沈娇,李宏义,武爱俊,等. 莺歌海盆地莺北区 HK29 区三亚组一段沉积特征及储层主控因素[J]. 海洋地质前沿, 2025, 41(1): 44-56. SHEN Jiao, LI Hongyi, WU Aijun, et al. Sedimentary characteristics and the controlling factors of reservoir in the First Member of Sanya Formation in the HK29 Area, Yingbei District, Yinggehai Basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2025, 41(1): 44-56.

# 莺歌海盆地莺北区 HK29 区三亚组一段 沉积特征及储层主控因素

沈娇,李宏义,武爱俊,肖伶俐,李欣,王一博,邱紫盈,魏庆 (中海油研究总院有限责任公司,北京100028)

摘 要:随着莺歌海盆地成熟区域及主力层系勘探程度日益提高,新区新层系成为日益关注的焦点。莺北区位于莺歌海凹陷北部,目的层三亚组一段具有较大的勘探潜力,但目前勘探程度较低,对其沉积体系及储层发育情况缺乏系统的研究。基于岩芯观察、镜下薄片鉴定以及地震、测录井、分析化验等资料分析,对HK29区目的层沉积相及其展布特征、储层特征等展开研究,探讨了储层发育的主控因素。结果表明:①HK29区三亚组一段主要发育物源来自海南岛的近源三角洲沉积,水下分流河道微相是有利相带;②三亚组一段储层岩性以长石岩屑砂岩和岩屑长石砂岩为主,孔隙类型以长石溶孔和粒间孔为主,总体表现为中—低孔、低渗—特低渗的特征;③储层物性主要受沉积作用和成岩作用控制,三角洲前缘水下分流河道砂体粒度粗、分选好,是发育有利储层的优势相带,压实作用是该区储层物性变差的直接因素,长石和岩屑的溶蚀是改善储层物性的关键因素。基于以上研究,提出HK29区三亚组一段"相带优、埋藏浅、溶蚀强"的优质储层形成机制,有效指导了莺北区领域勘探突破。

# 0 引言

莺歌海盆地是"建设南海西部万亿大气区"战略主战场之一,其勘探始于20世纪60年代<sup>[1]</sup>,目前已发现的7个气田在平面上主要分布于中央底辟带东方区和乐东区<sup>[2]</sup>(图1),86%的探明储量分布于莺歌海组、黄流组。随着成熟区域及主力层系勘探程度的日益提高,储量发现的难度越来越大,亟需拓展新的勘探领域。

莺北区位于莺歌海凹陷北部(图1),勘探面积

收稿日期: 2024-04-11

约9000 km<sup>2</sup>, 截至2023 年底, 共有8口探井, 探井 密度<0.1口/100 km<sup>2</sup>,处于极低勘探阶段,有巨大 的增储潜力。莺北区的油气勘探始于 20 世纪 90 年代,分构造圈闭和构造-岩性圈闭勘探2个阶段, 其中,构造圈闭勘探阶段钻探了 LG20A、LG20B、 HK30A 和 HK17A 共 4 口井, 构造-岩性圈闭勘探阶 段钻探了 HK29A、HK29B、L1X 和 LG35A 共 4 口 井(图1)。8口井中,钻遇气层井5口、显示井1口、 干井 2 口,发现 3 个含气构造,但都没有商业发现, 整体处于"有气无田"的状态。对已钻井揭示气层 情况统计发现,莺北区气层主要分布在区域盖层梅 山组二段的底部及三亚组一段,由于莺北区缺乏深 大断裂,深部油气很难突破梅山组二段区域盖层运 移至梅山组一段、黄流组等上部层系,因此,三亚组 一段是目前较现实的主力勘探层系。此外,莺北区 凹陷带内所钻6口井中有5口因储层物性差失利, 1口井因垂向运移不畅而失利,储层是该区钻探成

资助项目: "十三五"国家科技重大专项"大型油气田及煤层气开发" (2016ZX05026);中国海洋石油有限公司"十四五"重大科技项目"中国近 海新区新领域勘探技术"(KJGG2021-0300)

**第一作者**:沈娇(1989—),女,硕士,工程师,主要从事海上油气地质方面的研究工作. E-mail: shenjiao@cnooc.com.cn



图 1 HK29 区地理位置与莺北区地层综合柱状图

Fig.1 Geographical location of the HK29 Area and comprehensive lithostratigraphic column in Yingbei District

败最重要的因素。因此,优质储层展布是莺北地区 成藏关键因素之一,亟需开展深入研究。

由于莺北区钻井少、勘探程度低,前人在莺北 区沉积、储层等方面鲜有公开研究成果发布,因此, 对莺北区开展系统的沉积储层研究及成果认识总 结具有重要意义。本文以莺北区凹陷带 HK29 区 三亚组一段为研究对象,以老井复查为突破口,加 强对少井区中深层储集层沉积相带的研究,聚焦储 层发育特征及主控因素分析,以期推动莺北区中深 层低渗领域勘探突破。

