,古

近系—新近系沉积充填较厚,具备形成疑似泥底辟的物质基础。然而,泥底辟形成演化不仅促进了烃源岩成熟生烃演化,而且更重要的是其高温超压潜能与底辟通道及伴生的断层裂隙体系构成了油气供给运聚的网络系统,其为深部油气向浅层圈闭及天然气水合物高压低温稳定带运聚富集成藏提供了最佳运聚动力和流体运聚通道系统。目前,在琼东南盆地南部深水区天然气水合物勘查中,均已陆续发现了天然气水合物存在的地质、地球物理及地球化学证据及其指示标志^[17-22],表明该区具有较好的天

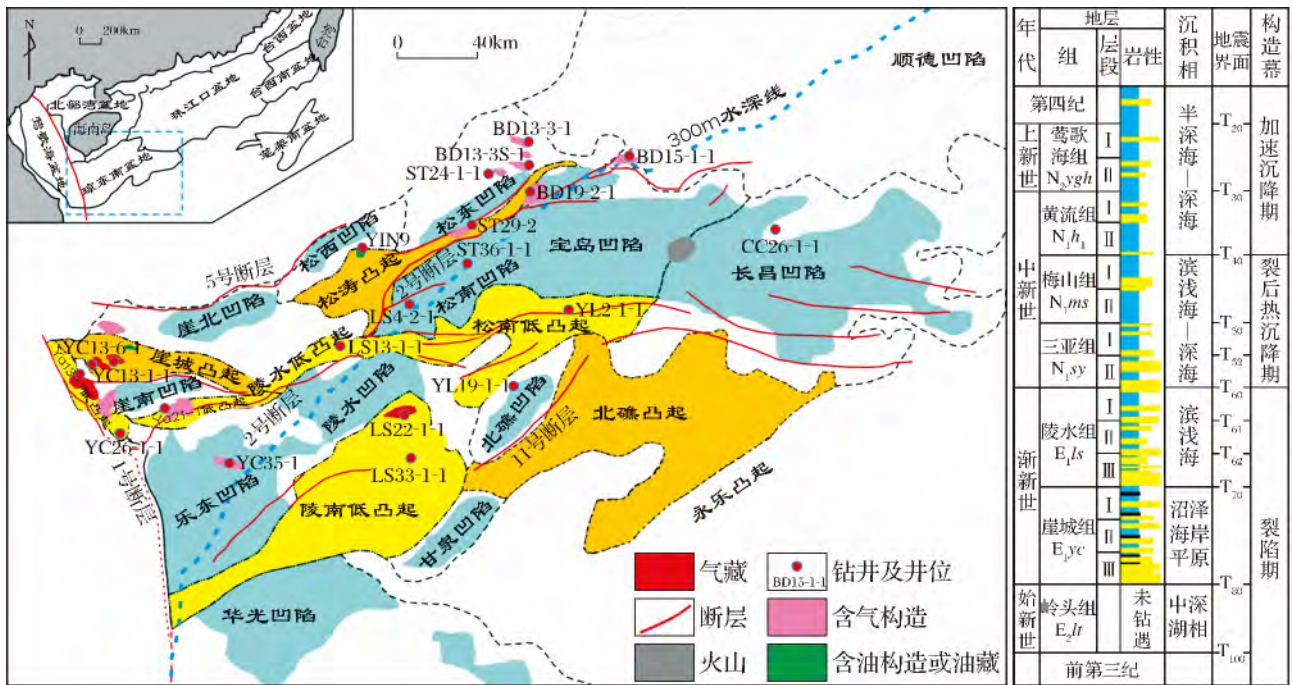


图 1 琼东南盆地构造单元划分及展布特征与地层系统及沉积充填特点^[25]

Fig. 1 Tectonic unit division, deposition and filling in Qiongdongnan Basin^[25]

然气水合物资源勘探前景。

2 疑似泥底辟发育展布特征

琼东南盆地深水区中央拗陷带与南部拗陷带新生界尤其是古近系沉积厚度及展布规模较大。加之该区古近纪及中新世沉降沉积速度大(平均沉降速率达 70~80m/100Ma),沉积充填了非常厚的古近系及中新统,而这种快速沉积充填的泥页岩等碎屑物质,为该区泥底辟形成奠定了物质基础,同时,琼东南盆地的平均地温梯度在 4℃/100m 左右^[30],中央拗陷带的地温梯度更高,属于异常高温环境^[23-25],高温快速沉积充填的地质背景为该区泥底辟形成提供了动力学基础,导致在沉积充填厚、埋藏深,处于欠压实的巨厚泥页岩发育的局部区域,泥底辟活动

强烈且异常发育。

前已述及,泥底辟是由深部快速充填沉积的厚层欠压实泥页岩在密度倒转的重力体系下岩石内摩擦力消失发生塑性流动,在地层薄弱带及断层裂隙带上拱侵入或底辟刺穿上覆地层而形成。泥底辟主体通常在二维反射地震剖面上呈现出各种形态的杂乱模糊反射或者空白反射,而其顶部或两侧一般具有明显的强振幅特征,或伴生一些断层裂隙或由于泥底辟上侵刺穿后泥源物质喷空塌陷,在泥底辟顶部形成喷口或麻坑。因此,泥底辟主体、通道及周缘均可形成形态各异的杂乱模糊反射或者空白反射所构成的复杂地震地质异常体(图 2)。泥底辟与气烟囱在地震剖面上的重要区别就是前者由于强烈的底辟活动改变了地层及围岩的产状,后者则由于气侵

作用没有改变地层产状,只是导致地震反射波发生畸变。因此泥底辟体顶部及两侧一般具有向上拱起牵引的特征。当泥底辟活动能量较低时,泥源物质上拱动力不够,可形成龟背上拱[图 2(a)]或低幅度隐伏底辟;当泥底辟活动能量强时,泥底辟物质喷发强烈甚至可刺穿海底,能量大量释放,地层发生塌陷可形成海底麻坑[图 2(f)]。同时,由于泥底辟均处在高温超压地层系统,泥底辟活动均可在其顶部及周缘附近形成底辟伴生断层与裂缝裂隙[图 2(d)一

图 2(f)],其与底辟活动通道一起构成了深部流体及油气向浅层纵向运移的气源供给运聚系统。必须强调指出,当地层富含天然气或发生气侵,则往往导致地震波能量被大量吸收而发生严重衰减,亦可在地震剖面上形成大量模糊或空白反射,或同相轴下拉现象,但通过地震处理后可以看到其地层产状及其构造形态没有发生改变,应属于气烟囱或含气陷阱[图 2(h)],其亦与油气及流体运聚现象有关,可作为油气运聚的指示。

