

doi: 10.3799/dqkx.2010.008

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

何家雄¹, 祝有海², 翁荣南³, 崔莎莎¹

1. 中国科学院边缘海地质重点实验室, 广东广州 510640

2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

3. 台湾中国石油股份有限公司探采事业部, 台北 11010

摘要: 泥底辟与泥火山成因机制相同, 发育演化特征相似, 但最终地质形态及存在形式有所差异。通过深入分析南海西北部莺歌海盆地泥底辟与东北部台西南盆地泥火山发育展布特点及伴生天然气地球化学特征, 指出莺歌海盆地泥底辟主要分布于盆地中部的莺歌海深大凹陷, 且沿盆地 NW 方向呈五行雁行式排列, 泥底辟发育演化具有明显的低密、低速和异常高温超压的特点; 而台西南盆地泥火山主要展布于南部凹陷陆坡深水区和台湾陆上台南—高雄地区, 陆上泥火山多沿深大断裂带分布, 地面形态特征类似火山形态, 多具有喷口, 海域泥火山的海底形态亦与其相似, 但研究程度较低。泥底辟及泥火山伴生烃类天然气成因类型较多, 但以成熟—高熟煤型烃类气为主; 伴生的非烃气 CO₂ 和 N₂ 丰富, 但以无机壳源型 CO₂ 为主。泥底辟及泥火山的泥源层均为中新世及上新世海相坳陷沉积的巨厚泥页岩, 本身即具生烃潜力, 其成熟生烃及其与泥底辟/泥火山运聚通道和底辟伴生构造的良好配置, 则构成了其独特的泥底辟/泥火山油气运聚成藏系统, 进而控制了这种“泥底辟/泥火山型油气藏”的分布。

关键词: 莺歌海盆地; 台西南盆地; 泥底辟/泥火山; 地质地球物理; 油气运聚特点。

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2010)01-0075-12

收稿日期: 2009-07-26

Characters of North-West Mud Diapirs Volcanoes in South China Sea and Relationship between Them and Accumulation and Migration of Oil and Gas

HE Jia-xiong¹, ZHU You-hai², WENG Jung-nan³, CUI Sha-sha¹

1. Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

3. Chinese Petroleum Corp., Exploration & Production Business Division, Taipei 11010, China

Abstract: It has geological and mode of occurrence differences between mud diapirs and mud volcanoes though the similar genesis and the characters of evolution and development. Mud diapirs in Yinggehai basin located in the central deep depression appeared on five north-west lines and had characters of low density, low wave velocity, high temperature and high pressure however mud volcanoes in Southwest Taiwan basin located in the continental deep-water distract in the south depression and Tainan-Kaohsiung distract in Taiwan. It located along the discordogenic fault and usually had calderas also sea floors. Mud diapirs and mud volcanoes had many styles of accompanying gas to be mainly of the mature-post mature coaliferous gas and had abundance CO₂ and N₂ to be mainly of the inorganic-crustal CO₂. The mud formations were Miocene and Pliocene marine mud shales which was source rocks, furthermore it made a effective system with the channel and affiliated structures generated by mud diapirs and mud volcanoes, so it was a particular petroleum system controlling the distribution of oil and gas.

Key words: Yinggehai basin; Southwest Taiwan basin; mud diapirs/ mud volcanoes; geology and geophysics; oil-gas accumulation and migration characters.

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (Nos. 2007CB41170501, 2009CB219501).

作者简介: 何家雄(1956—), 男, 研究员, 长期从事油气勘探与地质综合研究. E-mail: hejx@gig.ac.cn

0 引言

泥底辟、泥火山成因机制相同,发育演化特征相似,均是由地壳深部密度较小的高塑性巨厚欠压实泥页岩,在密度倒置的动力体系下产生差异重力作用而导致流动上侵和上拱,使得上覆岩层弯曲隆起或刺穿上覆地层薄弱带而形成的一种地质构造,其中未刺穿上覆地层,即未出露地表或海底的为泥底辟,而刺穿上覆地层出露地表或海底的则称为泥火山(曹成润和刘志宏, 2005; 何家雄等, 2006a)。泥底辟及泥火山在全球范围内广泛分布,地球上已知泥火山数量近 900 个,比较著名的泥火山有伊朗的马克兰和罗马尼亚的布扎,最大的泥火山分布在阿塞拜疆的巴库,美国黄石公园泥火山亦非常闻名。海底泥火山在里海、黑海、挪威海、地中海以及巴巴多斯近海、尼日利亚近海和墨西哥湾等海域均有发现。研究表明(何家雄等, 1990, 1994a, 2004; 张启明等, 1996; 解习农等, 1999; 郝芳等, 2001; 龚再升等, 2004; 范卫平等, 2007), 大多泥底辟及泥火山发育演化均与油气运聚成藏存在一定的成因联系。因此,泥底辟及泥火山的存在是寻找石油天然气及“渗漏型”天然气水合物的重要线索和示踪标志(沙志彬等, 2005; 何家雄等, 2009)。

南海北部边缘西北部莺歌海盆地泥底辟异常发育,而东北部台西南盆地泥火山则广泛分布。其中,莺歌海盆地天然气勘探程度及泥底辟研究程度较高,根据该区泥底辟发育演化与天然气运聚存在的成因联系,应用泥底辟热流体上侵活动控制天然气运聚成藏的原理,近二十年来,取得了天然气勘探的重大突破。迄今为止,在莺歌海盆地泥底辟构造带浅层勘探已发现了大量各种“泥底辟类型天然气气藏”或与泥底辟有关的天然气气藏,获得探明+控制+预测级烃类天然气和二氧化碳地质储量均分别超过 $3\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$, 烃类天然气和二氧化碳资源量亦分别达万亿立方米以上;而东北部台西南盆地天然气勘探程度及泥火山研究程度均较低,无论是海上还是陆上天然气勘探及泥火山地质研究均较薄弱或者属于勘探与研究的空白区。迄今为止,虽然在陆上泥火山区发现了天然气苗和气显示,海上陆坡深水区泥火山发育区亦发现大量天然气水合物存在的标志(BSR),但尚未获得天然气及天然气水合物勘探的重大突破。本文旨在前人研究工作基础之上,通过深入剖析南海西北部泥底辟与东北部泥火山发育演化特征及其与油气运聚成藏的关系,以勘探及研究程度较高的莺歌海

盆地为研究重点,深入探讨这种泥底辟及泥火山伴生油气藏的形成条件、分布规律及其与泥底辟发育演化过程的成因联系,以期为促进和推动勘探开发这种泥底辟及泥火山油气藏提供指导和借鉴。

1 区域地质背景

莺歌海盆地位于印支半岛与海南岛之间的南海西北部大陆边缘位置,处在印度板块与欧亚板块及太平洋板块三大板块之交汇区,属于华南地块与印支地块地缝合线向西南海域之延伸区。从构造动力学及运动学特征分析,该盆地属于在地幔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非常独特的走滑伸展型的新生代沉积盆地,新生代沉积厚度超过 17 000 m,盆地结构虽然亦与中国东部及邻区的断陷裂谷盆地相似,具有断拗双层结构,但其以新近纪及第四纪后巨厚的海相拗陷沉积为主,海相拗陷沉积规模巨大,沉积厚度超过万米。盆地总体沿 NW 向呈菱形长带状展布(图 1),盆地主体及中部莺歌海拗陷沉降沉积最深、沉积规模巨大,主要由西北部河内拗陷与东南部莺歌海拗陷所构成,两拗陷间被临高低隆起分隔,盆地东北部边缘与西南部边缘区则分别由莺东斜坡和莺西斜坡两个盆地边缘构造单元所组成,异常发育的众多泥底辟所组成的中央泥底辟构造带即展布于盆地中部莺歌海拗陷沉降沉积最深处,整个泥底辟构造带展布规模超过 $2 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