# 1 地质概况

莺歌海盆地是一个富气的新生代大型走滑-伸展盆地<sup>[1]</sup>,面积约11.3×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>,整体呈NW—SE走向,共发育2个凹陷,南部为莺歌海凹陷,北部为河内凹陷<sup>[1,3-5]</sup>(图1),中国界内盆地面积约4×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>。 莺歌海盆地自新生代以来,主要经历了古近纪断陷期至新近纪拗陷期2个阶段的充填过程<sup>[1-2,6-7]</sup>。古近纪断陷期沉积充填主要受断层活动影响<sup>[1,7-9]</sup>,沉积了始新统和渐新统崖城组、陵水组;进入新近纪以后,断裂活动减弱,盆地以热沉降为主,沉积充填 主要受海平面升降、物源供给程度及古地貌的影响, 沉积了中新统三亚组、梅山组和黄流组,上新统莺 歌海组以及第四系<sup>[10-12]</sup>。

莺北区位于莺歌海凹陷北部,整体勘探程度低, 石油地质条件研究尚浅,该区带内临高-海口区走滑 构造活动较为活跃,压扭性的反转构造有利于油气 的聚集<sup>[8,13-14]</sup>,且该区带整体位于盆地边缘,远离中 央底辟带,处于温压过渡带,同时又缺乏 CO<sub>2</sub> 气体 的困扰,是较为有利的勘探领域<sup>[1,8-9,12]</sup>。本次研究 的HK29 区位于莺北区海口鼻状构造脊上,已经钻 探发现了三亚组低丰度气藏,钻井揭示主要目的层 三亚组一段主要由灰色、浅灰色中一细砂岩与灰色 泥岩互层,砂岩含砂率较高,但储层渗透率整体较 差,仅局部发育甜点储层,优质储层形成机制认识 不清,影响了该区中深层甜点储层预测,亟待加强 对沉积储层的进一步研究。

# 2 沉积特征

下中新统三亚组沉积时期, 莺北区整体为热沉 降阶段的海陆过渡相沉积<sup>[2,7]</sup>, 岩性主要受源区构造、 物源、气候背景、沉积过程和沉积环境等因素的 影响<sup>[15]</sup>。

#### 2.1 源区构造、物源、气候背景特征

中新世以来,莺北区沉积演化大致可分为6个 阶段:初始隆升期、相对稳定期、快速隆升期、剥蚀 夷平期、急剧隆升期和剥蚀-隆升加速期<sup>[8,13-14]</sup>,各阶 段大致对应于三亚组二段沉积时期(23~19 Ma)、 三亚组一段沉积时期(19~16.2 Ma)、梅山组沉积 时期(16.2~11 Ma)、黄流组沉积时期(11~5.3 Ma)、 莺歌海组-乐东组三段沉积时期(5.3~1.6 Ma)、乐 东组二段沉积时期至今(1.6 Ma 至今)<sup>[8,13-14]</sup>。相对 活跃的构造活动造成本区既有早期拉分形成的一 些张性断层,也有晚期构造反转发育的鼻状构造[8-9]。 沉积上主要受红河的远程物源及海南岛近物源的 相互影响<sup>[2,4,9]</sup>,其中,红河物源沿着临高凸起与东面 的斜坡带之间的凹陷向南输送,海南岛物源则顺着 东面的斜坡而下对本区进行近源补给,因此,该区 岩性横向变化较大。三亚组一段沉积时期,莺北区 在经历了初始隆升之后进入相对稳定期,红河远物 源的影响变弱,以海南岛近物源影响为主,HK29区 钻井揭示,三亚组一段以长石岩屑砂岩与岩屑长石 砂岩为主。母岩类型以岩浆岩为主,反映了海南岛 岩浆岩(花岗岩)为主的物源特征。

古气候方面,中新统沉积时期莺北区地处热带、 亚热带湿润地带,同时受海洋季风气候的影响,这 种热带、亚热带季风气候会使中新统沉积期降水较 晚渐新统沉积期更为丰富,估计可达3500 mm<sup>[15]</sup>; 丰富的降雨条件,也有利于河流的搬运作用,容易 形成大型三角洲。因此,中新统沉积时期,物源和 古气候条件十分有利于近源三角洲的发育,从而也 为储层发育提供了必备的物质条件。

#### 2.2 古地貌特征

古地貌深度等值线平面图或者立体图能够显示地貌单元形态,可以识别出物源及沟谷在空间上的展布<sup>[16-18]</sup>。基于地震、测井资料,采用构造回剥技术及层序地层学方法综合恢复了三亚组一段沉积前的古地貌(图 2a)。斜坡和沟谷是海南岛物源进入HK29区的重要通道,沟槽分布及分叉方向能够精准指示物源推进方向及三角洲形态,从地震剖面(图 2b)及古地貌图上均能看出存在 NE、E向 2 个明显的沟槽,为HK29 区输送碎屑物质,不同方向的水流通过沟槽向HK29 区地势低洼部位汇集,

在莺北区整体北高南低地形的影响下, 朵体整体有 向南推进的趋势。

#### 2.3 沉积相类型及展布

#### 2.3.1 沉积相类型

在岩芯精细观察描述的基础上,综合沉积构造 背景、古地貌特征、地震反射特征、钻测井资料等 分析认为,HK29区三亚组一段沉积时期发育三角 洲沉积,在地震剖面上以中一强振幅、低频、中连续 的斜交前积反射为主,主体为三角洲前缘亚相,主 要发育水下分流河道、水下分流河道间、河口坝及 席状砂沉积微相。

