

doi:10.3799/dqkx.2013.098

# 鄱阳湖浅水三角洲沉积体系三维定量正演模拟

黄 秀<sup>1,2</sup>, 刘可禹<sup>1,2\*</sup>, 邹才能<sup>1</sup>, 桂丽黎<sup>1,2</sup>, 袁选俊<sup>1,3</sup>, 秦雁群<sup>1</sup>

1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

2. 中国石油天然气股份有限公司盆地构造油气成藏重点实验室, 北京 100083

3. 中国石油天然气股份有限公司油气储层重点实验室, 北京 100083

**摘要:** 以鄱阳湖现代浅水三角洲沉积体系为例, 应用三维正演地层模拟软件 SedSim, 在参考前人研究的基础上, 首次将湖盆底部地形、湖(海)平面变化、沉积物注入量及注入方式、气候、沉积物供给速率等动力要素结合在一起, 对该浅水三角洲沉积体系的形成过程及 1200 年以来的演化进行定量正演模拟, 并采用历史和野外数据对鄱阳湖现代浅水三角洲沉积模型进行约束和校正。模拟结果表明, 鄱阳湖浅水三角洲沉积体系的发育是湖盆地形、湖平面变化、物源供给等多因素作用的综合结果。在该三角洲沉积体系中, 由于水体较浅、沉积底形坡度平坦且基准面变化频繁, 三角洲前缘发育的砂体基本上以席状砂为主, 并主要分布于湖区敞流通道附近。湖平面之上的三角洲平原河道发育与改道的现象主要受湖平面变化速率的影响, 即基准面缓慢上升期间和基准面快速下降期间, 河道发育的现象较明显。该模拟结果不仅能够对大型浅水三角洲的内部特征及形成过程有着更直观的认识, 而且也可为今后研究不同地区相似的三角洲沉积体系的形成过程提供了可借鉴的分析模型与理论依据。

**关键词:** 浅水三角洲; 鄱阳湖; 三维定量正演模拟; 数值模拟; 定量沉积学。

**中图分类号:** P539.2

**文章编号:** 1000-2383(2013)05-1005-09

**收稿日期:** 2013-01-15

## Forward Stratigraphic Modelling of the Depositional Process and Evolution of Shallow Water Deltas in the Poyang Lake, Southern China

HUANG Xiu<sup>1,2</sup>, LIU Ke-yu<sup>1,2\*</sup>, ZOU Cai-neng<sup>1</sup>, GUI Li-li<sup>1,2</sup>, YUAN Xuan-jun<sup>1,3</sup>, QIN Yan-qun<sup>1</sup>

1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China

2. CNPC Key Laboratory for Basin Structure and Hydrocarbon Accumulation, Beijing 100083, China

3. CNPC Key Laboratory for Oil and Gas Reservoir, Beijing 100083, China

**Abstract:** Large-scale shallow-water deltas in lacustrine basins have recently been identified as important reservoir plains in the world. The Poyang Lake, the largest fresh water lake of China, develops a series of modern shallow-water deltas, hence provides a good modern analogue for understanding various key depositional processes that control deltaic development and evolution. This paper uses SedSim, a three-dimensional stratigraphic forward modelling program, to simulate the development and evolution of the shallow-water deltas in the Poyang Lake by considering a number of key processes and parameters affecting the deltaic deposition over 1200 years. According to our simulation results, the construction of the shallow-water deltas in the Poyang Lake is primarily controlled by the lake level fluctuations, the discharge rate of sediment, and the pre-existing topography/bathymetry. It shows that the sand bodies in the delta front are basically sand sheets, which are mainly distributed near the lake open circulation area due to the shallow water depth of the lake, the gentle slope of the depositional basement and the high frequency of lake-level fluctuations. In addition, the frequency of relative lake level oscillation appears to be a significant controlling factor on the development and divarication of river channels on the upper delta plain. A lower rate of the lake level rise and a faster rate of the lake level fall would cause enhanced river channel development and divarication. This study not only enables us to quantitatively understand the dynamic processes of shallow-water delta systems and the key factors controlling the deltaic development and evolution but also provides a reference model for similar ancient depositional systems in sedimentary basins.

**基金项目:** 中国石油天然气股份有限公司科技管理部项目(No.2011A-0207).

**作者简介:** 黄秀(1981—), 女, 博士, 主要从事层序地层学、三维地层正演模拟。E-mail: huangxiu1983@hotmail.com

\* **通讯作者:** 刘可禹, E-mail: keyu\_liu@petrochina.com.cn

where active hydrocarbon exploration is currently being undertaken.

**Key words:** shallow-water deltas; Poyang Lake; stratigraphic forward model; numerical simulation; numerical sedimentary.

近年来,大型湖盆浅水三角洲已成为国际油气藏勘探的重要目标.许多学者应用“将今论古”的方法,研究现代湖泊三角洲沉积体系,借以提高识别古代沉积环境的能力,从而指导油气探勘工作.鄱阳湖位于江西省北部,因赣江、修水、抚河、信江及饶河 5 条河流汇聚于此,而形成了重要的浅水三角洲沉积盆地(朱海虹等,1981).目前,许多学者从不同方面对鄱阳湖进行研究.在地质方面,朱海虹等(1981)对三角洲的沉积背景、沉积过程、沉积相与相模式进行了分析,表明该区的沉积作用主要受到入湖河流与长江双重因素的影响.结合地质、地理方法,张春生和陈庆松(1996)将湖区的沉积体系自下而上划分为冲积扇—扇三角洲沉积体系、河流沉积体系和三角洲沉积体系,其中三角洲沉积体系约发育于 1200 年前(朱海虹等,1981).近 8 ka 以来,鄱阳湖经历了 4 次暖湿和 4 次冷(凉)干的气候环境变化(马振兴等,2004).在水文方面,Feng *et al.* (2011)利用高分辨率的遥感数据分析了近十年来鄱阳湖湖底地貌的变化,并指出一些湖底高程的增加主要是人类活动(如砂疏浚和堤防工程)和天气事件的综合结果.鄱阳湖水位与水量变化主要受气候变化与五河入湖流量的控制(Hu *et al.*, 2007; 郭华等,2011).

