

珠江口盆地惠州凹陷西江 30 洼陡坡型源汇体系特征及扇-辫转换机制

高翔*, 刘培, 宋朋霖, 朱君雪, 胡坤, 韩博, 马逢源

中海石油(中国)深圳分公司, 广东深圳 518054

* 通信作者, gaoxiang18@cnooc.com.cn

收稿日期: 2022-09-28

摘要 西江 30 洼位于惠州凹陷西南部, 由于前期深层地震资料差、钻井少等原因, 研究区地质研究及油气发现主要集中在浅层, 而对深层文昌组关注相对较少, 缺少系统的源汇体系分析及有利砂体预测, 制约了该区勘探进程。利用最新三维地震资料和钻井资料, 在“源-汇”理论指导下对西江 30 洼陡坡带文昌组沉积体系进行了系统研究。结果表明: 惠西低凸起中生界花岗岩为西江 30 洼提供物源, 源区发育 6 个汇水单元, 对应 6 个沟谷通道, 并定量统计了汇水面积、集水高差、搬运距离、沟谷类型、宽深比等参数。基于地震沉积学及构造背景分析, 认为西江 30 洼陡坡带垂向上发生了由扇三角洲向辫状河三角洲沉积体系的转换, 文四段发育扇三角洲沉积, 可识别出 5 个扇体, 文三段发育辫状河三角洲沉积, 可识别出 3 个朵叶体。惠州运动所引起的裂陷迁移和古地理格局的变化是西江 30 洼陡坡带发生扇-辫沉积体系转换的主要原因。通过源汇各要素相关性分析, 明确汇水面积和搬运距离是控制西江 30 洼陡坡带砂体发育规模的主控因素, 并指出 F 汇水单元输砂能力最强, 其对应的文四段扇体 4 和文三段朵叶体 3, 展布规模最大, 地震相特征最优, 有利于优质储层发育, 是下步勘探的有利区带。通过以上分析指明了西江 30 洼陡坡带文昌组勘探的有利方向, 并且对陡坡型源汇体系研究提供了独特案例。

关键词 西江 30 洼; 源汇体系; 陡坡带; 扇-辫转换; 地震沉积学

Characteristics of a steep slope source-to-sink system and a fan-braid transition mechanism in the Xijiang30 sub-sag, Huizhou sag, Pearl River Mouth Basin

GAO Xiang, LIU Pei, SONG Penglin, ZHU Junxue, HU Kun, HAN Bo, MA Fengyuan

Shenzhen Branch of CNOOC China Limited, Shenzhen 518054, China

Abstract The Xijiang 30 sub-sag is located in the southwest of the Huizhou sag. In the early exploration stage, due to the poor quality of seismic data and few deep formation drilled wells, geological research and oil and gas discovery in the study area are mainly concentrated in the shallow regions, while relatively little attention is paid to the deep Wenchang Formation, resulting in a lack of systematic source-to-sink system analysis and favorable sand body prediction, which restricts the exploration process in the area. Using the latest 3D seismic and drilling data, the sedimentary system of the Wenchang Formation in the Xijiang30

引用格式: 高翔, 刘培, 宋朋霖, 朱君雪, 胡坤, 韩博, 马逢源. 珠江口盆地惠州凹陷西江 30 洼陡坡型源汇体系特征及扇-辫转换机制. 石油科学通报, 2023, 02: 141-151

GAO Xiang, LIU Pei, SONG Penglin, ZHU Junxue, HU Kun, HAN Bo, MA Fengyuan. Characteristics of a steep slope source-to-sink system and a fan-braid transition mechanism in the Xijiang30 sub-sag, Huizhou sag, Pearl River Mouth Basin. Petroleum Science Bulletin, 2023, 02: 141-151. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.02.010

sub-sag steep slope zone was systematically studied under the guidance of the “source-to-sink” theory. The results show that the Mesozoic granite in the Huixi low uplift provides provenance for the Xijiang30 sub-sag, and there are 6 catchment units in the source area, corresponding to 6 sediment transport pathways. The catchment area, catchment height difference, transportation distance, valley type, width:depth ratio and other parameters are calculated quantitatively. Based on the analysis of seismic sedimentology and tectonic background, it is considered that a transformation of the fan-braided sedimentary system occurred in the steep slope belt of the Xijiang30 sub-sag. Fan delta deposits developed in the fourth member of the Wenchang Formation, and 5 fans can be identified. The third member of the Wenchang Formation developed braided river delta deposits, and three lobes can be identified. The migration of rift strength and the change of paleogeographical pattern caused by the Huizhou Movement are the main reasons for the transformation of the fan-to-braided sedimentary system in the steep slope belt of the Xijiang30 sub-sag. From correlation analysis of various source-to-sink elements, it is clear that the catchment area and transportation distance are the main controlling factors of the scale of sand bodies in the steep slope zone of the Xijiang30 sub-sag, and it is pointed out that F catchment unit has the strongest sand transportation capacity. Its corresponding fan bodies 4 of Wen-4 member and lobes 3 of Wen-3 member have the largest distribution scale and the best seismic facies characteristics, which are conducive to the development of high-quality reservoirs, and it is a favorable zone for future exploration. The above analysis points out the favorable direction for the exploration of the Wenchang Formation in the steep slope belt of the Xijiang30 sub-sag, and provides a unique case for the study of the steep slope type source-sink system.

Keywords Xijiang30 sub-sag; source to sink system; steep slope; the transformation of fan-braided; seismic sedimentology

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.02.010

0 引言

源-汇研究旨在恢复完整的沉积过程,其研究内容包括沉积事件触发机制、沉积物从源到汇的搬运方式和沉积特征,起源于1998年美国启动的“洋陆边缘计划”(MARGINS program),最初兴起于大陆边缘沉积过程分析^[1-5],近年来我国学者针对陆相断陷湖盆沉积体系开始系统建立“源-汇”理论体系。陡坡带近源扇体往往紧邻烃源,是深层油气勘探的有利区带,针对陡坡带源汇系统的研究取得一系列成果和认识,徐长贵等提出陆相断陷湖盆“山-沟-坡-面”耦合控砂思想,并在渤海油气勘探中得到广泛应用^[6];刘强虎等精细刻画了沙垒田凸起西部陡坡源-汇系统,探讨了各要素相关性并建立耦合模式^[7];何卫军等结合断裂体系探讨了乌石凹陷南陡坡带断裂-物源耦合控砂模式和有利储层主控因素^[8]。以上研究主要集中于物源、古地貌、断裂体系等要素对扇三角洲或近岸水下扇的控制作用,然而在特殊构造背景和古地理格局下陡坡带是否能够发育辫状河三角洲沉积,哪些因素可能诱发扇-辫沉积体系的转换较少有研究涉及。

