

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2016.02.015

莺歌海盆地古新近系烃源条件与有利油气勘探方向

李晓唐^{1,2}, 何家雄¹, 张伟^{1,2}

(1. 中国科学院 广州地球化学研究所边缘海地质重点实验室, 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:根据莺歌海盆地地质背景与古新近系构造沉积演化特征,结合钻井资料和前人烃源岩研究及生烃模拟实验结果,深入研究了不同层位烃源岩尤其是古近系烃源岩地球化学特征,重点剖析了烃源条件及高温高压环境中有机质热演化成烃特点。研究表明,中新统海相陆源烃源岩分布较广泛,其有机质干酪根类型属Ⅱ₂-Ⅲ型,处在成熟-高熟大量生气阶段,为盆地浅层及中深层天然气气藏主要烃源岩;始新统及渐新统湖相及煤系亦是盆地重要烃源岩,主要分布在盆地西北部及与琼东南盆地毗邻的东南部,其生源母质类型属偏腐殖型,且处于成熟-高熟/裂解气阶段,具有较大生烃潜力。基于盆地构造沉积演化特点与烃源条件分析,结合近年来天然气勘探成果与有利油气富集区带综合评价,预测盆地临高反转构造带及临高海口-昌化区是勘探古近系烃源供给之油气有利富集区;莺东斜坡以及靠近琼东南盆地1号断裂带附近区域亦是勘探古近系烃源供给之油气的重要勘探领域。同时中深层深部高温超压九大构造圈闭系列则是勘探发现大中型天然气田群建成特大气区的主战场。

关键词:古近系烃源岩;中新统烃源岩;烃源条件分析;有利油气勘探方向;莺歌海盆地

中图分类号:P736.22 文献标识码:A 文章编号:0256-1492(2016)02-0129-14

随着天然气勘探及研究的不断深入,莺歌海盆地陆续在中央泥底辟带东方区及乐东区先后发现一系列的中浅层气田群及含油气构造,尤其是近年来在东方区中深层高温高压天然气领域亦取得了里程碑式的重大突破和发现^[1-2],实现了几代勘探地质专家的梦想,开辟和拓展了该区中深层高温超压天然气勘探新领域。根据现代油气地质及含油气系统理论,油气藏形成本质上就是一个“从烃源到圈闭成藏”过程及其主要成藏地质要素的时空耦合配置的结果。因此,盆地中烃源岩研究及烃源条件分析至关重要,其不仅是油气运聚成藏研究的核心和重点,且对于油气运聚富集规律的分析预测和有利油气勘探目标区的优选与确定等,均具有非常重要的理论意义和实践指导作用。必须强调指出,莺歌海盆地通过半个多世纪的油气勘探,迄今为止虽然已勘探发现了大量浅层气藏及气田群,且中深层高温超压领域近年来亦获得了重大突破,勘探发现了大中型高温超压气田,但该区油气运聚成藏条件尤其是烃源岩评价及其生烃条件,至今尚未完全搞清楚,且由

于缺乏深入系统的分析研究,许多问题仍然悬而未决,尚未达成共识。诚然,前人在烃源条件分析上已做了很多研究工作^[3-4],但目前均只是局限于中新统海相烃源岩的分析研究,对于深部可能存在的古近系烃源岩地质地球化学特征及生烃潜力等研究,基本上尚未涉及。由于莺歌海盆地新近系及第四系沉积巨厚^[5],其下伏的古近系地层钻井揭露甚少,目前仅在盆地西北部临高凸起及盆地东北部莺东斜坡带有少量探井钻遇,而盆地中央坳陷主体及东南部由于上覆新近系及第四系沉积逾万米,且存在高温高压,目前的地震探测深度及钻井根本无法揭示^[6],故对盆地深部古近系烃源岩研究难以进行。但必须肯定的是,根据盆地西北部临高凸起区及盆地东北部和西南部边缘斜坡区地震解释及少量探井揭示(越南和中海油),该区存在古近系是不容置疑的,但其地球化学特征及生烃潜力如何、能否提供烃源迄今尚未有研究者做过深入研究。

本文在前人研究基础之上,结合区域地质背景及构造沉积演化特征,根据地球物理资料及钻井揭示和盆地生烃模拟实验结果,不仅对该区中新统烃源岩特征、高温高压环境中有机质演化机制及油气源等开展了综合分析研究,而且重点对深部古近系烃源岩有机地球化学特征及生烃潜力进行了分析探讨,进而评价预测了有利油气勘探区带,以期为促进和推动该区中深层油气勘探尤其是古近系油气藏勘探评价等提供参考借鉴。

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

作者简介:李晓唐(1989—),女,硕士生,主要从事海洋地质、有机地球化学与油气勘探综合研究,E-mail:lixiaotang@gig.ac.cn

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

收稿日期:2015-11-17;改回日期:2016-01-21. 文凤英编辑

1 区域地质背景

莺歌海盆地位于海南岛西南陆缘与越南中南部陆架之间的莺歌海海域,盆地整体为菱形条带状沿NNW向展布,东南以1号深大断裂与琼东南盆地相接,东北与北部湾盆地毗邻,是南海北部大陆边缘西区非常独特的新生代走滑伸展型盆地。莺歌海盆地海域面积达 $12.7 \times 10^4 \text{ km}^2$,新生代最大沉积厚度超过17 000 m^[5]。盆地可划分为3个一级构造单元,即中部的中央坳陷带、盆地东北及西南的莺东斜坡带和莺西斜坡带(图1)。其中,中央坳陷带由莺歌海凹陷、临高凸起及越南境内的河内凹陷所组成。莺歌海盆地新生代地层系统自下而上由古近系始新统、渐新统崖城组及陵水组,新近系中新统三亚组、梅山组和黄流组,上新统莺歌海组和第四系乐东组构成。其中始新统及渐新统崖城组在莺歌海盆地的我国辖区目前尚未钻遇,但在莺歌海盆地的越南辖区探井已钻遇该古近系地层,且在新近系沉积较薄的盆地西北部隆起区及东北部斜坡区地震剖面上(图2)均可识别出古近系地层。

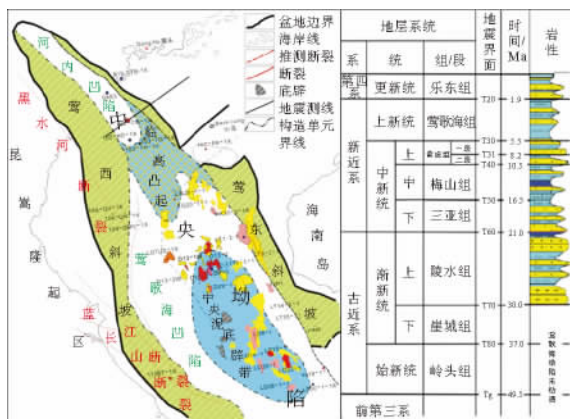


图1 莺歌海盆地展布特征及构造单元划分与新生代地层系统构成
Fig. 1 Basic tectonic units distribution and Cenozoic strata system of Yinggehai Basin

走滑伸展型的莺歌海盆地也经历了早期古近纪断陷沉积充填过程,但其沉积充填规模较小,主要沉积了陆相及海陆过渡相地层;新近纪及第四纪晚期热沉降海相拗陷阶段,由于沉降沉积速度快,沉积充填了巨厚的新近系及第四系,沉积规模巨大,构成了盆地的主体^[7-8]。盆地快速沉降沉积的结果导致巨厚海相泥页岩欠压实非常普遍,造成了压实与流体排出不均衡,产生高温超压及盆地中部泥页岩塑性

变形而最终形成强烈的泥底辟活动,导致大量流体包括油气的释放和渗漏,如盆地边缘莺东斜坡带异常发育的油气苗很可能即是其产物之一^[9]。总之,中新世晚期快速沉降沉积背景下,在莺歌海盆地沉降沉积中心即中央凹陷区形成的规模巨大中央泥底辟隆起构造带(面积达2万平方千米)及其沿北西盆地走向呈南北向雁行式排列异常发育的泥底辟强烈上侵活动,对该区中新统海相烃源岩成熟及生排烃作用与天然气运聚成藏过程等均具有显著控制和影响作用。

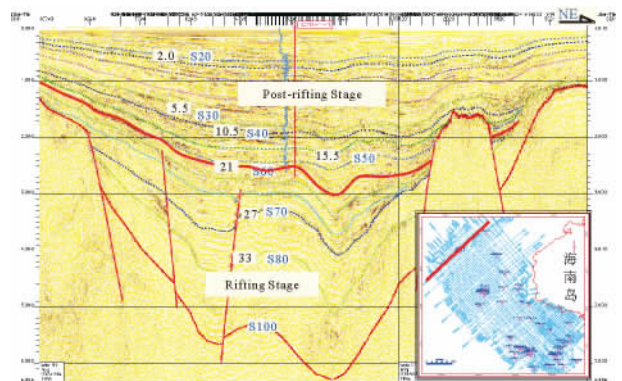


图2 莺歌海盆地临高区地震反震剖面
Fig. 2 The seismic profiles of Lingao area in Yinggehai Basin

2 古新近系烃源条件分析

含油气系统及油气成藏动力学理论表明,油气运聚成藏本质上就是一个从“源到汇”直至最终聚集的过程。而烃源(生烃)条件即烃源岩质量及规模与展布,则是油气运聚成藏中的核心和关键要素,不然就会成为“无源之水无本之木”,因此,含油气盆地中烃源条件分析对于油气地质研究及油气勘探评价等至关重要^[10]。根据莺歌海盆地油气勘探及地震探测和探井揭示,结合区域地质条件及钻遇岩石样品有机地球化学分析结果,古新近系烃源岩主要为新近系中新统三亚组、梅山组及黄流组海相泥页岩;古近系渐新统崖城组-陵水组深棕色碳质泥岩及煤层等含煤岩系以及始新统中湖相泥岩(探井资料较少,在盆地西北部临高凸起及莺东斜坡带和莺西斜坡带探井及地震探测均揭示)。以下重点对莺歌海盆地第三系烃源岩特征及生烃潜力进行深入剖析与探讨。

