

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.244>



白云凹陷中深层有利储层特征及其分布预测

谢晓军,熊连桥*,白海强,黄 饶,李飞跃,唐 武,陈 莹

中海油研究总院有限责任公司,北京 100028

摘 要: 白云凹陷中深层未探明油气资源潜力巨大,储层总体为低孔低渗储层,为了识别海域中深层有利储层的特征,寻找能用于指导有利储层宏观分布预测的主控因素,并对有利储层空间分布进行预测,对白云凹陷 5A 构造开展了研究.通过储层岩石学、储层物性特征及建设性成岩作用分析等微观方面与储层相带识别、厚层砂体发育的前积复合体预测、砂体与孔隙度地震反演及裂缝分布识别等宏观方面研究,对中深层有利储层“甜点”特征、宏观可识别的主控因素及空间分布规律开展分析.认为,白云 5A 构造辫状河三角洲平原与前缘中的分流河道和下水分流河道厚层中-粗砂岩发育次生溶孔和微裂缝,可作为储层“甜点”;反映沉积微相的砂体厚度及反映建设性成岩作用的裂缝是宏观可以识别的储层“甜点”主控因素,可通过地震外部形态的“上拱”、内幕结构的叠置及微地貌的低洼 3 个特征在地震上识别厚层砂体发育的前积复合体;综合厚层砂体识别、砂体及孔隙度预测、裂缝分布识别三方面成果,认为白云 5A 构造中深层 C 块东部为储层“甜点”发育区.

关键词: “甜点”;成岩作用;主控因素;分布预测;中深层;白云凹陷;油气地质.

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2022)05-1635-17

收稿日期: 2021-10-24

Characteristics of Favorable Reservoir and Its Distribution Prediction in Middle-Deep Layers in Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin

Xie Xiaojun, Xiong Lianqiao*, Bai Haiqiang, Huang Rao, Li Feiyue, Tang Wu, Chen Ying

CNOOC Research Institute Ltd., Beijing 100028, China

Abstract: Middle-deep layers in Baiyun sag have great potential for unexplored hydrocarbon resources. Reservoirs in the middle-deep layers are generally of low porosity and permeability. In order to describe the favorable reservoir characteristics, to find the reservoir macro-controlling factors, and to predict the special distribution of the favorable reservoirs, Baiyun 5A structure in Baiyun sag was studied. Taking middle-deep layers of Baiyun 5A structures for example, the microcosmic aspects such as reservoir lithology, reservoir properties, and constructive diagenesis and the macro aspects such as facies identification, prediction of progradation complex with thick sand, seismic inversion for sand and porosity, and fracture distribution recognition of reservoir are studied. Reservoir “sweet points” characteristics in the middle-deep layers, controlling factors that can be identified macroscopically, and special distribution of the “sweet points” are studied. It suggests that middle-coarse sandstones with big thickness in the distributary channels and underwater distributary channels in the Baiyun 5A structure developed secondary solution caves and microfractures, and these sandstones can be used as reservoir “sweet points”. Sand body thickness that represents its

基金项目:“十三五”国家科技重大专项“中国近海富烃凹陷优选与有利勘探方向预测(No. 2016ZX05024002).

作者简介:谢晓军(1978—),男,高级工程师,博士,主要从事沉积与储层地质研究工作. ORCID: 0000-0002-6331-0626. E-mail: xiexj@cnooc.com.cn

* **通讯作者:**熊连桥, ORCID: 0000-0003-4053-1087. E-mail: xionglq2@cnooc.com.cn

引用格式:谢晓军,熊连桥,白海强,黄饶,李飞跃,唐武,陈莹,2022.白云凹陷中深层有利储层特征及其分布预测.地球科学,47(5):1635-1651.

Citation: Xie Xiaojun, Xiong Lianqiao, Bai Haiqiang, Huang Rao, Li Feiyue, Tang Wu, Chen Ying, 2022. Characteristics of Favorable Reservoir and Its Distribution Prediction in Middle-Deep Layers in Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin. *Earth Science*, 47(5): 1635-1651.

microfacies and fractures that represent the constructive diagenesis are controlling factors that can be identified macroscopically for reservoir “sweet points” prediction. Progradation complex with thick sand can be identified through the shape of “bump”, the superposed inside structure, and the low part of the microrelief in the seismic data. Combining the results of thick sand body identification, sand and porosity prediction, and fracture distribution recognition, the eastern part of the C block in the Baiyun 5A structure is recognized as the reservoir “sweet points”.

Key words: sweet point; diagenesis; controlling factors; distribution prediction; middle-deep strata; Baiyun sag; petroleum geology.

白云凹陷深水区勘探面积接近 3 万 km²(田立新等, 2020), 该凹陷未探明资源潜力巨大, 中深层恩平组岩性地层圈闭将是重要的勘探领域(张功成等, 2015); 珠海组及以下中深层(埋深大于 3 500 m) 地层存在超压, 这些地层中的高温超压“甜点”储层区是规模油气勘探的有利方向(田立新等, 2020). 近年来, 白云凹陷流花 34f 井恩平组和白云 5b 井中深层的规模油气藏发现, 逐渐揭示了白云凹陷中深层的油气勘探潜力(田立新等, 2020).

白云凹陷中深层储层整体物性较差, 恩平组-珠海组储层主体孔隙度为 7.1%, 渗透率为 0.15 mD, 达到了目前公认的致密储层级别(Holditch, 2006; 姜振学等, 2006), 但是钻井揭示局部发育孔隙度为 13.4%~14.4%, 渗透率为 10.8~44.7 mD 的优质储层. 随着油气勘探难度的增加, 白云凹陷油气勘探需要在储层整体物性较差的背景中寻找储层“甜点”. 储层“甜点”主要分为 2 类: 一类是称为“异常高孔带”(远光辉等, 2015)的“甜点”, 主要是由于特殊地质作用在致密储层背景中形成的异常高孔隙度储层集中区; 另一类是特殊地质作用形成的具备储集和渗流能力的裂缝集中区(朱筱敏等, 2018). 近年来, 对储层“甜点”的研究大多以岩石薄片或岩心微观特征(朱如凯等, 2009, 2013; 于兴河等, 2015; 马明等, 2017; Xiao *et al.*, 2021)、测井响应宏观特征研究为主(赖锦等, 2015; 牟炜卫等, 2017), 并且微观研究方面对有利储层形成的主控因素的研究已比较系统、全面; 有利储层分布预测要落实到宏观钻井、地震上, 在储层“甜点”预测方面, 则以地震属性分析(杜文波等, 2015)、储层反演(许多年等, 2015)、地震波形特征识别(骆帅兵等, 2017)等方面研究为主, 但是如何将储层主控因素的微观分析与储层预测的宏观预测结合起来, 就是储层“甜点”能否成功预测的关键. 储层“甜点”预测需要兼顾地质理论上的合理性和勘探实践中的可操作性, 但是, 近年来储层微观机理研究与储层宏观分布预测仍存在脱节的现象.

本文将白云 5A 构造中深层(恩平组上部-珠

海组下部)储层的微观岩石学特征、储集空间特征、成岩作用特征与宏观沉积相结合, 将储层“甜点”落实到沉积相带, 并在地震中对这类有利储集相带开展识别, 进而综合地震对砂体、孔隙度和裂缝的预测指出储层“甜点”的分布区. 试图将储层“甜点”微观与宏观特征的结合, 扩展到地震预测中去, 从而为勘探实践提供一定的指导.

1 地质背景

白云凹陷位于珠江口盆地珠二坳陷, 西南部与开平凹陷以云开低凸起相隔, 北部以番禺低隆起与恩平凹陷相隔(图 1a), 凹陷内部可分为东洼、主洼、西洼、南洼 4 个洼陷(图 1b), 凹陷水深为 300~2 000 m, 最大地层厚度可达 10 000 m 以上(张功成等, 2014; 田立新等, 2020). 白云 5A 构造位于凹陷北坡向主洼延伸的构造脊倾没端(图 1b), 靠近主洼, 处于油气运移的优势路径上, 成藏条件优越. 新生代以来, 白云凹陷主要经历了裂谷期、裂后拗陷期和新构造期 3 期演化阶段(张功成等, 2014), 自下而上发育文昌组、恩平组、珠海组、珠江组、韩江组、粤海组、万山组和第四系(图 1c), 白云 5A 构造有两口钻井(BY5A 和 BY5B), BY5A 井钻遇了恩平组上部.

文昌组沉积时期, 白云凹陷以湖泊沉积为主, 湖泊周边呈环剥蚀特征(方竞男, 2013), 周缘隆起为主要物源区. 恩平组沉积早-中期, 凹陷以海陆过渡相沉积为主(张功成等, 2014), 海水仅通过荔湾凹陷、白云南洼进入白云凹陷(韩银学等, 2016), 番禺低隆起、东沙隆起等周缘隆起区成为凹陷的主要物源区, 发育扇三角洲、辫状河三角洲及滩坝沉积(韩银学等, 2017). 恩平组沉积晚期, 华南古陆成为凹陷的物源区, 古珠江携带碎屑物质进入凹陷, 发育大型持续进积型三角洲(韩银学等, 2017), 恩平组上段的岩性组合具有典型的辫状河河道沉积特征(赵玉娟等, 2017). 珠海组沉积时期, 昆莺琼古河流发育昌盛, 虽然有海侵作用, 但是古河流携带南海西侧陆源物质向凹陷进积(邵磊等, 2019), 白云



图1 白云凹陷地理位置及地质分层

Fig. 1 Location of Baiyun sag and its strata

凹陷在珠海组整体上发育多期大型陆架边缘三角洲(陈莹等,2020).珠江组沉积时期,白云凹陷基底发生快速沉降,珠海组以上以半深海-深海沉积为主(张功成等,2014).

整体上看,白云凹陷地温梯度高,热流值也高,为热凹(张功成等,2014),其中在白云凹陷北部地温梯度相比南部低(李弛等,2019),凹陷平均地温梯度为 $4.5\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 以上(田立新等,2020).白云凹陷古近系超压特征普遍,主注的压力系数能达到1.8(郭志峰等,2012),异常高压可减少储层的机械压实,并对胶结作用也有一定的抑制作用(郝芳等,2002;朱东亚等,2015),为中深层优质储层的发育提供了条件.

2 储层基本特征

白云凹陷中深层(恩平组上部-珠海组下部)是寻找储层甜点的主要目的层段.恩平组沉积晚期,白云凹陷北部逐渐成为主物源通道,凹陷主注主要为三角洲前缘沉积(韩银学等,2017).相对于主注,白云5A构造位于主物源的上游,故恩平组上段以三角洲平原亚相为主(张功成等,2014),其中凹陷西北部P33井揭示恩平组的平均砂地比可达61%(韩银学等,2016);同时,白云西洼处于辫状河道内,可见典型的辫状河道沉积特征(赵玉娟等,2017).珠海组沉积早期(珠海组五、六段),珠二坳陷以三角洲-滨岸-陆架沉积体系为主(张丽丽

等,2019),白云5A构造主要为三角洲前缘亚相(张功成等,2014;曾智伟等,2017).以上表明,白云5A构造恩平组上段储层主要表现为辫状河三角洲平原辫状河道微相砂体特征,珠海组储层主要表现为辫状河三角洲前缘水下分流河道、河口坝微相砂体特征,这些相带水动力条件较强,搬运砂体粒度较粗,砂体中泥质含量较少,可成为优质储层发育的原始沉积环境.