惠州凹陷是已证实的富生烃凹陷,也是珠江口盆地油气勘探的主战场之一。随着勘探程度增加,惠州凹陷油气主要勘探层系已由浅层转变为深层。西江30洼位于惠州凹陷西南部,陡坡带浅层已发现两大油田,是油气勘探的有利区带。但是该区前期深层地震资料品质差,钻井少(仅X3井揭示少量文昌组地层),前人研究及勘探实践主要关注浅层韩江组及珠江组^[9-10],

而对深层文昌组关注较少,缺少系统的源汇体系研究,砂体展布特征认识不清,严重制约该区勘探进程。

针对以上问题,本文利用最新高精度三维资料,对西江30洼陡坡带勘探潜力最大的文三、四段源汇体系进行了精细研究,同时提出该区文三、四段发生由扇三角洲向辫状河三角洲沉积体系转换,并分析了其形成机制。以上研究明确了该区深层的有利勘探区带,同时也为陡坡带源汇体系研究提供了独特案例。

1 区域地质背景

惠州凹陷位于珠江口盆地珠一坳陷中部,四周分别被北部隆起带、惠西低凸起、中央隆起带、惠陆低凸起环绕,超过7000 km²,是珠江口盆地主力油气产区之一^[11-12]。西江30洼陡坡带位于惠州凹陷西南部,整体呈近东西向展布,西江30洼边界断裂以南为惠西低凸起(图1)。1985年在西江30洼陡坡带钻探X1井,在韩江-珠江组获得了中型油气田发现,2017年在边界断裂上升盘钻探X4井,同样在浅层发现了大量油气,证实了西江30洼生烃潜力,其陡坡带文昌组砂体位于已发现油田正下方,具有较大勘探潜力。

惠州凹陷文昌组发育6个三级层序(图2),受早、晚文昌期间惠州运动影响,惠州凹陷文昌组南北控洼断裂差异活动,沉积沉降中心由南向北迁移^[13-14],导致西江30洼仅发育文六-文三段地层,且文三段地层较薄,未沉积文一、二段地层。该区主力烃源层系为文四段^[15],主要储层为文三、四段砂体,源储配置优

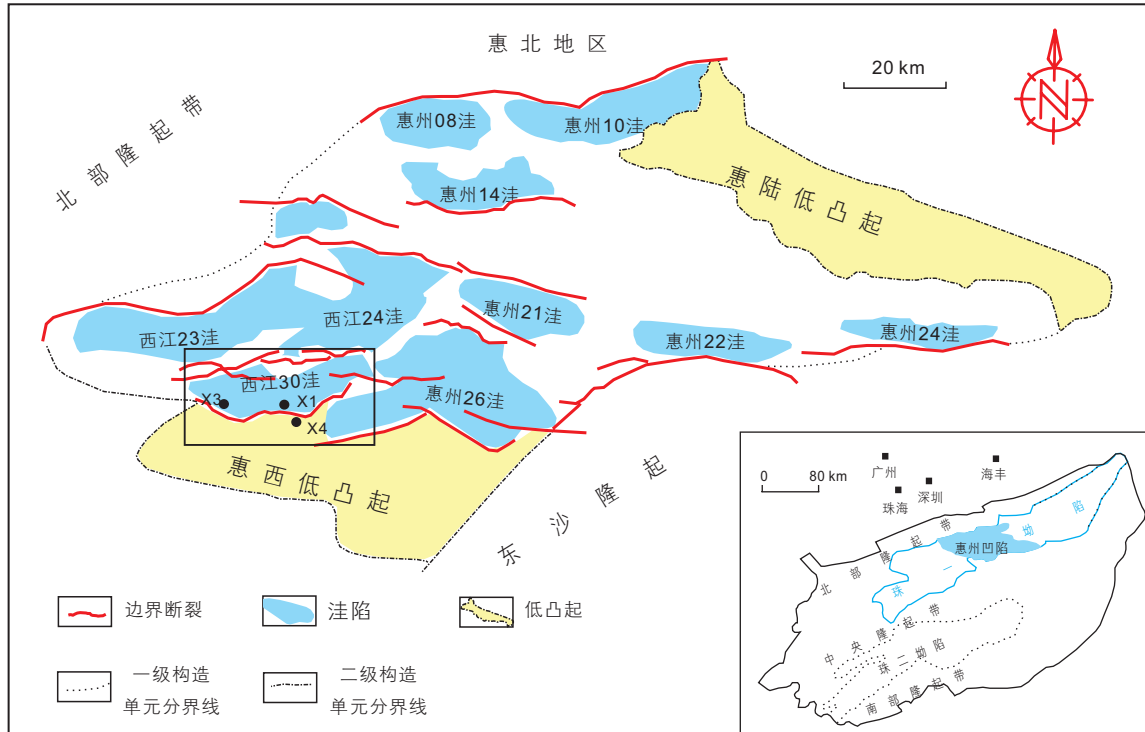


图 1 研究区位置图

Fig. 1 Location of the study area

地层		地震反射界面	三级层序	构造运动	演化阶段	
始新组	文一段	T80	WCSQ6	珠江运动二幕 39.0 Ma	裂陷 Ib 幕	裂陷萎缩期
		T81				裂陷收缩期
		T82	裂陷转换期			
	文二段	T83	WCSQ3	惠州运动 43.0 Ma		裂陷强烈期
		T84				裂陷扩张期
		T85				裂陷初始期
Tg	WCSQ1	珠江运动一幕 49.0 Ma				

图 2 惠州凹陷文昌组层序地层格架

Fig. 2 Stratigraphic framework of Wenchang Formation in Huizhou sag

越,因此本文重点针对文三、四段进行源汇体系分析。

2 文昌组源-汇特征

2.1 物源体系

2.1.1 母岩性质

西江30洼陡坡带物源区为惠西低凸起,根据物源区钻遇基底的X1、X2等井岩心、岩屑及岩石薄片鉴定,确定惠西低凸起基岩主要岩石类型为花岗岩,具有富长英质特点,根据岩石薄片鉴定,X1石英含量44%,斜长石含量28%,正长石含量12%,根据岩屑录井,X2井石英含量40%~50%,斜长石含量5%~10%,钾长石含量5%~10%,结合锆石U-Pb年龄117~133 Ma,确定其物源为白垩纪酸性侵入岩。

2.1.2 汇水体系

对惠西低凸起古地理格局进行了恢复,选取距离基底最近且全区分布的等时地层界面作为基准面计算了现今残余厚度,并基于印模法近似恢复了基底古地貌。根据古地貌高点及分水岭展布特征划分了西江30洼陡坡带汇水体系(图3)。I级分水岭为分隔惠西低凸起南北水系的地貌高点连线,II级分水岭为凸起北段分隔不同汇水体系的次级高点连线。西江30洼陡坡带物源区

