

南海北部莺—琼盆地 CO₂ 成因 与成藏特征及其分布规律

徐新德,张迎朝,熊小峰,甘 军,梁 刚

(中海石油(中国)有限公司湛江分公司,广东湛江 524057)

摘 要:莺—琼盆地是中国南海北部重要的天然气产区,部分地区天然气中 CO₂ 含量高,制约了天然气勘探的经济性。CO₂ 成因、成藏及分布规律的研究有助于低 CO₂ 含量的优质天然气勘探。在天然气地球化学特征剖析的基础上,结合区域地质条件,综合研究了莺—琼盆地天然气中 CO₂ 的成因和来源,剖析了天然气成藏机制和 CO₂ 分布规律。研究认为:莺—琼盆地天然气中 CO₂ 含量变化大且成因复杂,来源各异;发育 3 种天然气成藏模式,其控制了天然气中 CO₂ 的差异性分布;莺歌海盆地高 CO₂ 天然气的分布受控于底辟活动和超压,而琼东南盆地高 CO₂ 天然气的成藏与分布则主要与深大断裂及火山活动有关。因此,莺—琼盆地不同地区优质天然气勘探应采用不同的思路和对策:莺歌海盆地应在输导体系发育、天然气成藏较早且保存条件好的底辟波及区中深层寻找优质天然气;琼东南盆地则应在无火山活动和无深大断裂发育、天然气生运聚及保存条件好的地区寻找优质天然气,或者在深大断裂发育或火山活动地区寻找保存条件好、未受破坏的早期形成的优质天然气藏。

关键词:二氧化碳;成因;成藏;分布规律;优质天然气;莺—琼盆地

中图分类号:P618.18

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2017.07005

莺歌海盆地和琼东南盆地(简称莺—琼盆地)是中国南海北部重要的天然气勘探区,经过多年的勘探,已有良好的天然气发现。迄今为止,区内已发现多个气田或含气构造,建产 Y13-1、X1-1 等 5 个气田。特别是自 2010 年以来,莺歌海盆地 X13-1、X13-2 等构造及琼东南盆地 L22-1 等构造的中新统黄流组取得了天然气勘探的重大突破。

随着勘探程度的提高,莺—琼盆地天然气勘

探层系由浅层向中深层、区位上由浅水向深水(水深>500 m)不断发展,并不断取得新的突破。对于本区的天然气成因与成藏前人已有较多研究^[1-6],其中针对 CO₂ 成因来源及成藏过程也有专题研究^[3],但是研究对象单一,对于莺歌海和琼东南盆地剖面上的浅层和中深层、平面上的浅水区 and 深水区(水深以 500 m 为界)CO₂ 成藏及分布,特别是低 CO₂ 的优质天然气分布方面的对比研究却少有报道。本研究根据天然气组分、碳同位素及稀有气体同位素资料,综合研究了中国南海北部莺—琼盆地天然气中 CO₂ 的成因和来源,并结合区域地质背景对比分析了其 CO₂ 的成藏主控因素及分布规律,以期对莺—琼盆地优质天然气勘探突破提供决策参考。

收稿日期:2017-05-15

基金项目:国家“十三五”重大科技专项“莺琼盆地高温高压天然气富集规律与勘探开发关键技术(三期)”(2016ZX02024-005)

作者简介:徐新德(1970—),男,硕士,高级工程师,主要从事南海油气地球化学与成藏方面的研究工作. E-mail: xuxd@cnooc.com.cn

1 地质背景

莺—琼盆地面积共约 $18.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。莺歌海盆地位于中国海南岛与越南之间的莺歌海海域,整体呈 NNE 走向,面积约 $9.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。盆

地东北面与北部湾盆地相接,东南方向通过 1 号断裂与琼东南盆地相连,为一个非常独特的高温高压新生代转换—伸展含油气盆地^[7-9]。琼东南盆地位于海南岛东南方向,呈 NE 走向,东北面以神狐隆起与珠江口盆地相邻,面积约 $8.3 \times 10^4 \text{ km}^2$,为一被动大陆边缘离散型盆地^[7-9](图 1)。

