

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

何家雄¹ 夏 斌¹ 张树林² 阎 贫¹ 刘海岭¹

(1.中国科学院边缘海地质重点实验室,广东 广州 510640;2.中海石油研究中心,北京 100027)

提要:泥底辟是南海北部边缘西区莺歌海盆地颇具特色的地震地质异常体,具有欠压实异常、高温高压特点及低密低速的地球物理特征,其展布则具有明显分带性且沿盆地北西走向呈近南北向雁行式排列。泥底辟成因及分布,主要受控于盆地快速沉降及高速沉积充填压实与排出流体不均衡所产生的巨大异常高温高压潜能,和区域控盆断裂晚期右旋走滑伸展活动。而晚期泥底辟热流体上侵活动及其他成藏条件的有效配置,则有效地控制了天然气及 CO₂ 运聚成藏规律。

关键词:泥底辟成因;高温高压潜能;控盆断裂;热流体活动;晚期运聚成藏

中图分类号:P618.130.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-3657(2006)06-1336-09

莺歌海盆地泥底辟(有学者称泥-流体底辟)是该区颇具特色的地震地质异常体,具有明显的低密低速及欠压实异常高温高压特征。泥底辟成因、展布及其发育演化特征与天然气运聚成藏等均密切相关。自 20 世纪 80 年代以来,何家雄^[1-8]、郝芳^[9-11]、单家增^[12]、张树林^[13]、解习农^[14]、李纯泉^[15]、黄春菊^[16]、张敏强^[17]等均对该区泥底辟成因、空间展布规律、发育演化特征及泥底辟热流体上侵活动与天然气运聚成藏的成因联系等,进行过深入系统地剖析与全面研究。笔者根据近年来所获新的地质地球物理及地球化学资料,结合该区近期天然气勘探与 CO₂ 地质研究成果,拟就泥底辟成因及发育演化特征、泥底辟热流体上侵活动与天然气及 CO₂ 分布富集的关系和控制因素等方面,进行综合剖析与深入探讨,抛砖引玉以期能够对该区泥底辟成因、发育演化特征及其与天然气及 CO₂ 运聚规律的认识与研究有所裨益,同时亦对指导该区天然气勘探与天然气成藏规律研究有所启迪和借鉴。

1 泥底辟形成发育的区域地质背景

莺歌海盆地位于印支半岛与南海西北部大陆边缘接合部,处在印度板块与欧亚板块及太平洋板块三大板块之交接区,属于华南地块与印支地块地缝合线,即北西走向向红河断裂带向南海海域之延伸部分,其区域构造应力场演化受控于印度板块与欧亚板块及太平洋板块三者之间的相互作用,其

中,印度板块与欧亚板块的碰撞作用是盆地形成的主控因素。从构造动力学及运动学特征分析,该盆地则属于在岩石圈拉伸与红河断裂走滑双重机制控制下所发育形成的转换伸展型新生代沉积盆地。

莺歌海盆地与中国东部陆相断陷盆地一样具有断拗双层结构,但古近纪陆相断陷时间短,沉积不甚发育,盆地主体为新近纪—第四纪巨厚的海相拗陷沉积。由于新近系—第四系海相沉积巨厚,故仅在沉积相对较薄的盆地西北部临高区及盆地边缘莺东斜坡区方可见到明显的断拗双层结构,其他区域,尤其是中部拗陷泥底辟发育区均为巨厚大规模的海相拗陷式沉积,其新近系—第四系最大沉积厚度超过 17 km,且在 8 s 深的地震剖面上仍见不到新近系地层的底界,因此就更见不到古近系陆相断陷沉积。莺歌海盆地具有非常高的沉降及沉积速率(0.5~1.4 mm/a),第四系最大沉积厚度超过 2 300 m,新近系沉积厚度大于 14 000 m 以上,沉积物总体上以细粒沉积为主,岩性多为粉细砂岩及大套泥页岩,细砂岩以上粗粒沉积物甚少,其物源主要来自盆地西北部红河物源与东南部海南岛物源所构成的复合物源体系。盆地总体上断裂不发育,大断裂主要局限于基底及古近系断陷沉积层中,上部新近系及第四系拗陷沉积层中除发育与底辟伴生的小断距断层外几乎不发育断层。盆地地热场及地温梯度偏高,大地热流值及地温梯度最高分别达 88.5 mW/m² 和 4.75°C/m,同时

收稿日期:2006-05-24;改回日期:2006-08-11

基金项目:中国科学院边缘海地质重点实验室创新项目(MSGL06-19)和中国科学院三期知识创新项目(KZCXZ-YW-203)共同资助。

作者简介:何家雄,男,1956年生,博士,研究员,从事油气勘探与地质综合研究;E-mail:hejx@gig.ac.cn。

在3 000 m以下(泥底辟区1 700 m)普遍存在异常高压,压力系数多在1.6~2.3,具有典型高温超压盆地的地质特征。

快速沉降、大量细粒沉积物充填、异常高温超压及新近系断裂不发育,且区域上受控于晚期右旋走滑伸展活动的边界断层,是莺歌海盆地形成演化的主要控制因素与基本地质特征。由于盆地新近系断层不发育,缺少流体垂向运移与释放的通道,且盆地沉降沉积速率高(500~1 400 m/Ma),多充填以泥页岩及粉细砂岩为主的细粒沉积物,因此在这种特定的区域地质背景与沉积环境的共同作用下,造成了该区新近系及第四系巨厚海相泥页岩压实与排出流体极不平衡,加之盆地大地热流高(88.5 mW/m²),导致水热增压和生烃(特别是生气)作用特别强,因此,在盆地中部拗陷区形成了强烈的大规模欠压实超压区带,为该区泥底辟形成发育奠定了地质基础。须强调的是,该盆地不同区域超压顶面深度差异甚远,对泥底辟形成发育亦有所限制。由于盆地中部拗陷区沉降及沉积速率最高、充填岩性最细、生烃作用最强,故欠压实超压最强烈,其超压顶面埋藏深度亦最浅(1 700~2 000 m),同时,在强超压与区域右旋走滑断裂活动的构造应力共同作用下,导致在该区域形成发育了大规模的泥底辟活动构造带;远离沉降沉积中心区,则新近系及第四系海相泥页岩沉积明显减薄,超压顶面埋藏深度明显增大(3000~4300 m),欠压实超压作用随远离沉降及沉积中心而逐渐减小或消失,如远离盆地沉降沉积中心的边缘斜坡区(莺东斜坡带)则无异常高压,不具备形成发育泥底辟的地质条件,故无泥底辟发育及展布。