主要是I级分水岭以北区域,可划分为7个汇水体系,不同汇水体系流域面积、集水高差及延伸距离存在差异(表1),汇水面积7~29 km²不等,集水高差73~389 m,延伸距离2.6~7.6 km。其中F区汇水面积最大,约29 km²,集水高差较大162 m,流域延伸长度最大,约7.6 km,供源能力最强;E区汇水面积7 km²,流域延伸长度2.4 km,但集水高差最大,达到389 m,供源能力较强;BCD区汇水面积分别为18 km²、16 km²、12 km²,集水高差73~168 m,搬运距离3.3~4.9 km,供源能力中等;A区汇水面积9 km²、搬运距离2.6 km,供源能力最弱。

2.2 沟谷通道

沟谷通道也是影响物源区向沉积区提供沉积物的重要控制因素,沟谷类型和宽深比是影响沉积物搬运通量的重要参数。沟谷类型通常可分为V型、W型和U型,V型沟谷通常指示坡度陡、高差大,水系下切侵蚀能力强,W型沟谷指示坡度、高差中等,流域内存在多条分支水系,沉积物通过能力中等,U型沟谷指示坡缓、高差较小,通常沉积物通过能力较弱^[16-17]。宽深比越小通常指示水系侵蚀能力越强,沉积物通过能力越强。西江30洼陡坡带物源区与汇水体系相对

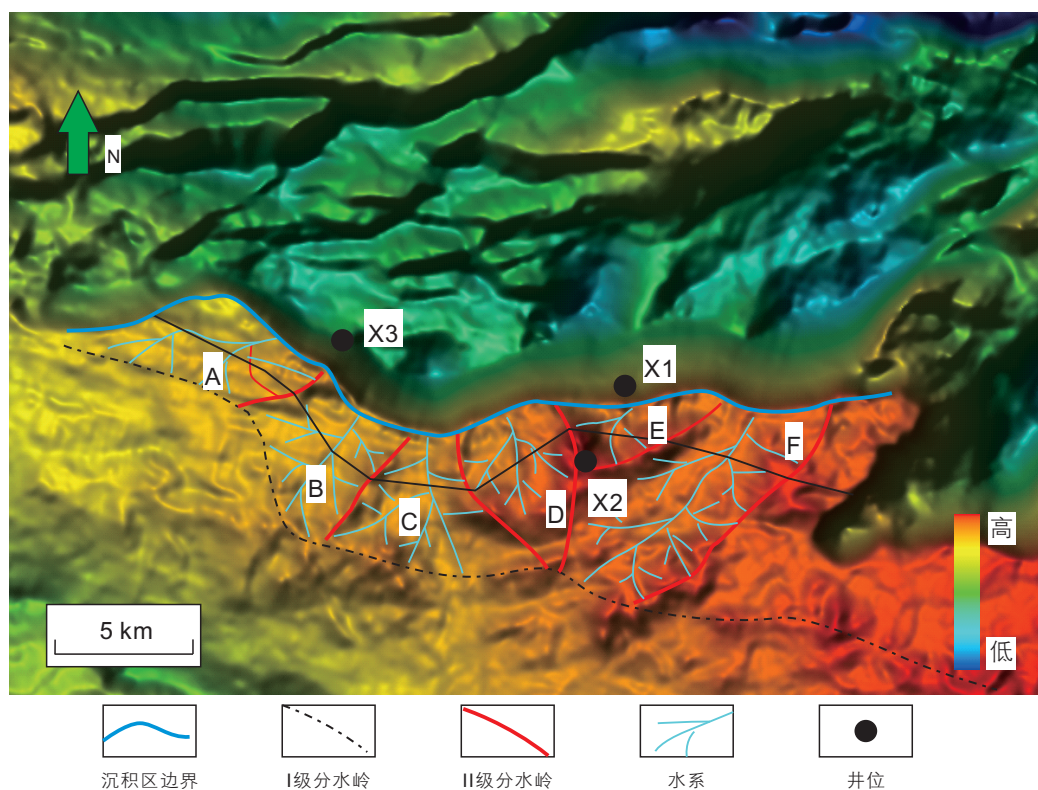


图3 惠西低凸起文昌组古地理格局及汇水单元分区

Fig. 3 Paleogeomorphology and catchment units division of Wenchang Formation in Huixi uplift

表 1 惠西低凸起汇水单元、物源通道及沉积响应参数统计

Table 1 Parametric statistics of catchment units, sediment transport pathways and deposition response of Huixi low uplift

源				沟谷					汇	
汇水区 编号	集水高差 /m	汇水面积 /km ²	搬运距离 /km	沟谷编号	沟谷类型	深度/m	宽度/km	宽深比	文三段面 积/km ²	文四段面 积/km ²
A	146	9	2.6	V1	U	226	3.8	39		3.3
B	73	16	4.7	V2	W	162	4.3	26		
C	129	18	4.9	V3	V	139	2.7	15	3.6	10.5
D	168	12	3.3	V4	W	248	3.6	19		
E	389	7	2.4	V5	V	161	2.8	17	10.7	9.8
F	162	29	7.6	V6	W	139	3.8	27	35.1	18.1

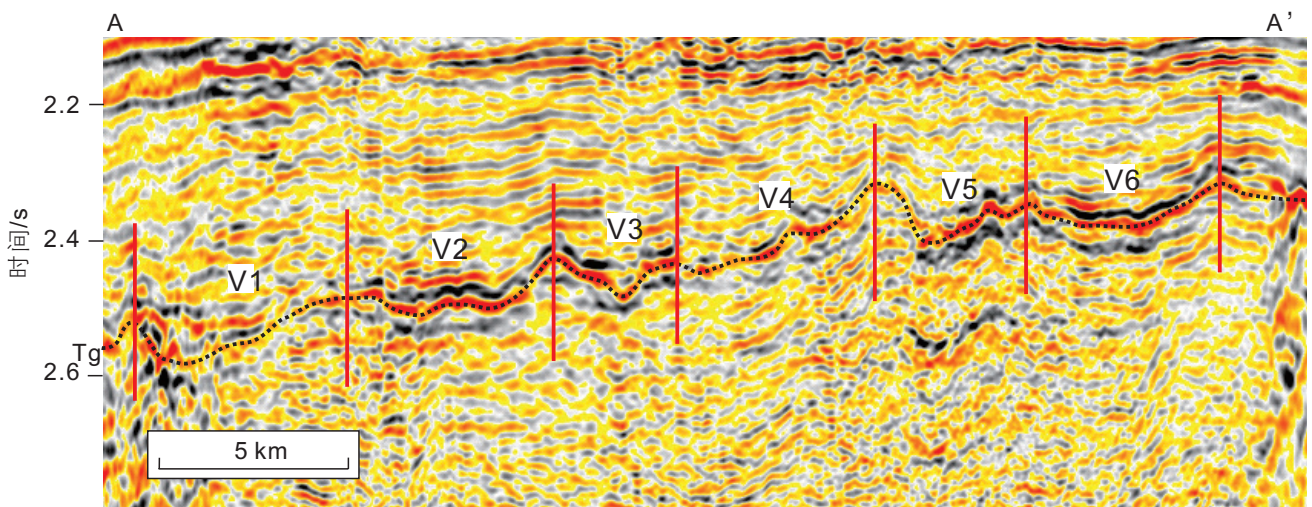


图 4 惠西低凸起文四段物源通道剖面图(剖面位置见图 3)