(1) 水下分流河道沉积微相

三亚组一段沉积时期,水下分流河道广泛发育, 岩芯序列表现为正韵律沉积特征(图 3)。岩性主要 以浅灰色、灰色厚层、块状中一细砂岩为主,粒度较 粗,分选较好(图 4),砂岩厚度大。HK29B 井在三 亚组一段上部 3 611~3 629.56 m 取芯,取芯段主要 为砂岩。其中,3 621.5~3 629.56 m 为厚层块状砂 岩,以中一细砂岩为主,发育块状层理、少量平行层 理和交错层理,水动力较强,为水下分流河道微相。 测井曲线具有低幅、中等齿化箱形的特征(图 4), GR 曲线总体值较低,顶底突变接触,单层厚度约 6~10 m,多指示厚层砂岩沉积,反映强水动力条件。 地震剖面上单个河道表现为强振幅"V"型或"U" 型下切(图 4), 朵体内部则可见多河道的相互切割 叠置,反映了河道的频繁迁移摆动。

(2) 水下分流河道间微相

水下分流河道间主要以泥质沉积为主,还可见 粉砂质泥岩和泥质粉砂岩,沉积厚度较薄,已钻井 揭示的厚度大多<5 m,且发育较少。测井曲线具 有中一低幅高 GR 值的响应特征。受河道迁移作用 影响,分流河道间保存较少。

(3)河口坝微相

河口坝微相主要由灰色细一极细砂岩组成, 岩芯序列垂向上表现为反韵律沉积。HK29B井 3 611~3 621.5 m岩芯主要为灰色细一粉砂岩,粒 度较细,分选差一中等,砂岩层理构造比较发育,可 见平行层理、波状层理、上攀交错层理,偶可见生物 钻孔和少部分泥砾(图 3)。测井曲线表现为中等幅 度、中高齿化的的漏斗形或复合漏斗形(图 4),下部 以齿状较高值的 GR 曲线为主,上部为明显的低 GR 值段,厚度 4~8 m。地震剖面上表现为中等振 幅的弱下切-丘状。



(a) 莺北区三亚组一段古地貌; (b) HK29 区东部沟槽地震剖面特征
 图 2 莺北区三亚组一段古地貌特征
 Fig.2 Paleogeomorphic characteristics of the First Member of Sanya Formation in Yingbei District

(4) 席状砂微相

席状砂主要以灰色细一粉砂岩与泥岩互层为 主,砂岩厚度薄。测井曲线表现为低幅、低一中等 齿化的指形(图 4),GR曲线呈低值尖峰状,顶底与 GR高值段接触,厚度约 2 m,地震上难以识别。

2.3.2 三角洲展布特征

通过地震沉积学,结合古地貌(图 2a)、最小振 幅属性切片(图 5a)等的综合研究,厘清了莺北区 HK29区三亚组一段三角洲平面展布特征(图 5b)。 三亚组一段沉积时期,莺北区东北部地形较平缓, 整体上北高南低,来自东北部凸起区的海南岛物源 供给充足,东部凸起区发育典型的沟槽地貌,物源 通过 NE、WE 向的沟槽向 HK29 区低洼部位输送, 形成了2支三角洲朵叶体。受北高南低地形影响, 三角洲入盆后,2支朵叶体相互叠置继续往南推进, 形成"近源端"垂直岸线、"远源端"平行岸线的近 SN向展布的复合三角洲沉积,是该区储层发育的 物质基础。

3 储层特征

#### 3.1 岩石学特征

对 HK29 区 500 个砂岩样品岩矿薄片进行分 析,根据曾允孚等<sup>[19]</sup> 砂岩成分分类方案,HK29 区 三亚组一段储集层岩石类型主要为长石岩屑砂岩







沉积 微相	岩相 特征	岩芯	粒度、分选 特征	测井相 特征	测井曲线 典型井段	地震相 类型	典型地震 剖面
水下 分流 河道	以灰色厚层、 块状中砂岩— 细砂岩为主, 分选好,砂 岩厚度较大	HK29B, 3657 m. 中砂岩, 块状层理	HK29B, 3 632 m, 中一细砂岩, 卷度中值 200 µm, 分选中等	<ul> <li>箱形</li> <li>低幅</li> <li>中等齿化</li> <li>顶底突变接触</li> </ul>	HK29B GR/gRAPI 深度/m 岩性 3 650 3 660 3 660 4 6 6 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7	强振幅 "V" / "U	IKSN UKSA
河口坝	以灰色中厚 层细一极细砂 岩为主,分 选较好,砂 岩厚度适中	HK29B, 3618 m, 细砂 岩,爬升层理,水平层理	HK29A, 3 619 m, 细砂岩. 控度中值 150 µm, 分选差.中	<ul> <li>漏斗-复合漏</li></ul>	HK29B GRGigRaff 深度/m 岩性	中等振幅 弱下切- 丘状	
席 状 砂	以细一粉砂岩 与泥岩互层 为主,砂岩 厚度薄	1	/	<ul> <li>指形</li> <li>低幅</li> <li>低一中等齿化</li> <li>顶部突变接触</li> </ul>	HK29B 「「」」」 「」」」 「」」」 「」」」 「」」」 「」」」 「」」」 「」」」 「」」」 「」」」 「」」」 「」」」 「」」」 「」」」 「」」」 「」」」 「」」」」 「」」 「」」」 「」」」 「」」」 「」」」 「」」」 「」 「	弱振幅 亚平行	/

