

doi:10.3799/dqkx.2017.134

湖平面升降对浅水三角洲影响的沉积数值模拟实验

曾 灿, 尹太举*, 宋亚开

长江大学地球科学学院, 湖北武汉 430100

摘要: 湖平面升降对三角洲沉积体的发育具有重要影响, 前人对此做了相关研究, 但对于其形成过程缺乏定量分析. 利用水动力数值模拟的方法正演模拟了湖平面变化情况下浅水三角洲的形成过程并精确分析了其演化规律. 根据现代河流三角洲的水动力特征, 设计了水动力及泥沙条件, 采用 Delft3D 模拟了湖平面上升和湖平面下降两种沉积过程. 通过对浅水三角洲的模拟分析得到湖平面的升降对沉积体的形成与分布、河道的演化具有重要影响, 结合平面和剖面分析发现沉积体的多期叠置现象. 研究结果表明湖平面控制着沉积体的进退及其沉积特征, 且利用水动力数值模拟方法可较好地揭示湖平面变化下浅水三角洲的演化过程.

关键词: 沉积数值模拟; 湖平面升降; 浅水三角洲; Delft3D; 石油地质.

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2017)11-2095-10

收稿日期: 2017-05-12

Experimental on Numerical Simulation of the Impact of Lake Level Plane Fluctuation on Shallow Water Delta

Zeng Can, Yin Taiju*, Song Yakai

School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China

Abstract: Lake level fluctuation has an important influence on the development of delta sediments. However, previous studies have not included any quantitative analysis of the formation process. In this paper, the hydrodynamic numerical simulation method is used to simulate the formation process of the shallow water delta in the case of lake level fluctuation and to analyze its evolution law. According to the hydrodynamic characteristics of modern river delta, the hydrodynamic and sedimentary conditions were designed. Two sedimentation processes of lake level fluctuation were simulated by Delft3D. The simulation analysis show that lake level fluctuation exerts great impact on the formation and distribution of the sediments, and the evolution of the river channel. Combined with plane and profile analysis, the multi-period superposition of sedimentary body was found. The results show that the lake level controls the advance and retreat of the sedimentary body and its sedimentary characteristics, and the hydrodynamic numerical simulation method can better reveal the evolution process of the shallow water delta in the case of lake level fluctuation.

Key words: numerical simulation of sediments; lake level fluctuation; shallow water delta; Delft3D; petroleum geology.

近几十年油气勘探表明, 三角洲是一类与油气密切相关的沉积体系, 世界上许多油气田与三角洲相有关(何幼斌和王文广, 2007). Fisk *et al.* (1954) 最早提出了浅水三角洲的概念, 随后更多的学者开始对此进行研究, 按水体深度将三角洲分为深水 and 浅

水两大类(Donaldson, 1974; Postma, 1990). 近年来, 大型浅水三角洲已成为国际油气藏勘探的重点(黄秀等, 2013). 浅水三角洲是湖盆内大面积砂体分布的重要成因(邹才能等, 2008), 其发育的主控因素包括盆地构造背景(Postma, 1990; 岳绍飞等, 2016)、水体深

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.41672119); 国家重大专项(Nos.2016ZX05024-003-004, 2016ZX05058-001-002).

作者简介: 曾灿(1992-), 女, 正在攻读地质工程专业硕士, 主要从事沉积储层方面的研究. ORCID: 0000-0002-2397-0515.

E-mail: 279449224@qq.com

* **通讯作者:** 尹太举, E-mail: 278806207@qq.com

引用格式: 曾灿, 尹太举, 宋亚开, 2017. 湖平面升降对浅水三角洲影响的沉积数值模拟实验. 地球科学, 42(11): 2095-2104.