2.1 烃源岩有机质丰度

有机地球化学评价烃源岩主要包括有机质丰

度、类型、热演化程度等几个方面。国内外常用评价有机质丰度的指标主要有:总有机碳含量(TOC,%)、生烃潜力($S_1 + S_2$, mg/g)、氯仿沥青“A”(%)含量及总烃浓度(HC, 10^{-6})等。其中总有机碳含量是沉积速率、原始有机质丰度、介质的物理化学条件以及成岩时有机质热演化程度等一系列因素的综合反映,是评价烃源岩质量的重要参数。

2.1.1 始新统烃源岩

目前,始新统地层在莺歌海盆地中国勘探区内钻井尚未揭示,但地球物理、古生物及钻井资料等均显示莺歌海盆地存在始新统湖相地层,且可能为盆地重要烃源岩。首先,根据莺歌海盆地西北部地震剖面揭示(图 2),在新近系地层之下(S60)存在非常厚的陵水组(S60—S70)及崖城组煤系地层(S70—S80)和始新统湖相地层(S80—S100),其地震反射特征与北部湾盆地及琼东南盆地渐新统和始新统地层基本类似。其次,在东北部莺东斜坡 LT9-1-1 井钻遇到岭头组地层,该套地层具有始新统地层的古生物及岩电特征,其地质年龄为 36.0 Ma,推测其与北部湾盆地始新统流沙港组湖相沉积地层相当,也是一套以断陷湖盆充填沉积为主的陆相地层^[11]。再次,位于越南境内靠近莺西斜坡的莺西断裂钻探的 104-QMV-1X 井证实,该区亦存在始新统地层,从沉积相分析表明该井钻遇辫状河三角洲,地层中含有大量煤系地层,其中泥岩和煤的有机质丰度如表 1。泥岩有机碳平均含量是 0.62%, $S_1 + S_2$ 值分布在 1.09~3.11 mg/g 范围内,均值为 2.13 mg/g,总烃的分布范围为 $(127 \sim 457) \times 10^{-6}$,平均

值为 259×10^{-6} ,按照我国陆相含油气盆地的烃源岩评价标准^[12],其始新统的泥岩有机质丰度整体上达到中等烃源岩标准。煤系地层有机碳的含量分布范围为 47.4%~83.4%,平均含量为 70.7%, $S_1 + S_2$ 值分布于 227~284.7 mg/g 范围内,其平均值为 260.7 mg/g。按陈建平^[13]提出的煤生烃评价标准,整体上也达到中等烃源岩标准。诚然,在区域上,莺歌海盆地边缘斜坡钻遇到的始新统泥岩有机质丰度要差于北部湾盆地始新统流沙港组及珠江口盆地文昌组泥岩有机质丰度,但其始新统煤系地层有机质丰度与珠江口盆地始新统一下渐新统恩平组煤系相当,故亦可评价为较好烃源岩^[14]。总之,莺歌海盆地存在始新统泥岩及煤层烃源岩,且有机质丰度属于中等烃源岩,可能成熟度偏高,应该具有一定的生烃潜力。

2.1.2 渐新统海陆过渡相烃源岩

渐新统崖城组和陵水组烃源岩主要分布于莺歌海盆地西北部凸起区和西南部及东北部边缘斜坡区、东南部 1 号断裂下降盘附近,为一套半封闭浅海及滨海沼泽相沉积。越南境内靠近莺西断裂 104-QMV-1X 井钻遇到渐新统煤系地层,沉积相研究分析判识,该井钻遇崖城组为三角洲平原相沉积,属于海陆过渡相沉积的煤系地层。有机地球化学分析结果表明崖城组煤系地层有机碳平均值为 77.3%, $S_1 + S_2$ 值为 352 mg/g,总烃含量值 352×10^{-6} ,具有很好的生气潜力(表 1)。渐新统在临近莺歌海盆地东南部的琼东南盆地西区已有较多探井揭示,其中钻遇崖城组地层最厚可达 910 m,为滨浅海及海岸

表 1 104-QMV-1X 井始新统一渐新统烃源岩有机质丰度及干酪根类型参数统计

Table 1 Parameters of organic matter abundance and type from Eocene-Oligocene source rocks in well 104-QMV-1X

层位	岩性	有机碳/%	总烃/ 10^{-6}	生烃潜量/(mg/g)	干酪根类型
陵水组	泥岩	0.53~4.32	37~258	0.81~3.07	II ₂ -III
		1.5	171	2.2	
	煤系泥岩/煤	66.97~90.07	274~312	233.12~271.43	II ₂
崖城组	泥岩	78.79	293	252.28	III
		0.75	128	1.2	
	煤系泥岩/煤	76.3~78.2	352	284.75	II ₂
始新统	泥岩	77.3	127~457	1.09~3.11	II ₂
		0.42~0.9	259	2.13	
	煤系泥岩/煤	47.4~83.4	287~352	227~284.6	II ₂
		70.7	312	260.7	

平原沼泽相沉积,属于海陆过渡相沉积的煤系地层^[15]。如临近盆地东南部崖城 13-1 构造,钻遇 Ya13-1-2 井崖城组地层厚度为 237.5 m,含煤层 11 层,其中暗色泥岩总厚度为 69.0 m,其泥岩有机碳平均值为 0.98%,达到中等偏好的烃源岩标准;且其煤系有机质含量为 8.55%~95.9%,具有很好的生烃潜力^[16]。

104-QMV-1X 井钻遇到陵水组地层为三角洲平原相。有机地球化学分析表明陵水组泥岩有机质丰度高,有机碳值为 0.53%~4.32%,平均值为 1.5%,达到好烃源岩标准; S_1+S_2 值分布在 0.81~3.07 mg/g 范围内,达到了中等烃源岩的生烃潜力。同样,陵水组地层也发育较多的煤系地层,其总烃的分布范围为 $(274\sim312)\times 10^{-6}$, S_1+S_2 值为 233.12~271.43 mg/g,平均值为 252.28 mg/g,均具有中等烃源岩的生气潜力。临高区钻遇的陵水组地层主要发育滨浅海相沉积,故其泥岩有机质丰度明显偏低,LG20-1-1 井泥岩有机碳含量为 0.36%~1.03%,平均值为 0.51%,相邻的 LG20-1-2 井有机碳含量则更低,平均值仅为 0.33%。古近纪中晚期,临高构造及向南的凹陷区为浅海及海陆过渡相环境,陵水-崖城组地层沉积厚度可达 2 000 m,推测在临高构造带存在高有机质丰度的烃源岩^[17]。在盆地东南部靠近琼南盆地崖城凸起即 1 号断裂下降盘的 Ya19-2-1 井也钻遇渐新统煤系烃源岩,有机碳含量为 0.18%~7.83%,大多数值分布在 1%以上, S_1+S_2 分布在 0.8~7.3 mg/g 之间,总体达到中等偏好的烃源岩标准。在越南境内莺西斜坡钻探的 112-BT-1X 井,该井 4 144 m 钻遇到渐新统砂泥岩及泥盆纪碳酸盐岩,均有油气显示,并且有机地球化

学分析表明其渐新统地层具有非常高的有机质丰度,有机碳含量为 3.46%, S_1+S_2 值为 13.56 mg/g,有机质丰度达到了好—很好的烃源岩标准^[18]。此外,盆地东北部靠近莺东斜坡古近纪地堑及半地堑中亦存在湖相泥岩及煤系地层^[19-20],且在盆地东北边缘区 Dong Ho 露头和 Bach Long Vi 岛发现深棕色碳质泥岩夹层和煤层,亦证实为古近纪以来缺氧环境下的淡水湖相沼泽相沉积^[20]。Dong Ho 露头及 Bach Long Vi 岛未熟暗色泥岩有机碳含量为 4%~20%,其 S_1+S_2 值一般均超过 450 mg/g,最高值可达到 700 mg/g^[21-22]。综上所述,渐新统海陆过渡相泥岩及浅海相泥页岩有机质丰度具有非均质性,但整体达到中等—好烃源岩标准,其煤系地层达到中等偏好烃源岩标准,且生气潜力大。

2.1.3 中新统一上新统底部海相烃源岩

盆地裂后热沉降拗陷期沉积充填巨厚的中新统海相泥页岩,属于三角洲-浅海相-半深海相沉积,其沉积厚度可达 6 000 m,而泥页岩约占其 70%^[5],其中所含有有机质是油气形成的物质基础。目前探井揭示的莺歌海盆地不同区域中新统一上新统底部海相烃源岩有机质丰度不尽相同,普遍偏低(表 2)。莺歌海凹陷中央泥底辟带 DF1-1-11 井钻遇的中新统一上新统底部海相烃源岩有机质丰度较低,其上新统莺歌海组有机碳含量为 0.23%~0.4%,氯仿沥青“A”含量为 0.013 8%~0.077 7%,均值为 0.040 7%,总烃的分布范围为 $(54\sim490)\times 10^{-6}$,平均值为 278×10^{-6} ;黄流组有机碳含量为 0.33%~0.45%,氯仿沥青“A”含量为 0.016 1%~0.023 6%,总烃的分布范围为 $(69\sim241)\times 10^{-6}$,均为差—中等烃源岩。盆地西北部临高区 LG20-1-1 井钻遇