2 泥底辟成因及发育展布特征

2.1 泥底辟成因剖析

莺歌海盆地泥底辟成因,很多学者及专家都进行过研究与探讨,何家雄等^[1-3]、郝芳等^[4]、单家增等^[5]、张树林等^[6]、解习农等^[4]、张敏强等^[7]均认为泥底辟成因与该盆地晚期右旋走滑伸展活动的区域构造地质背景和快速沉积充填的巨厚欠压实海相泥页岩(即泥源层)发育存在密切的联系。快速沉积的巨厚欠压实海相泥页岩是形成发育大规模泥底辟的物质基础和内在的基本地质条件,而区域构造地质动力条件则是控制其发育展布的主要外界因素。莺歌海盆地中部拗陷区自晚渐新世以来,经历了长期的持续沉降和快速充填,沉积了逾万米的巨厚海相地层,其中,下—中中新统三亚—梅山组浅海—半深海相沉积厚度高达6 500 m,上新统莺歌海组—第四系半深海相泥页岩厚达5 400 m以上。根据中部拗陷区不同层位(沉积中心)地层厚度计算的沉积速率表明,下中新统三亚组沉积速率达700 m/Ma,上新统莺歌海组—第四系地层的沉积速率为780 m/Ma,很显然如此高的沉积充填速率是导致该区压实与排出流体不平衡形成强烈欠压实的根本原因,亦是泥底辟形成发育的基本前提地质条件。在上述快速充填沉积的区域地质背景下,该区自渐新世以来,在不同地质时期的最大海侵期沉积了3套泥页岩富集层段,即下中新统三亚组下段、中中新统梅山组上段和上新统莺歌海组

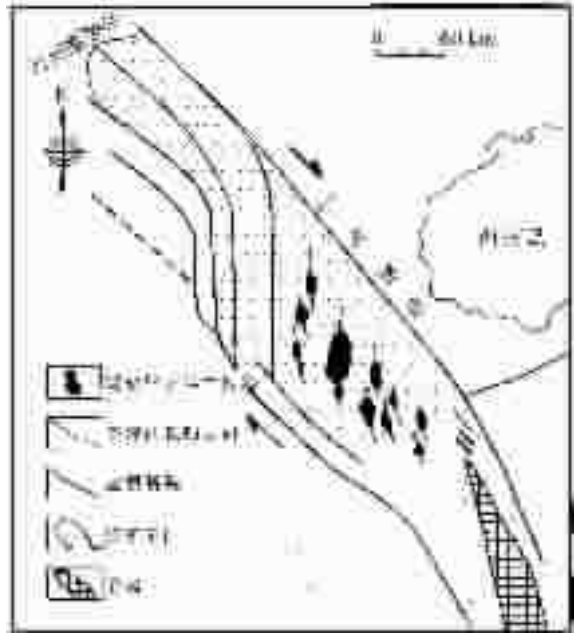


图1 莺歌海盆地区域构造地质特征与泥底辟雁行式展布特点

Fig.1 Structural characteristics and echelon distribution of mud diapirs in the Yinggehai basin

下段,其构成了中部拗陷区泥底辟大规模强烈活动及底辟刺穿的雄厚物质基础即泥源层,并与其上覆相邻的相对粗粒沉积物组成了易于产生底辟作用之密度倒转的重力体系(即动力体系),进而为泥底辟形成发育奠定了基本的地质条件。

总之,莺歌海盆地新近纪以来,快速沉降沉积(最大沉降沉积速率1 400 m/Ma)、强烈的欠压实、水热增压及生烃作用等多种因素共同作用之结果,均导致该盆地中部拗陷区形成了规模大范围广的强超压,加之盆地边界断层右旋走滑伸展之区域构造应力场的配合与影响,进而诱发了盆地中央大规模强烈的泥底辟活动,形成了非常发育、规模巨大的泥底辟活动构造带(图1)。必须强调的是,渐新世以来,盆地边界断层(①号断层)右旋走滑伸展活动,主要控制了该区近北向区域张应力的方向,导致在盆地中央形成了沿北西走向(从西北的东方区往东南至乐东区)呈雁行排列的5条近北向剪切断裂。在该断裂系统的区域构造应力环境下,其快速充填沉积的巨厚欠压实海相泥页岩所孕育的高温高压潜能则可诱发大规模强烈的层间塑性流动^[1-3],而当其欠压实海相泥页岩中地层流体孔隙压力(高温高压潜能)接近或达到上覆地层破裂压力时,上覆地层即沿主张应力方向发生破裂,大量塑性泥页岩及流体则通过地层破裂薄弱带向上底辟刺穿和释放,形成5排近北向呈雁行排列的泥底辟(图1),且在剖面上形成了不同类型、不同形态的泥底辟及其伴生构造。

2.2 泥底辟发育展布特征及主要成因类型

莺歌海盆地泥底辟主要发育展布于盆地沉积中心的中

部拗陷区,具有明显的分带性,平面上沿盆地长轴北西方向,由众多单个泥底辟构成了5排近南北向呈雁行式排列的泥底辟构造活动带(图1)。其中,泥底辟及其伴生构造最大面积达350 km²,最小面积≥10 km²,泥底辟伴生构造多为短轴背斜构造或断背斜构造类型。泥底辟剖面形态变化较大,其形成及发育演化具明显的多源性和多幕性特点。由于盆地发育有中新统三亚组下段(T51~T60)、梅山组上段(T40~T41)、上新统莺歌海组下段(T27~T30)等3套最大海侵期沉积的浅海—半深海相及陆架斜坡相等巨厚泥源层,加之晚期控盆断裂右旋走滑伸展活动在中部拗陷区所产生的近南北向张性断裂制约,故导致不同泥底辟或同一类型泥底辟活动发育时间及期次均存在差异。因此,该区泥底辟形成不仅具有多源性而且其发育演化亦具多幕性。如在同一泥底辟及其伴生构造的不同层位泥源层上方常常形成不同的“气烟囱”位置,其规模大小及形态特征,均存在显著差异即是其多源多幕性的具体表征。因此,对于这种泥底辟形成及发育演化的多源性与多幕性的分析和判识,可以通过泥底辟体上隆和穿刺及其与围岩和上覆地层的关系,来进行地质综合分析并确认。须强调指出的是,在泥底辟形成及发育演化过程中,由于其高温高压潜能作用极易导致泥底辟上隆拱起或穿刺上覆地层及围岩,故往往会造成在泥底辟构造活动带区域,凸现异常浅的超压顶界面(该区泥底辟带为1 700~2 200 m)和超压面之上强烈的热流体活动现象,而其他区域则为正常深度的超压顶界面,在该区一般为3 000 m以下,如盆地中部拗陷东南部非泥底辟区的LD30-1地区即是如此。

莺歌海盆地泥底辟主要成因类型,根据其剖面形态特征、活动能量及喷出程度、泥底辟侵入高度等特点,可大体上划分为“深埋型”、“浅埋型”及“喷口型”等三大类^[1-4]。“深埋型”泥底辟即低幅度弱—中能量型泥底辟,“浅埋型”泥底辟则为高幅度中—强能量型泥底辟,而“喷口型”泥底辟即属高幅度特强能量型泥底辟。这些不同类型泥底辟及伴生构造的

