

文章编号:1009-2722(2017)07-0011-13

# 南海北部陆坡泥底辟/气烟囱基本特征及其与油气和水合物成藏关系

张 伟<sup>1,2,3</sup>, 梁金强<sup>1,2,4</sup>, 何家雄<sup>5\*</sup>, 丛晓荣<sup>6</sup>, 苏丕波<sup>1,2</sup>

(1 国土资源部广州海洋地质调查局, 广州 510075; 2 国土资源部海底矿产资源重点实验室, 广州 510075;  
3 中山大学海洋科学学院, 珠海 519082; 4 中国地质大学(武汉), 武汉 430074;  
5 中国科学院大学, 北京 100049; 6 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640)

**摘 要:**以南海北部陆坡深水区琼东南盆地南部及珠江口盆地白云凹陷地质地震资料为基础,综合分析了泥底辟及气烟囱分布特征、发育演化特点、成因机制及其与油气和水合物成藏的关系。研究表明:泥底辟及气烟囱主要相对集中发育于凹陷中心或凹陷与凸起构造转换带,具有杂乱模糊地震反射特征且其模糊带形态各异;泥底辟及气烟囱展布规模大小不一,刺穿层位及幅度亦存在明显差异,且常常伴生强烈的热流体活动;泥底辟及气烟囱形成受控于沉积充填的巨厚欠压实泥页岩及其伴生的高温超压潜能、断层裂缝及构造薄弱带和有机质生烃增压等地质因素;泥底辟与气烟囱及其伴生断层裂隙是深部气源向浅层运移聚集的优势通道,通过这些流体运聚的高速通道,可以将其运移至上覆新近系储层和深水海底浅层高压低温稳定域,最终形成深部常规油气藏与海底浅层天然气水合物矿藏纵向叠置复式聚集的组合特点。

**关键词:**泥底辟;气烟囱;发育演化特征;深部常规油气藏;浅层水合物;南海北部陆坡

中图分类号:P618.18 文献标识码:A DOI:10.16028/j.1009-2722.2017.07002

泥底辟及气烟囱的形成演化及其展布与油气分布存在成因联系。泥底辟及气烟囱不仅是含油气盆地深部构造运动与流体活动信息的表征,而且是油气及天然气水合物藏存在和分布的重要指示标志,其在一定程度上控制和制约了含油气盆地中油气及水合物的运聚成藏过程,因而具有十分重要的油气地质意义<sup>[1-3]</sup>。本文以南海北部陆坡西部琼东南盆地深水区与东部珠江口盆地珠二

拗陷白云凹陷为研究对象,分析研究了泥底辟及气烟囱展布特征、发育演化特点、成因机制,在此基础上全面分析解剖泥底辟及气烟囱与油气藏及天然气水合物矿藏的成因联系,总结建立了油气及水合物运聚成藏模式及其评价预测方法,以期能为推进南海北部陆坡深水区油气及水合物资源勘探等提供指导和参考。

## 1 区域地质背景

南海北部陆坡深水区(图 1)位于中国华南大陆向海倾没之陆架坡折及以下区域,构造上处于欧亚板块、太平洋板块及印—澳板块相互作用区,水深在 300~3 200 m 之间。陆坡深水区盆地结构与陆架浅水区一样,亦由古近系与新近系 2 个

收稿日期:2017-05-18

基金项目:国家天然气水合物专项(GZH201100305);国家自然科学基金青年科学基金(41602149)

作者简介:张 伟(1987—),男,博士后,主要从事油气与天然气水合物地质勘探研究工作。E-mail:zwgmgs@foxmail.com

\* 通讯作者:何家雄(1956—),男,博士,岗位教授,主要从事油气及水合物成藏研究工作。E-mail:hejx@gig.ac.cn

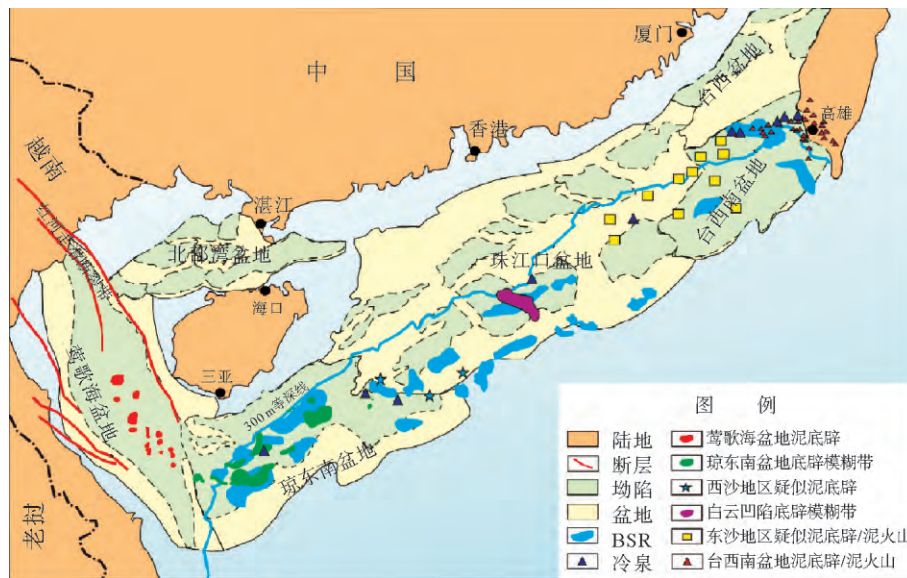


图1 南海北部大陆边缘盆地泥底辟及气烟囱与天然气水合物BSR分布特征

Fig.1 The distribution of mud diapirs, gas chimneys and BSR in the northern margin of South China Sea

构造层组成,古新世晚期以来经历了湖相—海陆过渡相—浅海/半深海相环境,沉积充填了巨厚古近系陆源碎屑沉积物和新近系海相陆源沉积物。为油气形成奠定了雄厚的物质基础<sup>[4]</sup>。其中,陆坡深水区普遍具有快速沉降沉积特点,且主要沉积充填了偏细的陆源碎屑沉积物。由于快速沉降沉积产生的压实与流体排出不均衡之欠压实作用,导致地层超压较普遍。加之南海北部陆坡远离陆缘区,处在减薄的海陆过渡型地壳或洋壳附近,在这种地壳薄之高地温场及高热流背景下,深部烃源岩有机质成熟生烃均主要处于气窗阶段而形成大量高熟热解气,故其可为研究区深水大气田及海底浅层天然气水合物等提供重要的深部气源供给<sup>[5]</sup>。与此同时,在上述这种区域构造地质背景和快速沉降沉积充填之地质环境下,巨厚欠压实泥页岩普遍蕴含高温超压潜能,加之有机质热解生烃增压作用所产生的巨大动力,往往导致某些地层薄弱带及断裂发育区形成异常发育的泥底辟及气烟囱等地质体,且在发育演化过程中作为塑性物质及流体运聚的纵向输送通道系统,必然会将大量油气等流体物质源源不断地携带至浅层具有圈闭聚集条件场所或高压低温稳定带形成油气藏或水合物矿藏。因此,泥底辟及气烟囱与油气及水合物成矿成藏密切相关<sup>[6]</sup>。

## 2 泥底辟及气烟囱分布特征

海域泥底辟/泥火山及气烟囱等特殊地质体,一般均应用现代高分辨率地震、浅剖及海底多波束探测资料,并结合少量油气钻井资料等进行综合分析判识<sup>[7,8]</sup>。研究表明<sup>[6,9-12]</sup>,南海北部大陆边缘盆地泥底辟/泥火山及气烟囱,主要分布于陆架浅水区的莺歌海盆地中央泥底辟带、陆坡深水区的琼东南盆地中央坳陷带及其南部坳陷带和珠江口盆地珠二凹陷白云凹陷及东沙东南部、台西南盆地南部凹陷深水海域及相邻陆上部分区域(图1)。其中,处于南海北部陆坡西部琼东南盆地南部深水区 and 东部珠江口盆地白云凹陷深水区疑似泥底辟及气烟囱(由于其与典型泥底辟存在差异,故称“疑似泥底辟”,为了表述方便,以下均称泥底辟)较发育,尤其是气烟囱分布较普遍。