表 2 莺歌海盆地上新统一中新统烃源岩有机质丰度及综合评价

Table 2 The abundance and evaluation of Pliocene-Miocene source rocks in Yinggehai Basin

层位	岩性	沉积相	有机碳/%	氯仿沥青“A”/%	总烃 / 10^{-6}	生烃潜力 (mg/g)	干酪根 类型	生烃 潜力
莺歌海组	泥岩	浅海-半 深海相	0.23~0.43	0.005 9~0.007 77	43~490	0.13~0.26	Ⅲ	差
			0.39(643)	0.010 5(173)	79(45)	0.24(593)		
黄流组	泥岩	滨浅海- 浅海相	0.33~3.03	0.015 1~0.033 8	112~337	0.19~0.63	Ⅱ ₂ -Ⅲ	较好
			0.57(72)	0.022(24)	263(12)	0.47(67)		
梅山组	泥、灰岩	滨浅海- 浅海相	0.38~4.51	0.010 3~0.056 1	62~353	0.29~0.45	Ⅲ	较好
			0.73(70)	0.018 7(29)	181(15)	0.36(66)		
三亚组	泥岩	滨浅海- 浅海相	0.39~0.84	0.022 2~0.027 2	226~319	0.30~0.65	Ⅱ ₂ -Ⅲ	较好
			0.5(32)	0.025 5(18)	243(11)	0.38(30)		

到中中新统梅山组灰色—深灰色泥岩,有机碳含量为 0.29%~0.72%,氯仿沥青“A”为 0.003%~0.0192%,S1+S2 值为 0.06~3.19 mg/g,均值小于 0.67 mg/g;下中新统三亚组泥岩有机质丰度也不高,有机碳含量为 0.49%,氯仿沥青“A”为 0.0272%。与其相邻的 LG20-1-2 中新统有机碳含量平均为 0.2%~0.34%,S1+S2 值分为 0.15~0.27 mg/g,按烃源岩标准评价亦为差烃源岩,充分表明盆地中新统有机质丰度不高。有机质丰度偏低,可能是含钙所致。李可为等的研究^[23],亦证实了中新统海相沉积地层中普遍含碳酸盐岩,造成了其有机质丰度低,但烃源岩生烃潜力并不差。李可为的分析实验表明,莺歌海盆地中新统海相烃源岩虽然有机碳含量不高,但具有很高的烃转化率,甚至优于北部湾盆地始新统流沙港组中深湖相烃源岩,说明中新统海相烃源岩生烃潜力较大。诚然,中新统海相烃源岩有机质丰度在局部区域亦存在较高值。如盆地西南部 104-QMV-1X 井,钻遇梅山组泥岩有机质丰度较高,其有机碳含量为 0.73%~1.74%,平均值为 1.12%,S1+S2 值为 0.84~3.43 mg/g,均值为 2.36 mg/g,有机质丰度评价达到中—好烃源岩标准。再如盆地莺歌海凹陷东南部 LD30-1-1A 井亦揭示了高有机质丰度的上中中新统梅山组及上中新统黄流组浅海相泥页岩,其厚度分别可达 433.5 和 278.2 m^[24]。其中,梅山组烃源岩有机碳含量为 0.44%~3.17%,平均值为 1.45%;黄流组烃源岩有机碳含量为 0.39%~2.6%,平均值为 1.06%,均达到好到较好烃源岩标准。同时,位于 LD30-1-1A 西北部中央泥底辟带上的 LD22-1-7 井上中新统黄流组及中中新统梅山组地层同样钻遇了高有机质丰度段(图 3),其中黄流组有机质含量为 0.36%~3.03%,梅山组有机碳含量为 0.49%~4.51%,平均值为 1.35%,且梅山组烃源岩厚度可达 442.5 m^[25]。综上所述,位于盆地边缘区域中新统浅海相烃源岩有机碳含量普遍偏低,而盆地中央拗陷区某些局部区域,尚存在高有机质丰度的中中新统梅山组及上中新统黄流组浅海相烃源岩,且烃转化率高,达到了好烃源岩标准,生烃潜力大。

2.2 烃源岩生源母质类型

烃源岩有机质生源母质类型是衡量其质量即有机质生烃能力的重要参数,亦决定了生成的烃类产物组成及基本性质和相态特征,生源母质类型如果是偏腐泥型干酪根则以生油为主,而生源母质类型属偏腐殖型干酪根则主要生气。通过有机地球化学

和有机岩石学等方法对干酪根及可溶有机质进行分析评价,可划分和确定烃源岩有机质的生源母质类型,预测其烃类产物及其相态特征。

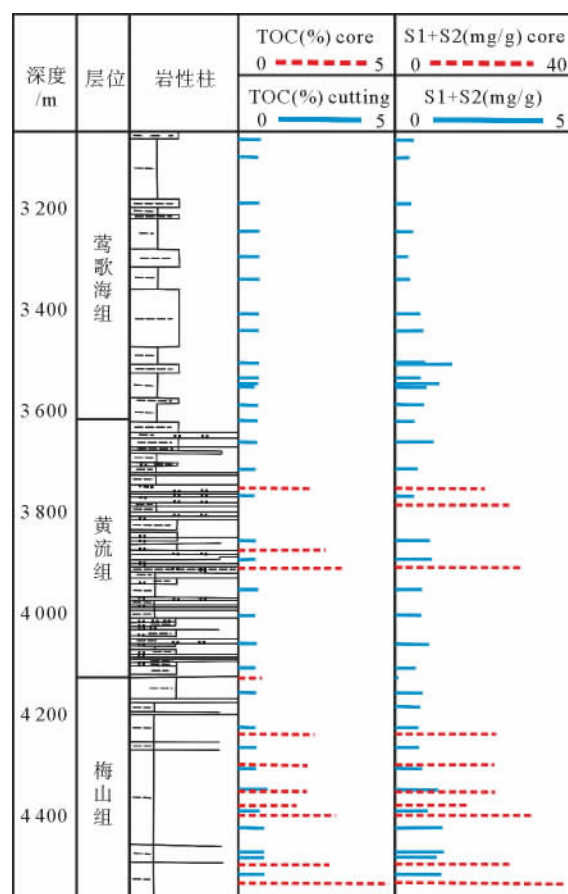


图 3 LD22-1-7 井中新统烃源岩有机质丰度剖面

Fig. 3 The profile of organic matter from Miocene source rocks in well LD22-1-7

莺歌海盆地始新统陆相烃源岩生源母质类型以靠近莺西斜坡探井揭示的始新统地层为典型代表,属于偏腐殖型生源母质类型。该井始新统烃源岩干酪根显微组分分析测定表明,其显微组分以无荧光无定形组和镜质组为主,含量约为 80%~90%,含部分发荧光无定形组和少量壳质组。依据氢指数与 T_{max} -有机质类型图版判识(图 4a),其始新统有机质生源母质类型属于 II₂ 型干酪根母质。图中热解氢指数多在 229~319 mg/g 之间,分布于偏腐殖混合型区域。由于该井钻遇地层属三角洲平原相,具有大量陆源高等植物母质输入,导致烃源岩生源母质类型偏腐殖型,故其干酪根类型与邻近的北部湾盆地始新统流沙港组中深湖相烃源岩存在一定的差异。

渐新统烃源岩生源母质类型,根据前人对莺-琼盆地(莺歌海盆地和琼东南盆地)钻遇渐新统烃源岩

有机质类型分析^[26],其无论是海岸平原相还是半封闭浅海相沉积的干酪根,有机岩石学显微组成均以镜质组及惰质组为主,仅含有少量灰色无定形组;其元素组成特征为,H/C值介于0.5~1.2之间,大多数集中于0.8~1.1,O/C值变化范围不大,主要集中在0.1~0.25之间,总体表征为II₂—III干酪根类型,这与氢指数和 T_{max} 关系图版上干酪根类型划分结果基本一致(图4b)。值得注意的是,越南境内的河内凹陷渐新统地层有机质中II₂型干酪根占有很大优势,且多数已进入成熟阶段。此外,局部地区尚存在偏腐泥型生源母质。在盆地东北地区 Dong Ho 露头和 Bach Long Vi 岛的渐新统深棕色碳质泥岩有机质中含有丰富的荧光无定形组,其含量可高达82%,其次是27%的来自陆源壳质组碎屑体。在荧光无定形的藻类体中发现了淡水环境 *Botryococcus* 藻类相似的生态结构(荧光无定形组主要来源于此藻类体),因此,该区渐新统泥岩有机质干酪根类型可确定为I型^[19]。总之,莺歌海盆地西北部临高凸起区及东南部1号断层与琼东南盆地相邻的区域,其渐新统烃源岩主要为一套煤系地层,生源母质类型属偏腐殖的II₂—III型,其他局部区域尚发育有偏腐泥型生源母质;推测临高区渐新统下部可能存在较好有机质类型的烃源岩,且渐新统烃源岩区域上可能存在由北向南有机质类型逐渐从偏腐泥型向偏腐殖型转变的特点。

莺歌海盆地中新统烃源岩生源母质类型主要属陆源海相腐殖型。有机岩石学分析表明,其干酪根组成中镜质组和惰质组含量为20%~50%,灰色无定形组分含量为30%~80%,且这种灰色无定形组分主要是浮游植物的生物聚合物转化而来,即中新

