

断陷湖盆低勘探区源-汇系统与烃源岩预测

——以珠江口盆地珠一坳陷北部洼陷区为例

刘 豪¹,徐长贵²,高阳东³,林鹤鸣³,邱欣卫³,剧永涛⁴,汪旭东³,李 磊⁵,孟 俊¹,阙晓明³

[1. 中国地质大学(北京),北京 100083;2. 中海石油(中国)有限公司,北京 100010;3. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司,广东 深圳 518054;4. 华北理工大学,河北 唐山 063210;5. 西安石油大学,陕西 西安 710065]

摘要:烃源岩是沉积盆地含油气系统中决定油气聚集与成藏的关键因素之一。针对盆地或洼陷中勘探程度相对较低、钻井较少且烃源岩指标不丰富等烃源岩预测的难点,以珠江口盆地珠一坳陷北部低勘探区为例,从“找湖(深湖-半深湖)”、“寻泥(深湖-半深湖泥岩)”、“定烃(烃源岩预测与评价)”的角度,开展源-汇系统与烃源岩预测系统性分析。首先,以“找湖”为目的,通过多期构造古地貌恢复,阐明原始盆地面貌与古湖盆发育位置,结合“地震前积确定湖盆边界、坡折体系确定深湖-半深湖分布范围、生化指标确定湖盆古环境特征、构造强度确定湖盆规模”等分析,对低勘探区的深湖-半深湖区进行确认并对潜在发育烃源岩的洼陷进行初步遴选,研究认为文昌期 HF33 等洼陷和下恩平期 HZ5 等洼陷具备发育深湖-半深湖泥岩的潜力。其次,通过古物源、古环境和沉积体系的分析,结合构造古地貌发育特征,开展源-汇系统重建及深湖-半深湖相泥岩发育的地质背景分析,通过源-汇系统各配置要素的数值模拟,指出中等物源供给强度、细物源粒度、高湖平面、大可容空间及欠补偿-均衡补偿型盆地有利于富泥型湖泊相沉积。最后,以成熟勘探区已钻遇优质烃源岩的钻井为基础,分析与烃源岩层对应的4类深湖-半深湖地震相及其地质背景,构建成熟区“烃源岩相(烃源岩地震相)”,结合对珠一坳陷主要富烃洼陷富烃要素的系统总结,开展低勘探区优质烃源岩多因素、多维度评价与最终排序。通过研究,指出 LF22、HF33、HZ24(上、下文昌组),LF7和 HZ10(下文昌组)等洼陷为 I 级潜在富生烃洼陷;HZ5 和 HZ11 洼陷(下恩平组)为 II 级潜在生烃洼陷。部分洼陷烃源岩的预测和评价结果在实际勘探中已得到证实。

关键词:烃源岩地震相;烃源岩预测;低勘探区;源-汇系统;古近系;珠江口盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Source-to-sink system and hydrocarbon source rock prediction of underexplored areas in rifted lacustrine basins: A case study on northern lows in Zhu I Depression, Pearl River Mouth Basin

LIU Hao¹, XU Changgui², GAO Yangdong³, LIN Heming³, QIU Xinwei³, JU Yongtao⁴, WANG Xudong³, LI Lei⁵, MENG Jun¹, QUE Xiaoming³

[1. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. China National Offshore Oil Corporation, Beijing 100010, China; 3. China National Offshore Corporation-Shenzhen Branch, Shenzhen, Guangdong 518054, China; 4. North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063210, China; 5. Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China]

Abstract: Hydrocarbon source rock is one of the key factors controlling oil/gas accumulation in petroliferous system of a sedimentary basin. Focusing on the challenges facing hydrocarbon source rock prediction in basins or lows with relatively low exploration maturity, sparsely distributed drilling wells and insufficient source rock index, we take the underexplored areas in northern Zhu I Depression in the Pearl River Mouth Basin (PRMB) as an example to systematically analyze the source-to-sink system and predict source rocks from the perspectives of “searching for lake (deep-to-semi-deep lake)”, “recognizing mudstones (deep-to-semi-deep lacustrine mudstones)”, and “identifying hydrocarbon (hydrocarbon source rock prediction and evaluation)”. First, the original basin features and location of the paleo-lacustrine basin are illustrated by restoring multi-stage tectono-palaeogeomorphology to “find the lake”; and the

收稿日期:2023-02-09;修订日期:2023-04-16。

第一作者简介:刘豪(1974—),男,教授、博士生导师,盆地分析、构造沉积学和海洋地质资源。E-mail: hyluhao@cugb.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(41676050);国家自然科学基金重点项目(42230816);中央高校优秀教师基金项目(35832017108)。

deep-to-semi-deep lake is identified in the underexplored area together with preliminary selection of potential lows with well-developed hydrocarbon source rocks in combination with analyses including “identifying the lacustrine basin boundary by seismic progradational reflection, determining the scope of the deep-to-semi-deep lake by slope break system, illustrating paleo-environment characters by biochemical index, and defining the lacustrine basin scale by tectonic intensity”. The results indicate that five lows formed during the Wenchang depositional period, and five lows formed during the depositional period of the lower Enping Formation have the potential of developing deep-to-semi-deep lacustrine mudstones. Second, the reconstruction of source-to-sink system and the geological analysis of deep-to-semi-deep lacustrine mudstone development are conducted through analyses of paleo-provenance, paleo-environment and depositional systems, as well as tectono-palaeogeomorphology features; various configuration elements simulation results of the source-to-sink system show that basins characterized by medium sediment supply intensity, fine-grained source materials, high lake level, large accommodation space and under-equal or equal compensation are favorable for the deposition of mud-rich lacustrine facies. Finally, based on data of exploratory wells encountering high-quality hydrocarbon source rocks in mature exploration areas, we analyze four types of deep-to-semi-deep seismic facies and their geologic backgrounds corresponding to hydrocarbon source rock intervals, establish the “hydrocarbon source rock facies (seismic facies of hydrocarbon source rocks)” of the mature exploration areas. Coupled with the systematic summary of hydrocarbon-enrichment factors in main hydrocarbon-rich lows of the Zhu I Depression, we assess and rank the high-quality hydrocarbon source rocks in the underexplored areas with multiple factors and from multi-dimensional points of view. The research results also indicate that the first-order potentially hydrocarbon-rich lows include LF22, HF33, and HZ24 (with the lower and upper Wenchang Formation as source rocks), as well as the LF7 and HF10 (with the lower Wenchang Formation as source rocks); the second-order potentially hydrocarbon-rich ones are HZ5 and HZ11 (with the lower Enping Formation as source rocks), with the hydrocarbon source rock prediction and evaluation results of some lows having been testified in practical exploration.

Key words: seismic facies of source rocks, source rock prediction, underexplored area, source-to-sink system, Paleogene, Pearl River Mouth Basin (PRMB)

引用格式:刘豪,徐长贵,高阳东,等.断陷湖盆低勘探区源-汇系统与烃源岩预测——以珠江口盆地珠一坳陷北部洼陷区为例[J].石油与天然气地质,2023,44(3):565–583. DOI:10.11743/ogg20230304.

LIU Hao, XU Changgui, GAO Yangdong, et al. Source-to-sink system and hydrocarbon source rock prediction of underexplored areas in rifted lacustrine basins: A case study on northern lows in Zhu I Depression, Pearl River Mouth Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(3): 565–583. DOI:10.11743/ogg20230304.

烃源岩是沉积盆地含油气系统中主要的地质要素,是决定油气聚集与成藏的关键因素之一,盆地有效烃源岩分布研究是降低勘探风险的重要地质基础^[1]。中国油气资源以陆相为主,在众多盆地中成功地勘探开发了复杂的陆相油气,在发展陆相油气地质理论体系的同时^[2],成功推动了烃源岩预测技术和方法的进步^[3–8]。然而,对于某些勘探程度相对较低、钻井较少且烃源岩指标不丰富的盆地或洼陷而言,传统的烃源岩预测方法很难实现烃源岩的准确预测和评价,进而制约盆地油气勘探。

有机质富集研究对于寻找优质烃源岩、评价盆地的油气远景具有极其重要的意义。有机质富集受沉积速率、原始产生率、古气候等多种因素控制。对于内陆湖盆而言,湖泊的有机质丰度则可能是湖盆构造、湖盆

形态、有机质沉积过程等相互作用的结果^[9–15]。不难看出,开展盆地级别构造古地貌、原始盆地与源-汇系统重建,探讨源-汇系统控制作用与潜在烃源岩之间的内在联系,结合成熟勘探区的古环境、优质烃源岩发育地质背景的对比分析,对无井或少井的低勘探区烃源岩预测具有重要意义。

珠江口盆地珠一坳陷北部地区共发育11个次级洼陷(图1),除陆丰南地区(如LF13东、LF13西和LF15洼陷)勘探程度相对较高外,其他洼陷具有“勘探程度低、研究程度低、钻井数量少、烃源岩样品及地化分析指标少”等特征,烃源岩分布与洼陷的资源量预测一直未得到系统研究,这明显制约了珠江口盆地北部地区油气勘探。有效烃源岩及优质烃源岩预测成为珠一坳陷北部少井区取得油气勘探突破的关键。本文无意于

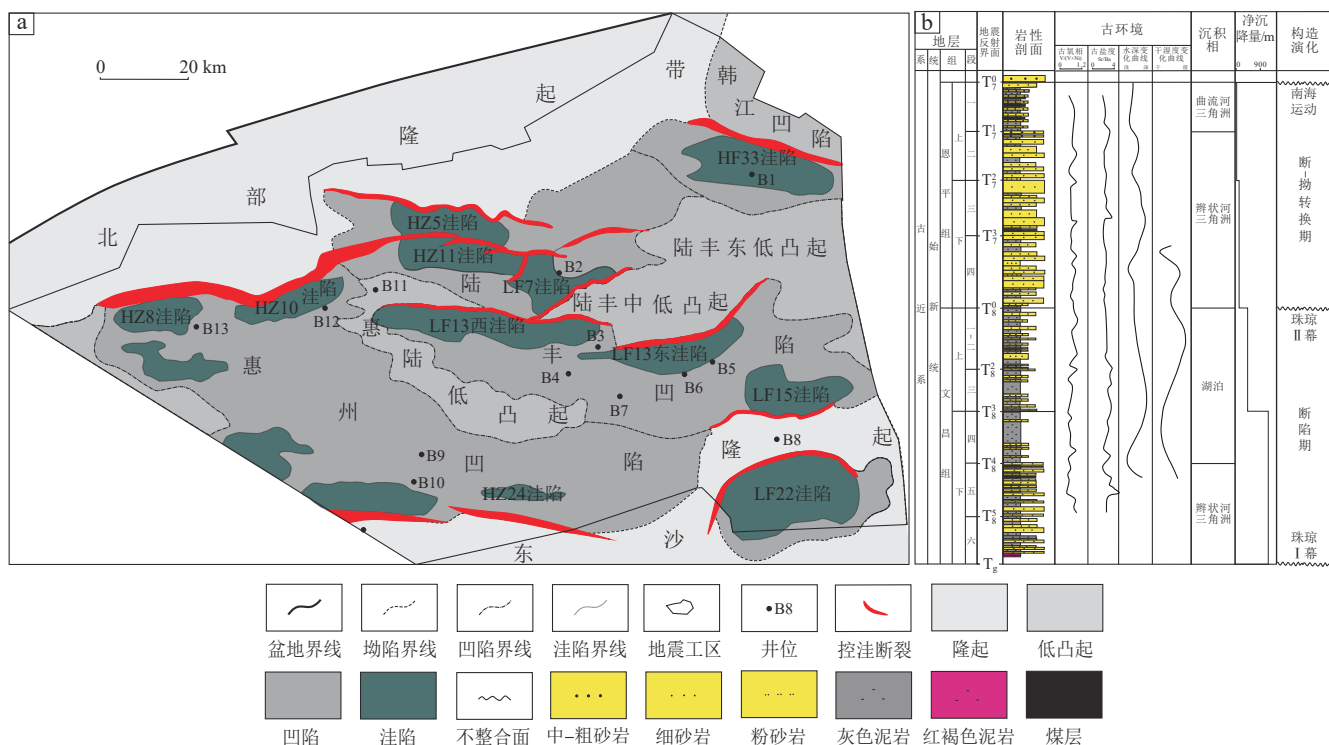


图1 珠江口盆地珠一坳陷北部地区主要洼陷分布(a)和地层综合柱状图(b)

Fig. 1 Major lows (a) and composite stratigraphic column (b) of northern Zhu I Depression, PRMB

针对单个洼陷进行烃源岩预测与评价研究,而是以珠江口盆地珠一坳陷北部整个低勘探区始新统为例,结合三维地震和成熟区钻井等资料的综合分析,从形成烃源岩的源-汇系统各配置要素出发,通过“找湖”“寻泥”“定烃”的多角度分析和综合对比,为南海珠江口盆地上产2 000万吨提供理论和技术支持,为其他类似盆地的烃源岩乃至更为宽泛的细粒沉积物研究提供思路。

