

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2023.190>



珠江口盆地惠州凹陷恩平组“扇-辫”复合体发育规律 及有利储层主控因素

彭光荣, 刘培, 宋朋霖, 高翔, 熊万林, 向巧维, 韩博

中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 广东深圳 518054

摘要: 珠江口盆地惠州凹陷惠州 26 洼恩平组发育“扇三角洲-辫状河三角洲”复合沉积体系,并在不同构造的不同沉积演化阶段均发生了典型的“扇-辫”体系转换,转换前后的储层物性条件差异较大,亟需开展深入研究.基于三维地震资料以及岩心分析资料,综合分析了惠州 26 洼恩平组“扇-辫”复合体系储层差异展布特征及其主控因素,并明确了该区域“南扇北辫、早扇晚辫”的扇-辫演化关系;同时,深入揭示了“优相-改造-火山”为该复合体系有利储层发育的三大主控因素,其中:优质沉积相带是有利储层发育的物质基础,多级断阶搬运改造以及古隆背景下的湖浪淘洗是改善储层物性的关键,而火山物质差异化成岩演化对储层物性起着调控作用.相对而言,惠州 26 洼恩平组辫状河三角洲相储层物性整体较好,但仍需在埋深下限之上寻找受火山物质影响小的有利储层发育区带;而扇三角洲前缘亚相,还需加强对改造作用的研究并优选强改造作用下的储层.

关键词: 扇三角洲;辫状河三角洲;改造作用;成岩作用;储层物性;主控因素;石油地质.

中图分类号: P624

文章编号: 1000-2383(2025)08-3199-14

收稿日期: 2023-12-23

Characteristics of the “Fan-Braid” Complex and Main Controlling Factors of Favorable Reservoir in the Enping Formation, Huizhou 26 Sag, Pearl River Mouth Basin

Peng Guangrong, Liu Pei, Song Penglin, Gao Xiang, Xiong Wanlin, Xiang Qiaowei, Han Bo

Shenzhen Branch of CNOOC, Shenzhen 518054, China

Abstract: A unique “fan delta-braided river delta” composite sedimentary system is developed in Enping Formation, Huizhou 26 depression, the Pearl River Mouth Basin, and typical “fan braid” system transformation has occurred in different sedimentary evolution stages of different structures. The reservoir physical conditions before and after the transformation are quite different, so it is urgent to carry out in-depth research. Based on three-dimensional seismic data and core testing data, this article comprehensively analyzes the differential distribution characteristics and main controlling factors of the “fan-braid” composite

基金项目: 中国海洋石油有限公司“十四五”科技重大项目“陆缘裂谷盆地深层/超深层油气成藏条件与成藏机制研究——珠江口盆地珠一坳陷”(No. KJGG2022-0403);中国海洋石油有限公司科研项目“惠州 19 构造带三角洲-滩坝复合沉积形成机制及展布规律”(No. SKKY-2024-YJYKT-01);中国海洋石油有限公司三年基础地质研究项目“高温背景下不同流体环境“岩一流”相互作用研究”(No. SKKY-2024-SZ-YJYKT12);中国海洋石油有限公司科研项目“珠江口盆地浅水区陡坡砂砾岩带油气富集规律及勘探方向”(No. KJZH-2024-2106).

作者简介: 彭光荣(1978-),男,高级工程师,主要从事油气地质与油气勘探综合研究工作. ORCID: 0009-0009-1437-5878. E-mail: peng-gr@cnooc.com.cn

引用格式: 彭光荣,刘培,宋朋霖,高翔,熊万林,向巧维,韩博,2025.珠江口盆地惠州凹陷恩平组“扇-辫”复合体发育规律及有利储层主控因素.地球科学,50(8):3199-3212.

Citation: Peng Guangrong, Liu Pei, Song Penglin, Gao Xiang, Xiong Wanlin, Xiang Qiaowei, Han Bo, 2025. Characteristics of the “Fan-Braid” Complex and Main Controlling Factors of Favorable Reservoir in the Enping Formation, Huizhou 26 Sag, Pearl River Mouth Basin. *Earth Science*, 50(8): 3199-3212.

system reservoir in the Enping Formation of Huizhou 26 Depression, and clarifies the "fan-braid" evolution relationship of the "southern fan northern braid, early fan late braid" in the region; At the same time, the three main controlling factors for the development of high-quality reservoirs in this composite system, namely "superior facies-transformation-volcano", have been deeply revealed. Among them, high-quality sedimentary facies are the material basis for the development of high-quality reservoirs, transformation of multi-level fault stage transportation, and lake wave washing under the background of ancient uplift are the key to improving reservoir physical properties, while differential diagenetic evolution of volcanic materials plays a regulatory role in reservoir physical properties. Relatively speaking, the overall physical properties of the braided river delta facies reservoirs in the Enping Formation of Huizhou 26 Depression are good, but it is still necessary to search for favorable reservoir development zones that are less affected by volcanic materials above the lower burial depth limit; And for the subfacies of the fan delta front, it is necessary to strengthen the research on the transformation effect and select the reservoirs under strong transformation effect.

Key words: fan delta; braided river delta; transformation effect; diagenesis; reservoir physical properties; main control factor; petroleum geology.

0 引言

珠一坳陷位于珠江口盆地中东部,是盆地的最主要的产油气区;而惠州凹陷位于珠一坳陷东北部,其中惠州 26 洼为珠一坳陷最富生烃洼陷——“十三五”油气资源评价认为,富生烃洼陷古近系和中生界古潜山(“双古”)领域蕴藏大量油气资源,尤其是天然气资源(陈长民等,2003;施和生等,2009a,2015,2022;张强等,2018;张为彪等,2018;朱明等,2019;刘军等,2022;彭光荣等,2022,2023). 惠州 26 洼以文昌组半深湖—深湖亚相油型烃源岩为主力烃源岩,总地质资源量超过 11 亿吨油当量(包含约 1 500 亿方天然气). 目前,惠州 26 洼周缘已勘探发现十余个油气田,数量占整个南海东部油田总数的三分之一,其中新近系、古近系、古潜山等重要勘探领域均已获商业突破(施和生等,2009b,2015,2022;朱红涛等,2016;朱明等,2019;王绪诚等,2020;彭光荣等,2022). 早期勘探层位主要集中在中浅层新近系,但随着新近系未钻圈闭越来越少,加强古近系领域勘探研究成为必然(施和生等,2009a;朱明等,2017;杜家元等,2017). 近年来随着古近系深层勘探力度加大,其惠州 26 洼的油气资源规模和产能也在不断获得突破(周凤娟等,2022). 截至目前,惠州 26 洼剩余 7 亿吨地质资源量,且相比埋深更大的文昌组,其恩平组具有“近油源、浅埋藏、物性好”的典型优势并具有近烃源强势充注的有利条件,勘探潜力大,是珠江口盆地大中型油气田突破首选洼陷及层系.

目前,珠一坳陷恩平组深层油气勘探的最关键的问题是寻找有利储层,惠州凹陷恩平组整体发育

大型扇三角洲、辫状河三角洲两类沉积体系(施和生等,2017;杜家元等,2021;施和生等,2022;张丽等,2022). 惠州 26 洼周缘恩平组已钻 30 余口探井,主要分布于惠州 26-A 油田、惠州 27-A 含油构造、惠州 27-B 油田及惠州 21-D 含气构造(图 1). 钻探结果揭示了该地区沉积体系与储层发育条件的复杂性,一方面,因控洼断裂活动速率的差异,引起不同构造恩平组沉积期坡度变化大,因此已钻井揭示该地区扇三角洲、辫状河三角洲沉积体系存在多期次、多区带的转换;另一方面,其不同层段、不同构造带的储层物性差异很大,同时钻井证实存在多期火山喷发作用的影响及改造,这些因素综合使得惠州 26 洼恩平组的储集物性更为复杂. 前人针对惠州 26 洼古近系储层方面,多单独以某一构造的扇三角洲或辫状河三角洲沉积体系为例开展深入研究(王绪诚等,2020;彭光荣等,2022),然而随着 2021 年以来十余口探井部署后,已经揭示了扇三角洲—辫状河三角洲纵向上、平面上迁移叠覆规律,并且研究人员获取到了最新岩心分析化验资料,因此,本文开展“扇—辫”复合沉积体系联合研究,对比分析二者储层主控因素的差异,以期深化该地区沉积储层认识. 本论文充分利用研究区已有的相对丰富的钻井测试资料及三维地震资料,通过选取惠州 26 洼周缘恩平组“扇—辫”复合体系为研究对象,对其沉积演化规律、沉积储层发育特征及其主控因素开展深入研究,相关研究成果和认识对珠一坳陷乃至其他盆地寻找及落实“扇—辫”复合沉积体系有利储层具有重要的理论研究意义及勘探应用价值.