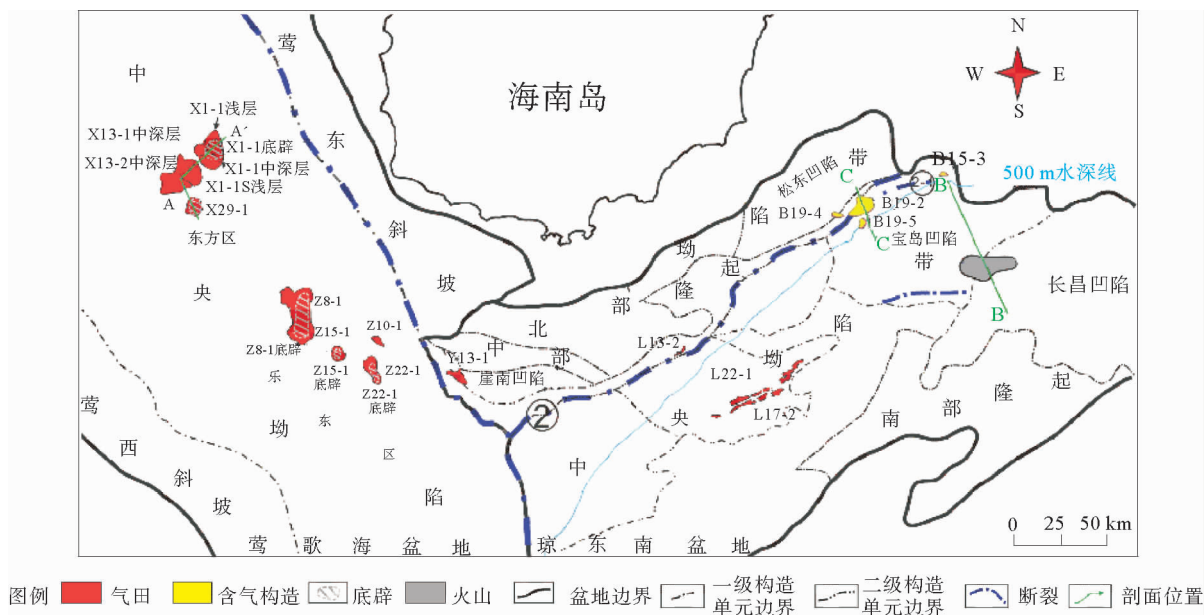


图 1 莺—琼盆地构造区划

Fig. 1 The structural outline of the Yinggehai-Qiongdongnan Basins

莺—琼盆地经历了早期断陷和后期坳陷 2 个演化阶段。在早期的断陷阶段,莺歌海盆地和琼东南盆地水体分割,为 2 个独立的盆地,沉积了古近系始新统湖相地层、渐新统崖城组和陵水组海陆过渡相及海相地层。在后期的坳陷阶段,莺歌海盆地和琼东南盆地水体统一,沉积了新近系三亚组、梅山组、黄流组和莺歌海组海相以及第四系地层。据研究,莺—琼盆地发育 2 套以生气为主的烃源岩:其一是渐新统海陆过渡相及浅海相烃源岩,已证实是琼东南盆地主力烃源岩;其二是中新统浅海相烃源岩,已证实是莺歌海盆地主力烃源岩^[7,8,10]。陵水组三段扇三角洲、滨海相砂岩,三亚组滨海、三角洲砂岩,梅山组滨海及三角洲相砂岩,黄流组滨海、三角洲和浊积砂岩,莺歌海组低位扇、浅海席状砂分别与其上覆的海相泥岩构成了莺—琼盆地垂向上的多个储盖组合^[9]。

在平面上,莺—琼盆地分别由多个次级构造

单元组成。莺歌海盆地包括中央坳陷、莺东斜坡、莺西斜坡;琼东南盆地包括北部坳陷带、北部隆起、中央坳陷带等^[9](图 1)。

2 CO₂ 地球化学特征及成因

2.1 天然气中 CO₂ 含量

莺—琼盆地不同地区、不同构造以及不同层段天然气中 CO₂ 含量变化很大,分布范围在 0~97.2% 之间,平均值为 36.4%(表 1)。

莺歌海盆地已发现的天然气主要分布于中央坳陷带的东方区和乐东区,天然气中 CO₂ 分布非常复杂。

东方区主要有 X1-1、X29-1、X1-1S、X13-2 等气田或含气构造,X1-1 和 X29-1 是本区的 2 个底辟。地处 X1-1 底辟核部的 X1-1 构造莺歌海组二

表 1 莺—琼盆地典型天然气组成及碳同位素分布

Table 1 Chemical and carbon isotopic composition of natural gas in the Yinggehai-Qiongdongnan Basins

盆地	构造	层段	天然气组成/%				碳同位素 δ ¹³ C/‰		³ He/ ⁴ He ×(10 ⁻⁷)	R/Ra	
			C ₁	C ₂₊	N ₂	CO ₂	CO ₂	C ₁			
莺歌海盆地	X1-1	浅层	莺歌海组	28.0~84.7 /67.3 *	0.6~3.2 /1.9	1.1~34.8 /14.6	0.2~64.8 /16.3	-54.1~-31.7 /-37.6	-20.7~-2.8 /-11.6	0.5~6.8 /1.8	0.03~0.48
	X1-1	中深层	黄流组	43.1~84.7 /73.8	1.6~3.5 /2.2	5.2~12.5 /9.3	2.1~49.5 /14.7	-33.1~-30.1 /-31.5	-8.0~-0.7 /-5.8	4.7	0.34
	X13-1	中深层	黄流组	22.7~66.5 /43.2	0.5~1.7 /1.1	3.0~9.2 /5.7	22.2~73.8 /49.9	-32.9~31.9 /-32.5	-6.6~-3.9 /-4.9	- * *	-
	X1-1S	浅层	莺歌海组	7.1~44.9 /18.5	0.01~1.7 /0.8	3.3~19.9 /9.0	34.6~88.0 /71.7	-43.8~-31.3 /-35.5	-6.6~-3.8 /-5.6	-	-
	X13-2	中深层	黄流组	69.0~82.4 /79.5	1.8~2.9 /2.4	12.4~27.7 /15.8	1.4~2.4 /2.1	-38.9~-32.3 /-35.7	-17.0~-7.2 /-10.9	-	-
	X29-1		莺歌海组	6.5~65.8 /22.5	0.2~1.4 /0.6	3.9~23.7 /11.4	9.0~88.9 /65.4	-35.6~-29.1 /-32.2	-5.9~-2.1 /-3.5	1.9~4.7 /2.7	0.13~0.33
	Z22-1		乐东组 莺歌海组	13.4~81.9 /68.6	0.9~2.5 /1.8	5.3~22.2 /17.1	0.01~80.4 /12.5	-40.2~-26.9 /-34.2	-12.7~-2.2 /-6.7	0.4~1.0 /0.7	0.03~0.07
	Z15-1		乐东组 莺歌海组	5.3~54.8 /25.7	0.5~3.3 /1.9	0.8~13.0 /5.8	28.9~93.4 /66.6	-35.7~-32.3 /-34.2	-8.2~-4.2 /-6.0	3.7~5.7 /4.5	0.26~0.40
	Z8-1		乐东组 莺歌海组	15.8~91.7 /45.2	1.0~2.3 /1.8	1.7~4.5 /3.0	4.5~80.8 /50.0	-41.8~-29.1 /-32.9	-8.5~-2.5 /-4.7	8.4~21.9 /16.8	0.60~1.56
	琼东南盆地	B19-2、B19-4		三亚组	1.3~79.7 /20.5	0.1~8.4 /1.4	0.1~6.3 /2.7	1.2~97.2 /74.5	-46.8~-35.2 /-39.5	-7.5~-3.9 /-5.2	34.6~87.5 /61.7
B19-5、			陵水组								
Y13-1			陵水组	82.2~89.0 /84.8	2.9~9.0 /6.4	1.0~1.2 /1.1	7.7~8.5 /8.1	-39.9~-39.4 /-39.6	-10.3~-5.1 /-7.7	1.1~4.8 /2.9	0.08~0.34
	L22-1		黄流组	91.2~91.7 /91.4	7.5~8.0 /7.7	0.5~0.6 /0.6	0.3/0.3	-39.2~-38.8 /-39.0	-9.2~-7.4 /-8.4	-	-