1 区域地质背景

珠一坳陷位于珠江口盆地东北部,呈近NE走向,面积约 $4 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中坳陷北部地区包括惠州、陆丰和韩江等凹陷^[16-23](图1a)。本次研究区位于珠一坳陷北部惠州凹陷和陆丰凹陷,共包括HF33, HZ5, HZ11, LF7, HZ8, HZ10, HZ24, LF22, LF13东, LF13西和LF15等11个次级洼陷(图1a)。

珠一坳陷内地层自下而上发育有始新统文昌组,渐新统恩平组、珠海组,中新统珠江组、韩江组、粤海组,上新统万山组,上覆第四系。古近系和新近系累积厚度达4 000多米。坳陷新生代构造演化可划分为裂陷期和拗陷期两大阶段(图1b)。裂陷期自始新世至早渐新世,以陆相沉积为主,发育了文昌组半深湖-深湖相和恩平组

浅湖相、沼泽相等烃源岩^[16-20, 22]。

多年以来,前人在区域构造、层序地层学、沉积体系及石油地质研究的基础上^[16-29],借鉴陆上断陷盆地的勘探经验,运用“源-汇-聚”评价体系^[17],按照“定凹选带”“源控找油、富洼勘探”勘探思路,开展了深入的研究,有效支撑了盆地油气勘探的持续发展^[20]。

研究区钻井主要集中在陆丰凹陷南部 LF13 东、LF13 西和 LF15 等洼陷,这些洼陷已被证实为富生烃洼陷并在其中发现多个油田^[15, 21],相关烃源岩及其他地化分析数据也主要集中在该地区,这些相对成熟的洼陷区资料将在本次研究与低勘探洼陷区进行对比分析。此外,全三维地震数据覆盖将为本文在层序地层学、沉积体系、构造充填与原始盆地、深湖-半深湖地震相模式及低勘探区有利烃源岩预测等方面提供非常重要的资料支撑。

2 低勘探区湖盆及深湖-半深湖环境

层序地层、沉积体系、构造及古地貌分析是研究沉积盆地层序沉积及充填过程最主要的手段和方法^[30-32]。开展盆地烃源岩的发育及潜力预测,首先必须明确湖盆分布范围、深湖-半深湖环境及深湖-半深湖区规模。而要解决无井或少井条件下的低勘探区烃

源岩预测难题,基础地质研究和盆地沉积充填及演化过程的系统解剖尤为重要。其中,在区域构造层序划分与厘定的基础上,开展原始盆地面貌重建和构造古地貌分析,揭示主要洼陷展布、湖盆分布范围、古环境特征和湖盆发育规模等,是确认烃源岩是否发育的首要工作。

2.1 构造古地貌恢复与主要洼陷展布

构造古地貌重建属于原始盆地研究的范畴,恢复古地貌不仅是开展盆地层序-沉积体系充填过程与动

力学背景研究的基础工作,而且为准确预测沉积中心、洼陷和烃源岩的分布提供更为科学的、直观的证据^[33-34]。沉积盆地的古构造或古地貌对烃源岩的控制是当前国内外沉积地质和含油气盆地分析的热点问题^[35]。因此,剥蚀厚度恢复、古水深-压实校正与盆地构造古地貌重建研究越来越受到人们的重视^[33-34]。

本文在剥蚀厚度恢复的基础上,结合压实校正等工作,对珠一坳陷北部低勘探区按文昌组和恩平组分别进行了区域和洼陷古地貌重建(图2)。整体上,文昌期-恩平期构造古地貌特征表现为:①文昌期隆-

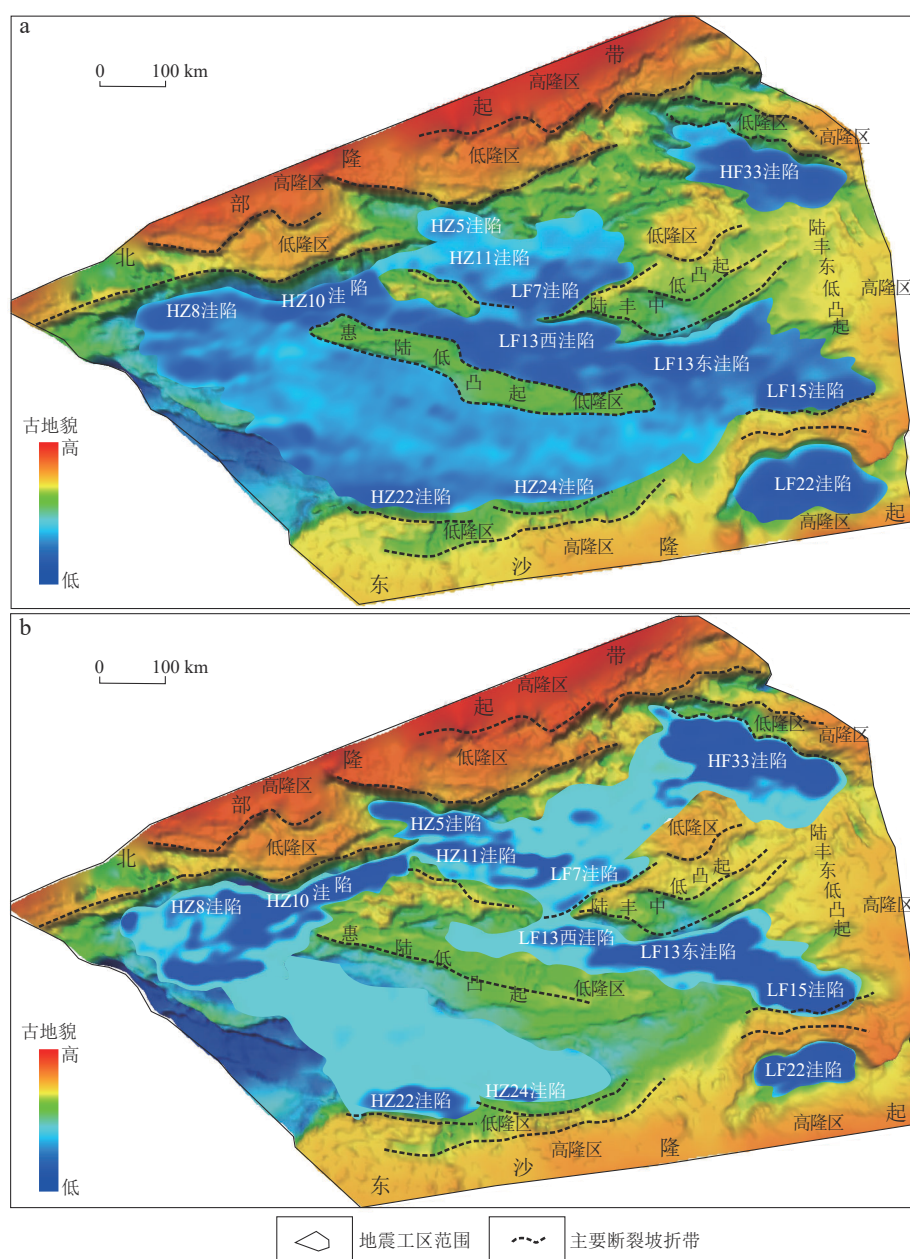


图2 珠一坳陷北部文昌期(a)和恩平期(b)构造古地貌

Fig. 2 Tectono-palaeogeomorphology of the Wenchang depositional period (a) and Enping depositional period (b) in northern Zhu I Depression

凹相间,表现出明显的裂陷型盆地特征;而恩平期则以盆大水浅、地形平缓、少隆少洼为主要特征。②受先存基底和后期构造应力场的差异控制,洼陷面积和分布差异性较大,文昌期整体表现为南部地区(如LF22, LF15, LF13等洼陷)洼陷面积大于北部地区(如HZ11, HZ5, HZ10等洼陷);而恩平期北部洼陷规模则整体增大。

2.2 湖盆主体边界和范围

确认湖盆边界的手段和方法较多,比如通过残余厚度或原始厚度变化趋势进行分析。同样地,在陆相断陷湖盆中,前积地震相通常对应各类三角洲相,前积发育区域属于河-湖交互带,因此前积发育区的位置和区域构造古地貌特征可以为判断湖盆主体边界提供依据。

以陆丰凹陷北部LF7洼陷文(文昌组)四段为例,通过三维地震精细解释,共识别出斜交、杂乱前积、楔形杂乱和杂乱等多种地震相类型(图3)。其中,斜交前积地震相通常对应缓坡带的辫状河三角洲,而杂乱前积、杂乱和楔形杂乱地震相则被解释为陡坡带近岸水下扇和扇三角洲。在缓坡带,辫状河三角洲发育位置附近通常为陆-湖交互发育地带,而对于陡坡带而

言,湖泊边界则受断陷边界断裂的控制。因此,基于地震前积相的分类解释,结合洼陷的古地貌特征和分布结构,可以直接勾绘出LF7洼陷文四段可能的河湖边界(图3)。

2.3 深湖-半深湖分布

对于陆相断陷盆地,无论是陡坡带还是缓坡带,均发育多级坡折带,不同类型的坡折带组合与盆地深部基底构造格局和区域构造应力背景息息相关。同一坡折体系中的坡折带之间具有明显的成因共生联系,坡折带相互组合形成的坡折体系则是同一构造应力背景下的地貌表现^[32, 36]。因此,这些坡折带往往与盆地古地形的分布关系紧密,也是确定盆地或洼陷沉积环境的因素之一。在多级坡折带中,盆缘坡折带控制了物源区的发育^[32],而盆内坡折带则可能是三角洲、滨浅湖和深湖之间的分界带。

珠一坳陷北部地区发育明显的多级坡折带,其中各洼陷陡坡带以断裂坡折带为主,缓坡带多为挠曲坡折带,其中恩平晚期坡折带数量减少,坡度减缓(图2)。以HF33洼陷为例,就坡折带识别与深湖-半深湖分布的确认进行阐述。该洼陷具有北断南超、北陡南缓的洼陷结构。在文昌期-恩平期,北部陡坡带

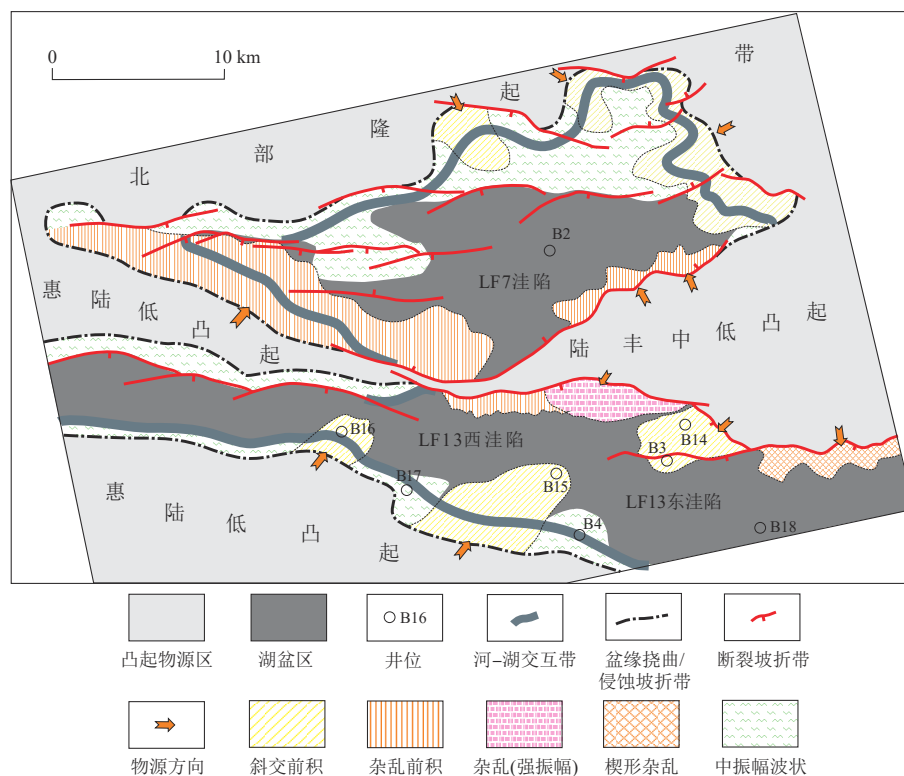


图3 珠一坳陷陆丰凹陷LF7洼陷及其邻区文四段前积反射地震相分析与河-湖交互带确认

Fig. 3 Reflectance signatures of foresets on seismic sections and identification of river-lake interaction zone of the 4th member of Wenchang Formation in LF7 low and its adjacent areas in Lufeng Sag, Zhu I Depression

