



## 珠江口盆地阳江东凹高含CO<sub>2</sub>油气藏的类型、成因及成藏过程

马宁, 熊万林, 龙祖烈, 朱俊章, 温华华, 杨兴业, 汪晓萌

### Types, genesis, and formation of CO<sub>2</sub>-rich reservoirs in the Yangjiangdong Sag, Pearl River Mouth Basin

MA Ning, XIONG Wanlin, LONG Zulie, ZHU Junzhang, WEN Huahua, YANG Xingye, and WANG Xiaomeng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022062201>

#### 您可能感兴趣的其他文章

##### Articles you may be interested in

#### 珠江口盆地阳江东凹始新统的源汇过程：碎屑锆石定年及物源示踪

Tracing source-to-sink process of the Eocene in the Eastern Yangjiang Sag, Pearl River Mouth Basin: Evidence from detrital zircon spectrum

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 124

#### 中国海域基岩油气藏特征及未来勘探方向

Characteristics of the recently bedrock hydrocarbon reservoir in China Seas and future exploration directions

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 151

#### 西湖凹陷Y构造花港组气藏特征及成藏主控因素

Characteristics of gas reservoir and controlling factors for gas accumulation in the Huagang Formation in Y Structure, Xihu Sag

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 174

#### 构造-沉积耦合过程的数值模拟：以南海北部阳江凹陷为例

Numerical modeling of the coupling between strike-slip faulting and sedimentation: A case from the Yangjiang Sag of northern South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 139

#### 南黄海崂山隆起二叠系砂岩储层特征及其油气勘探前景

Characteristics and hydrocarbon prospects of the Permian sandstone reservoirs of the Laoshan Uplift, South Yellow Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 181

#### 珠江口内伶仃洋晚第四纪黏土矿物组成特征及对源区气候变化的指示

Late Quaternary clay minerals in the inner Lingdingyang of the Pearl River Estuary, southern China: Implications for paleoclimate changes at the provenance

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 202



关注微信公众号，获得更多资讯信息

马宁,熊万林,龙祖烈,等.珠江口盆地阳江东凹高含 CO<sub>2</sub> 油气藏的类型、成因及成藏过程[J].海洋地质与第四纪地质,2023,43(1):118-127.  
MA Ning, XIONG Wanlin, LONG Zulie, et al. Types, genesis, and formation of CO<sub>2</sub>-rich reservoirs in the Yangjiangdong Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(1): 118-127.

# 珠江口盆地阳江东凹高含 CO<sub>2</sub> 油气藏的类型、成因及成藏过程

马宁,熊万林,龙祖烈,朱俊章,温华华,杨兴业,汪晓萌

中海石油(中国)有限公司深圳分公司,深圳 518067

**摘要:**通过对阳江东凹高含 CO<sub>2</sub> 油气藏的流体组分组成、P-T 相图、原油生物标志化合物、天然气组分及同位素、流体包裹体进行研究,分析了高含 CO<sub>2</sub> 油气藏的类型、成因及成藏过程。结果表明,阳江东凹高含 CO<sub>2</sub> 的油气藏分为 3 类:第一类为含 CO<sub>2</sub> 溶解气的常规油藏,第二类为含 CO<sub>2</sub> 溶解气的挥发性油藏,第三类为含溶解烃的 CO<sub>2</sub> 气藏。油气藏中原油主要为浅湖-半深湖相及半深湖-深湖相烃源岩成熟阶段的产物,烃类气均为原油伴生气,CO<sub>2</sub> 属于幔源型无机成因气。EP20-A 井原油的充注时期为 12~10.7 Ma,CO<sub>2</sub> 充注时期为 5.6~1.7 Ma。EP20-C 井存在两期原油充注及两期 CO<sub>2</sub> 充注,第一期原油充注时期为 14~6 Ma,为主要充注期,第二期原油充注时期为 4~0 Ma,第一期 CO<sub>2</sub> 的充注时期为 11~10 Ma,第二期 CO<sub>2</sub> 的充注时期为 5~1.5 Ma。根据 CO<sub>2</sub> 充注强度的相对大小,分别形成了 EP20-C 井含溶解烃的 CO<sub>2</sub> 气藏,EP20-A 井含 CO<sub>2</sub> 溶解气的挥发性油藏,EP20-B 井含 CO<sub>2</sub> 溶解气的常规油藏。

**关键词:**高含 CO<sub>2</sub> 油气藏;流体类型;油气成因;成藏过程;阳江东凹

中图分类号:P744

文献标识码:A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022062201

## Types, genesis, and formation of CO<sub>2</sub>-rich reservoirs in the Yangjiangdong Sag, Pearl River Mouth Basin

MA Ning, XIONG Wanlin, LONG Zulie, ZHU Junzhang, WEN Huahua, YANG Xingye, WANG Xiaomeng

Shenzhen Branch of CNOOC Ltd, Shenzhen 518067, China

**Abstract:** By studying the composition of the fluid wells, P-T phase diagram, crude oil biomarkers, natural gas components, isotopes and fluid inclusions of high CO<sub>2</sub> oil and gas reservoirs in the Yangjiangdong Sag, the types, genesis, and formation of CO<sub>2</sub>-rich reservoirs were analyzed. Results show that the CO<sub>2</sub>-rich reservoirs could be divided into three types: i.e., conventional reservoir with CO<sub>2</sub>-dissolved gas, volatile reservoir with high CO<sub>2</sub> dissolved gas, and CO<sub>2</sub> gas reservoirs containing dissolved hydrocarbons. The crude oil in the reservoir is mainly originated from shallow-semi-deep lake facies and semi-deep-deep lake facies in the mature stage. The hydrocarbon gas is crude oil associated, and CO<sub>2</sub> belongs to mantle-derived inorganic gas. The charging period in EP20-A well is 12~10.7 Ma, and that of CO<sub>2</sub> is 5.6~1.7 Ma. Two stages of crude oil charging and two stages of CO<sub>2</sub> charging in EP20-C well were recognized. The first stage of crude oil charging is 14~6 Ma, which is the main charging period; and the second stage is 4~0 Ma. The first stage of CO<sub>2</sub> charging period is 11~10 Ma, and the second is 5~1.5 Ma. The relative magnitude of CO<sub>2</sub> charging intensity show that the CO<sub>2</sub> gas reservoir containing dissolved hydrocarbon was formed in well EP20-C, volatile reservoir containing CO<sub>2</sub> dissolved gas was formed in well EP20-A, and conventional reservoir containing CO<sub>2</sub> dissolved gas was formed in well EP20-B.

**Key words:** CO<sub>2</sub>-rich reservoirs; fluid type; origin of oil and gas; pool-forming process; the Yangjiangdong Sag

在珠江口盆地东部及西部普遍存在高含 CO<sub>2</sub> 的油气藏<sup>[1-12]</sup>,前人对珠江口盆地 CO<sub>2</sub> 的成因及分布规律已取得了一些认识<sup>[1-4,7-11]</sup>,认为火山幔源型 CO<sub>2</sub> 主要分布于珠江口盆地坳陷边缘及凸起附近的深大断裂处,这类 CO<sub>2</sub> 的运聚及分布主要受控

于地壳深部的幔源火山活动及与幔源型火山活动沟通的深大断裂的发育程度。王振峰指出珠江口盆地东部普遍存在 CO<sub>2</sub> 充注驱替早期油藏圈闭中的油气导致油气重新组合,最终形成现今的含 CO<sub>2</sub> 油藏、含油的 CO<sub>2</sub> 气藏和纯 CO<sub>2</sub> 气藏<sup>[9]</sup>。在断

资助项目:“南海大中型天然气田形成条件、勘探潜力与突破方向”之课题 3“南海东部大中型天然气田勘探潜力与突破方向”

