

# 珠江口盆地珠一坳陷古近系优质储层差异发育特征及主控因素

——以陆丰地区和惠州地区文昌组为例

丁琳, 李晓艳, 周凤娟, 龙更生, 马永坤, 张月霞

(中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 广东深圳 518067)

**摘要:**近年来珠江口盆地古近系深层勘探屡获突破,经济下限也逐渐下调至埋深4 000多米,勘探实践证明,陆丰-惠州地区古近系储层表现出明显的差异性,陆丰地区古近系储层普遍优于惠州地区。为解析这两个地区古近系储层的差异,本文利用岩石薄片、扫描电镜、X衍射、物性等分析化验资料,开展了陆丰、惠州地区古近系储层研究,根据成岩过程中岩石的溶蚀特征及溶蚀产物对其进行分类,建立其与储层物性之间的对应关系,进而还原不同类型储层的孔隙演化过程及控制因素。研究结果显示,陆丰地区文昌组储层受中生代沉积岩物源影响明显,岩石组分具高石英、低长石组分特征,孔隙类型以原生孔为主,具有弱溶蚀-少产物的成岩组合,发育低孔中渗或中高孔中高渗储层;惠州地区文昌组受中生代花岗岩物源影响明显,岩石组分具低石英、高长石组分特征,孔隙类型以原生孔、溶蚀孔和高岭石晶间微孔等混合孔为主,具有强溶蚀-多产物的成岩组合,普遍发育中孔低渗储层,但受强水动力改造下也能形成中孔中渗优质储层。对陆丰与惠州地区古近系优质储层的对比分析认为,母岩性质决定储层的先天优势,沉积改造改善储层初始物性,成岩差异影响储层质量的好坏。厘清不同母岩影响下优质储层发育条件及形成机理,对不同地区古近系储层甜点预测意义重大。

**关键词:**珠江口盆地;古近系;母岩性质;成岩差异;优质储层;主控因素

中图分类号: P618.130.2<sup>+</sup>; P588.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2022)01-0075-12

## Differential development characteristics and main controlling factors of the Paleogene high-quality reservoirs from the Zhu I Depression in the Pearl River Mouth Basin: A case on Wenchang Formation at Lufeng area and Huizhou area

DING Lin, LI Xiao-yan, ZHOU Feng-juan, LONG Geng-sheng, MA Yong-kun and ZHANG Yue-xia

(Shenzhen Branch of CNOOC China Limited, Guangdong Shenzhen 518067, China)

**Abstract:** In recent years, the Paleogene deep exploration of Pearl River Mouth Basin has gained repeated breakthroughs, and the economic basement has been gradually lowered to more than 4 000 meters. Exploration practices show that Paleogene reservoirs of Lufeng area and Huizhou area display significant diversity and that the Paleogene reservoir in Lufeng area is better than in Huizhou area. To clarify the difference of the Paleogene reservoir between these two areas, the diagenesis of reservoir is studied by using thin section, scanning electron microscope, X-ray diffraction and physical properties analysis. According to the dissolution characteristics and dissolution products of rocks in the secondary pore development zone, the corresponding relationship between them and reservoir physical

收稿日期: 2021-05-13; 接受日期: 2021-10-18; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 中海石油(中国)有限公司科技联合攻关项目(YXKY-2019-SZLH-01)

作者简介: 丁琳(1981-),女,博士,高级工程师,主要从事油气勘探综合地质研究, E-mail: dinglin@cnooc.com.cn。

网络首发时间: 2021-11-29; 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20211126.1923.002.html>

properties is established and then the pore evolution models of different types of reservoirs are restored. The research reveals that Wenchang Formation sandstone in Lufeng area, which is obviously influenced by Mesozoic sedimentary rocks, is characterized by high contents of quartz and low contents of feldspar, and mainly primary pores of pore types, develops low porosity and medium permeability or medium-high porosity and medium-high permeability reservoirs. Wenchang Formation sandstone in Huizhou area, which is obviously influenced by Mesozoic granite sources, is characterized by low contents of quartz and high contents of feldspar, mixed pores of primary pores and dissolution pores of pore types, develops medium porosity and low permeability reservoirs which could be changed into medium porosity and medium permeability reservoir refer to strong hydrodynamic force. Comprehensive study shows that the nature of parent rock determines the inherent advantages of reservoir, and that sedimentary rebuild improves the original physical property of reservoir, diagenesis difference affects the quality of reservoir. Understanding the development conditions and formation mechanism of high-quality reservoirs is of great significance for the Paleogene reservoir dessert prediction in different areas.

**Key words:** Pearl River Mouth Basin; Paleogene; parent rock types; diagenetic difference; high-quality reservoirs; main controlling factors

**Fund support:** Joint Scientific and Technological Research Project of CNOOC (China) Co., Ltd. (YXKY-2019-SZLH-01)

珠江口盆地是我国重要的原油生产基地,也是世界海洋油气勘探的热点地区之一。早先受制于古近系地层埋深和储层物性等因素,珠一坳陷的油气勘探主要集中在新近系的中浅层,近年来随着勘探领域的拓展以及勘探进程的加大,古近系也不断取得突破,并获得了一系列商业或潜在商业发现(张向涛等, 2017; 朱明等, 2017)。2009年惠州地区在3 700 m以下的文昌组发现了高产油层, 2014年陆丰地区钻探证实在4 000 m以下的文昌组也能形成工业产层, 由此坚定了向古近系进军的信念, 古近系优质储层的发育和预测也成为了勘探工作的重点和难点。从勘探成效上看, 珠一坳陷陆丰地区商业成功率明显高于惠州地区, 造成这种差异的原因主要在于古近系储层质量的优劣, 因此, 古近系储层问题依然是制约勘探的关键问题。前人对陆丰和惠州地区古近系储层研究认为, 沉积、成岩以及油气早期充注对优质储层的发育具有决定作用(施和生等, 2008; 龙更生等, 2011a, 2011b; 葛家旺等, 2014, 2015; 汪旭东等, 2017; 朱筱敏等, 2019), 但较少考虑母岩性质对岩石组分、成岩产物和孔隙结构的控制作用, 进而可能忽略了影响这两个地区优质储层发育的关键成因信息。

珠江口盆地珠一坳陷基底以中生界花岗岩为主(刘海伦, 2018), 但最新研究表明, 珠一坳陷东部基底存在沉积岩(周凤娟等, 2020), 具备向坳陷内各凹陷供源的物质基础, 尤其是处于坳陷东部的陆

丰凹陷, 这也为珠一坳陷古近系优质储层的差异性研究提供了良好的先决条件。本文以珠江口盆地珠一坳陷古近系钻井较多的陆丰地区和惠州地区文昌组为例, 在分析母岩性质、岩石学特征的基础上, 研究不同母岩约束下的成岩作用对储层的改造或影响, 弄清这两个地区文昌组优质储层的形成机理和主控因素, 进而开展储层评价和有效储层预测, 进一步推动珠一坳陷古近系勘探, 以期获得更多商业发现。

## 1 区域地质背景

珠一坳陷位于珠江口盆地北部, 从西至东由恩平凹陷、西江凹陷、惠州凹陷、陆丰凹陷和韩江凹陷等组成, 其中陆丰凹陷和惠州凹陷处于珠一坳陷东部, 之间由惠陆低凸起隔开(图1)。古近系自下而上依次发育文昌组、恩平组及珠海组, 文昌组是本次研究的重点层系, 形成于盆地的裂陷I幕, 依据惠州运动所形成的局域不整合面T83(施和生等, 2020), 可将文昌组划分为文昌组上、下段, 细分为6段(文昌一段—文昌六段), 整个文昌组地层经历了从初始、强烈到萎缩阶段完整的裂陷旋回。

