

# 珠江口盆地白云南洼珠海组陆架边缘三角洲储层发育特征与主控因素及有利储层预测

舒梁锋\*, 张丽丽, 雷胜兰, 高中亮, 韩霄, 于飒

中海石油(中国)有限公司深圳分公司研究院, 深圳 518054

\* 通信作者, shulf@cnooc.com.cn

收稿日期: 2021-12-29

中海石油有限公司“十三五”科技重点项目“南海东部油田上产2000万吨关键技术研究”(CNOOC-KJ 135 ZDXM 37 SZ 01 SHENHAI) 资助

**摘要** 陆架边缘三角洲既是全球深水储层研究的热点对象,也是我国南海深水油气勘探的重要目标。基于对珠江口盆地白云南洼珠海组已钻井、薄片及物性分析,剖析了陆架边缘三角洲储层基本特征,明确了储层发育的主控因素并预测了有利储层分布。研究表明:珠海组各层段均发育三角洲储层,珠海组六段和五段发育陆架三角洲储层,珠海组四段至一段形成陆架边缘三角洲储层,其物性较好,随埋深增大储层物性整体变差。珠海组一段和二段物性最好,为中-高孔、中-高渗储层;珠海组三段和四段储层物性次之,为中-高孔、特低-高渗;珠海组五段和六段储层物性最差,为低孔、特低-低渗。珠海组陆架边缘三角洲储层发育由沉积相带、压实作用和盆地高热流背景联合控制。其中沉积相带提供储层物质基础,优质储层主要发育于陆架边缘三角洲前缘高能相带和近端深水扇,远源相对深埋的深水扇物性变差;压实作用主要发生在珠海组六段和五段,陆架边缘三角洲主体发育时期压实作用不明显;白云南洼古热流值高,促使成岩作用加速,储层物性快速变差,但也易形成次生溶蚀带。“热盆优相”型储层为珠海组油气勘探的最有利储层,主要为珠海组三段至一段的陆架边缘三角洲和深水扇砂体,其中珠海组一段三角洲前缘和深水扇的规模大、物性最好,而珠海组五段和六段油气勘探则应聚焦于优相次生孔隙发育带。

**关键词** 陆架边缘三角洲; 储层特征; 物性; 主控因素; 珠海组; 白云南洼

## Reservoir sedimentary characteristics and reservoir prediction in the shelf margin delta of the Zhuhai Formation in the southern subsag of the Baiyun sag in the Pearl River Mouth Basin

SHU Liangfeng, ZHANG Lili, LEI Shenglan, GAO Zhongliang, HAN Xiao, YU Sa

Research Institute, Shenzhen Branch of China National Offshore Oil Corporation Limited, Shenzhen 518054, China

**Abstract** The shelf margin delta of the Zhuhai Formation in the southern subsag of the Baiyun sag in the Pearl River Mouth

引用格式: 舒梁锋, 张丽丽, 雷胜兰, 高中亮, 韩霄, 于飒. 珠江口盆地白云南洼珠海组陆架边缘三角洲储层发育特征与主控因素及有利储层预测. 石油科学通报, 2022, 03: 309-320

SHU Liangfeng, ZHANG Lili, LEI Shenglan, GAO Zhongliang, HAN Xiao, YU Sa. Reservoir sedimentary characteristics and reservoir prediction in the shelf margin delta of the Zhuhai Formation in the southern subsag of the Baiyun sag in the Pearl River Mouth Basin. Petroleum Science Bulletin, 2022, 03: 309-320. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2022.03.028

Basin is a focus for domestic deep-water research and an important deep-water exploration target. Based on the surrounding drilled wells, thin section and physical property analysis data, the characteristics of the reservoirs in Zhuhai Formation are investigated, the main factors affecting physical properties are discussed and favorable reservoir distribution is predicted. The result shows that reservoirs with good physical properties had developed in all the delta intervals of the Zhuhai Formation, and the physical properties of the reservoirs decrease with an increase of burial depth. The 1st and 2nd Members of the Zhuhai Formation have the best physical properties. These are mainly medium-high porosity and medium-high permeability. The 3rd and 4th Members of the Zhuhai Formation have medium-high porosity, extra low permeability- high permeability. The 5th and 6th Members of Zhuhai Formation are relatively poor, and have mainly low porosity and low permeability-extra low permeability. The reservoirs on the shelf margin delta of the Zhuhai Formation are controlled by sedimentary facies belts, compaction, and basin heat flow background. Sedimentary facies belts provide the material basis of the reservoirs, and high-quality reservoirs are developed in the high-energy facies belts of the delta front. The compaction was only strong before the 4th Member of the Zhuhai Formation, and the compaction was not strong during the main development period of the shelf margin delta. The high geothermal gradient in the southern subsag of the Baiyun sag promotes the acceleration of diagenesis and the deterioration of the physical properties of the reservoir, but it also has led to secondary pore development zones. The threshold of the burial depth of the reservoir physical properties is 2400~2600 m, indicating that the physical properties of the 4th Member and above of the Zhuhai Formation are relatively good. Favorable reservoirs in the Zhuhai Formation are characterized by high thermal sag, shallow burial and superior facies. They are mainly high-energy facies belts at the front of the shelf margin deltas and deep-water fans near the delta, the physical properties of deep-water fans relatively far from the delta have deteriorated. The shelf margin delta front and deep water fans from the 3rd Member to the 1st Member of the Zhuhai Formation form favorable reservoirs. The most favorable reservoirs developed in the 1st Member of Zhuhai Formation because of its large scale and best physical properties and they can be key exploration targets. The 5th and 6th Members of the Zhuhai Formation are mainly important reservoirs when superior facies and secondary pore development zones exist.

**Keywords** shelf margin delta; physical properties; prediction of favorable reservoirs; Zhuhai Formation; southern subsag of the Baiyun sag

**doi:** 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.03.028

## 0 引言

陆架边缘三角洲是发育在浅海大陆架的陆架边缘向深海过渡位置所形成的三角洲沉积,其位于陆架边缘附近,沉积规模大,前三角洲部位可发育重力水道和深水扇等沉积体<sup>[1-5]</sup>。陆架边缘三角洲长期以来是海洋沉积作用、沉积过程与油气勘探的重要研究对象<sup>[6-10]</sup>。自晚渐新世以来,珠江口盆地形成了广阔的陆架边缘,在不同时期发育了陆架边缘三角洲,其储层发育控制因素已成为石油地质学的研究热点<sup>[7-9,11-13]</sup>。

前人针对珠江口盆地的陆架边缘三角洲储层已开展了大量卓有成效的研究,但主要集中于白云凹陷地区,涉及白云凹陷区域沉积学、珠海组储层特征与成因、珠海组储层的碳酸盐胶结物特征与形成机理等方面<sup>[14-21]</sup>,而尚未明确陆架边缘三角洲优质储层发育特征与主控因素。最新三维地震和探井钻探结果揭示白云南洼珠海组发育有大型的陆架边缘三角洲<sup>[23-25]</sup>,现今水深 1200~2600 m,是我国南海油气勘探向深水进军的重要对象,但陆架边缘三角洲优质储层发育特征、主控因素不清,制约着优质储层发育区带的预测评价。

基于白云南洼新获取的超过 2000 km<sup>2</sup> 的高精度三维地震资料和已钻探的九口探井资料,解剖珠海组陆

架边缘三角洲内幕结构,在此基础上,结合珠海组不同时期发育的储层岩石学和物性分析结果,明确影响储层物性的主控因素,进而预测优质储层发育的层段及平面分布特征。本次研究不仅可为陆架边缘三角洲储层研究提供理论支持,而且可为珠江口盆地的深水油气勘探提供一定的实际指导。

## 1 区域地质背景

白云凹陷是珠江口盆地面积最大、沉积地层最厚的凹陷<sup>[6,26-27]</sup>,油气资源潜力最大。白云南洼为白云凹陷南部的一个独立小洼陷,面积约 1800 km<sup>2</sup>,为顺鹤隆起和云荔低隆起所包围(图 1)。白云南洼的区域构造演化经历了断陷、断拗和拗陷三个阶段,自下而上发育了古近系文昌组、恩平组和珠海组,新近系珠江组、韩江组、粤海组和万山组地层,其中古近系文昌组和恩平组为断陷期陆相地层,珠海组为拗陷期海陆过渡相地层,珠江组至今为拗陷期海相地层。