2.1 岩石学特征

白云凹陷钻井显示,恩平组上部主要为辫状河三角洲平原亚相,到珠海组六段由于水进,演化为辫状河三角洲前缘亚相为主(图2).其中恩平组上部辫状河道微相砂体粒度较粗,以含砾的中-粗砂岩为主(图3a, 3b),颗粒分选性差,可见巨砾,砾石磨圆度较高,巨砾磨圆度呈滚圆状,中-粗砂颗粒为次棱角状-次圆状.珠海组下部水下分流河道微相以细-中砂岩为主(图3c),上部粒度变细,以细砂岩为主,砂体整体分选性较好,泥质含量较高,颗粒以次棱角状为主(图3d).

通过岩石矿物组分QFR三角图显示,恩平组上部辫状河道砂体砂岩骨架矿物以亚岩屑砂岩为主,其次为岩屑砂岩(图4a),其中粗粒砂岩中石英含量较高.珠海组水下分流河道、河口坝砂体砂岩骨架矿物以亚长石砂岩、亚岩屑砂岩为主,其次为岩屑砂岩(图4b),粗粒砂岩石英含量高、岩屑含量较低.

恩平组上部至珠海组下部的岩石特征表明,

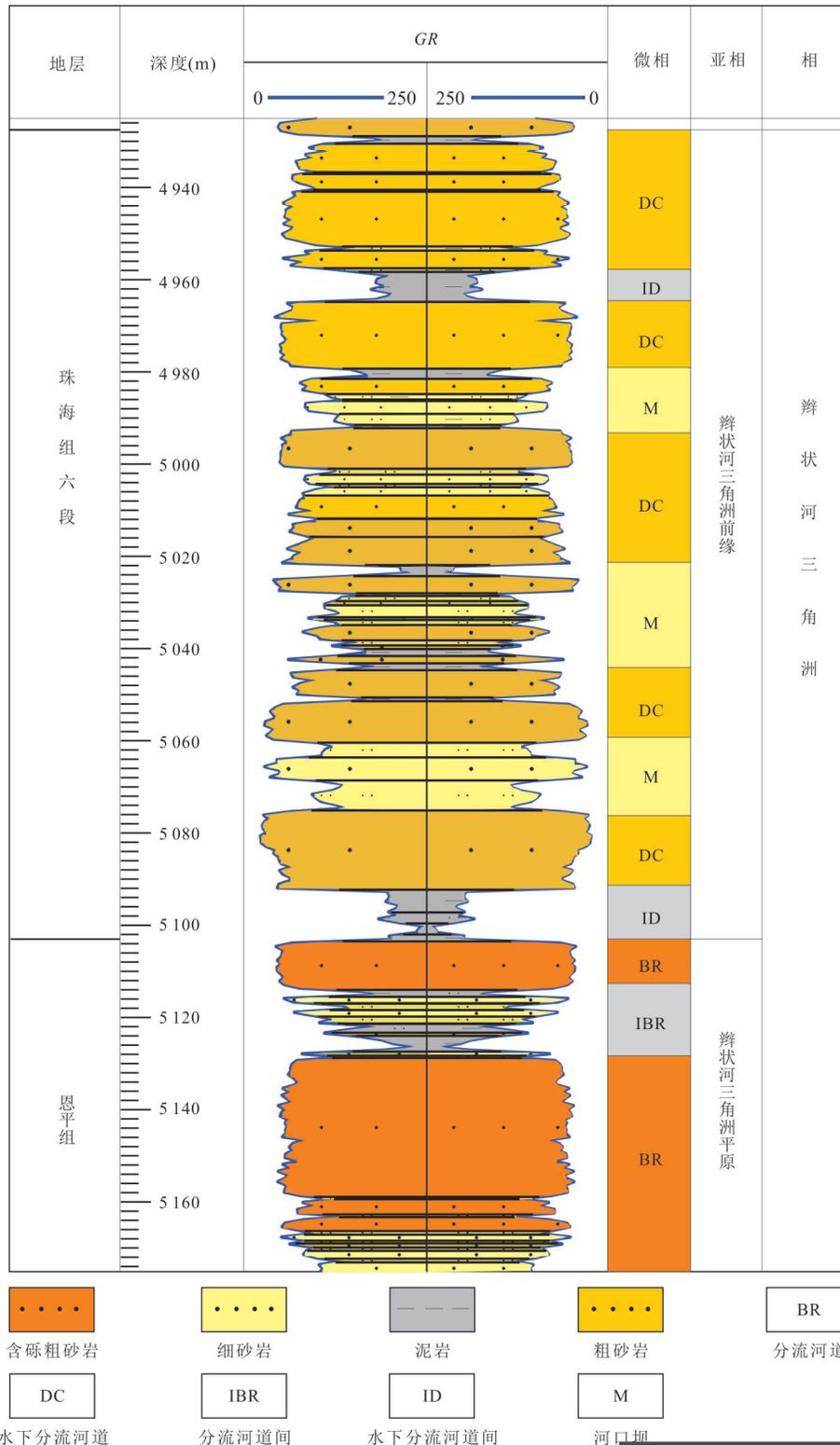


图2 BY5B井恩平组上部-珠海组六段沉积相综合柱状图

Fig. 2 Depositional facies of the upper Enping Formation and the sixth member of Zhuhai Formation in BY5B well

砂体搬运距离中等,较粗的颗粒抗压实作用较强,为有效储集空间的保存提供了物质基础.

2.2 储集空间类型

研究发现,白云5A构造中深层储层主要发育

在三角洲平原分流河道、水下分流河道微相中,其他相带由于砂体较薄,砂体遭受压实、胶结严重而物性较差.储层的储集空间以次生成因为主,溶蚀孔洞为主要储集空间,也可见残余的粒间孔,颗粒

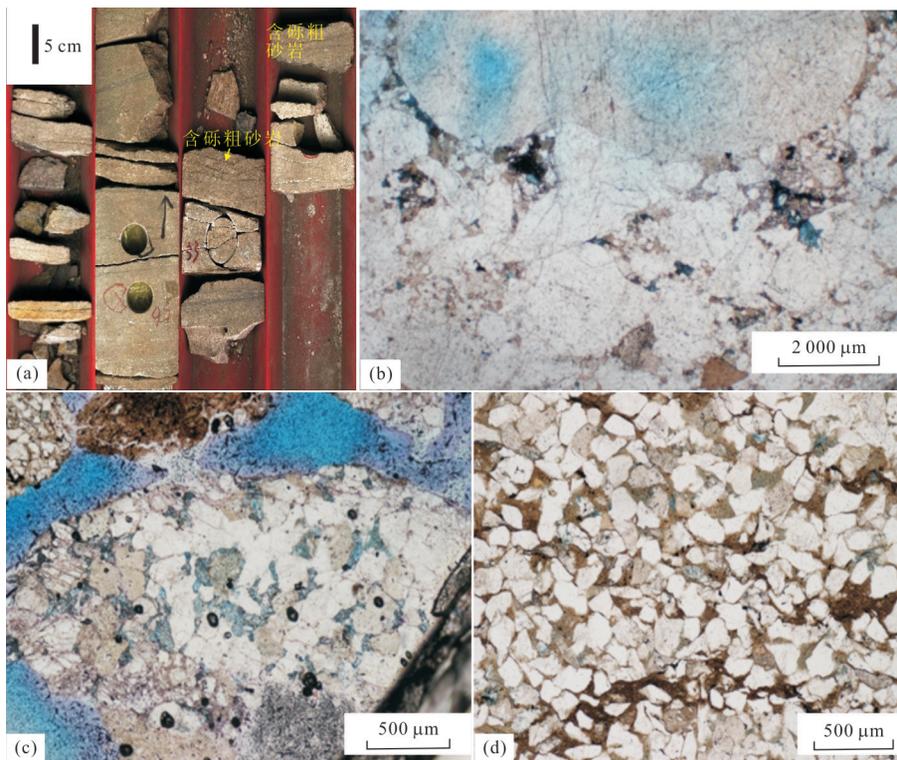


图 3 白云凹陷中深层岩石学特征

Fig. 3 Lithology characteristics of middle-deep strata in Baiyun sag

a. 含砾中-粗砂岩,恩平组,5 094~5 092 m,PY33井;b. 含砾中-粗砂岩,砾石磨圆度较高,恩平组,5 107 m,BY5A井;c. 细-中粒岩屑砂岩,珠海组下部,5 064~5 066 m,BY5B井;d. 含泥中-细粒岩屑石英砂岩,珠海组上部,4 249.4 m,BY5B井

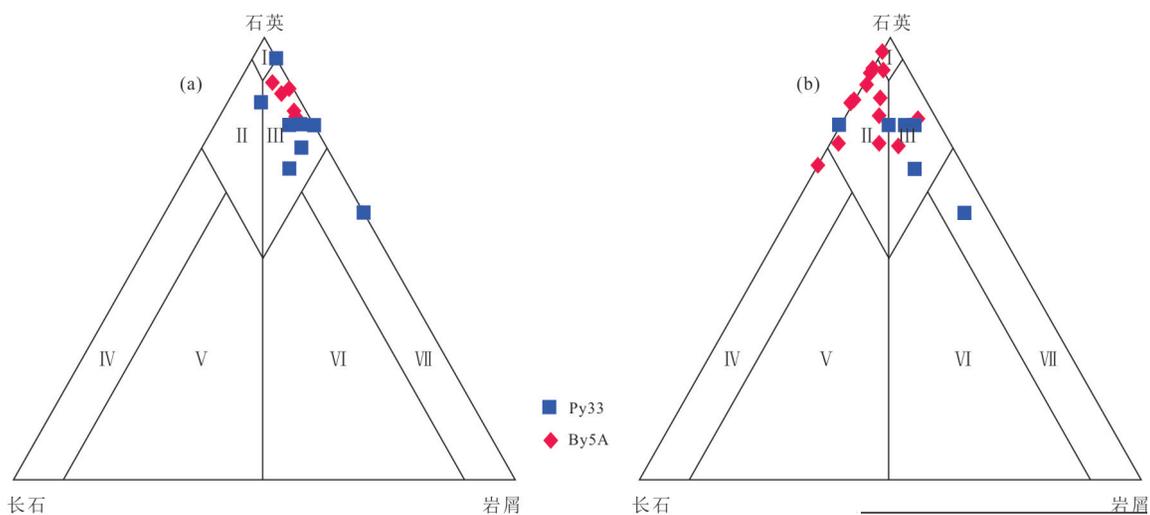


图 4 白云凹陷中深层恩平组上部(a)与珠海组(b)岩石矿物组分三角图

Fig. 4 QFR charts of the upper Enping Formation (a) and Zhuhai Formation (b) in the middle-deep strata in Baiyun sag

I. 石英砂岩;II. 亚长石砂岩;III. 亚岩屑质砂岩;IV. 长石砂岩;V. 岩屑质长石砂岩;VI. 长石质岩屑砂岩;VII. 岩屑砂岩

碎裂现象严重,破裂缝也可能具有一定的储集能力.

