

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2018020201

白云凹陷北坡珠江组下段陆架边缘三角洲特征及其主控因素

余烨^{1,2}, 张昌民³, 朱锐³, 杜家元⁴, 黄俨然^{1,2}, 王莉²

1. 湖南科技大学页岩气资源利用湖南省重点实验室, 湘潭 411201

2. 湖南科技大学资源环境与安全工程学院, 湘潭 411201

3. 长江大学地球科学学院, 武汉 430100

4. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 深圳 518000

摘要:为了明确白云凹陷北坡珠江组下段陆架边缘三角洲的形成演化阶段及其主要控制因素,采用地震沉积学、层序地层学的相关理论和方法,结合钻井数据、地震反射结构特征和均方根振幅属性等资料,在前人研究的基础上对该陆架边缘三角洲的识别特征、演化模式和控制因素进行了重新认识和探讨分析。结果表明:陆架边缘三角洲在顺物源方向具有高角度斜交型前积反射,缺乏顶积层的海岸平原相,其前端发育盆底扇沉积;垂向沉积序列以多期反旋回的前三角洲、席状砂、河口沙坝和下水分流河道的叠置为特征,发育陆坡区常见的生物扰动、泥质条带变形和滑塌、滑动现象;珠江组下段陆架边缘三角洲形成于强制海退体系域时期,并伴随着盆底扇的发育,而低位体系域时期主要发育斜坡扇和低位楔状体;构造活动促使白云凹陷北坡在珠江组下段时期形成稳定分布的陆架坡折带,珠江组下段时期古珠江携带的充沛物源和该时期强烈的海平面下降使碎屑沉积物能够进积至陆架边缘,甚至陆坡地区形成陆架边缘三角洲沉积。

关键词:陆架边缘三角洲;沉积层序特征;主控因素;白云凹陷北坡;珠江口盆地

中图分类号:P736.2

文献标识码:A

Characteristics and main controlling factors of the shelf-edge delta of the lower member of Zhujiang Formation in the northern Baiyun Depression

YU Ye^{1,2}, ZHANG Changmin³, ZHU Rui³, DU Jiayuan⁴, HUANG Yanran^{1,2}, WANG Li²

1. Hunan Provincial Key Laboratory of Shale Gas Resource Utilization, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China

2. School of Resource Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China

3. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China

4. Shenzhen Branch of CNOOC Ltd., Shenzhen 518000, China

Abstract: In order to reveal the evolutionary history and controlling factors of the shelf-edge delta discovered in the Lower Member of Zhujiang Formation in the northern Baiyun Depression, seismic sedimentology and sequence stratigraphy are applied with the support of drilling data, logging data, seismic reflection configuration and root mean square amplitude attributes. Seismic reflection characteristics suggest a high angle oblique progradational body in parallel to the direction of sediment movement. Topset deposits are missing. Instead there are fan deposits in front of the delta laid on the bottom of the basin. The vertical sequence of the delta is characterized by the multiple reverse cycles changing from prodelta, sheet sand, mouth bar to underwater distributary channel upwards. There are abundant bioturbated structures, shale strip deformation and sliding features usually found on continental slope. The shelf-edge delta in the Lower Member of the Zhujiang Formation was formed in forced regressive systems tract periods, and accompanied by basin floor fans. However, in the lowstand system tract period there were mainly developed slope fans and low wedgelike sand bodies. A stable distribution of shelf break zone was formed in the period while the Lower Member of Zhujiang Formation was deposited under the control of tectonic

资助项目:国家重点研发计划项目“低渗透油藏 CO₂ 注入及地质封存中的迁移转化规律和岩石力学响应”(2018YFB0605503); 国家科技重大专项“白云北坡陆架坡折带地层岩性油气藏的识别和预测”(2011ZX05023-002-007); 湖南省自然科学基金项目“南海北部白云-荔湾凹陷韩江组深水水道沉积构型及其控制因素研究”(2019JJ50151); 湖南省教育厅资助科研项目“珠江口盆地珠江组强制海退沉积层序特征及其演化模式研究”(18C0347)

作者简介:余烨(1983—),男,讲师,博士,主要从事储层沉积学及层序地层学研究,E-mail: yuyel983@163.com

收稿日期:2018-02-02; **改回日期:**2018-05-04. 周立君编辑

movement. Shelf-edge delta occurred in the shelf margin and slope area by the huge amount of sediment discharge from the paleo-Pearl River and the strong sea-level falling then.

Key words: shelf-edge delta; depositional features; main controlling factors; northern Baiyun Depression; Pearl River Mouth Basin

陆架边缘三角洲普遍被认为发育在相对海平面下降阶段和低水位时期^[1-3]。但在某些特殊情况下,比如存在异常高的沉积物供给和狭窄陆架的时候,陆架边缘三角洲也能在相对海平面高水位时期,甚至上升阶段发生沉积^[4,5]。然而,陆架边缘三角洲的形成要求滨线海退穿越整个陆架地区,这种情况最有可能发生在强制海退时期^[6]。此外,河流携带的砂体更容易在相对海平面下降阶段和低水位时期从陆架搬运至深水区^[7],这通常被认为陆架边缘三角洲的形成是驱动砂体输送到陆坡和深水盆地的主要控制因素^[1]。陆架边缘三角洲沉积的大量实例已证实,在高的可容空间比沉积物供给(A/S)的条件下或者不存在明显的下切沟谷的情况下,陆架边缘三角洲的砂体很难被输送到斜坡和深水盆地^[4,5,8]。因此,陆架边缘三角洲的存在并不能保证在该时期形成盆底扇的浊积岩油气藏,而盆底扇发育的地区则通常预示着陆架边缘三角洲的存在。珠江口盆地作为典型的被动大陆型盆地,具有宽广的陆架古地理背景,在白云凹陷珠江组时期的各层序中广泛发育深水扇沉积^[9],并通过 LW3 井的钻探证实了深水扇沉积富含丰富的油气资源。与此同时,彭大钧等^[10]、郑荣才等^[11]从“源-渠-汇”的勘探思路对深水扇的成因机制进行了探讨,指出珠江组深水扇的形成与低位期陆架边缘三角洲前缘砂体供源和海平面大幅下降导致的重力滑塌和砂崩有关,从此逐渐增加了人们对珠江口盆地珠江组陆架边缘三角洲研究的兴趣^[2,12,13]。而针对白云凹陷北坡珠江组下段的陆架边缘三角洲,吴景富等^[14]基于新钻井、精细三维地震资料解释,对该陆架边缘三角洲的形成、演化进行了探讨,指出该陆架边缘三角洲发育于低位期的晚期,主要受相对海平面变化和陆架断阶坡折带控制;而易雪斐等^[2]借助岩心资料、测井曲线和地震剖面等资料对该陆架边缘三角洲沉积物特征进行了识别,指出该陆架边缘三角洲发育在低位体系域时期,主要受物源供给的控制。随着强制海退概念的提出以及认识程度的不断加深,陈维涛等^[15]认为该陆架边缘三角洲发育于强制海退体系域时期,而低位体系域时期主要发育斜坡扇和盆底扇。因此,有必要对珠江口盆地白云凹陷北坡珠江组下段的陆架