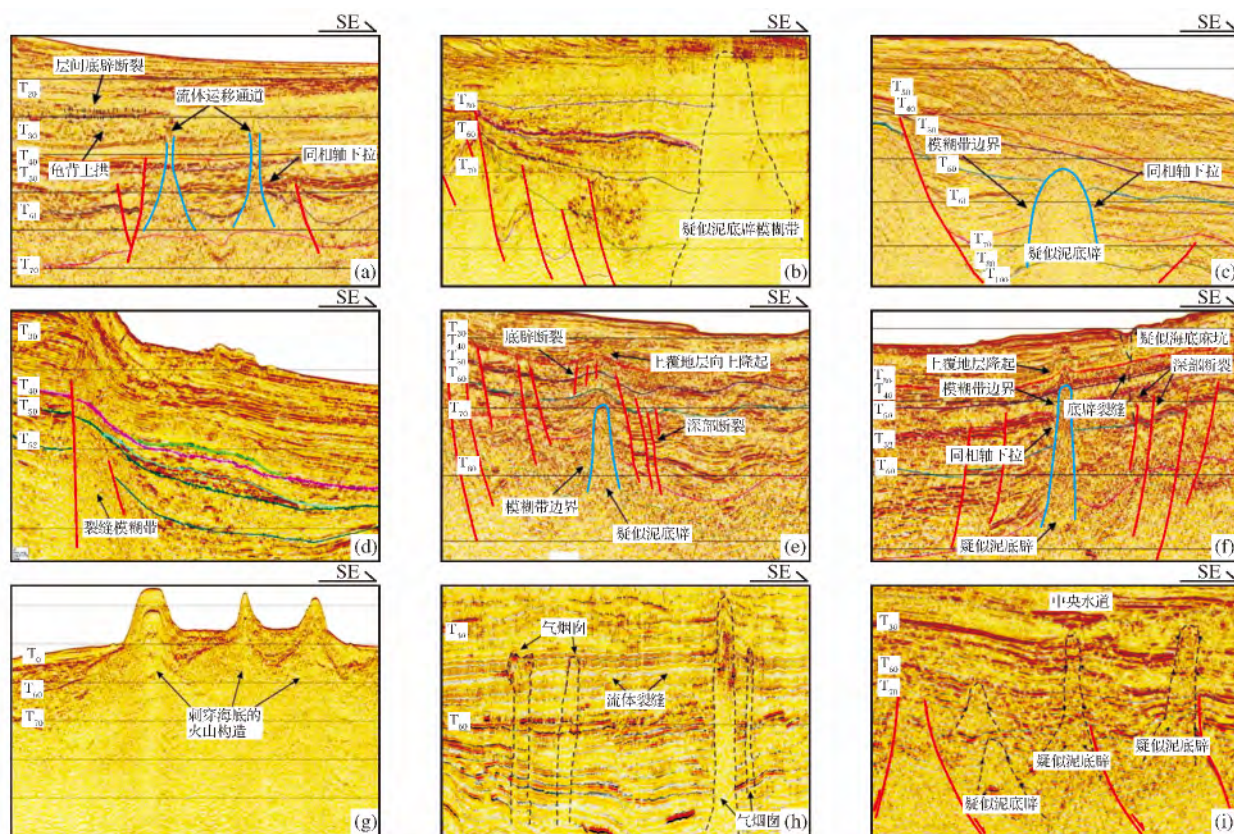


图 2 琼东南盆地疑似泥底辟/火山构造样式二维反射地震剖面响应特征^{[30]①}

Fig. 2 Seismic sections of different suspected mud diapir/mud volcano in the Qiongdongnan Basin^{[30]①}

(a) 乐东凹陷流体底辟与龟背上拱;(b) 乐东凹陷泥底辟;(c) 松南—宝岛凹陷泥底辟;(d) 宝岛凹陷北坡流体裂缝;
(e) 长昌凹陷泥底辟;(f) 长昌凹陷泥底辟;(g) 陵水凹陷泥火山;(h) 松南凹陷南斜坡气烟囱;(i) 陵水凹陷南斜坡泥底辟

与西部邻区莺歌海盆地莺歌海凹陷泥底辟沿 NW 向雁行式排列集中式分布特征的显著差异是,琼东南盆地疑似泥底辟及气烟囱在不同区域发育类型及数量存在明显区别,且在地震剖面上,其泥底辟及气烟囱特征不甚明显或典型,故称之为疑似泥底辟及气烟囱。疑似泥底辟平面上总体沿 NE 方向自东向西展布于南部深水区长昌凹陷、松南—宝岛凹

陷、北礁凹陷及松南低凸起、陵水凹陷及陵南低凸起和乐东凹陷以及西南部的华光凹陷(图 3)。须强调指出,深水区东部的长昌凹陷周缘尤其是深大断裂发育区存在火山岩底辟,其与深大断裂及边缘斜坡地层薄弱带密切相关。根据疑似泥底辟地震反射特征、速度参数等地球物理响应特点,在地质地震资料解释及层序地层学分析的基础上,参考前人^[17,30-31]

① 中海石油(中国)有限公司湛江分公司. 琼东南盆地深水区成藏条件与勘探突破方向. 内部报告, 2013.

部分研究成果,重点对盆地南部深水区不同类型疑似泥底辟(泥火山)及气烟囱等特殊地震地质体,进行了综合分析研究,划分确定了疑似泥底辟或泥火山的类型,剖析了其发育演化特征。如中央坳陷带乐东—陵水凹陷[图 2(a),图 2(b)]及松南凹陷和宝岛凹陷疑似泥底辟;长昌凹陷泥火山和疑似泥底辟[图 2(a)—图 2(f)];松南—宝岛凹陷北坡靠近北部隆起带位置形成的气烟囱和流体裂缝[图 2(d)];深

水区南部低凸起区域即陵南低凸起及松南低凸起带疑似泥底辟和气烟囱[图 2(h)];陵水凹陷南斜坡中央水道砂体下部发育的疑似泥底辟等^[32][图 2(i)];西南部华光凹陷同样也发育一定规模的泥底辟、气烟囱^[33]。总之,这些疑似泥底辟及气烟囱和火山岩底辟的发育演化特征明显,内部具空白反射或模糊反射,底辟周缘伴生断层裂隙发育,底辟顶部常常伴有流体压裂产生的微裂隙。

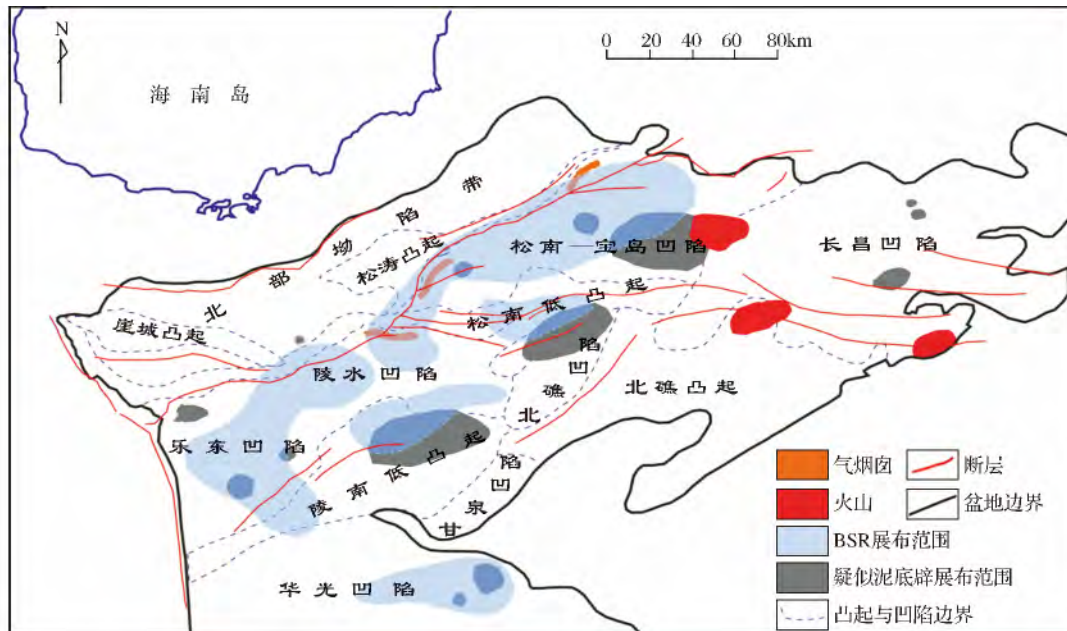


图 3 琼东南盆地疑似底辟构造与天然气水合物(BSR)叠置分布特征^[17,30-31]

Fig. 3 Superposition characteristic between the suspected mud diapir and BSR in Qiongdongnan Basin^[17,30-31]