发育3组明显的断裂坡折带,其中盆内三级坡折带控制了深湖-半深湖的边界(图4)。在南部缓坡区,同样发育多级坡折带,但是坡折带的类型和组合具有差异性。其中,控制南部物源区的盆缘坡折带为侵蚀坡折带;二级坡折带为断裂坡折带+挠曲坡折带,为冲积平原和三角洲的分界带;盆内三级坡折带以反向断裂坡折带为主,它控制与二级坡折带之间的局部沟谷沉积,同时也是南部缓坡带滨浅湖与深湖-半深湖的分界线(图4)。

2.4 湖盆古环境特征

烃源岩的形成取决于生烃母质生物的生存环境和有机质保存条件,这两大因素从根本上来说又取决于生物繁殖、埋藏时的古温度、古降水、古盐度、古氧化还原性、古生产力、古水深等各要素的良好匹配^[37],因此原始盆地的古环境研究对烃源岩的预测和评价有重大意义。开展古环境研究的沉积地球化学指标包括沉积物中的常量元素、微量元素、稀土元素和同位素^[38-39],以及沉积物中的花粉、有孔虫、藻类、介形类等动物、植物遗迹化石^[40-41]。因此,通过现有成熟区钻井的古生物+地球化学等指示分析,阐明研究区的区域和局部古气候变迁与沉积记录的关系,定性分析古水深变化趋势,

阐明古气候变化对沉积层序、湖水环境及湖平面波动的影响,探讨古水深波动与湖相沉积之间的关系,可作为勘探程度较低地区的湖盆古水深与古环境的借鉴和依据之一。

通过陆丰南部成熟区所有钻遇古近系、具有生化指标钻井的古水深(岩相、主、微量元素)、古环境(主、微量元素,有机地化)与古气候(古生物、主、微量元素)的详细分析揭示,本地区文昌期一恩平期具有主体为淡水、古湿度增加、古盐度降低、古水深变浅的古环境变化特征;文昌期整体水深较大,特别是文三段和文四段古水深达到最大(图5)。因此,文昌组的古水深波动特点可能是研究区发育深湖-半深湖相十分可靠的证据之一,尽管低勘探区没有钻井直接反映古水深的演化过程,但是区域古水深波动的趋势可作为这些低勘探洼陷古水深预测的间接证据。此外,研究还发现古水深与TOC(总有机碳含量)正相关性明显,但在文昌期,古气候与水深关系其实并不明显(图5),这可能与陆内断陷盆地中的强烈构造活动有关,构造作用对盆地基准面、可容空间和沉积充填的控制作用占主导。

2.5 湖盆发育规模定量分析

在构造活动较强的内陆湖盆中,如中国东部的断

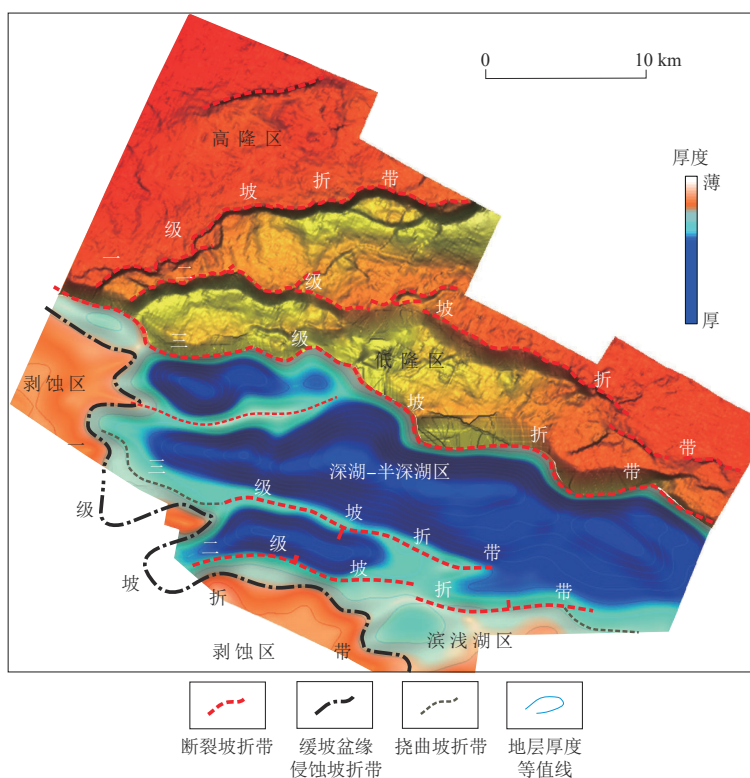


图4 珠一坳陷 HF33 洼陷残余地层厚度及多级坡折带发育特征平面展布

Fig. 4 Map showing residual thickness and planar distribution of multi-stage slope break development signatures of HF33 low in the Zhu I Depression

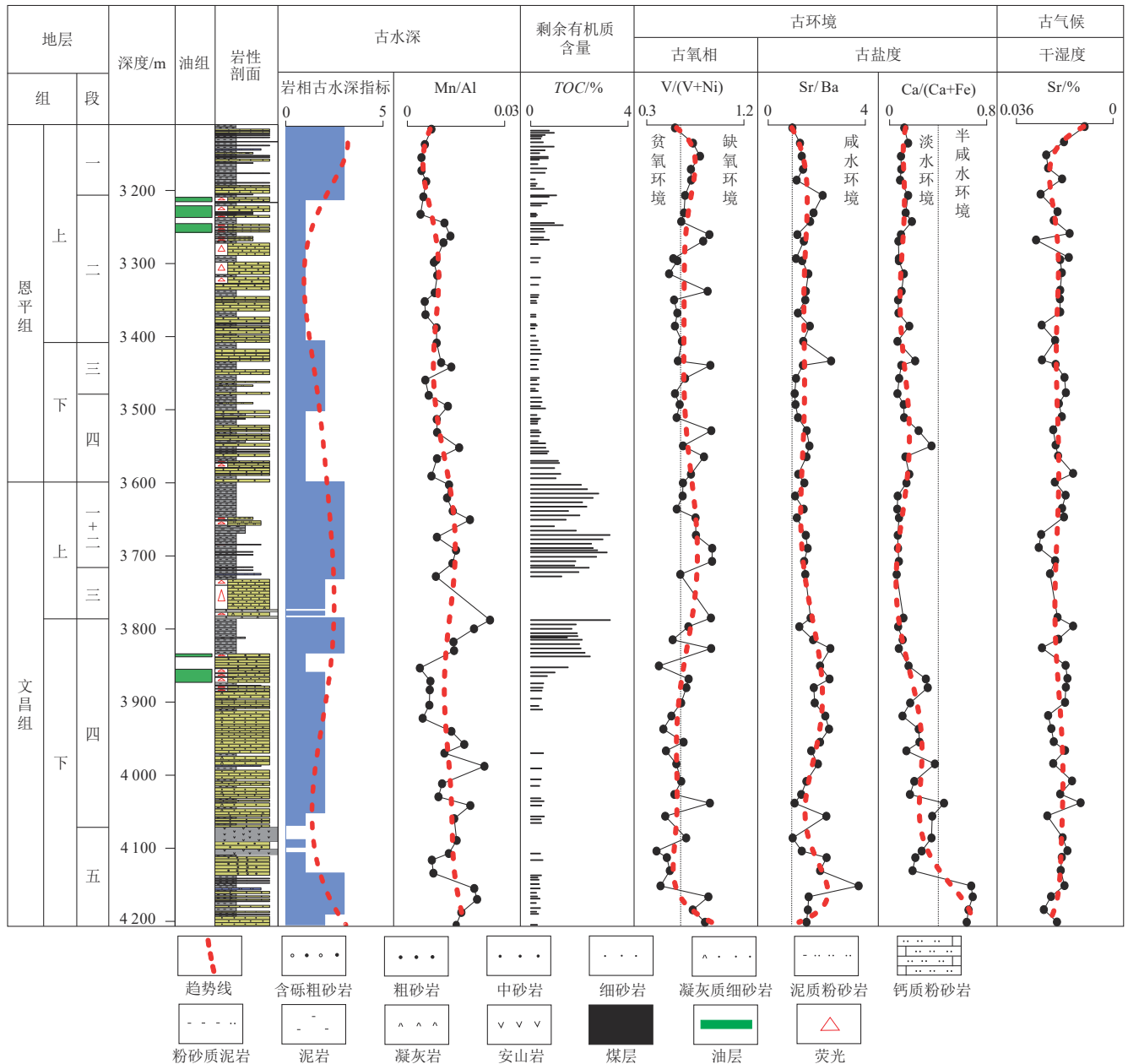


图5 珠一坳陷北部B15井古水深、古环境及古气候演化特征

Fig. 5 Palaeo water-depth, palaeo-environment and palaeo-climate evolution features in well B15 in northern Zhu I Depression

陷湖盆,构造机制是控制沉积和地层叠置样式最主要的因素^[34, 42-43]。构造活动不仅控制了物源区的分布,改变了沉积地形地貌,而且对沉积可容空间的增减、湖平面(基准面)的波动甚至局部气候都有重要的影响^[31-36, 43-46]。

始新世—早渐新世伸展裂陷阶段的构造活动强度对珠一坳陷古近系烃源岩的形成与分布起到了重要的控制作用,较高的断裂活动速率和沉降速率有利于可容空间和深湖盆形成。在物源供给不充分时易形成欠补偿沉积环境,有利于半深湖—深湖相优质烃源岩的发育^[47]。前人对中国近海及东部陆上富生烃

凹陷主力烃源岩形成期沉降速率的分析发现,其沉降速率均高于 200 m/Ma^[48]。珠一坳陷断裂的活动性呈现不同洼陷不同时期的特征,盆地裂陷作用强,洼陷控边断裂活动强度差异,控洼边界断裂活动强度大的,往往形成较深的裂陷盆地,有利于半深湖—深湖相沉积发育^[47, 49]。

可容空间的大小由基准面与初始沉积表面(地貌)的差值所决定^[50]。而在实际研究中,由于基准面和湖平面求取比较困难,因此对于古老地层的沉积可容空间的恢复也成为基础地质研究中的一个难点^[51]。在盆地沉积区,可容空间可以通过被保存的沉积物厚度

来确定^[51],其明显受沉降作用、构造抬升作用或基准面(如海、湖平面)变化所控制^[46]。但是,在陆相断陷盆地,构造沉降作用可能对可容空间的控制作用更大^[44-45]。因此,通过计算不同洼陷或盆地的构造活动强度,可以直接指示盆地沉积时的可容空间大小^[34],在区域古气候相似的条件下,可容空间越大越利于深湖-半深湖的形成。

本文选取了珠一坳陷中已证实的、具有较好生烃潜力的6个成熟洼陷和惠陆地区勘探程度较低的8个洼陷为研究对象,开展了构造沉降量和可容空间^[34]的计算(图6)。从构造沉降量与可容空间的关系可以看出(图7),在内陆裂陷型盆地中,构造作用是盆地沉积可容空间最主要的控制因素,不仅决定了盆地发育的规模,而且也可能为盆地深湖-半深湖沉积提供了潜在的可容空间。由于下文昌组处于强裂陷期,构造沉降作用最为明显,导致大部分洼陷的可容空间普遍较大,而晚期特别是恩平期断陷作用减弱,构造沉降量变小,可容空间也随之减小。但受区域构造应力场的差异控制,惠陆地区构造活动强度具有“早期(文昌组)南强北弱、晚期(恩平组)北强南弱”的特征^[28,30],因此构造沉降量和可容空间的变化也具有与构造强度一致的演化规律(图6)。勘探实践表明,6个成熟洼陷在文昌组和下恩平组都有较好的生烃潜力,根据这些成熟洼

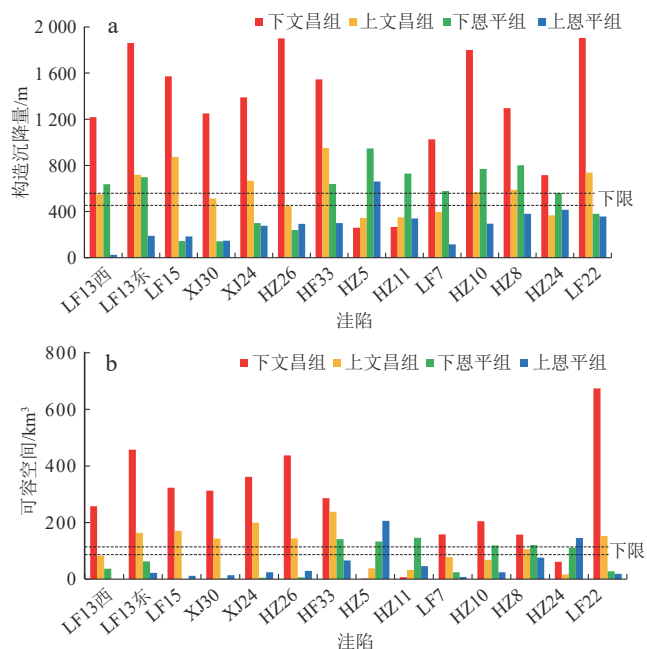


图6 珠一坳陷北部地区文昌组、恩平组主要洼陷构造沉降量(a)和可容空间(b)

