

珠江口盆地惠州26洼东南缘古近系恩平组上段断-拗 转换期源-汇系统及勘探意义

彭光荣,王绪诚,陈维涛,靳瑶瑶,王菲,王文勇,全涵

[中海石油(中国)有限公司深圳分公司,广东深圳518054]

摘要:断-拗转换期是断陷盆地由伸展体制向热冷却沉降机制转变的重要阶段,伴随着拉张作用的减弱,构造活动逐渐趋于稳定,从而影响裂陷晚期沉积体系及有利储层分布。以源-汇系统要素耦合为指导,基于源-汇区岩石学、测井相、地震相特征分析,结合珠江口盆地惠州26洼东南缘古近系恩平组上段断-拗转换期边界断层活动差异,提出以“构造控相、沟断控储”分析有利储层成因及分布规律。研究表明:①研究区恩平组上段物源为东沙隆起中生代酸性侵入岩,在恩平组上段断-拗转换期发育5大汇水单元,其供源能力强弱以汇水单元面积与物源区落差进行量化表征;②输砂通道由“沟谷-边界断层”组合而成,物源区沟谷形态及规模造成各水系水动能强弱差异,而边界断层的平面组合样式(凹面墙角型、平直陡坡型及平直断阶型)和垂向落差影响沉积物汇聚入湖的方式与砂体展布;③以“源-沟-断-汇”4要素进行源-汇耦合,建立断-拗转换期构造活动趋稳背景下由边界断层差异活动形成的“南扇北辫”沉积格局,刻画沉积特征并揭示有利相带及优质储层分布,即顺“沟-断”优势通道入湖的辫状河三角洲平原河道亚相高成熟度粗粒沉积,该沉积具有原生孔隙发育和渗透率高的特征。新认识推动了研究区内恩平组研究与勘探进程,为惠西南地区深层古近系油气勘探指明方向。

关键词:断-拗转换期;源-汇系统;恩平组;古近系;惠州26洼;珠江口盆地

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Source-to-sink system during rifting-depression transition period and its exploration significance: A case study of the Upper Enping Formation at southeastern margin of Huizhou 26 sub-sag, Pearl River Mouth Basin

PENG Guangrong, WANG Xucheng, CHEN Weitao, JIN Yaoyao, WANG Fei, WANG Wenyong, QUAN Han

(Shenzhen Branch of CNOOC, Shenzhen, Guangdong 518054, China)

Abstract: Rifting-depression transition period is a significant stage of transition for a rifted basin from extension to subsidence, during which the tectonic activities get stable along with declining extension, affecting the sedimentary system and favorable reservoir distribution in the late rifting period. With the guidance of the “source-to-sink” coupling ideology and based on the analysis of petrological characteristics, logging and seismic facies, we propose the idea of “tectonic activity-controlling facies, and valley/fault-controlling reservoir” to analyze the origin and distribution pattern of favorable reservoirs according to the differential activities of boundary faults during the rifting-depression transition period of the Upper Enping Formation at southeastern margin of Huizhou 26 sub-sag. The major conclusions can be drawn as follows. First, the Mesozoic intrusive rocks of the Dongsha uplift serve as the provenance to the upper member of the Enping Formation in the study area, with five major catchment units developed during the rifting-depression transition period. The supply capacity can be characterized by the quantitative analysis of the area and head of these catchment units. Second, the sediment-transport pathways are composed of the valleys and boundary faults. The morphology and scale of valleys within provenance affect the water kinetic energy of each drainage, and the planar

收稿日期:2023-01-13;修订日期:2023-03-13。

第一作者简介:彭光荣(1978—),男,高级工程师,油气地质。E-mail: penggr@cnooc.com.cn。

基金项目:中国海洋石油集团有限公司“十四五”重大科技项目(KJGG2022-0403);中海石油(中国)有限公司深圳分公司2023年勘探项目(SCKY-2023-SZ-03)。

combination pattern of boundary faults (i. e. the concave corner type, the straight and flat slope type, and the straight and flat fault type) and their vertical throws serve to influence the way of sediments converging in lake, as well as the distribution of sand bodies. Third, the “source-to-sink” coupling with four elements including source, valley, boundary fault and sedimentary system helps establish a sedimentary framework of “fan deltas in the south and braided deltas in the north” resulting from the differential activities of boundary faults at the tectonically quiet stage of the rifting-depression transition period. Sedimentary characteristics are finely depicted to disclose favorable facies zone and quality reservoir distribution, that is, the coarse-grained deposits of channel sub-facies, braided river delta plain facies, that is formed by sediments transported along the “valley-boundary faults” to lake, and characterized by well-developed primary pores and high permeability. These new understandings serve to promote the exploration progress of the Enping Formation and manifest exploration direction of the Paleogene deep strata at the southwestern area of Huizhou Sag.

Key words: rifting-depression transition period, source-to-sink system, Enping Formation, Paleogene, Huizhou 26 sub-sag, Pearl River Mouth Basin (PRMB)

引用格式: 彭光荣, 王绪诚, 陈维涛, 等. 珠江口盆地惠州26洼东南缘古近系恩平组上段断-拗转换期源-汇系统及勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(3): 613–625. DOI: 10. 11743/ogg20230307.

PENG Guangrong, WANG Xucheng, CHEN Weitao, et al. Source-to-sink system during rifting-depression transition period and its exploration significance: A case study of the Upper Enping Formation at southeastern margin of Huizhou 26 sub-sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(3): 613–625. DOI: 10. 11743/ogg20230307.

源-汇系统研究经过多年的发展, 已经由聚焦于沉积物搬运过程的被动大陆边缘海相沉积, 逐渐转向陆相断陷盆地由物源体系、沉积物搬运通道及沉积体系所构成的沉积物路径系统^[1-7], 并逐渐走向要素定量化、时-空耦合的综合分析阶段^[8-9]。同时, 边界断层作为陆相断陷盆地沉积物从源到汇搬运的重要环节, 其纵向活动性所代表的构造活动强弱与平面组合特征, 对层序地层及沉积体系展布产生深刻影响^[10-14]。

随着珠江口盆地珠一坳陷古近系勘探程度不断提高, 地质认识不断深入^[15-17]。“十三五”以来, 围绕陆丰13洼、惠州26洼等珠一坳陷典型的富生烃洼陷^[18-20], 先后在陆丰南地区缓坡带^[21-22]、惠西南地区转换带^[23]等获得了古近系恩平组和文昌组油气商业发现, 特别是惠州26洼西南缘陡坡带惠州26-6构造获得的古近系和古潜山“双古”领域勘探突破, 进一步证实了古近系围绕优质烃源岩“近源成藏, 强势供烃”的有利成藏模式与特征。

前人研究认为, 惠州26洼具有南断北超的洼陷结构^[24-25], 南部为边界断层发育区, 伴随断陷作用沿断层走向形成一系列陡坡带扇三角洲及近岸水下扇, 及两条边界断层同向错位形成的转换带三角洲。然而多轮勘探实践证实, 洼陷南部古近系储层物性及产能主要受到沉积相类型所控制, 有利相带主要为与转换带相关的辫状河三角洲平原、前缘及远端滩坝^[23, 26], 而陡坡

带扇三角洲、近岸水下扇储层非均质性较强、物性普遍较差。因此, 转换带(体)^[27]形成的低角度搬运斜坡是在箕状半地堑陡坡带寻找低角度入湖、长距离搬运改造的有利相带及优质储层的有效方法。而洼陷边界断层活动增强或减弱导致沉积物入湖倾角变化, 也会引起纵向上沉积相带的改变, 从而影响有利储层分布。惠州26洼东南缘恩平组上段为断-拗转换期所沉积, 对该区进行构造控相、沟断控储分析, 精细刻画恩平上段沉积体系并指导有利储层分布预测, 能够丰富珠一坳陷源-汇系统新认识, 并为古近系下一步油气勘探指明方向。

1 断-拗转换期地质特征

断-拗转换期是中国东部新生代断陷盆地从裂陷阶段向裂后拗陷阶段演化的构造转型期, 既具有裂陷萎缩期的构造样式, 又具备拗陷初始阶段的构造发展格局^[28]。珠江口盆地是南海北部典型的新生代陆相断陷盆地, 中生代末期以来, 受控于古新世开始的拉张构造环境, 华南陆缘广布的中生代褶皱基底发生强烈断陷作用并形成多洼多隆、隆-洼相间的构造格局: 从始新世初期珠琼运动一幕(约47.8 Ma, 地震标志层T₉/T₈)开始, 基底张裂并沉积文昌组。始新世中、后期的珠琼运动二幕(约39.0 Ma^[29], 地震标志层T₈⁰)开始, 进入断-拗转换期, 断层活动减弱、拗陷初始阶段的热沉