### 2.1 琼东南盆地南部深水区

琼东南盆地南部陆坡深水区二维地震资料解释及地质综合分析表明,陆坡深水区及其周缘泥底辟及气烟囱分布较普遍,但以气烟囱为主,平面展布表现出“广而散”的特征,几乎在整个盆地均有发育,部分区域相对集中,泥底辟和气烟囱发育

及展布规模大小不一(图 2)。在北部凸起带及中央坳陷带过渡区域,气烟囱分布较普遍,同时发育一定规模的泥底辟。中央坳陷带泥底辟和气烟囱主要集中展布于乐东凹陷、陵水凹陷、松南凹陷、宝岛凹陷及长昌凹陷。在南部低凸起区域泥底辟和气烟囱分布也较为集中,如陵南低凸起及

松南低凸起区域及其周缘的泥底辟和气烟囱分布较普遍。油气勘探及地质分析亦表明,在陵南低凸起区中央水道砂下部地震反射剖面上可观察到大范围泥底辟及气烟囱活动痕迹<sup>[13]</sup>。另外,在位于盆地西南部的华光凹陷也识别圈定出了一定展布规模的泥底辟。总之,根据琼东南盆地泥底辟及气烟囱展布规律,这些特殊地质体均主要分布于凹陷沉积中心及凹陷与凸起过渡区较深部位,因此,泥底辟及气烟囱形成及分布应与盆地构造沉积充填演化特点密切相关。

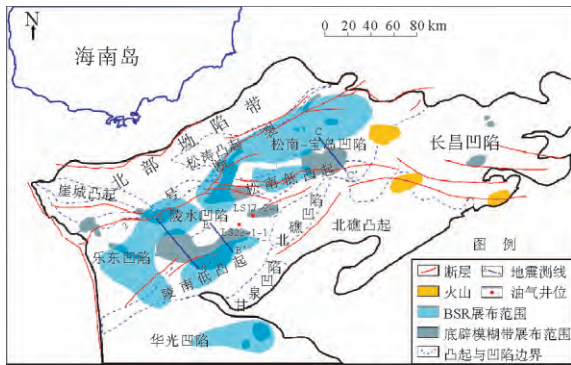


图 2 琼东南盆地深水区泥底辟及气烟囱与 BSR 展布特征

Fig. 2 The distribution of mud diapirs, gas chimneys and BSR in the deep water area of Qiongdongnan Basin

### 2.2 珠江口盆地白云凹陷及周缘深水区

珠江口盆地深水油气勘探及天然气水合物勘查表明,盆地南部深水珠二凹陷白云凹陷中南部及周缘区,泥底辟及气烟囱分布较普遍(图 3a)。目前,除了在白云凹陷中南部发现有大规模分布的泥底辟及气烟囱外,在白云凹陷北坡番禺低隆起局部区域,部分地震反射剖面上亦可观察到泥底辟及气烟囱造成的大规模地震杂乱反射模糊带甚至空白带;此外,通过海洋地质调查及地震

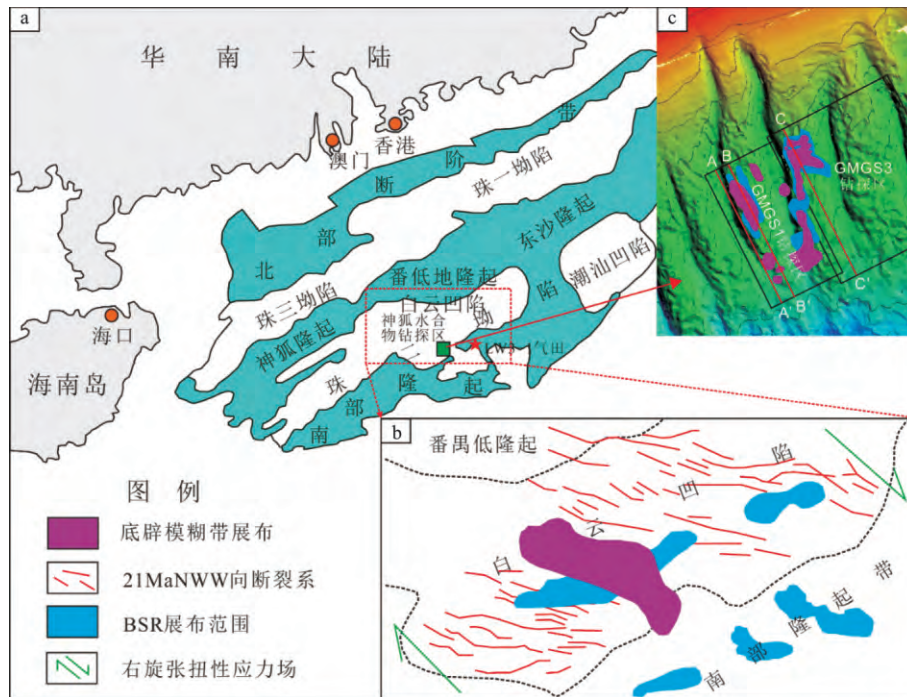


图 3 南海北部陆坡东部珠江口盆地白云凹陷及周缘泥底辟及气烟囱与 BSR 展布特征

Fig. 3 The distribution of diapir muzzy zone and BSR in Baiyun Sag of Pearl River Mouth Basin in the east of the northern slope of South China Sea

概查工作,亦在珠江口盆地东部东沙东南部海域发现了刺穿海底的泥火山及其相关证据<sup>[14]</sup>。从泥底辟及气烟囱空间分布特征看,该区泥底辟及气烟囱大致呈 NWW 向展布,主要分布于白云凹陷中心略偏西南区域,其与白云凹陷中新世晚期发育的 NWW 向断裂体系展布方向大体一致(图 3b),因此,泥底辟活动及展布可能受区域断裂体系控制<sup>[15]</sup>。总之,珠江口盆地南部深水区泥底辟/泥火山及气烟囱发育展布不仅平面上具有不均一性,而且纵向上泥底辟形成演化特征也存在较大差异,表明不同区域泥底辟/泥火山及气烟囱展布特征、发育演化过程及控制影响因素等存在一定差异。

### 3 泥底辟及气烟囱形成演化特点

琼东南盆地及珠江口盆地泥底辟及气烟囱等地震地质异常体,通常具有泥底辟活动的一般地震反射特点和几何外形特征,在二维地震反射剖面上,往往可以观察到泥底辟内部空白、模糊杂乱反射等异常反射特点。泥底辟周缘往往伴生断层裂隙,泥底辟顶部常伴有流体压裂产生的断裂和微裂隙等底辟伴生构造的一系列特点。但不同区域构造地质动力及沉积充填背景的差异,往往导致不同区域泥底辟活动及其形成演化特点均存在较大差异,如泥底辟类型、展布规模,断层裂隙等伴生构造特征、热流体活动特点等明显不同。

#### 3.1 琼东南盆地泥底辟及气烟囱形成演化特点

##### 3.1.1 分布较普遍,规模不一

前已论及,琼东南盆地深水区泥底辟及气烟囱分布较普遍,几乎在全盆地深水区均有发育。但依据大量地震资料追踪解释和对比,尤其是结合构造沉积充填演化特点分析认为,研究区泥底辟及气烟囱发育展布较分散。泥底辟及气烟囱可两者在一地区同时出现,即以泥底辟伴生气烟囱的形式产出,亦可两者单独出现。如部分凹陷中心及凹陷与凸起过渡区,气烟囱分布较密集,尤其是中央坳陷带及南部低凸起区气烟囱普遍较发育,而该区泥底辟活动及分布则相对较少;在乐东—陵水凹陷中心及偏南部的低凸起区域,不仅泥底辟活动强烈且伴生气烟囱普遍,泥底辟展布

