

姚哲, 张金锋, 朱继田, 等. 琼东南盆地深水区天然气水合物运聚成藏模式[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(7): 22-32.

琼东南盆地深水区天然气水合物运聚成藏模式

姚哲^{1,2}, 张金锋³, 朱继田², 方小宇¹, 罗钧升³

(1 南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江), 湛江 524000; 2 中海石油(中国)有限公司海南分公司, 海口 570100;

3 中山大学海洋科学学院, 珠海 519082)

摘要:天然气水合物是当今油气资源研究的热点之一, 前人对天然气水合物的理化性质和运聚成藏要素已有详尽的研究, 但关于水合物的运聚和成藏过程仍众说纷纭, 缺乏系统性归纳和总结。为进一步梳理水合物运聚成藏模式, 以期对天然气水合物勘探评价及有利富集区带优选预测等有所裨益, 笔者以琼东南盆地天然气水合物运聚成藏为研究重点, 结合前人有关琼东南盆地水合物成藏模式的研究基础, 深入开展高精度三维地震解释与地质综合分析研究, 并根据水合物气源供给的构成特点、运聚方式及产出赋存特征等的差异性, 重点对琼东南天然气水合物运聚成藏模式进行系统地分类与划分, 深入探讨了其运聚分布规律及控制因素等。在此基础上, 根据气源供给及源储关系差异, 初步将琼东南盆地水合物运聚成藏模式分为下生上储型、自生自储型和复式混合型 3 大类, 其中, 下生上储型可分为 4 小类: 气烟囱主导型、泥底辟主导型、微裂缝主导型和断层主导型; 自生自储型仅 1 小类, 即浅层原位赋存型。

关键词:琼东南盆地; 水合物赋存特点; 运聚通道特征; 源储关系; 运聚成藏模式

中图分类号: P744.4; P539.1

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2021.124

0 引言

海洋天然气水合物资源量巨大, 具有分布广、储量大、高密度、高热值及低碳低污染的特点, 具有十分重要的资源环境效应^[1-2]。天然气水合物的海底释放会造成温室气体的增加; 水合物分解会使沉积层移动, 引发海底滑坡、重力流和海啸等地质灾害, 对海洋工程具有破坏作用^[3]; 气体供给及其运聚系统与高压低温稳定域等要素控制影响水合物聚集成藏, 而水合物储集特征和富集形式则影响水合物资源的开发开采。本文基于前人有关水合物资源特点及运聚成藏特征的深刻认识, 重点对水合物运聚成藏模式开展研究, 这将有利于对水合物赋存区进行整体把握, 有助于认识水合物成藏要素之间的耦合关系。该研究不仅对温室效应和海洋地质

灾害等科学研究有重要启示, 对于推动海洋天然气水合物资源勘探开发亦具有重要意义。

琼东南盆地是一个富油气盆地, 具备适合天然气水合物形成需要的高压低温环境, 盆地内发育了有利于水合物聚集成藏的错综复杂的渗漏通道及相关运聚系统^[4-5]。何家雄等^[6-7]借鉴浅水区油气成藏地质条件, 对琼东南盆地深水油气(水合物)成藏条件进行了早期预测与评价, 指出油气(水合物)主要富集区集中在凹陷边缘的低凸起、斜坡带及其倾没端。近年来在琼东南盆地深水海洋地质调查中, 更是发现了指示水合物存在的间接证据——似海底反射层(BSR)^[8]。对琼东南盆地某似海底反射层发育区内柱状样的地球化学分析也表明, 琼东南盆地浅表层存在显著的甲烷微渗漏活动, 其周缘及下方可能有水合物分布^[9]。2015年, 前人在该盆地深水区发现了包括“海马冷泉”在内的多个处于不同活动阶段的海底冷泉, 发现了指示水合物分解产物的冷泉碳酸盐岩, 并利用重力柱采样器首次在“海马冷泉”浅表层采集到块状水合物实物样品, 证实了琼东南盆地具备水合物成藏的潜力^[10]。2016-2019年, 在琼东南盆地松南-宝岛一带进行的水合物钻探过程中, 钻获了大量水合物实物样品, 为建

收稿日期: 2021-04-26

资助项目: 南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江)项目“南海天然气水合物富集规律及固态硫化开采机理研究(一期)”(ZJW-2019-03); 国家自然科学基金(42076054)

作者简介: 姚哲(1984-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事海洋石油勘探开发工作。E-mail: yaozhe@cnooc.com.cn

立琼东南盆地天然气水合物先导性开采试验区奠定了物质基础,取得了琼东南盆地天然气水合物勘查的重大突破和发现^[11]。随着地球物理勘探技术的不断进步,更多高精度地球物理方法已用于琼东南盆地水合物成藏条件及分布特征与控制因素等方面的研究。近年来,通过对琼东南盆地南部隆起带天然气水合物赋存特征分析,计算了水合物稳定带深度,并总结建立了该区局部存在连通深部气源的底辟、气烟囱和微裂隙,具有满足水合物形成的温压条件,可形成深部成熟烃源与浅层未成熟烃源(生物气)同时供烃、气烟囱-微裂隙垂向运移以及第四系海底扇与浊积水道砂富集天然气水合物的运聚成藏模式^[12-13]。

综上所述,琼东南盆地水合物资源丰富,但运聚成藏模式多种多样,盆地不同区域、不同构造动力背景及不同温压条件下,尤其是气源供给条件及运聚通道类型的差异等,均可导致水合物运聚及其赋存特征千差万别,其运聚成藏模式及机制差异明显,尤其是水合物运聚成藏过程及成因机理与分布富集规律及控制因素等,目前仍然缺乏系统全面的归纳凝练和分析总结。鉴此,本文在前人有关琼东南盆地水合物成藏模式的研究基础上,充分利用该区丰富的高精度三维地震资料解释,结合油气地质条件综合分析,尤其是根据水合物气源供给的构成特点、运聚方式及产出赋存特征等的差异性,重点

对琼东南天然气水合物运聚成藏模式进行系统总结,深入分析研究其气源供给、运聚通道系统类型及高压低温稳定带等关键控制要素及其相互耦合关系,在此基础上,提出和建立天然气水合物运聚成藏模式具体的分类划分方案。

1 区域地质概况

琼东南盆地位于南海北部大陆边缘西端,处在海南岛与西沙群岛之间(109°10′-113°38′E, 15°37′-19°00′N),面积约 83 000 km²,是南海北部重要的含油气盆地之一。琼东南盆地主体沿海南岛南缘呈 NE 向展布,其西部与莺歌海盆地相邻,北部与海南岛南缘相接,东北部与珠江口盆地神狐隆起相连,东南部向永乐隆起过渡(图 1)^[14]。盆地可划分为 5 个一级构造单元^[15],盆地南部及西南部绝大多数地区及周缘都处在陆坡-洋陆过渡带深水区,最大深度超过 2 000 m^[16]。

根据以往油气地质研究与勘探实践^[10-11,17-21],琼东南盆地具有形成大中型油气田尤其是深水油气和天然气水合物资源的有利地质条件和雄厚的物质基础,具体表现在以下几方面:

(1) 沉积充填及烃源条件

琼东南盆地具有快速沉降、高沉积速率、高热流和高地温梯度的特点^[17],经历古近纪的张裂和新

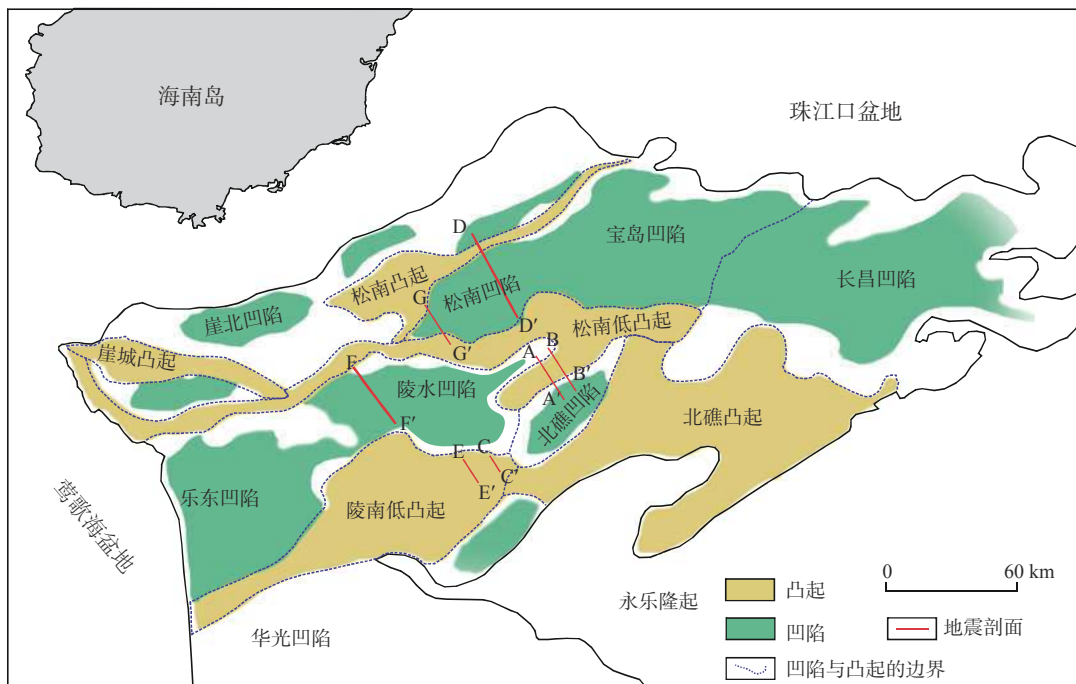


图 1 琼东南盆地构造单元组成及展布特征

Fig.1 Tectonic units of the Qiongdongnan Basin

近纪以来热沉降拗陷过程,新生代沉积最大厚度超过12 km,最大生烃凹陷面积超过9 000 km²^[10]。油气勘探证实,盆地主要发育3套烃源岩:始新统湖相烃源岩、下渐新统崖城组海岸平原相—半封闭浅海相烃源岩、上渐新统陵水组至中新统浅海—半深海相潜在烃源岩,具备了雄厚的烃源物质基础,能够为深水油气及水合物形成提供充足的烃源供给。

(2) 温压场环境及流体运聚动力

琼东南盆地深部古近系及中新统具有高温超压特点,而现今深水区琼东南盆地中央拗陷带及南部隆起区浅层及浅表层上新统及第四系具有高压低温特征。其中,南部隆起区海底压力为(6~13)×10⁶ Pa,平均压力约为10×10⁶ Pa,且在深水区中央拗陷带及南部隆起区绝大多数地区水深均>1 000 m,地层压力>100 MPa,海底温度约为0~5 ℃,具备了天然气水合物形成的高压低温条件。另外,盆地大地热流平均值为77.5 mW/m²,地温梯度为39.1 ℃/km,表明盆地深部具有较高热流值及高地温场特征^[18-19],即盆地深部地层的高温超压环境促进了烃源岩有机质成熟演化及高温超压流体的形成,进而为泥底辟及气烟囱形成以及油气运聚成藏提供了源动力及潜能。

(3) 运聚通道系统发育情况

琼东南盆地中新世晚期及上新世以来的新构造运动,导致老断裂活化及新断层裂隙发育,加之巨厚欠压实细粒沉积物的快速沉积充填导致了泥底辟及气烟囱的形成,最终构成了气体渗漏通道、断层裂隙及大型盆缘储集体和不整合面等组成的运聚通道系统^[20],为中深层深水油气及浅表层天然气水合物运聚成藏及分布富集等提供了重要的烃源供给疏导条件^[15, 21]。

总之,琼东南盆地油气地质条件较好,尤其是具备了形成深水油气及天然气水合物资源的优越地质条件,而多种烃源供给、深部高温超压环境与中深层流体运聚通道系统发育以及深水海底浅表层高压低温稳定带的耦合配置,使得该区深水油气及天然气水合物资源丰富且油气运聚成藏类型丰富多彩。

2 水合物运聚成藏模式分析

基于地震资料结合地质分析,根据琼东南盆地水合物藏分布特征差异及主控因素的不同,本文以气源供给特点、运聚疏导系统类型和储层分布特点

及赋存特征作为分类的基本原则,将该区水合物运聚成藏模式分为3大类:下生上储型、自生自储型和复式混合型。其中,因琼东南盆地的水合物运聚疏导系统类型差异最大,又以此为分类标准,进一步将下生上储型细分为4小类:气烟囱主导型、泥底辟主导型、断层主导型和微裂缝主导型水合物运聚成藏模式;自生自储型仅1类,即浅层原位成藏模式。

2.1 下生上储型水合物运聚成藏模式

2.1.1 气烟囱/泥底辟主导型水合物运聚成藏模式

(1) 赋存特征

在琼东南盆地地震剖面上,气烟囱和泥底辟二者常伴生或单独发育,且几乎整个区域都广泛发育气烟囱或泥底辟。

泥底辟主导型水合物运聚成藏模式是琼东南盆地一种常见的水合物赋存模式,是指水合物以泥底辟为主要运移场所而控制水合物富集成藏的模式(图2a)。琼东南盆地的泥底辟一般呈群带分布,通常发育在断裂带上方,其形态较为狭长,通常呈长柱状,大多数从崖城组开始发育,到乐东组为止。地震资料显示,丘体下部地层呈不连续、低振幅特征,且与相邻地层相比具有轻微的上拉特征,其内部伴生流体活动较为微弱,在地震剖面上空白反射特征时有时无,内部呈低频率、不连续的杂乱反射特征,表明泥底辟内部含有大量气体;顶部的局部强反射异常以及低声波阻抗异常表明该地层圈闭了部分流体,泥底辟顶部终止层位常与邻近的似海底反射界面处于同一层甚至相连,推测水合物富集区主要位于第四系乐东组^[22]。在这种成藏模式下,深部泥质上涌的底辟活动导致被侵入层位物性改变,以利于气体通过,气体随后在泥底辟内进行较长距离运移,移至浅层位后,再于合适的温压条件下聚集成藏。

