

珠江口盆地恩平凹陷A油田 新近系储层钙质砂岩夹层成因

戴建文¹, 柴愈坤¹, 王冠民², 孙爽¹, 郭飞¹, 薛亚²

1 中海石油(中国)有限公司深圳分公司; 2 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院

摘要 珠江口盆地恩平凹陷A油田新近系主力储层中普遍含有钙质砂岩夹层,对油田的进一步精细开发有较大的影响,迫切需要准确掌握这些钙质砂岩夹层的成因与分布规律。基于对岩心的精细观察和分析,利用岩石铸体薄片分析钙质填隙物的成因,结合沉积相、粒度、测井曲线、岩石密度分析和地震反演等手段,确定研究区新近系主力储层中钙质砂岩夹层主要是沉积成因,少量属于成岩过程中的胶结成因。古珠江三角洲前缘常被波浪改造形成沿岸砂坝,钙质砂岩夹层主要形成于沿岸砂坝向陆的后滨或坝后混合坪亚相中,是在潮间—潮上带的浅水或者暴露环境下,海水强烈蒸发形成碳酸盐矿物沉淀,并胶结砂质碎屑颗粒而形成的。钙质砂岩夹层在垂向上与坝后泥坪或潟湖的泥岩相邻,其分布规律具有相似性。

关键词 钙质砂岩夹层; 沿岸砂坝; 新近系; 恩平凹陷; 珠江口盆地

中图分类号:TE122.2 **文献标识码**:A

0 前言

钙质砂岩夹层在砂砾岩储层中比较常见,钙质砂岩的形成对油气储层质量和油气藏开发具有重要影响。钙质胶结物的存在不仅仅破坏储层,而且可以形成物性隔夹层。一般来说,少量发育的钙质砂岩夹层往往出现在砂岩层的顶部或底部,尤其是在砂岩顶部比较常见。对于这些厚层砂岩中的钙质胶结砂岩夹层,一般认为钙质胶结物主要来自于邻近的暗色泥岩,是泥岩中的富钙流体进入砂岩并在砂-泥界面处沉淀出的碳酸盐胶结物^[1-5],也有学者认为其形成受到储层中的生物碎屑(或盆内碳酸盐颗粒)的控制^[6-8],还可能与高频海泛面或准层序界面等密切相关^[9]。钙质砂岩夹层在平面上的延伸可达数百米至数千米^[3,10]。

目前一般认为钙质砂岩夹层是成岩期间由胶结作用形成的。但是近期在珠江口盆地珠一坳陷恩平凹陷A油田的新近系储层中,发现了可能为沉积成因的钙质砂岩夹层,与上述成岩作用形成的钙

质砂岩夹层明显不同。本文通过岩心详细观察、铸体薄片分析,综合沉积相、粒度、测井曲线、岩石密度分析和地震反演等研究方法,确定了研究区新近系钙质砂岩夹层的沉积成因,以期对珠一坳陷海上新近系区块油藏开发提供借鉴。

1 地质概况

珠一坳陷是珠江口盆地北部的次级坳陷,亦称北部坳陷带,其形成于中新世^[11],近40年来陆续发现了多个大中型油田,油气当量累计超1亿吨,油气资源勘探潜力巨大^[12-15]。恩平凹陷位于珠一坳陷西段(图1a),近年来在恩平凹陷的新近系又陆续发现了一些非常有前景的构造-岩性油气藏。

恩平凹陷在古近纪属于陆相裂谷盆地,文昌组是最主要的烃源岩层段;新近纪早期随珠江口盆地一起进入坳陷阶段,成为陆架盆地;新近纪后期盆地出现构造差异活化。新近系自下而上的地层依次为:下中新统珠江组,中中新统韩江组,上中新统粤海组,上统万山组(图1b)。其中在珠江组、韩

收稿日期:2023-07-16; 改回日期:2023-08-21; 网络出版日期:2023-12-12

本文受国家科技重大专项课题“近岸深水粗碎屑岩沉积构型与有利储层评价”(编号:2016ZX05009-002)资助

第一作者:戴建文,硕士,高级工程师,主要从事油气田开发地质研究。通信地址:518054 广东省深圳市南山区后海滨路3618号中海油大厦A座; E-mail:daijw2@cnoc.com.cn

通信作者:王冠民,博士,教授,主要从事沉积学和储层地质学的教学与研究。通信地址:266580 山东省青岛市长江西路66号 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院; E-mail:wangguanmin@upc.edu.cn