边缘三角洲进行重新识别认识和演化模式总结,以期准确把握该陆架边缘三角洲的沉积层序特征,掌握其主要控制因素,为该地区寻找大型储集体提供依据。

1 区域地质背景

珠江口盆地位于华南大陆南缘,在欧亚、印度和太平洋三大板块交汇的南海北部,是在加里东、海西、燕山期褶皱基底上形成的中、新生代含油气盆地,盆地自北向南依次划分为北部断阶带、北部坳陷带、中央隆起带、南部坳陷带和南部隆起带等 5 个构造单元,各个构造单元又细分为若干个凹陷和低隆起^[16-18]。珠江口盆地新生代主要有 6 次重要的构造运动,即神狐运动、珠琼运动一幕、珠琼运动二幕、南海运动、白云运动以及东沙运动,其中南海运动是盆地断陷、断拗向拗陷转化时期,拗陷开始并进入沉降阶段,沉积了珠海组粗粒碎屑岩和珠江组海相细粒碎屑岩,使之成为珠江口盆地重要的油气储集层^[16,19]。

白云凹陷北坡位于中央隆起带番禺低隆起和南部坳陷带白云凹陷的接触位置(图 1),发育的主要含油气地层有珠海组、珠江组下段、珠江组上段和韩江组。在渐新世(珠海组)与中新世(珠江组下段)交界约 23.8Ma 时期,受白云凹陷深部地幔上隆热沉降的影响,陆架坡折带从白云凹陷南侧突变式跃迁到凹陷北侧,并继承性地维持在白云凹陷北坡附近^[19,20],为白云凹陷发育陆架边缘三角洲和深水重力流沉积提供了古地貌基础。已建立的珠江口盆地层序地层格架在珠江组下段内部识别出了 2 个三级层序界面和 1 个最大海泛面,经超微化石定年分别对应 23.8、21 和 18.5Ma^[21]。21Ma 时期白云凹陷发生大规模海退,形成 SB21 侵蚀不整合面,界面之下可以观察到削截反射结构和下切谷特征,之上有高角度前积反射和丘状反射结构特征^[15]。基于这种相对海平面下降在陆架坡折带附近形成的高角度前积反射,具有三角洲特征,本文将之解释为强制海退体系域陆架边缘三角洲沉积。

角洲区别于陆架内三角洲的典型特征,反映一种高能三角洲沉积环境、海岸平原相不发育、相对海平面大幅下降、河流侵蚀作用增强和沉积古地貌显著变陡的特征。通过地震软件层拉平技术,以最大海泛面 MFS18.5 作为参考层位,计算求得白云凹陷北坡珠江组下段陆架边缘三角洲中第一套前积体的前积反射倾角为 3.2° ,推测该三角洲沉积时期的陆坡坡度也为 3.2° 。通常认为,陆架的坡度一般小于 1° ,陆坡的坡度一般为 $3^{\circ} \sim 6^{\circ}$ ^[1,2],同时, Moller 等基于墨西哥湾不同类型三角洲和滨岸沉积环境的实例观察测量,将陆坡坡度为 3° 作为斜坡沉积单元砂质大量出现的临界值^[23],并指出三角洲沉积时的坡度越大,预示着越容易发育富砂的沉积体系,这说明珠江口盆地白云凹陷北坡珠江组下段发育的三角洲属于陆架边缘陆坡上发育的富砂三角洲,如 B3 井砂体厚度达到 85m,含砂率为 60%(图 2)。该陆架边缘三角洲底界面为强制海退体系域底面(FRST 底面)或前人研究认定的 SB21 层序界面,顶界面为强制海退体系域顶面(FRST 顶面),由于该顶面为相对海平面快速下降形成的顶超面,并伴随着下切侵蚀作用的发生而形成广泛发育的不整合面,受后期海侵侵蚀作用的影响以及海侵体系域在陆坡区发育极薄的凝缩段的特点,该不整合面在地震剖面上不好区分,甚至在局部地区发生强制海退体系域顶面(FRST 顶面)与最大海泛面(MFS18.5)几乎重叠的现象(图 2、图 3、图 4)。远源区陆架边缘三角洲前积体逐层向盆地方向收敛,下超于前期的沉积物之上,由于陆坡的坡度相对较大,未固结的三角洲前缘或前三角洲沉积物常与滑动和滑塌相伴生,并在坡脚或盆地中心再一次沉积形成局部“凸起”的丘状反射结构,表现为盆底扇的特征,随后伴随着相对海平面的缓慢上升发育低位楔状体沉积(图 2)。

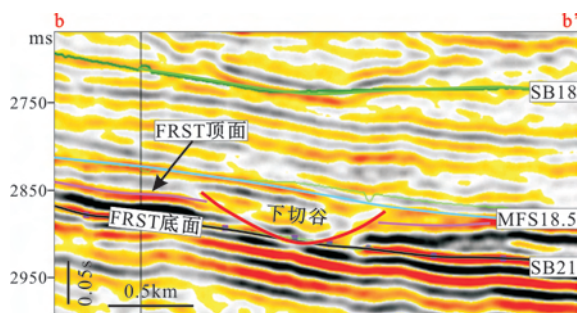


图3 陆架边缘三角洲陆架坡折带的下切谷

Fig.3 Incised valley across shelf break along the shelf-edge delta

由于受强制海退的影响,陆架边缘三角洲发育的同时在陆架坡折带附近常常表现为下切谷的特征。地震剖面上下切谷外部形态呈 V 型或者 U 型,这与河道的侵蚀能力有关,一般靠近物源侵蚀作用强,下切深度大,以 V 型为主,而远离物源侵蚀作用弱,呈 U 型特征;而下切谷内部具有充填反射结构特征,下部以杂乱或平行地震反射为主,少见侧向加积,上部常被海侵期的泥质沉积所覆盖^[23]。白云凹陷北坡珠江组下段下切谷特征明显,在垂利物源的测线上可见到大型下切的地震反射结构,外部形态呈 U 型,内部为平行的地震反射充填结构(图 3),最大深度达 90m,宽 1km。该下切谷从陆架边缘三角洲复合体的顶面(FRST 顶面)一直下切到陆架边缘三角洲复合体的底面(FRST 底面或 SB21 层序界面),而后被海侵体系域沉积物所充填,表现为内部平行的地震反射特征,该下切沟谷的存在,也预示着陆架边缘三角洲的砂体很容易被输送到斜坡和深水盆地,形成富含油气资源的盆底扇^[5,8]。由于受三角洲朵体自旋回过程的影响以及主河口频繁摆动的制约,陆架边缘三角洲在垂利物源方向的地震剖面上可以看到三角洲前积层向两侧沉积尖灭的现象,如第 2 套三角洲前积层在 B6 井左侧发生了沉积尖灭,而在 B2 井和 B3 井中甚至不发育第 2 套三角洲前积层(图 4a)。

2.2 钻测井特征

陆架边缘三角洲垂向沉积序列以多期反旋回前三三角洲与三角洲前缘的叠置为特征。从图 4b 中的连井剖面可以看出,珠江组下段陆架边缘三角洲具有 3 期明显的反旋回特征,代表 3 个准层序组(四级层序)的演化过程。第 1 期陆架边缘三角洲在 B2、B3 井表现为大套厚层的三角洲前缘的河口沙坝+水下分流河道的沉积,在 B6、B5 和 B1 井中以少量席状砂与前三三角洲泥岩的沉积,自然伽玛(GR)曲线表现为明显的反旋回特征。受三角洲朵体自旋回过程和主河口频繁摆动的影响,第 2 期陆架边缘三角洲在 B5、B1 井中依然以具反旋回特征的前三角洲沉积为主,但在 B6 井表现为下部以席状砂与前三三角洲泥岩互层沉积为主,测井曲线呈指状;上部发育中厚层状河口沙坝砂岩,测井曲线呈漏斗形,同时在 B2、B3 井发生了沉积尖灭(图 4)。第 3 套陆架边缘三角洲反旋回特征明显,下部表现为前三三角洲泥岩夹席状砂的沉积,测井曲线呈指状;上部表现为三角洲前缘的河口沙坝与水下分流河道的组合沉积,测井曲线呈漏斗形与箱型的组合特征。伴随着强制海

