

马永坤,徐乐意,孙辉,等. 珠江口盆地白云凹陷储层成岩特征及中深层储层勘探潜力. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(6): 1940-1950. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240240.

Ma Yongkun, Xu Leyi, Sun Hui, et al. Diagenetic Characteristics of Reservoirs and Middle-Deep Reservoirs Exploration Potential in Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(6): 1940-1950. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240240.

珠江口盆地白云凹陷储层成岩特征 及中深层储层勘探潜力

马永坤^{1,2}, 徐乐意^{1,2}, 孙辉^{1,2}, 汪晓萌^{1,2}, 李晓艳^{1,2}, 周凤娟^{1,2}

1. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 广东 深圳 518054

2. 中海石油深海开发有限公司, 广东 深圳 518054

摘要:珠江口盆地白云凹陷是深水勘探的重要目标,具有高变地温梯度特征,单井地温梯度高达66.4 °C/km。高地温场对储层成岩具有重要的控制作用,影响孔隙的演化和孔渗关系的变化趋势;然而,高地温梯度背景下地温梯度对储层质量的影响机理尚不清楚,严重制约了下一步的勘探部署。通过分析研究区始新统一中新统的岩石样品,采用对比研究的方法,综合分析了深水地区地温场、地层温度、岩石学组成和储层演化之间的关系。珠江组和珠海组的渗透率随着埋深和地层温度的增加迅速下降,在现今地温高于140 °C的情况下,渗透率通常小于1 mD^①,砂岩孔隙以次生孔隙为主,孔隙内部充填碳酸盐胶结物和自生黏土矿物;恩平组由于岩石学组分差异而表现出不同的演化特征,即使在孔隙度快速降低的情况下仍能保持较好的渗透率,可高达200 mD,恩平组砂岩为一套粗砂岩,颗粒以石英为主,原生孔隙保存,孔隙结构好,粒间充填少量胶结物,具有良好的孔渗关系。研究认为储层孔隙度、渗透率下降速率不仅受地温场的影响,同时也受砂岩原始组分的控制。

关键词: 储层;成岩作用;高地温场;储层孔隙演化;白云凹陷;珠江口盆地

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240240

中图分类号:P618.13

文献标志码:A

Diagenetic Characteristics of Reservoirs and Middle-Deep Reservoirs Exploration Potential in Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin

Ma Yongkun^{1,2}, Xu Leyi^{1,2}, Sun Hui^{1,2}, Wang Xiaomeng^{1,2}, Li Xiaoyan^{1,2}, Zhou Fengjuan^{1,2}

1. CNOOC China Limited, Shenzhen Branch, Shenzhen 518054, Guangdong, China

2. CNOOC Deepwater Development Limited, Shenzhen 518054, Guangdong, China

Abstract: Baiyun sag in the Pearl River Mouth basin is an important target for deepwater exploration, which has a highly variable geothermal gradient. The geothermal gradient of a single well is as high as 66.4 °C/km. The high geothermal field has an important control effect on the diagenesis of the

收稿日期:2024-09-30

作者简介:马永坤(1986—),男,工程师,主要从事沉积储层与石油地质研究,E-mail:mayk4@cnooc.com.cn

基金项目:中国海洋石油有限公司“十四五”重大科技项目(KJGG2021-0100)

Supported by the Major Science and Technology Project of CNOOC During the 14th Five-Year Plan Period (KJGG2021-0100)

①毫达西(mD)为非法定计量单位,1 mD=0.987×10⁻³ μm²,下同。

reservoir, affecting the evolution of pores and the changing trend of the relationship between porosity and permeability. However, the influence mechanism of geothermal gradient on reservoir quality under the background of high geothermal gradient is still unclear, which seriously restricts the further exploration deployment. By analyzing rock samples from Eocene to the Early Miocene in the study area, the relationship among geothermal field, formation temperature, petrological composition and reservoir evolution in deepwater area is comprehensively analyzed by means of comparative study. The permeability of Zhujiang Formation and Zhuhai Formation decreases rapidly with the increase of formation temperature and burial depth. When the formation temperature exceeds 140 °C, the permeability is usually less than 1 mD. The sandstone pores are mainly secondary pores with carbonate cement and authigenic clay minerals inside. However, Enping Formation exhibits different characteristics, maintaining a high permeability up to 200 mD, even with a rapid decrease in porosity. The sandstone of Enping Formation is a set of coarse-grained sandstone, mainly composed of quartz, with preserved primary pores, good pore structure, less intergranular filling with cement, and good porosity-permeability relationship. It could be concluded that the decreasing rate of porosity and permeability in the reservoir was controlled by the geothermal field as well as the primary composition of sandstone.

Key words: reservoir; diagenesis; high geothermal field; reservoir pore evolution; Baiyun sag; Pearl River Mouth basin

0 引言

珠江口盆地已发现一批大型气田,在南海深水显示区显示出良好的勘探前景。白云凹陷面积约为 $2.0 \times 10^4 \text{ km}^2$,最大沉积厚度约为 11 000 m,是珠江口盆地中面积最大、沉积厚度最厚的凹陷^[1]。白云凹陷位于古珠江水系下游,含沙量大,运输距离远,因此,该地区具有巨大的油气勘探潜力。然而,深水区深层储层物性明显变差,非均质性增强。总体上,研究区储层随埋藏深度的增加而物性变差。当埋深超过 2 300 ~ 2 400 m 时,油气显示依然活跃,但由于孔隙度、特别是渗透率明显降低,难以形成商业性油气藏。多种重大构造事件导致新生代白云凹陷经历了断陷期文昌组河湖相沉积、断坳期恩平组大型湖盆沉积、过渡期珠海组浅海陆架三角洲-陆坡深水沉积、坳陷期珠江组及其以上地层陆坡内盆地半深水-深水沉积等充填演化阶段,形成了白云深水区独特的弧前盆地-断陷盆地-断坳盆地-陆坡内盆地叠置的充填模式和断陷-断坳-坳陷的三层盆地结构^[2]。

与陆上油气勘探相比,深海油气勘探成本更高。因此,在海上油气勘探过程中,尽可能降低风险和成本是必要的。虽然目前深水区钻井较少,但了解成岩过程对于评价储层质量、部署进一步勘探和提高生产效率是必要的。温度直接影响成岩作用和储层质量^[3-4],以往的研究表明,即使在相同的温度下,不同地温梯度区域的储层性质也存在差异^[5-6]。在相