文昌六段对应裂陷初期, 沉积范围狭小, 限于坳陷的中西部, 物源来自盆内的低隆起或低凸起, 发育一些小型的扇三角洲和辫状河三角洲, 湖盆水体较浅。文昌五段—文昌四段对应裂陷扩张—

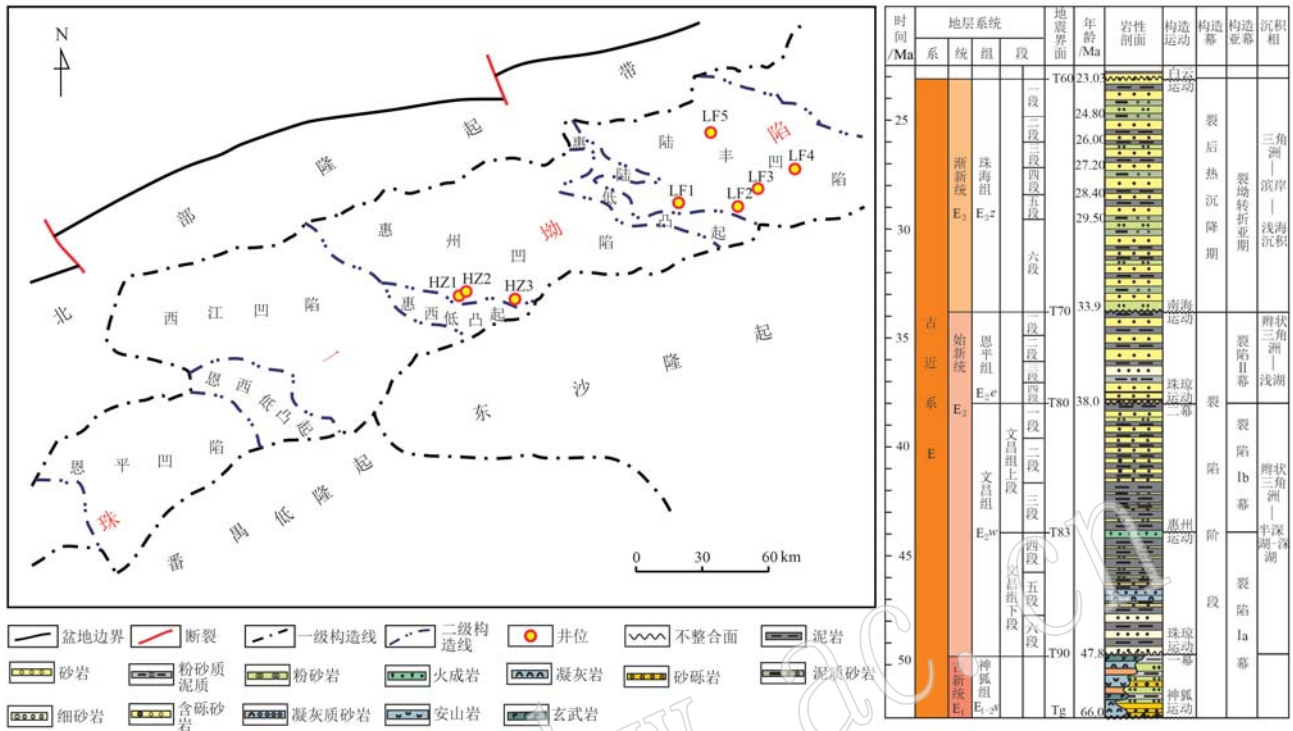


图 1 珠一坳陷构造单元划分及古近系地层综合状图

Fig. 1 Division map of structural units and comprehensive map of Paleogene strata in Zhu I Depression

强烈期, 期间湖盆迅速扩张, 水体加深, 沉积范围扩大, 各凹陷均接受沉积, 缓坡带、构造转换带及盆地长轴向河流作用明显加强, 发育较大型的辫状河三角洲, 陡坡带受断-隆联合控制发育一些扇三角洲或近岸水下扇, 半深湖广布。文三段对应裂陷转变期, 受惠州运动影响, 存在裂陷作用的南北转变、控凹(洼)断裂迁移、基底隆升、岩浆底辟及剥蚀作用等一系列构造现象(施和生等, 2020), 该时期坳陷沉积范围较广, 湖盆连片分布。文昌二段—文昌一段对应裂陷收缩-萎缩期, 湖盆水体变浅, 坳陷大部分出露, 沉积范围逐渐变小, 河流作用减弱, 湖盆缓坡发育一些中小型辫状河三角洲及近陡岸的小型扇三角洲, 至末期, 沉积仅局限地分布在坳陷西部的零星小洼陷。

## 2 储层基本特征

### 2.1 源区及母岩性质

文昌组碎屑岩锆石 U-Pb 年龄特征在珠一坳陷的不同地区差异明显, 本文选取惠州地区两口井中文昌组的两个砂岩岩屑样品进行了碎屑锆石 U-Pb 定年分析, 并与陆丰地区两口井的测年数据(周凤

娟等, 2020)进行了对比。样品的预处理、阴极发光 (CL) 图像拍摄和 LA-ICP-MS 定年均在同济大学海洋地质国家重点实验室完成, 激光剥蚀系统为 New Wave 213nm, ICP-MS 型号为 Thermo Elemental X-Series。对每颗锆石进行 U-Pb 定年, 最终分别获得  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  的 3 组年龄。对于封闭体系, U-Pb 年龄是谐和的, 可反映锆石的结晶年龄, 而在实际情况下, 由于热液或变质作用的影响, 锆石有可能会 Pb 污染或丢失, 导致 U-Pb 年龄不谐和。本次在数据处理中, 对  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄小于 1 000 Ma 的锆石选取  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄, 并以  $100(^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}) / (^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U})$  计算谐和度; 对  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄大于 1 000 Ma 的锆石则选取  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄, 并以  $100(^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}) / (^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U})$  计算谐和度。结合样品数据情况, 选取谐和度介于 90%~110% 的锆石 U-Pb 年龄, 根据 Kernel Density Estimation (KDE) 方法绘制了锆石年龄谱图。

测年结果表明, 惠州地区文昌组碎屑岩锆石 U-Pb 年龄数据分布型式以单峰为主, 主峰值为 116 Ma(图 2a、2b), 说明惠州地区文昌组的物源成分较单一。相对惠州地区, 陆丰地区锆石年龄复杂, 不同时代的年龄均有分布, 年龄谱具有多峰特征, 主

峰值为 430 Ma, 其次为中生代 160~154 Ma、104 Ma 峰值, 新生代和印支期的锆石也占有一定的比例, 另含有少量元古宙和太古宙的锆石(图 2c、2d, 周凤