降作用逐渐增强并沉积恩平组。随后,珠江口盆地全面转入被动大陆边缘构造演化阶段,以拗陷作用为主。

惠州26洼位于珠一坳陷中部的惠州凹陷西南部,洼陷面积约600 km²,中心最大沉积厚度可达3 000 m。洼陷内地层(岩层)自下而上依次为中生代褶皱基底、新生代早期火山岩层、古近纪早期文昌组及古近纪晚期恩平组。根据断-拗转换期典型地震接触关系及测井、录井和古生物等资料,在恩平组顶、底及内幕识别出4个层序界面,自下而上依次对应地震反射层T_g⁰, T_g¹, T_g²和T_g³,并划分为3个三级层序,自下而上分别为EPSQ1, EPSQ2和EPSQ3,对应恩四段、恩三段和恩一段+恩二段(图1)。

2 断-拗转换期物源区供给强度表征

物源区基岩经风化、剥蚀作用形成抗压程度显著不同的碎屑物质,成为源-汇系统重要的物质基础。恩平组上段断-拗转换期,惠州26洼南缘古近系物源区为洼陷南部的东沙隆起与西惠低凸起^[18,30]。对物

源区基岩岩心、岩屑观察与镜下鉴定,发现东沙隆起基岩的岩石类型为花岗闪长岩与二长花岗岩。其中,花岗闪长岩为细粒粒状结构,角闪石碳酸盐化严重(图2a),或具有中-细粒粒状结构,斜长石表面绢云母化严重,微斜长石格子双晶结构,角闪石部分转化为绿泥石(图2b);二长花岗岩为中-细粒粒状结构,斜长石表面绢云母化,微斜长石发育格子双晶(图2c)。结合研究区内多口井基底岩屑样品锆石U-Pb同位素年龄(133~113 Ma),认为东沙隆起物源区岩性为中生代酸性侵入岩。

根据恩平组上段断-拗转换期物源区地貌形态识别了分水岭、分水线等要素,其所围限的汇水单元面积大小与源区落差决定了沉积物供给强度。洼缘东南部物源区可划分为5大汇水单元(C1—C5),汇水面积29.94~52.56 km²。其中北部的C4和C5的汇水单元面积最大(均在43.26~52.56 km²)、源区落差最显著(T_g面落差200.01~202.25 ms),代表可风化剥蚀面积与强度大、沉积物供给能力强;位于中部的C3汇水单元面积最小(29.94 km²),但物源区落差中等(T_g面落

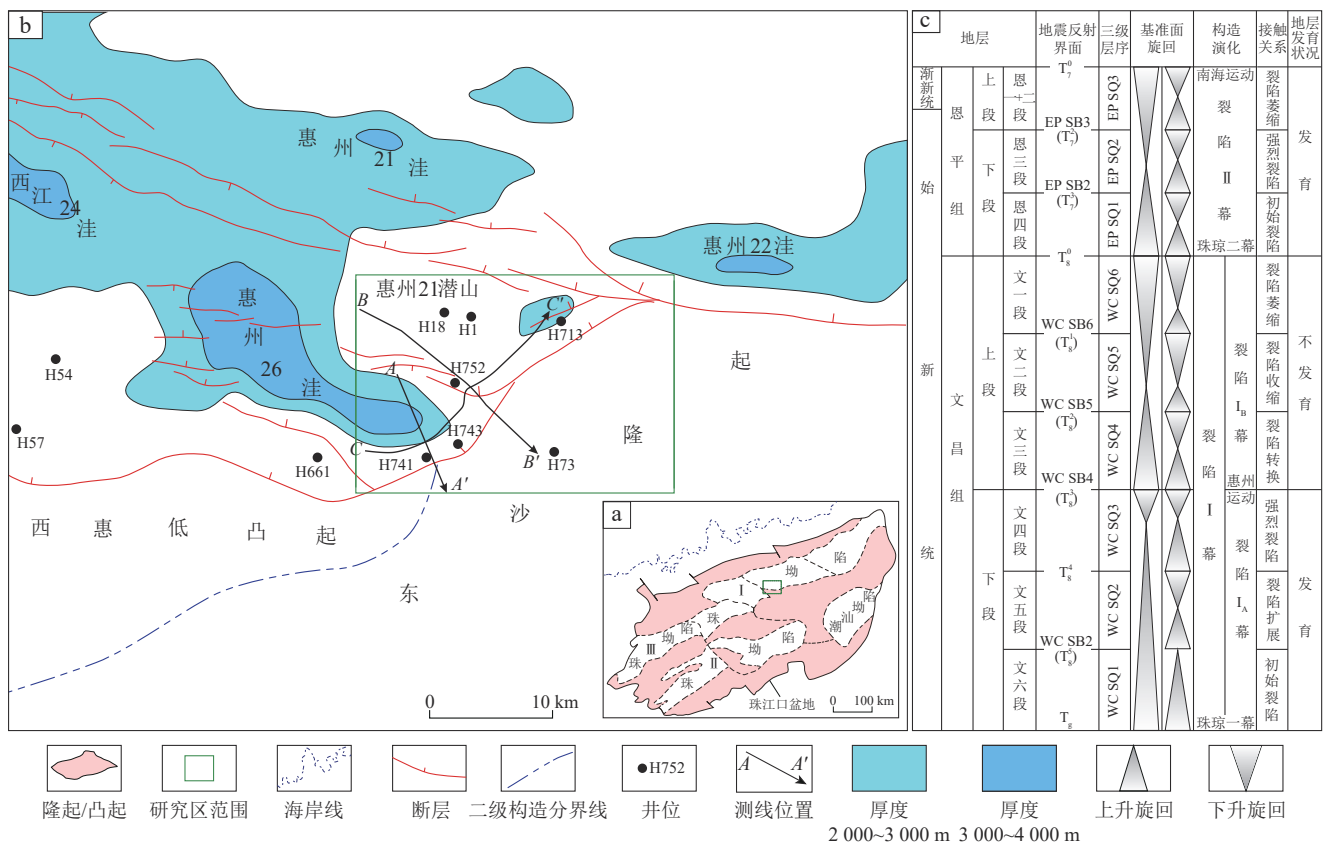


图1 珠江口盆地惠州26洼构造位置及古近系层序地层格架

Fig. 1 Structural location map and the Paleogene sequence stratigraphic framework of Huizhou 26 sub-sag, PRMB

a. 珠江口盆地构造纲要图; b. 惠州26洼构造纲要; c. 层序地层格架

差 183.31 ms), 其供源能力次之; 南部 C1 和 C2 汇水单元的汇水面积中等 (均在 33.15 ~ 39.96 km²), 但源区

落差较小 (T_g 面落差 139.39 ~ 168.26 ms)、地势相对平坦, 沉积物供给能力相对较弱 (图 3; 表 1)。

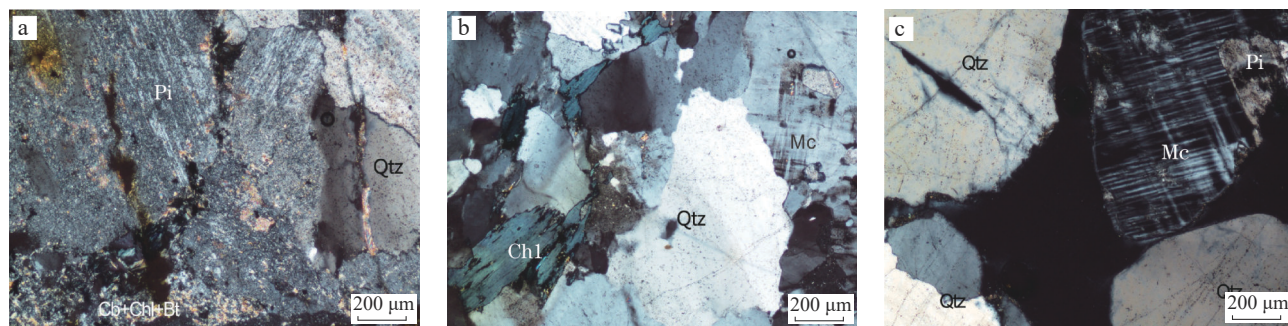


图2 珠江口盆地惠州26洼东南缘东沙隆起物源区基岩岩性照片

Fig. 2 Bedrock lithology of the provenance in Dongsha uplift, Huizhou 26 sub-sag, PRMB

- a. 花岗闪长岩, 细粒粒状结构, 块状构造, H73井, 深度2 572 m, 正交偏光; b. 花岗闪长岩, 中-细粒粒状结构, 块状构造, H91井, 深度3 373 ~ 3 376 m, 正交偏光; c. 二长花岗岩, 中-细粒粒状结构, 块状构造, H41井, 深度2 315 m, 正交偏光
Qtz. 石英; Pl. 斜长石; Mc. 微斜长石; Cb. 碳酸盐矿物; Chl. 绿泥石; Bt. 黑云母