同温度下,砂岩压实率和孔隙度降低率与地温梯度正相关。对于具有相同成分和分选程度的砂岩样品,应用实验模拟方法证明地温梯度与孔隙度和渗透率降低率之间存在正相关关系^[7]。珠江口盆地白云凹陷和番禺低隆起不同地温梯度区砂岩成岩演化也存在差异。然而,地温梯度如何影响成岩作用仍不清楚。有学者认为,较高的温度会增加岩石或矿物的内能,降低颗粒之间的凝聚力,从而降低岩石的破裂强度^[8]。因此,岩石或矿物更容易变形,并且压实率增加。一般来说,埋深越大,砂岩储层质量越差。然而,即使在相同的埋深和温度下,白云凹陷储层质量仍存在差异。

本文从地温场和碎屑组分入手,探讨造成这种显著差异的控制因素及其形成机制,分析深层在岩石学特征改变情况下发育优质储层的条件。同时,初步探讨高地温场对砂岩储层成岩和储层孔隙演化的重要影响,通过分析现今埋深范围为 500 ~ 4 500 m 的砂岩储层,研究渐进埋藏过程中储层演化和成岩特征。

1 地质背景

位于南海北部的珠江口盆地是南海最具代表性的陆架坡折带及深水沉积区域(图 1)。白云凹陷位于珠江口盆地南部深水区,是盆地内面积最大、沉积地层最厚、油气资源潜力最大的凹陷^[9]。由于研究区处于减薄的洋陆过渡地壳和盆地构造转换带位

置,岩石圈强烈的伸展拆离薄化作用导致深部地幔物质异常活跃,热流背景明显增高,该过程对凹陷的沉积作用、生排烃产生了重要影响^[10]。白云凹陷是一个典型的深水“热”盆,单井现今地温梯度可高达 66.4 °C/km。有学者已经认识白云凹陷多期构造运动及其热动力学过程与机制的复杂性^[11-13],但热事件与高热流背景下储层的成岩响应特征、成岩作用与储层储集性能演化的特殊性及其对有利储层与油气勘探目标的预测等研究依然十分薄弱。珠江口盆地是中生代末期以来在伸展断陷基础上发育起来的被动大陆边缘型盆地,具有“下断上坳、下陆上海”的双层结构,下构造层主要包括文昌组、恩平组,上构造层为珠海组、珠江组、韩江组及以上层系^[14-16](图 2)。本文强调的中浅层为上构造层系珠江组和上珠海组,其特征是埋深较浅(通常小于 2 500 m)、地层温度较低,中深层为恩平组和文昌组,其特征是埋深较大(通常为 2 500~3 500 m)、地层温度较高^[17]。

2 中浅层储层成岩及演化特征

高地温背景下中浅层成岩作用在珠江组和珠海

组中表现为渗透率的显著降低、孔隙结构的改变,以及自生矿物的形成和转化。这一过程受高地温梯度的影响,压实作用、自生矿物种类及体积分数、溶蚀作用强度等方面与中—低地温梯度区存在明显差异。这些因素共同作用导致储层进入中成岩 B 阶段的深度有所不同,成为储层低渗的关键界面。在高温背景下,原生孔隙的丧失和次生孔隙的形成成为孔隙演化的主要特征,影响了储层的物性和储集性能。

2.1 岩石学特征

对研究区 88 个典型砂岩铸体薄片的显微镜下观察及定量统计结果表明,白云凹陷中浅层珠江组和珠海组砂岩的类型差别不大,以岩屑长石砂岩和长石岩屑砂岩为主(少量长石砂岩和岩屑石英砂岩);但骨架矿物的体积分数有一定变化,表现出较强的非均质性(图 3)。原始成分的差异为后期成岩和物性的演化奠定了基础。

