

# 珠江口盆地中北部中新统珠江组浪控三角洲沉积时空演化模拟

杨慧玲<sup>1</sup>,张青青<sup>2</sup>,衡立群<sup>3</sup>,王健<sup>2</sup>,刘太勋<sup>2</sup>,刘建良<sup>2</sup>,刘可禹<sup>2,4</sup>

1 中海石油(中国)有限公司天津分公司; 2 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院;

3 中海石油(中国)有限公司深圳分公司; 4 青岛海洋科学与技术国家实验室

**摘要** 基于沉积背景、高分辨率层序地层格架及沉积微相展布分析,应用沉积正演模拟方法,综合利用地震、测井、岩心等资料,开展沉积作用和沉积过程的三维时空演化模拟,定量恢复了珠江口盆地中北部中新统珠江组浪控三角洲沉积演化过程,探讨了沉积环境与波浪参数对砂体展布的影响。结果表明:①研究区珠江组沉积期的沉积微相随基准面的变化呈规律性演化,滨线呈现先向陆迁移、再向海迁移的趋势。②珠江组沉积期的波浪作用较强,波浪角度为近南东方向,波浪作用对三角洲砂体展布具有明显影响。随着波浪高度增加,波浪阻碍三角洲河口细粒沉积物堆积的作用增大,并将其搬运至深水区,泥质沉积物趋向沉积于波基面以下区域,波基面以上区域砂质碎屑含量较高。波浪作用入射角度发生倾斜,会导致三角洲在演化过程中产生不对称的沉积和形态。③有利储层砂体主要发育于滨岸线附近。沉积正演模拟为定量恢复沉积演化过程提供更为直观的方法,且在确定浪控三角洲潜在形态方面具有预测作用。

**关键词** 浪控三角洲;沉积演化;正演模拟;珠江组;珠江口盆地

**中图分类号**:TE121.3 **文献标识码**:A

**引用**: 杨慧玲,张青青,衡立群,等. 珠江口盆地中北部中新统珠江组浪控三角洲沉积时空演化模拟[J]. 海相油气地质, 2024,29(3): 291-302.

YANG Huiling, ZHANG Qingqing, HENG Liqun, et al. Simulation of sedimentary spatiotemporal evolution of wave-dominated delta of the Miocene Zhujiang Formation in north-central Pearl River Mouth Basin [J]. Marine origin petroleum geology, 2024, 29(3): 291-302.

## 0 前言

三角洲对陆地和海洋环境的变化极为敏感<sup>[1-2]</sup>,在演化过程中,波浪作用、潮汐作用和河流作用比例的变化,被认为是其形态和沉积相结构的主要控制因素<sup>[3]</sup>。浪控三角洲主要形成于波浪作用较强、潮汐作用较弱的内海。在世界上许多成熟盆地中,浪控三角洲砂体蕴藏着丰富的油气资源<sup>[4-6]</sup>,其岸线砂岩含量高,储层质量好,沿沉积走向具有连续性,是油气勘探的重要目标<sup>[7]</sup>。

珠江口盆地为南海北部重要的新生代含油气盆地,前人针对该盆地中北部中新统珠江组浪控型三角洲做了大量的研究<sup>[8-13]</sup>,但大多数是利用定性手段描述三角洲体系的沉积及演化特征,囿于该

区钻井资料少的现状,很难进行精准的砂体空间展布预测。此外,三角洲的沉积是一个动态且复杂的过程,受到多种地质因素(海平面变化、构造沉降、水动力条件及沉积物供给等因素)的共同控制及影响,而且在浪控三角洲沉积过程中,波浪作用被认为是造成内大陆架和中大陆架沉积物移动的主要原因之一<sup>[14]</sup>,然而以往的研究没有定量地探讨波浪参数对该区浪控三角洲沉积演化过程的影响及控制作用。

沉积地层在时间域内存在的不连续性特征已被广泛认识<sup>[15-17]</sup>。目前沉积学领域主要还是在深度域内对沉积地层记录进行研究,很少将地层从深度域定量转换为时间域进行分析研究,同时也缺少基于模拟结果的地层完整性及其影响因素定量探

收稿日期:2023-12-08;改回日期:2024-06-11

本文受中国科学院战略性先导科技专项(A类)(编号:XDA14010401)、中国海洋石油总公司“十三五”科技重大项目(CNOOC-KJ 135 ZDXM 22 LTD 02 SZ 2016)联合资助

**第一作者**: 杨慧玲,硕士,工程师,主要从事沉积学及储层地质学的研究工作。通信地址:300452 天津市滨海新区海川路2121号海洋石油大厦;E-mail: yanghl28@163.com

**通信作者**: 刘可禹,博士,教授,主要从事沉积定量模拟及油气成藏等方面的研究。通信地址:266580 山东省青岛市黄岛区长江西路66号;E-mail: liukeyu@upc.edu.cn

讨<sup>[18]</sup>。水槽物理模拟实验和放射性同位素定年是目前可见的时间域内地层分析方法,但均存在一定的局限性。水槽物理模拟实验技术通过频繁的过程记录方式,可以将整个沉积过程在时间域内进行恢复记录,依据结果进而研究地层在时间域内的完整性<sup>[17]</sup>,但实际地质过程是无法通过物理模拟实验来恢复的。放射性同位素定年法可以确定沉积地层的绝对年龄,但该方法在将某一段地层转换为时间域时,对于年代较老地层的定年有较大误差,且无法准确确定出薄层地层的沉积时间<sup>[15]</sup>。部分学者利用数值模拟方法,如利用 Sedpak<sup>[19]</sup>和 Wheeler-Lab<sup>[20]</sup>模拟软件,将深度域层序地层转换为时间域地层剖面。但 Sedpak 软件是一个二维剖面模拟工具,应用几何方程模拟沉积和侵蚀作用过程,不能在三维空间下进行沉积演化过程模拟;WheelerLab 软件根据已有的地震剖面反演时间轴上的二维地层剖面进行模拟,不是正演模拟工具,无法准确恢复沉积物的沉积演化过程。

基于以上问题,本文在前人研究成果的基础上,应用沉积正演模拟的研究手段,结合沉积背景、高分辨率层序地层格架及沉积微相展布分析,开展

沉积作用和沉积过程的三维模拟,定量恢复珠江口盆地中北部中新统珠江组沉积演化过程,探讨浪控三角洲砂体的时空展布和演化规律。该方法在确定浪控三角洲潜在形态方面具有预测作用,可为油气勘探研究提供借鉴。

## 1 概况

珠江口盆地是在前古近系基底上发展起来的一个新生代大陆边缘伸展盆地<sup>[21-22]</sup>,位于中国南海北部陆缘,盆地面积约为  $26.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,整体呈北东—南西向展布,由北向南可划分为5个二级构造单元,即北部断阶带、北部坳陷带、中央隆起带、南部坳陷带和南部隆起带<sup>[23]</sup>(图 1a)。作为新生代快速沉降盆地,珠江口盆地新生代主要经历了神狐运动、珠琼运动一幕、珠琼运动二幕、南海运动、白云运动及东沙运动等6次重要的构造运动<sup>[24-26]</sup>,盆地在古近纪和新近纪主要发育陆源碎屑沉积,地层自下而上依次为古近系文昌组、恩平组和珠海组,新近系珠江组、韩江组、粤海组和万山组,以及第四系<sup>[27-28]</sup>(图 1b)。

