

珠江口盆地白云凹陷古近系文昌组源-汇系统特征及演化

高阳东^{1,2}, 彭光荣^{1,2}, 张向涛^{1,2}, 汪旭东^{1,2}, 孙辉^{1,2}, 刘太勋³, 孙丰春³

[1. 中海石油 深海开发有限公司, 广东 深圳 518054; 2. 中海石油(中国)有限公司 深圳分公司, 广东 深圳 518054;
3. 中国石油大学(华东) 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580]

摘要:珠江口盆地是南海东部典型的边缘海盆地,白云凹陷为珠江口盆地珠二坳陷中、新生代地层发育最全的深大凹陷,其古近系是深水区已证实的主力层系及近期深层油气勘探的重点目标。文昌组是白云凹陷已经获得勘探证实的主要烃源岩层系,在凹陷周边物源控制区也是有利储层发育的重要场所。通过定量表征其源-汇系统和分析源-汇系统特征及演化规律为白云凹陷主力烃源岩及规模砂体分布预测提供依据。基于锆石定年及重矿物分析确定物源体系及其演化,利用PSDM地震资料及古地貌刻画了搬运通道类型及分布,井-震结合厘定了沉积体系及沉积相类型特征;结合古地貌起伏、剥蚀量及沉积汇聚量计算结果对源-渠-汇系统进行了定量耦合。研究表明,古近纪文昌期发育番禺低隆起、云荔低隆起、云东低凸起以及云开低凸起4个近物源体系,以断沟和沟谷为渠,形成了4套完整的源-渠-汇系统。不同沉积时期的源-汇体系发生明显转变,受各时期物源差异的影响,文昌期白云凹陷发育古沟槽及大型构造转换带控制下的近物源小型湖相、辫状河三角洲及扇三角洲沉积。白云凹陷源-汇系统控制下的文昌组规模滨浅湖在文昌组五段(文五段)、文四段和文三段分布范围最广;半深湖-深湖相沉积分布局限,在文五段仅零星分布,在文四段、文三段及文二段的湖盆中央局部范围分布,这些认识为主力烃源岩的分布预测提供了基础。在宽缓裂陷结构及大物源控制下,白云凹陷北坡发育的辫状河三角洲富砂沉积体系控制了规模砂体的平面展布。白云凹陷东部辫状河三角洲及扇三角洲规模小,是相带砂体的主要分布位置。

关键词:定量表征;分布预测;规模砂体;主力烃源岩;源-汇系统;古近系;白云凹陷;珠江口盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Characteristics and evolution of the source-to-sink system of the Paleogene Wenchang Formation in Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin

GAO Yangdong^{1,2}, PENG Guangrong^{1,2}, ZHANG Xiangtao^{1,2}, WANG Xudong^{1,2}, SUN Hui^{1,2},
LIU Taixun³, SUN Fengchun³

[1. Deepwater Development Ltd., CNOOC, Shenzhen, Guangdong 518054, China; 2. Shenzhen Branch of CNOOC, Shenzhen, Guangdong 518054, China; 3. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China]

Abstract: The Pearl River Mouth Basin (PRMB) is a typical marginal sea basin to the east of the South China Sea. The Paleogene strata of the Baiyun Sag, a deep and large sag with well-developed Mesozoic-to-Cenozoic strata in the Zhu II Depression of the PRMB, are the major targets for recent hydrocarbon exploration in the deep-water area. The Wenchang Formation is the hydrocarbon source rock sequence verified in exploration in the Baiyun Sag, and the provenances around the sag are also favorable for reservoir development. The quantitative characterization of the source-to-sink system, and the analysis of its characteristics and evolution of the formation provide a basis for predicting the distribution of the main hydrocarbon source rocks and large-scale sand bodies in the Baiyun Sag. A combination of zircon dating and heavy mineral analysis serves to determine the provenance system and its evolution. The types and distribution of transport channels are characterized by PSDM seismic data and palaeo-geomorphology. The characteristics of sedimentary system and sedimentary facies are depicted by well-tied seismic interpretation, while the source-channel-sink system is quantitatively coupled with the calculation results of palaeo-geomorphic relief, denudation

收稿日期:2023-01-17;修订日期:2023-04-18。

第一作者简介:高阳东(1975—),男,教授级高级工程师,中国海域油气勘探与开发。E-mail:gaoyd@cnooc.com.cn。

基金项目:青岛海洋科学与技术试点国家实验室“十四五”重大项目(2021QNLMO20001);中海石油(中国)有限公司综合科研项目(KJZH-2021-0003-00)。

thickness and sedimentary accumulation. The research results show that during the deposition of the Paleogene Wenchang Formation, there are four proximal provenance systems developed, that is, the Panyu low uplift, Yunli low uplift, Yundong low salient and Yunkai low salient, resulting in four complete suites of “source-channel-sink” systems with fault-related ditches and ravines as channels. The source-to-sink system tends to undergo significant changes in different sedimentary periods. Under the effect of differential provenances in different periods, near-provenance braided river delta and fan delta deposits of small-scale lacustrine facies are developed in the Wenchang Formation of the Baiyun Sag as controlled by paleo-grooves and large-scale tectonic transition zones. The deposits of shore-shallow lake facies are widely developed in the 5th, 4th and 3rd members of the Wenchang Formation under the control of the source-to-sink system of the Baiyun Sag. While the occurrence of semi-deep to deep lake facies is sparsely seen in the 5th member of the Wenchang Formation, and seen in the central of the 4th, 3rd, and 2nd members, which provide a basis for predicting the distribution of the main hydrocarbon source rocks. Under the control of wide and gentle rift structure and large provenances, the braided river delta of sand-rich sedimentary system is developed on the north slope of Baiyun Sag that controls the planar distribution of large-scale sand bodies; the braided river deltas and fan deltas in the east of the Baiyun Sag are small in scale with sand bodies of favorable facies widely seen.

Key words: quantitative characterization, distribution prediction, large-scale sand bodies, main hydrocarbon source rocks, source-to-sink system, Palaeogene, Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin (PRMB)

引用格式:高阳东,彭光荣,张向涛,等. 珠江口盆地白云凹陷古近系文昌组源-汇系统特征及演化[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(3): 584–599. DOI: 10. 11743/ogg20230305.

GAO Yangdong, PENG Guangrong, ZHANG Xiangtao, et al. Characteristics and evolution of the source-to-sink system of the Paleogene Wenchang Formation in Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(3): 584–599. DOI: 10. 11743/ogg20230305.

源-汇系统研究已成为世界范围内地球科学颇为关注的重要领域^[1],研究核心是地球动力学过程分析和多学科交叉融合的研究方法探索^[2]。源-汇系统最早起源于美国1988年开始酝酿的“洋陆边缘计划”^[3]。经过数十年的不断发展完善,源-汇系统研究已成为当前沉积学的前沿热点^[4–8]。目前,中国的源-汇系统研究主要围绕陆相盆地进行了一系列的分析,研究内容包括地貌演化、物源-沉积体系的响应关系及其耦合样式等^[9–15]。相对于洋陆边界盆地,开展陆相盆地研究的主要难点在于盆地类型多样、物源区-搬运区-沉积区受多种因素复合控制、物源区类型多样等^[16–22]。白云凹陷(北坡)古近系源-汇系统经历了从陆相断陷盆地向洋-陆边界盆地转换的过程,物源区发生了重大变化,沟渠等搬运通道多样,沉积体系更加复杂多变^[23–29]。柳保军等利用源-汇系统控砂理论对白云凹陷深水深层砂体展布规律进行了研究,发现了以深水海底扇砂体为主的高产气藏^[30–33]。白云凹陷(北坡)古近系具有巨大的勘探潜力,但白云凹陷深水深层少井及无井区的源-汇系统研究有待进一步完善。笔者在新的深度域地震资料及测井、录井等资料的基础上,从物源体系分析入手,识别了白云凹陷古近系源-汇系统的类型,分析了文昌组源-汇系统特征及演化过程,对白云凹陷文昌组砂体和烃源岩预测及深层油气勘探具有重要的指导意义。

1 地质背景

珠江口盆地白云凹陷位于中国南海北部,受欧亚、太平洋及印度-澳大利亚三大板块的应力共同影响形成,油气资源异常丰富^[34–35]。珠江口盆地面积约 $18 \times 10^4 \text{ km}^2$,大体呈NE-SW走向,整体在NE向基底控凹断裂和NW向走滑调节断裂控制约束下,形成“南北分带、东西分块”的隆-坳相间格局^[36–39],总体上具有“下断上坳、先陆后海”的特征^[40]。白云凹陷处于珠江口盆地珠二坳陷东北部(图1),其北接番禺低隆起,南至南部隆起带,西连云开低凸起,东邻东沙隆起,凹陷面积超过 $2 \times 10^4 \text{ km}^2$,水深为200~2 000 m,约70%的面积水深大于500 m^[41–42]。区域构造演化方面,基于不整合面识别、构造-沉积响应特征及火山岩浆活动等综合研究,可知白云凹陷古近纪主要发育4次大规模的构造运动,分别为神狐运动、珠琼运动一幕、珠琼运动二幕和南海运动。白云凹陷在早文昌期为初始裂陷期,中-晚文昌期为强烈裂陷期,中文昌期受拆离作用,经历拆离裂陷期,晚文昌期受到岩浆底侵作用,经历底侵裂陷期。恩平期白云凹陷拗陷作用增强,裂陷作用变弱,经历断-拗转换期。珠海期—韩江期白云凹陷经历拗陷沉降期。