2.2 热压实作用和黏土矿物快速转化加快成岩演化

受热作用影响,白云凹陷不同地温梯度地区砂岩储层的成岩演化过程存在一定差异^[18]。中—低

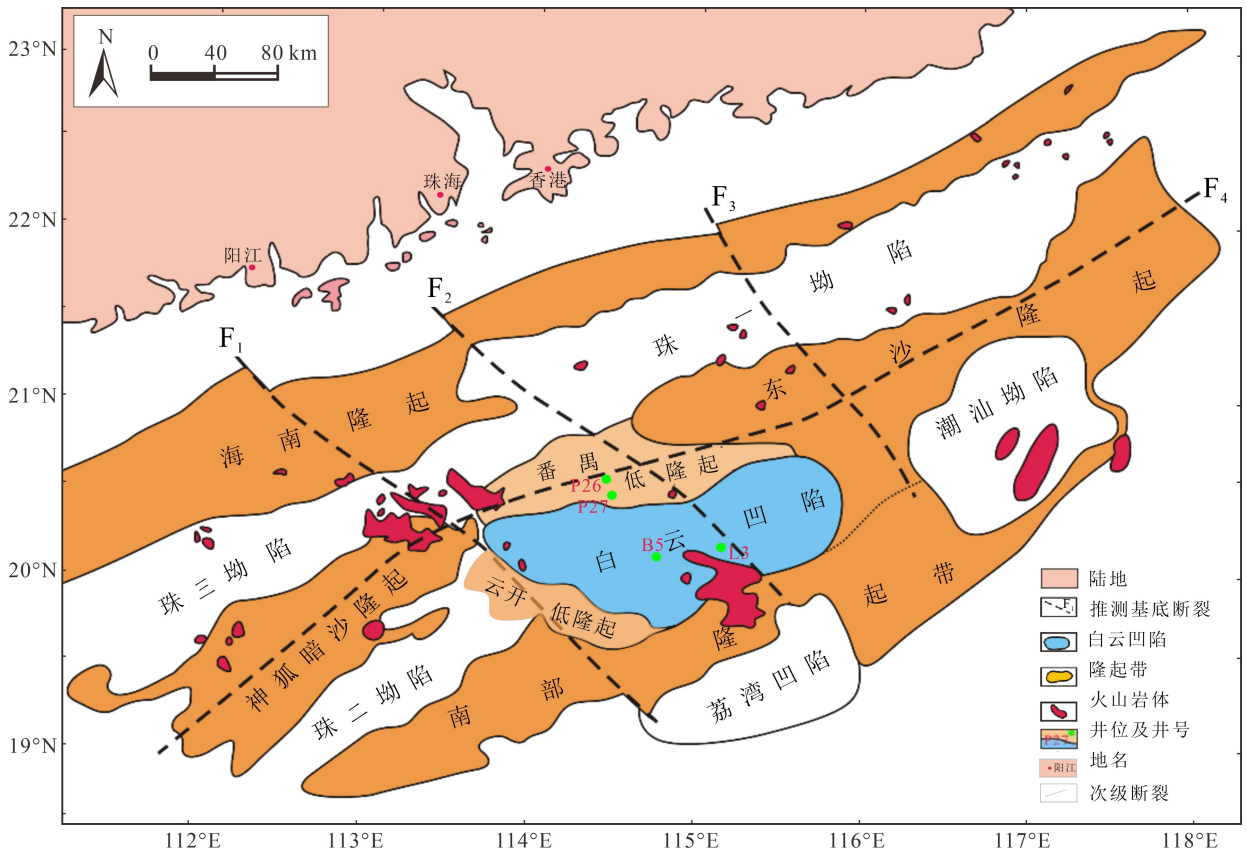
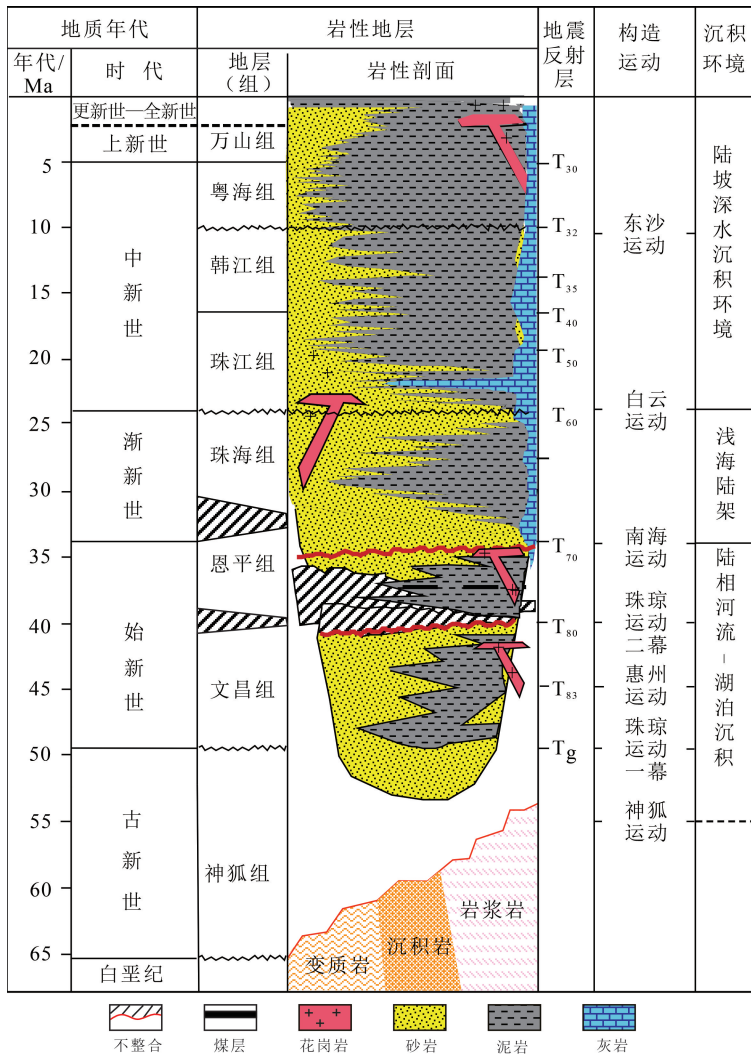


图 1 珠江口盆地白云凹陷区域构造位置图

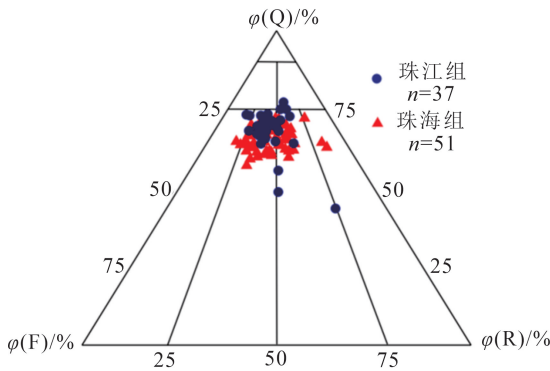
Fig.1 Tectonic location map of Baiyun sag in the Pearl River Mouth basin



据文献[17]修编。

图 2 白云凹陷地层及构造演化综合柱状图

Fig.2 Composite column diagram of stratigraphic and structural evolution in Baiyun sag



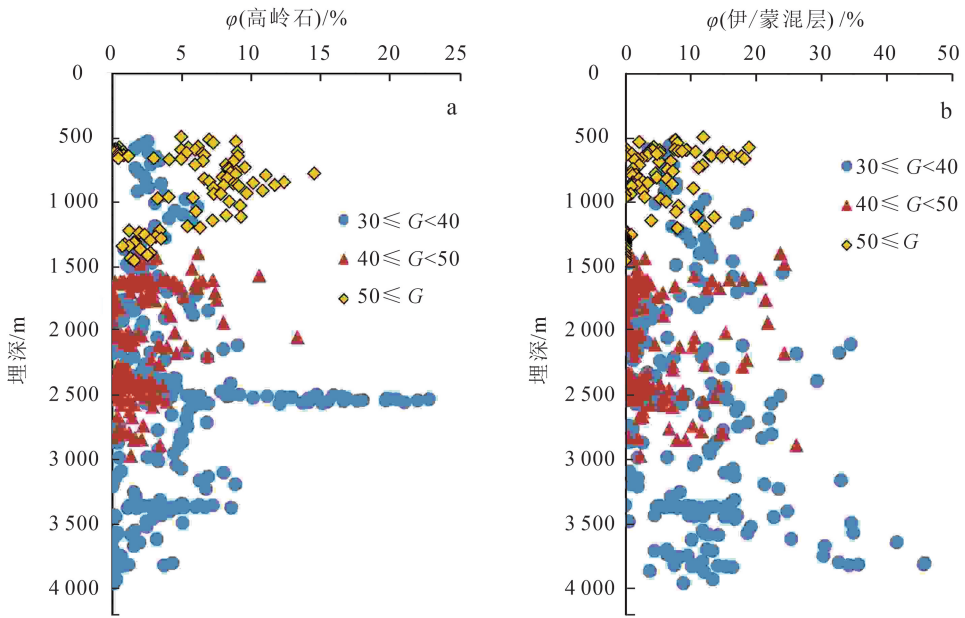
Q.石英;F.长石;R.岩屑。n.样品数。

图 3 珠江口盆地中浅层珠江组-珠海组砂岩三角分类图

Fig.3 Sandstone triangle classification diagram of shallow Zhujiang Formation and Zhuhai Formation in the Pearl River Mouth basin