* 分布范围/平均值; ** 无数据

段(浅层)天然气中 CO₂ 含量有高低,但总体较低,分布范围为 0.2%~64.8%,平均 16.3%,绝大多数样品 CO₂ 含量在 15% 以下;X1-1 构造黄流组一段(中深层)天然气中 CO₂ 含量总体也较低(分布范围为 2.1%~49.5%,平均 14.7%)。但距离 X1-1 构造较近的 X13-1 构造黄流组一段天然气中 CO₂ 含量总体较高(分布范围为 22.7%~73.8%)。另一个位于底辟核部的 X29-1 构造,目前主要在莺歌海组二段钻获天然气,CO₂ 含量总体高(分布范围为 9.0%~88.9%,平均 65.4%)。此外,在 X1-1 和 X29-1 底辟之间,距离底辟有一定距离的 2 个构造 X1-1S(莺歌海组二段)和 X13-2(黄流组一段),在垂向上近乎重叠,天然气中 CO₂ 含量差别较大。X1-1S 构造(莺歌海组二段)天然气中 CO₂ 含量总体很高,分布范围为 34.6%~88.0%,平均 71.7%;而 X13-2 构造(黄流组一段)天然气中 CO₂ 含量则非常低,平均值仅为 2.1%(表 1)。可见,东方区 CO₂ 分布在空间上呈现出一定规律,浅层莺歌海组二段表现为底辟核部 CO₂ 含量变化较大,变化幅度超过 60%,不同底辟之间也存在差别(如 X29-1 底辟

CO₂ 含量整体高于 X1-1 底辟),但是底辟之间波及区 CO₂ 含量整体较高,平均可达 71.7%。中深层黄流组一段表现为底辟核心区 CO₂ 含量有高低(如 X1-1 构造平均为 12.6%;X13-1 构造平均可达 49.9%),但是其整体上高于波及区(如 X13-2 构造平均含量 2.1%)。

乐东区主要有 Z22-1、Z15-1、Z8-1 气田或含气构造,分别位于 3 个底辟的核部。目前仅在浅层的莺歌海组一段及乐东组发现天然气,各构造天然气中 CO₂ 的含量差别较大。如 Z22-1 构造天然气中 CO₂ 含量总体较低,绝大多数样品中 CO₂ 含量 < 1%,仅少数样品 CO₂ 含量高。而在 Z15-1 和 Z8-1 构造天然气中 CO₂ 含量则总体很高,绝大多数天然气样品 CO₂ 含量在 50.0% 以上,局部高达 93.44%(表 1)。可见,乐东区浅层乐东组和莺歌海组一段 CO₂ 分布与东方区浅层莺歌海组二段 CO₂ 分布规律类似,即底辟核心区 CO₂ 含量变化幅度比较大,变化幅度超过 60%,不同底辟呈现一定差别。

琼东南盆地天然气中 CO₂ 的含量变化也非常大,分布范围为 0.5%~97.2%,尽管 CO₂ 含量

变化幅度很大,但是 CO_2 分布分区性比较明显,即:高 CO_2 含量的天然气主要集中于盆地东部宝岛凹陷北侧的 2 号断裂带,如 B19-2、B19-4、B19-5、B15-3 构造,除极少数样品 CO_2 含量较低外(如 B19-2 构造 B192-3、B192-4 号样品 CO_2 含量只有 1.2% 和 18.7%),绝大多数样品 CO_2 含量在 80% 以上,最高达到 97.2%,呈现整体富含 CO_2 、少数富烃的特征。在琼东南盆地中远离深大断裂的区域天然气中也含有一定量 CO_2 ,但含量总体较低,如 L22-1、Y13-1 气田天然气中 CO_2 含量较低,大多在 10.0% 以下。

2.2 天然气同位素组成及成因

天然气中 CO_2 碳同位素组成与其成因密切相关^[11-14]。有机成因的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值一般 $< -10\%$, 主要在 $-10\% \sim -30\%$ 之间;无机成因 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值一般 $> -8\%$, 主要在 $-8\% \sim 3\%$ 之间; $-10\% < \delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2} < -8\%$ 为有机、无机过渡或混合成因。根据 CO_2 百分含量及其碳同位素值可以有效区分有机与无机成因的 CO_2 ^[13,14]。

莺—琼盆地的 CO_2 碳同位素分布范围为 $-20.7\% \sim -0.7\%$, 显示 CO_2 既有有机成因,又有无机成因。此外,不同成因的 CO_2 与含量也有一定的相关性,有机成因 CO_2 含量一般比较低,大部分在 10.0% 以下,而无机成因 CO_2 的含量一般在 20.0% 以上,大部分高于 40.0% (表 1, 图 2)。与此同时,不同地区、不同层段的 CO_2 成因也有一定差异。

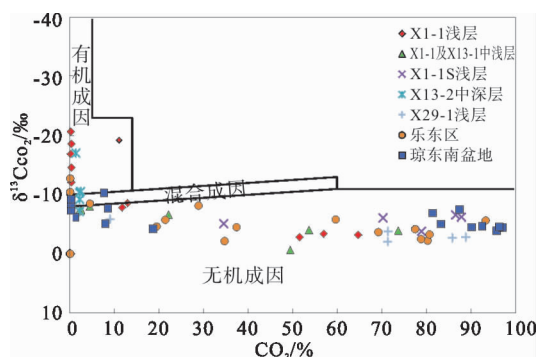


图 2 莺—琼盆地天然气中 CO_2 含量与碳同位素关系 (图版据文献[15])

Fig. 2 Relationship between content and carbon isotope value of CO_2 in the Yinggehai-Qiongdongnan Basins (from reference [15])