统烃源岩有机质来源中不仅有大量陆源高等植物输入,亦有较丰富的浮游植物藻类^[26]。热解分析结果亦证实中新统烃源岩以偏腐殖型生源母质为主,其氢指数多为30~160 mg/g,仅少数样品氢指数大于300 mg/g,属于III型为主母质类型,具有偏腐殖混合型海相陆源烃源岩特征。中新统烃源岩可溶有机质分布特点主要表现为,生源母质构成中陆源高等植物输入占优势。如中新统梅山组烃源岩中正构烷烃碳数分布为 nC_{13} — nC_{37} ,主峰碳在 nC_{19} — nC_{29} 之间,其Pr/Ph值虽然小于2,但样品中含丰富的陆源倍半萜,且五环三萜烷中普遍含有奥利烷,多数样品奥利烷/ C_{30} 藿烷大于0.3,总体表明陆源高等植物对其有重要贡献^[27]。再如上中新统黄流组及上新统莺歌海组底部烃源岩,其正构烷烃分布范围为 nC_{15} — nC_{35} ,Pr/Ph值为2.04~5,反映为弱还原—氧化环境;甾萜烷生物标志物中亦有奥利烷及羽扇烷分布,且绝大多数样品奥利烷/ C_{30} 藿烷小于0.15。甾萜烷组成中以 C_{27} 甾萜烷虽然占有一定的优势,但 C_{27} 、 C_{28} 、 C_{29} 三种生物仍然呈“V”字分布,重排甾萜烷的含量较低,且普遍含有微量的 C_{30-4} 甲基甾萜烷,其生源母质构成既有陆源高等植物输入亦有低等水生生物的贡献,属于腐泥—腐殖混合生源母质类型。除此之外,中新统烃源岩梅山组—三亚组及黄流组干酪根元素组成分析亦证实,其亦以偏腐殖混合型和腐殖型生源母质类型为主(图5)。因此,综合以上中新统海相烃源岩生源母质类型的地球化学信息,可以确定其有机质母质类型以偏腐殖混合型及腐殖型为主,且具有海相环境陆源母质大量输入的特点。

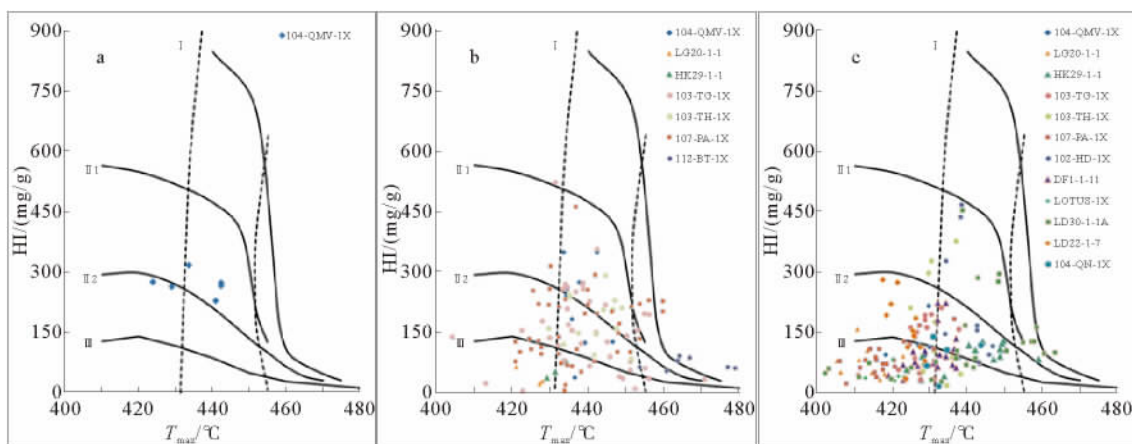


图4 莺歌海盆地始新统(a)、渐新统(b)及中新统(c)烃源岩HI与 T_{max} 相关关系

Fig. 4 The diagram of HI and T_{max} of the source rocks from Eocene(a), Oligocene(b), Miocene(c) in Yinggehai Basin

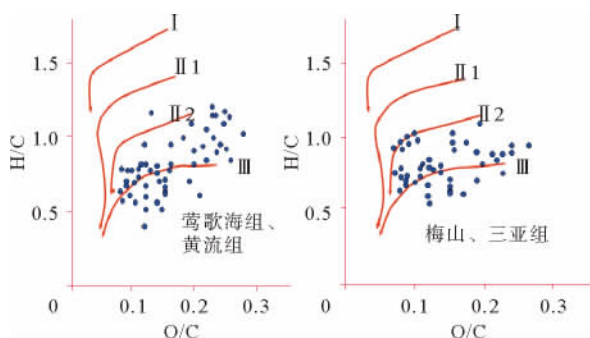


图 5 莺歌海盆地新近系烃源岩干酪根元素组成特征
Fig. 5 The Van Krevelen diagram of kerogen elements of Miocene source rocks in Yinggehai Basin

2.3 烃源岩成熟热演化特征

前已述及,莺歌海盆地新近系及第四系裂后拗陷海相沉积规模巨大,其中央拗陷带平均沉积速率为 0.41 mm/a ,属快速沉积区。高沉降沉积速率不仅有利于有机质快速堆积保存,而且控制了烃源岩发育展布规模。同时,巨厚海相泥页岩快速沉降沉积往往会造成其中流体不能及时排出而产生强烈欠压实作用,最终导致盆地中央拗陷东南部巨厚泥页岩沉积充填区,在欠压实及生烃等综合地质作用下形成异常高温超压环境,并在地层薄弱带及断裂发育区,巨厚欠压实塑性软泥发生强烈泥底辟及热流体上侵活动,进而对盆地烃源岩热演化生烃窗及其产物产生巨大影响和控制作用^[6,28]。

泥底辟热流体上侵活动形成高热流场与深部异常强超压是莺歌海盆地新近系烃源岩热演化生烃作用的两个重要影响控制因素。盆地平均地温梯度为 $4.25 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$,最高达 $5.7 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$,且高热流场主要集中在中央泥底辟带。在泥底辟带中深层及浅层局部区域,不仅地温梯度及热流场高(热流值高达 88.5 mw/m^2),而且具有异常超压特点,孔隙流体压力系数最高可达 2.3,形成了一个异常高温超压流体系统,进而控制和制约了新近系海相陆源烃源岩有机质热演化生烃作用及其热演化进程。中央泥底辟带新近系海相陆源烃源岩有机质成熟门限明显比邻区非泥底辟活动区偏浅,图 6 即是其典型例证。从莺歌海盆地不同区带新近系烃源岩有机质热演化特征剖面可以看出,中央泥底辟带 DF1-1 区和 LD15-1 区烃源岩有机质热演化成熟门限分别为 2 380 和 2 290 m(对应上新统莺歌海组二段、莺歌海组一段地层)^[8],局部地区可能浅于 2 000 m,明显比盆地边缘斜坡区及其他非泥底辟活动区成熟门限偏浅。在盆地东南部非泥底辟区,虽然平均地温梯

度亦较高($4.5 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$),但由于缺少泥底辟热流体上侵活动,导致其成熟生烃门槛较深。如该区 LD30-1 井区,在 3 000 m 左右其泥岩可溶有机质饱和烃色谱仍具有明显奇偶优势,且生物标志化合物甾烷成熟度参数 $C_{29}20S/(20S+20R)$ 值偏低,尚未达到成熟阶段之地质构型异构化终点。不溶有机质镜质体反射率(R_o)测定亦表明,LD30-1 井区烃源岩成熟门槛为 3 000~3 100 m($R_o=0.6\%$),比中央泥底辟带 DF1-1 及 LD15-1 井区成熟生烃门槛偏深 300~700 m。以上实例充分表明泥底辟热流体上侵活动大大促进了浅部地层烃源岩有机质热演化进程,导致其有机质成熟门限深度比非泥底辟活动区明显偏浅,极大地拓展了生烃窗范围。盆地斜坡边缘区等其他非泥底辟区亦与 LD30-1 井区类似,其有机质成熟门限深度为 2 400~3 000 m,亦明显比中央泥底辟带成熟生烃门限深度深。同时尚需强调指出,不仅盆地高温高热流能够促进和加速烃源岩热演化成熟生烃,导致有机质成熟门槛变浅,油气窗范围扩大,而且其深部异常超压作用亦对有机质热演化生烃具有重要的抑制作用,能够抑制和推迟有机质热演化进程,导致油气窗向深部拓宽^[15,29]。国内外专家及学者对异常超压环境中有机质热演化生烃作用研究表明^[30],异常超压环境对烃源岩干酪根热解生烃及烃类热裂解等均存在重要的抑制作用。莺歌海盆地中央拗陷泥底辟带新近系烃源岩热演化生烃过程亦存在异常超压对有机质热演化生烃作用的影响和抑制。该区 LD30-1-1A 井新近系烃源岩镜质体反射率热演化剖面呈明显的两段式变化轨迹特点即是典型例证^[30]。在 3 000 m 以上的正常压力系统中,LD30-1-1A 井最高热解峰值与镜质体反射率 R_o 两者均随深度增加而逐渐增大,符合埋深增加有机质热演化程度增加的演变规律;但在 3 000 m 以下尤其是 3 900 m 以下的异常超压环境中,有机质热演化明显受到了高压的影响和抑制作用。其镜质体反射率 R_o 值偏离正常成熟热演化趋势,明显与有机质热演化随埋深增加热力作用加强而成熟度递增的演变规律有别,表明有机质成熟生烃作用与强热力作用不匹配,有机质热演化生烃作用明显受到了影响和抑制,这样就导致烃源岩有机质热演化生烃作用进程延迟,大大拓展了油气窗,亦即扩大和拓宽了油气勘探领域。

