

雷永昌,邱欣卫,吴琼玲,等.惠陆低凸起东侧早文昌期源-汇系统分析与勘探实践.吉林大学学报(地球科学版),2024,54(2):413-428.doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220340.  
Lei Yongchang, Qiu Xinwei, Wu Qionglin, et al. Source and Sink System and Exploration Practice in Early Wenchang Period on East Side of Huilu Low Uplift. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(2): 413-428. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220340.

# 惠陆低凸起东侧早文昌期源-汇系统分析与勘探实践

雷永昌<sup>1</sup>,邱欣卫<sup>1</sup>,吴琼玲<sup>1</sup>,朱红涛<sup>2</sup>,肖张波<sup>1</sup>,李敏<sup>1</sup>

1.中海石油(中国)有限公司深圳分公司,广东 深圳 518054

2.中国地质大学(武汉)资源学院,武汉 430074

**摘要:**惠陆低凸起东侧为陆丰南富生烃洼陷,为厘清该低凸起东侧物源面貌及沉积储层分布规律,综合利用钻井和三维地震资料,恢复了古物源区面貌,描述了源-汇体系要素,预测了富砂沉积体平面分布,并探讨了砂体差异富集的控制因素。结果表明:惠陆低凸起发育完整的受古地貌控制的源-汇系统,研究区古近纪下文昌组进一步可划分为A—H共8个凸起群单元,在古地貌恢复的基础之上,8个凸起群单元共划分出17个由独立流域和对应沉积区组成的源-汇系统。惠陆低凸起东侧发育流域1—6组成的6个独立的源-汇系统,其中流域2、4和6剥蚀范围大,基底受剥蚀能力强,水系发育数量多且相对汇聚,是主要的优势物源供给区。2号流域(陆丰13东洼缓坡中部)大的剥蚀面积、花岗岩和喷出岩母岩为大型辫状河三角洲及优势储层发育提供了物质基础,多个水系和平面上的优势汇聚为优质的水下分流河道砂岩储层提供了良好的发育条件。

**关键词:**惠陆低凸起;陆丰凹陷;源-汇体系;早文昌期;勘探实践

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220340

中图分类号:P618.13

文献标志码:A

## Source and Sink System and Exploration Practice in Early Wenchang Period on East Side of Huilu Low Uplift

Lei Yongchang<sup>1</sup>, Qiu Xinwei<sup>1</sup>, Wu Qionglin<sup>1</sup>, Zhu Hongtao<sup>2</sup>, Xiao Zhangbo<sup>1</sup>, Li Min<sup>1</sup>

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

2.School of Earth Resources, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

**Abstract:** The east side of Huilu low uplift is Lufeng south hydrocarbon rich depression. In order to clarify the source and sedimentary reservoir distribution law on the east side of the low uplift, the research comprehensively uses the drilling and 3D seismic data to restore the ancient source area, describe the source to sink system elements, predict the plane distribution of sand rich sedimentary bodies, and discuss the control factors of sand body differential enrichment. The results show that Huilu

收稿日期:2022-12-13

作者简介:雷永昌(1980—),男,工程师,主要从事石油地质综合方面的研究,E-mail: leiych2@cnooc.com.cn

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05024-004,CNOOC-KJ135ZDXM37SZ);中国海洋石油有限公司前瞻基础研究项目(KJQZ-2023-2001)

Supported by the National Science and Technology Major Project (2016ZX05024-004, CNOOC-KJ135ZDXM37SZ) and the Prospective Basic Research Projects of CNOOC (KJQZ-2023-2001)

low uplift develops a complete source and sink system controlled by paleogeomorphology. The lower Wenchang Formation of Paleogene in the study area can be further divided into eight uplift group units: A – H. On the basis of paleogeomorphology restoration, the eight uplift group units can be divided into 17 source and sink systems composed of independent watersheds and corresponding sedimentary areas. Among them, six independent source and sink systems composed of Watershed 1 – 6 are developed on the east side of Huilu low uplift, and Watershed 2, 4, and 6 have a large denudation range and denudation strength, and a large number of water systems, which are relatively concentrated. They are the main dominant source supply areas. The large denudation area, granite and volcanic rocks in Watershed 2 (eastern gentle slope of Lufeng 13 east sag) provide the material basis for the development of a large braided river delta and high quality reservoirs. The advantageous convergence of multiple water systems provides good development conditions for high-quality underwater distributary channel sandstone reservoirs.

**Key words:** Huilu low uplift; Lufeng depression; source and sink system; Early Wenchang Period; exploration practice

## 0 引言

陆相断陷湖盆裂陷期构造活动强,地层剥蚀强烈,沉降差异大,储层表现为埋深大、多物源、非均质性强的特征,是油气勘探中寻找有利目标的重点和难点,而富烃洼陷裂陷层勘探成功的关键就是寻找到优质储层<sup>[1-2]</sup>。断陷期多个物源区风化剥蚀产生的碎屑物质经过一系列的输砂通道搬运后,在特定的时间和特定的空间沉积下来,就构成了一个完整的源-汇时空耦合控砂系统<sup>[3-4]</sup>。源-汇系统是近年来发展起来的,用以理解物质来源、搬运、沉积和改造的新方法、新思路<sup>[5]</sup>。陆相盆地源-汇系统构建是指导有利储层识别的重要手段和最新理念<sup>[6-7]</sup>,同时可实现对物源区基岩组成、分布特征、搬运通道及其与汇区沉积砂体间的源-汇系统的精细刻画,其对于预测优质储层有重要意义<sup>[8-18]</sup>。

珠江口盆地经过 40 余 a 的勘探,截至目前已探明原油地质储量超过 10 亿 m<sup>3</sup>,天然气地质储量超过 1 800 亿 m<sup>3</sup>,已成为我国重要的油气产区之一<sup>[19]</sup>。该盆地裂陷早—中期古近系文昌组发育湖相优质烃源岩,奠定了在这一地区持续勘探突破的物质基础<sup>[20]</sup>。随着勘探的不断深入,古近系逐渐成为重要的勘探层系,但由于古近系总体埋深较大,储层多表现为低孔低渗特征,商业性发现举步维艰。如何在低孔低渗背景中找到相对高孔渗储层的发育区带,是古近系勘探成功的关键,通过精细刻画源-汇系统,有望帮助解决这一勘探难题。

本文以惠陆低凸起东侧为例,利用最新的三维

高精度地震资料及钻井资料,在剥蚀古地貌恢复的基础上建立不同区带的源-汇系统,结合凸起区基岩岩性组成、古地貌及水系分布、汇区内地震沉积学精细刻画分析等,旨在揭示低凸起到洼陷区的古近系文昌组沉积体系时空分布特征,探讨源-汇系统耦合关系,预测有利储层发育区带,进而指导发现了南海东部海域古近系首个商业性油田。

## 1 区域地质概况

珠江口盆地位于南海北部陆缘,处于欧亚板块、太平洋板块和印度洋板块的交会处,是中国南海最大的新生代沉积盆地<sup>[21-22]</sup>,盆地面积约为 26.7 × 10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>。受控于 NE 和 NW 向两组断裂的控制,盆地自北西向南东依次被分为北部隆起带、北部拗陷带、中央隆起带、南部拗陷带和南部隆起带 5 个次级构造单元(图 1a)<sup>[23-24]</sup>。

惠陆低凸起位于珠江口盆地的东北部,东侧与陆丰凹陷相接,西侧与惠州凹陷相邻,南部和北部分别被中央隆起带和北部隆起带所限,面积约 3 400 km<sup>2</sup>。受控于先期 NE – NEE 和 EW – NWW 向断裂<sup>[25-26]</sup>,惠陆低凸起又被细分为惠陆南和惠陆北两个次级构造单元。惠陆南呈条带状与中央隆起带相连,断裂呈 NWW 向展布;惠陆北呈三角状与北部隆起带相连,断裂主要为近 NW 向展布。基于断裂活动性和地貌差异,惠陆南又进一步划分为两个次一级构造沉积单元,分别为惠陆东和惠陆西,相较于惠陆西,惠陆东地貌高差大,断裂活动性强,地层发育厚度大,是源-汇体系研究和有利目标勘探的

重点区域(图 1b)。

惠陆低凸起及周缘盆地古近纪主要经历了三期大的构造运动,分别是珠琼运动一幕、珠琼运动二幕和南海运动<sup>[27-30]</sup>,其中南海运动标志着研究区断陷期到拗陷期的转换。受三期构造幕的影响,研究区古近纪主要发育神狐组、文昌组、恩平组和珠海组,地震上各地层顶底分别对应于  $T_g$ 、 $T_{90}$ 、 $T_{80}$ 、 $T_{70}$  和  $T_{60}$  界面(图 1c)。前人<sup>[31]</sup>研究已经证实,下文昌组主要发育辫状河三角洲和扇三角洲沉积相,是勘探和开发的重点目的层段之一。

## 2 惠陆低凸起东侧早文昌期源-汇系统

### 2.1 惠陆低凸起源-汇系统构建

古地貌研究是源-汇系统分析的基础,惠陆低凸起下文昌组残余地貌是早文昌期沉积古地貌在地质

历史时期中经过构造变形、差异压实、沉积充填以及风化剥蚀等作用综合的结果(图 2),不能完全准确展示沉积时期古地貌的整体面貌和源-汇配置关系<sup>[32-35]</sup>,对古物源方向、古水流体系、沉积体系类型和沉积地貌格局的判断与刻画产生了一定的干扰。基于古地貌分析,结合沉积体系和沉积相分布及区域演化规律,可建立研究区不同构造-沉积单元的源-汇体系<sup>[36-41]</sup>。研究区下文昌组沉积时期,惠陆低凸起剥蚀区提供物源(图 2a),在洼陷内沉积下文昌组;而沉积后期,先前沉积的部分下文昌组由于构造作用受到剥蚀(图 2b),产生差异沉降(图 2e)。因此,基于差异剥蚀和差异沉降恢复下的古地貌进行源-汇系统的建立,是反映古近纪下文昌组沉积时期的物源和沉积体系配置关系的必要手段,也是源-汇体系建立的基础。