珠海组沉积时期,虽然相对海平面处于持续上升阶段<sup>[28]</sup>,但因沉积物通量增大<sup>[29]</sup>,白云凹陷东南至白云南洼形成了规模很大的陆架边缘三角洲沉积体系<sup>[7-8,11]</sup>。随后受珠海组末期的白云运动影响,陆

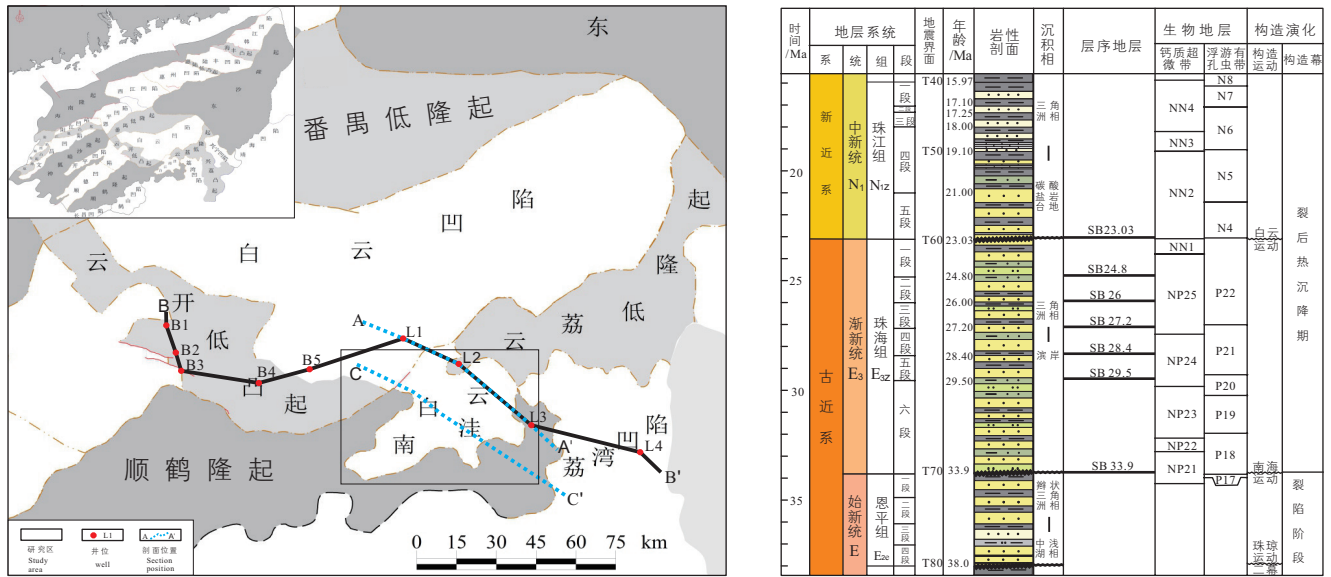


图1 白云南洼位置图和珠江口盆地晚渐新世综合柱状图  
Fig.1 Location map of south subsag of Baiyun sag and Late Oligocene comprehensive column of Pearl River Mouth Basin

架坡折带向北迁移至白云凹陷北坡至番禺低隆起一带，白云南洼珠海组地层被深海泥岩所覆盖<sup>[7,12,22]</sup>。根据前人研究成果，珠海组可识别出7个三级层序边界(SB33.9、SB29.5、SB28.4、SB27.2、SB26、SB24.8和SB23.03)，从而将珠海组划分为6个三级层序，珠海组地层也划分为六段<sup>[30]</sup>。其整体演化特征如下：珠海组六段和五段为陆架三角洲沉积，主要分布在白云凹陷西南部；珠海组四段中后期沉积物开始在白云南洼沉积，并形成陆架坡折，三角洲由陆架三角洲变为陆架边缘三角洲，分布面积变大；珠海组三段陆架边缘三角洲沉积规模达到最大，珠海组二段至一段陆架边缘三角洲以加积为主，到珠海组一段三角洲规模变小，后被上覆珠江组泥岩所覆盖，最终形成现有构造格局(图2)。

利用高精度三维地震资料解释成果和已钻探九口探井资料来解剖陆架边缘三角洲的沉积结构(图2)，结果显示：L1井钻遇珠海组一段—三段上半段，钻遇地层均为三角洲前缘亚相；L2井钻穿珠海组，其中珠海组六段—五段为陆架三角洲的前三角洲亚相，珠海组四段—三段沉积为陆架边缘三角洲前缘至前三角洲亚相，珠海组二段—一段为陆架边缘三角洲前缘亚相；L3井钻穿珠海组，但仅包括珠海组三段—一段地层，为陆架边缘三角洲对应的深水扇，根据层序格架内地震剖面解释，该井位于隆起高部位，故而缺失珠海组六段—四段地层；L4井也钻穿珠海组，但由于位置较低，仅揭示珠海组四段—一段地层，为陆架边缘三角洲对应的远源深水扇。

## 2 储层特征

### 2.1 岩石学特征

珠海组主要为三角洲沉积，根据深圳分公司内部资料分析，储层岩石类型主要为岩屑长石砂岩和长石岩屑砂岩，含少量长石石英砂岩。基于已钻井的连井剖面和含砂率数据分析可知，珠海组地层的含砂率由西北物源向东南方向逐渐降低，粒径也逐渐变细。云开低凸起为珠海组沉积时期的物源和沉积物通道<sup>[31-32]</sup>，地层厚度相对薄，仅为100~350 m，为三角洲平原亚相，含砂率为40.4%~71.7%，平均含砂率达60%，岩性以粗砂岩为主；白云凹陷南部和白云南洼所处的陆架边缘三角洲前缘亚相为三角洲沉积主体，其中L2井钻穿珠海组，地层厚度800~1500 m，含砂率介于37.4%~51%，平均约为44%，岩性从上到下由粗砂过渡中细砂；白云南洼南部和荔湾凹陷处于陆坡至深海平原环境，L3井和L4井揭示珠海组厚度仅为250~300 m，含砂率介于10.5%~48.3%，平均为25%，其中L4井含砂率仅为10.5%，岩性粒度较L3井钻遇的更细，以含细粉砂岩为主。

从垂向上看，珠海组六段—四段地层主要发育中砂岩，以泥质和高岭石胶结为主，其含量为5%~17%，局部充填铁白云石胶结物，含量小于5%；珠海组三段—二段则以细砂岩为主，泥质胶结，粒间孔充填泥质(含量8%~22%)、碳酸盐胶结物(含量2%~8%)；珠