发育演化特征及其对天然气及CO₂运聚分布的控制作用等,均存在一定的差异。

2.2.1 低幅度弱—中能量深埋型泥底辟

低幅度弱—中能量深埋型泥底辟如图2-A所示,其主要特点是泥底辟上侵拱起(向上底辟)的幅度较低,且未刺穿或基本上未刺穿上覆地层而被上覆巨厚地层所掩埋。由于该类型泥底辟的内能及活动能量极弱,上侵拱起的幅度(向上底辟高度)低,且一般多被巨厚的上覆地层深埋,故属于底辟能量弱未刺穿上覆地层的低幅度上拱型泥底辟。低幅度弱—中能量深埋型泥底辟的重要特征是,具有低密低速及高温高压“两低两高”的地质地球物理特点^[5-8]。剖面形态为低幅度背斜,泥底辟顶部上覆巨厚地层往往由于泥底辟活动时上侵挤入(底辟)之垂向上拱作用力较弱,而导致其断层不甚发育,但微裂隙广泛存在,而裂隙无疑成为了天然气及流体运聚的主要通道,其往往通过广泛发育的微裂隙疏导系统向浅层运移聚集,在具备良好储集及圈闭条件的场所形成天然气藏。该类泥底辟伴生构造一般均以富集烃类气为主,但部分区块及层段CO₂亦较富集,如研究区的LD20-1、LD22-1等泥底辟伴生构造的浅层及超浅层气藏即为其典型实例。

2.2.2 中—强能量高幅度浅埋型泥底辟

该类泥底辟最突出的特点是,底辟活动能量强,上侵拱起的幅度较高,亦具低密低速及高温高压之“两低两高”的地质地球物理特点。由于泥底辟活动时上侵挤入(底辟)之垂向上拱作用力强,底辟拱起幅度高,其底辟能量及作用力已接近或达到上覆地层的破裂极限强度,但尚未完全刺穿上覆地层,故底辟顶部及上覆地层中拱张断裂可能较发育,剖面上往往形成可能为不同类型断裂系统及油气等流体充注所造成的空白杂乱模糊反射带(图2-B),平面上则分割成诸多不同大小的断块。天然气及流体通过断裂系统及疏导体系向浅部地层运聚,在具备储集及圈闭保存条件的构造及砂体中富集成藏。该类型泥底辟伴生构造,由于泥底辟热流体局部性

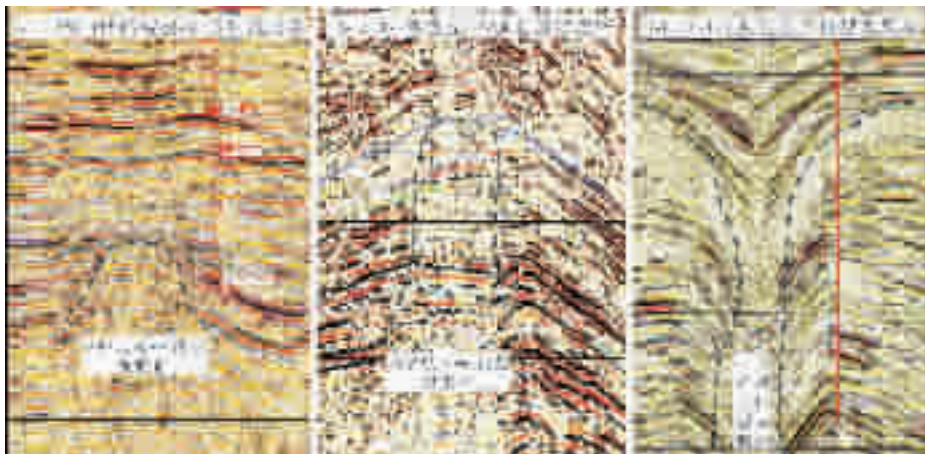


图2 莺歌海盆地泥底辟带不同类型泥底辟发育演化特征典型地震剖面

Fig.2 Typical seismic section of the evolution characteristics of different types of mud diapir in the mud diapir zone in the Yinggehai basin

上侵活动比较复杂,天然气及 CO₂ 运聚具有分区分块及分层富集的特点,运聚通道畅通储层发育物性良好且受到热流体侵入影响的区块及层段 CO₂ 富集成藏,反之,未受到热流体上侵活动影响的区块及层段则富集烃类气藏。

2.2.3 特强能量高幅度喷口型泥底辟

特强能量高幅度喷口型泥底辟最典型最突出的特点是,泥底辟的“柱状喷口”非常明显且规模大(图 2-C),泥底辟上侵底辟活动的能量极强,上侵拱起(底辟)的幅度最高,具有非常明显的低密低速及高温高压地质地球物理特征。由于泥底辟活动时上侵入(底辟)之垂向上拱作用力极强,底辟拱起幅度最高,且底辟活动能量及作用力均已大大超过了上覆地层岩石的破裂极限强度。因此,该类型泥底辟刺穿及喷发活动相当强烈,其泥底辟刺穿活动已达当时的海底地表(即大量泥源物质已喷出地表),故在其泥底辟顶部形成了规模颇大的类似火山喷发活动所形成的“漏斗状”下凹形喷口,其上则被上覆地层所充填覆盖。该类泥底辟由于底辟活动能量巨大,泥岩刺穿活动强烈,而当泥源物质及流体被大量携带喷出至地表后,其底辟能量则大量释放,流体压力急剧降低。伴随底辟能量及压力的释放和降低,以及泥源物质及流体的大量喷发和排出,则往往导致泥底辟顶部由于其泥源物质被大量喷空和喷出地表后冷却收缩,而最终形成了类似火山或泥火山喷发活动所遗留下来的痕迹——大型“漏斗状”下凹形喷口。该类泥底辟在地震剖面上则多表现为大型的杂乱地震反射模糊带,并凸现“柱形漏斗状”杂乱模糊地震反射形态

特点(图 2-C)。因此,对于该类型泥底辟可以通过地质及地球物理分析,综合判识与确定泥底辟发育演化特征及形态特点和分布位置。该类型泥底辟伴生构造,由于泥底辟热流体上侵活动非常强烈,天然气及 CO₂ 运聚虽然具分区分块及分层富集的特点,但以 CO₂ 最为富集,且 CO₂ 多通过底辟通道及断裂疏导系统向泥底辟体两侧地层运聚,在运聚通道畅通储层物性良好、热流体侵入活动强烈的区块及层段最终富集成藏。

2.3 泥底辟发育演化阶段及演变历程

为了进一步剖析和探讨泥底辟发育演化阶段及演变历程,笔者通过纵贯和横切中央泥底辟带昌南区 CN6-1 泥底辟(莺歌海盆地最大泥底辟)众多地震剖面的分析与解释,揭示出了 CN6-1 泥底辟及热流体的发育演化阶段及其演变历程。由此不难看出,该泥底辟及热流体活动以及所产生的地震模糊带活动轨迹,可以划分为几个重要的演化阶段,即泥底辟及热流体活动具有明显的阶段性,存在一个由量变到质变的泥底辟活动演化历程即:区域构造地质条件与巨厚欠压实泥页岩奠定了泥底辟形成发育的地质基础,在上述因素共同作用下欠压实泥页岩发生塑性流动,即泥底辟开始初次活动,其活动能量从开始孕育到大量充分的积聚积累,当其高温高压潜能达到一定极限之后,则导致底辟上侵或刺穿上覆地层及围岩,此时底辟活动能量则大量释放与散失;其后,泥底辟活动继续重复上述幕式活动的循环过程,泥底辟能量(即高温高压潜能)又开始重新积聚积累与重新刺穿释放直至最终