气烟囱主导型水合物运聚成藏模式是指水合物以气烟囱为主要运移通道控制水合物运移并富集成藏的模式(图2b)。相较于泥底辟,琼东南盆地气烟囱形态发育规模较小,多呈短柱状或穹隆状,亦有微小型气烟囱存在。研究区气烟囱呈罗棋布,这些气烟囱多以始新统崖城组发育的古潜山为底,气体以崖城组的断层为优势运移通道,疏导入气烟囱内,如图2b所示。随着导入气烟囱内的气体量不断增加,气烟囱向上延伸生长至中新统,多于莺歌海组就停止生长,最终形成柱状或纺锤状的结构。

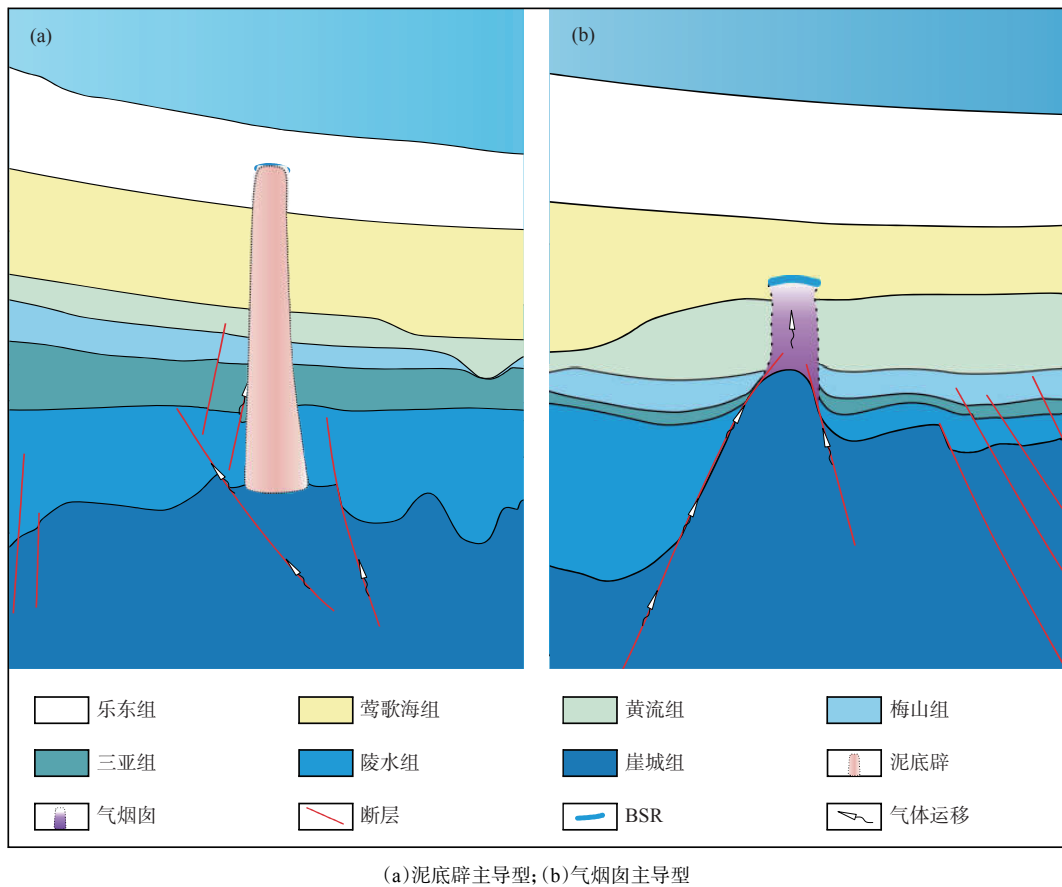


图 2 琼东南盆地泥底辟主导型和气烟囱主导型水合物成藏模式

Fig.2 Mud diapir dominated and gas chimney dominated of hydrate accumulation models in the Qiongdongnan Basin

气烟囱内部沉积层横向上反射同相轴连续性变差, 内部反射杂乱, 空白反射特征及空白带周围地层下拉特征明显(图 3), 证明有气体充注于气烟囱之中^[23]。其顶部界面为莺歌海组似海底反射界面, 常见亮点异常, 该层位亦为研究区内的主要水合物富集区。

(2) 气源供给通道成因

琼东南盆地普遍发育超压环境^[18], 深部地层受到强烈挤压推覆作用, 造就了崖城组中小型断层十分发育的局面, 深部气体借机向上部层位运移, 形成柱状气烟囱。同样, 大量深部高温超压塑性泥质流体在压力差及密度差作用下, 上拱刺穿上覆地层, 形成泥底辟, 同时伴生较强热流体活动, 将深部气体释放入浅部地层。构造应力使得断裂裂隙在一些凹陷和凸起过渡带中出现构造转换结构, 从而出现断裂薄弱带^[24]。从盆地南部松南低凸起的部分剖面(图 3、4)可观察到, 深部泥质流体可沿这些断裂薄弱带向上侵入地层, 进而形成泥底辟或气烟囱。

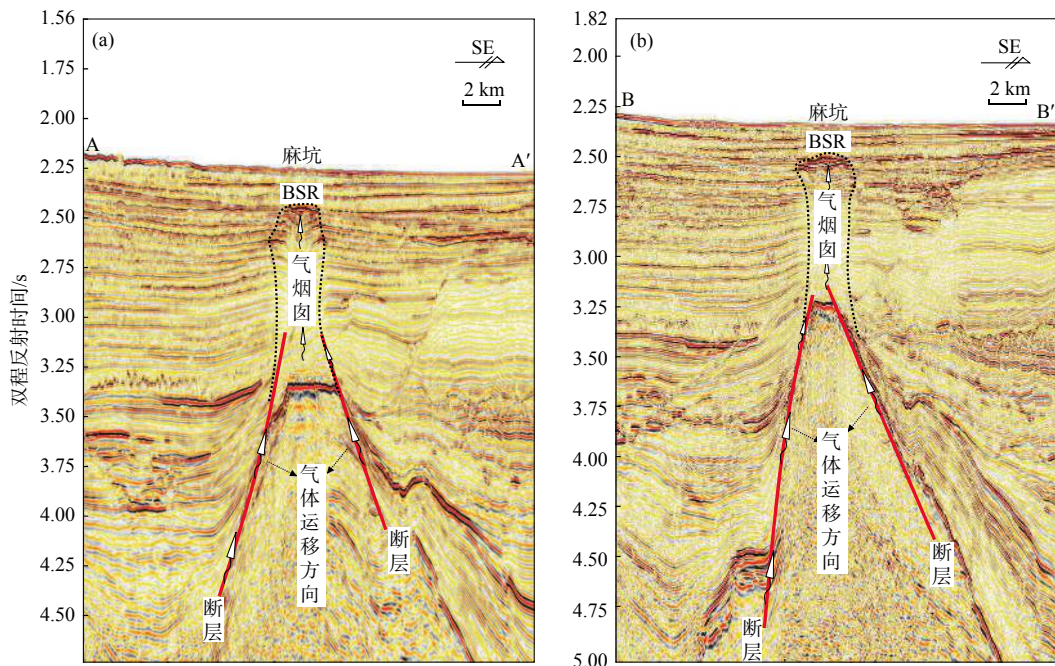
气烟囱和泥底辟内部地层与相邻地层相比, 具有良好的孔隙度和渗透性, 可作为浅层生物降解成