1 区域地质概况

珠江口盆地为新生代大陆边缘裂陷型盆地,盆地的形成、演化与印度—澳大利亚板块和欧亚板块碰撞、古太平洋板块和菲律宾板块俯冲挤压及南海扩张有关(施和生等,2017,2020,2022)。珠江口盆地由北向南可划分为北部隆起带、北部坳陷带、中央隆起带、中部坳陷带、南部隆起带和南部坳陷带6个构造单元,各个构造带又可分若干个凹陷和低隆起(图1a)。

惠州凹陷位于珠一坳陷中部,面积约7 000 km²。据已有的地震及钻井资料揭示,惠州凹陷自下而上发育的地层有:中生界(古潜山的岩体),始新统文昌组、恩平组,渐新统珠海组,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,以及第四系(施和生等,2017,2020,2022)。拉张离散的被动大陆边缘背景下,惠州凹陷经历了先陆后海的沉积环境演化,其地层具有典型的“先断后坳”双层结构。其中,古近系为断陷盆地陆相沉积环境,受到早—中始新世珠琼运动Ⅰ幕强烈拉张、裂陷活动,形成惠州凹陷主力烃源岩——文昌组中半深湖—深湖相暗色泥岩。此外,惠州凹陷在文昌期发生了“异迁移”,即凹陷两侧同沉积的控洼边界断层先后活动,导致凹陷内部惠州26洼的三级层序发生侧向迁移、斜列叠置(朱红涛等,2016;施和生等,2020;王绪诚等,2020),因此惠州26洼文昌组仅发育下文昌组文四段—文六段地层。古近系恩平组形成于裂陷Ⅱ幕,受控于珠琼运动二幕,湖盆主体为湖相、湖沼相、河流—三角洲沉积,岩性主要为灰白色砂岩、粉砂岩、浅灰色泥岩、泥质粉砂岩与煤线,在惠西南地区(包括惠州26洼),主要发育恩平组一十二段、恩平组三段、恩平组四段地层,被T70、T72、T73、T80四个层序界面所分隔(图1a),其中主要目的层段恩平组二段又可细分为EP21、EP22、EP23三个砂层组。

2 “扇—辫”复合体特征

受珠琼构造运动二幕影响,珠一坳陷恩平组发育分布广泛的滨浅湖和辫状河三角洲沉积体系(朱明等,2019;单玄龙等,2022)。而在惠州26洼地区,恩平组沉积主要受控于惠州25、惠州26、惠州27三个大型转换带(图1b),由于沉积期控洼断裂活动性不同,导致沉积物入湖坡度差异较大,因此整个裙

边带发育“扇三角洲—辫状河三角洲”复合沉积体系,整体上,伴随着恩平组沉积期构造活动强度的逐渐减弱与地形地貌趋缓,不同期次以及平面上不同构造均发生“扇—辫”沉积体系的转换,而这种“扇—辫”体系的转换对于储层发育具有重要的控制作用。

2.1 沉积相带特征

基于惠州26洼地区“扇—辫”沉积相带的时空转换特征,本次重点选取恩平组下段(恩三段、恩四段)、恩平组上段(恩二段)作为控制层进行相带分析。据区域连井岩性对比(图2a),可明确惠州26洼恩平组整体含砂率较高,主要介于60%~80%之间,井上“扇—辫”转换特征明显,即:(1)辫状河三角洲相(浅黄色填充)伽马曲线呈现明显的厚层箱形特征,前缘亚相可见漏斗形,平原亚相可见煤层发育,粒度随搬运距离变远而变细;搬运距离相对近的如A6-1井、B5-2/2Sa井以中—粗砂岩、含砾粗砂岩为主,含砂率达70%以上,而搬运距离相对较远的如A6-5井以中—细砂岩为主,含砂率在60%左右,岩性剖面呈现出砂泥互层的特征;(2)扇三角洲相由于离物源较近,属于陡坡沉积体系,其伽马曲线形态为齿化钟形—箱形、齿化漏斗形(深黄色填充),局部砂砾岩层段伽马曲线呈现高值特征;扇三角洲平原亚相如A6-2井主要以近源堆积砂砾岩为主,成分成熟度、结构成熟度很低,一般将其作为致密带考虑,前缘亚相以含砾粗砂岩、中—粗砂岩为主,入湖距离相对于辫状河三角洲前缘更短。

基于区域连井地震相对比(图2b),惠州26洼恩平组辫状河三角洲及扇三角洲地震整体相呈现中频、中等连续、中等振幅特点,在泥质含量变高、砂泥互层明显的A6-5、B5-1井区地震反射频率变高、振幅略强,富砂的A6-1、B5-2井区地震轴振幅中等连续、中等振幅特征,局部呈现弱振幅反射特征。在垂生物源方向剖面位置可见叠置的丘状反射特征,代表(水下)分流河道的侧向迁移,在平行物源方向剖面位置可见一定的三角洲前积反射特征。惠州27-A构造的A7-1井与惠州27-B构造南块的B5-1井之间可见地震相的明显变化,指示着扇三角洲、辫状河三角洲沉积边界(图2b)。

基于井震对比精准标定,得出惠州26洼恩平组沉积相平面展布及演化如图3所示:

(1)恩平组下段(恩三一四段)沉积时期,除惠州26-A构造为隆起剥蚀区,惠州26洼南缘其余构

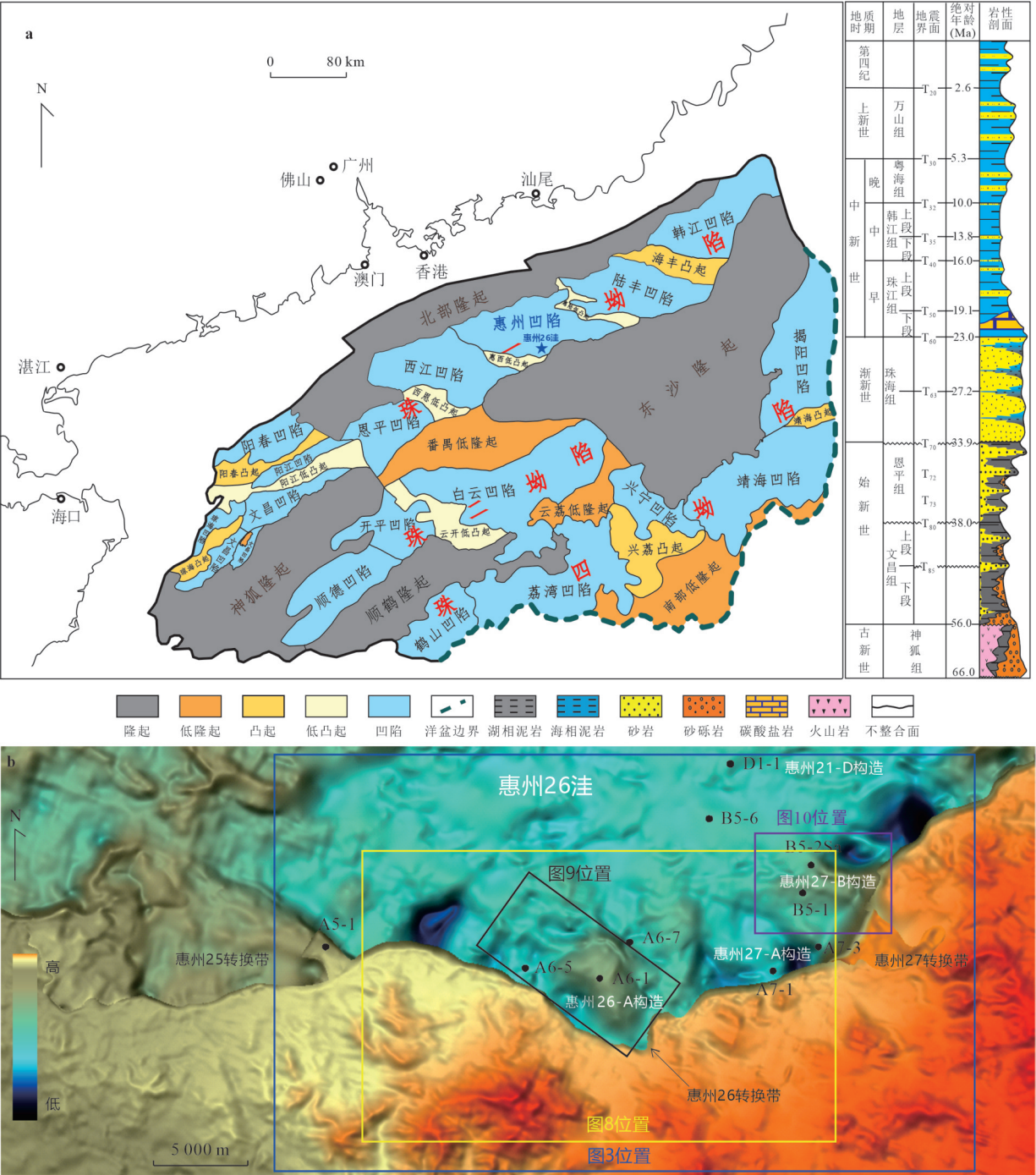


图 1 惠州凹陷区域位置及综合地层柱状图(a),惠州 26 洼恩平组二段沉积古地貌图(b)

Fig.1 Location and Comprehensive Stratigraphic Histogram of Huizhou Depression (a), Sedimentary Paleogeomorphology Map of the Second Member of Enping Formation in Huizhou 26 Depression (b)