尽管对于鄱阳湖沉积的研究涉及了多方面(朱海虹等,1981; 马振兴等,2004; Hu *et al.*, 2007; Feng *et al.*, 2011; 郭华等,2011),但是对于鄱阳湖三角洲沉积过程的数值模拟研究却甚少.因此,本文首次将各种地质要素结合起来,对鄱阳湖现代浅水三角洲沉积体系进行三维正演模拟研究.使用该正演地层模拟技术不仅能够重建沉积体系在空间的分布模型(Tetzlaff and Harbaugh, 1989; Liu *et al.*, 2001),而且能够预测沉积体系未来的演化(Li *et al.*, 2006).该模拟技术可以对各种现象进行有效地模拟和预测,如海床由于气候变化或风动循环而引起的演化(Li *et al.*, 2007),海水对水下基础设施的侵蚀作用(Liang *et al.*, 2005)以及地壳的均衡作用(Li *et al.*, 2004).本次研究的目的主要着重于环境因素对沉积过程的影响,如湖盆底部地形、湖(海)平面变化、沉积物注入量及注入方式、气候、沉积物供给速率等,从而为人们进一步认识浅水三角洲沉积体系的形成提供重要的理论依据.

## 1 区域概况

鄱阳湖是中国最大的淡水湖,也是世界重要的湿地之一.该湖位于江西地区的北部,地理坐标为东经  $115^{\circ}47' \sim 116^{\circ}45'$ 、北纬  $28^{\circ}22' \sim 29^{\circ}45'$ .根据形态,鄱阳湖通常被划分为南北两部分:星子以北为地堑作用形成的北部狭长水道,宽约 5~8 km,深 10~16 m,为湖水入长江水道区;南部为发育于“鄱阳湖断凹”构造背景上的大水面,宽达 50~70 km,水深 3~8 m(朱海虹等,1981; 张春生和陈庆松,1996).鄱阳湖湖底平坦,湖水较浅,平均深度约 8.4 m(邹才能等,2008),主要接受赣江、修水、抚河、信江及饶河 5 条河流的沉积物及水量注入(图 1).由于浅水湖泊三角洲坡度缓,湖泊面积主要受水位幅度变化的控制.丰水期水位上升,湖面骤增,湖面面积可达 4 647 km<sup>2</sup>,枯水期水位下降,湖面面积仅为 146 km<sup>2</sup>(张春生和刘忠保,1997).

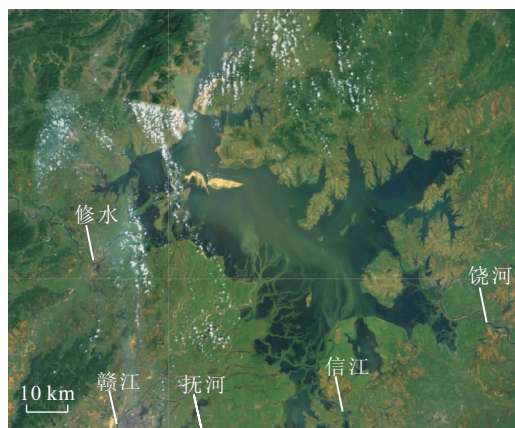


图 1 鄱阳湖地理位置(下载于 Google Earth)

Fig.1 Location of the Poyang Lake

## 2 方法与数据

三维正演地层模拟就是利用研究区现有的、有限的的数据对该区缺乏数据的层序地层、地层的几何形态和沉积序列中沉积相的分布特征进行预测(Granjeon and Joseph, 1999).SedSim 模拟程序能够模拟并预测一系列沉积环境中的沉积物分布规律特征,模拟的尺度范围从几厘米至数公里.以下对 SedSim 的基本原理进行简要地介绍.

### 2.1 三维地层正演模拟

SedSim 是一款三维正演地层模拟软件,于 20 世纪 80 年代由美国斯坦福大学最先研发,现由澳大利亚联邦科工业组织地球科学模拟研究组继续对该软件进行研发及完善.SedSim 主要以流体动力学方程(Navier-Stokes equations)为核心,并使用网格标记方法(Tetzlaff and Harbaugh, 1989),该方法结合了欧拉方程和拉格朗日方程的优点,克服了流体动力学方程和连续方程的数值全解所带来的困难,从而使得 SedSim 实现对不同尺度范围内的构造沉降、海平面变化、波浪搬运、压实、剥蚀等地质过程进行模拟.其连续方程结合物质守恒得到的方程为(Tetzlaff and Harbaugh, 1989):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho q = 0, \quad (1)$$

式中: $\rho$  为流体密度; $t$  为时间; $q$  为流体运动向量.流体动量方程则为:

$$\rho \left( \frac{\partial q}{\partial t} + (q \cdot \nabla) q \right) = -\nabla p + \nabla \mu U + \rho (g + \Omega q), \quad (2)$$

式中: $P$  为压力; $\mu$  为流体粘性; $U$  为流体动力张量; $\Omega$  为科里奥利张量.假设,在温度恒定条件下,同介质的流体具有不能压缩的性质,则流体密度  $\rho$  与流体粘性  $\mu$  均可设为常量.由于科里奥利加速度  $\Omega q$  很小,其对流体的影响可以忽略,即  $\Omega q = 0$ .公式(1)与(2)可以简化成:

$$\nabla \cdot q = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + (q \cdot \nabla) q = -\nabla \Phi + \nu \nabla^2 q + g, \quad (4)$$