Fig. 6 Tectonic subsidence amplitude (a) and accommodation space distribution (b) of main lows during the Wenchang and Enping periods in northern Zhu I Depression

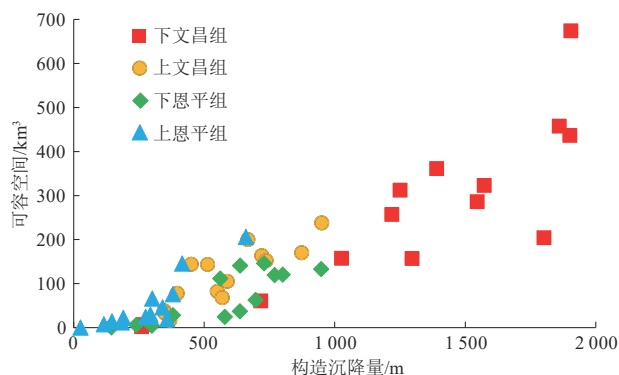


图7 珠一坳陷北部地区文昌组、恩平组主要洼陷构造沉降量与可容空间关系散点图

Fig. 7 Scatter plot showing the relationship between tectonic subsidence amplitude and accommodation space of main lows during the Wenchang and Enping periods in northern Zhu I Depression

陷构造沉降量和可容空间的计算结果,珠一坳陷北部地区构造沉降量下限为450~550 m,可容空间下限为90~110 km³(图6)。据此,初步判断文昌期HF33, LF22, HZ7, HZ10, HZ8等洼陷和恩平期(下恩平组沉积期为主)HZ5, HZ11, HZ10, HZ8, HF33等洼陷具备发育深湖-半深湖泥岩的潜力。

3 源-汇系统与深湖-半深湖相泥岩发育控制因素

针对前面所遴选的“湖盆(洼陷)”,在盆地构造古地貌分析的基础上,结合古物源、古气候及沉积体系的研究,进一步从沉积盆地源-汇系统整体性出发,深入探讨原始盆地地貌与深湖-半深湖泥岩发育的控制因素,揭示影响烃源岩发育的关键地质要素,为进一步预测和遴选发育有利烃源岩的洼陷提供依据。

3.1 古物源与古沟谷发育特征

物源分析是盆地和造山带研究的一项重要内容,确定物源位置、性质以及沉积物搬运路径,甚至整个盆地的沉积作用和盆地构造背景等具有非常重要的意义^[52-54]。同样地,物源性质、发育规模、与沉积区的距离等因素直接影响了盆地内油气生成、运移及保存等条件,也是含油气盆地储层预测与评价的基础^[34, 36, 55-56]。

构造古地貌恢复为揭示研究区不同沉积期的物源区分布提供了良好基础(图2)。在珠一坳陷北部地区发育了北部隆起带、东沙隆起、陆丰低凸起以及惠陆低凸起等多个物源区,按发育样式可分为高隆区和低隆区^[33]。其中,高隆区是T_g, T₈³和T₈⁰等多个构造不整合面

的叠合区域,为稳定物源区,主要分布在北部断阶带、东沙隆起和陆丰低凸起高部位。低隆区为受单一构造不整合面控制的区域,往往为地层超覆-削蚀的三角地带^[33],由于受湖平面升降的影响,该区域通常为动态物源发育区(指剥蚀和沉积共同作用的区域),主要分布在北部断阶带、东沙隆起和陆丰低凸起之间(图2)。物源区的规模和持续发育程度决定了盆地沉积物质堆积的体量。整体上而言,文昌期物源区的规模较大、数量较多,而在恩平期特别是晚恩平沉积期,物源范围减小,盆内物源贡献减少。

综合地震地层学、岩石学、锆石年代学、地球化学和微观薄片分析等手段,开展了珠一坳陷北部地区母岩分布范围、性质、大地构造属性等分析,为研究区原始盆地及源-汇系统的构建提供基础。区域井-震结合解释分析表明,研究区隆起区基底以火成岩为主,其

次为变质岩和沉积岩;薄片岩石学、地球化学分析揭示文昌组沉积物源为近源中-基性火山岩,含有较多长石和岩屑颗粒;恩平组主要为花岗岩和相对远源的再循环的古老沉积组分,含较多石英颗粒和火山岩屑。此外,碎屑锆石古物源分析表明,文昌组与恩平组的物源转换特征明显,恩平期古珠江、古韩江可能具备供源能力(图8)。

同时,在珠一坳陷北部地区通过对基底界面(T_g)古沟谷的地震解释,还原了隆起区古沟谷的分布(图9)。古沟谷解释结果表明,研究区共发育74个古水系,通过现今基底构造特征和主要古水系的展布,可以将古隆起物源区进一步划分为多个汇水地貌单元。其中各洼陷长轴方向的沟谷规模普遍较大,陡坡带的沟谷规模普遍小于缓坡带的古沟谷规模。古沟谷是盆地中沉积体系(如各类三角洲)发育的重要通道,而古

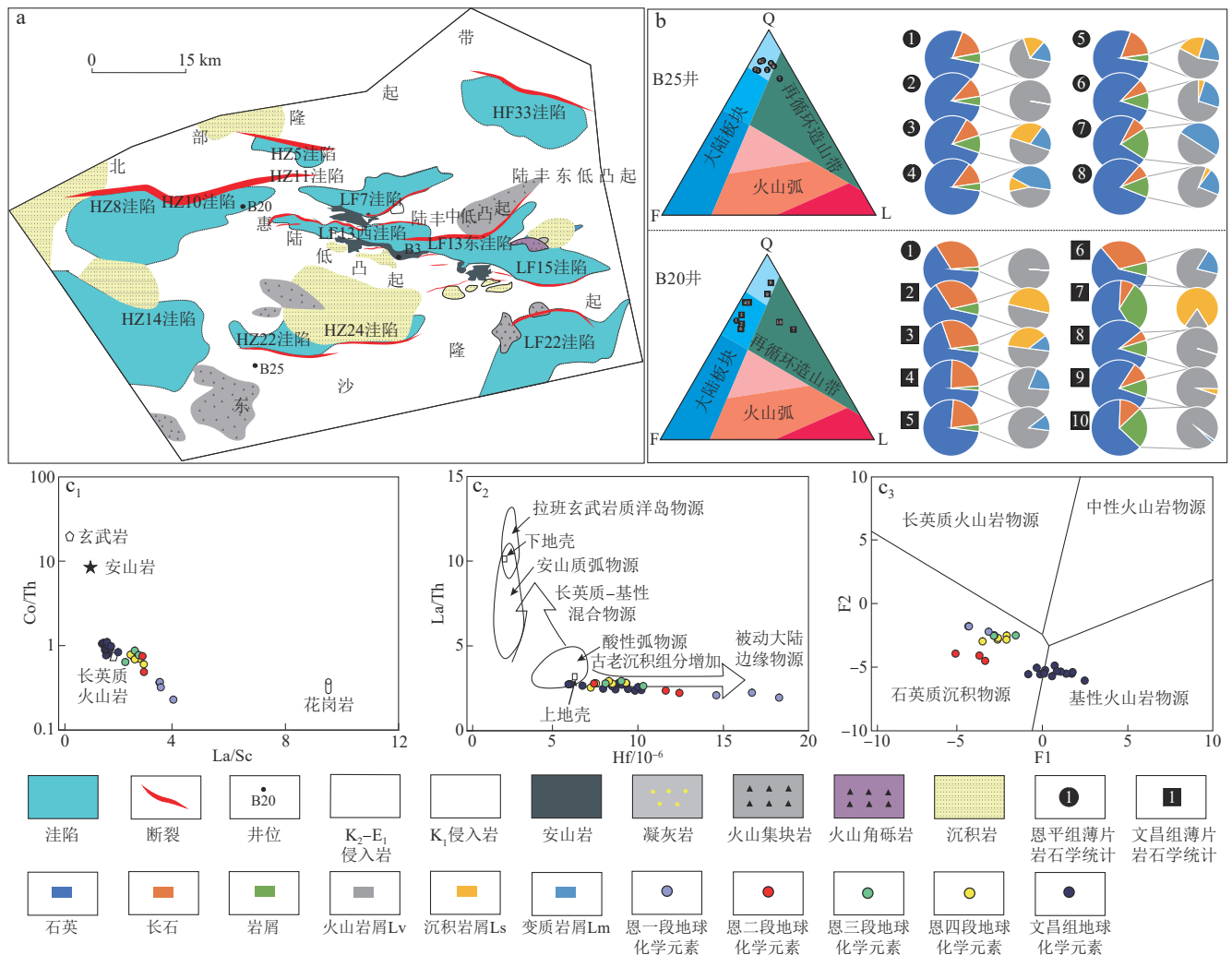


图8 珠一坳陷北部地区文昌组物源综合分析

Fig. 8 Comprehensive provenance analysis of the Wenchang Formation in northern Zhu I Depression

a. 井-震联合解释与隆起区基底母岩类型及分布;b. 主要钻井薄片岩石学统计和Dickinson砂岩骨架矿物分析;c₁. B3井La/Sc-Co/Th图解与母岩性质判别;c₂. B3井Hf-La/Th图解及物源判别;c₃. B3井F1-F2图解及母岩性质判别,F1和F2为沉积物源主量元素判别函数

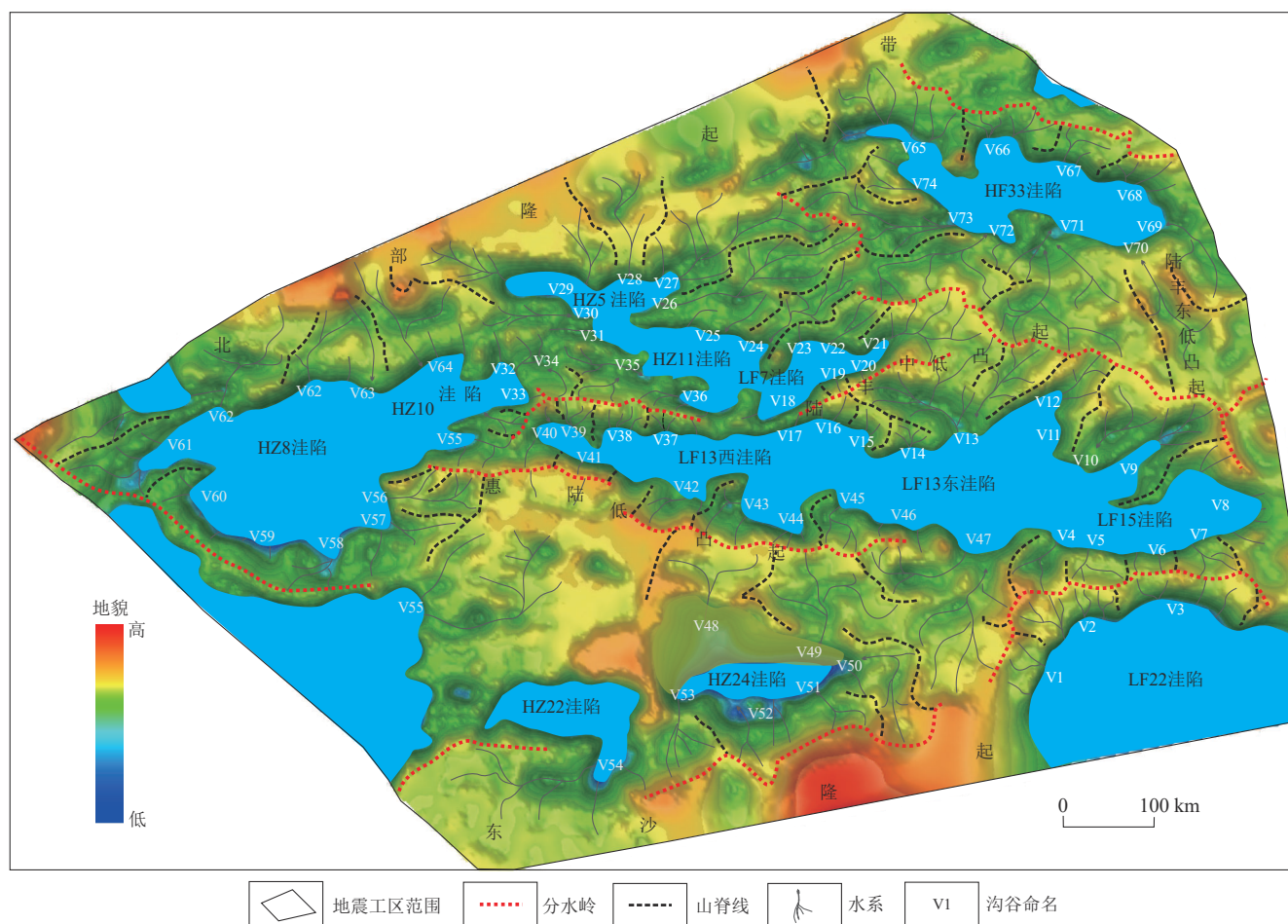


图9 珠一坳陷北部地区主要古隆起区古沟谷平面分布

Fig. 9 Plan view distribution of paleo-valleys in the main paleo-uplifting areas, northern Zhu I Depression