因气的储集空间和聚集性流体优势运移通道。它们的顶部往往具有良好的封盖层, 以阻止气体继续逸散, 抑制气烟囱向上发育, 同时, 低温高压的环境条件也有利于形成水合物稳定带, 促进水合物聚集成藏。此外, 气烟囱和泥底辟的存在, 可将来自深部的热解成因气及浅层原位生物成因气运输到浅部地层, 提高了水合物疏导和富集成藏效率^[25]。某些气烟囱或泥底辟发育区的海底浅层可观察到海底麻坑, 表明气烟囱发育时或底辟上涌活动中发生卸压, 导致海底面坍塌, 亦表明该地区气源丰富。

2.1.2 断层/微裂隙主导型水合物运聚成藏模式

(1) 赋存特征

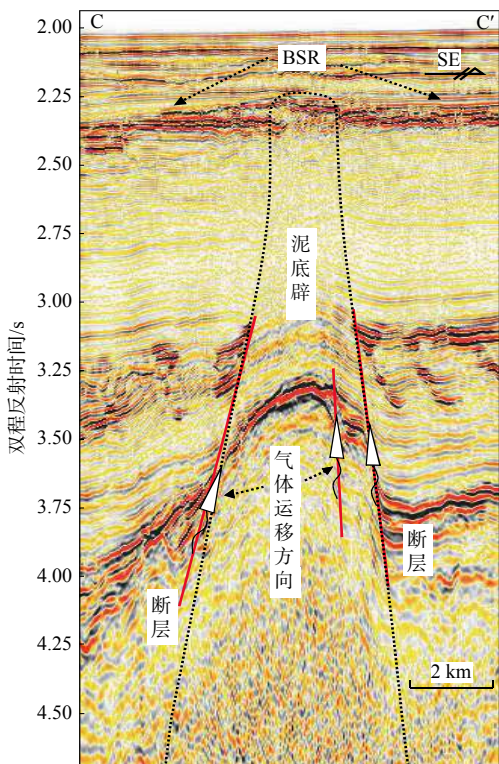
断层主导型水合物运聚成藏模式是指断层作为气体主要运移的通道, 控制水合物富集成藏的模式, 具有水合物输送距离远, 且水合物沿断层阶梯状分布的特征(图 5a)。大型断层是影响琼东南盆地水合物运聚和分布的重要因素, 盆地北部凸起带及中央凹陷带交界处形成的大型断裂带, 向深部切断始新统, 向浅部甚至切穿海底面。中部松南凹陷区域发育了数条深大断裂, 也可见少量中型断层活动, 形成了盆地内气体运移主要方向和通道。中型



(a)AA'、(b)BB'剖面位置见图1,此为同一气烟囱

图3 琼东南盆地气烟囱典型地震剖面

Fig.3 Typical seismic profiles of gas chimneys in the Qiongdongnan Basin



CC'剖面位置见图1

图4 琼东南盆地疑似泥底辟典型地震剖面

Fig.4 Typical seismic profile of suspected mud diapir in the Qiongdongnan Basin

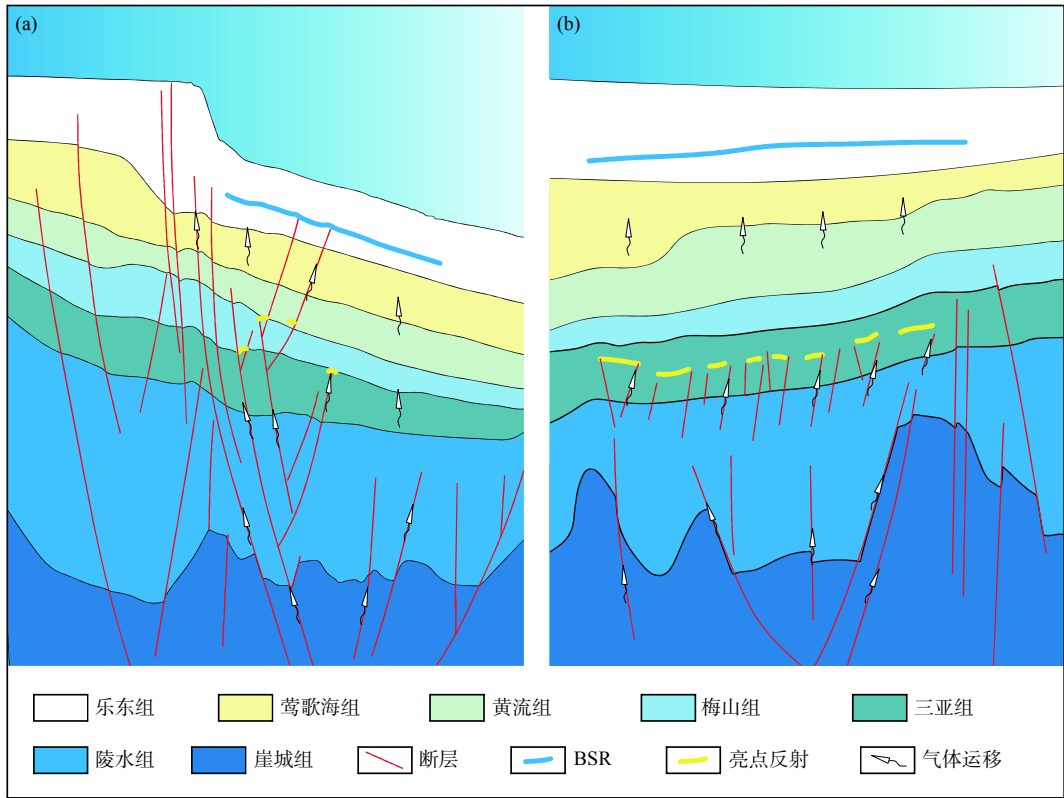
断层发育在陆坡—陆裙区中新统,这些中型断层与大断层相连,组合形成花状断层。花状断层的存在

使得气体在该区域进行阶梯式运移,推测可能有少量的气体在该层位发生分段式储集。浅部地层可见明显的强振幅、良好连续性的BSR反射特征。这些大型断层可作为气体运移的通道,将深部热成因气直接运移到浅部地层并聚集成藏。

微裂隙主导型水合物运聚成藏模式是指水合物以微裂隙为主要运移的通道,常与多边形断层伴生的水合物富集成藏的模式(图5b)。与气烟囱/泥底辟主导型相比,其输送通道分布范围广,多呈片状分布,不仅局限于某个单一的地质构造体,微裂隙在陵水凹陷和陵南低凸起一带广泛发育。由于该盆地普遍发育的超压环境^[19],陵水组和三亚组构造活动十分活跃,发育了数个中小型多边形正断层,紧随其上发育了大量微型裂缝。来自于深部热解成因气体首先通过崖城组的断层,进入陵水组,少量气体聚集在三亚组,于地震剖面上形成亮点反射;剩余气体通过微裂缝渗漏进中新统,继续向上运移,并在乐东组聚集成藏,形成超长的BSR。