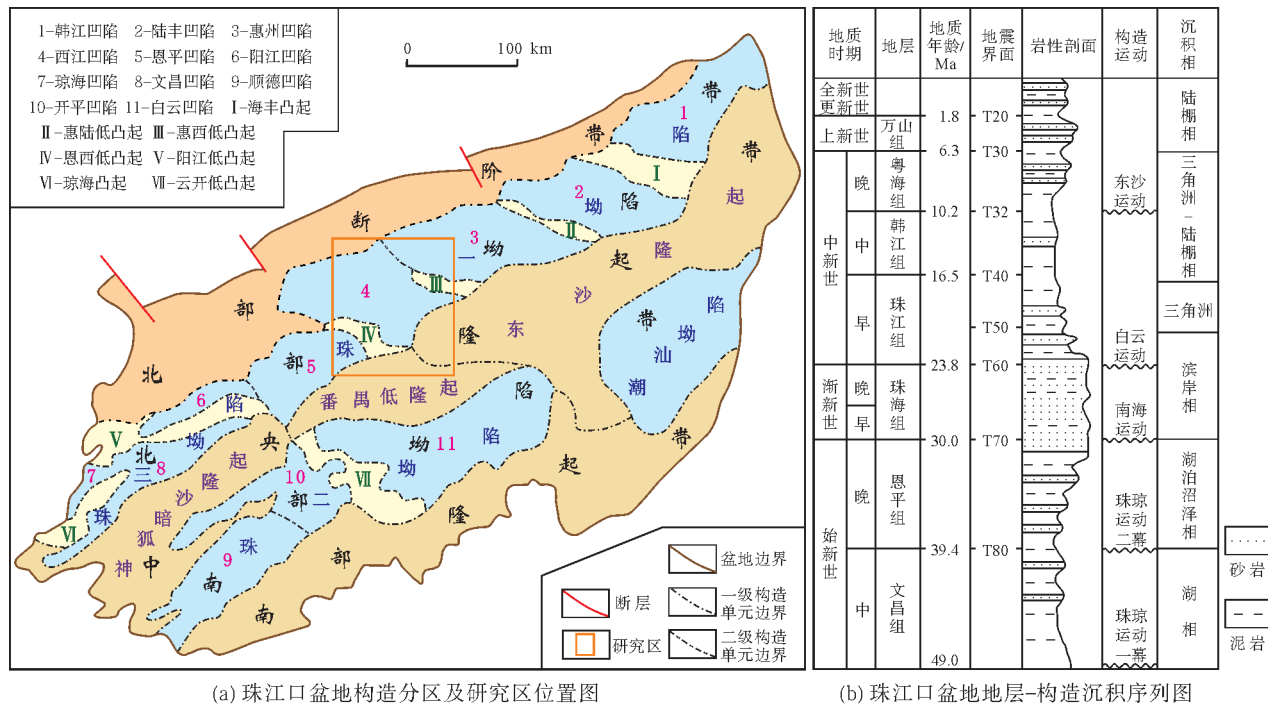


图1 研究区构造位置与地层综合柱状图(据文献[27]修改)

Fig.1 Structural location map and comprehensive stratigraphic column of the study area(cited from reference [27], modified)

研究区主体位于珠江口盆地陆架区域,构造相对简单,整体上平缓稳定,覆盖西江凹陷、惠州凹陷西南部、恩平凹陷西部及番禺低隆起北部地区。中

新统珠江组对应地震反射界面T60~T40之间的地层,地质年龄介于23.8~16.5 Ma,埋藏较浅且储层物性好,以三角洲前缘沉积为主,发育水下分流河道、

河口坝、浪成砂坝、分流间湾和席状砂等沉积微相。研究层段自下而上为一个完整的二级层序,可划分为5个三级层序SQ1—SQ5,每个三级层序对应的地质年龄分别是:SQ1对应23.8~21 Ma, SQ2对应21~18 Ma, SQ3对应18~17.5 Ma, SQ4对应17.5~17.1 Ma, SQ5对应17.1~16.5 Ma。

## 2 方法和参数

### 2.1 沉积正演数值模拟方法

本次模拟使用的SedSim模拟软件,于20世纪80年代由美国斯坦福大学最先研发,是以简化的水动力学动量方程和连续方程为核心算法,使用标记网格法(也就是使用流体元素代替流体和沉积物在流体中运动),且考虑多种地质作用过程的沉积领域专业正演模拟软件<sup>[29]</sup>。SedSim模拟软件主要基于沉积过程的约束,遵循能量守恒、动量守恒以及质量守恒原则,综合考虑古地貌、古气候、水动力等条件对沉积相的时空分布特征进行预测,可以进行多尺度的沉积模拟,具有比地震分辨率高的特征。它包含多种模块,这些模块可以单独运行,也可以综合起来模拟复杂的地质过程<sup>[30]</sup>。

### 2.2 模拟参数获取

珠江组沉积时期,研究区西北部的古珠江携带沉积物进入南海北部陆缘,研究区发育陆源碎屑沉积。模拟过程中不考虑碳酸盐沉积,设置的模拟主要参数包括:时间及网格、古地貌、构造沉降、海平面变化、沉积物供给及波浪作用等参数。

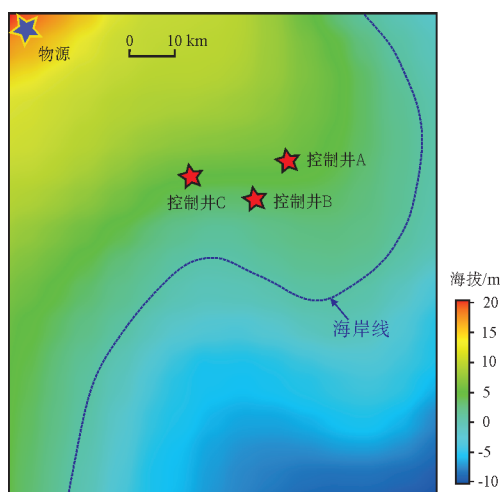
#### 2.2.1 时间及网格

本次研究设置的模拟时间为中新统珠江组沉积时期23.8~16.5 Ma,沉积模拟过程中每10 000 a输出一个模拟结果;流体采样间隔表征流体元素从源区释放的频率,设置每2 000 a由源区释放一次流体和沉积物。网格模块限定了模拟的区域,研究区范围设置为92.0 km×104.0 km的矩形区域(图1),网格间距为1 000.0 m。

#### 2.2.2 古地貌

古地貌是控制盆地沉积体系发育与分布的关键因素之一,也是控制后期油藏储盖层发育和分布的主要因素之一<sup>[31]</sup>。研究区主体位于珠江口盆地陆

架区域,整体上平缓稳定。此次模拟选取珠江组沉积底界面(T60,地质年龄23.8 Ma)至该层序最大海泛面(T56,地质年龄22.0 Ma)之间不存在大规模剥蚀的地层为对象开展古地貌的恢复。采用地震解释成果并结合钻井数据校正的方法,进行构造与剥蚀量恢复、残留厚度校正;借助压实前后地层骨架体积不变的原理,获取压实方程,进行脱压实校正;结合研究区古水深分布进行古水深校正<sup>[32]</sup>。通过上述方法恢复得到研究区模拟古地貌(图2):珠江组沉积古地貌整体平缓,表现为西北及北部高,东南及南部低的特征,高处物源区与低洼处相对高差约为32.0 m,平均坡度为0.02°。



注:模拟区范围为92.0 km×104.0 km,物源位于模拟区西北角。

图2 珠江口盆地中北部珠江组沉积早期(23.8~22.0 Ma)初始沉积古地貌模拟结果

Fig. 2 Simulation result of initial sedimentary paleogeomorphology of the early Zhujiang period (23.8–22.0 Ma) in north-central Pearl River Mouth Basin

#### 2.2.3 构造沉降

构造沉降为地壳或岩石圈动力学演化过程中产生的盆地地形负向演化过程<sup>[33–34]</sup>,是控制盆地构型及盆地底部形态的基本要素,进而对沉积物的分布模式产生影响<sup>[35]</sup>。珠江口盆地内分布有较多的、结构特征差异性较大的构造单元,研究区位于宽缓的大陆架边缘,珠江组沉积时期构造相对简单,发育的断层均为后期断层。王聪等<sup>[36]</sup>对珠江口盆地各构造单元沉降的研究所获取的沉降史及沉积通量表明,珠江组沉积期珠江口盆地平均构造沉降速率为36 m/Ma,而研究区所覆盖地区中的惠州凹陷、西江凹陷及恩平凹陷沉降速率远高于平均沉降速率,为主要沉降中心,番禺低隆起沉降速率接近于平均



沉降速率,为次级沉降中心。马明等<sup>[37]</sup>对珠江口盆地的整体及不同构造单元沉降演化特征的研究表明,珠江组上段(18.5~16.5 Ma)沉降速率较珠江组下段(23.8~18.5 Ma)明显增大。基于以上研究成果,初步确定本次模拟所输入的研究区构造沉降速率,结合研究区的三级层序的划分及单井实际沉积厚度数据做约束,将模拟的珠江组构造沉降设置为4期(图3)。总体上,研究区西北部沉降幅度小,东南部沉降幅度大。第1期(23.8~21.0 Ma)构造沉降