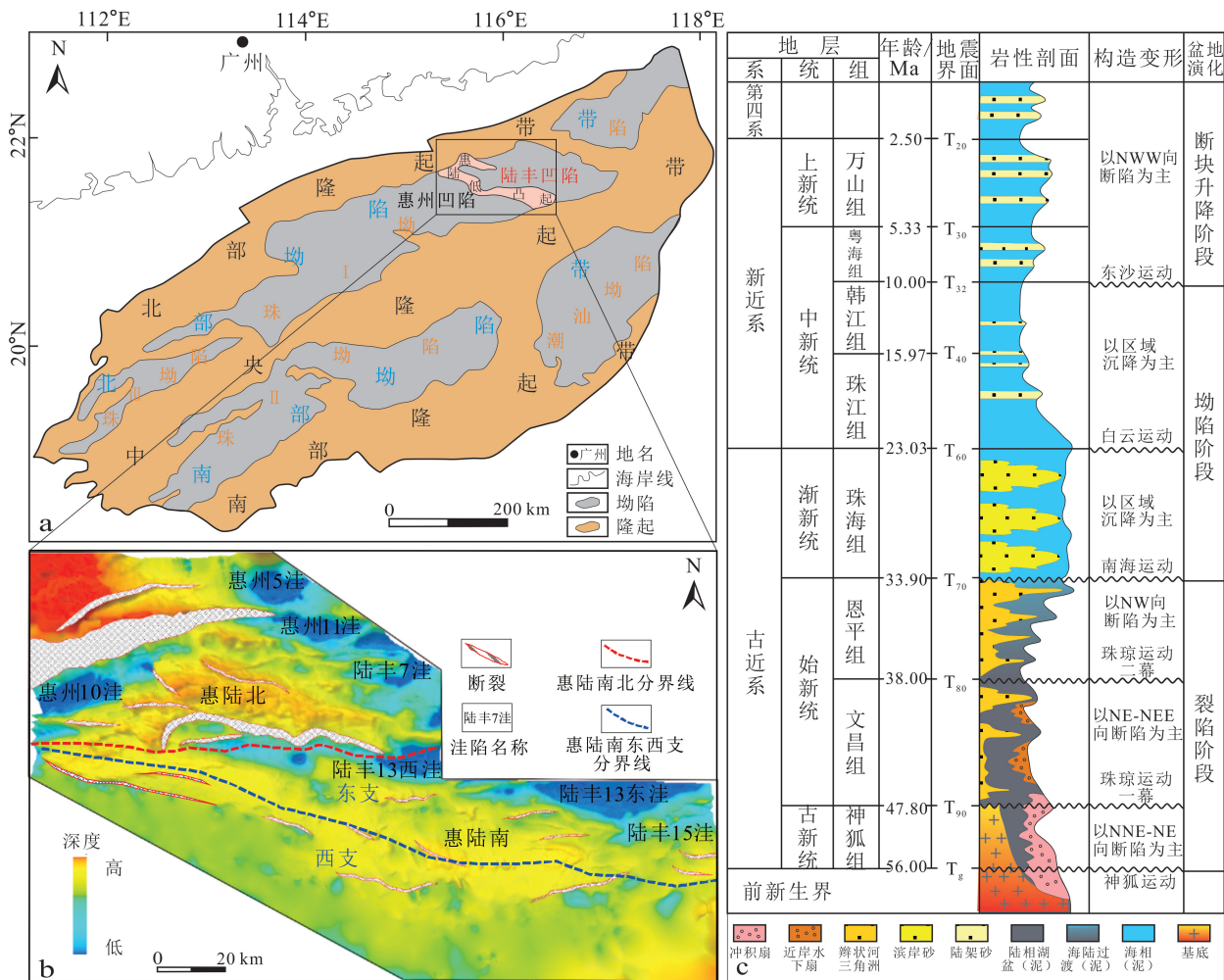
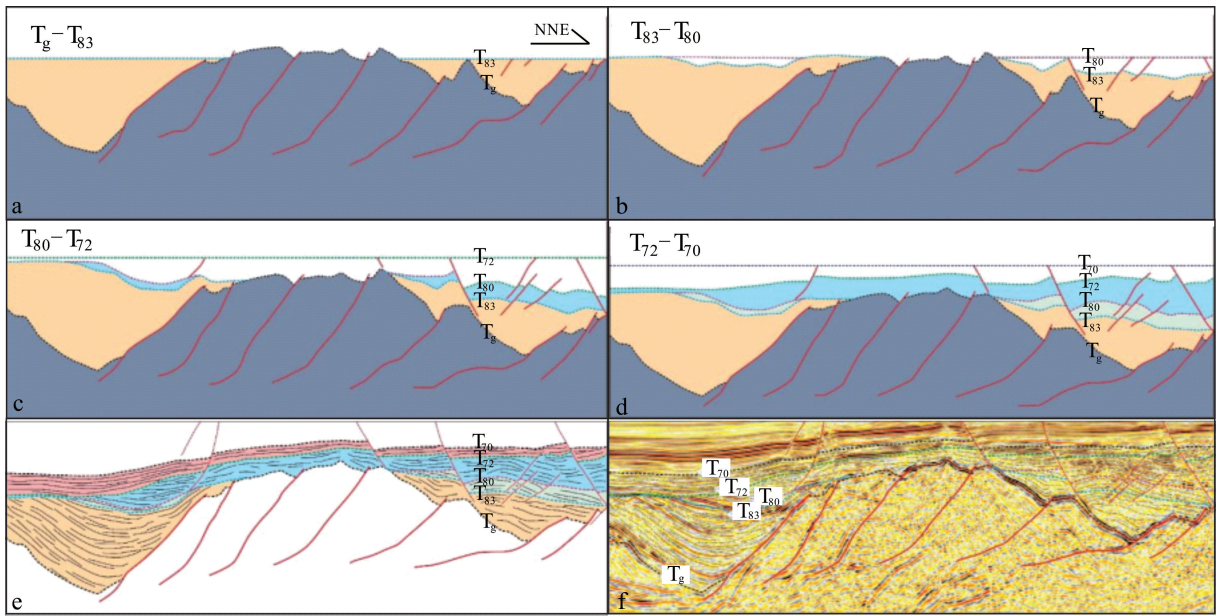


图 1 珠江口盆地构造单元分区图(a)、惠陆低凸起构造单元划分图(b)和陆丰凹陷综合地层柱状图(c)

Fig.1 Structural zoning map of Pearl River Mouth basin (a), structural units of Huilu low uplift (b) and synthetical stratigraphic column of Lufeng sag (c)



a. 早文昌末期; b. 文昌末期; c. 早恩平末期; d. 恩平末期; e. 现今; f. 地震剖面解释图。

图 2 惠陆低凸起  $T_g-T_{72}$  平衡剖面恢复

Fig.2 Restoration of  $T_g-T_{72}$  equilibrium profile of Huilu low uplift

### 2.1.1 残余地貌-剥蚀和沉积区界定

戴维斯曾经将地貌的演变划分为 3 个阶段,即幼年期、壮年期和老年期<sup>[42]</sup>。大陆边缘或盆地边缘等由于构造活动强烈变化,其各个阶段地貌演化复杂;相比较而言,盆内物源区岩性均一、构造稳定,整个地貌从开始转变到衰亡的过程相对稳定。因此,基于残余地貌的分水线和脊线对剥蚀区相对独立的物源体系进行划分,可明确不同剥蚀区所对应的沉积区和沉积方向。

在惠陆低凸起下文昌组沉积前残余地貌( $T_g$ )拾取的基础上,对研究区剥蚀区和沉积区进行判别(图 3)。受控于不同断裂体系和古地貌组合影响,惠陆低凸起由不同的凸起群所组成,凸起群之间由相对低洼的剥蚀边界所限定。每个凸起群作为独立剥蚀区域具有独立的分水线和脊线,分水线为凸起群内构造最高点,对应于独立的沉积洼陷,脊线为凸起群内次一级的构造高点,对应于洼陷内独立的沉积体,由此,剥蚀区被进一步划分为 A—H 8 个凸起群单元。其中凸起群 A—F 位于惠陆南,凸起群 G—H 位于惠陆北。惠陆南凸起群 A、B、C、D、F 分水线分隔陆丰凹陷和惠州凹陷,东北侧对应于陆丰凹陷,其中凸起群 A、B、C 整体对应于陆丰 13 东洼,凸起群 D、E、F 对应于陆丰 13 西洼,凸起群 A、B、

C、D、F 分水线西南侧对应于惠州凹陷。惠陆北 G 凸起群以南对应于陆丰 13 西洼、以北对应于陆丰 7 洼和惠州 10 洼;H 凸起群以南则对应于惠州 10 洼,以北对应于惠州 5 洼。在此基础之上,对凸起群和所对应的沉积区进行识别,以建立残余地貌控制下的凸起群和沉积区空间展布格局。

### 2.1.2 差异沉降校正

在明确凸起群和沉积区空间分布格局的基础上,对研究区地层发育特征和阶段进行判定。研究区文昌期和恩平期处于陆相湖盆沉积时期,地貌具有明显的起伏和差异。而  $T_{70}$  界面时间对应南海运动的起始时间,代表由陆相湖盆沉积向海相沉积的转换;同时  $T_{70}$  界面之上断裂活动数量及速率皆不显著,通过地震判别和平衡剖面恢复,认定恩平组顶面  $T_{70}$  为一个典型的准平原化界面。基于此,选取  $T_{70}$  界面作为基准面,通过基准面层拉平法对下伏关键时期残余地貌进行平衡恢复,以便能很好地对沉积后的差异沉降量进行校正。在残余地貌基础之上,对  $T_{70}$  界面进行回剥处理,以较好地呈现差异沉降校正后的地貌发育样式(图 4)。差异沉降校正之后的分水线在平面上和残余地貌具有一一对应关系,即在下文昌组沉积时期分水线和脊线在平面上是处于相对稳定的状态。