台西南盆地位于台湾西南海域,即南海北部边缘的东北部(图 1),其范围在 $117^\circ 30' \sim 120^\circ 40' \text{ E}$, $20^\circ 30' \sim 23^\circ 30' \text{ N}$ 之间。盆地总体呈 NE-SW 方向展布,长约 480 km,宽达 240 km,面积约 $72\,500 \text{ km}^2$ 。盆地主要由海区和少部分陆上所组成(图 2),海域部分跨越陆架陆坡,水深为 50~3 000 m,其中水深小于 200 m 的陆架部分仅占盆地面积 34%,其余均属陆坡深水区。台西南盆地属中新世叠合型或残留复合型断陷裂谷盆地。由于前古近纪区域上 NE-SW 向张裂作用之结果,导致该盆地从北至南被分割为北部凹陷、中央隆起带以及南部凹陷等 3 个构造单元,中央隆起带夹于北部凹陷与南部凹陷之间,属两凹之隆,其石油地质特征及油气运聚规律与中国东部陆相断陷盆地及其它近海陆架断陷盆地基本一致,凹凸相间、断洼相隔、块断差异活动及自成体系的断块油气运聚系统和特点非常明显(何家雄等, 2006b)。需强调指出的是,台西南盆地中央隆起带南部,尤其是南部凹陷多处于陆坡深水区,新近纪裂



图 1 南海北部大陆边缘主要沉积盆地分布及研究区位置

Fig. 1 The main sedimentary basins distribution and location of study area in continental margin of South China Sea

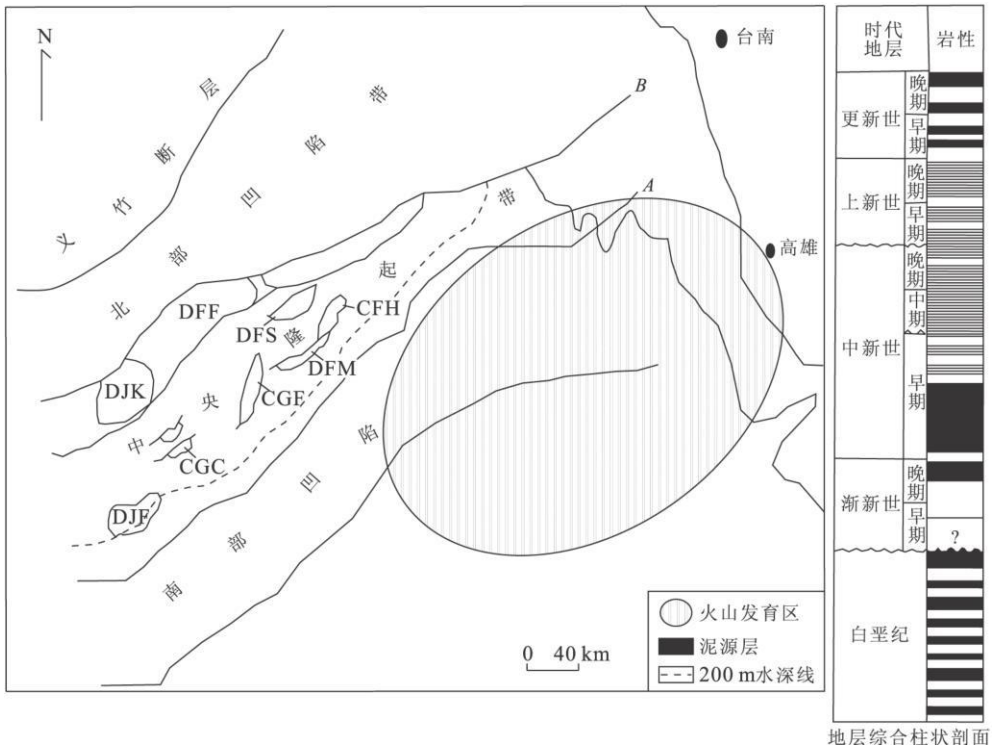


图 2 台西南盆地构造单元组成、泥火山分布范围及泥源层发育特征

Fig. 2 Tectonic unit, mud volcano distribution and mud source layer development characteristics of South West Taiwan basin

后海相坳陷沉积规模大, 沉积了巨厚的中新统及上新统大套海相泥页岩(图 2), 为该区泥火山形成发

育奠定了雄厚的物质基础。同时,由于该区中新世晚期断裂活动非常活跃,且纵向上切割层位多,一般可延伸至浅层,故其不仅对该区众多泥火山形成与分布具有重要的控制作用,且对其油气运聚输导尤其是成烃门限以上的构造及非构造圈闭的油气运聚与富集成藏等,均具有重要的输导控制作用。

2 西北部泥底辟与东北部泥火山发育特征

2.1 西北部泥底辟发育特征

南海西北部边缘走滑伸展型的莺歌海盆地,具有下断上拗,且以巨厚海相拗陷沉积为主的断拗双层盆地结构特点。其古近系陆相断陷沉积不甚发育、分布较局限,仅在盆地西北部有所揭示,而新近系及第四系裂后海相拗陷沉积规模巨大、泥页岩等细粒沉积物巨厚,且主要展布于盆地沉降最深、沉积最厚的东南部莺歌海拗陷,其总沉积充填厚度超过万米,进而为该区泥底辟形成奠定了雄厚的物质基础。该区区域构造发育演化史研究表明(孙家振等,1995;龚再升和李思田,1997;何家雄等,2008a;孙珍等,2007),红河断裂带(莺歌海盆地位于其东南部延伸处)在新生代晚期发生过两次大的剪切(走滑)运动,这种走滑伸展运动的最终结果,导致在该盆地中部莺歌海拗陷形成了多组近南北向呈雁行排列的张裂带,进而为该区塑性泥底辟上侵活动及其展布提供了重要的外部通道条件,亦促进和控制了泥底辟成群成带分布,形成了沿盆地北西长轴方向呈 5 排雁行式排列的泥底辟展布格局,并由此构成了规模巨大的盆地中央泥底辟构造带。

莺歌海盆地泥底辟发育展布特征,何家雄等(1989,1990,1994b,2000a,2006a)研究,主要具有以下显著特点:其一,区域上展布于盆地中部东南区沉降最深、沉积最厚的莺歌海拗陷。该区沉积充填规模巨大,新近系及第四系海相拗陷沉积厚逾万米,是形成大规模泥底辟的物质基础;其二,平面上沿盆地北西长轴方向泥底辟呈 5 行雁行式排列,并由此构成了规模巨大的中央泥底辟背斜构造带,展布面积达 20 000 km²。其中,泥底辟单个最大面积超过 700 km²,一般多为几十至百余平方千米;其三,具有低密低速的地球物理特征和异常高温超压的地质特点。由于该区泥底辟的泥源层物资均为中新统及上新统底部富含流体的巨厚海相欠压实泥页岩,故其