沟谷水系过多、过大则可能不利于烃源岩的发育。如HF33洼陷,尽管该洼陷的规模很大(图6),但古沟谷发育的数量较多且规模普遍较大(图9),有可能制约了深湖-半深湖的发育与分布,有关HF33洼陷的烃源岩发育潜力的分析,在本文后面也有相应的探讨。

3.2 沉积体系

通过综合地震相(包括几何地震相、地震沉积学)、岩(心)相(岩心、录井岩相)、测井相(电测曲线典型沉积学)特征及沉积环境标志分析,开展古近系各组、段沉积相及沉积体系的最终构建,共划分了扇三角洲、辫状河三角洲、滩坝、滨浅湖、深湖-半深湖等主要沉积相类型(图10)。其中,滨浅湖、深湖-半深湖相将是下一步开展“烃源岩相”构建和低勘探区烃源岩预测的重点沉积相类型。

3.3 源-汇系统重建与深湖-半深湖相泥岩发育控制因素

源-汇系统所揭示的地球动力学过程,无论在海相

盆地还是内陆湖盆,都已经成为当前国际地球科学领域中的研究热点^[34, 55-58]。开展源-汇系统的研究对于了解和把握整个盆地、不同洼陷的演化及充填过程意义重大,为开展不同洼陷之间沉积充填过程的控制作用及沉积响应的差异性对比提供了基础,也必将进一步为沉积区洼陷的烃源岩预测提供更加宏观的地质背景。

在构造古地貌、古物源和沉积体系等分析的基础上,按照物源、沉积物路径、沉积区和洼陷分布结构等要素开展了珠一坳陷北部地区文昌组、恩平组的源-汇系统及其单元划分(图10)。在不同的源-汇系统单元中,选择LF22洼陷文四段(富泥沉积)和HF33洼陷上文昌组(富砂沉积)两个典型实例,从构造古地貌、构造活动强度、古物源、古气候和盆地结构与充填样式(盆地欠补偿、均衡补偿和过补偿等)等要素出发,综合考虑源(物源大小及粒度)、型(坡折带及地形)、汇(湖盆分布与规模)、容(构造沉降及湖盆可容空间)、深(湖平面升降)等控制因素,开展了深湖-半深湖环境中细粒沉积物沉积过程控制作用的数值模拟,指出物源供给强

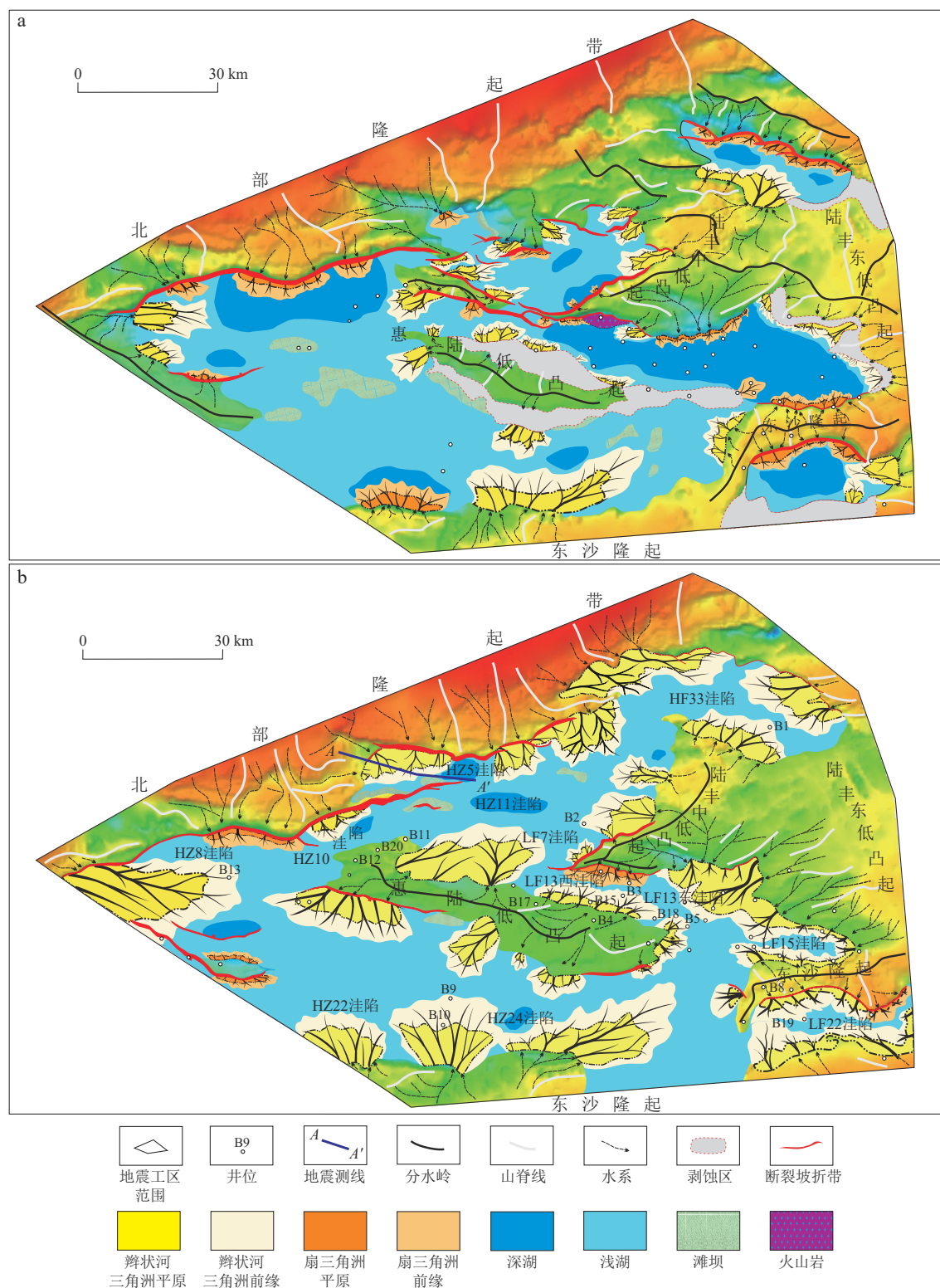


图10 珠一坳陷北部文昌期(a)和恩平期(b)源-汇系统分布

Fig. 10 Source-to-sink system distribution map during the Wenchang depositional period (a) and Enping depositional period (b) in northern Zhu I Depression

a. 文四段沉积期; b. 恩四段沉积期

度中等、物源粒度细、高湖平面、大可容空间、欠补偿-均衡补偿型盆地有利于富泥型湖泊相沉积。而大(多)物源、高供给强度、中-低湖平面、中可容空间、均衡-过

补偿型盆地则不利于湖盆中心细粒沉积物的富集。

值得一提的是,古环境及古气候是烃源岩形成和发育的重要条件之一^[9-11, 59-62]。在泥岩发育数值模拟

过程中,由于目标洼陷缺少钻井,在古环境分析时主要参考了油气勘探成熟区的分析结果(借鉴的前提条件是假设古环境具有区域整体特征^[63])。事实上,古环境中某些要素,如古气候,在珠一坳陷区乃至整个珠江口盆地变化并不大,尽管古近纪各洼陷分割性较强,可能存在因构造活动差异性引起的古隆起高低及地形变化,导致洼陷间古水深、水体环境等有一定的差别,但是从区域性气候和相似的古物源性质可得出,珠一坳陷北部地区洼陷之间的古水体环境具有很好的一致性。陆丰凹陷南部地区所有钻遇古近系、具有生化指标钻井的古环境及古气候研究结果就很好地证实了这一点(图5)。

通过前文深湖-半深湖相泥岩发育控制因素分析,建立了珠一坳陷北部地区源-汇系统控制下的沉积体系主要发育模式(图11)。其中,模式1(小物源供给-高沉降-欠补偿型盆地的扇三角洲-半深湖沉积体系组合)和模式2(中等物源供给-高沉降-欠补偿型盆地的辫状河三角洲-半深湖沉积体系组合)是深湖-半深湖沉积和烃源岩发育的有利源-汇系统组合模式。而类似多物源-低沉降-补偿型盆地的沉积体系组合(模式4和模式5)则不利于深湖-半深湖沉积。在文昌期,模式1和模式2主要分布在LF22洼陷北部陡坡带以及HZ8, HZ10, HZ14, LF7和HF33等洼陷, HZ5, HZ11和HZ24等洼陷主要发育模式4和模式5。在恩平期,由于上恩平期的盆地范围扩大、斜坡坡度变缓、湖盆水体变浅、构造沉降量降低、可容空间变小、沉积物供给强度大等背景要素皆表明该时期的烃源岩潜力

整体上不如文昌期。在下恩平期, HZ5, HZ11, HZ10, HZ8, HZ24和LF33等洼陷特征清楚,洼陷的构造沉降量和可容空间大小的下限超过成熟区(图6),具备一定的规模。同时,这些洼陷的物源范围缩小,也具备较为明显的欠补偿型构成样式,为深湖-半深湖泥岩的发育提供较好的盆地地貌背景(图10,图12),发育模式1和模式2的源-汇沉积组合类型(图11)。此外, HZ8洼陷、HZ10洼陷以及陆丰南成熟地区的钻井揭示,下恩平期浅湖-沼泽相泥岩的烃源岩指标较好^[63]。因此,下恩平期HZ10, HZ8, HZ5, HZ11和HF33等洼陷也值得进一步关注。

从源-汇沉积模式的发育与洼陷分布可以看出一个有趣的现象,文昌期HF33洼陷的构造沉降和可容空间计算结果与LF22洼陷比较相近,更是远大于HZ10洼陷和HZ8洼陷,经初步遴选,其烃源岩发育潜力较大,排名靠前。但是,因为HF33洼陷受周围多个物源区和大沟谷的作用,更多的粗碎屑物质易于被携带至盆地中,导致盆地在文昌组大部分沉积时期的充填呈过补偿状态,推测洼陷的富砂程度较高,不利于深湖-半深湖泥岩沉积。基于源-汇系统整体分析判断, HZ33洼陷的烃源岩发育潜力可能不如HZ10洼陷和HZ8洼陷。

4 “烃源岩相”分析与低勘探区优质烃源岩预测和评价

前文重点解决了区域烃源岩发育与分布的古湖泊

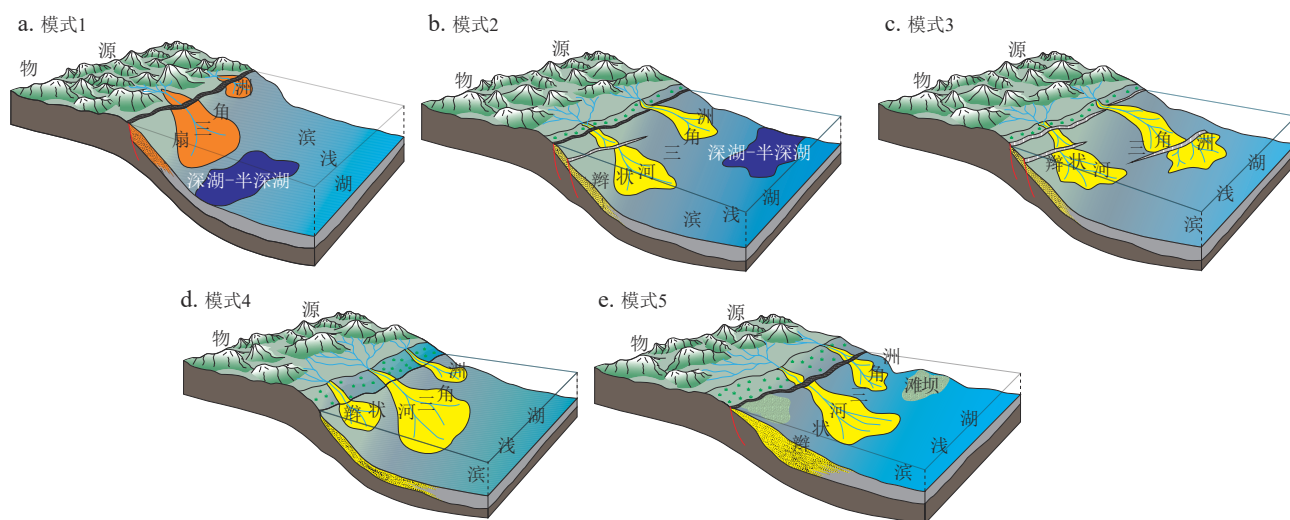


图11 珠一坳陷北部地区低勘探区主要源-汇系统发育模式

Fig. 11 Development pattern of the main source-to-sink system in underexplored areas of northern Zhu I Depression

a. 高沉降-欠补偿型(扇三角洲-半深湖沉积组合); b. 高沉降-欠补偿型(辫状河三角洲-半深湖沉积组合); c. 高沉降-欠补偿型(辫状河三角洲-滨浅湖沉积组合); d. 低沉降-平衡补偿型(辫状河三角洲-滨浅湖沉积组合); e. 低沉降-过补偿型(辫状河三角洲-滩坝-滨浅湖沉积组合)