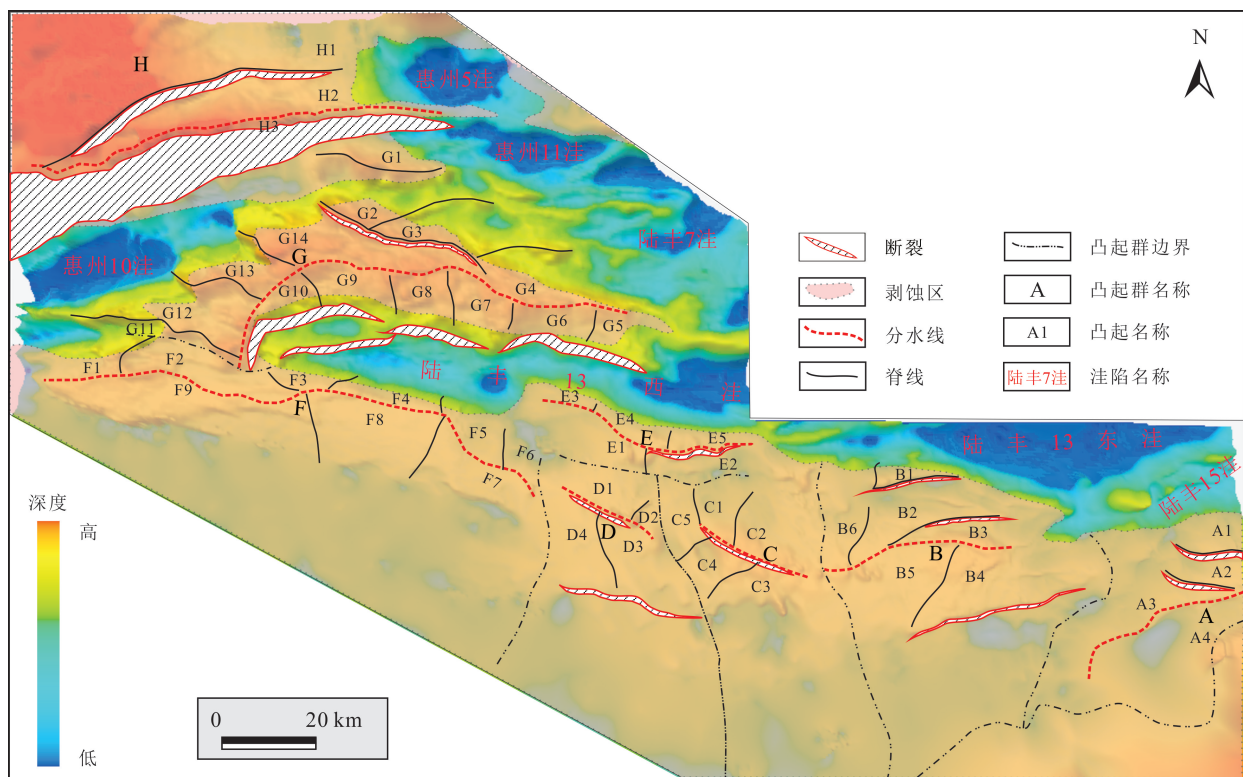


图3 惠陆低凸起  $T_2$  界面残余地貌图

Fig.3 Residual geomorphology of  $T_2$  interface of Huilu low uplift

2.1.3 差异剥蚀恢复

在恢复差异沉降的基础之上,通过早期在地球上对陆丰西地区剥蚀区和沉积区不整合类别进行识别以及对不同类型不整合范围进行标定,明确了下文昌组沉积前和沉积后时期区域内存在的剥蚀区(持续剥蚀的区域——典型削截面)、超剥区(早期接受沉积,晚期接受剥蚀-超覆和剥蚀现象同时存在)及沉积区(只接受沉积的区域——典型超覆面)的平面分布范围<sup>[21]</sup>。剥蚀区作为稳定的物源供给区,在下文昌组沉积时期持续提供物源,不接受沉积;超剥区最典型的特征是早期接受沉积,地层底界具有典型的超覆现象,晚期沉积地层接受剥蚀,残余地层顶界具有典型的剥蚀现象,地层超覆和剥蚀同时存在;沉积区则是在整个沉积时期只接受沉积,无明显剥蚀现象,地层顶底界面都是以典型的超覆不整合出现(图5)。

对惠陆低凸起剥蚀区恢复的重点在于对剥蚀总量的恢复,针对研究区不同的不整合及它们组合分布的区域,残余古地貌凸起群和与之对应的沉积区进行划分表明,每一个沉积区都有明确的凸起群和

剥蚀范围与之相对应。同时,基于对应沉积区的前积角和前积范围,利用体积反演的原理,基于分水线和凸起群边界,可将剥蚀区沉积物总量反向还原于对应的剥蚀区。研究区剥蚀区恢复的第一步是对沉积体总量的恢复。先基于高精度三维地震资料,利用文昌组顶底界面坡角延伸法对研究区沉积总量进行恢复,在此基础之上恢复残余地层总量和下文昌组剥蚀总量,即可得出剥蚀区在下文昌组沉积时期的剥蚀总量(图6)。再结合超剥区的分布,对研究区上文昌组沉积地层剥蚀量进行恢复,利用剥蚀区边界和分水线明确各个洼陷对应的不同凸起群剥蚀范围和剥蚀边界,基于基地地层趋势延伸法进行沉积体积反演和校正,可明确研究区不同凸起群的剥蚀厚度(图7)。

2.1.4 研究区源-汇系统

在经过构造-沉积单元划分、沉积区差异沉降校正及剥蚀区剥蚀量恢复的基础上,对研究区古地貌进行整合和校正,最终完成古地貌恢复以及构造沉积单元的划分(图8)和研究区不同区带的源-汇系统构建(图9)。

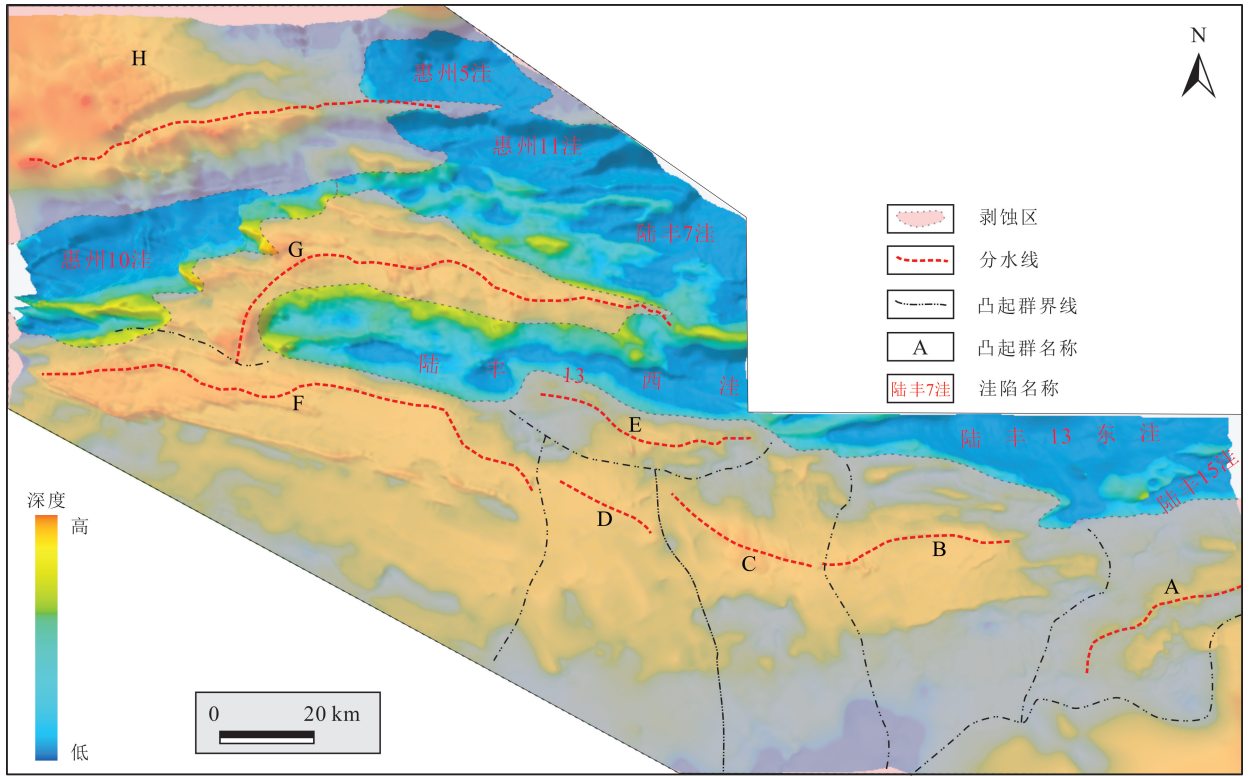


图4 惠陆低凸起  $T_g$  地貌差异沉降恢复图

Fig.4 Differential settlement recovery of  $T_g$  landform of Huilu low uplift

恢复后的古地貌表明,惠陆南凸起群高差整体大于惠陆北,惠陆南凸起群B、C和F高差最大约为2350 m,而惠陆南G凸起群最大高差约为2100 m。在恢复不同凸起群基础之上,对凸起群、水系和沉积区进行划分,在研究区共识别出17套独立源-汇系统(图9)。其中,流域1对应于陆丰15洼,流域2、3和4对应于陆丰13东洼,流域5、6、7、8对应于陆丰13西洼,流域9对应于陆丰7洼和惠州11洼,流域10、12和13对应于惠州10洼,流域11对应于惠州5洼,流域14、15、16和17对应于惠州凹陷(表1)。

基于古地貌分析,结合研究区沉积体系和沉积相分布,建立研究区不同构造-沉积单元的源-汇体系。研究区惠陆南和惠陆北呈现出不一样的源-汇体系配置关系。惠陆南东支(惠陆东)水系发育规模大(流域1—7及其对应沉积区陆丰15洼、陆丰13东洼和陆丰13西洼缓坡),具有明显的水系汇聚入口,是源-汇系统要素解剖的重要部位;惠陆南西支(惠陆西)水系发育规模小(流域14—17及其对应沉积区惠州凹陷),水系近平行向惠州凹陷延伸,剥蚀程度低;而惠陆北(流域8—13及其对应沉积区陆丰13西洼陡坡、陆丰7洼、惠州11洼、惠州10洼、惠州5