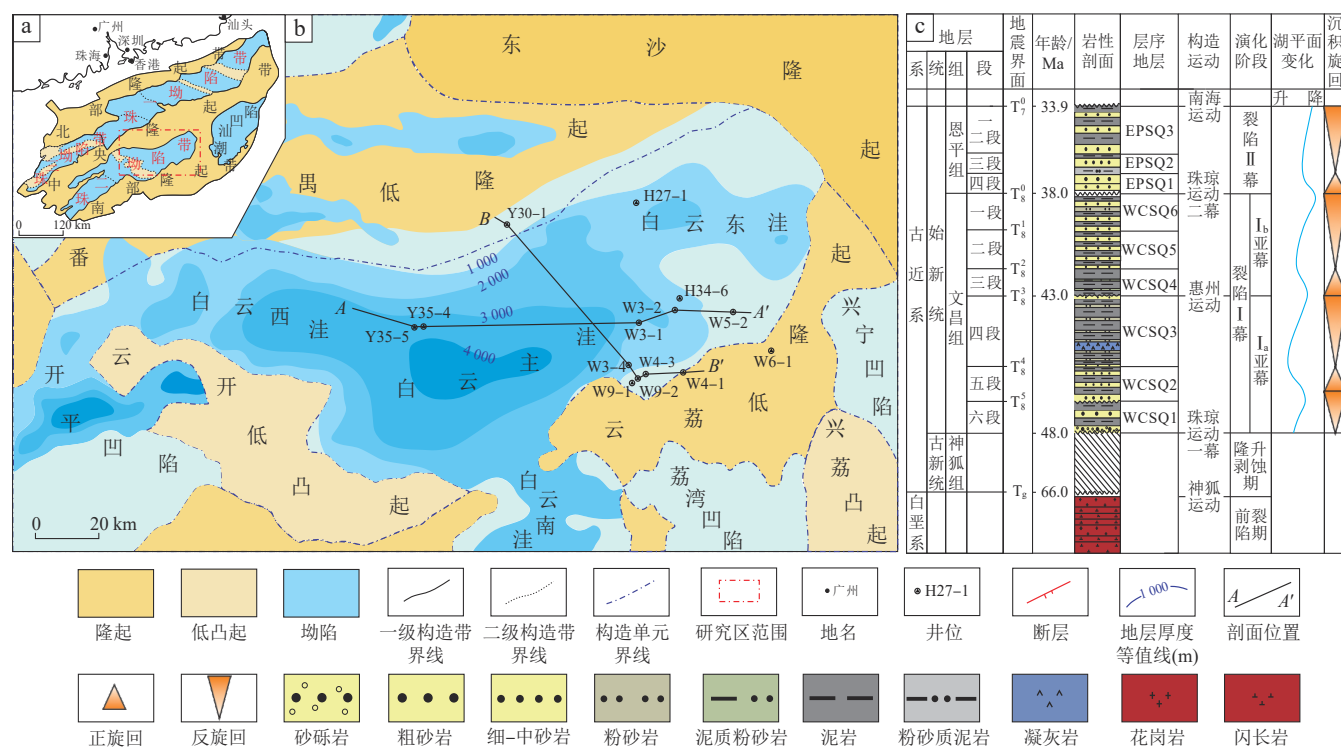


图1 珠江口盆地白云凹陷构造位置及地层综合柱状图

Fig. 1 Structural location map and composite stratigraphic column of the Baiyun Sag, PRMB

a. 珠江口盆地构造位置; b. 白云凹陷构造位置; c. 地层综合柱状图

白云凹陷基底为中生界火山岩和变质岩,古近系自下而上划分为文昌组、恩平组和珠海组^[43]。其中文昌组六段(文六段)主要岩性为细-中砂岩夹薄层泥岩。文五段上部在云荔低凸起北部的岩性为灰色及褐色页岩,含微量钙质薄片及炭质层,孢粉-藻类化石极为丰富。在白云东洼岩性为紫红色、褐灰色含砾凝灰岩,块状构造,较致密,角砾主要为晶屑和岩屑;文五段下部在云荔低凸起北部钻遇白色厚层中-粗砂岩夹少量灰色页岩与浅灰色泥岩互层,砂岩与泥岩中偶见少量钙质,泥岩中含大量陆源植物碎屑。在白云东洼钻遇褐灰色凝灰岩,凝灰结构,局部可见不规则孔洞。文四段主要岩性为薄-厚层浅灰色中砂岩、细砂岩,粉砂岩与薄-中厚层褐色泥岩不等厚互层。文三段岩性以薄-巨厚层灰色、褐灰色、深灰色泥岩、粉砂质泥岩为主,夹薄-厚层浅灰色细砂岩、泥质细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩,局部夹薄层灰质粉砂岩。文一段、二段钻遇的岩性以薄-巨厚层灰色泥岩为主,夹薄层浅灰色细砂岩、泥质粉砂岩、灰质粉砂岩。

文昌期对应珠琼运动一幕,该时期火山岩浆作用及断裂构造活动活跃,白云凹陷为陆相断陷湖泊充填期,发育多组具有伸展拆离背景的大型低角度断裂带,

呈现深陷的宽断陷特征^[31-32]。沉积了宽断陷控制下的大型三角洲-湖相^[32],发育有北部番禺低隆起、西南部云开低凸起和东南部云荔低隆起3个物源体系^[31]。此外,白云东低凸起也是文昌组的一个重要物源。文昌组与恩平组沉积过渡时期发生了珠琼运动二幕,该时期白云凹陷遭受了强烈的抬升剥蚀,湖水变浅,为海-陆过渡充填期,以大型辫状河三角洲沉积为主。珠海初期发生南海运动,白云凹陷强烈抬升,地层以低角度不整合为典型特征,且该时期海水大规模由南向北侵入,白云凹陷为海相拗陷充填期,以海陆边缘的大型三角洲沉积为主。

2 白云凹陷北部物源特征

2.1 物源体系的锆石定年时代特征

锆石是最理想的测年对象,不同成因及不同年代的锆石均能够通过定年的手段分辨出来。因此,锆石定年也是物源体系分析的重要手段。根据白云凹陷文昌组锆石测年结果分析可知,文昌组的物源主要为侏罗纪、白垩纪燕山期杂岩及早期沉积岩(表1)。

表1 白云凹陷物源岩性及年代分布

Table 1 Lithologies and geological time of the provenances for the Baiyun Sag

地区	井名	层位	顶深/ m	底深/ m	钻遇岩性	年代
白云主洼东	W6-1	文昌组	2 244	2 289	含砾细砂岩	侏罗纪
白云主洼东	W4-1	文昌组	3 285	3 290	砂岩	白垩纪
白云主洼东	H34-6	文昌组	3 838	3 841	细砂岩	白垩纪
白云主洼东	H34-6	基底	3 949	3 955	沉凝灰岩	古近纪/白垩纪
白云西洼	Y13-2	文昌组	2 622	2 661	砂岩	白垩纪

前人研究认为,白云凹陷文昌期物源区主要为盆地低隆起与低凸起的中-酸性火成岩^[19,26,44],盆地潜在物源区番禺低隆起、云荔低隆起与白云东低凸起的基底岩性包括花岗岩与凝灰岩两大类。笔者选取了白云凹陷8口井基底样品中谐和度高于90%的410颗基底火成岩碎屑锆石和374颗文昌组沉积岩碎屑锆石进行了U-Pb定年分析,共得到符合条件的碎屑锆石U-Pb定年数据784个。碎屑锆石颗粒的统计数目是影响碎屑锆石U-Pb定年准确性的关键因素,目前认可的具有数理统

计意义且能比较准确进行物源示踪的碎屑锆石数目应大于80粒,本次选取的H34-6、H29-1和H16-2井,受岩心取样困难的影响,基底火成岩碎屑锆石颗粒较少,但通过多口井多个取样点位的综合分析,能减少因部分取样点位的碎屑锆石颗粒数目少而带来的不利影响。

W9-1井基底凝灰岩碎屑锆石定年结果可代表南部云荔低隆起的火成岩年龄,H29-1、H34-3与H34-6井位于白云东低凸起,可代表该凸起物源区的火成岩年龄,H26-2井可代表北部番禺低隆起物源区火成岩年龄(图2)。白云凹陷东部5口井的碎屑锆石年龄分布特征较为相似,年龄峰值主要分布于167~110 Ma,以中生代燕山期火成岩为主,表明白云凹陷周缘潜在物源区的火成岩基底形成于同一时期。另外,位于白云凹陷东北部的H34-6、H29-1与H16-2井明显出现了位于42 Ma左右的年龄峰值,该时期正对应于惠州运动,白云凹陷东北部岩浆火山作用强烈,结晶喷发形成了新的火成岩。

白云凹陷东部文昌组4口井的碎屑锆石年龄频谱图均呈现单峰状(图2),年龄峰值位于175~106 Ma,

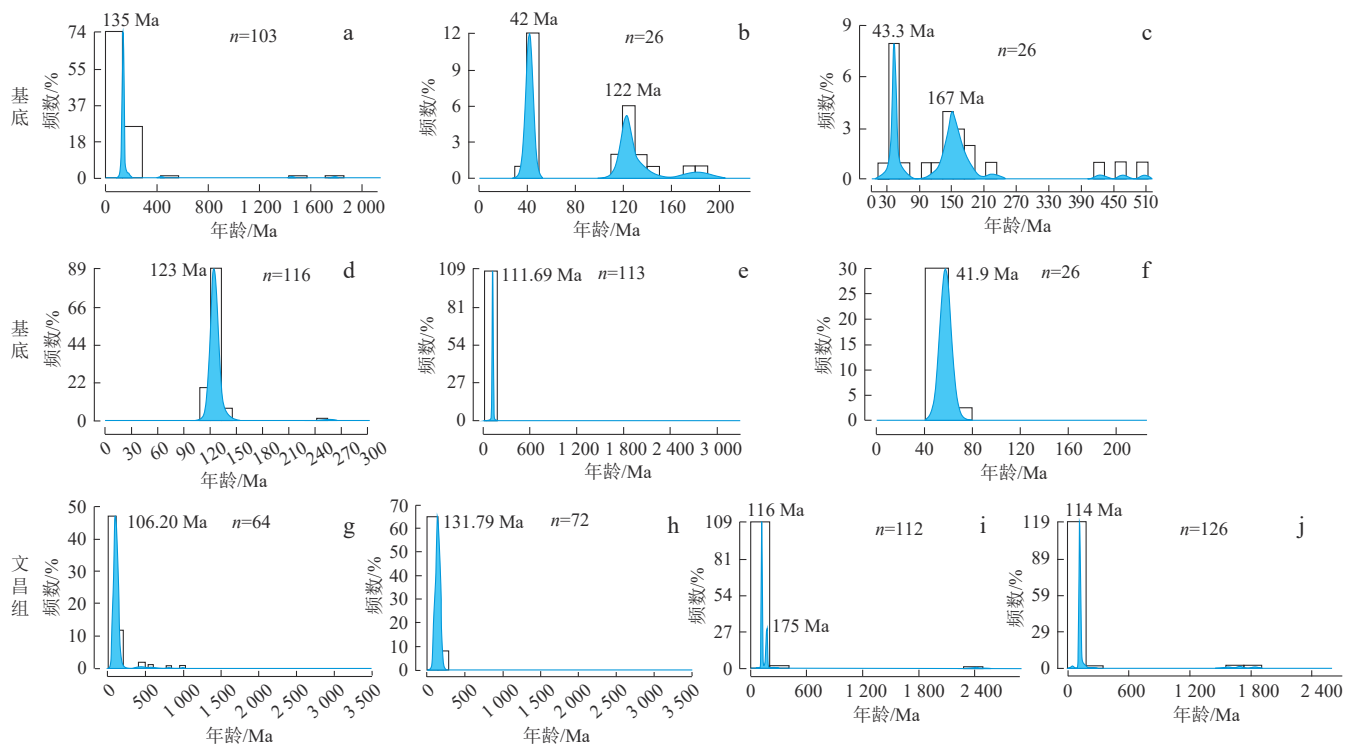


图2 白云凹陷东部钻井样品锆石U-Pb年龄频谱

Fig. 2 Zircon U-Pb age spectrum in the eastern Baiyun Sag

a. W9-1井,埋深3 625.00~3 635.00 m,凝灰岩;b. H34-6井,埋深3 949.00~3 955.00 m,凝灰岩;c. H29-1井,埋深3 200.00~3 240.00 m,凝灰岩;d. H34-6井,埋深4 015.00~4 018.00 m,花岗岩;e. H34-3井,埋深3 750.00~3 763.00 m,花岗岩;f. H16-2井,埋深2 619.00~2 631.00 m,花岗岩;g. H27-1井,埋深5 006.00~5 015.00 m,文三段;h. W9-2井,埋深3 612.80~3 700.00 m,文四段;i. W4-1井,埋深3 285.00~3 290.00 m,文五段;j. H34-6井,埋深3 838.00~3 841.00 m,文五段