岩石密度非常低(小于 2.3 g/cm³),地震传播速度出现低速异常,在常规二维反射地震剖面及速度谱资料上均见到明显的低速异常特征。同时,钻井及地震资料揭示,泥底辟分布区存在明显的异常高温超压的地质特点。钻井测试表明,盆地中央泥底辟带地温梯度及大地热流值偏高,最大分别高达 5.7 °C/100 m 和 95 mW/m² 以上,而盆地边缘斜坡区则地温梯度及大地热流值偏低,分别为 3.69 °C/100 m 和 73.8 mW/m²,大大低于中央泥底辟带。泥底辟带异常超压亦非常明显。根据钻井及地震资料解释与预测证实(图 3),盆地中部泥底辟带地层流体孔隙压力系数一般均大于 1.5,最高达 2.2 以上,展布范围与泥底辟带分布规模基本一致;其四,具有各种形态杂乱模糊反射地球物理特征。在二维、三维时间地震反射剖面上,由于泥底辟热流体强烈的上侵活动,导致其底辟通道及周缘产生了各种形态各异、反射模糊杂乱或空白反射的复杂地震地质体等信息特点;其五,根据该区泥底辟剖面形态特征、活动能量及喷出程度、底辟侵入及拱起高度等特点,可将其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、柱状喷口型特强能量泥底辟等 3 种成因类型(何家雄等,2006a,2008a)。“深埋型低幅度弱—中能量泥底辟”如图 4a 所示,其主要特点是泥底辟上侵拱起(向上底辟挤入)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覆盖。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。该类泥底辟最重要的特点是具有低密低速、异常高温高压,即“两低两高”的地质地球物理特点,剖面形态多为低幅度背斜。“浅埋型高幅度中—强能量泥底辟”如图 4b 所示,其最突出的特点是底辟活动能量强,上侵拱起即底辟挤入的幅度较高,亦具低密低速及高温高压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,剖面上往往形成不同类型断裂系统所造成的空白杂乱模糊地震反射带。“柱状喷口型特强能量泥底辟”如图 4c 所示,其最典型最突出的特点是泥底辟上部“柱状喷口”非常明显且延伸长、规模大,泥底辟之上侵底辟活动的能量极强,上侵拱起(底辟挤入)的幅度高,具有非常明显的

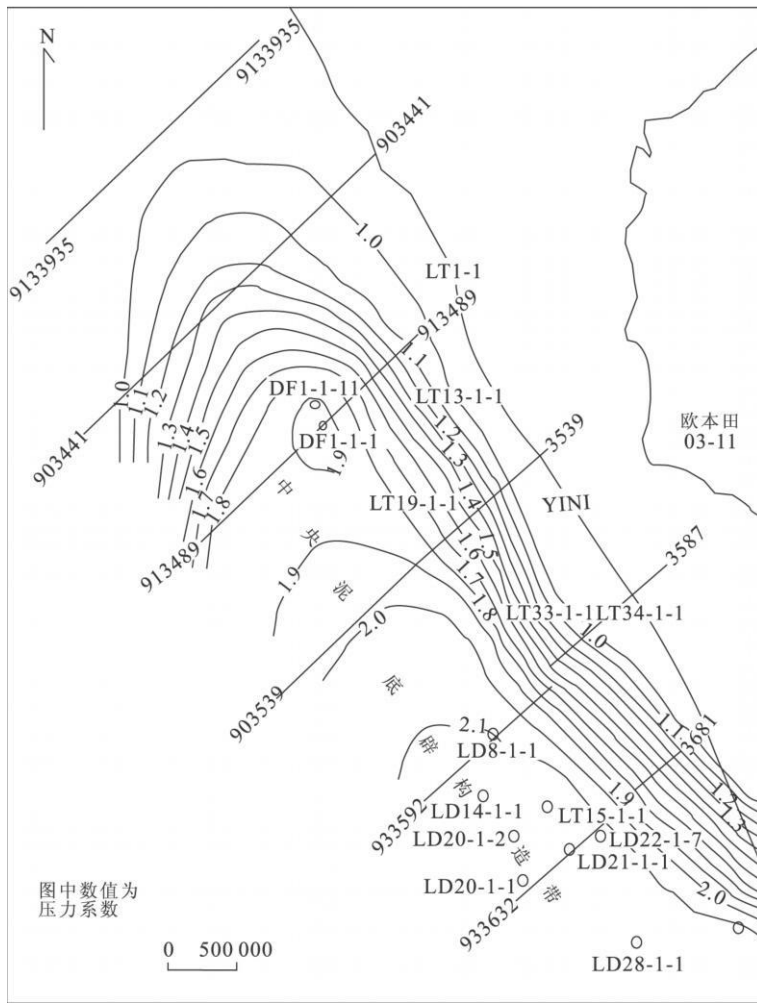


图 3 莺歌海盆地中央泥底辟带异常超压分布特征(据欧本田, 2003^①)

Fig. 3 Distribution characteristics of abnormal overpressure in mud diapir belt of Yinggehai basin

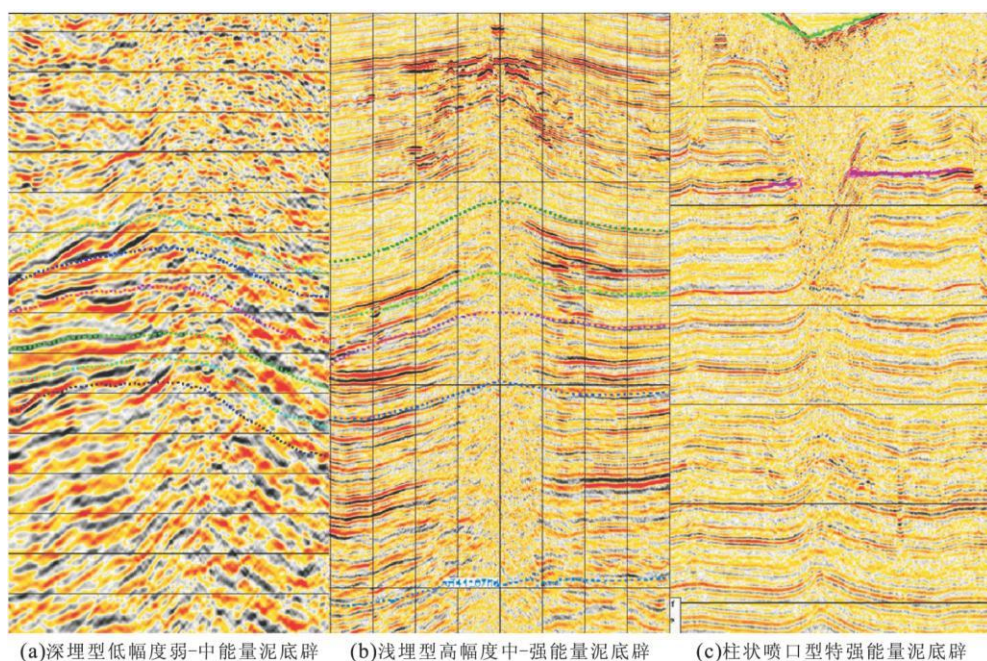
低密低速及高温高压之地质地球物理特征。由于泥底辟活动时上侵挤入(底辟)之垂向上拱作用力极强,底辟拱起幅度高,且底辟活动能量及作用力极强,故已大大超过了上覆地层岩石的破裂极限强度。因此,该类型泥底辟刺穿及喷发活动相当强烈,其泥底辟刺穿活动已达当时的地表,故在泥底辟顶部往往形成了规模颇大的类似火山喷发活动所形成的“柱形漏斗状”下凹喷口,其上则被上覆地层所充填覆盖而现今尚未出露地表。