莺歌海盆地东方区 X1-1 构造莺歌海组二段(浅层) $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值的分布范围为 $-20.7\% \sim -2.8\%$, 显示天然气中的 CO_2 既有有机成因,又有无机成因,无机成因 CO_2 在天然气中含量较高,最高达到 64.8%。X1-1 和 X13-1 构造黄流组一段(中深层)、X29-1 和 X1-1S 构造莺歌海组二段 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值的分布范围为 $-8.0\% \sim -0.7\%$, 显示 CO_2 为无机成因。有意思的是,位于 X1-1 和 X29-1 底辟之间的 X13-2 构造黄流组一段(中深层) CO_2 分布与周边构造差异明显:其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 总体偏轻,仅少数样品较重,显示 CO_2 以有机成因为主,极少数为有机—无机混合成因或无机成因(表 1, 图 2)。乐东区 Z22-1 构造天然气中由于 CO_2 含量较低, $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值有高有低 ($-12.7\% \sim -2.2\%$), 既有有机成因又有无机成因,且含量低的 CO_2 均为有机成因。Z15-1、Z8-1 构造天然气 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值分布范围较窄,主要在 $-8.5\% \sim -2.5\%$ 之间,除极个别样品 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值略轻为有机—无机混合成因外,绝大多数样品 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值较重,为无机成因。可见,莺歌海盆地浅层底辟核心区的 CO_2 既有有机成因也有无机成因,而位于两底辟之间波及区的 CO_2 主要为无机成因,而中深层底辟核心区的 CO_2 主要为无机成因,波及区 CO_2 主要为有机成因。

琼东南盆地不同地区天然气中 CO_2 气体碳同位素差别较大,分布范围为 $-10.3\% \sim -3.9\%$, 显示有多种成因。盆地东部的宝岛凹陷北部 2 号断裂带附近的 B19-2 等构造 CO_2 含量非常高,碳同位素均比较重,显示为无机成因;远离深大断裂的 Y13-1 构造天然气大部分 CO_2 碳同位素较重为无机成因,极少数碳同位素较轻为有机—无机混合成因;L22-1 构造 CO_2 碳同位素相对较轻,显示既有无机成因,又有有机—无机混合成因(表 1)。总之,琼东南盆地绝大多数 CO_2 均为无机成因,少数天然气样品中 CO_2 碳同位素较轻为有机—无机混合成因,常分布于盆地中远离深大断裂的区域。

根据天然气中伴生的稀有气体氦同位素 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值可进一步判别无机成因的 CO_2 到底是壳源还是幔源。一般说来, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值 (R) 小于大气的氦同位素 $^3\text{He}/^4\text{He}$ (Ra) 比值,即 $R/\text{Ra} < 1$ 者为壳源; $1 < R/\text{Ra} < 2$ 为壳幔过渡;

R/Ra>2者为典型幔源^[14-17]。

莺歌海盆地天然气中稀有气体同位素³He/⁴He比值分布范围为(0.5~21.9)×10⁻⁷, R/Ra 比值分布范围为 0.04~1.6, 显示既有壳源成因的 CO₂, 也有部分样品中有一定幔源 CO₂ 的混入, 为壳源—幔源混合成因(表 1)。不同地区存在一定差异: X1-1、X29-1、Z22-1、Z15-1 等构造稀有气体³He/⁴He 及 R/Ra 比值均较低, CO₂ 为典型的壳源成因, 主要是钙质泥岩或碳酸盐岩高温热解变质生成的产物; Z8-1 构造稀有气体³He/⁴He 及 R/Ra 比值则较高, 显示其 CO₂ 主要为壳源—幔源混合成因, 应该是由于 Z8-1 底辟活动强烈, 将部分深部的地幔来源的 CO₂ 输导上来。

琼东南盆地不同地区的无机成因 CO₂ 在来源上也存在明显差异。位于深大断裂附近的构造, 如位于二号断裂带的 B19-2、B19-4、B15-3 等构造, 天然气中稀有气体氦同位素³He/⁴He 及 R/Ra 比值均较高, 显示其 CO₂ 为幔源无机成因。而远离深大断裂的地区, 如 Y13-1 气田天然气中稀有气体氦同位素³He/⁴He 和 R/Ra 比值均较低, 显示 CO₂ 为壳源无机成因。L22-1 黄流组天然气中无机 CO₂ 未开展伴生稀有气体氦同位素检测, 根据其百分含量较低的实际, 推测为壳源无机成因(表 1)。

3 天然气成藏模式

莺—琼盆地不同地区地质条件不同, 天然气运移、成藏的控制条件与成藏机制也存在较大差异。根据天然气运移驱动力和输导体系的不同, 可以归纳为 3 种类型的成藏模式, 其控制了莺—琼盆地复杂的天然气空间分布。

3.1 底辟和超压驱动断裂输导型天然气成藏模式

底辟和高温高压是莺歌海盆地独特的地质现象, 其共同控制了中央坳陷底辟带天然气运移、成藏和分布^[19-21]。在底辟核部, 底辟能量强, 底辟活动及深部超压构成了天然气运移成藏的动力。输导体系是底辟活动产生的大断裂及底辟本身, 天然气垂向运移, 存在多期天然气破坏和多期成藏, 保存条件较差。X1-1 底辟核部的 X1-1、X13-1 浅层和中深层气田的成藏符合该模式。

X1-1 底辟核心区 X1-1 浅层(莺歌海组二段及以上层段)天然气中 CO₂ 含量有高有低, 但总体较低, 天然气成熟度高低混杂(表 1), 总体上较低, CO₂ 既有有机成因又有无机成因(图 2); X1-1 和 X13-1 中深层黄流组天然气中 CO₂ 含量则总体较高(表 2), 天然气成熟度也总体较高, CO₂ 为无机成因(图 2)。