从疑似泥底辟在盆地中展布特征看,主要集中于盆地凹陷中心区和凹陷与凸起过渡区。凹陷中心沉降沉积速度快,沉积物压实与流体排除不均衡,最容易产生欠压实而形成高温超压地层系统,有利于泥源岩内摩擦力消失而产生塑性流动及高温超压潜能等能量的积累,一旦其超过上覆地层的破裂压力,大量泥源物质即开始底辟上拱和挤入上覆地层薄弱带或断裂带发生底辟上拱和刺穿作用,最终形成泥底辟或泥火山。而在凹陷与凸起过渡区,往往是构造活动转换带,区域应力比较集中,较易形成断裂发育活动带,而塑性泥源物质比较容易在这种构造断裂破碎带底辟上拱和刺穿上覆地层,形成泥底辟甚至泥火山^[17,30]。

从疑似泥底辟纵向发育特征看,不同构造带及同一构造带不同位置泥底辟刺穿层位及规模存在明显不同。通过地震资料对琼东南盆地疑似泥底辟分析识别表明,纵向上,疑似泥底辟主要发育于 T_5 反

射界面之下,即刺穿 T_5 反射界面之上泥底辟相对较少。泥底辟发育规模大小不一,刺穿层位最浅可达第四系浅层,表明个别疑似泥底辟活动能量较强,能够将深部泥源物质及其大量流体携带至浅层^[31]。尤其是在盆地南部深水区中央坳陷带及南部坳陷带,个别泥底辟活动能量强,泥源物质及流体能够向上底辟刺穿至第四系。总之,该区疑似泥底辟发育演化形成的底辟通道及其伴生断层裂隙构成的运聚供给系统,可以成为天然气水合物形成的有利运聚通道,能够将深部气源输送到深水海底浅层天然气水合物稳定域,最终形成天然气水合物矿藏。

3 天然气水合物(BSR)分布特征

琼东南盆地油气勘探及地球物理勘查揭示,盆地深水区中央坳陷带及南部坳陷带,疑似泥底辟及气烟囱较发育,且纵向上从深部刺穿上覆地层可达第四系深水海底浅层附近,能够通过底辟及气烟囱

通道将热解气源从深部输送至浅层深水海底高压低温稳定带,形成天然气水合物及其 BSR 标志层。尽管 BSR 并不是指示天然气水合物存在的唯一标志,但存在天然气水合物一般均或多或少具有 BSR 的明显显示,因此,在海域天然气水合物勘查初期,主要依据 BSR 特征判别是否存在天然气水合物^[34-35],预测评价天然气水合物有利勘探区带。海洋区域地质地球物理调查及天然气水合物勘查表明,琼东南盆地南部深水海底浅层天然气水合物 BSR 标志层明显且分布稳定,通过高分辨率多道地震解释,BSR 延伸长度一般在 20~40km 之间,最短为 12km,最长可达 68km^[31],具备了天然气水合物存在的基本地球物理信息与资源勘探前景。

从图 3 所示可以看出,琼东南盆地南部深水,根据天然气水合物标志层 BSR,可以大致圈定出面积大小不等的 5 个区域^[17,31],这些区域均处在陆坡深水,即陆架坡折带以下(水深大于 300m)广大地区,构造位置处于中央坳陷带及南部隆起带和南部坳陷带展布区,天然气水合物标志层 BSR 剖面上主要分布于水深 350~2 500m 范围的海底浅层高压低温稳定带,空间上自东而西主要展布在松南—宝岛凹陷、陵水凹陷及乐东凹陷和华光凹陷,在中南部深水松南低凸起及北礁凹陷和陵南低凸起等区带亦有较大面积的 BSR 显示。

从图 3 尚可看出,该区天然气水合物标志层 BSR 展布范围亦与其疑似泥底辟发育展布位置,在空间上似乎具有一定的叠置复合的成因联系。几乎所有天然气水合物标志层 BSR 分布均与该区疑似泥底辟/泥火山和气烟囱等特殊地质体基本叠合,亦即泥底辟、气烟囱均处于 BSR 分布范围内,仅少数泥底辟位于 BSR 展布范围之外,表明该区疑似泥底辟展布与天然气水合物分布空间上存在较密切的叠置耦合关系。很显然这种对应关系绝非偶然,充分暗示了泥底辟及气烟囱等气源供给运聚通道系统与天然气水合物富集成藏具有一定的时空耦合配置关系^[17-18]。盆地沉积凹陷中心和凹陷斜坡与凸起过渡区,往往是沉降沉积速度快,沉积充填巨厚,且断层裂隙发育区(凹陷与凸起转换过渡区),沉积物压实与流体排出不均衡,巨厚欠压实泥页岩(泥源层)容易发生大规模塑性流动,在上覆浅层地层薄弱带及断层裂隙发育区,产生上侵底辟作用形成各种类型及形式的泥底辟及伴生气烟囱。而这些泥底辟及气烟囱通道,以及底辟活动波及影响形成的底辟伴生断层裂隙等,则构成了深部流体及油气源向浅层圈

闭或天然气水合物高压低温稳定带运移输导的极佳运聚通道,进而能够将深部油气输送至浅层形成常规油气藏和天然气水合物矿藏^[17-18]。如上所述的盆地南部深水松南—宝岛凹陷、陵水凹陷及乐东凹陷和华光凹陷,以及松南低凸起及北礁凹陷和陵南低凸起等区域,其疑似泥底辟与天然气水合物 BSR 标志层展布的空间叠置复合关系,即为典型实例。

必须强调指出的是,在泥底辟及气烟囱发育展布区域,并不均具有天然气水合物 BSR 标志层显示。虽然泥底辟活动与天然气水合物成矿成藏具有成因联系,但由于受诸多因素影响,故亦并非绝对如此^[36]。天然气水合物成矿成藏条件苛刻,除需严格满足高压低温条件外,其气源供给输送与运聚输导系统的时空偶和配置至关重要。以下拟重点分析阐述研究区深水海底浅层高压低温稳定带与深部烃源供给条件、泥底辟及气烟囱和断层裂隙运聚系统的时空耦合配置关系,分析探讨天然气水合物形成条件及主控因素。

4 天然气水合物气源构成特点

4.1 天然气水合物气源构成

研究表明,天然气水合物气源构成,依据其地球化学特征所确定的天然气成因类型可大体分为 2 类即:一类为生物气及亚生物气,属于未成熟—低熟沉积有机质热演化阶段的产物;二类为热解气,为有机质成熟—高熟及过成熟热演化阶段形成的产物。生物气是有机质在低温环境下经生物化学作用形成的烃类气,生物甲烷含量通常大于 98%,通常干燥系数 $C_1/\sum C_n > 0.98$,甲烷碳同位素值明显偏低, $\delta^{13}C_1 \leq -55\%$;热解气则是有机质热演化成熟—高熟及过成熟热解生烃窗范围形成的烃类气,以成熟—高熟热成因甲烷为主,干燥系数高, $C_1/\sum C_n$ 值一般为 0.8~0.98,甲烷碳同位素值偏高,通常 $\delta^{13}C_1 \geq -48\%$ 以上。琼东南盆地油气勘探及研究表明^[22-25,32],上述 2 种类型天然气均存在(表 1),尤其是热解气资源丰富,目前在盆地北部浅水区及南部深水均已勘探发现了富集高产成熟—高熟天然气藏及储量规模较大的大中型天然气田。而浅层生物气及亚生物气在浅水及深水新近系及第四系浅层钻井中,亦普遍见到良好气显示,且具有一定的资源潜力,亦完全可为天然气水合物形成提供充足的气源。

4.2 生物气及亚生物气气源

Kvenvolden^[37]研究认为,只要沉积速率大于

3cm/ka,有机碳含量达到0.5%,即可满足天然气水合物形成所需的生物成因甲烷,当有机碳含量低于0.5%,则其生物气源难以满足形成天然气水合物需要。琼东南盆地生物气及亚生物气主要来自上新