(1)溶蚀孔洞,恩平组上部三角洲平原分流河道微相中可见长石溶蚀形成的粒内溶孔(图 5a),长石颗粒遭受溶蚀,颗粒边界可见港湾状溶蚀边缘,剧烈的溶蚀可形成铸模孔.

(2)残余粒间孔,恩平组上部三角洲平原分流河道微相及珠海组下部水下分流河道微相中可见粒间孔被铁白云石充填(图 3c,图 5b),残余粒间孔形态不规则,孔径变化较大,多与压实和胶结作用有关.

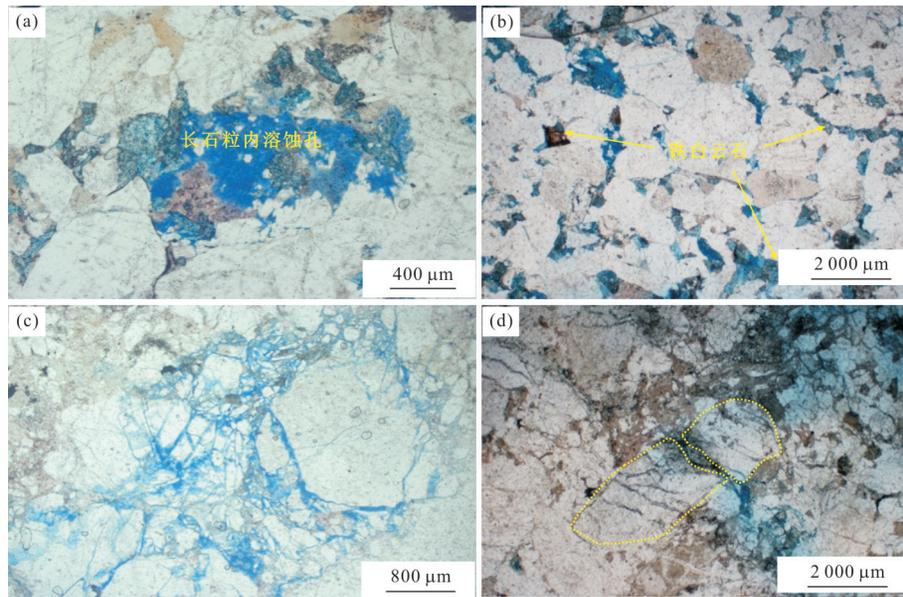


图 5 白云 5A 构造中深层储层储集空间特征

Fig. 5 Storage space characteristics of reservoir in the middle-deep strata in Baiyun 5A structure

a. 粒内溶孔, 5 109 m, BY5A 井; b. 残余粒间孔, 5 109 m, 实测孔隙度为 8.5%, 渗透率为 0.133 mD, BY5A 井; c. 颗粒破裂缝, 5 134 m, 微裂缝非常发育, BY5A 井; d. 颗粒破裂缝, 5 134 m, BY5A 井, 实测孔隙度为 13.4%, 渗透率为 10.9 mD

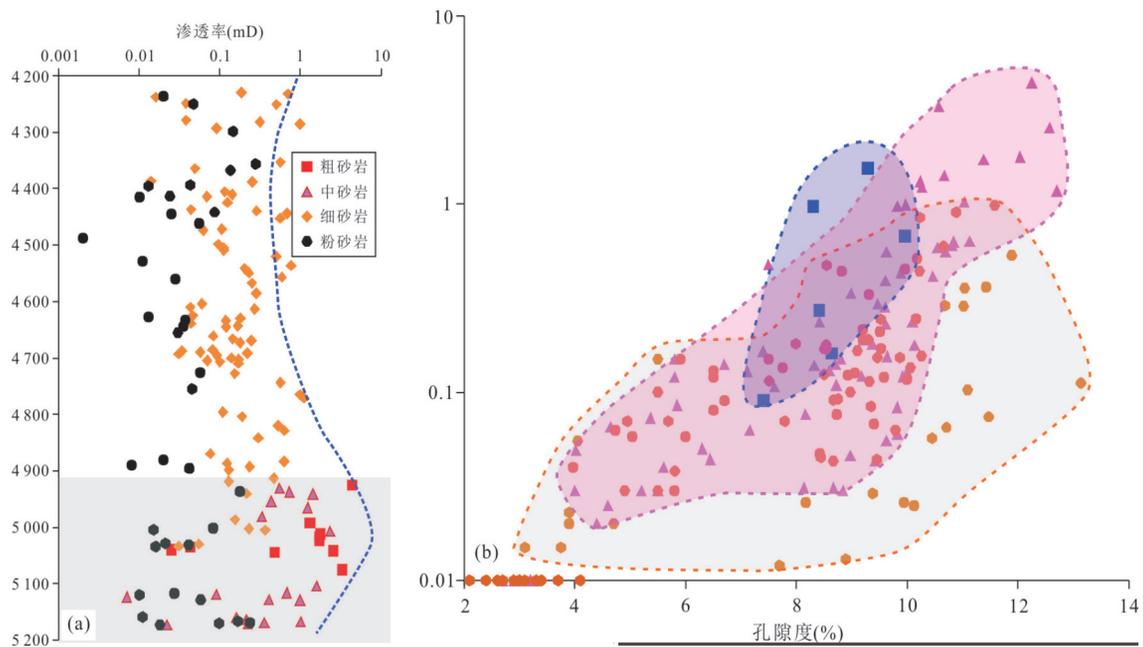


图 6 白云 5A 构造中深层储层物性特征

Fig. 6 Reservoir properties of the middle-deep strata in Baiyun 5A structure

(3) 裂缝, 以颗粒破裂缝为主(图 5c, 5d), 一方面由于分流河道、水下分流河道及河口坝等微相中碎屑颗粒比较粗大, 受力后容易破碎为小颗粒; 另一方面由于中深层存在超压(郭志峰等, 2012), 孔隙间压力的不平衡也会导致碎屑颗粒受力不均而破碎。

2.3 储层物性特征

根据白云 5A 构造钻井实测物性数据显示, 储层孔隙度在 1.5%~12.7%, 平均值为 7.1%, 渗透率在 0.01~1.17 mD, 平均值为 0.15 mD, 局部发育优质储层, 这些优质储层就是需要寻找的储层“甜点”。由于实测数据较少, 根据钻井揭示的恩平组与珠海

组下部测井解释成果,4 200 m以深,随着深度增加,渗透率有降低的趋势,但是在4 900~5 200 m存在高渗透率层段(图6a)。利用单井沉积相划分结果与测井物性解释成果交汇,可见分流河道、水下分流河道这类水动力较强的相带整体储层物性相比河口坝微相好(图6b)。通过深度、相带、物性之间的关系表明,白云5A构造中深层分流河道、水道分流河道微相为储层“甜点”发育相带。

2.4 建设性成岩作用

有学者研究认为,文昌组、恩平组砂岩在主成藏期普遍致密化,导致油气向外排出不畅,砂岩致密封闭是研究区中深层产生超压的主要原因之一(田立新等,2020)。白云凹陷中深层经历了较强的压实作用和胶结作用,但是溶蚀作用结合破裂、超压,同样可以在中深层中形成优质储层。前人研究认为,恩平组储层中的长石和火山岩岩屑遭受溶蚀可产生粒内溶孔,并在煤系地层附近形成次生孔隙发育带(马明等,2017);而珠海组成岩相研究认为,总体以较强压实强溶蚀相为主,三角洲平原水道和滨岸砂主要为二类储层,夹有一类优质储层(梁建设等,2011)。

溶蚀作用受地温场影响,有学者提出,低地温梯度碳酸盐岩胶结物含量相对较低,高地温梯度碳酸盐岩胶结物含量整体较高;同一深度下,高地温梯度会造成储层孔隙度降低(雷川,2019)。在研究区白云北坡和主洼,随着埋深增加,以次生孔隙为主,因此,在白云凹陷深层储层中,高地温梯度下超压区寻找次生孔隙发育区是有利的勘探对象。

白云5A构造钻井也揭示出,中深层储层处于成岩演化的中成岩B期,但是中深层分流河道和下水分流河道微相中溶蚀现象(图5a、5b)和颗粒破裂缝(图5c)比较普遍,这些建设性的成岩作用在埋深较大的层段形成了优质储层发育带(图5a)。

3 有利储层主控因素

砂岩储层的分布和物性特征主要受沉积相和成岩作用的影响与控制(胡明毅等,2013;张武等,2019),其中能在钻井和地震尺度上识别的储层“甜点”发育的主控因素,主要是沉积相和裂缝。

3.1 沉积相

沉积微相是研究储层非均质性的重要基础和内 容,岩性岩相变化是形成岩性圈闭的根本条件,而沉积作用是控制岩性岩相变化的前提

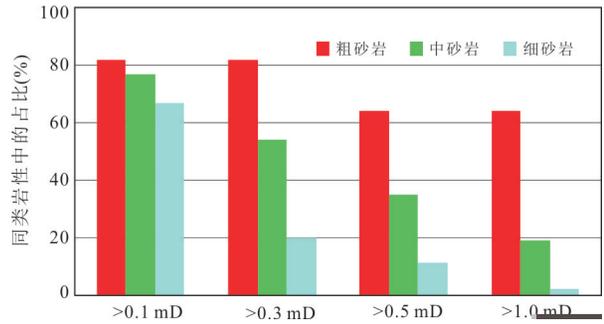


图7 不同渗透率下限所属砂岩占比直方图

Fig.7 Percentage histogram of different types of sandstone with different permeability

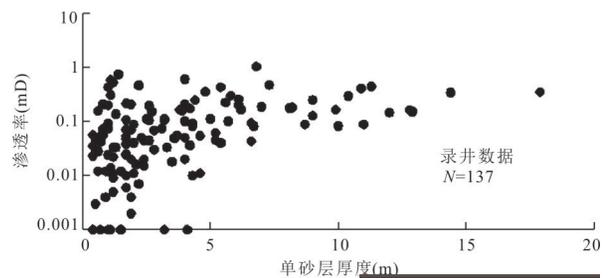


图8 单砂层厚度与单砂层平均渗透率的关系

Fig.8 Relationship between the thickness and the average permeability of the single sandstone layers