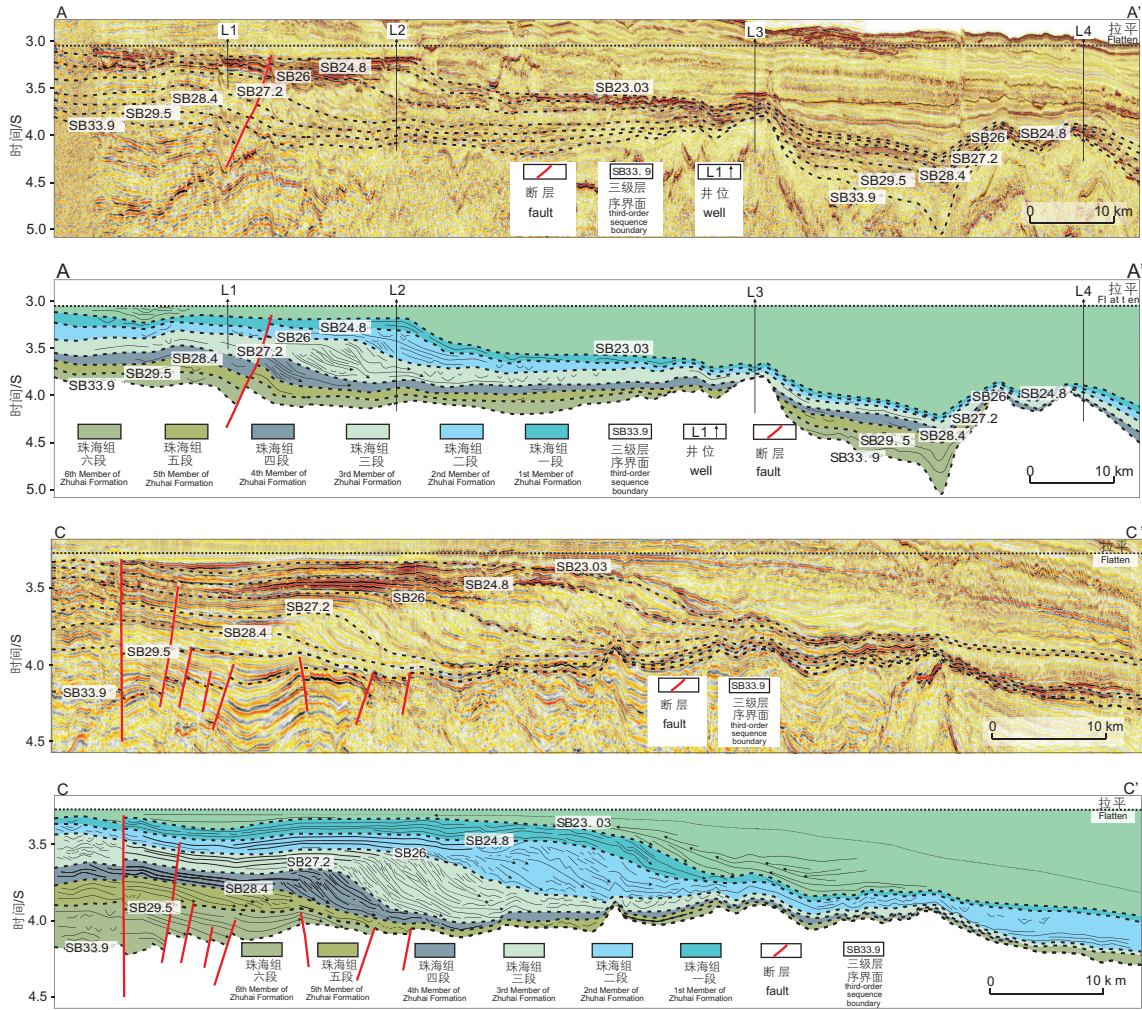


图2 白云南洼过已钻井典型地震剖面及解释剖面

Fig.2 A typical well-drilled seismic section and interpretation section in south subsag of Baiyun sag

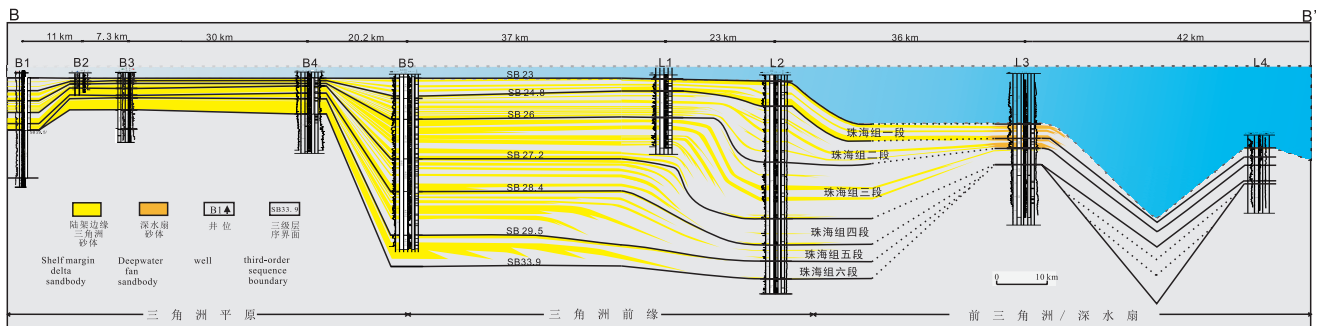


图3 白云南洼连井剖面图

Fig.3 Linked well profile in south subsag of Baiyun sag

海组一段地层岩性主要为细砂岩-粗砂岩, 少量泥质胶结(含量8%~16%), 粒间孔充填高岭石、菱铁矿、铁白云石等, 其含量为5%~22%(图4)。

### 2.2 物性特征

随着埋深增大, 珠海组储层的孔隙度和渗透率均

逐渐降低, 但不同层段储层的孔隙度和渗透率差异明显。根据中华人民共和国石油天然气行业标准《油气储层评价方法》碎屑岩储层分类标准, 碎屑岩储层孔隙度类型划分为特高孔  $\Phi \geq 30\%$ 、高孔  $25\% \leq \Phi < 30\%$ 、中孔  $15\% \leq \Phi < 25\%$ 、低孔  $10\% \leq \Phi < 15\%$ 、特低孔  $5\% \leq \Phi < 10\%$ 、超低孔  $\Phi < 5\%$ ; 碎屑岩储

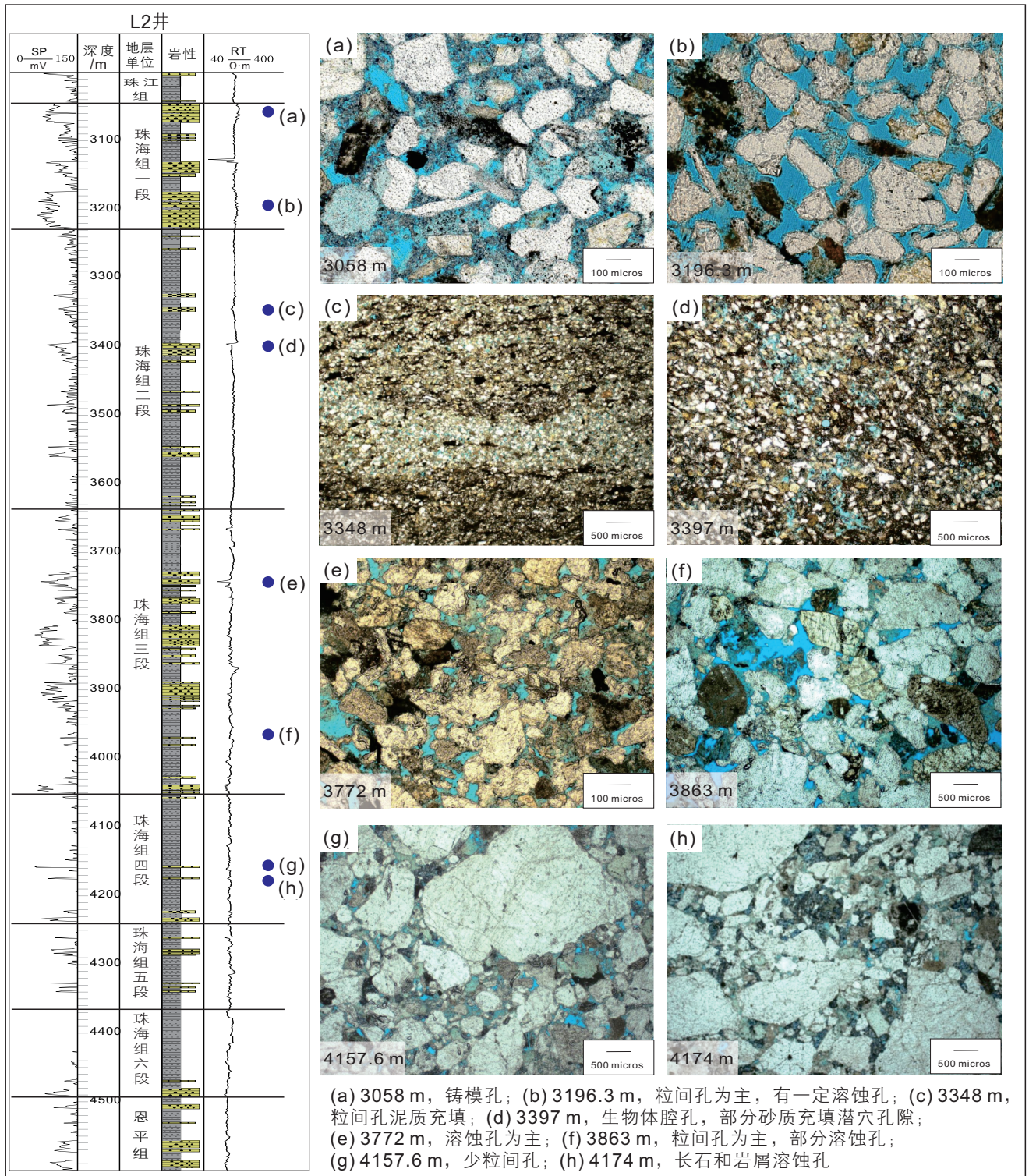


图 4 白云南洼陆架边缘三角洲珠海组储集空间特征(以 L2 井为例)