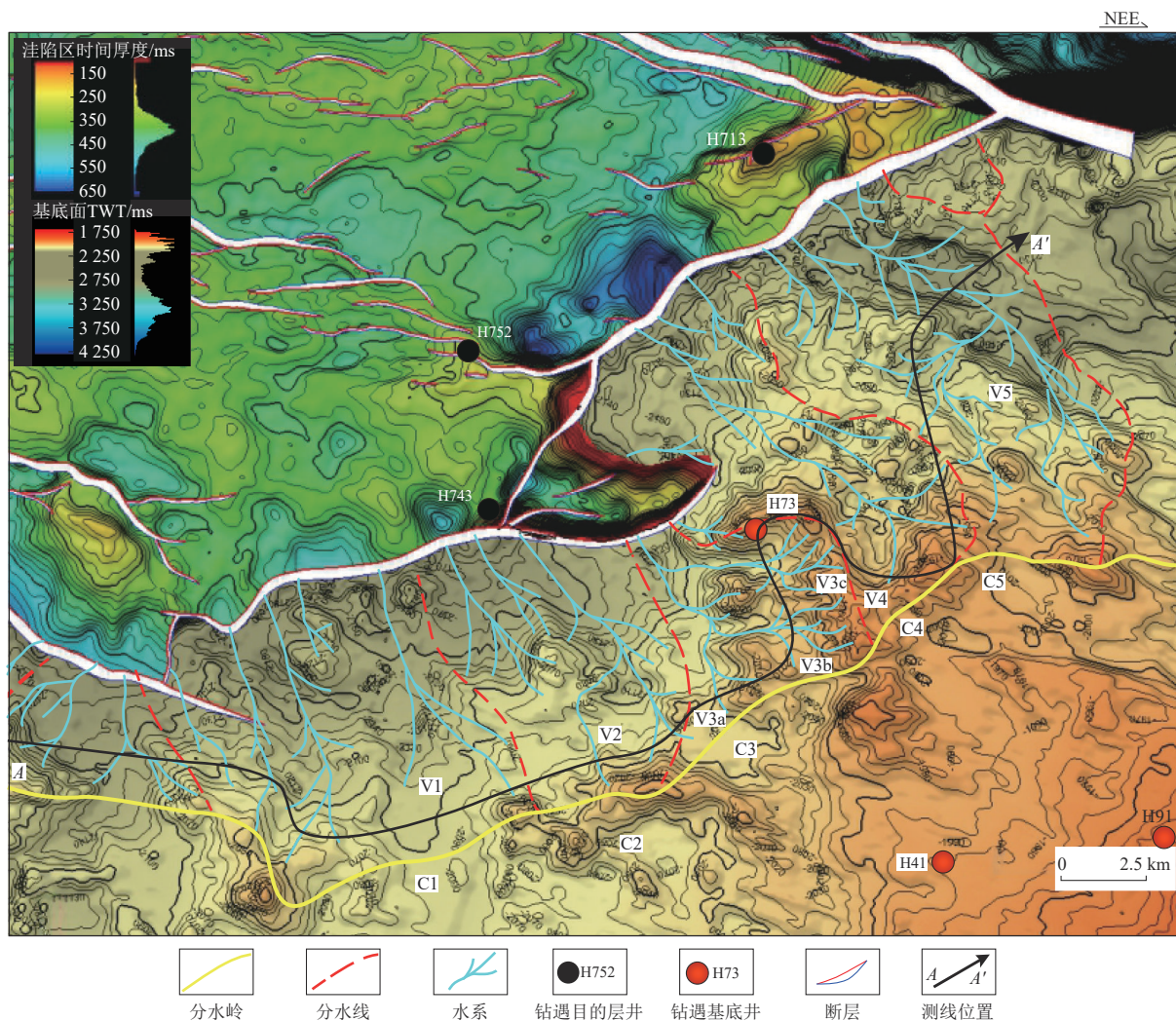


图3 珠江口盆地惠州26洼恩平组上段沉积区等厚图(左上)与物源区汇水单元划分(以断层F1—F4为界)

Fig. 3 Isopach map for the upper member of Enping Formation, catchment unit division of provenance at southeastern margin of Huizhou 26 sub-sag, PRMB (with fault F1—F4 as the boundary)
C1—C5. 汇水单元编号; V1—V5. 沟谷编号

表1 珠江口盆地惠州26洼东南缘恩平组上段东沙隆起物源区参数统计

Table 1 The parametric statistics of provenance for the upper member of Enping Formation at the southeastern margin of Huizhou 26 sub-sag, PRMB

汇水单元	沟谷编号	岩性	汇水面积/km ²	源区落差/ms	沉积物供给强度
C1	V1	二长花岗岩、花岗闪长岩	39.96	139.39	弱
C2	V2		33.15	168.26	弱
C3	V3a		29.94	183.31	中等
C3	V3b		29.94	183.31	中等
C3	V3c		29.94	183.31	中等
C4	V4		43.26	200.01	强
C5	V5		52.56	202.25	强

3 断-拗转换期输砂通道特征

3.1 物源区沟谷体系特征

物源区沟谷体系是基岩被风化剥蚀后所形成碎屑物的搬运通道,与边界断层共同作为联系断-拗转换期物源体系与沉积体系的纽带。沟谷体系是由剥蚀区内一系列山岭、冲沟等共同构成的古沟谷地貌,其沟谷形态、起伏程度和延伸长度决定了汇水单元内各个水系水动能的强弱。本文以东沙隆起物源区在恩平组上段沉积时期地貌图为基础,开展物源区沟谷体系定量表征。物源区C1汇水单元内V1沟谷为W型,宽/深比34.0,长度7.6 km,水动能较弱;C2汇水单元内V2沟谷宽/深比23.1,形态为U型,长度8.4 km,水动能中

等;C3和C4汇水单元内V3b与V4沟谷形态为对称的V型,宽/深比8.2~18.1,水动能较强;C5汇水单元内V5沟谷形态为不对称U型平底谷,宽/深比较大(34.1),与边界断层之间存在较为平缓的断槽,进一步降低了该水系入湖前的水动能(图4;表2)。

3.2 边界断层平面组合样式与汇聚能力

珠江口盆地古近系经历了多幕拉张伸展演化过程,形成一系列地堑、半地堑并通过一组边界断层与隆起区相接,而惠州26洼东南缘在断-拗转换期正是以物源区沟谷体系与边界断层为搬运通道。其中,由一条或多条边界断层形成的不同类型的输砂体系沟通物源剥蚀区与沉积区。随着盆地拉张、破裂作用的进行,一系列独立发育的主控断层逐渐扩展,相邻断层的两端以不同形态组合,形成了多种类型的洼陷边缘样式。

根据地震解释的断层组合平面形态,可分为碎屑物汇聚、水动能集中的凹面型及碎屑物相对发散的平直与凸面型。根据断层上盘基岩断阶发育情况,可进一步分为断坡型与断阶型,前者受单条断层控制,断面附近没有断阶承接沉积物,在古落差较大、源区供源有限情况下,碎屑物入湖倾角较陡,存在近源重力流沉积;后者则受两条甚至多条断层控制,在主断面上形成一系列基岩断阶承载入湖沉积物,有效减小了边界断层输砂通道的倾角。惠州26洼东南缘边界断层组合样式可分为汇聚能力强、碎屑物高能入湖的凹面墙角型,无明显汇聚点、沉积展布局限于断层附近

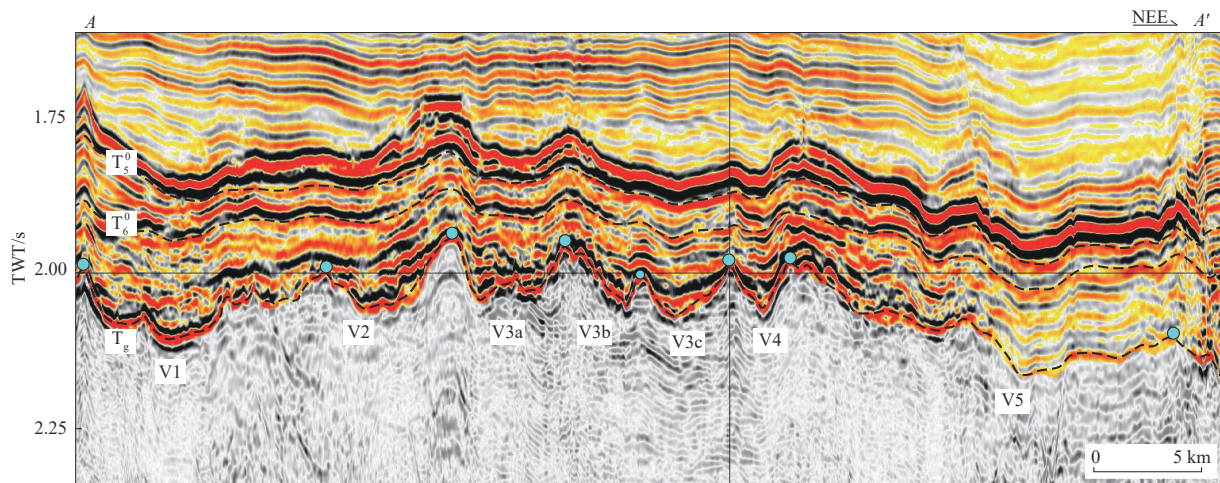


图4 珠江口盆地惠州26洼东南缘恩平组上段物源区沟谷体系特征(测线位置见图3)