条件和动力基础(赵文智等,2013)。通过沉积相与储层物性的关系分析认为,白云5A构造中砂体粒度和厚度与储层物性呈正相关关系。

(1) 砂体粒度。有学者通过成岩作用拉平处理,对储层物性与沉积相关参数进行分析,认为储层物性与沉积物粒度和分选性呈正相关(王家豪等,2019)。在白云5A构造中深层,砂体岩性以粉砂岩、细砂岩、中砂岩和粗砂岩为主。在砂体埋深的基础上,通过砂体粒度与物性的关系分析可以看到(图6a),虽然埋深加大,砂岩粒度越粗,整体物性越好。同时,随着渗透率值变高,渗透性好储层的主要是粗粒的砂岩(细砂岩、中砂岩、粗砂岩),并且在粗砂岩中,渗透率值高的储层占比较高。当储层渗透率值按0.1 mD为下限时,粗砂岩中有82%大于0.1 mD,细砂岩中有67%大于0.1 mD;当储层渗透率值按1 mD为下限时,粗砂岩中有64%大于1 mD,而细砂岩中只有2%大于1 mD(图7)。以上表明,砂岩粒度越粗,砂岩中高渗透值的储层占比也就越高,找到优质储层的概率也就越大,粗粒的砂岩主要集中在分流河道与水下分流河道微相中。

(2) 砂体厚度。通过白云5A构造钻井揭示的中深层单砂层厚度与单砂层平均渗透率值交

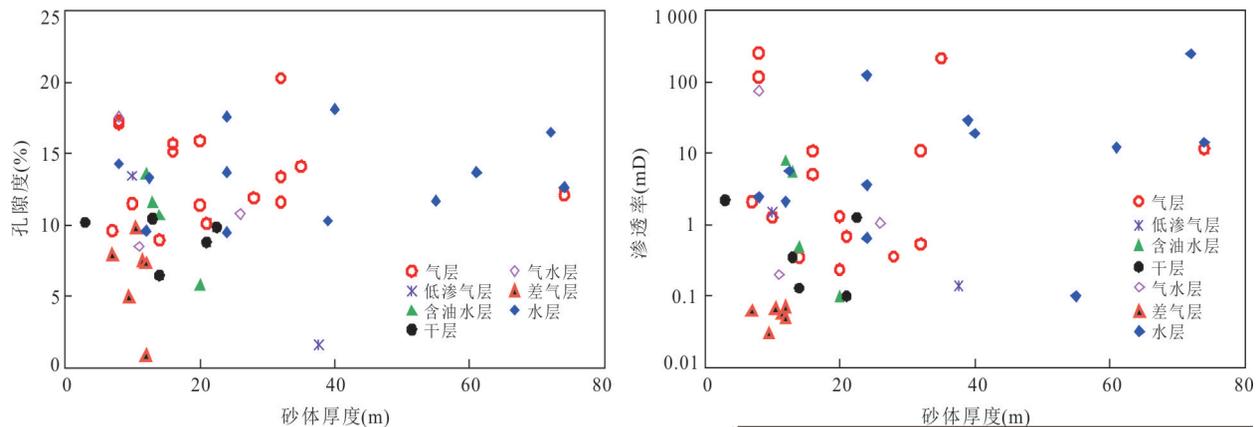


图9 不同解释结论砂岩厚度与储层物性的关系

Fig.9 Relationship between the thickness and the reservoir properties of different well-log interpretation results

汇可以看到,随着单砂层厚度增大,砂体渗透率值有升高的趋势(图8),表明单砂体厚度越大,找到优质储层的概率也就越大,而厚层的单砂体主要分布在分流河道与水下分流河道微相中。

根据测井解释结果,砂层解释为干层、差气层、气层、水层、含油水层,其中气层、水层、含油水层是有效储层,干层、差气层是非有效储层。通过不同解释结论砂岩厚度与孔隙度及渗透率的关系(图9),可以看到,砂岩厚度 >10 m时,有效储层孔隙度普遍大于10%,渗透率普遍大于0.2 mD,因此,研究区有效储层的厚度下限定为10 m。

3.2 裂缝

能够储集和渗流油气的裂缝发育带也是致密储层中的“甜点”(朱筱敏等,2018),如四川盆地新场气田上二叠统须家河组二段,埋深在4 500~5 000 m,砂岩基质的平均孔隙度只有3.38%,平均渗透率只有0.07 mD,但通过岩心可以看到砂体裂缝非常发育,并且测试获得56万方的天然气(王丹丹等,2016),表明裂缝也是有利储层发育的主控因素之一。

根据构造断裂发育特征,主干断层周边多发育伴生断层,大断裂发育标志着附近就是一个断裂带。白云5A构造钻井揭示的中深层储层,砂体中胶结充填比较严重,但是颗粒的破裂缝也比较发育(图5c),微裂缝发育导致实测渗透率达到10.9 mD(图5d),而微裂缝是深层砂砾岩储层的重要渗流通道之一(徐燕红等,2020),表明裂缝发育区也是白云5A构造中深层储层“甜点”预测的重要区域之一。

沉积相中以砂体厚度在震害尺度上可以通过地震相特征进行反映,同时,通过地震识别的裂缝

集中区也意味着储层中裂缝比较发育,从而使有利储层预测在现实勘探中具有可操作性。综合上述分析认为,白云5A构造中深层优质储层发育的主控因素是沉积相带和裂缝,反映沉积微相的砂体厚度及反映建设性成岩作用的裂缝可以在地震尺度上开展分析,因此,可以通过地震数据,综合对厚层砂体和裂缝的识别来预测储层“甜点”发育区。

4 有利储层分布预测

4.1 厚层砂体识别

(1)地震反射外部形态。有学者对墨西哥湾深水复合水道研究中发现,富砂的水道顶部地震反射特征存在“上拱”现象(Henry *et al.*, 2019)。这种现象与砂泥岩差异压实作用有关,砂体厚度越大,呈现的砂岩透镜体的地震反射外部“上拱”形态越明显;砂体越薄,泥岩较厚时,地震反射呈上凹或平直的特征。这种厚层砂体可以在三角洲相、河流相及深水沉积中发育,都可能发育砂泥岩差异压实现象,因此,利用这种差异压实现象直接在地震剖面上寻找厚层砂体是有利储层分布预测的思路之一,与沉积背景间的差异关联不大。

这种砂泥岩差异压实特征在琼东南盆地深水复合水道中也可以看到,厚砂体层段地震反射顶部有上拱现象(图10a),而厚层泥岩段与薄砂层段的组合表现为上凹或平直的地震反射特征(图10b)。白云5A构造中深层钻井显示,厚层砂岩段地震同相轴“上拱”,厚层泥岩段地震同相轴上凹或平直(图10c)。在没有钻井的区域,根据地震反射外形的“上拱”特征,可以看到,预测的前积复合体“上拱”的地方同时厚度也比较大,可能代表前

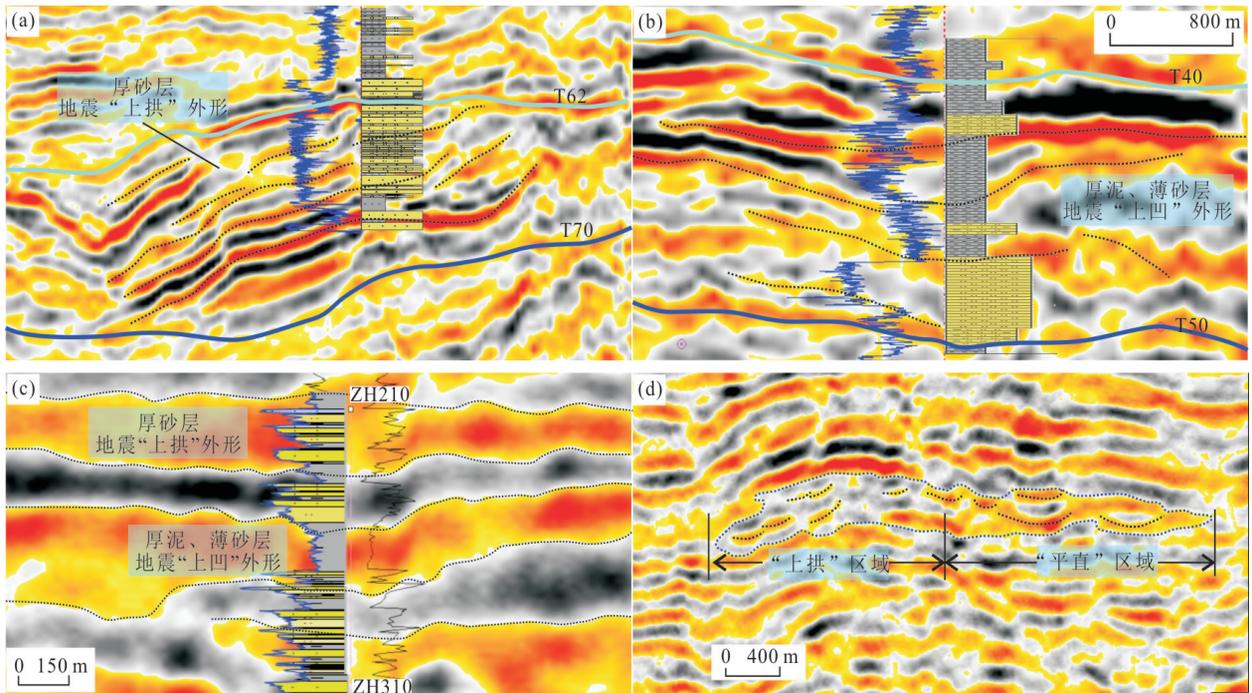


图 10 钻井揭示的砂体与预测砂体地震外部形态特征

Fig. 10 Seismic outlines of the sand bodies revealed by wells and the predicted area

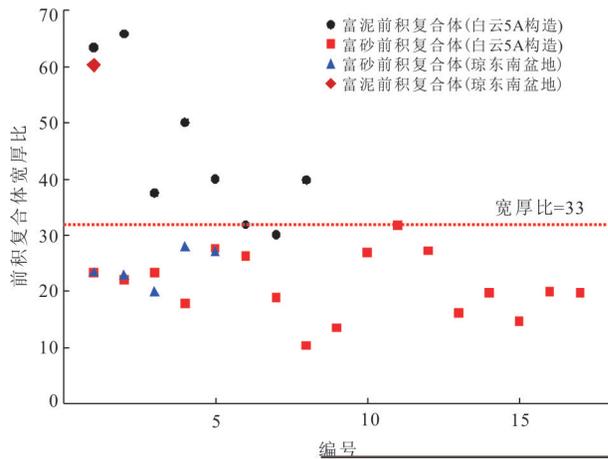


图 11 钻井揭示的前积复合体宽厚比特征

Fig. 11 Width and thickness ration of the progradation complex revealed by wells

积复合体主水道发育部位;而平直的地方同时厚度也比较小,可能代表前积复合体边缘(图 10d)。

通过对琼东南盆地和白云 5A 构造中深层有井钻遇的前积复合体的横向宽度与最大厚度比值(宽厚比)统计分析发现(图 11),砂体厚的前积复合体宽厚比普遍小于 33,表明三角洲前积复合体越来越富砂,前积复合体越呈现为“土豆”状。