2.2 东北部泥火山发育特征

南海东北部边缘台西南盆地位于欧亚板块与库拉-太平洋板块、菲律宾板块结合带的仰冲板块之上,其基底属于华南陆块东缘的华夏古陆部分,盆地发育演化具有南海东北部大陆边缘先断后拗的演化特点。中生代早期,由于库拉-太平洋板块向欧亚板

块的西向俯冲作用,位于板块活动边缘的华南陆块上形成了广泛的裂陷构造,产生了一系列 NW-SE 向为主的张性大断裂,陆缘基底被分割成一系列的凸起与凹陷带,这种运动一直持续到中生代晚期。随着断陷作用的进一步加强,整个台西南盆地快速沉降,接受了一套晚中生界滨海-浅海相沉积。渐新世中期开始,伸展性正断层的作用开始减弱,表现为台西南盆地整体下沉拗陷并接受一系列浅海相-半深海相沉积,渐新世末期,该区经历了一次强烈的挤压事件,导致盆地挤压变形,早期正断层局部发生反转,而且还发育了大量的逆冲断层及其相关的褶皱。这次挤压事件造成了上渐新统部分地层剥蚀,形成了中新统与下伏渐新统地层之间的区域性不整合。中新世以来台西南盆地以热沉降拗陷作用为主,快速沉积充填了半深海-深海相的中新统一上新统大套厚层泥页岩(杜德莉, 1991; 丁巍伟等, 2004),进而为该区泥火山形成发育提供了雄厚的物质基础。受

①欧本田, 2003. 莺-琼盆地第三系流体地层压力预测. 中国海洋石油南海西部研究院内部报告.



(a)深埋型低幅度弱-中能量泥底辟 (b)浅埋型高幅度中-强能量泥底辟 (c)柱状喷口型特强能量泥底辟

图 4 莺歌海盆地中央泥底辟构造带 3 种类型泥底辟发育特征之典型地震地质解释剖面

Fig. 4 Seismic profiles with the typical geological interpretation three types of mud diapir development characteristics in central mud diapir belt of Yinggehai basin

盆地构造发育演化及半深海—深海相泥源层展布的控制, 台西南盆地泥火山主要展布于盆地南部凹陷陆坡深水区及台湾陆上台南—高雄地区。其中, 海域泥火山分布可分为 4 个带, 主要为高雄海岸带, 靠近高屏的海底峡谷带, 枋寮海底峡谷带及永安线形构造带等, 每个泥火山带都有几个到十几个海底泥火山不等, 而且多半分布于深大断裂附近 (Chiu *et al.*, 2006), 海域泥火山分布的水深范围为 300 ~ 2000 m 的海域, 且分布于水深大于 1 000 m 的泥火山占有一定的数量。需强调指出的是, 海底泥火山形态与陆上泥火山存在一定的差异, 个体形态总体比陆上泥火山大, 通常海底泥火山的直径为 100 ~ 200 m, 高出海底 15 ~ 50 m。台西南盆地陆上泥火山主要分布于台南及高雄地区, 平面上从北到南、由西至东可划分为 4 ~ 5 个泥火山带, 主要有触口断层泥火山带、古亭坑背斜泥火山带、旗山断层泥火山带、高屏海岸平原泥火山带以及东部海岸山脉西南段泥火山带。

3 泥底辟/泥火山天然气地球化学特征及成因

3.1 泥底辟天然气地球化学特征及成因

根据莺歌海盆地中央泥底辟带 DF1-1、DF29-1、

LD8-1、LD15-1 及 LD21-1 等浅层气藏及含气构造钻探所获天然气组成及碳、氢同位素特征 (图 5), 莺歌海盆地泥底辟伴生天然气, 可划分为富二氧化碳 (以二氧化碳为主) 天然气和富甲烷 (以甲烷为主) 天然气两大类。富二氧化碳天然气中, 二氧化碳依据其碳同位素特征及伴生稀有气体氢同位素特点, 可划分为壳源无机 (岩石化学) 型、壳源有机型、壳幔混合型等三种成因类型 (何家雄等, 2005a)。其中, 壳源无机型二氧化碳, 其二氧化碳碳同位素 ($\delta^3\text{Cco}_2$) 偏重, 均大于 -8×10^{-3} , 一般为 $-0.65 \times 10^{-3} \sim -4.18 \times 10^{-3}$, 氢同位素比值 R/R_a 均小于 1, 为 0.03 ~ 0.31; 壳源有机型二氧化碳, 其二氧化碳碳同位素偏轻, $\delta^3\text{Cco}_2$ 小于 -10×10^{-3} , 一般为 $-14.0 \times 10^{-3} \sim -20.7 \times 10^{-3}$, 氢同位素比值 R/R_a 与壳源无机型二氧化碳一致, 均小于 1, 为 0.08 ~ 0.13; 壳幔混合型二氧化碳, 其二氧化碳碳同位素亦偏重, $\delta^3\text{Cco}_2$ 均大于 -8×10^{-3} , 多为 $-3.33 \times 10^{-3} \sim -4.50 \times 10^{-3}$, 与壳源无机型的二氧化碳碳同位素值范围相当, 伴生稀有气体的氢同位素比值 R/R_a 均大于 1 小于 2, 多为 1.46 ~ 1.56, 介于壳源型与火山幔源型两类二氧化碳气之间。富甲烷烃类天然气, 根据甲烷及同系物碳同位素特征, 亦可将其划分为亚生物气、成熟煤型气、成熟—高熟煤型气等 3 类 (何家雄等, 2008b, 2008c), 其中, 亚生物气, 即生物—低熟过渡

盆地	地区	取样位置	层位	天然气组成(%)				$\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})(\times 10^{-3})$ 、 $^3\text{He}/^4\text{He}$				CO ₂ 成因类型	烃类气成因类型		
				CO ₂	N ₂	CH ₄	C ₂ ⁺	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	R/Ra				
莺歌海盆地	东方区	DF1-1/2,3	Ny2	64.70	5.82	27.97	1.52	-3.80	-31.90	-24.80	0.07	壳源无机型	成熟-高熟煤型气		
		DF1-1-11	Nh1	49.52	5.24	43.11	2.13	-0.65	-30.08	-23.76	0.03				
		DF29-1-1	Ny2	88.91	5.45	5.26	0.38	-2.00	-32.10	-24.10	0.14				
	乐东区	LD15-1-1	Ny1	75.17	4.17	18.70	1.99	-4.15	-34.54	-23.54	0.26	壳源无机型	成熟煤型气		
		LD21-1-1		83.97	6.63	8.71	0.69	-4.18	-36.08		0.31				
	东方区	DF1-1/4,8	Ny1	0.17	27.15	71.27	1.41	-20.70	-35.60	-24.90	0.13	壳源有机型	亚生物气		
				0.35	18.63	79.64	1.38	-18.35	-54.09	-26.86	0.08				
	乐东区	LD22-1-1	Q	0.16	19.60	77.68	1.04	-14.00	-54.30	-24.40	0.08	壳幔混合型	成熟-高熟煤型气		
				71.20	4.21	22.73	2.02	-3.65	-31.32	-27.74	1.56				
				59.74	3.92	35.22	1.12	-3.33	-28.59	-23.60	1.46				
39.29				3.48	55.65	1.58	-4.50	-32.87	-23.50	1.52					
台西南盆地	触口断层温泉/泥火山带	N	CLJB-B-03			72.4		23.3	4.2		-29.39	-26.52	0.16	壳源无机型	成熟-高熟煤型气
			CST-03			78.2		8.8	2.1		-33.11	-24.06			
			SCST-06			76.5		8.6	2.1		-29.98	-23.96			
			KTL-06			0.5		92.3	6.8		-33.12	-24.06			
	古亭坑泥火山带	N _{2-g}	YSK-06			0.4		90.3	0.5		-50.02	-33.82	壳源有机型	亚生物气	
			SKS-N1-01			2.2		98.2	0.4		-46.12	-33.63			
			KSP-12			4.6		90.3	4.7		-51.03	-36.47			
	旗山断层泥火山带	N ₂	TDS-2-06			2.2		94.1	3.3		-57.35	-44.71	0.09~0.26	壳源无机型	成熟-高熟煤型气
			YC-C-06			0.5		78.0	0.4		-38.82	-29.98			
			SYNH-10			0.5		97.7	1.8		-31.76	-25.88			
	东部海岸山脉西南段泥火山带	N ₂	WSD-04			0.4		99.9	5.2		-30.04	-26.47	1.83	壳幔混合型	成熟-高熟煤型气
			LYS-02			8.7		45.5	8.1		-29.99	-24.71			
			CS-1-03			0.2		78.1	0.5		-33.53	-25.88			
			LS-1-03			0.2		77.7	0.4		-31.76	-25.29			
			LGH-03			0.2		97.3	0.2		-45.87	-30.04			