Fig. 4 Characteristics of gully-valley system of the provenance for the upper member of Enping Formation at the southeastern margin of Huizhou 26 sub-sag, PRMB (see Fig. 3 for the seismic line position)

V1—V5. 沟谷编号

表2 珠江口盆地惠州26洼东南缘恩平组上段东沙隆起物源区沟谷体系参数统计

Table 2 The parametric statistics of gully-valley system of the provenance in Dongsha uplift for the upper member of Enping Formation at the southeastern margin of Huizhou 26 sub-sag, PRMB

汇水单元	沟谷编号	沟谷形态	基本参数				水动能
			长度/m	宽度/m	深度/m	宽/深比	
C1	V1	W	7 561	7 826	230	34.0	弱
C2	V2	U	8 415	3 647	158	23.1	中等
C3	V3a	W	4 857	4 943	140	35.3	弱
C3	V3b	V	4 230	2 298	280	8.2	强
C3	V3c	U	3 002	3 600	160	22.5	中等
C4	V4	V	10 535	3 200	177	18.1	强
C5	V5	U	12 493	6 178	181	34.1	弱

的平直陡坡型,及入湖倾角显著减缓的平直断阶型3类(图5)。

3.3 边界断层纵向活动性与优势入湖通道

惠州26洼南部陡坡带古近系储层物性及产能主要受沉积相类型控制,有利相带主要为转换带辫状河三角洲平原、前缘及远端滩坝^[23,26],而陡坡带扇三角洲、近岸水下扇储层物性较差。空间上,构成转换带(体)的多条边界断层发生同向错位,所形成的低角度搬运斜坡是箕状半地堑陡坡带的低角度入湖、长距离搬运改造优势通道^[27]。

断-拗转换期是洼陷由伸展断陷向区域热沉降的过渡时期,边界断层活动性减弱导致隆起区的碎屑物入湖倾角发生变化,垂向上引起沉积相带的改变。把沟-断联合搬运体系视为相带与储层的主要控制因素,精细刻画源汇体系及沉积样式,明确有利储层分布规律。一般认为,形成地堑或半地堑的边界正断层以板式、铲式或坡坪式为主。多条断层在统一的应力场作用下首尾直接接触、逐渐融合为同一条边界断层,形成简单的洼缘主控断层,并且在断层相接的位置断距(古落差)最小,沿断层走向上形成入湖角度最平缓的入湖点,在物源供给强度与水动能相同的条件下,断层相接点处形成展布面积较广的辫状河三角洲沉积。本次研究统计了惠州26洼东南缘边界断层F2—F4文昌至恩平期各三级层序沿走向的落差,结果表明F2断层在文昌末期中部落差大、两端落差显著减小,至裂陷作用减弱的恩平末期其落差特征基本一致,表明断层始终处于强烈活动阶段,结合平直陡坡的平面组合形态,入湖倾角较陡、汇聚能力弱。F3断层在文昌末期南段受F2断层影响落差大于北段,至恩平末期沿走向落差较为平均,且为东南缘落差最小的边界断层,同时其平

面组合形态表现出由南向北凹面汇聚特征,表明F3断层北段断-拗转换期时入湖点平缓、汇聚能力强。F4断层落差特征在上述两个沉积时期存在较大差异:文昌末期与F2断层较为相似,中部断陷作用最为强烈、两翼迅速减弱,而恩平末期落差整体差异不大,表明其断陷作用减弱;同时上盘发育断阶进一步降低入湖角度,垂向上从文昌末期至恩平末期由构造活动变化导致重力流沉积向牵引流沉积转变,而F3和F4断层相接处由于落差最小,对应的断层倾角、碎屑物入湖倾角均较小,是优势入湖通道(图6)。

4 断-拗转换期断控沉积特征

根据洼缘边界断层活动性及平面组合样式,由文昌末期至恩平末期,区域构造运动不断减弱并导致洼缘沉积体系发生变化。文昌末期由于边界断层强烈活动,裂陷特征显著,沟扇对应性较好,惠州26洼西南缘断控沉积由以转换带长源辫状河三角洲为主的沉积体和陡坡带短源扇三角洲沉积体构成。随着断陷作用减弱,沉积物入湖角度变缓,恩平组上段断-拗转换期陡坡带形成了适于扇-辫转换的特殊构造背景,具有“南扇北辫”的断控沉积特征。

4.1 平直陡坡型沉积特征

平直陡坡型是受单条断层控制的陡坡带入湖通道类型,断面附近没有断阶承接沉积物,落差大、碎屑物入湖倾角陡,发育近源重力流沉积(图7)。靠近断层处地震相以中-弱振幅、弱连续、中-高频、杂乱反射为特征,分布范围较为局限,远离物源方向地震相迅速变为中-强连续、中-低频、中-强振幅,代表了重力流所形成的扇三角洲平原至前缘的地震反射特征

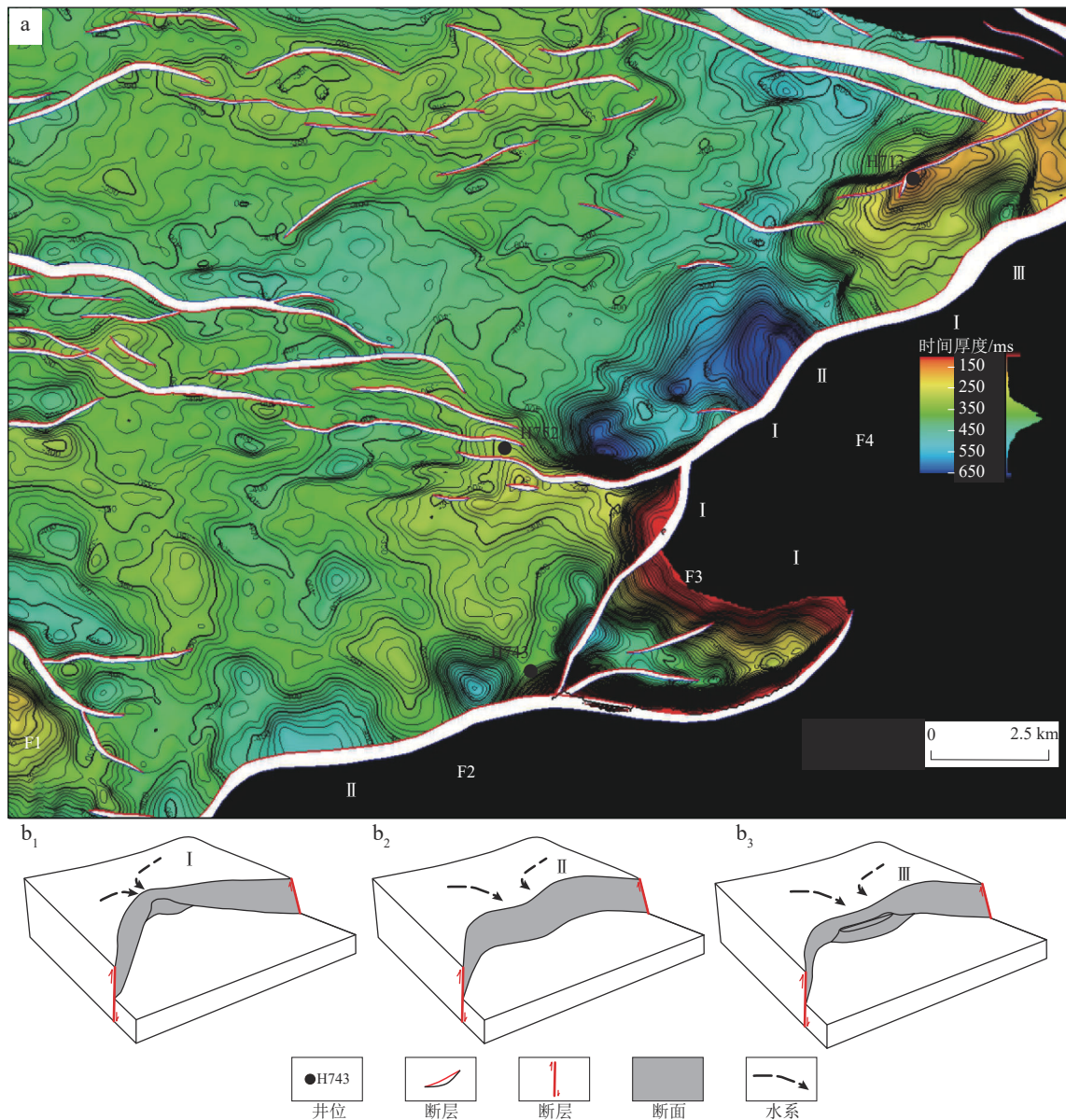


图5 珠江口盆地惠州26洼东南缘恩平组上段边界断层平面组合样式

Fig. 5 Diagram showing the planar combination of boundary faults in the upper member of Enping Formation at the southeastern margin of Huizhou 26 sub-sag, PRMB