(a—c为基底凝灰岩样品;d—f为基底花岗岩样品;g—j为文昌组沉积岩样品。)

与白云凹陷周缘番禺低隆起、云荔低凸起及白云东低凸起的中生代燕山期火成岩基底形成年龄相吻合,表明白云凹陷东部文昌期为盆内近物源沉积。文五段—文三段,随着地层年龄变新,碎屑锆石 U-Pb 年龄有逐渐从老变新的趋势, W4-1 井与 H34-6 井文五段分别存在 2 400 Ma 和 1 700 Ma 左右的少量锆石年龄数据,但在地层年龄较新的文三段和文四段无该年龄段的锆石, H27-1 井文三段锆石年龄最新,仅 106. 20 Ma,且并未见白云凹陷东北部基底普遍存在的 42 Ma 锆石年龄峰值。该现象表明在白云凹陷东部文昌组沉积初期,物源区地层除中生代燕山期火成岩外,还包含少量的中元古代原始沉积物源,但在文昌中、晚期由于白云凹陷周缘低隆起和低凸起的不断构造抬升与火山岩浆作用,物源区逐渐单一化为中生代燕山期火成岩,并且在白云凹陷文昌组沉积过程中,番禺低隆起与白云东低凸起依然存在活跃的火山岩浆作用,但新形成的新生代火山岩并未对文昌组沉积供源。

2.2 物源体系的重矿物特征

重矿物是分析沉积物物源体系的重要方法之一,根据碎屑重矿物组合及其分布可以确定物源体系特征^[45]。稳定的重矿物如金红石、电气石和锆石的比例变化可以反映物源的距离和方向。通常根据 ZTR 指数(重矿物成熟度)及陆源稳定重矿物含量综合判断物源的搬运距离及搬运方向,并根据重矿物组合类型分析物源分支。根据钻遇文昌组的 4 口井重矿物资料可知,文昌组在云荔低隆起具有 5 类重矿物组合,即:①白钛矿+锆石组合(白钛矿为主);②锆石+白钛矿组合(锆石为主);③锆石+锐钛矿组合;④白钛矿+电气石组合;⑤电气石+锆石+磷灰石组合。平面上可将物源大致分为 3 类。W21-1 井、W3-4 井和 W4-1 井文昌组的重矿物组合类型相似,整体上 3 口井的重矿物稳定指数较小,反映沉积物搬运距离较短。

2.3 物源体系在 PSDM 深度域地震资料的响应

利用地震资料识别地震前积反射结构可以定性分析物源的方向,尤其是三角洲前积体的方向,可以指示物源的方向。笔者利用深度域地震资料识别典型位置处三角洲最大前积角并确定文昌组物源及砂体展布方向。文六段沉积期在南部云荔低隆起发育有斜交前积地震反射结构,由相对较陡的反射同相轴组成,上部顶超于 T_8^s ,下部下超于 T_8^b 底界面,反映了文六段沉积期云荔低隆起陡坡带丰富的沉积物供源和相对稳定的湖平面变化,地震相为弱振幅、低连续、中频的特征,前积方

向为自南向北,为陡坡带扇三角洲沉积。文五段沉积期在白云东低凸起与南部云荔低隆起可识别出 2 个小型的地震前积反射特征(图 3)。白云东低凸起东部缓坡带文五段沉积期发育一套呈低角度叠瓦状前积的地震反射结构,前积体内部反射同相轴近乎平行,地震相表现为低振幅中等连续性与中频的特征,前积方向为自北向南,地层沉积厚度较薄,表现为浅水沉积的特征,通过前积方向分析可知文五段白云东起凸起缓坡带的碎屑物质经近南北向水流输送至白云主洼东部的湖盆中,为缓坡带辫状河三角洲沉积。云荔低隆起北部陡坡带发育楔形前积的地震反射特征,前积体地震相呈现透镜状中强振幅高连续低频的特征,前积体根部则呈现杂乱地震相,前积方向为自南向北,地层沉积厚度较厚,为陡坡带扇三角洲沉积。白云凹陷北坡文四段及文三段主物源方向为近 NW 向,存在多个明显的分支,自北向南,物源方向由近 NW 向逐渐过渡至近 NNW 向。

3 白云凹陷搬运体系

3.1 物源搬运通道类型及特征

白云凹陷物源搬运通道主要有 U 型谷、V 型谷以及断槽等几种类型(表 2)。U 型谷主要发育在白云凹陷的北坡,距离物源区相对较远的位置,水动力较强,输砂能力强,为河流壮年期的形态,下切深度浅范围广,呈叠置分布;V 型谷主要发育在云荔低隆起的北侧,距离物源区近,水动力强,垂向下切作用明显,输砂能力强,为河流初期的形态;断槽主要发育在白云东低凸起四周,单断断槽属于轴向物源体系,以洪水型、滑塌型重力流沉积及近源沉积为主。

白云凹陷北坡文昌中期以断沟为“渠”。断沟延伸方向为自西向东—北东东方向由窄变宽,晚期以宽 U 型沟谷为“渠”。恩平期主要发育宽缓的 U 型谷搬运通道。

3.2 物源搬运通道分布

3.2.1 古沟谷物源通道

古沟谷物源通道的识别不仅能判断白云凹陷东部的物源方向,而且古沟谷物源通道本身可以作为有利的储集体。根据古沟谷在地震剖面上切割下伏地形,同相轴错断导致地形下凹的外部形态特征与双向上超、中间厚两端薄的透镜状内部充填特征,在白云凹陷

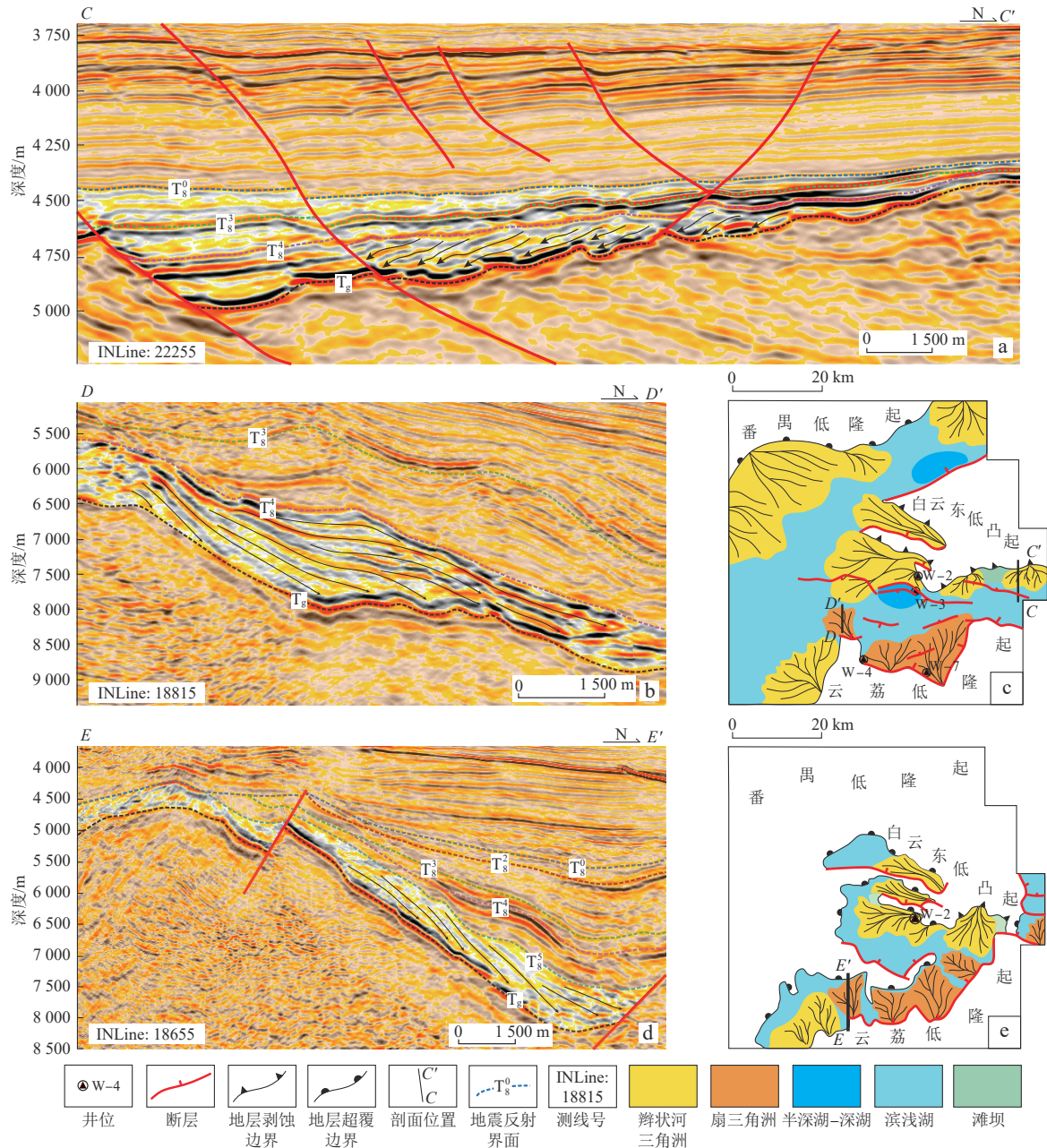


图3 白云凹陷东部文昌组地震层序界面特征

Fig. 3 Identification of seismic sequence interfaces of the Wenchang Formation in the eastern Baiyun Sag

- a. 文昌组五段叠瓦状前积反射结构剖面; b. 文昌组五段楔形前积反射结构剖面; c. 文昌组五段沉积相; d. 文昌组六段斜交前积反射结构剖面; e. 文昌组六段沉积相