(2) 断层系统对水合物运聚成藏的控制

琼东南盆地的大型断层不仅连通了深部气层和浅部储层,还对气体起到圈闭作用,限制了气体的横向运移范围。断层对于水合物成藏的控制作用主要体现在2个方面:①与断层相伴生的构造薄弱带可以有效降低地层压力,有利于深部热解成因气从深部地层逸散出来;②断层可直接作为潜在气



(a)断层主导型; (b)微裂隙主导型

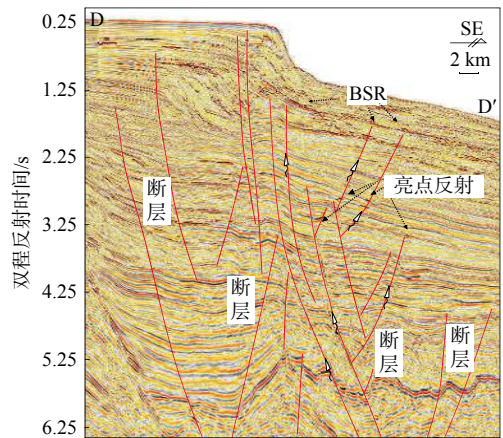
图 5 琼东南盆地断层主导型和微裂隙主导型水合物成藏模式

Fig.5 Fault dominated and micro-cracks dominated hydrate accumulation models in the Qiongdongnan Basin

源的运移通道且为优势通道, 形成气体向上运移路径, 促进深部含气流体运移到浅部水合物稳定带聚集成藏^[24-27]。有关琼东南盆地断裂系统的研究表明, 始新统构造活动形成的断裂, 为深部的气体向上运移提供了良好的通道^[28]。

琼东南盆地花状构造常导致水合物聚集区呈阶梯状分布。松南-宝岛凹陷一带的地震剖面上观察到, 这些花状构造的端点(黄流组和梅山组)存在强振幅的亮点反射(图 6), 疑似气体成藏。由于泄气现象广泛存在^[29], 中型断层与 BSR 的连接处可见 BSR 的轻微上拱, 推测此处含气量较大、气体向上运移的浮力强, 气体或含气流体沿中型断层运移至浅部储层时, 突破地层并使地层发生上拱^[30]。

此外, 琼东南盆地的气烟囱大多沿大型断裂带分布或发育于古潜山正上方, 泥底辟构造则通常发育于多边形断层区, 这是断层控制作用的结果^[31]。部分剖面仍可见气烟囱或泥底辟的底部发育小型正断层(图 3、4), 这些产状陡、断距小的断层形成流体向上分散溢出的通道, 控制水合物富集区的边界, 促进水合物聚集成藏, 与观察到的崖城组广泛发育的断层通道与气烟囱/泥底辟存在的耦合关系



DD'剖面位置见图 1

图 6 琼东南盆地深部断裂系统纵向展布特征典型地震剖面

Fig.6 Seismic profile of longitudinal distribution characteristics of the deep fault system in the Qiongdongnan Basin

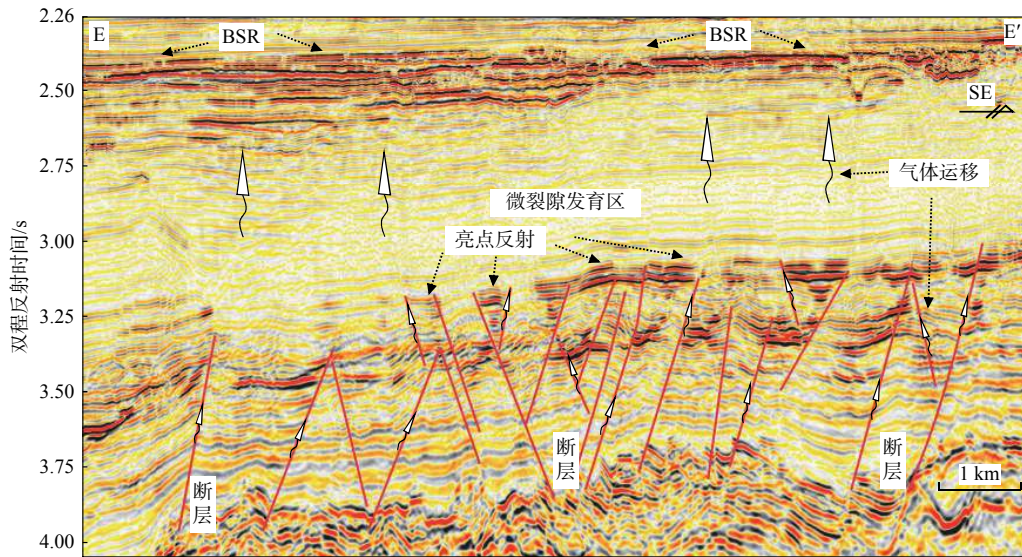
所一致。

(3) 微裂缝系统对水合物成藏的影响

琼东南盆地北礁凹陷发育许多微裂隙, 反映了本地的超压环境^[19]。理论研究表明, 当压力系数达到或者超过 1.9 时, 地层的孔隙压力可能会大于破裂压力, 地层内部会开始产生破裂, 进而形成广泛

分布的超压裂^[32]。研究区底部地层广泛发育压力系数>2.0的超压地层,且具有明显的构造活动背景,凸起与凹陷间的差异沉降幅度较大。分析认为,陵水凹陷中新统为裂缝发育的最有利位置。地震资料显示,微裂缝发育区具有空白反射特征并存在亮点反射,则可能是少量水合物聚集的标志。浅部地层发育连续的BSR,推测是深部气体通过微裂

隙向上运移后,在合适的温压条件下形成了水合物,于浅部的乐东组聚集成藏^[33-34]。陵水凹陷中发现的微裂缝剖面(图7)与著名的“海马”冷泉地层的地震剖面十分相似,后者也存在广泛发育的微裂隙体系,且发现了水合物的存在^[35],亦观察到泥底辟的发育(图4),证明微裂隙也可作为气体运移通道。



EE'剖面位置见图1

图7 琼东南盆地典型地震剖面中深部断裂系统与浅层裂隙发育特征

Fig.7 Seismic profile of longitudinal distribution characteristics of the deep fault system and shallow fractures in the Qiongdongnan Basin

2.2 自生自储型水合物运聚成藏模式

2.2.1 浅层原位赋存型水合物藏特征

浅层原位赋存型水合物运聚成藏模式指浅部生物成因气原位聚集成水合物藏的成藏模式,具有生储层位近、自生自储、水合物运移距离短的特点。此类水合物藏成藏模式比较简单,气体主要来自上新统及第四系浅表层沉积物,以扩散的方式向上迁移较短距离后,在乐东组聚集成藏,并在地震剖面上形成强振幅、平行海底的BSR反射(图8)。

2.2.2 琼东南盆地浅层气成藏模式分析

琼东南盆底浅层气的主要成分是生物成因气,同时伴有少量来自深部的热解成因气。傅宁等^[36]对琼东南盆地浅层生物气组成进行分析,测得琼东南盆地烃类气主要是甲烷,含量约为96.01%, $\delta^{13}C_1$ 值介于-66‰~-63‰,与国内外生物气 $\delta^{13}C_1$ 值基本相当,表明琼东南盆地的浅层气主要是生物气。勘探实践表明,区内生物成因气主要分布于松南凹陷和宝岛凹陷一带,气体产生层位为第四系及新近