#### 图 4 HK29 区三亚组一段沉积微相类型特征



低长石"的含量特征,其中,石英的相对含量最高, 一般为 5%~10%,均值为 6.75%;长石含量最低,

和岩屑长石砂岩(图 6)。碎屑组分具有"富石英、 一般为 50%~70%,均值 62.45%;其次为岩屑,含量



(a)最小振幅属性切片;(b)沉积相图 图 5 莺北区三亚组一段三角洲展布特征

Fig.5 Distribution of the deltaic facies in the First Member of Sanya Formation in Yingbei District



第41卷第1期

为3%~8%,均值3.35%。矿物成分成熟度指数 (Q/(F+R))均值为3,结构成熟度较高,主要表现为 砂岩粒度以细砂岩、极细砂岩为主,颗粒分选中 等一较好,磨圆度以次棱一次圆状为主,反映碎屑 物质经历了较长距离的搬运,整体为一套成分成熟 度和结构成熟度中等一较高的碎屑岩。 HK29 区三亚组一段碎屑岩薄片和全岩矿物 统计分析表明,其碎屑储层填隙物较少,其中杂基 以泥质杂基为主,而胶结物以自生黏土矿物为主, 次为碳酸盐胶结物,具有"低碳酸盐、高黏土矿 物"含量特征(图 7a)。据X衍射分析,HK29 区 三亚组一段储层黏土矿物主要为伊利石,次为伊/ 蒙混层(图 7b)。扫描电镜下,自生伊利石和钠长 石晶体发育,二者常相伴生,充填于孔隙或包裹石 英颗粒边缘,还可见大量自生铁白云石、毛发状 伊利石及书页状高岭石等充填粒间孔隙,易发生 水敏。

#### 3.2 物性特征

研究区三亚组 232 个岩/壁芯样品物性数据分 析表明, 三亚组一段储集层总体表现为中一低孔、 低一特低渗特征。三亚组一段储层孔隙度主要分 布于 4%~17.6%, 平均值为 13.6%。岩/壁芯的孔隙 度分布频率的分析结果显示, 孔隙度峰值主要集中 在 14%~16%, 占比 39.86%; 其次为 12%~14%, 占 比 38.51%(图 8a), 总体为中一低孔特征, 孔隙度较 好。三亚组一段储层渗透率主要分布在(0.04~ 4.47)×10<sup>-3</sup> µm<sup>2</sup>, 岩/壁芯的渗透率分布频率分析结









果显示,渗透率峰值主要集中在<0.5×10<sup>-3</sup>μm<sup>2</sup>的 范围内,占比 62.16%,仅少量数据>1×10<sup>-3</sup>μm<sup>2</sup>,占 比 15.54%(图 8b),总体为低一特低渗特征,储层渗 透率较差。三亚组一段储层孔隙度和渗透率的相 关性统计结果(图 9)表明,储层孔隙度、渗透率在半 对数坐标中呈正相关关系,孔隙度与渗透率呈指数 增长,相关性较好,总体属于孔隙型储层。尽管钻 井揭示三亚组一段储层渗透率整体较差,但仍有部 分砂岩储层达到中孔低渗的标准,反映了 HK29 区 仍然具有发育有利储层的潜力。



Fig.9 The porosity-permeability correlation of the First Member of Sanya Formation in the HK29 Area

#### 3.3 孔隙类型及喉道特征

通过大量镜下薄片观察发现,HK29 区三亚组 一段储层主要发育剩余原生粒间孔、粒间溶孔、粒 内溶孔和铸模孔,其中,铸模孔占比最多,其次为 粒间溶蚀孔、粒内溶蚀孔和微孔隙等。三亚组一 段储层压实作用较强,原生粒间孔保存较少,多为 长石发生溶蚀形成溶蚀孔,包括长石完全溶蚀形 成的铸模孔(图 10a),部分长石、岩屑溶蚀形成的 颗粒溶孔(图 10b),也可见因长石溶蚀形成的黏土 矿物,从而形成黏土矿物粒间微孔(图 10c),此外, 还可见碳酸盐胶结物的部分溶蚀,形成残余粒间 溶孔(图 10d)。镜下薄片还可观察到较多孔隙中 充填伊利石、高岭石和石英,降低了绝对储集空间 (图 10e、f)。

HK29 区 A、B 井取芯段压汞曲线显示, 三亚组 一段储层砂岩进汞排驱压力为 0.5~1 Mpa, 平台段 斜率较小, 表明储层孔喉结构连通性中等(图 11a); A、B 井孔喉半径分布曲线显示, 三亚组一段储层砂 岩喉道半径中值(R<sub>50</sub>)为 0.16~1.2 μm, 均值为 0.5 μm, 总体以微米级的细—微喉道为主(图 11b), 喉 道类型有受压实成因形成的片状喉道和受黏土矿