东部共识别出V, U, W等3种类型的古沟谷, 在番禺低隆起、云荔低隆起、白云东低凸起均有分布。

3.2.2 断槽物源通道

白云凹陷东部断槽物源通道只在白云东低凸起发育。白云东低凸起西部发育有一条受近WE向正断层控制的单断槽物源通道(图4), 通过一系列垂直断槽方向的主测线地震剖面可以看出, 该单断槽控制了文六段至文三段沉积期的地层沉积, 文昌组呈现靠近南

部断层较厚、向北逐渐减薄的箕状地层充填特征, 沉积与沉降中心均位于断层一侧。

4 白云凹陷沉积体系

4.1 主要沉积体系类型

利用自然伽马曲线并结合录井资料, 对研究区钻遇文昌组的7口钻井进行测井相识别, 文昌组自然伽

表2 白云凹陷主要搬运通道类型及特征

古沟谷类型	充填样式		地震剖面实例	断沟及沟谷特点
U型下切谷		垂向叠置		U型古沟谷主要发育在距离物源区相对较远的位置,水动力较强,输砂能力强,为河流壮年期的形态
		侧向叠置		
V型下切谷		垂向叠置		V型古沟谷主要发育在物源区附近,水动力强,垂向下切作用明显,输砂能力强,为河流初期的河道沉积
		侧向叠置		
单断断槽		垂向叠置		单断断槽属于轴向物源体系,以洪水型、滑塌型重力流沉积及近源沉积为主
双断断槽		侧向叠置		

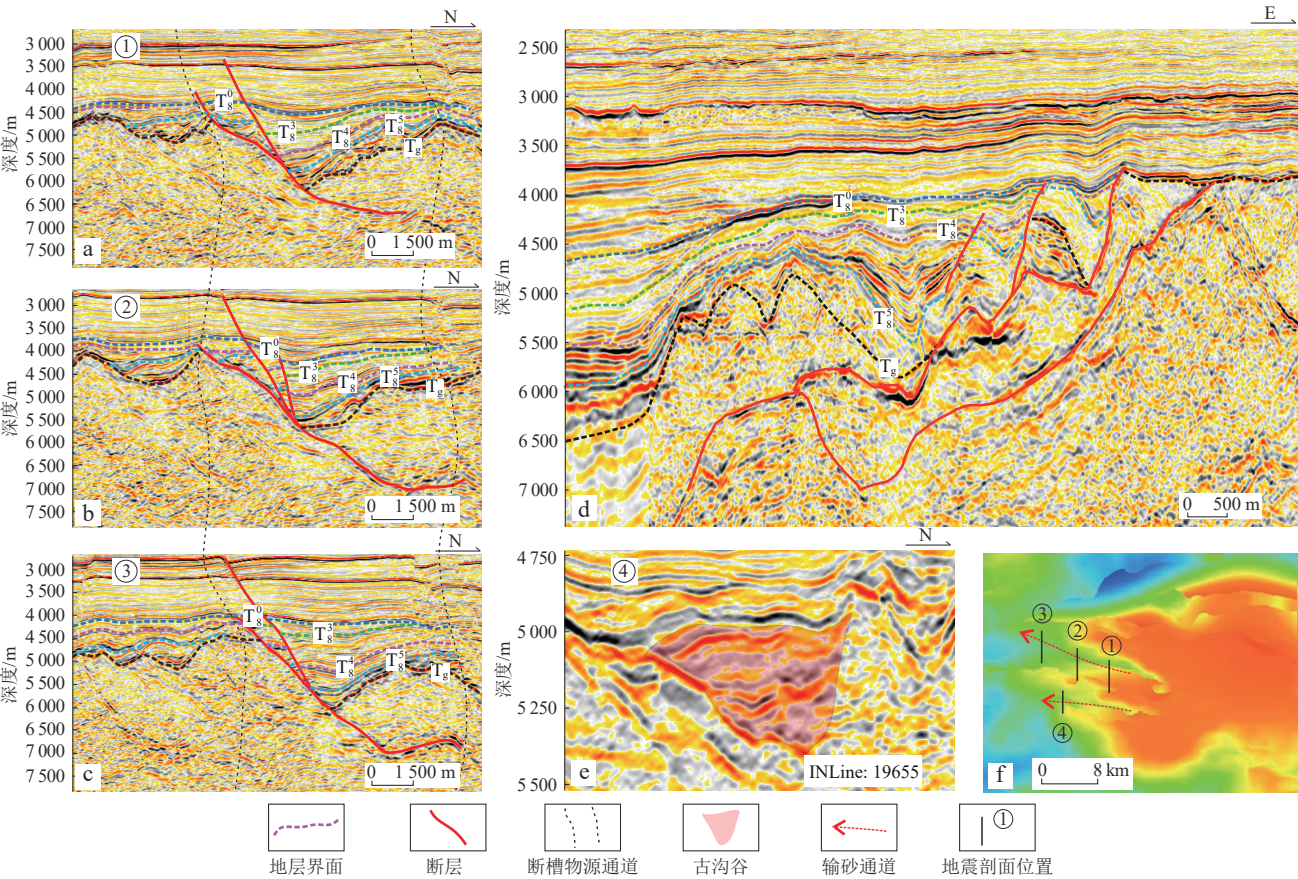


图4 白云凹陷东部断槽充填特征

Fig. 4 Sedimentary filling of fault-related troughs in the eastern Baiyun Sag

a. 垂直断槽物源通道方向的地震特征(INLine:19775);b. 垂直断槽物源通道方向的地震特征(INLine:19695);c. 垂直断槽物源通道方向的地震特征(INLine:19615);d. 平行断槽物源通道方向的地震特征;e. 垂直断槽物源通道方向的地震特征(INLine:19655);f. 白云凹陷东部断槽平面位置

马测井曲线主要呈箱形、钟形、漏斗形、交互指形和平直形等几种类型。结合文昌组钻井揭示的岩性及沉积相标志特征,明确文昌组主要发育扇三角洲-浅湖沉积体系、辫状河三角洲-浅湖沉积体系及少量滨浅湖和半深湖沉积体系,包括辫状河三角洲相、扇三角洲相、湖底扇相和湖泊相等4种主要的沉积相类型。

辫状河三角洲相主体部分包括辫状河三角洲平原和辫状河三角洲前缘。辫状河三角洲平原主要岩性为粗砂岩、中砂岩和细砂岩,垂向上呈正韵律,其辫状河道的自然电位及自然伽马曲线形态呈箱形。辫状河三角洲前缘主要岩性为中砂岩、细砂岩、粉砂岩及泥质粉砂岩夹泥岩,垂向上呈正韵律,其水下分流河道的自然伽马曲线形态呈钟形。H34-6井钻遇文五段(WCSQ2)与文六段(WCSQ1),岩性主要为细-中砂岩夹薄层的泥岩,表现为多期的辫状河三角洲平原的分流河道相互叠加,反映了文六段与文五段沉积期,河道交替变动频繁,物源碎屑物质供应充足。

扇三角洲相主要包括扇三角洲平原及扇三角洲前缘,主要岩性为细砂岩、含砾中砂岩,主要发育于凹陷周边同沉积边界断层附近,搬运距离短,快速堆积,分选差-中等,具正递变层理。W4-1井及W3-4井文五段均为扇三角洲相中的扇三角洲平原亚相,W4-1井岩性为厚层的细砂岩、中砂岩和粗砂岩,还有少量的灰色页岩与薄层的泥岩,泥岩中含有大量的陆源植物碎屑,表现出近源扇三角洲的沉积特征,物源区碎屑物质供应充足。文五段沉积初期表现为湖退体系域的反旋回特征,晚期表现为湖进体系域的正旋回特征,该时期文五段含有的钙质薄片,也反映了湖进体系域的特征。

湖底扇相主要岩性为细砂岩、粉砂岩及不等粒砂岩,浊积特征明显,岩性组合特征表现为大段泥岩夹中薄层砂岩,分选差。

湖泊相在文昌组主要体现为滨浅湖、滩坝及半深湖-深湖沉积。W3-2井文四段为滨浅湖相沉积,发育了一整套厚层的灰色泥岩,表现为湖进体系域的正旋回特征,文五段为半深湖沉积,岩性为巨厚层灰色泥岩,底部夹薄层粉砂岩,也反映了文五段晚期的湖侵特征。

4.2 主要沉积体系展布

4.2.1 初始裂陷期($T_6-T_8^5$)

WCSQ1(文六段)时期在珠江运动一幕的影响下,白云凹陷开始发育,整体呈复式半地堑结构,多个洼陷受控于高角度正断层,呈NEE向展布,地层表

现为“南断北超”的特征,地层分布范围相对比较局限^[46]。

WCSQ1时期初始断陷盆地湖泊水深较浅,以滨浅湖相为主。该时期洼陷北部以白云东低凸起为物源区,西侧发育3个近东西向轴向物源的辫状河三角洲相沉积,东侧则发育缓坡带短轴物源为主的辫状河三角洲沉积,在白云东低凸起的斜坡区及辫状河三角洲的侧缘零星发育滩坝沉积。白云主洼东部的南侧以云荔低隆起为物源区,南部北倾边界断层控洼,断层活动强烈,断层北侧发育楔形杂乱地震相,为扇三角洲相沉积,共发育4个扇三角洲朵体,白云主洼东部以云荔低隆起为物源,在云荔低隆起西侧发育辫状河三角洲。在白云凹陷西南,云开低凸起提供多个分支物源,形成5个主要的辫状河三角洲。整体上,该时期以轴向物源供应为主形成主要的辫状河三角洲,横向物源为辅形成断控的扇三角洲沉积相(图5a)。

4.2.2 拆离裂陷早期($T_8^5-T_8^3$)

WCSQ2(文五段)时期白云凹陷进入拆离裂陷期,南部控洼拆离断层呈现大范围长距离的活动伸展,白云凹陷初步形成统一洼陷,湖盆面积显著扩大,断层上盘出现旋转翘倾现象,沉积中心向北偏移。

WCSQ2早期洼陷北部以白云东低凸起为主物源,向西延伸的单断槽为物源通道,形成2个由东向西延伸的辫状河三角洲朵体,白云东低凸起向南部供源较弱,形成2个较小的辫状河三角洲朵体及滨浅湖滩坝;云荔低隆起物源继承发育,形成3个向北延伸的断控扇三角洲及向西延伸的2个辫状河三角洲朵体;白云北坡番禺低隆起逐渐形成规模较大的物源,其缓坡带发育4个辫状河三角洲;在白云西洼形成向西南延伸的多支规模较小的辫状河三角洲,白云西洼的西北缘及白云西洼南缘主要形成断控的扇三角洲朵体;白云凹陷西南以云开低凸起为物源,发育多支由西向东展布的辫状河三角洲朵体,横向物源形成扇三角洲。WCSQ2时期湖盆依然以滨浅湖相沉积为主,但由于拆离断层的断陷加深,半深湖-深湖范围扩大,WCSQ2晚期湖平面快速上升,湖相范围迅速增大,三角洲沉积萎缩(图5b)。