图 5 莺歌海盆地泥底辟与台西南盆地泥火山伴生天然气地球化学特征及成因类型

Fig. 5 Geochemistry and genesis of associated natural gas type in mud diapirism of Yinggehai basin and mud volcano in the Southwest Taiwan basin

带气,其甲烷碳同位素($\delta^3\text{C}_1$)偏轻,一般小于 -54×10^{-3} ;成熟煤型气,其甲烷碳同位素较重, $\delta^3\text{C}_1$ 值为 $-34.54 \times 10^{-3} \sim -36.08 \times 10^{-3}$,乙烷碳同位素($\delta^3\text{C}_2$)均大于 -28×10^{-3} ,一般为 $-23.5 \times 10^{-3} \sim -24.9 \times 10^{-3}$;成熟-高熟煤型气,则甲烷碳同位素偏重, $\delta^3\text{C}_1$ 值一般为 $-28.59 \times 10^{-3} \sim -32.87 \times 10^{-3}$,乙烷碳同位素($\delta^3\text{C}_2$)均大于 -28×10^{-3} ,主要分布在 $-23.5 \times 10^{-3} \sim -27.7 \times 10^{-3}$ 之间。

综上所述,根据天然气组成及其碳、氢同位素特征,结合该区油气地质条件综合分析,以及天然气与源岩的对比研究(何家雄等,1995,2005b,2008a),可以将莺歌海盆地泥底辟伴生天然气成因类型及气源构成特点进行以下综合判识与确定:(1)泥底辟伴生的富甲烷烃类气主要属成熟或成熟-高熟煤型气,亦有少量亚生物气;(2)泥底辟伴生的富CO₂非烃气则多为壳源型无机(岩石化学)型和壳幔混合(过渡)型。无论是富甲烷烃类气还是富CO₂非烃气,两者均来自中新统及上新统底部巨厚海相含钙

砂泥岩与泥底辟热流体强烈上侵活动之物理化学综合作用的结果。

3.2 泥火山天然气地球化学特征及成因

台西南盆地泥火山伴生天然气,目前仅在盆地的陆上部分,即台南-高雄地区油气地质调查中发现。盆地海域部分迄今油气勘探程度尚低,泥火山发育区亦无探井,故尚未获取其天然气样品。以下仅根据陆上泥火山分布区油气地质调查所采集的天然气,进行天然气地球化学特征及其成因与气源的分析探讨。

由图5所示可以看出,泥火山伴生天然气可划分为富二氧化碳非烃气和富甲烷烃类气两大类,但富二氧化碳非烃气分布非常局限,仅在触口断层温泉/泥火山带发现,其他区域均为富甲烷烃类气。富二氧化碳非烃气(CO₂大于70%以上)伴生的少量烃类气的甲烷及乙烷碳同位素均明显偏重, $\delta^3\text{C}_1$ 和 $\delta^3\text{C}_2$ 分别为 $-29.39 \times 10^{-3} \sim -33.11 \times 10^{-3}$ 和 $-23.96 \times 10^{-3} \sim -26.52 \times 10^{-3}$,伴生稀有气体氦同位素比值R/Ra小于1,为0.16,属壳源无机型二

氧化碳.富甲烷烃类天然气分布广泛,在古亭坑背斜泥火山带、旗山断层泥火山带和东部海岸山脉西南段泥火山带等地区均有分布.富甲烷烃类天然气,根据其天然气组成及碳同位素特征和伴生稀有气体氩同位素比值(R/Ra)综合分析判识,可确定与划分为生物气及亚生物气、成熟油型气及成熟—高熟煤型气等3种成因类型.其中,生物气及亚生物气仅在古亭坑背斜泥火山带发现,其甲烷碳同位素($\delta^3 C_1$)为 $-57.35 \times 10^{-3} \sim -46.12 \times 10^{-3}$,属生物气及亚生物气范畴;成熟油型气则仅分布于旗山断层泥火山带YC-C-06采样点和东部海岸山脉西南段泥火山带LGH-03采样点,前者甲烷碳同位素($\delta^3 C_1$)和乙烷碳同位素($\delta^3 C_2$)分别为 -38.82×10^{-3} 和 -29.98×10^{-3} .后者 $\delta^3 C_1$ 和 $\delta^3 C_2$ 分别为 -45.87×10^{-3} 和 -30.04×10^{-3} .其油型气特征均较明显;成熟—高熟煤型气主要分布于旗山断层泥火山带和东部海岸山脉西南段泥火山带,其甲烷碳同位素 $\delta^3 C_1$ 为 $-33.53 \times 10^{-3} \sim -29.99 \times 10^{-3}$,乙烷碳同位素($\delta^3 C_2$)为 $-26.47 \times 10^{-3} \sim -24.71 \times 10^{-3}$,均大于 -28×10^{-3} ,属于典型的成熟—高熟煤型气特征.

总之,根据台西南盆地陆上泥火山伴生天然气组成及同位素特征,该区烃类气成因类型主要为成熟—高熟煤型气,亦有成熟油型气和少量生物气及亚生物气;而分布非常局限的 CO_2 非烃气则多属壳源无机型和壳幔混合型成因类型,且与莺歌海盆地泥底辟带浅层天然气成因类型类似,其富甲烷烃类气和富二氧化碳非烃气,两者均可能主要来自中新统,尤其是上新统的巨厚海相砂泥岩与泥火山上侵活动之物理化学综合作用的结果.