a. 时间厚度叠合边界断层; b₁. 凹面墙角型(I型); b₂. 平直陡坡型(II型); b₃. 平直断阶型(III型)
F1—F4. 边界断层

(图7a)。顺物源方向识别出较陡的前积反射,纵向延伸距离短;垂直物源方向上见河道摆动形成的丘状反射(图7c)。

对源-沟-断等源-汇系统要素的定量分析揭示,洼陷东南缘平直陡坡型边界断层F2对应流域数最多(C1—C3)、面积最大(共为103.1 km²),但流域面积内物源落差只有139.4~183.3 ms,属相对平缓的物源区,因此沉积物供给强度为中-弱。物源区沟谷体系为W型-U型,宽/深比22.5~35.3,水动能以中等-弱为主。而F2边界断层平面样式主要为平直陡坡型,汇

水、汇砂能力较低,在断层纵向活动性较强的情况下,近断层部位发育扇三角洲平原粗颗粒相带(表3)。

4.2 凹面墙角型和平直断阶型沉积特征

凹面墙角型因其独特的断层组合样式而具有较强汇水、汇砂能力,平直断阶型则因主断面上基岩断阶的存在而有效降低输砂通道入湖角度,二者共同影响导致研究区北部在恩平组上段断-拗转换期形成牵引流,并发育一套面积广阔的辫状河三角洲沉积体,地震相为中等振幅、中等连续、中-低频、平行-亚平行反射

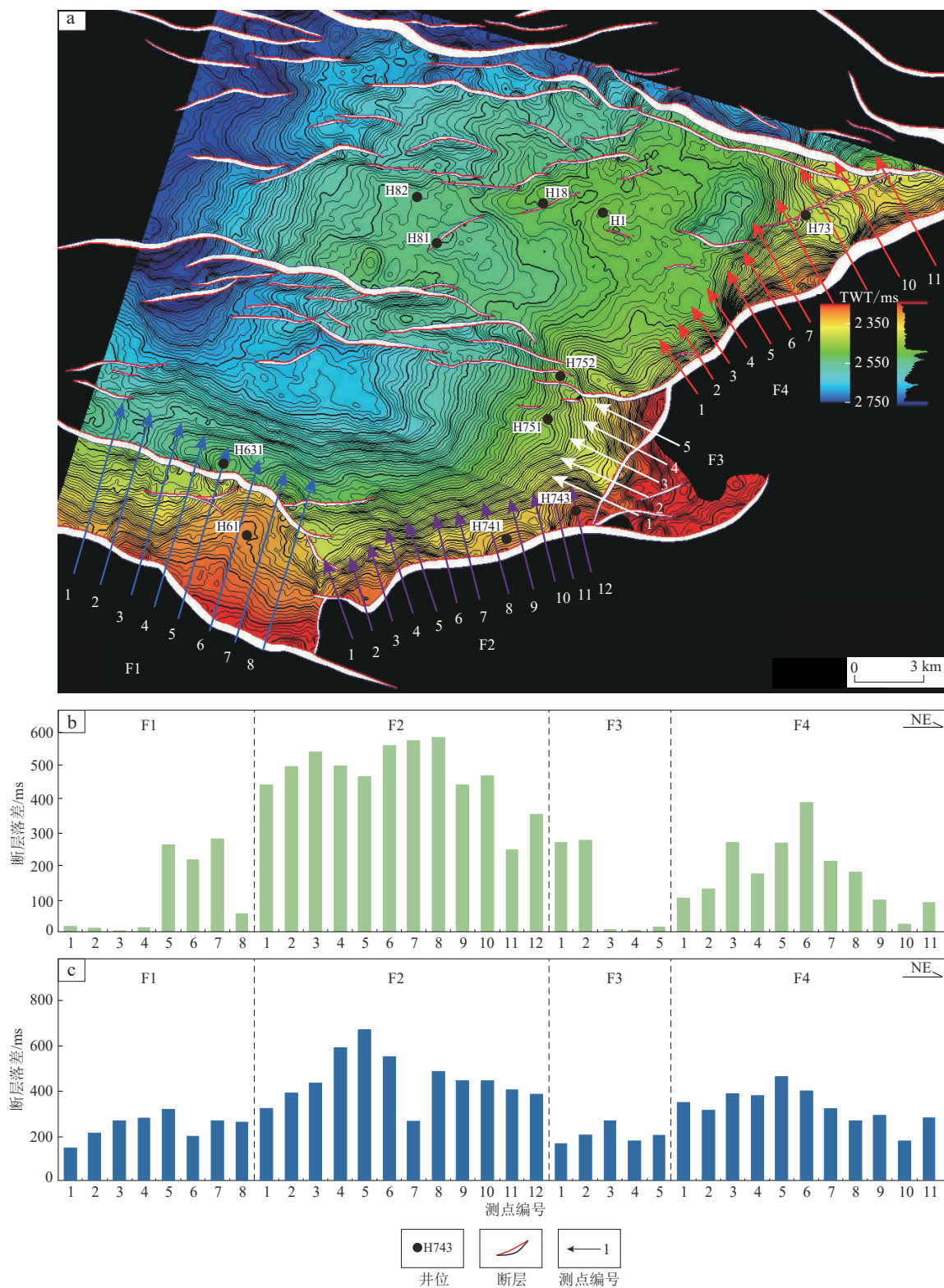


图6 珠江口盆地惠州26洼东南缘恩平组上段断-拗转换期断层落差特征

Fig. 6 Fault throw features during the rifting-depression transition period for the upper member of Enping Formation at the southeastern margin of Huizhou 26 sub-sag, PRMB

a. T_7^0 层位等 T_0 图及断层分析测线位置; b. 文昌末期断层落差; c. 恩平末期断层落差

F1—F4. 边界断层

特征(图7b)。顺物源方向识别出一组低角度前积反射,纵向延伸距离较长;而在垂直物源方向上表现为平

缓的双向下超反射特征,为宽缓河道侧向摆动所形成(图7c)。

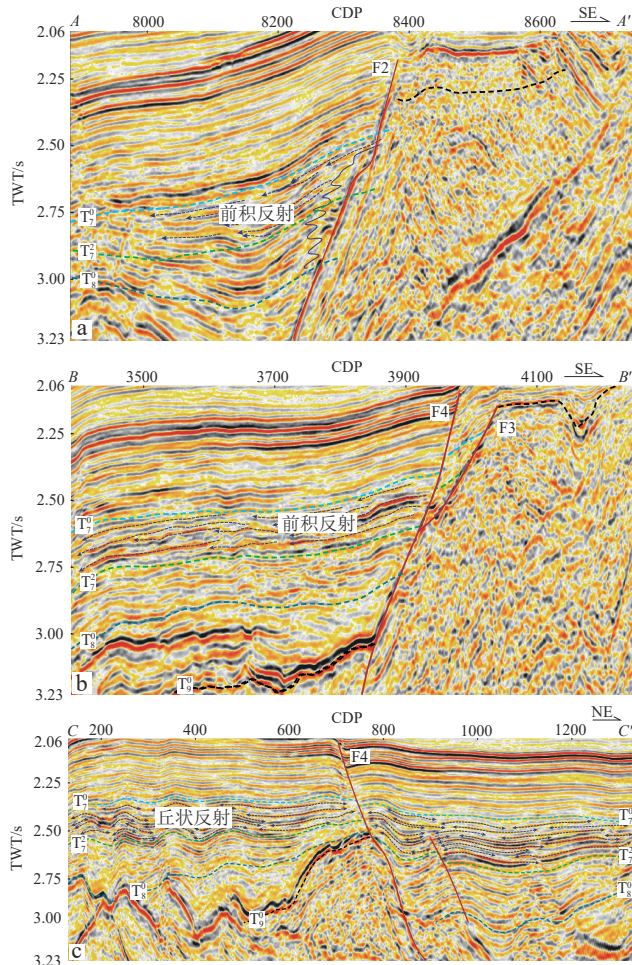


图7 珠江口盆地惠州26洼东南缘断-拗转换期扇三角洲及辫状河三角洲地震相特征(测线位置见图1)