式中:压力与流体密度的比值为  $\Phi = p/q$ ,运动粘度为  $\nu = \mu/\rho$ .在开放河道中,底部摩擦力与流体平均速率的平方成比例关系: $a = -c_1 \frac{Q|Q|}{h}$ ,  $c_1$  为摩擦系数, $Q$  为流体平均速率, $h$  为流体深度.假设流体平均速率  $Q$  为常量,考虑底部摩擦力的作用,则流体方程可以写为:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + (Q \cdot \nabla) Q = -g \nabla H + \frac{c_2}{\rho} \nabla^2 Q - c_1 \frac{Q|Q|}{h}, \quad (5)$$

经过拉格朗日变换,公式(5)简化为:

$$\frac{DQ}{Dt} = -g \nabla H + \frac{c_2}{\rho} \nabla^2 Q - c_1 \frac{Q|Q|}{h}, \quad (6)$$

式中: $H$  为水平面高程,由于地形高程产生的加速度为  $-g \nabla H$ ,  $c_2$  为剪切力摩擦系数,  $\frac{c_2}{\rho} \nabla^2 Q$  则表

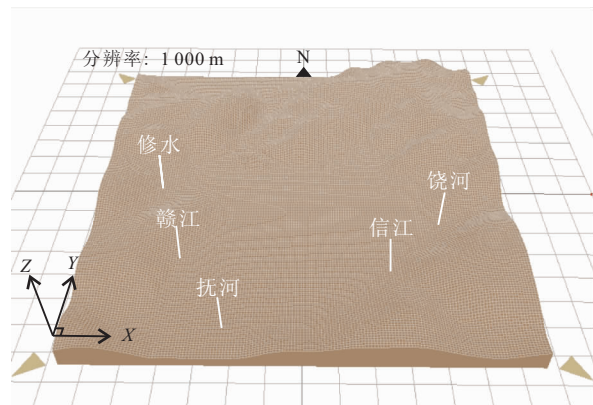


图 2 SedSim 输入的初始沉积地形及来自五大河流的物源位置

Fig.2 Bathymetry of the Poyang Lake and location of the river sediment sources defined in SedSim simulation

表 1 SedSim 输入参数

Table 1 Parameters and parameter values used in SedSim model

SedSim 命令	输入数据
模拟时间	从公元前 1200 年到现今,时间插值为 5 a
网格尺度	分辨率为 1 000 m,网格数为 182×164
流体密度	输入河流的流体密度为 1 000 kg/m <sup>3</sup> ,海水密度为 1 027 kg/m <sup>3</sup>
斜坡角度	4 种沉积物颗粒水下最大角度:0.000 50、0.000 21、0.000 20 和 0.000 10 最小角度为 0.000 10(0.005 70),时间插值为 1 a
流体物源	流体元素释放时间插值为 1 a,流体速度、沉积物浓度、流体高度以及初始沉积物组分百分含量分别在输入文件中

示流体扩散因子.

这些流体方程构成了 SedSim 的核心,使其可以计算单位时间内流体流过每个网格的速率,从而可以统计规定时间内的沉积物体积.SedSim 三维正演地层模拟软件包含多个模块,如沉积物搬运沉积,构造沉降,风暴作用,波浪作用,碳酸盐岩沉积过程等,这些模块可以单独运行,也可以综合运用来模拟复杂的地质过程(Tetzlaff and Harbaugh, 1989; Griffiths *et al.*, 2001; Liang *et al.*, 2005; Li *et al.*, 2007; Salles *et al.*, 2008, 2010; Huang *et al.*, 2012).该软件主要受多种变量参数控制,如相对水平面曲线或基准面变化曲线、盆地初始形态、构造沉降、沉积物搬运速度等.由于 SedSim 不仅可以很好地模拟碎屑岩以及碳酸盐岩混和沉积物充填沉积盆地的过程,而且其模拟结果能够从三维空间上很好地表现出沉积体的形态特征和分布规律,因此,早在 20 世纪 90 年代, SedSim 就被广泛应用于油气勘探预测

上(Griffiths *et al.*, 2001).

## 2.2 数据来源

模拟中所需的数据主要来源于 USGS 数据库以及公开发表的文献.以下部分将详细介绍 Sedsim 模拟中所需的输入数据及所涉及的独立数据.

### 2.2.1 地形或水深表面

鄱阳湖三角洲沉积期间,构造运动不明显,主要以沉积物沉积作用为主(朱海虹等,1981;马逸麟和危泉香,2002),三角洲沉积厚度一般为 3~7 m,三角洲沉积前,地形高差相差不大,一般为 2~5 m(张春生和陈庆松,1996).由于现今数字高程数据(下载于 USGS 数据库)并不是模拟中的初始沉积地形(1200 年至今),因此结合测井资料,使用地层回剥法恢复湖盆沉积底型.整个研究区为横向网格分辨率为 1 000 m 的 182×164 正方形网格(图 2).

### 2.2.2 沉积物源

鄱阳湖的沉积物源主要来自赣江、抚河、信江、饶河、修水 5 条河流,经湖口注入长江(图 2).根据地层对比及生物分析,鄱阳湖三角洲发育历史较短,其中以赣江和修水为物源的三角洲大约发育于 1200 年前,而以抚河、信江和饶河为物源的则发育相对较晚,约 800 年前(朱海虹等,1981).朱海虹等(1981)研究指出,五大河流多年来平均每年吞吐水量约 1 480 亿  $m^3$ ,其中赣江水量占入湖总水量的 44%,约为黄河的 4 倍.赣江含沙量较低,约 0.17  $kg/m^3$ ,仅为黄河的 4.5%、长江的 74%,岩性主要以中、细砂以及粉砂为主、泥质较少.根据

该区河流的径流量和沉积物特征设置 Sedsim 的输入参数,在参数转化过程中粒度级别分别为粗粒(0.28 mm)、中粒(0.15 mm)、细粒(0.03 mm)和泥(0.000 3 mm),沉积物密度分别为 2 650、2 600、2 600和 2 550  $kg/m^3$ (Gibbs *et al.*, 1971).其他相关的参数如表 1 所示.