洼)为典型的发散型源-汇体系,无明显水系汇聚入口,源区高差小,沉积体主要以近源短距离搬运为主。

## 2.2 惠陆低凸起东侧早文昌期源-汇系统要素

在惠陆低凸起东侧源-汇系统建立的基础之上,针对各流域和沉积区对应的源-汇系统进行对比分析。惠陆低凸起东侧整体上以花岗岩基底为主,抗剥蚀能力强,同时伴随着发育部分抗剥蚀能力较弱的喷出岩和沉积岩<sup>[43]</sup>。研究区各流域剥蚀面积、基岩抗风化能力和物源通道空间分布存在显著差异。2号流域(陆丰13东洼缓坡中部)剥蚀面积最大,主要以花岗岩和喷出岩为主,水系数目最多,发育4个主要水系。4号流域(陆丰13东洼西侧轴向)和6号流域(陆丰13西洼缓坡中部)剥蚀面积次之,主要发育大规模的喷出岩和沉积岩,花岗岩占比相对较低,发育3个主要水系。1号流域(陆丰15洼缓坡)、3号流域(陆丰13东洼缓坡西部)、5号流域(陆丰13西洼缓坡东部)剥蚀面积相对较小。其中1号流域基底主要以花岗岩为主,只发育1个水系。3号流域和5号流域基底以花岗岩为主,发育部分喷出岩,发育两个水系(图9,表1)。不同流域对应的水系平面组合也存在显著差异,2号流域、4号流域

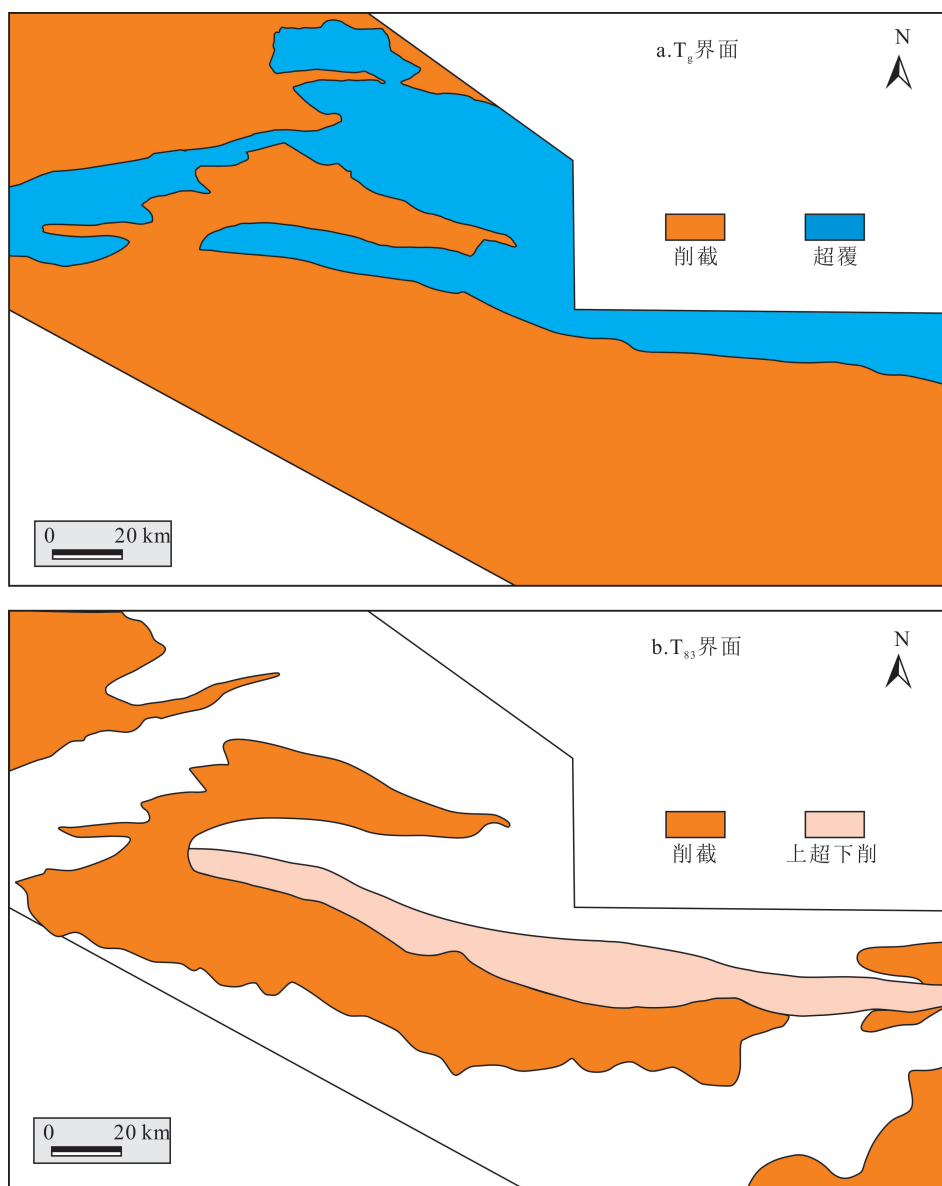
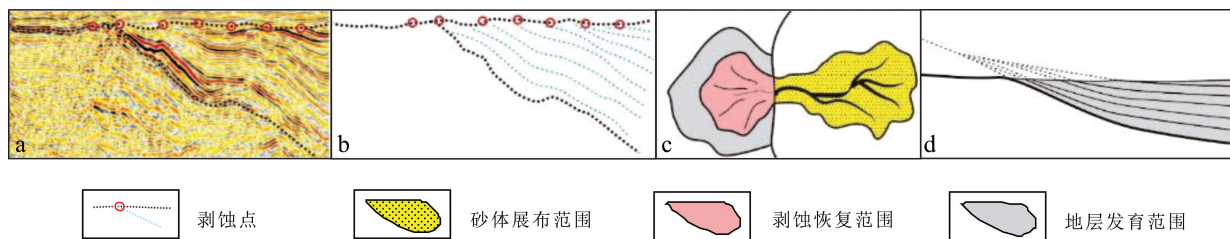


图 5 惠陆低凸起文昌组顶底不整合界面特征分布图

Fig.5 Feature distribution of top-bottom unconformity interface of Wenchang Formation in Huilu low uplift



a. 地震剖面; b. 剥蚀样式; c. 平面展布; d. 恢复方法。

图 6 惠陆低凸起超剥区剥蚀量恢复方法示意图

Fig.6 Schematic diagram of denudation recovery method in overstrapping area of Huilu low uplift