(a)HK29B, 3 619.17 m, 粉砂质极细砂岩, 长石铸模孔; (b)HK29B, 3 620.43 m, 极细砂岩, 长石/岩屑溶蚀为铸模孔; (c)HK29B, 3 619.17 m, 极细一细砂岩, 长石溶孔; (d)HK29A, 3 682 m, 细砂岩, 碳酸盐溶蚀孔隙及其残余; (e)HK29A, 3 615.45 m, 极细砂岩, 高岭石、石英次生加大充填孔隙; (f)HK29A, 3 637 m, 细砂岩, 石英次生加大、伊利石充填孔隙, 3 618.88 m

图 10 HK29 区三亚组一段储层孔隙类型







物胶结成因的管束型喉道。镜下可见喉道中伊蒙 混层杂基、自生伊利石等较多(图 10f),严重堵塞喉 道,极大降低了砂岩的渗透性,这也是三亚组一段 渗流能力与储集能力差异较大的原因之一。

# 4 储层主控因素分析

岩性是决定储层物性的基础,而物性又是控制储层含油气性的关键因素,受沉积作用和成岩作用等多种因素共同影响<sup>[20-21]</sup>。其中,沉积作用决定了

储层的岩石矿物类型和原生孔隙分布,是储层发育的基础<sup>[22-23]</sup>,经过后期成岩作用改造,储层碎屑组成和孔隙结构发生显著变化<sup>[24-25]</sup>,从而影响HK29区三亚组一段储层质量。

#### 4.1 沉积作用对储层的影响

沉积作用决定了沉积类型,沉积类型决定了砂 岩碎屑成分、粒度大小、分选磨圆程度、杂基含量、 支撑类型和颗粒填集方式等,进而控制储层初始物 性<sup>[26]</sup>。对 HK29 区三亚组一段储层沉积微相、岩性、 物性等参数统计发现(图 12), 三角洲前缘水下分流 河道微相发育的砂质碎屑颗粒粒度较粗, 砂体厚 度较大, 岩性主要为中一细砂岩, 镜下薄片可见粒 内溶孔较发育, 物性相对较好, 样品砂岩孔隙度 为 13.4%~17%, 均值为 15.08%, 渗透率为(0.51~ 4.47)×10<sup>-3</sup> µm<sup>2</sup>, 均值为 1.36×10<sup>-3</sup> µm<sup>2</sup>, 储集性能较 好, 是该区有利储集层; 三角洲前缘河口坝微相沉 积常以砂泥互层的形式出现, 砂体厚度相对较小, 粒度较细,主要为细一极细砂岩,样品砂岩储层孔 隙度为 4.2%~17.32%,均值为 13.44%,渗透率为 (0.03~1.27)×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>,均值为 0.38×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>,储集 性能相对较差;三角洲前缘席状砂微相则主要发育 薄层砂,粒级最小,主要为粉砂岩,样品砂岩储层孔 隙度为 9.3%~16.6%,均值为 12.85%,渗透率为 (0.04~0.61)×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>,均值为 0.28×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>,表现 为超低渗储集层,储集性能最差。综上认为,海口





Fig.12 Relationships among sedimentation, lithofacies, grain size, and physical properties of the First Member of Sanya Formation in the HK29 Area

29 区水下分流河道砂粒度粗, 孔渗条件好, 可发育 >1×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>的储层, 是 HK29 区三亚组一段优势 储集体。宏观上优势储集相带的分布是储层物性 垂向和平面展布特征的重要控制因素之一, 奠定了 HK29 区三亚组一段储层质量的基础。

#### 4.2 成岩作用对储层的影响

成岩作用促进储层分异,既可以促进储层的形成和发育,也可以破坏储层的储集性能<sup>[24-25]</sup>。研究表明,压实作用和胶结作用是 HK29 区三亚组一段储层最重要的破坏性成岩作用,而溶蚀作用则是HK29 区三亚组一段砂岩成储的关键。

压实作用贯穿储层成岩作用的始终, 压实作用 强是导致整个莺北区储层物性变差最关键的成岩 因素。莺北区及周缘多口钻井实测孔隙度、渗透率 纵向分布规律的统计结果表明, 斜坡带近物源井埋 深较浅, 物性普遍较好(图 13), 远离斜坡方向井物 性随埋深加大而变差。在埋深<1900 m 时, 砂岩 储层处于早成岩期, HK30A 井岩芯孔隙度介于 15%~35%, 渗透率介于(1.19~271)×10<sup>-3</sup> µm<sup>2</sup>, 属 中—高孔、中—高渗储层; 在埋深为1900~2900 m 时, 储层已进入中成岩 A1 期, 物性随埋深加大逐 渐降低, 在 2900 m 底界实测孔隙度大多<15%, 以 低—中孔、低渗为主; 当埋深>2900 m, 储层已进 入中成岩 A2 期, 至 3 500 m 附近孔隙度已降至约 10%,以特低一低孔、低渗一特低渗为主。HK29A、 B 井三亚组在 3 600 m 埋深下为中一低孔、低一特 低渗储层(孔隙度为 14%~15%,渗透率为 0.4×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>,少数达 1.4×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>),埋藏深、压实作用强是 造成物性差的主要原因。物性分析表明,HK29 区 三亚组一段因压实作用损失的原始孔隙度平均为 16%;根据镜下照片的视压实率计算,其视压实率 为 70%~88%,表现为强压实,显微镜下碎屑颗粒间 多为线接触,也可见凹凸接触,整体储层物性较差。 此外,粒度粗的砂岩抗压实能力强,因此,寻找埋深 浅、粒度粗的有利沉积相带是研究工作重点。