速率整体偏小,具有西北小、向东南逐渐增大的趋势;第2期(21.0~18.0 Ma)构造沉降速率较第1期略有增大,整体变化趋势与第1期相近,但中南部沉降速率增大明显;第3期(18.0~17.1 Ma)构造沉降速率迅速加快,西南部构造沉降速率较第1期和第2期增大明显,整体呈现西北小、南部及东南部沉降速率大的分布格局;第4期(17.1~16.5 Ma)构造沉降速率在西北部继承了第3期,而南部及中南部略有减小。

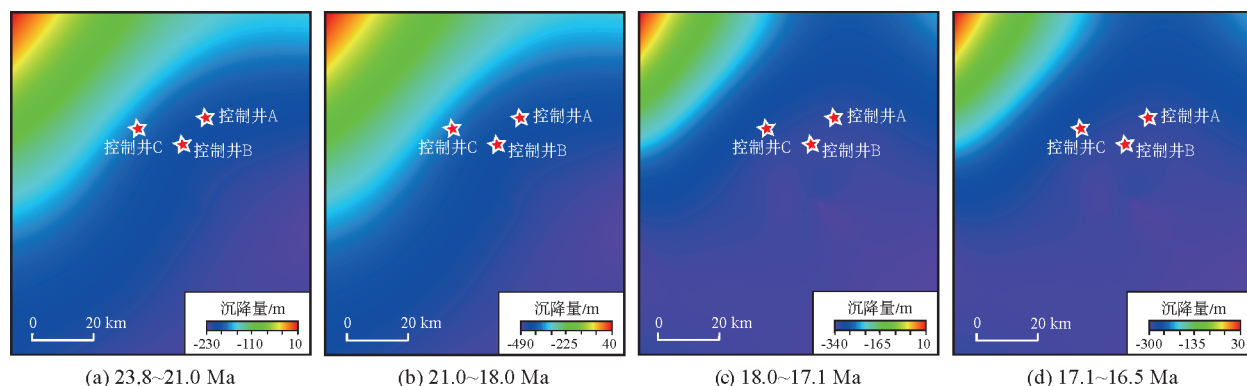


图3 珠江口盆地中北部珠江组沉积期构造沉降量设置

Fig. 3 Setting maps of tectonic subsidence during Zhujiang period in the north-central Pearl River Mouth Basin

## 2.2.4 海平面变化曲线

海平面升降在研究海相沉积及建立层序地层格架过程中十分重要,是沉积环境和砂体发育的主要影响因素之一。珠江口盆地海域属于南海海域的一部分,田世峰等<sup>[38]</sup>通过研究认为珠江口盆地中新世地层旋回受天文轨道周期变化驱动,研究区沉积速率受到米兰科维奇旋回周期控制。结合前人研究成果<sup>[39-40]</sup>,本文选取 Haq 的全球海平面曲线<sup>[41]</sup>,叠加了高精度米兰科维奇旋回,建立应用于沉积正演模拟的高分辨率海平面变化曲线(图4)。该曲线整体符合全球海平面曲线的低频变化规律,同时在此基础上叠加了变化周期为5 000 a的高频海平面变化。

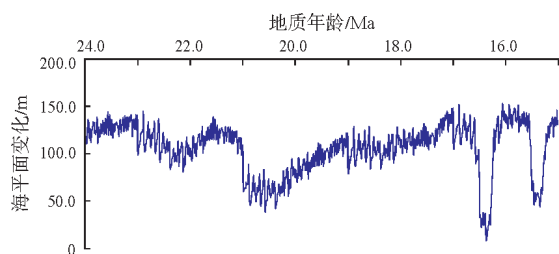


图4 沉积正演模拟输入的海平面曲线

Fig. 4 Sea level curves used for simulations

## 2.2.5 沉积物源

珠江组沉积时期,珠江口盆地珠一坳陷在古珠江、古韩江和东沙隆起3大物源的供应下发育了三角洲、滨岸、浅海陆棚以及碳酸盐台地4大沉积体系<sup>[42]</sup>。研究区珠江组沉积期的物源基本来自于北部和西部的古珠江体系,沉积相带以三角洲沉积为主。珠江年径流量为3 300多亿立方米,居全国江河水系第2位,仅次于长江,含沙量为0.11~0.64 kg/m<sup>3</sup>。研究区主要发育灰白色、棕褐色中—粗砂岩,局部含砾,粒度整体较粗,平均粒径为0.415 mm,细砂岩和泥质粉砂岩也较发育,泥岩多呈灰色、浅灰色和浅灰绿色,含少量氧化的泥岩,未见深色以及棕色泥岩,这反映研究区为弱还原—弱氧化的浅水—近岸的短暂暴露的沉积环境。

本次模拟中,依据研究区沉积微相、目的层段可容纳空间与沉积物供给量比值平衡原理、实际单井粒度分析结果,参考现今主要江河的流量、含泥沙量,以及目的层岩性特征,设置物源位置于研究区西北部地势较高处(图2),根据模拟地质时期及高频海平面变化曲线,设置速度、排放量、浓度(含沙量)以及物源输出沉积物各粒径组分的百分含量(表1)。

表1 沉积物源参数设置  
Table 1 Parameters of the clastic sediments used in the simulations

地质年龄/Ma	三级层序	速度矢量 $v_x/$ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	速度矢量 $v_y/$ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	排放量/ ( $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ )	浓度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	沉积物组成 /%			
						粗粒	中粒	细粒	泥质
23.8~21.0	SQ1	0.51	-0.69	25	0.60	20	30	30	20
21.0~18.5	SQ2	0.45	-0.72	54	0.58	10	15	25	50
18.5~18.0	SQ2	0.48	-0.68	380	0.66	15	20	30	35
18.0~17.5	SQ3	0.52	-0.75	290	0.61	13	18	30	39
17.5~17.1	SQ4	0.51	-0.71	306	0.59	15	17	27	41
17.1~16.5	SQ5	0.55	-0.71	450	0.62	12	18	28	42

2.2.6 波 浪

在浪控三角洲沉积过程中,波浪作用被认为是造成内大陆架和中大陆架沉积物移动的主要原因之一<sup>[14]</sup>。受波浪作用的影响,三角洲向盆地方向进积的速率受到限制<sup>[43]</sup>,且在其沉积相和形态方面表现出不同程度的不对称性。波浪阻碍了三角洲河口细粒沉积物的堆积,限制了河口沙坝的生长,同时趋于将三角洲岸线塑造造成高含沙量的尖头状,整体平行于海岸线,并在其河道周围呈不对称形态发育大型弧形且界限分明的浪成砂坝<sup>[7,44]</sup>。波浪在控制三角洲朵叶体宽度及形态方面起主导作用,波浪能量越强,浪控三角洲的尖头状朵叶体越发育,同时波浪作用的倾斜度会使沉积物的搬运产生差异,从而导致不对称三角洲发育,形成障壁岛及嘴状沙洲<sup>[43, 45]</sup>。

研究区于珠江组沉积时期位于大陆架边缘,古板块位置与现今相似,结合沉积学特征及地貌特征分析认为,珠江组沉积过程中遭受较强波浪作用的影响,波浪作用方向主要在南西—北东向到南东—北西向( $135^{\circ}\sim 225^{\circ}$ )的范围。为探讨波浪作用参数在研究区三角洲沉积过程中对砂体展布的影响,此次模拟针对波浪高度、波基面及波浪角度参数,设置了系列测试实验(表2),模拟参数的设置依据珠江

表2 用于模拟对照的波浪参数  
Table 2 Wave parameters used for controlled simulations

对照参数	测试编号	模拟参数		
		波浪高度/m	波基面/m	波浪角度/ $^{\circ}$
波浪高度	H-01	0.2	10.0	135
	H-02	0.8	10.0	135
	H-03	2.0	10.0	135
波基面	B-01	2.0	10.0	135
	B-02	2.0	20.0	135
	B-03	2.0	50.0	135
波浪角度	A-01	2.0	10.0	135
	A-02	2.0	10.0	180
	A-03	2.0	10.0	225