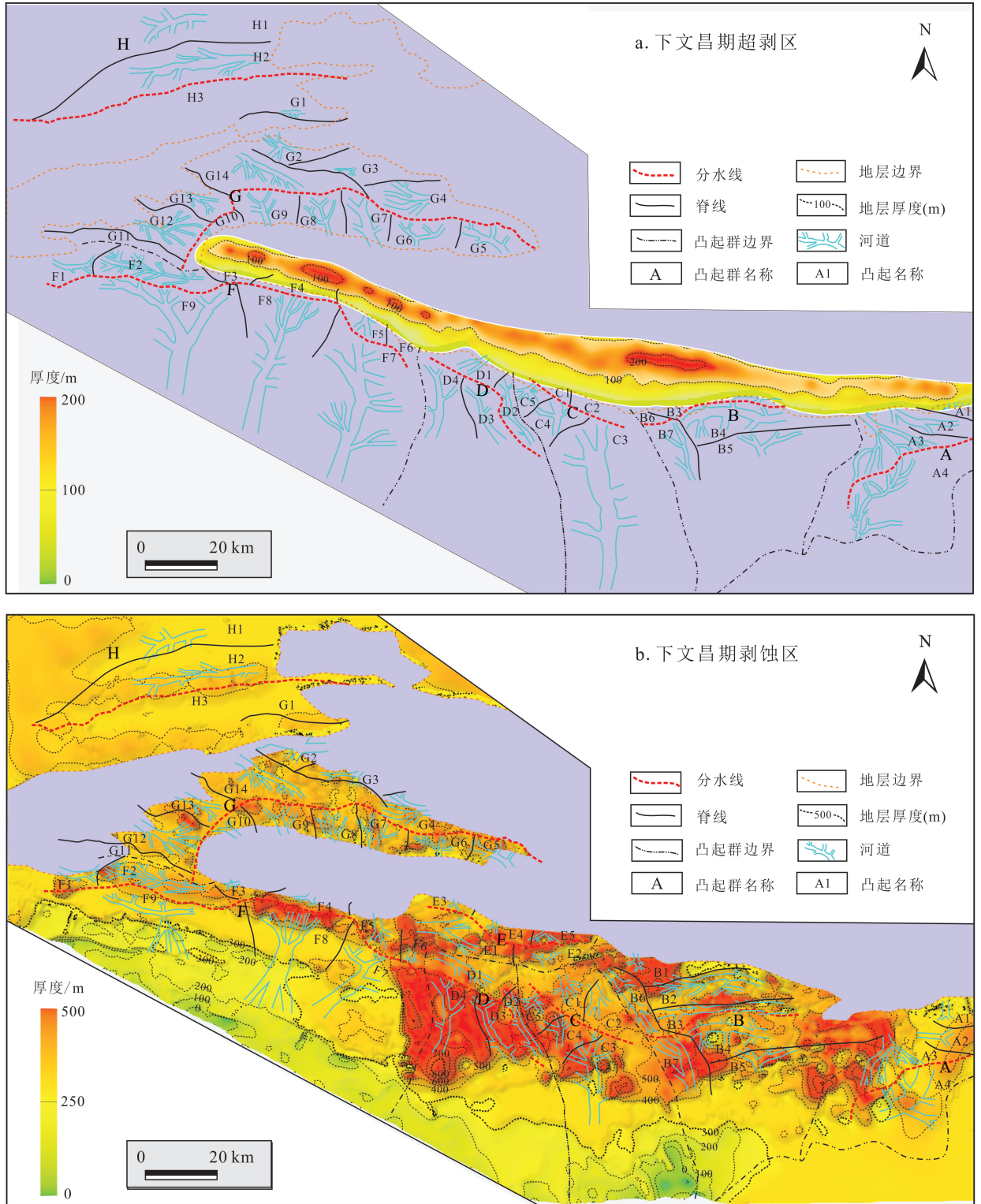


图 7 惠陆低凸起剥蚀量恢复图

Fig.7 Denudation restoration figure of Huilu low uplift

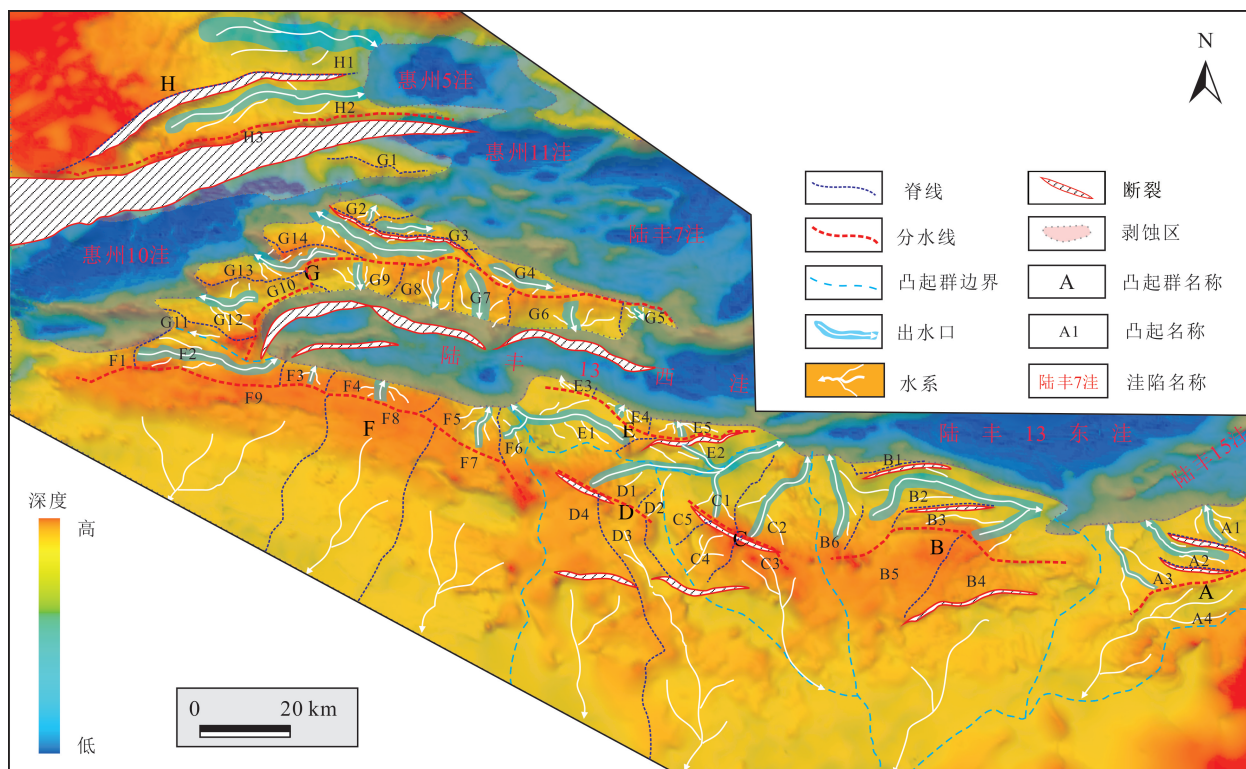


图8 惠陆低凸起下文昌组古地貌示意图

Fig.8 Lower Wenchang Formation paleogeomorphology of Huilu low uplift

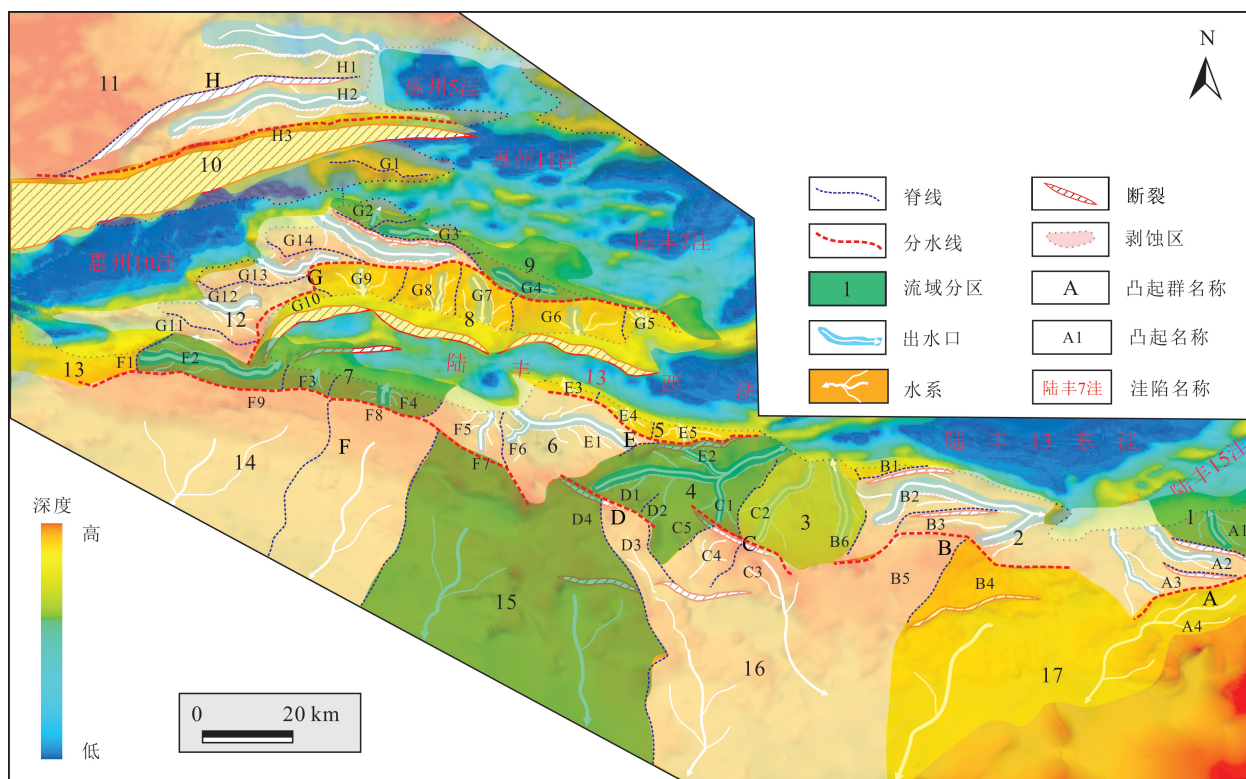


图9 惠陆低凸起流域划分及分布图

Fig.9 Watershed division and distribution of Huilu low uplift

表 1 惠陆低凸起流域及沉积区分布

Table 1 Distribution table of Huilu low uplift watershed and sedimentary area

区带	流域	凸起群	汇	流域剥蚀面积	流域抗风化能力	主要水系数量	供源能力强弱
惠陆南	流域 1(陆丰 15 洼缓坡)	A1	陆丰 15 洼	小	最强	1	较差
	流域 2(陆丰 13 东洼缓坡中部)	A2、A3、B2、B3	陆丰 13	最大	次之	4	最强
	流域 3(陆丰 13 东洼缓坡西部)	B1、C2、B6	东洼	小	最强	2	较差
	流域 4(陆丰 13 东洼西侧轴向)	C1、C5、D1、D2、E2		次之	最弱	3	次之
	流域 5(陆丰 13 西洼缓坡东部)	E3、E4、E5	陆丰 13	小	最强	2	较差
	流域 6(陆丰 13 西洼缓坡中部)	E1、F5、F6	西洼	次之	最弱	3	次之
	流域 7(陆丰 13 西洼缓坡西部)	F2、F3、F4		—	—	—	—
惠陆西支	流域 14(惠州凹陷西部)	F8、F9	惠州凹陷	—	—	—	—
	流域 15(惠州凹陷中部)	F7、D4		—	—	—	—
	流域 16(惠州凹陷东部)	B5、C3、C4、D3		—	—	—	—
	流域 17(惠州凹陷东侧轴向)	A4、B4		—	—	—	—
惠陆北	流域 8(陆丰 13 西洼陡坡)	G5、G6、G7、G8、G9、G10	陆丰 13 西洼	—	—	—	—
	流域 9(陆丰 7 洼、惠州 11 洼缓坡)	G2、G3、G4	陆丰 7 洼、惠州 11 洼	—	—	—	—
	流域 10(惠州 10 洼陡坡)	H3	惠州 10 洼	—	—	—	—
	流域 11(惠州 5 洼西侧轴向)	H1、H2	惠州 5 洼	—	—	—	—
	流域 12(惠州 10 洼缓坡东部)	G11、G12、G13、G14	惠州 10 洼	—	—	—	—
	流域 13(惠州 10 洼缓坡西部)	G11、F1	惠州 10 洼	—	—	—	—

和 6 号流域水系呈汇聚型展布,在沉积区具有明确的独立出水口;而 1 号流域、3 号流域和 5 号流域水系近平行和孤立发育,没有明确的独立出水口。基于水系发育数量和平面展布规律,2 号流域水系更利于优势沉积体的堆积,4 号流域和 6 号流域次之,1 号流域、3 号流域和 5 号流域则较差。基于以上综合分析,2 号流域物源供给能力最强,4 号流域和 6 号流域物源供给能力次之,而 1 号流域、3 号流域和 5 号流域供给能力相对较差。