作者简介:马宁(1988—),女,工程师,主要从事油气地球化学研究,E-mail: mndd2007@163.com

收稿日期:2022-06-22; 改回日期:2022-07-11. 周立君编辑

裂附近的构造圈闭中, CO<sub>2</sub> 容易富集并驱替圈闭中已聚集的油气, 形成新的油气藏<sup>[9]</sup>。随着阳江凹陷勘探开发的深入, 发现阳江东凹多口井油气藏中富含 CO<sub>2</sub>。前人对阳江凹陷的研究工作主要侧重于凹陷的构造、沉积特征及油气成藏条件<sup>[13-15]</sup>, 而对于阳江凹陷高含 CO<sub>2</sub> 油气藏的流体组分和性质、油气成因及 CO<sub>2</sub> 与烃类流体的动态成藏过程还缺乏系统分析, 本次研究通过对阳江东凹高含 CO<sub>2</sub> 油气藏的流体组分、P-T 相图、原油生物标志化合物、天然气组分及同位素、流体包裹体的分析, 总结了阳江东凹高含 CO<sub>2</sub> 油气藏的类型、CO<sub>2</sub> 与烃类的成因及来源及高含 CO<sub>2</sub> 油气藏的成藏过程, 以期对阳江东凹油气勘探和开发提供理论依据。

## 1 区域地质背景

阳江东凹位于珠江口盆地珠一坳陷和珠三坳陷的交汇处, 处于阳江—统大走滑断裂带之上, 北部毗邻海南隆起和阳春凸起, 东接恩平凹陷, 南接阳江低凸起和神狐隆起, 洼陷呈 NE 走向, 面积约 940 km<sup>2</sup>。阳江东凹自西向东依次分为阳江 24 洼、恩平 20 洼及恩平 21 洼 3 个次洼(图 1)。凹陷经历了晚白垩世—早渐新世裂陷阶段、晚渐新世—中中新世拗陷阶段和晚中新世至今的新构造运动阶段, 凹陷内从下到上地层依次为始新统文昌组、始新统恩平组、渐新统珠江组、下中新统珠江组、中中新统韩江组、上中新统粤海组、上新统万山组及第四系<sup>[13]</sup>。文昌组、恩平组为主要烃源岩, 珠海组、珠江组及韩江组下段为主要储层。

## 2 高含 CO<sub>2</sub> 油气藏的类型

CO<sub>2</sub> 作为含油气盆地中常见的一种伴生气, 在天然气中所占的摩尔百分含量通常低于 5%<sup>[16]</sup>。阳江东凹在已发现的油气藏中出现了高含 CO<sub>2</sub> 的特征, 部分油气藏中 CO<sub>2</sub> 在天然气中所占的摩尔百分含量超过了 20%, 根据油气藏的流体类型及 CO<sub>2</sub> 的赋存相态将阳江东凹高含 CO<sub>2</sub> 的油气藏分为 3 类: 第一类为 EP20-B 井 ZJ320 层含 CO<sub>2</sub> 溶解气的常规油藏(CO<sub>2</sub> 含量为 34.6%~37.3%), 第二类为 EP20-A 井 ZJ550 层含 CO<sub>2</sub> 溶解气的挥发性油藏(CO<sub>2</sub> 含量为 52%), 第三类为 EP20-C 井 WC341 层含溶解烃的 CO<sub>2</sub> 气藏(CO<sub>2</sub> 含量为 80%)。

分别对 EP20-A 井 ZJ550 层、EP20-B 井 ZJ320 层、EP20-C 井 WC341 层所采集的 PVT 样进行了油气藏流体高压物性分析, 利用实验测试获得的油气藏流体组分组成及 P-T 相图研究表明(表 1、图 2), EP20-A 井 ZJ550 层 2 693.5 m 气油比为 372.2 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>, 地层原油密度为 0.5993 g/cm<sup>3</sup>, 死油密度为 0.7898 g/cm<sup>3</sup>(20 °C, 0.101 MPa)。根据气油比及原油密度划分油气藏流体类型的标准<sup>[17]</sup>, 油气藏流体类型为挥发油, 闪蒸气组成中 CO<sub>2</sub> 占 51.8%, CH<sub>4</sub> 占 25.1%, 井流体组成中 C<sub>1</sub>+N<sub>2</sub> 含量为 21.76%, C<sub>2</sub>-C<sub>6</sub>+CO<sub>2</sub> 含量为 56.06%, C<sub>7+</sub> 含量为 22.18%, 根据井流体 C<sub>1</sub>+N<sub>2</sub>、C<sub>2</sub>-C<sub>6</sub>+CO<sub>2</sub>、C<sub>7+</sub> 组成的三角图来划分油气藏流体类型, EP20-A 处于挥发性油藏的范围(图 3)。井流流体 P-T 相图判识流体类型最为直观可靠, EP20-A 井的流体相态点位于临界点的左侧, 地层压力为 26.2 MPa, 高于饱和压力 23.39 MPa, 流体具有

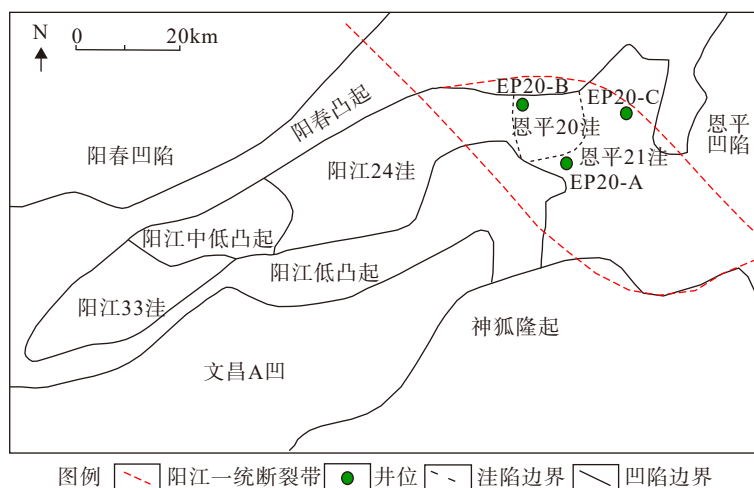


图 1 珠江口盆地阳江凹陷构造单元划分<sup>[13]</sup>

Fig.1 Tectonic division and stratigraphic age representation in Yangjiang Sag, Pearl River Mouth Basin<sup>[13]</sup>

表1 油气藏流体高压物性分析数据  
Table 1 Data sheet of high pressure physical property analysis of oil and gas reservoir fluid

井号	深度/m	层段	气油比 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	体积系数	地层 温度 /°C	地层 压力 /MPa	地层原油 密度 (g/cm <sup>3</sup> )	死油密度 (20℃时) (g/cm <sup>3</sup> )	井流体组成/mol%			闪蒸气组成/mol%	
									C <sub>1</sub> +N <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> -C <sub>6</sub> +CO <sub>2</sub>	C <sub>7+</sub>	C <sub>1</sub>	CO <sub>2</sub>
EP20-A	2693.5	珠江组下段ZJ550	372.2	2.2845	119.4	26.2	0.5993	0.7898	21.76	56.06	22.18	25.1	51.8
EP20-B	2160	珠江组上段ZJ320	18	1.071	95.33	20.32	0.87	0.9132	9.27	13.4	77.33	35.52	37.28
EP20-C	3271.5	文三段WC341	4472.1	0.0034	142.4	37.09		0.8098	13.21	84.04	2.75	12.7	80

