

断陷湖盆坡折带-古沟谷对沉积的控制作用

——以珠江口盆地海丰33洼陷古近系文昌组为例

和子琛¹, 刘豪¹, 林鹤鸣², 邱欣卫², 汪旭东², 剧永涛³, 阙晓明²

[1. 中国地质大学(北京)海洋学院, 北京 100083; 2. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 广东 深圳 518000;

3. 华北理工大学矿业工程学院, 河北 唐山 063210]

摘要:断陷湖盆的沉积充填受构造活动强度、海平面升降及物源供给通量的控制, 而其内部砂体展布特征还受坡折带-古沟谷体系配置的调控, 深入探索坡折带-古沟谷的配置关系对断陷湖盆油气勘探具有重要意义。珠江口盆地是南海重要的含油气盆地, 盆地北部海丰33洼陷勘探程度较低, 需要开展沉积体系发育控制因素分析, 为储层的分布预测和油气勘探部署提供支撑。根据海丰33洼陷3D地震资料和测井资料, 在区域构造解释基础上, 深入剖析海丰33洼陷古近系文昌组发育的坡折带和古沟谷类型及其特征, 阐明坡折带-古沟谷对沉积充填的控制作用。研究表明:①研究区文昌组发育断裂坡折、挠曲坡折和沉积坡折3种坡折带类型, 自盆地边缘至沉积中心, 坡折带具有多级分带的特征;②古沟谷类型以V型、U型、W型和单断槽型等4类为主, 其中V型和U型沟谷数量较多且平面分布较为集中。坡折带控制了剥蚀区与物源区的边界, 为沉积物输送提供了动力, 控制了沉积物走向、搬运距离和沉积可容空间等。受坡折带组合的影响, 研究区在不同阶段发育了不同的沉积体系类型。古沟谷作为沉积物搬运通道控制了沉积物的输送方向及卸载位置, 且其大小控制了沉积体系的规模。因此, 坡折带-古沟谷共同控制了沉积体系的类型、规模及其发育和演化。

关键词:坡折带; 古沟谷; 古地貌; 沉积体系; 区域构造; 文昌组; 海丰33洼陷; 珠江口盆地

中图分类号: TE121.3

文献标识码: A

Controlling effect of slope-break zone and paleovalley on sedimentation in rifted lake basins: A case study of the Paleogene Wenchang Formation in Haifeng 33 Subsag, Pearl River Mouth Basin

HE Zichen¹, LIU Hao¹, LIN Heming², QIU Xinwei², WANG Xudong², JU Yongtao³, QUE Xiaoming²

(1. School of Ocean Sciences, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Shenzhen Branch, CNOOC, Shenzhen, Guangdong 518000, China; 3. School of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063210, China)

Abstract: Rifted lake basins usually have their sedimentary filling controlled by the intensity of tectonic activities, sea level fluctuation and sediment flux. The distribution of sand bodies in these basins are also controlled by slope-break zones and paleovalley systems. It is of great significance to explore the configuration relationship between the slope break zones and paleovalley systems for oil and gas exploration in rifted lake basins. The Pearl River Mouth Basin is the most important petroliferous basin in the South China Sea. The less explored Haifeng 33 Subsag in the basin is selected to study the factors controlling the development of sedimentary systems so as to support the mapping of reservoirs and deployment of oil and gas exploration. Based on 3-D seismic data and logging data of the subsag as well as on the basis of regional structural interpretation, this paper analyzes the types and development characteristics of the slope-break zones and the paleovalleys of the Paleogene Wenchang Formation in the subsag, and clarifies the control of the slope-break zones and paleovalleys on sediment filling. The results show that there are three types of slope-break zones in the study area: fault slope-break zone, flexure slope-break zone and sedimentary slope-break zone. The paleovalleys are mainly V-shaped, U-shaped, W-shaped and single fault groove types, among which the V-shaped and U-shaped valleys are more

收稿日期: 2022-08-01; 修订日期: 2022-11-16。

第一作者简介: 和子琛(1996—), 男, 硕士研究生, 矿产资源普查与勘探。E-mail: 3109596992@qq.com。

通讯作者简介: 刘豪(1974—), 男, 教授, 矿产普查与勘探。E-mail: lhcugb@163.com。

in number and more concentrated in-plane distribution. The slope-break zones control the boundary of denudation and provenance, thus mobilizing the sediments in a certain direction for a certain distance within certain space. Different sedimentary systems are believed to be developed in different periods under the influence of these zones. Serving as transport channels, paleovalleys control the direction of sediment transport, location of sediment discharge as well as scale of depositional system. It is concluded that slope-break zones together with paleovalleys determine the types, scales, development and evolution of depositional systems.

Key words: slope-break belt, paleovalley, paleogeomorphology, sedimentary system, regional structure, Wenchang Formation, Haifeng 33 Subsag, Pearl River Mouth Basin

引用格式: 和子琛, 刘豪, 林鹤鸣, 等. 断陷湖盆坡折带-古沟谷对沉积的控制作用——以珠江口盆地海丰33洼陷古近系文昌组为例[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(2): 441–451. DOI: 10.11743/ogg20230215.

HE Zichen, LIU Hao, LIN Heming, et al. Controlling effect of slope-break zone and paleovalley on sedimentation in rifted lake basins: A case study of the Paleogene Wenchang Formation in Haifeng 33 Subsag, Pearl River Mouth Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(2): 441–451. DOI: 10.11743/ogg20230215.

基于构造-古地貌对盆地充填的控制作用, 进一步寻找具有较好储存条件和圈闭背景的砂体, 是油气勘探的重要目标^[1-3]。林畅松等(2000)对断陷湖盆同沉积构造坡折带的研究认为构造坡折带决定了沉积可容空间, 控制了砂体的展布^[4]。断陷湖盆中不同类型坡折带对沉积体系的控制作用各不相同^[5-7], 多级坡折带的存在导致了盆地的不同地理位置发生不同的沉积剥蚀响应, 且非构造圈闭的生-储-盖组合较好, 坡折带控制下的非构造圈闭的含油性条件优越, 对非构造圈闭勘探的影响深远^[8-17]。坡折带伴生的古沟谷体系是主要的物源通道, 对储集砂体的发育规模具有一定的控制作用, 因而对其开展分析有助于储层预测^[18]。松辽盆地勘探实践表明古沟谷也是优势油气的输导体系^[19]。由此可见, 坡折带-古沟谷的发育特征和展布规律对盆地沉积体系的平面展布和充填序列起着重要的控制作用。

珠江口盆地是南海北部重要的油气产地^[20-21]。油气勘探实践证实珠江口盆地陆丰凹陷油气勘探潜力较大, 但其部分区域, 例如海丰33洼陷, 仍处于低勘探阶段^[22-24]。依据现有的高分辨率地震、钻井及测井资料, 在区域构造解释基础上, 开展古地貌重建, 识别出断裂坡折带、挠曲坡折带和沉积坡折带以及与其伴生的V型、U型、W型和单断槽型沟谷体系。依据坡折带和古沟谷类型及特征进一步探讨其对盆地沉积充填的控制作用。