Fig. 4 The section of sediment transport pathways of Wenchang Formation in Huixi low uplift(see Fig.3 for location)

应可共识别出 6 条主要沟谷通道(图 4), 分别命名为 V1~V6。其中 V3、V5 为 V 型沟谷, 宽深比分别为 15、17, 沉积物通过能力较强, V2、V4 和 V6 为 W 型沟谷, 宽深比分别为 26、19 和 27, 沉积物通过能力中等, V1 为 U 型沟谷, 宽深比 39, 沉积物通过能力较弱。

2.3 沉积体系

物源区、汇水单元、沟谷通道、构造背景共同影响沉积体系类型及空间展布特征^[18-19], 在前文分析基础上, 通过对地震相、地球物理属性及钻井综合分析识别了文三、四段沉积体系类型及展布特征(图 5)。文四段具有典型扇三角洲沉积特征, 共识别出 5 个连片扇体, 扇体发育规模与汇水单元、沟谷通道耦合关系较好; 文三段发育辫状河三角洲沉积, 其地震反射

特征、展布规模与文四段扇三角洲存在显著差异。

2.3.1 文四段扇三角洲差异展布特征

西江 30 洼文四段为强烈裂陷期, 控洼断裂活动速率达到峰值 215 m/Ma。结合地震相及地震属性对西江 30 洼陡坡带沉积体系进行了精细刻画, 共识别出 5 个扇体, 不同扇体内部反射特征、展布形态各不相同。

从顺物源剖面看, 5 个扇体均表现为典型的扇三角洲地震响应特征, 近边界断裂厚度大, 向洼陷中心方向减薄, 楔形形态较明显。其中扇体 3、4 内部反射结构相似, 平原相带表现为低频、串珠状反射特征, 前缘相带表现为中频、中连续、中振幅斜交前积反射。不同相带间具有较清晰的接触界面, 平原与前缘间反射同相轴错位或断开, 前缘与湖相沉积地震反射存在明显差异, 湖相沉积表现为低频、连续、强振幅的平行反射特征(图 6d、e)。扇体 1、2 内部反射特征与扇

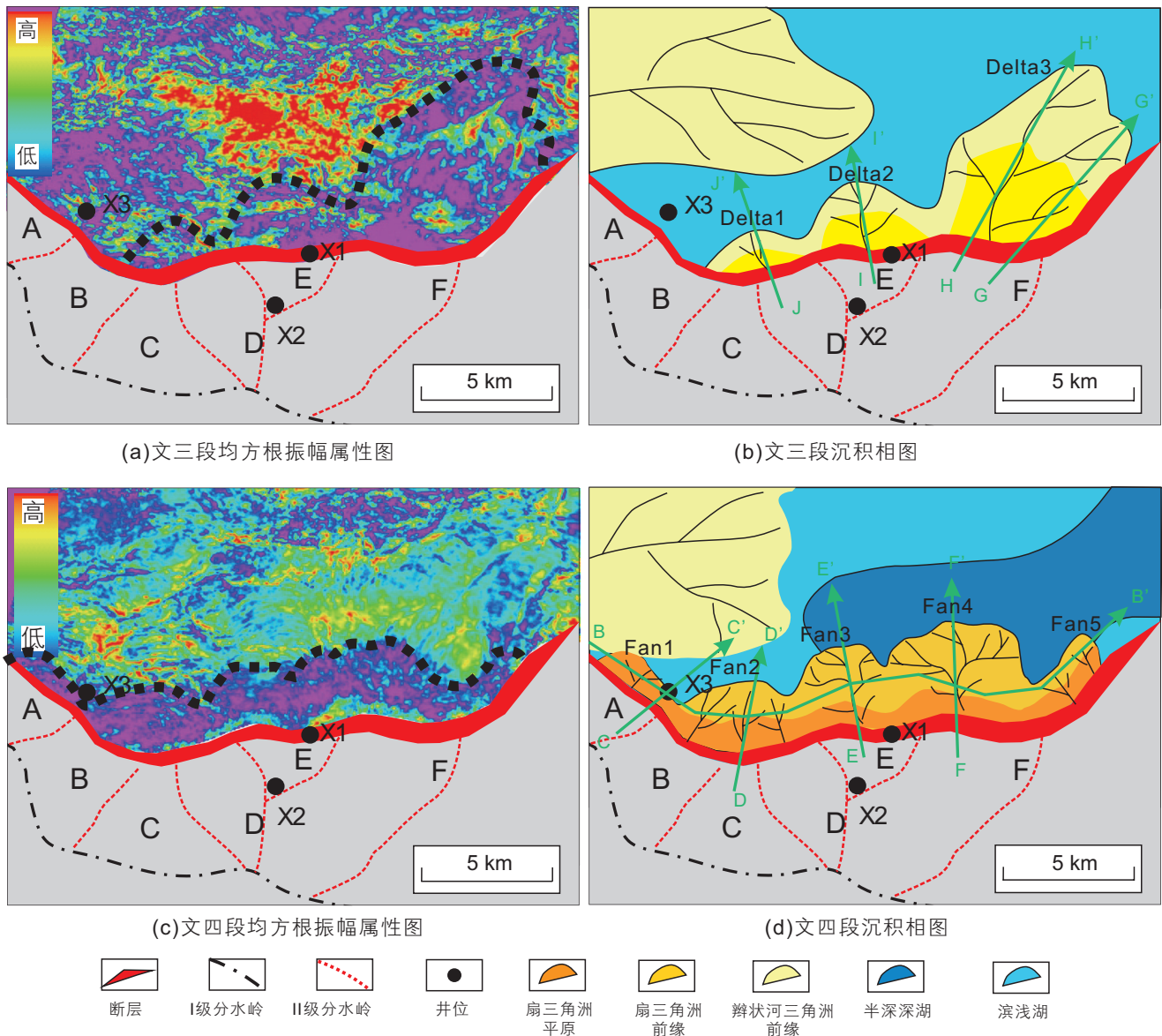


图5 西江30洼陡坡带文三、四段均方根振幅属性及沉积相图

Fig. 5 RMS slices and sedimentary faces map of the third and fourth member of Wenchang Formation of the steep slope in Xijiang30 sub-sag