Fig.4 Reservoir space characteristics of Zhuhai Formation in south subsag of Baiyun sag (L2 as example)

层渗透率类型划分为特高渗  $K \geq 2000$  mD、高渗  $500 \text{ mD} \leq K < 2000$  mD、中渗  $50 \text{ mD} \leq K < 500$  mD、低渗  $10 \text{ mD} \leq K < 50$  mD、特低渗  $1 \text{ mD} \leq K < 10$  mD、超低渗  $K < 1$  mD。珠海组六段埋深集中在 2500~2800 m, 发育特低孔-中孔、特低渗-低渗储层; 珠海组五段

埋深在 1600~2700 m, 发育特低孔-高孔、特低渗-高渗储层; 珠海组四段埋深在 1500~2500 m, 发育特低孔-高孔、特低渗-高渗储层; 珠海组三段、二段和一段埋深分别为 1000~2900 m、1000~2600 m 和 900~2500 m, 均发育特低孔-高孔、特低渗-高渗储

层,孔隙度和渗透率变化范围大(图5)。

基于上述分析,可知珠海组六段和五段分别发育低孔-低渗、低孔-特低渗储层。陆架边缘三角洲沉积则整体发育中-高孔储层,但渗透率变化大,特低

渗储层到高渗储层均有发育,其中珠海组四段为高孔特低渗-高渗储层,三段主要为中孔低渗储层,二段为中孔、特低-中渗储层,而顶部的珠海组一段储层的物性最好,主体为高孔-高渗储层(表1)。

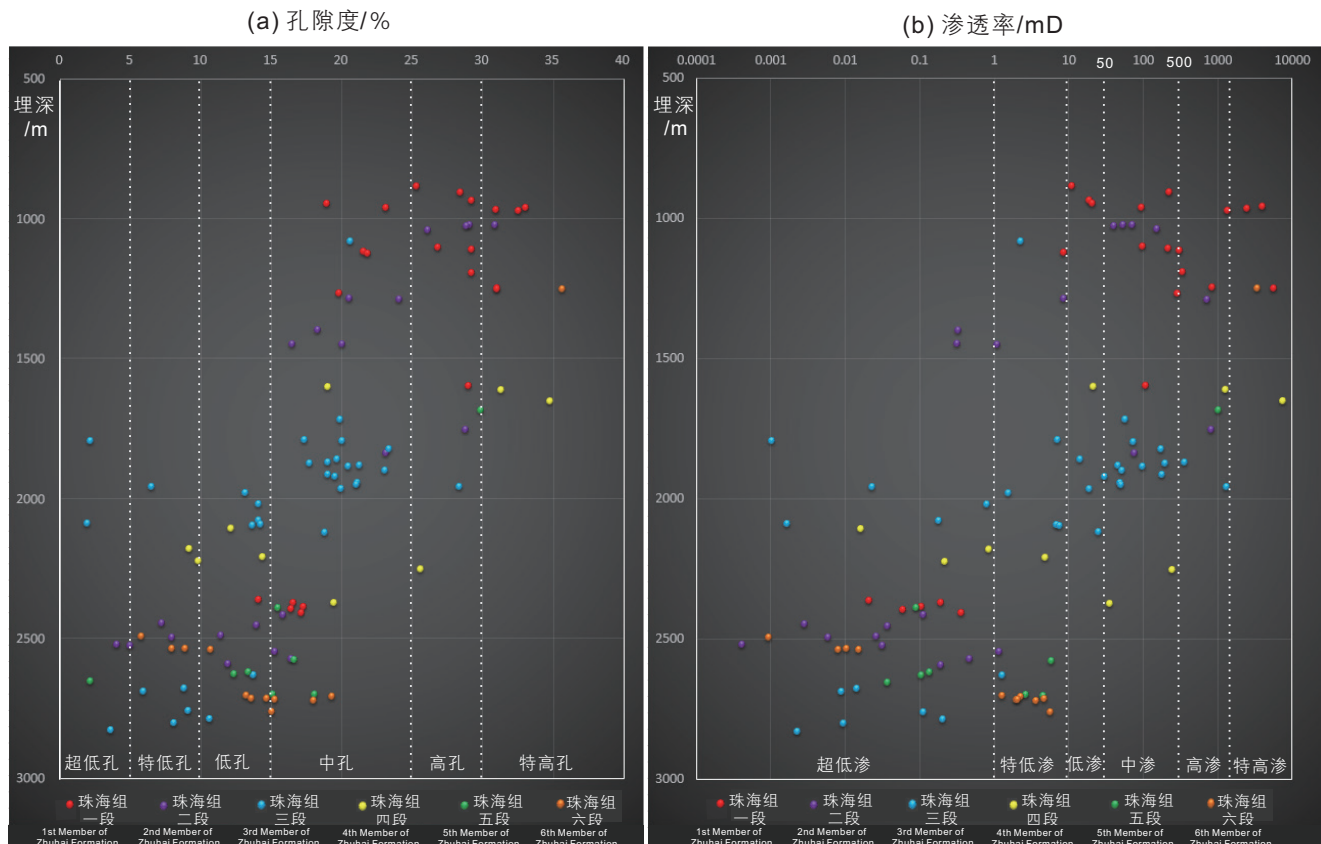


图5 白云南洼珠海组储层物性图

Fig.5 Reservoir physical properties map of Zhuhai Formation in south subsag of Baiyun sag (a)porosity; (b)permeability)

表1 白云南洼珠海组储层物性统计表

Table1 Reservoir physical properties of Zhuhai Formation in south subsag of Baiyun sag

分类	孔隙度/%				渗透率/mD				物性特征
	超-特低孔 (N=6/12)	低孔 (N=20)	中孔 (N=45)	高孔 (N=23)	超-特低渗 (N=40/20)	低渗 (N=8)	中渗 (N=22)	特-高渗 (N=14)	
珠海组一段				*				*	高孔高渗
珠海组二段			*		*		*		中孔
珠海组三段			*			*			中孔低渗
珠海组四段				*	*			*	高孔
珠海组五段					*				低孔特低渗
珠海组六段						*			低孔低渗

\*表示主要集中,珠海组一段样品数N=22;珠海组二段样品数N=21;珠海组三段样品数N=33;珠海组四段样品数N=9;珠海组五段样品数N=8;珠海组六段样品数N=13

### 3 影响储层物性的主控因素

储层物性是由沉积作用、成岩作用、构造运动及盆地高热流背景等因素相互作用的结果,其中沉积作用决定了砂岩碎屑矿物的成分与结构,成岩作用使得碎屑矿物成分和孔隙结构发生变化<sup>[33-37]</sup>,而盆地高古热流背景下深部热流体参与了储层的成岩-孔隙演化过程<sup>[38-39]</sup>。

#### 3.1 沉积作用

沉积作用为储层提供了物质基础,控制了储层的发育条件及优质储层的分布范围。不同沉积微相发育砂体的物性差异明显。基于已钻井与岩石物性数据分析,结果显示优质储层主要发育在水下分流河道和河口坝等高能相带,具有粒度粗、分选好、杂基含量少的特点,其中后两者特点应该与波浪作用改造有关,这两种微相发育砂体的物性整体较好,其平均孔隙度和渗透率分别达25%和225 mD。对比而言,远砂坝、水下天然堤、分流间湾等微相发育储层的粒度较细、颗粒分选磨圆较差,杂基多,物性变差,这与沉积水动力弱有关,其中分流间湾发育砂体的物性很差,其孔隙度和渗透率平均值分别仅为8.6%和小于1 mD。此外,同一相带同一层段内砂体的泥质含量不同,也导致储层物性差异明显,比如L1井和L2井同属于三角洲前缘相带沉积,相同层段砂体粒度基本相同,但由于泥质含量不同,导致物性不同,其中L2井由于泥质含量低,原始孔隙度高,因此物性相对好。