4 泥底辟/泥火山发育演化与油气运聚关系

台西南盆地陆上泥火山喷出的泥浆中常常伴有大量气体且燃烧时火焰达数米高(曾威豪和刘家瑄,2007),在莺歌海盆地泥底辟发育区的浅层海底,油气地质调查也发现了由于天然气运聚所产生的气烟囱及“麻坑”(何家雄等,2000b).这就充分表明,泥底辟及泥火山发育演化与油气分布乃至运聚成藏等均密切相关.深入分析莺歌海盆地泥底辟和台西南盆地泥火山发育演化及其与油气运聚的关系,可以总结概括出如下几点油气地质规律及特点:

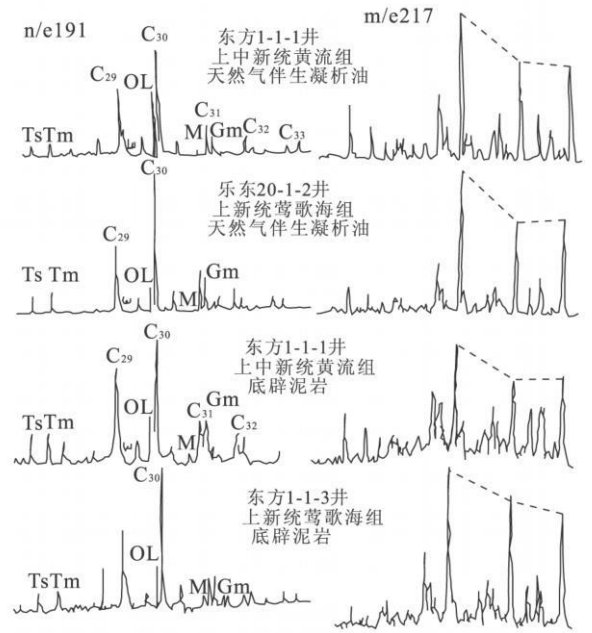


图6 莺歌海盆地泥底辟烃源岩与天然气伴生凝析油馏烃分布对比

Fig. 6 Comparison of mud diapir source rocks with associated condensate and natural gas in Yinggehai basin

(1)形成泥火山/泥底辟的物质基础——巨厚欠压实泥源层本身就是烃源岩,具备生烃条件及良好的生烃潜力.莺歌海盆地中央泥底辟构造带迄今勘探发现的大量气田及含气构造,其气源均主要来自泥底辟发育区下中新统三亚组—上新统莺歌海组底部浅海—半深海相巨厚的底辟泥岩(图6),这已为烃源对比的结果所充分证实.

(2)泥底辟/泥火山孕育的高温超压潜能提供了生烃热动力学条件和油气运聚驱动力.前已论及,莺歌海盆地中央泥底辟带存在异常高温超压地层系统,大地热流及地温梯度明显高于盆地斜坡边缘区.泥底辟发育演化中孕育的高温超压潜能导致烃源岩有机质演化及成熟生烃门槛值(R_0),即达到相同成熟度的深度门槛明显浅于邻区及周边地区(图7),且有机质热演化生成物之油气的成熟度偏高(Hao *et al.*, 1998),主要以成熟—高熟甚至过熟煤型烃类气为主,同时也形成大量壳源无机型二氧化碳.

(3)泥底辟/泥火山上的侵活动产生的底辟运聚通道系统(底辟喷口、微裂隙系统、流体压裂通道体系等)为油气大规模运聚及高效成藏开辟了纵向运移的快速通道(Wang and Huang, 2008),同时亦控制油气运聚分布规律.

(4)泥底辟/泥火山发育演化过程中底辟上拱形

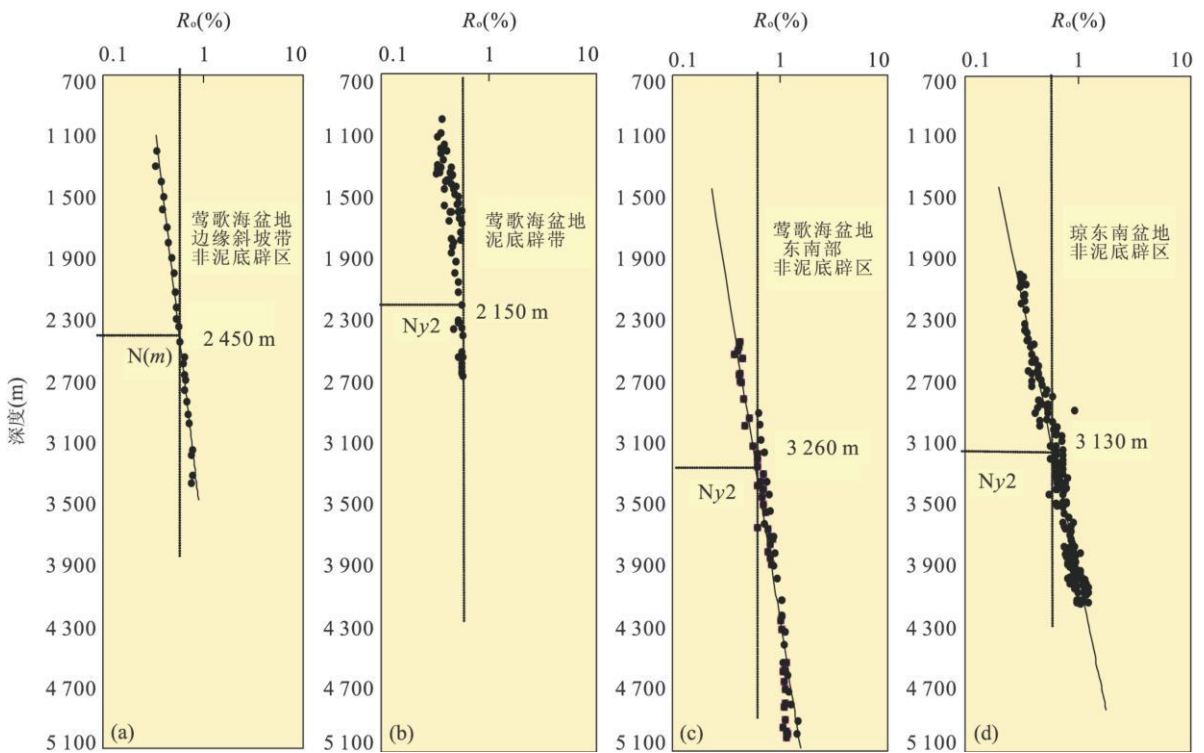


图 7 南海西北部莺歌海盆地泥底辟带与相邻非泥底辟区第三系有机质热演化特征对比

Fig. 7 Thermal evolution characteristics comparison of Tertiary organic matter between mud diapir belt of Yinggehai basin and adjacent non-mud diapir zone

成的不同类型伴生构造为油气运聚成藏提供了富集场所. 泥底辟、泥火山伴生构造多以背斜, 断背斜及断块圈闭为主, 亦有构造—地层岩性复合圈闭. 如莺歌海盆地泥底辟带浅层形成的背斜, 断背斜及断块圈闭和中深层形成的背斜、断背斜等底辟伴生构造即为其典型实例. 由于这些底辟伴生构造均邻近烃源中心及油气运聚通道系统, 故非常有利于减少油气运聚过程中的散失损耗及高效富集成藏.

5 结论与认识

(1)南海西北部莺歌海盆地泥底辟具有低密低速及高温超压的地质地球物理特征, 主要分布于盆地中部沉降最深、沉积最厚的莺歌海坳陷, 且沿北西方向呈 5 行雁形式排列, 根据其地震反射特征可将其划分为深埋型低幅度弱—中能量泥底辟、浅埋型高幅度中—强能量泥底辟和柱状喷口型特强能量泥底辟等 3 种成因类型; 南海东北部台西南盆地泥火山海域及陆上均有分布, 海域泥火山主要分布在南部凹陷陆坡深水区, 可分为高雄海岸带、高屏海底峡谷带、枋寮海底峡谷带以及永安线形构造带等 4 个海底泥火山带. 陆上泥火山则主要分布于台南—高

雄地区, 从北到南、由西至东主要由触口断层泥火山带、古亭坑背斜泥火山带、旗山断层泥火山带、高屏海岸平原泥火山带及东部海岸山脉西南段泥火山带所组成.