(2)地震反射内幕结构.单期水道在地震剖面上同相轴表现为单个“土豆”状,当靠近物源

时,水道两侧限制较强,导致水道砂体间相互切割、叠置,形成较厚的叠置砂体;随着砂体搬运距离增加,远离物源时,水道两侧限制减弱,水道砂体散开,同期水道间横向排列 (Straub, 2012),形成较薄的砂体.从而可以根据同一个前积复合体内“土豆”状同相轴之间是叠置或横向排列特征来判断前积复合体砂体的厚薄程度。

白云 5A 构造区中深层钻井显示,砂体较厚的层段在地震剖面上同一个前积复合体内“土豆”状同相轴以垂向或侧向叠置为主(图 12a);而钻井揭示的砂体较薄、被泥岩分隔的砂体层段,地震剖面上同一个前积复合体内“土豆”状同相轴以横向排列为(图 12b).在没有钻井的区域,根据前积复合体内“土豆”状同相轴特征,可以识别砂体厚度大的前积复合体(图 12c).同时,根据同一个前积复合体厚薄特征可以看到,前积复合体厚度较大的部位“土豆”状同相轴以叠置为主,可能代表前积复合体主水道发育部位;前积复合体厚度较薄的部位“土豆”状同相轴以侧向叠置或横向排列为(图 12b).可能代表前积复合体边缘。

(3)微地貌低洼处.白云 5A 构造珠海组二段 A、B 两井同属于一个小洼子边缘,A 井砂地比为 54.1%,B 井为 50.9%,对应 A 井微地貌深度为

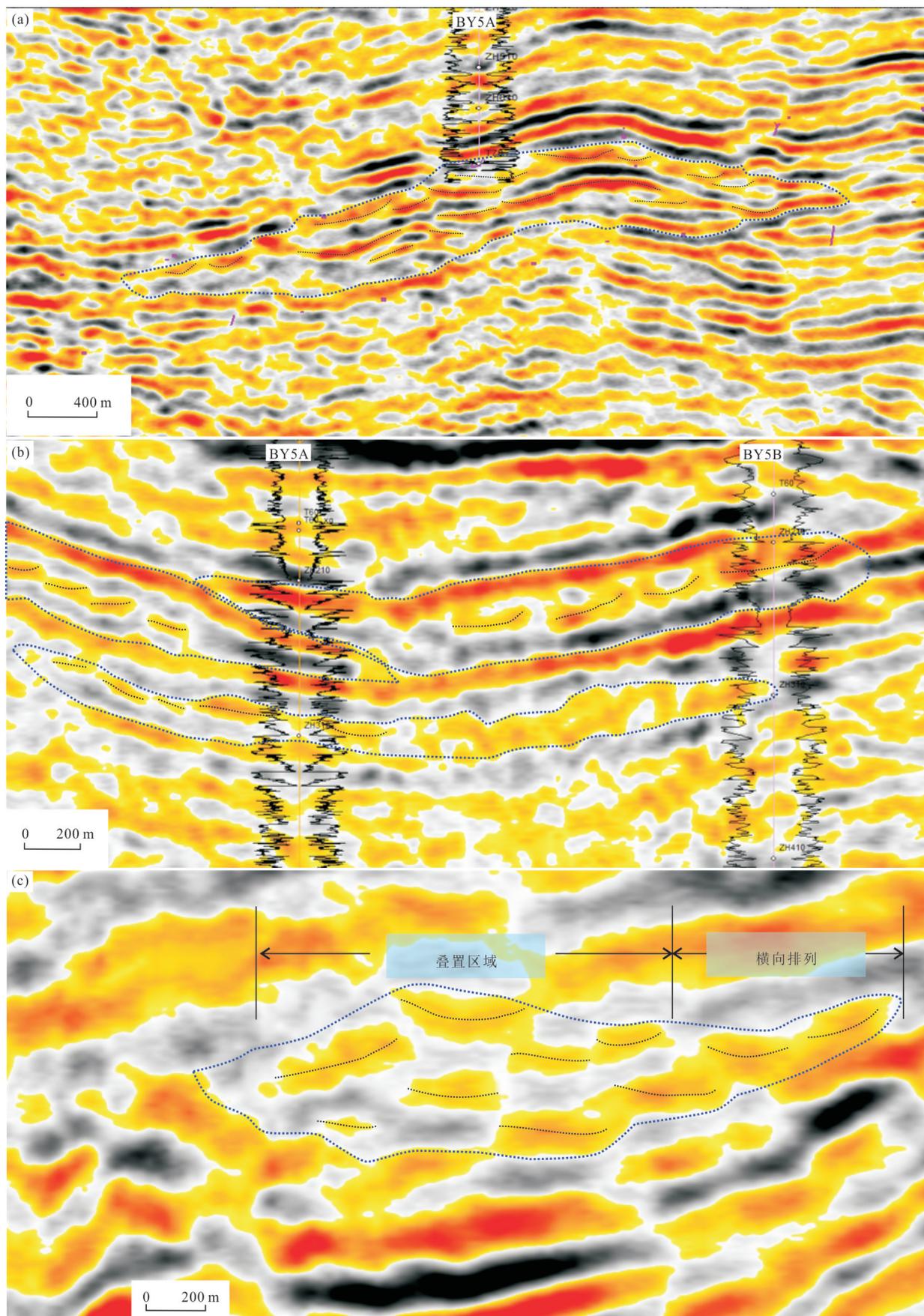


图 12 钻井揭示的厚砂体与预测厚砂体地震内幕结构特征
Fig. 12 Seismic inside structure of the sand bodies revealed by wells and the predicted area

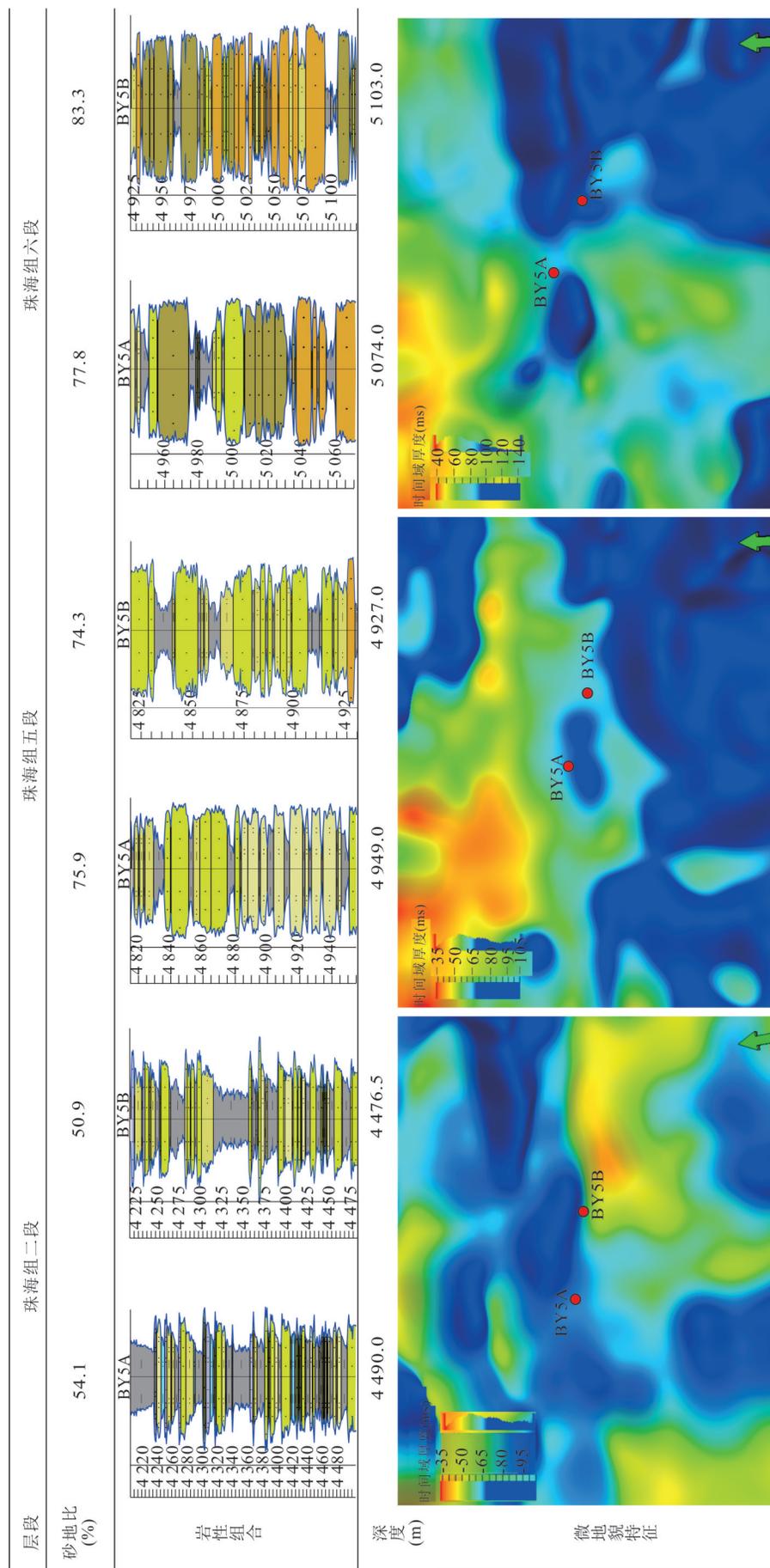


图13 钻井揭示的不同层段砂地比与微地貌特征
Fig.13 Sand ratio and micro relief characteristics of different strata revealed by wells in Baiyun 5A structure