WCSQ3(文四段)时期拆离断层继续活动,湖盆面积进一步增大,沉积中心继续北移,地层沉积展布范围达到最大。白云东低凸起、云荔低隆起、番禺低隆起及云开低凸起物源继承发育。但番禺低隆起西北侧辫状河三角洲由近源沉积变为峡谷水道长距离搬运沉积,辫状河三角洲规模进一步增大,且番禺低隆起物源向

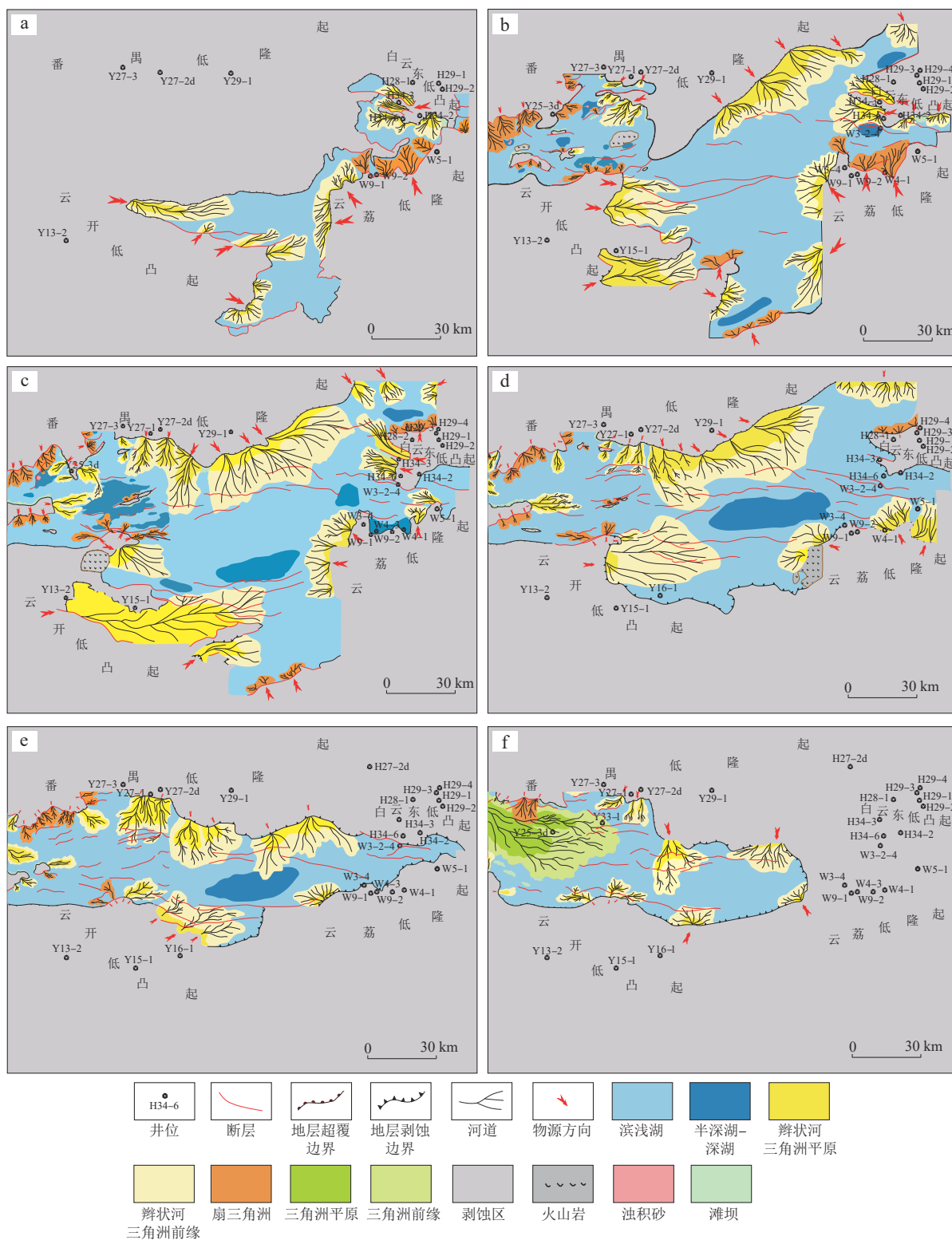


图5 珠江口盆地白云凹陷文昌组沉积相

Fig. 5 Sedimentary facies maps of the Wenchang Formation in the Baiyun Sag, PRMB

a. 文六段($T_8^5-T_8^6$); b. 文五段($T_8^4-T_8^5$); c. 文四段($T_8^3-T_8^4$); d. 文三段($T_8^2-T_8^3$); e. 文二段($T_8^1-T_8^2$); f. 文一段($T_8^0-T_8^1$)

白云西洼的供源能力增强,形成多支辫状河三角洲。白云西洼周边主要为小的物源供应形成多支规模较小的扇三角洲及辫状河三角洲。白云东低凸起南部物源

逐渐萎缩,辫状河三角洲消失。白云东低凸起继续供源,顺断沟发育辫状河三角洲,北侧对控洼断层供源,形成扇三角洲。云荔低隆起北侧供源能力减弱,发育

2个规模较小的辫状河三角洲,西侧继续供源形成多支连片分布的辫状河三角洲。白云凹陷西南的云开低凸起继续供源,形成沿沟分布的辫状河三角洲。WCSQ3时期断层活动依旧剧烈,坡折带发育,且早期湖体较深,半深湖-深湖亚相范围均有所扩大,在白云主洼南部控沉积断层北部、白云东洼及白云主洼以东局部位置发育半深湖-深湖(图5c)。

4.2.3 拆离裂陷晚期($T_8^3-T_8^0$)

WCSQ4(文三段)时期为裂陷Ib幕的开始,拆离断层活动性较裂陷早期大大减弱,由于构造抬升,沉积范围变小,伴随火山作用湖平面相对上升,沉积和沉降中心远离南部控洼断裂,转移至湖盆中心。番禺低隆起物源继承发育,在白云凹陷北部发育远源辫状河三角洲沉积,番禺低隆起向白云西洼供源能力减弱,辫状河三角洲朵体减小。白云东低凸起西侧的物源也逐渐萎缩消失,北部供源能力减弱,仅在白云东洼南部陡坡带发育发育小型扇三角洲。云荔低隆起物源继承发育,云荔低隆起北部供源能力略有增强,2个辫状河三角洲朵体有所增大,西侧供源能力略有减弱,辫状河三角洲朵体范围变小。白云凹陷西南云开低凸起的供源能力减弱,仅形成1个由西向东的辫状河三角洲。白云西洼继承性发育多支断控的扇三角洲及小型辫状河三角洲。该时期白云凹陷中心多发育滨浅湖相沉积,在白云主洼局部发育半深湖-深湖(图5d)。

WCSQ5(文二段)时期为裂陷Ib幕的中晚期,拆离断层几乎停止活动,并且由于构造抬升活动,白云东洼未沉积文二段,湖盆范围逐渐萎缩,轴向物源基本消失,垂向缓坡物源为主,主要物源为番禺低隆起,其次为云开低凸起,云荔低隆起供源能力减小,仅沉积1个小型辫状河三角洲,白云东低凸起缺乏物源通道,未形成沉积。白云西洼主要沉积由北部物源供源的辫状河三角洲及西北方向的扇三角洲。湖盆中心位于白云主洼位置,发育局部半深湖-深湖沉积。由于湖盆周边构造高部位遭受后期强烈剥蚀,残存的沉积范围较小,现今残留地层厚度较薄(图5e)。

WCSQ6(文一段)时期为裂陷Ib幕的晚期,由于构造抬升活动,湖盆范围收缩,沉积物大部分被剥蚀,残存沉积范围小。仅在白云主洼及白云西洼残留文一段。湖盆边缘由于早期的填平补齐,地形较为平坦,且湖泊水体较浅,为滨浅湖沉积环境,白云主洼周边多发育从四周向湖盆中央供源的浅水辫状

河三角洲。辫状河三角洲朵体的范围较小,数量较少,仅在白云主洼北部、东北部、东南及南部。白云西洼发育1个长距物源形成的三角洲,西洼北部发育扇三角洲及小型辫状河三角洲(图5f)。

5 白云凹陷北部源-渠-汇耦合

5.1 源-汇系统类型

源-汇系统类型划分主要有两种方案。朱红涛等(2017)将陆相盆地源-汇系统分为洋-陆边缘盆地源-汇系统、断陷盆地源-汇系统和拗陷盆地源-汇系统3大类^[2,4]。操应长等(2018)依据空间结构类型和成因机制将源-汇系统进行分类,并根据地貌的空间结构特征将源-汇系统分为近源-陡坡-深水、远源-缓坡-深水和远源-缓坡-浅水三类源-汇系统^[2-3]。古地貌是控制盆地充填演化的重要因素^[47],笔者根据文昌组主要沉积期古地貌(图6)及源-汇系统特征,将白云凹陷古近系文昌组的源-汇系统划分为近源-陡坡-深水、近源-缓坡-浅水、远源-缓坡-浅水及远源-缓坡-深水等4种类型的源-汇系统。其中,WCSQ1(文六段)时期发育近源-陡坡-深水及近源-缓坡-浅水源-汇系统;WCSQ2(文五段)时期主要发育近源-陡坡-深水、近源-缓坡-浅水、远源-缓坡-浅水源-汇系统;WCSQ3(文四段)时期、WCSQ4(文三段)时期及WCSQ5(文二段)时期白云凹陷主要发育远源-缓坡-浅水、近源-缓坡-浅水、远源-缓坡-深水及近源-陡坡-深水源-汇系统;WCSQ6(文一段)时期主要发育远源-缓坡-浅水、近源-缓坡-浅水源-汇系统。根据白云凹陷东西向及南北向主要物源方向,建立了源-汇系统类型剖面模式(图7)。