基于惠陆低凸起东侧各源-汇系统剥蚀区面积、基岩组成、水系发育数量和水系空间展布规律及各要素耦合关系,结合惠陆低凸起周围钻井岩性约束,预测了研究区富砂沉积体平面展布,不同流域单元存在显著差异<sup>[14]</sup>。研究区 2 号流域、4 号流域和 6 号流域物源剥蚀面积大,基岩物源供给能力强,水系较发育,富砂沉积体在平面上呈大规模朵叶状展布(图 10);而 1 号流域、3 号流域和 5 号流域剥蚀面积较小,基岩物源供给能力较弱,水系发育数量少,相对独立发散,富砂沉积体在平面上分布范围较小,在

平面上更趋近于条带状。

### 3 勘探实践

惠陆低凸起东侧 2 号流域基底主要由花岗岩和喷发岩构成。自始新世以来,该流域处于剥蚀状态,是陆丰 13 洼初始裂陷期沉积物的主要物源区。平面上惠陆低凸起 2 号流域与陆丰 13 洼走向斜交,由于此时陆丰 13 洼南部具有大型的缓坡构造背景,碎屑物质经过河流的搬运作用,在汇水区发生堆积,沿洼陷形成了一套良好的大规模辫状河三角洲沉积。2 号流域源-汇要素分析表明,该地区发育多条汇聚型水系,通过 LF14-A、LF14-B 等(位置见图 10)钻井揭示,该地区水下分流河道砂岩是主要的储层类型,为斜坡带文五段主力油层形成良好的储层提供了物质基础。其辫状河三角洲水下分流河道砂岩的岩性主要为含砾极粗—粗砂岩和少量细砂岩(图 11a、b),砂岩厚度为 0.5~32.2 m,厚度为 1~7 m 的砂岩体积分数占 56.4%,大于 7 m 的占 33.9%;储层岩石类型以长石质石英砂岩和岩屑质石英砂岩为

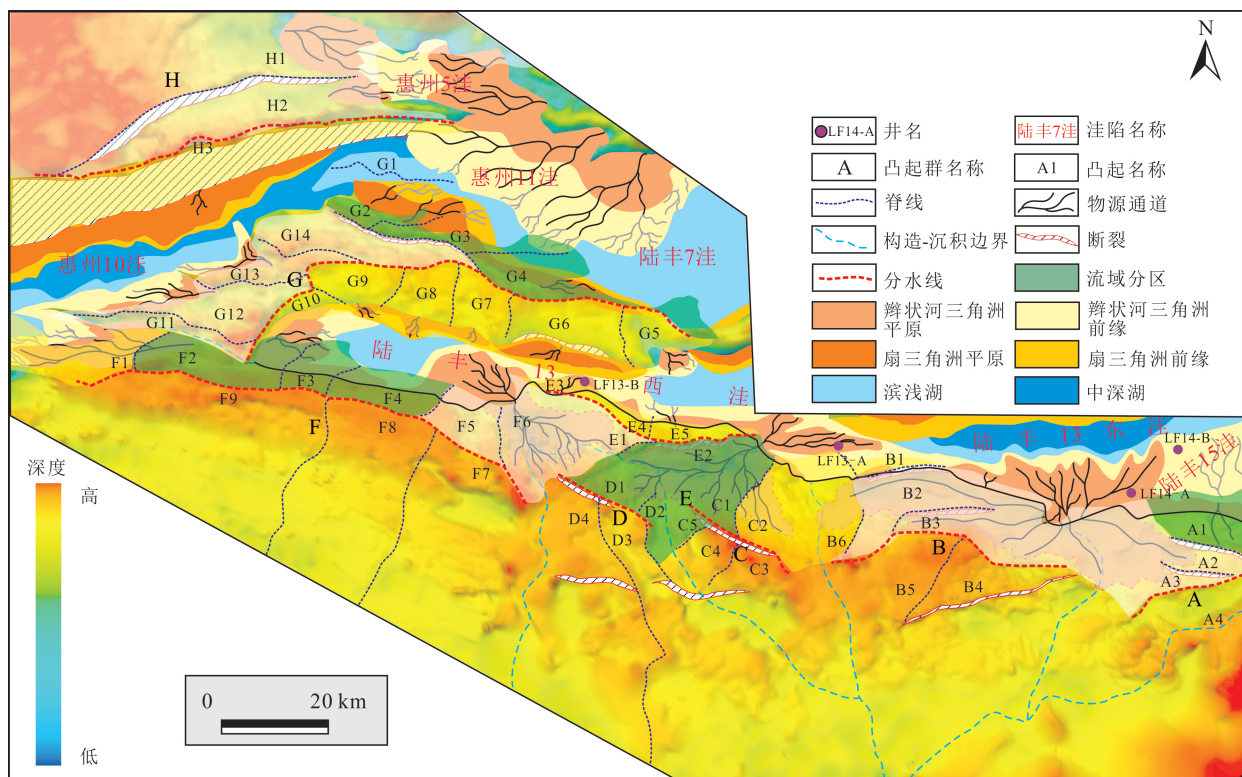


图 10 惠陆低凸起早文昌期源-汇配置关系图

Fig.10 Source and sink configuration relationship diagram of Huilu low uplift during Early Wenchang period

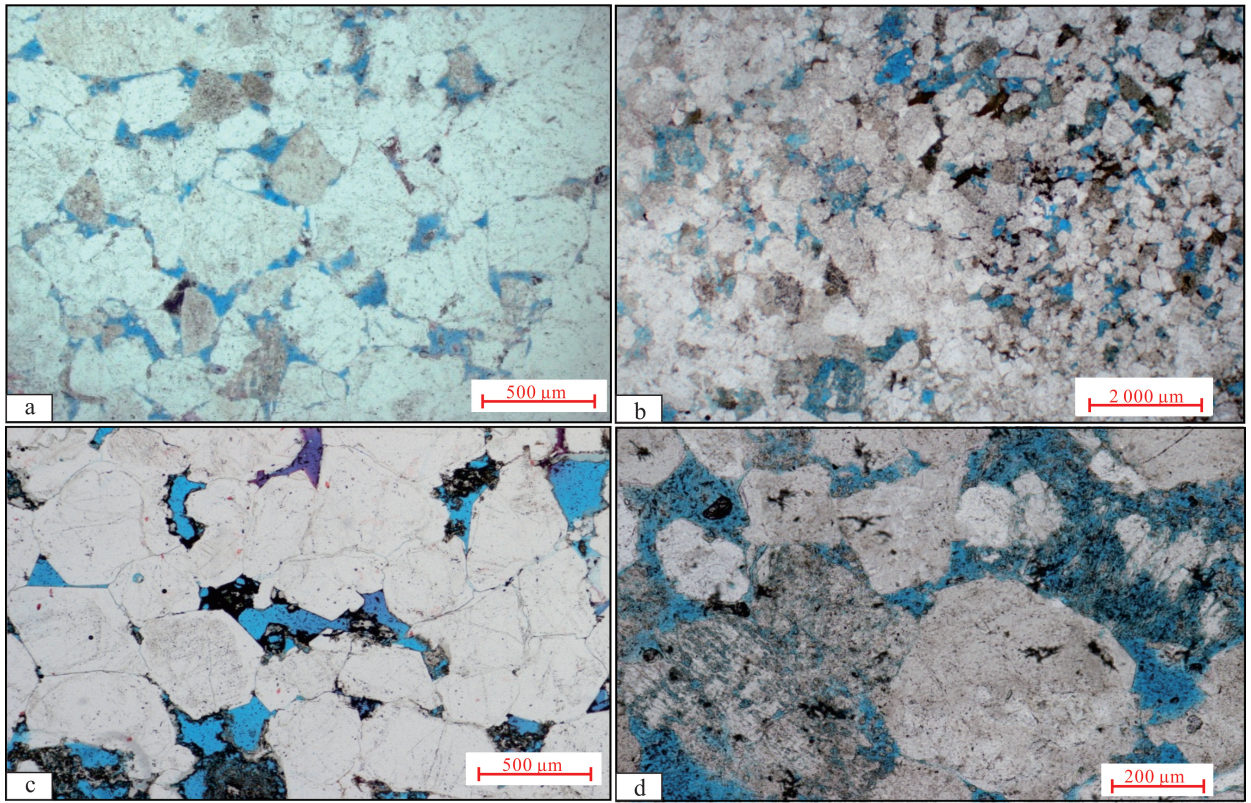
主,储集空间主要为原生粒间孔,具有低孔隙度、中-低渗透率的特点,砂岩孔隙度为 10.0%~13.5%,平均为 11.8%;渗透率以大于  $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  为主,储集层物性好,含油性好,研究区探明储量的 90% 蕴藏在该类储层中。岩性主要为偏粗的细砾岩、含砾(中)粗砂岩(图 11a、b)。文五段优质储层主要发育在水动力能力强、杂基体积分数小、成熟度高的河道中部砂岩中。结合惠陆低凸起东侧源-汇系统要素分析,2 号流域大范围的剥蚀面积、花岗岩和喷出岩母岩为大型辫状河三角洲沉积体及优势储层发育提供了物质基础,多个水系和平面上的优势汇聚为优质的水下分流河道砂岩储层提供了良好的发育条件。

4 号流域重点区为凸起区所限定的三角形局部洼地,其基底为沉积岩和火成岩,该区部分井受火山凝灰质影响较大。LF13-A 井实钻结果揭示文五段含油气性好,但储层物性较 2 号流域略差。通过分析 4 号流域源-汇要素,该地区下文昌组文五段发育多条主要的汇聚型水系,但受三角洲局部洼地的影响,沉积砂体展布范围相比 2 号流域小,主要的储层类型为粗粒水下分流河道砂岩;砂体厚度为 2~

18 m,砂岩孔隙度为 6.5%~15.3%,平均为 12.2%;砂岩渗透率为  $(0.1 \sim 25.0) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,平均为  $1.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,孔隙发育,但连通性较 2 号流域 LF14-A 井差,井壁心薄片照片揭示碎屑颗粒以粗粒为主,见少量凝灰质,偶见碳酸盐胶结物、颗粒和凝灰质溶蚀,发育大量有机质,孔隙发育中等(图 11c)。