组沉积时期研究区地貌特征、波基面的经验范围值<sup>[46]</sup>及现今我国近海波浪高度分布数据<sup>[47]</sup>。

3 模拟结果及合理性

3.1 合理性分析

在输入参数优化的基础上,对模拟所生成的地震剖面、三级层序地层沉积厚度、多口控制井自然伽马( $GR$ )曲线、平面内地层厚度与实际资料进行了对比检验。地层泥质含量的高低决定了 $GR$ 测井曲线幅值的变化,因此可利用沉积模拟输出虚拟井的泥质含量,计算得到控制井的 $GR$ 测井曲线值,与该井真实的 $GR$ 测井曲线值对比,作为验证模拟结果准确性的指标之一。以研究区内控制井A为例,该井珠江组垂向沉积厚度为1 145.6 m(深度范围1 564.5~2 710.1 m),图5为控制井A实际的 $GR$ 曲线与模拟结果生成的 $GR$ 曲线的对比,可见结果吻合度较高,在误差允许范围内,因此认为23.8~16.5 Ma模拟结果符合研究区真实情况。沉积厚度对比是检验模拟结果准确性的基础指标之一。表3为研究区内3口控制井的三级层序垂向模拟地层沉积厚度,与该层序实际测井地层沉积厚度对比,结果显示各三级层序厚度误差均小于10%,准确率平均可达95%。通过以上对比,证实模拟结果与实际数据具有很高的吻合度,验证了本次正演模型的准确性,以及将其应用于恢复研究区目的层沉积演化的可能性。

3.2 基于正演模拟的沉积微相演化

研究区中新统珠江组(23.8~16.5 Ma)自下而上的每一个三级层序(SQ1—SQ5)包含2~5个四级层序,共发育MSC1—MSC18共18个四级层序(图6)。沉积正演模拟结果显示,该时期研究区沉积微相随着二级层序基准面的变化呈规律性演化,且滨线呈现由向陆迁移、再向海迁移的趋势(图6)。

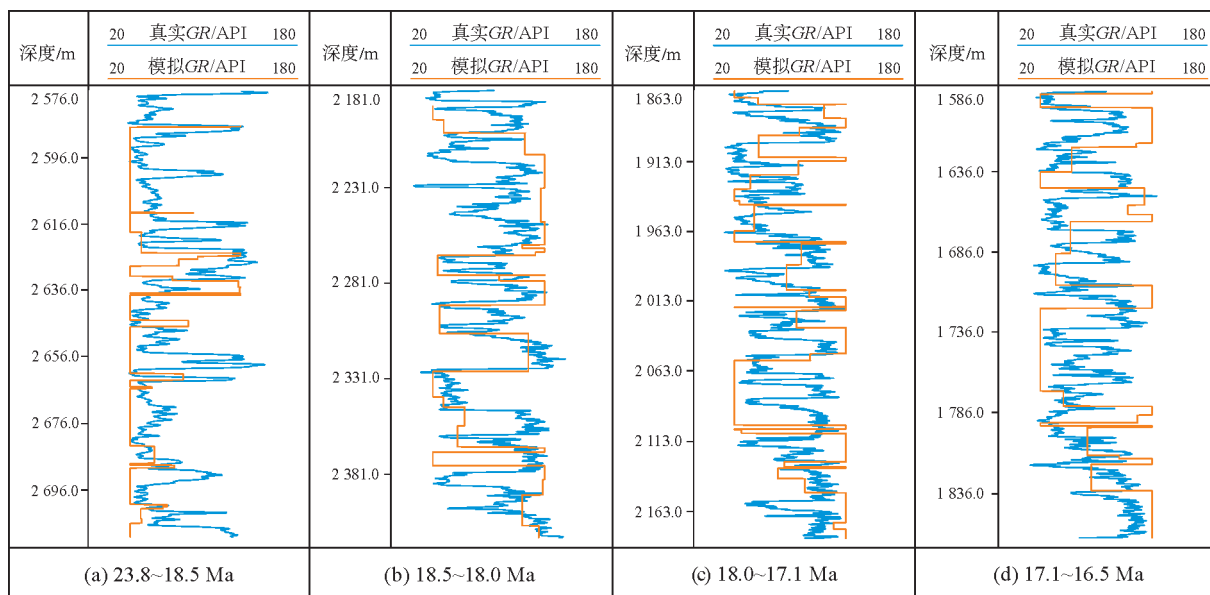


图5 控制井A的测井GR曲线与模拟输出GR曲线对比

Fig. 5 Comparison of logging GR curves and simulated pseudo-GR curves of Well A

表3 研究区内3口控制井的三级层序地层沉积厚度对比

Table 3 Comparison of simulated and actual thicknesses of third-order sequences of three wells in the study area

井号	三级层序	地质年龄/Ma	模拟厚度/m	实际厚度/m	误差/%
控制井A	SQ5	17.1~16.5	298.7	276.3	8.1
	SQ3—SQ4	18.0~17.1	306.0	318.3	3.9
	SQ2	21.0~18.0	397.5	395.5	0.5
	SQ1	23.8~21.0	143.3	133.1	7.7
控制井B	SQ5	17.1~16.5	301.8	276.3	9.2
	SQ3—SQ4	18.0~17.1	307.3	318.3	3.5
	SQ2	21.0~18.0	402.4	395.5	1.7
	SQ1	23.8~21.0	140.8	133.1	5.8
控制井C	SQ5	17.1~16.5	300.1	276.3	8.6
	SQ3—SQ4	18.0~17.1	309.5	318.3	2.8

在二级层序基准面上升期(MSC1—MSC4)沉积过程中(图6a中23.8~18.5 Ma,图6b—6c中22.67~18.69 Ma),研究区主要发育三角洲平原沉积。在二级层序上升半旋回早期(MSC1、MSC2),海平面处于低位状态,水下分支河道微相发育,随着海平面逐渐上升,水下分流河道沉积砂体逐渐衰退,浪成砂坝砂体逐渐扩大;在二级层序上升半旋回晚期(MSC3、MSC4),海平面处于中—高位状态,浪成砂坝微相占主体地位,随着海平面继续上升,水下分流河道砂体逐渐逆着物源方向衰退,浪成砂坝砂体持续扩大,沉积厚度较薄,到二级层序基准面转换期,水深达最大。

随后在二级层序基准面下降期(MSC5—MSC18)沉积过程中(图6a中18.5~16.5 Ma,图6b—6c中18.21~16.87 Ma),随着相对海平面的下降,水深有减小趋势。在二级层序下降半旋回早期

(MSC5—MSC7),海平面处于高位状态,以发育席状砂与浪成砂坝微相为主,随着海平面下降,水下分流河道砂体开始发育并逐渐扩大,伴随着浪成砂坝砂体的逐渐衰退;在二级层序下降半旋回中—晚期(MSC8—MSC18),海平面由高位转为低位状态,水下分流河道微相开始占主导,随着海平面的下降,水下分流河道砂体逐渐扩大,浪成砂坝砂体及河口坝逐渐缩小,但均以三角洲前缘沉积为主,砂体沉积厚度逐渐增加。

结合沉积正演模拟结果以及研究区沉积微相展布特征,认为中新统珠江组沉积期发育浪控三角洲:当海平面处于高位时,浪成砂坝微相、席状砂大面积展布,呈大型条带状,水下分支河道在物源方向局限发育甚至不发育;当海平面处于低位时,水下分流河道微相占主体,分流间湾分布于河道之间,浪成