规模亦较大<sup>[16]</sup>。此外,在北部凸起带及中央坳陷带转换过渡带等区域,其泥底辟亦相对集中发育。除平面上泥底辟展布特征存在差异外,剖面上泥底辟活动强度及规模也大小不一。活动能量强且规模大的泥底辟及气烟囱,在地震反射剖面显示为杂乱模糊地震反射或模糊空白带,且刺穿多个层位;活动能量小且规模小的泥底辟及气烟囱,其在地震剖面上多显示为规模小的层间泥底辟及气烟囱,其泥底辟及伴生流体活动微弱,在地震剖面上常常难以识别和判识。

##### 3.1.2 构造样式多样

琼东南盆地南部深水区泥底辟上侵活动较强烈,泥底辟及气烟囱剖面上构造样式及形态特征各异,展布规模大小不一,在二维地震剖面上显示为不同形状的异常反射特点(图 4)。通过沿盆地 NE 向长轴横切乐东—陵水凹陷及陵南低凸起的 2 条地震剖面(AA'和 BB')和横切松南—宝岛凹陷及松南低凸起的地震剖面(CC')分析解释,可以识别出泥底辟、气烟囱及海底丘状体、管状构造、底辟伴生断层,海底麻坑等多类型泥底辟及伴生构造系统。

在琼东南盆地南部深水区二维地震剖面上,泥底辟和气烟囱相伴生或单独发育,通常呈柱状或纺锤状外形,内部地震反射同相轴不连续,多为模糊或杂乱地震反射或空白反射(图 4a)。从图 4a 及 4b 可以看出,剖面上泥底辟柱状体向上刺穿围岩及上覆地层,两侧同相轴在泥底辟边界发生中断并被牵引上拉,底辟两侧和顶部发育高角度底辟伴生断层。在泥底辟顶部和两侧还可识别出“亮点”,表明其深部气体沿泥底辟纵向通道发生了运移并被浅层储集体所捕获。另外,某些泥底辟发育区深水海底浅层还可观察到海底麻坑,表明泥底辟上侵活动中发生泄压后导致海底表面塌陷。该区气烟囱模糊带在地震剖面上亦异常明显,其内部反射杂乱模糊,其与泥底辟不同的是,气烟囱两侧同相轴虽然在气烟囱边界也发生中断,但同相轴代表的地层产状并未发生改变,在气烟囱的顶部或两侧侧翼亦能见到含气“亮点”,部分气烟囱顶部还形成了气体逸散的微小柱状及管状构造(图 4a),进而可导致气体通过该垂向通道逸散至海底。同时在气烟囱所在区域海底亦可见海底麻坑,可能是深部气体通过气烟囱运移至海

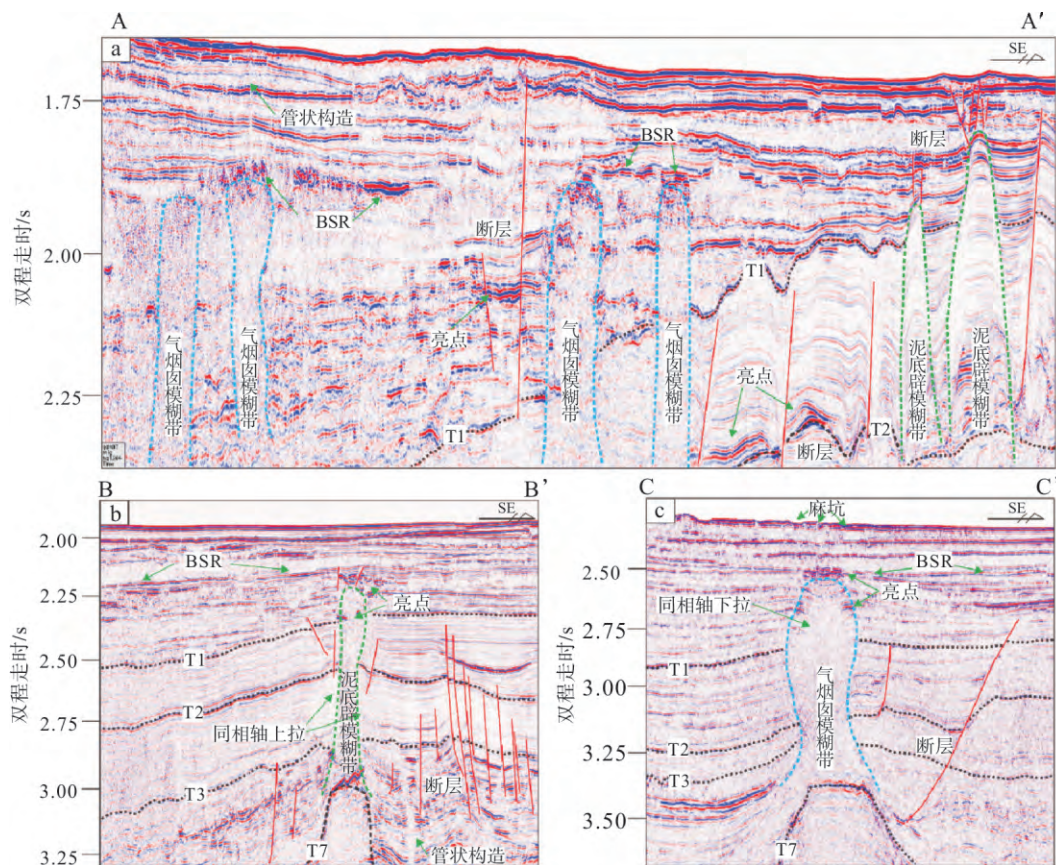


图 4 琼东南盆地深水区泥底辟和气烟囱地震反射特征(测线位置见图 2)

Fig. 4 The seismic reflection features of mud diapirs and gas chimneys in deep water area of Qiongdongnan Basin (see Fig. 2 for location)

底浅层发生泄压泄漏而形成塌陷麻坑(图 4c),亦表明该区气源较充足。

### 3.1.3 刺穿层位不一

地震资料分析解释表明,琼东南盆地不同区域不同构造带或同一构造带不同位置展布的泥底辟和气烟囱刺穿地层层位及刺穿规模存在一定差异。前人通过对琼东南盆地地震资料分析研究后认为<sup>[17]</sup>,泥底辟及气烟囱在盆地中央拗陷带西北部深水区较为集中发育,且形成时间较晚,垂向上,大部分泥底辟及气烟囱均刺穿 T1—T3 地震反射界面;而盆地南部深水区的泥底辟纵向上仅刺穿至 T2 界面。本次研究通过地震精细分析解释,揭示了琼东南盆地中央拗陷带及南部深水区泥底辟的泥源层主要来自 T5 地震反射界面之下,底辟发育规模大小不一,刺穿层位不一,有的刺穿 T1 反射界面,离海面非常近,例如在中央拗陷带及其周缘甚至发现了可能刺穿至海底的疑似泥底辟(图 4a、4b),表明底辟活动能量强,能够将

深部泥源物质及伴生天然气等流体携带至浅层。当然亦有泥底辟上侵活动能量较弱的,其仅仅刺穿 T5 或 T6 地震反射层,泥源物质轻微上拱底辟幅度非常低而形成龟背型弱刺穿底辟类型。推测不同构造带底辟活动刺穿层位及发育规模的差异,主要与所在区域构造沉积充填演化及欠压实程度与生烃增压作用的强弱密切相关。