统一第四系海相泥岩及沉积物,根据琼东南盆地深水区中央坳陷带(包括南部斜坡带)几口探井揭示(图4),中新统及上新统烃源岩有机质丰度TOC含量大部分达到了0.5%,甚至超过0.5%^[39],因此,

表1 琼东南盆地油气成因类型及地球化学特征^[24,32]

Table 1 Genetic types and geochemistry characteristics of hydrocarbon in Qiongdongnan Basin^[24,32]

油气成因类型	构造及区带	层位	烃类气		非烃气		干燥系数	碳同位素 $\delta^{13}C/\%$
			C ₁	C ₂₊	CO ₂	N ₂		
生物气	YC13-1/8	Q	89.19	0.06	1.1	9.65	0.99	-76.6~87.0
	YC21-1/1	Q	99.76	0.24			0.99	-60.8
	BD19-2N	Nm	14.31	0.14	4.78	80.8	0.99	-63.5
生物-低熟过渡带气	YC13-1/1	Nh	86.5	10.94	0.07	2.49	0.89	-52.7
	YC21-1/1	Q	98.95	1.05			0.99	-54.7
	BD19-2N	Nm	15.14	7	3.15	74.71	0.96	-51.7
石蜡型油	YC14-1/1	Ns	4-甲基萘烷丰富,奥利烷和咔唑烯含量高					
	ST32-2/Y9	Els	4-甲基萘烷丰富,奥利烷含量高					
油型气	YC14-1/1	Ns	65.72	32.37	0.93	0.99	0.67	
	ST32-2/Y9	Els	60.44	27.93	9.67	3.74	0.68	
煤型气		Ns	86.32	6.94	6.53	0.25	0.93	
	YC13-1	Els	83.88	1.0~9.0	0.17~11.5	0.1~1.8	0.91~0.98	-34.7~39.9
		Ey	89.81	5.32	0.17	4.65	0.94	
	YC21-1/3	Ey	71.46	3.59	24.12	0.67	0.95	
	YC21-1/4	Els	88.11	2.77	0.32	8.69	0.97	-40.6~41.9
	LS22-1/3	Nh	91.53	7.59	0.32	0.55	0.93	-39.20
	LS17-2/1	Nh	92.51	6.38	0.45	0.48	0.94	
煤型凝析油	YC13-1	Els	双杜松烷丰富,奥利烷较高,芳烃化合物含量高					

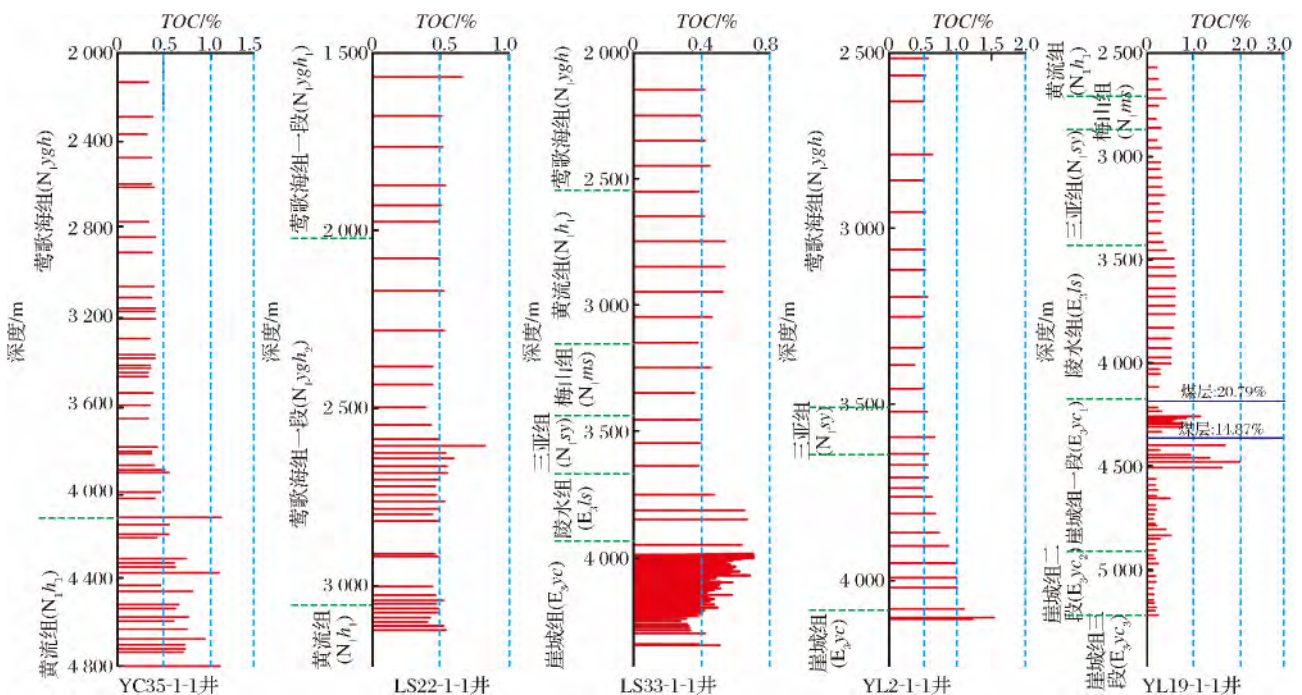


图4 琼东南盆地深水区钻井揭示的烃源岩有机质丰度随深度变化特征^[39]

Fig. 4 TOC value revealed by wells vs depths in Qiongdongnan Basin deep water area^[39]

该生物气及亚生物气气源岩已经达到了形成生物气气源的基本条件,能够为天然气水合物形成提供烃源供给条件。

琼东南盆地勘探发现的生物气主要赋存在 2 300m 以浅深度的上新统莺歌海组—第四系海相粉细砂岩或泥质粉砂岩中,大部分探井在 2 300m 以浅均见强烈的生物气气测异常^[22]。勘探发现的亚生物气(生物—低熟过渡带气)主要分布于浅中层系(深度 2 000~3 320m),一般多分布在 3 320m 以浅的上中新统黄流组海相砂岩储集层中,且多以水溶气的形式产出,在北部浅水区崖南凹陷的崖 13-1 气田上中新统黄流组与松涛凸起东倾没端的 BD19-1 构造中新统梅山组和南部深水区中央坳陷带及其周缘区上中新统黄流组储集层中,探井录井过程中均见到强烈的气测显示。亚生物气组成及地球化学特征与生物气基本类似,有所不同的是前者的重烃含量(一般为 1%~10%)比后者高得多, $\delta^{13}C_1$ 值比生物气明显偏高,其成因主要是生物气与其邻近低熟烃源岩所生成的低熟气相互混合的结果,亦可能有少量深部运移上来的热成因气之混入。例如,宝岛凹陷北坡宝岛 13 区浅层梅山组—三亚组富烃气藏的天然气即为附近渐新统一中新统烃源岩生成的生物气/低熟气与部分来自宝岛凹陷崖城组烃源岩的成熟烃类气混合而成,故导致天然气 $\delta^{13}C_1$ 值偏高。