砂坝微相在河道前端呈零星条带状展布。总体来说,水下分流河道方向与物源方向一致,分流间湾分

布在河道之间,浪成砂坝在垂直物源的方向呈条带状展布,沉积微相展布随着海平面的升降而变化。

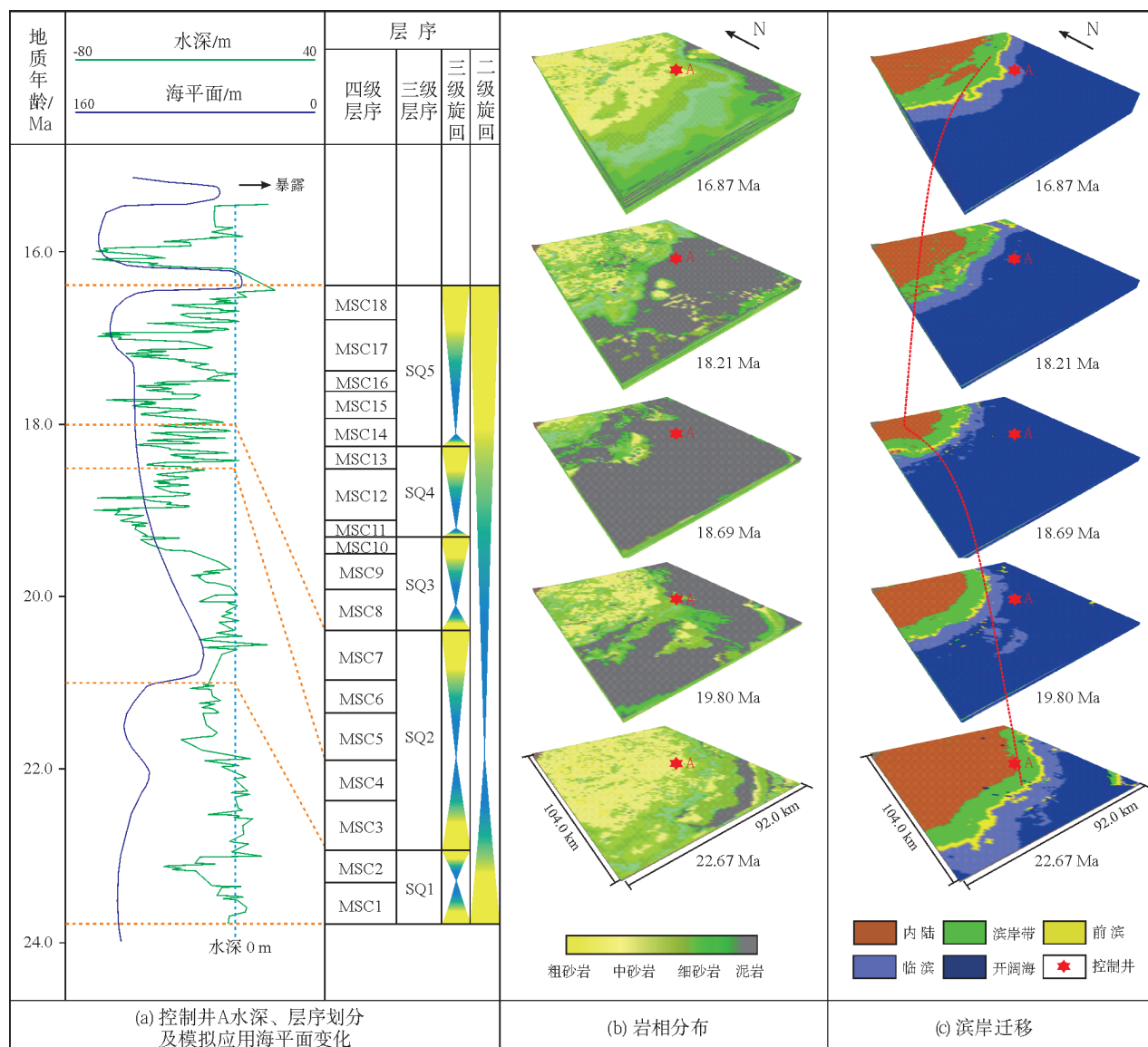


图6 珠江口盆地中北部珠江组沉积期正演模拟结果

Fig. 6 Sedsim simulation output of sedimentary evolution during Zhujiang period in the north-central Pearl River Mouth Basin

## 4 讨论

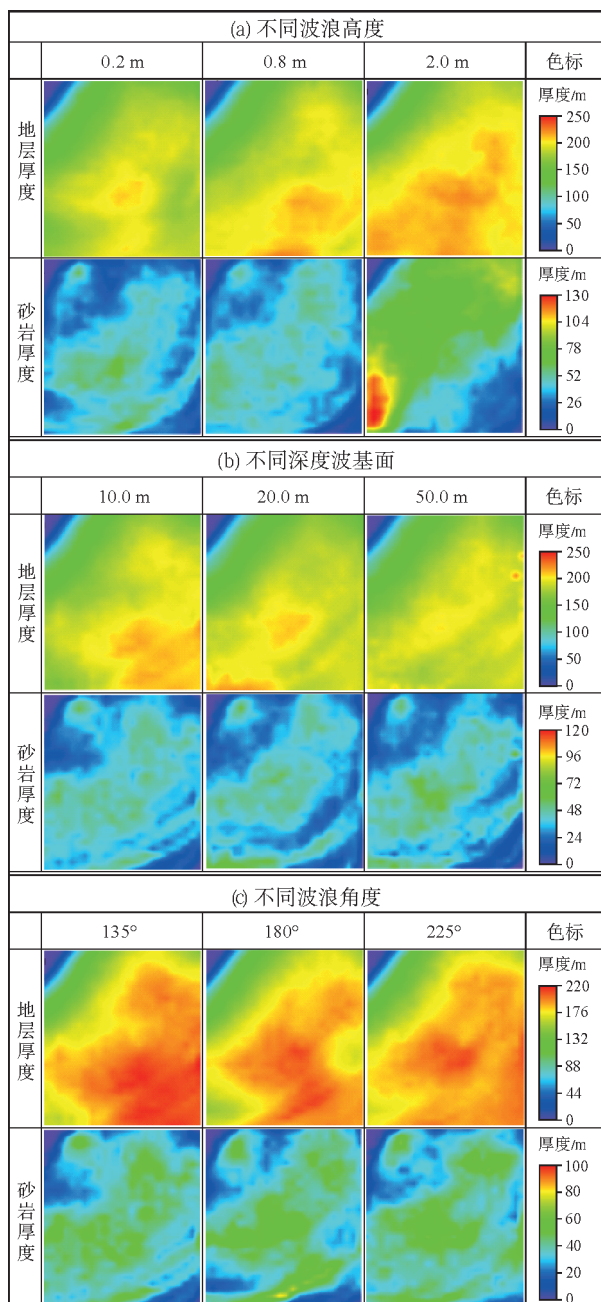
### 4.1 波浪参数对砂体展布的影响

为明确波浪作用参数在三角洲沉积过程中对沉积砂体展布的影响,利用沉积正演模拟软件进行了一系列波浪参数的模拟测试实验。在控制其他参数不变的条件下,单一改变波浪高度、波浪角度或波基面参数,模拟结果表明,波浪参数的变化在浪控三角洲演化过程中对砂体展布起着重要的控制作用。

沉积物的改造程度受波浪高度的影响显著。图

7a所示为模拟获得的不同波浪高度作用下研究区珠江组沉积期21.0~18.5 Ma的地层厚度及砂岩厚度分布。波浪高度为0.2 m时,研究区整体地层厚度较薄,约为130.0~200.0 m,中部分布略厚,砂岩厚度分布趋势与地层厚度相似,约为25.0~80.0 m,中部及南部略厚;当波浪高度增加至0.8 m,研究区地层厚度增加至150.0~230.0 m,砂岩厚度分布与波浪高度0.2 m时相比变化不明显;波浪高度增加至2.0 m时,研究区地层厚度增加至160.0~250.0 m,远离物源区的中部、南部及东南部地层厚度平均达230.0 m,砂

岩厚度分布趋势与波浪高度 0.2 m 及 0.8 m 时相比变化明显,砂质沉积物在近物源区堆积,厚度略大,细粒沉积物被搬运至远物源区。以上模拟结果显示,波浪高度越大,波浪阻碍三角洲河口细粒沉积物的堆积作用越显著,更大程度将细粒沉积物搬运至深水区,致使研究区地层沉积厚度及砂岩厚度均明显增大。



注: 研究区范围为92.0 km×104.0 km的矩形区域。

图7 珠江口盆地中北部珠江组沉积期(21.0~18.5 Ma)不同波浪参数条件下的地层厚度及砂岩厚度

Fig. 7 Comparison of formation thickness and sand body thickness with different wave parameters of Zhujiang middle period (21.0~18.5 Ma) in the north-central Pearl River Mouth Basin