#### 3.2 成岩作用

成岩作用控制了储层的孔隙演化,决定着储集性能的好坏<sup>[34,39-40]</sup>。白云南洼珠海组储层在埋藏成岩过程中主要经历了压实作用、胶结作用、溶蚀作用,进而改变了储层的孔隙结构和物性,与白云主洼经历的成岩作用类似<sup>[38-39]</sup>。

压实作用主要发生在珠海组三段地层以下,在陆架边缘三角洲主体发育时期作用不明显。对比来看,珠海组六段一四段储层压实作用强,压实减孔量8%~10.5%,平均孔隙度整体减小至10%左右,渗透率普遍小于5 mD;珠海组三段和二段砂体由于埋深变浅,压实作用较强,压实减孔量3%~8%,但具有一定的长石和岩屑溶蚀孔,平均孔隙度约为20%,渗透率66~110 mD;珠海组一段储层由于埋深浅,仅经历了弱/未压实成岩,且伴随的长石溶蚀形成了一定数量

的溶蚀孔,砂体平均孔隙度在26%左右,渗透率普遍大于200 mD。根据已有矿物成分分析化验结果,参考中华人民共和国石油天然气行业标准《碎屑岩成岩阶段划分》中成岩阶段划分依据,综合研究区碎屑颗粒点-线接触关系、铁白云石、泥岩中I/S(伊利石/蒙皂石混层)中S(蒙皂石)百分含量(图6)等因素,珠海组储层正处于中成岩A期。

#### 3.3 古热流

沉积盆地内高古热流可促进成岩作用过程,进而使得储层物性快速变差,但也易形成次生溶蚀带。珠江口盆地现今的大地热流值大约为24.2~121.0 mW/m<sup>2</sup>,平均热流值为71.8±13.6 mW/m<sup>2</sup>,为典型的“热盆”。珠江口盆地白云凹陷北部的地温梯度普遍小于4℃/100 m,而白云凹陷南部地温梯度大于4℃/100 m,其中L2井珠海组地温梯度为4.22℃/100 m,L3井地温梯度更高到6℃/100 m。白云南洼属于中高地温梯度区,深部热流体参与了储层的成岩-孔隙演化过程。高地温梯度区砂岩的原生孔隙受静岩压实作用和热压实作用联合控制,具体表现为压实减孔速率高,等孔隙度埋深显著变浅。高地温梯度区受构造热事件的影响明显,成岩演化进程加快,各成岩作用过程活跃并出现一些典型的热液成因自生矿物组合<sup>[38-39]</sup>。另一方面,虽然储层物性随埋深的增加而下降,但在高地温梯度区储层更易发生溶蚀,从而形成次生孔隙发育带,如白云凹陷深层砂岩的储集空间以次生溶孔为主,约占总孔隙的2/3以上<sup>[38]</sup>,高地温梯度区发育有碎屑颗粒(长石、岩屑、少量石英)、胶结物(高岭石、碳酸盐等)和杂基等大量溶蚀形成的次生溶蚀带。

同时,高地温梯度区热演化事件和热异常影响着珠海组有效储层的埋深下限<sup>[41-43]</sup>,据中海油深圳分公司内部资料统计,在内地温梯度区,储层孔隙度为15%的埋深下限为2400 m,渗透率10 mD的埋深下限为2600 m。结合白云南洼周边已钻井储层物性变化特征,研究区珠海组陆架边缘三角洲储层物性埋深下限在2400~2600 m,砂岩在该埋深之下物性逐渐变差,之上储层物性保持较好,指示珠海组四段及以上储层物性相对好。

### 4 有利储层预测

珠海组不同层段和不同相带均发育储层甜点。具体而言,在珠海组六段-四段,三角洲平原亚相发

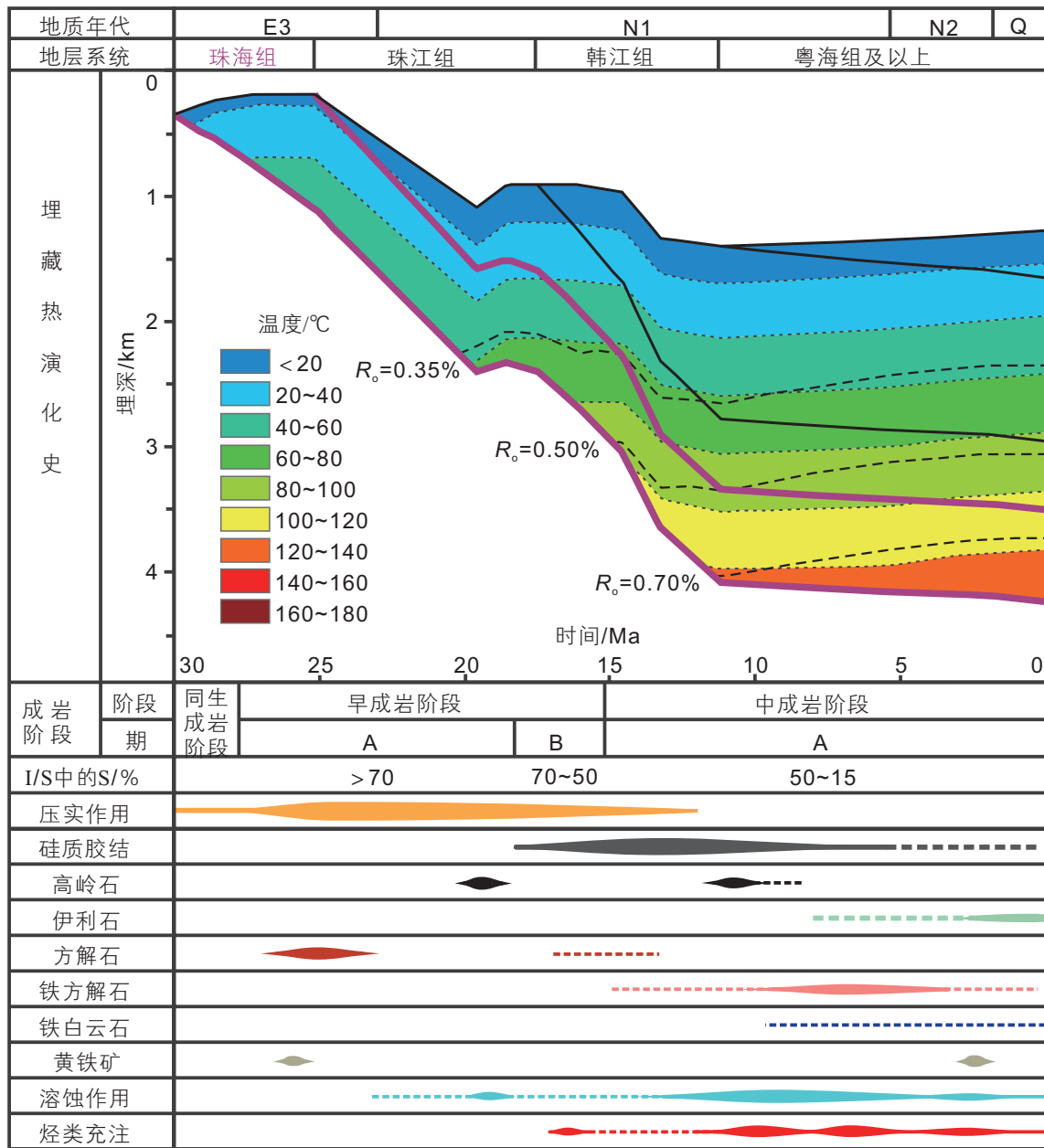


图 6 白云南洼珠海组砂岩埋藏-成岩-孔隙演化

Fig.6 Burial-diagenesis-pore evolution of sandstones from Zhuhai Formation in south subsag of Baiyun sag