6 号流域为断层约束的宽缓斜坡洼陷,为沉积岩基底。LF13-B 井实钻结果揭示:下文昌组文四段砂体发育,是一个砂体富集区,整体展布方向从西往东呈条状分布,砂体主要沉降于部分宽缓斜坡带和东部洼陷区;砂体为中厚层细砂岩,砂岩孔隙度为 8.2%~15.8%,平均为 11.4%;砂岩渗透率为  $(0.03 \sim 95.0) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,平均为  $13.9 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。井壁心薄片照片揭示碎屑颗粒分选差,孔隙整体发育中等,以次生孔隙为主,连通性中等,储层物性条件较好,储层条件并非该区文四段未油气成藏的主因(图 11d)。

在 2 号流域源-汇系统分析的基础上,通过部署钻探 LF14-A 井在埋深近 4 km 下文昌组中获得日产超 200 m<sup>3</sup> 的工业油流。后续评价井进一步落实该流域沉积相带和储层原生孔发育,该油田三级地



a. LF14-A 井, 4 168.0 m, 粗砂岩原生孔隙发育; b. LF14-B 井, 4 080.5 m, 细砂岩孔隙发育; c. LF13-A 井, 4 125.7 m, 粗砂岩孔隙发育中等; d. LF13-B 井, 3 429.2 m, 中砂岩次生孔隙发育。

图 11 研究区钻井揭示砂岩孔隙特征

Fig.11 Pore characteristics of drilling sandstone in the study area

质储量超  $3 \times 10^8$  t, 为在珠江口盆地古近系陆相地层中寻找可动用优质大中型油田提供了很好的例证, 也为下一步油气勘探提供了新的思路和理论基础。

#### 4 结论

1) 惠陆低凸起东侧发育完整的受古地貌控制的源-汇系统, 将惠陆低凸起剥蚀区进一步划分为 A—H 共 8 个凸起群单元, 并对不同构造-沉积单元进行了划分。其中: 凸起群 A、B、C 对应陆丰 13 东洼; 凸起群 D、E、F 对应陆丰 13 西洼; 凸起群 G 以南对应陆丰 13 西洼, 以北对应陆丰 7 洼和惠州 10 洼; 凸起群 H 以南则对应惠州 10 洼, 以北对应惠州 5 洼。

2) 基于构造-沉积单元划分、差异沉降和差异剥蚀的沉积时期古地貌恢复, 建立了惠陆低凸起早文昌期共 17 个流域和沉积区所对应的源-汇系统。其中: 惠陆南东支水系发育规模大, 发育流域 1—7 及其对应沉积区所组成的源-汇系统, 具有明显的水系汇聚入口, 是源-汇系统要素解剖的重要区域; 而惠陆南西支发育流域 14—17 及其对应沉积区, 水系近

平行向惠州凹陷延伸, 剥蚀程度低; 惠陆北发育流域 8—13 及其对应沉积区, 为典型的发散型源-汇体系, 无明显水系汇聚入口。

3) 源-汇系统要素分析表明, 2 号流域(陆丰 13 东洼缓坡中部)、4 号流域(陆丰 13 东洼西侧轴向)和 6 号流域(陆丰 13 西洼缓坡中部)剥蚀范围大, 基底受剥蚀能力强, 水系发育数量多且水系相对汇聚, 具有明确和独立的出水口, 是主要的优势物源供给区, 对应的沉积区沉积体分布范围大, 呈朵叶状展布; 1 号流域(陆丰 15 洼缓坡)、3 号流域(陆丰 13 东洼缓坡西部)、5 号流域(陆丰 13 西洼缓坡东部)剥蚀范围相对小, 基底受剥蚀能力弱, 水系发育少且独立分散, 物源供给能力较弱, 沉积区沉积体分布范围小, 呈条带状展布。

4) 2 号流域(陆丰 13 东洼缓坡中部)勘探实践表明, 大范围的剥蚀面积、花岗岩和喷出岩母岩为大型辫状河三角洲沉积体及优势储层发育提供了物质基础, 为数较多的水系和平面上的优势汇聚为优质的水下分流河道砂岩储层提供了良好的发育条件。

基于源-汇系统分析的有利储层勘探实践,为在珠江口盆地古近系陆相地层中寻找可动用优质大中型油田提供了很好的例证,也为下一步油气勘探提供了新的思路和理论基础。

#### 参考文献(References):

- [1] 宋章强,杜晓峰,王启明,等. 辽西低凸起北段源-汇系统精细描述与油气勘探实践[J]. 地球科学, 2017, 42(11): 2069-2080.  
Song Zhangqiang, Du Xiaofeng, Wang Qiming, et al. Source-to-Sink System Fine Description and Petroleum Exploration Practice of the Northern Section of Liaoxi Low Uplift[J]. Earth Science, 2017, 42(11): 2069-2080.
- [2] 刘志刚,宋章强,郭涛,等. 渤海海域盆内低凸起周边近源砂体形成条件及预测方法:以辽东湾 JZ-A 构造区沙一、二段为例[J]. 海洋石油, 2011, 31(1): 22-27.  
Liu Zhigang, Song Zhangqiang, Guo Tao, et al. The Formation Conditions and Prediction Methods of Near-Source Sand Body Adjacent to Low Salient in Bohai Bay Basin: Taking Es<sub>1</sub> and Es<sub>2</sub> Formation in the JZ-A Structure Liaodong Bay as an Example[J]. Offshore Oil, 2011, 31(1): 22-27.
- [3] 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.  
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.
- [4] 杜晓峰,加东辉,王启明,等. 盆内局部物源体系及其油气勘探意义:以渤海海域古近系为例[J]. 中国海上油气, 2017, 29(4): 19-27.  
Du Xiaofeng, Jia Donghui, Wang Qiming, et al. Local Provenance System and Its Oil and Gas Exploration Significance: A Case Study of the Paleogene in Bohai Sea Area[J]. China Offshore Oil and Gas, 2017, 29(4): 19-27.
- [5] Allen P A. From Landscapes into Geological History [J]. Nature, 2008, 451: 274-276.
- [6] 王永利,加东辉,李建平,等. 辽西低凸起锦州地区古近系沙河街组三段砂体分布特征及物源分析[J]. 古地理学报, 2011, 13(2): 185-192.  
Wang Yongli, Jia Donghui, Li Jianping, et al. Distribution Characters of Sandbody of the Member 3 of Paleogene Shahejie Formation and Provenance Analysis of Jinzhou Area in Liaoxi Low Uplift [J]. Journal of Palaeogeography, 2011, 13(2): 185-192.
- [7] 吕丁友,张宏国,麻旭刚,等. 渤海东部凸起区与斜坡区油气勘探实践与认识[J]. 地质科技情报, 2018, 37(5): 84-89.  
Lü Dingyou, Zhang Hongguo, Ma Xugang, et al. Exploration Practices from Uplift and Slope Zones in Eastern Part of Bohai Sea and Its Inspiration [J]. Geological Science and Technology Information, 2018, 37(5): 84-89.
- [8] 刘强虎,朱筱敏,李顺利,等. 沙垒田凸起西部断裂陡坡型源-汇系统[J]. 地球科学, 2017, 42(11): 1880-1896.  
Liu Qianghu, Zhu Xiaomin, Li Shunli, et al. Source-to-Sink System of the Steep Slope Fault in the Western Shaleitian Uplift [J]. Earth Science, 2017, 42(11): 1880-1896.
- [9] 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.
- [10] Romans B W, Castelltort S, Covault J A, et al. Environmental Signal Propagation in Sedimentary Systems Across Timescales [J]. Earth-Science Reviews, 2016, 153: 7-29.
- [11] Sømme T O, Helland-Hansen W, Martinsen O J, et al. Relationships Between Morphological and Sedimentological Parameters in Source-to-Sink Systems: A Basis for Predicting Semi-Quantitative Characteristics in Subsurface Systems [J]. Basin Research, 2009, 21(4): 361-387.
- [12] Sømme T O, Jackson C A. Source-to-Sink Analysis of Ancient Sedimentary Systems Using a Subsurface Case Study from the Møre-Trøndelag Area of Southern Norway: Part 2 - Sediment Dispersal and Forcing Mechanisms [J]. Basin Research, 2013, 25(5): 512-531.
- [13] Walsh J P, Wiberg P L, Aalto R, et al. Source-to-Sink Research: Economy of the Earth's Surface and Its Strata [J]. Earth-Science Reviews, 2016, 153: 1-6.
- [14] Zhao Q, Zhu H, Zhang X, et al. Geomorphologic Reconstruction of an Uplift in a Continental Basin