### 2.2.3 湖平面变化

湖泊水位的变化是湖泊重要的水文特征,它不仅影响水体的深浅、湖面积和容积的大小,而且是沉积可容纳空间变化的主控因素.鄱阳湖水位的变化在长时期内主要受到古气候的影响.由于鄱阳湖北部与长江相连,其水位(尤其退水水位)主要受江湖关系控制,长江水的倒灌对鄱阳湖的形成与演化起了重要作用(胡春华,1999;Shankman *et al.*, 2006).胡春华(1999)指出约在 2 360 a B.P.长江南摆至今,湖口附近首次发生江水倒灌鄱阳湖盆地;历史时期的江水倒灌强度可划分为 3 个阶段:2 360—1 550 a B.P.弱于今;1 550—880 a B.P.波状递增时期,增至整个历史时期的最大值;880 a B.P.至今强烈振荡时期,具有 6 个完整的周期,周期约为 115 a(图 3f).

## 3 模拟结果

在模拟过程中,赣江三角洲和修水三角洲优先开始发育.由于入湖口地势平坦,角度一般为  $1.7^\circ \sim 3.1^\circ$ (张春生和陈庆松,1996),大量的沉积物被搬运

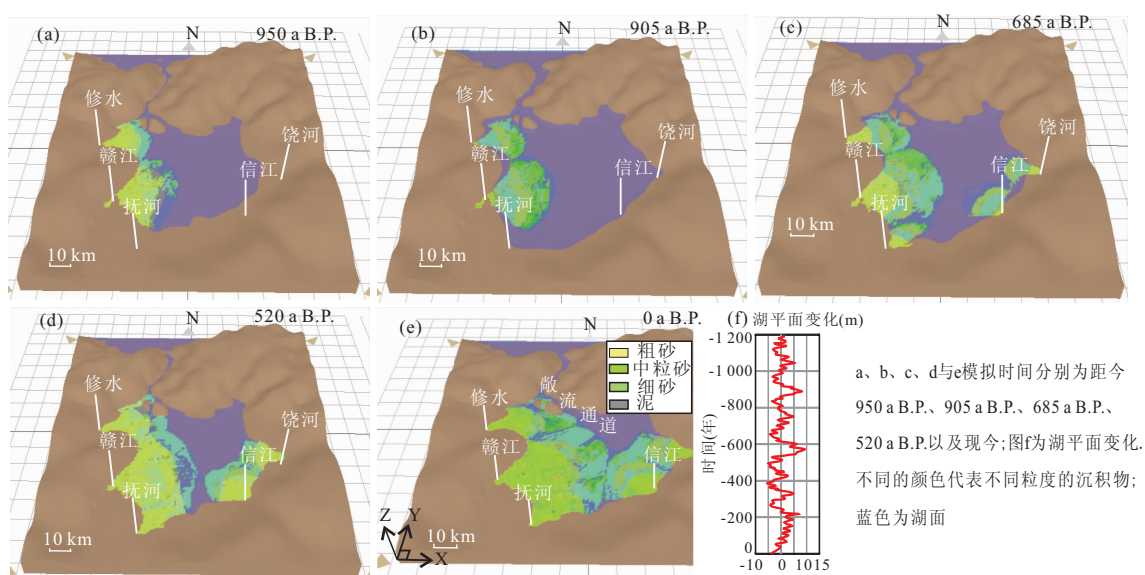


图 3 不同时期 Sedsim 模拟的结果

Fig.3 Results from Sedsim simulation during different periods

至河口附近沉积下来,其平面形态呈扇形,且分布范围较大.当模拟时间为 800 a B.P.时,抚河、信江和饶河等三角洲开始发育.由于在三角洲形成期间,鄱阳湖的构造运动不明显,因此,可容纳空间的变化主要受到湖平面变化的控制.在基准面上升并达到较高的洪水期期间,入湖河流物源充足,沉积物广泛接受再沉积,其中砂质沉积物以退积的形式在湖平面之下的三角洲平原保存下来,而大量的泥质沉积物则被搬运至三角洲前缘(图 3a,3b).在与干旱季节相对应的枯水期,基准面下降,入湖河流沉积物供应也相应减少,湖平面之上的三角洲平原发育河道,砂质沉积物被搬运至三角洲前缘并以席状形式保存下来(图 3c,3d).由于湖平面变化频繁,三角洲平原发育的河道也发生频繁地分叉、迁移改道,从而使得三角洲不断地往湖盆中心生长(图 3a~3e).

模拟结果表明,鄱阳湖浅水三角洲沉积体系的发育是湖盆地形、湖平面变化、物源供给等多因素作用的综合结果.该区浅水三角洲沉积体系的规模和形成期间主要受到入湖河流的水动力强度、输沙能力、河口地貌条件与三角洲发育时间的影响.饶河在五大河流中水量和输沙量最小,发育时间短,其形成的三角洲规模最小.而赣江的水量和输沙量在入湖五河流中均占首位,且发育时期较早,形成了大规模的浅水三角洲沉积体系.在该三角洲沉积体系中,由于水体较浅、沉积底形坡度平坦与基准面变化频繁,三角洲前缘发育的砂体基本上以席状砂为主,并主要分布于湖区敞流通道附近(图 3e).