1 区域地质概况

珠江口盆地位于华南大陆南缘, 是中国重要的油气产地。早-中始新世, 珠江口盆地处于印度-澳大利亚板块与欧亚板块强烈挤压的应力释放区域, 太平洋板块俯冲速率降低且俯冲带发生后退, 使得南海北部

由挤压环境转变为NNW-SSE向伸展环境, 控盆断裂以NEE向为主, 形成NE-NEE向的隆起和坳陷带, 并伴随着岩浆活动, 地层抬升遭受剥蚀^[25-27]。珠江口盆地发生珠琼运动I幕, 珠一坳陷控盆断裂发育, 分割性强, 组合形式多样, 内部断裂控制凹陷和洼陷的发育^[28]。盆地整体上具有“南北分带、东西分块”的构造特征, 由北部隆起带、北部坳陷带、中央隆起带、南部坳陷带、南部隆起带共同组成了盆地现今“三隆两坳”的构造格局^[29-31]。海丰33洼位于陆丰凹陷东北部, 北部与WE走向构造带和断层相邻, 南部与陆丰中低凸起相邻^[32](图1)。海丰33洼陷古近系自下而上发育了文昌组、恩平组和珠海组3套地层, 其中文昌组划分为上、下文昌两个准二级层序, 其界限自下而上分别对应于 T_g 、 T_8^3 和 T_8^0 地震反射界面^[33](图2)。文昌组沉积时期, 在拉张应力场作用下, 海丰33洼陷NW-NEE向断层活动强烈, 断面多呈弯曲的弧状, 主干断裂延续活动时间长, 主控了海丰33洼陷北断南超的箕状半地堑结构。文昌组对应于珠琼I幕大规模的区域性构造运动^[34-35], 受盆地构造演化的控制, 海丰33洼陷文昌组发育了冲积扇、扇三角洲、辫状河三角洲、湖底扇、深湖-半深湖和滨浅湖等多种沉积体系类型^[36]。

2 坡折带与古沟谷特征

2.1 坡折带类型

坡折带是地形坡度突然变陡的区域, 整体上具有上缓、中陡和下缓的特点^[37]。坡折带按成因可以分为侵蚀坡折带、沉积坡折带和构造坡折带等多种类型, 其中构造坡折带又可分为断裂坡折带和挠曲坡折

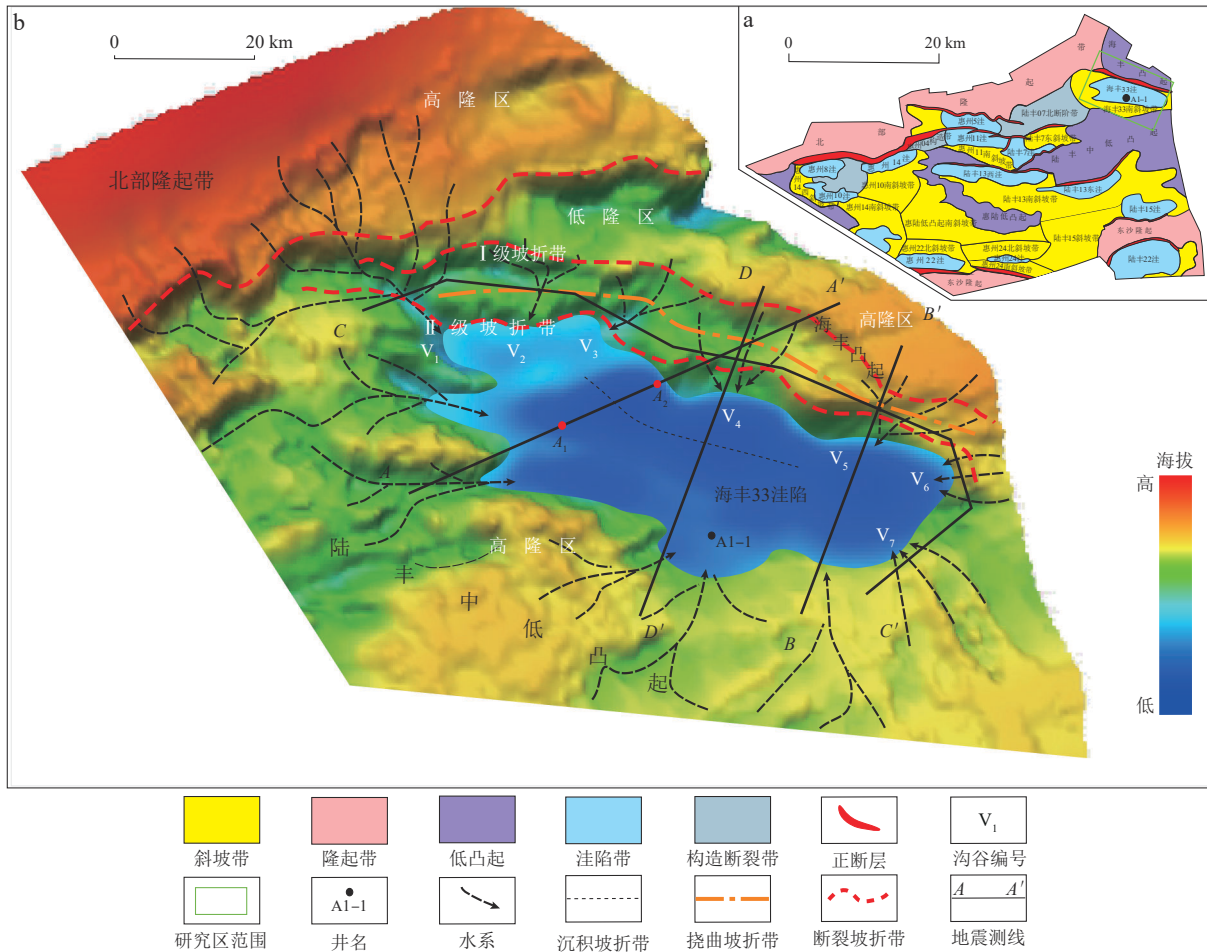


图1 珠江口盆地海丰33洼陷构造位置(a)(据文献[32]修改)与下文昌组沉积时期古地貌(b)

Fig. 1 Structural location of Haifeng 33 Subsag (a) (Modified after reference[32]) and paleo-geomorphology of the Wenchang period (b) in the Haifeng 33 Subsag, Pearl River Mouth Basin

带^[38-40]。通过地层和断层体系的精细解释及同沉积断层的识别,在海丰33洼陷北部陡坡带识别出了断裂坡折带、挠曲坡折带和沉积坡折带,在南部缓坡带识别出了侵蚀坡折带和断裂坡折带(图1,图3)。