在 X1-1 底辟区, 中新统烃源岩早期(约 3.6 Ma)生成的成熟度较低的富烃天然气在底辟及深部超压作用下, 沿着底辟活动产生的大断裂, 向上运移进入黄流组、梅山组海底扇圈闭聚集成藏; 约 1.8 Ma 至今, 在强烈的底辟活动及更强超压作用下, 早期形成的气藏遭受破坏, 天然气向上发生再次运移, 至上新统莺歌海组或更浅储层聚集。后期成熟度更高、CO₂ 含量也更高的天然气向上运移, 主要充注梅山组、黄流组海底扇储层^[5, 22]。底辟活动的多期性导致底辟区不同层段天然气充注成藏的多期性, 从而形成浅层有机、无机 CO₂ 混杂, 中深层无机 CO₂ 为主, 不同层位 CO₂ 含量变化复杂的格局。由于底辟核心区能量强, 天然气保存条件较差(图 3a)

3.2 超压驱动裂隙输导型天然气成藏模式

在莺歌海盆地距离底辟较远的外围区(波及区), 底辟能量较弱, 同样发育超压。在超压作用主要影响、底辟活动次要影响下, 产生大量地震剖面上难以识别的小断裂或裂隙。同时, 超压充当了天然气运移的动力。

浅层的 X1-1S 构造(莺歌海组二段)天然气中 CO₂ 含量高、天然气成熟度较高, CO₂ 无机成因为主; 而中深层的 X13-2 构造(黄流组一段)天然气中 CO₂ 含量非常低, 烃类气含量高, 天然气成熟度相对较低, CO₂ 主要是有机成因或有机—无机混合成因。

X1-1S/X13-2 构造离底辟较远, 底辟能量相对较低, 天然气运移和成藏受底辟活动影响程度相对较小。中新统烃源岩早期(约 3.6 Ma)生成的成熟度较低的富烃天然气(其中 CO₂ 主要为有机成因或有机—无机混合成因), 借助小断裂或微裂隙向上运移并持续充注中深层黄流组、梅山组海底扇。由于距离底辟较远, 天然气保存条件较好。随着地层埋深逐步加大, 烃源岩热演化程度

升高,后期(约 1.8 Ma 至今)生成的成熟度更高、含有较高无机 CO₂ 的天然气沿着底辟活动产生的“伞状”断层或微断裂向上直接运移至浅层聚集成藏^[5](图 3b)。最终形成中深层天然气成熟度总体较低且 CO₂ 含量低、浅层天然气成熟度高

且 CO₂ 含量高的天然气分布格局。莺歌海盆地中央坳陷底辟带广大底辟外围区,如 X1-1、X29-1、Z15-1、X8-1 底辟周围中深层,符合这种天然气成藏模式,天然气成藏时间早,保存条件好,是有利的优质天然气富集区带。

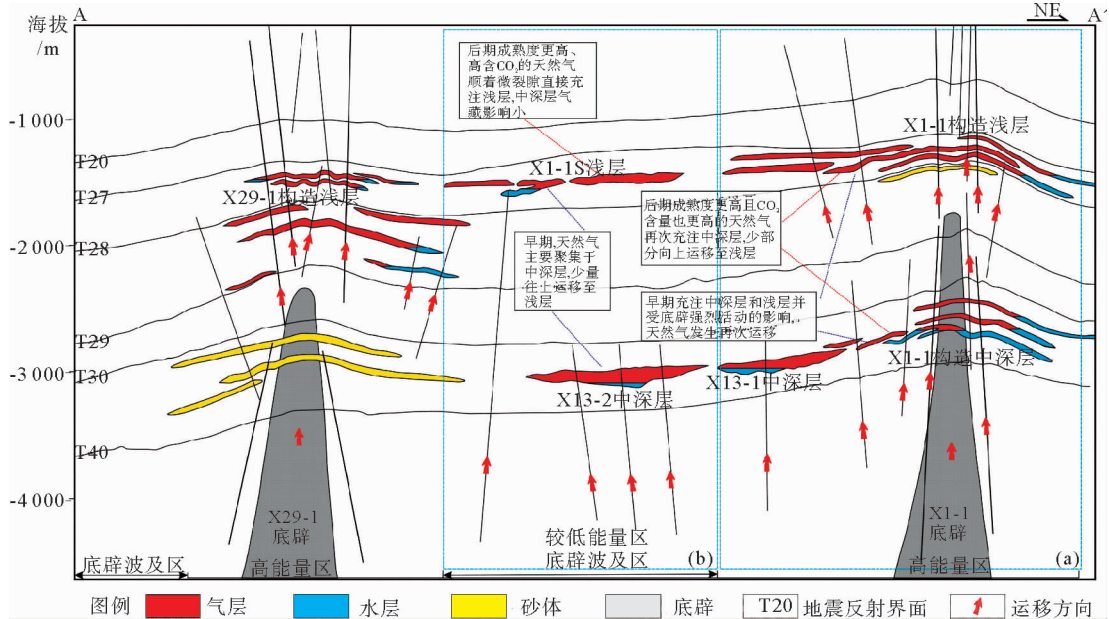


图3 莺歌海盆地东方区不同底辟能量场天然气成藏模式(据文献[5]修改)

Fig. 3 Accumulation model of natural gas in different areas of Dongfang Area, Yinggehai Basin(modified from reference [5])

另外,琼东南盆地西部的乐东凹陷和陵水凹陷由于中新世以来发生快速沉降和沉积而发育超压,由超压作用导致上部地层裂开形成大量地震剖面上难以识别的裂隙,成为天然气垂向运移的良好通道。超压驱动深部烃源岩生成的天然气顺着这些裂隙向上运移并聚集。因此,琼东南盆地乐东凹陷和陵水凹陷也具备发育超压驱动裂隙输导型天然气成藏模式的地质条件。

3.3 断裂输导型天然气成藏模式

天然气的运移和成藏受控于大断裂。深部烃源岩生成的天然气,主要在浮力作用下,借助沟源大断裂向上垂向运移至浅层目标聚集成藏,或者借助大断裂向上垂向运移后,顺着砂岩层侧向运移至目标聚集成藏。如琼东南盆地2号断裂带附近的B19-2、B19-4及B15-3构造均属这种类型。