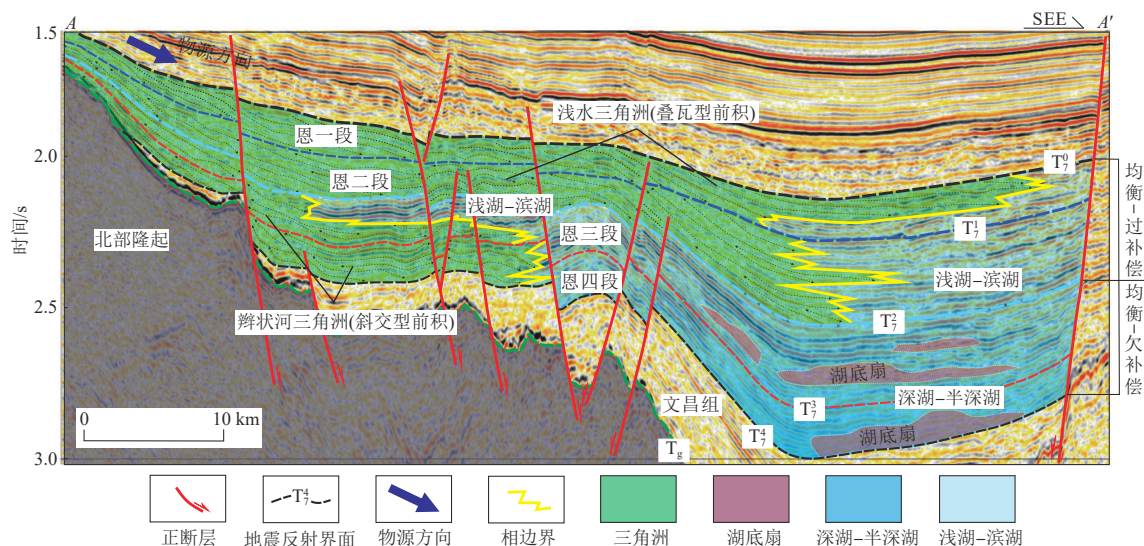


图 12 过珠一坳陷 HZ5 洼陷地震剖面特征及沉积充填过程解释(剖面位置见图 10b)

Fig. 12 Signatures of the seismic profile across Huizhou 5 low and interpretation of deposition and filling processes in Zhu I Depression (see Fig. 10b for the profile location)

宏观背景及可能具备的地质条件。在低勘探区遴选出潜在生烃洼陷,需进一步证实这些洼陷中的深湖-半深湖相泥岩是否为有效和优质烃源岩,并进一步开展烃源岩预测。从邻近油气勘探成熟区分析入手,通过对已有钻井揭示的大套深湖-半深湖泥岩的岩相、地震相分析,建立起深湖-半深湖泥岩的地震反射类型和模式,在充分考虑钻井烃源岩评价指标的基础上,构建整个珠一坳陷北部地区烃源岩地震相(烃源岩相)模型。以烃源岩相为基础,在关键地质要素约束下开展低勘探区烃源岩的预测。

4.1 勘探成熟区深湖-半深湖地震相类型

“烃源岩相”的分析包括勘探成熟区深湖-半深湖地震相类型识别、成熟区“烃源岩相”模型构建和低勘探区烃源岩预测几个方面。

本文选取了陆丰南部成熟洼陷中的多口钻遇古近系、具有厚层泥岩特征的钻井,结合地震剖面地震反射特征,总结了 4 种深湖-半深湖地震相类型及其发育的地质背景(图 13)。其中,地震相 SF1—SF3 以低振幅、低连续性和低频地震反射为主,通常代表了一套岩性较厚、内部岩性速度较均一、在横向上稳定发育的沉积体;钻井揭示这 3 种地震相对应大套泥岩(厚度 60~200 m,平均约 120 m);地质背景分析表明其主要发育在盆地区,构造沉降量和可容空间皆大于临界值(图 6)。因此,综合分析认为这 3 种地震相类型对应于深湖-半深湖沉积环境。此外,研究区还发育中频平行-亚平行地震相,通常代表了水体能量较

低、具有垂向加积叠置样式的地质体,多被解释为深湖-半深湖沉积^[64-65]。尽管该类地震相没有钻井证实,而且在地震相转沉积相过程中可能存在多解性,但仍可通过其发育的洼陷地貌背景(如在盆地区)、构造沉降和可容空间大小等参数来综合判断其代表深湖-半深湖相。

4.2 勘探成熟区烃源岩地震相模型

深湖-半深湖相只能作为识别烃源岩的依据之一。尽管通过多种约束因素初步判断其可能具备烃源岩的潜力,但仍需结合烃源岩的化学指标来佐证,并最终构建“烃源岩相”模型。LF13 西、LF13 东和 LF15 等成熟洼陷的钻井泥岩烃源岩评价指标表明(图 13),文昌组主力层段有机碳和有机质丰度普遍较高,可综合评价为好的烃源岩,其中 LF15 洼陷为很好。因此不难看出,上述 4 种深湖-半深湖地震相具有较好的生烃条件,特别是前 3 种已有钻井证实的地震相类型可以作为烃源岩相模式,为低勘探区的烃源岩预测提供借鉴。

4.3 低勘探区烃源岩预测与评价

在区域沉积体系和勘探成熟区烃源岩地震相分析的基础上,结合前面湖盆分布、洼陷构造沉降、可容空间、充填方式等地质要素,通过与成熟区烃源岩发育地质背景的多因素、多维度对比,可进一步开展低勘探区烃源岩的预测和评价。

珠江口盆地油气勘探实践表明,各洼陷的油气发

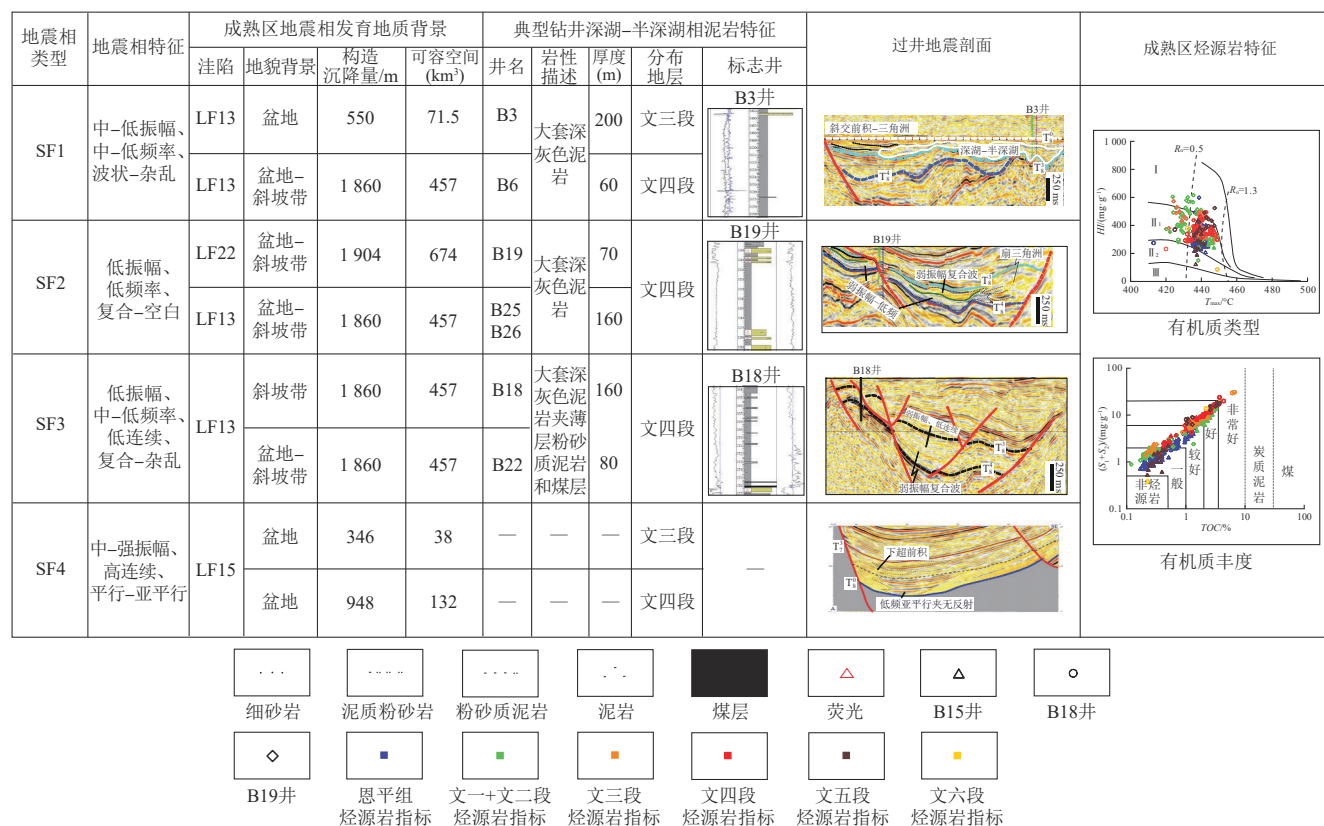


图13 珠一坳陷成熟区深湖-半深湖相地震反射类型、发育地质背景、钻井岩相及烃源岩特征

Fig. 13 Seismic reflection types, geologic setting, lithofacies from exploratory wells and source rock features of deep-to-semi-deep lacustrine facies in mature areas of the Zhu I Depression

现和资源量明显受控于富烃程度^[17, 20]。前人在评价珠一坳陷不同成熟度注陷的烃源岩品质和生烃潜能时,就众多注陷的地质要素和油藏地球化学指标进行了总结^[63],为低勘探区烃源岩对比评价提供了基础。因此,为了更进一步揭示珠一坳陷北部地区所遴选出来的主要低勘探注陷的烃源岩发育条件,评价其是否具有优质烃源岩,本文在系统总结珠一坳陷富烃注陷的注陷面积、构造沉降量、可容空间、A/S值(可容空间大小/沉积物供给速率)、物源条件、泥岩厚度、水体环境、地震反射及烃源岩沉积相类型的基础上,通过与低勘探注陷相应指标进行对比(表1),重点对文昌期无井和少井区开展多因素、多维度的优质烃源岩评价与排序。综合对比表明,LF22, HF33, HZ24(上、下文昌组), LF7和HZ10(下文昌组)等注陷发育优质烃源岩,生烃潜力较大,为Ⅰ级潜在富生烃注陷。HZ5注陷和HZ11注陷(下恩平组)发育一定的优质烃源岩,具有一定的生烃潜力,为Ⅱ级潜在生烃注陷。

当然,以源-汇系统理论和分析为基础,在低勘探区开展“找湖、寻泥、定烃”的烃源岩预测与评价依然受一定的条件限制,包括:①相邻勘探成熟区有效优质烃

源岩的发现及一定数量钻井烃源岩的揭示;②具备区域全覆盖的高精度地震资料;③区域(盆地级别)古气候和古环境存在一致性等。对于那些没有成熟区可对比的湖盆,则只能在湖盆确认和深湖-半深湖相预测的基础上,参考邻近盆地(或相似盆地)古环境特征,对潜在的、可能具备的烃源岩发育条件进行判别。

5 结论

1) 针对盆地或注陷中勘探程度相对较低、钻井较少且烃源岩指标不丰富等烃源岩预测的难点,提出了找湖、寻泥、定烃的烃源岩预测与评价思路:以低勘探区烃源岩预测和评价为目的,以盆地源-汇系统综合分析思想为指导,采用多学科交叉、多方法结合的手段,阐明烃源岩发育的古湖盆背景,识别与烃源岩相关联的深湖-半深湖相沉积,结合区域注陷烃源岩发育地质条件对比分析,揭示优质烃源岩分布的成因机制及控制作用,并用比对的手段进行低勘探区烃源岩预测与评价。

2) 原始盆地地貌与古湖盆发育位置和规模深湖-

表 1 珠一坳陷成熟区与北部低勘探区烃源岩发育地质要素综合对比
Table 1 Comprehensive comparison of geologic factors for hydrocarbon source rock development in areas with mature exploration degree and areas with low exploration degree in northern Zhu 1 Depression