前已论及,莺歌海盆地古新近系不同层位烃源岩成熟热演化生烃作用,均主要受控于快速沉积充填埋藏与异常高温超压环境的控制和影响。根据盆地高温超压条件及探井不同层位烃源岩有机质镜质

体反射率分析测定,结合地震地质解释与构造演化史分析,本研究重点针对不同层位烃源岩有机质热演化进行了生烃盆地模拟实验。盆地生烃模拟实验结果显示,区域上,新近系海相陆源烃源岩在盆地中央坳陷区中央泥底辟带基本上处在成熟—高熟乃至过成熟阶段,而古近系陆相—海陆过渡相烃源岩则处于高熟—过成熟阶段。其中,新近系上中新统黄流组及中中新统梅山组底部烃源岩处于低熟/成熟—高熟阶段,下中新统三亚组底部烃源岩以达到高熟—过成熟阶段;古近系渐新统海陆过渡相烃源岩则处在高熟—过成熟裂解阶段。而盆地凸起及边缘斜坡区,即西北部临高凸起区及盆地东北部边缘莺东斜坡区,由于新近系及第四系沉积较薄,不仅中新统烃源岩成熟度偏低,而且深部古近系烃源岩成熟热演化程度亦明显偏低。其中,下中新统三亚组及中中新统梅山组海相陆源烃源岩大部分仅达到成熟阶段,尚未进入高熟—过成熟热演化阶段。而古近系下渐新统崖城组亦仅处在成熟—高熟/过成熟阶段。这充分表明了莺歌海盆地中央泥底辟热流体上侵活动,对有机质成熟热演化生烃作用具有重大的影响和控制作用。换言之,盆地中泥底辟热流体强烈上侵活动区烃源岩有机质热演化程度要比盆地非底辟活动区高得多,且其异常高温超压作用在该区浅层(2 700 m 以上)可促进有机质热演化,导致成熟生烃门槛偏浅,而在其中深层(2 700 m 以下)则可抑制烃源岩热演化进展,延伸了生烃窗范围,即拓宽了油气窗下限,进而拓展了盆地深部的油气勘探领域。

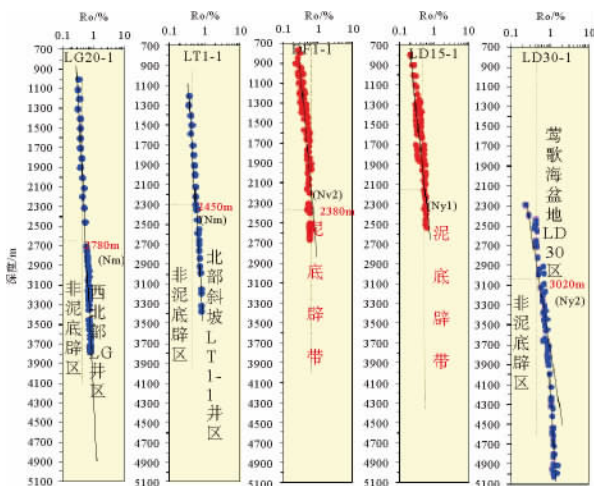


图6 莺歌海盆地不同区带热演化特征剖面图(据文献[8],修改)

Fig. 6 The profile of thermal evolution of organic matter from different districts in Yinggehai Basin (modified from reference[8])

综上所述,莺歌海盆地古新近系烃源条件较优越,大部分烃源岩均处于成熟—高熟/过熟热演化阶段,且生烃窗宽,完全能够为该区油气藏形成提供充足的烃源供给。尚须强调指出,该区不仅具有中新统海相陆源沉积之主力烃源岩,且还发育有古近系陆相及海陆过渡相沉积等重要煤系烃源岩,尤其是在上覆新近系及第四系沉积薄,古近系地层埋藏浅的盆地凸起区及边缘斜坡区,该套烃源岩多处在成熟—高熟/过熟热演化之油气窗范围,其生烃潜力大亦能够为油气藏形成提供充足的烃源供给,因此不可忽视。

3 天然气成因与烃源判识

莺歌海盆地天然气富集区主要集中于中央泥底辟带,其他区域目前尚未获得商业性天然气勘探的突破。中央泥底辟带浅层气藏及中深层气藏天然气由烃类气和非烃气组成,且无论在东方区还是乐东区烃类气含量变化均较大,其变化范围为 5.77%~93.82%。烃类气中甲烷含量多在 90% 以上,干燥系数(C_1/C_{1-5})较高,大多数在 0.95 以上,天然气组分偏干。非烃气主要由二氧化碳和氮气组成,且含微量稀有气体。其中二氧化碳含量变化范围亦很大,其最高可达 90% 以上。天然气轻烃组成特征基本一致,一般正构烷烃含量多低于 35%,异构烷烃含量为 30%~60%,总体上表现出环烷烃及异构烷烃占优势,表明腐殖型母质烃源岩对天然气有重要贡献。须强调的是,东方区气藏天然气轻烃组成中二甲基环戊烷相对含量达 20%~50%,判识气源可能有富氢结构偏腐泥型母质源岩的贡献^[31]。中央泥底辟带气藏天然气甲烷碳同位素分布比较复杂,其中,中浅层气藏天然气甲烷碳同位素值变化范围较宽,为 -54.32‰ ~ -29.09‰ ,且以 -36‰ ~ -30‰ 居优势,表明其以热成因天然气为主的中浅层天然气成熟度变化大,可能来源于不同成熟阶段烃源岩的供给;中深层气藏天然气甲烷碳同位素变化范围相对较窄,为 -39.24‰ ~ -30.08‰ ,且随与泥底辟活动中心的距离减小,其碳同位素值变重,分布范围变窄,表明泥底辟上侵强烈活动对天然气运聚成藏及其分布规律的控制影响作用^[2]。中浅层及中深层气藏天然气乙烷同位素值变化不大,且总体上偏重,主要分布在 -21‰ ~ -25‰ 之间,这与中新统海相陆源烃源岩干酪根 $\delta^{13}\text{C}$ 值介于 -24.41‰ ~ -24.16‰ 具有相似性,但有别于琼东南盆地渐新统崖城组煤系烃源岩干酪根的 $\delta^{13}\text{C}$ 值 (-27.3‰ ~ -27.14‰),表明该区天然气的生源母质主要来源

于中新统海相陆源烃源岩^[26]。中浅层及中深层气藏天然气丙烷和丁烷碳同位素特征与乙烷相似,分别为 -28.59% ~ -22.02% 和 -28.09% ~ -20.36% ,其碳同位素组成相互间差值较小,总体反映天然气具有较高的演化程度;而不同构造圈闭气藏之间其碳同位素值分布范围差别较小,则表征其具有相似的母质来源。根据戴金星^[31] $\delta^{13}\text{C}_1$ — $\delta^{13}\text{C}_2$ — $\delta^{13}\text{C}_3$ 烷烃气鉴别图版(图 7)可知,莺歌海盆地中央泥底辟带浅层及中深层气藏天然气总体上均属煤型气,其中东方区中深层气藏少部分天然气样品落于混合区,表明其烃源岩母质类型含有一定的腐泥成分。同时,DF1-1-11、DF13-2-4 等井及 DF29-1 深层气藏天然气乙烷同位素相对偏轻,亦表明其天然气母质来源与该区其他天然气母质来源存在差异。据何家雄等^[32]通过 $\delta^{13}\text{C}_1$ -Rc 方程计算,中浅层天然气成熟度 Rc 主要分布范围为 0.71% ~ 1.59% ,平均值为 1.22% ;中深层天然气成熟度 Rc 主要分布范围为 1.42% ~ 1.71% ,平均值 1.63% 。总体表现为中深层天然气成熟度特征比中浅层天然气成熟度偏高,但由于受泥底辟热流体上侵活动影响,部分浅层气藏天然气成熟度亦有偏高的。另外,根据中央泥底辟带 LD5-1-1 井和 LD14-1-1 井气藏天然气中氩同位素,其 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值分别为 326 和 306,是我国新近系及古近系含油气盆地天然气中氩同位素的最低值,表明该区天然气对应的源岩年代较新,由此推测中央泥底辟带气藏天然气主要应来自中新统成熟度较高的海相陆源源岩^[33]。

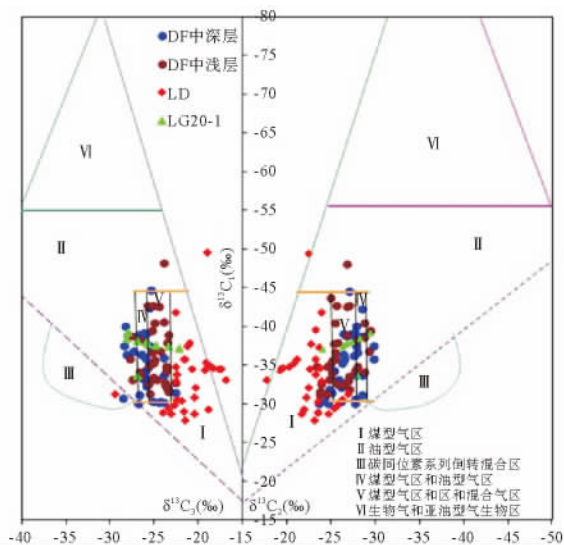


图 7 莺歌海盆地 $\delta^{13}\text{C}_1$ — $\delta^{13}\text{C}_2$ — $\delta^{13}\text{C}_3$

同位素关系(图版据文献^[31])

Fig. 7 Relationship among methane, ethane and propane carbon isotope in Yinggehai Basin (chart according to reference^[31])