5.2 源-渠-汇系统耦合

总体上,文昌组发育番禺低隆起、云荔低隆起、云东低凸起和云开低凸起4个近物源体系。在不同时期,物源体系特征随着构造演化而呈现特征差异变化。文六段沉积期白云凹陷处于拆离前分布不连续的早期孤立断陷,物源体系表现为规模小、近源、物源充足、箕状断陷及快速充填的特征;文六段在白云主洼东部地区发育近源-陡坡-深水和近源-缓坡-浅水源-汇系统,在白云凹陷西南及云荔低隆起西部主要发育近源-缓坡-浅水源-汇系统。近源-陡坡-深水源-汇系统主要为近源沉积物同沉积断层控制下形成陡坡扇三角洲-湖泊沉积体系,近源-缓坡-浅水源-汇系统主要表现为近源沉积物在断沟及沟渠等搬运通道输砂条件

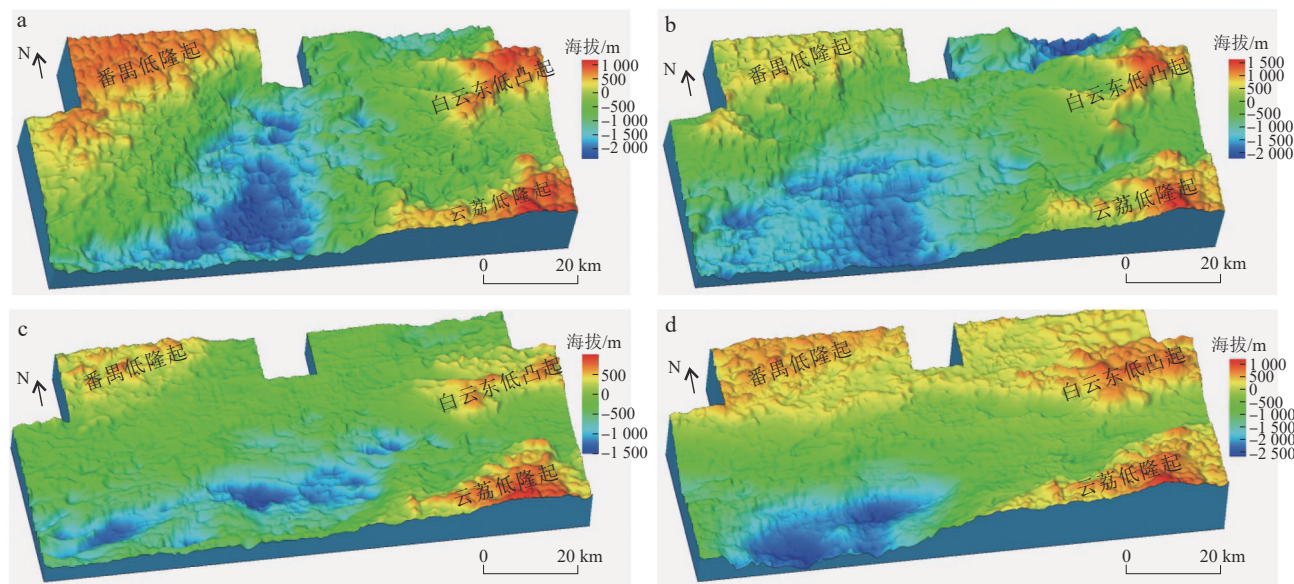


图6 珠江口盆地白云凹陷北部文昌组主要沉积时期古地貌

Fig. 6 Paleo-geomorphologies during the major deposition periods of the Wenchang Formation in the northern Baiyun Sag, PRMB

a. 文五段沉积前($T_8^4-T_8^5$); b. 文四段沉积前($T_8^3-T_8^4$); c. 文三段沉积前($T_8^2-T_8^3$); d. 文二段沉积前($T_8^0-T_8^2$)

下形成辫状河三角洲-滨浅湖沉积体系。

文五段沉积期拆离作用开始,湖盆范围扩大逐渐连片,在白云凹陷北坡为规模较大的物源,在白云凹陷东部为规模小、近源及一源多汇的发散性源-汇系统。文五段在白云凹陷东部的白云东低凸起南部和西部发育近源-缓坡-浅水源-汇系统,来自白云东低凸起的近源经过短距离搬运,在白云东低凸起南部和西部分别形成缓坡输砂和断沟输砂的辫状河三角洲-滨浅湖沉积体系,在云荔低隆起北部形成近源陡坡扇三角洲-湖泊沉积体系,在云荔低隆起西部及番禺低隆起东南形成近源-缓坡-的辫状河三角洲-滨浅湖沉积体系,物源区分水岭延伸成为三角洲朵体的分界,搬运通道与辫状河三角洲分流河道匹配良好(图8a)。

文四段沉积期湖盆进一步扩大连片分布,白云凹陷北坡物源规模大、呈多分支体系,白云凹陷东部仍然继承物源规模小、近源及一源多汇特征。文四段在白云东低凸起西侧、云荔低隆起北侧和西侧发育近源-缓坡的辫状河三角洲-滨浅湖沉积体系,在番禺低隆起南侧发育远源-缓坡的辫状河三角洲-滨浅湖沉积体系,在白云东低凸起北侧形成近源-陡坡的扇三角洲-半深湖-深湖沉积体系(图8b)。

文三段沉积期白云凹陷部分地区受岩浆底侵抬升、湖盆逐渐萎缩,白云南洼与白云主洼分隔,白云凹陷北坡继承规模大的物源,白云凹陷东部呈物源规模继续缩小、近源及一源多汇特征。文三段在番禺低隆

起南部和白云凹陷西南发育远源-缓坡的辫状河三角洲-滨浅湖沉积体系,在白云东低凸起北侧发育近源-陡坡的扇三角洲-湖泊沉积体系、云荔低隆起北侧和西侧发育近源-缓坡的辫状河三角洲-滨浅湖沉积体系(图8c)。

文二段及文一段沉积期白云凹陷受到构造抬升的影响、残存部分湖盆。文二段在番禺低隆起南部和云荔低隆起西侧发育近源-缓坡的辫状河三角洲-滨浅湖沉积体系(图8d)。文昌末期湖盆抬升接受剥蚀、残存局部湖盆。文一段在残留湖泊周边发育近源-缓坡的辫状河三角洲-滨浅湖沉积体系,在白云西洼的西侧发育一套远源-缓坡的三角洲-滨浅湖沉积体系及一套近源-陡坡的扇三角洲沉积体系。

6 源-汇系统演化对油气勘探的指示

白云凹陷源-汇系统及沉积体系为主力烃源岩及储层预测提供了基础,根据沉积体系的分布,预测了文昌组各层段主力烃源岩及规模砂体及有利相带砂体的分布。

6.1 源-汇系统控制的烃源岩分布预测

白云凹陷源-汇系统控制下的沉积体系及沉积相分布特征表明,区内发育规模滨浅湖及局限半深湖-深湖沉积,为主力烃源岩的分布预测提供了基础。滨浅湖沉积主要分布于文昌组各层段,在文五段一文三

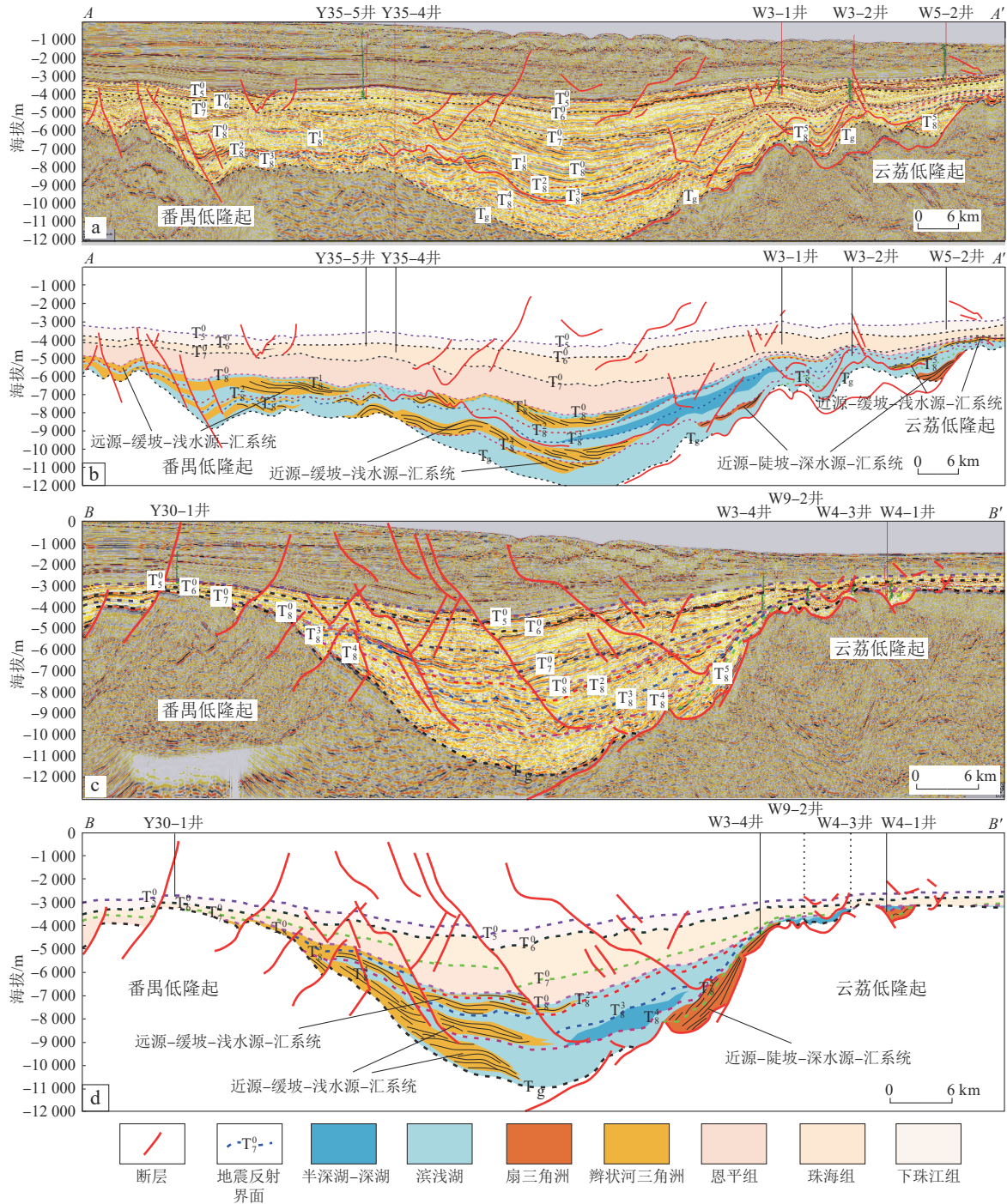


图7 珠江口盆地白云凹陷源-汇系统类型剖面模式(剖面位置见图1)

Fig. 7 Profiles showing the source-to-sink systems of the Wenchang Formation in the Baiyun Sag, PRMB