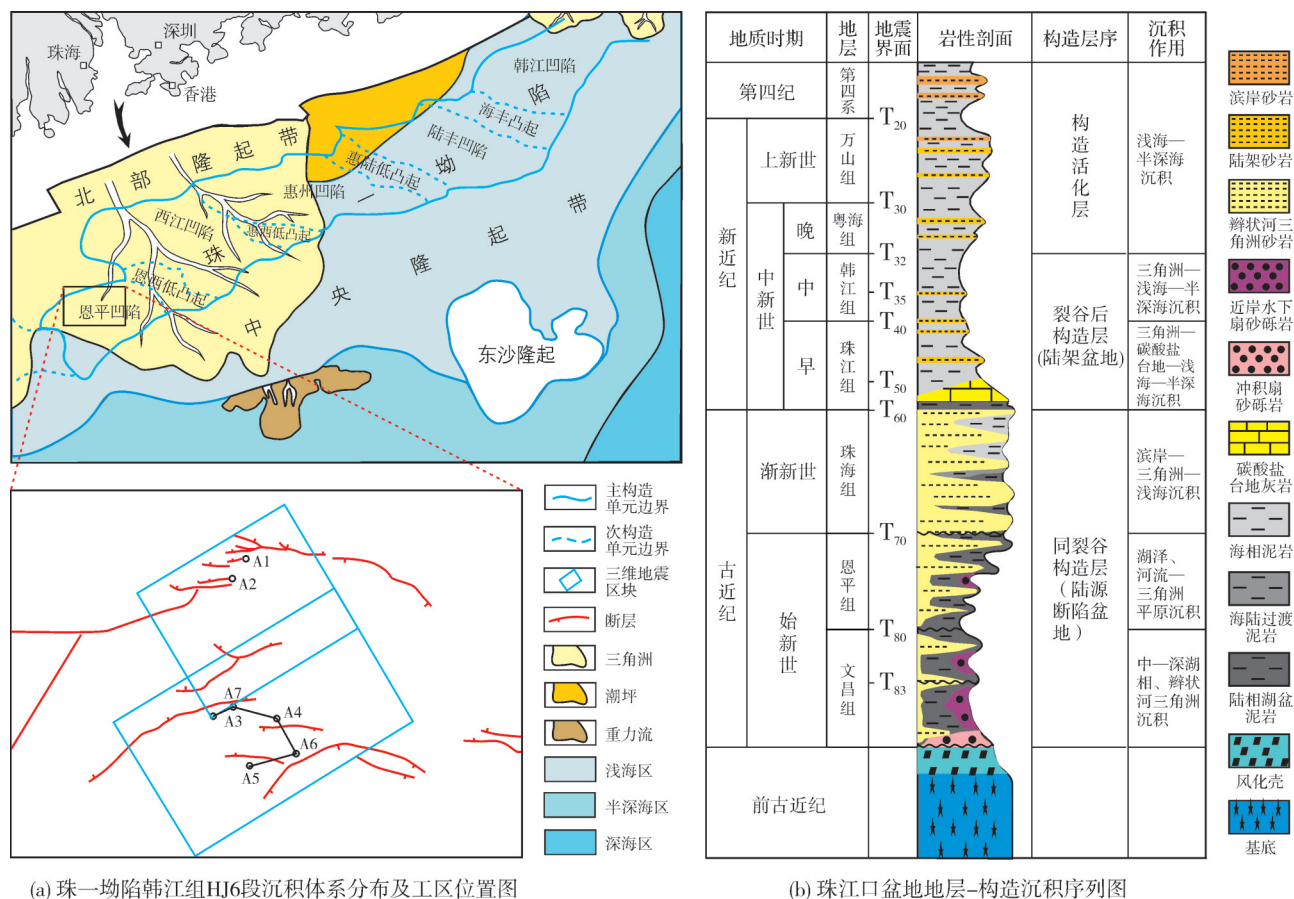


图1 珠江口盆地恩平凹陷构造-地层概况及研究区位置图(据文献[16],有修改)

Fig. 1 Structural-stratigraphic background and location map of the study area in Enping Sag, Pearl River Mouth Basin (cited from reference [16], modified)

江组沉积时期,恩平凹陷处于古珠江三角洲进积的前缘(图1a),同时受到河流与海洋作用的影响^[17-18],形成一些与波浪、潮汐作用有关的成因复杂的砂体。随着恩平A油田珠江组与韩江组构造-岩性油气藏的勘探开发,其地质研究难点也逐渐显现,难点之一是在主力储层中普遍发育钙质夹层,尤其是钙质砂岩夹层。这些钙质砂岩夹层在主力小层中垂向分布的位置比较复杂,既可以出现在小层的顶部(有研究者称之为“顶钙”^[19]),也可以分布在小层的中部(“中钙”)和底部(“底钙”)。有研究认为“顶钙”、“底钙”的岩性以生物碎屑灰岩为主,“中钙”以方解石胶结砂岩为主^[20]。由于钙质隔夹层严重影响油藏的开发部署,因此,对恩平A油田韩江组和珠江组主力小层的钙质夹层发育规律及其控制因素开展研究,有助于深化储层发育规律的认识,对刻画构造-岩性油藏边界,明确夹层对油田开发的影响有重要意义。

2 钙质砂岩夹层的岩性特征

研究区韩江组和珠江组的储层岩性主要为疏松的长石质石英砂岩,全岩X衍射分析结果显示:石英含量普遍在50%以上,一般在60%~70%之间;长石以钾长石为主,含量在10%~20%之间,斜长石的含量普遍低于10%。在偏光显微镜下观察,砂岩中的岩屑含量很低,最常见的岩屑是泥屑,其含量一般小于颗粒的5%;其次是燧石,含量一般小于颗粒的2%;此外在颗粒中常有不定量的双壳类、有孔虫等海相生物碎屑(图2a)。

储层间的钙质砂岩夹层不是较纯的碳酸盐岩,而是陆源的砂、粉砂与部分黏土矿物、钙质成分的混合。23块钙质砂岩夹层样品的全岩X衍射分析结果显示(表1):钙质含量最高可达52%,一般在20%~40%之间,平均值大约为35%;钙质成分主要是铁方解石,少量样品中含方解石或白云石。

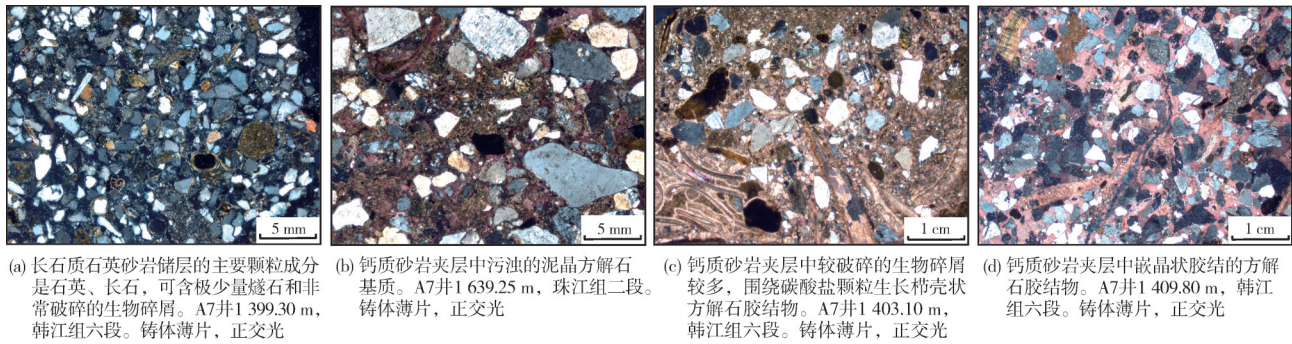


图2 珠江口盆地恩平凹陷A油田韩江组和珠江组砂岩储层与钙质砂岩夹层的镜下特征

Fig. 2 Microscopic characteristics of sandstone reservoir and calcareous sandstone interlayers of Hanjiang Formation and Zhujiang Formation of A Oilfield in Enping Sag, Pearl River Mouth Basin

表1 珠江口盆地恩平凹陷A油田韩江组和珠江组钙质砂岩夹层的全岩X衍射结果

Table 1 X-ray diffraction results of calcareous sandstone interlayers in Hanjiang Formation and Zhujiang Formation of A Oilfield in Enping Sag, Pearl River Mouth Basin

组分	最大含量/%	最小含量/%	平均含量/%
石英	64	29	49.50
钾长石	17	6	10.00
斜长石	5	0	3.20
方解石	1	0	0.05
白云石	10	0	0.58
铁方解石	52	13	34.00
黄铁矿	3	0	0.26
菱铁矿	3	0	0.32
黏土矿物	7	0	2.58