娟等, 2020), 说明文昌组碎屑岩锆石 U-Pb 年龄特征在珠一坳陷的不同地区差异明显。

文昌组物源主要来自凹陷周缘隆起的前古近

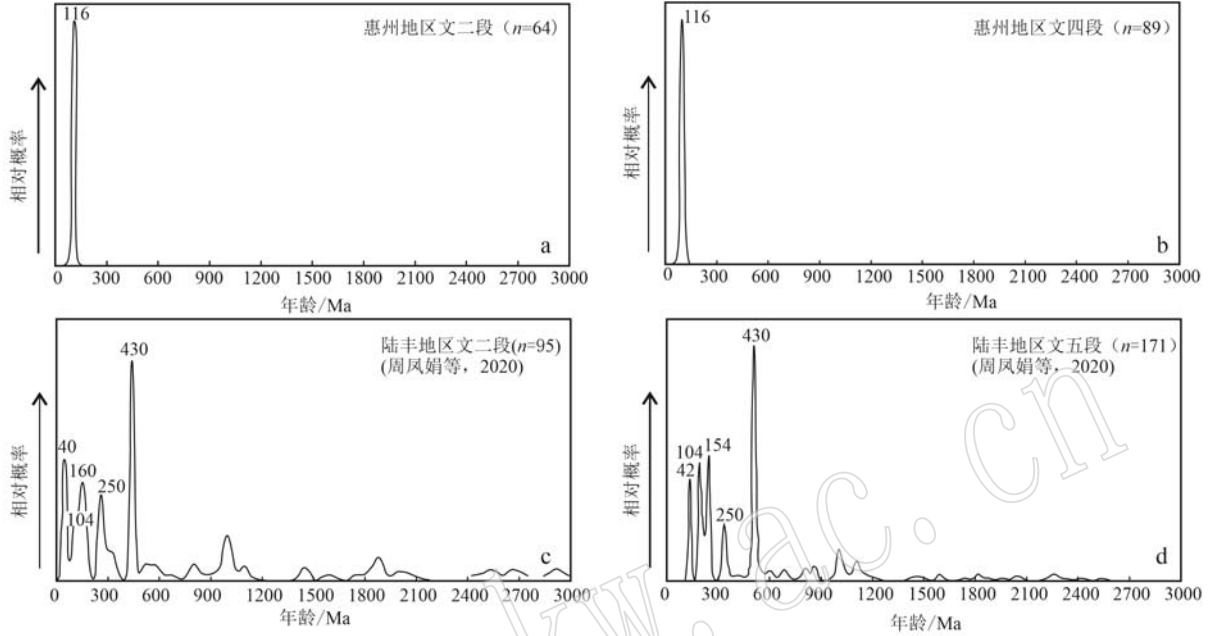


图 2 惠州和陆丰地区文昌组碎屑锆石 U-Pb 年龄特征图

Fig. 2 U-Pb age characteristics of detrital zircon from Wenchang Formation sandstone in Huizhou and Lufeng areas

系。前人研究成果表明, 珠江口盆地前古近系基底岩性主要为花岗岩, 局部发育火山岩、火山碎屑岩和少量变质岩, 另外, 在珠一坳陷东部发育较大面积沉积岩残留基底(鲁宝亮等, 2011; 周凤娟等, 2020)。基底花岗岩锆石 U-Pb 年龄值统计以 165~145、130~100 Ma 区间为主, 指示中生代晚侏罗世和早白垩世两期岩浆活动; 基底沉积岩锆石 U-Pb 年龄具有两组年龄峰值, 一个为中生代峰值, 年龄在 160~108 Ma 区间, 另一个主峰值为 430 Ma, 指示这套基底沉积岩具有古生代母岩的贡献; 基底变质岩

的原岩是花岗岩, 锆石 U-Pb 年龄为  $161.6 \pm 2.4$  Ma, 推测为中生代晚侏罗世花岗岩变质形成, 其分布比较局限, 仅在陆丰地区 LF5 井处出现(图 1); 另局部发育的火山岩、火山碎屑岩, 主要是南海北部新生代两期重要的火山活动形成的(周凤娟等, 2020)。

统计结果表明, 陆丰地区文昌组岩屑类型主要为石英岩及火山岩, 沉积岩岩屑和花岗岩岩屑含量较低(图 3a); 惠州地区岩屑类型主要为花岗岩, 石英岩、火山岩岩屑和沉积岩岩屑含量低(图 3b)。由此可见, 陆丰与惠州地区文昌组沉积物的原始物质

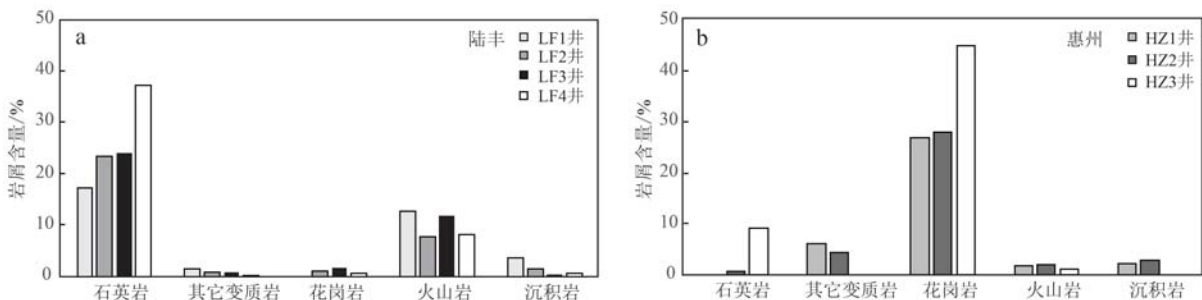


图 3 惠州和陆丰地区文昌组砂岩岩屑类型统计直方图

Fig. 3 Statistical histogram of sandstone cuttings types of Wenchang Formation in Huizhou and Lufeng areas

组分具有显著差异。通过对母岩的年代学及岩性示踪综合分析,认为陆丰地区文昌组石英岩岩屑来源于中生代沉积岩,属于再旋回产物;惠州地区文昌组则主要来源于中生代花岗岩。

## 2.2 岩石学特征

陆丰地区和惠州地区文昌组砂岩储层岩石组分和孔隙特征存在明显差异。陆丰地区文昌组储层以高石英、低长石的长石石英砂岩和岩屑石英砂岩为主(图4a),石英含量一般为59%~93%(平均为81.4%),长石含量一般为1%~16%(平均为6.4%),岩屑含量一般为1%~39.5%(平均为

11.9%);填隙物含量低,含量为0.5%~27.5%(平均为7.25%),填隙物类型以泥杂基为主,局部方解石致密胶结;骨架颗粒分选好,易于保存原生孔隙。惠州地区则以低石英、高岩屑及长石的岩屑砂岩和长石岩屑砂岩为主(图4b),石英含量一般为7%~86%(平均为27.5%),长石含量一般为3%~46.5%(平均为19.3%),岩屑含量一般为10.9%~72%(平均为53.2%);填隙物含量高,含量为1%~37%(平均为11.8%),填隙物类型与陆丰地区有明显差异,以泥杂基和自生高岭石为主,其次为方解石。