育有优质储层，其埋深在 1700 m 左右，孔隙度达 29.8%~35.6%，渗透率达 997~3342 mD，同时还可能存在次生孔隙发育带；珠海组三段主要发育陆架边缘三角洲前缘砂体，埋深约为 2000 m，孔隙度和渗透率分别可达 30% 和 167~1292 mD；珠海组二段和一段主要发育三角洲前缘和深水扇砂体，埋深约为 1000 m，孔隙度和渗透率分别为 26%~29% 和 151~322 mD，其中一段储层物性相对二段更好(图 7)。

基于上述分析，珠海组有利储层特征为热盆优相浅埋，主要为陆架边缘三角洲前缘高能相带和近端深

水扇，远源相对深埋的深水扇物性变差。珠海组储层分布最有利的储集体为珠海组三段至一段的陆架边缘三角洲和深水扇砂体，其中珠海组三段有利砂体为西南侧的三角洲前缘河口坝，条带砂和小规模的深水扇，珠海组二段有利砂体为东侧的三角洲前缘河口坝，条带砂和中等规模的深水扇，珠海组一段有利砂体为东侧的三角洲前缘河口坝和深水扇，规模最大(图 8)。

因此，分析南海北部白云南洼珠海组陆架边缘三角洲储层特征和预测其储集砂体类型及发育分布区域，有助于明确有利的油气生储盖组合特征，更好地预测



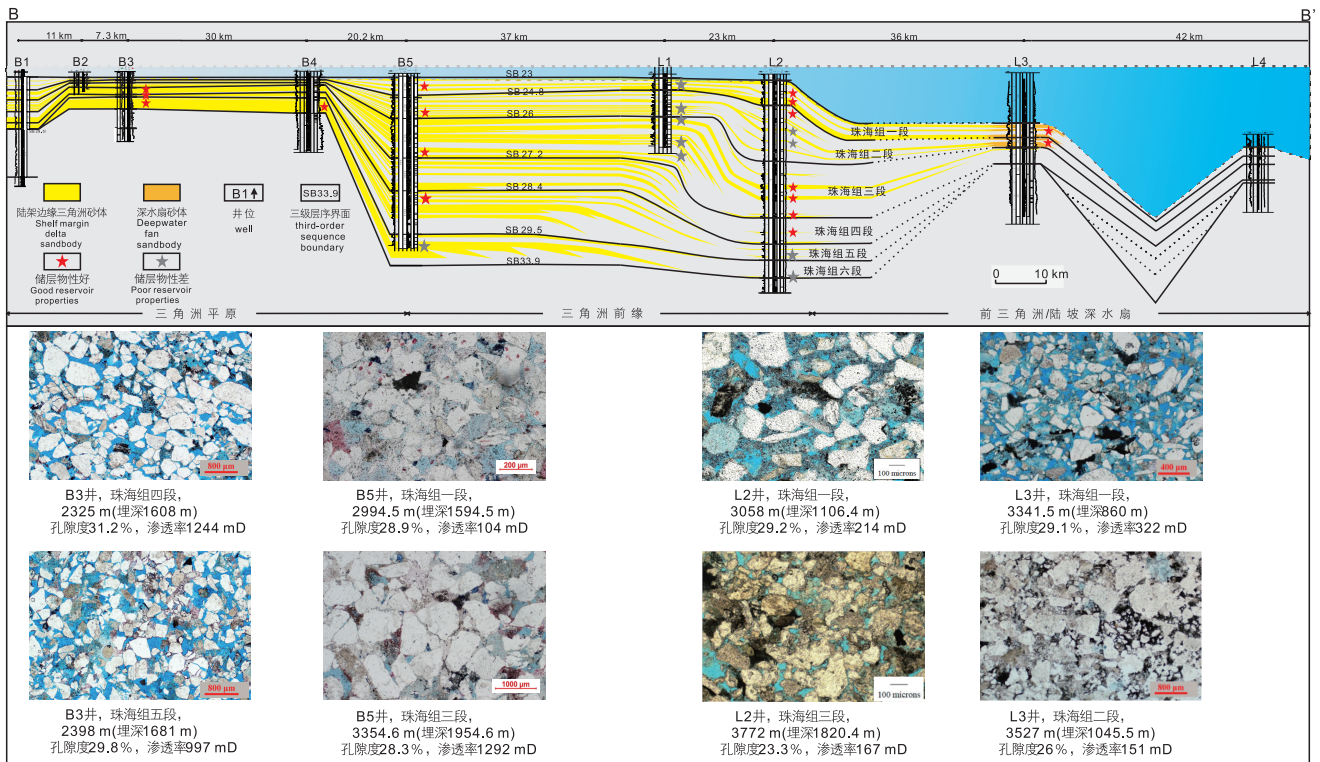


图 7 白云南洼珠海组储层发育层段及物性特征

Fig.7 Reservoir development interval and physical characteristics of Zhuhai Formation in south subsag of Baiyun sag

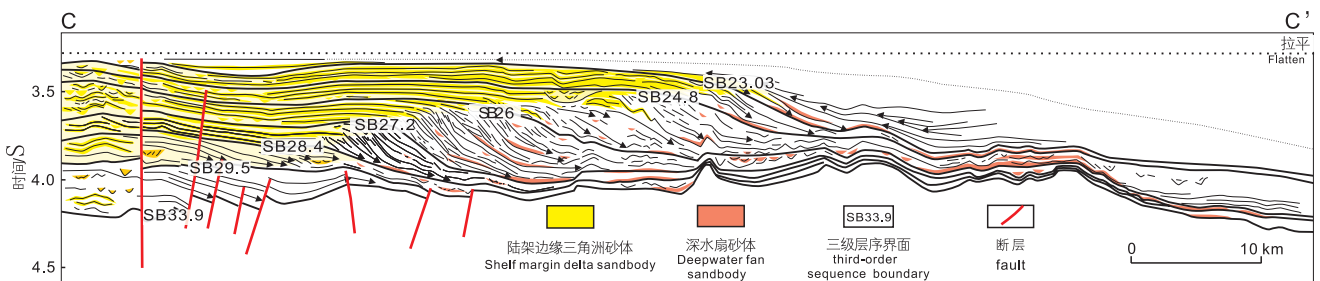


图 8 白云南洼珠海组优质储层预测模式

Fig.8 Prediction model of Zhuhai Formation high-quality reservoir in south subsag of Baiyun sag

及评价有利成藏区带，对珠江口盆地白云南洼构造-岩性储集体及油气勘探具有重要现实意义，推动其深水油气勘探评价工作。

## 5 结论

(1) 珠海组三角洲各层段均发育有物性好的储层，总体随埋深增大而储层物性变差。其中陆架边缘三角洲发育的珠海组一段和二段物性最好，珠海组三段和四段次之，陆架三角洲珠海组五段和六段相对差。珠海组一段和二段物性主要为中-高孔、中-高渗，三段和四段物性为中高孔特低渗-高渗，五段和六段储

层物性主要为低孔低渗-特低渗。

(2) 珠海组陆架边缘三角洲储层由沉积相带、压实作用和盆地高热流背景作用共同控制，其中沉积相带是物质基础，三角洲前缘高能沉积相带发育优质储层，压实作用仅在珠海组四段之前表现强烈，陆架边缘三角洲主体发育时期埋深压实不强。盆地高热流背景使得白云南洼地温梯度高，促使成岩作用加速，使得储层物性变差，但也易形成次生溶蚀带。高地温梯度区热演化事件和热异常影响着储层物性下限，埋深下限在 2400~2600 m，指示珠海组四段及以上储层物性相对好。

(3) 珠海组有利储层特征为热盆优相浅埋，主要为

陆架边缘三角洲前缘高能相带和近端深水扇,远源相对深埋的深水扇物性变差。有利储集体主要为珠海组三段至珠海组一段的陆架边缘三角洲和深水扇砂体,物性中孔中渗及以上,其中珠海组一段三角洲前缘和

深水扇规模大,物性最好,可作为重点勘探对象,珠海组五段和六段则以寻找优相次生孔隙发育带为主。

致谢:评审专家和编辑对本文提出的宝贵意见和建议,在此表示衷心的感谢!