通过偏光显微镜观察,发现钙质砂岩夹层中的钙质成分呈“两类三形”的状态存在。第1类是生物碎屑(图2b,2c),以颗粒的形态呈现,含量一般不超过20%。最主要的生物碎屑是双壳类(图2b,2c),偶尔可见有孔虫。相比较而言,生物碎屑在砂岩储层中往往破碎程度非常高,但在钙质砂岩夹层中则相对比较完整,多呈破碎的长条形。第2类是填隙物,具体可表现为基质与胶结物2种

类型:基质是钙质夹层中最常见的填隙物类型,尤其是在分选较差的砂岩中,泥晶基质甚至表现出基质支撑的特征。基质在显微镜下呈较污浊的泥晶或粉晶形态,粉晶的分布常不规则,多呈斑块状出现,尤其是当生物碎屑较密集时,基质更多地表现为粉晶而不是泥晶(图2c)。其成因应该与早成岩期沉积物中发生的泥晶重结晶作用有关,生物碎屑密集的区域压实作用弱,局部富含孔隙水,更有利于重结晶作用的发生。胶结物则呈栉壳状或嵌晶状:栉壳状胶结物主要分布在生物碎屑或泥灰质岩屑等富碳酸盐颗粒的表面(图2c);嵌晶状方解石连片充填在颗粒支撑砂岩的颗粒之间,属于成岩阶段缓慢胶结的产物(图2d)。这种嵌晶状方解石胶结的砂岩较少见,一般仅出现在泥晶基质胶结的钙质砂岩与疏松的砂岩储层之间,厚度往往小于20 cm。

钙质砂岩夹层在结构上变化比较大(表2),平均粒径范围为0.11~0.42 mm,标准偏差普遍大于0.71,分选中等一差,只有个别小于0.71,分选比较好。分选较好的钙质砂岩一般粒度较大,可达中砂岩级别(如表2中1 409.80 m深度的样品),颗粒之

表2 珠江口盆地恩平凹陷A油田A7井典型钙质砂岩夹层的粒度特征

Table 2 Grain size characteristics of typical calcareous interbeds in Well A7 of A Oilfield in Enping Sag, Pearl River Mouth Basin

深度/m	粒级组成/%								平均值 Mz/mm	标准偏差σ
	砾	巨砂	粗砂	中砂	细砂	极细砂	粗粉砂	细粉砂和泥		
1 403.10	0.00	3.47	36.92	44.05	13.58	1.98	0.00	0.00	0.42	0.77
1 403.57	0.00	4.12	12.91	55.32	22.39	1.76	0.00	3.50	0.33	0.79
1 409.80	0.00	0.00	18.37	55.75	24.13	1.73	0.01	0.00	0.34	0.66
1 414.25	0.00	0.00	1.49	36.53	42.36	8.25	0.37	11.00	0.21	1.59
1 415.55	0.00	0.00	0.00	12.31	32.57	27.04	6.08	22.00	0.11	2.79

间的填隙物主要是嵌晶状的方解石(图2d),在粒度概率累积曲线上以跳跃式为主(图3a);分选差的钙质砂岩一般粒度相对较小,杂基含量高,主要粒级

范围较宽泛,有的频率曲线甚至出现双峰形态,颗粒之间的填隙物主要是泥晶或粉晶方解石,在粒度概率累积曲线上也是以跳跃式为主(图3b)。

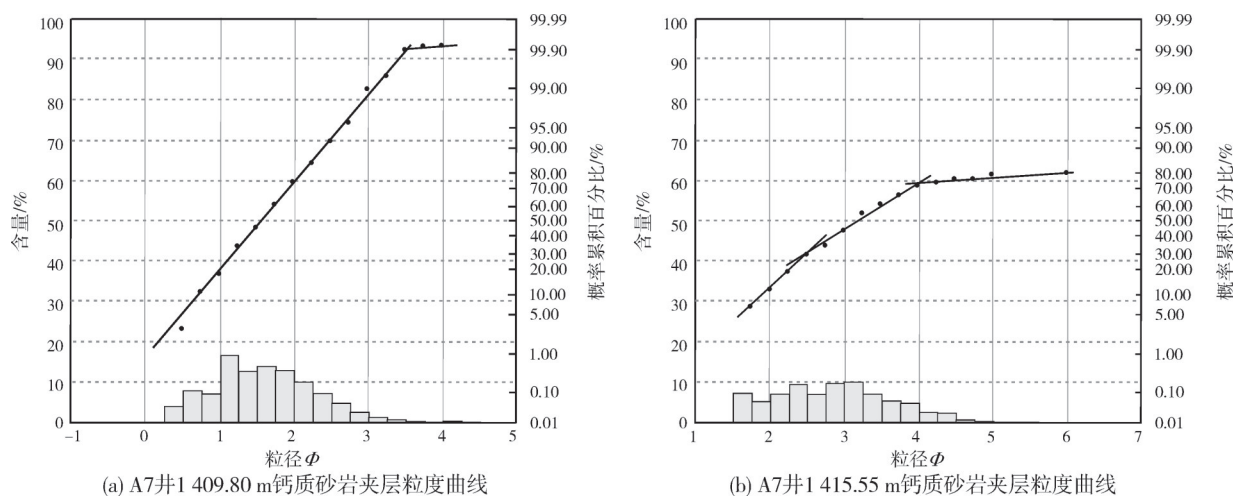


图3 珠江口盆地恩平凹陷A油田钙质砂岩夹层典型的粒度概率累积曲线

Fig. 3 Typical particle size probability accumulation curve of calcareous sandstone interlayers of A Oilfield in Enping Sag, Pearl River Mouth Basin

3 钙质砂岩夹层的沉积特征

珠一坳陷韩江组和珠江组的沉积相类型比较复杂。除了从北向南进积的三角洲以外,还常见潮汐砂脊、潮控砂席^[21-22]、浪控沿岸砂坝、席状砂等,甚至在东沙隆起还发育碳酸盐台地^[22]。不同构造区的沉积微相明显不同。研究区的韩江组和珠江

组砂体源于从北向南进积的古珠江三角洲(图1a),所以三角洲是恩平凹陷韩江组与珠江组的主要沉积相类型。

通过A油田韩江组HJ62层的地震均方根振幅属性(图4a)可以看出,该层在平面上发育近南北向和近北东向两种砂体。其中,近南北向砂体与区域上古珠江三角洲的进积方向一致,应该属于