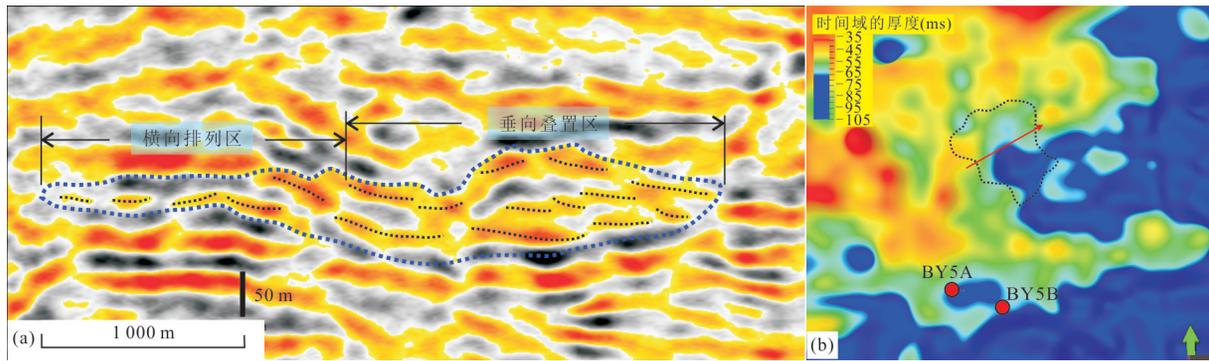


图 14 珠海组五段预测前积复合体地震相特征

Fig. 14 Seismic facies characteristics of the predicted progradation complex in the 5th section of Zhuhai Formation

a. 剖面位置见图 14b; b. 微地貌特征

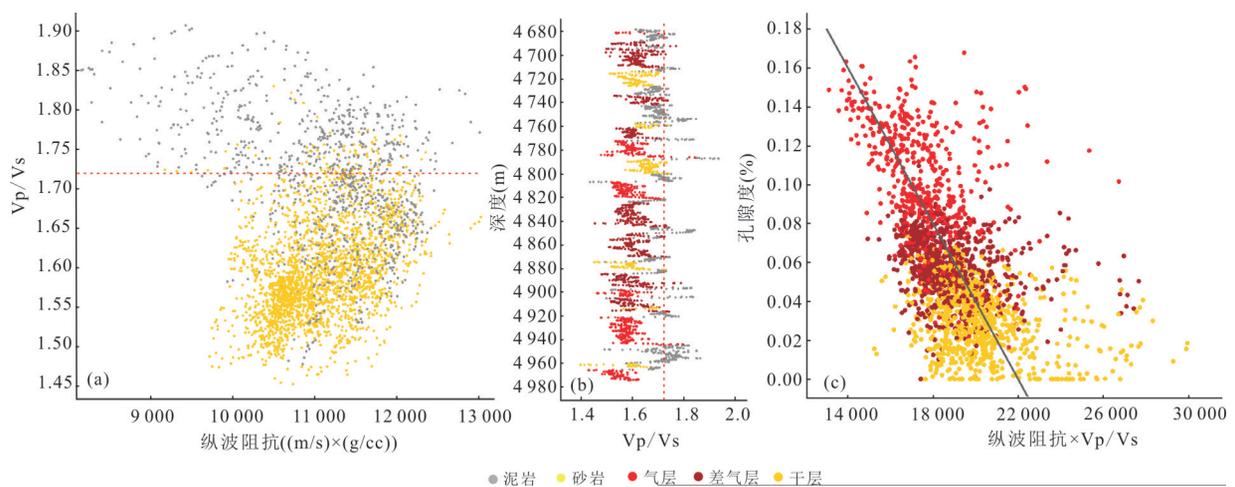


图 15 白云 5A 构造中深层岩石物理特征

Fig. 15 Rock physical properties of the middle-deep strata in Baiyun 5A structure

a. 白云 5A 构造中深层 V_p/V_s 与纵波阻抗交汇特征; b. BY5A 井不同深度气层、差气层、干层和泥岩 V_p/V_s 特征; c. 气层、差气层、干层孔隙度与岩性识别因子(纵波阻抗 $\times V_p/V_s$) 的关系

4 490.0 m, B 井位为 4 476.5 m; 珠海组五段 A、B 两井同属于一个小洼子边缘, A 井砂地比为 75.9%, B 井位为 74.3%, 对应 A 井微地貌深度为 4 949.0 m, B 井为 4 927.0 m; 珠海组六段 A、B 两井分别属于两个不同的小洼子边缘, A 井砂地比为 77.8%, B 井位为 83.3%, 对应 A 井微地貌深度为 5 074.0 m (图 13)。

对钻井揭示的微地貌深度及相应层段砂地比特征进行对比可以发现, 微地貌深度较大时, 钻井揭示的砂地比也较高, 说明微地貌洼地有利于砂体堆积, 形成较厚的砂体。有学者通过对渤海 X 油田沙二段古地貌恢复, 结合砂体特征分析, 发现沟谷、凹陷单元砂体厚度大、泥质成分少、压实、胶结作用弱, 溶蚀作用强, 储层物性好 (邓猛等, 2019)。因此, 微地貌低洼处为厚层砂体堆积和有利储层发育的区域。

综合地震外部形态、内幕结构及微地貌特征, 对未钻井区域发育厚层砂体的前积复合体进行识别追踪, 从而得到厚层砂体发育的平面分布范围和垂向叠置关系。通过前积复合体追踪也可发现, 上述 3 个特征是共生的关系。如预测的前积复合体地震相特征 (图 14a) 与微地貌特征 (图 14b) 对比可以看到: 前积复合体宽厚比为 32.1, 在地震外部形态上拱为主的部位, 地震内幕以垂向叠置为主, 该部位厚度较大, 也是微地貌低洼的部位; 而地震外部形态平直为主的部位, 地震内幕以横向排列为, 厚度较薄, 是微地貌较高的部位。

4.2 砂体及孔隙度预测

将白云 5A 构造中深层钻井揭示的砂泥岩纵波阻抗与 V_p/V_s 交汇发现 (图 15a), 砂岩表现为低 V_p/V_s 特征, 通过 V_p/V_s 小于 1.72 可以区分砂岩和

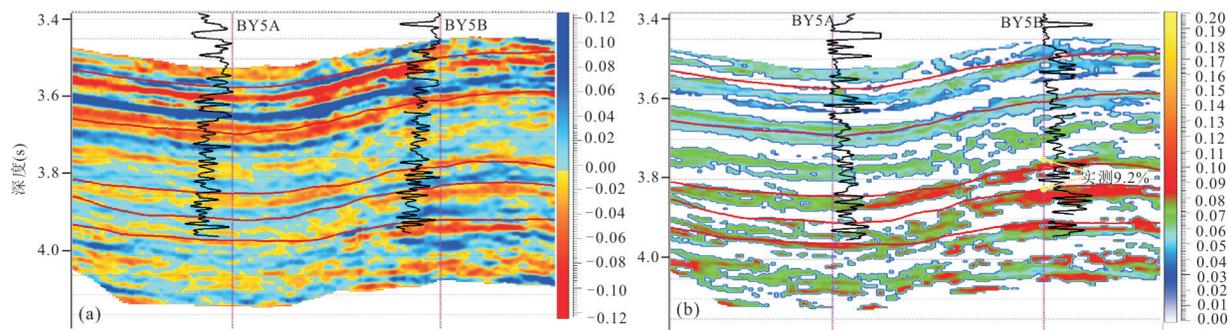


图 16 白云 5A 构造叠前 Vp/Vs 反演结果

Fig. 16 Prestack inversion results of Vp/Vs and porosity in Baiyun 5A structure

a. 岩性反演结果; b. 孔隙度反演结果

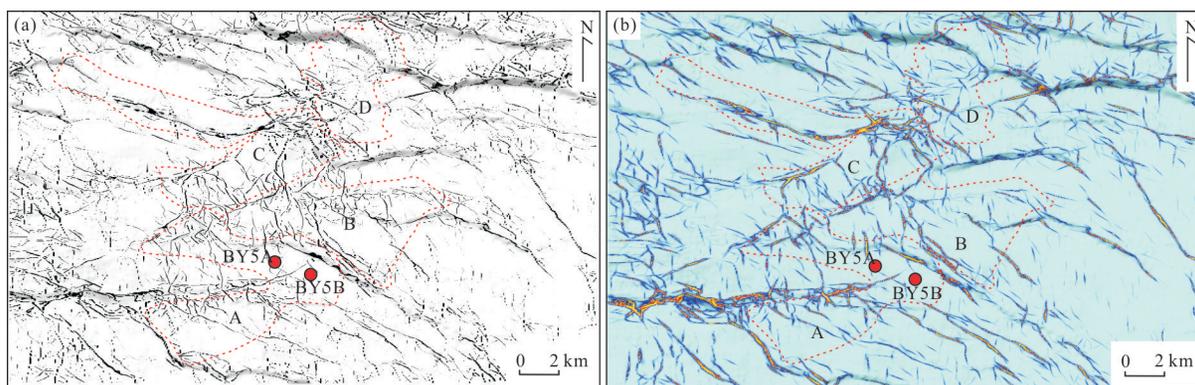


图 17 白云 5A 构造 T70 各断块裂缝识别

Fig. 17 Fracture identification of different fault blocks on T70 surface in Baiyun 5A structure

a. T70 各断块最大似然属性特征; b. T70 各断块增强似然属性特征

泥岩,因此可应用叠前反演得到的 Vp/Vs 结果来预测砂岩平面展布规律.同时,根据不同深度气层、差气层、干层及泥岩的 Vp/Vs 特征(图 15b),可见 Vp/Vs 小于 1.72 时,可以区别出砂岩层段.将气层、差气层与干层的孔隙度与岩性识别因子(纵波阻抗 \times Vp/Vs)进行交汇发现(图 15c),孔隙度与岩性识别因子具有较好的线性关系,应用钻井解释的孔隙度与岩性因子的交汇拟合关系可得到预测孔隙度值.

通过叠前 Vp/Vs 反演剖面与钻井获取的泥质含量曲线可以看到, Vp/Vs 预测砂岩的结果与泥质含量曲线反映的砂岩分布层段吻合关系较好(图 16a);孔隙度反演剖面表明,钻井处实测孔隙度为 9.2% 的两个点,预测孔隙度分别为 9.4% 和 9.0%(图 16b),相对误差为 2.2%.

4.3 裂缝分布特征

利用地震数据的方差、相干体、噪声以及蚂蚁体等地球物理方法可预测大断裂分布,研究区通过这些地震属性与最大似然属性进行对比,发现最大似然属性预测的断裂分布特征效果最好.通过最大

似然体得到的断裂分布是三维空间的数据体,为了展示储层平面分布规律,仅用了似然体平面分布图;最大似然体属性结合原始数据体断层解释结果可检测断裂预测的有效性,此外,地震方差、相干、蚂蚁体等属性虽然在研究区使用效果不好,但在局部也能验证最大似然体对断裂预测的结果.

在白云 5A 构造中深层,最大似然属性能够反映出断裂的分布情况(图 17a),根据恩平组顶部(T70)构造圈闭解释,将研究区划分为 A、B、C、D 四个断块,通过最大似然属性反映的断裂分布情况来看,C 块东部、B 块西北部、A 块北部为断裂比较集中的区域.将最大似然属性进行增强,可以看到 C 块东部的断裂更加突显出来(图 17b).