胶结作用是导致储层物性变差的次要成岩因素。莺北区胶结作用不强烈,物性分析表明,HK29 区三亚组一段储层胶结作用损失的原始孔隙度平 均为10.4%;根据镜下照片的视胶结率计算,其视胶 结率普遍<10%,主要表现为泥质胶结、碳酸盐 (如(铁)方解石)胶结和自生黏土矿物(如伊利石)胶 结等,对储层物性造成局部性影响。

溶蚀作用是改善莺北区储层孔隙最重要的成 岩因素。当储层进入中成岩阶段, 黏土矿物层间水、 有机酸酸性水进入储层后, 溶蚀砂岩中铝硅酸盐矿 物、碳酸盐胶结物, 储层普遍出现长石溶孔、铸模 孔及岩屑溶孔等次生孔隙(图 10a—c), 对储层的孔 隙度有较大的贡献, 致使 3 000~3 500 m 出现次生 强溶蚀带, 产生明显的相对高孔带(图 13)。HK29



图 13 莺北区及周缘储层物性纵向演化图

Fig.13 Longitudinal evolution of reservoir physical properties in Yingbei District and its periphery

区处在莺北区次生溶蚀带内,根据镜下照片的视溶 蚀率计算,其视溶蚀率普遍接近 60%,镜下铸体薄 片常见长石溶蚀(铸模)孔,同时可见少量(铁)方解 石等矿物溶蚀(图 10d),次生溶蚀作用增孔明显 (图 10a—d),表明 HK29 区三亚组一段储层增孔作 用以溶蚀作用为主。

综合沉积微相、粒度、成岩作用等多因素分析, 提出埋藏相对浅、溶蚀作用强、粒度相对粗的三角 洲前缘水下分流河道沉积发育区是 HK29 区中深 层低渗领域实现勘探突破的有利方向。

### 5 结论

(1)中新统三亚组沉积时期,受源区构造、海南 岛近物源供给及热带、亚热带季风气候的多重影响, HK29 区三亚组一段发育海南岛物源的大型三角洲 沉积,为储层发育提供物质基础。

(2)HK29 区三亚组一段储层岩石类型主要为 岩屑长石砂岩和长石岩屑砂岩,成分成熟度和结构 成熟度中等一较高,填隙物具有"低碳酸盐、高黏土 矿物"的特征。储层具有中一低孔、低一特低渗特 征,孔喉连通性中等,发育细一微喉道,次生孔隙较 发育,多来自于长石矿物的溶蚀。

(3)储层的发育多受控于沉积相带及成岩作用。 三角洲前缘水下分流河道砂粒度大、分选好,是最 有利的储层分布相带;压实作用是研究区储层物性 变差的最关键因素,长石、岩屑等的溶蚀作用则是 改善研究区储层孔隙最重要的成岩因素,是中深层 储层成储的关键。

(4)基于以上研究,提出莺北区 HK29 区三亚组 一段"相带优、埋藏浅、溶蚀强"的优质储层形成机 制,该认识有效指导了莺北区凹陷带圈闭优选和风 险目标评价,推动了莺北区风险领域勘探获重大 突破。

#### 参考文献:

- [1] 谢玉洪.构造活动型盆地层序地层分析及天然气成藏模式: 以莺歌海盆地为例 [M].北京:地质出版社,2009.
   XIE Y H. Sequence Stratigraphic Analysis and Hydrocarbon Accumulation Models in Tectonically Active Basins: Case Study on the Yinggehai Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009.
- [2] 李慧明. 莺歌海盆地新近系物源分析与沉积演化特征 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2012.

LI H M. Provenance and sedimentary evolution in Neogene of

Yinggehai Basin[D]. Beijing: China University of Geoscience (Beijing), 2012.

 [3] 万志峰,夏斌,何家雄,等.南海北部莺歌海盆地与琼东南盆 地油气成藏条件比较研究 [J]. 天然气地球科学,2007,18(5): 648-652.

> WAN Z F, XIA B, HE J X, et al. The comparative study of hydrocarbon accumulation conditions in Yinggehai and Qiongdongnan Basins, northern South China Sea[J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(5): 648-652.

[4] 王策. 莺歌海盆地上中新统一更新统储层物源识别:来自碎 屑锆石 U-Pb 年代学和地球化学制约 [D]. 广州:中国科学院 研究生院(广州地球化学研究所), 2016.

WANG C. Source identification of Upper Miocene Pleistocene reservoir in Yinggehai Basin: constraints from U-Pb chronology and geochemistry of clastic zircons[D]. Guangzhou: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Guangzhou Institute of Geochemistry ), 2016.