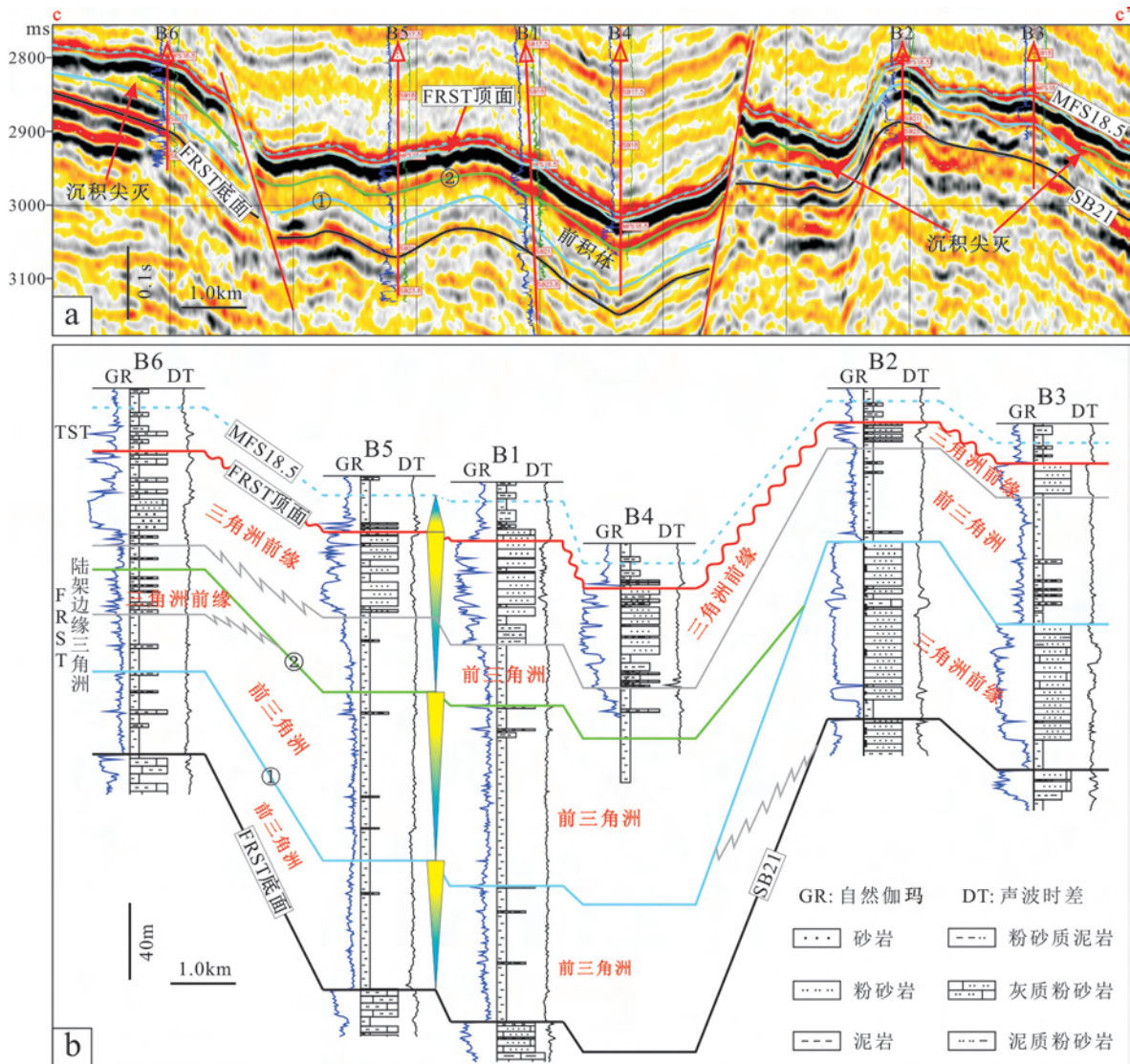


图4 陆架边缘三角洲过井地震剖面 and 连井剖面

Fig.4 A seismic profile and well correlation section across the shelf-edge delta

退的结束和随后相对海平面的缓慢上升,依次沉积低位体系域泥岩、粉砂岩薄互层的低位楔沉积和海侵体系域的薄层凝缩段泥质沉积。水下分流河道以灰色中—细粒岩屑石英砂岩为主,表现为3个下粗上细的正粒序结构,具楔状、板状交错层理和平行层理,砂岩中发育生物扰动和大型生物钻孔,泥质条带变形强烈(图5),表现为滑塌、滑动的特征,说明该水下分流河道沉积在坡度相对较陡的陆坡地区,即为陆架边缘三角洲沉积。概率累积曲线以两段式为主,悬浮总体与跳跃总体之间的交接点在 $2.5\sim 3\Phi$ 区间内,跳跃总体的倾斜多在 60° 左右,不发育滚动组分(图5),为典型水下分流河道的特征。个别样品的概率累计曲线(3746.28m样品)跳跃总体被分为两个直线段,具有双跳跃总体的特征,表现为双向水流沉积作用的结果,说明该水下分流河道受到了波浪、海流等改造作用的影响,这与外陆架沉积物容

易遭受波浪和海流的侵蚀活动有关^[24]。

2.3 深水扇指示特征

陆架边缘三角洲的形成是驱动砂体输送到陆坡和深水盆地的主要控制因素^[1],往往深水扇(盆底扇)发育的地区通常预示着陆架边缘三角洲的存在^[25]。为了确定陆架边缘三角洲和盆底扇的成因关系,以强制海退体系域顶面(FRST顶面)为界往下提取30ms的均方根振幅属性(图6a)和以强制海退体系域底面(FRST底面)为界往上提取30ms的均方根振幅属性(图6b)。从图6a中可以看出,21Ma陆架坡折带下方西侧在平面上为大型朵状的强振幅,往东过渡为小型朵状的强振幅,说明三角洲的主河口位于研究区西部,次河口位于研究区东部。从图6b中可以看出,在21Ma陆架坡折带下方存在一个明显均方根振幅属性减弱的地带,而在两个陆

架边缘三角洲往盆地中心的方向上存在两个相对振幅较强的区域,且可以看到明显的沟谷水道从陆架坡折带地区连通到强振幅区域,说明陆架边缘三角洲靠近强制海退底面的前积层下部为前三三角洲泥质沉积,而靠近强制海退顶面的前积层上部为富砂的三角洲前缘沉积,且在陆架边缘三角洲前端靠近盆地中心的地区往往发育重力流盆底扇沉积,并存在沟谷水道连接陆架边缘三角洲和盆底扇沉积,而且陆架边缘三角洲范围大的,其前端靠近盆地中心地区发育的盆底扇范围也大。从图 6c 中可以看出清晰的沟谷水道特征,该水道在上游陆架坡折带地区(陆架边缘三角洲发育位置)相对较宽,水道宽度约为 1.2km;在中游陆架地区(陆架边缘三角洲与盆底扇中间)相对狭窄,水道宽度约为 300m;在下游盆地中心(盆底扇发育位置)再次变宽,水道宽度约为 1.8km;说明水道①和水道③发育位置地形坡度较缓,而水道②发育位置地形坡度相对较陡。同时,在水道②发育位置可以看到继承性水道发育的特征,表明在陆架边缘三角洲发育的整个过程中都存