地温梯度区由于上覆沉积地层较厚,地层增温速率较慢,砂岩储层的压实作用主要受静岩压实作用控制^[19];高地温梯度区珠海组增温速率较快,砂岩的压实作用受热压实作用和静岩压实作用的共同控制^[20]。低地温梯度区($<40\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$),伊/蒙混层与高岭石在从浅到深(500~4 000 m)的深度范围内均可见到,且伊/蒙混层黏土矿物随深度增加体积分数明显增高,最高可达 50%(图 4);中地温梯度(40~50 $^{\circ}\text{C}/\text{km}$)区,伊/蒙混层与高岭石发育于 1 500~3 000 m,但随深度增加体积分数减少(图 4);高地温梯度($\geq 50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$)和受异常热影响区,伊/蒙混层与高岭石在约 1 500 m 深度以下即消失(图 4)。

此外,在高热流背景下,黏土矿物的转化和自生黏土矿物的生成明显受到影响,在埋藏成岩作用过



G 。地温梯度, $^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。样品为白云凹陷不同地温梯度区珠江组-珠海组砂岩样 ($n=120$)。

图 4 白云凹陷不同地温梯度区砂岩储层中黏土矿物随埋深的变化趋势

Fig. 4 Variation trend of kaolinite and illite/montmorillonite mixed-layer clay minerals in deep sandstone reservoirs with different geothermal gradients in Baiyun sag

程中,高岭石和钾长石反应生成伊利石,严重影响储层物性。在地温梯度较高的地区,随埋深的增加地层升温速率较快,热作用加速了砂岩中高岭石向伊利石的转化。

高地温梯度区的成岩演化序列与中—低地温梯度区基本一致,但由于受到深部热流体的影响,压实作用特征、自生矿物种类及体积分数、溶蚀作用强度等特征与中—低地温梯度区存在差异^[21],最终导致进入中成岩 B 阶段界面的深度明显不同。该界面上下储层特征发生明显变化,也是导致储层低渗的一个关键界面(图 5)。在低地温梯度地区,中浅层珠江组-珠海组砂岩强压实界线以线压实来界定,线接触的门限埋深在 3 000 m 左右,而在高地温梯度这一门限埋深上升到 2 300 m 以浅。

2.3 中浅层长石砂岩物性演化特征

在高地温背景下,压实作用对储层孔隙演化显示出重要的作用,原生孔隙受静岩压实与热压实作用的共同控制,孔隙度快速稳定下降,从沉积时的平均 40%降低到地层地温 160 $^{\circ}\text{C}$ 时的 10.1%(图 6a),渗透率快速降至 0.1 mD(图 6b)。岩石学研究表明,研究区砂岩在浅埋条件下,砂岩孔隙类型以原生孔为主,仅存在少量次生孔和微孔,地层高温条件下

变为以次生孔和微孔为主的孔隙组合。

高加温速率加快成岩演化进程。在埋深较浅处由于温度较高,已经达到高岭石消失及蒙脱石向伊利石转化所需要的门槛温度^[22]。当温度为 120~130 $^{\circ}\text{C}$ 时,大多数原生孔隙已因机械压实作用而丧失或被胶结物充填(石英、含铁碳酸盐、伊利石等),此时埋深大约在 2 500 m。在更大埋深和更高温度下,荔湾地区珠海组砂岩表现出强烈的伊利石化特征,显微镜下照片可见长石类的溶解形成次生孔隙,总孔隙度通常并没有增加,而是被晚期沉淀的铁白云石、伊利石、石英胶结物等所抵消(图 7);同时孔隙结构变差导致渗透率进一步降低,没有被胶结物充填的砂岩储层成为了有利的储集体,次生孔隙和微孔成为主要的孔隙类型。当地温超过 140 $^{\circ}\text{C}$ 时,渗透率普遍降至 1 mD 以下,砂岩孔隙主要由次生孔隙构成,内部充填有碳酸盐胶结物和自生黏土矿物。