### 3.1.4 伴生较强热流体活动

泥底辟上侵活动不仅导致大量深部高温超压塑性泥源物质在压力差及密度差作用下向浅层及围岩上拱甚至刺穿上覆地层,而且亦伴生较强热流体活动,促使有机质成熟生烃形成油气水等大量流体,不断地向上覆地层薄弱带侵入且残留很多流体运聚活动的痕迹。因此,在地震反射剖面上通常可看到不同类型泥底辟及气烟囱和“含气陷阱”等塑性泥源层和流体侵入地层而强烈活动的痕迹<sup>[18]</sup>,同时由于泥底辟伴生热流体的上侵活动,往往导致有机质成熟度偏高,有机质生烃成熟

门槛比非泥底辟区明显偏浅,气窗范围扩大。如南海西北部莺歌海盆地中央泥底辟带中新统气源岩成熟生烃演化与浅层及中深层气藏形成过程即为其典型实例<sup>[10]</sup>。琼东南盆地中央坳陷带及南部坳陷深水区亦属于高温超压盆地,盆地中央及凹陷中心深部超压普遍发育,且具高地温高热流特征<sup>[19]</sup>。深部沉积充填较厚的古近纪及早中新世泥页岩欠压实作用及烃源岩有机质生烃形成的异常高温超压明显,故导致泥底辟及气烟囱以及伴生热流体上侵活动较强烈,而且盆地东部长昌凹陷及南部深水区尚存在强烈的岩浆底辟侵入作用的影响,故导致局部区域热异常明显,地温梯度偏高。进而对该区深水油气形成及深水海底浅层天然气水合物成矿成藏等,均起到了重要的控制影响作用。中央坳陷带深水区中水道砂目前勘探发现的LS17-2、LS25-1等大中型天然气田群,以及深水海底浅层如西沙海槽等区域发现的水合物实物样品及冷泉碳酸盐岩等,均充分表明研究区存在由于泥底辟及伴生热流体活动所提供的深部热解气源的供给及其运聚过程。亦即盆地多种类型泥底辟及热流体上侵活动之流体运聚活动对于深水油气及水合物形成产生了重要影响和控制作用<sup>[13,16]</sup>。

### 3.2 白云凹陷泥底辟气烟囱发育演化特征

#### 3.2.1 分布相对集中

与琼东南盆地底辟活动“广而散”的分布特征明显不同,珠江口盆地白云凹陷泥底辟及气烟囱发育相对集中,主要展布于凹陷中央偏西南位置,且呈现出大面积底辟模糊带的特征,展布面积约1 000 km<sup>2</sup><sup>[15]</sup>。部分地震剖面能观察到多个泥底辟或多个气烟囱成群成带分布的特征,部分地震

剖面显示出泥底辟和气烟囱伴生的特点。水合物勘查研究证实,白云凹陷神狐天然气水合物钻探区气烟囱异常发育,探区内主要发育NW和SN 2个气烟囱带,分布面积约占钻探区的1/10(图3c)。底辟和气烟囱这种集中分布特征可能与凹陷沉积及断裂构造的控制有关<sup>[11,14,15,20,21]</sup>。

#### 3.2.2 类型多样,刺穿层位不一

白云凹陷泥底辟、气烟囱及其伴生构造均较发育,王家豪等<sup>[15]</sup>通过地震资料解释发现,白云凹陷发育了多种底辟构造样式或不同底辟阶段的底辟地质异常体,包括龟背上拱、弱刺穿、气烟囱、底辟断层/裂缝、海底麻坑等多种类型,并认为这些不同样式的底辟代表了由深部塑性物质开始上拱—弱刺穿—强刺穿—塌陷等不同底辟演化阶段及底辟幅度的产物。

不同阶段发育的底辟规模具明显差异,据统计<sup>[15]</sup>泥底辟最大底辟幅度(高度)可达8 km,小型底辟仅呈现出轻微上拱的特征。从地震剖面上解释,泥底辟根部地震反射杂乱模糊,可能发源于文昌—恩平组,垂向向上延伸进上中新统一第四系,甚至刺穿至海底。气烟囱的规模也大小不一且同样无固定刺穿层位,神狐水合物钻探区地震剖面显示(图5),气烟囱多发育于T5之下的珠海组泥岩层,甚至可能发源于文昌—恩平组沉积层,向上刺穿T2、T3、T4和T5 4个层位到达浅部。从深部的T5反射层到浅部的T2反射层,气烟囱的位置和面积都变化不大<sup>[21]</sup>。从神狐海域地震资料来看,泥底辟发育并不典型,仅表现出泥底辟体两侧同相轴轻微牵引上拱特点,而在泥底辟体内部、两侧及顶部可识别出大量底辟伴生断层,表明泥底辟活动能量较强(图5c)。

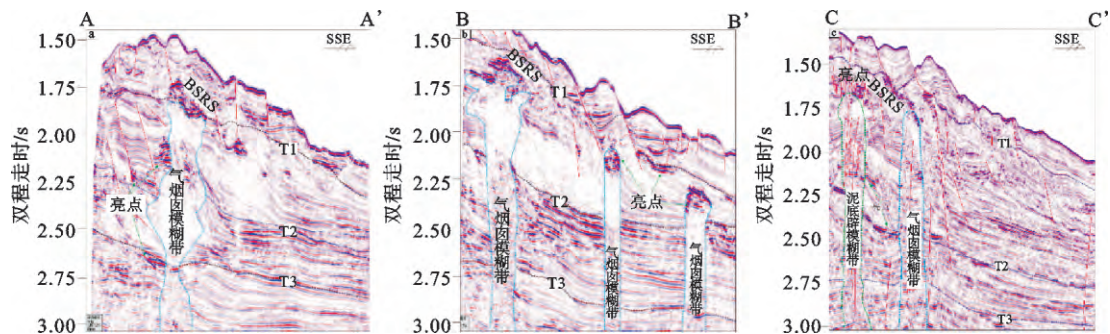


图5 珠江口盆地白云凹陷泥底辟及气烟囱地震反射特征(测线位置见图3c)

Fig. 5 The seismic reflection features of mud diapirs and gas chimneys in Baiyun sag of Pearl River Mouth Basin (see Fig. 3c for location)

### 3.2.3 气烟囱发育形态各异

从白云凹陷中水合物神狐钻探区地震剖面观察,钻探区的气烟囱呈较为规则的柱状形态,气烟囱顶部呈现出囊状、花冠状和穹顶状等多种形态,表明气体发生了充注和扩散(图 5)。气烟囱顶部边缘多呈小型龟背上拱和弱刺穿构造<sup>[21]</sup>,表现出高温超压导致的上拱特征。从花冠状气烟囱模糊带外形上看(图 5b),其中下部为柱状的模糊反射,地震反射杂乱,连续性较差,但通常与两侧地层边界明显,呈现出较明显的接触关系。花冠状模糊反射带的顶部与中下部柱状模糊带有较明显区别,在顶部可以观察到明显的横向扩张而表现出花状或囊状的外形<sup>[21-23]</sup>。穹顶状气烟囱模糊带在神狐钻探区发育较为典型和普遍,其外形近乎直立,顶部呈现出光滑穹顶状,无四周扩散而逐渐收敛(图 5b)。从气烟囱反射特征看,其并没有延伸或刺穿至海底,通常终止于 BSRs 附近。在“穹顶”附近,地震反射为模糊—强振幅反射,地震反射同相轴“增粗”应是在气烟囱反射带顶部聚集有从下部运移而来的游离气导致。地震资料显示,神狐钻探区发育的气烟囱内部结构自下而上可以分为 3 部分:下部的杂乱反射带;中部的空白反射带;上部的强振幅反射带<sup>[22,23]</sup>。前人研究认为,气烟囱是地质历史时期深部流体向上运移的有利通道<sup>[24]</sup>,同时,也说明该区曾经存在着较强的超压<sup>[20]</sup>。