在浪控三角洲沉积过程中,泥质沉积物趋向沉积于波基面之下,而波基面以上部分砂质沉积物含量较高。图7b所示为模拟获得的不同波基面作用下研究区珠江组沉积期21.0~18.5 Ma的地层厚度及砂岩厚度分布。波基面在10.0 m、20.0 m及50.0 m时,研究区地层厚度分别为150.0~240.0 m、150.0~230.0 m及140.0~200.0 m。波基面在10.0 m时,研究区中部及东南部沉积偏厚;随着波基面深度增加至50.0 m,东南部沉积厚度逐渐减薄。波基面在10.0 m、20.0 m及50.0 m时,整体上研究区沉积砂岩厚度相近,约为32.0~85.0 m。波基面为10.0 m时,近源河口区砂岩沉积较厚,达50.0 m;随着波基面深度增加至20.0 m,近源区砂质沉积厚度明显减薄;波基面深度增加至50.0 m时,近源河口区砂质很少沉积,平均厚度不足20.0 m。随着波基面深度的增加,三角洲河口附近及近源端砂质沉积物的堆积量降低,改造后沉积物的搬运距离增大。

波浪方向为135°、180°及225°的对比模拟实验(图7c)结果与前人的认识一致:波浪作用角度发生倾斜,会导致三角洲在演化过程中产生不对称沉积和形态,且沉积物趋向于沿波浪方向迁移。

## 4.2 砂体预测

应用地质过程约束的沉积正演模拟方法,在建立研究区合理的地层定量正演三维数值模拟模型的基础上,选定目标剖面位置(图8a),将该位置沉积地层信息由深度域转换为时间域,建立二维时间域层序地层剖面,通过对深度域与时间域层序地层剖面进行对比,了解某一时期沉积物的堆积情况,准确地分析沉积环境,在此基础上进行有利储层砂体预测。

结果显示,在深度域上地层由陆向海呈现由薄变厚的楔状形态(图8b)。时间域上表现为近源区一直接受沉积,但沉积地层厚度较小、岩性较粗,且容易遭受剥蚀作用;远离物源的区域存在沉积间断,在有沉积的时间步长内,碎屑岩沉积厚度大,古水深增加,岩性通常较细,不易发生剥蚀。二维时间域剖面中的沉积范围显示(图8c):在沉积初期物源供应量不大的情况下,沉积物向海搬运的距离与海平面的升降呈很好的相关性,盆地充填主要受海平面变化的影响;后期在物源供应充足的情况下,沉积物的搬运距离与理想情况有明显差别,即在海平



面大幅持续上升的情况下,盆地内部远离物源处依旧发育较厚地层,此时物源的供给是盆地充填的主要控制因素。沉积正演模拟结果(图6)与时间域内

盆地充填演化特征表明:随着盆地的演化,滨岸带附近(图6c)更易于发育砂岩,分布连续且不易发生剥蚀,即有利储层砂体主要发育于滨岸线附近。

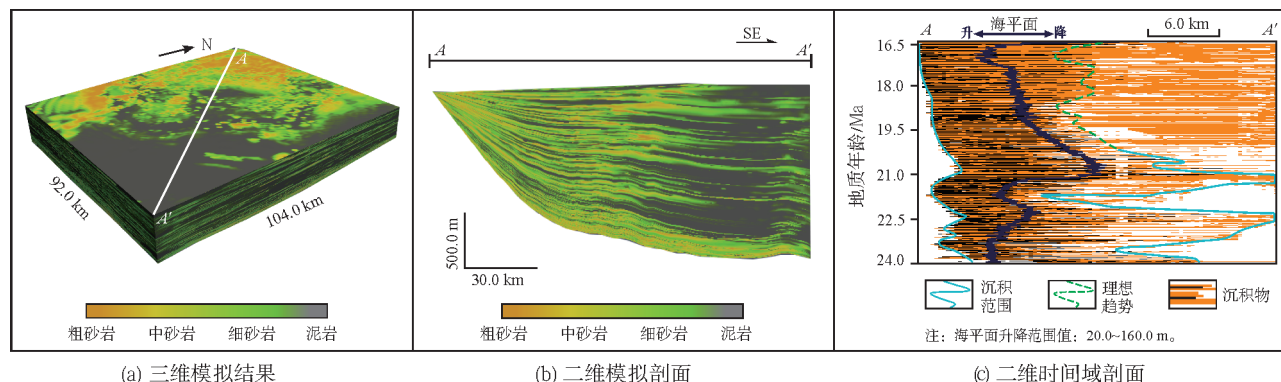


图8 珠江口盆地中北部珠江组沉积层序地层正演模拟三维体及深度域与时间域剖面

Fig. 8 Sedsim simulation output of sequence stratigraphic 3D volume and profiles in depth domain and time domain of Zhujiang period in the north-central Pearl River Mouth Basin

## 5 结 论

(1) 珠江口盆地中北部中新统珠江组浪控三角洲沉积主要发育三角洲前缘亚相,存在南东—北西向波浪作用,且波浪作用对砂体展布具有明显的影响。波浪高度越大,阻碍细粒沉积物堆积的作用越强,将越多的细粒沉积物搬运至深水处沉积;泥质沉积物趋向于波基面之下区域沉积,波基面以上区域砂质沉积物含量较高;波浪作用角度发生倾斜,会导致三角洲产生不对称沉积和形态。

(2) 珠江口盆地中北部中新统珠江组在二级层序内,滨线呈现由向陆迁移、再向海迁移的趋势。二级层序基准面上升期,海平面处于高位,浪成砂坝、席状砂大面积展布,呈大型条带状,水下分支河道在物源方向局限发育甚至不发育;二级层序基准面下降期,海平面处于低位,水下分流河道微相占主体,分流间湾分布于河道之间,浪成砂坝在河道前端呈零星条带状展布。水下分流河道方向与物源方向一致,分流间湾分布在河道之间,浪成砂坝在垂直物源的方向呈条带状展布。

(3) 应用地质过程约束的沉积正演模拟方法,获得的时间域与深度域内盆地充填演化特征表明,有利储层砂体主要发育于滨岸线附近。

### 参考文献

- [1] SYVITSKI J P M, MILLIMAN J D. Geology, geography, and humans battle for dominance over the delivery of fluvial sediment to the coastal ocean[J]. The journal of geology, 2007, 115(1): 1-19.
- [2] NIENHUIS J H, ASHTON A D, ROOS P C, et al. Wave reworking of abandoned deltas[J]. Geophysical research letters, 2013, 40(22): 5899-5903.
- [3] WRIGHT L D, COLEMAN J M. Variations in morphology of major river deltas as functions of ocean wave and river discharge regimes[J]. AAPG bulletin, 1973, 57(2): 370-398.
- [4] GALLOWAY W E, MORTON R A. Geometry, genesis, and reservoir characteristics of shelf sandstone facies, Frio Formation (Oligocene), Texas coastal plain[M]//MORTON R A, NUMMEDA D. Shelf sedimentation, shelf sequences and related hydrocarbon accumulation. Tulsa: SEPM Society for Sedimentary Geology, 1989: 89-115.
- [5] RIJKE E J H. Baram delta geology and hydrocarbon occurrence [J]. Bulletin of the Geological Society of Malaysia, 1981, 14: 1-18.
- [6] KLAUSEN T G, RYSETH A, HELAND-HANSEN W, et al. Progradational and backstepping shoreface deposits in the Ladinian to Early Norian Snadd Formation of the Barents Sea[J]. Sedimentology, 2016, 63(4): 893-916.
- [7] HAMPSON G J, HOWELL J A. Sedimentologic and sequence stratigraphic characteristics of wave-dominated deltas[J]. AAPG bulletin, 2017, 101(4): 441-451.
- [8] 张向涛, 杜家元, 丁琳, 等. 不同水动力机制下砂体沉积响应及岩性圈闭形成模式[J]. 石油学报, 2019, 40(增刊 1): 105-114.  
ZHANG Xiangtao, DU Jiayuan, DING Lin, et al. Sedimentary response of sand body and formation models of lithologic traps under different hydrodynamic conditions[J]. Acta petrolei sinica, 2019, 40(S1): 105-114.
- [9] 余烨, 张昌民, 李少华, 等. 珠江口盆地中新统珠江组强制海退沉积层序与有利砂体分布[J]. 古地理学报, 2018, 20(5): 841-854.