4.3 热解成熟—高熟及过熟气气源

琼东南盆地热解成熟—高熟及过熟天然气资源丰富,主要分布于盆地西部浅水区环崖南凹陷崖城凸起南缘及崖 13-1 低凸起和崖 21-1 低凸起周缘区,在盆地南部深水区中央坳陷带的乐东—陵水、松南—宝岛诸凹陷及南部坳陷区等区域,亦有大量热解煤型天然气分布。20 世纪 80 年代在北部浅水区勘探发现的崖 13-1 大型热解煤型气天然气田,近年来在南部深水区陵水凹陷陵南斜坡中央水道勘探发现的陵水 22-1、陵水 17-2 大型高产热解煤型气天然气田^[32],以及近期在乐东凹陷勘探发现的陵水 25-1 中型热解煤型天然气气田,其热解气烃源均主要来自渐新统崖城组及陵水组成熟—高熟煤系烃源岩。北部浅水区热解天然气产出层位主要为渐新统陵水组三段,次为中新统三亚组—梅山组及渐新统崖城组二段与三段,而南部深水区热解天然气目前勘探发现主要产层为中新统黄流组,预测其深部渐新统陵水组亦是重要的高熟煤型热解气的储集层。热解气成熟度高,属成熟—高成熟气窗阶段产物,多以大

量成熟—高成熟热解煤型气为主并伴生少量煤型凝析油。

综上所述,琼东南盆地生物成因气和热成因气,不仅能为该区不同类型油气藏及大中型天然气田的形成提供充足的气源,而且亦可为该区深水海底浅层天然气水合物形成提供充足的气源供给,为深水区天然气水合物形成奠定物质基础。当其与天然气水合物气源供给运聚系统和深水海底浅层天然气水合物形成所需的高压低温稳定域条件时空耦合配置较好时,即可形成高丰度大规模展布的天然气水合物资源。

5 天然气水合物输导体系与成矿成藏模式预测

前已论及,天然气水合物的形成需要充足的气源供给、天然气运移输导通道与特定高压低温天然气水合物稳定域良好的时空耦合配置,而天然气水合物气源供给系统及其气源充足与否对于高丰度大规模天然气水合物形成至关重要。

天然气水合物成矿成藏与常规油气运聚成藏规律基本类似,亦具有“源、汇、聚”的运聚成藏过程,故可借鉴常规油气运聚成藏规律的基本研究框架及思路,开展天然气水合物成矿成藏模式的分析预测,重点剖析其气源供给条件及运聚过程与天然气水合物稳定带形成的时空耦合配置关系^[38]。笔者在获取大量油气地质资料与海洋地质地球物理调查成果的基础上,根据天然气水合物成矿成藏的气源供给和高压低温稳定带配置之关键地质条件,依据天然气水合物形成的气源供给运聚系统构成特点及类型,重点分析阐明了琼东南盆地南部深水区 3 种类型天然气水合物成矿成藏模式及其地质条件。

5.1 热解气他源断层裂隙输导型下生上储异地成矿成藏模式

琼东南盆地具古近纪断陷、新近纪拗陷双层构造沉积格局,盆地断裂主要集中发育于古近纪构造层之中,而新近纪断裂活动微弱,断层断至 T_{40} 上中新统的数量较少,但也有部分古近纪大断裂可断至中新统甚至海底,可作为凹陷深部烃源岩生成的天然气向浅层水合物稳定域运移输导通道^[23-25]。此外,盆地南部断阶带断裂活动及沉积构造特征与北部浅水区存在明显差别,不仅浅层断裂比较发育,而且该区因沉降沉积速率快,沉积充填规模也较大,不仅形成了泥底辟及气烟囱等纵向输导体系,在地震

剖面上亦发现了底辟断层及流体裂隙等纵向运聚通道[图 2(e), 图 2(f)], 这些底辟断层与裂缝是在异常高压条件下因流体压裂导致底辟上部地层破裂而形成。因通常出现在底辟构造上方, 底辟断层和裂缝等则是底辟流体纵向上运转移导的优良通道, 可将底辟深部古近纪烃源岩生成的天然气向上输导至浅层稳定域中形成天然气水合物^[30]。部分地震剖面显示, 在 BSR 之下发育了大量断层及裂缝所构成的天然气纵向运移供给疏导通道(图 5), 其下切穿始新统及渐新统烃源岩层, 其上则断至深水海底浅层高压低温稳定域 BSR 水合物层, 也即沟通了古近纪成熟—高熟—过成熟烃源岩经正常热演化过程生成的热解型天然气, 而天然气水合物赋存在深水海底浅层未成岩沉积物之中, 显然沟通深部气源与浅层稳定域之间的气源运转移导通道主要是大量断层及裂隙所构成, 从而形成了他源断层裂隙输导型下生上储, 古生新储异地成矿成藏模式[图 6(a)]。该类型水合物成矿成藏, 主要取决于深部充足热解气源的大量供给与浅层水合物稳定域之间有效的时空耦合配置。在中央坳陷带与北部隆起带承接区域, 沟通深部气源与浅层稳定域断层发育(主要为 2 号断层), 其天然气水合物藏的形成主要为上述成矿成藏模式。

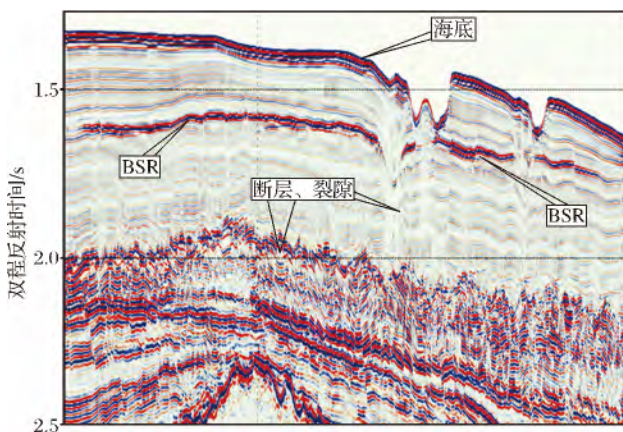


图 5 琼东南盆地断层、裂隙构成的纵向天然气运聚通道系统典型地震剖面

Fig. 5 Typical seismic profile showing the gas migration and accumulation system composed of faults and fractures in Qiongdongnan Basin

5.2 热解气他源泥底辟及气烟囱输导型下生上储异地成矿成藏模式

泥底辟及气烟囱形成演化过程中产生的天然气纵向运聚通道在一些沉积盆地中均较普遍, 例如莺歌海盆地中央泥底辟带发育形成的大型泥底辟及气

烟囱天然气纵向运聚输导通道即是典型实例。而与莺歌海盆地东部相邻的琼东南盆地, 同样也存在疑似泥底辟及气烟囱构成的油气纵向运移输导通道^[40]。前已述及, BSR 主要分布于盆地凸起和凹陷的交界地带或者沉积凹陷的中心区, 而盆地疑似泥底辟及气烟囱等也主要分布于凹陷中心及构造转换带(凹陷与凸起过渡带), 二者在分布空间上存在较密切的叠置耦合关系, 因此推测疑似泥底辟与气烟囱等可作为深部天然气向浅层运转移导通道, 从而为天然气水合物形成提供了重要的输导条件。

在地震剖面上(图 7), 可观察到疑似泥底辟活动强烈, 且刺穿古近纪及中新统多套地层的现象, 泥底辟顶部甚至可直接刺穿至中新统及第四纪, 使得底辟类型的纵向气源供给输导体系可以连通深水海底浅层的天然气水合物稳定域, 当与断裂及裂缝等输导体系相互配置时, 可将深部古近纪及渐新统烃源岩生成的煤型热解气源, 通过泥底辟及气烟囱等纵向运转移导通道向上运移至浅层稳定域形成天然气水合物矿藏, 且天然气水合物多分布富集在底辟及气烟囱附近, 从而形成了热解气他源泥底辟及气烟囱输导型下生上储异地成矿成藏模式[图 6(b)], 该模式重要特征为泥底辟及气烟囱为深部古近系烃源岩生成的热解气源向浅层高压低温稳定带输送供给提供了纵向运移通道, 即泥底辟、气烟囱起到沟通和连接深部热解气源与上覆深水海底浅层天然气水合物稳定带的桥梁作用, 很显然, 这种类型天然气水合物成矿成藏模式, 对琼东南盆地深水区新近纪及第四纪断裂不甚发育区域的天然气水合物矿藏的形成具有重大意义。