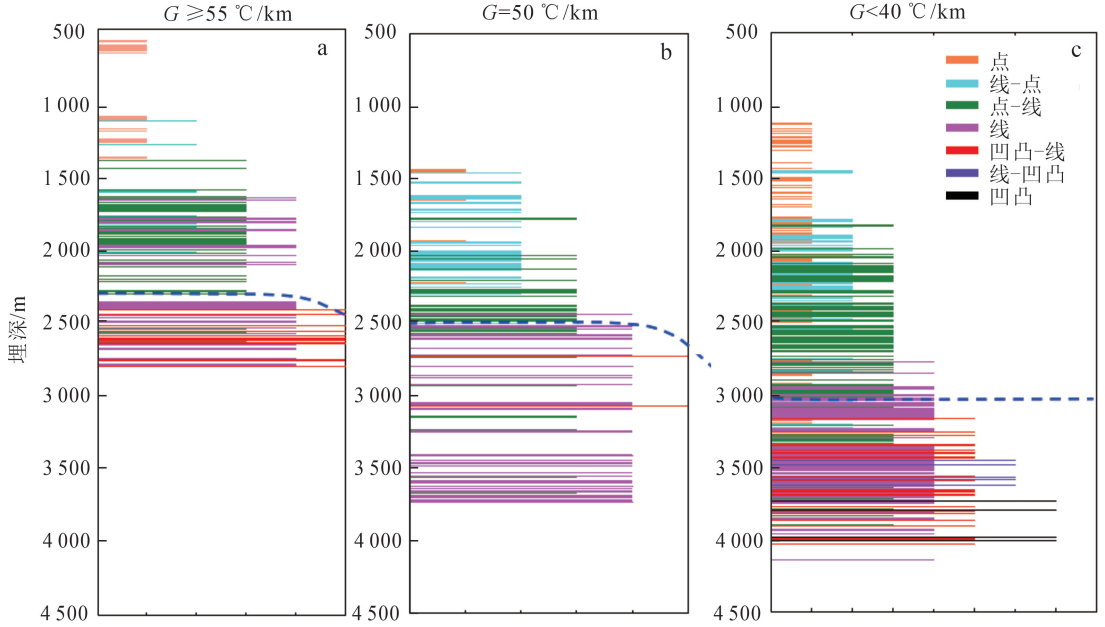
3 中深层储层特征及勘探潜力

针对中深层(3 000~4 000 m)层系开展了沉积-成岩综合研究,认识到中深层恩平组-文昌组石英砂岩具有发育甜点储层的条件,具有很好的勘探潜力。

3.1 岩石学特征

物源和沉积体系的差异直接导致了白云凹陷恩平组和珠海组砂岩结构成熟度和成分成熟度的差异, 进而影响储层成岩作用类型和成岩演化过程, 最

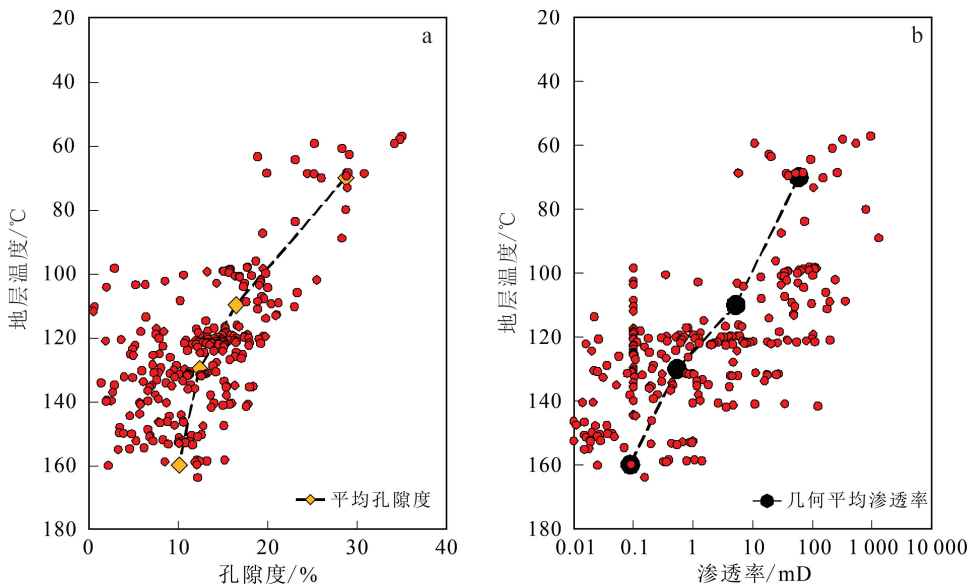
终导致了恩平组和珠海组的储层物性差异。白云凹陷深层井(B5、P26、P27 等) 储层岩石学特征(图 8) 显示, 恩平组砂岩为岩屑石英砂岩和长石石英砂岩(图 8a), 具有成分成熟度高、结构成熟度中等的



a. 地温梯度 ≥ 55 °C/km 条件下, 中成岩 B 界面埋深约 2 300 m; b. 地温梯度为 50 °C/km 条件下, 中成岩 B 界面埋深约 2 500 m; c. 地温梯度 < 40 °C/km 条件下, 中成岩 B 界面埋深约 3 000 m。

图 5 研究区颗粒接触关系以及对应的中成岩阶段 B 界面

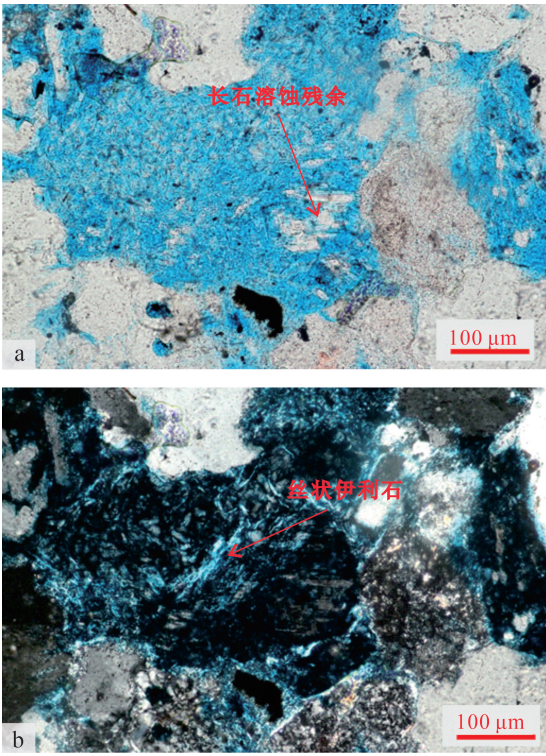
Fig.5 Particle contact relationships and the corresponding interface of diagenetic stage B in the study area



$n = 120$ 。

图 6 白云凹陷 B5、L3 井区珠江组-珠海组砂岩孔隙度(a)、渗透率(b)随地层温度变化趋势

Fig.6 Variation trend of sandstone porosity (a) and permeability (b) of Zhujiang Formation and Zhuhai Formation with formation temperature in B5 and L3 well areas of Baiyun sag



a. 铸体薄片(-)显微照片,埋深 2 795.5 m,长石溶蚀残余,粒间孔隙发育;b. 铸体薄片(+)显微照片,埋深 2 795.5 m,丝状伊利石充填粒间孔隙。

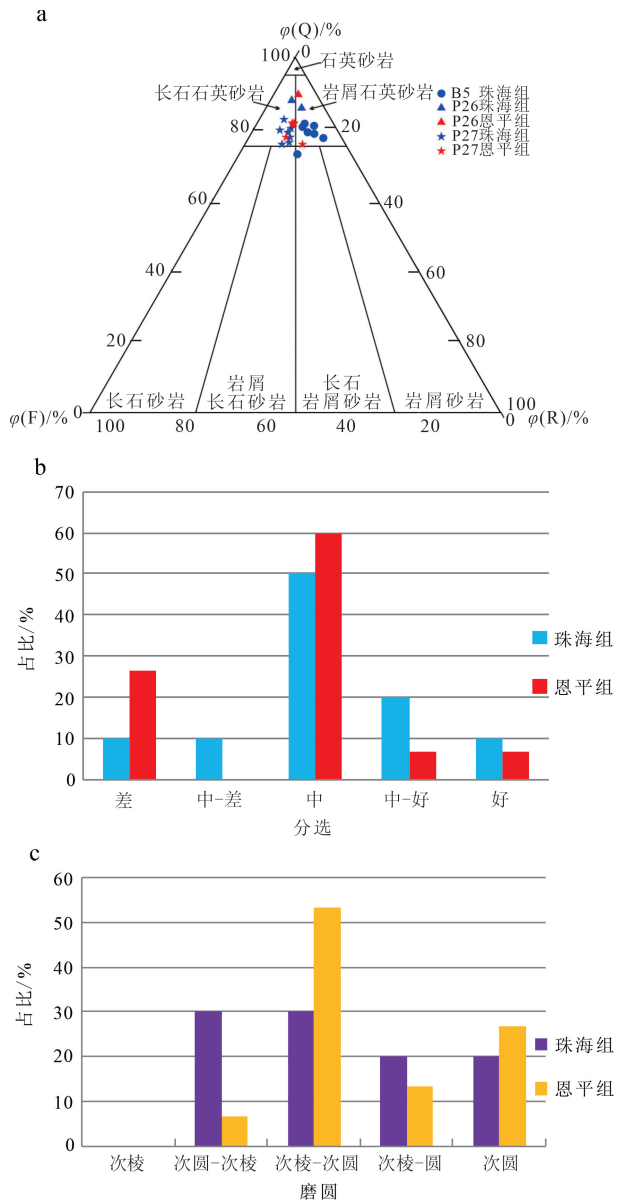
图 7 L3 井高地温背景下粒间高岭石发生伊利石化

Fig.7 Illitization of intergranular kaolinite in Well L3 under high geothermal conditions

