

陈玲玲, 肖张波, 钟锴, 等. 珠江口盆地陆丰 13 洼陡坡带构造分段差异性与油气成藏模式[J]. 海洋地质前沿, 2025, 41(7): 89-98.

CHEN Lingling, XIAO Zhangbo, ZHONG Kai, et al. Structural evolution difference and hydrocarbon accumulation model of steep slope zone in Lufeng 13 Sag of the Pearl River Mouth Basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2025, 41(7): 89-98.

珠江口盆地陆丰 13 洼陡坡带构造分段差异性与 油气成藏模式

陈玲玲^{1,2}, 肖张波^{1,2}, 钟锴^{3,4*}, 易浩^{1,2}, 张志伟^{1,2}, 赵越^{1,2}, 边利豪^{3,4}

(1 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 深圳 51800; 2 中海石油深海开发有限公司, 深圳 51800;

3 同济大学海洋地质全国重点实验室, 上海 200092; 4 同济大学海洋资源研究中心, 上海 200092)

摘 要: 陆丰 13 洼是珠一坳陷的主力富生烃洼陷之一, 但商业性油气发现仅集中在洼陷斜坡带和中央背斜带, 拓展陡坡带勘探新领域尤为迫切。基于研究区联片三维地震解释和构造解析, 整体解剖了陆丰 13 洼陡坡带的构造样式, 揭示了陡坡带的分段分期差异演化特征, 进而将陡坡带划分为继承型、改造型和迁移型 3 种构造类型以及单断继承型、双断继承型、迁移型、滑脱改造型、底侵改造型和构造转换带 6 种构造样式。结合研究区主控注断裂分段断裂活动性的定量分析, 提出了针对复杂陡坡带“动中有静、陡中有缓”构造时空格架的研究思路, 厘清了陡坡带各段的时空演化特征, 从源头上探索了陡坡带古近系规模输砂部位的时空分布特征, 最终优选了陡坡带的 3 个勘探有利区并预测了其油气成藏模式, 上述认识将为陆丰 13 洼陡坡带的油气勘探研究提供借鉴和参考。

关键词: 陆丰 13 洼; 陡坡带; 横向差异演化; 规模输砂; 勘探有利区

中图分类号: P744.4; P736

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2024.136

0 引言

陆丰 13 洼位于珠江口盆地珠一坳陷的东部, 规模性油气勘探始于 20 世纪 80 年代, 是珠一坳陷的主力富生烃洼陷之一, 目前已成为珠江口盆地的油气主产区之一^[1-12]。迄今为止, 陆丰 13 洼的商业性油气发现主要集中在洼陷斜坡带和中央背斜带, 油气主要产层从中浅层转向深层古近系地层^[5-10]; 近年来随着构造圈闭的规模及数量逐渐减小, 勘探目标多以构造-岩性圈闭或岩性圈闭为主, 勘探层系集中在深层文昌组地层, 储层条件相对苛刻^[12]。因此, 拓展陆丰 13 洼陡坡带的勘探新领域尤为迫切。

2015 年以来, 对陆丰 13 洼陡坡带开展多轮评价, 相继钻探 6 口井, 证实陡坡带发育大型扇三角洲, 油气运聚条件优越, 其中, LF7-9-5d 井古近系钻遇 338.5 m(垂厚)油气显示, 测井解释油层净厚仅为 17.8 m, 测井解释渗透率为 $1.18 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 探明储量规模不足 400 万 t, 勘探一度陷入困局。

陆丰 13 洼陡坡带控注断裂的活动性较强且横向差异活动明显, 造成断裂继承型和改造型活动不一, 导致了陡坡带的构造样式多样、类型复杂, 横向差异性显著^[13-14]; 另一方面, 陡坡带毗邻控注断裂, 文昌组储层的沉积相带相对不利, 储层非均质性更强、深层孔渗条件普遍较差^[12,15], 油气勘探虽然地质成功率较高, 但长期处于“有油无田”的困境, 能否寻找到上下叠置的规模优质储层发育带成为制约勘探成败的关键。

前人的相关研究多集中在陆丰 13 洼缓坡带, 洼陷的构造研究多集中在断裂体系的分析, 涉及多为主要断裂几何学、运动学特征的探讨^[11,16-18], 缺乏对陡坡带构造样式的整体解剖和演化横向差异性

收稿日期: 2024-06-14

资助项目: 中海石油(中国)有限公司生产性科研项目(CCL2023SZPS0055)

第一作者: 陈玲玲(1987—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事石油地质方面的研究工作. E-mail: chenll26@cnooc.com.cn

* 通讯作者: 钟锴(1974—), 男, 高级工程师, 主要从事石油地质与海洋油气勘探方面的研究工作. E-mail: zhongkai@tongji.edu.cn

对比。因此,有必要先理清陆丰13洼陡坡带的构造样式和类型,进而“动中找静”,即寻找陡坡带控注断裂相对不活跃的阶段和部位;“陡中找缓”,即理清陡坡带演化历程中构造转换带、斜坡带发育、规模储集体发育的有利区带,寻找陡坡带时空演化中的最有利于规模优质储集体发育的区域,以期从源头上解决陡坡带油气勘探中的“痛点”。

本文基于研究区三维地震解释和断裂体系的梳理,整体解剖了陆丰13洼陡坡带的构造样式及横向差异特征,并进行了系统分类;“动中找静,陡中找缓”,厘清陡坡带构造演化中最为有利输砂部位的时空分布特征,探索复杂陡坡带规模储集体发育机理及分布特征,结合油气成藏特征预测复杂陡坡带典型的油气成藏模式,以期为陆丰13洼陡坡带的油气勘探提供借鉴和参考。

1 区域地质背景

珠江口盆地位于南海北部大陆边缘,是新生代被动大陆边缘伸展型盆地,主体呈NE—SW走向。

多期构造运动造就了盆地现今“三隆三坳”的构造格局。珠一坳陷为盆地北部坳陷带的内次级构造单元,北邻北部断阶带,南接中央隆起带,坳陷南北缘由一系列NE—NEE向对倾边界断裂组成。