造主要发育扇三角洲沉积体系(图 3a);而惠州 26 洼东缘的惠州 27-B 构造呈现出“南扇北辫”的特征,“扇—辫”转换边界位于 B5-1、B5-2 井之间,其中惠州 27-B 构造的 B5-1 井区在恩三段晚期发生“扇—辫”转换,随后惠州 27-B 构造整体转变为辫状河三角洲沉积。

(2)恩平组上段(恩二段早期)沉积时期,惠州 26-A 构造恩平组早期的剥蚀区逐渐淹没水下并接受沉积,并开始发育大型转换带扇三角洲沉积体系;而惠州 26 洼东缘的惠州 27-B 构造南块发生“扇—辫”沉积体系转换——发育大型转换带辫状河三角洲沉积体系(图 3b);至恩二段晚期,受物源

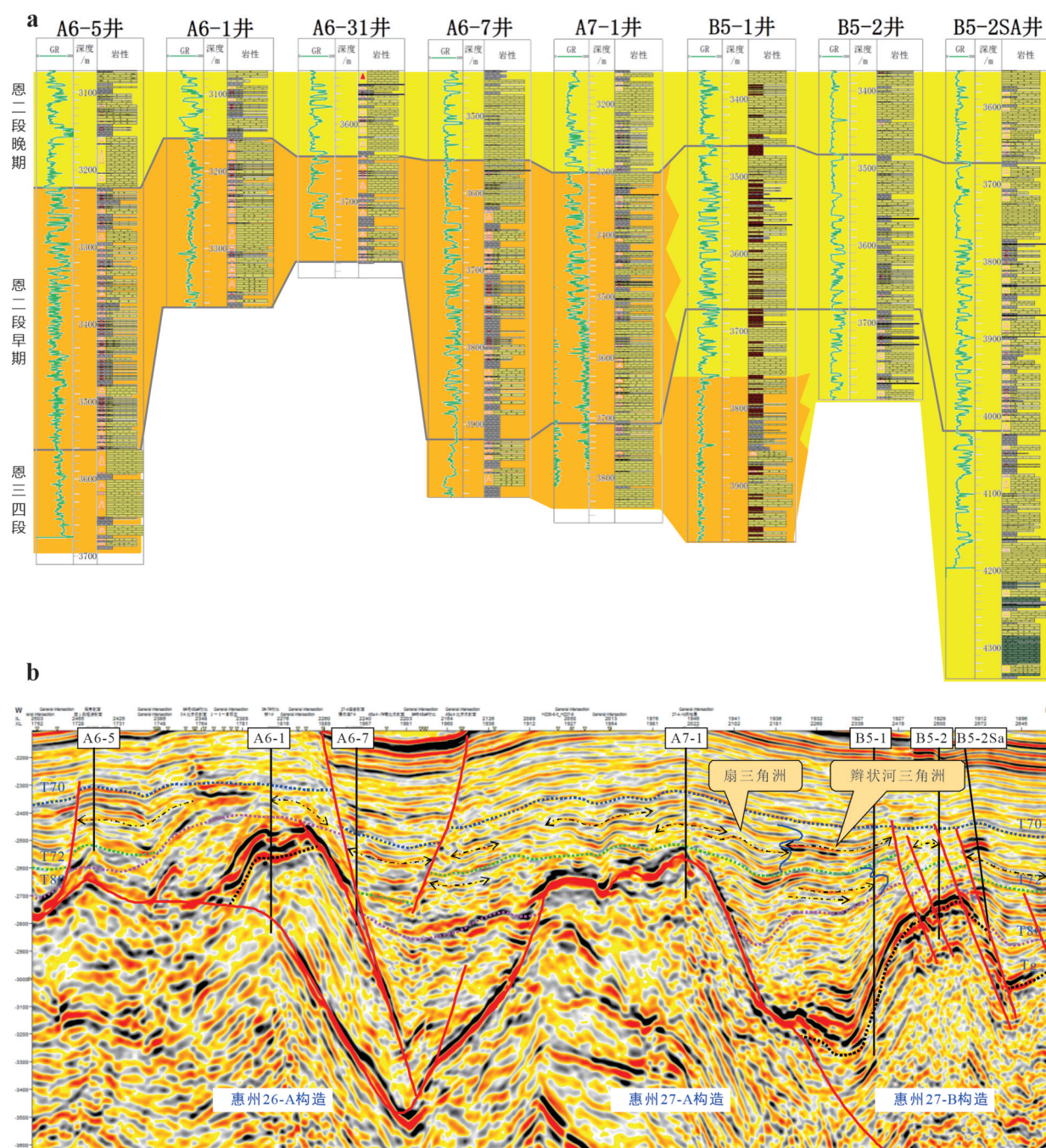


图2 惠州26洼恩平组区域连井(a)及地震相(b)剖面

Fig.2 Profile of Well Connection (a) and Seismic Facies (b) in the Enping Formation of Huizhou 26 depression

供给、边界断裂活动性等多个因素影响,惠州26洼南缘整体已转变为大型辫状河三角洲沉积体系,物源供给充足,滨浅湖相展布范围减小,呈现出“满带含砂”的特征(图3c)。

综上,惠州26洼恩平组整体具有“南扇北辫、早扇晚辫”的扇—辫发育规律。

2.2 储层发育特征

惠州26洼恩平组储层物性整体变化较大,井壁取心实测渗透率主要介于1~1 000 mD之间(图4),平均值约80 mD。对于粗砂岩、含砾粗砂岩、砂砾岩而言,由于粒度较粗、抗压实能力相对较强,储层渗透率10 mD的埋深下限约为4 000 m,储层渗透率1 mD的埋深下限约为4 500 m。其中:(1)惠州26洼周

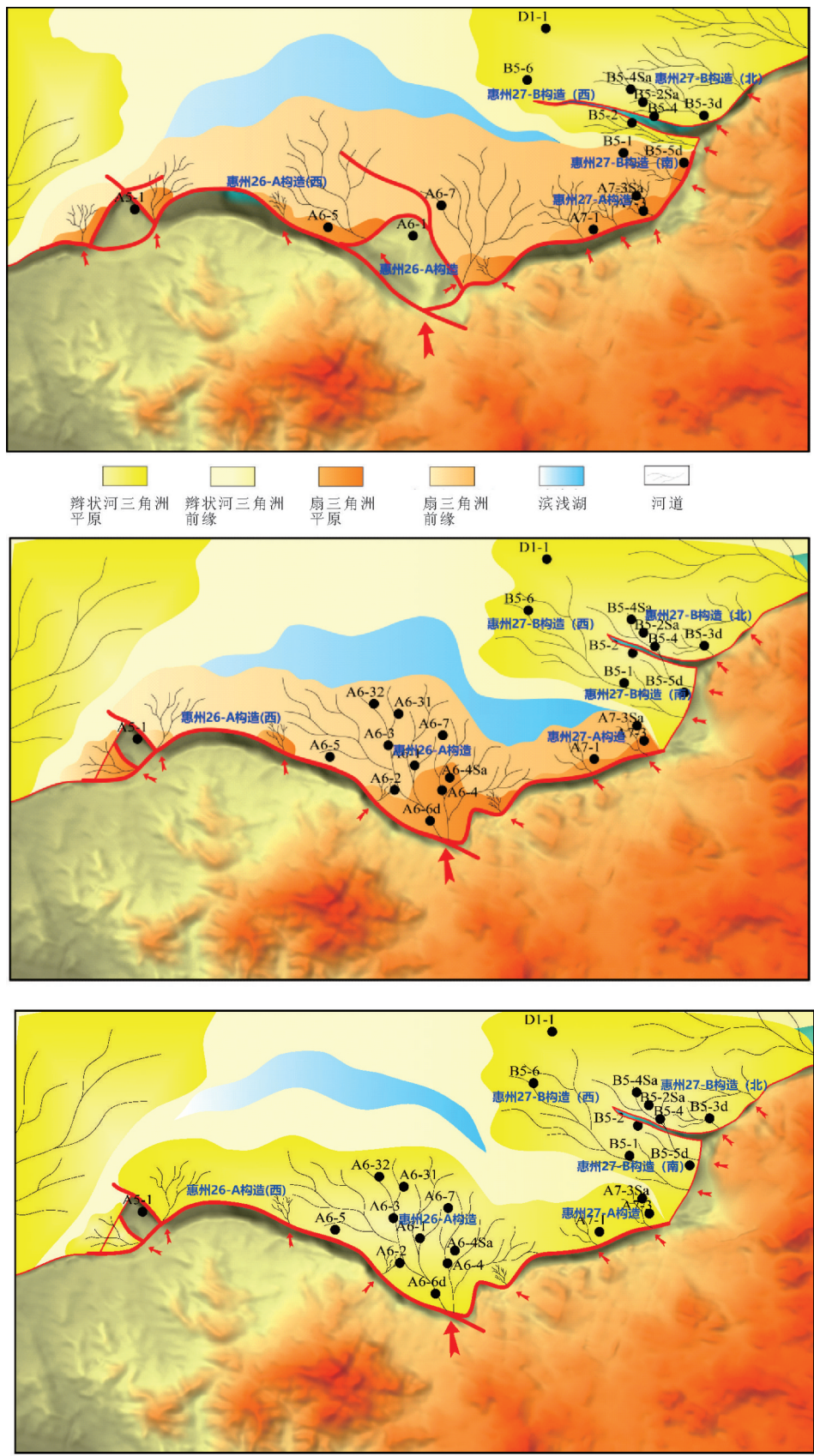


图 3 惠州 26 注恩平组恩三四段沉积相(a)、恩二段早期沉积相(b)、恩二段晚期沉积相(c)