体3、4不同,表现为低频、弱振幅、杂乱-空白反射特征(图6b、c)。X3井钻遇了扇体1,文四段为褐色粗碎屑沉积,岩屑以砾石为主,呈粒状及块状,孔隙不发育,分选磨圆差,综合分析为花岗质母岩近源堆积产物(图7)。从垂直物源剖面可以看到5个扇体均具有两侧薄、中间厚的透镜体形态,地震反射特征与顺物源剖面一致,扇体3、4和扇体1、2、5在频率、振幅、连续性等方面存在明显差异(图6a)。

根据地震相的分析,西江30洼陡坡带近源扇体整体表现为中-弱振幅,而洼中湖相沉积为强振幅,可见振幅属性对砂体的空间展布和横向变化比较敏感,因此优选均方根振幅属性刻画扇体边界。根据地震属

性特征,沿边界断裂裙带状展布的蓝紫色低振幅值区域指示富砂的扇三角洲沉积,洼陷中心绿-红色高振幅值区域对应相对富泥的湖相沉积。同时结合地震剖面前缘前积反射终止位置和前缘与湖相沉积界面的振幅强弱突变点精细确定了5个扇体沉积边界(图5c、d)。根据扇体的精细刻画,扇体3、4展布范围较大,入湖距离分别为3.2 km和4.1 km,平均厚度分别为270 m和210 m,面积分别为9.8 km²和18.1 km²,扇体2次之,入湖距离约2.5 km,平均厚度180 m,面积10.5 km²,扇体1沉积范围较小,为3.3 km²,入湖距离仅1.1 km。

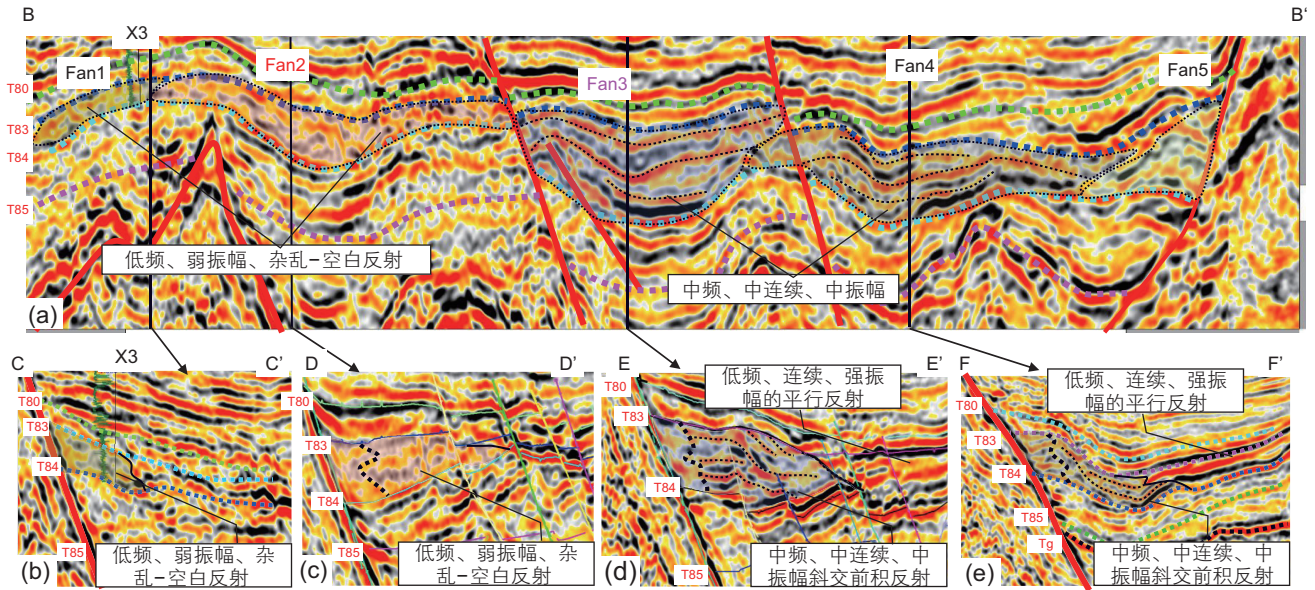


图 6 西江 30 洼陡坡带文四段扇三角洲典型地震相特征图 (剖面位置见图 5)

Fig. 6 Seismic faces characteristics of the fan deltas of the fourth member of Wenchang Formation of the steep slope in Xijiang30 sub-sag

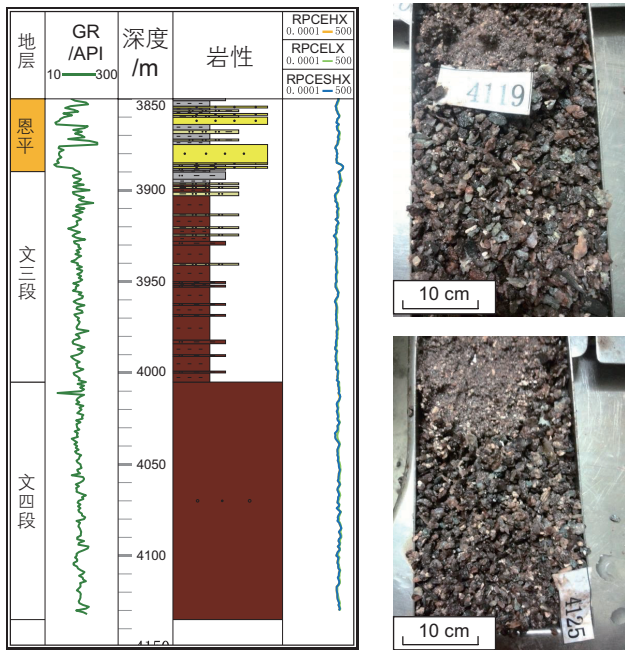


图 7 X3 井柱状图及岩屑特征

Fig. 7 Histogram and cuttings characteristics of well X3

2.3.2 文三段辫状河三角洲展布特征

文三段为西江 30 洼裂陷萎缩期, 控洼断裂活动速率 22 m/Ma, 构造活动弱, 沉积地层较薄, 结合构造背景、地震反射特征认为发育辫状河三角洲沉积, 共识别出 3 个朵叶体。

朵叶体 3 顺物源方向剖面上, 可见明显叠瓦状前积, 中频、连续、中振幅反射特征, 垂直物源方向具

有双向上超的充填反射特征, 与文四段扇三角洲相比, 其展布范围更大, 连续性更强, 前积特征更清晰(图 8a、b), 具有典型辫状河三角洲地震反射特征。朵叶体 2 顺物源方向剖面同样可见叠瓦状前积反射, 中频、中连续、中弱振幅反射(图 8c)。朵叶体 1 由于地层厚度较薄, 前积特征不明显, 表现为中连续、弱振幅反射(图 8d)。