陆丰凹陷位于珠一坳陷东北部,为北部隆起带、惠陆低凸起、东沙隆起、海丰凸起所围限。受早期NNW向和晚期近S—N向应力场影响,凹陷内构造形迹主要呈现NEE和EW走向,中部陆丰中低凸起将凹陷进一步分割成南北次凹。其中,南次凹为陆丰地区油气勘探主战场,自南向北将凹陷进一步分割成陆丰22洼、陆丰15洼、陆丰13洼、陆丰7洼、惠州11洼、惠州5洼等。陆丰13洼构造走向为NWW—NE向,陆丰13洼从西向东可进一步划分为陆丰13西北洼(以下简称为“西北洼”)、陆丰13西洼(以下简称为“西洼”)和陆丰13东洼(以下简称为“东洼”)共3个次洼。陆丰13洼在构造走向上存在一定的横向差异性,其中,西北洼的总体构造走向为NWW向,西洼为近EW向,到东洼转变为近EW—NE向(图1)。

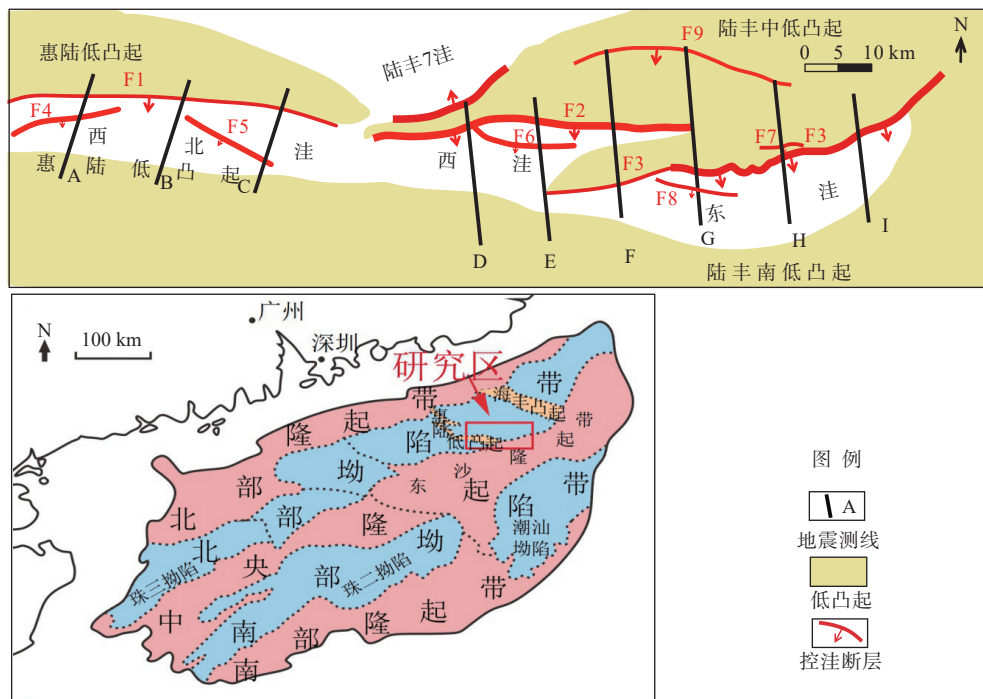


图1 陆丰13洼构造单元概要图

Fig.1 Overview of structural units in the Lufeng 13 Sag

陆丰13洼的总体构造演化特征与珠一坳陷的其他洼陷类似,是一个发育在南海北部大陆边缘陆架区的新生代洼陷,其新生代以来的构造演化可大致划分为3个阶段^[13,15]:早—中始新世裂陷期、

晚始新世断拗转换期、渐新世—第四纪拗陷期(图2)。

早—中始新世裂陷期可进一步划分为裂陷一幕、二幕和三幕共3幕裂陷作用,相应沉积了文昌

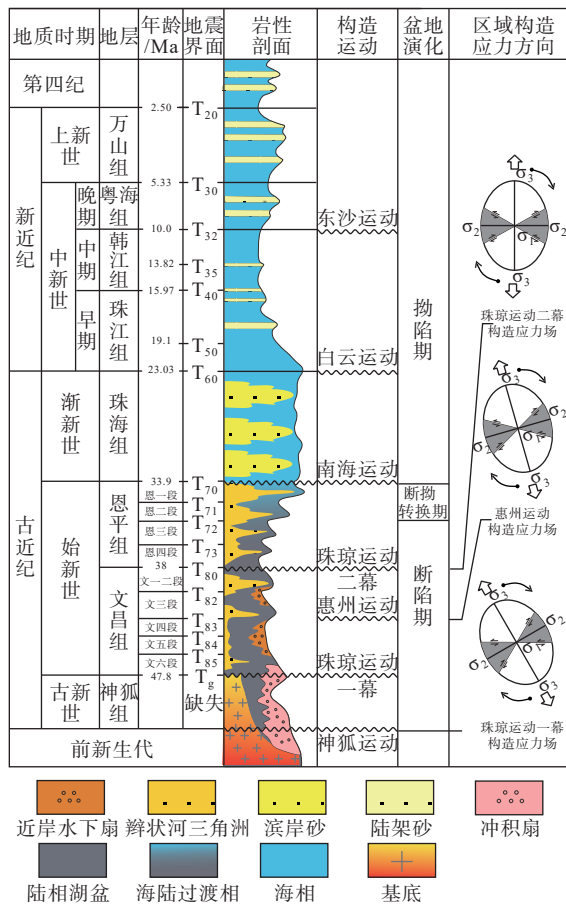


图 2 陆丰地区构造阶段划分与地层发育特征

Fig.2 Structural stage division and stratigraphic development of the Lufeng Sag

组六段+五段和四段(以下简称为“文下段”)、文昌组三段、一+二段(以下简称为“文上段”)和恩平组三段和四段(以下简称为“恩下段”)共 3 套地层(图 2)。主要控洼断裂的活动性总体较强,但存在明显的分段差异活化特征,导致了各次洼的分隔性明显且各期地层的沉积厚度不一。

至晚始新世,陆丰 13 洼进入断拗转换期后,以 T₇₂ 地震反射界面为标志,界面以上各次洼的演化趋同,该阶段沉积了恩平组一段和二段地层(以下简称为“恩上段”)。

进入拗陷期后,陆丰 13 洼和整个盆地一起经历了区域热沉降作用,沉积了珠海组及新近系地层。

2 陡坡带的构造分段差异性及其差异沉积响应

研究区的构造分段差异性主要表现在裂陷期,3 幕裂陷作用均表现出了明显的横向差异性,具体

表现为:控洼断裂的活动性、控洼断裂的生长和连接、陡坡带的构造样式及构造时空演化特征等。

2.1 陡坡带的构造分段差异性

陆丰 13 洼陡坡带的构造样式总体上表现为 1 条或 2 条控洼断裂控制的半地堑,但存在着显著的分段差异性(图 3a—i)。根据控洼断裂是否继承性活动、沉积沉降中心是否迁移以及岩浆底侵改造强度分为继承型、改造型和迁移型 3 类构造类型,具体又可分为单断继承型、双断继承型、迁移型、滑脱改造型、底侵改造型、构造转换带共 6 种构造样式。