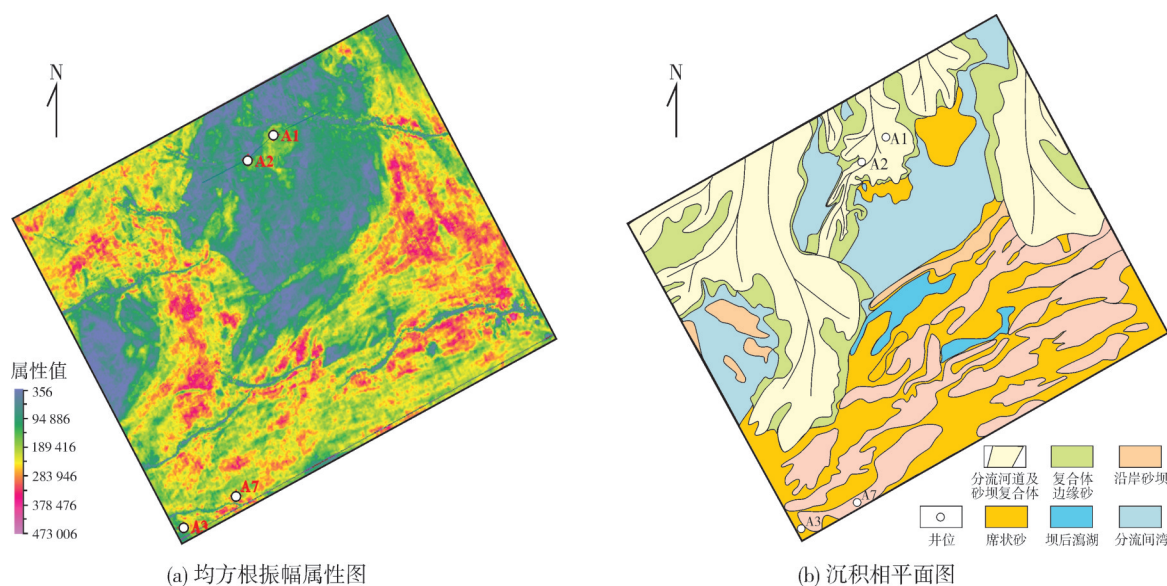


图4 珠江口盆地恩平凹陷A油田韩江组HJ62层的地震均方根振幅属性与沉积相平面图

Fig. 4 RMS amplitude and sedimentary facies plans of HJ62 layer of A Oilfield in Enping Sag, Pearl River Mouth Basin

三角洲分流河道及河口坝砂体;研究区东南部的近北东向砂体与三角洲分流河道砂体近于垂直(图4b),很可能属于波浪改造的砂坝与席状砂沉积。这类砂体在珠一坳陷的惠州凹陷珠江组中也有发育^[23]。

3.1 岩心相及钙质砂岩夹层特征

在恩平凹陷A7井韩江组的取心段中,可见的沉积相类型主要有沿岸砂坝、坝后潮坪(在图4b中归

属于席状砂)两种(图4,图5),相应的沉积亚相包括临滨、前滨、后滨和混合坪、泥坪,与钙质砂岩夹层有关的沉积亚相主要是后滨和混合坪。

(1) 沿岸砂坝

主要由波浪改造三角洲前缘砂体,然后沿古海岸线形成平行于海岸、垂直于分流河道的条带状砂体。这种砂体是研究区韩江组和珠江组的古珠江三角洲前缘末端的主要沉积类型,在沿层地震均方根振幅属性上非常明显(图4a)。

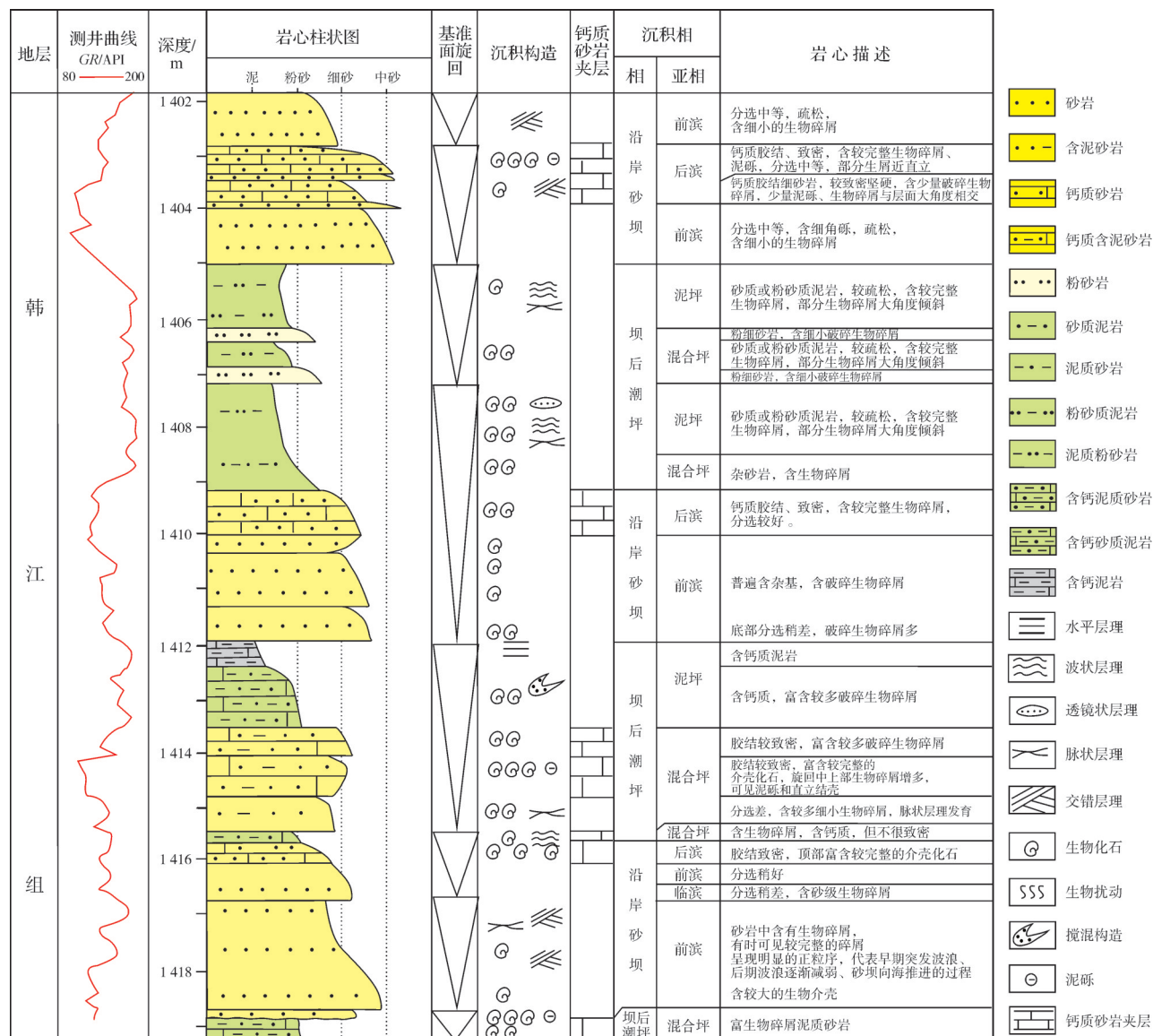


图5 珠江口盆地恩平凹陷A油田A7井韩江组取心段沉积相综合柱状图

Fig. 5 Sedimentary facies column of the core section of Hanjiang Formation of Well A7 in A Oilfield of Enping Sag, Pearl River Mouth Basin