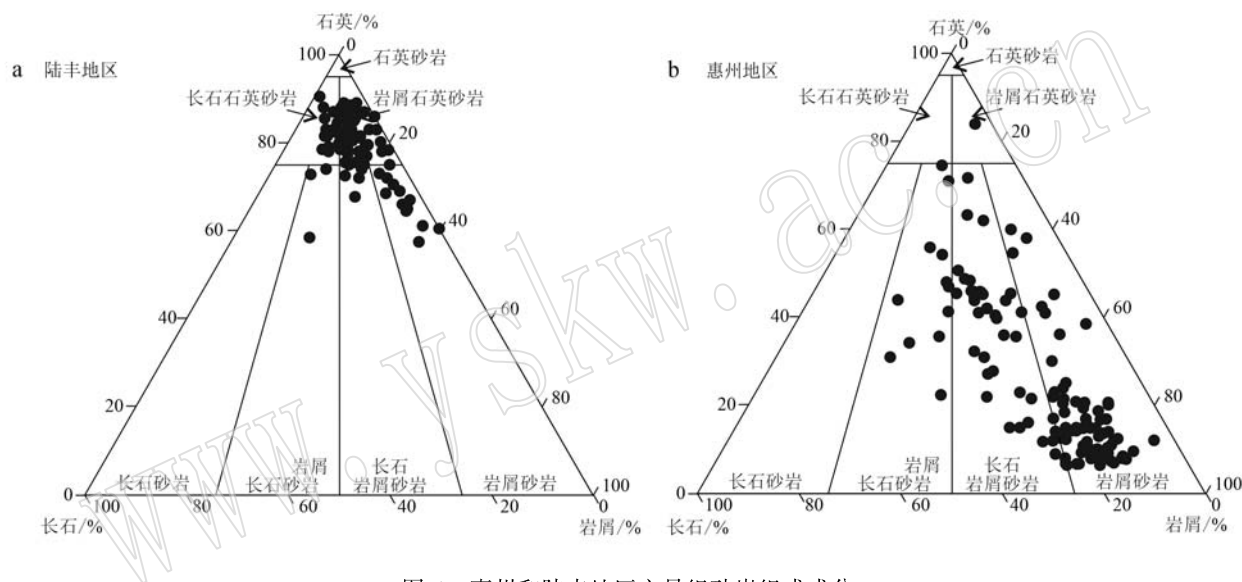


图4 惠州和陆丰地区文昌组砂岩组成成分

Fig. 4 Sandstone compositions of Wenchang Formation in Huizhou and Lufeng areas

## 2.3 孔隙特征与储层质量

整体来看,陆丰地区文昌组溶蚀现象较弱,残余原生孔较为发育,多呈不规则多边形或三角形。偏光显微镜和扫描电镜下,可以观察到原生孔隙(图5a、5b)。次生孔隙以少量颗粒溶孔、岩屑溶孔为主,胶结物溶孔少见,偶见有方解石胶结物和石英颗粒边缘发生溶蚀,但其溶蚀程度很弱,对研究区的孔隙贡献极小(图5a)。惠州地区文昌组仅保留少量原生孔,以溶蚀孔为主,表现为沿残余原生孔边缘溶蚀长石、岩屑等颗粒形成的粒间溶蚀扩大孔,有的表现为在长石、岩屑颗粒内部溶蚀形成的粒内溶孔等(图5d)。发生溶蚀的颗粒主要为长石颗粒或岩屑中的长石,部分长石溶蚀较彻底形成铸模孔。长石溶蚀产生大量的高岭石在原地或近源地沉淀,形成高岭石晶间微孔(图5e)。惠州地区溶蚀

作用较强,可观察到长石颗粒或者岩屑中的长石组分受到不完全溶蚀的现象。

大量的孔渗数据表明,陆丰地区古近系文昌组储层孔隙度均低于15%,但渗透率较高,最高达206 mD,属于低孔中渗储层(图6),孔隙类型以原生孔隙为主,产能高;而惠州地区古近系文昌组储层孔隙度虽高达15%~20%,但渗透率均低于50 mD,属于中孔低渗储层(图6),孔隙类型以原生孔-溶蚀孔-微孔的混合孔隙为主,产能较低。文昌组储层增孔不增渗的原因主要是长石溶蚀产生的自生高岭石原地大量沉淀,导致孔喉变细,连通性变差(图5e),进而影响了储层质量。这一结果显示,古近系储层质量差异取决于储层成岩差异演化过程,因此,弄清楚古近系储层成岩过程中的孔隙演化模式对储层质量的评价非常重要。

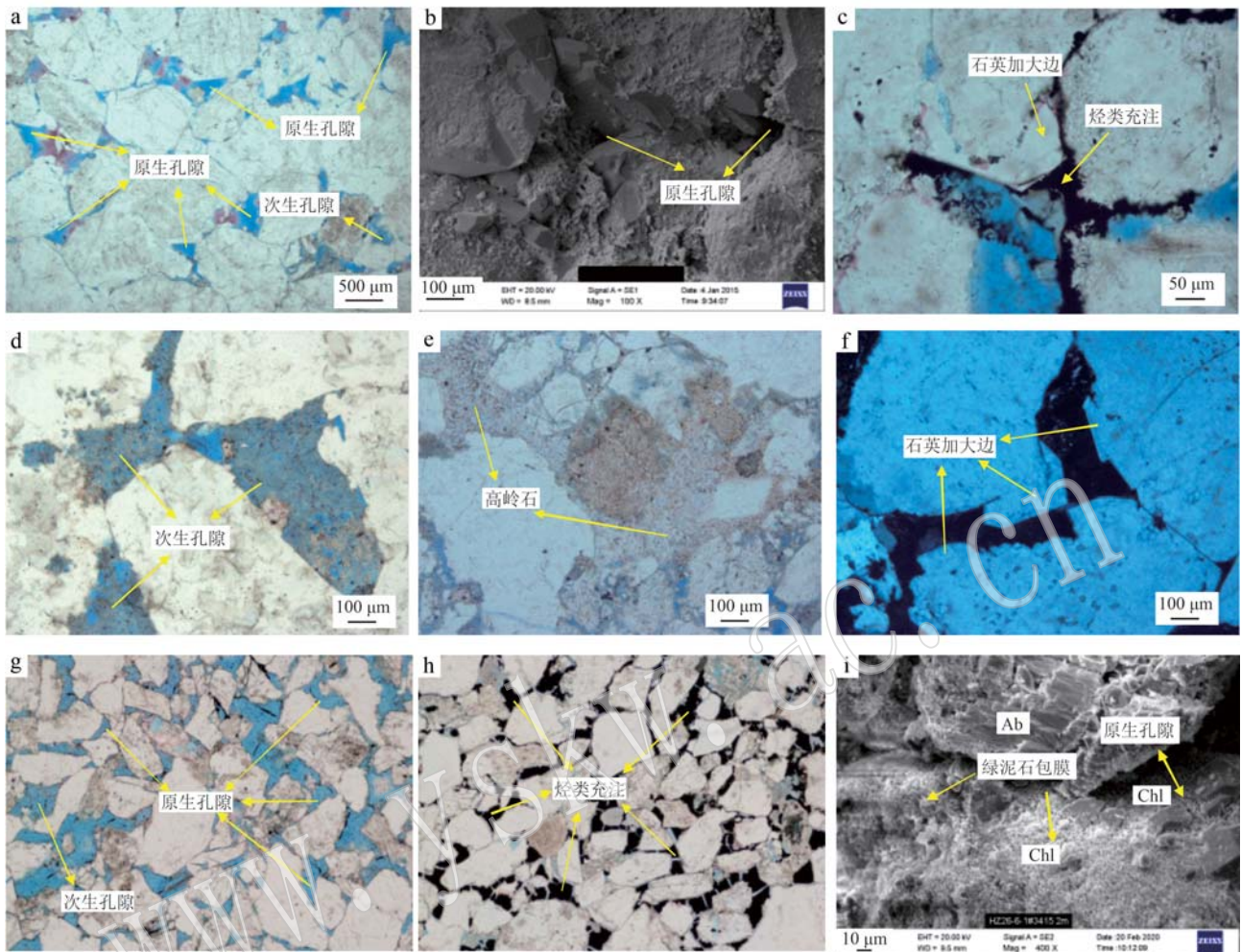


图5 惠州和陆丰地区古近系孔隙类型

Fig. 5 Paleogene pore type of Huizhou and Lufeng areas

a—LF2井, 4 156.75 m, 岩屑石英砂岩, 单偏光; b—LF2井, 4 158.26 m, 岩屑石英砂岩, 扫描电镜; c—LF2井, 4 172.71 m, 岩屑石英砂岩, 单偏光; d—HZ1井, 3 756.31 m, 岩屑砂岩, 单偏光; e—HZ1井, 3 773.18 m, 岩屑砂岩, 单偏光; f—HZ1井, 3 755.16 m, 岩屑砂岩, 正交偏光; g—HZ3井, 3 415.2 m, 长石岩屑砂岩, 单偏光; h—HZ3井, 3 405 m, 长石岩屑砂岩, 单偏光; i—HZ3井, 3 415.2 m, 长石岩屑砂岩, 扫描电镜; Ab—钠长石; Chl—绿泥石

a—LF2 well, 4 156.75 m, lithic quartz sandstone, single polarized light; b—LF2 well, 4 158.26 m, lithic quartz sandstone, scanning electron microscope; c—LF2 well, 4 172.71 m, lithic quartz sandstone, single polarized light; d—HZ1 well, 3 756.31 m, lithic sandstone, single polarized light; e—HZ1 well, 3 773.18 m, lithic sandstone, single polarized light; f—HZ1 well, 3 755.16 m, lithic sandstone, crossed polars; g—HZ3 well, 3 415.2 m, feldspar lithic sandstone, single polarized light; h—HZ3 well, 3 405 m, feldspar lithic sandstone, single polarized light; i—HZ3 well, 3 415.2 m, feldspar lithic sandstone, scanning electron microscope; Ab—albite; Chl—chlorite