- YU Ye, ZHANG Changmin, LI Shaohua, et al. Sedimentary sequence and favorable sand-body distribution in falling stage system tracts of the Miocene Zhujiang Formation in Pearl River Mouth Basin[J]. *Journal of palaeogeography*, 2018, 20(5): 841-854.
- [10] 江宁, 全志臻, 彭光荣, 等. 基于地震沉积学方法的沉积相研究: 以珠江口盆地番禺4洼古近系为例[J]. *海洋地球物理学*, 2016, 35(4): 102-111.
- JIANG Ning, QUAN Zhizhen, PENG Guangrong, et al. Research on sedimentary facies based on seismic sedimentology: a case study of Paleogene Strata of Panyu 4 Sag in the Pearl River Mouth Basin[J]. *Journal of tropical oceanography*, 2016, 35(4): 102-111.
- [11] 彭光荣, 温华华, 刘从印, 等. 珠江口盆地珠一坳陷浅层油气勘探实践及潜力探讨: 以番禺4洼为例[J]. *海洋地质前沿*, 2013, 29(3): 22-28.
- PENG Guangrong, WEN Huahua, LIU Congyin, et al. Practice of shallow oil and gas exploration in Zhu I Depression of the Pearl River Mouth Basin: a case from Panyu 4 Sag[J]. *Marine geology frontiers*, 2013, 29(3): 22-28.
- [12] 谢利华, 林畅松, 董伟, 等. 珠江口盆地番禺低隆起珠江组—韩江组沉积体系[J]. *石油地质与工程*, 2009, 23(2): 5-8.
- XIE Lihua, LIN Changsong, DONG Wei, et al. Sedimentary system of Zhujiang Formation and Hanjiang Formation in Panyu Low Uplift, Zhujiangkou Basin[J]. *Petroleum geology and engineering*, 2009, 23(2): 5-8.
- [13] 祝彦贺, 朱伟林, 徐强, 等. 珠江口盆地中部珠海组—珠江组层序结构及沉积特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(4): 77-83.
- ZHU Yanhe, ZHU Weilin, XU Qiang, et al. Sedimentary characteristics and sequence framework of the Zhuhai-Zhujiang Formation in the middle area of Pearl River Mouth Basin[J]. *Marine geology & Quaternary geology*, 2009, 29(4): 77-83.
- [14] GRIFFIN J D, HEMER M A, JONES B G. Mobility of sediment grain size distributions on a wave dominated continental shelf, southeastern Australia[J]. *Marine geology*, 2008, 252(1/2): 13-23.
- [15] SADLER P M. Sediment accumulation rates and the completeness of stratigraphic sections[J]. *The journal of geology*, 1981, 89(5): 569-584.
- [16] BURGESS P M, WRIGHT V P. Numerical forward modelling of carbonate platform dynamics: an evaluation of complexity and completeness in carbonate strata[J]. *Journal of sedimentary research*, 2003, 73(5): 637-652.
- [17] STRAUB K M, FOREMAN B Z. Geomorphic stasis and spatiotemporal scales of stratigraphic completeness[J]. *Geology*, 2018, 46(4): 311-314.
- [18] 刘建良, 刘可禹. 碳酸盐岩地层完整性分析及其影响因素定量评价: 来自地层正演模拟的启示[J]. *中国科学: 地球科学*, 2021, 51(1): 150-158.
- LIU Jianliang, LIU Keyu. Estimating stratal completeness of carbonate deposition via process-based stratigraphic forward modeling[J]. *Science China earth sciences*, 2021, 51(1): 150-158.
- [19] LIU Keyu, LIANG T C K, PATERSON L, et al. Computer simulation of the influence of basin physiography on condensed section deposition and maximum flooding[J]. *Sedimentary geology*, 1998, 122(1/4): 181-191.
- [20] AMOSU A, SUN Yuefeng. WheelerLab: an interactive program for sequence stratigraphic analysis of seismic sections, outcrops and well sections and the generation of chronostratigraphic sections and dynamic chronostratigraphic sections[J]. *SoftwareX*, 2017, 6: 19-24.
- [21] 米立军, 张向涛, 庞雄, 等. 珠江口盆地形成机制与油气地质[J]. *石油学报*, 2019, 40(增刊1): 1-10.
- MI Lijun, ZHANG Xiangtao, PANG Xiong, et al. Formation mechanism and petroleum geology of Pearl River Mouth Basin[J]. *Acta petrolei sinica*, 2019, 40(S1): 1-10.
- [22] 戴建文, 柴愈坤, 王冠民, 等. 珠江口盆地恩平凹陷A油田新近系储层钙质砂岩夹层成因[J]. *海相油气地质*, 2023, 28(4): 391-400.
- DAI Jianwen, CHAI Yukun, WANG Guanmin, et al. Genesis of calcareous sandstone interlayer in Neogene reservoir of A Oilfield in Enping Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. *Marine origin petroleum geology*, 2023, 28(4): 391-400.
- [23] 吴伟, 刘惟庆, 林畅松, 等. 珠江口盆地白云北坡珠江组下部陆架边缘沉积演化[J]. *地质学报*, 2014, 88(9): 1719-1727.
- WU Wei, LIU Weiqing, LIN Changsong, et al. Sedimentary evolution of the Lower Zhujiang Group continental shelf edge in the north slope of Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. *Acta geologica sinica*, 2014, 88(9): 1719-1727.
- [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: 1-31.
- CHEN Changmin, SHI Hesheng, XU Shice, et al. Formation conditions of tertiary oil and gas reservoirs in eastern Pearl River Mouth Basin[M]. Beijing: Science Press, 2003: 1-31.
- [25] 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]. *地质论评*, 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 and its implications[J]. *Geological review*, 2007, 53(2): 145-151.
- [26] 余烨, 张昌民, 朱锐, 等. 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[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(3): 28-39.
- YU Ye, ZHANG Changmin, ZHU Rui, et al. Characteristics and main controlling factors of the shelf-edge delta of the