2.1.1 继承型陡坡带

继承型陡坡带是指控洼断裂继承性活动而形成的陡坡带样式,可根据控洼断裂的数量分为单断继承型和双断继承型陡坡带。继承型陡坡带分布在西北洼西段和中段(图 3a、b)、西洼西段(图 3d)及东洼东段(图 3i),其洼陷形态总体表现为 1 条或 2 条控洼断裂控制下的北断南超半地堑,其中控洼断裂长期继承性活动,文昌和恩平期洼陷上下叠置、继承性发育。

继承型陡坡带由于控洼断裂继承性活动,陡坡带的沉积体系通常以断层下降盘的扇三角洲为主,其规模大小与断层活动性正相关。

2.1.2 迁移型陡坡带

迁移型陡坡带发育在陆丰 13 东洼的西段(图 3g),是指文昌期的控洼断裂与恩平期的控洼断裂发生了由早到晚、由南向北的跃迁式时空迁移。在横向洼陷结构上,恩平期拗陷型洼陷发育在文昌期箕状半地堑的北侧;纵向结构上为北侧的恩平期拗陷型洼陷叠加在其南侧的文昌期箕状半地堑之上。

由于控洼断裂的跃迁式迁移,陡坡带的古地理和地貌特征也将发生显著变化,相对继承型陡坡带,其构造样式更有利于规模输砂部位的发育。

2.1.3 改造型陡坡带

改造型陡坡带可进一步分为底侵改造型和滑脱改造型,均发育在研究区岩浆底侵活跃地段;其中,滑脱改造型发育在西北洼东段(图 3c),底侵改造型发育在东洼中段(图 3h)。

(1) 滑脱改造型陡坡带

滑脱改造是指基底断裂在岩浆底侵产生的局部熔融带发生了滑脱作用,而导致陡坡带形态和洼陷结构的改造。地震剖面可见基底以下发育岩浆

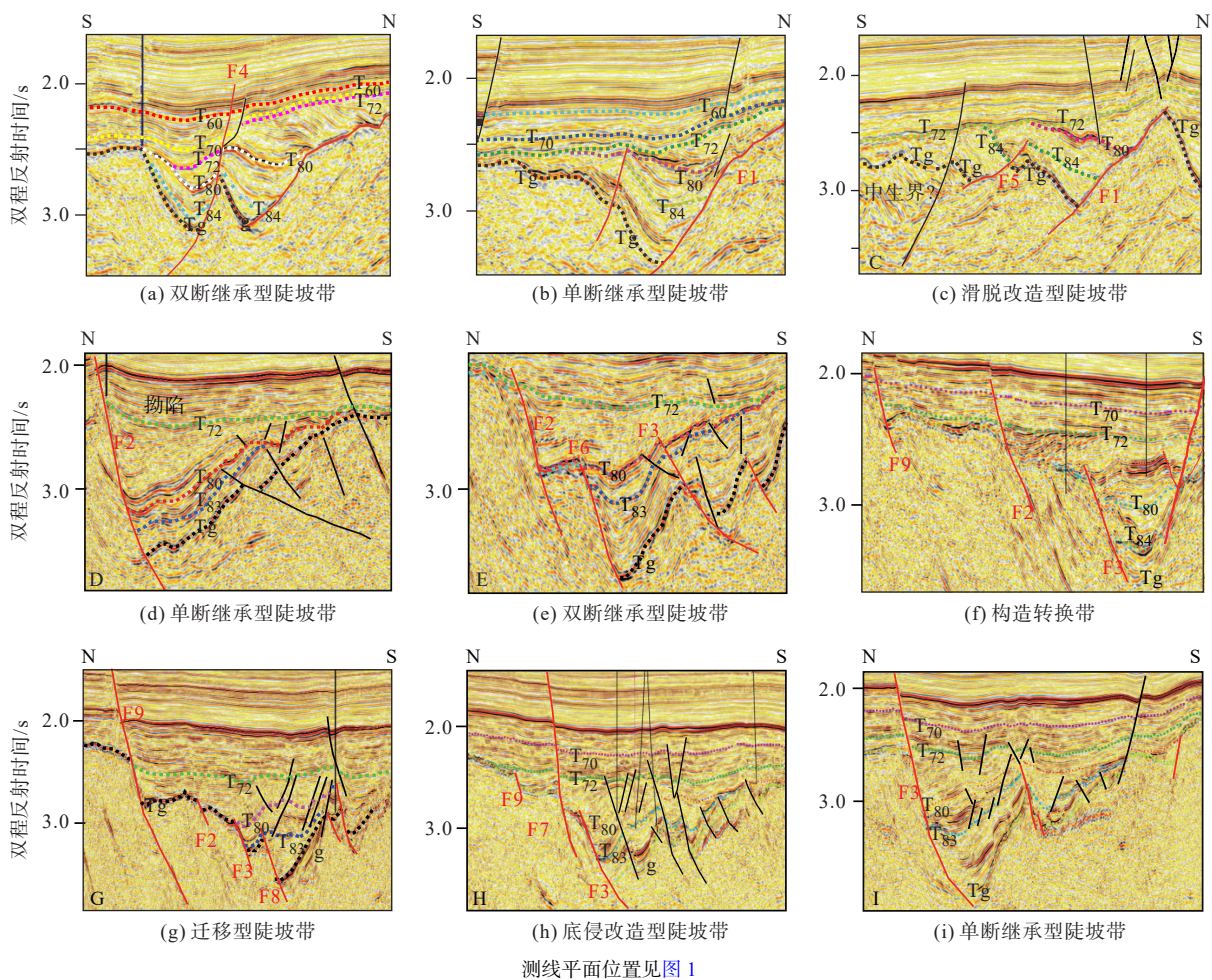


图 3 陆丰 13 洼不同类型陡坡带构造样式典型地震剖面

Fig.3 Seismic sections of different structural styles in the Lufeng 13 Sag

强烈底侵的杂乱反射区,并可见向南滑脱的基底断裂(图 3c),并收敛于其南侧的基底底侵穹窿带^[15]。

控洼断裂的滑脱作用导致其产状变缓,更有利于陡坡带物源区水系和流域规模的扩大,相对更为富砂。

(2) 底侵改造型陡坡带

底侵改造型洼陷总体表现为典型的韧性变形特征,具体表现为控洼断裂的数量多、活动性弱,断裂对沉积的控制作用不明显(图 3h)。岩浆底侵改造型洼陷发育在东洼中段,在地震剖面上可见基底之下多个岩浆底侵穹窿状反射^[13]。