根据地震相分析及文三段均方根属性特征, 蓝紫色低振幅值区域为辫状河三角洲沉积, 绿-红色高振幅值区为湖相沉积(图 5a、b), 结合地震属性与前积反射终止位置确定辫状河三角洲沉积边界。朵叶体 3 展布范围最大, 入湖距离 8.5 km, 平均厚度 150 m, 面积 35.1 km²; 扇体 2 次之, 入湖距离 3.4 km, 平均厚度 110 m, 面积 10.7 km²; 多叶体 3 展布范围最小, 入湖距离 2.2 km, 平均厚度 80 m, 面积 3.6 km²。

3 扇—辫沉积体系转换机制分析

多数地区勘探实践表明湖盆陡坡带以扇三角洲或近岸水下扇沉积为主, 主要是因为边界断裂持续活动, 湖盆快速沉降, 可容空间充足, 大量携带粗碎屑的近源水系从山区经短距离搬运在高陡地貌背景下进入高湖平面湖盆中, 形成扇三角洲或近岸水下扇, 往往具有沿断裂坡折展布、继承性好的特点^[20-24]。而辫状河三角洲通常发育在缓坡, 其可容空间和地形高差相对较小, 形成高度辫状河道化的水体入湖。

而西江30洼特殊之处在于早晚文昌之间断裂活动速率、地貌背景发生突变,从而导致文四段、文三段由扇三角洲向辫状河三角洲沉积体系的转换。近年来研究表明43 Ma左右在印度-欧亚板块开始硬碰撞、太平洋板块俯冲方向发生变化以及岩石圈由初始张裂到快速减薄变化的综合作用下,珠江口盆地发生惠州运动,造成了显著构造转变,表现为裂陷作用迁移、基底隆升及岩浆底侵等^[13]。在通过统计惠西地区文昌组控沉积断裂活动速率可以看出,惠州凹陷裂陷强度

的迁移方向为由南向北,早文昌期断裂活动整体表现为南强北弱,而晚文昌转换为北强南弱(图9)。西江30洼位于惠州凹陷南部,早文昌断裂活动强烈,可容空间较大,近源水系在高陡地貌背景下入湖快速堆积形成扇三角洲沉积;而晚文昌期断裂活动微弱,可容空间较小,水深较浅,且通过古地貌恢复其地层倾角较小,在1°~3°之间(图10),沉积地貌平缓,因此发育了辫状河三角洲沉积。综上,西江30陡坡带构造背景突变以及其所伴生的断裂活动、可容空间、地形坡

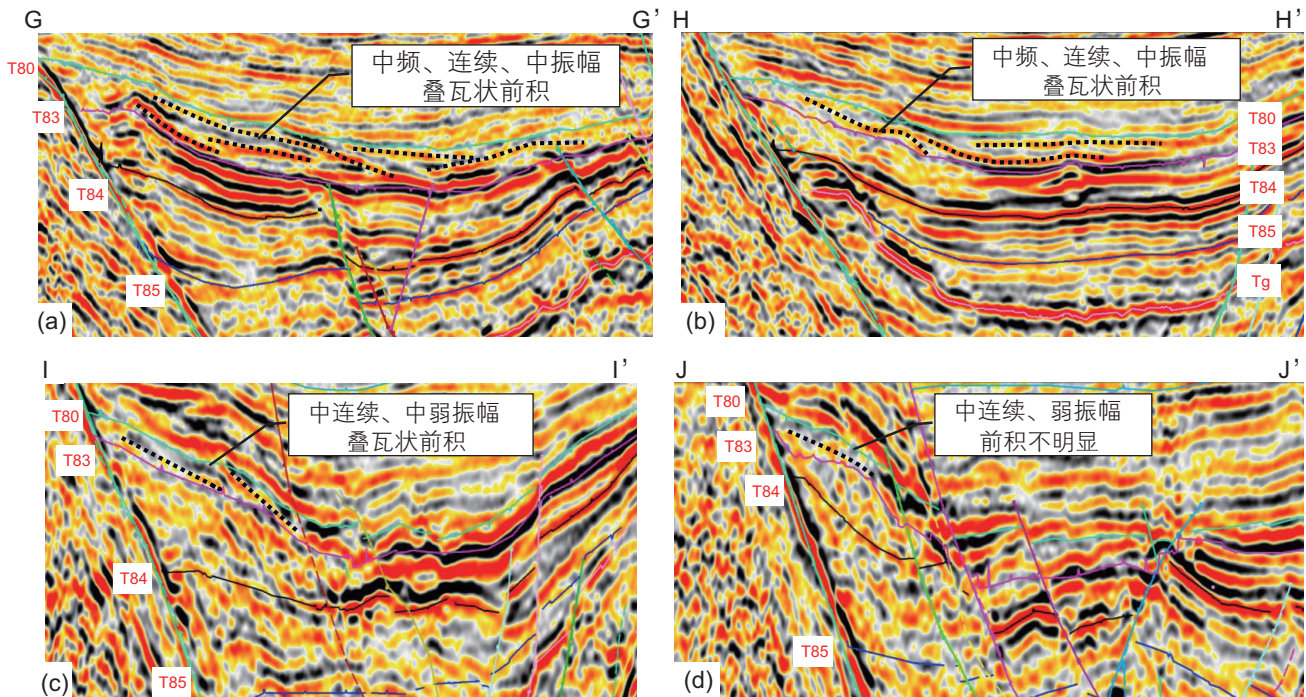


图8 西江30洼陡坡带文三段辫状河三角洲典型地震相特征图(剖面位置见图5)

Fig. 8 Seismic faces characteristics of the braided deltas of the fourth member of Wenchang Formation of the steep slope in Xijiang30 sub-sag

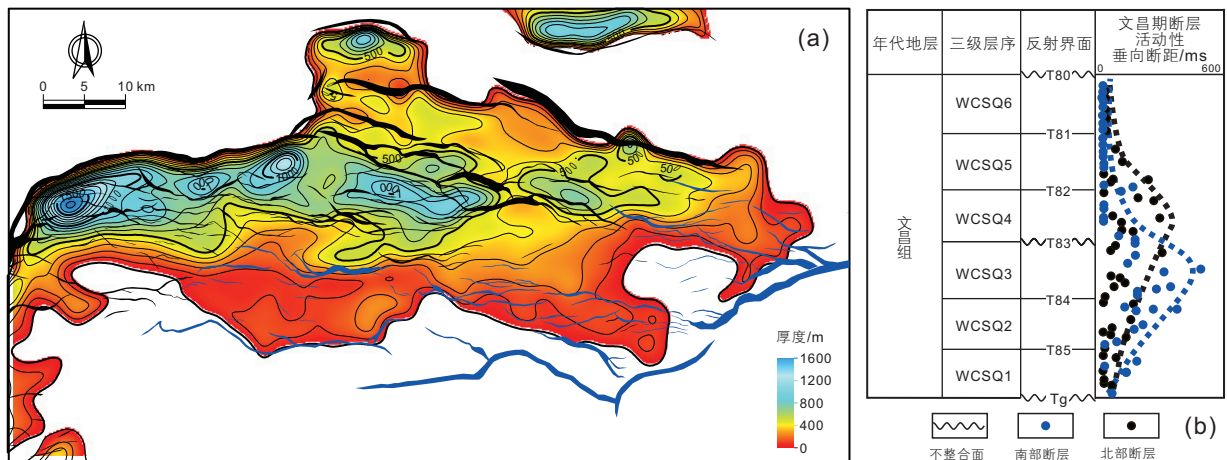


图9 惠州凹陷文一-三段(a)地层厚度图及(b)断层活动性

Fig. 9 Thickness map of (a)first-third member of Wenchang Formation and(b) faults activity of the Huizhou sag