### 3.2.4 天然气运移特征明显

白云凹陷内气烟囱较发育,在地震反射剖面上通常呈直立的,下大上小的柱状烟囱形构造,部分气烟囱局部发生横向扩张而呈囊状和花状,表明气体发生了横向(扩散),形成不规则的大型模糊带,并在气烟囱内部观察到因含气造成的地震反射同相轴下拉现象。一方面,气烟囱上部地层发育断裂或流体裂缝等有利流体运移的通道,天然气会沿这些通道向上发生运移泄漏,气体最终在更浅层或海底附近聚集,在气烟囱四周和顶部通常能观察到因地层圈闭气体后形成的“亮点”反射,表明深部气体沿着气烟囱通道向上部储层中运移且流体泄漏活动至今仍在延续<sup>[11]</sup>;另一方面,在气烟囱的顶部,因天然气等流体通过气烟囱渗漏到海底,底辟能量大量释放,海底浅表层沉积物发生塌陷而形成海底麻坑,在白云凹陷气烟囱

发育区顶部即观察到与气烟囱相联系的一系列休眠海底麻坑<sup>[15]</sup>。上述气烟囱与天然气流体运移伴生特征充分证明白云凹陷天然气运移特征明显,底辟及气烟囱通道对天然气等流体的运移疏导起到了重要作用。

## 4 泥底辟及气烟囱成因

### 4.1 巨厚欠压实泥页岩

泥底辟及气烟囱的形成必须具有厚层欠压实泥页岩这个雄厚物源基础。琼东南盆地物源供应充足,西部越南昆崙隆起、北部海南岛隆起及盆地南部隆起为盆地提供了大量快速沉积充填的陆源碎屑物质。盆地中央坳陷带古近系和新近系沉积巨厚,且由于快速沉积充填,凹陷中心因欠压实作用而普遍发育高温超压,为泥底辟及气烟囱的形成提供了强大的动力源和雄厚的物源基础。通过盆地地震地质资料分析解释和综合研究,笔者初步判定该区大部分泥底辟的泥源层主要来自中新统梅山组—三亚组,部分泥底辟泥源层则可能来自始新统岭头组—渐新统崖城组。必须强调指出,岭头组—崖城组泥页岩沉积由于晚期(中中新世梅山组之后)快速沉降和高地温场的影响,烃源岩有机质热解成熟生烃并伴生强大高温超压潜能。很显然这种富含大量热解气等流体的巨厚高温超压泥源层,即是该区泥底辟及气烟囱形成的物质基础和强大的动力源。当然,该区中新统梅山组—三亚组半深海相泥页岩等细粒沉积物,由于形成于快速沉积充填环境下高温超压较普遍,亦伴生强大的高温超压潜能,更是琼东南盆地泥底辟及气烟囱形成的主要泥源层及其物源供给者。

与琼东南盆地类似,白云凹陷同样具有快速沉降,碎屑物质快速沉积充填的特征,发育了巨厚的古近系泥源层,新生界最大沉积厚度达 11 km<sup>[15]</sup>。不同的是,白云凹陷处于珠江口盆地南缘陆坡深水区,相对远离北部珠江口物源供给方向,因此,凹陷沉积以细粒沉积物为主,主要沉积了 2 套巨厚的沉积层。白云凹陷沉积演化研究表明,始新世—渐新世时期,文昌组和恩平组开始沉积发育,且以中—深湖相泥岩沉积为主,最大沉积

厚度可达 5 km 以上, 钻井证实这 2 套地层为凹陷主要的烃源岩。根据地震资料解释, 这 2 套地层中发育的巨厚泥页岩也是凹陷发育泥底辟及气烟囱的主要物源基础和气体供给来源。早—中中新世时期, 白云凹陷又沉积了一套珠江组和韩江组巨厚的泥页岩沉积, 为白云凹陷另一套底辟物质的泥源层<sup>[15,20]</sup>。

总之, 凹陷沉积中心往往具有厚度大、埋藏深、沉积速度快的特点, 往往造成凹陷中沉积物压实与流体排出不均衡, 因而极易导致欠压实而形成高温超压系统, 当凹陷深部的厚层泥源物质高温超压潜能积累到一定程度, 达到或超过上覆地层破裂压力时, 混有油气水等流体的巨厚泥源物质即可突破上覆岩层沿薄弱带及断层裂隙等发生上拱底辟或刺穿侵入, 最终形成不同类型泥底辟及气烟囱。因此, 巨厚欠压实泥源物质的底辟上拱流动是形成泥底辟及气烟囱的物质基础和基本前提条件。

#### 4.2 高温超压潜能

琼东南盆地热流值普遍较高, 大部分区域热流值在  $60 \text{ mW/m}^2$  以上, 深水区地温梯度通常在  $4.0 \sim 4.4 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$  之间, 泥底辟和气烟囱相对集中发育的中央坳陷带地温梯度普遍较高, 盆地东部及南部部分区域受岩浆侵入影响, 局部地区出现热异常, 地温梯度更高<sup>[25]</sup>, 因此, 琼东南盆地是一个“热盆”。琼东南盆地凹陷中央及部分凸起深部普遍发育超压, 平面上看, 中央坳陷带发育强超压(纵向上凹陷中地层压力随深度加大, 压力系数有增大的趋势, 最高能达到 2.0 以上), 而北部凸起区的崖城 21-1 低凸起地区则是常压带<sup>[19,26]</sup>, 南部低凸起区及其周缘则属于常压及压力过渡带, 因此, 从压力分布上看, 北部凸起带及南部低凸起带是中央坳陷带强超压的泄压带, 因而是凹陷深部含气流体运移和泄压的主要方向。研究表明<sup>[19]</sup>, 梅山组及其以下地层为琼东南盆地超压主要发育层位, 高温超压的古近系泥页岩及新近系中新统梅山组半深海相大套泥岩构成了盆地泥底辟和气烟囱形成的物质基础, 古近纪超压与盆地快速沉降及高地温梯度促使深部烃源岩热解生烃增压密切相关, 而新近纪超压则是由欠压实作用引起。厚层泥页岩高温超压潜能则是盆地泥底辟

及气烟囱发育的物质基础及动力来源, 同时底辟的形成和展布与超压的分布密不可分。

珠江口盆地白云凹陷内热流值普遍较高, 据统计最高达  $77.8 \text{ mW/m}^2$ <sup>[27]</sup>, 这与凹陷地处陆壳向洋壳过渡的减薄构造带上, 且区域地幔隆升, 岩石圈发生拉张和减薄, 同时伴随了多期热活动有关。与琼东南盆地深凹陷类似, 白云凹陷高热流值同样可加速深部烃源岩有机质成熟热解, 进而造成有机质生烃及热流体增压, 为泥底辟和气烟囱的形成提供超压潜能。模拟研究结果表明<sup>[20]</sup>, 陆坡深水区白云凹陷具有幕式泄压的特点, 现今仅在海相泥岩地层中深部烃源岩层中发育弱超压, 在高地温梯度的作用下, 深部烃源岩生排烃并混入古近纪厚层塑性泥页岩中, 伴随凹陷幕式泄压向浅部地层上拱侵入甚至刺穿, 形成泥底辟和气烟囱。

#### 4.3 断层裂隙控制

##### 4.3.1 琼东南盆地构造断裂及地层薄弱带发育

前已述及, 琼东南盆地北部凸起带及中央坳陷带过渡区、南部低凸起带及凹陷与凸起转换带泥底辟和气烟囱相对较发育, 笔者研究认为这与底辟所处构造有关。琼东南盆地经历古近纪和新近纪“先断后坳”两大构造演化阶段, 形成南北分带, 凹凸相间的构造格局。最为显著的是, 在北部凸起带及中央坳陷带分界线形成了横贯盆地东西的 2 号断裂带, 其主干断裂向下切穿古近纪地层, 向上部分甚至切穿至海底, 成为含气流体运移疏导的重要通道。在南部深水区低凸起区域也发育了多条深大断裂, 新近纪仍在活动, 构成了中央坳陷带向南部超压过渡带泄压的主要方向和通道, 深部古近纪泥源层易于沿这些断裂薄弱带向上侵入刺穿。此外, 在一些凹陷和凸起过渡带同样因构造转换, 存在断裂裂缝薄弱带, 有利于泥底辟和气烟囱的形成。