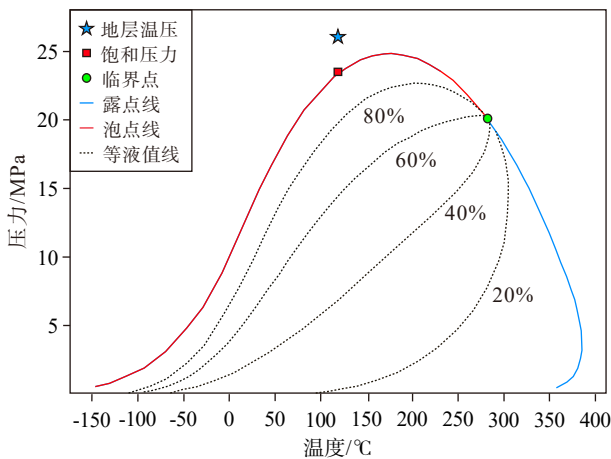


图2 EP20-A井流体P-T相图

Fig.2 Diagram of fluid P-T phase in well EP20-A

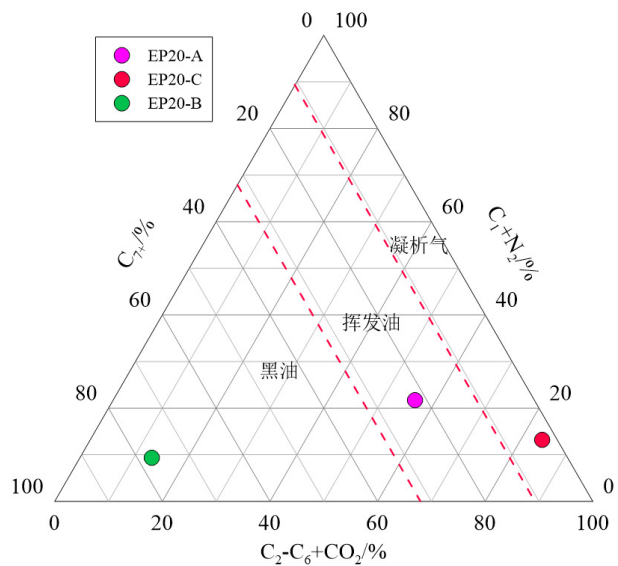


图3 油气藏流体类型图

Fig.3 Diagram of fluid type of oil and gas reservoir

高体积系数、高饱和压力、高气油比、高收缩性(地层原油体积收缩率为56.23%)等特点,为典型的挥发性油藏的特征。

EP20-B井ZJ320层2160 m气油比为18 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>,地层原油密度为0.87 g/cm<sup>3</sup>,死油密度为0.9132 g/cm<sup>3</sup>(20℃, 0.101 MPa),按照气油比及原油密度划分,油气藏流体类型为普通黑油,闪蒸气组成中CO<sub>2</sub>占37.28%,CH<sub>4</sub>占35.52%,井流体组成中C<sub>1</sub>+N<sub>2</sub>含量为9.27%,C<sub>2</sub>-C<sub>6</sub>+CO<sub>2</sub>含量为13.4%,C<sub>7+</sub>含量为77.33%,根据PVT井流体C<sub>1</sub>+N<sub>2</sub>、C<sub>2</sub>-C<sub>6</sub>+CO<sub>2</sub>、C<sub>7+</sub>组成的三角图来划分油气藏流体类型(图3),EP20-B井在三角图中处于油藏的范围。

EP20-C井WC341层闪蒸气组成中CO<sub>2</sub>占80%,CH<sub>4</sub>仅占12.7%,戴金星将CO<sub>2</sub>在天然气中的含量高于60%的气藏定义为CO<sub>2</sub>气藏<sup>[18]</sup>,因此EP20-C井WC341层属于CO<sub>2</sub>气藏。3271.5 m气油比为4472 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>,死油密度为0.8098 g/cm<sup>3</sup>(20℃, 0.101 MPa),按照气油比及原油密度划分的油气藏流体类型为凝析气,井流体组成中C<sub>1</sub>+N<sub>2</sub>含量为13.21%,C<sub>2</sub>-C<sub>6</sub>+CO<sub>2</sub>的含量为84.04%,C<sub>7+</sub>的含量为2.75%,在油气藏流体类型划分三角图中处于凝析气的范围(图3)。

### 3 油气成因及来源

#### 3.1 原油母质来源

分别对EP20-A井ZJ550层、EP20-B井ZJ320层、EP20-C井WC341层的油样进行了全油色谱、饱和烃色谱、饱和烃色质及芳烃色质分析。前人对珠一坳陷油气成因来源的研究表明,C<sub>30</sub> 4-甲基甾烷、双杜松烷、奥利烷及Ts/Tm的比值是进行油源对比的有效生物标志化合物参数<sup>[6,19-21]</sup>。淡水湖泊中的C<sub>30</sub> 4-甲基甾烷主要来源于沟鞭藻类,珠一坳陷的原油及文昌组烃源岩中普遍含有高丰度的C<sub>30</sub> 4-甲基甾烷。双杜松烷在东南亚地区古、新近系沉积物和原油中分布广泛,是东南亚高等植物树脂输入的标志性化合物<sup>[20]</sup>,奥利烷被认为是白垩纪或更年轻时代陆源高等植物输入的标志性化合物,Ts形成于富含黏土矿物的沉积物中,Ts/Tm比值受成熟度和烃源岩沉积环境的影响<sup>[22]</sup>。阳江东凹文昌组发育浅湖-半深湖相及半深湖-深湖相两种类型的烃源岩,文昌

组浅湖-半深湖相烃源岩生物标志化合物具有高 C<sub>30</sub> 4-甲基甾烷、高双杜松烷(T)、高奥利烷(OL)、高 Ts 及高重排霍烷的特征,文昌组半深湖-深湖相烃源岩生物标志化合物具有高 C<sub>30</sub> 4-甲基甾烷、低双杜松烷、低奥利烷、低 Ts 及低重排霍烷的特征(图 4)。EP20-B 井 ZJ320 层 2160 m 油藏及 EP20-A 井 ZJ550 层 2693.5 m 挥发油藏中原油生物标志化合物具有高 C<sub>30</sub> 4-甲基甾烷、高双杜松烷、高奥利烷、高 Ts 的特征(图 4), C<sub>30</sub> 4-甲基甾烷/C<sub>29</sub> 规则甾烷比值分别为 1.2、1.3, 双杜松烷 T/C<sub>30</sub> 霍烷比值分别为 1.2、7.2, Ts/Tm 比值分别为 1.8、2.5, 与文昌组浅湖-半深湖相烃源岩生物标志化合物指纹特征具有相似性, 认为该类原油主要来源于浅湖-半深湖相烃源岩。根据甲基菲指数 MPI 计算出的 EP20-B 井及 EP20-A 井原油的成熟度分别为 0.92%、0.89%, 为烃源岩成熟阶段的产物。EP20-C 井 WC341 层 3271.5 m 的 CO<sub>2</sub> 气藏中原油生物标志化合物具有高 C<sub>30</sub> 4-甲基甾烷、低双杜松烷、低奥利烷、低 Ts 的特征(图 4), C<sub>30</sub> 4-甲基甾烷/C<sub>29</sub> 规则甾烷比值为 2.4, 双杜松烷 T/C<sub>30</sub> 霍烷比值为 0.3, Ts/Tm 比值为 1.2, 与文昌组半深湖-深湖相烃源岩生物标志化合物指纹特征具有相似性, 认为该类原油主要来源于半深湖-深湖相