B19-2、B19-4是位于琼东南盆地东区松涛凸起东倾伏端、宝岛凹陷北部边缘断阶带下的断块

气藏,B15-3位于宝岛凹陷东北缘(图1)。B19-2、B15-3构造陵水组二、三段储层为大套近源三角洲砂体,B19-4构造储层为三亚组二段海相砂岩。天然气来自宝岛凹陷,2号断裂带为一深大断裂,为天然气向上运移提供通道,以垂向运移为主,侧向运移为辅。琼东南盆地在B19-2、B19-2N、B19-4、B19-5和B15-3构造发现高含CO₂的天然气,CO₂为幔源无机成因。

本地区处在中国东部陆上2个向大陆架延伸的NW向新近纪—第四纪玄武岩带上,火山岩浆脱气活动较为频繁^[23],根据火山与地层的接触关系,琼东南盆地东部宝岛凹陷5.5 Ma时期或更晚有火山活动(图4,T30沉积界面对应的时间为5.5 Ma),伴随火山活动释放的大量幔源CO₂气体顺着断裂运移至合适的储层聚集。流体包裹体分析揭示B19-2构造陵水组储层砂岩中存在有机包裹体与CO₂包裹体,与它们共生盐水包裹体均一温度分别为130~150℃与165~190℃。结

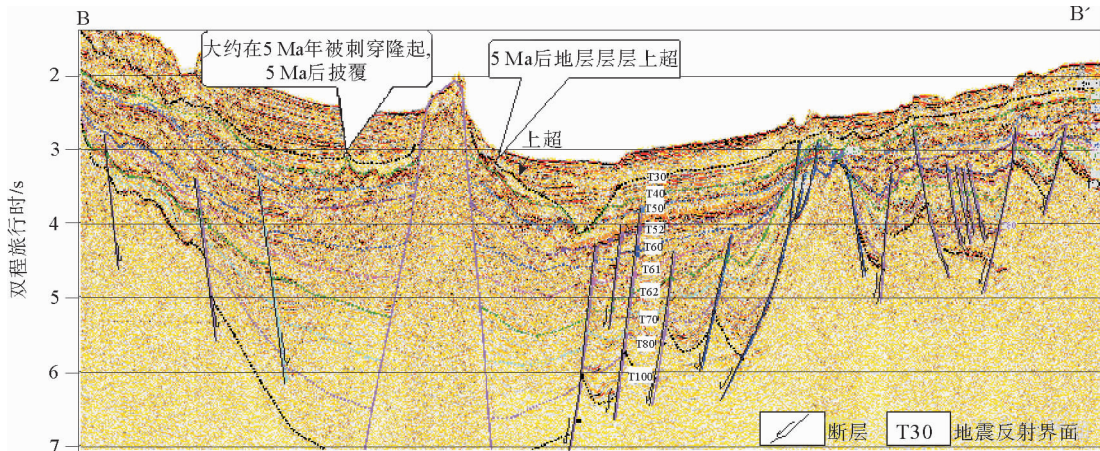


图 4 宝岛凹陷火山分布位置

Fig. 4 Distribution of volcanoes in Baodao Sag

合地层埋藏史分析, 烃类气充注的时间大约为 17.5~13 Ma; 大量无机 CO₂ 气体的充注时间约为 5 Ma 至今。因此, B19-2 及其周缘构造中幔源 CO₂ 应该与本区火山活动和断裂活动有关, 运移期可能为 5 Ma 或更晚。

从烃类气的生成和运移来看, 宝岛凹陷发育 2 套重要的烃源岩: ①以是生气为主的下渐新统崖城组海陆过渡相煤系源岩; ②以生油为主的始新统湖相源岩, 如果埋深足够大也可以生气。根据盆地模拟研究, 宝岛凹陷烃源岩有 2 期主要的生气高峰, 分别是早中新世(23~16 Ma)和晚中新世(11.6~5.5 Ma)。

宝岛凹陷北部 2 号断裂带天然气成藏过程如下: 宝岛凹陷烃源岩在 23~16 Ma 进入第 1 个生排气高峰, 此时 2 号断裂带正处于活动期, 烃类气沿着活动的断裂向上垂向运移进入陵水组聚集成藏, 形成纯烃类气气藏。随着地层埋深增加, 烃源岩在 11.6~5.5 Ma 进入第 2 个生排气高峰, 约 5.5 Ma 以来, 伴随火山活动释放大量的幔源 CO₂ 气体, 阻挡了部分烃类气的充注, 同时 CO₂ 可能主要沿 2-1 号断裂向上运移, 破坏部分早期形成的烃类气藏, 最终形成 B19-2N、B19-4、B19-5 等高 CO₂ 气藏(图 5)。因此, 综合分析本地区有 2 期主要的烃类气运移: 第 1 期大约在 23~16 Ma, 分别借助 2 号和 2-1 号断裂运移; 第 2 期大约在 11.6~5.5 Ma, 天然气可能主要借助 2-1 号断裂运移。幔源无机 CO₂ 大规模充注时间大约是 5 Ma 至今。

值得注意的是, 琼东南盆地其他远离 2 号深

大断裂的气田, 如 Y13-1 气田, 天然气中 CO₂ 含量很低。这一方面与崖城组烃源岩生成的天然气中 CO₂ 含量很低有关, 同时, 不存在沟通基底和上部构造的深大断裂, 构造周边也未发现火山活动的迹象。因此, 该地区基本上不存在 CO₂ 气源, 崖城组烃源岩生成低 CO₂ 含量天然气借助三角洲砂体侧向运移至 Y13-1 气田成藏。这表明, 无深大断裂及火山活动的地区, 只要具备良好的天然气生储盖及运聚条件, 天然气中 CO₂ 的含量基本上都很低。

4 CO₂ 分布规律及优质天然气勘探策略

综上所述, 莺歌海盆地与琼东南盆地存在 3 种不同的天然气成藏模式, 其控制了天然气运移和成藏, 也控制了 CO₂ 的分布。CO₂ 运聚与成藏存在共性, 即 CO₂ 均为晚期充注, 均可能在一定地区对早期形成的低 CO₂ 优质天然气藏造成破坏。但是, 由于这 2 个盆地地质背景不同, 天然气运聚与成藏机制及其对 CO₂ 分布的主控因素也各具特色。因此, 低 CO₂ 含量的优质天然气勘探应采用不同的思路和策略。