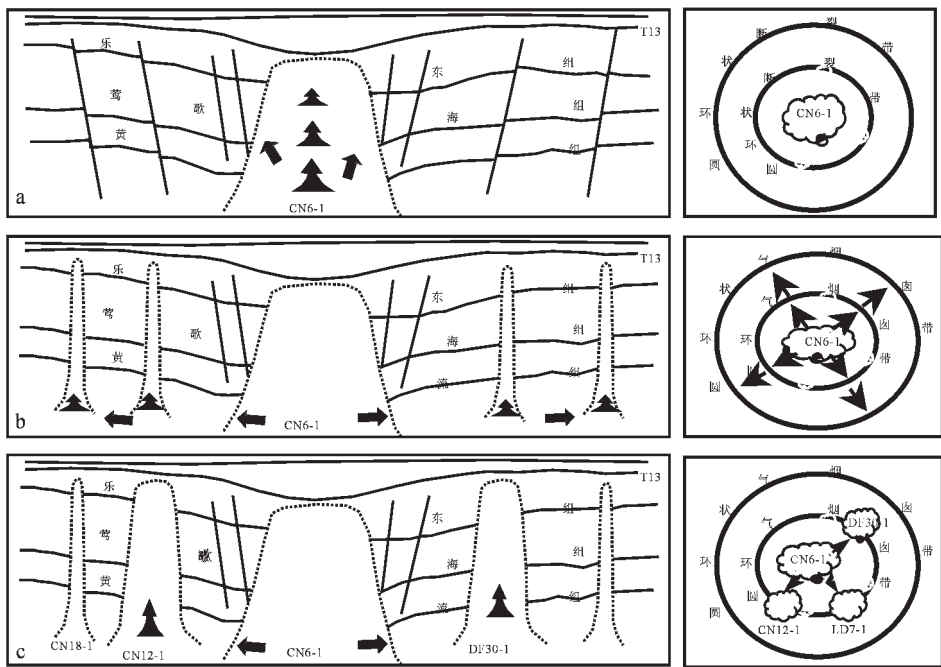


图 3 昌南区泥底辟形成演化及各阶段热流体上侵活动成因分析示意图 (箭头方向为泥底辟及热流体活动方向)

Fig.3 Formation and evolution of mud diapirs in the Changnan block and origin of the intrusion of thermal fluids in various stages (The direction of the arrow indicates the direction of mud diapirs and thermal fluid activity)

表 1 莺歌海盆地泥底辟带与非泥底辟区地温梯度及大地热流分布特征对比

Table 1 Comparison of the geothermal flow distribution characteristics and geothermal gradients between the mud diapir zone and non-mud diapir area in the Yinggehai basin

构造单元及区带		泥底辟类型	数据量	地温梯度 (°C/km)	地表温度 (°C)	岩石热导率		大地热流值			
						干样(W/m·k)	湿样(W/m·k)	干样(mW/m ²)	湿样(mW/m ²)		
莺歌海盆地	中部泥底辟构造带	DF1-1	中-强能量泥底辟	39	43.22	20	1.5	2.0	64.8	86.4	
		DF29-1	中-强能量泥底辟	10	44.25	20	1.5	2.0	66.4	88.5	
		LD8-1	特强能量泥底辟	18	36.28	20	1.5	2.0	54.4	72.6*	
		LD15-1	特强能量泥底辟	9	31.15	20	1.5	2.0	46.7	62.3*	
		LD20-1	弱-中能量泥底辟	8	42.56	20	1.5	2.0	63.8	85.1	
		LD22-1	弱-中能量泥底辟	9	43.06	20	1.5	2.0	64.5	86.1	
	LD28-1	中-强能量泥底辟	3	41.73	20	1.5	2.0	62.6	83.5		
	琼东南盆地	莺东斜坡带	LT13-1	非泥底辟区	1	36.00	20	1.5	2.0	54.0	72.0
			LT1-1		2	36.90	20	1.5	2.0	55.4	73.8
			LT34-1		1	35.00	20	1.5	2.0	52.5	70.0
LT35-1			1		35.00	20	1.5	2.0	52.5	70.0	
LT35-1			1		35.00	20	1.5	2.0	52.5	70.0	
莺歌海盆地				50	42.07	20	1.5	2.0	63.1	84.1	
琼东南盆地				39	37.37	20	1.5	2.0	56.0	74.7	

注: * 受底辟喷发作用影响的异常值; 热流值及地温梯度根据中国科学院地质研究所(1998)计算, 并补充修正。

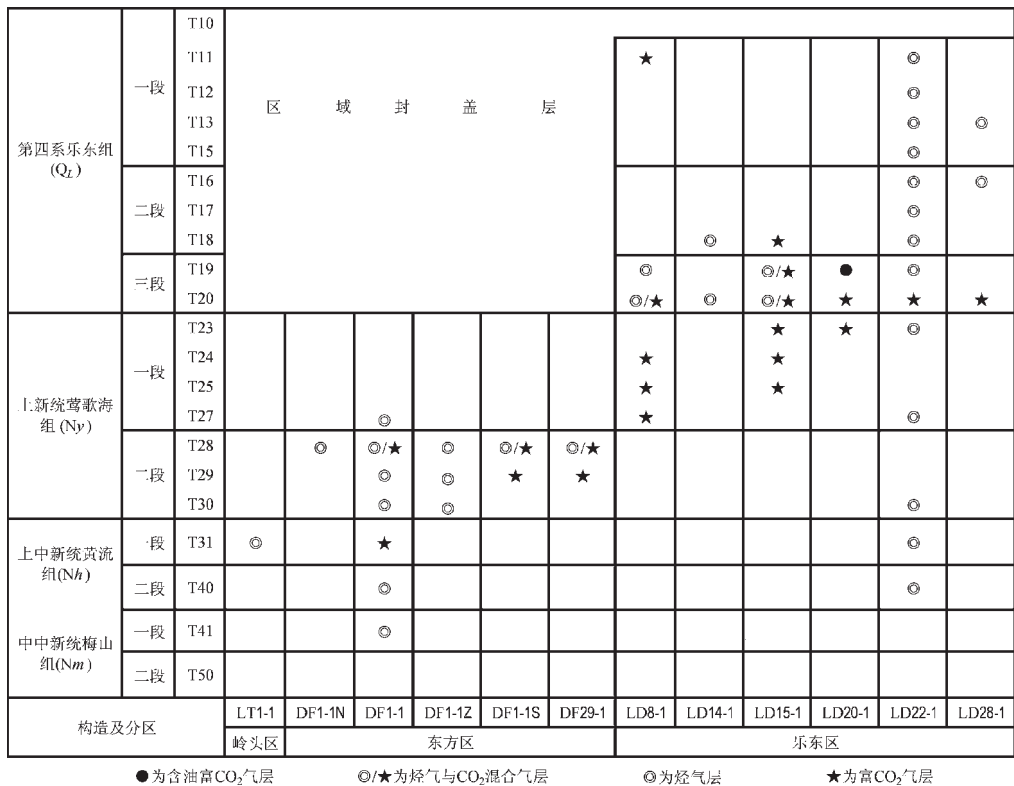


图 4 莺歌海盆地不同区带天然气及 CO₂ 运聚分布规律

Fig.4 Migration and accumulation of natural gas and CO₂ in different zones of the Yinggehai basin