烃源岩。甲基菲指数 MPI 计算出的原油成熟度为 0.93%, 说明 EP20-C 井 CO<sub>2</sub> 气藏中的原油为烃源岩成熟阶段的产物。

### 3.2 天然气成因判识

EP20-A 井 ZJ550 挥发油藏、EP20-B 井 ZJ320 油藏、EP20-C 井 WC341 的 CO<sub>2</sub> 气藏中烃类气以甲烷为主, 甲烷含量分别为 25.13%、38.28%、13.23%, 其次为乙烷, 非烃气以 CO<sub>2</sub> 为主(表 2)。EP20-A 井挥发油藏、EP20-B 井油藏、EP20-C 井 CO<sub>2</sub> 气藏中烃类气体干燥系数分别为 57%、83%、67%, 依据烃类气体组分特征判识烃类气为成熟原油伴生气(图 5)。EP20-B 井油藏中  $\delta^{13}C_1$  值为 -41.41‰,  $\delta^{13}C_2$  为 -27.83‰, EP20-C 井气藏中  $\delta^{13}C_1$  值为 -46.93‰,  $\delta^{13}C_2$  为 -32.5‰, 参考戴金星提出的碳同位素划分天然气成因类型的标准<sup>[23]</sup>, 认为 EP20-B 井油藏中烃类气为混合成因气, EP20-C 井气藏中烃类气为腐泥型原油伴生气(图 6)。EP20-A 井的天然气仅有组分数据, 无同位素数据, 无法根据同位素确定天然气及 CO<sub>2</sub> 的成因类型, 而前述 EP20-A 井的原油主要来源于浅湖-半深湖相烃源岩, 根据原油的母质来源特征推测 EP20-A 井的天然气为混合成因气。

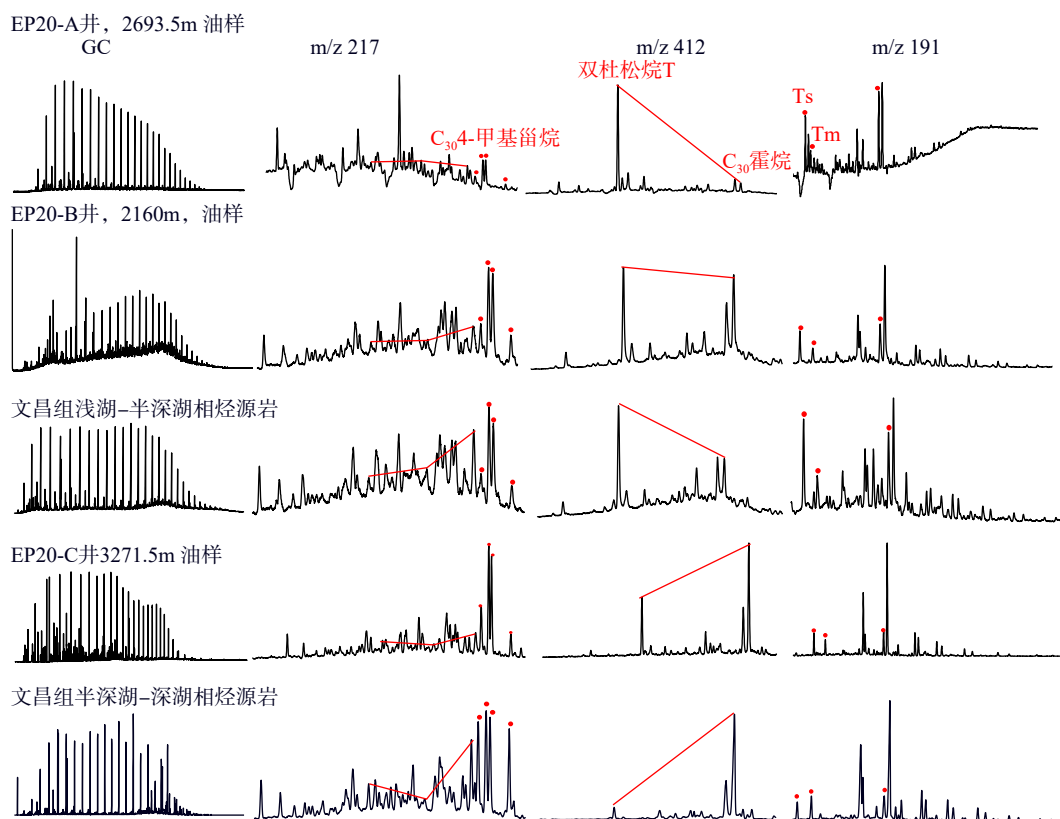


图 4 原油及烃源岩生物标志化合物指纹特征对比

Fig.4 Fingerprint characteristics of biomarkers in crude oil and source rocks

表2 天然气组分及同位素数据  
Table 2 Composition and isotopes of natural gas

井号	深度/m	层位	样品类型	组分含量/%				干燥系数 /%	$\delta^{13}C_1$ /‰	$\delta^{13}C_2$ /‰	$\delta^{13}C_{CO_2}$ /‰	$^{40}Ar/^{36}Ar$	$^3He/^4He$	CO <sub>2</sub> 生成年龄 /Ma
				C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>							
EP20-A	2693.5	珠江组下段ZJ550	PVT闪蒸气	25.13	6.83	5.47	51.79	57						
EP20-B	2160	珠江组上段ZJ320	PVT转出气	38.28	4.47	1.54	34.55	83	-41.41	-27.83	-6.04			
EP20-C	3271.5	文昌组WC341	PVT转出气	13.23	2.27	1.62	80.20	67	-46.93	-32.50	-5.57	493	3.40E-06	8.90

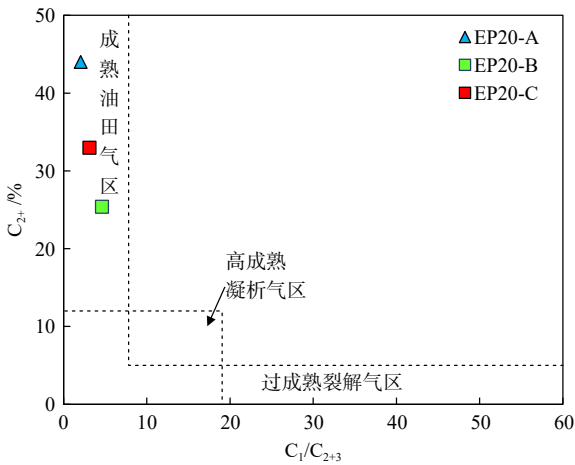


图5 天然气组分判别成因类型

Fig.5 Discrimination of genetic types by natural gas components

EP20-A井与EP20-B井的天然气成因类型相似,都来源于浅湖-半深湖相烃源岩生成的混合成因气。EP20-A井烃类气的干燥系数与EP20-B井存在差异,这可能是由于EP20-A井烃类气的成熟度低于EP20-B井,因此EP20-A井的干燥系数更低。EP20-C井3271.5 m气藏中CO<sub>2</sub>摩尔百分含量为80.2%, $\delta^{13}C_{CO_2}$ 值为-5.57‰, $^3He/^4He$ 值为 $3.4 \times 10^{-6}$ ,根据CO<sub>2</sub>组分、碳同位素及 $^3He/^4He$ 值判识,认为EP20-C井CO<sub>2</sub>气体属于幔源型无机成因气(图7)。根据EP20-C井CO<sub>2</sub>中稀有气体 $^{40}Ar/^{36}Ar$ 计算CO<sub>2</sub>生成年龄<sup>[10]</sup>: $t=[0.466 \times (^{40}Ar/^{36}Ar) \times 140] \times 10^6$ ,CO<sub>2</sub>生成年龄为8.9 Ma。EP20-B井PVT转出气中CO<sub>2</sub>摩尔百分含量为34.55%,而研究表明有机成因的CO<sub>2</sub>含量通常低于15%,且 $\delta^{13}C_{CO_2}$ 值小于-10‰,无机成因CO<sub>2</sub>含量一般会高于15%,且 $\delta^{13}C_{CO_2}$ 值大于-8‰,EP20-