### 3 成岩作用及孔隙演化

#### 3.1 成岩响应组合

酸性溶蚀作用是储层次生孔隙发育的重要机制之一, 长石等铝硅酸盐矿物溶蚀及碳酸盐矿物的溶蚀一般是常规碎屑岩储层中酸性溶蚀作用的主要特征(王艳忠, 2010; 任拥军等, 2010; 杜红权等,

2012)。碱性溶蚀作用也能形成次生孔隙, 一般以石英颗粒边缘或石英加大边的弱溶蚀为特征(肖冬生等, 2011; 尹相东等, 2021)。研究区惠州及陆丰地区古近系储层以酸性溶蚀为主, 且溶蚀矿物以长石为主, 碳酸盐胶结物溶蚀较为少见, 偶见或少见石英及其加大边的弱溶蚀, 表现出明显的选择性溶蚀特征。

惠州和陆丰地区古近系储层中, 溶蚀所沉淀的

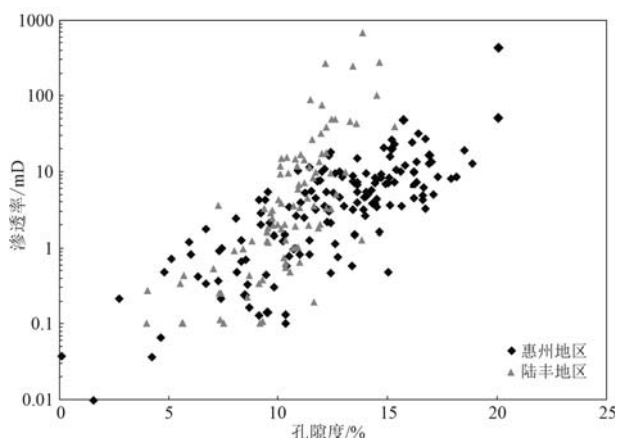


图 6 惠州和陆丰地区孔隙度与渗透率对应关系图版  
Fig. 6 Diagram of the corresponding relationship between porosity and permeability in Huizhou and Lufeng areas

次生矿物的再分配具有较强的不均匀性, 根据薄片、扫描电镜、X 衍射等分析化验资料, 文昌组储层中可识别出两种典型的成岩响应组合: 长石弱溶蚀-少量黏土矿物-少量石英胶结物组合(简称弱溶蚀-少产物)、长石强溶蚀-大量黏土矿物-大量石英胶结物组合(简称强溶蚀-多产物)。

研究表明长石溶蚀及其产物对储层物性有明显的影响(Bevan and Savage, 1989; 李汶国等, 2005; 远光辉, 2015)。长石溶蚀而形成的孔隙是次生孔隙中最重要的成因类型, 长石骨架颗粒发生溶解后, 其产物被带出粒间时, 砂岩的孔隙才能有效提高; 大部分情况下, 长石溶蚀是将孔隙结构好的原生孔隙进行重新分配, 转换为基本等量的长石颗粒次生溶孔和高岭石(伊利石)晶间孔的过程(远光辉等, 2013)。大量统计发现, 惠州地区与陆丰地区溶蚀孔

面孔率在 5% 以下时, 砂岩孔隙度主要由粒间孔贡献, 长石等溶蚀作用产生的溶蚀孔对孔隙度贡献小, 表明溶蚀作用较弱; 而当溶蚀面孔率  $\geq 5\%$  时, 砂岩孔隙度中溶蚀孔对储层孔隙度贡献加大, 表明溶蚀作用较强(图 7a、7b)。因此本文采用面孔率 5% 来定量表征长石溶蚀强度的衡量标准, 溶蚀面孔率  $\geq 5\%$  时, 认为长石强溶蚀; 反之, 认为长石弱溶蚀。

### 3.1.1 弱溶蚀-少产物组合

该成岩组合表现为长石颗粒溶蚀作用弱, 长石溶蚀孔隙含量通常低于 5%, 同时储层中与溶蚀作用相关的次生矿物含量较少, 含量通常低于 5%。该种类型的成岩组合在陆丰地区和惠州地区砂岩储层均有发育, 且以陆丰地区为主。

陆丰地区 LF2 井文昌五段为粗粒岩屑石英砂岩, 矿物成分和结构成熟度高, 填隙物含量低, 长石溶蚀不发育, 含量低于 4%, 自生黏土矿物少见(图 5a), 含量常低于 0.5%, 孔隙结构好, 渗流能力强, 埋深近 4 000 m 时, 储层仍有较高渗透率(206 mD), 产能最高。

惠州地区 HZ3 井文昌四段为高部位受强水动力改造的扇三角洲沉积, 岩性为粗粒长石岩屑砂岩, 填隙物含量低、种类少, 长石溶蚀不发育, 含量常低于 1%, 见少量自生黏土矿物和自生石英(图 5g), 含量低于 5%。另外, 早期形成的绿泥石包膜和烃类充注有效保存了原生孔隙(图 5h、5i), 使得文昌组储层渗流能力强, 在埋深 3 300 m 左右, 渗透率高达 415 mD, 产能亦较高。

### 3.1.2 强溶蚀-多产物组合

该成岩组合主要出现在惠州地区古近系储层

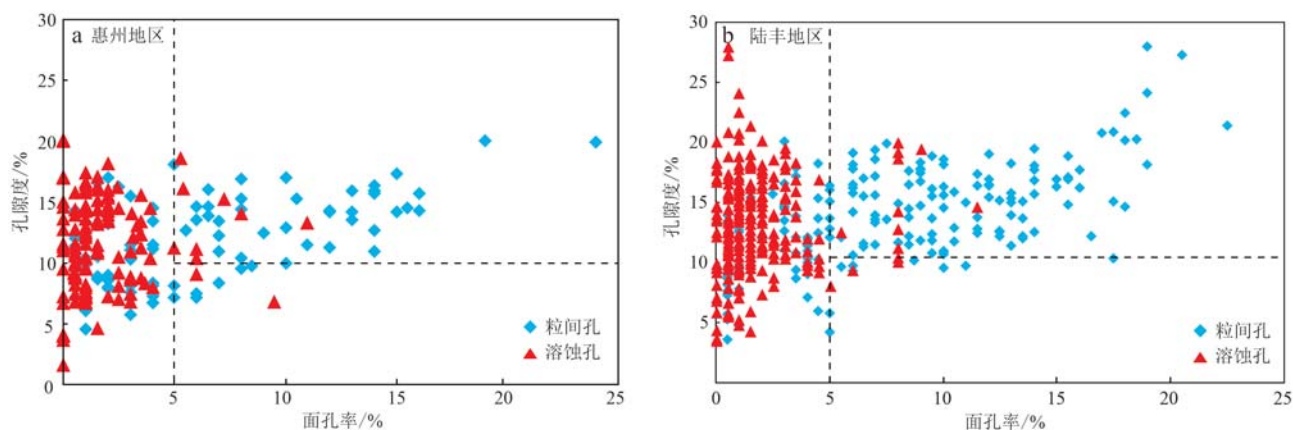


图 7 惠州和陆丰地区古近系溶蚀面孔率与孔隙度关系图版

Fig. 7 Diagram of relationship between Paleogene dissolved porosity and porosity of Huizhou and Lufeng areas