系上新统和中新统上部^[37-38]。该区域具有生成生物气的良好地质条件,上新世以来,琼东南盆地接受了持续、快速的巨厚沉积,特别是第四纪之后不断有碎屑物进行堆积,提供了丰富的物质来源,有利于微生物进行生物降解作用,产生甲烷气体^[17,39]。

由于琼东南盆地地层岩层孔隙度和渗透率良好,气体可直接通过扩散作用从气源发生层直接向

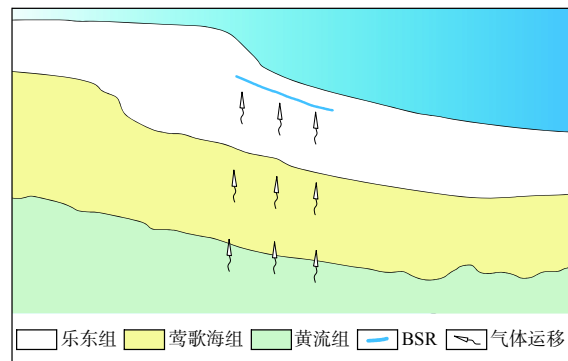
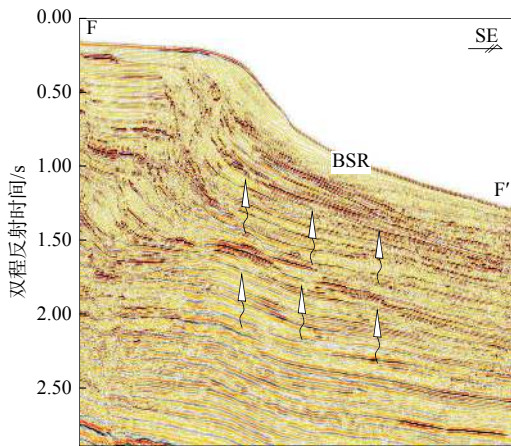


图8 琼东南盆地浅层原位水合物成藏模式

Fig.8 Model of shallow in situ gas hydrate accumulation in the Qiongdongnan Basin

上运移, 储存于浅部地层中, 如陵水凹陷一带发现了具备此类浅层气水合物成藏模式特征的地震剖面(图 9)。前文提及琼东南盆地构造环境复杂, 断裂系统林立, 通道发育良好, 断层、气烟囱和泥底辟等构造不仅可以疏导深部气体至浅层地层, 也可成为原位生物成因气的优势运移通道, 因此, 浅层气藏的成分除了生物气以外, 亦可能含有来自深部的热解成因气, 多气源气体共同在浅部地层聚集成藏。



FF'剖面位置见图 1

图 9 琼东南盆地自生自储型水合物典型地震剖面
Fig.9 Typical seismic profile of self generation and self storage hydrate in the Qiongdongnan Basin

2.3 复式混合型水合物

2.3.1 复式混合型水合物运聚模式

复式混合型水合物即多种要素共同作用, 控制水合物运聚成藏。鉴于琼东南盆地多幕次构造活动造成的多成因气体的输送和复杂的渗漏通道体系, 非单一要素控制的复式混合型水合物成藏模式在琼东南盆地十分常见。这类水合物成藏模式的主要识别标志是双 BSR。所谓“双 BSR”, 即在同一地震剖面上同时出现上下叠置的两层 BSR, 一般称为上 BSR 和下 BSR^[38,40]。上 BSR 常于乐东组发育, 下 BSR 常于莺歌海组发育(图 10)。

本文例举一处琼东南盆地的复式混合型水合物: 松南凹陷某地震剖面上(图 11), 浅部乐东组可见多处强振幅反射, 且这些强振幅反射破裂不连续, 疑似第四纪以后的碎屑物堆积^[17], 为微生物进行生物降解作用提供了充足的物质来源。随着海底沉积层不断加厚, 水合物稳定带形成, 微生物分解的气体可直接储存于乐东组地层中, 不再向上渗漏, 为该区域上 BSR 的形成模式。

在同一剖面上, 深部地层崖城组断裂带来的深

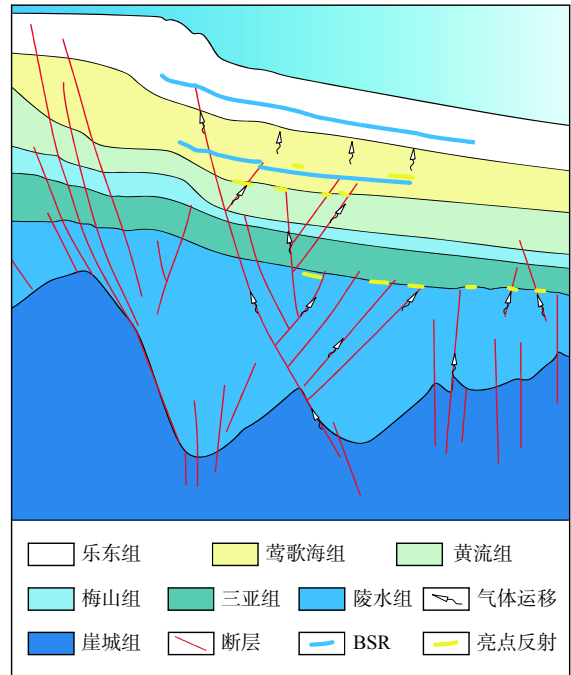
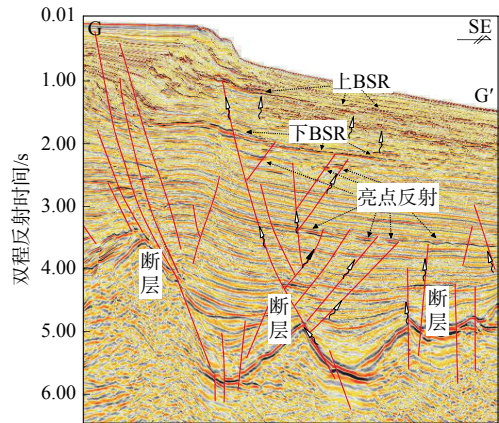


图 10 琼东南盆地复式混合型水合物成藏模式

Fig.10 Compound and mixed hydrate accumulation model in the Qiongdongnan Basin



GG'剖面位置见图 1

图 11 琼东南盆地多因素控制水合物藏典型地震剖面

Fig.11 Typical seismic profiles of hydrate reservoirs controlled by multiple factors in the Qiongdongnan Basin

部热解成因气, 通过中新统断裂通道的运移, 输送至浅部地层继续聚集储藏, 中新统同样观察到少量水合物聚集的亮点反射, 与前文提及的断层主导型水合物相似。浅部莺歌海组的 BSR 与断层相连, 深部热解成因气借助断层向上输送, 其部分连接处发生错断, 导致莺歌海组 BSR 中断, 为该区域下 BSR 的形成模式。随后部分气体在此渗漏, 继续向上运移并储存于乐东组层位。深层运聚系统与浅表层运聚系统的连通, 导致热解气与生物气混合构成混合气源供给, 最终形成复式混合型水合物藏。