度的突变导致其扇-辫沉积体系的转换。

4 陡坡型源汇耦合模式

西江 30 洼陡坡源-汇系统物源区基岩为白垩纪花岗岩,发育 6 个汇水单元及对应沟谷,碎屑沉积物顺沟谷通道在断裂坡折处卸载、沉积。垂向上文四段到文三段沉积体系的演化受惠州运动所引起的构造迁移影响显著,文四段裂陷强度大,地形坡度大,发育扇三角洲沉积,晚文昌期断裂活动弱,地形平缓发育辫状河三角洲沉积(图 11)。

综合对比研究区汇水面积、集水高差、搬运距离、

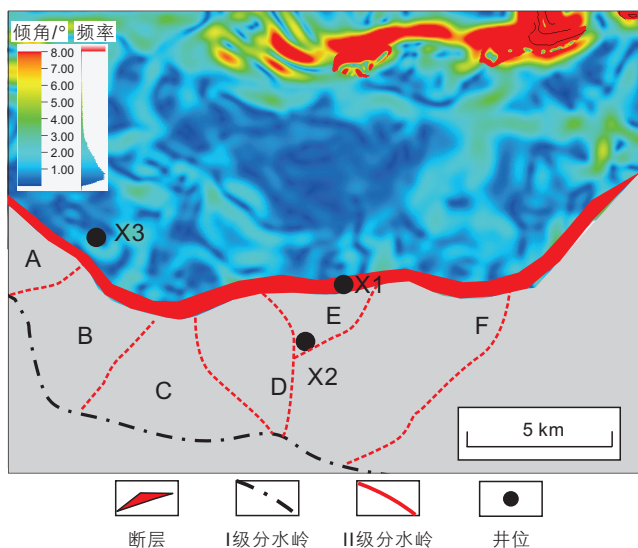


图 10 西江 30 洼陡坡带文三段古地貌地层倾角图

Fig. 10 Paleogeomorphic stratigraphic dip angle map of the Wen-3 member of the Xijiang30 sub-sag

5 结论

(1) 西江 30 洼陡坡源汇系统物源区以中生代花岗岩为主,基于分水岭展布特征将物源区划分为 6 个汇水单元,分别对应于 6 个沟谷通道,并定量统计了汇水面积、集水高差、搬运距离、沟谷类型、宽深比等参数。

(2) 基于地震沉积学及构造背景分析,认为文四段发育扇三角洲沉积,文三段发育辫状河三角洲沉积,

沟谷类型、宽深比等与沉积体系规模的关系可知,汇水面积、搬运距离控制作用最明显,汇水单元 F 汇水面积最大,搬运距离最长,其对应的文三段朵叶体 3 和文四段扇体 4 沉积规模最大,地震相反射连续且成层性好,最有利于优质储层发育,勘探潜力最大,是下一步勘探的重点目标;而 ABCDE 汇水单元由于汇水面积较小、搬运距离较短,其对应的文四段扇体和文三段朵叶体展布规模相对较小,地震相特征以杂乱反射为主,推测优质储层发育规模不及朵叶体 3 和扇体 4。通过对陡坡源汇耦合模式的构建明确了文三、四段沉积体系展布特征和有利区带,为西江 30 陡坡带深层油气的勘探提供了指导。

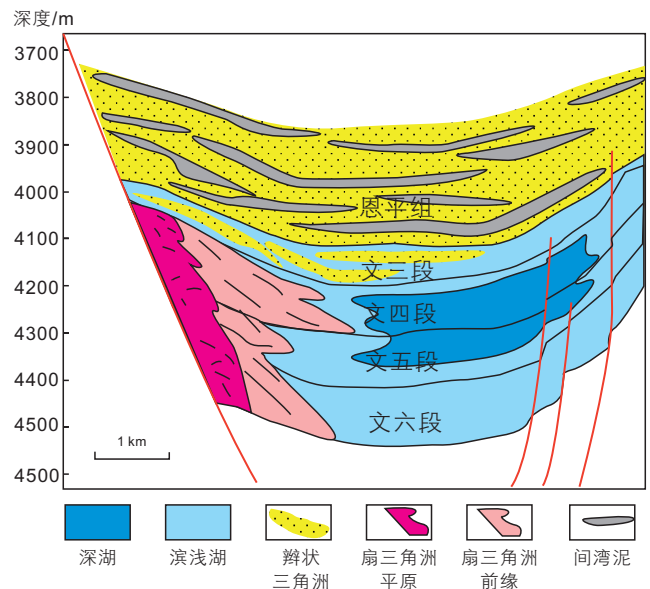


图 11 西江 30 洼陡坡型源汇系统扇-辫沉积体系转换模式图

Fig. 11 Fan-Braid sedimentary system transformation pattern of Xijiang30 sub-sag steep slope source-to-sink system

并精细识别了文四段 5 个扇体和文三段 3 个朵叶体。

(3) 惠州运动所引起的构造迁移导致文四段到文三段发生扇-辫沉积体系的转换。文四段裂陷强度大,地形坡度大,发育扇三角洲沉积,文三段断裂活动弱,地形平缓发育辫状河三角洲沉积。

(4) 通过源汇各要素相关性分析,明确汇水面积和搬运距离是控制砂体发育规模的主控因素,并指出 F 汇水单元输砂能力最强,其对应的扇体 4 和朵叶体 3 是下步勘探的有利区带。