气藏天然气伴生或相关的凝析油特征及其生物标志化合物信息,有助于分析判识天然气来源。中央泥底辟构造带钻遇的 LD15-1、LD20-1, DF1-1、LD22-1 及 DF13-2 等浅层及中深层气藏天然气中均伴有少量或微量凝析油。凝析油地球化学分析表明,其密度和凝固点均较低,含蜡量通常不超过 3% ,大多数都小于 1% ,基本不含沥青质^[34]。凝析油中碳同位素较重,主要分布在 -21.1% ~ -22.6% 之间,这亦与中新统海相陆源烃源岩干酪根碳同位素较重的特征相一致,反映海相介质条件下沉积有机质对凝析油的贡献。凝析油甾烷成熟度参数表明,大多数凝析油甾烷异构化程度不高,其成熟度参数 $\text{C}_{29}20\text{S}/(20\text{S}+20\text{R})$ 值为 0.26 ~ 0.28 , $\text{C}_{29}\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)$ 值为 0.25 ~ 0.39 ,且在个别样品中检测出藿烯,未达到成熟平衡点,表明凝析油成熟度处于低成熟阶段^[3]。凝析油中规则甾烷 C_{27} 胆甾烷占优,含有少量代表海相生油岩生物标志物的甲藻甾烷,且其 Pr/Ph 值一般为 3 ~ 5.5 。结合 Mango 轻烃参数、正异构庚烷值等成熟度参数确定大部分凝析油成熟度 Ro 值为 0.8% ~ 1.0% ,推测其源岩最大埋深在 3900 ~ 4000 m 左右^[35]。根据莺歌海盆地地层的区域分布情况,中央泥底辟带处于 4000 m 以上的地层主要是上新统莺歌海组—上中新统黄流组地层,且莺黄组下部烃源岩 $\text{C}_{29}20\text{S}/(20\text{S}+20\text{R})$ 值为 0.21 ~ 0.37 , $\text{C}_{29}\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)$ 值为 0.23 ~ 0.40 ,其热演化程度与凝析油相似。总之,通过综合分析,可以判识中央泥底辟带气藏天然气伴生低成熟凝析油主要来源于成熟度相对较低的上新统莺歌海组—上中新统黄流组烃源岩或油气运聚过程中的抽提作用。值得注意的是,在 LD15-1-2 井、DF1-1-5 井中成熟度较高的凝析油中尚检出了较高丰度的 C_{30-4} 甲基甾烷(图 8),其与北部湾盆地中深湖相原油的 C_{30-4} 甲基甾烷丰度相当,而与目前该区所揭示中新统烃源岩甾烷特征不一致,因此,推测其来源可能与深部始新统湖相烃源岩具有成因联系^[36]。

莺歌海盆地临高凸起区钻井少, LG20-1 钻井揭示,其天然气组分与中央泥底辟带气藏相似,亦是主要由烃类气和非烃类气组成,且烃类含量变化较大,分布范围在 37.25% ~ 99.02% 之间,非烃气含量甚低。烃类气主要以甲烷为主,重烃含量较低,其干燥系数较中央泥底辟带气藏天然气低,为 0.82 ~ 0.96 ,主要为湿气。天然气甲烷同位素值为 -39.32% ~ -33.80% ,相对于中央泥底辟带气藏天然气碳同位素较轻,可能来源于古近系湖相及煤系烃源岩生源母质。天然气乙烷同位素值分布范围

为 -24.07% ~ -29.34% ,均值为 -26.81% ,其与琼东南盆地揭示的崖城组干酪根同位素值 -27.3% ~ -27.14% 相似^[15],亦表明天然气可能主要来源于渐新统煤系烃源岩。根据临高区天然气碳同位值及组分分析,计算天然气成熟度 R_c 大于 1.3% ^[32],属于高成熟煤型气,少部分样品乙烷同位值小于 -28% (参见图7),干燥系数较低,天然气来源可能有富氢结构偏腐泥型母质源岩的参与。另外, LG20-1-1井槽气中芳烃含量较高,苯/ nC_6 和甲苯/ nC_7 比值均大于1,这亦与崖城13-1煤系天然气表现出相似的特点^[35]。此外, LG20-1-1井揭示陵水组荧光砂岩抽提物分析显示,其甾萜烷生物标志化合物中具有高含量奥利烷和树脂化合物“T”,亦有别于中新统海相烃源岩生物标志化合物特征,因此推测其烃源来自渐新统崖城组煤系泥岩。

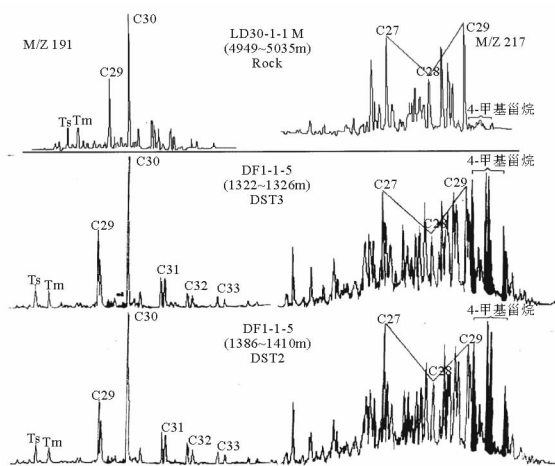


图8 莺歌海盆地中新统凝析油与烃源岩甾萜烷分布特征

Fig. 8 The distribution characteristic of sterane and terpane in condensate oil and source rock from Miocene Formation in Yinggehai Basin

总之,根据莺歌海盆地浅层及中深层气藏天然气组分、同位素、成熟度特征及凝析油、砂岩抽提物生物标志化合物等地球化学分析结果,结合该区油气地质条件综合分析,可以判识和确定中央泥底辟带浅层及中深层气藏天然气主要来自于中新统成熟—高熟/过成熟阶段三亚—梅山组海相陆源烃源岩,少量低成熟气和低熟凝析油来源于上中新统黄流组—上新统莺歌海组海相烃源岩;而盆地临高凸起区油气则主要来源于渐新统崖城组陆源碎屑泥岩及煤系烃源岩。且上述两者都不排除存在有深部古近系偏腐泥型母质源岩的部分贡献。

4 有利油气勘探方向分析

根据含油气系统及现代油气成藏动力学理论,常规油气运聚成藏本质上就是一个“从源到汇直至聚集”的运聚动平衡过程,即含油气系统所强调的“从烃源到圈闭运聚成藏”之核心和关键。因此,基于含油气系统理论,预测评价其有利油气勘探区带及勘探方向和勘探领域,均必须首先深入分析研究烃源条件,确定有效烃源岩及生烃灶的展布特点,在此基础上开展有利油气聚集区带及勘探方向分析评价与预测。

根据以上古新近系烃源条件分析,结合地震地质资料和探井钻探结果,莺歌海盆地古新近系有利油气勘探方向及重要勘探领域,笔者认为应主要围绕主力烃源岩——中新统海相陆源烃源岩及其生烃灶,勘探寻找海相陆源偏腐殖型生源母质供烃形成的天然气气藏(即目前勘探发现的浅层及中深层大中型天然气田群)和重要烃源岩——古近系陆相烃源岩及海陆过渡相煤系烃源岩及生烃灶,勘探评价及预测古近系陆相和煤系油气及油气藏(这类油气藏在北部湾盆地及琼东南盆地西部均已勘探发现大中型油气田)。因此,基于以上油气勘探基本原则及勘探部署评价思路,莺歌海盆地天然气勘探目前仍然应主要围绕中新统海相陆源有效烃源岩及生烃灶,开展烃源供给与运聚输导条件分析,深入剖析油气运聚成藏过程,在此基础上综合评价预测有利油气富集区带,优选有利油气勘探目标。研究表明目前比较现实和有利油气勘探方向及勘探领域,首当其冲的仍然是中央泥底辟带高温超压中深层油气勘探领域,虽然该区近年来已获得大中型气田的重要发现,但其勘探揭示的仅仅是上中新统黄流组一段(即中深层领域上部之“皮毛”,3 300 m以上),而中深层深部主体即中新统三亚—梅山组及黄流组二段目前尚未涉及或钻入,然而其中新统三亚—梅山组及黄流组二段不同类型构造圈闭非常发育,据中海油1997年地震资料分析圈定该区自北而南发育有九大背斜/断块圈闭,展布规模均在百平方千米以上,且邻近中深层深部有效烃源岩及生烃灶,具有“近水楼台”的优越供烃运聚条件,因此,中央泥底辟带中深层高温超压领域中新统构造圈闭油气藏应是该区今后勘探寻找大中型油气藏最有利的勘探方向和最重要的勘探领域。