4.4 储层“甜点”分布预测

根据上文分析的结论,厚层砂体物性好的概率高于薄层砂体;其次,根据裂缝发育的地方微裂缝也发育,有利于提高储层渗透率,甚至有助于流体循环而溶蚀岩石颗粒,形成次生溶孔,形成储层;再者,通过地球物理岩石物性反演,是预测有利储层

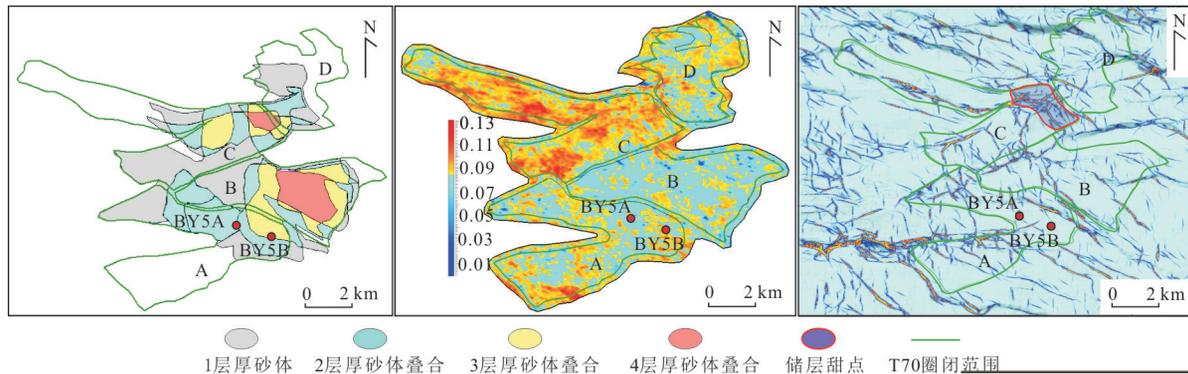


图 18 白云 5A 构造中深层储层“甜点”预测

Fig. 18 Reservoir “sweet point” prediction of the middle-deep strata in Bayun 5A structure

a. 中深层各圈闭厚度砂体叠置特征; b. 白云 5A 构造恩平组上部孔隙度反演结果; c. 最大似然属性反映的裂缝分布特征

的方法之一. 因此, 厚层砂体+裂缝发育带+高孔隙预测区, 综合叠加得到储层“甜点”发育区.

通过发育厚层砂体的前积复合体识别与追踪, 得到白云 5A 构造中深层各层段厚层砂体的平面分布规律; 将各层段厚层砂体平面分布与圈闭范围进行叠合, 可得到圈闭范围内各层段厚层砂体分布范围; 进而将各层段圈闭内厚层砂体分布范围进行叠合, 可以看到圈闭范围内多层厚砂体叠置情况(图 18a). 厚层砂体的叠置特征反映出, C 块与 B 块东部厚层砂体叠置程度最高, 也就是说这些区域内厚层砂体最为集中. 通过地球物理对白云 5A 构造中深层砂岩和孔隙度反演结果(图 18b), 反映出 C 块总体上砂体最为发育、孔隙度最高, 是有利储层最为发育的断块. 通过最大似然属性和增强似然属性反映出白云 5A 构造中深层断裂分布特征, 总体上 C 块东部、B 块西北部、A 块北部为断裂比较集中的区域, 其中 C 块东部断裂最为集中(图 18c). 断裂集中区意味着裂缝、微裂缝的发育区, 表明 C 块东部是裂缝改造最为显著的区域.

综合厚层砂体叠置的厚砂集中区、砂体-孔隙度反演的物性优势区及裂缝识别的裂缝发育区, 认为白云 5A 构造中深层 C 块东部是储层“甜点”发育区.

5 结论

(1) 白云 5A 构造中深层砂体总体为低孔低渗储层, 中-粗砂岩发育次生溶孔和微裂缝, 溶蚀和构造碎裂是中深层建设性的成岩作用. 辫状河三角洲平原与前缘中发育厚层砂体的分流河道和下水分流河道是有利储层发育相带.

(2) 反映沉积微相的砂体厚度及反映建设性成岩作用的裂缝是可以在地震上进行识别的储层“甜点”主控因素. 在地震尺度上, 可通过地震外部形态的“上拱”、内幕结构的叠置及微地貌的低洼处 3 个特征来识别厚层砂体发育的前积复合体.

(3) 综合厚层砂体识别、砂体及孔隙度预测、裂缝分布识别三方面成果, 认为白云 5A 构造中深层 C 块为储层“甜点”发育区.

致谢: 感谢匿名审稿专家对论文修改提出宝贵的意见!

References

- Chen, Y., Han, Y.X., Bian, L.Z., et al., 2020. Difference between Eastern and Western Paleogene Sedimentary Systems in Deep Waters off the Northern South China Sea Continental Margin and Its Effect on Source Rock Distribution. *Oil & Gas Geology*, 41(5): 1028–1037 (in Chinese with English abstract).
- Deng, M., Zhao, J.S., Jin, B.Q., et al., 2019. Reservoir Quality Evaluation of Middle-Deep Formations Based on Paleo-Geomorphology Analysis: A Case Study of Sha-2 Formation in X Oilfield of Bohai Bay, China. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 26(2): 147–152 (in Chinese with English abstract).
- Du, W.B., Sun, G.H., Huang, Y.J., et al., 2015. Reservoir Prediction Based on Seismic Multi-Attributes Analysis: An Example from Paleogene Enping Formation of Enping Sag in the Pearl River Mouth Basin. *Marine Geology Frontiers*, 31(8): 62–70 (in Chinese with English abstract).
- Fang, J.N., 2013. Evolution of Sedimentary System and Source-Reservoir-Caprock Association in Tertiary of Pearl River Mouth Basin (Dissertation). China Uni-

- versity of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Guo, Z.F., Liu, Z., Lü, R., et al., 2012. Predrill Prediction of Formation Pressure Using Seismic Data in Deep-Water Area of Baiyun Depression, Northern South China Sea. *Oil Geophysical Prospecting*, 47(1): 126–132, 188, 198 (in Chinese with English abstract).
- Han, Y.X., Chen, Y., Yang, H.C., et al., 2017. “Source to Sink” of Enping Formation and Its Effects on Oil and Gas Exploration in Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin. *China Petroleum Exploration*, 22(2): 25–34 (in Chinese with English abstract).
- Han, Y.X., Yang, H.Z., Chen, Y., et al., 2016. The Evaluation Methods of Mid-Deep Litho-Stratigraphic Traps in Deep-Water and Less-Well Blocks: A Case Study of Target Baiyun 11 in Enping Formation, Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 37(S1): 68–78 (in Chinese with English abstract).
- Hao, F., Zou, H.Y., Ni, J.H., et al., 2002. Evolution of Overpressured Systems in Sedimentary Basins and Conditions for Deep Oil/Gas Accumulation. *Earth Science*, 27(5): 610–615 (in Chinese with English abstract).
- Henry, W.P., Venkatarathnam, K., Liu, H.Q., 2019. An Overview of Deep-Water Turbidite Deposition. *Acta Sedimentologica Sinica*, 37(5): 879–903 (in Chinese with English abstract).
- Holditch, S. A., 2006. Tight Gas Sands. *Journal of Petroleum Technology*, 58(6):86–93.
- Hu, M.Y., Shen, J., Hu, D., 2013. Reservoir Characteristics and Its Main Controlling Factors of the Pinghu Formation in Pinghu Structural Belt, Xihu Depression. *Oil & Gas Geology*, 34(2): 185–191 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, Z.X., Lin, S.G., Pang, X.Q., et al., 2006. The Comparison of Two Types of Tight Sand Gas Reservoir. *Petroleum Geology and Experiment*, 28(3): 210–214, 219 (in Chinese with English abstract).
- Lai, J., Wang, G.W., Huang, L.X., et al., 2015. Quantitative Classification and Logging Identification Method for Diagenetic Facies of Tight Sandstones. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 34(1): 128–138 (in Chinese with English abstract).
- Lei, C., 2019. Influence of High Thermal Background on Deep Water Reservoir Quality in the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin (Dissertation). Northwest University, Xi'an (in Chinese with English abstract).
- Li, C., Luo, J.L., Hu, H.Y., et al., 2019. Thermodynamic Impact on Deepwater Sandstone Diagenetic Evolution of Zhuhai Formation in Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin. *Earth Science*, 44(2): 572–587 (in Chinese with English abstract).
- Liang, J.S., Wang, Q., Hao, L.W., et al., 2011. Application of Diagenetic Facies Analysis to Reservoir Prediction in Deep Water Area of the Northern South China Sea: A Case Study from Baiyun Sag, Zhujiangkou Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 29(3): 503–511 (in Chinese with English abstract).
- Luo, S.B., Zhang, Z.T., Guo, W., et al., 2017. Seismic Response Characteristics of the Middle-Deep High-Quality Sand Bodies at the Southwest Margin of Baiyun Depression. *Journal of Geology*, 41(2): 282–291 (in Chinese with English abstract).
- Ma, M., Chen, G.J., Li, C., et al., 2017. Quantitative Analysis of Porosity Evolution and Formation Mechanism of Good Reservoir in Enping Formation, Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin. *Natural Gas Geoscience*, 28(10): 1515–1526 (in Chinese with English abstract).
- Mou, W.W., Wang, Q., Tian, B., et al., 2017. The Diagenetic Facies Logging Response Characteristics of Medium-Deep Reservoirs in the North Slope of Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin. *Natural Gas Geoscience*, 28(10): 1601–1612 (in Chinese with English abstract).
- Shao, L., Cui, Y.C., Qiao, P.J., et al., 2019. Implications on the Early Cenozoic Palaeogeographical Reconstruction of SE Eurasian Margin Based on Northern South China Sea Palaeo-Drainage System Evolution. *Journal of Palaeogeography*, 21(2): 216–231 (in Chinese with English abstract).
- Straub, P., 2012. Quantifying the Hierarchical Organization of Compensation in Submarine Fans Using Surface Statistics. *Journal of Sedimentary Research*, 82(11/12): 889–898.
- Tian, L.X., Zhang, Z.T., Pang, X., et al., 2020. Characteristics of Overpressure Development in the Mid-Deep Strata of Baiyun Sag and Its New Enlightenment in Exploration Activity. *China Offshore Oil and Gas*, 32(6): 1–11 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D.D., Li, H., Zhao, X.Y., et al., 2016. Characteristics of Natural Fractures and Their Influence on Dynamic Gas and Water Distribution in Xinchang Gas Field. *Petroleum Geology & Experiment*, 38(6): 748–756 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J.H., Peng, G.R., Liu, B.J., et al., 2019. Flattening Diagenesis of Clastic Rocks and Quantitative Characterization of Sedimentary Control on Reservoir Properties: A Case Study of Baiyun Sag in Pearl River Mouth Basin.