(2)南海西北部莺歌海盆地与东北部台西南盆地南部凹陷区(包括陆上部分)中新世及上新世海相坳陷阶段沉降沉积特征基本类似, 两盆地沉积充填的规模巨大的中新统及上新统泥页岩是形成泥底辟/泥火山的物资基础; 而中新世晚期新构造活动产生的张性断裂及地层薄弱带则是泥底辟/泥火山形成的外部地质条件.

(3)泥底辟/泥火山伴生天然气主要为富甲烷的烃类气和富 CO₂ 的非烃气. 其中, 莺歌海盆地泥底辟带烃类天然气主要为成熟—高熟煤型气, CO₂ 非烃气主要属壳源无机型和壳幔混合型成因; 台西南盆地泥火山伴生烃类天然气亦以成熟—高熟煤型气为主, 成熟煤型气及油型气、生物气及亚生物气等均有产出. 台西南盆地泥火山伴生的 CO₂ 非烃气分布非常局限, 成因类型亦属壳源无机型和壳幔混合型. 以上两盆地的气源均来自中新统及上新统巨厚海相泥页岩与泥底辟/泥火山热流体上侵活动之物理化学综合作用.

(4)泥底辟/泥火山发育演化与天然气运聚成藏密切相关,其不仅提供了流体纵向运聚通道,而且所孕育的高温超压潜能亦提供了促使烃源岩成熟生烃的热动力和促进油气运聚的驱动力.深入分析泥底辟/泥火山发育演化特征及其与天然气运聚成藏关系,优选有利油气富集的泥底辟构造带及伴生构造圈闭实施评价与勘探,可以提高油气勘探成功率,开辟这种“泥底辟型”油气藏勘探新领域.

References

- Cao, C. R., Liu Z. H., 2005. Petroliferous basin analysis theory and method. Jilin University Press, Jilin (in Chinese).
- Chiu, J. K., Tseng, W. H., Liu C. S., 2006. Distribution of gassy sediments and mud volcanoes offshore southwestern Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 17(4): 703–722.
- Ding W. W., Wang, Y. M., Chen, H. L., et al., 2004. Deformation characters and its tectonic evolution of the Southwest Taiwan basin. *Journal of Zhejiang University (Sciences Edition)*, 31(2): 216–220 (in Chinese with English abstract).
- Du D. L., 1991. Characteristics of geologic structure and hydrocarbon potential of the Southwest Taiwan basin. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 11(3): 21–33 (in Chinese with English abstract).
- Fan, W. P., Zheng L. Q., Gong J. H., et al., 2007. Forming of mud volcano and relation with hydrocarbon. *Turpan-Hami Oil and Gas*, 12(1): 43–47 (in Chinese with English abstract).
- Gong, Z. S., Li, S. T., 1997. Northern South China Sea continental margin basin analysis and hydrocarbon accumulation. Science Press, Beijing, 1–178 (in Chinese).
- Gong, Z. S., Li S. T., Yang, J. M., et al., 2004. The South China Sea basin, forming the northern continental margin dynamics. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Hao, F., Li, S. T., Dong W. L., et al., 1998. Abnormal organic-matter maturation in the Yinggehai basin, South China Sea: implications for hydrocarbon expulsion and fluid migration from overpressured systems. *Journal of Petroleum Geology*, 21(4): 427–444. doi: 10.1111/j.1747-5457.1998.tb00794.x
- Hao, F., Li S. T., Gong, Z. S., et al., 2001. Yingge Sea basin diapiric development of mechanisms and episodic fluid injection. *Science in China (Ser. D)*, 31(6): 471–476 (in Chinese).
- He, J. X., Chen, H. L., Chen, G., et al., 1995. Gas reservoir and exploration targets of mud diapir belt, Yinggehai basin. *China's Offshore Oil and Gas*, 9(3): 157–163 (in Chinese with English abstract).
- He, J. X., Chen, S. H., Yao, Y. J., et al., 2008b. Main genetic types of oil & gas and characteristics of their accumulation and distribution in North Marginal basins, South China Sea. *Natural Gas Geoscience*, 19(1): 34–40 (in Chinese with English abstract).
- He, J. X., Chen, W. H., Zhong, Q. X., et al., 1994. Yingge Sea basin, mud diapir characteristics and gas exploration orientation. *Petroleum Exploration and Development*, 21(6): 6–9 (in Chinese with English abstract).
- He, J. X., Huang, H. Y., Chen, L. C., 1994a. Origin and distribution of mud diapirs in the Yinggehai basin and their relation to the migration and accumulation of natural gas. *Acta Sedimentologica Sinica*, 12(3): 120–129 (in Chinese with English abstract).
- He, J. X., Li, M. X., Chen, W. H., et al., 2000a. Geotemperature field and up-welling action of hot flow body and its relationship with natural gas migration and accumulation in Yinggehai basin. *Natural Gas Geoscience*, 11(6): 29–43 (in Chinese with English abstract).
- He, J. X., Li, M. X., Huang, B. J., et al., 2000b. The analysis of the oil and gas exploration prospect and the distribution of outflow of oil and gas in the northern slope of the Yinggehai basin. *Natural Gas Geoscience*, 11(2): 1–9 (in Chinese with English abstract).
- He, J. X., Liu, H. L., Yao, Y. J., et al., 2008d. Northern South China Sea marginal basin geology and resources of oil and gas prospects. Petroleum Industry Press, Beijing, 1–178 (in Chinese).
- He, J. X., Xia, B., Liu, B. M., et al., 2004. Analysis on the upintrusion of thermal fluid and the migration and accumulation rules of natural gas and CO₂ in the mud diapirs of the yinggehai basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 26(4): 349–358 (in Chinese with English abstract).
- He, J. X., Xia, B., Liu, B. M., et al., 2005b. Origin, migration and accumulation of CO₂ in East China and offshore shelf basins. *Petroleum Exploration and Development*, 32(4): 42–49 (in Chinese with English abstract).
- He, J. X., Xia, B., Wang, Z. X., et al., 2006b. Petroleum geologic characteristics and exploration base of Southwest Taiwan basin in eastern area of continental shelf in northern of the South China Sea. *Natural Gas Geoscience*, 17(3): 344–350 (in Chinese with English abstract).
- He, J. X., Xia, B., Zhang, S. L., et al., 2005a. Genetic types