底侵改造型陡坡带相对更有利于大型水系的形成和规模输砂部位的发育。

2.1.4 构造转换带型陡坡带

构造转化带型陡坡带发育在西洼和东洼之间(图 3d),位于西洼控洼断裂和东洼控洼断裂的收敛端,具有长期继承性发育的特征,也是目前陆丰 13 洼陡坡带勘探程度相对最高的地区,钻探揭示了大型

辫状河三角洲的发育并有良好的油气显示^[10]。

2.2 陡坡带时空演化特征及其规模输砂部位发育样式

鉴于研究区陡坡带构造样式多、横向差异大,断裂体系复杂且分段差异活化,“古陡坡-古地貌-古水系”迁移频繁,搬运模式差异性很强,相变快,储层非均质性强,寻找规模储层的难度很大;加上古近系储层埋深普遍较大,孔渗等物性条件较差,严重制约了陡坡带的勘探进程。因此,在陡坡带寻找规模优质储层直接决定着勘探的成败,而从源头上寻找陡坡带规模输砂有利构造位置成为陡坡带油气勘探研究的关键所在。

2.2.1 “动中有静、陡中有缓”

陡坡带控洼断裂总体上长期持续活跃,存在显著的时空差异演化特征,因此,在陡坡带的油气勘探研究中需要贯穿“动中有静、陡中有缓”的攻关思路来寻找陡坡带规模输砂有利构造位置的时空

分布规律。

“动中有静”是指首先在时间维度上寻找控洼断裂长期持续活动中相对安静的演化阶段, 在空间维度上寻找控洼断裂及其控制的陡坡带中相对不活跃的构造位置。“陡中找缓”是指在陡坡带时空演化历程中, 着重寻找断裂活动相对平静、古地貌更为平缓的、古水系相对更为发育的陡坡带构造部位。

“动中有静、陡中有缓”旨在通过对陡坡带分段分期时空和演化差异的剖析, 从源头上寻找陡坡带中相对更为有利的古地形-古地貌、发育更为充分的古水系和古流域发育部位, 落实规模砂体更

为富集、上下叠置的有利沉积相带, 指出陡坡带油气勘探的有利区。

2.2.2 陡坡带时空差异演化控制下的规模输砂部位

通过对陡坡带主控断裂分段差异活化特征的深入分析, 重点厘清各段陡坡带的时空演化特征, 从源头和机制上探索陡坡带古近系规模输砂部位时空发育特征。

结合前文中对陆丰 13 洼陡坡带各段各期分段差异性及其陡坡带各期控洼断裂的活动性及相应沉积地层的残留厚度, 恢复了文五段、文四段、文三段、文一+二段及恩下段沉积时期陆丰 13 洼古陡坡的构造格架及相应次洼的沉降中心(图 4)。

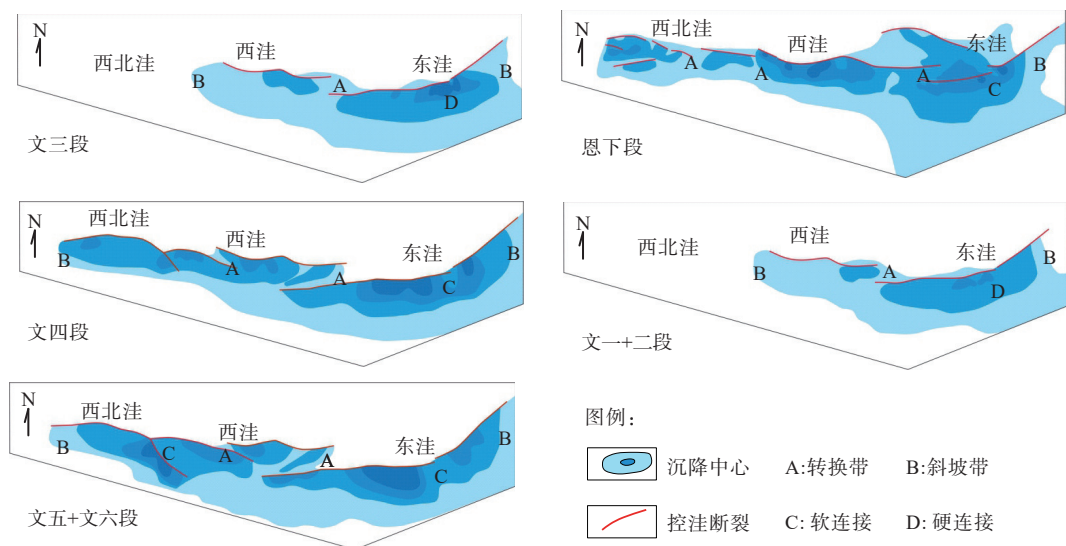


图 4 陆丰 13 洼古近系各期构造-沉积响应模式

Fig.4 Tecto-sedimentary responding patterns in various stages of the Paleogene in the Lufeng 13 Sag

由图 4 中断陷期各阶段沉积沉降中心的变迁结合断裂活动性的继承性或差异性分析可知, 陆丰 13 洼古陡坡带的裂陷期演化也存在着明显的时空差异性, 呈现了“动中有静, “陡中有缓”的演变历程(图 4)。

(1) 文五段沉积期 古陡坡带发育过程中, 东洼中段的陡坡带为多条控洼断裂软连接背景下的多转换带, 东洼西段相对简单, 转换带不发育; 西北洼和东洼中段类似, 也发育多断裂和多转换带。

(2) 文四段沉积期 断裂继承发育, 其古陡坡发育样式与文五段基本保持一致。

(3) 文三段沉积期 开始进入了湖盆萎缩期, 断裂整体活动性减弱, 东洼的多条断裂发生了合并和硬连接, 西洼和西北洼断裂活动性也明显减弱。

(4) 文一+二段沉积期 进入了湖盆强烈萎缩期, 断裂活动性进一步减弱, 其中西北洼断裂活动

趋于停滞, 东洼的断裂再次发生差异性活化, 断裂数量增多, 东洼和西洼的陡坡带再次发育若干转换带。

(5) 恩下段沉积期 全区断裂活动性显著增强, 湖盆再次强烈扩张, 东洼由于控洼断裂的迁移性演化而发育大型转换带, 西洼和西北洼也发育若干断裂间的构造转换带。

对陆丰 13 洼古陡坡各段时空差异演化和响应沉积沉降中心进一步梳理, 明确了陆丰 13 洼陡坡带发育着 3 个“动中有静、陡中有缓”的规模输砂构造部位:

(1) 西洼西段 在文下段为介于西北洼控洼断裂东侧与西洼控洼断裂东侧之间的构造转换带; 文上段, 西北洼沉积停滞, 成为了西洼控洼断裂西缘的斜坡带; 至恩下段, 西北洼控洼断裂再次活化后, 重新成为西北洼和西洼之间的构造转换带。

(2)东洼和西洼之间的构造转换带 该构造转换带在整个裂陷阶段长期持续发育,成为陆丰 13 洼陡坡带持续时间最长、最稳定的构造带,极有利于大中型斜向水系的持续发育,是相对而言陆丰 13 洼最为有利的规模输砂部位。

(3)东洼中段 该段在文下段为东洼控注断裂间的软连接带,分隔了东西两侧的两个次一级沉积沉降中心,有利于规模砂体的发育;文上段控注断裂发生硬连接,两翼的沉积沉降中心迁移到此成为了东洼统一的沉积沉降中心,有利于烃源层系的发育;至恩下段,断裂再次差异活化,该段成为次一级的构造转换带。断陷期频繁的断裂差异活化和沉积沉降中心变迁一方面有利于规模砂体的输入,另一方面也造成了烃源层系和砂体相互叠置,形成了

优越的油气生成和储集匹配关系。

3 陆丰 13 洼陡坡带油气成藏模式与勘探有利区

3.1 陆丰 13 洼陡坡带油气成藏模式

综合前人陆丰 13 洼陡坡带生储盖组合、生排烃时间、断层活动性以及油气成藏期次^[2-11],编绘了陆丰 13 洼陡坡带文昌-恩平组含油气系统事件图,揭示了 2 期成藏关键时刻(图 5):①第 1 期对应 T₆₀—T₄₀ 沉积期(23.03~15.97 Ma)为主生排烃期;②第 2 期对应 T₃₂ 至第四系沉积期(5 Ma~至今),具持续成藏特征。

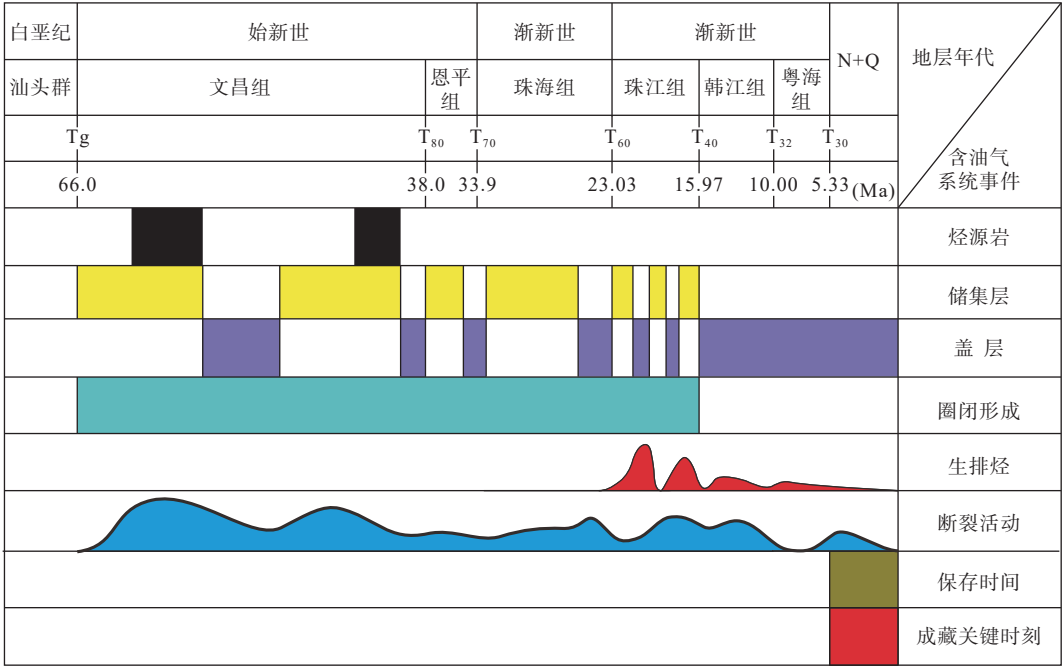


图 5 陆丰 13 洼陡坡带文昌-恩平组含油气系统事件图

Fig.5 Petroleum system event diagram of the Wenchang Formation-Enping Formation in the steep slope zone of Lufeng 13 Sag

陆丰 13 洼陡坡带文昌-恩平组含油气系统事件图表明,文昌-恩平组生储盖组合匹配良好,陡坡带控制油气垂向运移的断层活动性增强,与生排烃时间匹配良好。此外,仅部分晚期断裂活化,可能破坏油气藏(图 5)。

3.2 陆丰 13 洼陡坡带勘探有利区预测

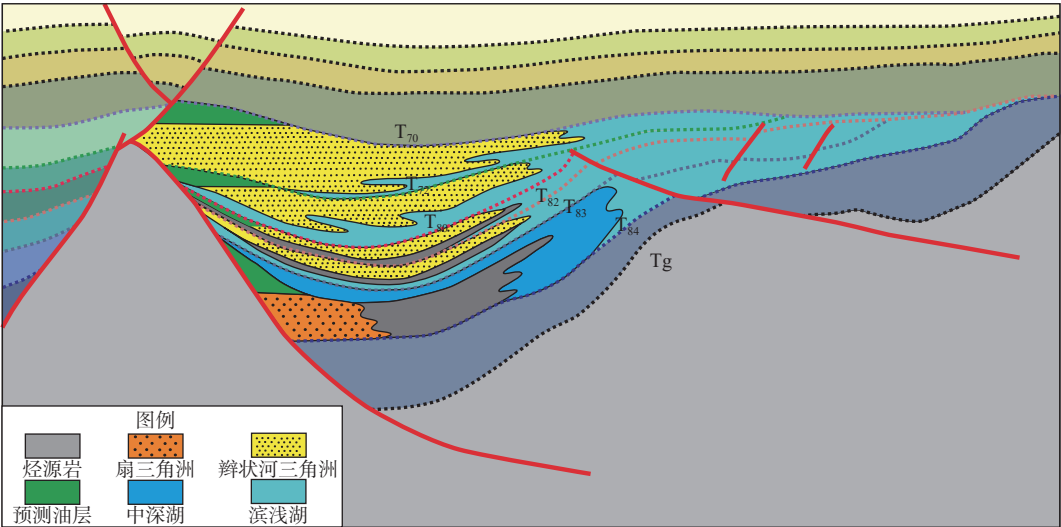
结合陆丰 13 洼油气成藏的关键要素和陡坡带时空演化中的有利规模输砂位置,综合研判当前陡坡带勘探有利区应聚焦西洼西段继承型陡坡带、西洼与东洼间构造转化带型陡坡带以及东洼中段改