(see Fig. 1 for the location of the section)

a. 东西向地震剖面; b. 东西向解释剖面; c. 南北向地震剖面; d. 南北向解释剖面

段分布范围最广,半深湖-深湖沉积分布局限,在文五段仅零星分布、在文四段一文二段的湖盆中央局部范围分布,在文六段及文一段不发育半深湖-深湖沉积。结合前期的烃源岩研究成果可知,白云凹陷文昌组主力烃源岩主要分布于滨浅湖亚相,而优质烃源岩分布于局限的半深湖-深湖亚相。

6.2 源-汇系统控制的规模砂体及有利相带砂体分布

白云凹陷文昌组源-汇系统控制了规模砂体及部分有利相带砂体的分布。文昌期,白云凹陷处于宽缓裂陷结构及大物源控制下,白云凹陷北坡发育的辫状河三角洲富砂沉积体系控制规模砂体平面展布,其中

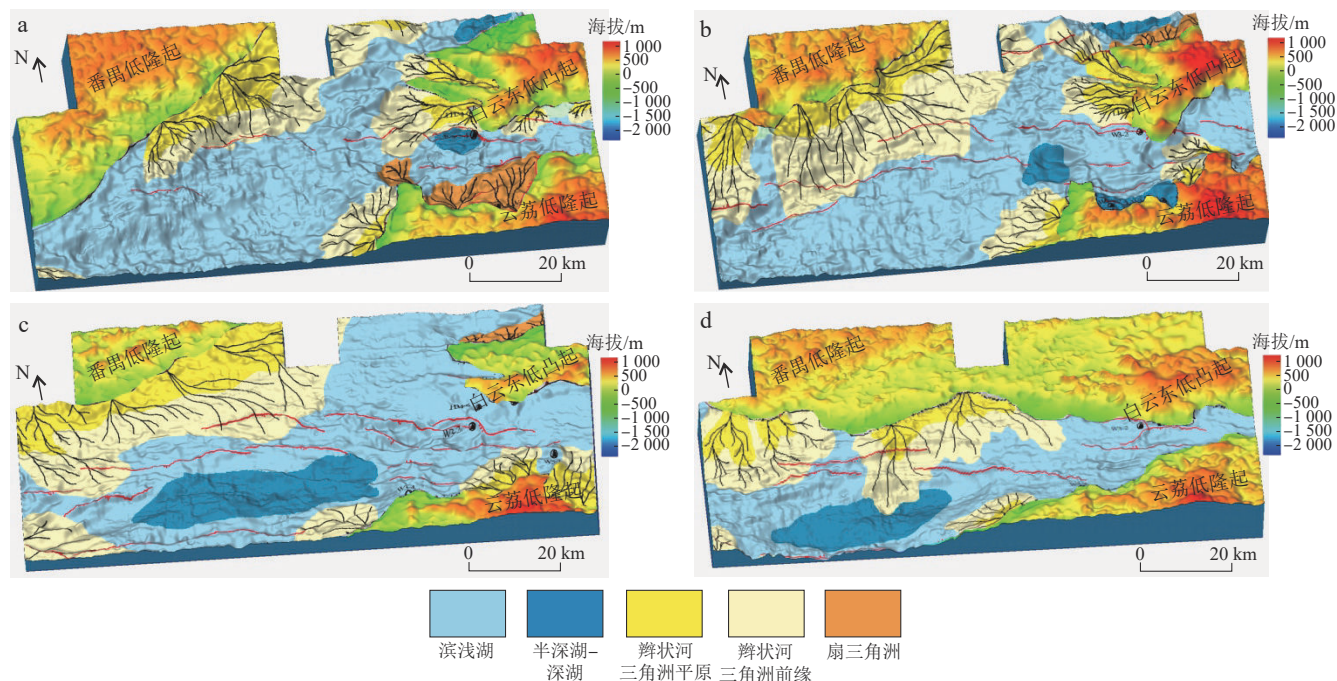


图8 珠江口盆地白云凹陷北部文昌组沉积相与古地貌叠合图

Fig. 8 Superimpositions of the paleo-geomorphologies and sedimentary facies of the Wenchang Formation in the northern Baiyun Sag, PRMB

a. 文五段; b. 文四段; c. 文三段; d. 文二段

辫状河三角洲平原及辫状河三角洲内前缘部分砂体厚度大,砂/泥比高值,平面上分布范围也相对较大,是规模砂体发育的主要位置。而在白云凹陷东部,辫状河三角洲及扇三角洲规模小,其中部分有利相带则为优质储层提供了基础,贫凝灰质-砂质的辫状河三角洲平原和扇三角洲平原砂体厚度相对较大,是有利相带砂体的主要分布位置。

7 结论

1) 古近纪文昌期,白云凹陷发育番禺低隆起、云荔低隆起、云东低凸起和云开低凸起4个主要的近物源体系,以断沟及沟谷为渠,形成了4套完整的“源-渠-汇系统”。源-汇系统划分为近源-陡坡-深水、近源-缓坡-浅水、远源-缓坡-浅水及远源-缓坡-深水等4种源-汇系统类型。

2) 白云凹陷东部文昌组存在辫状河三角洲、扇三角洲、湖底扇、滩坝与湖相沉积共5种沉积相类型。初始裂陷期与拆离裂陷早期由于构造活动强烈,陡坡侧发育扇三角洲-半深湖沉积体系,缓坡侧发育辫状河三角洲-滨浅湖沉积体系,拆离裂陷晚期由于构造活动减弱与盆地填平补齐的影响,只发育辫状河三角洲-滨浅湖沉积体系。

3) 白云凹陷存在古沟谷、断槽与构造转换带等物源通道类型,与不同的物源区组合形成了不同供源方式,并对沉积体系的类型与展布产生影响。番禺低隆起为长距离多分支的古沟谷物源通道,发育大型辫状河三角洲沉积;白云东低凸起为古沟谷与单断槽物源通道,发育轴向辫状河三角洲沉积;云荔低隆起为短距离古沟谷与构造转换带物源通道,发育大型扇三角洲与小型辫状河三角洲沉积。

4) 白云凹陷源-汇及沉积体系研究为主力烃源岩及储层预测提供了基础。在白云凹陷文昌组物源体系、搬运通道体系与沉积体系认识的基础上,提出不同源-汇系统具有不同的控砂机制与模式,并根据沉积体系的分布预测了文昌组各三级层序内主力烃源岩、规模砂体及有利相带砂体的分布。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 徐长贵,杜晓峰,朱红涛. 陆相断陷盆地源汇系统控砂原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2020: 1-5.
XU Changgui, DU Xiaofeng, ZHU Hongtao. Principle and

- application of sand control in source to sink system in continental rift basin[M]. Beijing: Science Press, 2020: 1-5.
- [3] 操应长, 徐琦松, 王健. 沉积盆地“源-汇”系统研究进展[J]. 地学前缘, 2018, 25(4): 116-131.
- CAO Yingchang, XU Qisong, WANG Jian. Progress in “source-to-sink” system research[J]. Earth Science Frontiers, 2018, 25(4): 116-131.
- [4] 朱红涛, 徐长贵, 朱筱敏, 等. 陆相盆地源-汇系统要素耦合研究进展[J]. 地球科学, 2017, 42(11): 1851-1870.
- ZHU Hongtao, XU Changgui, ZHU Xiaomin, et al. Advances of the source to sink units and coupling model research in continental basin[J]. Earth Science, 2017, 42(11): 1851-1870.
- [5] 彭光荣, 杜晓东, 姜素华, 等. 基于古地貌和源-汇特征分析的烃源岩评价: 以珠江口盆地阳江凹陷为例[J]. 地学前缘, 2022, 29(5): 188-202.
- PENG Guangrong, DU Xiaodong, JIANG Suhua, et al. Source rock evaluation based on paleotopographic and source-to-sink analysis: An example of the Yangjiang Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2022, 29(5): 188-202.
- [6] 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.
- [7] 龚承林, 齐昆, 徐杰, 等. 深水源-汇系统对多尺度气候变化的过程响应与反馈机制[J]. 沉积学报, 2021, 39(1): 231-252.
- GONG Chenglin, QI Kun, XU Jie, et al. Process-product linkages and feedback mechanisms of deepwater source-to-sink responses to multi-scale climate changes[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(1): 231-252.
- [8] 曾智伟. 南海北部珠江口盆地古近纪源-汇系统耦合研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2020.
- ZENG Zhiwei. Source-to-sink (S2S) system analysis of the Paleogene in the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2020.
- [9] 姜在兴. 沉积体系及层序地层学研究现状及发展趋势[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(5): 535-541.
- JIANG Zaixing. Studies of depositional systems and sequence stratigraphy: The present and the future[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(5): 535-541.
- [10] 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.
- [11] 朱红涛, 杨香华, 周心怀, 等. 基于地震资料的陆相湖盆物源通道特征分析: 以渤中凹陷西斜坡东营组为例[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2013, 38(1): 121-129.
- ZHU Hongtao, YANG Xianghua, ZHOU Xinhui, et al. Sediment transport pathway characteristics of continental lacustrine basins based on 3-D seismic data: An example from Dongying Formation of western slope of Bozhong Sag [J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2013, 38(1): 121-129.
- [12] 林杨松, 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.
- [13] 刘强虎, 朱红涛, 舒誉, 等. 珠江口盆地恩平凹陷古近系恩平组物源体系及其对滩坝的控制[J]. 石油学报, 2015, 36(3): 286-299.
- LIU Qianghu, ZHU Hongtao, SHU Yu, et al. Provenance systems and their control on the beach-bar of Paleogene Enping Formation, Enping Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(3): 286-299.
- [14] 刘强虎, 朱筱敏, 李顺利, 等. 沙垒田凸起前古近系基岩分布及源-汇过程[J]. 地球科学, 2016, 41(11): 1935-1949.
- LIU Qianghu, ZHU Xiaomin, LI Shunli, et al. Pre-Paleogene bedrock distribution and source-to-sink system analysis in the Shaleitian uplift[J]. Earth Science, 2016, 41(11): 1935-1949.
- [15] 刘强虎. 渤海湾盆地沙垒田凸起古近系“源-渠-汇”系统耦合研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016.
- LIU Qianghu. “Source-to-sink” system coupling analysis of the Paleogene, Shaleitian uplift, Bohai Bay Basin, China [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2016.
- [16] 徐长贵. 渤海古近系坡折带成因类型及其对沉积体系的控制作用[J]. 中国海上油气, 2006, 18(6): 365-371.
- XU Changgui. Genetic types of Paleogene slope-break zones and their controls on depositional system in Bohai offshore [J]. China Offshore Oil and Gas, 2006, 18(6): 365-371.
- [17] 朱筱敏, 康安, 王贵文. 陆相坳陷型和断陷型湖盆层序地层样式探讨[J]. 沉积学报, 2003, 21(2): 283-287.
- ZHU Xiaomin, KANG An, WANG Guiwen. Sequence stratigraphic models of depression and faulted-down lake basins [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(2): 283-287.
- [18] 肖凡. 源-汇系统组成单元搬运通道特征及其控制下的沉积体定量预测[D]. 武汉: 中国地质大学, 2017.
- XIAO Fan. Characteristics of transport pathways in component units of source to sink systems and quantitative prediction on sedimentary bodies under its control [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2017.
- [19] 曾智伟. 珠江口盆地白云凹陷古近系恩平组源-汇系统研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2016.
- ZENG Zhiwei. Source-to-sink systems analysis of the Paleogene Enping Formation, Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin [D].