评价要素		成熟洼陷		低勘探洼陷												
				LF22		HZ10		HZ8		HF33		LF7		HZ11		HZ5
洼陷面积/km ²	上文 昌组	下文 昌组	上文 昌组	下文 昌组	上文 昌组	下文 昌组	上文 昌组	下文 昌组	上文 昌组	下文 昌组	上文 昌组	下文 昌组	上文 昌组	下文 昌组	上文 昌组	下文 昌组
	180 ~ 320		210	350	118	114	58	100	250	190	197	154	94	26	110	9
	450 ~ 1 900		740	1 900	500	1 800	588	1 300	1 550	950	350	1 026	350	266	346	260
构造沉降量/m	99 ~ 450		150	670	67	204	105	157	170	690	78	160	33	7	38	2
A/S	≥1		≥1		≥1		≥1		≤1	≤1	≥1		≥1		≥1	
母岩类型	火成岩、变质岩和沉积岩		火成岩为主													
泥岩厚度/m	100 ~ 700		100 ~ 300	150 ~ 500	90 ~ 380	100 ~ 510	90 ~ 380	100 ~ 400	100 ~ 200	200 ~ 300	100 ~ 200	200 ~ 300	<100	<100	<100	<100
水环境	缺氧、富营养		缺氧、淡水		较富营养	缺氧、富营养	较富营养	缺氧、富营养	富营养	缺氧、富营养	缺氧、富营养		缺氧、淡水		缺氧、富营养	
地震相类型	SF 1、SF2、SF3、SF4		SF1	SF2	SF4	SF3	SF1、SF4		SF4		SF4		SF4		SF4	
沉积相类型	滨浅湖-深湖		深湖		深湖		深湖-半深湖		深湖-半深湖		滨浅湖	深湖	深湖-半深湖		深湖-半深湖	
烃源岩发育条件	I	I	II	I	II	I	II	I	II	II	III	I	III	III	III	III

注: A/S = 可容空间/沉积物供给速率。地震相类型及命名与图 13 一致。排名中的序号 I、II 和 III 表示烃源岩发育条件分别为优、中等和差。

半深湖分布范围以及古环境特征综合“找湖”研究表明,下文昌组沉积期 HF33, HZ24, LF22, LF7, HZ10 和 HZ8, 上文昌组沉积期 HF33, HZ24, LF22 和 HZ8, 以及下恩平组沉积期 HZ5, HZ11 和 HF33 等洼陷的深湖-半深湖发育规模大, 具备发育深湖-半深湖泥岩和潜在烃源岩的有利洼陷条件。

3) 源-汇系统与烃源岩发育的地质因素分析表明, 文昌期 HZ24, LF22, HF33, LF7 和 HZ10, 下恩平期 HZ10, HZ8, HZ5, HZ11 和 HF33 等洼陷发育小物源供给-高沉降-欠补偿型盆地的扇三角洲-半深湖沉积体系组合和中等物源供给-高沉降-欠补偿型盆地的辫状河三角洲-半深湖沉积体系组合两种模式, 生烃潜力较大。

4) 烃源岩相和低勘探区烃源岩多因素、多维度评价研究表明, 文昌期 LF22, HF33, HZ24 和下文昌期 LF7, HZ10 洼陷在洼陷面积、构造沉降量、可容空间、 A/S 值、物源条件、泥岩厚度、水体环境、地震反射及烃源岩沉积相类型等方面与珠一坳陷成熟区对应指标吻合程度很好, 为 I 级潜在富生烃洼陷; 下恩平期 HZ5 洼陷和 HZ11 洼陷吻合程度较好, 为 II 级潜在生烃洼陷。

参 考 文 献

- [1] 朱明, 陈维涛, 杜家元, 等. 珠江口盆地惠西南地区新近系岩性圈闭形成条件及发育类型[J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(6): 62-69.
ZHU Ming, CHEN Weitao, DU Jiayuan, et al. Formation conditions and development types of Neogene lithologic traps in southwestern Huizhou area, Pearl River Mouth Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(6): 62-69.
- [2] 贾承造, 邹才能, 杨智, 等. 陆相油气地质理论在中国中西部盆地的重大进展[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 546-560.
JIA Chengzao, ZOU Caineng, YANG Zhi, et al. Significant progress of continental petroleum geology theory in basins of Central and Western China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 546-560.
- [3] 陈建平, 孙永革, 钟宁宁, 等. 地质条件下湖相烃源岩生排烃效率与模式[J]. 地质学报, 2014, 88(11): 2005-2032.
CHEN Jianping, SUN Yongge, ZHONG Ningning, et al. The efficiency and model of petroleum expulsion from the lacustrine source rocks within geological frame [J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(11): 2005-2032.
- [4] 吴文祥, 张海翔, 李占东, 等. 层序地层地球化学方法在烃源岩评价中的应用——以海拉尔盆地贝尔凹陷为例[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(4): 701-710.
WU Wenxiang, ZHANG Haixiang, LI Zhandong, et al. Sequence stratigraphic geochemistry and its application in evaluation of source rocks: Taking Beier Sag of Hailar Basin as an example[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(4): 701-710.
- [5] 金强, 侯庆杰, 程付启, 等. 成熟探区有效烃源岩的评价方法——以辽东湾地区为例[J]. 石油学报, 2019, 40(3): 257-267.
JIN Qiang, HOU Qingjie, CHENG Fuqi, et al. Evaluation method of effective source rock in mature exploration area: A case study of Liaodong Bay [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(3): 257-267.
- [6] 徐泽阳, 赵靖舟, 李军. 松辽盆地长垣地区白垩系青山口组一段有机质含量对超压分析的影响及校正方法[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(4): 938-946.
XU Zeyang, ZHAO Jingzhou, LI Jun. The impact of organic matter content on overpressure analysis and its correction method in the first member of Cretaceous Qingshankou Formation, Placanticline area, Songliao Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(4): 938-946.
- [7] 田明智, 刘占国, 宋光永, 等. 柴达木盆地扎哈泉地区致密油有效烃源岩识别与预测[J]. 新疆石油地质, 2019, 40(5): 536-542.
TIAN Mingzhi, LIU Zhanguo, SONG Guangyong, et al. Identification and prediction of effective source rocks for tight oil in Zhahaquan area, Qaidam Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40(5): 536-542.
- [8] 赵峦啸, 刘金水, 姚云霞, 等. 基于随机森林算法的陆相沉积烃源岩定量地震刻画: 以东海盆地长江坳陷为例[J]. 地球物理学报, 2021, 64(2): 700-715.
ZHAO Luanxiao, LIU Jinshui, YAO Yunxia, et al. Quantitative seismic characterization of source rocks in lacustrine depositional setting using the Random Forest method: An example from the Changjiang Sag in East China Sea Basin [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(2): 700-715.
- [9] SALMON V, DERENNE S, LALLIER-VERGÈS E, et al. Protection of organic matter by mineral matrix in a Cenomanian black shale[J]. Organic Geochemistry, 2000, 31(5): 463-474.
- [10] QUAN Yongbin, HAO Fang, LIU Jianzhang, et al. Source rock deposition controlled by tectonic subsidence and climate in the western Pearl River Mouth Basin, China: Evidence from organic and inorganic geochemistry [J]. Marine and Petroleum Geology, 2017, 79: 1-17.
- [11] WANG Xiaolong, HE Sheng, DONG Tian, et al. Characterizations and accumulation of lacustrine source rocks in the Zhu I Depression, Pearl River Mouth Basin, China [J]. Geological Journal, 2019, 54(6): 4034-4050.
- [12] 张功成, 陈莹, 李增学, 等. 中国海域煤型油气成因理论[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(3): 553-565.
ZHANG Gongcheng, CHEN Ying, LI Zengxue, et al. Theory on genesis of coaliferous petroleum in the China Sea [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(3): 553-565.
- [13] 范柏江, 师良, 杨杰, 等. 鄂尔多斯盆地中部湖相有机质沉积环境特征[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(3): 648-657.
FAN Bojiang, SHI Liang, YANG Jie, et al. Sedimentary

- environment of lacustrine organic matter in the central Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(3): 648–657.
- [14] 龚德瑜, 刘海磊, 杨海波, 等. 准噶尔盆地风城组烃源岩生气潜力与天然气勘探领域[J]. *新疆石油地质*, 2022, 43(6): 674–683.
- GONG Deyu, LIU Hailei, YANG Haibo, et al. Gas generation potential of Fengcheng Formation source rocks and exploration fields in Junggar Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2022, 43(6): 674–683.
- [15] 石正勇, 金芸芸, 罗家群. 泌阳凹陷核桃园组优质烃源岩发育古环境特征及地质意义[J]. *特种油气藏*, 2021, 28(1): 51–58.
- SHI Zhengyong, JIN Yunyun, LUO Jiaqun. Paleo-environmental characteristics of the development of high-quality hydrocarbon source rocks in Hetaoyuan Formation of Biyang Sag and geological significance [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2021, 28(1): 51–58.
- [16] 吴克强, 刘志峰, 王升兰, 等. 珠一坳陷北部洼陷带始新统半深—深湖相烃源岩综合判识[J]. *中国海上油气*, 2015, 27(3): 10–15, 24.
- WU Keqiang, LIU Zhifeng, WANG Shenglan, et al. Composite recognition of Eocene semi-deep and deep lacustrine facies source rocks in northern subsags belt of Zhu I depression, Pearl River Mouth Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2015, 27(3): 10–15, 24.
- [17] 施和生. 油气勘探“源-汇-聚”评价体系及其应用——以珠江口盆地珠一坳陷为例[J]. *中国海上油气*, 2015, 27(5): 1–12.
- SHI Hesheng. “Source-migration-accumulation” evaluation system and its application in hydrocarbon exploration: A case study of Zhu I depression in Pearl River Mouth Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2015, 27(5): 1–12.
- [18] 刘培, 张向涛, 林鹤鸣, 等. 珠江口盆地西江主洼油气差异分布机制[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2021, 51(1): 52–64. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20200140.
- LIU Pei, ZHANG Xiangtao, LIN Heming, et al. Distribution mechanism of oil and gas in Xijiang main Depression of Pearl River Mouth Basin[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2021, 51(1): 52–64. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20200140.
- [19] 朱明, 施洋, 朱俊章, 等. 惠州凹陷HZ21-1构造油气成因来源及有利滚动勘探区预测[J]. *中国海上油气*, 2017, 29(6): 12–22.
- ZHU Ming, SHI Yang, ZHU Junzhang, et al. Hydrocarbon origin and favorable progressive exploration area of HZ21-1 structure in Huizhou Sag [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2017, 29(6): 12–22.
- [20] 米立军, 张向涛, 庞雄, 等. 珠江口盆地形成机制与油气地质[J]. *石油学报*, 2019, 40(S1): 1–10.
- MI Lijun, ZHANG Xiangtao, PANG Xiong, et al. Formation mechanism and petroleum geology of Pearl River Mouth Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(S1): 1–10.
- [21] 王绪诚, 陈维涛, 何叶, 等. 珠江口盆地惠西南地区古新世火山机构对有利储层的控制作用[J]. *石油实验地质*, 2022, 44(3): 466–475.
- WANG Xucheng, CHEN Weitao, HE Ye, et al. Control of Paleocene volcanic edifice on favorable reservoirs: A case study of the southwestern Huizhou Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2022, 44(3): 466–475.
- [22] 和子琛, 刘豪, 林鹤鸣, 等. 断陷湖盆坡折带-古沟谷对沉积的控制作用——以珠江口盆地海丰33洼陷古近系文昌组为例[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(2): 441–451. doi:10.11743/ogg20230215.
- HE Zichen, LIU Hao, LIN Heming, et al. Controlling effect of slope-break zone and paleovalley on sedimentation in rifted lake basins: A case study of the Paleogene Wenchang Formation in Haifeng 33 Subsag, Pearl River Mouth Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(2): 441–451. doi:10.11743/ogg20230215.
- [23] 陈一鸣, 谢明英, 闫正和, 等. 珠江口盆地恩平凹陷海相高泥质砂岩储层特征及主控因素[J]. *石油地质与工程*, 2022, 36(1): 08–14.
- CHEN Yiming, XIE Mingying, YAN Zhenghe, et al. Reservoir characteristics and main controlling factors of marine high argillaceous sandstone in Enping sag of Pearl River Mouth basin [J]. *Petroleum Geology & Engineering*, 2022, 36(1): 08–14.
- [24] 邵磊, 崔宇驰, 乔培军, 等. 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[J]. *古地理学报*, 2019, 21(2): 216–231.
- SHAO Lei, CUI Yuchi, QIAO Peijun, et al. Implications on the early Cenozoic palaeogeographical reconstruction of SE Eurasian margin based on northern South China Sea palaeo-drainage system evolution [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2019, 21(2): 216–231.
- [25] 朱红涛, 李森, 刘浩冉, 等. 陆相断陷湖盆迁移型层序构型及意义: 以珠 I 坳陷古近系文昌组为例[J]. *地球科学*, 2016, 41(3): 361–372.
- ZHU Hongtao, LI Sen, LIU Haoran, et al. The types and implication of migrated sequence stratigraphic architecture in continental lacustrine rift basin: An example from the Paleogene Wenchang Formation of Zhu I Depression, Pearl River Mouth Basin[J]. *Earth Science*, 2016, 41(3): 361–372.
- [26] 杜家元, 张向涛, 刘培, 等. 珠江口盆地珠一坳陷古近系“源-汇”系统分类及石油地质意义[J]. *地球科学*, 2021, 46(10): 3690–3706.
- DU Jiayuan, ZHANG Xiangtao, LIU Pei, et al. Classification of Paleogene source-to-sink system and its petroleum geological significance in Zhuyi Depression of Pearl River Mouth Basin [J]. *Earth Science*, 2021, 46(10): 3690–3706.
- [27] 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 Heming, SHI Hesheng. Hydrocarbon accumulation conditions and exploration direction of Baiyun-Liwan deepwater in the Pearl River Mouth Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(5):