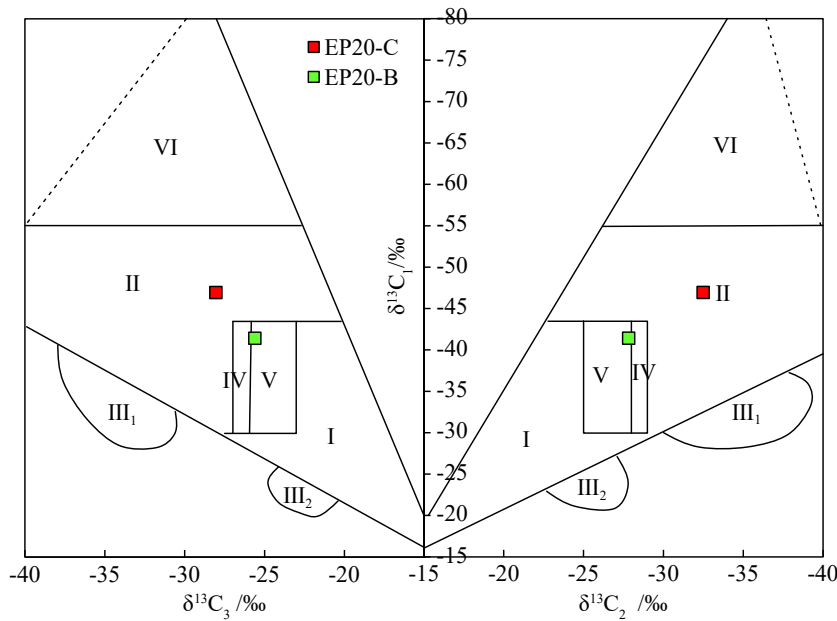
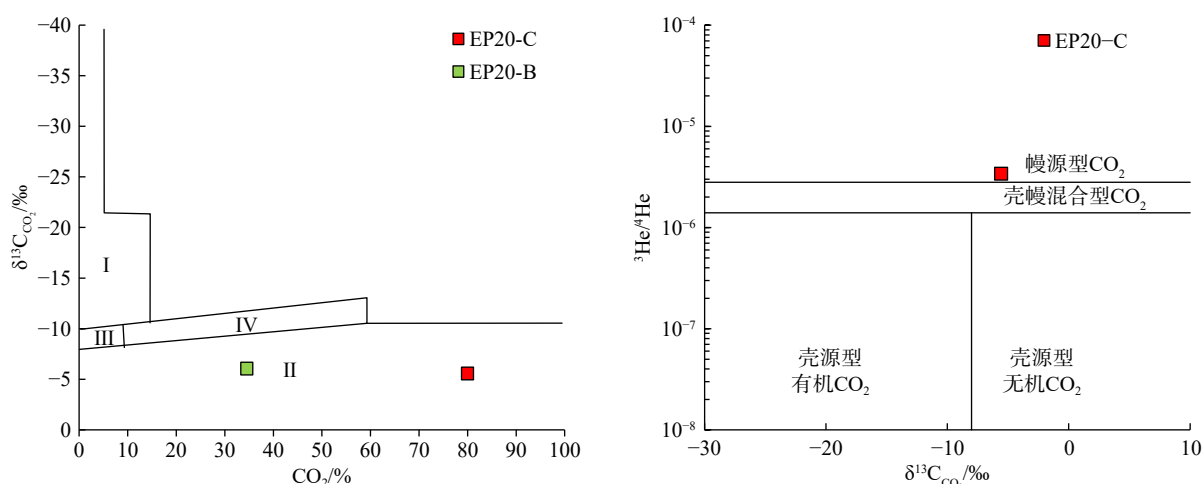


图6 碳同位素判识天然气成因类型

I: 煤成气区, II: 油型气区, III: 碳同位素倒转混合气区, IV: 煤成气和油型气区, V: 煤成气、油型气和混合气区, VI: 生物气和亚生物气区。

Fig.6 Discrimination of genetic types of natural gas by carbon isotope

I: coal-derived gas; II: oil-associated gas; III: mixed gas with reversed carbon isotope sequence; IV: coal-derived gas and(or) oil-associated gas; V: coal-derived gas, oil-associated gas and mixed gas, VI: biogenic and sub-biogenic gas.

图 7 CO<sub>2</sub> 成因类型判别

I: 有机成因二氧化碳区, II: 无机成因二氧化碳区, III: 有机成因与无机成因二氧化碳共存区, IV: 有机、无机成因二氧化碳混合气区。

Fig.7 Discrimination of CO<sub>2</sub> genetic types

I: Organic CO<sub>2</sub>, II: inorganic CO<sub>2</sub>, III: organic CO<sub>2</sub> or inorganic CO<sub>2</sub>, IV: organic and inorganic mixed CO<sub>2</sub>.

B 井的 CO<sub>2</sub> 为无机成因。EP20-A 井仅有 CO<sub>2</sub> 组分数据, 天然气中 CO<sub>2</sub> 摩尔百分含量为 51.79%, 而有机成因的 CO<sub>2</sub> 含量通常低于 15%, 推测 EP20-A 井 CO<sub>2</sub> 为无机成因气。

## 4 成藏过程

### 4.1 油气充注期次及时间

对 EP20-A 井 2494、2693.5 m, EP20-B 井 2162 m 及 EP20-C 井 3265~3294.5 m 井壁心及岩屑样品进行了流体包裹体观察。显微观察显示(图 8a-e), 在 EP20-A 井石英颗粒内成岩裂纹中检测到大量发黄绿色荧光油包裹体, 在石英颗粒间孔隙中检测到大量黄褐色沥青。对与油包裹体相伴生的盐水包裹体均一温度进行了分析, 均一温度分布于 86.3~

89.8 °C(表 3)。在石英颗粒内成岩裂纹中检测到大量 CO<sub>2</sub> 包裹体, 与 CO<sub>2</sub> 包裹体同期的盐水包裹体均一温度分布范围为 106.2~113 °C(表 3)。根据与油、CO<sub>2</sub> 包裹体相伴生的盐水包裹体均一温度并结合软件模拟出的标有等温线的单井埋藏史图, 确定 EP20-A 井存在一期原油及一期 CO<sub>2</sub> 充注, 原油的充注时期为 12~10.7 Ma, 无机成因 CO<sub>2</sub> 充注时期为 5.6~1.7 Ma(图 9a)。

在 EP20-C 井石英颗粒内成岩裂纹中检测到大量发蓝色—蓝绿色荧光含沥青油包裹体及 CO<sub>2</sub> 包裹体(图 8f-j), 根据与油、CO<sub>2</sub> 包裹体相伴生的盐水包裹体均一温度的分析(表 3), 结合标有等温线的单井埋藏史图, 认为 EP20-C 井存在两期原油充注, 两期 CO<sub>2</sub> 充注, 第一期原油充注时期为 14~6 Ma, 为主要充注期, 第二期原油充注时间为 4~0 Ma, 第一期 CO<sub>2</sub> 的充注时期为 11~10 Ma, 第二期 CO<sub>2</sub> 的

表 3 盐水包裹体均一温度数据

Table 3 The homogenized temperature of aqueous inclusions

井名	深度/m	盐水包裹体均一温度/°C	共生类型	时间/Ma
EP20-A	2494	86.3~89.8	油	12~10.7
	2693.5	106.2~113.1	CO <sub>2</sub>	5.6~1.7
EP20-C	3265~3280	102~116.7, 122.7~124.4	油	12~6, 1.5~0
	3271.5	102.4~117.5, 120~126.6	油	12~6, 4~0
	3280.9	96.7~109.6, 113.6~117.7	油	14~10, 8~6
	3294.5	106.9~108.3, 118.5~122.2	CO <sub>2</sub>	11~10, 5~1.5
EP20-B	2162	88.3~96.6	油	3~0