2.3.2 双BSR对复式混合型水合物的意义

根据前人的研究,上BSR通常代表了现今活跃的水合物稳定域底界,而下BSR代表盆地原有温度和压力稳定带底界,即原始或“古”水合物稳定域底界^[40-41]。琼东南盆地气源丰富,并且具备良好的运移疏导条件,其存在的双BSR现象,意味着盆地的多期活动产生了不同批次的气体释放和聚集成藏^[38,42]。上BSR(乐东组)标志琼东南盆地浅层生物成因气的存在(图11),琼东南盆地接受了自上新世以来的沉积后^[17],水深和地层压力发生改变,导致水合物稳定带向上迁移,因此,现今的水合物富集区主要集中于乐东组,对应于前文提及自生自储型水合物运聚成藏模式。下BSR(莺歌海组)标志深部热解成因气在琼东南盆地的莺歌海组也有所聚集(图11),水合物钻探区邻近的LS17-2、LS18-1等气田已证实莺歌海组水道砂岩储集的天然气来自深部古近纪崖城组^[43-45],说明琼东南盆地在上新世以前就发生过水合物的释放和聚集^[46],凭借早期形成的断层和底辟、气烟囱等垂向通道,气体从深部地层向古水合物稳定域运移,形成莺歌海组的水合物藏,与断层主导型水合物成藏模式相吻合。因此,在复式混合型水合物运聚模式中,断层仍是水合物运移聚集的主控因素。

双BSR的形成演化与水合物成藏关系密切,往往揭示多期次水合物聚集成藏。有关研究显示,琼东南盆地华光凹陷生物成因甲烷水合物稳定带最大厚度约320 m,热成因天然气水合物稳定带最大厚度约为345 m,认为具有早、晚2期生烃且以晚期生烃为主的特征^[47]。而本研究发现两层BSR的深度差距约为750 m,较前人研究中的双BSR的深度差距大,推测是古今两期水合物成藏时间相隔较远,亦可能下BSR仅是古水合物稳定带的残留痕迹,说明形成水合物的温压等稳定条件在地质历史时期曾发生过较大变化,但又重新进入新的平衡状态,使得上BSR得以形成并保持存在。

双BSR的研究为与水合物成藏有关的盆地构造演化、沉积演变等地质问题的研究提供了新的信息,其可揭示水合物形成和分解与温压变化的关系^[48-49],断层、泥底辟和气烟囱等发育的区域,往往BSR异常发育,双BSR也相对容易出现^[50]。因此,了解双BSR与琼东南盆地构造演化、海底温压等条件以及水合物分解等的关系,对于进一步梳理琼东南水合物成藏特点具有重要意义^[51]。

3 结论

(1)根据气源供给及源储关系的不同,初步将琼东南盆地的水合物成藏类型分为3大类:下生上储型、自生自储型和复式混合型水合物成藏型。其中,下生上储型可进一步分为4小类:气烟囱主导型、泥底辟主导型、微裂缝主导型和断层主导型;自生自储型仅1类,即浅层原位成藏型。

(2)琼南盆地水合物气源供给在深浅层运聚通道系统连通的局部区域,肯定有来自深部地层(崖城组烃源岩及以下)的热解气气源供给,而大部分区域仍以大量浅部地层的原位生物成因气气源供给为主。水合物运聚成藏及其分布富集特征与泥底辟、气烟囱、断裂和微裂缝等多种类型的天然气运移疏导通道密切相关,海底运聚通道系统发育,且深部气源与浅层储层连通的局部区域,才能够形成高饱和度的富集型水合物藏。

参考文献:

- [1] PAUL C K, DILLON W P. Natural gas hydrates: occurrence, distribution, and detection[M]. American Geophysical Union Geophysical Monograph, 2001, 124: 3-18.
- [2] SLOAN E D, KOH C A. Clathrate hydrates of natural gases[M]. Third Edition. New York: CRC Press, 2008.
- [3] 何健,梁前勇,马云,等.南海北部陆坡天然气水合物区地质灾害类型及其分布特征[J].中国地质,2018,45(1):15-28.
- [4] 陈多福,李绪宣,夏斌.南海琼东南盆地天然气水合物稳定域分布特征及资源预测[J].地球物理学报,2004,47(3):483-489.
- [5] 龚跃华,杨胜雄,王宏斌,等.琼东南盆地天然气水合物成矿远景[J].吉林大学学报(地球科学版),2018,48(4):1030-1042.
- [6] 何家雄,陈胜红,马文宏,等.南海北部大陆边缘盆地深水油气成藏条件早期预测与评价[J].天然气地球科学,2008,19(6):780-789.
- [7] 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.
- [8] 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, 2018, 54(6): 3556-3573.
- [9] 冯俊熙,杨胜雄,孙晓明,等.琼东南盆地甲烷微渗漏活动地球化学示踪研究[J].西南石油大学学报,2018,40(3):63-75.
- [10] LIANG Q Y, HU Y, FENG D, et al. Authigenic carbonates from newly discovered active old seeps on the northwestern slope of the South China Sea: constraints on fluid sources, formation environments, and seepage dynamics[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2017, 124: 31-41.