- 29-36.
- [28] 戴宗, 张青青, 衡立群, 等. 珠江口盆地番禺4洼珠江组层序地层及其约束下砂体发育模式[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2021, 45(1): 12-22.
- DAI Zong, ZHANG Qingqing, HENG Liqun, et al. Sequence stratigraphy and sand body development model of Zhujiang Formation in Panyu 4 Subsag, Pearl River Mouth Basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2021, 45(1): 12-22.
- [29] 陈维涛, 徐少华, 孙珍, 等. 层序地层学标准化理论在陆架坡折-陆坡区的应用——以珠江口盆地中中新世沉积层序为例[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(6): 1414-1422.
- CHEN Weitao, XU Shaohua, SUN Zhen, et al. Application of standardized sequence stratigraphy theory in the shelf break-to-slope area: A case study of the Middle Miocene sedimentary sequence in the PRMB [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(6): 1414-1422.
- [30] 林畅松, 刘景彦, 张英志, 等. 构造活动盆地的层序地层与构造地层分析——以中国中、新生代构造活动湖盆分析为例[J]. 地质前缘, 2005, 12(4): 365-374.
- LIN Changsong, LIU Jingyan, ZHANG Yingzhi, et al. Sequence stratigraphy and tectono-stratigraphic analysis of tectonically active basins: A case study on the Cenozoic-Mesozoic lacustrine basins in China [J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(4): 365-374.
- [31] LIU Hao, WANG Yingmin, XIN Renchen, et al. Study on the slope break belts in the Jurassic down-warped lacustrine basin in western-margin area, Junggar Basin, northwestern China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2006, 23(9/10): 913-930.
- [32] LIU Hao, XIA Qinglong, SOMERVILLE I D, et al. Paleogene of the Huanghekou Sag in the Bohai Bay Basin, NE China: Deposition-erosion response to a slope break system of rift lacustrine basins [J]. Geological Journal, 2015, 50(1): 71-92.
- [33] LIU Hao, SOMERVILLE I D, LIN Changsong, et al. Distribution of Palaeozoic tectonic superimposed unconformities in the Tarim Basin, NW China: Significance for the evolution of palaeogeomorphology and sedimentary response [J]. Geological Journal, 2016, 51(4): 627-651.
- [34] LIU Hao, VAN LOON A J (TOM), XU Jie, et al. Relationships between tectonic activity and sedimentary source-to-sink system parameters in a lacustrine rift basin: A quantitative case study of the Huanghekou Depression (Bohai Bay Basin, E China) [J]. Basin Research, 2020, 32(4): 587-612.
- [35] ZHU Hongtao, LI Sen, SHU Yu, et al. Applying seismic geomorphology to delineate switched sequence stratigraphic architecture in lacustrine rift basins: An example from the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea [J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 78: 785-796.
- [36] LIU Hao, MENG Jun, BANERJEE S. Estimation of palaeo-slope and sediment volume of a lacustrine rift basin: A semi-quantitative study on the southern steep slope of the Shijiutuo Uplift, Bohai Offshore Basin, China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2017, 147: 148-163.
- [37] 张水昌, 张宝民, 边立曾, 等. 中国海相烃源岩发育控制因素[J]. 地质前缘, 2005, 12(3): 39-48.
- ZHANG Shuichang, ZHANG Baomin, BIAN Lizeng, et al. Development constraints of marine source rocks in China [J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(3): 39-48.
- [38] 傅家谟, 盛国英. 分子有机地球化学与古气候、古环境研究[J]. 第四纪研究, 1992, 12(4): 306-320.
- FU Jiamo, SHENG Guoying. Molecular organic geochemistry and its application to the study of paleoclimate and paleoenvironments [J]. Quaternary Sciences, 1992, 12(4): 306-320.
- [39] 蔡观强, 郭锋, 刘显太, 等. 沾化凹陷新近系沉积物的C、O、Sr、Nd同位素组成变化对古环境变迁的记录[J]. 地球化学, 2007, 36(6): 569-577.
- CAI Guanqiang, GUO Feng, LIU Xiantai, et al. C, O, Sr and Nd isotopic records for Neogene sedimentary environmental changes of Zhanhua Sag [J]. Geochimica, 2007, 36(6): 569-577.
- [40] 张玉兰. 南海184站深海沉积中孢粉、藻类研究及古环境分析[J]. 微体古生物学报, 2008, 25(1): 97-101.
- ZHANG Yulan. Sporopollen and algae research on deep-sea sediments of core 184 in the South China Sea and paleoenvironmental analysis [J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2008, 25(1): 97-101.
- [41] 朱正杰, 李航, 任世聪, 等. 青海湖近800年来沉积物介形虫Li/Ca比值的古环境指示意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2010, 30(4): 115-121.
- ZHU Zhengjie, LI Hang, REN Shicong, et al. Palaeoenvironmental implications of Li/Ca ratios of ostracod shells from lake Qinghai during the past 800 years [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2010, 30(4): 115-121.
- [42] 李思田. 沉积盆地的动力学分析——盆地研究领域的主要趋向[J]. 地质前缘, 1995, 2(3): 1-8.
- LI Sitian. Geodynamics of sedimentary basins——the main trend of basin research [J]. Earth Science Frontiers, 1995, 2(3): 1-8.
- [43] LIN Changsong, ERIKSSON K, LI Sitian, et al. Sequence architecture, depositional systems, and controls on development of lacustrine basin fills in part of the Erlian Basin, Northeast China [J]. AAPG Bulletin, 2001, 85(11): 2017-2043.
- [44] KATZ B J, LIU Xingcai. Summary of the AAPG research symposium on lacustrine basin exploration in China and Southeast Asia [J]. AAPG Bulletin, 1998, 82(7): 1300-1307.
- [45] RAVNÁS R, STEEL R J. Architecture of marine rift-basin successions [J]. AAPG Bulletin, 1998, 82(1): 110-146.
- [46] LEMONS D R, CHAN M A. Facies architecture and sequence stratigraphy of fine-grained lacustrine deltas along the eastern margin of Late Pleistocene Lake Bonneville, Northern Utah and Southern Idaho [J]. AAPG Bulletin, 1999, 83(4): 635-665.
- [47] 丁亮, 郭刚, 郝建荣, 等. 珠一坳陷西江主洼古近系文昌组烃

- 源岩特征及生烃潜力[J]. 中国海上油气, 2015, 27(5): 21-26.
- DING Liang, GUO Gang, HAO Jianrong, et al. Characteristics of Paleogene source rocks of Wenchang formation and hydrocarbon potential in Xijiang Sag, Zhu I Depression[J]. China Offshore Oil and Gas, 2015, 27(5): 21-26.
- [48] 郭刚, 吴景富, 吴克强, 等. 珠江口盆地隆起区残留洼陷地质特征与石油勘探新领域[J]. 石油学报, 2013, 34(S2): 39-47.
- GUO Gang, WU Jingfu, WU Keqiang, et al. Geological characteristics of residual sags and a new field of petroleum exploration in the uplift area of Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Petroli Sinica, 2013, 34(S2): 39-47.
- [49] 汪旭东, 张向涛, 林鹤鸣, 等. 珠江口盆地陆丰13洼复式油气成藏条件、分布规律及勘探潜力[J]. 中国海上油气, 2018, 30(3): 19-27.
- WANG Xudong, ZHANG Xiangtao, LIN Heming, et al. Reservoir-forming conditions, oil distribution and exploration potential of compound hydrocarbon reservoirs in the Lufeng 13 Sag in Pearl River Mouth basin [J]. China Offshore Oil and Gas, 2018, 30(3): 19-27.
- [50] WHEELER H E. Baselevel, lithosphere surface, and time-stratigraphy[J]. GSA Bulletin, 1964, 75(7): 599-610.
- [51] MUTO T, STEEL R J. The accommodation concept in sequence stratigraphy: Some dimensional problems and possible redefinition [J]. Sedimentary Geology, 2000, 130(1/2): 1-10.
- [52] SHAO Lei, CAO Licheng, QIAO Peijun, et al. Cretaceous-Eocene provenance connections between the Palawan Continental Terrane and the northern South China Sea margin[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2017, 477: 97-107.
- [53] WU Tao, LI Lie, LI Wentuo, et al. A quantitative study on source rocks in the western Leidong Depression, northern South China Sea[J]. Energy Geoscience, 2021, 2(1): 73-82.
- [54] MOROZOV V P, JIN Zhijun, LIANG Xinping, et al. Comparison of source rocks from the Lower Silurian Longmaxi Formation in the Yangzi Platform and the Upper Devonian Semiluksk Formation in East European Platform [J]. Energy Geoscience, 2021, 2(1): 63-72.
- [55] 徐长贵. 陆相断陷盆地源-汇时空耦合控砂原理: 基本思想、概念体系及控砂模式[J]. 中国海上油气, 2013, 25(4): 1-11, 21.
- XU Changgui. Controlling sand principle of source-sink coupling in time and space in continental rift basins: Basic idea, conceptual systems and controlling sand models [J]. China Offshore Oil and Gas, 2013, 25(4): 1-11, 21.
- [56] 徐长贵, 杜晓峰, 徐伟, 等. 沉积盆地“源-汇”系统研究新进展[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(1): 1-11.
- XU Changgui, DU Xiaofeng, XU Wei, et al. New advances of the “source-to-sink” system research in sedimentary basin [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(1): 1-11.
- [57] 林畅松, 夏庆龙, 施和生, 等. 地貌演化、源-汇过程与盆地分析[J]. 地学前缘, 2015, 22(1): 9-20.
- LIN Changsong, XIA Qinglong, SHI Hesheng, et al. Geomorphological evolution, source to sink system and basin analysis[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(1): 9-20.
- [58] 朱红涛, 朱筱敏, 刘强虎, 等. 层序地层学与源-汇系统理论内在关联性与其差异性[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(4): 763-776.
- ZHU Hongtao, ZHU Xiaomin, LIU Qianghu, et al. Sequence stratigraphy and source-to-sink system: Connections and distinctions[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(4): 763-776.
- [59] BARRON E J. Numerical climate modeling, a frontier in petroleum source rock prediction: Results based on Cretaceous simulations[J]. AAPG Bulletin, 1985, 69(3): 448-459.
- [60] SUESS E. Interaction of organic compounds with calcium carbonate- II. Organo-carbonate association in Recent sediments[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1973, 37(11): 2435-2447.
- [61] CARROLL A R, BOHACS K M. Stratigraphic classification of ancient lakes: Balancing tectonic and climatic controls [J]. Geology, 1999, 27(2): 99-102.
- [62] CARROLL A R, BOHACS K M. Lake-type controls on petroleum source rock potential in nonmarine basins [J]. AAPG Bulletin, 2001, 85(6): 1033-1053.
- [63] 施和生. 论油气资源不均匀分布与分带差异富集——以珠江口盆地珠一坳陷为例[J]. 中国海上油气, 2013, 25(5): 1-8, 25.
- SHI Hesheng. On heterogeneous distribution and differential enrichment by zones of hydrocarbon resources: A case in Zhu I Depression, Pearl River Mouth Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2013, 25(5): 1-8, 25.
- [64] VAIL P R. Seismic stratigraphy interpretation using sequence stratigraphy: Part 1: Seismic stratigraphy interpretation procedure [M]//BALLY A W. Atlas of Seismic Stratigraphy. Houston: Shell Oil Company, 1987: 1-10.
- [65] 彭光荣, 龙祖烈, 史玉玲, 等. 低钻揭洼陷有利烃源岩空间展布地质与地球物理综合识别方法——以珠江口盆地珠一坳陷恩平17洼为例[J]. 石油实验地质, 2022, 44(6): 1116-1122.
- PENG Guangrong, LONG Zulie, SHI Yuling, et al. Discussion on integrated geological and geophysical identification method for spatial distribution of favorable source rocks in depression with lack of drilling data: A case study of Enping 17 Sag, Zhu I Depression, Pearl River Mouth Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2022, 44(6): 1116-1122.

(编辑 张玉银)