泥底辟能量完全枯竭停止活动。因此, CN6-1 泥底辟及热流体活动演化过程具体可划分为以下几个阶段(图 3):

第一阶段为 CN6-1 泥底辟及热流体活动初期。该阶段虽然具体起始时间无法准确确定, 但泥底辟大规模活动结束时间基本可确定为第四纪(T13 时期), 其主要标志是在该时

期泥底辟顶部地层由于底辟能量释放塑性物质喷空后发生了大规模的塌陷, 在泥底辟顶部形成了非常明显的下凹沉积特征(图 3-a)。再者, 从泥底辟顶部晚期沉积的上覆地层未遭受破坏, 沉积连续也表明 CN6-1 泥底辟在 T13 之后基本停止了该阶段活动。同时, 泥底辟周缘地层由于受泥底辟活动

中心地层塌陷的牵引作用,形成两个围绕泥底辟活动中心的“圆环”状断裂带(图 3-a 右侧),在剖面上显示为发育于泥底辟两侧的对称性断裂,很显然该断裂为下一阶段的泥底辟热流体活动提供了疏导通道及诱发底辟的外界条件。

第二阶段为 CN6-1 泥底辟及热流体活动中期,该阶段在前期泥底辟活动停止后一段时间内发生,由于 CN6-1 泥底辟活动能量的重新积聚积累并达到了其活动极限,导致重新复活而发生第二次刺穿释放的演化过程。此时,由于 CN6-1 泥底辟区在前期发生过范围广规模大的地层塌陷,导致了其垂向运聚通道堵塞,加之该阶段泥底辟活动能量较小,尚不足以重新刺穿 CN6-1 泥底辟所在区域,故其底辟能量无法沿原来的垂直向上的底辟通道上侵刺穿,只能通过侧向沿周缘两侧地层薄弱带扩散侵入,最终在其邻近的“圆环”形断裂带刺穿释放而形成众多气烟囱(图 3-b),由于该阶段泥底辟及热流体能量释放过于分散,加之泥底辟活动能量有限,因此并没有对上覆地层产生强烈的破坏和影响,故未在地震剖面上形成大规模的地震模糊带,在平面上则仅仅形成两个“圆环”形的气烟囱带。

第三阶段为 CN6-1 泥底辟及热流体活动晚期(消亡期)和其他邻近泥底辟的发育成熟期。在第二演化阶段的基础上,由于 CN6-1 泥底辟活动能量经过重新积聚积累达到了一定的强度和极限,发生了第三次大规模、强能量刺穿释放的演化过程。该阶段 CN6-1 泥底辟的活动能量,通过长期的积聚积累,基本达到或接近了初期该底辟活动的能量,但由于 CN6-1 泥底辟区底辟主通道已被上覆地层堵死,不得不在其邻近的 DF30-1、LD7-1、CN12-1、12-2、18-1 等构造处沿着第二阶段所形成的断裂气烟囱带刺穿释放底辟能量,而发生第三次幕式底辟及热流体活动,形成了一系列泥底辟及伴生的地震模糊带。由于泥底辟及热流体的活动与释放,均沿断层及地层薄弱带侵入和扩散,集中在距底辟活动中心能量最强、最近的区域,故第三阶段形成的泥底辟地震模糊带,均主要集中于邻近 CN6-1 泥底辟活动中心、第二阶段演化所形成的第一个气烟囱“圆环”上(图 3-c),即该图的 DF30-1、LD7-1、CN12-1 及 18-1 等泥底辟热流体地震模糊带。

总之,泥底辟发育展布及其底辟上侵活动是该区高温超压盆地颇具特色的地质现象,是导致盆地高温高压潜能大量逸散与天然气运聚成藏的主控因素。其中泥底辟发育演化及其活动时与天然气运聚成藏时间基本一致,或略早于天然气运聚成藏时间,是该区天然气成藏至关重要的控制因素。从构造、断裂、油气运聚等相关资料分析,该区泥底辟活动多在晚中新世晚期及第四纪乃至现今,且个别泥底辟至今仍处于活动状态,而该区天然气运聚成藏时间与泥底辟形成及发育活动时基本同步或更晚,为第四纪乃至现今。加之,泥底辟作用在不同层位及深度均形成了上覆拱张背斜和断背斜等伴生构造,这些伴生构造多形成于中新世末—上新世,一直延续至第四纪方定型,同时,泥底辟活动在上覆地层中也产生了高角度断裂和垂向裂隙系统,故构成了塑性流体(包

括天然气)穿层运移的主要通道。因此,天然气可以伴随泥底辟及热流体上侵活动以幕式、多期充注特点进行大规模运聚,在具备储层及有效圈闭的场所富集成藏。

3 泥底辟发育演化与天然气及 CO₂ 运聚成藏规律

前已论及 3 种类型泥底辟的发育演化特征及特点,以下将重点对泥底辟发育演化与天然气及 CO₂ 运聚分布规律进行剖析,深入探讨泥底辟及热流体活动在该区天然气及 CO₂ 运聚成藏过程中的重要作用。