底辟和超压驱动断裂输导型成藏模式主要发育于莺歌海盆地, 超压驱动裂隙输导型成藏模式在莺歌海盆地以及琼东南盆地西区的乐东凹陷和陵水凹陷发育。在莺歌海盆地底辟核心区, 底辟能量大, 对早期成藏的优质天然气藏破坏也较大。因此, 在底辟核心区, 无论浅层还是中深层, 天然

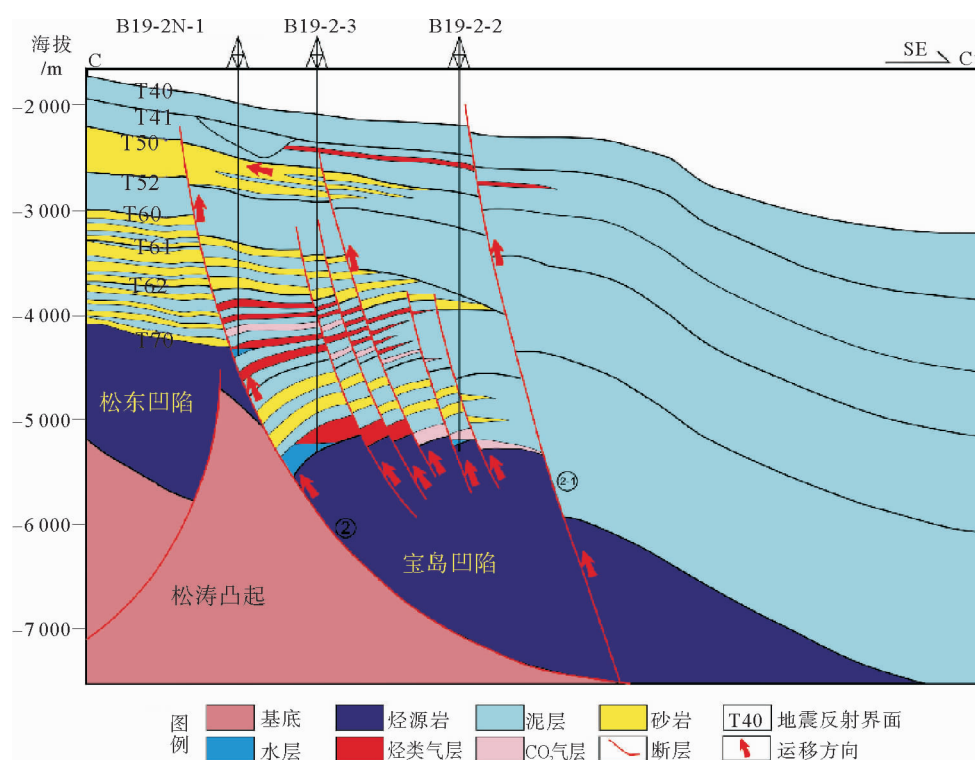


图5 宝岛凹陷北部 B19-2 构造及周缘天然气成藏模式

Fig. 5 Accumulation model of natural gas in B19-2 area, north of Baodao Sag

气勘探既有高 CO_2 风险,也有高烃类气的机遇;距离底辟较远的波及区,底辟能量相对较小,早期形成的优质天然气藏保存条件好, CO_2 风险较低。因此,莺歌海盆地应该在裂隙等输导体系发育、早期成藏(天然气中 CO_2 含量低)且保存条件好的底辟波及区中深层,如黄流组和梅山组目标寻找优质天然气。在琼东南盆地西部的乐东凹陷和陵水凹陷应寻找较高的源储压差、裂隙发育、圈闭条件较好的地区开展评价。

琼东南盆地高 CO_2 的天然气主要与其东部存在火山岩浆活动及 2 号深大断裂带活动有关,在没有火山活动和没有深大断裂发育的其他地区,天然气中 CO_2 的风险大大降低。因此,琼东南盆地应在无火山活动和深大断裂发育、天然气生运聚及保存条件好的地区寻找优质天然气,或者在深大断裂发育区寻找保存条件较好、未受破坏的早期优质天然气藏。

在上述成果和思路的指导下,进一步精细评价莺歌海盆地 X13-2 上中新统黄流组目标,扩展天然气储量,实现了 X13-2 构造黄流组优质天然气勘探的重大突破,并发现 Z10-1 上中新统黄流

组优质天然气藏;琼东南盆地在深水西区的陵水凹陷进一步勘探发现 L17-2 黄流组优质大气田,实现了琼东南盆地深水区优质天然气勘探的重大突破,同时在琼东南盆地浅水区发现 L13-2 中中新统梅山组优质天然气藏。

5 结论

(1) 莺—琼盆地天然气中 CO_2 含量变化大,成因类型多样。莺歌海盆地 CO_2 以无机成因为主,有机或有机—无机混合成因为辅。无机 CO_2 主要为壳源成因,仅少数为壳源—幔源混合成因;琼东南盆地东部深大断裂发育及火山活动地区 CO_2 主要是幔源无机成因,非深大断裂或无火山活动区的 CO_2 主要是壳源无机成因。

(2) 莺—琼盆地不同地区因地质条件差异,发育 3 种不同类型的天然气成藏模式,分别是底辟和超压驱动断裂输导型、超压驱动裂隙输导型、断裂输导型天然气成藏模式,其控制了不同地区天然气成藏与分布。莺歌海盆地高含量 CO_2 天然气的成藏与分布主要受控于底辟活动和超压,琼

东南盆地高含量 CO₂ 天然气的成藏与分布则主要受控于深大断裂及火山活动。

(3)不同地区优质天然气的勘探应采用不同的思路和对策。莺歌海盆地应该在输导体系发育、早期成藏且保存条件好的底辟波及区中深层(如黄流组和梅山组)寻找优质天然气;琼东南盆地应在无火山活动和无深大断裂发育、天然气生运聚及保存条件好的地区寻找优质天然气,或者在深大断裂发育区寻找保存条件较好、未受破坏的早期优质天然气藏。