2.1.1 断裂坡折带

断裂坡折带是同沉积断裂形成的地形突变地带^[41]。文昌组沉积时期,珠江口盆地发育裂陷一幕,断层数量较多且延续时间长,断面多呈上陡下缓的铲式断裂,在剖面上呈现雁行排列(图3)。在划分坡折带类型时,不仅要考虑其形成的构造背景,还要明确其规模及组合关系^[41],因此本文按规模划分出一级坡折带和二级坡折带。

一级断裂坡折带位于边界大断裂处,断面坡度大,形成时间较早且长期活动,断层上、下盘高度差很大,平面上呈东西展布,为整个洼陷的沉积体系提供了物源。二级断裂坡折带的构造活动性小于一级坡折带,

多平行于一级坡折带,构成同向断阶坡折带(图3)。

海丰33洼陷受一级断裂坡折带控制的地区主要为北部陡坡带,整体上呈NW-SE向分布,长度约50.8 km,二级断裂坡折带长度约65.1 km。根据工区地震资料解释结果,北部陡坡带的断裂由西向东整体上呈现断距先逐渐增大后减小的趋势。

2.1.2 挠曲坡折带

挠曲坡折带多是由深部断裂或者同沉积褶皱引起的背斜、弯曲、古凸起上覆地层变形所形成,在构造作用相对较弱的环境中较发育。在NNW-SSE向拉张应力场作用下,基底断块隆升,上覆地层发生变形,在地震剖面上发育明显的地层上倾尖灭现象(图3)。海丰33洼陷下文昌组沉积时期构造活动由弱变强,挠曲坡折带并不明显,上文昌组沉积时期逐渐变弱,形成挠曲坡折带;平面上,挠曲坡折带主要分布在北部海丰凸起的中间位置,延伸距离相对较

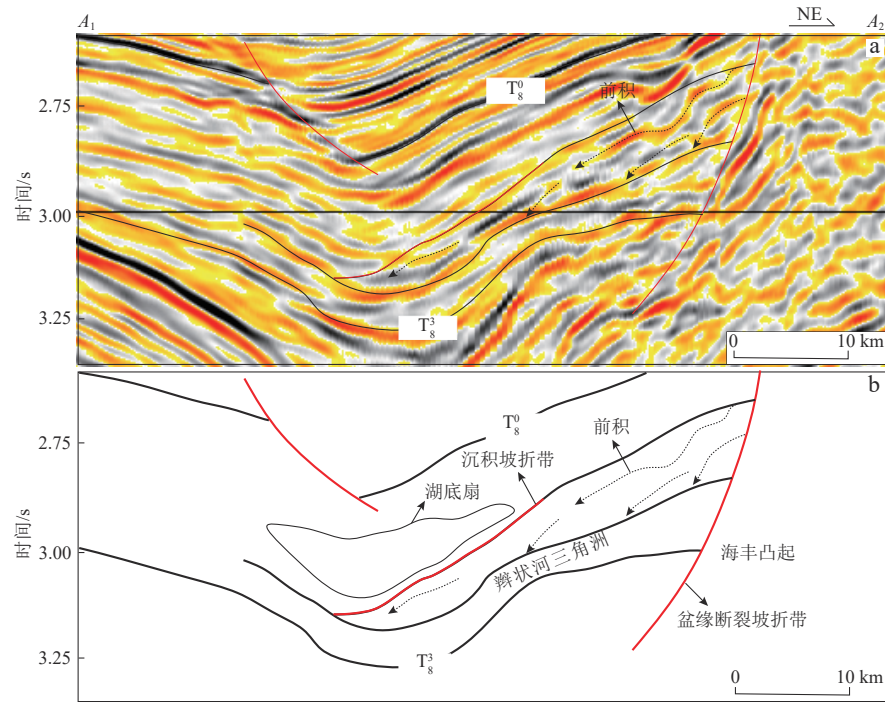


图4 海丰33洼陷沉积坡折带特征(剖面位置见图1)

Fig. 4 Characteristics of sedimentary slope-break zone in the Haifeng 33 Subsag (See Fig. 1 for profile location)

a. 地震剖面;b. 解释剖面

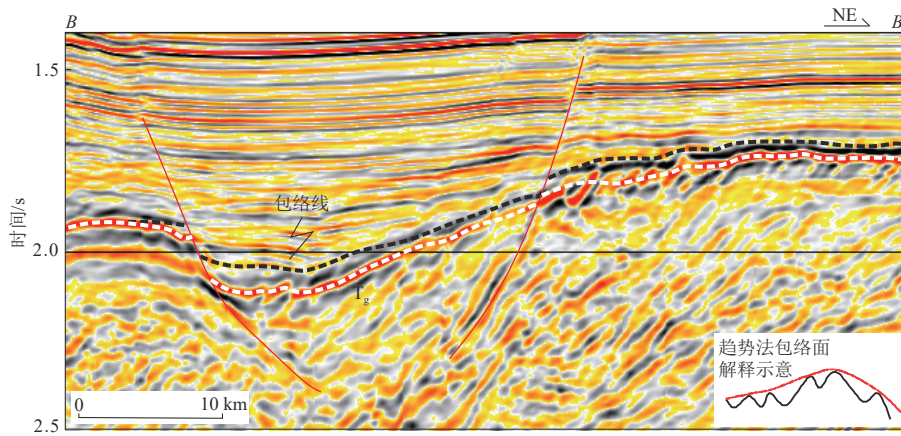


图5 海丰33洼陷古沟谷刻画方法示意图(剖面位置见图1)

Fig. 5 Schematic diagram of the paleovalley characterization for the Haifeng 33 Subsag (See Fig. 1 for profile location)

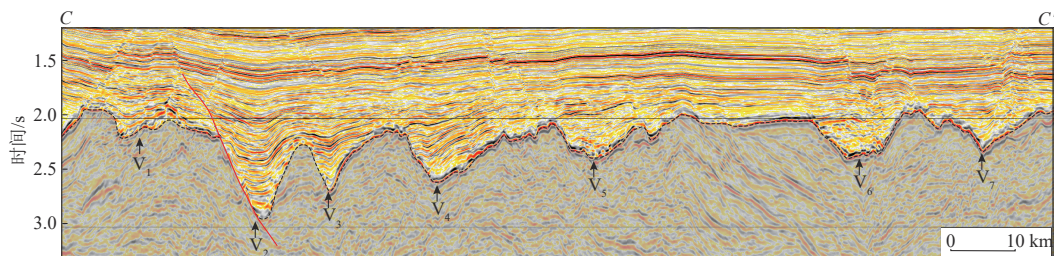


图6 海丰33洼陷古沟谷形态特征(剖面位置见图1)

Fig. 6 Morphological characteristics of paleovalleys in the Haifeng 33 Subsag (See Fig. 1 for profile location)