- with a Source-to-Sink Balance: An Example from the Huizhou-Lufeng Uplift, Pearl River Mouth Basin, South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, 128: 104984.
- [15] Zeng Z, Zhu H, Mei L, et al. Multilevel Source-to-Sink (S2S) Subdivision and Application of an Ancient Uplift System in South China Sea: Implications for Further Hydrocarbon Exploration [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 181: 106220.
- [16] Li Z, Liu Q, Zhu H, et al. Compositional Relationship Between the Source-to-Sink Segments and Their Sedimentary Response to Diverse Geomorphology Types in the Intrabasinal Lower Uplift of Continental Basins [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, 123: 104716.
- [17] Michael N A, Zühlke R. Source-to-Sink: Regional Grain Size Trends to Reconstruct Sediment Budgets and Catchment Areas[J]. *Basin Research*, 2022, 34 (1):393 - 410.
- [18] Sharman G R, Hubbard S M, Covault J A, et al. Sediment Routing Evolution in the North Alpine Foreland Basin, Austria: Interplay of Transverse and Longitudinal Sediment Dispersal[J]. *Basin Research*, 2018, 30: 426 - 447.
- [19] 施和生, 何敏, 张丽丽, 等. 珠江口盆地(东部)油气地质特征、成藏规律及下一步勘探策略[J]. *中国海上油气*, 2014, 26(3): 11 - 22.  
Shi Hesheng, He Min, Zhang Lili, et al. Hydrocarbon Geology, Accumulation Pattern and the Next Exploration Strategy in the Eastern Pearl River Mouth Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2014, 26(3): 11 - 22.
- [20] 朱明, 张向涛, 黄玉平, 等. 珠江口盆地烃源岩特征及资源潜力[J]. *石油学报*, 2019, 40 (增刊 1): 53 - 68.  
Zhu Ming, Zhang Xiangtao, Huang Yuping, et al. Source Rock Characteristics and Resource Potential in Pearl River Mouth Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40 (Sup.1): 53 - 68.
- [21] 张向涛, 杜家元, 丁琳, 等. 不同水动力机制下砂体沉积响应及岩性圈闭形成模式[J]. *石油学报*, 2019, 40(增刊 1):105 - 114.  
Zhang Xiangtao, Du Jiayuan, Ding Lin, et al. Sedimentary Response of Sand Body and Formation Models of Lithologictraps Under Different Hydrodynamic Conditions[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(Sup.1):105 - 114.
- [22] 夏玲燕, 林畅松, 李筱, 等. 珠江口盆地断裂构造特征及对沉积盆地的控制作用[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2018, 33(5):1 - 8,16.  
Xia Lingyan, Lin Changsong, Li Xiao, et al. Characteristics of Fault Structures in Pearl River Mouth Basin and Control Effect on Sedimentary Basin [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2018, 33(5):1 - 8,16.
- [23] 王清辉, 冯进, 管耀, 等. 基于动态资料的低孔低渗砂岩储层渗透率测井评价方法:以陆丰凹陷古近系为例[J]. *石油学报*, 2019, 40(增刊 1):206 - 216.  
Wang Qinghui, Feng Jin, Guan Yao, et al. Permeability Logging Evaluation Method of Low-Porosity Low-Permeability Sandstone Reservoirs Based on Dynamic Data: A Case Study of Paleogene Strata in Lufeng Sag[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(Sup.1):206 - 216.
- [24] 胡阳, 吴智平, 何敏, 等. 珠江口盆地新近纪构造特征与演化[J]. *高校地质学报*, 2018, 24(3):433 - 441.  
Hu Yang, Wu Zhiping, He Min, et al. Neogene Tectonic Characteristics and Evolution of Pearl River Mouth Basin, South China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2018, 24(3):433 - 441.
- [25] 王家豪, 彭光荣, 柳保军, 等. 碎屑岩成岩拉平处理及沉积作用控制储层物性的定量表征:以珠江口盆地白云凹陷为例[J]. *石油学报*, 2019, 40(增刊 1): 115 - 123.  
Wang Jiahao, Peng Guangrong, Liu Baojun, et al. Flattening Diagenesis of Clastic Rocks and Quantitative Characterization of Sedimentary Control on Reservoir Properties: A Case Study of Baiyun Sag in Pearl River Mouth Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(Sup.1):115 - 123.
- [26] 胡圣标, 龙祖烈, 朱俊章, 等. 珠江口盆地地温场特征及构造-热演化[J]. *石油学报*, 2019, 40(增刊 1): 178 - 187.  
Hu Shengbiao, Long Zulie, Zhu Junzhang, et al. Characteristics of Geothermal Field and the Tectonic-Thermal Evolution in Pear River Mouth Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(Sup.1):178 - 187.
- [27] 张忠涛, 张向涛, 孙辉, 等. 珠江口盆地渐新世陆架边缘三角洲沉积特征及其对成藏的控制作用[J]. *石油学报*, 2019, 40(增刊 1):81 - 89.  
Zhang Zhongtao, Zhang Xiangtao, Sun Hui, et al. Sedimentary Characteristics of Oligocene Shelf Edge

- Delta and Their Control on Hydrocarbon Accumulation in Pearl River Mouth Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(Sup.1):81-89.
- [28] 吴琼玲,彭光荣,肖张波,等. 岩浆底辟改造型洼陷复杂结构特征及演化规律:以珠江口盆地陆丰22洼为例[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2023, 53(4): 1048-1065.
- Wu Qiongling, Peng Guangrong, Xiao Zhangbo, et al. Complex Structural Characteristics and Evolution of Magmatic Diapirism Reformed Subsag: A Case of Lufeng 22 Subsag, Pearl River Mouth Basin [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2023, 53(4):1048-1065.
- [29] 汪成,陈冬霞,李洪博,等. 珠江口盆地陆丰凹陷深部储层原生孔隙特征及发育机制[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2023, 53(1): 44-59.
- Wang Cheng, Chen Dongxia, Li Hongbo, et al. Characteristics and Development Mechanism of Primary Pores in Deep Burial Reservoirs in Lufeng Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2023, 53(1): 44-59.
- [30] 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, Rexiti Yalikun, Liu Pei, et al. Sedimentary Response and Tectonic Significance of Zhuqiong Movement in Xijiang Main Depression of the Pearl River Mouth Basin [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2023, 53(2): 329-342.
- [31] 葛家旺,朱筱敏,吴陈冰洁,等. 辫状河三角洲沉积特征及成因差异:以珠江口盆地陆丰凹陷恩平组为例[J]. *石油学报*, 2019, 40(增刊1):139-152.
- Ge Jiawang, Zhu Xiaomin, Wu Chenbingjie, et al. Sedimentary Characteristics and Genetic Difference of Braided Delta: A Case Study of Enping Formation in Lufeng Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(Sup.1):139-152.
- [32] 宋明水,赵乐强,宫亚军,等. 准噶尔盆地西北缘超剥带圈闭含油性量化评价[J]. *石油学报*, 2016, 37(1):64-72.
- Song Mingshui, Zhao Leqiang, Gong Yajun, et al. Quantitative Assessment on Trap Oil-Bearing Property in Ultra-Denudation Zones at the Northwestern Margin of Junggar Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(1):64-72.
- [33] 加东辉,徐长贵,杨波,等. 辽东湾辽东带中南部古近纪古地貌恢复和演化及其对沉积体系的控制[J]. *古地理学报*, 2007, 9(2):155-166.
- Jia Donghui, Xu Changgui, Yang Bo, et al. Paleogene Palaeogeomorphology Reconstruction and Evolution and Its Control on Sedimentary Systems in Central-Southern Liaodong Zone, Liaodongwan Bay [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2007, 9(2):155-166.
- [34] 刘军,彭光荣,郑金云,等. 珠江口盆地白云凹陷西区始新世张裂-拆离作用下沉积转换及源-汇响应[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(3): 600-612.
- Liu Jun, Peng Guangrong, Zheng Jinyun, et al. Sedimentary Transformation and Source-to-Sink Response Under Eocene Tension Fracture Detachment in Western Baiyun Sag, the Pearl River Mouth Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(3): 600-612.
- [35] 朱红涛,徐长贵,杜晓峰,等. 陆相盆地古源-汇系统定量重建、级次划分及耦合模式[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(3): 539-553.
- Zhu Hongtao, Xu Changgui, Du Xiaofeng, et al. Quantitative Reconstruction, Hierarchical Division, and Coupling Model of Paleosource Sink Systems in Terrestrial Basins [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(3): 539-553.
- [36] 史同广,景才瑞. 戴维斯学说与现代地貌学[J]. *华中师范大学学报(自然科学版)*, 1990, 24(3):127-131.
- Shi Tongguang, Jing Cairui. Davis' Geographical Cycle Theory and Modern Geomorphology [J]. *Journal of Central China Normal University(Nature Science)*, 1990, 24(3):127-131.
- [37] 高阳东,张向涛,张丽丽,等. 珠江口盆地中生代陆缘岩浆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 Background of Mesozoic Continental Margin Magma Arc in Pearl River Estuary Basin[J]. *Earth Science*, 2022, 47(7): 2317-2327.
- [38] 朱筱敏,陈贺贺,葛家旺,等. 陆相断陷湖盆层序构型与砂体发育分布特征[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(4): 746-762.
- Zhu Xiaomin, Chen Hehe, Ge Jiawang, et al. Characterization of Sequence Architectures and Sandbody Distribution in Continental Rift Basins [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(4): 746-762.

- [39] 孟庆涛,胡菲,刘招君,等. 陆相坳陷湖盆细粒沉积岩岩相类型及成因:以松辽盆地晚白垩世青山口组为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(1): 20 - 37.
- Meng Qingtao, Hu Fei, Liu Zhaojun, et al. Lithofacies Types and Genesis of Fine-Grained Sediments in Terrestrial Depression Lake Basin: Taking Upper Cretaceous Qingshankou Formation in Songliao Basin as an Example[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(1): 20 - 37.
- [40] 张增宝. 准噶尔盆地阜康凹陷深层侏罗系砂岩储层差异性成岩演化与烃类充注历史[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(1): 1672 - 1688.
- Zhang Zengbao. Differential Diagenetic Evolution of Deep Sandstone Reservoirs and Hydrocarbon Charge History: A Case Study from the Lower Jurassic Sangonghe Formation in the Fukang Sag, Central Junggar Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(1): 1672 - 1688.
- [41] 雷永昌,赵鹏,肖张波,等. 珠江口盆地陆丰凹陷陆丰 15 洼与 22 洼古近系文昌组源-汇系统与沉积演化[J]. 世界地质, 2023, 42(3): 501 - 515.
- Lei Yongchang, Zhao Peng, Xiao Zhangbo, et al. Source to Sink System and Sedimentary Evolution of Paleogene Wenchang Formation in Lufeng 15 and 22 Sags, Lufeng Depression, Pearl River Mouth Basin [J]. World Geology, 2023, 42(3): 501 - 515.
- [42] 向巧维,柳保军,李晓艳,等. 西江主洼缓坡带裂陷期三角洲沉积特征对比[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2022, 44(2): 19 - 30.
- Xiang Qiaowei, Liu Baojun, Li Xiaoyan, et al. Comparison of Sedimentary Characteristics of Delta During the Rift Period in the Gentle Slope Zone of Xijiang Main Depression [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Natural Science Edition), 2022, 44(2): 19 - 30.
- [43] 田兵,郑有伟,赵俊梅. 南海白云凹陷渐新统珠海组沉积相及其演化[J]. 断块油气田, 2022, 29(6): 800 - 806.
- Tian Bing, Zheng Youwei, Zhao Junmei. Sedimentary Facies and Evolution of the Oligocene Zhuhai Formation in the Baiyun Depression of the South China Sea [J]. Fault Block Oil and Gas Field, 2022, 29(6): 800 - 806.