3.1 泥底辟热流体上侵活动与地温场的关系

大量地质综合研究^[1-10]及实际观测表明^[11],莺歌海盆地泥底辟带地温场明显高于盆地斜坡带及其他非泥底辟区的地温场。从表 1 地热数据可以明显看出,盆地中部泥底辟带大地热流值极高,达 83.5~88.5 mW/m²,而处在非泥底辟区的盆地边缘莺东斜坡带,其大地热流值偏低,均小于 74 mW/m²,多在 70~73.8 mW/m²。而且莺歌海盆地总体地温场亦偏高,其平均大地热流值高达 84.1 mW/m²,与其东南部相邻的琼东南盆地(无泥底辟活动大地热流值为 74.7 mW/m²)相比,其平均大地热流值要高得多。莺歌海盆地地温场及大地热流值除比琼东南盆地普遍偏高外(表 1),其盆地内部本身则以中部坳陷区的泥底辟构造带最高,且不论何种泥底辟类型其地热参数均明显偏高(表 1)。如泥底辟构造带上的 DF1-1、DF29-1、LD20-1、LD22-1 等气田及含气构造属不同类型的泥底辟伴生构造,但其大地热流值平均均在 85 mW/m² 以上,最高可达 88.5 mW/m²。表 1 中所示的 LD8-1 和 LD15-1 两气田及含气构造虽属特强能量型泥底辟伴生构造,但由于泥底辟发育演化及上侵刺穿活动相当强烈,纵向上底辟喷口及断裂通道已达超浅层或海底,故部分泥底辟热流体已在泥底辟上侵活动中散失消耗,因此,目前尚残存保留的大地热流值偏低,其分别平均为 72.6 mW/m² 和 62.3 mW/m²,比泥底辟带上的其他不同类型的泥底辟构造的大地热流值均低得多(表 1)。这种异常现象并不是表明该泥底辟构造大地热流值低,而是由于在泥底辟发育演化过程中,泥源物质及流体强烈喷发导致泥底辟热流大量散失所致。泥底辟带以外的其他区域即盆地边缘的莺东斜坡带或坳陷周缘区,如盆地西北部的 X 隆起区和盆地东北边缘莺东斜坡区,其大地热流值均较低,平均多在 70~73.8 mW/m²,与邻区无泥底辟活动的琼东南盆地大地热流值相当,而大大低于泥底辟带的大地热流值。总之,莺歌海盆地区域上大地热流高值区及高地温场,主要集中于盆地中部坳陷区的泥底辟构造带,该带地温梯度平均达 4.30℃/100 m,最高可达 4.75℃/100 m,大地热流值最高达 92.5 mW/m²,而由该带向盆地两侧边缘斜坡区及周缘,则大地热流值大幅度降低而逐渐递减为 70 mW/m² 左右。

3.2 泥底辟发育演化与天然气及 CO₂ 运聚富集规律

莺歌海盆地自 20 世纪 60 年代初开展浅海油气苗调查及浅井钻探以来,迄今已发现多个天然气藏及含气构造和众

多油气苗及气烟囱分布区,主要分布在中央泥底辟带浅层及莺东斜坡带中南段。研究表明^[19-20],该区天然气运聚成藏规律,具有分区分块分带运聚特征、生运聚(供)与散失动平衡晚期成藏的特点,主要受控于泥底辟发育演化及热流体的局部上侵活动。上新世—第四纪晚期泥底辟热流体上侵活动既在纵向上开辟了天然气运聚的“高速公路”通道,提供了中新统一上新统下部烃源岩成烃演化与非烃气形成的热动力条件,进而导致大量天然气及 CO₂ 生成,同时控制了该区天然气及 CO₂ 运聚分布具有明显分层分块局部性富集的特点。由图 4 可以看出,莺歌海盆地中央泥底辟带东方区和乐东区不同气藏及含气构造的天然气及 CO₂ 运聚分布特征,由于其受泥底辟热流体上侵活动及运聚通道差异的影响和控制,导致不同构造圈闭之不同区块及层段,其天然气及 CO₂ 运聚分布乃至富集成藏,均存在颇大差异。如 LD15-1 气田和 LD8-1 含气构造,由于泥底辟热流体上侵活动强烈,断裂较发育,底辟通道及断裂相互配置良好,故天然气及 CO₂ 富集,纵向上 CO₂ 运聚到最浅处仅 350 m(如 T11 层);平面上,在乐东区和东方区则分别以第四系乐东组的 T20 层和上新统莺歌海组 T28、T29 层 CO₂ 最富集,而区域上烃类气富集 CO₂ 含量低的区块及构造,则主要集中在 DF1-1N 气藏和乐东 22-1 气田。CO₂ 最富集的泥底辟伴生构造及气田主要为 DF1-1S、DF29-1 及 LD8-1 和 LD15-1 等。

总之,莺歌海盆地泥底辟发育演化与天然气及 CO₂ 运聚成藏规律较复杂,且独具特色,但可以概略总结为以下几点:

- (1) 上新世—第四纪盆地晚期泥底辟及热流体上侵活动控制了天然气及 CO₂ 运聚成藏和分块分层的富集规律;
- (2) 盆地属新近纪形成的年轻盆地,烃源岩新(中新统一上新统下部),第四纪晚期泥底辟热流体上侵活动导致其快速熟化,生排烃时间甚晚,而天然气运聚成藏时间则更晚,很显然,对于天然气而言其运聚成藏时间越短,则极大地减少了天然气运聚成藏过程中大量的散失损耗,提高了天然气的富集效率,有利于天然气运聚动平衡成藏;
- (3) 天然气藏具有典型的生运聚(供)与散失的动平衡成藏特征,生运聚供之天然气数量远远大于其运聚成藏过程中散失损耗之天然气数量,即“天然气供给远大于散失”是该盆地天然气运聚成藏关键所在。典型的例证是该区无论中央泥底辟带还是边缘斜坡区,在海底及海面均可见有油气苗或气烟囱,表明该区迄今仍存在天然气的散失过程,但由于气源供给量大于散失量,故在不同区带仍然形成了较大规模的天然气藏。由于盆地非常年轻,加之天然气运聚成藏时间甚晚,故天然气生运聚散的动平衡过程迄今仍在进行之中^[3-11],该区所见大量油气苗及气烟囱显示即是重要例证;
- (4) 泥底辟热流体上侵活动所伴生的高温高压潜能,不仅是烃源岩成熟演化的主导因素,而且也是天然气运聚成藏的主要动力和控制因素^[3-8];
- (5) 天然气及 CO₂ 分区分块与分层的差异运聚规律及特点,主要受控于泥底辟热流体上侵活动与有利储集场所

(圈闭)及有效储集层段(储集物性好储层)的相互配置^[3-8]。

4 结 论

综上所述泥底辟发育演化及热流体上侵活动与天然气及 CO₂ 运聚成藏规律的分析,可以得到以下结论:

- (1) 莺歌海盆地是南海北部大陆边缘西区一个沉积巨厚的新生代走滑伸展盆地,欠压实异常高温高压与强烈的泥底辟活动及天然气丰富是其颇具特色的地质特征。盆地高温高压场分布主要集中于中部拗陷区泥底辟构造带,由该带向盆地两侧边缘斜坡非泥底辟区,明显减弱或为正常温压地层系统。
- (2) 莺歌海盆地泥底辟具有明显的低密低速及高温高压的地质地球物理特征,依据其形态特征、活动能量及喷出程度、底辟上拱侵入高度等特点,可划分为“深埋型”低幅度弱—中能量泥底辟、“浅埋型”高幅度中—强能量泥底辟及“喷口型”高幅度特强能量泥底辟等 3 种主要类型。
- (3) 莺歌海盆地新近纪以来快速沉积,强烈的欠压实、水热增压及生烃作用等多种因素共同作用与盆地边界断层晚期右旋走滑伸展区域构造应力场的配合与影响,是该区泥底辟形成发育的基本地质条件和最主要的控制因素。
- (4) 莺歌海盆地天然气运聚成藏具有烃源岩新(中新统一上新统下部)、供大于散晚期动平衡成藏以及泥底辟热流体上侵活动控制天然气及 CO₂ 运聚规律特点。根据该区天然气及 CO₂ 运聚规律,结合油气勘探成果资料的综合剖析,即可预测 CO₂ 风险,优选与确定天然气勘探方向及领域。

参考文献(References):

[1] 何家雄, 咎立声, 陈龙操, 等. 莺歌海盆地泥丘发育演化特征与油气远景[J]. 石油与天然气地质, 1990,11(4):436-445.
He Jiaxiong, Zan Lisheng, Chen Longcao, et al. Characteristics of mud-mount evolution and oil potential in Yinggehai Basin [J]. Oil and Gas Geology, 1990,11 (4):436~445 (in Chinese with English abstract).