Fig.3 Late sedimentary facies of the second member (a), early sedimentary facies of the second member (b), and sedimentary facies of the third and fourth members (c) of the Enping Formation in the Huizhou 26 depression

缘恩平组储层主体埋深3 000~4 000 m之间,粗砂岩及含砾粗砂岩物性条件相对较好,多为(水下)分流河道微相沉积;(2)洼内恩平组埋深大,普遍达到4 000 m,压实作用影响明显。整体而言,惠州26洼恩平组3 000~3 800 m深度段(位于埋深下限之上)储层物性差异大,储层非均质性强,受沉积、成岩等多个地质因素协同控制,现今储层物性整体上呈低孔、低渗储层特征(渗透率小于1 mD),但在有利的沉积条件、岩矿组分、成岩演化综合影响下,仍可发育有利储层。

惠州26洼恩平组“扇—辫”沉积体系不同井、不同深度段的储层铸体薄片下呈现出较大的差异性,扇三角洲主要局限发育在洼缘,埋深主要介于3 300~4 000 m;而辫状河三角洲由于以牵引流为主,推进能力强,在洼内洼缘均有展布,储层埋深可达3 700~5 000 m,其储层特征及差异主要如下:

(1)扇三角洲储层受相控作用明显,扇三角洲前缘亚相成分成熟度、结构成熟度中等—偏低,而扇三角洲平原亚相成分成熟度、结构成熟度极低,呈现出砂泥混杂近源堆积特征,孔隙不发育(图5a);此外,惠州26-A构造扇三角洲局部层段填隙物

含量高、种类多,储层主要填隙物类型包括泥质杂基、高岭石、方解石、自生石英、粘土矿物等等,成岩作用较为复杂,对恩平组储层物性影响较大(蒯克来,2015;王然,2020;王剑,2022;图5d~5h)。

(2)辫状河三角洲成分成熟度、结构成熟度中等—偏高,孔隙类型以原生粒间孔隙为主(图5b),粒内溶孔、铸模孔局部发育,但含量均较低,溶蚀面孔率多小于1.5%,溶孔主要以长石粒内溶孔为主(图5c)。尽管辫状河三角洲沉积体系为优质沉积相带,但惠州26洼东缘的惠州27-B构造储层受凝灰质控制作用明显,铸体薄片下可见大量凝灰质充填孔隙(图5k、5l)。此外,惠州26洼“扇—辫”沉积体系中均可以见到有机质浸染薄片现象(图5i、5j),指示着油气早期充注现象较为广泛,有机质占据粒间孔隙可以阻碍后期胶结作用,有利于有利储层发育,距离烃源岩近、沟通“源—储”断裂发育的井区,有机质浸染的铸体薄片更多,油气早期充注有利于原生孔隙的保护。

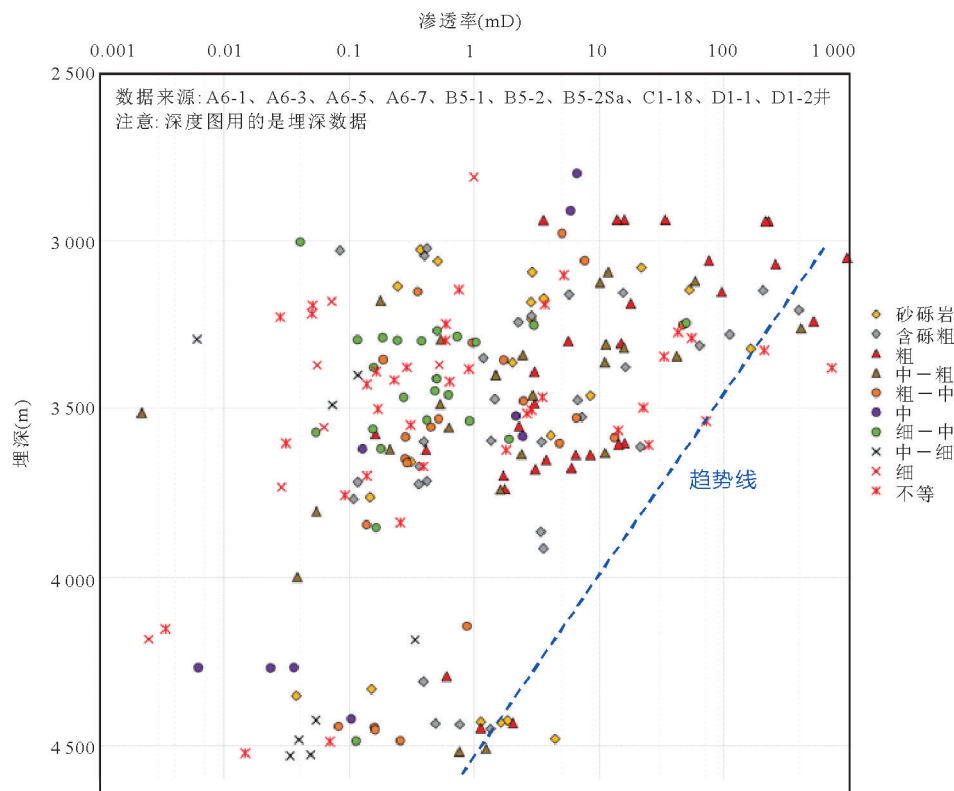


图4 惠州26洼恩平组实测渗透率与埋深关系散点图

Fig.4 Scatter plot of the relationship between measured permeability and burial depth in the Enping Formation in the Huizhou 26 depression

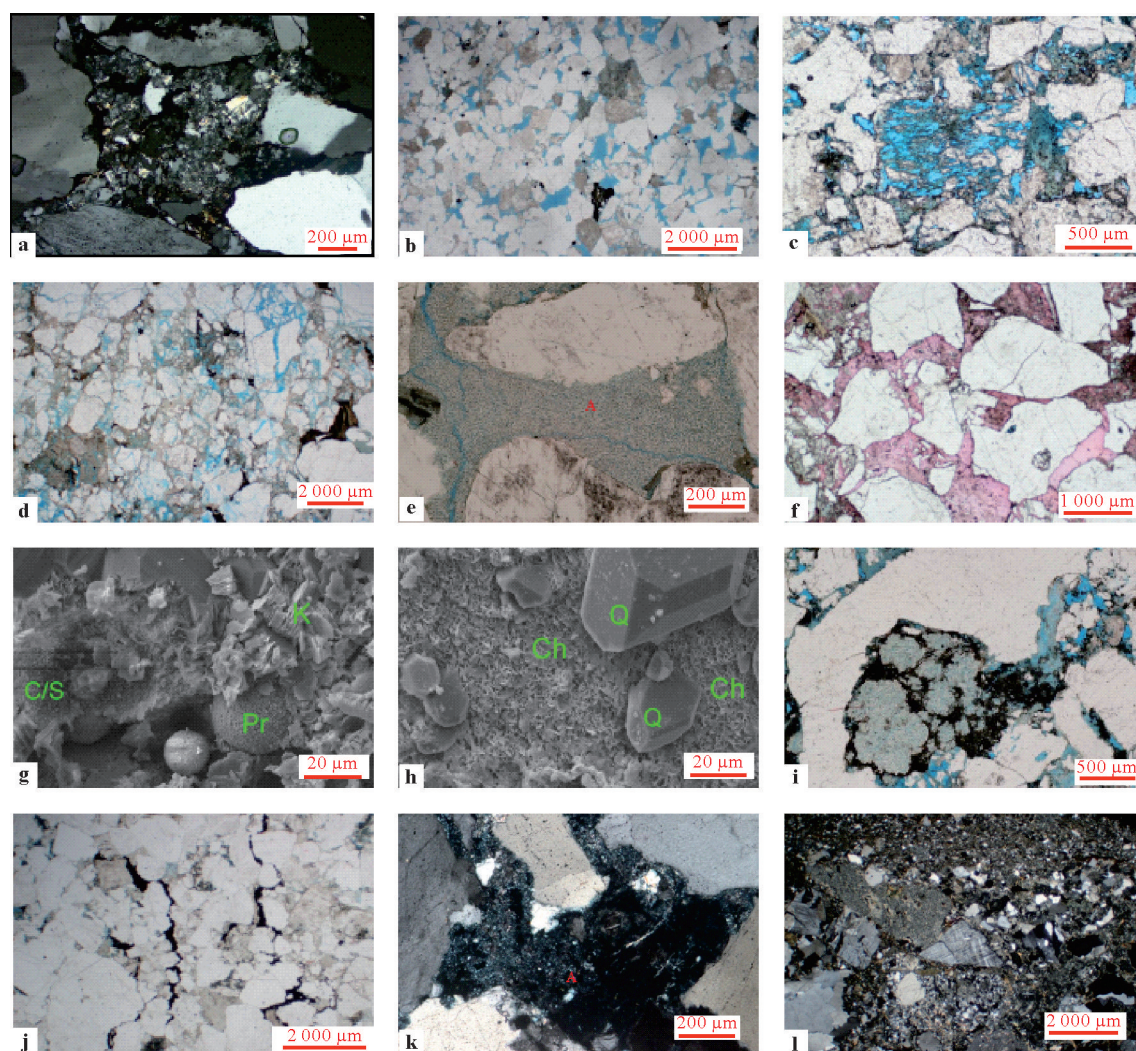


图5 惠州26洼恩平组重点井位镜下储层特征

Fig.5 Microscopic reservoir characteristics of key well locations in the Enping Formation of Huizhou 26 depression