特点(图 8b)。从成分成熟度来看,恩平组石英体积分数为 75.5%~89.5%,平均为 79.87%,石英体积分数较高,珠海组明显低于恩平组。恩平组成分成熟度指数(Q/(F+R))为 3.95,高于珠海组的 3.34。从结构成熟度上来看,恩平组以中粗砂岩到砾岩为主,砂岩颗粒粗,泥质体积分数平均为 2.6%,砂岩分选以中等为主,磨圆以次棱-次圆为主(图 8c);珠海组以极细-细砂岩为主,颗粒较细,泥质体积分数平均为 9.3%(B5 井),砂岩分选中等。

3.2 差异成岩演化是深部储层孔渗保存的关键

中深层恩平组砂岩与中浅层珠江组-珠海组砂岩在结构成熟度和成分成熟度上存在显著差异。这种差异直接导致了各自的成岩演化路径不同,从而影响了最终的孔渗物性。具体而言,从典型井 P26 和 P27 的观察可以明显看出,中深层恩平组储层在较大埋深条件下,受到压实作用的显著影响,孔隙度明显降低(图 9a);这一现象可以归因于强压实作用对孔隙结构的改变。虽然孔隙度有所降低,但由于其孔隙结构依然保留较为良好,这些储层仍保持了



a. 中深层砂岩三角分类图;b. 恩平组、珠海组砂岩分选对比图;c. 恩平组、珠海组砂岩磨圆对比图。n = 24。

图 8 白云凹陷 B5、P26、P27 井区恩平组、珠海组砂岩储层岩石学特征

Fig.8 Petrological characteristics of sandstone reservoirs of Enping Formation and Zhuhai Formation sandstone in B5, P26 and P27 well area of Baiyun sag

较好的渗透性(图 9b)。中深层文昌组和恩平组由于具备更优的孔隙结构,最终的渗透性依然优于中浅层珠江组和珠海组。这一结果表明,成岩演化路径和储层的物理特征在油气勘探和开发中扮演着关键角色。

以中深层井 P26、P27 珠海组和恩平组典型成岩作用为特征建立成岩演化模式(图 10)。其中,珠海组以高泥质体积分数细砂岩或者低泥质体积分数

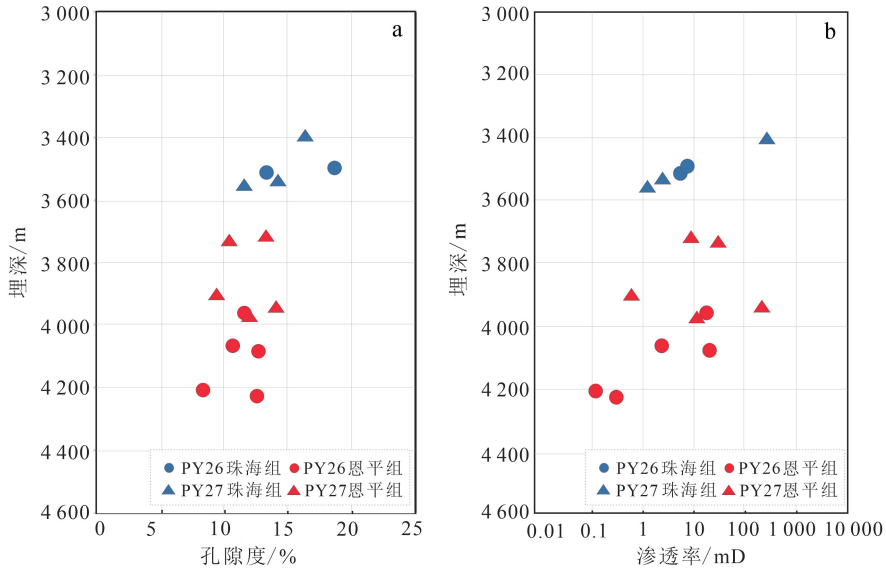


图 9 白云凹陷典型井中深层砂岩储层物性特征

Fig.9 Porosity and permeability characteristics of mid-deep sandstone reservoirs in typical wells of Baiyun sag