因此, 对于缺乏纵向断层和裂隙输导体系的区域, 泥底辟及气烟囱纵向输导通道则是他源下生上储热解型天然气水合物成矿成藏的主控因素。鉴此, 在中央坳陷带凹陷中心及南部低凸起发育泥底辟及气烟囱的区域, 天然气水合物藏的形成主要是这种成矿成藏模式。

5.3 生物气—亚生物气自源扩散型自生自储原地成矿成藏模式

勘探研究表明, 深水海底浅层沉积有机质经微生物生物化学作用生成的生物气及亚生物气, 一般是在生物化学作用带深度范围内相对较粗的沉积物中近源运聚富集, 具自生自储或原地运聚富集特点, 因而这种生物气自生自储型运聚供给系统主要存在于晚新世及第四纪浅层低成岩或未成岩的生物化学作用带。主要通过沉积物孔隙和微裂缝等扩散聚

集,在地震剖面上观察到,琼东南盆地浅层还存在泥底辟活动形成的层间断裂,此外,陈端新等^[33]研究也发现,盆地中新世—第四纪浅层地层中发育了大量的多边形断层,均可作为浅层生物气—亚生物气

扩散通道。前已述及,琼东南盆地在 3 300m 以浅地层之中,均存在大量生物气及亚生物气显示,且气源充足,其运移聚集体系简单,海底浅层沉积有机质生成的生物气—亚生物气原地聚集或通过微裂缝,

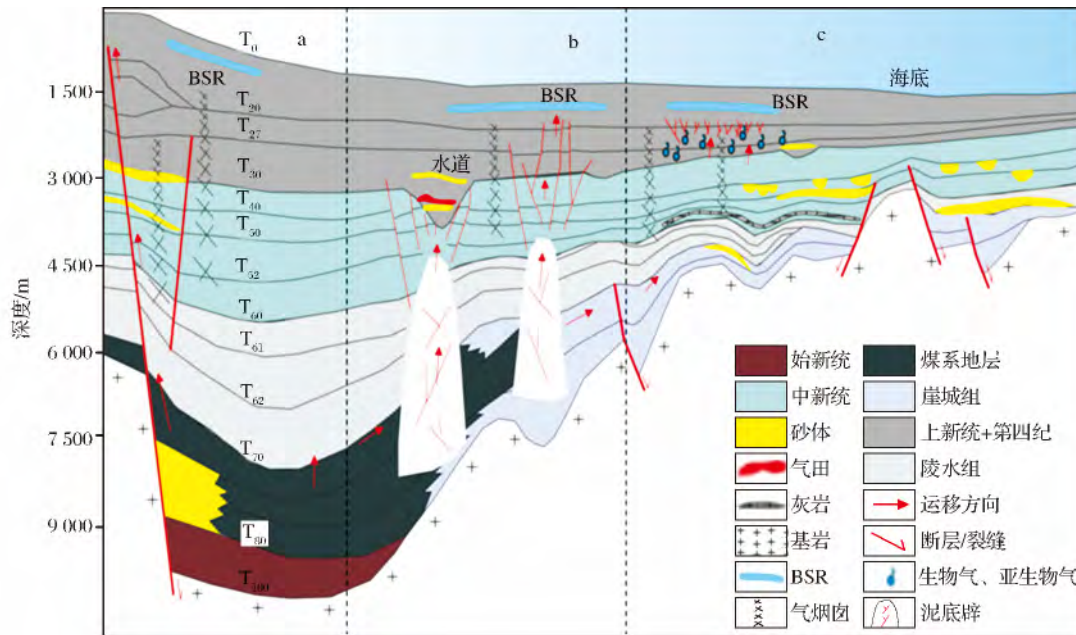


图 6 琼东南盆地南部深水区 3 种典型天然气水合物成矿成藏模式预测

Fig. 6 Three types of accumulation model of natural gas-hydrate in Qiongdongnan Basin

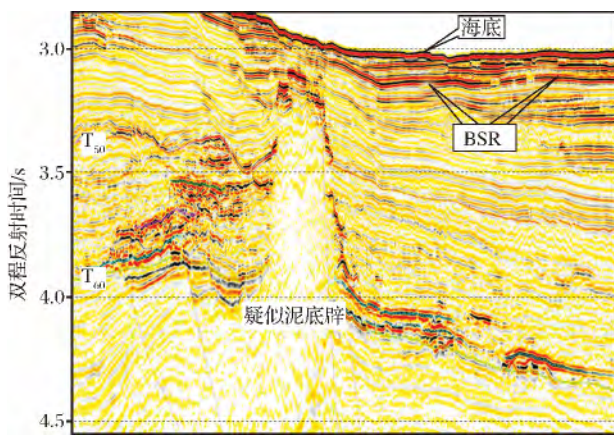


图 7 琼东南盆地疑似泥底辟构成的纵向天然气运聚通道系统典型地震剖面

Fig. 7 Typical seismic profile showing the gas migration and accumulation system composed of the suspected mud diapir in Qiongdongnan Basin

多边形断层,沉积微孔隙等通道短距离近源聚集,其与深水海底浅层高压低温之天然气水合物稳定域具有自源扩散配置特征,进而形成了这种自源扩散型自生自储原地成矿成藏模式[图 6(c)],其重要特征是生物气源岩与天然气水合物高压低温稳定域均处

于盆地有机质成熟门槛以上微生物生物化学作用带,且天然气水合物丰度及资源规模则取决于盆地生物气与亚生物气气源供给规模及富集程度的高低。根据钻井揭示的生物气—亚生物气显示区域,预测松涛—宝岛凹陷周缘水合物的成矿成藏属于这种模式。

6 结论

(1)琼东南盆地疑似泥底辟及气烟囱主要展布于盆地凸起和凹陷过渡带及沉积凹陷中心区。泥底辟与气烟囱及其派生断层裂隙等构成了天然气水合物成矿成藏的重要气源供给输导系统。

(2)疑似泥底辟及气烟囱附近可形成天然气水合物,其主要分布在研究区凹陷与凸起构造单元过渡区或沉积凹陷中心,且水合物与泥底辟分布空间上存在较密切的叠置耦合关系,表明泥底辟及气烟囱等构成的气源供给运聚通道系统与天然气水合物成藏具有一定的时空耦合配置关系。

(3)天然气水合物气源,主要由沉积有机质未成熟—低熟阶段形成的生物气及亚生物气与成熟—高熟—过熟阶段形成的热解气所构成,其是天然气水

合物形成的主控因素之一。

(4)预测琼东南盆地存在“生物气—亚生物气自源扩散型自生自储原地成矿成藏、热解气他源断层裂隙输导型下生上储异地成矿成藏、热解气他源泥底辟气烟囱输导型下生上储异地成矿成藏”3种类型天然气水合物运聚成矿成藏模式。

参考文献 (References):