a. A6-2井, 3 155.00 m, 砂泥混杂近源堆积, 成分成熟度低, 孔隙发育极差; b. A6-5井, 3 132.46 m, 分选好, 孔隙发育好, $K=2\ 206\text{ mD}$, $\varphi=17.4\%$; c. A6-1井, 3 235.00 m, 长石粒内溶蚀孔隙; d. A6-5井, 3 359.50 m, 泥质含量较丰富, 见少量高岭石等自生粘土矿物, 孔隙发育差, $K=2.9\text{ mD}$, $\varphi=11.56\%$; e. A6-1井, 3 234.50 m, 见大量高岭石(A)充填粒间, 见微孔; f. A6-1井, 3 184.00 m, 方解石呈连晶状胶结颗粒产出; g. A6-1, 3 306.50 m, 见粒状黄铁矿, 蜂窝状-片状绿/蒙混层以及手风琴状高岭石充填粒间孔隙产出; h. A6-1, 3 415.20 m, 针叶状绿泥石和次生加大石英夹杂共生并充填粒间孔隙产出; i. A6-7井, 3 660.00 m, 有机质充填粒间孔隙; j. B5-2井, 3 836.00 m, 见有机质条带, 粗粒为主, 凹凸-线接触, 孔隙发育差; k. B5-2井, 3 770.00 m, 凝灰质充填粒间, 并见溶蚀; l. B5-2井, 3 815.00 m, 填隙物凝灰质含量10%, 火山岩岩屑相对含量55%; m. A6-1井, 3 234.50 m, 半塑性安山岩岩屑; n. A6-4井, 3 220.00 m, 可见玻屑; o. B5-1井, 安山岩砾石见磨圆

3 有利储层控制因素

惠州26洼恩平组发育“扇—辫”复合体沉积体系, 沉积期伴随多类型的改造作用、火山喷发, 成岩期局部发生胶结物充填、有机酸溶蚀等等, 储层条件较为复杂. 由于扇三角洲、辫状河三角洲两种相带沉积机制的差异, 有利储层发育的机理亦有所不同, 因此上文首先基于井震联合对比研究, 开展扇—辫体系特征、展布规律的分析, 刻画了平面上、纵向上“扇—辫”转换的边界, 下文将继续通过

“扇—辫”对比分析, 剖析有利储层发育机理, 明确惠州26洼恩平组“扇—辫”复合体系“优相—改造—火山”为该地区有利储层发育的三大主控因素.

3.1 优质相带

对于古近系储层条件来说, 优质沉积相带是寻找有利储层的关键因素, 非优相储层物性普遍较差. 在“扇—辫”复合体系与“扇—辫”转化的整体背景下, 沉积亚相类型对于储层发育产生基础控制作用, 两大沉积相类型不同亚相类型的控储效应差异

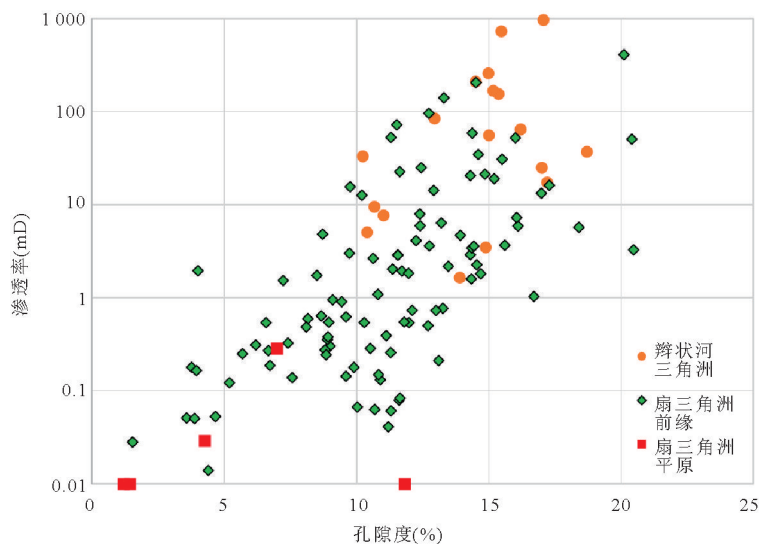


图6 恩平组不同沉积相带井壁心实测物性

Fig.6 Measured physical properties of wellbore cores in different sedimentary facies zones of the Enping Formation

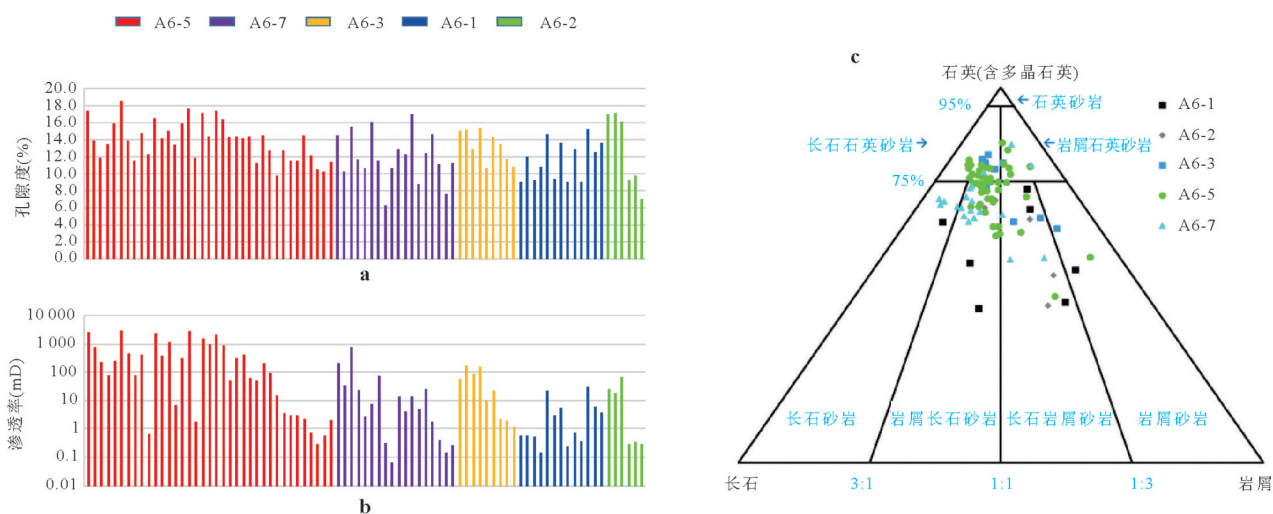


图7 惠州26-A构造恩平组下段实测孔隙度(a)、实测渗透率(b)及成分成熟度图(c)

Fig.7 Measured porosity (a), permeability (b), and compositional maturity map (c) of the lower section of the Enping Formation in Huizhou 26-A structure

明显. 基于区域构造背景、地震相、岩相、测井相等联合研究, 刻画落实了“扇-辫”沉积亚相边界(图3). 研究认为, 辫状河三角洲平原至前缘亚相及扇三角洲前缘亚相均为优质相带类型. 从钻井实测物性数据可以看出(图6), 辫状河三角洲相物性最优, 其渗透率多大于10 mD; 扇三角洲前缘亚相物性次之, 其渗透率多介于1~10 mD; 扇三角洲平原亚相物性较差, 均小于1 mD. 其中, A6-2井薄片镜下可见明显的砂泥混杂堆积特征(图5a), 物性相对较差.