古沟谷的宽度、深度、延伸长度等参数(表1)。为了便于描述,由西向东将已识别的古沟谷命名为 $V_1, V_2, V_3,$

V_4, V_5, V_6 和 V_7 号沟谷(图1,图6)。

海丰33洼陷北部陡坡沉积物源充足,垂向高差在

370 ~ 700 m, 地形坡度较大, 介于 $3.5^{\circ} \sim 9.4^{\circ}$, 坡降明显, 地层遭受剥蚀后形成了以 V 型沟谷和 U 型沟谷为主, 少量 W 型沟谷并存的古沟谷体系(图 6)。其中, V_1 号沟谷表现为 W 型, 在地震剖面上表现为垂向加积, 沉积物输送能力一般。 V_2 号沟谷为单断槽通道, 在地震剖面上表现为垂向加积。 V_3 、 V_4 和 V_7 号沟谷为 V 型沟谷, 有明显的侵蚀下切特征, 且 V_3 号沟谷在地震剖面上表现为垂向加积, V_4 号和 V_7 号沟谷表现为侧向加积, V_4 横截面积最大, 指示其供水系规模较大。 V_5 、 V_6 号沟谷表现为宽度较大的 U 型沟谷, 内部呈侧向加积特征, 指示其沉积水动力较强, 古沟谷发生侧向迁移。根据数据统计以及剖面形态特征分析, V_4 、 V_5 和 V_6 号古沟谷是最有利的沉积物输送通道(表 1; 图 6)。在此基础上, 依据刘豪等对沉积体系的量化方法^[47-48], 计算沉积体面积和体积等参数, 对其相关性进行分析。

3 坡折带-古沟谷对沉积体的影响

3.1 古沟谷是主要的物源通道

断陷湖盆流域内的水系携带物源碎屑通过古沟谷进入湖盆, 因此古沟谷控制了沉积物的搬运方向, 其末端往往是沉积体发育的有利区域^[29]。古沟谷作为主要的物源通道, 其类型和规模对沉积体系的发育具有较强的控制作用。海丰 33 洼陷北部陡坡带发育大量扇三角洲, 本文通过对古沟谷的宽度、深度、宽深比、横截面积、坡度和延伸长度以及扇体面积和体积的定量测量, 拟合了古沟谷与沉积体系地貌学参数的定量关系(图 7)。

由地貌学参数相关性可知, 古沟谷的横截面积与扇体的面积及体积呈正相关, 指示古沟谷横截面积的增大, 其沉积物的输送通量增大, 扇体的面积及体积也会增大。古沟谷的宽深比与扇体的面积及体积呈负相关, 指示古沟谷宽深比较大时, 沟谷多宽浅, 其沉积物输送通量及速率较低。当宽深比较小时, 沟谷以侵蚀为主, V 型沟谷与 W 型沟谷通常较为明显。

海丰 33 洼陷北部陡坡带的垂向高差在 400 ~ 650 m, 坡度在 $3.5^{\circ} \sim 9.4^{\circ}$, 沉积碎屑具有较大的势能, 输送通量及运输速率较大, 沉积碎屑快速下降并在坡底堆积形成大型扇三角洲, 因其动能大, 形成的扇体扩散面积大。由散点图可知随着地形坡度的增大, 扇体的面积及体积随之增大, 呈现正相关性; 但在坡度较大情况下, 随着延伸长度的增加, 所形成扇三角洲的面积及体积随之下落, 多对应发育 U 型沟谷。

V 型沟谷内部水系水动力较强, 在水流的强力冲击作用下, 水道形成深度较大的下蚀, 水流所携带的沉积物颗粒大小不一, 磨圆度极差, 分选性差, 其发育的坡折带坡度偏陡, 在沟谷末端远离中心的位置发育面积、体积较大的扇三角洲。

顺直型单断式古沟谷内部水系相对较为分散, 沉积碎屑粒径较粗, 沉积厚度大, 但展布范围一般较小, 因此所形成沉积体的体积相对小, 在海丰 33 洼陷西北部边界断裂处较多。

U 型沟谷是物源通道发育的壮年期, 其内部沉积充填分为垂向加积和侧向加积两种类型。侧向加积反映古沟谷不断发生侧向迁移, 垂向加积指示相对稳定的河道沉积物充填, 这一阶段物源输送能力强、输送距离远且稳定, 沉积物颗粒大小相对均一, 磨圆度和分选性较好, 在盆缘形成的扇三角洲面积和体积较大, 是油气储存的有利场所, 多分布于海丰 33 洼陷的陡坡带中间位置。

W 型沟谷是物源通道发育的晚年期, 其发育时内部水系能量相对弱, 地势相对平坦, 水流携带的沉积物颗粒小, 以泥沙为主, 但延伸距离很远, 多形成厚度小、体积小的小辫状河三角洲, 主要分布于海丰 33 洼陷的缓坡带。

3.2 坡折带-古沟谷耦合对沉积体的控制作用

陆丰中低凸起存在 NE 走向的走滑断层, 受陆丰中低凸起分隔作用的影响, 陆丰凹陷北部发育近 NW 向和 NWW 向断层, 平面为顺向断阶; 南部断层以近 WE 向为主, 北部和南部断层的走向迥异。海丰凸起、北部隆起带在文昌组沉积时期为海丰 33 洼陷提供了

表 1 海丰 33 洼陷陡坡带古沟谷和沉积体数据

Table 1 Data of paleovalleys and sedimentary bodies in the steep slope zone of the Haifeng 33 Subsalt

沟谷名称	沟谷类型	宽度/km	深度/km	宽深比	横截面积/km ²	延伸长度/km	坡度/($^{\circ}$)	扇体面积/km ²	扇体体积/km ³
V_1	W 型	1.80	0.11	16.36	0.10	4.87	3.5	17.30	7.13
V_2	单断槽型	1.64	0.27	6.07	0.22	4.27	5.7	27.81	8.30
V_3	V 型	1.67	0.21	7.95	0.18	3.78	7.2	33.15	11.95
V_4	V 型	3.11	0.22	14.14	0.46	3.83	6.7	39.22	13.57
V_5	U 型	2.56	0.15	17.07	0.39	2.57	9.4	36.04	12.93
V_6	U 型	2.17	0.17	12.77	0.36	2.82	8.1	30.87	9.78
V_7	V 型	2.20	0.10	22.00	0.10	4.40	6.2	20.08	6.91