在沟谷水道往盆地中心输送沉积物形成盆底扇的现象,进一步印证了陆架边缘三角洲的形成是驱动砂体输送到陆坡和深水盆地的主要控制因素,也为深水扇发育地区预示陆架边缘三角洲的存在提供指示作用,同时指出深水扇发育的大小一定程度上取决于陆架边缘三角洲的大小。

3 陆架边缘三角洲的演化模式

沉积层序演化模式是指导砂体分布预测的基础^[26],通过地震剖面、钻测井资料以及相关地震属性特征的解释识别,在层序演化特征和沉积演化特征分析的基础上,总结了白云凹陷北坡珠江组下段陆架边缘三角洲的演化模式。

3.1 层序演化特征

陆架边缘三角洲的前积层并不在相对海平面持续下降的连续过程中形成的,而是发生在相对海平面总体下降的背景下,期间伴随有相对海平面快速

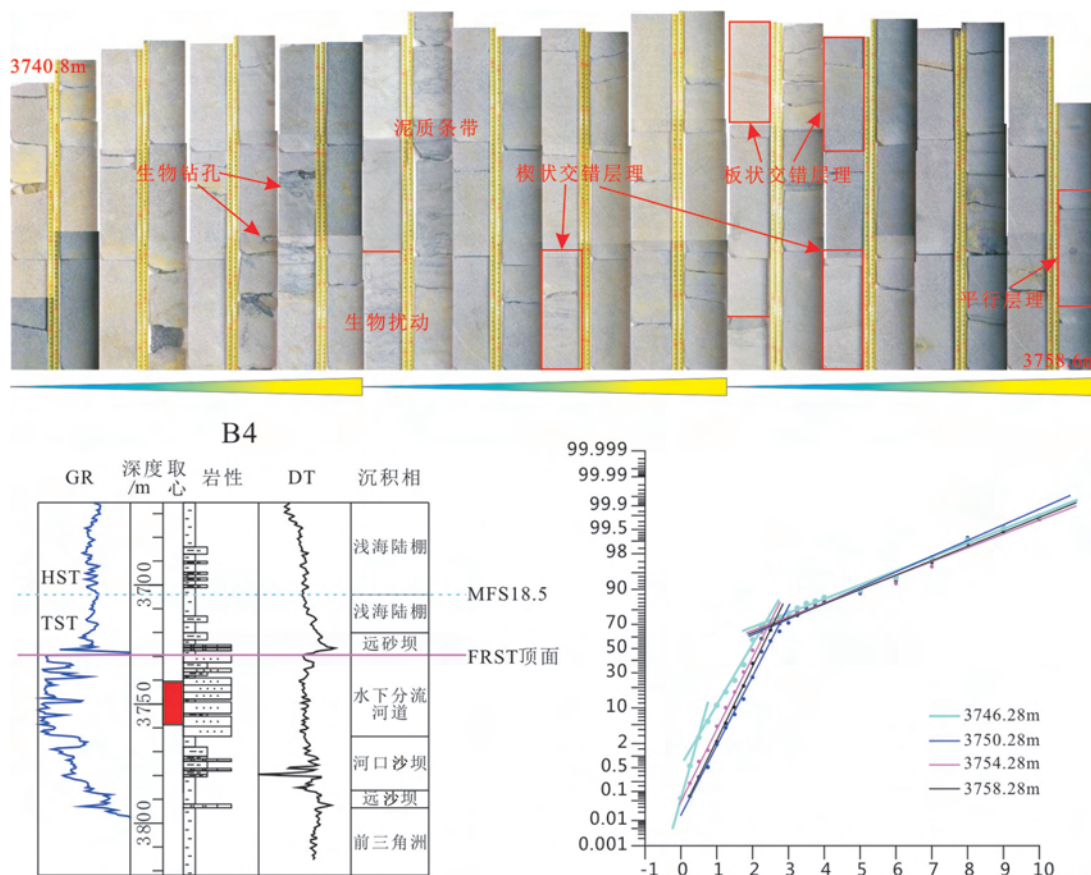


图 5 陆架边缘三角洲钻测井特征(岩性图例见图 4)

a.B4 井岩心特征;b.B4 井单井柱状图;c.B4 井取心段概率累积曲线

Fig.5 Drilling core, logging curve and probability cumulative curve of the shelf-edge delta

a.core pictures of well B4;b.column diagram of well B4;c.probability cumulative curve of a sample from well B4