扇三角洲沉积体系相对于辫状河三角洲沉积体系来说, 其入湖坡度较陡, 搬运距离近. 近源堆积

的扇三角洲平原相多为砂泥混杂堆积, 分选程度差, 分选、磨圆均不好, 储层物性普遍较差. 通过对已钻井实测物性及储层岩石学特征分析可以发现, 经过远距离搬运的扇三角洲成分成熟度、结构成熟度都会明显变高, 泥质含量降低, 储层物性明显优于近源搬运的沉积体系(搬运距离自远而近顺序为: A6-5、A6-7、A6-3、A6-1、A6-2). 以惠州26-A构造恩平组下段(恩三一四段)为例, 从近物源的A6-2、A6-1井到远物源的A6-3、A6-7、A6-5井呈现出孔隙度相差不大(图7a)、渗透率明显变好(图7b)、成分成熟度明显变高(图7c)的特征, A6-2、A6-1井钻遇扇三角洲平原-前缘(近端), 以长石岩屑砂岩为

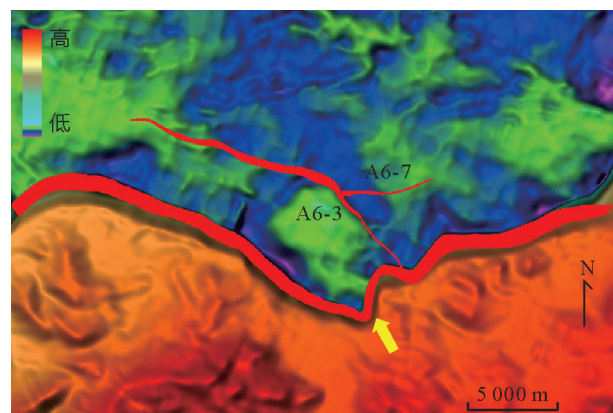


图8 惠州26-A构造EP23层沉积古地貌图(位置见图1b)

Fig.8 Sedimentary Paleogeomorphology Map of EP23 Layer in Huizhou 26-A Structure (see Fig.1b for location)

主,渗透率多小于10 mD,而A6-3、A6-7、A6-5井钻遇扇三角洲前缘(中—远端),以长石石英砂岩、岩屑石英砂岩、岩屑长石砂岩为主,储层物性可达1 000 mD以上.综上所述,远源搬运可以改善储层,使储层物性变好.

3.2 特殊改造作用

相较于辫状河三角洲而言,扇三角洲储层成熟度相对较低,泥质含量高,有利储层发育条件更加严苛.惠州26洼恩平组沉积期在特殊地形地貌控制下扇三角洲有利储层发育带具备多级断阶搬运与古隆起湖浪淘洗改造条件,对扇三角洲沉积体系产生了重要的改造作用.对比不同沉积条件下的扇三角洲储层特征可知,这种特殊改造作用对于储层物性的改善至关重要.

3.2.1 多级断阶搬运改造 恩平组时期,A6-7井与A6-3井距离转换带物源口的距离相近,约5 km.其中,A6-3井粒度以含砾粗砂岩为主,GR曲线也呈现出(齿化)箱型、(齿化)钟型的特点,认为钻遇扇三角洲前缘水下分流河道微相(图2a);而A6-7井粒度以中粗砂岩为主(图2a),粒度比3井区更细.一般而言,搬运距离相近的3井和7井储层物性应该相差不多,但是通过实测渗透率对比可以发现实际现象与理论相矛盾:即(1)EP21层7井平均326 mD,3井82 mD;(2)EP22层7井22.7 mD,3井1.9 mD;(3)EP23层7井10.5 mD,3井1.1 mD,7井的物性更优.

因而,通过恢复恩平组二段EP23砂层组沉积古地貌可知(图8),A6-7井区沉积体系受多级盆内断裂坡折控制,呈阶梯状向湖盆散开,多级断裂坡折可以起到改造储层的作用,使储层分选磨圆变

好,使得物性变好.

3.2.2 古隆起湖浪淘洗改造 物源稳定供给区,水下古隆起地貌具备湖浪高能碎浪改造储层的有利条件(姜在兴,2015;陈彬滔,2018).以惠州26-A构造扇三角洲层段为例,基于井上精细小层对比及地震同相轴的稳定追踪,精细解释EP22、EP23砂层组中的单砂体组EP221、EP231、EP233的顶底界面,恢复砂层组级别古沉积地貌(图9),可以看到从早期到晚期(从EP233到EP221),惠州26-A古隆起是逐渐填平补齐的过程,即EP233古隆起地势最高,EP231次之,而EP221地势相对平缓.且据前人研究,湖盆中古隆起地貌由于水深相对较浅,发育水动力作用较强的高能碎浪带、破浪带,可以改善储层(周连德等,2016;杨剑萍等,2017).以A6-1井为例,EP233层古隆幅度最高,湖浪改造作用最强,铸体薄片下的泥质杂基含量仅0.5%,孔隙较发育,渗透率达152 mD;而EP231层古隆幅度次之,泥质杂基含量约2%,渗透率约31 mD;EP221层地势相对平缓,泥质杂基含量达7%,对应着物性较差,渗透率仅0.5 mD.因此,古隆起地貌背景下的高能湖浪可以有效改善储层物性.

3.3 火山作用

火山物质对储层物性的影响具有两面性:一方面火山物质既可以填充粒间孔隙,使储层物性变差,另一方面火山物质的易溶组分又可以在有机酸作用下,溶解产生次生孔隙(姜在兴,2015;陈彬滔,2018;王剑,2022).惠州26洼周缘,火山物质呈现出的主要是对储层物性的负面影响作用.据统计,惠州27-B构造8口钻井录井为凝灰质砂岩层段失利比例达92%,其中84%无油气显示;惠州26-A构造4井、4Sa井、6d井录井为含凝灰质层段的无任何油气显示.惠州27-B储层填隙物凝灰质含量也与储层物性呈现出明显的反比关系,当凝灰质含量>5%时,其面孔率明显降低.

从成因上来说,惠州26-A地区扇三角洲储层中的火山物质是喷发成因,呈中心式局限分布,发育原位火山岩(溢流安山岩)(图5m),薄片上可见玻屑(图5n),地震反射呈现超低频反射特征(图10);惠州27-B地区以搬运成因为主,早期喷发的火山岩被风化剥蚀成为晚期沉积物源体系,沿控洼断裂线性分布,镜下安山岩砾石见磨圆(图5o),在该地区搬运成因的火山物质地震响应特征不明显,但测井相的密度值变大,与中子曲线明显偏离(图10a).

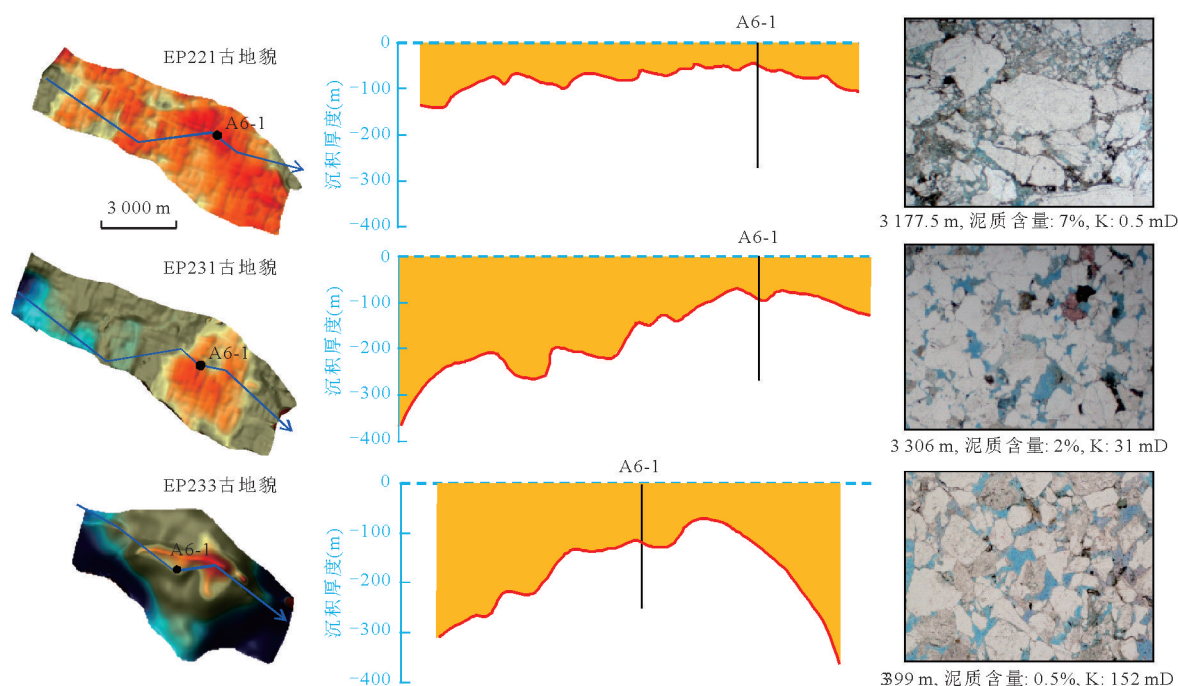


图9 惠州 26-A 构造单砂体组 (EP221、EP231、EP233) 微古地貌图 (位置见图 1b)

Fig.9 Micropaleogeomorphic map of Huizhou 26-A structure single sand body group (EP221, EP231, EP233) (see Figure 1b for location)