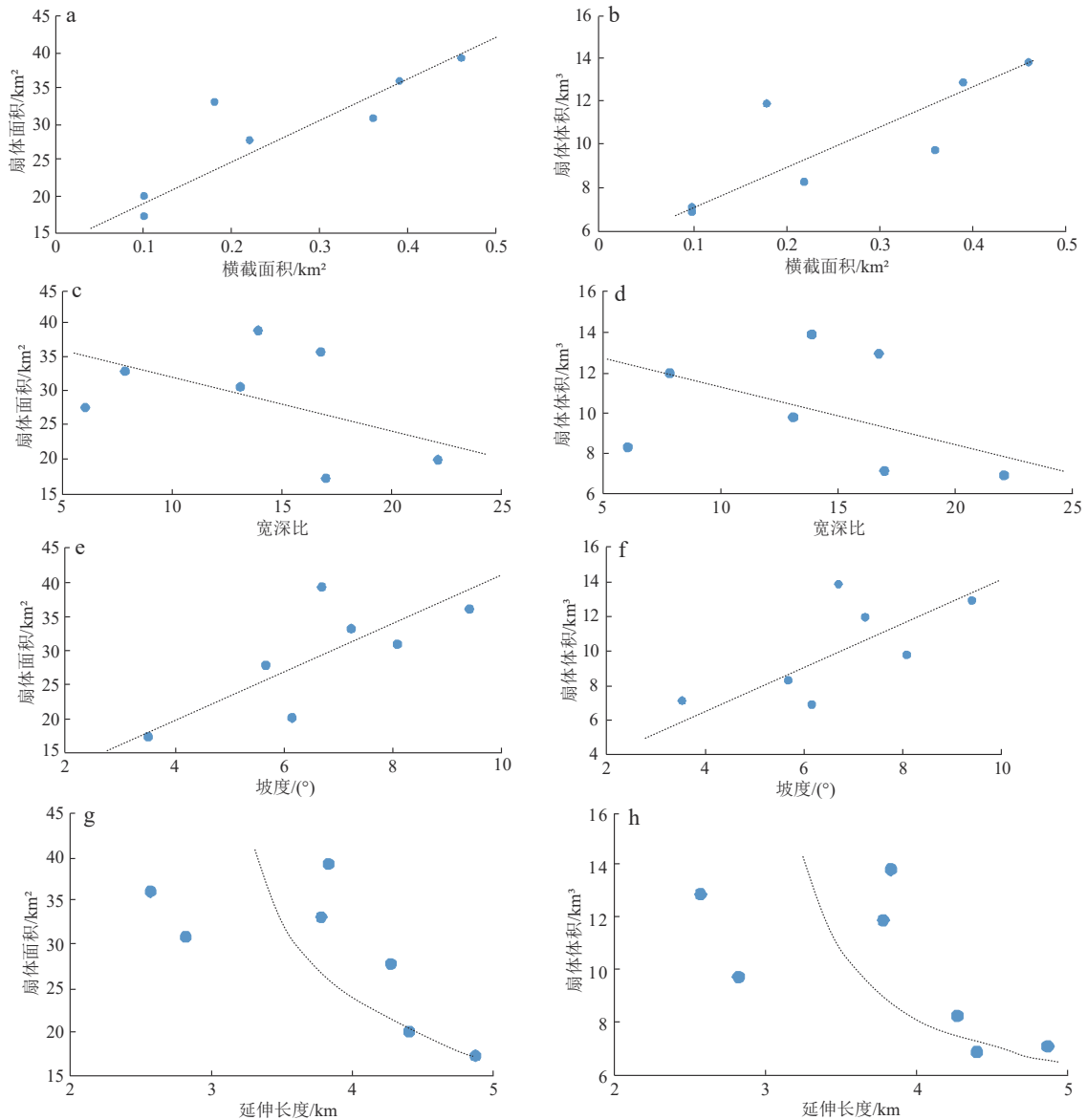


图7 海丰33洼陷陡坡带古沟谷与沉积体对应关系

Fig. 7 Correspondence between paleovalleys and sedimentary bodies in the steep slopezone of the Haifeng 33 Subsag

a. 沟谷横截面积与扇体面积关系;b. 沟谷横截面积与扇体体积关系;c. 沟谷宽深比与扇体面积关系;d. 沟谷宽深比与扇体体积关系;e. 沟谷坡度与扇体面积关系;f. 沟谷坡度与扇体体积关系;g. 沟谷延伸长度与扇体面积关系;h. 沟谷延伸长度与扇体体积关系

充足的物源。

构造坡折带和古沟谷对沉积物的分配和演化起着重要作用。海丰33洼陷北部发育大规模的构造坡折带,其上发育了不同类型的古沟谷,在古沟谷的末端发育了扇三角洲、辫状河三角洲等。坡折带为沉积物输送提供了动力,控制了沉积物搬运的距离和可容空间等,从大方向上控制了沉积物的走向;古沟谷控制了沉积体系的发育位置及分布规模;受坡折带组合的影响在不同阶段发育了不同的沉积体。

下文昌组沉积时期,断层的活动性逐渐变强,盆地内普遍发生隆升、沉降。陡坡带受区域构造拉伸的影

响,形成断阶式坡折组合,断层下降盘快速沉降,可容空间增大,基准面下降,一级坡折带控制了剥蚀区与沉积区的边界,二级坡折带控制了深湖-半深湖与滨浅湖的分界线。此时物源充足,供水水系能量较强,砂体搬运易形成V型或U型古沟谷,在古沟谷的末端主要发育扇三角洲,洼陷内部发育了小面积的深湖-半深湖(图8a)。碎屑物质从远处的物源区进入沉积区,快速堆积,形成厚度大、推进距离较小沉积体,在地震上表现为中低频-中振幅-弱连续地震反射特征的楔状杂乱前积反射或下超的前积反射外形,岩性多为含泥砾砂岩扇三角洲相,多发育于洼陷北部盆地边缘(图9)。