中,成岩现象表现为强溶蚀特征,长石次生溶蚀孔含量高达9.5%,孔隙类型以粒间孔隙、溶蚀孔隙和高岭石晶间微孔的混合孔隙为主,同时储层次生矿物含量较高,其中自生黏土矿物含量介于1%~15%之间,自生石英胶结物含量介于0.1%~0.5%之间。如HZ1井文昌组储层为短源辫状河三角洲沉积,以长石岩屑粗粒砂岩为主,岩石成分成熟度较低,长石含量较高,由于长石强溶蚀产生大量的次生孔隙(图5d),其孔隙度高达18.8%,但由于次生高岭石含量高,且都保留在粒间堵塞了孔道(图5e),导致孔隙结构较差,渗流能力较弱,产能较低。

### 3.2 孔隙演化模式

根据矿物之间的充填、切割、交代等现象,结合前文母岩和沉积分析对储层的影响,认为珠一坳陷文昌组优质储层主要有两种孔隙演化模式。

一种模式以陆丰地区为典型代表,文昌组沉积时受中生代沉积岩物源影响明显,易于形成“原生型”优质储层。成岩早期,文昌组储层主要受机械压实作用影响,以原生孔隙减少为主,高成熟度的粗粒净砂岩抗压实能力强,能保存一部分原生孔隙;成岩中期,伴随酸性流体的注入,文昌组岩石中少量长石和岩屑开始发生溶蚀,并产生少量自生高岭石沉淀和少量的自生石英胶结。另外,在距今约14 Ma,油气开始大量充注于粒间孔隙中(朱筱敏等,2019)(图5c),并抑制了矿物的压实和胶结作用,进一步保存了原生孔隙,最终使得陆丰地区文昌组储层原生孔隙发育,孔隙结构好,渗流能力强,形成低孔中渗的优质储层,从而使得4 000 m之下的文昌组依然具有较高的产能(图8)。

另一模式以惠州地区为典型代表,储层沉积时

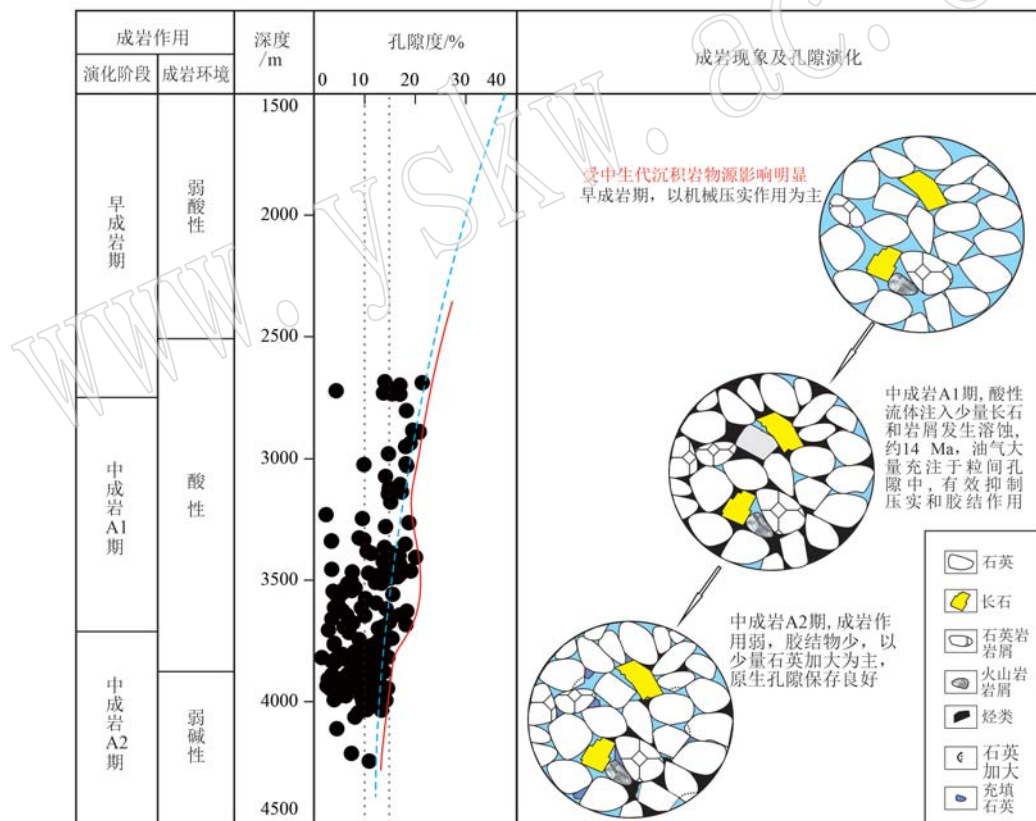


图8 基于母岩差异和矿物选择性溶蚀的孔隙演化模式(陆丰地区)

Fig. 8 Pore evolution model based on parent rock difference and mineral selective dissolution (Lufeng area)

主要受中生代花岗岩物源影响明显,其岩石矿物成分中长石和岩屑含量高,成分成熟度较低,抗压实作用弱,成岩中期随着酸性流体的注入,长石和岩屑大量溶蚀,并形成大量的自生黏土矿物和石英加大边(图5e、5f),孔隙组合为原生粒间孔、长石溶蚀

孔和高岭石晶间微孔混合,次生孔隙占总孔隙的60%以上,尽管早期的油气充注保存了部分原生孔隙,但溶蚀产物并没有被有效地带离岩石,导致砂岩孔隙度较高而渗透率却较低,整体为中孔低渗储层(图9)。



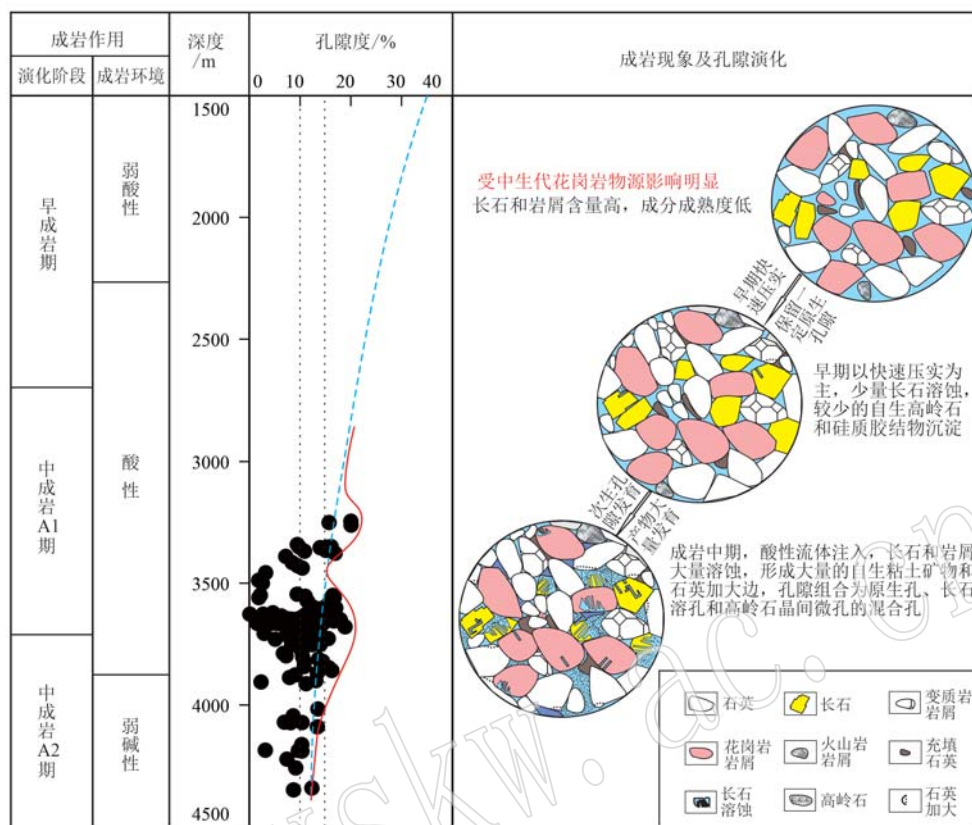


图 9 基于母岩差异和矿物选择性溶蚀的孔隙演化模式(惠州地区)