## 参考文献

- [1] POREBSKI S J, STEEL R J. Shelf-margin deltas: Their stratigraphic significance and relation to deepwater sands[J]. *Earth-Science Reviews*, 2003, 62(3-4): 283-326.
- [2] CARVAJAL C, STEEL R J. Shelf-edge architecture and bypass of sand to deep water: Influence of shelf-edge processes, sea level, and sediment supply[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2009, 79(9): 652-672.
- [3] DIXON J F, STEEL R J, OLARIU C. Shelf-edge delta regime as a predictor of deep-water deposition[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2012, 82(9): 681-687.
- [4] 朱筱敏,葛家旺,赵宏超,等. 陆架边缘三角洲研究进展及实例分析[J]. *沉积学报*, 2017, 35(5): 945-957. [ZHU X M, GE J W, ZHAO H C, et al. Development of shelf-edge delta researches and typical case analyses[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(5): 945-957.]
- [5] 谢玉洪,张功成,唐武,等. 南海北部深水区油气成藏理论技术创新与勘探重大突破[J]. *天然气工业*, 2020, 40(12): 1-11. [XIE Y H, ZHANG G C, TANG W, et al. Theoretical and technological innovation of oil and gas accumulation and major exploration breakthroughs in deep-water areas, northern South China Sea[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(12): 1-11.]
- [6] 张功成,米立军,吴时国,等. 深水区—南海北部大陆边缘盆地油气勘探新领域[J]. *石油学报*, 2007, 28(2): 15-21. [ZHANG G C, MI L J, WU S G, et al. Deepwater area—the new prospecting targets of northern continental margin of South China Sea[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(2): 15-21.]
- [7] 柳保军,申俊,庞雄,等. 珠江口盆地白云凹陷珠海组浅海三角洲沉积特征[J]. *石油学报*, 2007, 28(2): 49-56. [LIU B J, SHEN J, PANG X, et al. Characteristics of continental delta deposits in Zhuhai Formation of Baiyun depression in Pearl River Mouth Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(2): 49-56.]
- [8] 王永凤,王英民,李冬,等. 陆架边缘三角洲沉积特征研究及其油气意义[J]. *海洋地质前沿*, 2011, 7(7): 28-33. [WANG Y F, WANG Y M, LI D, et al. Depositional characteristics of shelf margin deltas and their petroleum significance[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2011, 27(7): 28-33.]
- [9] 张忠涛,张向涛,孙辉,等. 珠江口盆地渐新世陆架边缘三角洲沉积特征及其对成藏的控制作用[J]. *石油学报*, 2019, 40(增刊1): 81-89. [ZHANG Z T, ZHANG X T, SUN H, et al. Sedimentary characteristics of Oligocene shelf edge delta and their control on hydrocarbon accumulation in Pearl River Mouth Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(S1): 81-89.]
- [10] 谢玉洪. 莺琼盆地区中央峡谷源头沉积特征及油气勘探前景[J]. *地质科技通报*, 2020, 39(5): 69-78. [XIE Y H. Sedimentary characteristics and hydrocarbon exploration potential of the upstream of the central canyon in the Yinggehai and Qiongdongnan basins[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2020, 39(5): 69-78.]
- [11] 曾清波,陈国俊,张功成,等. 珠江口盆地深水区珠海组陆架边缘三角洲特征及其意义[J]. *沉积学报*, 2015, 33(3): 595-606. [ZENG Q B, CHEN G J, ZHANG G C, et al. The shelf margin delta feature and its significance in Zhuhai Formation of deep water area, Pearl River Mouth Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(3): 595-606.]
- [12] 王思琦,张忠涛,林畅松,等. 白云凹陷东南部晚渐新世陆架边缘三角洲沉积特征及沉积地貌演化[J]. *东北石油大学学报*, 2017, 41(1): 33-42. [WANG S Q, ZHANG Z T, LIN C S, et al. Sedimentary features and sedimentary evolution of the shelf—margin delta in late Oligocene of southeast Baiyun sag[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2017, 41(1): 33-42.]
- [13] 邢作昌,林畅松,秦成岗,等. 珠江口盆地白云深水区珠海组石英颗粒表面特征[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2017, 39(1): 1-11. [XING Z C, LIN C S, QIN C G, et al. The surface features of the quartz wand grains in Zhuhai Formation of Baiyun deep—water area, the Pearl River Mouth Basin[J]. *Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition)*, 2017, 39(1): 1-11.]
- [14] 尤丽,李才,刘景环. 文昌A凹陷珠海组储层区域成岩作用特征及定量评价[J]. *大庆石油学院学报*, 2012, 36(2): 7-13. [YOU L, LI C, LIU J H. Regional diagenesis feature and quantitative evaluation from Zhuhai Formation reservoir in Wenchang A sag[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2012, 36(2): 7-13.]
- [15] 朱俊杰,张尚锋,朱锐,等. 珠江口盆地番禺低隆起A井区珠海组沉积研究[J]. *长江大学学报(自然科学版)*, 2011, 8(2): 20-22. [ZHU J J, ZHANG S F, ZHU R, et al. Deposition characteristics of Zhuhai Formation of Wellblock A in Panyu low uplift of Pearl-river Mouth Basin. *Journal of Yangtze University (Nat Sci Edit)*, 2011, 8(2): 20-22.]