## 4 讨论

### 4.1 观察与模拟结果比较

在模拟结果与野外观察的结果比较中,主要进行平面形态和垂向地层厚度两方面的比较.从平面形态比较中可以看出,本次模拟结果形成的三角洲沉积体系在位置与形状上与实际数据非常吻合,如在模拟结果中,赣江三角洲的形态为扇形朵体,延伸长度约为 56.5 km(图 4a),实际中赣江三角洲具有相同的扇形朵体,其延伸长度约 55.4 km(图 4b).马逸麟和危泉香(2002)根据遥感信息分析发现,自 1973—2001 年期间,赣江三角洲淤胀总面积约 26.6 km<sup>2</sup>,以 0.95 km<sup>2</sup>/a 的平均年淤速向湖心扩展.在模拟结果中,自 1975—2000 年,赣江三角洲淤胀总面积约 21 km<sup>2</sup>,年平均淤胀速率约为 0.84 km<sup>2</sup>/a.

通过测井地层厚度与模拟结果中所得的厚度对比结果发现,该模拟结果的厚度与测井资料中的地层厚度数据相差不大.在模拟结果中,赣江三角洲地区入湖口处附近的地层厚度较厚,如 W09 与 ZK1-4 井厚度分别为 6.51 m 和 5.35 m(图 5),实际测井厚度分别约为 5~7 m(张春生和陈庆松,1996);在入湖口处较远的地层厚度相对较薄,如 ZK1-2 井厚度约为 3.38 m(图 5),实际测井厚度约 3~4 m(朱海虹等,1981;马逸麟和危泉香,2002).需要指出的是,实际数字高程图(图 4b)中的一些宽度小于一个网格精度的分支河道不能在模型(图 4a)中显示出来.

不管在平面形态观察还是测井地层厚度对比,

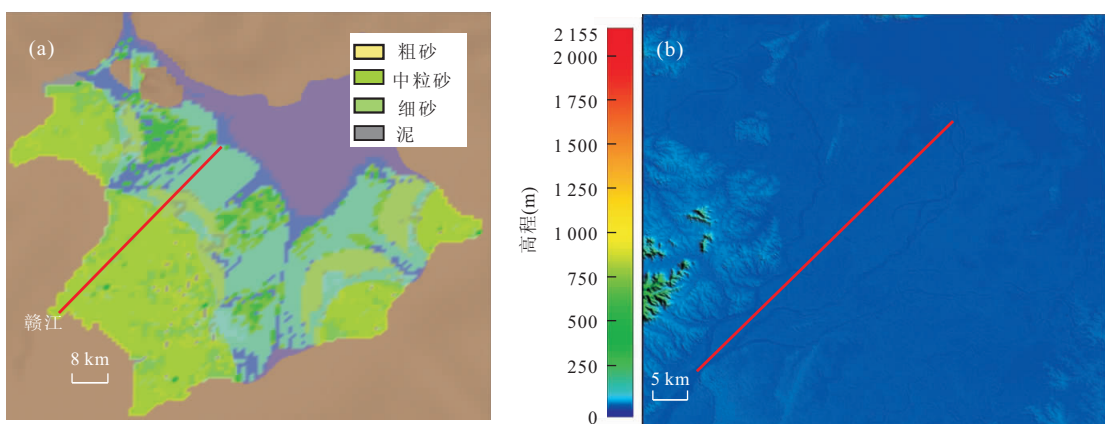


图 4 赣江三角洲沉积体系现今分布特征

Fig.4 Deposition of the Ganjiang delta system

a.Sedsim 模拟的结果,为现今的累计结果;b.实际数字高程数据(DEM)图(下载于 USGS 数据库)

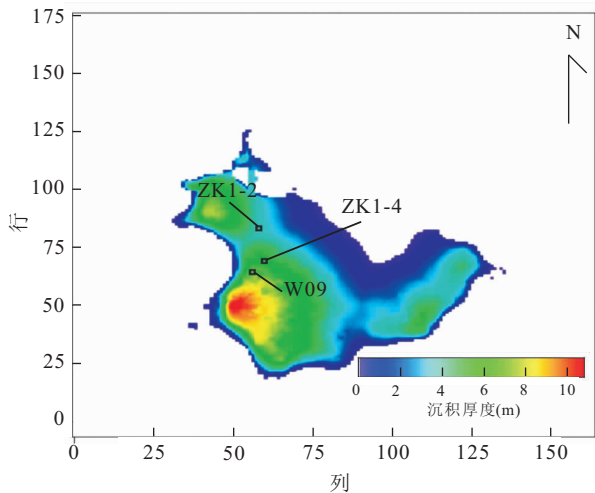


图 5 鄱阳湖三角洲在过去 1200 年的沉积厚度分布  
Fig.5 Thickness of the shallow-water delta in the Poyang Lake deposited over the past 1200 years  
黑色方格为测井的位置, W09、ZK1-4 与 ZK1-2 井模拟厚度分别为 6.51 m、5.35 m 和 3.38 m

模拟结果中得到的沉积中心、沉积体几何形态、沉积厚度等数据均与实际数据具有很高的吻合度。这不仅表明了 Sedsim 正演地层模拟软件在已知参数的条件下可以实现对浅水三角洲沉积体系形成过程的模拟,同时也表明了该软件模拟得出的结果能够很大程度上、更直观地反映自然界的复杂地质过程。

## 4.2 湖平面变化对河道发育的影响

湖平面(海平面)变化对三角洲的发育有着重要的影响(Stanley and Warne, 1994)。近年来,许多关于大型三角洲演化的研究都强调了沉积物供给和海平面变化的重要性,如密西西比河三角洲(Coleman, 1988)、尼罗河三角洲(Chen *et al.*, 1992)、湄公河三角洲(Nguyen *et al.*, 2000; Ta *et al.*, 2001, 2002)、黄河三角洲(Saito *et al.*, 2000, 2001)、长江三角洲(Li *et al.*, 2000, 2002; Hori *et al.*, 2001)、红河三角洲(Tanabe *et al.*, 2003, 2006; Li *et al.*, 2006a, 2006b; Funabiki *et al.*, 2007)、珠江三角洲(Zong *et al.*, 2012)等。然而,对于湖平面(海平面)变化与三角洲平原上的分流河道发育之间的关系却没有提及。因此,为了探讨湖平面变化对分流河道发育的影响,笔者对分流河道的发育在湖面(海平面)变化的不同阶段下进行了分析。