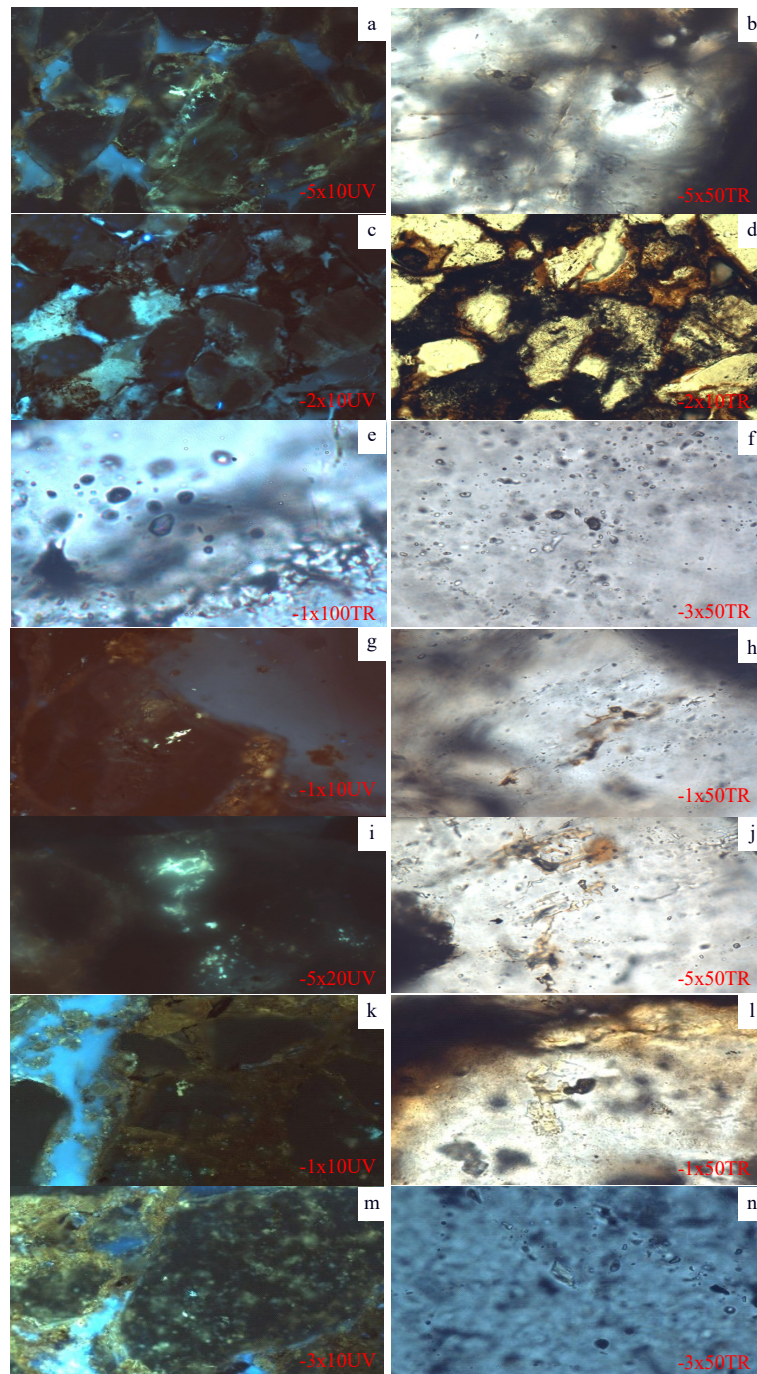


图8 EP20-A井、EP20-C井及EP20-B井流体包裹体显微观察照片

UV表示荧光, TR表示偏光, 5×10表示显微镜物镜放大倍数; a-b: EP20-A井2494 m石英颗粒内成岩裂纹中检测到大量发黄绿色荧光油包裹体; c-d: EP20-A井2693.5 m石英颗粒间孔隙中检测到大量黄褐色沥青; e: EP20-A井2693.5 m石英颗粒内成岩裂纹中检测到CO<sub>2</sub>包裹体; f: EP20-C井3294.5 m石英颗粒内成岩裂纹中检测到CO<sub>2</sub>包裹体; g-j: EP20-C井3271.5 m石英颗粒内成岩裂纹中检测到大量发蓝色-蓝绿色荧光含沥青油包裹体; k-n: EP20-B井2162 m石英颗粒内裂纹中检测到发黄绿色、蓝绿色荧光油包裹体。

Fig.8 Micrograph of fluid inclusion in wells EP20-A, EP20-C, and EP20-B

充注时期为5~1.5 Ma(图9b)。

EP20-B井石英颗粒内成岩裂纹中检测到发黄绿色、蓝绿色荧光油包裹体(图8k-m),但未检测到CO<sub>2</sub>包裹体。与油包裹体相伴生的盐水包裹体均一温度分布于88.3~96.6℃(表3),根据与油包裹体相伴生的盐水包裹体均一温度,结合标有等温线