- sin. *Acta Petrolei Sinica*, 40(S1): 115–123 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, M., Wu, S. T., Yuan, X. J., et al., 2021. Conglomerate Reservoir Pore Evolution Characteristics and Favorable Area Prediction: A Case Study of the Lower Triassic Baikouquan Formation in the Northwest Margin of the Junggar Basin, China. *Journal of Earth Science*, 32(4): 998–1010. <https://doi.org/10.1007/s12583-020-1083-6>
- Xu, D.N., Yin, L., Qu, J.H., et al., 2015. Prediction Method of the Low Permeability Sandy-Conglomerate “Sweet Point” Reservoirs and Its Application: A Case Study of Mahu Depression Northern Slope Area in the Junggar Basin. *Natural Gas Geoscience*, 26(S1): 154–161 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Y.H., Yang, X.H., Mei, L.F., 2020. Reservoir Characteristics and Main Control Factors of Conglomerate Reservoir of E₃ in the Northwest Steep Slope Zone of Weixinan Depression. *Earth Science*, 45(5): 1706–1721 (in Chinese with English abstract).
- Yu, X.H., Li, S.L., Yang, Z.H., 2015. Discussion on Deposition-Diagenesis Genetic Mechanism and Hot Issues of Tight Sandstone Gas Reservoir. *Lithologic Reservoirs*, 27(1): 1–13 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, G.H., Cao, Y.C., Jia, Z.Z., et al., 2015. Research Progress on Anomalously High Porosity Zones in Deeply Buried Clastic Reservoirs in Petroliferous Basin. *Natural Gas Geoscience*, 26(1): 28–42 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, Z.W., Yang, X.H., Zhu, H.T., et al., 2017. Development Characteristics and Significance of Large Delta of Upper Enping Formation, Baiyun Sag. *Earth Science*, 42(1): 78–92 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G.C., Chen, Y., Yang, H.C., et al., 2015. Stratigraphic-Lithologic Traps in the Enping Formation: A New Exploration Field in Deep Water Area of the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin. *China Offshore Oil and Gas*, 27(6): 1–9 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G.C., Yang, H.Z., Chen, Y., et al., 2014. The Baiyun Sag: A Giant Rich Gas-Generation Sag in the Deepwater Area of the Pearl River Mouth Basin. *Natural Gas Industry*, 34(11): 11–25 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L.L., Shu, Y., Cai, G.F., et al., 2019. Eocene-Oligocene Sedimentary Environment Evolution and Its Impact on Hydrocarbon Source Conditions in Eastern Pearl River Mouth Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 40(S1): 153–165 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W., Hou, G.W., Xiao, X.G., et al., 2019. Genesis of Low Permeability Reservoirs and Main Controlling Factors of High Quality Reservoirs in Xihu Sag, East China Sea Basin. *China Offshore Oil and Gas*, 31(3): 40–49 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, W.Z., Hu, S.Y., Wang, H.J., et al., 2013. Large-Scale Accumulation and Distribution of Medium-Low Abundance Hydrocarbon Resources in China. *Petroleum Exploration and Development*, 40(1): 1–13 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y.J., Yang, X.H., Zhu, H.T., et al., 2017. Distinct Sedimentary Backgrounds and Hydrocarbon Characteristics of Paleogene Enping Formation, Baiyun Sag. *Geological Science and Technology Information*, 36(3): 156–163 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, D.Y., Zhang, D.W., Zhang, R.Q., et al., 2015. Role of Oil Charge in Preservation of Deep Dolomite Reservoir Space. *Acta Geologica Sinica*, 89(4): 794–804 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, R.K., Bai, B., Cui, J.W., et al., 2013. Research Advances of Microstructure in Unconventional Tight Oil and Gas Reservoirs. *Journal of Palaeogeography*, 15(5): 615–623 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, R.K., Zou, C.N., Zhang, N., et al., 2009. Diagenetic Fluid Evolution and Tight Genetic Mechanism of Tight Sandstone Gas Reservoir: A Case Study of Xujiahe Formation of Upper Triassic in Sichuan Basin. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 39(3): 327–339 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, X.M., Pan, R., Zhu, S.F., et al., 2018. Research Progress and Core Issues in Tight Reservoir Exploration. *Earth Science Frontiers*, 25(2): 141–146 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈莹, 韩银学, 边立曾, 等, 2020. 南海北部深水区古近系沉积体系的東西差异及对烃源岩分布的影响. *石油与天然气地质*, 41(5): 1028–1037.
- 邓猛, 赵军寿, 金宝强, 等, 2019. 基于古地貌分析的中深层沉积储层质量评价: 以渤海X油田沙二段为例. *断块油气田*, 26(2): 147–152.
- 杜文波, 孙桂华, 黄永健, 等, 2015. 基于地震多属性的储层预测: 以珠江口盆地恩平凹陷古近系恩平组为例. *海洋地质前沿*, 31(8): 62–70.
- 方竞男, 2013. 珠江口盆地第三系沉积体系演变与生储盖组合(硕士学位论文). 北京: 中国地质大学.
- 郭志峰, 刘震, 吕睿, 等, 2012. 南海北部深水区白云凹陷钻前地层压力地震预测方法. *石油地球物理勘探*, 47(1):

- 126—132, 188, 198.
- 韩银学, 陈莹, 杨海长, 等, 2017. 白云凹陷恩平组“源-汇”体系及其对油气勘探的影响. 中国石油勘探, 22(2): 25—34.
- 韩银学, 杨海长, 陈莹, 等, 2016. 深水少井区中深层岩性地层圈闭评价方法: 以珠江口盆地白云凹陷恩平组白云11目标评价为例. 石油学报, 37(S1): 68—78.
- 郝芳, 邹华耀, 倪建华, 等, 2002. 沉积盆地超压系统演化与深层油气成藏条件. 地球科学, 27(5): 610—615.
- Henry, W.P., Venkatarathnam, K., 刘化清, 2019. 深水浊流沉积综述. 沉积学报, 37(5): 879—903.
- 胡明毅, 沈娇, 胡蝶, 2013. 西湖凹陷平湖构造带平湖组砂岩储层特征及其主控因素. 石油与天然气地质, 34(2): 185—191.
- 姜振学, 林世国, 庞雄奇, 等, 2006. 两种类型致密砂岩气藏对比. 石油实验地质, 28(3): 210—214, 219.
- 赖锦, 王贵文, 黄龙兴, 等, 2015. 致密砂岩储集层成岩相定量划分及其测井识别方法. 矿物岩石地球化学通报, 34(1): 128—138.
- 雷川, 2019. 珠江口盆地白云凹陷高热背景对深水区储层质量的影响(博士学位论文). 西安: 西北大学.
- 李弛, 罗静兰, 胡海燕, 等, 2019. 热动力条件对白云凹陷深水区珠海组砂岩成岩演化过程的影响. 地球科学, 44(2): 572—587.
- 梁建设, 王琪, 郝乐伟, 等, 2011. 成岩相分析方法在南海北部深水区储层预测的应用: 以珠江口盆地白云凹陷为例. 沉积学报, 29(3): 503—511.
- 骆帅兵, 张忠涛, 郭伟, 等, 2017. 白云凹陷西南区块中-深层优质砂岩体地震响应特征. 地质学刊, 41(2): 282—291.
- 马明, 陈国俊, 李超, 等, 2017. 珠江口盆地白云凹陷恩平组储层成岩作用与孔隙演化定量表征. 天然气地球科学, 28(10): 1515—1526.
- 牟炜卫, 王琪, 田兵, 等, 2017. 珠江口盆地白云凹陷北坡中深部储层成岩相测井响应特征. 天然气地球科学, 28(10): 1601—1612.
- 邵磊, 崔宇驰, 乔培军, 等, 2019. 南海北部古河流演变对欧亚大陆东南缘早新生代古地理再造的启示. 古地理学报, 21(2): 216—231.
- 田立新, 张忠涛, 庞雄, 等, 2020. 白云凹陷中深层超压发育特征及油气勘探新启示. 中国海上油气, 32(6): 1—11.
- 王丹丹, 李浩, 赵向原, 等, 2016. 新场气田储层裂缝特征及其与动态气水分布的关系. 石油实验地质, 38(6): 748—756.
- 王家豪, 彭光荣, 柳保军, 等, 2019. 碎屑岩成岩拉平处理及沉积作用控制储层物性的定量表征——以珠江口盆地白云凹陷为例. 石油学报, 40(S1): 115—123.
- 许多年, 尹路, 瞿建华, 等, 2015. 低渗透砂砾岩“甜点”储层预测方法及应用: 以准噶尔盆地玛湖凹陷北斜坡区三叠系百口泉组为例. 天然气地球科学, 26(S1): 154—161.
- 徐燕红, 杨香华, 梅廉夫, 2020. 涪西南凹陷西北陡坡带流三段砂砾岩储层特征与主控因素. 地球科学, 45(5): 1706—1721.
- 于兴河, 李顺利, 杨志浩, 2015. 致密砂岩气储层的沉积-成岩成因机理探讨与热点问题. 岩性油气藏, 27(1): 1—13.
- 远光辉, 操应长, 贾臻臻, 等, 2015. 含油气盆地中深层碎屑岩储层异常高孔带研究进展. 天然气地球科学, 26(1): 28—42.
- 曾智伟, 杨香华, 朱红涛, 等, 2017. 白云凹陷恩平组沉积晚期大型三角洲发育特征及其意义. 地球科学, 42(1): 78—92.
- 张功成, 陈莹, 杨海长, 等, 2015. 恩平组岩性地层圈闭: 白云凹陷深水区天然气勘探新领域. 中国海上油气, 27(6): 1—9.
- 张功成, 杨海长, 陈莹, 等, 2014. 白云凹陷: 珠江口盆地深水区一个巨大的富生气凹陷. 天然气工业, 34(11): 11—25.
- 张丽丽, 舒誉, 蔡国富, 等, 2019. 珠江口盆地东部始新世-渐新世沉积环境演变及对烃源条件的影响. 石油学报, 40(S1): 153—165.
- 张武, 侯国伟, 肖晓光, 等, 2019. 西湖凹陷低渗储层成因及优质储层主控因素. 中国海上油气, 31(3): 40—49.
- 赵文智, 胡素云, 王红军, 等, 2013. 中国中低丰度油气资源大型化成藏与分布. 石油勘探与开发, 40(1): 1—13.
- 赵玉娟, 杨香华, 朱红涛, 等, 2017. 白云凹陷古近系恩平组沉积背景差异及其烃类特征. 地质科技情报, 36(3): 156—163.
- 朱东亚, 张殿伟, 张荣强, 等, 2015. 深层白云岩储层油充注对孔隙保存作用研究. 地质学报, 89(4): 794—804.
- 朱如凯, 白斌, 崔景伟, 等, 2013. 非常规油气致密储集层微观结构研究进展. 古地理学报, 15(5): 615—623.
- 朱如凯, 邹才能, 张鼎, 等, 2009. 致密砂岩气藏储层成岩流体演化与致密成因机理: 以四川盆地上三叠统须家河组为例. 中国科学(D辑: 地球科学), 39(3): 327—339.
- 朱筱敏, 潘荣, 朱世发, 等, 2018. 致密储层研究进展和热点问题分析. 地学前缘, 25(2): 141—146.