在模拟结果中发现,湖平面之上的三角洲平原分流河道发育现象主要受潮平面变化速率的控制(图 6e)。湖平面上升期间,河流入湖口处以片流沉积为主,沉积物主要向岸溯源沉积,在三角洲平原发育众多分流河道,但河道细小甚至难以识别,水携能量弱,接近片流沉积。对湖平面以不同速率上升时期分析发现,湖平面上升速率较慢时期的河道发育的现象比上升速率较快时明显(图 6a, 6b)。与湖平面上

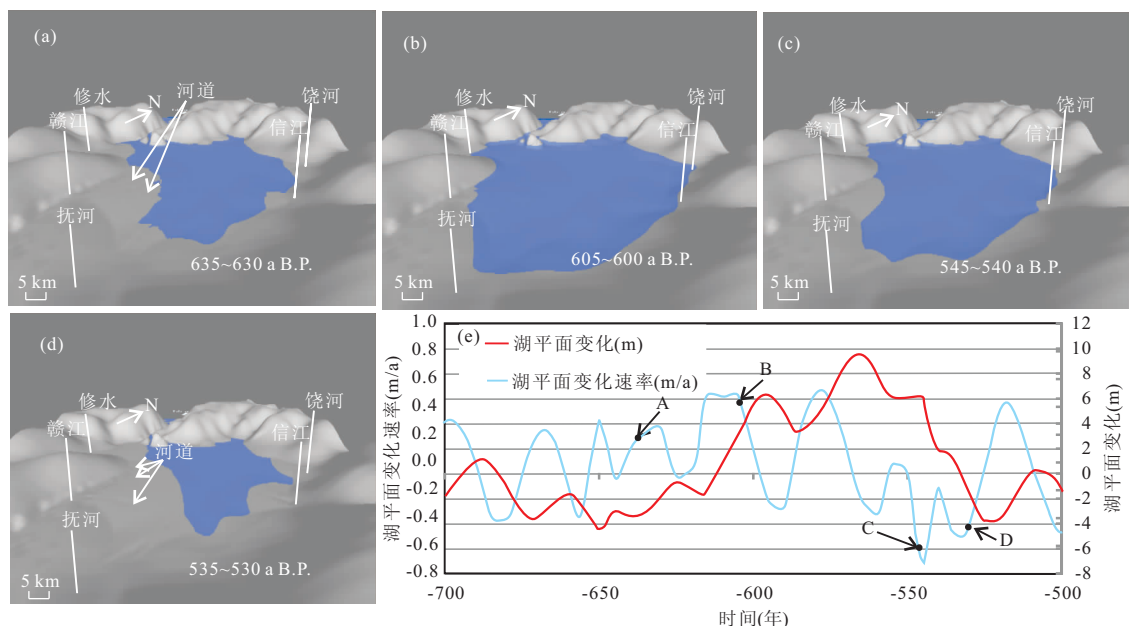


图 6 不同时期 Sedsim 模拟的三角洲地貌

Fig.6 Results from Sedsim simulation showing the topographies of delta system during different periods  
a 与 b 分别对应 e 中湖平面上升的 A 和 B 两个时期; c 与 d 分别对应 e 中湖平面下降的 C 和 D 两个时期, 蓝色为湖面. e 为湖平面变化与湖平面变化速率

升期间相比,湖平面下降期间三角洲平原发育的分流河道较宽,容易识别,水携能量强,向盆地方向延伸距离远。此外,对湖平面以不同速率下降时期的河道发育的现象分析表明,该现象在湖平面下降速率较快期间比下降速率较慢时明显(图 6c,6d)。

## 5 结论

在结合湖盆底部地形、湖(海)平面变化、沉积物注入量及注入方式、气候、沉积物供给速率等动力要素,以要素与过程约束的三维正演地层模拟软件 Sedsim 为平台,对鄱阳湖现代浅水三角洲沉积体系形成过程定量模拟分析研究,得出以下 3 点结论:(1)鄱阳湖浅水三角洲沉积体系的发育是湖盆地形、湖平面变化、物源供给等多因素综合作用的结果。(2)在该三角洲沉积体系中,由于水体较浅、沉积底形坡度平坦与基准面变化频繁,三角洲前缘发育的砂体基本上以席状砂为主,并主要分布于湖区敞流通道附近。(3)三角洲平原上的分支河道的发育主要受潮平面变化速率的控制,基准面缓慢上升和基准面快速下降期间,分流河道的发育现象较明显。

本次研究不仅首次将影响浅水三角洲沉积体系形成的各种地质要素结合起来,使得笔者能够对该研究区的三角洲沉积体系的内部特征及形成过程有着更直观的认识,也为今后不同地区沉积盆地中相似的三角洲沉积体系的形成过程研究提供了可借鉴的分析模型与理论依据。

致谢:论文完成过程中得到中国地质大学(北京)邓宏文教授的悉心指导!在此表示诚挚的谢意!