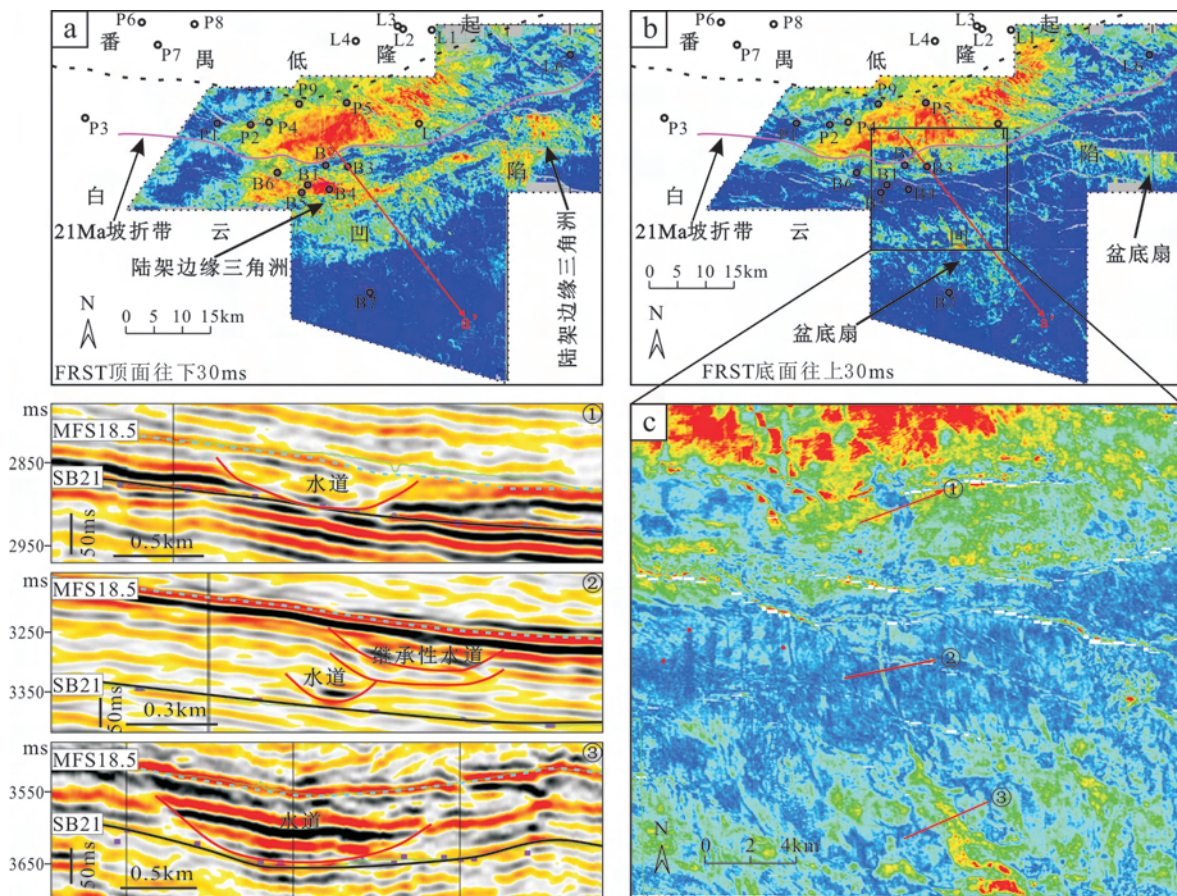


图6 陆架边缘三角洲相关的均方根振幅属性图

a.强制海退体系域顶面往下提取30ms均方根振幅属性;b.强制海退体系域底面往上提取30ms均方根振幅属性;c.图6b局部放大图

Fig.6 Root mean square amplitude attribute associated with the shelf-edge delta

a.30ms root mean square amplitude attribute extracted downward from the upper interface of forced regressive systems tract;

b.30ms root mean square amplitude attribute exssion; c. enlarged part of Fig.6b

短暂的上升过程。每个高角度的前积层代表1个准层序组,即一个完整的四级旋回(图7),这种旋回的准层序垂向叠置主要受高频气候变化的影响。在低可容纳空间背景下伴随相对海平面的短暂快速上升,使每个四级旋回具有向上变浅的特征,又在顶部存在水体突然变深的标志,这一特点在图4b中陆架边缘三角洲的3期准层序组中都有所反映,即自然伽玛曲线由漏斗形、箱型突然变成泥岩基线或者岩性由砂岩突然变成泥岩。在三级层序相对海平面总体下降的背景下,依次形成1、2、3、4期陆架边缘三角洲(4个准层序组),并且新形成的三角洲低于上一期的三角洲的发育位置,呈“叠瓦状”向海推进,直至相对海平面下降到最低点,同时在重力作用触发机制的驱动下将陆架边缘三角洲的砂体源源不断地输向斜坡下方及盆地中心,形成深水扇沉积,从而完成陆架边缘三角洲及盆底扇的层序演化过程(图7)。随后,在相对海平面缓慢上升的驱动下,在盆底扇之上沉积斜坡扇或低位楔状体,完成低位体系域

的层序演化阶段(图7)。

3.2 沉积演化特征

在前积体地震追踪确定每期陆架边缘三角洲发育范围的基础上,结合均方根振幅属性对砂体进行识别,确定三角洲前缘、前三三角洲泥和重力流沉积,从而对白云凹陷北坡珠江组下段的4期陆架边缘三角洲沉积演化特征进行分析。第1期陆架边缘三角洲(前积体①)发育在研究区的中部紧邻21Ma坡折带,三角洲前缘和前三三角洲泥分布范围比较正常,且在前三角洲泥中发育重力流沉积(图8a)。第2期陆架边缘三角洲(前积体②)发育在研究区的中西部,位置略比第1期陆架边缘三角洲靠下,但三角洲前缘主要发育在中部偏东位置,而西部主要以前三角洲泥沉积为主,说明主河口在第1期的基础上略往东发生了偏移且该期陆架边缘三角洲在西部剥蚀比较严重(图8b)。第3期陆架边缘三角洲(前积体③)发育位置又比第2期陆架边缘三角洲靠下,但三

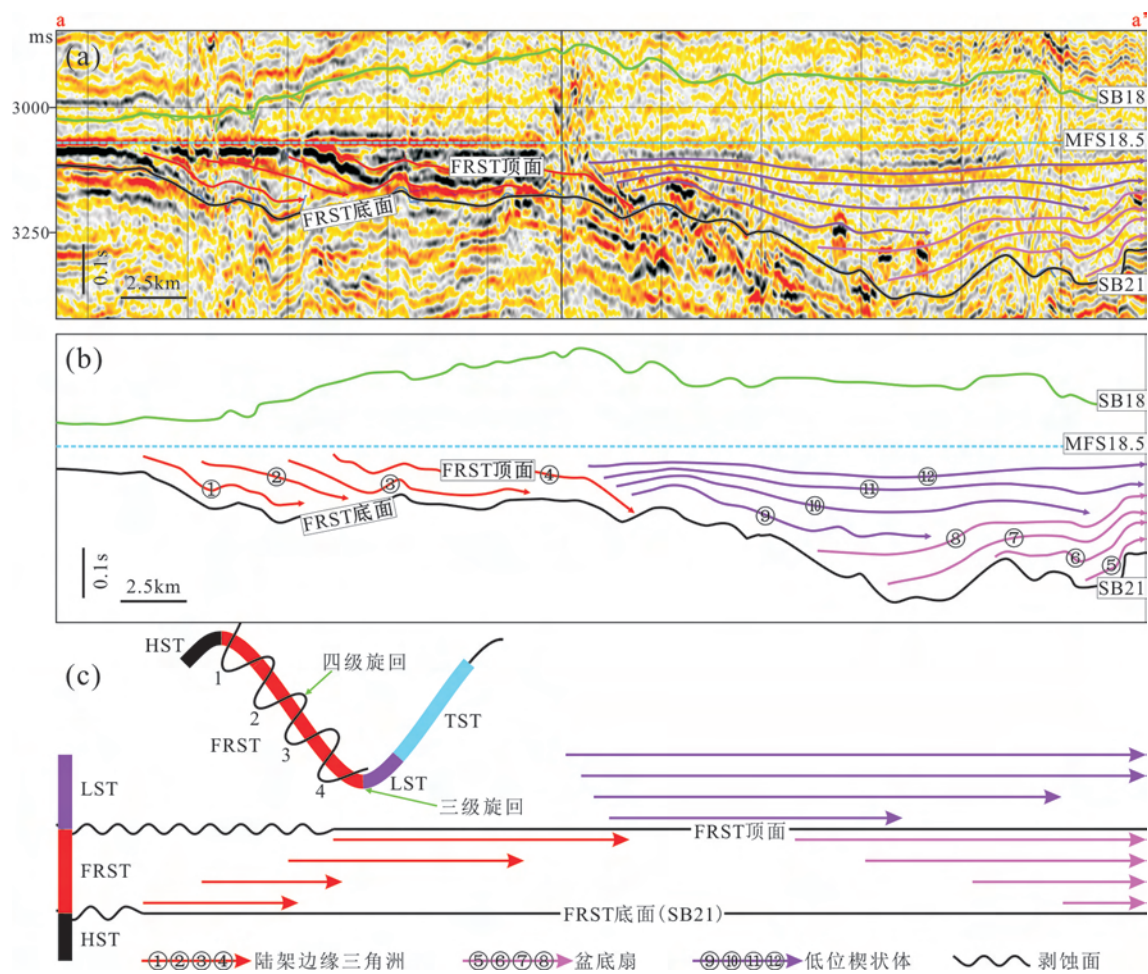


图 7 陆架边缘三角洲的层序演化特征

a.原始地震剖面;b.层序解释的地震剖面;c.层序演化模式

Fig.7 Sequence evolution characteristics of the shelf-edge delta

a. The original seismic profile; b.seismic profiles after sequence stratigraphic interpretation; c.sequence evolution model