这些沿岸砂坝在岩心中最典型的特征是砂岩厚度较大,分选中等或较差,常见交错层理,多含有一定

量的生物碎屑,生物碎屑磨圆程度偏低,粒度概率累积曲线多呈两段式或多段式(图3),可见浪成沙纹层

理,测井伽马曲线多呈幅度较低的齿化漏斗形(图5)。

参考障壁砂坝的亚相划分,沿岸砂坝可以进一步分为临滨、前滨、后滨(图5)。其中临滨的砂岩分选较前滨的略差;前滨的砂岩分选最好,生物碎屑含量低且破碎极其严重,一般因胶结程度差而相对疏松(图6a);后滨的砂岩分选最差,多含泥质,含较多生物碎屑,常见较大的生物介壳。后滨亚相的钙质含量往往是各亚相中最高的,砂岩因强烈的钙质胶结显得致密坚硬(图6b)。

(2) 坝后潮坪

以浅灰色砂质泥岩、粉砂质泥岩、泥质砂岩为

主,分选很差,可见脉状层理、透镜状层理、波状层理等沉积构造,常含一定量的生物碎屑,但含量低于沿岸砂坝的后滨,生物碎屑的破碎程度低。按照沉积物特征,坝后潮坪可以进一步划分出混合坪、泥坪等亚相(图5)。岩心中所见坝后潮坪的主体是混合坪,砂岩中有部分较完整的生物碎屑呈直立状态,或者与层面大角度相交,应该属于风暴浪成因的坝后堆积。混合坪砂岩中普遍含一定量的钙质,与后滨亚相的钙质砂岩一起构成钙质砂岩夹层(图6c)。泥坪以泥岩为主,可见水平层理和红褐色钙质结核(图6d)。



(a) 在分选较好的中粗砂岩(疏松)之上的细砂岩中,形成钙质砂岩夹层。A7井1 403.80~1 404.0 m, 韩江组



(b) 胶结致密的钙质砂岩,生物碎屑丰富,分选差。A7井1 414.35~1 414.55 m, 韩江组



(c) 在分选中等的细砂岩(疏松)之上的差分选细砂岩中,形成钙质砂岩夹层。A7井1 394.4~1 394.6 m, 韩江组



(d) 在浅灰色钙质泥岩中,常夹褐色泥岩条带,具潮汐层理。A7井1 633.55~1 633.75 m, 珠江组

图6 珠江口盆地恩平凹陷A油田A7井典型岩心沉积特征

Fig. 6 Typical core sedimentary characteristics of Well A7 of A Oilfield in Enping Sag, Pearl River Mouth Basin

3.2 钙质砂岩夹层的纵向发育特征

钙质砂岩夹层在测井解释上以高钙质含量、低孔隙度为特征,与泥质含量无直接关系(图7)。在纵向上可以出现在砂岩层的顶部,也可以出现在砂岩层的中部或底部。体现在粒度旋回中,可能出现在正旋回的底部(图7a),也可能出现在正旋回的中上部;可以出现在反旋回的顶部(图7b);或者出现在复杂旋回的中部。尽管整体看起来似乎钙质砂岩夹层与粒度旋回的关系不大,也与沉积基准面旋回关系不大(图5),但钙质砂岩夹层往往处于粒度偏粗的富砂层段或者与其相邻,在沉积亚相上对应