##### 4.3.2 白云凹陷张扭构造背景断层裂隙发育

白云凹陷内泥底辟和气烟囱的形成和展布与断裂活动密切相关。在新生代, 白云凹陷处于右旋张扭性构造环境, 在此构造作用下, 凹陷内发育了雁行状排列的 NWW 向断裂系, 断裂系的展布方向与凹陷内底辟和气烟囱的展布方向大体一致, 推测二者之间具有密切成因联系。断裂系的



形成造成凹陷沉积盖层内形成构造薄弱带<sup>[23]</sup>,在白云凹陷幕式泄压及晚期东沙运动的影响下,古近纪厚层塑性泥页岩易于在深部高温超压作用下向构造薄弱带底辟侵入甚至刺穿,深部烃源岩热解形成的天然气也可沿上述运移通道发生气侵,最终在凹陷中形成了泥底辟和气烟囱活动带。

#### 4.4 有机质生烃增压

琼东南盆地深水区发育多个大型富生烃凹陷,凹陷内沉积充填了巨厚的新生代沉积物,古近系始新统及渐新统崖城组烃源岩大多已进入成熟—高成熟阶段,部分凹陷烃源岩有机质现今仍处于活跃的生—排烃阶段,而部分烃源岩甚至已经进入过成熟阶段。统计结果表明<sup>[28]</sup>,中央坳陷带富生烃凹陷烃源岩的生烃强度为 $(125.15 \sim 168.53) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ,生气强度为 $(85.89 \sim 121.10) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ,拥有巨大的生烃潜力。迄今已在乐东—陵水凹陷南部斜坡带勘探发现了LS22-1及LS17-2等大中型深水天然气田,证实了中央坳陷带有机质热解生成了大量天然气且已经发生了生排烃及运聚过程。白云凹陷同样已被证实为巨大的富生烃凹陷(凹陷面积为 $2 \times 10^4 \text{ km}^2$ ),白云主洼生烃强度大于 $(500 \sim 4\,000) \times 10^4 \text{ t}/\text{km}^2$ ,主生气强度为 $(500 \sim 3\,500) \times 10^4 \text{ t(油当量)}/\text{km}^2$ ,凹陷古近纪发育了始新统文昌组及渐新统恩平组湖相—浅湖相—沼泽相、三角洲相烃源岩,文昌组烃源岩厚度介于 $200 \sim 1\,700 \text{ m}$ 之间,恩平组烃源岩厚度介于 $200 \sim 1\,300 \text{ m}$ 之间,因此,白云凹陷拥有极大的生烃潜力,凹陷内部及周源LW3-1、LH34-2、PY30-1等一大批商业性中—大型油气田的勘探发现充分证明了白云凹陷是一个烃源丰富的大凹陷<sup>[29]</sup>。总之,在凹陷深部高温超压作用下,大量天然气伴随深部热流体及塑性泥源物质上拱刺穿形成盆地或凹陷内较普遍发育及展布的泥底辟及气烟囱地质地震异常体。

## 5 泥底辟与油气及水合物成藏

### 5.1 泥底辟与油气成藏关系

琼东南盆地南部深水区油气勘探证实<sup>[13,16]</sup>,泥底辟在油气运移成藏过程中起到重要作用。因

盆地古近纪断裂发育,但是大部分断裂在新近纪已停止活动,古近纪烃源岩生成的油气难以通过断层向新近纪主要储层运移聚集,而南部深水区低凸起区域相对集中发育的底辟和气烟囱及其伴生构造则成为沟通深部古近纪烃源岩及新近纪储层的有效运聚通道,在流体势作用下促使始新统湖相及渐新统煤系地层生成的油气向上部中新统主要勘探目的层运移聚集形成油气藏。盆地深水区勘探发现的中央水道LS17-2上中新统黄流组砂岩大型天然气田成藏机制分析表明<sup>[16]</sup>,当凹陷深部古近纪烃源岩与断裂及泥底辟和气烟囱等垂向通道以及上覆不同类型圈闭时空耦合匹配较好时,可形成下生上储、古生新储型油气藏。气藏的烃源供给主要来自深部崖城组烃源岩,天然气通过深入凹陷深部的连续性砂体及不整合面等横向运移通道运移至南部低凸起区,再通过低凸起区下部发育的断裂、泥底辟及气烟囱及其伴生断层裂隙等垂向运移通道不断地运移疏导至新近纪黄流组水道砂富集成藏(图6)。

白云凹陷油气地质研究表明,凹陷油气运聚成藏系统主要是由古近纪始新统湖相及渐新统煤系地层相对高压流体势运聚动力与断层、裂隙及连续性运载砂体和泥底辟及气烟囱等疏导格架与新近纪不同类型储层和圈闭所构成,运移疏导体系在油气成藏过程中至关重要。无论是上渐新统珠海组陆架边缘浅水三角洲砂岩外源型天然气运聚成藏模式,还是中新统珠江组深水扇系统混源型天然气成藏模式<sup>[5,30]</sup>,烃源供给主要为陆相凹陷阶段凹陷深部沉积充填的巨厚始新统湖相及渐新统恩平组湖相泥岩及煤系地层。烃源岩有机质生成的油气通过直接沟通古近系大套陆相烃源岩的纵向断裂、砂体及不整合面和底辟及气烟囱向上或侧向运移,最终在有利构造区带之不同类型构造—岩性复合圈闭、中新统海底扇和浅水三角洲砂岩圈闭中运聚成藏,形成下生上储、陆生海储及海生海储的成藏储盖组合类型,白云凹陷LW3-1气田即为典型代表(图7)。

### 5.2 泥底辟与水合物成藏关系

从琼东南盆地深水区及白云凹陷泥底辟及气烟囱发育区地震剖面资料可以观察到(图2~5),水合物指示标志BSR与泥底辟及气烟囱空间匹

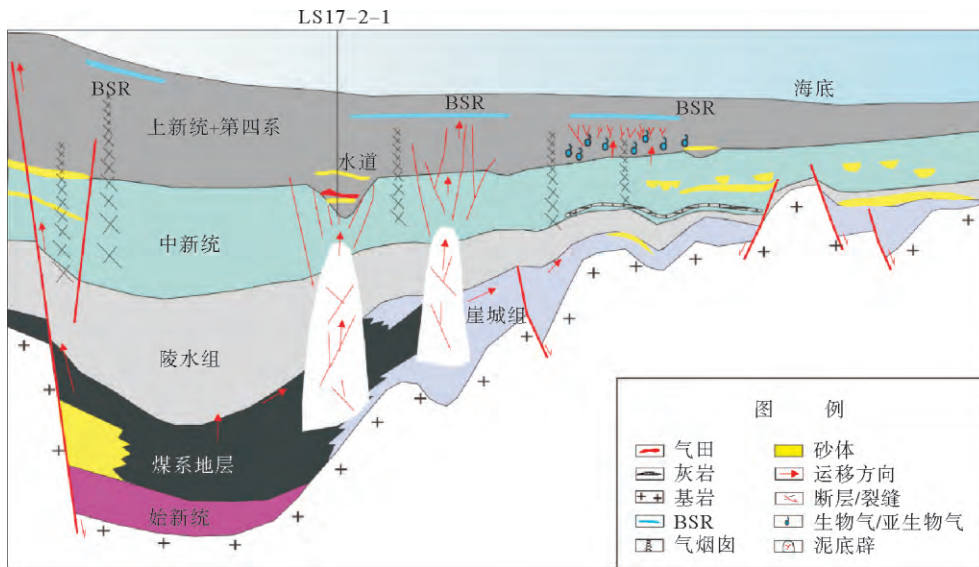


图 6 琼东南盆地深水区油气及天然气水合物成藏模式

Fig. 6 The migration and accumulation model of petroleum and gas hydrate in deep water area of Qiongdongnan Basin