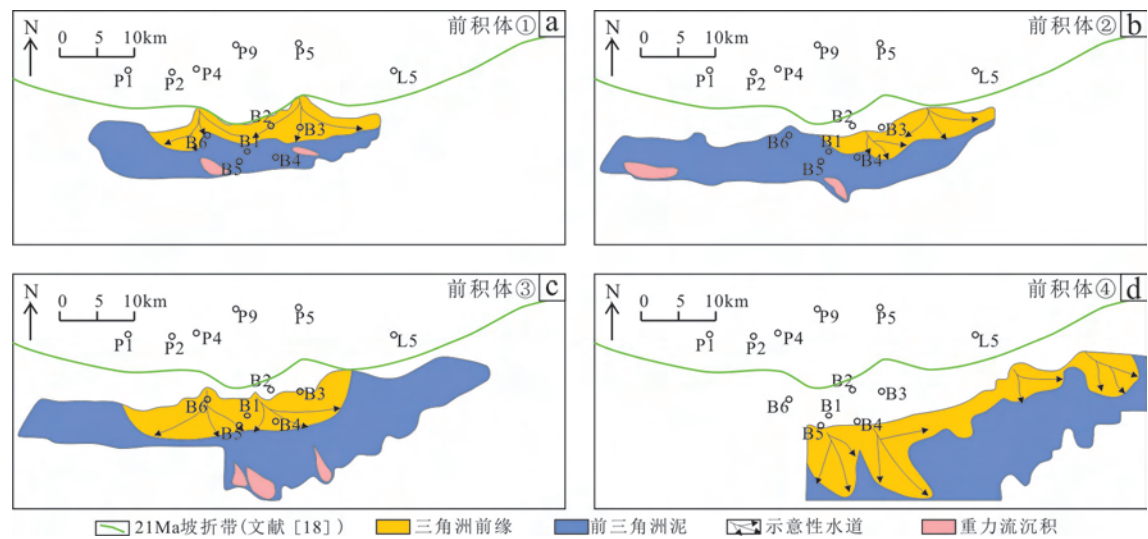


图 8 陆架边缘三角洲沉积演化特征

Fig.8 Sedimentary evolution characteristics of the shelf-edge delta

角洲前缘较第2期三角洲前缘往西部发生了偏移,说明该时期主河口向西发生了移动,也间接证实了第2期陆架边缘三角洲前缘在西部遭受剥蚀的事实(图8c)。第4期陆架边缘三角洲(前积体④)发育位置又比第3期陆架边缘三角洲靠下,发育的范围明显比第3期大,并延伸到了研究区东部,且三角洲前缘发育比较正常,说明该时期在研究区东部可能出现了次河口,且陆架边缘三角洲遭受剥蚀的少(图8d),这可能与该时期强制海退已下降到最低点导致剥蚀能力减弱有关。

3.3 演化模式

在上述层序演化特征和沉积演化特征分析的基础上,对白云凹陷北坡珠江组下段的陆架边缘三角

洲及其相关体系域的沉积层序模式进行了总结。强制海退体系域时期在陆架边缘和上陆坡发育4期陆架边缘三角洲沉积,由于受高角度前积体不稳定的影响,在重力作用下容易发生滑动、滑塌现象,在三角洲前端发育重力流沉积,同时受相对海平面持续下降的驱动,陆架边缘三角洲的沉积物通过沟谷水道被输送到盆底,形成盆底扇沉积(图9a)。随着强制海退体系域的结束,相对海平面开始缓慢上升,此时,低位体系域时期在下陆坡发育斜坡扇或低位楔状体,同时受相对海平面持续上升的影响,对强制海退体系域形成的陆架边缘三角洲进行海侵冲刷、砂体重新分配,形成波浪改造的陆架边缘三角洲(图9b)。

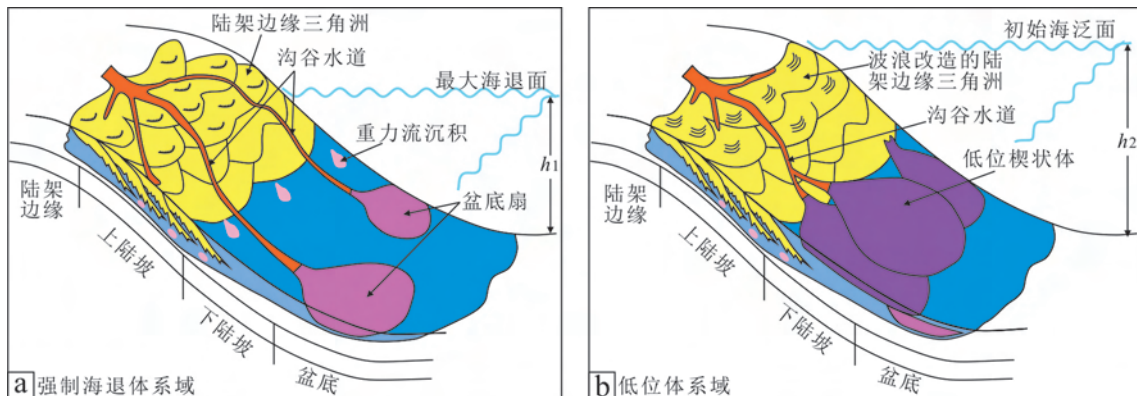


图9 陆架边缘三角洲及其相关体系域的沉积层序模式

Fig.9 Depositional sequence model of the shelf-edge delta and its related system tracts

4 陆架边缘三角洲的主控因素

陆架边缘三角洲的概念源于三角洲的动态变化过程,当海平面下降到陆架坡折附近或者物源供给足够充沛以致于能将大量的碎屑物质搬运至陆架坡折附近沉积形成陆架边缘三角洲,成因上可分为海平面控制型、物源供给控制型和两者混合控制型^[27]。白云凹陷北坡珠江组下段大型陆架边缘三角洲的形成发育与珠江组下段沉积时期相对稳定的构造背景、古珠江携带的充沛物源和强烈的相对海平面下降有关。

4.1 构造运动

南海运动之后,珠江口盆地深水区由早期的断陷、拗陷阶段进入构造活动相对稳定的拗陷沉降阶段,南海的扩张使得南部隆起带、白云凹陷等逐渐变

为浅海陆架环境,接受了分布广泛的珠海组三角洲相和海相沉积^[18]。晚渐新世末期(23.8Ma)南海进一步扩张发生强烈的热沉降,陆架坡折带由23.8Ma以前位于白云凹陷南部突然迁移到白云凹陷北部,并持续维持在该位置,白云凹陷也由浅海陆架环境转变为深海陆坡环境^[19]。因此,白云凹陷北坡珠江组下段沉积形成于构造活动相对稳定的拗陷沉降阶段,具相对稳定的构造沉积背景,而23.8Ma的热沉降作用使陆架坡折带向北迁移,并持续维持在白云凹陷北坡附近,为白云凹陷北坡珠江组下段陆架边缘三角洲的发育奠定了稳定构造环境和地形地貌坡度的条件。