造型陡坡带 3 处。

3.2.1 西洼西段继承型陡坡带

西洼西段继承型陡坡带的西侧持续性发育构造转换带,在文下段断层活动性强,砂体以扇三角洲为主,文上段发育辫状河三角洲(图 6)。

继承性转换型陡坡带物源供给、搬运、堆积的沉积响应系统受两条和多条断层雁列形成斜坡、断坡、沟槽等具有高低地形差异的地貌单元,控制和决定了物源搬运和沉积特征。在断裂活动强、沉降快的陡坡带可容空间大,在裂陷发育的不同阶段,陡坡带沉积体系差别较大。在文下段强烈



剖面位置见图 3b

图 6 西洼西段继承型陡坡带油气成藏模式

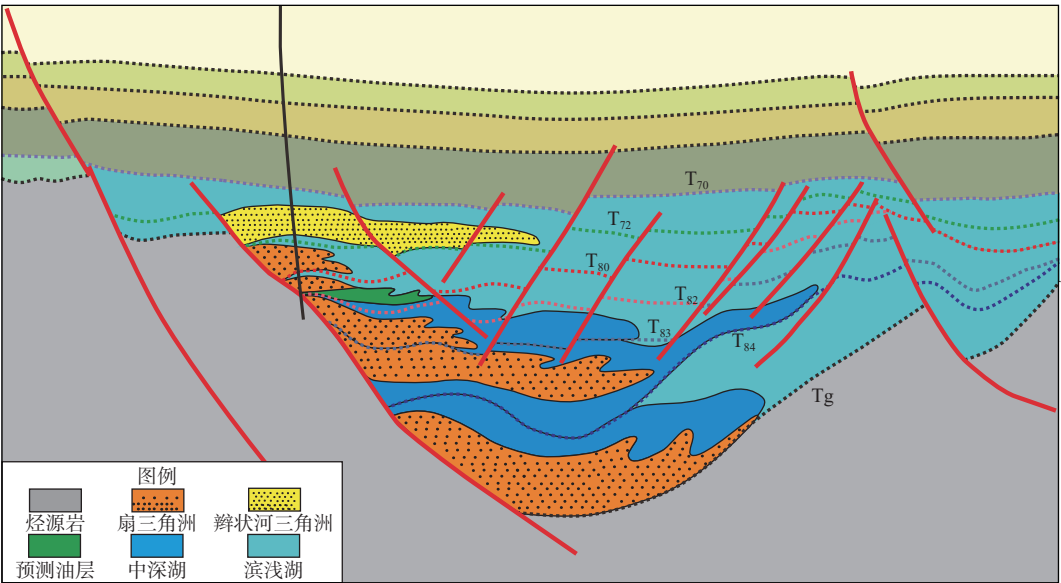
Fig.6 Oil and gas accumulation model of inherited steep slope zone in the western part of the Western Subbasin

裂陷期,湖盆沉降速率大于沉积速率,成为欠补偿湖盆,陡坡带主要发育扇三角洲、湖底扇等沉积;在裂陷萎缩期和裂陷后期,湖盆水体较浅且开阔,即使是陡坡带,落差也很小,以浅水环境的三角洲沉积为主。

西洼西段继承型陡坡带持续发育,并持续控砂,具有油气成藏优势包括:①位于断裂凸面,深层断面脊发育;②陡坡带砂体与烃源岩大面积接触;③断面脊与构造脊叠合较好;④酸性流体优先改造区域,有效避免流体滞留沉淀(图 6)。

3.2.2 构造转换带型陡坡带

西洼东段和东洼西段间的构造转换带长期持续发育,是重要的继承型规模输砂有利区和油气富集带。其油气成藏具有如下优势:①勘探目的层包括前新生界潜山、古近系多套砂体纵向叠置;②断裂-砂体匹配良好,规模砂体发育;③扇三角洲前缘具有相对更长的搬运距离,可以有效降低凝灰质含量与泥质含量;④临近中深湖泥岩部分上倾方向指向文三段扇三角洲前缘;⑤顶部厚层泥岩是良好的盖层(图 7)。



剖面位置见图 3b

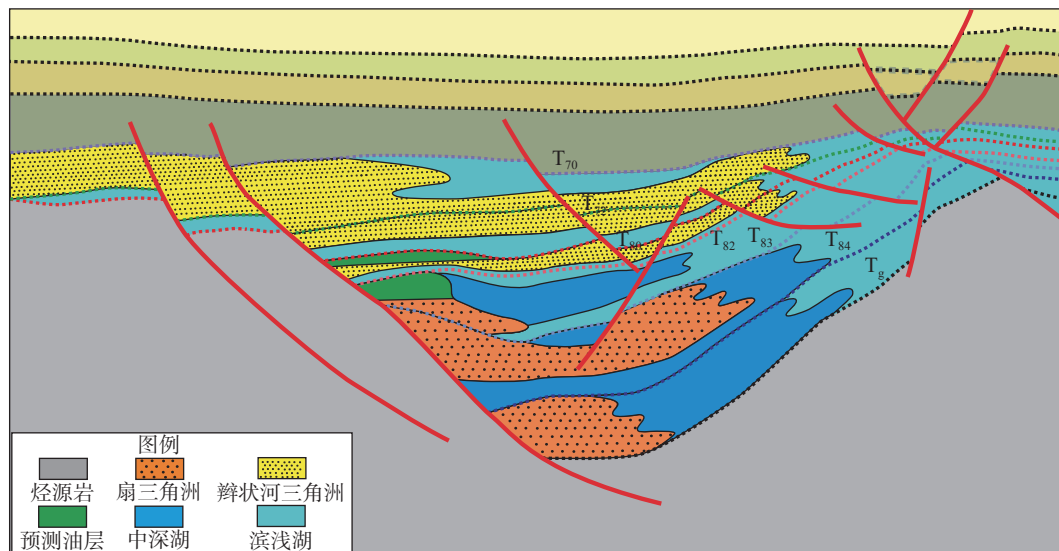
图 7 构造转换带扇三角洲前缘成藏模式

Fig.7 Reservoir-forming model of fan-delta front in the structural transition zone