参考文献

- [1] The Earth Science Community. MARGINS program science plans [R]. USA: MARGINS Office, 2004.
- [2] HELLAND-HANSEN W, Sømme T O, MARTINSEN O J, et al. Deciphering Earth's natural hourglasses: Perspectives on source-to-sink analysis[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2016, 86(9): 1008–1033.
- [3] ALLEN P A. Time scales of tectonic landscapes and their sediment routing systems[J]. *Geological Society, Special Publications*, 2008, 296(1): 7–28.
- [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 H T, XU C G, ZHU X M, 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] 徐长贵, 杜晓峰. 陆相断陷盆地源—汇理论工业化应用初探——以渤海海域为例[J]. *中国海上油气*, 2017, 29(04): 9–18. [XU C G, DU X F. Industrial application of source-to-link theory in continental rift basin: A case study of Bohai sea area[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2017, 29(04): 9–18.]
- [6] 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(06): 365–371. [XU C G. Genetic types of Paleogene slope break zones and their controls on depositional system in Bohai offshore[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2006(06): 365–371.]
- [7] 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): 1883–1896. [LIU Q H, ZHU X M, LI S L, et al. Source-to-sink system of the steep slope fault in the western Shaleitian uplift[J]. *Earth Science*, 2017, 42(11): 1883–1896.]
- [8] 何卫军, 徐万兴, 刘娟, 等. 乌石凹陷南陡坡带流二段源—汇系统及物性差异性分析[J]. *现代地质*, 2018, 32(06): 1161–1172. [HE W J, XU W X, LIU J, et al. Source-to-sink system and reservoir property variation of the second member of Liushagang Formation in the southern steep slope, Wushi sag[J]. *Geoscience*, 2018, 32(06): 1161–1172.]
- [9] 姜大朋, 何敏, 张向涛, 等. 箕状断陷控注断裂上下盘油气成藏差异性及其勘探实践——以南海北部珠江口盆地惠州凹陷X洼为例[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2019, 49(02): 346–355. [JIANG D P, HE M, ZHANG X T, et al. Difference of hydrocarbon accumulation between hanging and foot wall of half graben boundary fault and exploration practice: a case study of X sag in Huizhou depression, Pearl River Mouth basin, northern south China sea[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science edition)*, 2019, 49(02): 346–355.]
- [10] 姜大朋, 王文勇, 高翔, 等. 从内部结构出发探讨断裂控藏机理及模式: 以珠江口盆地珠一坳陷为例[J]. *地质科技情报*, 2016, 35(04): 91–97. [JIANG D P, WANG W Y, GAO X, et al. Mechanism and model of fault controlling reservoir in terms of the internal structure of fault zones: Examples from Zhu I depression, Pearl River Mouth Basin[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2016, 35(04): 91–97.]
- [11] 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(04): 22–30. [TIAN L X, SHI H S, LIU J, et al. Great discovery and significance of new frontier exploration in Huizhou sag, Pearl River Mouth basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(04): 22–30.]
- [12] 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(01): 35–37+40+133. [SHI H S, YU S M, MEI L F, et al. Features of Paleogene episodic rifting in Huizhou fault depression in the Pearl River Mouth Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2009, 29(01): 35–37+40+133.]
- [13] 施和生, 杜家元, 梅廉夫, 等. 珠江口盆地惠州运动及其意义[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(03): 447–461. [SHI H S, DU J Y, MEI L F, et al. Huizhou movement and its significance in Pearl River Mouth basin, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(03): 447–461.]
- [14] 林鹤鸣, 刘培, 汪旭东, 等. 珠一坳陷始新世文昌组沉积期构造转换对源—汇体系的控制[J]. *大地构造与成矿学*, 2021, 45(01): 188–200. [LIN H M, LIU P, WANG X D, et al. Influences of structural transformation on source-to-sink system during the depositional period of Wenchang formation of Eocene in the Zhu I depression[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2021, 45(01): 188–200.]
- [15] 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(S1): 53–68. [ZHU M, ZHANG X T, HUANG Y P, et al. Source rock characteristics and resource potential in Pearl River Mouth basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(S1): 53–68.]
- [16] 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(04): 39–50. [LI S L, ZHU X M, LI H Y, 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(04): 39–50.]

- [17] 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(01): 9-20. [LIN C S, XIA Q L, SHI H S, et al. Geomorphological evolution, source to sink system and basin analysis[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(01): 9-20.]
- [18] 冯有良, 李思田. 东营凹陷沙河街组三段层序低位域砂体沉积特征[J]. 地质论评, 2001(03): 278-286. [Feng Y L, LI S T. Depositional characteristics of lowstand sand bodies of the third member of the Shahejie formation in the Dongying depression and the significance in petroleum geology[J]. Geological Review, 2001(03): 278-286.]
- [19] 冯有良, 徐秀生. 同沉积构造坡折带对岩性油气藏富集带的控制作用——以渤海湾盆地古近系为例[J]. 石油勘探与开发, 2006(01): 22-25+31. [FENG Y L, XU X S. Syndepositional structural slope break zone controls on lithologic reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006(01): 22-25+31.]
- [20] 舒梁锋, 张丽丽, 雷胜兰, 等. 珠江口盆地白云南洼珠海组陆架边缘三角洲储层发育特征与主控因素及有利储层预测[J]. 石油科学通报, 2022, 03: 309-320. [SHU L F, ZHANG L L, LEI S L, et al. Reservoir sedimentary characteristics and reservoir prediction in the shelf margin delta of the Zhuhai formation in the southern subsag of the Baiyun sag in the Pearl River Mouth Basin[J]. Petroleum Science Bulletin, 2022, 03: 309-320.]
- [21] 罗威, 张道军, 刘新宇, 等. 乌石凹陷南部陡坡带流二段大型储集体发育条件及特征[J]. 沉积学报, 2018, 36(01): 154-165. [LUO W, ZHANG D J, LIU X Y, et al. Large reservoirs development condition and characteristics of the second member of Liushagang formation in the southern steep slope zone, Wushi depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2018, 36(01): 154-165.]
- [22] 孙盼科, 贾浪波, 朱红璋, 等. 南堡凹陷柳赞地区沙三段中上部层序结构及沉积充填特征研究[J]. 石油科学通报, 2021, 01: 16-30. [SUN P K, JIA L B, ZHU H Z, et al. Sequence architecture and sedimentary filling characteristics of the middle-upper part of the Es₃ formation in the Liuzan area, Nanpu depression[J]. Petroleum Science Bulletin, 2021, 01: 16-30.]
- [23] 王启明, 李瑾, 周晓光, 等. 石臼坨凸起西南缘陡坡带东三段古地貌对沉积的控制[J]. 东北石油大学学报, 2016, 40(06): 53-61+7-8. [WANG Q M, LI J, ZHOU X G, et al. Characteristics of paleo-geomorphic and its controlling effect on deposition of Ed₃ in steep slope zone of west southern Shijiutuo uplift[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2016, 40(06): 53-61+7-8.]
- [24] 薛良清, GALLOWAY W E. 扇三角洲、辫状河三角洲与三角洲体系的分类[J]. 地质学报, 1991(02): 141-153. [XUE L Q, GALLOWAY W E. Fan-delta, braid delta and the classification of delta systems[J]. Acta Geologica Sinica, 1991(02): 141-153.]

(编辑 付娟娟)