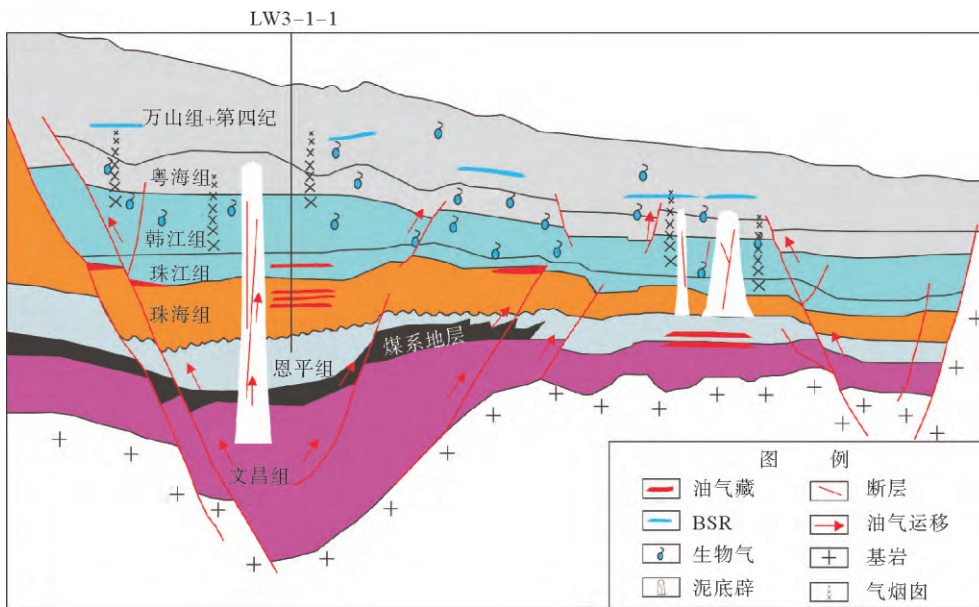


图 7 珠江口盆地白云凹陷油气及天然气水合物成藏模式(据文献[31]修改)

Fig. 7 The migration and accumulation model of petroleum and gas hydrate in Baiyun sag of Pearl River Mouth Basin (modified from reference [31])

配关系良好。在平面上,泥底辟及气烟囱与 BSR 叠置关系明显,大部分泥底辟及气烟囱发育在 BSR 展布范围内;纵向上,在底辟及气烟囱顶部及上部四周通常能识别出 BSR,充分表明底辟活动与水合物成藏关系密切,根据水合物气源成因

及泥底辟和气烟囱与水合物温压稳定域空间耦合关系,笔者认为南海北部陆坡深水区存在 2 种与底辟活动有关的水合物成藏模式。

(1)生物气自源供给自生自储原地成矿成藏南海北部水合物分解气及顶空气地化分析结

果表明<sup>[32]</sup>,水合物气源以生物成因气为主并伴有一定量的热成因气。生物气气源主要来自海底浅层处于生物化学作用带未成岩且富含有机质的沉积物,沉积物有机质尚未进入成熟门槛而是通过生物化学作用形成生物成因甲烷,这种甲烷具有近源短距离以扩散方式运移聚集的特点<sup>[33]</sup>,当天然气与浅层温压稳定域时空匹配较好时,即可形成生物气自源供给自生自储原地成矿成藏模式。这种水合物成藏的重要特征在于形成水合物的气源岩及温压稳定域均处于盆地有机质成熟门槛以上的微生物化学作用带。

白云凹陷神狐地区水合物勘查研究表明<sup>[32,33]</sup>,水合物生物气源主要是来自中中新统珠江组以上未成熟—低成熟的生物气源岩,主要通过气体扩散或通过孔渗性较好的地层进行运移疏导,一部分生物气还可以通过沟通气源与上中新统地层浅层及第四纪的断层裂缝或气烟囱到达海底浅层水合物温压稳定域形成水合物。琼东南盆地水合物气源研究表明<sup>[33]</sup>,盆地生物气与亚生物气气源十分丰富,盆地 3 300 m 以上上中新统一第四系浅层富含有机质的沉积物均可作为生物气源岩,推测具有与白云凹陷神狐地区类似的水合物成藏特点,即生物气与亚生物气通过自生自储原地成藏。

(2)热解气他源泥底辟气烟囱疏导下生上储成矿成藏

2015 年神狐地区水合物第 2 次钻探(GMGS3 航次)结果表明,在绝大部分站位水合物气体组分中具有较多 C<sub>2</sub> 及 C<sub>3</sub> 等以上重烃,表明热成因气对水合物成藏贡献明显。构造地质特征分析也表明水合物发育区底辟、气烟囱、断层裂隙等含气流体运移疏导通道发育,且 BSR 与泥底辟及气烟囱对应匹配关系良好。据此推测,珠江口盆地白云凹陷深水区可能存在深部热解气他源供给下生上储型的水合物成藏模式(图 7),深部始新统及渐新统等成熟—高成熟烃源岩生成的热成因气通过深入凹陷深部的不整合及连续性砂体及沟通气源的深大断裂运移至底辟及气烟囱垂向运移疏导通道下部,再通过泥底辟及气烟囱垂向运移疏导通道向浅层第四纪温压稳定域聚集形成水合物,这种水合物分布非常局限,因此,气烟囱及泥底辟等纵向运移疏导通道的发育与展布可能

控制和影响了热成因水合物的形成和富集。

琼东南盆地水合物发育区 BSR 下部也发现有泥底辟及气烟囱,且二者空间匹配关系较好,表明琼东南盆地发育的泥底辟及气烟囱与水合物成藏关系密切<sup>[34]</sup>。根据琼东南盆地天然气成因类型及水合物成藏地质特征并对比白云凹陷神狐地区水合物成藏特点,推测琼东南盆地深水区同样存在热解气他源底辟气烟囱疏导下生上储成矿成藏模式,尤其是在中央拗陷带沉积中心及南部低凸起区域靠近凹陷中心气源区域极可能发育这种水合物类型,其成藏过程应与白云凹陷水合物类似(图 6),在此不再展开阐述。

总之,陆坡深水区发育的泥底辟、气烟囱及其伴生断层裂隙等垂向通道可以作为沟通浅层水合物温压稳定域及深部古近纪烃源岩的“桥梁”,能够将凹陷深部天然气等流体运移疏导至海底浅层沉积物中形成水合物。而运移疏导体系与温压稳定域的时空耦合配置是水合物形成的关键。

## 6 结论与认识

(1)南海北部陆坡泥底辟及气烟囱发育,且主要集中在分布于凹陷中心及凹陷与凸起构造转换带。

(2)泥底辟及气烟囱在地震剖面上呈现出模糊或杂乱反射特征,表现为多种构造样式,其展布规模、刺穿层位各异且伴生强烈的热流体活动。

(3)凹陷沉积中心快速沉积充填的巨厚欠压实泥页岩是泥底辟形成的物质基础,其烃源岩有机质生烃增压形成的高温超压潜能是泥底辟形成的动力源,区域构造动力学背景及地层薄弱带,是泥底辟形成的外界条件。泥源层及其伴生的高温超压潜能(内因)与构造断裂薄弱带(外因)两者的时空耦合配置方可最终形成泥底辟及气烟囱。

(4)陆坡深水区泥底辟及气烟囱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,是深水油气及天然气水合物藏的优势运聚通道,其能够将深部油气源输送到中深层含油气圈闭储层中及深水海底浅层高压低温稳定带,形成剖面上深部常规油气藏与浅层深水海底天然气水合物矿藏之纵向叠置复式聚集的组合形式。