- Lower Member of Zhujiang Formation in the northern Baiyun Depression[J]. *Marine geology & Quaternary geology*, 2019, 39(3): 28–39.
- [27] 王福国, 梅廉夫, 施和生, 等. 珠江口盆地珠一坳陷古近系构造样式分析[J]. *大地构造与成矿学*, 2008, 32(4): 448–454.
- WANG Fuguo, MEI Lianfu, SHI Hesheng, et al. Structural styles of Paleogene in Zhu 1 Depression of Pearl River Mouth Basin[J]. *Geotectonica et metallogenia*, 2008, 32(4): 448–454.
- [28] 朱明, 代一丁, 朱俊章, 等. 珠江口盆地惠州凹陷古近系油藏地质特征及成藏机理[J]. *中国海上油气*, 2017, 29(1): 1–11.
- ZHU Ming, DAI Yiding, ZHU Junzhang, et al. Geological characteristics and accumulation mechanism of Paleocene reservoir in Huizhou Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. *China offshore oil and gas*, 2017, 29(1): 1–11.
- [29] TETZLAFF D M, HARBAUGH J W. *Simulating clastic sedimentation*[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1989.
- [30] 黄秀, 刘可禹, 邹才能, 等. 鄱阳湖浅水三角洲沉积体系三维定量正演模拟[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2013, 38(5): 1005–1013.
- HUANG Xiu, LIU Keyu, ZOU Caineng, et al. Forward stratigraphic modelling of the depositional process and evolution of shallow water deltas in the Poyang Lake, Southern China[J]. *Earth science (Journal of China University of Geosciences)*, 2013, 38(5): 1005–1013.
- [31] 赵俊兴, 陈洪德, 时志强. 古地貌恢复技术方法及其研究意义: 以鄂尔多斯盆地侏罗纪沉积前古地貌研究为例[J]. *成都理工大学学报*, 2001, 28(3): 260–266.
- ZHAO Junxing, CHEN Hongde, SHI Zhiqiang. The way and implications of rebuilding palaeogeomorphology: taking the research of palaeomorphology of the Ordos Basin before Jurassic deposition as example[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2001, 28(3): 260–266.
- [32] 戴宗, 衡立群, 孙润平, 等. 珠江口盆地番禺地区珠江组沉积前古地貌及其对沉积体系的控制[J]. *海相油气地质*, 2020, 25(3): 269–277.
- DAI Zong, HENG Liqun, SUN Runping, et al. Paleogeomorphology of the Lower Miocene Zhujiang Formation and its control on the depositional system in Panyu area, Pearl River Mouth Basin[J]. *Marine origin petroleum geology*, 2020, 25(3): 269–277.
- [33] 解习农, 程守田, 陆永潮. 陆相盆地幕式构造旋回与层序构成[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 1996, 21(1): 27–33.
- XIE Xinong, CHENG Shoutian, LU Yongchao. Episodic tectonic cycles and internal architectures of sequences in continental basin[J]. *Earth science(journal of China University of Geosciences)*, 1996, 21(1): 27–33.
- [34] 林畅松, 刘景彦, 张英志, 等. 构造活动盆地的层序地层与构造地层分析: 以中国中、新生代构造活动湖盆分析为例[J]. *地学前缘*, 2005, 12(4): 365–374.
- LIN Changsong, LIU Jingyan, ZHANG Yingzhi, et al. Sequence stratigraphy and tectono stratigraphic analysis of tectonically active basins: a case study on the Cenozoic Mesozoic lacustrine basins in China[J]. *Earth science frontiers*, 2005, 12(4): 365–374.
- [35] ZENG Hongliu, XU Ligui, WANG Guizhong, et al. Prediction of ultrathin lacustrine sandstones by joint investigation of tectonic geomorphology and sedimentary geomorphology using seismic data[J]. *Marine and petroleum geology*, 2016, 78: 759–765.
- [36] 王聪, 梅廉夫, 陈汉林, 等. 珠江口盆地惠州凹陷裂后期沉降特征及成因分析[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2016, 47(3): 807–818.
- WANG Cong, MEI Lianfu, CHEN Hanlin, et al. Post-rift subsidence history and mechanism of Huizhou Depression in the Pearl River Mouth Basin[J]. *Journal of Central South University (science and technology)*, 2016, 47(3): 807–818.
- [37] 马明, 漆家福, 张远泽, 等. 珠江口盆地新生代沉降特征及其影响因素分析[J]. *中国地质*, 2019, 46(2): 269–289.
- MA Ming, QI Jiafu, ZHANG Yuanze, et al. An analysis of subsidence characteristics and affecting factors in the Pearl River Mouth Basin in Cenozoic[J]. *Geology in China*, 2019, 46(2): 269–289.
- [38] 田世峰, 陈中强, 查明. 珠江口盆地中新世韩江组天文调谐地质年代代表[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2012, 36(1): 27–32.
- TIAN Shifeng, CHEN Zhongqiang, ZHA Ming. Astronomical time scale of Middle Miocene Hanjiang Formation in Pearl River Mouth Basin, South China Sea[J]. *Journal of China University of Petroleum (edition of natural science)*, 2012, 36(1): 27–32.
- [39] 庞雄, 陈长民, 施和生, 等. 相对海平面变化与南海珠江深水扇系统的响应[J]. *地学前缘*, 2005, 12(3): 167–177.
- PANG Xiong, CHEN Changmin, SHI Hesheng, et al. Response between relative sea-level change and the Pearl River deep-water fan system in the South China Sea[J]. *Earth science frontiers*, 2005, 12(3): 167–177.
- [40] 高鹏, 代一丁, 秦成岗, 等. 珠江口盆地番禺低隆起层序地层格架下地层圈闭发育模式[J]. *石油天然气学报*, 2012, 34(5): 8–14.
- GAO Peng, DAI Yiding, QIN Chenggang, et al. Development mode of stratigraphic traps in the sequence stratigraphic framework of Panyu Low Uplift[J]. *Journal of oil and gas technology*, 2012, 34(5): 8–14.
- [41] HAQ B U, HARDENBOL J, VAIL P R. Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic[J]. *Science*, 1987, 235(4793): 1156–1167.
- [42] 王张虎, 郭建华, 刘辰生, 等. 珠江口盆地陆丰凹陷珠江组沉积相带与储层特征[J]. *沉积与特提斯地质*, 2017, 37(1): 64–72.



- WANG Zhanghu, GUO Jianhua, LIU Chensheng, et al. Sedimentary facies and reservoir quality of the Zhujiang Formation in the Lufeng Depression, Zhujiangkou Basin[J]. Sedimentary geology and Tethyan geology, 2017, 37(1): 64–72.
- [43] ASHTON A D, GIOSAN L. Wave-angle control of delta evolution[J]. Geophysical research letters, 2011, 38(13): L13405.
- [44] NIENHUIS J H, ASHTON A D, GIOSAN L. What makes a delta wave-dominated?[J]. Geology, 2015, 43(6): 511–514.
- [45] BHATTACHARYA J P, GIOSAN L. Wave-influenced deltas: geomorphological implications for facies reconstruction[J]. Sedimentology, 2003, 50(1): 187–201.
- [46] 叶银灿. 中国海洋灾害地质学[M]. 北京: 海洋出版社, 2012.
- YE Yincan. Marine hazard geology[M]. Beijing: China Ocean Press, 2012.
- [47] 韩家新. 中国近海海洋: 海洋可再生能源[M]. 北京: 海洋出版社, 2015.
- HAN Jiaxin. Coastal sea of China marine renewable energy [M]. Beijing: China Ocean Press, 2015.

编辑: 黄革萍

## Simulation of sedimentary spatiotemporal evolution of wave-dominated delta of the Miocene Zhujiang Formation in north-central Pearl River Mouth Basin

YANG Huiling<sup>1</sup>, ZHANG Qingqing<sup>2</sup>, HENG Liqun<sup>3</sup>, WANG Jian<sup>2</sup>,  
LIU Taixun<sup>2</sup>, LIU Jianliang<sup>2</sup>, LIU Keyu<sup>2,4</sup>

1. Tianjin Branch of CNOOC China Limited; 2. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China);  
3. Shenzhen Branch of CNOOC China Limited; 4. Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology

**Abstract:** Based on the analysis of sedimentary background, high-resolution sequence stratigraphic framework and sedimentary microfacies distribution, by using the method of stratigraphic forward simulation and comprehensive use of seismic, well logging, core and other data, the three-dimensional sedimentary spatiotemporal evolution simulation is carried out, and the sedimentary evolution process of wave-dominated delta of the Miocene Zhujiang Formation in the north-central Pearl River Mouth Basin is quantitatively restored, and the influences of sedimentary environment and wave parameters on the distribution of sand bodies are discussed. The results indicate that: (1) Being located at the coastal area of a shallow continental shelf, the study area was subject to strong wave action during the Miocene, developing a typical wave-dominated delta sequence, and the sedimentary microfacies of the Zhujiang Formation evolved regularly with the change of the base level, and the shoreline moved first to the land and then to the sea. (2) The wave action during the Zhujiang Formation sedimentation period is strong, and the wave angle is near the southeast direction. The wave action has a significant impact on the distribution of the delta sand body. With the increase of wave height, the effect of impeding the accumulation of fine sediment in the delta estuary increases, and it is transported to the deep water area; muddy sediments are deposited in the area below the wave base, while sandy sediments in the area above the wave base have a higher content. The inclination of the incident angle in wave action can lead to asymmetric sedimentation and morphology in the evolution of delta. (3) The evolution characteristics of basin filling in the time domain indicate that favorable reservoir sand bodies are mainly developed near the shoreline, and source rocks are concentrated on slopes. Sedimentary forward simulation provides a more intuitive method for quantitatively restoring sedimentary evolution processes and has predictive value in determining the potential morphology of wave-dominated deltas.

**Key words:** wave-dominated delta; sedimentary evolution; forward simulation; Zhujiang Formation; Pearl River Mouth Basin

**YANG Huiling**, First author: MSc, Engineer, mainly engaged in sedimentology and reservoir geology. Add: No. 2121 Haichuan Rd., Binhai New District, Tianjin 300452, China. E-mail: yanghl28@163.com

**LIU Keyu**, Corresponding author: PhD, Professor, mainly engaged in quantitative simulation of sedimentation and hydrocarbon accumulation. Add: No. 66 Changjiang West Rd., Huangdao District, Qingdao, Shandong 266580, China. E-mail: liukeyu@upc.edu.cn