- of carbon dioxide in the terrestrial faulted basins and offshore continental shelf basins in East China. *Natural Gas Industry*, 25(8): 21—23 (in Chinese with English abstract).
- He, J. X., Xia, B., Zhang, S. L., et al., 2006a. Origin and distribution of mud diapirs in the Yinggehai basin and their relation to the migration and accumulation of natural gas. *Geology in China*, 33(6): 1336—1344 (in Chinese with English abstract).
- He, J. X., Xu, R. S., Liu, Q. W., et al., 2008a. Development and evolution of mud diapir and migration and accumulation of natural gas and CO₂ in Yinggehai basin. *Quaternary Geology & Marine Geology*, 28(1): 91—98 (in Chinese with English abstract).
- He, J. X., Yao, Y. J., Liu, H. L., et al., 2008c. Genetic types of natural gas and characteristic of the gas source composition in marginal basins of the northern South China Sea. *Chinese Geology*, 35(5): 997—1006 (in Chinese with English abstract).
- He, J. X., Zan, L. S., Chen, L. C., et al., 1990. Characteristics of mud mount evolution and oil potential in Yinggehai basin. *Oil & Gas Geology*, 11(4): 436—445 (in Chinese with English abstract).
- He, J. X., Zan, L. S., Huang, H. Y., et al., 1989. Yinggehai basin, due to their distribution patterns in soil Qiu Cheng. *The South China Sea Oil*, 6(4): 24—30 (in Chinese with English abstract).
- He, J. X., Zhu, Y. H., Chen, S. H., et al., 2009. Genetic types and mineralization characteristics of gas hydrate and resources potential of northern South China Sea. *Natural Gas Geoscience*, 20(2): 237—243 (in Chinese with English abstract).
- Sha, Z. B., Zhang, G. X., Li, J. Q., et al., 2005. Mud volcano—one live evidence of the existence of gas hydrates. *Geological South China Sea*, 17(1): 48—56 (in Chinese with English abstract).
- Sun, J. Z., Li, L. B., Yang, S. G., et al., 1995. Evolution of transform-extension Yinggehai basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 20(3): 243—249 (in Chinese with English abstract).
- Sun, Z., Zhong, Z. H., Zhou, D., 2007. The analysis and analogue modeling of the tectonic evolution and strong subsidence in the Yinggehai basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(3): 347—356 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. F., He, J. X., Xie, X. N., et al., 2004. Heat flow action and its control on natural gas migration and accumulation in mud-fluid diapir areas in Yinggehai basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(2): 203—210 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. F., Huang, B. J., 2008. Dongfang 1-1 gas field in the mud diapir belt of the Yinggehai basin, South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 25(4/5): 445—455. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2008.01.004
- Xie, X. N., Li, S. T., Dong, W. L., et al., 1999. Trace marker of hot fluid flow and their geological implications—a case study of Yinggehai basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 24(2): 183—188 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, W. H., Liu, J. X., 2007. The mud volcano off southwestern Taiwan. *Scientific Development*, 4(412): 18—25 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q. M., Liu, F. N., Yang, J. H., 1996. Overpressure system and hydrocarbon accumulation in the Yinggehai basin. *Chinese of offshore Oil and Gas (Geology)*, 10(2): 65—75 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 曹成润, 刘志宏, 2005. 含油气盆地构造分析原理及方法. 吉林: 吉林大学出版社.
- 丁魏伟, 王渝明, 陈汉林, 等, 2004. 台西南盆地构造特征与演化. *浙江大学学报(理学版)*, 31(2): 216—220.
- 杜德莉, 1991. 台西南盆地地质构造特征及油气远景. *海洋地质与第四纪地质*, 11(3): 21—33.
- 范卫平, 郑雷清, 龚建华, 等, 2007. 泥火山的形成及其与油气关系. *吐哈油气*, 12(1): 43—47.
- 龚再升, 李思田, 等, 1997. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集. 北京: 科学出版社, 1—178.
- 龚再升, 李思田, 杨甲明, 等, 2004. 南海北部大陆边缘盆地成藏动力学研究. 北京: 科学出版社.
- 郝芳, 李思田, 龚再升, 等, 2001. 莺歌海盆地底辟发育机理与流体幕式充注. *中国科学(D 辑)*, 31(6): 471—476.
- 何家雄, 陈红莲, 陈刚, 等, 1994b. 莺歌海盆地泥底辟带天然气成藏条件及勘探方向. *中国海上油气(地质)*, 9(3): 157—163.
- 何家雄, 陈胜红, 姚永坚, 等, 2008b. 南海北部边缘盆地油气主要成因类型及运聚分布特征. *天然气地球科学*, 19(1): 34—40.
- 何家雄, 陈伟煌, 钟启祥, 等, 1994b. 莺歌海盆地泥底辟特征及天然气勘探方向. *石油勘探与开发*, 21(6): 6—9.
- 何家雄, 黄火尧, 陈龙操, 1994a. 莺歌海盆地泥底辟发育演化与油气运聚机制. *沉积学报*, 12(3): 120—129.
- 何家雄, 李明兴, 陈伟煌, 等, 2000a. 莺歌海盆地热流体上侵活动与天然气运聚富集关系探讨. *天然气地球科学*, 11(6): 29—43.

- 何家雄, 李明兴, 黄保家, 等, 2000b. 莺歌海盆地北部斜坡带油气苗分布与油气勘探前景剖析. 天然气地球科学, 11(2): 1—9.
- 何家雄, 刘海龄, 姚永坚, 等, 2008d. 南海北部边缘盆地油气地质及资源前景. 北京: 石油工业出版社, 1—178.
- 何家雄, 夏斌, 刘宝明, 等, 2004. 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. 石油实验地质, 26(4): 349—358.
- 何家雄, 夏斌, 刘宝明, 等, 2005b. 中国东部及近海陆架盆地 CO₂ 成因及运聚规律与控制因素研究. 石油勘探与开发, 32(4): 42—49.
- 何家雄, 夏斌, 王志欣, 等, 2006b. 南海北部大陆架东区西南盆地石油地质特征与勘探前景分析. 天然气地球科学, 17(3): 344—350.
- 何家雄, 夏斌, 张树林, 等, 2005a. 东部陆相断陷盆地及近海陆架盆地 CO₂ 成因类型. 天然气工业, 25(8): 21—23.
- 何家雄, 夏斌, 张树林, 等, 2006a. 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. 中国地质, 33(6): 1336—1344.
- 何家雄, 徐瑞松, 刘全稳, 等, 2008a. 莺歌海盆地泥底辟发育演化与天然气及 CO₂ 运聚成藏规律研究. 第四纪地质与海洋地质, 28(1): 91—98.
- 何家雄, 姚永坚, 刘海龄, 等, 2008c. 南海北部边缘盆地天然气成因类型及气源构成特点. 中国地质, 35(5): 997—1006.
- 何家雄, 曾立声, 陈龙操, 等, 1990. 莺歌海盆地泥丘发育特征与油气远景. 石油与天然气地质, 11(4): 436—445.
- 何家雄, 曾立声, 黄火尧, 等, 1989. 莺歌海盆地泥丘成因及其分布特征. 南海石油, 6(4): 24—30.
- 何家雄, 祝有海, 陈胜红, 等, 2009. 天然气水合物成因类型及成矿特征与南海北部资源前景. 天然气地球科学, 20(2): 237—243.
- 解习农, 李思田, 董伟良, 等, 1999. 热流体活动示踪标志及其地质意义——以莺歌海盆地为例. 地球科学——中国地质大学学报, 24(2): 183—188.
- 沙志彬, 张光学, 梁金强, 等, 2005. 泥火山——天然气水合物存在的活证据. 南海地质研究, 17(1): 48—56.
- 孙家振, 李兰斌, 杨士恭, 等, 1995. 转换—伸展盆地—莺歌海的演化. 地球科学——中国地质大学学报, 20(3): 243—249.
- 孙珍, 钟志洪, 周蒂, 2007. 莺歌海盆地构造演化与强烈沉降机制的分析和模拟. 地球科学——中国地质大学学报, 32(3): 347—356.
- 王振峰, 何家雄, 解习农, 2004. 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. 地球科学——中国地质大学学报, 29(2): 203—210.
- 曾威豪, 刘家瑄, 2007. 台湾西南海域的泥火山. 科学发展, 4(412): 18—25.
- 张启明, 刘福宁, 杨计海, 1996. 莺歌海盆地超压体系与油气聚集. 中国海上油气(地质), 10(2): 65—75.