4.2 物源供给

珠江口盆地白云凹陷陆源碎屑物质来源复杂,不同时期差异较大。珠海组沉积时期,物源主要来自华南沿海的花岗岩;珠江组下段沉积时期,物源主

要来自华南地块古老的沉积岩^[18,28]。同时,余烨等^[18]通过沉积地球化学元素分析认为,珠江组、珠江组下段沉积时期物源区处于湿热的气候条件,说明珠江组下段沉积时期物源区母岩风化剥蚀作用比较强烈,为充沛的物质来源提供古气候的条件。此外,Mclennan 等^[29]统计了全球现今主要河流的沉积物通量与化学蚀变指数(CIA)的关系(图10),并建立了沉积物通量($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$) = $225000 / 10^{0.0435 \cdot CIA}$ 的关系式。基于这一关系,选取 P3 井珠江组下段 4 个样品开展了沉积地球化学元素分析,计算化学蚀变指数(CIA)及沉积物通量,珠江组下段时期化学蚀变指数为 48%~71%,沉积物通量为 183~1837 $t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$ (图10),与恒河、科罗拉多河和印度河等大型现代输砂量较大河流的沉积物通量相当,说明珠江组下段沉积时期物源供给比较充沛,为大型陆架边缘三角洲的发育提供了大量的物质基础。

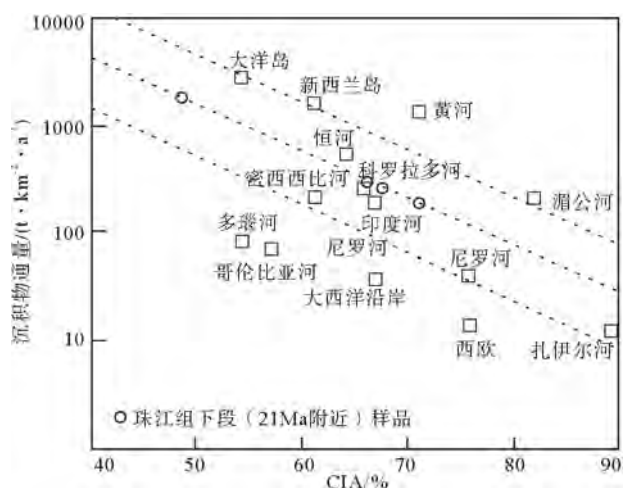


图10 世界主要河流沉积物通量与CIA值

Fig.10 Sediment flux and CIA of main rivers in the world

4.3 海平面变化

海平面的下降使三角洲沉积主体越过陆架地区,到达陆架边缘,甚至上陆坡地区,形成多套叠瓦状向海推进的三角洲前积体,而后随着海平面的快速上升,三角洲向陆退却,形成正常的陆架三角洲。白云凹陷北坡珠江组下段沉积时期,经历了大规模的海平面下降,表现为浮游有孔虫化石丰度和百分含量低、出现近岸类型有孔虫组合、地层岩性偏粗等特征^[30],可见明显的海岸上超点向海盆方向迁移^[20]。上述海平面变化过程在珠江组下段陆架边缘三角洲剖面具有明显的响应特征,表现为新的斜

坡体不断向已形成的三角洲早期斜坡体下超,前积体不断地向海方向延伸,富砂的水下分流河道、河口沙坝等相带逐渐向海推进迁移,形成一套由多个前积体组成的前积斜坡组合体(图4、图7)。该前积斜坡组合体中每一期前积体之间由分流河道或河道冲蚀谷形成的不整合面相互分开,且单个前积体代表一次高频的相对海平面升降旋回(四级旋回)。在高频相对海平面下降时期,单个前积体向海进积,地震剖面上表现为后期前积体的顶超点和下超点相对于前一期前积体更靠海;在高频相对海平面上升时期,后期前积体略向陆发生退积,下超于前期斜坡体沉积之上,表现为砂岩突变为泥岩或自然伽玛曲线突然转折为泥岩基线,即存在水体突然变深的相标志(图4、图7)。

5 结论

(1)白云凹陷北坡珠江组下段陆架边缘三角洲在顺物源方向具有高角度斜交型前积反射结构,缺乏顶积层的海岸平原相。

(2)陆架边缘三角洲在垂直物源方向的陆架坡折带附近发育U型下切谷,三角洲前端靠近盆地中心的地区发育被沟谷水道连通的具丘状反射结构的盆底扇沉积。

(3)陆架边缘三角洲垂向沉积序列以多期反旋回为特征,测井曲线表现为泥岩基线、指状、漏斗形和箱型的组合特点,发育生物扰动、泥质条带变形和滑塌、滑动现象。

(4)陆架边缘三角洲形成于强制海退体系域时期,且三角洲中每个高角度的前积层受更高级次的相对海平面变化(四级旋回)的控制。

(5)陆架边缘三角洲的发育受构造运动、物源供给和海平面变化的控制,构造运动促使白云凹陷北坡珠江组下段时期形成稳定分布的陆架坡折带,珠江组下段时期古珠江携带的充沛物源和该时期强烈的海平面下降使碎屑沉积物能够进积至陆架边缘、甚至陆坡地区形成陆架边缘三角洲沉积。

参考文献 (References)

- [1] Porebski S J, Steel R J. Shelf-margin deltas: their stratigraphic significance and relation to deep-water sands[J]. *Earth Science Reviews*, 2003, 62: 283-326.
- [2] 易雪斐,张昌民,李少华,等.珠江口盆地 21Ma 和 13.8Ma 陆架边缘三角洲对比[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(5): 670-678. [YI Xuefei, ZHANG Changmin, LI Shaohua, et al. Compari-