的单井埋藏史图,认为EP20-B井存在一期原油充注,原油充注时间为3~0 Ma(图9c),CO<sub>2</sub>的充注时间无法确定。

#### 4.2 油气藏成因模式

前人研究表明当温度高于31.26℃、压力大于



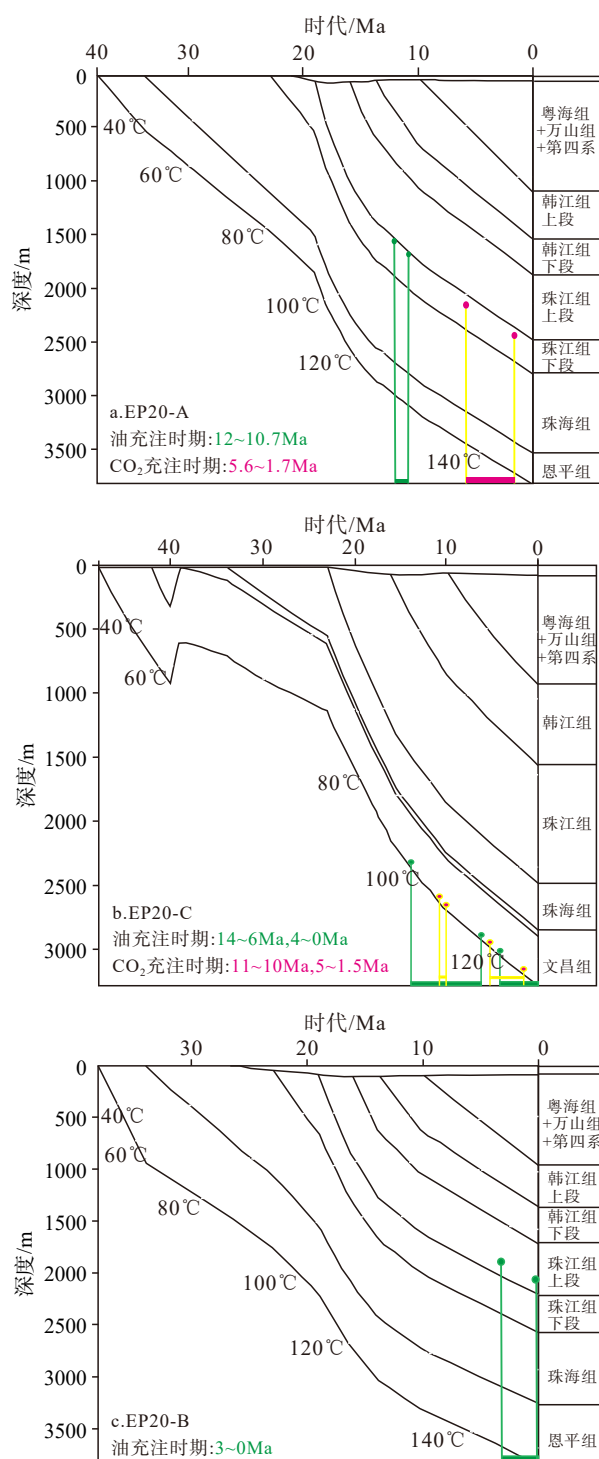


图 9 油气充注期次及时间

Fig.9 Period and age of oil and gas accumulation

7.2 MPa, CO<sub>2</sub> 不再是气态, 而是达到一种“密度接近于流体、粘度接近于气体”的超临界状态, 在超临界状态下 CO<sub>2</sub> 对原油中烃类的萃取和抽提能力极强, 通常能萃取原油中碳数小于 C<sub>20</sub> 的烃类组分, 造成 CO<sub>2</sub> 内轻烃富集、重组分残留底部<sup>[16]</sup>。CO<sub>2</sub> 和原油混合并不是一种流体对另外一种流体简单的驱替, 而是原油和 CO<sub>2</sub> 动态互溶的过程, 原油对 CO<sub>2</sub> 进行

溶解, 同时 CO<sub>2</sub> 对原油中的烃类进行萃取, 最终形成现今的含 CO<sub>2</sub> 的油藏、含油的 CO<sub>2</sub> 气藏及 CO<sub>2</sub> 气藏<sup>[9,16]</sup>。表 1 中 EP20-A 井 ZJ550 层挥发油中原油密度为 0.7898 g/cm<sup>3</sup>, EP20-C 井 CO<sub>2</sub> 气藏中溶解烃的密度为 0.8098 g/cm<sup>3</sup>, 均属于轻质油, 体现了 CO<sub>2</sub> 萃取原油中轻质组分的特征。

阳江东凹文昌组半深湖-深湖相烃源岩生成的成熟原油 (R<sub>C</sub> 为 0.93%) 在 14~6 Ma 及 4~0 Ma 通过砂体输导运移至 EP20-C 井 WC341 层成藏, 无机幔源成因的 CO<sub>2</sub> 在 11~10 Ma 及 5~1.5 Ma 充注进入圈闭, 由于 CO<sub>2</sub> 量较充足, 在充注的过程中不断萃取原油中的烃类, 原始油藏最终转化为含溶解烃的 CO<sub>2</sub> 气藏, 该气藏中 CO<sub>2</sub> 的摩尔百分含量最高, 后期 CO<sub>2</sub> 气体萃取原油中的烃类而导致的重组分沉淀形成沥青质砂岩储层及含沥青油包裹体。

在 12~10.7 Ma 阳江东凹文昌组浅湖-半深湖相烃源岩生成的成熟原油 (R<sub>C</sub> 为 0.89%) 通过油源断裂垂向运移至 EP20-A 井 ZJ550 层聚集成藏, 在 5.6~1.7 Ma 无机成因的 CO<sub>2</sub> 进入圈闭后与原油发生动态互溶, CO<sub>2</sub> 的充注强度稍弱于 EP20-C 井, 最终形成了挥发性油藏, 该挥发性油藏中 CO<sub>2</sub> 的摩尔百分含量中等。CO<sub>2</sub> 气体进入油藏后萃取原油中的烃类, 而导致重组分沉淀形成沥青, 在 EP20-A 井砂岩储层石英颗粒间孔隙中检测到大量黄褐色沥青。

在 3~0 Ma 阳江东凹文昌组浅湖-半深湖相烃源岩生成的成熟原油 (R<sub>C</sub> 为 0.92%) 通过油源断裂垂向运移至 EP20-B 井 ZJ320 层聚集成藏, 晚期无机成因的 CO<sub>2</sub> 充注进入圈闭, CO<sub>2</sub> 的充注强度最弱, 油藏中 CO<sub>2</sub> 的摩尔百分含量最低, 少量 CO<sub>2</sub> 溶解于油中, 最终形成了含 CO<sub>2</sub> 的常规油藏。

## 5 结论

(1) 阳江东凹在已发现的油气藏中出现了高含 CO<sub>2</sub> 的特征, 高含 CO<sub>2</sub> 的油气藏分为 3 类: 第一类为 EP20-B 井 ZJ320 层含 CO<sub>2</sub> 溶解气的常规油藏 (CO<sub>2</sub> 含量为 34.6%~37.3%), 第二类为 EP20-A 井 ZJ550 层含 CO<sub>2</sub> 溶解气的挥发性油藏 (CO<sub>2</sub> 含量为 52%), 第三类为 EP20-C 井 WC341 层含溶解烃的 CO<sub>2</sub> 气藏 (CO<sub>2</sub> 含量为 80%)

(2) 对这三类高含 CO<sub>2</sub> 油气藏中的油样及气样的地化分析表明, 油藏及挥发油藏中原油主要来源于浅湖-半深湖相烃源岩, CO<sub>2</sub> 气藏中原油主要来源于半深湖-深湖相烃源岩, 原油均属于烃源岩成熟阶

段的产物, 烃类气为成熟原油伴生气,  $\text{CO}_2$  属于幔源型无机成因气。

(3) EP20-A 井存在一期原油及一期  $\text{CO}_2$  充注, 原油的充注时期为 12~10.7 Ma,  $\text{CO}_2$  充注时期为 5.6~1.7 Ma。EP20-C 井存在两期原油充注, 两期  $\text{CO}_2$  充注, 第一期原油充注时期为 14~6 Ma, 为主要充注期, 第二期原油充注时间为 4~0 Ma, 第一期  $\text{CO}_2$  的充注时期为 11~10 Ma, 第二期  $\text{CO}_2$  的充注时期为 5~1.5 Ma。EP20-B 井存在一期原油充注, 充注时间为 3~0 Ma。

(4)  $\text{CO}_2$  充注进入圈闭后, 原油和  $\text{CO}_2$  发生动态互溶, 根据  $\text{CO}_2$  充注强度的相对大小, 分别形成了 EP20-C 井含溶解烃的  $\text{CO}_2$  气藏、EP20-A 井高含  $\text{CO}_2$  溶解气的挥发性油藏、EP20-B 井含  $\text{CO}_2$  溶解气的常规油藏。