3.2.3 东洼中段改造型陡坡带

东洼中段改造型陡坡带为韧性变形区, 规模砂体的发育特征为: 文下段断裂软连接期发育扇三角洲, 文三段断层硬连接期断裂活动性增强, 扇体变小、以湖相泥岩为主; 文一+二段重新软连接, 发育辫状河三角洲(图 8)。其油气成藏特征为: ①文下

段沉积期间为控洼断裂软连接处, 且位于韧性变形区, 扇三角洲砂体更为发育; ②文三段沉积期间控洼断裂硬连接, 中深湖相对发育, 为文下段提供良好盖层条件; ③文一、二段沉积期间, 控洼断裂重新发生软连接, 该阶段发育辫状河三角洲沉积; ④恩下段北部、东北部辫状河三角洲多期物源叠置, 规模性砂体发育(图 8)。



剖面位置见图 3c

图 8 东洼中段改造型陡坡带成藏模式

Fig.8 Reservoir-forming model of reformed steep slope zone in the middle section of the Eastern Subsag

4 结论

(1) 陆丰 13 洼陡坡带的构造样式存在着显著的分段差异性。根据其控洼断裂的是否继承型活动性、沉积沉降中心是否迁移以及岩浆底侵改造强度分为继承型、改造型、迁移型和构造转换带等 4 种构造类型, 具体又可分为单断继承型、双断继承型、迁移型、滑脱改造型、底侵改造型和构造转换带共 6 种构造样式。

(2) 陡坡带控洼断裂总体上长期持续活跃, 存在显著的时空差异演化特征, 因此, 需要贯穿“动中有静、陡中有缓”的研究思路来寻找陡坡带规模输砂有利构造位置的时空分布规律。通过对陡坡带断裂活动性和构造样式的分段差异性剖析, 重点厘清了陡坡带的时空差异演化特征, 结合各期各段沉降中心的变迁, 从源头和机制上探索陡坡带古近系规模输砂部位的时空发育特征。

(3) 结合陆丰 13 洼油气成藏的关键要素和陡坡带时空演化中的有利规模输砂位置, 综合研判当

前陡坡带勘探有利区应聚焦西洼东段继承型陡坡带、西洼与东洼间构造转化带型陡坡带以及东洼中段改造型陡坡带。

(4) 陆丰 13 洼复杂陡坡带的时空差异构造演化及其对规模输砂部位的控制机理可推广至中国近海其他复杂陡坡带的油气勘探研究。

参考文献:

- [1] 米立军, 张向涛, 汪旭东, 等. 陆丰凹陷古近系构造-沉积差异性及其对油气成藏的控制 [J]. 中国海上油气, 2018, 30(5): 1-10.
MI L J, ZHANG X T, WANG X D, et al. Tectonic and sedimentary differences of Paleogene and their control on hydrocarbon accumulation in Lufeng Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2018, 30(5): 1-10.
- [2] 张文昭, 张厚和, 李春荣, 等. 珠江口盆地油气勘探历程与启示 [J]. 新疆石油地质, 2021, 42(3): 346-352, 363.
ZHANG W Z, ZHANG H B, LI C R, et al. Petroleum exploration history and enlightenment in Pearl River Mouth Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(3): 346-352, 363.
- [3] 刘军, 蔡哲, 庞雄奇, 等. 珠江口盆地陆丰凹陷古近系多动力-多期次-多要素复合成藏区定量预测与评价 [J]. 地球科学,