Fig. 7 Seismic facies characteristics of fan delta and braid river delta during the rifting-depression transition period at the southeastern margin of Huizhou 26 sub-sag, PRMB (see Fig. 1 for the seismic line position)

a. 扇三角洲顺物源方向; b. 辫状河三角洲顺物源方向; c. 扇三角洲和辫状河三角洲垂直物源方向
F1—F4. 边界断层

洼陷东南缘凹面墙角型边界断层F3及F4西段对应流域C4, 汇水面积43.26 km², 物源区落差达200 ms, 沉积物供给强度大。源区沟谷体系为V型, 宽深/比18.1, 水动能强。F3和F4边界断层平面组合样式的汇水、汇砂能力较好, 断-拗转换期断层纵向活动性逐渐减弱, 两条断层相接部位适于发育辫状河三角洲平原粗颗粒相带(表3)。

边界断层F4主体部分对应流域C5, 汇水面积(52.56 km²)及物源区落差(202.3 ms)均表明其为沉积物供给强度最大的流域。然而平缓的沟谷形态(U型)及物源区存在的长距离顺物源平缓断槽, 降低了水动能。同时, 平直断阶型的边界断层的入湖角度较低,

进一步降低入湖水体的水动能, 因而发育辫状河三角洲中-粗粒平原、前缘相带。

恩平组上段断-拗转换期洼陷东南缘F3和F4断层整体表现为均匀裂隙, 沿走向落差较为平均, 同时F3断层平面组合的凹面特征改善了物源汇聚能力, F4断层上盘基岩断阶降低了沉积物入湖角度, 因此沉积样式由文昌期强烈断陷形成的陡坡带近源扇体及转换带长源三角洲组合, 转变为恩平末期断-拗转换体制下由南部陡坡带近源扇三角洲及北部长源辫状河三角洲构成的“南扇北辫”沉积格局, 构造活动差异对沉积相带控制作用显著(图8)。

5 源-汇耦合及有利储层特征

惠州26洼东南缘所经历的强烈断陷至断-拗转换使得陡坡带沉积体系在恩平末期出现变化, 在物源区沉积物供给强度、汇水单元水动能强弱、断层活动性变化及平面组合样式等要素的耦合作用下, 恩平末期洼陷东南缘南部形成了展布规模相对局限的扇三角洲, 北部形成了广阔的辫状河三角洲。

南部边界断层F2所在的文昌期强烈伸展断陷的位置, 发育中-深湖相厚层沉积, 至恩平期断层落差仍为最大, 陡坡特征显著。其物源区由3个汇水单元组成, 汇水面积大、源区落差小, 物源供给强度较弱。边界断层平面组合特征较平直, 在物源供给相对不充分、边界断层落差较大情况下, 沉积物沿断层分散入湖, 无法有效汇聚。因此, 近断层一侧地震相为杂乱反射特征, 远离断层则为高角度前积特征, 形成沿断层连片的扇状、裙带状近物源扇三角洲沉积体。

南部扇三角洲平原相储层岩性以厚层含砾中-粗砂岩、砂砾岩夹薄层泥岩为主, 分选、磨圆较差; 测井相以锯齿形、齿化箱形自然伽马曲线为特征, 砂、泥分异度不高, 代表砂、泥混杂且分选较差的重力流沉积。平原相含砂率较高, 单砂体厚度较大。储层石英含量变化范围较大, 为20%~75%, 岩屑含量相对较高, 以岩屑砂岩、长石岩屑砂岩和长石砂岩为主。岩屑成分主要为喷出岩。薄片镜下观察原生孔基本不发育, 面孔率最大只有0.5%, 储层物性较差(图9)。

北部边界断层F3和F4的活动性在恩平末期逐渐趋稳。F3断层活动性文昌期强裂陷阶段受F2断层影响而南强北弱, 而恩平末期断层落差相对平均; F4断层活动性强裂陷期中部强、两端弱, 至恩平末期断层不同位置活动强弱差异并不显著, 整体要弱于南部F2断层。同时, 北部断层F3因断层凹面的存在提升了汇聚

表3 珠江口盆地惠州26洼东南缘恩平组上段断-拗转换期源-汇耦合综合评价

Table 3 The parametric statistics of “source-to-sink” coupling for the upper member of Enping Formation at the southeastern margin of Huizhou 26 sub-sag, PRMB

汇水单元	沟谷编号	物源区		沉积物 供给强度	沟谷 形态	沟谷-边界断层输砂通道					近断层沉积区	
		汇水面积/km ²	落差/ms			宽/深比	水动能	边界断层	平面组合样式	纵向活动性	相带	粒度
C1	V1	39.96	139.4	弱	W	34.0	弱	F2	平直陡坡型	强	扇三角洲 平原	粗粒
C2	V2	33.15	168.3	弱	U	23.1	中等	F2	平直陡坡型	强		粗粒
C3	V3a	29.94	183.3	中等	W	35.3	弱	F2	平直陡坡型- 凹面墙角型	中-强		粗粒
C3	V3b	29.94	183.3	中等	V	8.2	强	F2				
C3	V3c	29.94	183.3	中等	U	22.5	中等	F2				
C4	V4	43.26	200.0	强	V	18.1	强	F3,F4	凹面墙角型	中	辫状河	粗粒
C5	V5	52.56	202.3	强	U	34.1	弱	F4	平直断阶型	强	三角洲平原	中-粗粒

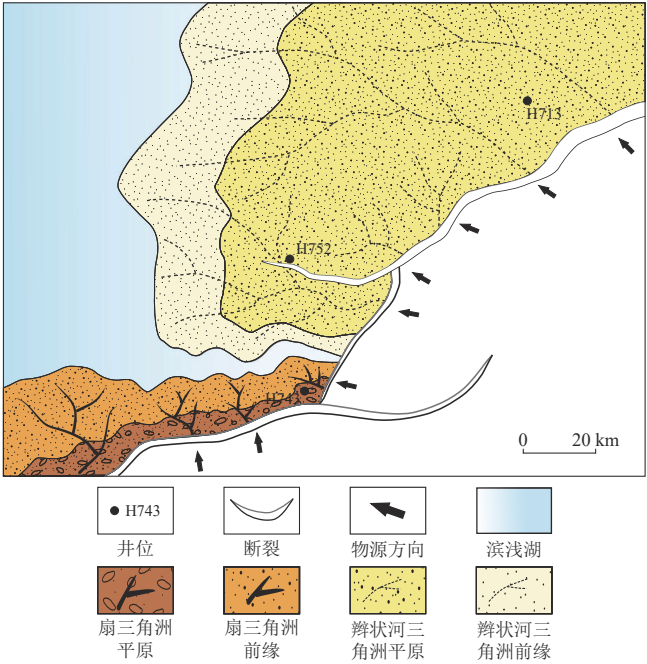


图8 珠江口盆地惠州26洼东南缘恩平组上段断-拗转换期沉积相

Fig. 8 Sedimentary facies of the upper member of Enping Formation during the rifting-depression transition period at the southeastern margin of Huizhou 26 sub-sag, PRMB

能力,F4断层中部则因基岩断阶的存在降低了断层落差最大处的入湖倾角,所以此北部边界断层陡坡带“山高湖深”特征并不显著。另一方面,F3断层和F4断层物源区汇水面积中等,但源区落差显著,为物源区地貌沟壑起伏最明显的位置;物源区沟谷体系亦多为深沟V谷,水动能较强。充沛的物源供给、强水动能与汇聚能力、较为平缓的入湖环境,导致北部边界断层形成物源向湖方向远距离推进的辫状河三角洲沉积体,地震反射为低角度前积特征,近断层一侧不发育近岸杂乱反射。

北部辫状河三角洲平原相储层岩性以中-厚层含砾中-粗砂岩、砂砾岩为主,粒度较粗,发育波状层理、脉状层理及块状层理;靠近断层处常发育氧化色泥岩与煤层,为典型的水上沉积环境。测井相特征表现为齿状箱形、钟形、指形及漏斗形,砂、泥分异度高,代表分选较好的牵引流沉积;含砂率整体偏高(50.8%~84.7%),单砂体厚度大,横向分异性强。储层石英含量在66%以上,岩屑含量18%~32%,以长石岩屑砂岩和岩屑长石砂岩为主。岩屑成分主要为喷出岩及花岗岩。从薄片镜下观察来看,原生孔隙较为发育,面孔率7.5%~15.0%,对应深度壁心样品实测孔隙度7.1%~13.8%,渗透率大于 $10\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 壁心样品占48%,孔、渗条件较好(图10)。