(5)泥底辟及气烟囱集中发育区是南海陆坡

## 深水区油气及天然气水合物勘探的有利靶区。

### 参考文献:

- [1] Reed D L, Silver E A, Tagudin J E. Relations between mud volcanoes, thrust deformation, slope sedimentation, and gas hydrate, offshore north Panama[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1990, 7:44-54.
- [2] Dimitrov L I. Mud volcanoes-the most important pathway for degassing deeply buried sediments [J]. *Earth Science Reviews*, 2002, 59: 49-76.
- [3] Kholodov V N. Mud volcanoes, their distribution regularities and genesis; communication 1. Mud volcanic provinces and morphology of mud volcanoes[J]. *Lithology and Mineral Resources*, 2002, 37(3): 197-209.
- [4] 米立军,张功成,等.南海北部陆坡深水海域油气资源战略调查及评价[M].北京:地质出版社,2011:5-17.
- [5] 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.
- [6] 张伟.南海北部主要盆地泥底辟/泥火山发育演化与油气及天然气水合物成矿成藏[D].广州:中国科学院广州地球化学研究所,2016.
- [7] Katzman R, Holbrook W S, Paull C K. A combined vertical incidence and wide angle seismic study of a gas hydrate zone, Blake Outer Ridge[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99:17975-17995.
- [8] Vanneste M, Batist M D, Golmshtok A. et al. Multi-frequency seismic study of gas hydrate bearing sediments in Lake Baikal, Siberia[J]. *Marine Geology*, 2001, 172: 1-21.
- [9] 陈胜红,贺振华,何家雄,等.南海东北部边缘台西南盆地泥火山特征及其与油气运聚关系[J]. *天然气地球科学*, 2009, 20(6): 872-878.
- [10] 何家雄,祝有海,马文宏,等.火山、泥火山/泥底辟及含气陷阱与油气运聚关系[J]. *中国地质*, 2010, 37(6): 1720-1732.
- [11] 何永焱,王英民,许翠霞,等.珠江口盆地深水白云凹陷气烟囱特征及成藏模式[J]. *海相油气地质*, 2012, 17(3): 62-66.
- [12] 刘伯然,宋海斌,关永贤,等.南海东北部陆坡天然气水合物区的滑塌和泥火山活动[J]. *海洋学报*, 2015, 37(9): 59-70.
- [13] 杨金海,李才,李涛,等.琼东南盆地深水中央峡谷天然气成藏条件与成藏模式[J]. *地质学报*, 2014, 88(11): 2141-2149.
- [14] 阎贫,王彦林,郑红波,等.东沙群岛西南海区泥火山的地球物理特征[J]. *海洋学报*, 2014, 36(7): 142-148.
- [15] 王家豪,庞雄,王存武,等.珠江口盆地白云凹陷中央底辟带的发现及识别[J]. *地球科学:中国地质大学学报*, 2006, 31(2): 209-213.
- [16] 张功成,曾清波,苏龙,等.琼东南盆地深水陵水 LS17-2 大气田成藏机理[J]. *石油学报*, 2016, 37(1): 34-46.
- [17] 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.
- [18] 沙志彬,张光学,梁金强,等.泥火山—天然气水合物存在的活证据[J]. *南海地质研究*, 2005, 17(1): 48-56.
- [19] 王子嵩,刘震,王振峰,等.琼东南盆地深水中央坳陷带异常压力分布特征[J]. *地球学报*, 2014, 35(3): 355-364.
- [20] 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.
- [21] 杨睿,阎贫,吴能友,等.南海神狐水合物钻探区不同形态流体地震反射特征与水合物产出的关系[J]. *海洋学研究*, 2014, 32(4): 19-26.
- [22] Su M, Sha Z B, Zhang C M, et al. Types, Characteristics and Significances of Migrating Pathways of Gasbearing Fluids in the Shenhu Area, Northern Continental Slope of the South China Sea[J]. *Acta Geologica Sinica* (English Edition), 2017, 91(1): 219-231.
- [23] 乔少华,苏明,杨睿.南海北部陆坡流体运移差异性的原因分析——以神狐天然气水合物钻探区和 LW3-1 井区为例[J]. *新能源*, 2014, 34(10): 137-143.
- [24] Heggland R. Definition of geohazards in exploration 3-D seismic data using attributes and neural-network analysis [J]. *AAPG Bulletin*, 2004, 88(6): 857-868.
- [25] 唐晓音,胡圣标,张功成,等.南海北部大陆边缘盆地地热特征与油气富集[J]. *地球物理学报*, 2014, 57(2): 572-585.
- [26] 李纯泉.莺歌海盆地流体底辟构造及其对天然气成藏的贡献[J]. *中国海上油气(地质)*, 2000, 14(4): 253-257.
- [27] 庞雄,陈长民,陈红汉,等.白云深水区油气成藏动力条件研究[J]. *中国海上油气*, 2008, 20(1): 9-14.
- [28] 李绪宣.琼东南盆地构造动力学演化及油气成藏研究[D].广州:中国科学院广州地球化学研究所,2004.
- [29] 戴金星.中国煤成大气田及气源[M].北京:科学出版社, 2014: 359-360.
- [30] 施和生,秦成岗,张忠涛,等.珠江口盆地白云凹陷北坡一番禹低隆起油气复合输导体系探讨[J]. *中国海上油气*, 2009, 21(6): 361-366.
- [31] 杨胜雄,梁金强,陆敬安,等.南海北部神狐海域天然气水合物成藏特征及主控因素新认识[J]. *地学前缘*, 2017, 24(优先出版): 1-14.
- [32] 黄霞.南海北部天然气水合物钻探区烃类气体成因类型研究[J]. *现代地质*, 2010, 24(3): 576-580.
- [33] 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.
- [34] 吴时国,王秀娟,陈端新,等.天然气水合物地质[M].北京:科学出版社,2015:104-110.

## CHARACTERISTICS OF MUD DIAPIR AND GAS CHIMNEY AND THEIR RELATIONSHIP WITH RESERVOIR FORMING FOR PETROLEUM AND NATURAL GAS HYDRATE ON NORTHERN SLOPE OF THE SOUTH CHINA SEA

ZHANG Wei<sup>1,2,3</sup>, LIANG Jinqiang<sup>1,2,4</sup>, HE Jiexiong<sup>5\*</sup>, CONG Xiaorong<sup>6</sup>, SU Pibo<sup>1,2</sup>

(1 Guangzhou Marine Geological Survey, Ministry of Land and Resources, Guangzhou 510075, China;

2 MLR Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Guangzhou 510075, China;

3 School of Marine Sciences, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, Guangdong, China;

4 China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China;

5 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

6 Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China )

**Abstract:** Based on the geological and seismic data collected from the deep water area, mud diapirs and gas chimneys are recognized in the Qiongdongnan Basin and Baiyun sag of the Pearl River Mouth Basin on the north slope of the South China Sea. Also discussed are the distribution pattern, evolutionary history, genetic features and their relationship with the accumulation of petroleum and natural gas hydrate. It is found that: (1) mud diapirs and gas chimneys are mainly distributed in the central part of a sag or the transition zone between sag and uplift and characterized by muzzy or chaotic seismic reflections. The dimension of the mud diapir and gas chimney varies and the strata penetrated by them are also different. Vigorous hot fluid flow activities may occur. (2) the evolution and development of mud diapir and gas chimneys are controlled by the thick shale deposited in the depressions, high temperature and overpressure, weak structures such as faults and micro-cracks, and pressure enhancement during the process of hydrocarbon generation. (3) mud diapirs and gas chimneys as well as associated structures are favorable pathways for deep hydrocarbons migrating from the deep to shallow. The gas-bearing fluid would finally migrate through those conduction systems to Neocene reservoirs and natural gas hydrate stability zones, and formed a vertical sequence with oil and gas pool below and/or natural gas hydrate on top.

**Key words:** mud diapir; gas chimney; development and evolution characteristics; deep conventional petroleum reservoir; submarine natural gas hydrate; northern slope of South China Sea