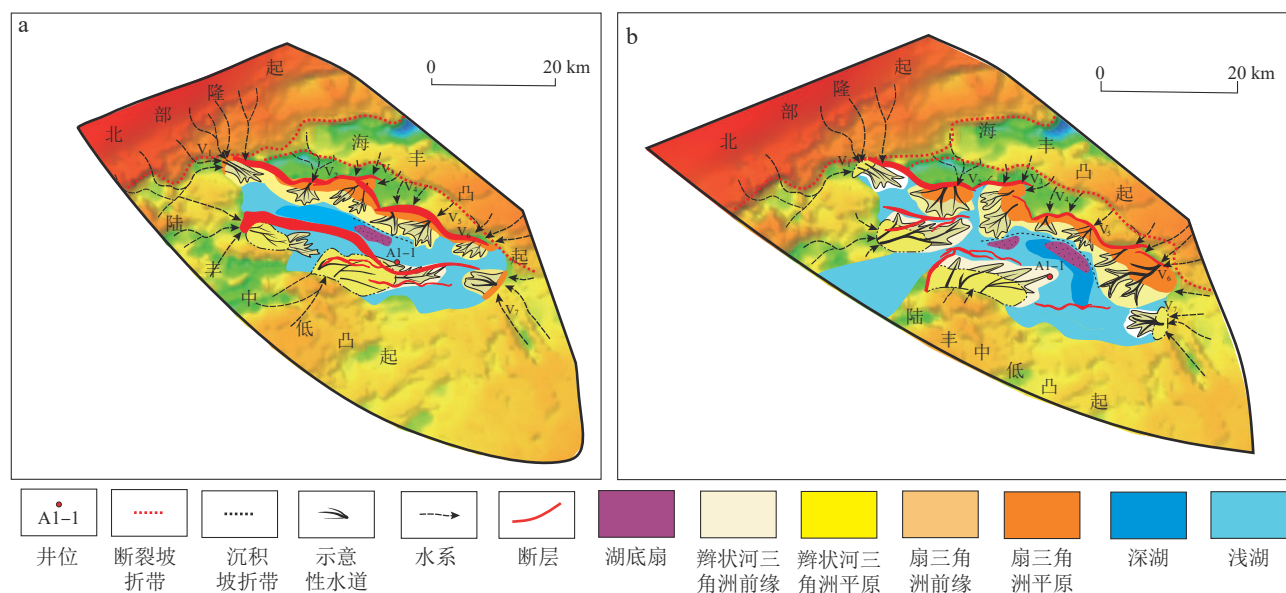
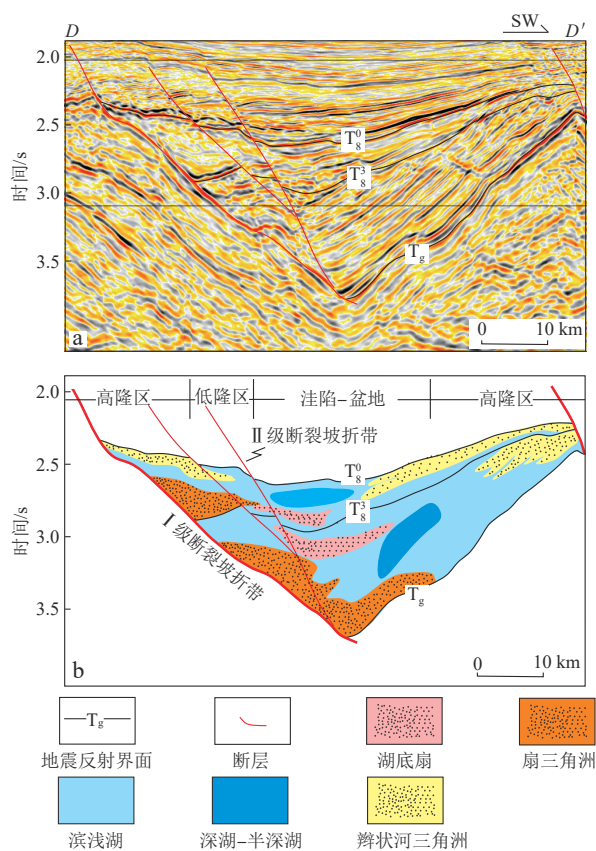


图8 海丰33洼陷文昌组沉积相

Fig. 8 Sedimentary facies of the Wenchang Formation, Haifeng 33 Subsag

a. 下文昌组; b. 上文昌组

图9 海丰33洼陷文昌组地震层序-沉积体系解释
(剖面位置见图1)Fig. 9 Seismic sequence-depositional system interpretation of the Wenchang Formation, Haifeng 33 Subsag
(See Fig. 1 for profile location)

a. 地震层序界面; b. 层序-沉积体系解释

上文昌组沉积时期,断层的活动性逐渐减弱。文昌组沉积末期,二级断裂末端因构造运动形成挠曲坡折。因构造作用的减弱,沉积坡折变得明显,此时缓坡带发育大面积的辫状河三角洲,向洼陷内部推进距离较远。辫状河三角洲物源主要来自北部隆起带、海丰凸起和陆丰中低凸起,地震反射特征呈现中低频、中弱振幅、中连续性的特点,明显的下超前积反射、S型前积反射或叠瓦状前积反射。陡坡带的扇三角洲沉积继承性发育,深洼处深湖-半深湖范围减小(图8b)。