- son between shelf-margin delta of 21 Ma and 13.8 Ma in Pearl River Mouth Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(5): 670-678.]
- [3] 朱筱敏,葛家旺,宋爽,等.南海北部长昌—鹤山凹陷渐新世陆架边缘三角洲—深水扇地震响应及形成条件[J].古地理学报, 2016, 18(3): 367-380. [ZHU Xiaomin, GE Jiawang, SONG Shuang, et al. Seismic responses and forming conditions of the Oligocene shelf-edge delta and deepwater fan system in Changchang-Heshan sag, northern South China Sea[J]. Journal of Palaeogeography, 2016, 18(3): 367-380.]
- [4] Uroza C A, Stell R. A highstand shelf-margin delta system from the Eocene of West Spitsbergen, Norway[J]. Sedimentary Geology, 2008, 203: 229-245.
- [5] Dixon J F, Stell R, Olariu C. Shelf-edge delta regime as a predictor of deepwater deposition[J]. Journal of Sedimentary Research, 2012, 82: 681-687.
- [6] Catuneanu O, Abreu V, Bhattacharya J P, et al. Towards the standardization of sequence stratigraphy[J]. Earth Science Reviews, 2009, 92: 1-33.
- [7] Posamentier H W, Kolla V. Seismic geomorphology and stratigraphy of depositional elements in deep-water settings[J]. Journal of Sedimentary Research, 2003, 73: 367-388.
- [8] Plink-bjorklund P, Steel R J. Sea level fall below the shelf edge, without basin-floor fans[J]. Geology, 2002, 30: 115-118.
- [9] 庞雄,申俊,袁立忠,等.南海珠江深水扇系统及其油气勘探前景[J].石油学报, 2006, 27(3): 11-15. [PANG Xiong, SHEN Jun, YUAN Lizhong, et al. Petroleum prospect in deep water fan system of the Pearl River in the South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(3): 11-15.]
- [10] 彭大钧,庞雄,黄先律,等.南海珠江深水扇系统的形成模式[J].石油学报, 2007, 28(5): 7-11. [PENG Dajun, PANG Xiong, HUANG Xianlv, et al. Depositional model of Pearl Rive deep water fan system in South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(5): 7-11.]
- [11] 郑荣才,李云,戴朝成,等.白云凹陷珠江组深水扇砂质碎屑流沉积学特征[J].吉林大学学报:地球科学版, 2012, 42(6): 1581-1588. [ZHENG Rongcai, LI Yun, DAI Chaocheng, et al. Depositional features of sand debris fole of submarine fan in Zhujiang Formation, Baiyun Sag[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(6): 1581-1588.]
- [12] 徐强,王英民,吕明,等.陆架边缘三角洲在层序地层格架中的识别及其意义——以南海白云凹陷为例[J].石油与天然气地质, 2011, 32(5): 733-742. [XU Qiang, WANG Yingmin, LV Ming, et al. Identification of the shelf margin delta in sequence stratigraphic frameworks and its significance: a case study of the Baiyun Sag, South China Sea[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(5): 733-742.]
- [13] 王思琦,张忠涛,林畅松,等.白云凹陷东南部晚渐新世陆架边缘三角洲沉积特征及沉积地貌演化[J].东北石油大学学报, 2017, 41(1): 33-42. [WANG Siqi, ZHANG Zhongtao, LIN Changsong, et al. Sedimentary features and sedimentary evolution of the shelf-margin delta in late Oligocene of southeast Baiyun sag[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2017, 41(1): 33-42.]
- [14] 吴景富,徐强,祝彦贺.南海白云凹陷深水区渐新世—中新世陆架边缘三角洲形成及演化[J].地球科学——中国地质大学学报, 2010, 35(4): 681-690. [WU Jingfu, XU Qiang, ZHU Yanhe. Generation and evolution of the shelf-edge delta in Oligocene and Miocene of Baiyun Sag in the South China Sea[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2010, 35(4): 681-690.]
- [15] 陈维涛,施和生,杜家元,等.珠江口盆地陆架坡折区地层岩性圈闭形成条件及发育模式——以珠江组地层为例[J].石油实验地质, 2016, 38(5): 619-627. [CHEN Weitao, SHI Hesheng, DU Jiayuan, et al. Formation conditions and development model of stratigraphic-lithologic traps in shelf break zone, Pearl River Mouth Basin; Zhujiang Formation as an example[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2016, 38(5): 619-627.]
- [16] 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: 1-31. [CHEN Changmin, SHI Hesheng, XU Shice, et al. Original condition of the Tertiary oil and gas accumulation, Pearl River Mouth Basin[M]. Beijing: Science Press, 2003: 1-31.]
- [17] 施和生,秦成岗,高鹏,等.珠江口盆地番禺低隆起—白云凹陷北坡天然气晚期成藏特征[J].中国海上油气, 2008, 20(2): 73-77. [SHI Hesheng, QIN Chenggang, GAO Peng, et al. Late gas accumulation characteristics in Panyu low-uplift and the north slope of Baiyun sag, Pearl River Mouth Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2008, 20(2): 73-77.]
- [18] 余烨,张昌民,李少华,等.白云北坡泥岩地球化学特征及源区性质[J].中国矿业大学学报, 2014, 43(4): 616-625. [YU Ye, ZHANG Changmin, LI Shaohua, et al. Geochemical characteristics of mudstone in the northern Baiyun Depression and provenance nature[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43(4): 616-625.]
- [19] 庞雄,陈长民,邵磊,等.白云运动:南海北部渐新统一中新统重大地质事件及其意义[J].地球论评, 2007, 53(2): 145-151. [PANG Xiong, CHEN Changmin, SHAO Lei, et al. Baiyun Movement, a great tectonic event on the Oligocene-Miocene boundary in the Northern South China Sea and its implications[J]. Geological Review, 2007, 53(2): 145-151.]
- [20] 柳保军,庞雄,颜承志,等.珠江口盆地白云深水区渐新世—中新世陆架坡折带演化及油气勘探意义[J].石油学报, 2011, 32(2): 234-242. [LIU Baojun, PANG Xiong, YAN Chengzhi, et al. Evolution of the Oligocene-Miocene shelf slope-break zone in the Baiyun deep-water area of the Pearl River Mouth Basin and its significance in oil-gas exploration[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(2): 234-242.]
- [21] 李向阳,张昌民,张尚锋,等.珠江口盆地新近系层序划分与发育模式[J].石油天然气学报, 2012, 34(4): 47-52. [LI Xiangyang, ZHANG Changmin, ZHANG Shangfeng, et al. Neogene sequence subdivision and its development pattern in Pearl River Mouth Basin[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2012, 34(4): 47-52.]

- [22] 郭秀蓉,武强,邱燕,等.南海曾母盆地南部陆架边缘三角洲沉积特征[J].海洋地质与第四纪地质,2006,26(4):1-6.[GUO Xiurong, WU Qiang, QIU Yan, et al. Analysis of the shelf-margin delta in the south of Zengmu basin, South China Sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2006, 26(4): 1-6.]
- [23] Moller L K, Rasmussen E S, CLAUSEN O R. Clinoform migration patterns of a Late Miocene delta complex in the Danish Central Graben; implications for relative sea-level changes [J]. Basin Research, 2009, 21(5): 704-720.
- [24] Aiello, Budillon. Lowstand prograding wedges as fourth-order glacio-eustatic cycles in the Pleistocene continental shelf of Apulia (southern Italy) [J]. SPEM Special Publication, 2004, 81: 215-230.
- [25] Plink-bjorklund P, Mellere D, Sterl R J. Turbidite variability and architecture of sand-prone, deep-water slopes: Eocene clinoforms in the central basin, spitsbergen [J]. Journal of Sedimentary Research, 2001, 71: 895-912.
- [26] 赵春晨,刘豪,张帅,等.断陷湖盆沉积层序演化模式及主控因素分析[J].科学技术与工程,2017,17(17):39-49.[ZHAO Chunchen, LIU Hao, ZHANG Shuai, et al. The evolution model of depositional sequences of rift lacustrine basin and analysis on its main controlling factors [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(17): 39-49.]
- [27] 曾清波,陈国俊,张功成,等.珠江口盆地深水珠海组陆架边缘三角洲特征及其意义[J].沉积学报,2015,33(3):595-606.[ZENG Qingbo, CHEN Guojun, ZHANG Gongcheng, et al. The shelf-margin delta feature and its significance in Zhuhai Formation of deep-water area, Pearl River Mouth Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(3): 595-606.]
- [28] Yu Y, Zhang C M, Li S H, et al. Influences of Tibetan Plateau uplift on provenance evolution of the paleo-Pearl River [J]. Chinese Journal of Geochemistry, 2015, 34(2): 208-218.
- [29] McLennan S M, Hemming S, Mcdaniel D K, et al. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics [C]// Jonnson M J, Basu A. Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments. [S.l.]: Geological Society of America, Boulde CO, 1993: 21-40.
- [30] 秦国权.珠江口盆地新生代晚期层序地层划分和海平面变化[J].中国海上油气(地质),2002,16(1):1-10.[QIN Guoquan. Late Cenozoic sequence stratigraphy and sea-level changes in Pearl River Mouth Basin, South China Sea [J]. China Off-shore Oil and Gas (Geology), 2002, 16(1): 1-10.]