Fig. 9 Pore evolution model based on parent rock difference and mineral selective dissolution (Huizhou area)

另外，以花岗岩为母岩的惠州地区还存在一种特殊的孔隙演化模式，此模式下古近系可形成“改造型”优质储层。如文昌组沉积时位于古隆地貌背景的 HZ3 井，由于受强水动力改造，泥质含量低，岩石成分成熟度与结构成熟度较高，成岩早期石英颗粒表面形成的绿泥石包膜、油气早期充注也能进一步抑制压实和胶结作用(图 5h、5i)，使原生孔隙大量保存(图 5g)，且溶蚀产物少，孔隙结构好，可形成中孔中渗优质储层(图 6)。

#### 4 优质储层差异发育的主控因素

惠州地区和陆丰地区是珠江口盆地珠一坳陷古近系勘探的主战场，是目前揭示古近系储层特征最广的两个地区。母岩成分、岩石组分、成岩特征、孔隙演化等方面的地区性差异能够总体反映出珠一坳陷优质储层发育所必需的条件。综合前面研究认为，珠一坳陷古近系优质储层发育受母岩成分、沉积改造、成岩作用等多因素控制。

#### 4.1 母岩成分决定储层的先天优势

沉积物中的岩屑成分能明显区分源区母岩成分供应的差异。从陆丰地区与惠州地区文昌组矿物组成成分来看，惠州地区文昌组沉积物岩屑类型主要为花岗岩岩屑，综合锆石年龄信息来看，其母岩主要来源于中生代花岗岩；陆丰地区文昌组沉积物岩屑类型主要为石英岩岩屑，结合锆石定年的年龄谱特征，认为其母岩主要来源于沉积岩母岩区。在文昌组碎屑组分中，可见石英岩颗粒具有较好磨圆，有可能经历了碎屑物质再旋回过程，使得保留下来的石英组分较纯，因而陆丰地区古近系文昌组岩石组分总体上具有石英含量高、长石含量低的特征，成分成熟度高，抗压能力强，原生孔为主，孔喉连通性好。钻井也证实，古近系相同埋深下，受沉积岩物源影响为主的陆丰地区的储层孔隙类型及渗透率要明显优于受花岗岩物源影响为主的惠州地区。

#### 4.2 沉积改造改善储层的初始物性

惠州地区母岩属于花岗岩母岩区，以长英质为

主, 沉积区长石含量较高, 抗压实作用不强。惠州地区大部分古近系钻井显示, 文昌组储层长石及岩屑含量高, 且具有强溶蚀现象, 自生高岭石大量富集, 孔隙类型为原生孔与次生溶蚀孔的混合孔, 且以次生溶蚀孔为主, 孔喉结构非均质性强, 导致渗透率低, 总体产能不高。但在强水动力条件改造下, 储层原始物性会得到改善。惠州地区文昌组沉积时期处于古隆起背景的 HZ3 井, 在 3 415.2 m 深度处, 文昌组孔隙度达 20%, 渗透率高达 415 mD, 表现为中孔中渗储层特征, 产能较高, 表明在惠州地区古近系也存在具有商业产能的好储层。

#### 4.3 成岩差异影响储层的质量好坏

不同母岩类型储集体的成岩演化差异影响着孔隙演化(Bloch, 1991; 黄洁等, 2007), 进而影响了不同地区古近系储层质量的好坏。陆丰地区文昌组受沉积岩母岩影响较明显, 由于沉积岩母岩中石英质颗粒的再旋回作用, 储层中石英质颗粒含量高, 砂岩较为纯净, 具有较强的抗压实能力; 由于其长石及岩屑含量低, 溶蚀产物较少; 另外, 早期油气充注也阻止了胶结和压实作用, 因而陆丰地区古近系文昌组较易形成原生型优质储层。惠州地区文昌组受长英质花岗岩母岩影响, 储层长石及岩屑含量高, 抗压实能力较弱, 当埋深超过 3 700 m 时, 储集体原生孔减孔率高, 尽管后期溶蚀作用下能形成大量次生孔隙, 具有一定增孔作用, 但溶蚀产物大量堵塞在孔喉处, 使得储层致密化, 只有在沉积改造的古隆起部位才有利于形成改造型优质储层。这种原生型优质储层和改造型优质储层一般具有很好的物性条件, 是目前珠一坳陷古近系具商业产能的主要类型。

## 5 结论

(1) 惠州地区和陆丰地区文昌组储层母岩组分具有显著差异, 惠州地区主要受中生代花岗岩影响, 向沉积区提供长英质颗粒, 文昌组矿物组分以低石英、高长石为特征; 而陆丰地区文昌组受中生代沉积岩物源影响较明显, 向沉积区提供了高质量的再旋回石英质颗粒, 矿物组分以高石英、低长石为特征。

(2) 惠州地区和陆丰地区成岩期主要发生酸性溶蚀, 且溶蚀矿物以长石为主, 碳酸盐矿物溶蚀少见, 具有明显矿物选择性溶蚀特征。

(3) 惠州地区和陆丰地区古近系储层具差异成岩现象, 惠州地区以强压实-长石强溶蚀-大量黏土矿物-大量石英胶结物为特征, 孔隙类型为混合孔, 且以次生孔隙为主, 表现为中孔低渗储层特征, 受强水动力改造可形成以原生孔为主的优质储层; 陆丰地区以弱压实-长石弱溶蚀-少量黏土矿物-少量石英胶结物为特征, 孔隙类型以原生孔为主, 表现为低孔中高渗优质储层特征。

(4) 惠州地区与陆丰地区古近系文昌组优质储层的发育受控于母岩性质、沉积改造和成岩差异等因素。

## References

- Bevan J and Savage D. 1989. The effect of organic acids on the dissolution of K-feldspar under conditions relevant to burial diagenesis[J]. *Mineralogical Magazine*, 53: 415~425.
- Bloch S. 1991. Role of secondary porosity and permeability in predrill prediction of total porosity and permeability in sandstones[J]. *AAPG Bulletin*, 75(3): 543~544.
- Du Hongquan, Zhu Rukai, He Youbin, *et al.* 2012. The diagenesis of the 2nd Member reservoirs of Xujiahe Formation and its influence on reservoirs of Hechuan area[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(3): 403~411(in Chinese with English abstract).
- Ge Jiawang, Qin Chenggang, Zhu Xiaomin, *et al.* 2014. Characteristics and origin of low porosity and low permeability sandstone reservoir of Wenchang Formation in HZ25-7 structural belt of Huizhou Depression [J]. *Lithologic Reservoirs*, 26(4): 36~43(in Chinese with English abstract).
- Ge Jiawang, Zhu Xiaomin, Pan Rong, *et al.* 2015. A quantitative porosity evolution model of sandstone for Wenchang Formation in Huizhou Depression, Pearl River Mouth Basin: A case study for braided fluvial delta reservoir of HZ-A area[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 33(1): 183~193(in Chinese with English abstract).
- Huang Jie, Zhu Rukai, Hou Dujie, *et al.* 2007. The new advances of secondary porosity genesis mechanism in deep elastic reservoir[J]. *Geological Science and Technology Information*, 26(6): 76~80(in Chinese with English abstract).
- Li Wenguo, Zhang Xiaopeng and Zhong Yumei. 2005. Formation mechanism of secondary dissolved pores in arcose[J]. *Oil & Gas Geology*, 26(2): 220~223(in Chinese with English abstract).
- Liu Hailun. 2018. Rift Structure of Zhuyi Depression in the Pearl River