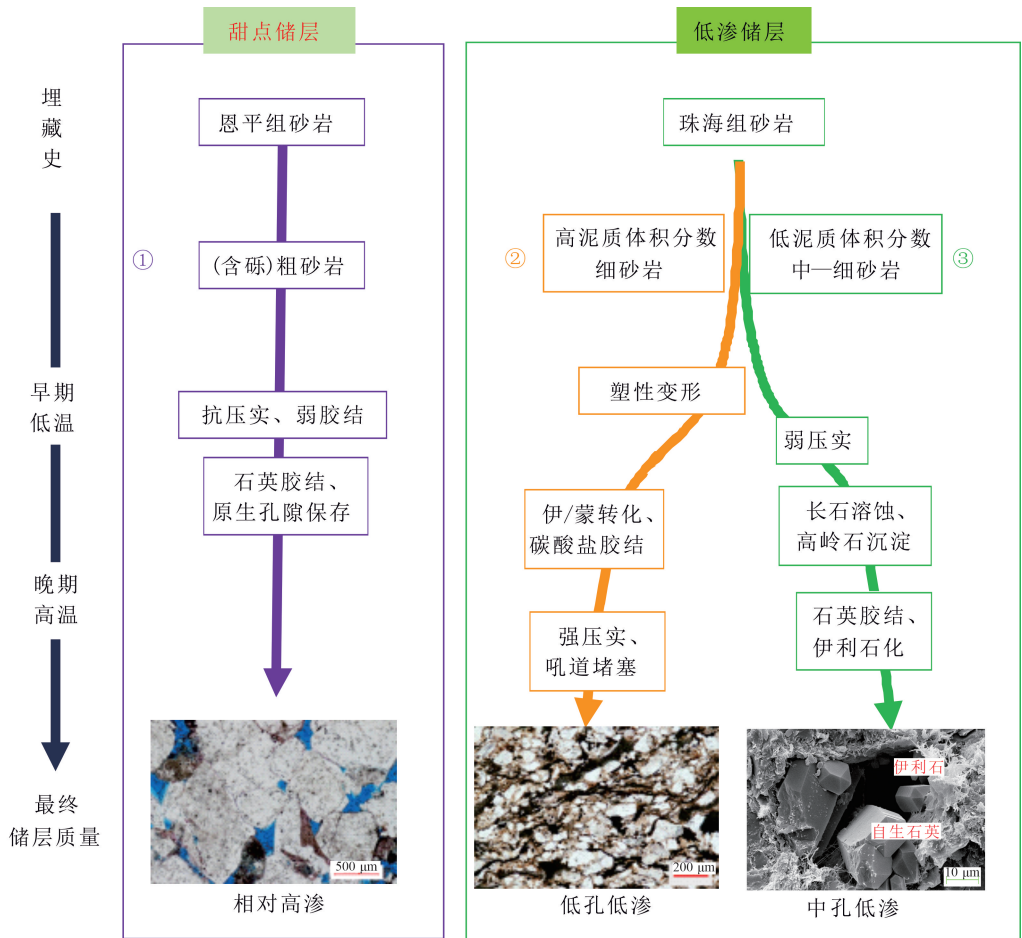


图 10 白云凹陷主要类型储层成岩演化模式

Fig.10 Diagenetic evolution patterns of major reservoir types in Baiyun sag

中细砂岩为主,黏土矿物体积分数普遍较高。在这一模式中,珠海组砂岩表现出两种不同的成岩特征:首先,高泥质体积分数细砂岩在强压实作用下经历了岩石的塑性变形;此外,碳酸盐矿物的胶结作用也显著增强,这一过程共同导致了孔隙吼道的堵塞,形成了低孔渗物性。另一方面,低泥质体积分数中细砂岩在较弱的压实作用下发生了长石的溶蚀、高岭石的沉淀以及石英胶结和伊利石化的作用^[23-25],这些因素相互作用形成了中低孔渗物性。与之形成对比的是恩平组砂岩,主要由干净的(含砾)粗砂岩构成,黏土矿物体积分数较低。在大理深条件下,恩平组砂岩的岩石抗压实能力较强,而碳酸盐胶结作用较弱,主要以石英胶结为主,这使得原生孔隙得以有效保留,从而形成了相对高渗的储层。综合而言,珠海组和恩平组的成岩演化模式在成分、压力和黏土矿物等方面存在显著差异,这些差异直接影响了储层的物性特征,进而影响其在油气勘探中的潜力。

在白云凹陷中深层,优质储层的形成受到了沉积作用和成岩作用的共同控制。沉积作用提供了高结构成熟度和成分成熟度、粗粒以及低泥质的砂岩,而成岩作用则通过控制弱胶结作用、弱压实以及超压改善物性等方面,进一步优化了储层的物性。因此,中深层储层的发育不仅依赖于沉积环境的优势,还与成岩特征的独特性密切相关。

4 结论与启示

不同热流背景下储层的差异性成岩孔隙演化路径与演化过程,直接导致储层孔隙结构与储集性能的明显差别。基于白云凹陷实际情况和自身的特殊性,得出如下认识:

1) 高热流背景下的成岩影响。在白云深水区进行中浅层常规层系勘探时,应充分重视高热流对储层成岩的影响。特别是在高地温梯度区,随着埋深的增加,储层质量风险显著提高。研究表明,高地温梯度区的孔隙度和渗透率降低速率始终大于低地温梯度区,这一特征为勘探策略的制定提供了重要参考。

2) 成岩演化与物性变化。高地温区域,砂岩储集层的物性随着埋藏深度的增加而迅速下降,成岩演化进程加快,导致成岩后期孔隙结构的复杂化。地层温度通过改变颗粒的抗压强度、矿物的溶解度、黏土矿物的转化及水岩反应速率等多种途径影响成岩作用过程,从而直接影响储层的质量和储集能力。

3) 新层系的潜力。新层系勘探中需充分认识新层系砂岩在岩石学、沉积特征及成岩演化等方面与常规层系的显著差异。尽管深层新层系砂岩面临更大的埋藏压力,但依然具备发育优质储层的潜力。因此,综合考虑这些差异有助于优化勘探策略,提高成功率。

4) 层系差异性的重视。在勘探过程中,必须区别对待并充分认识到两套层系的差异性和特殊性。这不仅有助于准确预测有利储集体的发育,也为明确风险储层的存在和规避勘探风险提供了科学依据。通过对这两种层系的全面理解和研究,能够为未来的油气勘探提供更为精准的决策支持。

参考文献(References):

- [1] 舒梁锋,张向涛,张忠涛,等.珠江口盆地白云南洼珠海组陆架边缘三角洲沉积体系演化[J].沉积学报, 2022, 40(3): 825-837.
Shu Liangfeng, Zhang Xiangtao, Zhang Zhongtao, et al. Evolution of the Shelf-Margin Delta Sedimentary System in the Zhuhai Formation in the South Subbasin of Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(3): 825-837.
- [2] 柳保军,庞雄,颜承志,等.珠江口盆地白云深水区沉积充填演化及控制因素分析[J].中国海上油气, 2011, 23(1): 19-25.
Liu Baojun, Pang Xiong, Yan Chengzhi, et al. An Analysis of Depositional Evolution and Its Controls in Baiyun Deep-Water Area, Pearl River Mouth Basin [J]. China Offshore Oil and Gas, 2011, 23(1): 19-25.
- [3] Schmid S, Worden R H, Fisher Q J. Diagenesis and Reservoir Quality of the Sherwood Sandstone (Triassic), Corrib Field, Slyne Basin, West of Ireland [J]. Marine & Petroleum Geology, 2004, 21(3): 299-315.
- [4] Dutton P S, Loucks G R. Diagenetic Controls on Evolution of Porosity and Permeability in Lower Tertiary Wilcox Sandstones from Shallow to Ultradeep (200-6 700 m) Burial, Gulf of Mexico Basin, USA [J]. Marine and Petroleum Geology, 2010, 27(1): 69-81.
- [5] Lander R, Laubach S. Insights into Rates of Fracture Growth and Sealing from a Model for Quartz Cementation in Fractured Sandstones [J]. Geological Society of America Bulletin, 2015, 127(3/4): 516-538.
- [6] McBride E F. Effects of Temperature and Pressure on