- [1] Dai Junsheng. Structural Geology and Tectonics[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006. [戴俊生. 构造地质学及大地构造[M]. 北京:石油工业出版社, 2006.]
- [2] He Jiexiong, Xia Bin, Zhang Shulin, *et al.* Origin and distribution of mud diapirs in the Yinggehai Basin and their relation to the migration and accumulation of natural gas[J]. *Geology in China*, 2006, 33(6): 1336-1344. [何家雄, 夏斌, 张树林, 等. 莺歌海盆地泥底辟成因、展布特征及其与天然气运聚成藏关系[J]. *中国地质*, 2006, 33(6): 1336-1344.]
- [3] Sha Zhibin, Wang Hongbin, Zhang Guangxue *et al.* The relationships between diapir structure and gas hydrate mineralization[J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(3): 283-288. [沙志彬, 王宏斌, 张光学, 等. 底辟构造与天然气水合物的成矿关系[J]. *地学前缘*, 2005, 12(3): 283-288.]
- [4] Ginsburg G D, Ivanov V L, Soloviev V A. Natural gas hydrates of the world's oceans[C]//Oil and Gas Content of the World's Oceans. PGO Sevmorgeologia, 1984: 141-158 (in Russian).
- [5] Reed D L, Silver E A, Tagudin J E, *et al.* Relations between mud volcanoes, thrust deformation, slope sedimentation, and gas hydrate, offshore north Panama[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1990, 7: 44-54.
- [6] Milkov A V. Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates[J]. *Marine Geology*, 2000, 167: 29-42.
- [7] Lüdmann T, Wong H K. Characteristics of gas hydrate occurrences associated with mud diapirism and gas escape structures in the northwestern Sea of Okhotsk[J]. *Marine Geology*, 2003, 201(4): 269-286.
- [8] Henry P, Le Pichon X, Lallemand S, *et al.* Fluid flow in and around a mud volcano field seaward of the Barbados accretionary wedge: Results from Manon cruise[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101(B9): 20297-20323.
- [9] Xu Ning, Wu Shiguo, Shi Buqing, *et al.* Gas hydrate associated with mud diapirs in southern Okinawa Trough[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26: 1413-1418.
- [10] Bourriak S, Vanneste M, Saoutkine A. Inferred gas hydrates and clay diapirs near the storegga slide on the southern edge of the Vøring Plateau, offshore Norway[J]. *Marine Geology*, 2000, 163: 125-148.
- [11] Zhao Hanqing, Wu Shiguo, Xu Ning, *et al.* The elementary research of gas hydrate associated with mud diapir structure in the East China Sea[J]. *Geoscience*, 2006, 20(1): 155-122. [赵汗青, 吴时国, 徐宁, 等. 东海与泥底辟构造有关的天然气水合物初探[J]. *现代地质*, 2006, 20(1): 155-122.]
- [12] Liu Jian, Lu Hongfeng, Liao Zhiliang, *et al.* Distribution in sulfides in shallow sediments in Dongsha area, South China Sea, and its relationship to gas hydrates[J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(3): 258-262. [刘坚, 陆红锋, 廖志良, 等. 东沙海域浅层沉积物硫化物分布特点及其与天然气水合物的关系[J]. *地学前缘*, 2005, 12(3): 258-262.]
- [13] Wu Daidai, Wu Nengyou, Fu Shaoying, *et al.* Geochemical characteristics of shallow sediments in the gas hydrate distribution area of Dongfang, the northern South China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2010, 30(5): 41-51. [邬黛黛, 吴能友, 付少英, 等. 南海北部东沙海域水合物区浅表层沉积物的地球化学特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30(5): 41-51.]
- [14] Guo Yuehua, Yang Shengxiong, Wang Hongbin, *et al.* Gas hydrate reservoir characteristics of Shenhu area, north slope of the South China Sea[J]. *Geoscience*, 2009, 23(2): 210-216. [郭跃华, 杨胜雄, 王宏斌, 等. 南海北部神狐海域天然气水合物成藏特征[J]. *现代地质*, 2009, 23(2): 210-216.]
- [15] Kuang Zengui, Guo Yiqun. The sedimentary facies and gas hydrate accumulation models since Neogene of Shenhu sea area, northern South China Sea[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2011, 36(5): 914-920. [匡增桂, 郭依群. 南海北部神狐海域新近纪以来沉积相及水合物成藏模式[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2011, 36(5): 914-920.]
- [16] Song Chuen Chen, Shu Kun Hsu, Yunshuen Wang, *et al.* Distribution and characters of the mud diapirs and mud volcanoes off southwest Taiwan[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 92(1): 201-214.
- [17] Li Shengli, Sha Zhibin, Yu Xinghe, *et al.* Impact of Neogene tectonic subsidence characteristics on the BSR Distribution in Qiongdongnan Basin[J]. *Geology in China*, 2013, 40(1): 163-175. [李胜利, 沙志彬, 于兴河, 等. 琼东南盆地新近纪构造沉降特征对BSR分布的影响[J]. *中国地质*, 2013, 40(1): 163-175.]
- [18] Pu Yanping, Sun Chunyan, Chen Shicheng, *et al.* Geochemical prospecting of natural gas hydrate and resource evaluation in Qiongdongnan Basin-Xisha trough of South China Sea[J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(11): 1656-1661. [蒲燕萍, 孙春岩, 陈世成, 等. 南海琼东南盆地西沙海槽天然气水合物地球化学勘探与资源远景评价[J]. *地质通报*, 2009, 28(11): 1656-1661.]
- [19] Sun Chunyan, Wu Nengyou, Niu Binhua, *et al.* Geochemical characteristics of gaseous hydrocarbons and hydrate resource prediction in the Qiongdongnan Basin of the South China Sea[J]. *Geoscience*, 2007, 21(1): 95-100. [孙春岩, 吴能有, 牛滨华, 等. 南海琼东南盆地气态烃地球化学特征及天然气水合物资源远景预测[J]. *现代地质*, 2007, 21(1): 95-100.]
- [20] Wu Daidai, Ye Ying, Wu Nengyou, *et al.* Early diagenesis records and chemical composition abnormalities in pore water for methane-seep in sediments from the southern Qiongdongnan Basin[J]. *Geoscience*, 2006, 20(1): 155-122. [赵黛黛, 叶莹, 吴能友, 等. 琼东南盆地南部泥底辟早期成藏记录及地球化学异常特征[J]. *现代地质*, 2006, 20(1): 155-122.]