- 2022, 47(7): 2481-2493.
- LIU J, CAI Z, PANG X Q, et al. Quantitative prediction and evaluation of Paleogene favorable hydrocarbon accumulation areas with multi-dynamic-stage-factor combination in Lufeng Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. *Earth Science*, 2022, 47(7): 2481-2493.
- [4] 彭光荣, 庞雄奇, 徐帆, 等. 珠江口盆地陆丰南地区古近系全油气系统特征与油气藏有序分布 [J]. *地球科学*, 2022, 47(7): 2494-2508.
- PENG G R, PANG X Q, XU Z, et al. Characteristics of Paleogene whole petroleum system and orderly distribution of oil and gas reservoirs in south Lufeng Depression, Pearl River Mouth Basin[J]. *Earth Science*, 2022, 47(7): 2494-2508.
- [5] 张向涛, 汪旭东, 舒誉, 等. 珠江口盆地陆丰凹陷大中型油田地质特征及形成条件 [J]. *中南大学学报 (自然科学版)*, 2017, 48(11): 2979-2989.
- ZHANG X T, WANG X D, SHU Y, et al. Geological characteristics and forming conditions of large and medium oilfields in Lufeng Sag of Eastern Pearl River Mouth Basin[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2017, 48(11): 2979-2989.
- [6] 汪旭东, 张向涛, 林鹤鸣, 等. 珠江口盆地陆丰 13 洼复式油气成藏条件、分布规律及勘探潜力 [J]. *中国海上油气*, 2018, 30(3): 19-27.
- WANG X D, ZHANG X T, LIN H M, et al. Reservoir-forming conditions, oil distribution and exploration potential of compound hydrocarbon reservoirs in the Lufeng 13 Sag in Pearl River Mouth basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2018, 30(3): 19-27.
- [7] 汪旭东, 张向涛, 林鹤鸣, 等. 珠江口盆地陆丰 13 洼陷中央背斜带地质构造特征及对油气成藏的控制作用 [J]. *石油学报*, 2019, 40(1): 56-66.
- WANG X D, ZHANG X T, LIN H M, et al. Geological structure characteristics of central anticline zone in Lufeng 13 Subsag, Pearl River Mouth Basin and its control effect of hydrocarbon accumulation[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(1): 56-66.
- [8] 代一丁, 牛子铖, 汪旭东, 等. 珠江口盆地陆丰凹陷古近系与新近系油气富集规律的差异及其主控因素 [J]. *石油学报*, 2019, 40(增刊 1): 41-52.
- DAI Y D, NIU Z C, WANG X D, et al. Differences of hydrocarbon enrichment regularities and their main controlling factors between Paleogene and Neogene in Lufeng Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(s1): 41-52.
- [9] 贺勇, 邱欣卫, 雷永昌, 等. 珠江口盆地陆丰 13 东洼新生代构造演化与油气成藏特征 [J]. *岩性油气藏*, 2023, 35(1): 74-82.
- HE Y, QIU X W, LEI Y C, et al. Tectonic evolution and hydrocarbon accumulation characteristics of Cenozoic in eastern Lufeng 13 Subsag, Pearl River Mouth Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2023, 35(1): 74-82.
- [10] 何雁兵, 肖张波, 郑仰帝, 等. 珠江口盆地陆丰 13 洼转换带中生界潜山成藏特征 [J]. *岩性油气藏*, 2023, 35(3): 18-28.
- HE Y B, XIAO Z B, ZHENG Y D, et al. Hydrocarbon accumulation characteristics of Mesozoic Lufeng 7-9 buried hill in Lufeng 13 Subsag transition zone, Pearl River Mouth Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2023, 35(3): 18-28.
- [11] 唐旭, 张向涛, 余一欣, 等. 珠江口盆地陆丰凹陷南部古近系断裂发育特征与油气成藏 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2023, 43(3): 132-143.
- TANG X, ZHANG X T, YU Y X, et al. Fault characteristics and hydrocarbon accumulation in the southern Lufeng Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2023, 43(3): 132-143.
- [12] 雷永昌, 彭光荣, 何雁兵, 等. 珠江口盆地陆丰凹陷古近系储层特征及优质储层主控因素 [J]. *海洋地质前沿*, 2024, 40(2): 37-49.
- LEI Y C, PENG G R, HE Y B, et al. Leogene reservoir characteristics and main controlling factors of high-quality reservoirs in Lufeng Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2024, 40(2): 37-49.
- [13] 肖张波, 雷永昌, 邱欣卫, 等. 泊松阻抗属性在陆丰南古近系低渗砂岩储层“甜点”识别中的应用 [J]. *海洋地质前沿*, 2022, 38(6): 70-77.
- XIAO Z B, LEI Y C, QIU X W, et al. Application of Poisson impedance for identification of sweet spot in the Paleogene low-permeability sandstone reservoir in Lufengnan Sag[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2022, 38(6): 70-77.
- [14] 钟锴, 肖张波, 朱伟林, 等. 珠江口盆地陆丰凹陷西北洼原型盆地及迁移演化特征 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2025, 45(1): 1-10.
- ZHONG K, XIAO Z B, ZHU W L, et al. Tectonic migration of prototype basins in northwest subsag of Lufeng Sag, the Pearl River Mouth Basin[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2025, 45(1): 1-10.
- [15] 朱筱敏, 葛家旺, 吴陈冰洁, 等. 珠江口盆地陆丰凹陷深层砂岩储层特征及主控因素 [J]. *石油学报*, 2019, 40(s1): 69-80.
- ZHU X M, GE J W, WU C B J, et al. Reservoir character main controlling factors of deep sands and stone in Lufeng Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(s1): 69-80.
- [16] 代向明, 李志刚, 孙闯, 等. 正断层三维生长和连接过程研究: 以南海北部陆丰凹陷为例 [J]. *地质学报*, 2022, 96(6): 1922-1936.
- DAI X M, LI Z G, SUN C, et al. 3D structural growth and lateral linkage of normal fault system: a case study from Lufeng Sag in the northern South China Sea[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96(6): 1922-1936.
- [17] 朱文奇, 黄胜兵, 郭刚, 等. 珠江口盆地陆丰 13 西北洼古近系构造沉积演化及资源潜力 [J]. *中国海上油气*, 2023, 35(2): 13-22.
- ZHU W Q, HUANG S B, GUO G, et al. Tectonic and sedimentary evolution of Paleogene and resource potential in northwestern Lufeng 13 Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2023, 35(2): 13-22.
- [18] 钟锴, 李洪博, 刘绍文, 等. 珠江口盆地陆丰 13 洼原型盆地类型与分段差异演化 [J]. *中国海上油气*, 2024, 36(3): 60-69.

ZHONG K, LI H B, LIU S W, et al. Prototype basin types and segmental differential evolution of LF13 Subsag in the Pearl

River Mouth Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2024, 36(3): 60-69.

Structural evolution difference and hydrocarbon accumulation model of steep slope zone in Lufeng 13 Sag of the Pearl River Mouth Basin

CHEN Lingling^{1,2}, XIAO Zhangbo^{1,2}, ZHONG Kai^{3,4*}, YI Hao^{1,2}, ZHANG Zhiwei^{1,2}, ZHAO Yue^{1,2}, BIAN Lihao^{3,4}

(1 Shenzhen Branch of CNOOC (China) Ltd., Shenzhen 51800, China; 2 CNOOC Deep Sea Development Co., Ltd., Shenzhen 51800, China;

3 State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China;

4 Tongji University Marine Resources Research Center, Shanghai 200092, China)

Abstract: Lufeng 13 Sag is one of the main hydrocarbon rich basins in the Zhuyi Depression. However, commercial oil and gas discoveries are concentrated in the slope zone and central anticline zone of the depression only, making it particularly urgent to expand the exploration into steep slope zones. Based on the three-dimensional seismic interpretation and structural analysis of the research area, the structural style of the steep slope zone in Lufeng 13 Sag was dissected as a whole, revealing the segmented and staged evolution characteristics of the steep slope zone. The steep slope zone was divided into three structural types of inheritance, transformation, and migration, as well as six structural styles of single fault inheritance, double fault inheritance, migration, slip transformation, bottom invasion transformation, and structural transformation. Based on the quantitative analysis of the segmented fault activity in the main control zone of the research area, an approach was proposed to construct a spatiotemporal framework for complex steep slope zones with "dynamic and static, steep and gentle" structures. The spatiotemporal evolution characteristics of each section of the steep slope zone were clarified, and the spatiotemporal distribution characteristics of the Paleogene large-scale sand transport in the steep slope zone were clarified from the source. Finally, three exploration favorable areas in the steep slope zone were selected and their oil and gas accumulation patterns were predicted. The above understanding provided a reference and guidance for oil and gas exploration in the steep slope zone of the Lufeng 13 Sag.

Key words: Lufeng 13 Sag; steep slope zone; differential evolution; large-scale sand transport; profitable exploration areas