着后滨或者坝后混合坪(图5)。当沉积序列完整时分别与相对细粒的坝后混合坪、泥坪相邻;当沉积序列不完整时,可处于砂岩层中部(图5,图7)。

3.3 钙质砂岩夹层的平面展布

为了进一步揭示钙质砂岩的平面展布规律,本文在砂岩、钙质砂岩、泥岩岩石物理参数分析的基础上,利用SMI波形反演方法,明确了钙质砂岩的平面展布特征。

韩江组钙质砂岩表现出高密度低自然伽马特征,利用密度与伽马交会图,可以区分钙质砂岩、普通砂岩和泥岩(图8)。SMI波形差异模拟反演选取

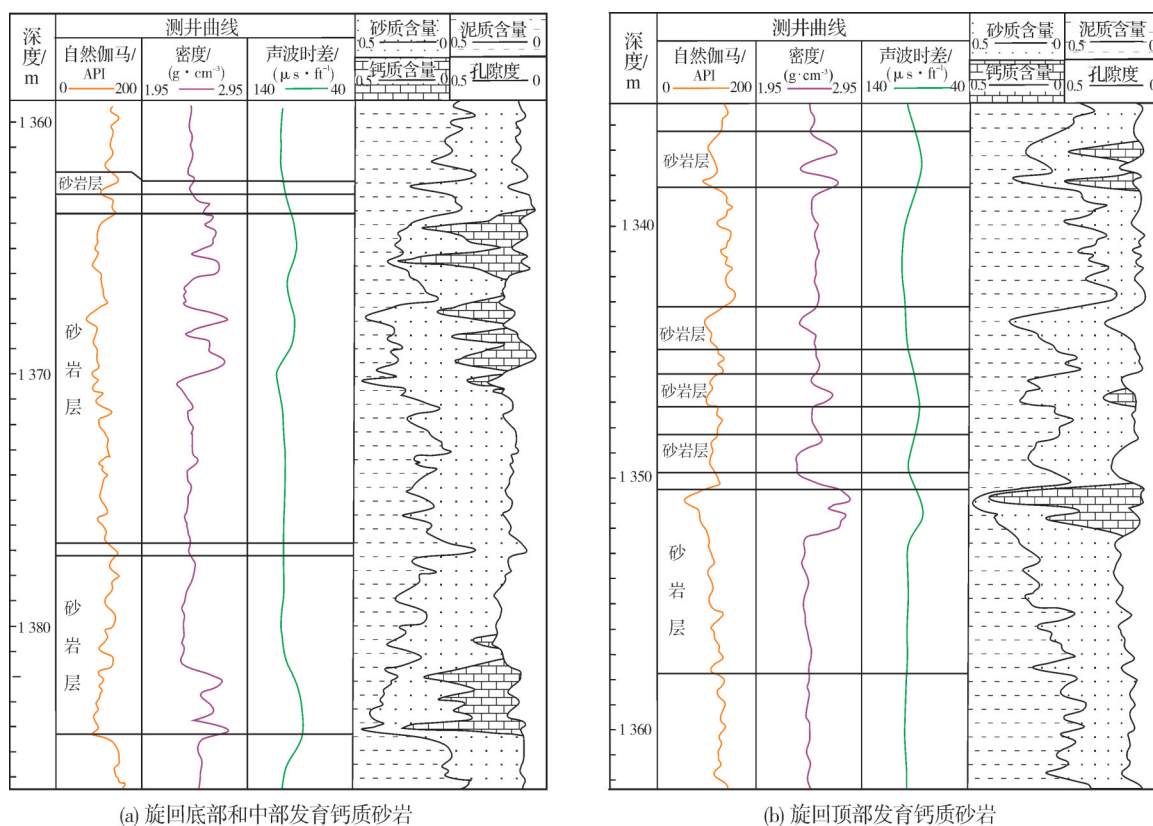


图7 珠江口盆地恩平凹陷A油田A7井韩江组中的钙质砂岩夹层测井解释

Fig. 7 Logging interpretation of calcareous sandstone interlayers of Hanjiang Formation of Well A7 in A Oilfield of Enping Sag, Pearl River Mouth Basin

密度与自然伽马做为储层敏感参数,分别利用密度与自然伽马曲线做为特征曲线反演出密度反演体与自然伽马反演体,然后通过体计算得到密度-自然伽马反演体,并利用坐标旋转确定出钙质砂岩门槛值来刻画钙质砂岩的展布。

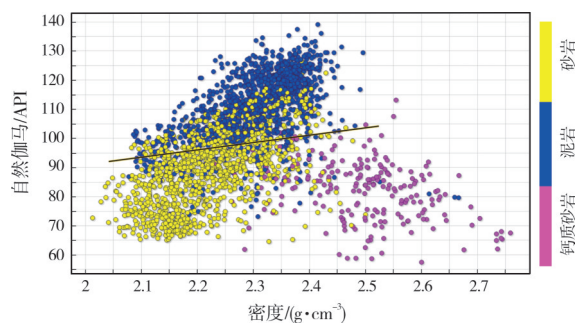


图8 珠江口盆地恩平凹陷A油田韩江组密度(DEN)与自然伽马(GR)值交会图

Fig. 8 The DEN-GR crossplot of Hanjiang Formation of A Oilfield in Enping Sag, Pearl River Mouth Basin

在A3—A7井区HJ62层的沿层均方根振幅平面图中,钙质砂岩大致呈现近NEE向的条带状(图9)。在反演结果的剖面图中,钙质砂岩多呈条带状或透

镜状展布(图10)。综合平面和剖面特征,预测钙质砂岩的空间分布应该呈中间厚边缘薄的带状透镜体,平面延伸方向与沉积相图中的沿岸砂坝方向一致(图4b),且处于沿岸砂坝、席状砂的沉积相范围内,故推断其成因应该与沿岸砂坝有关。

由于研究区的钙质砂岩普遍比较薄,最大厚度仅为2 m左右,所以在剖面中显示出来的钙质砂岩实际上包含了部分毗邻的普通砂岩在内,钙质砂岩的实际厚度要比剖面中显示的还要薄一些。

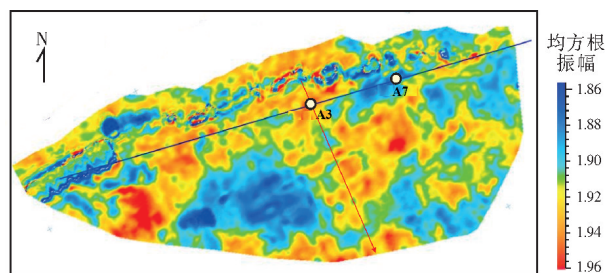


图9 珠江口盆地恩平凹陷A3井区HJ62层钙质砂岩夹层均方根振幅平面图

Fig. 9 RMS amplitude plan of calcareous sandstone interlayer of HJ62 layer in Well A3 block of Enping Sag, Pearl River Mouth Basin

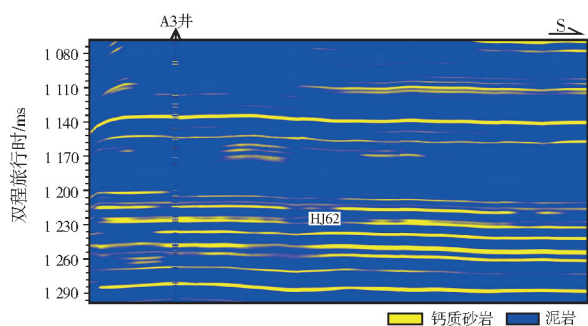


图10 珠江口盆地恩平凹陷A3井区钙质砂岩夹层反演剖面(剖面位置见图9)

Fig. 10 Inversion profile of calcareous sandstone interlayer in Well A3 block of Enping Sag, Pearl River Mouth Basin (section location is shown in Fig. 9)

4 钙质砂岩夹层成因讨论

张青青等^[19]对番禺A油田珠江组“顶钙”的发育特征、成因与分布模式进行了研究,认为珠江组储层顶部的钙质砂岩夹层形成于早成岩阶段,主要受高能粗粒生物碎屑富集程度和分布的控制,受沉积微相和高分层序界面的影响明显,是生物碎屑溶解再结晶的结果,河口坝为其提供了重要物质来源;并通过钙质的碳氧同位素测试,认为其结晶温度为55.9~72℃^[19]。

但是,恩平凹陷A油田韩江组和珠江组储层中的钙质砂岩夹层具有明显的不同成因。其中,只有少量砂岩中的钙质属于溶解再沉淀成因,多数夹层中的钙质属于同生期的沉积成因。主要理由如下:

(1)钙质砂岩夹层中的钙质成分主要与少量泥质一起充填在颗粒之间,甚至形成具有基质支撑结构的泥晶或粉晶方解石(图2b),部分钙质胶结物呈现栉壳状胶结(图2c),这都不应该是早成岩过程中形成的。

(2)从每个单砂层来看,钙质砂岩夹层不仅仅分布在砂岩层的顶部,也常见于砂岩层的中部和底部(图7),这很难用已有的富钙流体进入砂岩再胶结来解释。从图5的岩心柱状图可以发现,钙质砂岩明显受控于沉积亚相,与沉积环境有关。

(3)从样品分析和岩心观察来看,在钙质砂岩夹层中,除少数由嵌晶胶结的砂岩分选较好、粒度稍粗外,大多数钙质砂岩分选比较差、粒度偏小(表2,图3,图6),这用富钙成岩流体注入再胶结的成因同样难以解释,因为流体进入砂体会优先沿分选好、物性好的砂层运移。

故而推断,除了有少量钙质夹层属于早成岩期

的碳酸盐胶结物溶解再结晶以外,更多的钙质砂岩夹层是潮上带蒸发沉积成因,主要证据如下:

(1)钙质砂岩夹层空间上呈平行于沿岸砂坝的条带状(图9,图10),这种分布特征表明钙质的发育应该主要受沉积作用的影响。

(2)钙质胶结物主要发育在沿岸砂坝的后滨和混合坪亚相(图5,图6a—6c)。这两种环境远离滨线,生物碎屑沉积较多,处于平均高潮面之上或向陆地的坝后潮间带,蒸发作用较强,尤其是后滨亚相,非常有利于碳酸盐矿物的沉淀。

(3)在分选差甚至呈基底式胶结、富生物碎屑的砂岩中发育的大量泥晶或粉晶方解石基质以及栉壳状胶结物(图2b—2c),属于海水达到碳酸盐过饱和状态的沉积,在古珠江三角洲的偏淡水环境下,该条件只能在沿岸砂坝的后滨和坝后潮间或潮上带才能形成。

(4)与沿岸砂坝互层的泥岩、粉砂质泥岩的钙质含量往往比较高,其密度甚至大于砂岩(图8),表明其沉积于远离分流河道的半咸水—咸水环境。泥岩或粉砂质泥岩中常发育比较典型的各种潮汐层理,氧化成因的褐色泥岩条带也比较常见(图6d),这都证明泥岩属于坝后潮间或潮上带泥坪的蒸发氧化沉积。

综上所述,恩平凹陷的韩江组—珠江组钙质砂岩夹层大多属于沉积成因,形成于沿岸砂坝的后滨或坝后混合坪地带,是蒸发作用导致泥晶碳酸盐矿物在碎屑颗粒间沉淀胶结形成的。

5 结论

(1)珠江口盆地恩平凹陷A油田韩江组和珠江组储层中的钙质砂岩夹层的钙质填隙物产状呈现“两类三形”,除少部分为早成岩期的嵌晶式胶结物外,大多数是同生期在潮间带或潮上带由于强烈蒸发作用形成的泥晶或经后期重结晶的粉晶方解石。

(2)钙质砂岩夹层在空间上呈现平行于海岸和沿岸砂坝的条带状或透镜状,泥晶或粉晶胶结的钙质砂岩夹层一般出现在粒度偏小、分选偏差、生物碎屑含量较高的沿岸砂坝的后滨或坝后混合坪亚相中。

(3)鉴于钙质砂岩夹层多属于沉积成因,垂向上与沿岸砂坝的坝后潟湖、泥坪相泥岩相邻,故在开发过程中可以将钙质砂岩夹层与潟湖或潮坪相泥岩一并考虑,减少干扰因素。

参考文献

- [1] 孙海涛, 钟大康, 刘洛夫, 等. 沾化凹陷沙河街组砂岩透镜体表面与内部碳酸盐胶结作用的差异及其成因[J]. 石油学报, 2010, 31(2): 246-252.
SUN Haitao, ZHONG Dakang, LIU Luofu, et al. Carbonate cementation difference and its origin between exterior and interior surfaces of lenticular sandbody in Shahejie Formation of Zhanhua Depression [J]. Acta petrolei sinica, 2010, 31(2): 246-252.
- [2] LI Qing, JIANG Zaixing, LIU Keyu, et al. Factors controlling reservoir properties and hydrocarbon accumulation of lacustrine deep-water turbidites in the Huimin Depression, Bohai Bay Basin, East China [J]. Marine and petroleum geology, 2014, 57: 327-344.
- [3] MA Benben, CAO Yingchang, WANG Yanzhong, et al. Origin of carbonate cements with implications for petroleum reservoir in Eocene sandstones, northern Dongying Depression, Bohai Bay Basin, China [J]. Energy exploration & exploitation, 2016, 34(2): 199-216.
- [4] WANG Jian, CAO Yingchang, LIU Keyu, et al. Pore fluid evolution, distribution and water-rock interactions of carbonate cements in red-bed sandstone reservoirs in the Dongying Depression, China [J]. Marine and petroleum geology, 2016, 72: 279-294.
- [5] YANG Tian, CAO Yingchang, FRIIS H, et al. Genesis and distribution pattern of carbonate cements in lacustrine deep-water gravity-flow sandstone reservoirs in the third member of the Shahejie Formation in the Dongying Sag, Jiyang Depression, Eastern China [J]. Marine and petroleum geology, 2018, 92: 547-564.
- [6] 张青青, 刘可禹, 刘太勋, 等. 碎屑岩储层碳酸盐胶结物成因研究进展[J]. 海相油气地质, 2021, 26(3): 231-244.
ZHANG Qingqing, LIU Keyu, LIU Taixun, et al. Research status of the genesis of carbonate cementation in clastic reservoirs [J]. Marine origin petroleum geology, 2021, 26(3): 231-244.
- [7] CARVALHO M V F, DE ROS L F, GOMES N S. Carbonate cementation patterns and diagenetic reservoir facies in the Campos Basin Cretaceous turbidites, offshore eastern Brazil [J]. Marine and petroleum geology, 1995, 12(7): 741-758.
- [8] EL-GHALI M A K, MORAD S, MANSURBEG H, et al. Diagenetic alterations related to marine transgression and regression in fluvial and shallow marine sandstones of the Triassic Buntsandstein and Keuper sequence, the Paris Basin, France [J]. Marine and petroleum geology, 2009, 26(3): 289-309.
- [9] MARCELO KETZER J, MORAD S, EVANS R, et al. Distribution of diagenetic alterations in fluvial, deltaic, and shallow marine sandstones within a sequence stratigraphic framework: evidence from the Mullaghmore Formation (Carboniferous), NW Ireland [J]. Journal of sedimentary research, 2002, 72(6): 760-774.
- [10] DUTTON S P. Calcite cement in Permian deep-water sandstones, Delaware Basin, west Texas: origin, distribution, and effect on reservoir properties [J]. AAPG bulletin, 2008, 92(6): 765-787.
- [11] 吴静. 珠江口盆地恩平凹陷北部隆起区油气远源富集与主控因素[J]. 地质科技通报, 2022, 41(4): 117-124.
WU Jing. Key factors of far-source hydrocarbon enrichment in the northern uplift area of Enping Sag in Pearl River Mouth Basin [J]. Bulletin of geological science and technology, 2022, 41(4): 117-124.
- [12] 刘丽华, 陈胜红, 于水明, 等. 恩平凹陷成藏条件分析及商业性突破[J]. 中国海上油气, 2011, 23(2): 76-80.
LIU Lihua, CHEN Shenghong, YU Shuiming, et al. Analyzing conditions of hydrocarbon accumulation and a commercial breakthrough in Enping Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. China offshore oil and gas, 2011, 23(2): 76-80.
- [13] 刘再生, 施和生, 杨少坤, 等. 南海东部海域自营勘探实践与成效[J]. 中国海上油气, 2014, 26(3): 1-10.
LIU Zaisheng, SHI Hesheng, YANG Shaokun, et al. The practice of self-operated exploration and its achievements in the eastern South China Sea [J]. China offshore oil and gas, 2014, 26(3): 1-10.
- [14] 朱定伟, 彭光荣, 张忠涛, 等. 珠江口盆地恩平凹陷北部披覆带油气成藏条件[J]. 中国海上油气, 2022, 34(1): 36-44.
ZHU Dingwei, PENG Guangrong, ZHANG Zhongtao, et al. Hydrocarbon accumulation conditions in drape structure zone north of Enping Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. China offshore oil and gas, 2022, 34(1): 36-44.
- [15] 向巧维. 恩平凹陷新近系韩江组沉积微相及岩性圈闭类型[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(5): 60-66.
XIANG Qiaowei. Sedimentary microfacies and lithologic trap types of Neogene Hanjiang Formation in Enping Sag [J]. Marine geology frontiers, 2022, 38(5): 60-66.
- [16] 柴愈坤. 恩平A油田岩性-构造油藏储层精细表征研究[R]. 深圳: 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 2021.
CHAI Yukun. Study on fine characterization of lithological structural oil reservoirs of Enping A Oilfield [R]. Shenzhen: Shenzhen Branch of China National Offshore Oil Corporation Limited, 2021.
- [17] 李智高, 丁琳, 李小平, 等. 珠江口盆地珠一坳陷西部中新世早-中期沉积特征及控制因素[J]. 古地理论, 2022, 24(1): 99-111.
LI Zhigao, DING Lin, LI Xiaoping, et al. Sedimentary characteristics and controlling factors of the western Zhu I Depression during the early-middle Miocene, Pearl River Mouth Basin [J]. Journal of palaeogeography, 2022, 24(1): 99-111.
- [18] 吴静, 张晓钊, 白海军, 等. 珠江口盆地阳江凹陷中新统潮控体系及其岩性圈闭勘探意义[J]. 地球科学, 2021, 46(10): 3673-3689.
WU Jing, ZHANG Xiaozhao, BAI Haijun, et al. Miocene tidal control system and its exploration significance of lithologic trap in Yangjiang Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Earth science, 2021, 46(10): 3673-3689.
- [19] 张青青, 刘可禹, 衡立群, 等. 珠江口盆地番禺A油田珠江组“顶钙”发育特征、成因与分布模式[J]. 地球科学, 2021, 46(5): 1783-1796.
ZHANG Qingqing, LIU Keyu, HENG Liqun, et al. Character-