- Wuhan: China University of Geosciences, 2016.
- [20] CARTER L, ORPIN A R, KUEHL S A. From mountain source to ocean sink—the passage of sediment across an active margin, Waipaoa Sedimentary System, New Zealand[J]. *Marine Geology*, 2010, 270(1/4): 1–10.
- [21] LIU Qianghu, ZHU Hongtao, SHU Yu, et al. Provenance identification and sedimentary analysis of the beach and bar systems in the Palaeogene of the Enping Sag, Pearl River Mouth Basin, South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 70: 251–272.
- [22] 侯元立, 邵磊, 乔培军, 等. 珠江口盆地白云凹陷始新世——中新世沉积物物源研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2020, 40(2): 19–28.
- HOU Yuanli, SHAO Lei, QIAO Peijun, et al. Provenance of the Eocene–Miocene sediments in the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2020, 40(2): 19–28.
- [23] 高阳东, 张向涛, 张丽丽, 等. 珠江口盆地中生代陆缘岩弧地质特征及构造背景[J]. *地球科学*, 2022, 47(7): 2317–2327.
- GAO Yangdong, ZHANG Xiangtao, ZHANG Lili, et al. Geological characteristics and tectonic settings of Mesozoic continental margin magmatic arc in Pearl River Mouth Basin[J]. *Earth Science*, 2022, 47(7): 2317–2327.
- [24] 柳保军, 庞雄, 谢世文, 等. 珠江口盆地白云凹陷壳幔拆离断裂活动对深层大型三角洲沉积体系的控制作用[J]. *地球科学*, 2022, 47(7): 2354–2373.
- LIU Baojun, PANG Xiong, XIE Shiwen, et al. Control effect of crust-mantle detachment fault activity on deep large delta sedimentary system in Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. *Earth Science*, 2022, 47(7): 2354–2373.
- [25] 郑金云, 高阳东, 张向涛, 等. 珠江口盆地构造演化旋回及其新生代沉积环境变迁[J]. *地球科学*, 2022, 47(7): 2374–2390.
- ZHENG Jinyun, GAO Yangdong, ZHANG Xiangtao, et al. Tectonic evolution cycles and Cenozoic sedimentary environment changes in Pearl River Mouth Basin[J]. *Earth Science*, 2022, 47(7): 2374–2390.
- [26] 崔宇驰, 曹立成, 乔培军, 等. 南海北部古近纪沉积物碎屑锆石 U–Pb 年龄及物源演化[J]. *地球科学*, 2018, 43(11): 4169–4179.
- CUI Yuchi, CAO Licheng, QIAO Peijun, et al. Provenance evolution of Paleogene sequence (northern South China Sea) based on detrital zircon U–Pb dating analysis[J]. *Earth Science*, 2018, 43(11): 4169–4179.
- [27] 庞雄, 任建业, 郑金云, 等. 陆缘地壳强烈拆离薄化作用下的油气地质特征——以南海北部陆缘深水白云凹陷为例[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(1): 27–39.
- PANG Xiong, REN Jianye, ZHENG Jinyun, et al. Petroleum geology controlled by extensive detachment thinning of continental margin crust: A case study of Baiyun Sag in the deep-water area of northern South China Sea [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(1): 27–39.
- [28] 文静, 赵靖舟, 李军, 等. 白云凹陷中深层古近系砂岩储层特征及溶蚀作用对优质储层的控制作用[J]. *特种油气藏*, 2022, 29(6): 47–55.
- WEN Jing, ZHAO Jingzhou, LI Jun, et al. Characteristics of Mid-Deep Paleogene sandstone reservoirs in Baiyun Sag and controlling effect of dissolution on high-quality reservoirs [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2022, 29(6): 47–55.
- [29] 邵磊, 孟晓捷, 张功成, 等. 白云凹陷断裂特征对构造与沉积的控制作用[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(9): 1435–1441.
- SHAO Lei, MENG Xiaojie, ZHANG Gongcheng, et al. Feature of faults system and its influence on tectonic and sedimentary history of Baiyun Sag[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2013, 41(9): 1435–1441.
- [30] 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.
- [31] 米立军, 张功成, 沈怀磊, 等. 珠江口盆地深水区白云凹陷始新统一下渐新统沉积特征[J]. *石油学报*, 2008, 29(1): 29–34.
- MI Lijun, ZHANG Gongcheng, SHEN Huailei, et al. Eocene–Lower Oligocene sedimentation characteristics of Baiyun Sag in the deep water area of Pearl River Mouth Basin [J]. *Acta Petroleologica Sinica*, 2008, 29(1): 29–34.
- [32] 米立军, 柳保军, 何敏, 等. 南海北部陆缘白云深水区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.
- [33] 吴宇翔, 柳保军, 张春生, 等. 珠江口盆地白云凹陷古近纪挠曲缓坡带三角洲沉积过程响应水槽模拟[J]. *石油实验地质*, 2022, 44(3): 476–486.
- WU Yuxiang, LIU Baojun, ZHANG Chunsheng, et al. Flume simulation of response of deltaic sedimentary process to Paleogene flexural gentle slope belt in Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2022, 44(3): 476–486.
- [34] 代向明, 李志刚, 王伟涛, 等. 珠江口盆地构造变形特征与白云凹陷构造–沉积正演模拟研究[J]. *大地构造与成矿学*, 2022, 46(3): 517–529.
- DAI Xiangming, LI Zhigang, WANG Weitao, et al. The tectonic deformation characteristics of the pearl river mouth basin and tectonic-sedimentary forward modeling of the Baiyun Sag [J].

- Geotectonica et Metallogenia, 2022, 46(3): 517-529.
- [35] 葛家旺, 朱筱敏, 张向涛, 等. 珠江口盆地陆丰凹陷文昌组构造-沉积演化模式[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(2): 308-322.
- GE Jiawang, ZHU Xiaomin, ZHANG Xiangtao, et al. Tectono-sedimentation model of the Eocene Wenchang Formation in the Lufeng Depression, Pearl River Mouth Basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(2): 308-322.
- [36] 庞雄, 郑金云, 任建业, 等. 南海北部陆缘超伸展区白云凹陷断陷结构演化与岩浆作用[J]. 地球科学, 2022, 47(7): 2303-2316.
- PANG Xiong, ZHENG Jinyun, REN Jianye, et al. Structural evolution and magmatism of fault depression in Baiyun Sag, northern margin of South China Sea[J]. Earth Science, 2022, 47(7): 2303-2316.
- [37] WANG Jiahao, PANG Xiong, LIU Baojun, et al. The Baiyun and Liwan sags: Two supradetachment basins on the passive continental margin of the northern South China Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 95: 206-218.
- [38] YE Qing, MEI Lianfu, SHI Hesheng, et al. The Late Cretaceous tectonic evolution of the South China Sea area: An overview, and new perspectives from 3D seismic reflection data[J]. Earth-Science Reviews, 2018, 187: 186-204.
- [39] 吴伟, 白晓婧, 刘惟庆, 等. 白云凹陷北坡珠江组下部储层生物遗迹及沉积演化特征[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2023, 47(1): 12-24.
- WU Wei, BAI Xiaojing, LIU Weiqing, et al. Characteristics of sedimentary reservoirs trace fossils and sedimentary evolution in the Lower Zhujiang Formation on north slope of Baiyun Sag[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2023, 47(1): 12-24.
- [40] 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.
- [41] 袁丽平, 蒋文敏, 李芸, 等. 珠江口盆地深水区 and 浅水区古近系文昌组烃源岩地球化学特征对比[J]. 石油实验地质, 2022, 44(5): 866-876.
- YUAN Liping, JIANG Wenmin, LI Yun, et al. A comparison of geochemical features of source rocks of Eocene Wenchang Formation in the deep and shallow water zones of Pearl River Mouth Basin, SE China[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2022, 44(5): 866-876.
- [42] 孙辉, 范国章, 邵大力, 等. 深水局局限型水道复合体沉积特征及其对储层性质的影响——以东非鲁武马盆地始新统为例[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(6): 1440-1450.
- SUN Hui, FAN Guozhang, SHAO Dali, et al. Depositional characteristics of locally restricted channel complex in deep water and its influence on reservoir properties: A case study of the Eocene series, Rovuma Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(6): 1440-1450.
- [43] 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.
- [44] 赵梦, 邵磊, 乔培军. 珠江沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄特征及其物源示踪意义[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(6): 915-923.
- ZHAO Meng, SHAO Lei, QIAO Peijun. Characteristics of detrital zircon U-Pb geochronology of the Pearl River sands and its implication on provenances[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(6): 915-923.
- [45] 操应长, 宋玲, 王健, 等. 重矿物资料在沉积物物源分析中的应用——以涪西南凹陷古近系流三段下亚段为例[J]. 沉积学报, 2011, 29(5): 835-841.
- CAO Yingchang, SONG Ling, WANG Jian, et al. Application of heavy mineral data in the analysis of sediment source: A case study in the Paleogene lower submember of the third member of the Liushagang Formation, Weixinan Depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(5): 835-841.
- [46] 贾浪波, 纪友亮, 钟大康, 等. 珠江口盆地L凹陷裂陷期始新统文昌组沉积充填模式[J]. 古地理学报, 2017, 19(3): 525-540.
- JIA Langbo, JI Youliang, ZHONG Dakang, et al. Depositional filling model of the Eocene Wenchang Formation in rift stage of L Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2017, 19(3): 525-540.
- [47] 李进步, 王继平, 王龙, 等. 古地貌恢复及其对三角洲前缘沉积砂体的控制作用——以鄂尔多斯盆地庆阳气田二叠系山西组 1³亚段为例[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(5): 1136-1145, 1158.
- LI Jinbu, WANG Jiping, WANG Long, et al. Paleogeomorphologic restoration and its controlling effect on deposition of delta-front sand bodies: A case study of Shan 1³ sub-member of the Permian Shanxi Formation, Qingyang gas field, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(5): 1136-1145, 1158.

(编辑 张玉银)