前已论及,根据古近系烃源条件分析,少量探井及地震探测表明盆地深部普遍发育始新统陆相及渐

新统煤系烃源岩,且具有一定的生烃潜力,亦可作为重要烃源岩,能够为古近系油气藏形成提供烃源供给。首先,区域构造沉积演化特征研究表明,盆地西北部地堑内发育始新统一渐新统崖城组沉积,且具有自西北向东南,从河内凹陷向莺歌海凹陷呈喇叭式张开的特征^[37],主要沉积充填了由冲积扇-河流、浅湖到半深湖,深湖-半深湖再到浅湖-冲积扇构成的陆相碎屑沉积体系^[38],在临高凸起区地震反射剖面上也可以识别出始新统一渐新统地层沉积,这就充分表明和证实古近系在盆地西北部普遍存在。另外,在越南境内 102—106 区块内,即临高凸起北部及河内凹陷南部,2008 年在古近系中发现了 Ham Rong-1X 油田^[19],并获得商业性油流(日产原油 7 029 桶),即是勘探发现古近系商业性油气藏的典型实例。同时,根据盆地西北部露头及河内凹陷钻井揭示表明,该区始新统一渐新统泥岩有机质丰度较高,主要属于湖相及煤系烃源岩,且处于大量生烃的成熟—高熟阶段,这亦充分证实了古近系烃源岩具有生烃潜力,能够提供烃源供给。总之,通过地质地球物理综合分析评价,结合少量探井钻探成果,笔者认为盆地西北部中方管辖区的临高反转构造带及临高海口-昌化区,应为勘探寻找古近系烃源岩供烃之油气藏的重要勘探领域,应加强地质综合研究,开展区带油气勘探目标评价优选。再者,据越南研究及其古近系油气勘探成果^[22],莺歌海盆地西侧断裂带亦发现有渐新统供给之油气显示^[18],而该走滑伸展盆地东侧即中方辖区莺东斜坡带,则由于盆地斜拉分特征决定其结构具有对称性,因此推测盆地东侧莺东斜坡带亦发育古近系烃源岩,具有勘探寻找古近系油气藏的勘探前景。再者,该区发现的历史悠久的大量油气苗显示亦充分表明,莺东斜坡带以及靠近琼东南盆地 1 号断裂带附近之区域亦应该是古近系油气藏的重要勘探领域,具有勘探发现古近系油气藏的勘探前景。

5 结论

(1)莺歌海盆地古、新近系烃源条件较优越,其中中新统海相陆源烃源岩为主力烃源岩及有效生烃灶,中央泥底辟带浅层及中深层大中型气田/气藏之气源,均来自于中新统海相陆源烃源岩的供给。古近系始新统湖相及渐新统煤系是盆地重要烃源岩,目前地震探测及探井揭示其主要分布于上覆新近系及第四系沉积较薄的西北部临高凸起区及东北部莺东斜坡带和 1 号断裂下降盘附近等局部地区。

盆地西北部越南辖区地震及探井亦揭示了这套古近系烃源岩,根据所获古近系样品地球化学分析,其有机质丰度及成熟度与生源母质类型均较好,故具有较大生烃潜力。

(2)中新统海相陆源烃源岩是莺歌海盆地主力烃源岩,主要展布于中央泥底辟带。其有机质丰度普遍较低,但局部亦存在有机质高丰度段,生源母质类型主要为腐殖型或偏腐殖型,具有海相环境陆源母质的特点,且烃转化率高。有机质热演化程度处在低熟/成熟—高熟/过熟的油气窗阶段,其烃类产物则主要以大量天然气伴生少量凝析油及轻质油为主。中央泥底辟带浅层及中深层大中型气田群之天然气及凝析油产出特点即是其典型实例;古近系烃源岩是该区重要的湖相及煤系烃源岩。目前地震及探井仅在盆地西北部河内凹陷及临高凸起区和莺东斜坡带等局部地区有所揭示,但根据地震资料推测其可能全盆地普遍发育。据有限的探井所获样品分析,始新统湖相及渐新统煤系烃源岩,有机质丰度较高,多属 II₂—III 型有机质类型,且处于大量生烃的成熟—高熟/过熟之油气窗范围,故具有较大生烃潜力。

(3)莺歌海盆地强烈的泥底辟上侵活动与油气运聚成藏密切相关,其所形成的异常高温超压环境,不仅能够导致中新统烃源岩成熟门槛比非泥底辟活动区明显偏浅,而且其超压的抑制作用亦能够迫使深部中新统烃源岩有机质热演化程度偏离正常成熟度演化趋势推迟热演化进程,进而极大地拓展了油气窗范围,拓宽了盆地深部油气勘探领域。

(4)根据油气地质条件评价及勘探研究结果分析,预测中央泥底辟带中深层深部不同类型构造圈闭系列,应是勘探寻找中新统海相陆源烃源岩之油气最有利勘探方向和勘探领域;而临高反转构造带及临高-海口-昌化区和莺东斜坡带局部地区以及靠近 1 号断裂带附近等区域,则是勘探寻找古近系油气藏重要的勘探领域,具有较好的勘探前景。

参考文献 (References)

- [1] 李绪深,裴健翔,李彦丽. 莺歌海盆地乐东气田天然气成藏条件及富集模式[J]. 天然气工业, 2013, 33(11): 16-21. [LI Xushen, PEI Jianxiang, LI Yanli. Gas play conditions and accumulation patterns of Ledong Gas Fields, Yinggehai Basin[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(11): 16-21.]
- [2] 吴红烛,黄志龙,裴健翔,等. 莺歌海盆地底辟带 DF 区天然气地球化学特征差异及其成因[J]. 石油实验地质, 2015, 37(2): 211-219. [WU Hongzhu, HUANG Zhilong, FEI Jianxiang, et

- al. Causes of natural gas geochemical differences in the high-temperature and overpressure zone of DF1-1 diapir belt, Yinggehai Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2015, 37(2): 211-219.]
- [3] 何家雄. 莺歌海莺黄组气藏烃源探讨及勘探方向[J]. *石油实验地质*, 1996, 18(1): 78-87. [HE Jiexiong. The sources of gas pools in Yinghuang formation and its exploratory implication in the Yinggehai Basin[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 1996, 18(1): 78-87.]
- [4] 黄保家, 肖贤明, 董伟良. 莺歌海盆地烃源岩特征及天然气生成演化模式 [J]. *天然气工业*, 2002, 22(1): 9-10, 26-30. [HUANG Baojia, XIAO Xianming, DONG Weiliang. Source rocks and generation & evolution model of natural gas in Yinggehai Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2002, 22(1): 9-10, 26-30.]
- [5] 何家雄, 刘海玲, 姚永坚, 等. 南海北部边缘盆地油气地质及资源前景[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007. [HE Jiexiong, LIU Hailing, YAO Yongjian, et al. *The Petroleum Geology and the Resource Potential of the Marginal Basins in the Northern South China Sea* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007.]
- [6] 李海, 王鹏, 许浩, 等. 柴达木盆地与莺歌海盆地超压体系油气成藏特征对比分析 [J]. *天然气地球科学*, 2012, 23(4): 736-741. [LI Hai, WANG Peng, XU Hao, et al. Comparison of overpressure system and hydrocarbon accumulation between Qaidam basin and Yinggehai basin [J]. *Journal of Natural Gas Team*, 2012, 23(4): 736-741.]
- [7] 张功成, 陈国俊, 张厚和, 等. “源热共控”中国近海盆地油气田“内油外气”有序分布 [J]. *沉积学报*, 2012, 30(1): 1-19. [ZHANG Chengong, CHEN Guojun, ZHANG Houhe, et al. Regular distribution of inside-oil fields and outside-gas fields controlled by source rocks and heat in China offshore basins [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30(1): 1-19.]
- [8] 何家雄, 祝有海, 翁荣南, 等. 南海北部边缘盆地泥底辟及泥火山特征及其与油气运聚关系[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2010, 35(1): 75-86. [HE Jiexiong, ZHU Youhai, WENG Rongnan, et al. Characters of north-west mud diapirs volcanoes in South China Sea and relationship between them and accumulation and migration of oil and gas[J]. *Earth Science(Journal of China University of Geosciences)*, 2010, 35(1): 75-86.]
- [9] 张启明, 郝芳. 莺-琼盆地演化与含油气系统[J]. *中国科学D辑(地球科学)*, 1997, 27(2): 149-154. [ZHANG Qiming, HAO Fang. Evolution and hydrocarbon system in Ying-Qiong basin [J]. *Science in China(Series D)*. 1997, 27(2): 149-154.]
- [10] 张厚福, 方朝亮, 高先志, 等. *石油地质学*[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999. [ZHANG Houfu, FANG Zhanliang, GAO Xianzhi, et al. *Petroleum Geology* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999.]
- [11] 马文宏, 何家雄, 姚永坚, 等. 南海北部边缘盆地第三系沉积及主要烃源岩发育特征[J]. *天然气地球科学*, 2008, 19(1): 41-48. [MA Wenhong, HE Jiexiong, YAO Yongjian, et al. Characteristics of Tertiary sediments and main source rocks, northern South China Sea[J]. *Journal of Natural Gas Team*, 2008, 19(1): 41-48.]
- [12] 卢双舫, 张敏. *油气地球化学* [M]. 北京: 石油工业出版社, 2007. [LU Shuangfang, ZHANG Min. *Oil and Gas Geochemistry* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007.]
- [13] 陈建平, 赵长毅, 何忠华. 煤系有机质生烃潜力评价标准探讨 [J]. *石油勘探与开发*, 1997, 24(1): 1-5, 91. [CHEN Jianping, ZHAO Changyi, HE Zhonghua. Criteria for evaluating the hydrocarbon generating potential of organic matter in coal measures [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1997, 24(1): 1-5, 91.]
- [14] 李松峰, 徐思煌, 施和生, 等. 珠江口盆地惠州凹陷古近系烃源岩特征及资源预测[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2013, 28(1): 112-120. [LI Songfeng, XU Sihuang, SHI Hesheng, et al. Characteristics of Paleogene source rocks and prediction of petroleum resources in Huizhou which expressions using Pearl River Basin[J]. *Earth Science(Journal of China University of Geosciences)* 2013, 28(1): 112-120.]
- [15] 黄保家, 黄合庭, 李里, 等. 莺-琼盆地海相烃源岩特征及高温高压环境有机质热演化[J]. *海相油气地质*, 2010, 15(3): 11-18. [HUANG Baojia, HUANG Heting, LI Li, et al. The characteristics of Marine source rocks and effect of high temperature and overpressure to organic matter maturation in Yinggehai and Qiongdongnan Basins [J]. *Journal of Marine Origin Petroleum Geology*, 2010, 15(3): 11-18.]
- [16] 张功成, 邓运华, 吴景富, 等. 中国近海新生代叠合断陷煤系烃源岩特征与天然气勘探方向[J]. *中国海上油气*, 2013, 25(6): 15-25. [ZHANG Chengong, DENG Yunhua, WU Jingfu, et al. Coal measure source-rock characteristics and gas exploration directions in Cenozoic superimposed faulted depressions, offshore China[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2013, 25(6): 15-25.]
- [17] 廖静, 宋瑞有, 刘维军. 莺歌海盆地临高构造带成藏模式研究 [J]. *内江科技*, 2011(12): 135-136. [LIAO Jing, SONG Ruiyou, LIU Weijun. The evolution model of Lingao Tectonic Belt in Yinggehai Basin[J]. *Neijiang Science and Technology*, 2011(12): 135-136.]
- [18] Nielsen L H, Mathiesen A, Bidstrup T, et al. Modelling of hydrocarbon generation in the Cenozoic Song Hong Basin, Vietnam; a highly prospective basin [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 1999 (17): 269-294.
- [19] Trinh Xuan Cuong, Phan Ngoc Trung, Tong Duy Cuong, et al. Hydrocarbon systems in the north-eastern area of the Song Hong Basin[J]. *Journal of Earth Science and Engineering*, 2013 (3): 807-814.
- [20] Henrik I Petersen, Hans P Nytoft, Lars H Nielsen. Characterisation of oil and potential source rocks in the northeastern Song Hong Basin, Vietnam: indications of a lacustrine-coal sourced petroleum system [J]. *Organic Geochemistry*, 2004 (35): 493-515.
- [21] Andersen C, Mathiesen A, Nielsen L H, et al. Distribution of source rocks and maturity modelling in the northern Cenozoic Song Hong Basin(Gulf of Tonkin), Vietnam[J]. *Journal of Petroleum Geology*, 2005, 28(2): 167-184.