- [5] 邱燕,王英民.南海第三纪生物礁分布与古构造和古环境 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2001, 21(1): 65-67, 69-73.
   QIU Y, WANG Y M. Reefs and paleo-structure and paleo-environment in the South China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2001, 21(1): 65-67, 69-73.
- [6] 张功成,谢晓军,王万银,等.中国南海含油气盆地构造类型及勘探潜力 [J].石油学报,2013,34(4):611-627.
   ZHANG G C, XIE X J, WANG W Y, et al. Tectonic types of petroliferous basins and its exploration potential in the South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(4): 611-627.
- [7] 张建新, 范彩伟, 谭建财, 等. 莺歌海盆地中新世沉积体系演 化特征及勘探意义 [J]. 地质科技通报, 2019, 38(6): 51-59. ZHANG J X, FAN C W, TAN J C, et al. Evolution characteristics of sedimentary system in Yinggehai Basin in Miocene and its exploration significance[J]. Geological Science and Technology Information, 2019, 38(6): 51-59.
- [8] 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.
   GUOLZ, ZHONGZH, WANGLS, et al. Regional tectonic evolution around Yinggehai Basin of South China Sea[J]. Geological Journal of China Universities, 2001, 7(1): 1-12.
- [9] 刘海钰, 范彩伟, 廣雷, 等. 莺歌海凹陷东斜坡中北段天然气成因及成藏特征 [J]. 中国海上油气, 2022, 34(2): 25-34. LIU H Y, FAN C W, TUO L, et al. Origin and accumulation characteristics of natural gas in the middle and north section of eastern slope, Yinggehai Sag[J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(2): 25-34.
- [10] 王振峰,何家雄,解习农.莺歌海盆地泥-流体底辟带热流体活动对天然气运聚成藏的控制作用 [J]. 地球科学, 2004, 29(2): 203-210.

WANG Z F, HE J X, XIE X N. Heat flow action and its control on natural gas migration and accumulation in mud-fluid diapir areas in Yinggehai Basin[J]. Earth Science, 2004, 29(2): 203-210.

[11] 谢玉洪,李绪深,童传新,等.莺歌海盆地中央底辟带高温高

第41卷第1期

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 Y H, LI X S, TONG C X, et al. High temperature and high pressure gas enrichment condition, distribution law and accumulation model in central diapir zone of Yinggehai Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2015, 27(4): 1-12.

- [12] 范彩伟. 莺歌海大型走滑盆地构造变形特征及其地质意义[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(2): 190-199.
  FAN C W. Tectonic deformation features and petroleum geological significance in Yinggehai large strike-slip basin, South China Sea[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(2): 190-199.
- [13] 丁中一,杨小毛,马莉,等. 莺歌海盆地拉张性质的研究[J]. 地球物理学报,1999,42(1):53-61.
  DING Z Y, YANG X M, MA L, et al. A study of the stretching behavior of the Yinggehai Basin[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1999, 42(1):53-61.
- [14] 钟志洪, 王良书, 夏斌, 等. 莺歌海盆地成因及其大地构造意 义 [J]. 地质学报, 2004, 78(3): 302-308.
  ZHONG Z H, WANG L S, XIA B, et al. The Dynamics of Yinggehai Basin Formation and its tectonic significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(3): 302-308.
- [15] 苏瑞侠. 季风气候对南海北部珊瑚钙化和氧碳同位素组成的 影响 [D]. 中国科学院研究生院 (广州地球化学研究所), 2006. SU R X. The in fluencing o monsoonal climate on scleraetinian coral caleification and isotopic compositions of northern part of South China Sea[D]. Guangzhou: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Guangzhou Institute of Geochemistry ), 2006.
- [16] 钟玉婷, 董艳蕾, 李顺利, 等. 珠三坳陷珠海组海陆过渡相沉 积特征及储层控制因素 [J]. 东北石油大学学报, 2023, 47(4): 39-56.

ZHONG Y T, DONG Y L, LI S L, et al. Sedimentary characteristics and reservoir controlling factors of sea-land transition in Zhuhai Formation, Zhu-3 Depression[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2023, 47(4): 39-56.

- [17] ZHU H T, YANG X H, LIU K, et al. Seismic-based sediment provenance analysis in continental lacustrine rift basins: an example from the Bohai Bay Basin, China[J]. AAPG Bulletin, 2014, 98(10): 1995-2018.
- [18] 梁杰,刘杰,牛胜利,等.珠江口盆地惠州 25 转换带文五段低 位体系域源-渠-汇耦合关系 [J]. 沉积学报, 2022, 40(6): 1451-1460.

LIANG J, LIU J, NIU S L, et al. Exploration potential and source-ditch-sink characteristics of the lowstand system tract in the early sedimentary stage of the 5th Member of the Wenchang Formation, Huizhou 25 Transfer Zone[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(6): 1451-1460.

- [19] 曾允孚,夏文杰、沉积岩石学 [M]. 北京:北京出版社,1986.
   ZENG Y F, XIA W J. Sedimentary Petrology [M]. Beijing: Beijing Publishing House, 1986.
- [20] 邓秀芹,付金华,姚泾利,等.鄂尔多斯盆地中及上三叠统延 长组沉积相与油气勘探的突破 [J]. 古地理学报,2011,13(4): 443-455.