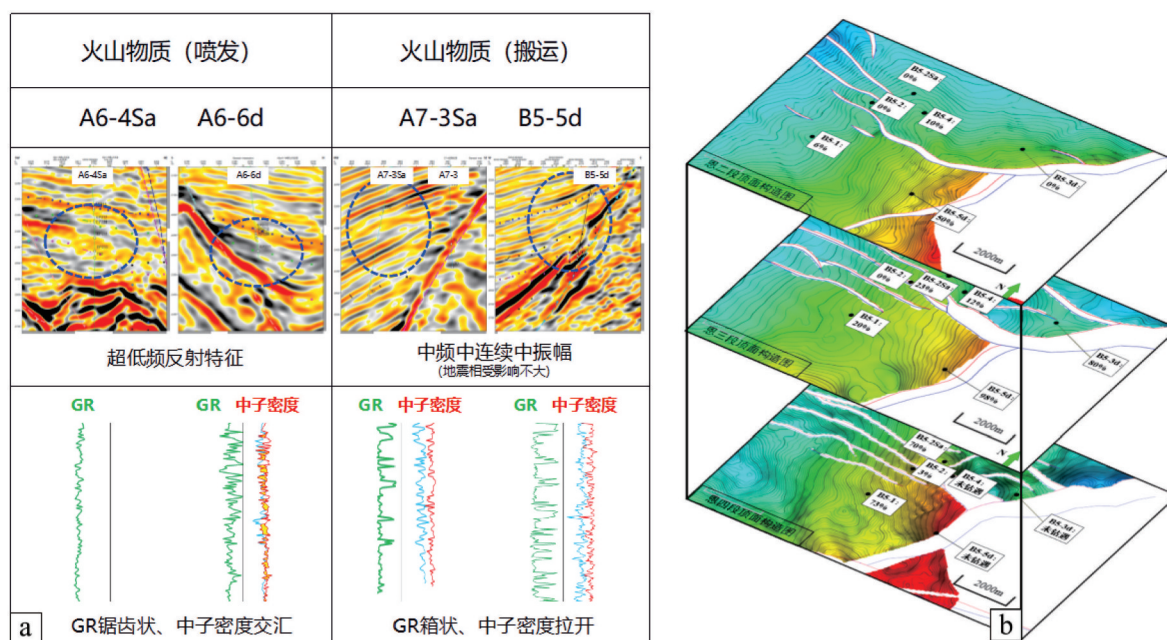


图 10 惠州 26-A、27-B 构造火山物质的井震特征 (a) 惠州 27-B 构造火山物质含量变化规律 (b) (位置见图 1b)

Fig.10 Well seismic characteristics of volcanic material in Huizhou 26-A and 27-B structures (a) Changes in volcanic material content in Huizhou 27-B structures (b) (see Figure 1b for location)

从分布上来说,惠州 26-A 构造火山物质局限分布于 1 井区 (4 井、4Sa 井、6d 井) 附近,展布范围较小,对储层的影响也较为局限;而惠州 27-B 构造火山物质影响范围较大,整体来看,由深至浅、由近到

远含量逐渐降低 (图 10b). 其中,惠州 27-B 构造 (1) 恩四段搬运距离较远的 B5-1、B5-2 井仍钻遇超 70% 的火山物质; (2) 恩三段仅近源的 B5-5d、B5-3d 井上钻遇大量火山物质,远源的 B5-1、B5-2、B5-2Sa、B5-

4 井火山物质含量多小于 20%;(3)恩二段,整体火山物质含量整体小于 10%,仅局部 5d 井可达 50%。因此,火山物质展布范围局限,对惠州 26-A 构造围区储层物性的影响有限;惠州 27-B 构造围区主要以优质辫状河三角洲沉积体系为主,有利储层分布于埋深更浅、搬运更远的区带。

综上所述,惠州 26 洼恩平组“扇—辫”复合体有利储层受“优相—改造—火山”三大因素所主控,其中:(1)优质沉积相带是有利储层发育的基础,辫状河三角洲相及远源搬运的扇三角洲相均为优质沉积相带;(2)多级断阶搬运以及古隆背景下的湖浪淘洗是改善扇三角洲储层物性的关键;(3)辫状河三角洲相虽为优相,但火山物质差异化成岩演化对储层物性起着调控作用。三大因素是后期成岩作用的先决条件也是有利储层发育的基础。因此,惠州 26 洼恩平组辫状河三角洲相为优质相带,储层物性整体相对较好,但基于上文综合论述,仍需在埋深下限之上寻找有利储层(图 4),且优选受火山物质影响小的区带(图 10);然而,扇三角洲前缘亚相虽同为优质相带,但其储层物性整体不如辫状河三角洲相,且有一定比例储层渗透率小于 1 mD(图 6),因此,为寻找该相带有效储层,还需加强对改造作用的研究,优选强改造作用下的沉积体。

4 结论

(1)惠州 26 洼恩平组发育大型扇三角洲、辫状河三角洲复合沉积体系,纵向上不同时期、平面上不同构造均发生“扇—辫”沉积体系的转换,整体具有“南扇北辫、早扇晚辫”的扇—辫发育关系。

(2)惠州 26 洼恩平组“扇—辫”复合体储层物性与埋深呈现明显的负相关关系,与粒度呈现正相关关系;铸体薄片下,成分成熟度、结构成熟度、杂基含量、胶结物含量、溶蚀强度等方面可见较大差异,储层非均质性强。

(3)“优相—改造—火山”为惠州 26 洼周缘恩平组“扇—辫”复合体储层物性主控因素,其中优质沉积相带控制了有利储层的发育,多级断阶搬运、古隆背景下的湖浪淘洗等多类型改造作用是改善储层物性的关键要素,多成因类型、差异展布的火山物质充填孔隙使得储层物性变差,成岩作用对局部层段的储层物性产生影响。

(4)惠州 26 洼恩平组辫状河三角洲相储层条件整体相对较好,但需要满足以下两个条件:①在埋

深下限之上寻找有利储层;②优选受火山物质影响小的区带。然而,扇三角洲前缘亚相需在以上两个条件基础上加强对各类改造作用研究,优选强改造作用下的储层分布,进而预测相应的有利储层发育区带。

References

- Chen, B. T., Shi, Z. S., Xue, L., et al., 2018. Depositional Models and Lithologic Reservoir Exploration of Sandy Beach-Bar around Buried-Hill: a Case from Galhak Formation in Ruman Region of Melut Basin, South Sudan. *Lithologic Reservoirs*, 30(6): 37—44(in Chinese with English abstract).
- Chen, C. M., Shi, H. S., Xu, S. C., et al., 2003. Tertiary Hydrocarbon Accumulation Condition in Pearl River Mouth Basin. Science Press, Beijing(in Chinese)..
- Du, J. Y., Ding, L., Zhang, X. T., et al., 2017. Exploration Approach and Techniques for the Neogene Lithologic Reservoirs in the Southwestern Huizhou Sag, Pearl River Mouth Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 39(6): 858—864(in Chinese with English abstract).
- Du, J. Y., Zhang, X. T., Liu, P., et al., 2021. Classification of Paleogene Source-to-Sink System and Its Petroleum Geological Significance in Zhuyi Depression of Pearl River Mouth Basin. *Earth Science*, 46(10): 3690—3706. (in Chinese with English abstract).
- Jiang, Z. X., Wang, J. H., Zhang, Y. F., 2015. Advances in Beach-Bar research: A Review. *Journal of Palaeogeography*, 17(4): 427—440(in Chinese with English abstract).
- Liu, J., Cai, Z., Pang, X. Q., et al., 2022. Quantitative Prediction and Evaluation of Paleogene Favorable Hydrocarbon Accumulation Areas with Multi-Dynamic-Stage-Factor Combination in Lufeng Sag, Pearl River Mouth Basin. *Earth Science*, 47(7): 2481—2493(in Chinese with English abstract).
- Peng, G. R., Zhang, L. L., Xu, X. M., et al., 2023. Source Rock Attribute, Oil Classification and Hydrocarbon Accumulation Main Control Factors of Xijiang Main Sag in Pearl River Mouth Basin. *Earth Science*, 48(6): 2361—2375 (in Chinese with English abstract).
- Peng, G. R., Zhang, X. T., Xu, X. M., et al., 2022. Important Discoveries and Understandings of Oil and Gas Exploration in Yangjiang Sag of the Pearl River Mouth Basin, Northern South China Sea. *China Petroleum Exploration*, 24(3): 267—279. (in Chinese with English abstract).
- Shan, X. L., Yalikun, Rexiti, Liu, P., et al., 2023. Sedimentary Response and Tectonic Significance of Zhuqiong