6 结论

- 1) 首次在珠江口盆地惠州26洼东南缘开展恩平组上段断-拗转换期源-汇系统分析。其物源区东沙隆起基岩为中生代酸性二长花岗岩、花岗闪长岩等侵入岩。隆起区可划分出5大汇水单元,汇水面积范围29.94~52.56 km²,物源区落差为139.4~202.3 ms,以其量化表征物源区供源能力强弱。
- 2) 恩平组上段断-拗转换期以“沟谷-边界断层”作为输砂通道,量化沟谷形态规模,分析水动能强弱,并通过边界断层平面组合样式(凹面墙角型、平直陡坡型和平直断阶型)与纵向活动性确定裂隙活动减弱背景下,沉积物汇聚入湖的方式与砂体展布。F3和F4断层交点处落差最小,纵向上以断层凹面汇水,汇砂能力较好。
- 3) 以“源-沟-断-汇”4要素耦合,综合考虑物源供给强度、水动能、边界断层特征,分析沉积体系与有

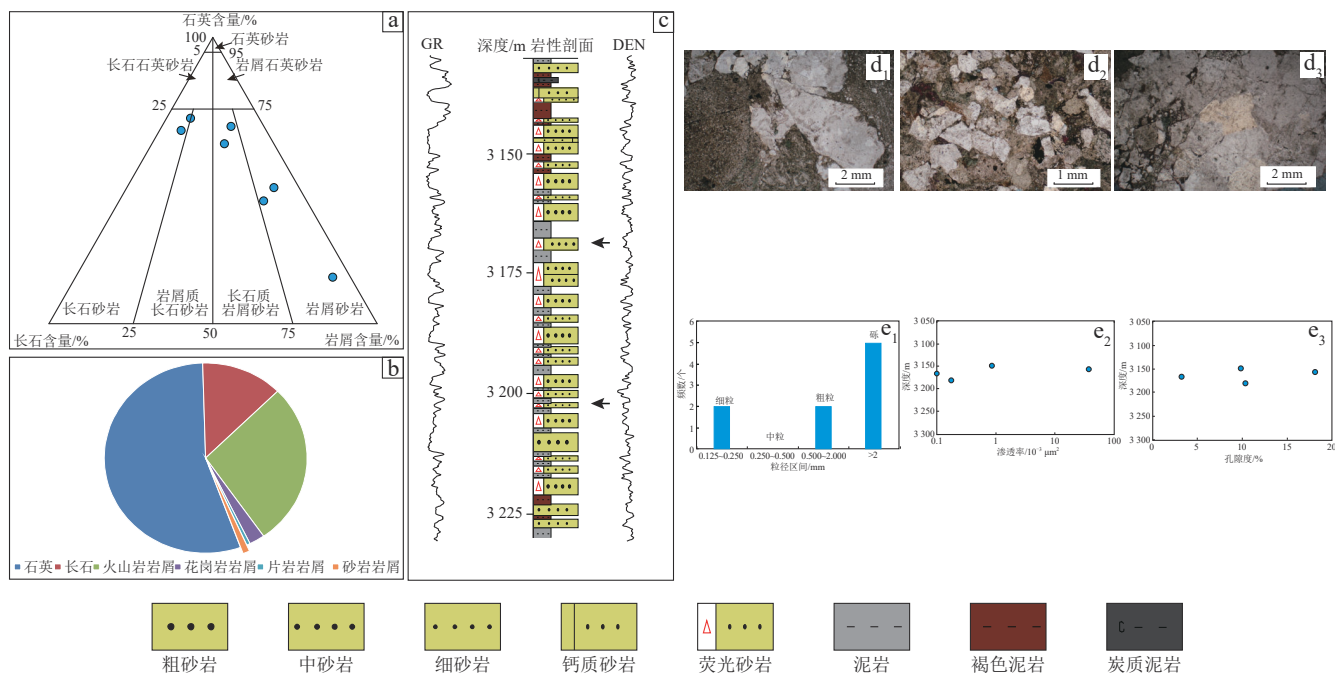


图9 珠江口盆地惠州26洼东南缘恩平组上段扇三角洲储层特征

Fig. 9 Characteristics of fan-delta reservoirs in the upper member of Enping Formation during the fault-depression transition period at the southeastern margin of Huizhou 26 sub-sag, PRMB

a. H743井储层岩石成分三角图; b. H743井储层岩石成分饼状图; c. H743井典型测井-录井相; d₁—d₃ H743井岩心单偏光照片, 其中d₁深度3 167.2 m (砾岩), d₂深度3 206.4 m (粗砂岩), d₃深度3 242.0 m (砂砾岩); e₁—e₃ 分别为储层粒度、渗透率和孔隙度散点图

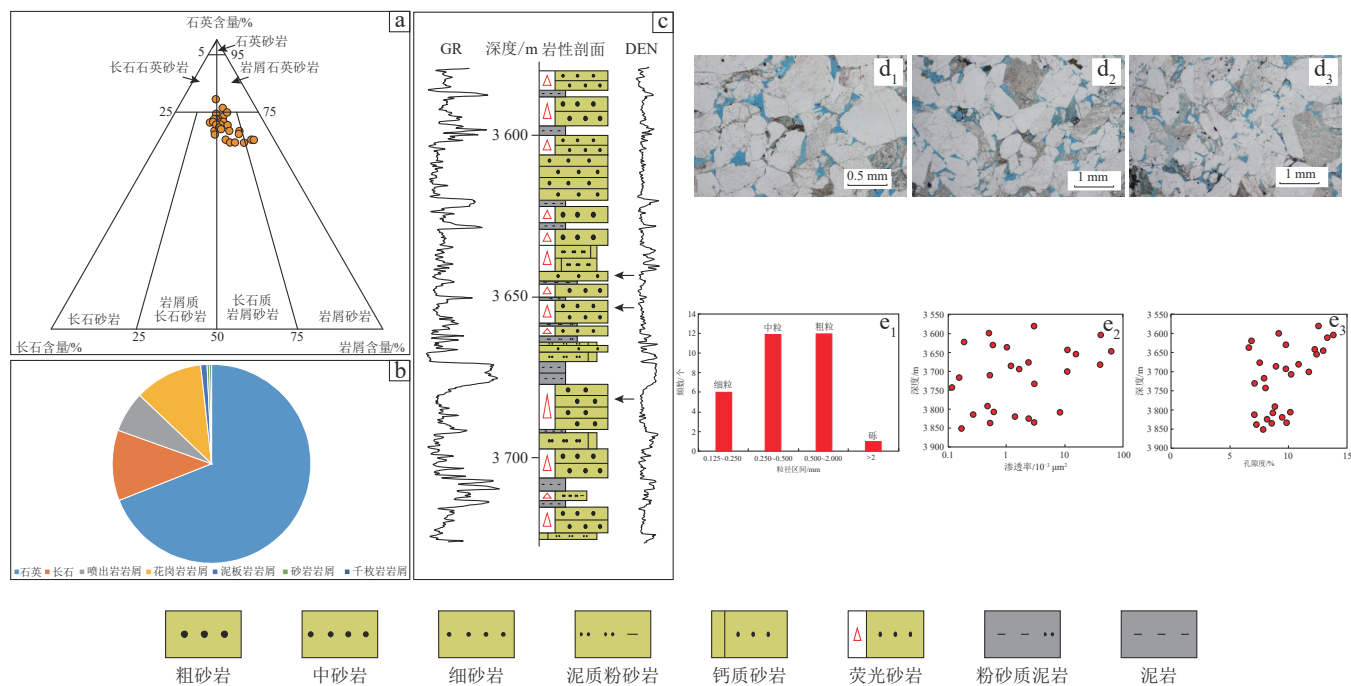


图10 珠江口盆地惠州26洼东南缘恩平组上段辫状河三角洲储层特征

Fig. 10 Characteristics of braided-delta reservoirs in the upper member of Enping Formation during the fault-depression transition period at the southeastern margin of Huizhou 26 sub-sag, PRMB

a. H752井储层岩石成分三角图; b. H752井储层岩石成分饼状图; c. H752井典型储层测井-录井相; d₁—d₃ H752井中-粗粒砂岩岩心单偏光照片, 其中d₁深度3 644 m, d₂深度3 654 m, d₃深度3 682 m; e₁—e₃ 分别为储层粒度、渗透率和孔隙度散点图

利储层,建立恩平组上段断-拗转换期构造活动减弱背景下“南扇北辫”沉积模型,认为北部沿凹面墙角型边界断层入湖的辫状河三角洲平原相河道亚相高成熟度粗粒沉积具有原生孔隙发育、渗透率较高等特征。研究结果推动了惠州26洼东南缘古近系恩平组勘探进程。