- Basin[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2009, 31(2): 86-96. [邬黛黛, 叶瑛, 吴能友, 等. 琼东南盆地与甲烷渗漏有关的早期成岩作用和孔隙水化学组分异常[J]. *海洋学报*, 2009, 31(2): 86-96.]
- [21] Chen Duofu, Yao Bochu, Zhao Zhenhua, *et al.* Geochemical constraints and potential distributions of gas hydrates in Pearl River Mouth Basin and Qiongdongnan Basin in the northern margin of the South China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2001, 21(4): 73-78. [陈多福, 姚伯初, 赵振华, 等. 珠江口和琼东南盆地天然气水合物形成和稳定分布的地球化学边界条件及其分布区[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2001, 21(4): 73-78.]
- [22] He Jiexiong, Yan Wen, Zhu Youhai, *et al.* Biogenetic and sub-biogenetic gas resource potential and genetic types of natural gas hydrates in the northern marginal basins of South China Sea[J]. *Natural Gas Industry*, 2013, 33(6): 121-134. [何家雄, 颜文, 祝有海, 等. 南海北部边缘盆地生物气—亚生物气资源与天然气水合物成矿成藏[J]. *天然气工业*, 2013, 33(6): 121-134.]
- [23] Zhu Weilin, Zhang Gongcheng, Yang Shaokun, *et al.* Gas Geology of Continental Margin in northern South China Sea [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007: 101. [朱伟林, 张功成, 杨少坤, 等. 南海北部大陆边缘盆地天然气地质[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007: 101.]
- [24] He Jiexiong, Liu Hailing, Yao Yongjian, *et al.* The Petroleum Geology and the Resource Potential of the Marginal Basins in the Northern South China Sea[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007: 84-85. [何家雄, 刘海龄, 姚永坚, 等. 南海北部边缘盆地油气地质及资源前景[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008: 84-85.]
- [25] Zhai Puqiang, Chen Honghan. Discharging zones of overpressure system in Qiongdongnan Basin, northern South China Sea: Implications for favorable sites of natural gas accumulation[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2013, 38(4): 832-842. [翟普强, 陈红汉. 琼东南盆地超压系统泄压带: 可能的天然气聚集场所[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2013, 38(4): 832-842.]
- [26] He Jiexiong, Zhu Youhai, Weng Rongnan, *et al.* Characters of north-west mud diapirs volcanoes in South China Sea and relationship between them and accumulation and migration of oil and gas[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2010, 35(1): 75-86. [何家雄, 祝有海, 翁荣南, 等. 南海北部边缘盆地泥底辟及泥火山特征及其与油气运聚关系[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2010, 35(1): 75-86.]
- [27] Shi Wanzhong, Song Zhifeng, Wang Xiaolong, *et al.* Diapir structure and its origin in the Baiyun Depression, Pearl River Mouth Basin, China[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2009, 34(5): 778-784. [石万忠, 宋志峰, 王晓龙, 等. 珠江口盆地白云凹陷底辟构造类型及其成因[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2009, 34(5): 778-784.]
- [28] Xie Lei, Wang Jiasheng, Wu Nengyou, *et al.* Characteristics of authigenic pyrites in shallow core sediments in the Shenhu area of the northern South China Sea: Implications for a possible mud volcano environment[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2013, 43(3): 351-359. [谢蕾, 王家生, 吴能友, 等. 南海北部神狐海域浅表层沉积物中自生黄铁矿及其泥火山指示意义[J]. *中国科学: 地球科学*, 2013, 43(3): 351-359.]
- [29] He Jiexiong, Huang Huoyao, Chen Longcao. The formation and evolution of mud diapir and its relationship with hydrocarbon accumulation mechanism in Yinggehai Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1994, 12(3): 120-129. [何家雄, 黄火尧, 陈龙操. 莺歌海盆地泥底辟发育演化与油气运聚机制[J]. *沉积学报*, 1994, 12(3): 120-129.]
- [30] Kong Min. The Analysis of Over Pressure and Hydrocarbon Migration in Qiongdongnan Basin[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2010. [孔敏. 琼东南盆地油气运移动力特征分析[D]. 武汉: 中国地质大学, 2010.]
- [31] Zhao Hanqin. Tectonic Restoration and the Formation Structural Analysis in the Potential Zone of Gas Hydrate of Qiongdongnan Basin[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2006. [赵汗青. 琼东南盆地天然气水合物远景区构造复原与成矿构造分析[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2006.]
- [32] Huang Baojia, Wang Zhenfeng, Liang Gang. Natural gas source and migration-accumulation pattern in the central canyon, the deep water area, Qiongdongnan Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2004, 26(5): 8-14. [黄保家, 王振峰, 梁刚. 琼东南盆地深水区中央峡谷天然气来源及运聚模式[J]. *中国海上油气*, 2004, 26(5): 8-14.]
- [33] Chen Ruixin, Wu Shiguo, Wang Zhijun, *et al.* Geometry and genesis of polygonal faults in epicontinental deepwater basins, northern South China Sea[J]. *Acta Petroli Sinica*, 2012, 33(4): 610-616. [陈端新, 吴时国, 王志君, 等. 南海北部陆缘深水盆地多边形断层几何特征及成因[J]. *石油学报*, 2012, 33(4): 610-616.]
- [34] Liu Xuewei, Li Minfeng, Zhang Yuwen, *et al.* Studies of seismic characteristics about gas hydrate: A case study of Line HD152 in the South China Sea[J]. *Geoscience*, 2005, 19(1): 33-38. [刘学伟, 李敏锋, 张聿文, 等. 天然气水合物地震响应研究——中国南海 HD152 测线应用实例[J]. *现代地质*, 2005, 19(1): 33-38.]
- [35] Sun Chunyan, Zhang Mingyu, Niu Binhua, *et al.* Study of modeling seismic bottom simulating reflector for nature gas hydrate[J]. *Geoscience*, 2003, 17(3): 337-344. [孙春岩, 章明昱, 牛滨华, 等. 天然气水合物地震似海底反射现象 AVO 正演模型研究[J]. *现代地质*, 2003, 17(3): 337-344.]
- [36] Lei Huaiyan, Zheng Yanhong, Wu Baoxiang. Exploratory method of gas hydrate: Research of BSR technology[J]. *Offshore Oil*, 2002, 4: 1-8. [雷怀彦, 郑艳红, 吴保祥. 天然气水合物勘探方法——BSR 适用性探析[J]. *海洋石油*, 2002, 4: 1-8.]
- [37] Kvenvolden K A. A primer in gas hydrates[C]// Howell D G. *The Future of Energy Gases*; U. S. Geological Survey Professional Paper, 1993, 1570: 279-292.
- [38] He Jiexiong, Su Pibo, Lu Zhenquan, *et al.* Prediction of gas

sources of natural gas hydrate in the Qiongdongnan Basin, northern South China Sea, and its migration, accumulation and reservoir formation pattern[J]. *Natural Gas Industry*, 2015, 35(8):19-29. [何家雄, 苏丕波, 卢振权, 等. 南海北部琼东南盆地天然气水合物气源及运聚成藏模式预测[J]. *天然气工业*, 2015, 35(8):19-29.]

[39] Zhang Wei, He Jiaxiong, Li Xiaotang, *et al.* Petroleum system in Qiongdongnan Basin of the continental margin, the northern South China Sea[J]. *Journal of Earth Geosciences and En-*

vironment, 2015, 37(5):80-92. [张伟, 何家雄, 李晓唐, 等. 南海北部大陆边缘琼东南盆地含油气系统[J]. *地球科学与环境学报*, 2015, 37(5):80-92.]

[40] Yang Taotao, Lv Fuliang, Wang Bin, *et al.* Geophysical characteristics and genetic mechanism of the gas chimney in deep-water area of southern Qiongdongnan Basin[J]. *Progress in Geophys*, 2013, 28(5):2634-2641. [杨涛涛, 吕福亮, 王彬, 等. 琼东南盆地南部深水气烟囱地球物理特征及成因分析[J]. *地球物理学进展*, 2013, 28(5):2634-2641.]

Preliminary Study of the Relationship between the Suspected Mud Diapir and Natural Gas Hydrate in the Qiongdongnan Basin, Northern South China Sea

ZHANG Wei^{1,2}, HE Jia-xiong¹, LU Zhen-quan³, SU Pi-bo⁴, LI Xiao-tang^{1,2}, LIU Zhi-jie^{1,2}

(1. CAS Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Oil and Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100029, China; 4. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China)

Abstract: Based on the tectonic and deposition characteristics, regional geophysical survey as well as hydrocarbon exploration of Qiongdongnan Basin, the development and evolution, and distribution features of the suspected mud diapir, the relationship between the suspected mud diapir and natural gas-hydrate are studied. The results show that the suspected mud diapir, the gas chimney and natural gas-hydrate are mainly distributed in the conjunction area between uplifts and sags, as well as the central of sags, what's more, there are overlapping area in geography between suspected mud diapir and natural gas-hydrate. Biogenic gas and sub-biogenic gas derived from organic matter in shallow layer, as well as thermal gas derived from organic matter in deep strata accumulate in the temperature and pressure stable zone through the gas supply and migration and accumulation system which comprised the suspected mud diapir, the gas chimney, or faults and fractures, and natural gas-hydrate come into being, which show that gas supply system that is composed of suspected mud diapir and gas chimney has space-time coupling configuration relationship with accumulation of natural gas-hydrate. It is forecast that there are three accumulation models of natural gas-hydrate, including self-sourced diffusion biogenic gas and sub-biogenic gas accumulate in place by way of "self-generation and self-bearing", foreign sourced thermal gas accumulate offsite through faults and fractures by way of "lower-generation and upper storage", foreign sourced thermal gas accumulate in offsite place through mud diapir and gas chimney by way of "lower-generation and upper storage".

Key words: Suspected mud diapir; Natural gas-hydrate; Gas supply system; Accumulation model of natural gas-hydrate; Qiongdongnan Basin