- Movement in Xijiang Main Sag, Pearl River Mouth Basin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 53(2): 329—342(in Chinese with English abstract).
- Shi, H. S., Dai, Y. D., Liu, L. H., et al., 2015. Geological Characteristics and Basic Model of Distribution and Development of Oil and Gas Reservoirs in Zhuyi Depression, Pearl River Mouth Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 36(S2): 120—133, 155(in Chinese with English abstract).
- Shi, H. S., Du, J. Y., Mei, L. F., et al., 2020. Huizhou Movement and Its Significance in Pearl River Mouth Basin, China. *Petroleum Exploration and Development*, 47(3): 483—498(in Chinese with English abstract).
- Shi, H. S., Gao, Y. D., Liu, J., et al., 2022. Characteristics of Hydrocarbon Source-Migration-Accumulation in Huizhou 26 Sag and Implications of the Major Huizhou 26-6 Discovery in Pearl River Mouth Basin. *Oil and Gas Geology*, 43(4): 777—791(in Chinese with English abstract).
- Shi, H. S., Yu, S. M., Mei, L. F., et al., 2009a. Features of Paleogene Episodic Rifting in Huizhou Fault Depression in the Pearl River Mouth Basin. *Natural Gas Industry*, 29(1): 35—37, 40, 133(in Chinese with English abstract).
- Shi, H. S., Zhu, J. Z., Jiang, Z. L., et al., 2009b. Hydrocarbon Resources Reassessment in Zhu I Depression, Pearl River Mouth Basin. *China Offshore Oil and Gas*, 21(1): 9—14(in Chinese with English abstract).
- Shi, H. S., Shu, Y., Du, J. Y., et al., 2017. Petroleum Geology of Paleogene in Pearl River Mouth Basin. Geological Publishing House, Beijing(in Chinese).
- Wang, R., Chang, Q. S., Qian, Y. X., et al., 2020. Reservoir Characteristics and Genesis of Shale Oil “Sweet Spots” in Lucaogou Formation, Jimsar Sag, Junggar Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 42(4): 604—611(in Chinese with English abstract).
- Wang, X. C., Du, J. Y., Zhang, Q., et al., 2020. Study of Source-Sink System of Transfer Zone Type of Palaeogene in Southwestern Area of the Huizhou Sag and Its Exploration Significance. *China Offshore Oil and Gas*, 32(5): 44—53(in Chinese with English abstract).
- Wang, J., Yuan, B., Liu, J., et al., 2022. Genesis and Poredevelopment Characteristics of Permian Lucaogou Migatites, Jimsar Sag, Junggar Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 44(3): 413—424(in Chinese with English abstract).
- Xi, K. L., Cao, Y. C., Zhu, R. K., et al., 2015. Rock Types and Characteristics of Tight Oil Reservoir in Permian Lucaogou Formation, Jimsar Sag. *Acta Petrolei Sinica*, 36(12): 1495—1507(in Chinese with English abstract).
- Yang, J. P., Zhang, Y. P., Wang, A. X., et al., 2017. Characteristics of Beach Bar Sedimentation in Sha-3 Upper Sub-Interval of Gaojiapu Area in the Baxian Sag. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 24(1): 1—5(in Chinese with English abstract).
- Zhang, L., Wu, J., Cai, G. F., et al., 2022. Reservoir Characteristics and Main Controlling Factors of Wenchang Formation in Panyu-4 Depression, Pearl River Mouth Basin. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 42(4): 116—127 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Lü, F. L., He, X. S., et al., 2018. Progress and Enlightenment of Oil and Gas Exploration in the South China Sea in Recent Five Years. *China Petroleum Exploration*, 23(1): 54—61(in Chinese with English abstract).
- Zhang, W. B., Yi, H., Zhong, H., et al., 2018. Analysis on the Causes of Failed Wildcat Wells in the Eastern Pearl River Mouth Basin and Its Enlightenment. *China Petroleum Exploration*, 23(3): 18—27(in Chinese with English abstract).
- Zhou, F. J., Ding, L., Zhang, Y. X., et al., 2022. Reservoir Characteristics and Main Controlling Factors of High-Quality Reservoirs in Wenchang Formation in Southwestern Huizhou Sag. *Sino-Global Energy*, 27(9): 30—37 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, L. D., Zhang, J. M., Mu, P. F., et al., 2016. Geomorphology and Thin Beach-Bar Sandbody Distribution Law of Paleogene Dongying Formation in a Oilfield, Bohai Bay, China. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 31(6): 32—38(in Chinese with English abstract).
- Zhu, H. T., Li, S., Liu, H. R., et al., 2016. The Types and Implication of Migrated Sequence Stratigraphic Architecture in Continental Lacustrine Rift Basin: an Example from the Paleogene Wenchang Formation of Zhu I Depression, Pearl River Mouth Basin. *Earth Science*, 41(3): 361—372 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, M., Dai, Y. D., Zhu, J. Z., et al., 2017. Geological Characteristics and Accumulation Mechanism of Paleocene Reservoir in Huizhou Sag, Pearl River Mouth Basin. *China Offshore Oil and Gas*, 29(1): 1—11(in Chinese with English abstract).
- Zhu, M., Zhang, X. T., Huang, Y. P., et al., 2019. Characteristics and Resource Potential of Source Rocks in Pearl River Mouth Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 40(S1): 53—68 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, M., Zhang, X. T., Huang, Y. P., et al., 2019. Characteristics and Resource Potential of Source Rocks in the Pearl River Mouth Basin. *Journal of Petroleum*, 40(Sup 1): 53—68(in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 陈彬滔,史忠生,薛罗,等,2018. 古潜山周缘滩坝沉积模式与岩性油藏勘探实践——以南苏丹 Melut 盆地 Ruman 地区 Galhak 组为例. 岩性油气藏,30(6): 37—44.
- 陈长民,施和生,许仕策,等,2003. 珠江口盆地(东部)第三系油气藏形成条件. 北京: 科学出版社.
- 杜家元,丁琳,张向涛,等,2017. 珠江口盆地惠州凹陷西南部新近系岩性油气藏勘探思路与关键技术. 石油地质实验,39(6): 858—863.
- 杜家元,张向涛,刘培,等,2021. 珠江口盆地珠一坳陷古近系“源—汇”系统分类及石油地质意义. 地球科学,46(10): 3690—3706.
- 姜在兴,王俊辉,张元福,2015. 滩坝沉积研究进展综述. 古地理学报,17(4): 427—440.
- 刘军,蔡哲,庞雄奇,等,2022. 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. 地球科学,47(7): 2481—2493.
- 彭光荣,张丽丽,许新明,等,2023. 珠江口盆地西江主洼烃源岩属性、原油分类及成藏主控因素. 地球科学,48(6): 2361—2375.
- 彭光荣,张向涛,许新明,等,2022. 南海北部珠江口盆地阳江凹陷油气勘探重要发现与认识. 中国石油勘探,24(3): 267—279.
- 单玄龙,热西提·亚力坤,刘培,等,2022. 珠江口盆地西江主洼珠琼运动的沉积响应及构造意义. 吉林大学学报(地球科学版),53(2): 329—342.
- 施和生,代一丁,刘丽华,等,2015. 珠江口盆地珠一坳陷油气藏地质特征与分布发育基本模式. 石油学报,36(2): 120—132.
- 施和生,杜家元,梅廉夫,等,2020. 珠江口盆地惠州运动及其意义. 石油勘探与开发,47(3): 447—461.
- 施和生,高阳东,刘军,等,2022. 珠江口盆地惠州 26 洼“源—汇—聚”特征与惠州 26-6 大油气田发现启示. 石油与天然气地质,43(4): 777—791.
- 施和生,舒誉,杜家元,等,2017. 珠江口盆地古近系石油地质. 北京: 地质出版社.
- 施和生,于水明,梅廉夫,等,2009a. 珠江口盆地惠州凹陷古近纪幕式裂陷特征. 天然气工业,29(1): 1—5.
- 施和生,朱俊章,姜正龙,等,2009b. 珠江口盆地珠一坳陷油气资源再评价. 中国海上油气,21(1): 9—14.
- 王剑,袁波,刘金,等,2022. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组混积岩成因及其孔隙发育特征. 石油实验地质,44(3): 413—424.
- 王然,常秋生,钱永新,等,2020. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油“甜点体”储集特征及成因机理. 石油实验地质,42(4): 604—611.
- 王绪诚,杜家元,张琴,等,2020. 惠西南地区古近系转换带型源—汇系统研究及其勘探意义. 中国海上油气,32(5): 44—53.
- 意克来,操应长,朱如凯,等,2015. 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组致密油储层岩石类型及特征. 石油学报,36(12): 1495—1507.
- 杨剑萍,张一平,王爱香,等,2017. 霸县凹陷高家堡地区沙三上亚段滩坝沉积特征. 特种油气藏,24(1): 1—5.
- 张丽,吴静,蔡国富,等,2022. 珠江口盆地番禺 4 洼文昌组储层特征及主控因素. 矿物岩石,42(4): 116—127.
- 张强,吕福亮,贺晓苏,等,2018. 南海近 5 年油气勘探进展与启示. 中国石油勘探,23(1): 54—61.
- 张为彪,易浩,钟辉,等,2018. 珠江口盆地东部地区预探井失利原因分析及启示. 中国石油勘探,23(3): 18—27.
- 周凤娟,丁琳,张月霞,等,2022. 惠州凹陷西南部文昌组储层特征及有利储层主控因素. 中外能源,27(9): 30—37.
- 周连德,张建民,穆朋飞,等,2016. 渤海 A 油田东营组古地貌及薄层滩坝发育规律. 西安石油大学学报(自然科学版),31(6): 32—38.
- 朱红涛,李森,刘浩冉,等,2016. 陆相断陷湖盆迁移型层序构型及意义: 以珠 I 坳陷古近系文昌组为例. 地球科学,41(3): 361—372.
- 朱明,代一丁,朱俊章,等,2017. 珠江口盆地惠州凹陷古近系油藏地质特征及成藏机理. 中国海上油气,29(1): 1—11.
- 朱明,张向涛,黄玉平,等,2019. 珠江口盆地烃源岩特征及资源潜力. 石油学报,40(S1): 53—68.
- 朱明,张向涛,黄玉平,等,2019. 珠江口盆地烃源岩特征及资源潜力. 石油学报,40(增刊 1): 53—68.