## References

- Chen, Z. Y., Warne, A. G., Stanley, D. J., 1992. Late Quaternary Evolution of the Northwestern Nile Delta between the Rosetta Promontory and Alexandria, Egypt. *Journal of Coastal Research*, 8(3): 527—561.
- Coleman, J. M., 1988. Dynamic Changes and Processes in the Mississippi River Delta. *Geological Society of America Bulletin*, 100(7): 999—1015. doi: 10.1130/0016—7606(1988)100<0999:DCAPIT>2.3.CO;2
- Feng, L., Hu, C. M., Chen, X. L., et al., 2011. MODIS Observations of the Bottom Topography and Its Inter-Annual Variability of Poyang Lake. *Remote Sensing of Environment*, 115(10): 2729—2741. doi: 10.1016/j.rse.2011.06.013
- Funabiki, A., Haruyama, S., Nguyen, V. Q., et al., 2007. Holocene Delta Plain Development in the Song Hong (Red River) Delta, Vietnam. *Journal of Asian Earth Sciences*, 30(3—4): 518—529. doi: 10.1016/j.jseaes.2006.11.013
- Gibbs, R. J., Matthews, M. D., Link, D. A., 1971. The Relationship between Sphere Size and Settling Velocity. *Journal of Sedimentary Research*, 41(1): 7—18. doi: 10.1306/74D721D0—2B21—11D7—8648000102C1865D
- Granjeon, D., Joseph, P., 1999. Concepts and Applications of a 3-D Multiple Lithology, Diffusive Model in Stratigraphic Modelling. Society for Sedimentary Geology (SEPM), Special Publications.
- Griffiths, C. M., Dyt, C., Paraschivoiu, E., et al., 2001. Sedsim in Hydrocarbon Exploration. In: Merriam, D. F., Davis, J. C., eds., *Geologic Modelling and Simulation*. Springer US, New York, 71—97.
- Guo, H., Hu, Q., Zhang, Q., 2011. Changes in Hydrological Interactions of the Yangtze River and the Poyang Lake in China during 1957—2008. *Acta Geographica Sinica*, 66(5): 609—618 (in Chinese with English abstract).
- Hori, K., Saito, Y., Zhao, Q., et al., 2001. Sedimentary Facies and Holocene Progradation Rates of the Changjiang (Yangtze) Delta, China. *Geomorphology*, 41(2—3): 233—248. doi: 10.1016/S0169—555X(01)00119—2
- Hu, C. H., 1999. A Historical Study on the Back Flows of Water from the Changjiang River to the Poyang Lake at Hukou, Jiangxi. *Acta Geographica Sinica*, 54(1): 77—82 (in Chinese with English abstract).
- Hu, Q., Feng, S., Guo, H., et al., 2007. Interactions of the Yangtze River Flow and Hydrologic Processes of the Poyang Lake, China. *Journal of Hydrology*, 347(1—2): 90—100. doi: 10.1016/j.jhydrol.2007.09.005
- Huang, X., Dyt, C., Griffiths, C., et al., 2012. Numerical Forward Modelling of ‘Fluxoturbidite’ Flume Experiments Using Sedsim. *Marine and Petroleum Geology*, 35(1): 190—200. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2012.02.012
- Li, C., Chen, Q., Zhang, J., et al., 2000. Stratigraphy and Paleoenvironmental Changes in the Yangtze Delta during the Late Quaternary. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(4): 453—469. doi: 10.1016/S1367—9120(99)00078—4
- Li, C., Wang, P., Sun, H., et al., 2002. Late Quaternary Incised-Valley Fill of the Yangtze Delta (China): Its Stratigraphic Framework and Evolution. *Sedimentary Geology*, 152(1—2): 133—158. doi: 10.1016/S037—0738(02)00066—0
- Li, F., Dyt, C., Griffiths, C., 2004. 3D Modelling of the Isostatic Flexural Deformation. *Computers & Geosciences*, 30(9—10): 1105—1115. doi: 10.1016/j.cageo.2004.08.005
- Li, F., Dyt, C., Griffiths, C., 2006. Multigrain Coastal Sedi-