[2] 何家雄, 陈伟煌, 钟启祥, 等. 莺歌海盆地泥底辟特征及天然气勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 1994,21(6):6~9.
He Jiaxiong, Chen Weihuang, Zhong Qixiang, et al. Mud diapir characteristics and natural gas prospects in Yinggehai Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 1994,21 (6):6~9 (in Chinese with English abstract).

[3] 何家雄, 咎立声, 陈龙操, 等. 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.
He Jiaxiong, Zan Lisheng, Chen Longcao, et al. The formation and evolution mud diapir and its relationship with hydrocarbon accumulation mechanism in Yinggehai Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1994,12(3):120~129(in Chinese with English abstract).

[4] 何家雄, 陈红莲, 陈刚, 等. 莺歌海盆地泥底辟带天然气成藏条件及勘探方向[J]. 中国海上油气(地质), 1995,9(3):155~163.
He Jiaxiong, Chen Honglian, Chen Gang, et al. Gas reservoir and exploration targets of mud diapir belt, Yinggehai Basin [J]. China

- Offshore Oil and Gas (Geology), 1995,9 (3):157~163 (in Chinese with English abstract).
- [5] 何家雄, 陈伟煌, 李明兴, 等. 莺歌海盆地热流体上侵活动与天然气运聚富集关系探讨[J]. 天然气地球科学, 2000,11(6):29~43.
He Jiaxiong, Chen Weihuang, Li Mingxing, et al. Geotemperature field and upwelling Action of hot flow body and its relationship with natural gas migration and accumulation in Yinggehai Basin[J]. Nature Gas Geoscience, 2000,11(6):29~43(in Chinese with English abstract).
- [6] 何家雄, 夏斌, 刘宝明, 等. 莺歌海盆地泥底辟热流体上侵活动与天然气及 CO₂ 运聚规律剖析[J]. 石油实验地质, 2004,26(4):349~358.
He Jiaxiong, Xiabin, Liu Mingbao, et al. Geotemperature field and upwelling Action of hot flow body and its relationship with natural gas migration and accumulation in Yinggehai Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2004,26 (4):349~358 (in Chinese with English abstract).
- [7] 何家雄, 王振峰, 解习农, 等. 莺歌海盆地泥-流体底辟带热流体活动对天然气运聚成藏的控制作用[J]. 地球科学, 2004,29(2):203~210.
He Jiaxiong, Wang Chenfeng, Xie Xinong, et al. Heat flow action and its control on natural gas migration and accumulation in mud-fluid diapir areas in Yinggehai Basin [J]. Earth science, 2004,29(2): 203~210(in Chinese with English abstract).
- [8] 毛云新, 何家雄, 张树林, 等. 莺歌海盆地泥底辟带昌南区热流体活动的地球物理特征及成因[J]. 天然气地球科学, 2005,16(1):108~113.
Mao Yunxin, He Jiaxiong, Zhang Shulin, et al. Geophysical characters and origin of the thermal fluids in Changnan block of mud diapir zone in Yinggehai Basin [J]. Nature Gas Geoscience, 2005,16(1):108~113(in Chinese with English abstract).
- [9] 郝芳, 李思田, 龚再升, 等. 莺歌海盆地底辟发育机制与流体幕式充注[J]. 中国科学(D辑), 2001,31(6):471~476.
Hao Fang, Li Sitian, Gong Zaishen, et al. The mechanics of the diapir and the fluid episodic infilling of Yinggehai Basin[J]. Science in China(Ser.D), 2001, 31(6):471~476(in Chinese).
- [10] 郝芳, 邹华耀, 黄保家, 等. 莺歌海盆地天然气生成模式及其成藏流体响应[J]. 中国科学(D辑), 2002,32(11):889~895.
Hao Fang, Zhou Huayao, Huang Baojia, et al. Gas generation model and its responds in accumulation of natural gas of Yinggehai Basin[J]. Science in China(Ser.D), 2002,32(11):889~895(in Chinese).
- [11] 郝芳, 董伟良, 邹华耀, 等. 莺歌海盆地汇聚型超压流体流动及天然气晚期快速成藏[J]. 石油学报, 2003,24(6):7~12.
Hao Fang, Dong Weiliang, Zhou Huayao, et al. Overpressure fluid flow and rapid accumulation of natural gas in Yinggehai Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2003,24 (6):7~12 (in Chinese with English abstract).
- [12] 单家增, 董伟良. 莺歌海盆地泥底辟构造动力学成因机制的高温高压模拟实验[J]. 中国海上油气(地质), 1996,10(4):209~214.
Shan Jiazeng, Dong Weiliang. High temperature and high pressure modelling experiments for dynamic mechanism of the mud diapir in Yinggehai Basin [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 1996,10(4):209~214(in Chinese with English abstract).
- [13] 张树林, 田世澄, 朱芳冰, 等. 莺歌海盆地底辟构造的成因及石油地质意义[J]. 中国海上油气(地质), 1996,10(1):1~6.
Zhang Shulin, Tian Shicheng, Zhu Fangbing, et al. Genesis of diapir structures in Yinggehai Basin and its significances to petroleum geology [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 1996,10(1):1~6(in Chinese with English abstract).
- [14] 解习农, 李思田, 胡祥云, 等. 莺歌海盆地底辟带热流体输导系统及其成因机制[J]. 中国科学(D辑), 1999,29(3):247~256.
Xie Xinong, Li Sitian, Hu Xiangyun, et al. Genetic mechanisms of the diapir and the fluid guide economy in Yinggehai Basin [J]. Science in China(Ser.D), 1999,29(3):247~256(in Chinese).
- [15] 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.
Li Chunquan. Fluid diapirs and their contributions to hydrocarbon accumulation in Yinggehai Basin [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 2000,14(4):253~257(in Chinese with English abstract).
- [16] 黄春菊, 陈开远, 李思田, 等. 莺歌海盆地泥底辟活动期次分析[J]. 石油勘探与开发, 2002,29(4):44~46.
Huang Chunju, Chen Kaiyuan, Li Sitian, et al. Periodicities of diapiric rise in the Yinggehai Basin [J]. Petroleum exploration and development, 2002,29(4):44~46(in Chinese with English abstract).
- [17] 张敏强, 钟志洪, 夏斌, 等. 莺歌海盆地泥-流体底辟构造成因机制与天然气运聚[J]. 大地构造与成矿学, 2004,28(2):118~125.
Zhang Minqiang, Zhong Zhihong, Xin Bia, et al. Genetic mechanisms of mud-fluid diapir in Yinggehai Basin and hydrocarbon accumulation [J]. Geotectonica et Metallogenia. 2004,28(2):118~125(in Chinese with English abstract).
- [18] 何丽娟, 熊亮萍, 汪集咏, 等. 莺歌海盆地构造热演化模拟研究[J]. 中国科学, 2000,30(4):415~419.
He Lijuan, Xiong Liangping, Wang Jiyang, et al. The research on thermal evolution of Yinggehai Basin [J]. Science in China(Ser.D), 2000,30(4):415~419(in Chinese).
- [19] 龚再升, 李思田, 等. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集[M]. 北京:科学出版社, 1997.1~510.
Gong Zaishen, Li Sitian, et al. The basin analysis and the accumulation of gas in the continental margin of the northern of the South Sea[M]. Beijing: Science Press, 1997.1~510(in Chinese with English abstract).
- [20] 何家雄, 笕立声, 梁可明, 等. 莺-琼盆地泥岩压实与油气运移[J]. 石油勘探与开发, 1991,18(增刊):34~41.
He Jiaxiong, Zan Lisheng, Liang Keming, et al. Evolution of the mudrock compaction and hydrocarbon migration in Ying-Qiong Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 1991,18(supp.): 34~41(in Chinese with English abstract).
- [21] 何家雄, 李明兴, 黄保家, 等. 莺歌海盆地北部斜坡带油气苗分布与油气勘探前景剖析[J]. 天然气地球科学, 2000,11(2):1~9.
He Jiaxiong, Li Mingxing, Huang Baojia, et al. The analysis of the oil and gas exploration and the distribution of outflow of oil and gas in the northern slope of the Yinggehai basin [J]. Nature Gas Geoscience, 2000,11(2):1~9(in Chinese with English abstract).