DENG X Q, FU J H, YAO J L, et al. Sedimentary facies of the Middle-Upper Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin and breakthrough in petroleum exploration[J]. Journal of Palaeogeography, 2011, 13(4): 443-455.

[21] 时保宏,李荣堃,田雯,等.鄂尔多斯盆地姬塬地区延长组长
 91段储层差异性特征及成因 [J].中国石油大学学报(自然科学版),2019,43(4):1-10.

SHI B H, LI R K, TIAN W, et al. Differences of characteristics and genetic of reservoirs in Chang 9<sub>1</sub> of Yanchang Formation in Jiyuan area, Ordos Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Sciences), 2019, 43(4): 1-10.

- [22] 赵虹, 党森, 党永潮, 等. 安塞油田延长组储集层特征及物性 影响因素分析 [J]. 地球科学与环境学报, 2005, 27(4): 45-48. ZHAO H, DANG B, DANG Y C, et al. Characteristics of Yanchang Formation reservoirs and its influence factors in Ansai Oilfileld[J]. Journal of Earch Sciences and Environment, 2005, 27(4): 45-48.
- [23] 徐刚. 黄骅坳陷歧南次凹沙河街组储层成岩作用及其对孔隙 影响的研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2012.
   XU G. Diagenesis and its influence to the pore of sandstone reservoirs of the Shahejie Formation in Qinan Sag of Huanghua Depression[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012.
- [24] 陈刚, 阚洪阁, 陈登祺, 等. 延 113-延 133 井区山 1、山 2--3
  储层特征及差异性研究 [J]. 石油地质与工程, 2019, 33(6): 1-4.

CHEN G, KAN H G, CHEN D Q, et al. Reservoir characteristics and differential study of Shan1 and Shan2~3 reservoirs in Yan113-Yan133 well blocks[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2019, 33(6): 1-4.

[25] 魏钦廉,崔改霞,刘美荣,等.鄂尔多斯盆地西南部二叠系盒 8 下段储层特征及控制因素 [J]. 岩性油气藏, 2021, 33(2): 17-25.

> WEI Q L, CUI G X, LIU M R, et al. Reservoir characteristics and controlling factors of the Permian lower He 8 Member in southwestern Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2021, 33(2): 17-25.

[26] 姚文礼.四川盆地须家河组致密砂岩物源体系的控储作用[J].地质科技通报, 2021, 40(5): 223-230.
 YAO W L. Reservoir control of tight sandstone provenance system in Xujiahe Formation, Sichuan Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2021, 40(5): 223-230.

# Sedimentary characteristics and the controlling factors of reservoir in the First Member of Sanya Formation in the HK29 Area, Yingbei District, Yinggehai Basin

SHEN Jiao, LI Hongyi, WU Aijun, XIAO Lingli, LI Xin, WANG Yibo, QIU Ziying, WEI Qing (CNOOC Research Institute Ltd., Beijing 100028, China)

Abstract: With the increasing exploration in mature areas and main layers in Yinggehai Basin, new layers in new area gradually become the focus of attention increasingly. Yingbei District is located in the northern part of Yinggehai Basin, and the First Member of Sanya Formation as the target layer has great exploration potential, but the exploration degree is low at present and the sedimentary system and reservoir development are lack of systematic research. Through drill core observation, microscopic thin section identification, seismic data, well logging data, and laboratory analytical data, the sedimentary facies and distribution characteristics, reservoir characteristics, diagenesis and other aspects of the target layer in the study area were studied, and the controlling factors of reservoir development were discussed. Results show that: ① The First Member of Sanya Formation in the HK29 area develops mainly proximal delta sediments influenced by the provenance in Hainan Island. The submarine distributary channel microfacies is a favorable facies belt; (2) The lithology of the reservoir rocks in the First Member of Sanya Formation is mainly feldspar lithic sandstone and lithic feldspar sandstone, the pore types are mainly feldspar-dissolved pores and inter-granular pores, and the overall performance is characterized by medium-low porosity, low permeability to ultra-low permeability; ③ The sand bodies in the underwater distributary channel at the delta front are coarse-grained and well-sorted, which is an advantageous facies belt for the development of favorable reservoirs. Compaction is the direct factor for the deterioration of reservoir properties in this area. The dissolution of feldspar and rock fragments is the key factor in improving reservoir properties. The reservoir physical properties are mainly controlled by sedimentation and diagenesis. The sandstones in the submarine distributary channel in the delta front are coarse-grained size and well-sorted, which is the advantageous facies for the development of favorable reservoirs. Compaction is the direct factor for the deterioration of the reservoir physical properties, and the dissolution of feldspar and lithic is the key factor for improving the reservoir physical properties. Base on the above research, the formation mechanism of the high-quality reservoir in the First Member of Sanya Formation in the HK29 Area with "excellent facies belts, shallow burial, and strong dissolution" was proposed, which effectively guided the exploration breakthrough in Yingbei District.

Key words: Yinggehai Basin; Yingbei District; medium-depth layer; delta; reservoir characteristics; main controlling factors of reservoir