- Mouth Basin: Combined Constraints of Basement Properties and Regional Stress [D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan) (in Chinese).
- Long Gengsheng, Shi Hesheng, Zheng Rongcai, *et al.* 2011a. Characteristics and development controlling factors of Paleogene deep reservoirs in Huizhou depression, Pearl River Mouth Basin[J]. *Marine Oil and Gas Geology*, 16(3): 71~78(in Chinese with English abstract).
- Long Gengsheng, Shi Hesheng, Zheng Rongcai, *et al.* 2011b. Diagenesis and porosity evolution of deep reservoirs in Huizhou depression, Pearl River Mouth basin[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(4): 665~673(in Chinese with English abstract).
- Lu Baoliang, Sun Xiaomeng, Zhang Goncheng, *et al.* 2011. Seismic-potential field response characteristics and identification of basement lithology of the northern South China Sea base[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 54(2): 563~572(in Chinese with English abstract).
- Ren Yongjun and Chen Yong. 2010. Acid dissolution of deep natural gas reservoirs in the Minfeng sag in the Dongying depression: Evidence from fluid inclusions[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(2): 257~262(in Chinese with English abstract).
- Shi Hesheng, Du Jiayuan, Mei Lianfu, *et al.* 2020. Huizhou movement and its significance in Pearl River Mouth Basin, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 47(3): 448~450(in Chinese with English abstract).
- Shi Hesheng, Lei Yongchang, Wu Mengshuang, *et al.* 2008. Research on the evolution of pores in deep sandstone reservoir in ZHU 1 depression[J]. *Earth Science Frontiers*, 15(1): 169~175(in Chinese with English abstract).
- Wang Xudong, Zhang Xiangtao, He Min, *et al.* 2017. Characteristics and controlling factors of reservoir development in the Wenchang Formation, Southern Lufeng Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 38(6): 147~155(in Chinese with English abstract).
- Wang Yanzhong. 2010. Genetic Mechanism and Evolution Model of Secondary Pore Development Zone of Paleogene in the North Zone in Dongying Depression[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China).
- Xiao Dongsheng and Fu Qiang. 2011. The genetic mechanism of authigenic quartz in Lower Shihezi Formation of Hanggin Banner, northern Ordos Basin[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(1): 113~120(in Chinese with English abstract).
- Yin Xiangdong, Jiang Shu, Wu Peng, *et al.* 2021. Features of the acid and alkaline diagenetic environment of tight sandstones and the control of the reservoir physical properties: A case study of the Linxing and Shenfu district, eastern Ordos Basin[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 40(1): 142~151(in Chinese with English abstract).
- Yuan Guanghui. 2015. Dissolution Mechanism and Physical Property Response of Feldspar and Carbonate Minerals during Diagenesis[D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China) (in Chinese).
- Yuan Guanghui, Cao Yingchang, Xi Kelai, *et al.* 2013. Feldspar dissolution and its impact on physical properties of Paleogene clastic reservoirs in the northern slope zone of the Dongying sag[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(5): 853~866(in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiangtao, Wang Xudong, Shu Yu, *et al.* 2017. 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)*, 48(11): 2979~2989(in Chinese with English abstract).
- Zhou Fengjuan, Ding Lin, Ma Yongkun, *et al.* 2020. Detrital zircon U-Pb age characteristics of Wenchang Formation in Lufeng 13 eastern sag and its sign[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 32(4): 46~55(in Chinese).
- Zhu Ming, Dai Yiding, Zhu Junzhang, *et al.* 2017. Geological characteristics and accumulation mechanism of Paleocene reservoir in Huizhou sag, Pearl River Mouth basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 29(1): 1~11(in Chinese with English abstract).
- Zhu Xiaomin, Ge Jiawang, Wu Chenbingjie, *et al.* 2019. Reservoir characteristics and main controlling factors of deep sandstone in Lufeng sag, Pearl River[J]. *Acta Sedimentology Sinica*, 40: 69~80(in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 杜红权, 朱如凯, 何幼斌, 等. 2012. 合川地区须二段砂岩储层成岩作用及其对储层的影响[J]. *岩石矿物学杂志*, 31(1): 403~411
- 葛家旺, 秦成岗, 朱筱敏, 等. 2014. 惠州凹陷 HZ25-7 构造带文昌组低孔低渗砂岩储层特征和成因机理[J]. *岩性油气藏*, 26(4): 36~43.
- 葛家旺, 朱筱敏, 潘荣, 等. 2015. 珠江口盆地惠州凹陷文昌组砂岩孔隙定量演化模式①——以 HZ-A 地区辫状河三角洲储层为例[J]. *沉积学报*, 33(1): 183~193.
- 黄洁, 朱如凯, 侯读杰, 等. 2007. 深部碎屑岩储层次生孔隙发育机理研究进展[J]. *地质科技情报*, 26(6): 76~80.

- 李汶国, 张晓鹏, 钟玉梅. 2005. 长石砂岩次生溶孔的形成机理[J]. 石油与天然气地质, 26(2): 220~223.
- 刘海伦. 2018. 珠江口盆地珠一坳陷裂陷结构: 基底属性与区域应力联合制约[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉).
- 龙更生, 施和生, 郑荣才, 等. 2011a. 珠江口盆地惠州凹陷深部古近系储层特征及发育控制因素[J]. 海相油气地质, 16(3): 71~78.
- 龙更生, 施和生, 郑荣才, 等. 2011b. 珠江口盆地惠州凹陷深部储层成岩作用与孔隙演化[J]. 岩石矿物学杂志, 30(4): 665~673.
- 鲁宝亮, 孙晓猛, 张功成, 等. 2011. 南海北部盆地基底岩性地震-重磁响应特征与识别[J]. 地球物理学报, 54(2): 563~572.
- 任拥军, 陈勇. 2010. 东营凹陷民丰洼陷深部天然气储层酸性溶蚀作用的流体包裹体证据[J]. 地质学报, 84(2): 257~262.
- 施和生, 杜家元, 梅廉夫, 等. 2020. 珠江口盆地惠州运动及其意义[J]. 石油勘探与开发, 47(3): 448~450.
- 施和生, 雷永昌, 吴梦霜, 等. 2008. 珠一坳陷深层砂岩储层孔隙演化研究[J]. 地学前缘, 15(1): 169~175.
- 王艳忠. 2010. 东营凹陷北带古近系次生孔隙发育带成因机制及演化模式[D]. 青岛: 中国石油大学(华东).
- 汪旭东, 张向涛, 何敏, 等. 2017. 珠江口盆地陆丰凹陷南部文昌组储层发育特征及其控制因素[J]. 石油与天然气地质, 38(6): 1147~1155.
- 肖冬生, 付强. 2011. 鄂尔多斯盆地北部杭锦旗区块下石盒子组自生石英形成机制[J]. 岩石矿物学杂志, 30(1): 113~120.
- 尹相东, 蒋恕, 吴鹏, 等. 2021. 致密砂岩酸性和碱性成岩环境特征及对储层物性的控制: 以鄂尔多斯盆地临兴和神府地区为例[J]. 地质科技通报, 40(1): 142~151.
- 远光辉. 2015. 成岩过程中长石和碳酸盐矿物溶蚀机理及其物性响应[D]. 青岛: 中国石油大学(华东).
- 远光辉, 操应长, 葱克来, 等. 2013. 东营凹陷北带古近系碎屑岩储层长石溶蚀作用及其物性响应[J]. 石油学报, 34(5): 853~866.
- 张向涛, 汪旭东, 舒誉, 等. 2017. 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, 48(11): 2979~2989.
- 周凤娟, 丁琳, 马永坤, 等. 2020. 陆丰13东洼文昌组碎屑锆石U-Pb年龄特征及其物源示踪意义[J]. 中国海上油气, 32(4): 46~55.
- 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[J]. 中国海上油气, 29(1): 1~11.
- 朱筱敏, 葛家旺, 吴陈冰洁, 等. 2019. 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, 40(增刊): 69~80.