参 考 文 献

- [1] ALLEN P A, HOVIUS N. Sediment supply from landslide-dominated catchments: Implications for basin-margin fans[J]. *Basin Research*, 1998, 10(1): 19-35.
- [2] ALLEN P A. From landscapes into geological history[J]. *Nature*, 2008, 451(7176): 274-276.
- [3] ALLEN P A. Time scales of tectonic landscapes and their sediment routing systems [J]. Geological Society, London, Special Publications, 2008, 296(1): 7-28.
- [4] SØMME T O, JACKSON C A L, VAKSDAL M. Source-to-sink analysis of ancient sedimentary systems using a subsurface case study from the Møre-Trøndelag area of southern Norway: Part 1-depositional setting and fan evolution[J]. *Basin Research*, 2013, 25(5): 489-511.
- [5] SØMME T O, JACKSON C A L. 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 李顺利,朱筱敏,李慧勇,等.源-汇系统要素定量表征及耦合模式——以沙垒田凸起与沙南凹陷沙河街组为例[J]. *中国海上油气*, 2017, 29(4): 39-50.
LI Shunli, ZHU Xiaomin, LI Huiyong, et al. Quantitative characterization of elements and coupling mode in source-to-sink system: A case study of the Shahejie Formation between the Shaleitian uplift and Shanan Sag, Bohai Sea [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2017, 29(4): 39-50.
- [10] 庞小军,王清斌,代黎明,等.渤海海域北部秦南凹陷东南缘古近系断层活动及其对沉积的控制[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(6): 1059-1067.
PANG Xiaojun, WANG Qingbin, DAI Liming, et al. Paleogene fault activities and their control over sedimentation at southeastern margin of Qinnan Sag, northern Bohai Sea [J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(6): 1059-1067.
- [11] 孙思敏,季汉成,刘晓,等.断陷盆地边界断层分段的层序地层响应特征——以南堡凹陷西南庄断层面上盘陡坡带东营组为例[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2017, 47(2): 382-392.
SUN Simin, JI Hancheng, LIU Xiao, et al. Architecture of sequence stratigraphy responding to segmentation of boundary fault: Taking an example of Dongying Formation on hanging wall of Xinanzhuang fault in Nanpu Sag [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2017, 47(2): 382-392.
- [12] 张伟忠,查明,韩宏伟,等.东营凹陷边界断层活动性与沉积演化耦合关系的量化表征[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2017, 41(4): 18-26.
ZHANG Weizhong, ZHA Ming, HAN Hongwei, et al. Quantitative research of coupling relationship between boundary fault activity and sedimentary evolution in Dongying Depression [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2017, 41(4): 18-26.
- [13] 葛家旺,朱筱敏,雷永昌,等.多幕裂陷盆地构造-沉积响应及陆丰凹陷实例分析[J]. *地学前缘*, 2021, 28(1): 77-89.
GE Jiawang, ZHU Xiaomin, LEI Yongchang, et al. Tectono-sedimentary development of multiphase rift basins: An example of the Lufeng Depression [J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, 28(1): 77-89.
- [14] 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.
- [15] 陈长民,施和生,许仕策,等.珠江口盆地(东部)第三系油气藏形成条件[M].北京:科学出版社,2003:1-30.
CHEN Changmin, SHI Hesheng, XU Shice, et al. Tertiary hydrocarbon accumulation condition in Pearl River Mouth Basin [M]. Beijing: Science Press, 2003: 1-30.
- [16] 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.
- [17] 施和生,舒誉,杜家元,等.珠江口盆地古近系石油地质[M].北京:地质出版社,2017:1-20.
SHI Hesheng, SHU Yu, DU Jiayuan, et al. Petroleum geology of the Paleogene in the Pearl River Mouth Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2017: 1-20.

- [18] 田立新, 刘杰, 张向涛, 等. 珠江口盆地惠州26-6大中型泛潜山油气田勘探发现及成藏模式[J]. 中国海上油气, 2020, 32(4): 1-11.
- TIAN Lixin, LIU Jie, ZHANG Xiangtao, et al. Discovery and accumulation pattern of HZ26-6 large-medium sized pan-buried hill oil and gas field in Pearl River Mouth Basin [J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32(4): 1-11.
- [19] 施和生, 高阳东, 刘军, 等. 珠江口盆地惠州26洼“源-汇-聚”特征与惠州26-6大油气田发现启示[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(4): 777-791.
- SHI Hesheng, GAO Yangdong, LIU Jun, et al. Characteristics of hydrocarbon source-migration-accumulation in Huizhou 26 Sag and implications of the major Huizhou 26-6 discovery in Pearl River Mouth Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(4): 777-791.
- [20] 张向涛, 史玉玲, 刘杰, 等. 珠江口盆地惠州凹陷古近系文昌组优质湖相烃源岩生烃动力学[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(5): 1249-1258.
- ZHANG Xiangtao, SHI Yuling, LIU Jie, et al. Kinetics of high-quality lacustrine source rocks of Paleogene Wenchang Formation, Huizhou Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(5): 1249-1258.
- [21] 张向涛, 汪旭东, 舒誉, 等. 珠江口盆地陆丰凹陷大中型油田地质特征及形成条件[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(11): 2979-2989.
- ZHANG Xiangtao, WANG Xudong, SHU Yu, et al. Geological characteristics and forming conditions of large and medium oilfields in Lufeng Sag of eastern Pearl River Mouth Basin [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(11): 2979-2989.
- [22] 汪旭东, 张向涛, 何敏, 等. 珠江口盆地陆丰凹陷南部文昌组储层发育特征及其控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(6): 1147-1155.
- WANG Xudong, ZHANG Xiangtao, HE Min, et al. Characteristics and controlling factors of reservoir development in the Wenchang Formation, southern Lufeng Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(6): 1147-1155.
- [23] 刘杰, 徐国盛, 温华华, 等. 珠江口盆地惠州26-6构造古潜山—古近系油气成藏主控因素[J]. 天然气工业, 2021, 41(11): 54-63.
- LIU Jie, XU Guosheng, WEN Huahua, et al. Main factors controlling the formation of buried hill-Paleogene reservoirs in 26-6 structure of Huizhou, Pearl River Mouth Basin[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(11): 54-63.
- [24] 施和生, 于水明, 梅廉夫, 等. 珠江口盆地惠州凹陷古近纪幕式裂陷特征[J]. 天然气工业, 2009, 29(1): 35-37, 40.
- SHI Hesheng, YU Shuiming, MEI Lianfu, et al. Features of Paleogene episodic rifting in Huizhou fault depression in the Pearl River Mouth Basin[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(1): 35-37, 40.
- [25] 刘浩冉, 朱红涛, 施和生, 等. 珠江口盆地惠州凹陷迁移型层序特征及其意义[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2015, 40(5): 840-850.
- LIU Haoran, ZHU Hongtao, SHI Hesheng, et al. Migrated sequence stratigraphic architecture and its geological significance in Huizhou Depression, Pearl River Mouth Basin [J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2015, 40(5): 840-850.
- [26] 周清波, 舒誉, 朱筱敏, 等. 珠江口盆地HA地区古近系文昌组沉积特征[J]. 高校地质学报, 2019, 25(4): 558-567.
- ZHOU Qingbo, SHU Yu, ZHU Xiaomin, et al. Sedimentary characteristics of the Paleogene Wenchang Formation in the HA area, Pearl River Mouth Basin [J]. Geological Journal of China Universities, 2019, 25(4): 558-567.
- [27] 田立新. 珠江口盆地惠州凹陷转换体控沉-控储特性及其油气地质意义[J]. 地球科学, 2021, 46(11): 4043-4056.
- TIAN Lixin. Sedimentary-reservoir characteristics under control of transfer model and implications for hydrocarbon exploration in Huizhou Depression, Pearl River Mouth Basin [J]. Earth Science, 2021, 46(11): 4043-4056.
- [28] 李邦勇, 黄传炎, 张宏伟, 等. 断-拗转换期物源体系分析: 以霸县凹陷东三段为例[J]. 地质科技情报, 2016, 35(3): 56-64.
- LI Bangyong, HUANG Chuanyan, ZHANG Hongwei, et al. Provenance system characters of fault-depressed transforming period: Insights from the third member of Dongying Formation in Baxian Sag [J]. Geological Science and Technology Information, 2016, 35(3): 56-64.
- [29] 张丽丽, 舒梁锋, 冯轩, 等. 再论珠江口盆地恩平组时代归属[J]. 中国海上油气, 2020, 32(5): 9-18.
- ZHANG Lili, SHU Liangfeng, FENG Xuan, et al. Further discussion on the age assignment of Enping Formation in the Pearl River Mouth Basin [J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32(5): 9-18.
- [30] 田立新, 施和生, 刘杰, 等. 珠江口盆地惠州凹陷新领域勘探重大发现及意义[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(4): 22-30.
- TIAN Lixin, SHI Hesheng, LIU Jie, et al. Great discovery and significance of new frontier exploration in Huizhou Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(4): 22-30.

(编辑 梁 慧)