参考文献:

- [1] Hao F, Li S T, Sun Y C, et al. Characteristics and origin of the gas and condensate in the Yinggehai Basin, offshore South China Sea; evidence for effects of overpressure on petroleum generation and migration[J]. *Organic Geochemistry*, 1996, 24(3): 363-375.
- [2] Huang B J, Xiao X M, Li X X. Geochemistry and origins of natural gases in the Yinggehai and Qiongdongnan basins, offshore South China Sea[J]. *Organic Geochemistry*, 2003, 34(7): 1009-1025.
- [3] 何家雄, 刘全稳. 南海北部大陆架边缘盆地 CO₂ 成因和运聚规律的分析与预测[J]. *天然气地球科学*, 2004, 15: 12-19.
- [4] 谢玉洪, 刘平, 黄志龙. 莺歌海盆地高温超压天然气成藏地质条件及成藏过程[J]. *天然气工业*, 2012, 32(4): 19-23.
- [5] 徐新德, 张迎朝, 裴健翔, 等. 莺歌海盆地东方区天然气成藏模式及天然气勘探策略[J]. *地质学报*, 2014, 88(5): 956-965.
- [6] 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.
- [7] 李思田, 解习农, 焦养泉. 南海北部边缘盆地充填序列和充填样式[M]// 龚再升, 李思田, 谢俊泰. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集. 北京: 科学出版社, 1997: 70-74.
- [8] 朱伟林, 张功成, 高乐. 南海北部大陆边缘盆地油气地质特征与勘探方向[J]. *石油学报*, 2008, 29(1): 1-9.
- [9] 朱伟林, 米立军. 中国海域含油气盆地图集[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010: 110.
- [10] 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): 26-30.
- [11] Schoell M. Genetic characterization of natural gases[J]. *Bulletin of American Association of Petroleum Geologists*, 1983, 67(12): 2225-2238.
- [12] Schoell M, Jenden P D, Beunas M A, et al. Isotope analysis of gases in gas field and gas storage operations[J]. *Jawra Journal of the American Water Resources Association*, 1993, 14(14): 384-393.
- [13] 戴金星. 天然气碳氢同位素特征和各类天然气鉴别[J]. *天然气地球科学*, 1993, 4(2/3): 1-40.
- [14] 戴金星, 戴春森, 宋岩, 等. 中国东部无机成因的二氧化碳气藏及其特征[J]. *中国海上油气(地质)*, 1994, 8(4): 215-222.
- [15] 戴金星. 天然气碳同位素特征和各类天然气鉴别[J]. *天然气地球科学*, 1993, 2/3: 1-40.
- [16] Wakita H, Sano Y. ³He/⁴He ration in CH₄-rich gases suggest magmatic origin[J]. *Nature*, 1983, 305 (5937): 792-794.
- [17] Xu Y C, Shen P, Tao M X, et al. Distribution of the helium isotopes in natural gases from oil-gas-bearing basins in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1994, 39 (22): 1905-1911.
- [18] Lollar B S, O'Nions R K, Ballentine C J. Helium and isotopes systematics in carbon dioxide-rich and hydrocarbon rich gas reservoirs[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(23): 5279-5290.
- [19] 张敏强. 莺歌海盆地底辟构造带天然气运聚特征[J]. *石油大学学报(自然科学版)*, 2000, 24(4): 39-42.
- [20] 郝芳, 李思田, 龚再升, 等. 莺歌海盆地底辟发育机理与流体幕式充注[J]. *中国科学(D辑)*, 2001, 31(6): 471-476.
- [21] 何家雄, 徐瑞松, 刘全稳, 等. 莺歌海盆地泥底辟发育演化及天然气及 CO₂ 运聚成藏规律[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28(1): 91-98.
- [22] 张迎朝, 徐新德, 王立锋, 等. 南海北部超压低渗气藏成藏过程与成藏模式——以莺歌海盆地 XF 区 XF13-1 超压气田为例[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(9): 1679-1688.
- [23] 滕吉文, 王光杰, 张中杰, 等. 华南大陆 S 波三维速度结构与郯庐断裂带的南延[J]. *科学通报*, 2000, 45 (23): 2492-3497.

GENESIS, ACCUMULATION AND DISTRIBUTION OF CO₂ IN THE YINGGEHAI-QIONGDONGNAN BASINS, NORTHERN SOUTH CHINA SEA

XU Xinde, ZHANG Yingzhao, XIONG Xiaofeng, GAN Jun, LIANG Gang

(Zhanjiang Branch of CNOOC Ltd., Zhanjiang 524057, Guangdong, China)

Abstract: Yinggehai-Qiongdongnan Basins are the major gas producers in the north of South China Sea. However, high content of CO₂ in some areas restricts the economic efficiency of natural gas exploration. Genesis, accumulation process and distribution pattern of CO₂ in natural gas are studied in this paper based on the geochemical characteristics of the natural gas as well as regional geological settings. CO₂ in the natural gases in the Yinggehai-Qiongdongnan Basins changes in a broad range in content and has quite complicated origin. There are three types of natural gas accumulation mechanisms controlling the distribution pattern of CO₂ in different areas. In the Yinggehai Basin, high content of CO₂ in natural gas is controlled by diapir structure and overpressure. In the Qiongdongnan Basin, however, high content of CO₂ is related generally to deep fractures and volcanic activities. Based on the distribution pattern of CO₂, favorable fields are proposed for exploration of high quality natural gas, such as the middle and deep layers in diapir-affected zones with early gas accumulation, abundant microfractures and good sealing conditions in the Yinggehai Basin, and the areas with good migration and sealing conditions but lack of volcanic activities and deep fractures in the Qiongdongnan Basin.

Key words: carbon dioxide; genesis; accumulation; distribution pattern; high quality of natural gas; Yinggehai-Qiongdongnan Basins