- [22] Petersen H I, Andersen C, Anh P H, et al. Petroleum potential of Oligocene lacustrine mudstones and coals at Dong Ho, Vietnam—an immature outcrop analogue to terrestrial source rocks in the greater Song Hong Basin[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2001(19):135-154.
- [23] 李可为. 莺歌海盆地海相油气及其源岩地球化学研究 [J]. *中国海上油气*, 1991, 5(3):5-14, 64. [LI Kewei. Geochemical study of marine gas and oil their source rocks in Yinggehai Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 1991, 5(3):5-14, 64.]
- [24] 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, offshore South China Sea[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2005, 32(1):37-42.]
- [25] 谢玉洪, 李绪深, 童传新, 等. 莺歌海盆地中央底辟带高温高压天然气富集条件、分布规律和成藏模式[J]. *中国海上油气*, 2015, 27(4):1-12. [XIE Yuhong, LI Xushen, TONG Chuanxin, et al. The High temperature and high pressure gas enrichment condition, the distribution law and accumulation model in central diapir zone of Yinggehai basin[J]. *Journal of China Offshore International Oil and Gas*, 2015, 27(4):1-12.]
- [26] 董伟良, 黄保家. 南海莺-琼盆地煤型气的鉴别标志及气源识别[J]. *天然气工业*, 2000, 20(1):23-27. [DONG Weiliang, HUANG Baojia. Identification marks and source discrimination of the coal type gas in Yinggehai and Qiongdongnan basins of South China Sea[J]. *Journal of Natural Gas Industry*, 2000, 20(1):23-27.]
- [27] 何家雄, 陈伟煌, 钟启祥. 莺歌海盆地泥底辟带浅层天然气成因及烃源探讨[J]. *天然气地球科学*, 1994, 5(26):14, 15-27. [HE Jiexiong, CHEN Weihuang, ZHONG Qixiang. The discussion of shallow gas origin and source rocks of mud diapir belt in Yinggehai Basin[J]. *Journal of Natural Gas Team*, 1994, 5(26):14, 15-27.]
- [28] 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, XIA Bin, et al. Based mechanisms of mud - fluid diapir in Yinggehai Basin and hydrocarbon accumulation[J]. *Geotectonica and Metallogenia*, 2004, 28(2):118-125.]
- [29] 童传新, 谢玉洪, 黄志龙, 等. 莺歌海盆地高温高压天然气地球化学特征及底辟翼部高效成藏模式[J]. *天然气工业*, 2015, 35(2):1-11. [DONG Chuanxin, XIE Yuhong, HUANG Zhi-long. Geochemical behaviors of HPHT gas reservoirs in the Yinggehai Basin and the efficient gas accumulation mode at the Basin's diapir flanks[J]. *Journal of Natural Gas Industry*, 2015, 35(2):1-11.]
- [30] 郝芳, 邹华耀, 方勇, 等. 超压环境有机质热演化和生烃作用机理[J]. *石油学报*, 2006, 27(5):9-18. [HAO Fang, ZOU Huayang, FANG Yong, et al. Kinetics of organic matter maturation and hydrocarbon generation in overpressure environment [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2006, 27(5):9-18.]
- [31] 戴金星. 各类天然气的成因鉴别[J]. *中国海上油气*, 1992, 6(1):11-19. [DAI Jinxing. Identification of various genetic natural gases[J]. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 1992, 6(1):11-19.]
- [32] 何家雄, 陈伟煌, 李明兴. 莺-琼盆地天然气成因类型及气源剖析[J]. *中国海上油气*, 2000, 14(6):33-40. [HE Jiexiong, CHEN Weihuang, LI Mingxing. Genetic types of natural gas and source rocks in Ying-qiong Basin[J]. *China offshore Oil and Gas(Geology)*, 2000, 14(6):33-40.]
- [33] 沈平, 陈践发, 陶明信, 等. 莺歌海盆地天然气气源及运移的地球化学特征[J]. *天然气地球科学*, 1996, 7(1):9-16. [SHEN Ping, CHEN Jianfa, TAO Mingxin, et al. The geochemical characteristics of gas source and migration in Yinggehai Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 1996, 7(1):9-16.]
- [34] 傅宁, 潘贤庄. 莺歌海盆地浅层凝析油研究[J]. *勘探家*, 1998, 3(2):5-17, 9-13. [FU Ning, PAN Xianzhuang. Study on shallow-layer condensates in Yinggehai Basin[J]. *Petroleum Explorationist*, 1998, 3(2):5-17, 9-13.]
- [35] Baojia Huang, Xianming Xiao, Xuxuan Li. Geochemistry and origins of natural gases in the Yinggehai and Qiongdongnan basins, offshore South China Sea[J]. *Organic Geochemistry*, 2003(34):1009-1025.
- [36] 龚再升, 李思田. 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. [Gong Zaisheng, Li Sitian. Continental Margin Basin Analysis and Hydrocarbon Accumulation of the Northern South China Sea[M]. Beijing: Science Press, 1997.]
- [37] 郭令智, 钟志洪, 王良书, 等. 莺歌海盆地周边区域构造演化 [J]. *高校地质学报*, 2001, 7(1):1-12. [GUO Lingzhi, ZHONG Zhihong, WANG Liangshu, et al. Regional tectonic evolution around Yinggehai basin of South China Sea [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2001, 7(1):1-12.]
- [38] 孙珍, 钟志洪, 周蒂, 等. 红河断裂带的新生代变形机制及莺歌海盆地的实验证据 [J]. *热带海洋学报*, 2003, 22(2):1-9. [SUN Zhen, ZHONG Zhihong, ZHOU Di, et al. Deformation mechanism of red river fault zone during cenozoic and experimental evidences related to Yinggehai Basin formation [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2003, 22(2):1-9.]

THE SYNTHETIC EVALUATION OF PALEOGENE AND NEOGENE SOURCE ROCKS AND THE FAVORABLE EXPLORATION TARGET IN YINGGEHAI BASIN

LI Xiaotang^{1,2}, HE Jiexiong¹, ZHANG Wei^{1,2}

(1. CAS Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Guangzhou Institute of Geochemistry,
Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: Prospecting evaluation of Tertiary source rocks in the Yinggehai Basin is in the exploration stage at present. According to regional geology, sedimentary and tectonic evolution features of Tertiary, seismic data, previous researches and the result of hydrocarbon-generating simulation experiments, source rocks in various horizons were analyzed, particularly the organic geochemical characteristics of Palaeogene source rocks. On the basis, this paper makes an intensive study on hydrocarbon source condition and thermal evolution of organic matter under the condition of HT and HP. The results have shown that Miocene marine mudstones are the main source rocks of shallow gas reservoirs and mid deep, as well as Eocene-Oligocene lacustrine mudstones and coals are important source rocks in the basin. Miocene marine source rocks containing Kerogen type II₂ and type III are widely distributed, and the maturity of organic matters is between mature and high mature phases for gas generation. Moreover, Eocene-Oligocene source rocks are mainly distributed in northwest and southeast of the basin, and the organic matter is the humic with high generation potential of hydrocarbon. Based on tectonic evolution characteristics and hydrocarbon source conditions, combining exploration achievements and comprehensive assessment of hydrocarbon accumulation area in recent years, the paper forecasts that, not only the Lingao inversion structures zone and the Lingao-Haikou-Changhua area are very important to the Tertiary oil-gas exploration, but also the Yingdong slope and the area beside the Qiongdongnan basin at the down throw side of No. 1 fault belt. What's more, the middle-deep structural traps under the condition of HT and HP in deep are very important for exploration of medium and large gas pools.

Key words: Palaeogene source rock; Miocene source rock; hydrocarbon source condition; favorable exploration target; Yinggehai Basin