4 结论

1) 海丰33洼陷发育断裂坡折带、挠曲坡折带和沉积坡折带,其中下文昌组沉积时期断裂活动强烈,挠曲坡折带并不明显,上文昌组沉积晚期,构造作用减弱,形成挠曲坡折带。

2) 海丰33洼陷文昌组发育了V型、U型、W型以及单断槽型4种古沟谷,其沟谷的填充类型包含垂向加积和侧向加积。

3) 海丰33洼陷陡坡带发育大量扇三角洲,随着古沟谷的横截面积、坡度的增大,扇体面积、体积增大;随着宽深比、延伸长度的增加,扇体面积、体积减小。

4) 坡折带与古沟谷的耦合关系与沉积体系的发育密不可分。坡折带控制了物源体系、沉积物的类型及沉积区平面展布;古沟谷控制了水系的流向并决定了沉积物最终卸载位置。

参 考 文 献

- [1] 向淑敏, 李建平, 王根照, 等. 青东凹陷古近系沙三段中亚段构造-古地貌对沉积的控制[J]. 大庆石油学院学报, 2010, 34(1): 1-4.
XIANG Shumin, LI Jianping, WANG Genzhao, et al. Tectonic-paleogeomorphic controlled on deposition of Paleogene Es^{3m} in Qingdong Sag[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2010, 34(1): 1-4.
- [2] 辛云路, 任建业, 李建平. 构造-古地貌对沉积的控制作用——以渤海南部莱州湾凹陷沙三段为例[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(3): 302-308.
XIN Yunlu, REN Jianye, LI Jianping. Control of tectonic-paleogeomorphology on deposition: A case from the Shahejie Formation Sha 3 member, Laizhouwan Sag, southern Bohai Sea [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(3): 302-308.
- [3] 曾智伟, 杨香华, 舒誉, 等. 恩平凹陷古近系文昌组构造古地貌特征及砂体展布规律——少井条件下储集砂体预测与评价[J]. 现代地质, 2015, 29(4): 804-815.
ZENG Zhiwei, YANG Xianghua, SHU Yu, et al. Structure palaeogeomorphology characteristics and sand bodies distribution regularities of Paleogene Wenchang Formation in Enping Sag: Under the conditions of lack of drilling data to predict and evaluate the reservoir sand bodies[J]. Geoscience, 2015, 29(4): 804-815.
- [4] 林畅松, 潘元林, 肖建新, 等. “构造坡折带”——断陷盆地层序分析和油气预测的重要概念[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2000, 25(3): 260-266.
LIN Changsong, PAN Yuanlin, XIAO Jianxin, et al. Structural slope-break zone: Key concept for stratigraphic sequence analysis and petroleum forecasting in fault subsidence basins[J]. Editorial Committee of Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2000, 25(3): 260-266.
- [5] 刘豪, 田立新, 周心怀, 等. 断陷湖盆坡折体系与剥蚀沉积响应——以黄河口凹陷古近系为例[J]. 中国海上油气, 2017, 29(4): 28-38.
LIU Hao, TIAN Lixin, ZHOU Xinhui, et al. Slope break systems of rift lacustrine basin and erosion-depositional response: A case study of the Paleogene in Huanghekou sag, Bohai Sea[J]. China Offshore Oil and Gas, 2017, 29(4): 28-38.
- [6] LIU Hao, WANG Yingmin, XIN Renchen, et al. Study on the slope break belts in the Jurassic down-warped lacustrine basin in western-margin area, Junggar Basin, northwestern China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2006, 23(9/10): 913-930.
- [7] LIU Hao, SOMERVILLE I D, LIN Changsong, et al. Distribution of Palaeozoic tectonic superimposed unconformities in the Tarim Basin, NW China: Significance for the evolution of palaeogeomorphology and sedimentary response [J]. Geological Journal, 2016, 51(4): 627-651.
- [8] 刘豪, 王英民. 准噶尔盆地坳陷湖盆坡折带在非构造圈闭勘探中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(4): 422-427.
LIU Hao, WANG Yingmin. Significance of slope break zones in downwarped lake basins to exploration of non-structural traps in Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(4): 422-427.
- [9] 刘豪, 王英民, 王媛. 坳陷湖盆坡折带特征及其对非构造圈闭的控制[J]. 石油学报, 2004, 25(2): 30-35.
LIU Hao, WANG Yingmin, WANG Yuan. Characteristics of slope breaks and their control on atectonic traps in downwarped lake basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(2): 30-35.
- [10] 刘豪, 王英民, 王媛, 等. 大型坳陷湖盆坡折带的研究及其意义——以准噶尔盆地西北缘侏罗纪坳陷湖盆为例[J]. 沉积学报, 2004, 22(1): 95-102.
LIU Hao, WANG Yingmin, WANG Yuan, et al. Study on slope breaks in large down warped lake basins and its significance——A case study from Jurassic lake in northwestern Junggar Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(1): 95-102.
- [11] 任宪军. 松辽盆地长岭断陷盆缘陡坡带中性火山岩相模式及其对储层的控制作用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(3): 816-828.
REN Xianjun. Faces Model of Intermediate Volcanic Rocks in Steep Slope and Its Control on Reservoirs: A Case Study in Changling Fault Depression, Songliao Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(3): 816-828.
- [12] 李东海, 咎灵, 黄文欢, 等. 溱潼凹陷西斜坡阜三段隐蔽油藏勘探开发一体化实践[J]. 油气藏评价与开发, 2021, 11(3): 281-290.
LI Donghai, ZAN Ling, HUANG Wenhuan, et al. Exploration and development integration practice of subtle reservoir of 3rd member of Funing Formation in western slope of Qintong depression[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(3): 281-290.
- [13] 赵世杰, 傅强, 骆卫峰, 等. 溱潼凹陷西斜坡阜三段断陷湖盆砂质滩坝沉积特征[J]. 油气藏评价与开发, 2021, 11(2): 248-255.
ZHAO Shijie, FU Qiang, LUO Weifeng, et al. Sedimentary characteristics of sandy beach-bar in faulted-lacustrine-basin, Ef3 in west slope of Qintong Sag [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(2): 248-255.
- [14] 宋昊, 胡明毅, 陈旭, 等. 不同坡度背景下生物礁沉积结构及差异演化特征: 以开江—梁平海槽西侧长兴组为例[J]. 断块油气田, 2022, (6): 788-793, 799.
SONG Hao, Hu Mingyi, CHEN Xu, et al. Sedimentary structure and differential evolution characteristics of reefs under different slope backgrounds: a case study of Changxing Formation on the west side of the Kaijiang-Liangping Trough [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2022, 29(6): 788-793, 799.
- [15] 王予帆, 尹天豪, 丁毅, 等. 二连盆地阿尔凹陷东部陡坡带腾一下亚段重力流沉积特征[J]. 断块油气田, 2022, 29(4): 489-495, 538.
WANG Yufan, YIN Tianhao, DING Yi, et al. Sedimentary characteristics of gravity flow from lower submember of the first Member of Tengger Formation in the eastern steep slope belt of Aer Sag, Erlian Basin [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2022, 29(4): 489-495, 538.

- [16] 郭美洁, 时保宏, 董雄英, 等. 黄骅拗陷埕海斜坡古近系油气成藏条件及主控因素[J]. 岩性油气藏, 2022, 34(3): 82-92.
GUO Meijie, SHI Baohong, DONG Xiongying, et al. Hydrocarbon accumulation conditions and main controlling factors of Paleogene in Chenghai slope, Huanghua Depression [J]. Lithologic Reservoirs, 2022, 34(3): 82-92.
- [17] 周红飞, 戴鑫, 贾敏, 等. 川中古隆起北斜坡震旦系灯影组二段油气成藏特征[J]. 岩性油气藏, 2022, 34(5): 130-138.
ZHOU Hongfei, DAI Xin, JIA Min, et al. Hydrocarbon accumulation characteristics of the second member of Sinian Dengying Formation in the north slope of central Sichuan paleo-uplift [J]. Lithologic Reservoirs, 2022, 34(5): 130-138.
- [18] 徐长贵, 赖维成, 薛永安, 等. 古地貌分析在渤海古近系储集层预测中的应用[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(5): 53-56.
XU Changgui, LAI Weicheng, XUE Yongan, et al. Palaeogeomorphology analysis for the Paleogene reservoir prediction in Bohai Sea area [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(5): 53-56.
- [19] 辛仁臣, 李桂范, 向淑敏. 松辽盆地西斜坡白垩系姚家组下切谷充填结构[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2008, 33(6): 834-842.
XIN Renchen, LI Guifan, XIANG Shumin. The incised valley filling architecture of Cretaceous Yaojia Formation in the western clinoform of Songliao Basin [J]. Editorial Committee of Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2008, 33(6): 834-842.
- [20] 何敏, 朱伟林, 吴哲, 等. 珠江口盆地新构造运动特征与油气成藏[J]. 中国海上油气, 2019, 31(5): 9-20.
HE Min, ZHU Weilin, WU Zhe, et al. Neotectonic movement characteristics and hydrocarbon accumulation of the Pearl River Mouth Basin [J]. China Offshore Oil and Gas, 2019, 31(5): 9-20.
- [21] 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 Ming, ZHANG Xiangtao, HUANG Yuping, et al. Source rock characteristics and resource potential in Pearl River Mouth Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(S1): 53-68.
- [22] 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.
- [23] 张素芳, 张向涛, 汪旭东, 等. 珠江口盆地陆丰南地区文四段浊积岩沉积特征及勘探意义[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(8): 115-120.
ZHANG Sufang, ZHANG Xiangtao, WANG Xudong, et al. Sedimentary characteristics and exploration significance of turbidity sandstones in the Wenchang IV Formation in south of Lufeng Depression in the Pearl River Mouth Basin [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(8): 115-120.
- [24] 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.
CHEN Changmin, SHI Hesheng, XU Shice, et al. The forming conditions of Tertiary oil-gas reservoir in the eastern Pearl River in the Pearl River Mouth basin [M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [25] 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.
- [26] RU K, PIGOTT J D. Episodic rifting and subsidence in the south China Sea [J]. AAPG Bulletin, 1986, 70(9): 1136-1155.
- [27] PIGOTT J D, RU Ke. Basin superposition on the northern margin of the south China Sea [J]. Tectonophysics, 1994, 235(1/2): 27-50.
- [28] 刘海伦. 珠江口盆地珠一坳陷裂陷结构: 基底属性与区域应力联合制约[D]. 武汉: 中国地质大学, 2018.
LIU Hailun. Rift style controlled by basement attribute and regional stress in Zhu I Depression, Pearl River Mouth Basin [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2018.
- [29] 郭伯举, 谢家声, 向凤典. 珠江口盆地珠一坳陷含油气系统研究[J]. 中国海上油气(地质), 2000, 14(1): 2-9.
GUO Boju, XIE Jiasheng, XIANG Fengdian. The study of the petroleum system in the Zhu I Depression in Pearl River Mouth Basin [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 2000, 14(1): 2-9.
- [30] 王碧维, 徐新德, 吴杨瑜, 等. 珠江口盆地西部文昌凹陷油气来源与成藏特征[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(7): 980-992.
WANG Biwei, XU Xinde, WU Yangyu, et al. Oil-gas origin and accumulation characteristics of Wenchang Depression, western Pearl River Mouth Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(7): 980-992.
- [31] 吴克强, 刘志峰, 王升兰, 等. 珠一坳陷北部洼陷带始新统半深—深湖相烃源岩综合判识[J]. 中国海上油气, 2015, 27(3): 10-15, 24.
WU Keqiang, LIU Zhifeng, WANG Shenglan, et al. Composite recognition of Eocene semi-deep and deep lacustrine facies source rocks in northern subsags belt of Zhu I Depression, Pearl River Mouth Basin [J]. China Offshore Oil and Gas, 2015, 27(3): 10-15, 24.
- [32] 万琼华, 刘伟新, 王华, 等. 珠江口盆地陆丰凹陷辫状河三角洲前缘储层沉积构型模式[J]. 天然气地球科学, 2019, 30(12): 1732-1742.
WAN Qionghua, LIU Weixin, WANG Hua, et al. Research on sedimentary architecture pattern of braided river delta front of Lufeng Depression in Pearl River Mouth Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(12): 1732-1742.
- [33] 高阳东, 汪旭东, 林鹤鸣, 等. 珠江口盆地陆丰凹陷恩平组内部构造—沉积面识别及意义[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(7): 961-970.
GAO Yangdong, WANG Xudong, LIN Heming, et al.