- [11] 何家雄, 钟灿鸣, 姚永坚, 等. 南海北部天然气水合物勘查试采及研究进展与勘探前景[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(12): 3-16.
- [12] 刘平, 李绪深, 唐圣明, 等. 琼东南盆地南部隆起带天然气水合物赋存特征分析[J]. 沉积与特提斯地质, 2017, 37(1): 73-78.
- [13] 朱继田, 邓勇, 郭明刚, 等. 琼东南盆地盆底平原区天然气水合物成矿条件及成藏模式[J]. 中国海上油气, 2020, 32(3): 10-19.
- [14] HU B, WANG L S, YAN W B, et al. The tectonic evolution of the Qiongdongnan Basin in the northern margin of the South China Sea[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 77: 163-182.
- [15] SHI W Z, XIE Y H, WANG Z F, et al. Characteristics of overpressure distribution and its implication for hydrocarbon exploration in the Qiongdongnan Basin[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 66: 150-165.
- [16] WANG Z F, SUN Z P, ZHU J T, et al. Natural gas geological characteristics and great discovery of large gas fields in deep-water area of the western South China Sea[J]. *Natural Gas Industry B*, 2015, 2(6): 489-498.
- [17] YUAN Y S, ZHU W L, MI L J, et al. "Uniform geothermal gradient" and heat flow in the Qiongdongnan and Pearl River Mouth Basins of the South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2008, 26(7): 1152-1162.
- [18] 甘军, 张迎朝, 梁刚, 等. 琼东南盆地深水区烃源岩沉积模式及差异热演化[J]. 地球科学, 2019, 44(8): 2627-2635.
- [19] 甘军, 吴迪, 张迎朝, 等. 琼东南盆地现今地层温度分布特征及油气地质意义[J]. 高校地质学报, 2019, 25(6): 952-960.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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(1): 106042.
- [23] 宋海斌, OSAMU M, 杨胜雄, 等. 含天然气水合物沉积物的岩石物性模型与似海底反射层的AVA特征[J]. 地球物理学报, 2002, 45(4): 546-556.
- [24] 张伟, 梁金强, 何家雄, 等. 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[J]. 海洋地质前沿, 2017, 33(7): 11-23.
- [25] 刘杰, 杨睿, 张金华, 等. 琼东南盆地华光凹陷天然气水合物成藏条件及有利区带预测[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2019, 39(1): 134-142.
- [26] 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*, 2017, 91(1): 219-231.
- [27] HILLMAN J I T, CRUTCHLEY G J, KROEGER K F. Investigating the role of faults in fluid migration and gas hydrate formation along the southern Hikurangi Margin, New Zealand[J]. *Marine Geophysical Research: an International Journal for the Study of the Earth Beneath the Sea*, 2020, 41(1): 152-174.
- [28] REN J Y, LEI C, WANG S, et al. Tectonic stratigraphic framework of the Yinggehai - Qiongdongnan Basins and its implication for tectonics province division in South China Sea[J]. *Chinese Journal of Geophysics-Chinese Edition*, 2011, 54(6): 1124-1137.
- [29] 王振峰, 何家雄. 琼东南盆地中新统油气运聚成藏条件及成藏组合分析[J]. 天然气地球科学, 2003, 14(2): 107-115.
- [30] 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: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2006.
- [31] 王秀娟, 吴时国, 王大伟, 等. 琼东南盆地多边形断层在流体运移和天然气水合物成藏中的作用[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(1): 122-128, 164, 174.
- [32] 周凡, 刘爱群, 宋鹏. 琼东南盆地高温高压地层垂向运移通道精细描述技术[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2019, 21(4): 23-27, 46.
- [33] 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.
- [34] WANG J L, WU S G, KONG X, et al. Subsurface fluid flow at an active cold seep area in the Qiongdongnan Basin, northern South China Sea[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 168: 17-26.
- [35] WEI J G, LI J W, WU T T, et al. Geologically controlled intermittent gas eruption and its impact on bottom water temperature and chemosynthetic communities—A case study in the "HaiMa" cold seeps, South China Sea[J]. *Geological Journal*, 2020, 55(9): 6066-6078.
- [36] 傅宁, 林青, 刘英丽. 从南海北部浅层气的成因看水合物潜在的气源[J]. 现代地质, 2011, 25(2): 332-339.
- [37] 何家雄, 陈胜红, 姚永坚, 等. 南海北部边缘盆地油气主要成因类型及运聚分布特征[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(1): 34-40.
- [38] POSEWANG J, MIENERT J. The enigma of double BSRs: indicators for changes in the hydrate stability field?[J]. *Geo-Marine Letters*, 1999, 19(1/2): 157-163.
- [39] 赖亦君, 杨涛, 梁金强, 等. 南海北部陆坡珠江口盆地东南海域GMGS2-09井孔隙水地球化学特征及其对天然气水合物的指示意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2019, 39(3): 135-142.
- [40] POPESCUA I, BATISTA M D, LERICOLAIS G, et al. Multiple bottom-simulating reflections in the Black Sea: Potential proxies of past climate conditions[J]. *Marine Geology*, 2006, 227(3/4): 163-176.
- [41] FOUCHER J P, NOUZÉ H, HENRY P. Observation and tentative interpretation of a double BSR on the Nankai slope[J]. *Marine Geology*, 2002, 187: 161-175.
- [42] LI L, LIU H J, ZHANG X, et al. BSRs, estimated heat flow, hy-

- drate-related gas volume and their implications for methane seepage and gas hydrate in the Dongsha region, northern South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 67: 785-794.
- [43] 张迎朝, 甘军, 徐新德, 等. 琼东南盆地深水东区Y8-1含气构造天然气来源及侧向运聚模式[J]. *地球科学*, 2019, 44(8): 2609-2618.
- [44] 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.
- [45] HUANG H T, HUANG B J, HUANG Y W, et al. Condensate origin and hydrocarbon accumulation mechanism of the deep-water giant gas field in western South China Sea: a case study of Lingshui 17-2 gas field in Qiongdongnan Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(3): 409-417.
- [46] 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.
- [47] 刘杰, 杨睿, 张金华, 等. 琼东南盆地华光凹陷天然气水合物成藏条件及有利区带预测[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(1): 137-145.
- [48] BANGS N L B, MUSGRAVE R J, TRÉHU A M. Upward shifts in the southern Hydrate Ridge gas hydrate stability zone following postglacial warming, offshore Oregon[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(B3).
- [49] ZANDER T, HAECKEL M, BERNDT C, et al. On the origin of multiple BSRs in the Danube deep-sea fan, Black Sea[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 462: 15-25.
- [50] 阮爱国, 李家彪, 初凤友, 等. 海底天然气水合物层界面反射AVO数值模拟[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(6): 1826-1835.
- [51] KEI B, YASUHIRO Y. BSRs and associated reflections as an indicator of gas hydrate and free gas accumulation: an example of accretionary prism and forearc basin system along the Nankai Trough, off Central Japan[J]. *Resource Geology*, 2004, 54(1): 11-24.

ANALYSIS OF THE GAS HYDRATE MIGRATION AND ACCUMULATION MODEL IN THE DEEP WATER AREAS OF QIONGDONGNAN BASIN

YAO Zhe^{1,2}, ZHANG Jinfeng³, ZHU Jitian², FANG Xiaoyu¹, LUO Junsheng³

(1 Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhanjiang), Zhanjiang 524000, China; 2 Hainan Branch of CNOOC Limited, Haikou 570100, China; 3 School of Marine Sciences, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China)

Abstract: Natural gas hydrate is one of the focuses nowadays in hydrocarbon resource researches. Physical and chemical properties, reservoir forming factors and gas hydrate migration and accumulation mechanisms have been carefully studied in previous references. However, there still remain different opinions and discrepancies on the migration and accumulation process of gas hydrate. Systematic induction and summarization are required. In order to better understand the migration and accumulation model of gas hydrate, which is critical to the exploration and evaluation of gas hydrate and the optimization and prediction of favorable enrichment zones, this paper, taking the reservoir forming types of gas hydrate in the Qiongdongnan Basin as the research focus, made a comprehensive analysis of 3D seismic data and geological research results based on the previous studies. According to the differences in gas source supply, migration and accumulation mode and occurrences of gas hydrate, the migration and accumulation modes of gas hydrate in the Qiongdongnan Basin are systematically classified, and also analyzed and discussed are the distribution pattern and their control factors. According to the difference in gas source and reservoir models, the hydrate accumulation in the Qiongdongnan basin can be divided into three types: the type of lower generation and upper storage, the type of self generation and self storage and the type of compound and mixed genesis. The former two types are further divided into five subtypes, of which the type of lower generation and upper storage includes four subtypes: gas chimney dominated subtype, mud diapir dominated subtype, micro-cracks dominated subtype and fault dominated subtype; and there is only one subtype under the type of self generation and self storage, i.e. the type of shallow in-situ deposits.

Key words: Qiongdongnan Basin; characteristics of hydrate occurrence; characteristics of migration and accumulation channel; source-reservoir relationship; migration and accumulation model