- mentation Model Based on Equilibrium Sediment Distribution: Application to Nourishment Design. *Estuarine Coastal Shelf Sci.*, 67(4): 543–730. doi: 10.1016/j.ecss.2006.01.006
- Li, F., Dyt, C., Griffiths, C., et al., 2007. Predicting Seabed Change as a Function of Climate Change over the Next 50 years in the Australian Southeast? In: Harff, J., Hay, W.W., Tetzlaff, D.M., eds., *Coastline Changes: Interrelation of Climate and Geological Processes*. GSA Book, New York, 43–64.
- Li, Z., Saito, Y., Matsumoto, E., et al., 2006a. Climate Change and Human Impact on the Song Hong (Red River) Delta, Vietnam, During the Holocene. *Quaternary International*, 144(1): 4–28. doi: 10.1016/j.quaint.2005.05.008
- Li, Z., Saito, Y., Matsumoto, E., et al., 2006b. Palynological Record of Climate Change during the Last Deglaciation from the Song Hong (Red River) Delta, Vietnam. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 235(4): 406–430. doi: 10.1016/j.palaeo.2005.11.023
- Liang, D., Cheng, L., Li, F., 2005. Numerical Modelling of Scour below a Pipeline in Currents. *Coastal Engineering*, 52(1): 43–62. doi: 10.1016/j.coastaleng.2004.09.001
- Liu, K., Griffiths, C.M., Dyt, C., 2001. Computer Modelling of the Oxfordian Depositional System in the Kendrew Trough, Dampier Sub-basin. *The APPEA Journal*, 41(1): 463–481.
- Ma, Y.L., Wei, Q.X., 2002. The Sedimentation Mechanism and Development Model of the Ganjiang Delta. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 13(4): 33–38 (in Chinese with English abstract).
- Ma, Z.X., Huang, J.H., Wei, Y., et al., 2004. Organic Carbon Isotope Records of the Poyang Lake Sediments and Their Implications for the Paleoclimate during the Last 8 ka. *Geochimica*, 33(3): 279–285 (in Chinese with English abstract).
- Nguyen, V.L., Ta, T.K.O., Tateishi, M., 2000. Late Holocene Depositional Environments and Coastal Evolution of the Mekong River Delta, Southern Vietnam. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(4): 427–439. doi: 10.1016/S1367-9120(99)00076-0
- Saito, Y., Wei, H., Zhou, Y., et al., 2000. Delta Progradation and Chenier Formation in the Huanghe (Yellow River) Delta, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(4): 489–497. doi: 10.1016/S1367-9120(99)00080-2
- Saito, Y., Yang, Z., Hori, K., 2001. The Huanghe (Yellow River) and Changjiang (Yangtze River) Deltas; a Review on Their Characteristics, Evolution and Sediment Discharge during the Holocene. *Geomorphology*, 41(2–3): 219–231. doi: 10.1016/S0169-555X(01)00118-0
- Salles, T., Marchès, E., Dyt, C., et al., 2010. Simulation of the Interactions between Gravity Processes and Contour Currents on the Algarve Margin (South Portugal) Using the Stratigraphic Forward Model Sedsim. *Sedimentary Geology*, 229(3): 95–109. doi: 10.1016/j.sedgeo.2009.05.007
- Salles, T., Mulder, T., Gaudin, M., et al., 2008. Simulating the 1999 Capbreton Canyon Turbidity Current with a Cellular Automata Model. *Geomorphology*, 97(3–4): 516–537. doi: 10.1016/j.geomorph.2007.09.005
- Shankman, D., Keim, B.D., Song, J., 2006. Flood Frequency in China's Poyang Lake region: Trends and Teleconnections. *International Journal of Climatology*, 26(9): 1255–1266. doi: 10.1002/joc.1307
- Stanley, D.J., Warne, A.G., 1994. Worldwide Initiation of Holocene Marine Deltas by Deceleration of Sea-Level Rise. *Science*, 265(5169): 228–231. doi: 10.1126/science.265.5169.228
- Ta, T.K.O., Nguyen, V.L., Tateishi, M., et al., 2001. Sedimentary Facies, Diatom and Foraminifer Assemblages in a Late Pleistocene Holocene Incised-Valley Sequence from the Mekong River Delta, Bentre Province, Southern Vietnam; the BT2 Core. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20(1): 83–94. doi: 10.1016/S1367-9120(01)00028-1
- Ta, T.K.O., Nguyen, V.L., Tateishi, M., et al., 2002. Holocene Delta Evolution and Sediment Discharge of the Mekong River, South Vietnam. *Quaternary Science Reviews*, 21(16–17): 1807–1819. doi: 10.1016/S0277-3791(02)00007-0
- Tanabe, S., Hori, K., Saito, Y., et al., 2003. Song Hong (Red River) Delta Evolution Related to Millennium-Scale Holocene Sea-level Changes. *Quaternary Science Reviews*, 22(21–22): 2345–2361. doi: 10.1016/S0277-3791(03)00138-0
- Tanabe, S., Saito, Y., Vu, Q.L., et al., 2006. Holocene Evolution of the Song Hong (Red River) Delta System, Northern Vietnam. *Sedimentary Geology*, 187(1–2): 29–61. doi: 10.1016/j.sedgeo.2005.12.004
- Tetzlaff, D.M., Harbaugh, J.W., 1989. *Simulating Clastic Sedimentation*. Van Nostrand Reinhold, New York, 196.
- Zhang, C.S., Chen, Q.S., 1996. Holocene Sedimentary Environment and Characteristics in the Poyang Lake. *Journal of Jiangnan Petroleum Institute*, 18(1): 24–29 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, C.S., Liu, Z.B., 1997. *Deposits and Simulation Experiment of Modern Rivers and Lakes*. Geological Press,



Beijing.

- Zhu, H. H., Zheng, C. S., Wang, Y. F., et al., 1981. A study of the Sedimentary Facies of the Deltas in Poyang Lake. *Oil & Gas Geology*, 2(2): 89—104 (in Chinese with English abstract).
- Zong, Y., Huang, K., Yu, F., et al., 2012. The Role of Sea-Level Rise, Monsoonal Discharge and the Palaeolandscape in the Early Holocene Evolution of the Pearl River Delta, Southern China. *Quaternary Science Reviews*, 54: 77—88. doi: 10.1016/j.quascirev.2012.01.002
- Zou, C. N., Zhao, W. Z., Zhang, X. Y., et al., 2008. Formation and Distribution of Shallow-Water Deltas and Central basin Sandbodies in Large Open Depression Lake Basins. *Acta Geologica Sinica*, 82(6): 813—825 (in Chinese with English abstract).
- 郭华, Hu, Q., 张奇, 2011. 近 50 年来长江与鄱阳湖水文相相互作用的变化. *地理学报*, 66(5): 609—618.
- 胡春华, 1999. 历史时期鄱阳湖湖口长江倒灌分析. *地理学报*, 54(1): 77—82.
- 马逸麟, 危泉香, 2002. 赣江三角洲的沉积机制及生长模式. *中国地质灾害与防治学报*, 13(4): 33—38.
- 马振兴, 黄俊华, 魏源, 等, 2004. 鄱阳湖沉积物近 8 ka 来有机质碳同位素记录及其古气候变化特征. *地球化学*, 33(3): 279—285.
- 张春生, 陈庆松, 1996. 全新世鄱阳湖沉积环境及沉积特征. *江汉石油学院学报*, 18(1): 24—29.
- 张春生, 刘忠保, 1997. 现代河湖沉积与模拟实验. 北京: 地质出版社.
- 朱海虹, 郑长苏, 王云飞, 等, 1981. 鄱阳湖现代三角洲沉积相研究. *石油与天然气地质*, 2(2): 89—104.
- 邹才能, 赵文智, 张兴阳, 等, 2008. 敞流坳陷湖盆浅水三角洲与湖盆中心砂体的形成与分布. *地质学报*, 82(6): 813—825.

#### 附中文参考文献

郭华, Hu, Q., 张奇, 2011. 近 50 年来长江与鄱阳湖水文相