- Characteristics and significances of the tectono-sedimentary transitional unconformity in Enping Formation of Lufeng Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021, 32(7): 961-970.
- [34] 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.
- [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] 汪旭东, 林鹤鸣, 邱欣卫, 等. 低勘探区烃源岩SAS预测技术——以陆丰凹陷海丰33洼文昌组为例[J]. *地球物理学进展*, 2022, 37(2): 882-891.
- WANG Xudong, LIN Heming, QIU Xinwei, et al. Prediction of source rock based on SAS in an immature exploration area: A case study of Wenchang Formation in the Haifeng 33 Sag, Lufeng Depression[J]. *Progress in Geophysics*, 2022, 37(2): 882-891.
- [37] 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, 33(1): 22-25, 31.
- FENG Youliang, XU Xiusheng. Syndepositional structural slope-break zone controls on lithologic reservoirs——A case from Paleogene Bohai Bay Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2006, 33(1): 22-25, 31.
- [38] 王英民, 刘豪, 辛仁臣, 等. 湖盆坡折带——地层岩性圈闭勘探的新领域[J]. *石油科学(英文版)*, 2004, 1(2): 55-61.
- WANG Yingmin, LIU Hao, XIN Renchen, et al. Lacustrine basin slope break——A new domain of strata and lithological trap exploration[J]. *Petroleum Science*, 2004, 1(2): 55-61.
- [39] 邓宏文, 王红亮, 王敦敏. 古地貌对陆相裂谷盆地层序充填特征的控制——以渤中凹陷西斜坡区下第三系为例[J]. *石油与天然气地质*, 2001, 22(4): 293-296, 303.
- DENG Hongwen, WANG Hongliang, WANG Dunze. Control of paleo-morphology to stratigraphic sequence in continental rift basins: Take lower tertiary of western slope in Bozhong Depression as an example[J]. *Oil & Gas Geology*, 2001, 22(4): 293-296, 303.
- [40] 姜华, 王华, 肖军, 等. 应用古地貌分析方法进行有利区带预测——以琼东南盆地②号断裂带为例[J]. *石油勘探与开发*, 2009, 36(4): 436-441.
- JIANG Hua, WANG Hua, XIAO Jun, et al. Palaeogeomorphologic prediction of favorable zones: Take fault ② of Qiongdongnan Basin as an example[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2009, 36(4): 436-441.
- [41] 谭建财, 范彩伟, 宋鹏, 等. 琼东南盆地中新统古沟谷和坡折带特征及油气勘探意义[J]. *油气地质与采收率*, 2017, 24(3): 30-36, 43.
- TAN Jiancai, FAN Caiwei, SONG Peng, et al. Characteristics of the mid-Miocene paleo ravine-slope break zones in Qiongdongnan Basin and its significance for oil-gas exploration [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2017, 24(3): 30-36, 43.
- [42] 李峻颀, 蒋一鸣, 侯国伟, 等. 坡折带对油气圈闭发育的约束效应——以平湖斜坡带孔雀亭区平湖组为例[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021, 41(3): 141-150.
- LI Junjie, JIANG Yiming, HOU Guowei, et al. Constraints of slope break belt on oil and gas trapping——An example from the Pinghu Formation in the Kongqueting area of Pinghu Slope [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2021, 41(3): 141-150.
- [43] 朱红涛, 朱筱敏, 刘强虎, 等. 层序地层学与源-汇系统理论内在关联性与差异性[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(4): 763-776.
- ZHU Hongtao, ZHU Xiaomin, LIU Qianghu, et al. Sequence stratigraphy and source-to-sink system: Connections and distinctions [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(4): 763-776.
- [44] 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.
- [45] 谈明轩, 朱筱敏, 张自力, 等. 古“源-汇”系统沉积学问题及基本研究方法简述[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(5): 1107-1118.
- TAN Mingxuan, ZHU Xiaomin, ZHANG Zili, et al. Summary of sedimentological issues and fundamental approaches in terms of ancient “Source-to-Sink” systems[J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(5): 1107-1118.
- [46] 黄胜兵, 叶加仁, 朱红涛, 等. 渤中西环古沟谷与坡折带特征及其对储层的控制[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2011, 31(1): 119-124.
- HUANG Shengbing, YE Jiaren, ZHU Hongtao, et al. Characteristics of valley-slope break zone in the western circle of the Bozhong Depression and its control over reservoir distribution[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2011, 31(1): 119-124.
- [47] LIU Hao, MENG Jun, BANERJEE S. Estimation of palaeo-slope and sediment volume of a lacustrine rift basin: A semi-quantitative study on the southern steep slope of the Shijiutuo Uplift, Bohai Offshore Basin, China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017, 147: 148-163.
- [48] LIU Hao, LOON A J (Tom), XU Jie, et al. Relationships between tectonic activity and sedimentary source-to-sink system parameters in a lacustrine rift basin: A quantitative case study of the Huanghekou Depression (Bohai Bay Basin, E China) [J]. *Basin Research*, 2020, 32(4): 587-612.