### 参考文献 (References)

- [1] 何家雄, 祝有海, 黄霞, 等. 南海北部边缘盆地不同类型非生物成因  $\text{CO}_2$  成因成藏机制及控制因素[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(6): 935-942. [HE Jiexiong, ZHU Youhai, HUANG Xia, et al. Accumulated mechanisms for different genetic types of non-biological  $\text{CO}_2$  and controlling factors in north marginal basins, South China Sea [J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(6): 935-942.]
- [2] 何家雄, 祝有海, 崔莎莎, 等. 南海北部边缘盆地  $\text{CO}_2$  成因及运聚规律与资源化利用思路[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(4): 488-496. [HE Jiexiong, ZHU Youhai, CUI Shasha, et al. Origin, migration and accumulation of  $\text{CO}_2$  and its resource utilization in marginal basin, northern South China Sea [J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 20(4): 488-496.]
- [3] 何家雄, 马文宏, 陈胜红, 等. 南海北部边缘盆地非烃气分布及形成的地质条件与控制因素[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(2): 95-104. [HE Jiexiong, MA Wenhong, CHEN Shenghong, et al. Non-hydrocarbon gas distribution and its geological conditions and controlling factors in the marginal basin of northern South China Sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2011, 31(2): 95-104.]
- [4] 向凤典. 珠江口盆地(东部)的  $\text{CO}_2$  气藏及其对油气聚集的影响[J]. 中国海上油气: 地质, 1994(3): 13-20. [XIANG Fengdian. Carbon dioxide reservoir and its significance to hydrocarbon accumulation in eastern Pearl River Mouth Basin [J]. China Offshore Oil and Gas: Geology, 1994(3): 13-20.]
- [5] 张向涛, 彭光荣, 朱定伟, 等. 珠江口盆地恩平凹陷  $\text{CO}_2$  成藏特征与成藏过程[J]. 大地构造与成矿学, 2021, 45(1): 211-218. [ZHANG Xiangtao, PENG Guangrong, ZHU Dingwei, et al. Characteristics and processes of  $\text{CO}_2$  accumulation in the Enping Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2021, 45(1): 211-218.]
- [6] 熊万林, 朱俊章, 杨兴业, 等. 恩平凹陷北部隆起构造带油气成因来源及成藏过程研究[J]. 中国海上油气, 2020, 32(1): 54-65. [XIONG Wanlin, ZHU Junzhang, YANG Xingye, et al. Study on the genetic sources and accumulation processes of oil and gas in the north uplift structural belt of Enping Sag [J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32(1): 54-65.]
- [7] 何家雄, 夏斌, 刘宝明, 等. 中国东部及近海陆架盆地  $\text{CO}_2$  成因及运聚规律与控制因素研究[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(4): 42-49. [HE Jiexiong, XIA Bin, LIU Baoming, et al. Origin, migration and accumulation of  $\text{CO}_2$  in East China and offshore shelf basins [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(4): 42-49.]
- [8] 王振峰, 何家雄, 裴秋波. 莺-琼盆地和珠江口盆地西部  $\text{CO}_2$  成因及运聚分布特征[J]. 中国海上油气(地质), 2003(5): 293-297. [WANG Zhenfeng, HE Jiexiong, PEI Qiubo. The origin and migration-accumulation features of  $\text{CO}_2$  in Ying-Qiong basin and the western Pearl River Mouth Basin [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 2003(5): 293-297.]
- [9] 王振峰, 何家雄, 张树林, 等. 南海北部边缘盆地  $\text{CO}_2$  成因及充注驱油的石油地质意义[J]. 石油学报, 2004, 25(5): 48-53. [WANG Zhenfeng, HE Jiexiong, ZHANG Shulin, et al. Genesis of carbon dioxide and geological significance for carbon dioxide infilling and oil displacement in the northern marginal basin of South China Sea [J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(5): 48-53.]
- [10] 陈红汉, 米立军, 刘妍鹤, 等. 珠江口盆地深水区  $\text{CO}_2$  成因、分布规律与风险带预测[J]. 石油学报, 2017, 38(2): 119-134. [CHEN Honghan, MI Lijun, LIU Yanhua, et al. Genesis, distribution and risk belt prediction of  $\text{CO}_2$  in deep-water area in the Pearl River Mouth Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(2): 119-134.]
- [11] 雷川, 罗静兰, 马永坤, 等. 珠江口盆地白云凹陷及其周缘  $\text{CO}_2$  分布与控制因素分析与启示[J]. 矿物岩石, 2017, 37(3): 97-106. [LEI Chuan, LUO Jinglan, MA Yongkun, et al. Distribution of carbon dioxide in Baiyun Sag and its periphery, Pearl River Mouth Basin [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2017, 37(3): 97-106.]
- [12] 刘妍鹤, 陈红汉, 王艳飞, 等. 珠江口盆地白云-荔湾深水区幔源  $\text{CO}_2$  充注的黏土矿物成岩响应[J]. 地质科技通报, 2021, 40(3): 85-95. [LIU Yanhua, CHEN Honghan, WANG Yanfei, et al. Diagenetic effect of mantle-derived  $\text{CO}_2$  charge to clay minerals in the Baiyun-Liwan deepwater area of the Pearl River Mouth Basin in South China Sea [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2021, 40(3): 85-95.]
- [13] 彭光荣, 张向涛, 许新明, 等. 南海北部珠江口盆地阳江凹陷油气勘探重要发现与认识[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(3): 267-279. [PENG Guangrong, ZHANG Xiangtao, XU Xinming, et al. Important discoveries and understandings of oil and gas exploration in Yangjiang Sag of the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea [J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(3): 267-279.]
- [14] 田立新, 张向涛, 彭光荣, 等. 珠江口盆地阳江凹陷石油地质特征及成藏主控因素[J]. 中国海上油气, 2020, 32(1): 13-22. [TIAN Lixin, ZHANG Xiangtao, PENG Guangrong, et al. Petroleum geological characteristics and main controlling factors of the Yangjiang Sag in Pearl River Mouth Basin [J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32(1): 13-22.]
- [15] 熊万林, 龙祖烈, 朱俊章, 等. 阳江凹陷恩平21洼不同沉积环境烃源岩发育特征及成藏贡献[J]. 油气地质与采收率, 2021, 28(5): 50-56. [XIONG Wanlin, LONG Zulie, ZHU Junzhang, et al. Develop-

- ment characteristics and accumulation contribution of source rocks in different sedimentary environments in Enping 21 Sub sag of Yangjiang Sag [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2021, 28 (5): 50-56.]
- [16] 赵健, 赵俊峰, 任康绪, 等. 巴西桑托斯盆地高含 CO<sub>2</sub> 油气藏类型、特征及成因模式 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2021, 51 (6): 1654-1664. [ZHAO Jian, ZHAO Junfeng, REN Kangxu, et al. Main types, characteristics and genetic model of oil & gas reservoirs with high CO<sub>2</sub> content in Santos Basin, Brazil [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2021, 51 (6): 1654-1664.]
- [17] 国家能源局. SY/T 5542-2009 油气藏流体物性分析方法[S]. 北京: 石油工业出版社, 2010. [National Energy Administration. SY/T 5542-2009 Test method for reservoir fluid physical properties [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010.]
- [18] 戴金星, 宋岩, 洪峰, 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. [DAI Jinxiong, SONG Yan, HONG Feng, et al. Inorganic genetic carbon dioxide gas accumulations and their characteristics in east part of China [J]. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 1994, 8 (4): 215-222.]
- [19] 李友川, 陶维祥, 孙玉梅, 等. 珠江口盆地惠州凹陷及其邻区原油分类和分布特征[J]. 石油学报, 2009, 30 (6): 830-834, 842. [LI Youchuan, TAO Weixiang, SUN Yumei, et al. Classification and distribution of oil in Huizhou Depression of Pearl River Mouth Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30 (6): 830-834, 842.]
- [20] 卢晓林, 石宁, 李美俊, 等. 珠江口盆地白云凹陷原油双柱烷分布特征及地球化学意义[J]. 石油实验地质, 2019, 41 (4): 560-568. [LU Xiaolin, SHI Ning, LI Meijun, et al. Distribution patterns and geochemical implication of bicadinanes in crude oils from Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2019, 41 (4): 560-568.]
- [21] 张向涛, 朱俊章, 熊万林, 等. 番禺4洼文昌组烃源岩生物标志化合物特征与油源判识[J]. 中国海上油气, 2020, 32 (4): 12-23. [ZHANG Xiangtao, ZHU Junzhang, XIONG Wanlin, et al. Biomarker characteristics and oil-source discrimination of source rocks in Wenchang Formation of Panyu 4 Sag [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2020, 32 (4): 12-23.]
- [22] Peters K E, Moldowan J M. *The Biomarker Guide: Interpreting Molecular Fossils in Petroleum and Ancient Sediments* [M]. Englewood: Prentice Hall, 1993.
- [23] 戴金星. 各类天然气的成因鉴别[J]. 中国海上油气(地质), 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.]