- [22] 何家雄, 梁可明, 黄保家, 等. 莺歌海盆地海相烃源岩特征及油气运移的证据[J]. 南海石油, 1990,7(3):8~22.
He Jiexiong, Liang Keming, Huang Baojia, et al. Characters of marine hydrocarbon rock and evidences of oil & gas migration in Yinggehai basin[J]. Nanhai Petroleum, 1990,7(3):8~22(in Chinese with English abstract).
- [23] 何家雄, 杨计海, 陈志宏, 等. 莺歌海盆地中深层天然气运聚成藏特征[J]. 天然气工业, 2003,(23)3:15~19.
He Jiexiong, Ynag Jihai, Chen Zhihong, et al. Migration – accumulation characteristics of deep zone gas in Yinggehai Basin[J]. Natural Gas Industry, 2003,23 (3):15~19 (in Chinese with English abstract).
- [24] 何家雄, 夏斌, 刘宝明, 等. 莺歌海盆地浅层与中深层天然气成藏地质条件综合分析评价[J]. 地质通报, 2005,15(1):12~17.
He Jiexiong, Xia Bin, Liu Baoming, et al. Analysis of conditions of formation of middle –and deep –level gas accumulations in the Yinggehai basin and their comparison with those of shallow –level gas accumulations[J]. Geological Bulletin of China, 2005,15(1):12~17(in Chinese with English abstract).
- [25] 何家雄, 夏斌, 刘宝明, 等. 莺歌海盆地中深层天然气运聚成藏特征及勘探前景[J]. 石油勘探与开发, 2005,32(1):37~42.
He Jiexiong, Xia Bin, Liu Baoming, et al. Gas migration and accumulation and the exploration of the middle –deep layers in Yinggehai Basin[J]. Offshore South China Sea, 2005,32(1):37~42 (in Chinese with English abstract).
- [26] 何家雄, 刘全稳, 刘宝明, 等. 从两口深井看莺歌海盆地中深层天然气成藏特征[J]. 天然气地球科学, 2004,15(3):230~237.
He Jiexiong, Liu Quanwen, Liu Baoming, et al. Analysis of the characters of forming natural Gas reservirs basing on two deep drilling wells in the middle –deep beds in Yinggehai Basin[J]. Nature Gas Geoscience, 2004,15 (3):230~237 (in Chinese with English abstract).
- [27] 朱建成, 何家雄, 张树林, 等. 莺歌海盆地底辟带中深层高温高压环境天然气勘探前景[J]. 海洋石油, 2004,24(4):21~26.
Zhu Jiancheng, He Jiexiong, Zhang Shulin, et al. The exploration outlook of natural gas under high temperature and high pressure in medium –deep layerinthe shale diapir belt of the Yinggehai Basin[J]. Offshore Oil, 2004,24(4):21~26(in Chinese with English abstract).
- [28] 何家雄, 夏斌, 刘宝明, 等. 中国东部陆上和海域 CO₂ 成因及运聚规律与控制因素分析[J]. 中国地质, 2005,32(4):663~673.
He Jiexiong, Xia Bin, Liu Baoming, et al. Analysis of the genesis and migration and accumulation of CO₂ and controlling factors in the onland and offshore areas of eastern China [J]. Geology in China, 2005,32(4):663~673(in Chinese with English abstract).

Origin and distribution of mud diapirs in the Yinggehai basin and their relation to the migration and accumulation of natural gas

HE Jia-xiong¹, XIA Bin¹, ZHANG Shu-lin², YAN Pin¹, LIU Hai-ling¹

(1. Key Laboratory of Marginal Sea Geology and Resources, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China

2. CNOOC Research Center, Beijing 100027, China)

Abstract: Mud diapirs are characteristic anomalous seismic –geologic bodies in the Yinggehai basin on the northern margin of the South China Sea and have the less compact, abnormally high –pressure and –temperature and low –density and –velocity geophysical characteristics. They show pronounced zoning and are distributed en echelon in a nearly N –S direction along the northwest trend of the basin. The origin and distribution of the mud diapirs were controlled mainly by the combined action of the great abnormally high –temperature and –pressure potential energy produced by rapid subsidence of the basin and inequilibrium between the filling –compaction of rapidly deposited sediments and fluids squeezed out and the dextral strike –slip extension of regional basin –controlling faults in the late stage. The natural gas and CO₂ migration and accumulation were effectively controlled by the effective combination of the upward intrusion of the late –stage mud –diapir thermal fluids and their accumulation conditions.

Key words: diapir origin; diapir hot fluid activity; potential energy of high pressure and temperature; basin –controlling fault; late –stage hydrocarbon migration and accumulation

About the first author: HE Jia –xiong, male, born in 1956, doctor and professor, engages in petroleum exploration and integrated geological study; E –mail: hajx@gig.ac.cn.