- [16] 吕成福, 陈国俊, 张功成, 等. 珠江口盆地白云凹陷珠海组碎屑岩储层特征及成因机制[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(9): 2763–2773. [LÜ C F, CHEN G J, ZHANG G C, et al. Reservoir characteristics of detrital sandstones in Zhuhai Formation of Baiyun sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(9): 2763–2773.]
- [17] 耿威, 郑荣才, 魏钦廉, 等. 白云凹陷珠海组储层沉积学特征[J]. 岩性油气藏, 2008, 20(4): 98–104. [GENG W, ZHENG R C, WEI Q L, et al. Reservoir sedimentology of paleogene Zhuhai Formation in Baiyun depression[J]. Lithologic Reservoirs, 2008, 20(4): 98–104.]
- [18] 李云, 郑荣才, 高博禹, 等. 珠江口盆地白云凹陷渐新世/中新世地质事件的碎屑组响应[J]. 现代地质, 2011, 25(3): 476–481. [LI Y, ZHENG R C, GAO B Y, et al. Characteristics of the detrital response to Oligocene/Miocene geological events in Baiyun sag, Pearl River Mouth Basin. Geoscience, 2011, 25(3): 476–481.]
- [19] 王琪, 郝乐伟, 陈国俊, 等. 白云凹陷珠海组砂岩中碳酸盐胶结物的形成机理[J]. 石油学报, 2010, 31(4): 553–559. [WANG Q, HAO L W, CHEN G J, et al. Forming mechanism of carbonate cements in siliciclastic sandstone of Zhuhai Formation in Baiyun sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(4): 553–559.]
- [20] 王代富, 罗静兰, 陈淑慧, 等. 珠江口盆地白云凹陷深层砂岩储层中碳酸盐胶结作用及成因探讨[J]. 地质学报, 2017, 91(9): 2079–2090. [WANG D F, LUO J L, CHEN S H, et al. Carbonate cementation and origin analysis of deep sandstone reservoirs in the Baiyun sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2017, 91(9): 2079–2090.]
- [21] 杜贵超, 苏龙, 陈国俊, 等. 番禺低隆起珠海组砂岩碳酸盐胶结特征及其对储层物性的影响[J]. 岩性油气藏, 2019, 31(3): 10–19. [DU G C, SU L, CHEN G J, et al. Carbonate cements and its effect on reservoir property of shallow marine sandstones of Zhuhai Formation in Panyu low-uplift, Pearl River Mouth Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2019, 31(3): 10–19.]
- [22] 林畅松, 施和生, 李浩, 等. 南海北部珠江口盆地陆架斜坡带层序结构和沉积演化及控制作用[J]. 地球科学, 2018, 43(10): 3407–3422. [LIN C S, SHI H S, LI H, et al. Sequence architecture, depositional evolution and controlling processes of continental slope in Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea[J]. Earth Science, 2018, 43(10): 3407–3422.]
- [23] 张曼莉, 林畅松, 何敏, 等. 珠江口盆地晚渐新世陆架边缘三角洲沉积层序结构及演化[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(4): 875–885. [ZHANG M L, LIN C S, HE M, et al. Sequence architecture and evolution of shelf–margin deltaic systems of the Late Oligocene in Pearl River Mouth Basin[J]. Oil&Gas Geology, 2019, 40(4): 875–885.]
- [24] 邢作昌, 林畅松, 张忠涛, 等. 白云深水区珠海组陆架边缘三角洲沉积演化[J]. 特种油气藏, 2017, 24(5): 15–20. [XING Z C, LIN C S, ZHANG Z T, et al. Deposit evolution of continental margin delta in the Zhuhai Formation in deep water area of Baiyun sag[J]. Special Oil and Gas Reservoir, 2017, 24(5): 15–20.]
- [25] 邢作昌, 张忠涛, 林畅松, 等. 珠江口盆地荔湾凹陷晚渐新世—早中新世重力流沉积类型及其特征[J]. 古地理学报, 2020, 22(6): 1143–1156. [XING Z C, ZHANG Z T, LIN C S, et al. Sedimentary types and features of gravity flow depositional systems from Late Oligocene to Early Miocene in Liwan sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2020, 22(6): 1143–1156.]
- [26] 林鹤鸣, 施和生. 珠江口盆地白云荔湾深水区油气成藏条件及勘探方向[J]. 天然气工业, 2014, 34(5): 29–36. [LIN H M, SHI H S. Hydrocarbon accumulation conditions and exploration direction of Baiyun-Liwan deep water area in the Pearl River Mouth Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(5): 29–36.]
- [27] 施和生, 柳保军, 颜承志, 等. 珠江口盆地白云荔湾深水区油气成藏条件与勘探潜力[J]. 中国海上油气, 2010, 22(6): 369–374. [SHI H S, LIU B J, YAN C Z, et al. Hydrocarbon accumulation conditions and exploration potential in Baiyun-Liwan deepwater area, Pearl River Mouth Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2010, 22(6): 369–374.]
- [28] 秦国权. 珠江口盆地新生代晚期层序地层划分和海平面变化[J]. 中国海上油气(地质), 2002, 16(1): 1–10. [QIN G Q. Late Cenozoic sequence stratigraphy and sea-level changes in Pearl River Mouth Basin, South China Sea[J]. China Offshore Oil and Gas: Geology, 2002, 16(1): 1–10.]
- [29] 黄维, 汪品先. 渐新世以来的南海沉积量及其分布[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2006, 36(9): 822–829. [HUANG W, WANG P X. The sediment volume and distribution of the South China Sea from the Oligocene[J]. China Science(series D, Earth science), 2006, 36(9): 822–829.]
- [30] 柳保军, 庞雄, 颜承志, 等. 珠江口盆地白云深水区渐新世—中新世陆架坡折带演化及油气勘探意义[J]. 石油学报, 2011, 32(2): 234–242. [LIU B J, PANG X, YAN C Z, et al. Evolution of the Oligocene-Miocene shelf slope-break zone in the Baiyun deep-water area of the Pearl River Mouth Basin and its significance in oil-gas exploration[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(2): 234–242.]
- [31] 韩银学, 王龙颖, 杨东升, 等. 珠江口盆地白云凹陷珠海组南部物源及其油气勘探意义[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(10): 1537–1545. [HAN Y X, WANG L Y, Yang D S, et al. Southern provenance supply of Zhuhai Formation and its significance on oil and gas accumulation in Baiyun sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(10): 1537–1545.]
- [32] 曾智伟, 朱红涛, 杨香华, 等. 珠江口盆地白云凹陷恩平组物源转换及沉积充填演化[J]. 地球科学, 2017, 42(11): 1936–1954. [ZENG Z W, ZHU H T, YANG X H, et al. Provenance transformation and sedimentary evolution of Enping Formation, Baiyun sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Earth Science, 2017, 42(11): 1936–1954.]
- [33] 杨奕华, 包洪平, 贾亚妮, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界砂岩储集层控制因素分析[J]. 古地理学报, 2008, 10(1): 25–33. [YANG Y

- H, BAO H P, JIA Y N, et al. Analysis on control factors of sandstone reservoir of the Upper Paleozoic in Ordos Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2008, 10(1): 25–33.]
- [34] 杜红权, 朱如凯, 何幼斌, 等. 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*, 2012, 31(3): 403–411. [DU H Q, ZHU R K, HE Y B, et al. The diagenesis of the 2nd Member reservoirs of Xujiache Formation and its influence on reservoirs of Hechuan area[J]. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 2012, 31(3): 403–411.]
- [35] 吕传炳, 庞雄奇, 庞宏, 等. 饶阳凹陷西6区块沙一上段沉积微相及其含油气性[J]. *石油科学通报*, 2021, 04: 553–565. [LYU C B, PANG X Q, PANG H, et al. Sedimentary microfacies and oil/gas-bearing ability of the upper member of Es1 in the Xi-6 area, Raoyang sag[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2021, 04: 553–565.]
- [36] 孙盼科, 贾浪波, 朱红璋, 等. 南堡凹陷柳赞地区沙三段中上部层序结构及沉积充填特征研究[J]. *石油科学通报*, 2021, 01: 16–30. [SUN P K, JIA L B, ZHU H Z, ZHANG Lin, et al. Sequence architecture and sedimentary filling characteristics of the middle-upper part of the Es3 Formation in the Liuzan Area, Nanpu depression[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2021, 01: 16–30.]
- [37] 庞宏, 吴松, 胡英杰, 等. 辽河拗陷牛心坨沙四段致密砂岩油形成主控因素及有利区预测[J]. *石油科学通报*, 2020, 04: 467–482. [PANG H, WU S, HU Y J, et al. Main controlling factors and favorable area prediction of tight sandstone oil formations in the Niuxintuo Es4 member in the Liaohe depression[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2020, 04: 467–482.]
- [38] 李弛, 罗静兰, 胡海燕, 等. 热动力条件对白云凹陷深水珠海组砂岩成岩演化过程的影响[J]. *地球科学*, 2019, 44(2): 572–587. [LI C, LUO J L, HU H Y, et al. Thermodynamic impact on deep-water sandstone diagenetic evolution of Zhuhai Formation in Baiyun sag, Pearl River Mouth Basin[J]. *Earth Science*, 2019, 44(2): 572–587.]
- [39] 罗静兰, 何敏, 庞雄, 等. 珠江口盆地南部热演化事件与高地温梯度的成岩响应及其对油气勘探的启示[J]. *石油学报*, 2019, 40(增刊1): 90–104. [LUO J L, HE M, PANG X, et al. Diagenetic response on thermal evolution events and high geothermal gradients in the southern Pearl River Mouth Basin and its enlightenment to hydrocarbon exploration[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 40(S1): 90–104.]
- [40] 李兆雨, 李文厚, 吴越, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬地区延长组长8油层组储层特征及主控因素[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2020, 50(2): 193–202. [LI Z Y, LI W H, WU Y, et al. Characteristics and controlling factors of Chang 8 Reservoir of the Jiyuan area in the Ordos Basin[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2020, 50(2): 193–202.]
- [41] LEI C, LUO J L, PANG X, LI C, et al. Impact of temperature and geothermal gradient on sandstone reservoir quality: The Baiyun sag in the Pearl River Mouth Basin study case(Northern South China Sea)[J]. *Minerals*, 2018, 8, 452: 1–18.
- [42] 庞雄, 任建业, 郑金云, 等. 陆缘地壳强烈拆离薄化作用下的油气地质特征: 以南海北部陆缘深水白云凹陷为例[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(1): 27–39. [PANG X, REN J Y, ZHENG J Y, et al. Petroleum geology controlled by extensive detachment thinning of continental margin crust: A case study of Baiyun sag in the deep-water area of Northern South China Sea[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(1): 27–39.]
- [43] 罗静兰, 李弛, 雷川, 等. 碎屑岩储集层成岩作用研究进展与热点问题讨论[J]. *古地理学报*, 2020, 22(6): 1021–1040. [LUO J L, LI C, LEI C, et al. Discussion on research advances and hot issues in diagenesis of clastic—rock reservoirs[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2020, 22(6): 1021–1040.]

(责任编辑 杨威 编辑 付娟娟)