- istics and genetic distribution model of top calcareous cementation layers within Zhujiang Formation in Panyu A Oilfield, Pearl River Mouth Basin [J]. *Earth science*, 2021, 46(5): 1783–1796.
- [20] 甘永年, 晁彩霞, 曹阳, 等. 珠江口盆地西部文昌A油田钙质隔夹层研究[J]. *海相油气地质*, 2021, 26(2): 185–192.
- GAN Yongnian, CHAO Caixia, CAO Yang, et al. Study on calcareous interlayer of Wenchang A Oilfield in western Pearl River Mouth Basin [J]. *Marine origin petroleum geology*, 2021, 26(2): 185–192.
- [21] 石国平. 珠江口盆地下中新早期的水下潮汐三角洲[J]. *沉积学报*, 1989, 7(1): 135–142.
- SHI Guoping. Subaqueous tidal delta of Zhujiang Basin in the early lower Miocene [J]. *Acta sedimentologica sinica*, 1989, 7(1): 135–142.
- [22] 张向涛, 杜家元, 丁琳, 等. 不同水动力机制下砂体沉积响应及岩性圈闭形成模式[J]. *石油学报*, 2019, 40(增刊1): 105–114.
- ZHANG Xiangtao, DU Jiayuan, DING Lin, et al. Sedimentary response of sand body and formation models of lithologic traps under different hydrodynamic conditions [J]. *Acta petrolei sinica*, 2019, 40(S1): 105–114.
- [23] 昌建波. 珠江口盆地珠江组强制海退砂体与岩性油气藏: 以惠州凹陷南部为例[J]. *海相油气地质*, 2020, 25(2): 121–131.
- CHANG Jianbo. Forced-regressive sand bodies and the related lithologic reservoirs of Zhujiang Formation in Huizhou Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. *Marine origin petroleum geology*, 2020, 25(2): 121–131.

编辑: 黄革萍

Genesis of calcareous sandstone interlayer in Neogene reservoir of A Oilfield in Enping Sag, Pearl River Mouth Basin

DAI Jianwen, CHAI Yukun, WANG Guanmin, SUN Shuang, GUO Fei, XUE Ya

Abstract: The main reservoir of A Oilfield in Enping Sag is developed in the front of ancient Pearl River delta of the Neogene Hanjiang Formation and Zhujiang Formation. The fact that main reservoirs of the Neogene system generally contain calcareous sandstone interlayers has a significant impact to refined development of A Oilfield, and it is urgent to accurately understand the origin and distribution patterns of these calcareous sandstone interlayers. Based on detailed observation and analysis of rock cores, this paper uses cast thin sections of sandstone to analyze the origin of calcium interstitial materials. Furthermore, by combining analysis of sedimentary facies, particle size, logging curves, rock density, and seismic inversion methods, it is determined that the calcium sandstone interlayer in the main reservoir of Neogene in the study area is mainly sedimentary origin, with a small amount belonging to the cementation origin during diagenesis. The front of the ancient Pearl River delta is often transformed by waves to form coastal sand bars. The calcareous sandstone interlayer is mainly formed in the onshore backshore or mixed flat subfacies behind the dam of the coastal sand bar. It is formed through carbonate mineral deposition caused by strong evaporation of seawater in the shallow water or exposed environment of intertidal supratidal zone cementing sandy debris particles. The distribution patterns of calcareous sandstone interlayers adjacent to the mudflats or lagoons behind the dam in a vertical direction are similar.

Key words: calcareous sandstone interlayer; coastal sand bars; Neogene; Enping Sag; Pearl River Mouth Basin

DAI Jianwen, First author: MSc, Senior Engineer, mainly engaged in fine reservoir description and geological research of oil and gas development in Pearl River Mouth Basin. Add: CNOOC Building, No. 3168 Houhaibin Rd. (Shenzhen Bay section), Nanshan District, Shenzhen, Guangdong 518054, China

WANG Guanmin, Corresponding author: PhD, Professor, mainly engaged in teaching and research in sedimentology and reservoir geology. Add: School of Geoscience, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China