- the Formation of Sandstone Reservoirs: Insights from the Geochemistry of Natural Gas[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(8): 1433-1448.
- [7] Palchik V. Influence of Porosity and Elastic Modulus on Uniaxial Compressive Strength in Soft Brittle Porous Sandstones [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1999, 32(4): 303-309.
- [8] Gao X P, Yang C H, Wu W, et al. Experimental Studies on Temperature Effect of Mechanical Properties of Rock Salt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(11): 1775-1778.
- [9] 彭大钧, 陈长民, 庞雄, 等. 南海珠江口盆地深水扇系统的发现[J]. 石油学报, 2004, 25(5): 18-23.
- Peng Dajun, Chen Changmin, Pang Xiong, et al. Discovery of Deep-Water Fan System in South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(5): 17-23.
- [10] 单玄龙, 热西提·亚力坤, 刘培, 等. 珠江口盆地西江主洼珠琼运动的沉积响应及构造意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(2): 329-342.
- Shan Xuanlong, Yalikus · Rexiti, Liu Pei, et al. Sedimentary Response and Tectonic Significance of Zhuqiong Movement in Xijiang Main Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(2): 329-342.
- [11] 邵磊, 庞雄, 张功成, 等. 南海北部渐新世末的构造事件[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2009, 34(5): 717-724.
- Shao Lei, Pang Xiong, Zhang Gongcheng, et al. Late Oligocene Tectonic Event in the Northern South China Sea and Its Implications [J]. Earth Science, 2009, 34(5): 717-724.
- [12] 李三忠, 曹现志, 王光增, 等. 太平洋板块中—新生代构造演化及板块重建[J]. 地质力学学报, 2019, 25(5): 642-677.
- Li Sanzhong, Cao Xianzhi, Wang Guangzeng, et al. Meso-Cenozoic Tectonic Evolution and Plate Reconstruction of the Pacific Plate [J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25(5): 642-677.
- [13] 赵中贤, 孙珍, 陈广浩, 等. 南沙海域新生代构造特征和沉降演化[J]. 地球科学, 2011, 36(5): 815-822.
- Zhao Zhongxian, Sun Zhen, Chen Guanghao, et al. Cenozoic Structural Characteristics and Subsidence Evolution in Nansha [J]. Earth Science, 2011, 36(5): 815-822.
- [14] 秦国权. 微体古生物在珠江口盆地新生代晚期层序地层学研究中的应用[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1996, 16(4): 1-18.
- Qin Guoquan. Application of Microfauna in the Late Cenozoic Stratigraphy of the Pearl River Mouth Basin [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1996, 16(4): 1-18.
- [15] 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 Baojun, Pang Xiong, Yan Chengzhi, 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.
- [16] 米立军, 柳保军, 何敏, 等. 南海北部陆缘白云深水油气地质特征与勘探方向[J]. 中国海上油气, 2016, 28(2): 10-22.
- Mi Lijun, Liu Baojun, He Min, et al. Petroleum Geology Characteristics and Exploration Direction in Baiyun Deep Water Area, Northern Continental Margin of the South China Sea [J]. China Offshore Oil and Gas, 2016, 28(2): 10-22.
- [17] 庞雄, 陈长民, 彭大钧, 等. 南海北部白云深水区之基础地质[J]. 中国海上油气, 2008, 20(4): 215-222.
- Pang Xiong, Chen Changmin, Peng Dajun, et al. Fundamental Geology of the Baiyun Deepwater Area in Northern South China Sea [J]. China Offshore Oil and Gas, 2008, 20(4): 215-222.
- [18] 李驰, 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 Chi, Luo Jinglan, Hu Haiyan, et al. Thermodynamic Impact on Deepwater Sandstone Diagenetic Evolution of Zhuhai Formation in Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Earth Science, 2019, 44(2): 572-587.
- [19] 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 Jinglan, He Min, Pang Xiong, et al. Diagenetic Response on Thermal Evolution Events and High Geothermal Gradients in the Southern Pear River Mouth Basin and Its Enlightenment to Hydrocarbon Exploration [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(Sup. 1): 90-104.
- [20] 李驰. 热流背景差异对白云凹陷珠海组砂岩储层埋藏—成岩—孔隙演化过程及储集性能的影响[D]. 西安: 西北大学, 2017.

- Li Chi. The Impact of Thermal Flow Background Differences on the Burial-Diagenesis-Porosity Evolution Process and Reservoir Properties of Sandstone in the Zhuhai Formation of Baiyun Sag[D]. Xi'an: Northwest University, 2017.
- [21] 张立亚, 徐文, 沈艳杰. 松辽盆地南部深层致密砂岩气储层形成机制及成藏主控因素[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(5): 1707 - 1717.
- Zhang Liya, Xu Wen, Shen Yanjie. Formation Mechanism and the Main Controlling Factors of Deep Tight Sandstone Gas Reservoir in Southern Songliao Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(5): 1707 - 1717.
- [22] 张丽, 陈淑慧. 珠江口盆地东部地区不同地温梯度下储层特征响应关系[J]. 中国海上油气, 2017, 29(1): 29 - 38.
- Zhang Li, Chen Shuhui. Reservoir Property Response Relationship Under Different Geothermal Gradients in the Eastern Area of the Pearl River Mouth Basin [J]. China Offshore Oil and Gas, 2017, 29(1): 29 - 38.
- [23] Velde B, Vasseur G. Estimation of the Diagenetic Smectite to Illite Transformation in Time-Temperature Space [J]. American Mineralogist, 1992, 77(9): 967 - 976.
- [24] 吴健, 张恒荣, 胡向阳, 等. 北部湾盆地复杂孔隙结构含砾砂岩低阻油层综合评价方法[J]. 特种油气藏, 2023, 30(5): 67 - 76.
- Wu Jian, Zhang Hengrong, Hu Xiangyang, et al. Comprehensive Evaluation Method of Low-Resistivity Reservoirs in Gravelly Sandstone with Complex Pore Structure in Beibuwan Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2023, 30(5): 67 - 76.
- [25] 梁光河, 张宝林. 从陆缘伸展探讨新生代南海构造演化[J]. 地质通报, 2024, 43(1): 20 - 32.
- Liang Guanghe, Zhang Baolin. Discussion on the Cenozoic Tectonic Evolution of the South China Sea from Continental Margin Extension [J]. Geological Bulletin of China, 2024, 43(1): 20 - 32.