度、河流作用、湖(海)平面变化(Porebski and Steel, 2006)、气候及物源供给(曾智伟等, 2017)等地质条件。前人在浅水三角洲沉积特征、发育规律、控制因素等方面已有较多研究(楼章华, 1999; 张昌民等, 2010; 朱永进等, 2011; 朱筱敏等, 2012), 然而对于其形成过程尚缺乏定量的剖析。湖平面变化是形成浅水三角洲的重要因素, 湖平面变化和物源因素控制了层序及体系域的发育样式(史双双等, 2012)。王亚青(2009)指出湖平面变化控制了沉积物的供给, 从而控制了沉积体的发育期次和发育类型。湖平面的升降变化直接影响着浅水湖盆三角洲的沉积特征(蔡希源和辛仁臣, 2004)。浅水湖盆三角洲沉积在我国中生代地层发育广泛且油气富集, 然而针对湖盆中沉积的三角洲还没有形成较为统一的认识(胡圣武和翟书礼, 2013), 且在研究湖平面变化对浅水三角洲影响方面缺乏一个定量手段。本文将通过数值模拟的方法定量分析湖平面变化下浅水三角洲的形成与演化特征。

20 世纪 70 年代后期水动力数值模拟兴起, 水动力数值模拟在河流、河口、近海、湖泊等方面都有应用(廖庚强, 2013)。目前国际上应用较多的水动力数值模拟软件有美国的 POM、ECOM 模型, 丹麦的 MIKE 系列软件, 荷兰的 Delft3D 软件以及美国 Brigham 大学研发的 SMS 软件等(邵准远, 2013)。Delft3D 软件从 20 世纪 80 年代中期起在国内也开始广泛应用, 如长江口、杭州湾、渤海湾、太湖、滇池等水动力数值模拟(范翻平, 2010)。

Delft3D 是由荷兰 Delft Hydraulics 开发的一款水动力数值模拟软件包, 该软件功能强大, 操作简单, 使用便捷。其理论依据为水动力学、泥沙动力学和数值计算方法, 即使用数值方法在计算机中对流体力学的控制方程进行求解, 从而预测流场的流动(周书敏等, 2013)。Delft3D 由 7 个模块组成, 本文用到的主要是水动力模块(Delft3D-Flow), 该模块主要用于浅水环境, 即水平运动尺度远大于垂向运动尺度的情况。

通过 Delft3D 水动力数值模拟, 笔者将对湖平面升降变化情况下浅水三角洲沉积体的形成与演化进行讨论, 为油气勘探与开发提供指导。

1 湖平面变化下的三角洲沉积响应特征

与正常的三角洲沉积相比, 浅水三角洲的形成和发育主要受河流作用的控制, 而湖盆的波浪改造作用

很弱, 其独特的沉积作用形成了浅水三角洲特有的沉积体展布形态(何义中等, 2002; 朱伟林等, 2008; 李洁等, 2011)。一般认为盆底地形平缓、坡度较小、较为缓慢稳定的沉降背景有利于浅水三角洲的形成。

湖平面存在上升期(丰水期)、相对稳定期和下降期(枯水期)3 种变化情况。湖平面的升降变化控制了三角洲沉积体的空间展布形态, 主要表现在以下两个方面: 湖平面上升期, 湖水面积扩大, 水流带着沉积物在靠陆地一侧沉积; 湖平面下降期, 湖水面积萎缩, 水流带着沉积物向湖盆方向沉积。因此湖平面的上升与下降会使沉积体出现退积和进积两种现象。当沉积体为三角洲时, 湖平面上升形成退积型三角洲, 湖平面下降则形成进积型三角洲。现今鄱阳湖的赣江三角洲就是受气候变化导致湖平面发生变化而形成的进积型浅水三角洲(朱筱敏等, 2013)。

2 水动力数值模拟方法

本文利用水动力数值模拟软件 Delft3D 建立模型。Delft3D 建立在纳维-斯托克斯方程(Navier-Stokes equations, 简称 N-S 方程)的基础上, 通过使用交替方向法(alternating direction implicit method, ADI)对相应坐标系下的控制方程组进行离散求解(图 1)。

对于浅水湖盆而言, 由于水体相对较浅, 在垂向上流速虽有差异, 但分层现象并不明显, 这种情况下可以认为各相关物理量沿水深变化相对于沿水平方向的变化较小。因此, 通过各物理量沿水积分得到垂向平均的二维浅水方程组来描述水体运动(范翻平, 2010)。为此, Delft3D 中对 N-S 方程作了布辛涅斯克假定、静水压假定对方程进行简化, 简化的方程如下。

(1) 连续性方程:

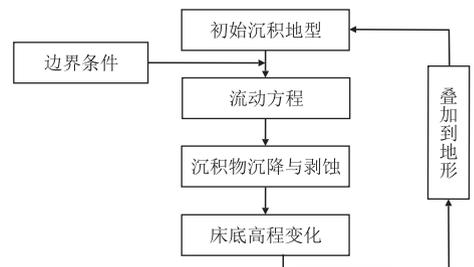


图 1 模型主要部分的流程配置关系

Fig.1 Process configuration relational of the main part of the model

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial [(d + \xi)U]}{\partial x} + \frac{\partial [(d + \xi)V]}{\partial y} = Q, \quad (1)$$

其中: ξ 为自由表面到基准面的距离(m); d 为基准面以下的水深(m); U 、 V 为平均速度(m/s); Q 为单位面积的源或汇流量(m/s)。

(2) 动量方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\omega}{d + \xi} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - f_v = \\ & - \frac{1}{\rho} P_u + F_u + \frac{1}{(d + \xi)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} (v_v \frac{\partial u}{\partial \sigma}) \\ & \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\omega}{d + \xi} \frac{\partial v}{\partial \sigma} - f_u =, \quad (2) \\ & - \frac{1}{\rho} P_v + F_v + \frac{1}{(d + \xi)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} (v_v \frac{\partial v}{\partial \sigma}) \\ & \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = - \frac{\partial \xi}{\partial t} - \frac{\partial [(d + \xi)u]}{\partial x} - \frac{\partial [(d + \xi)v]}{\partial y} + \\ & H(q_{in} - q_{out}) + P - E \end{aligned}$$

其中: ξ 为自由表面到基准面的距离(m); d 为基准面以下的水深(m); u 、 v 、 ω 分别为 x 、 y 和 σ 方向(垂向)的流速(m/s); ρ 为流体密度(kg/m³); P 为压强(Pa); P_u 、 P_v 为压力梯度(kg/(m²·s²)), F_u 和 F_v 是水平雷诺应力(m/s²); H 为总的水深, $H = d + \xi$ (m); E 为系统的蒸发量(m/s); V_v 为垂直涡流粘度(m²/s); f_v 、 f_u 分别为垂直和水平方向的摩擦系数; q_{in} 、 q_{out} 分别为单位体积的来源和下渗(1/s)。

Delft3D 中的沉积物类型分为黏性和非黏性泥沙两种。黏性泥沙在水流中的搬运方式为悬浮搬运,非黏性泥沙的搬运方式为悬浮搬运或推移搬运。不同类型的泥沙对应不同的输沙方程(User Manual of Delft3D-Flow, 2013)。

当沉积物为粘性泥沙时,对于粘性泥沙我们采用扩散方程进行模拟,公式如下:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial c^{(i)}}{\partial t} + \frac{\partial uc^{(i)}}{\partial x} + \frac{\partial vc^{(i)}}{\partial y} + \frac{\partial (\omega - \omega_s^{(i)})c^{(i)}}{\partial z} - \\ & \frac{\partial}{\partial x} (\epsilon_{s,x}^{(i)} \frac{\partial c^{(i)}}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial y} (\epsilon_{s,y}^{(i)} \frac{\partial c^{(i)}}{\partial y}) - \frac{\partial}{\partial z} (\epsilon_{s,z}^{(i)} \frac{\partial c^{(i)}}{\partial z}) = 0, \quad (3) \end{aligned}$$

其中: c 为沉积组分的浓度(kg/m³); u 、 v 、 ω 为水流的速度分量(m/s); $\epsilon_{s,x}$ 、 $\epsilon_{s,y}$ 、 $\epsilon_{s,z}$ 为沉积组分的扩散系数(m²/s); ω_s 为沉积组分的沉降速度(m/s)。

对于非粘性泥沙采用 Van Rijn 的沉积物的沉降函数进行模拟,公式如下:

$$\begin{aligned} & \frac{(s^{(i)} - 1) g D_s^{(i)2}}{18\nu}, \quad 65 \mu\text{m} < D_s \leq 100 \mu\text{m}, \\ & \omega_{s,o}^{(i)} = \frac{10\nu}{D_s} \left(\sqrt{1 + \frac{0.01(s^{(i)} - 1)gD_s^{(i)3}}{\nu^2}} - 1 \right), \quad 100 \mu\text{m} < D_s \leq 1000 \mu\text{m}, \\ & 1.1 \sqrt{(s^{(i)} - 1)gD_s^{(i)}}, \quad 1000 \mu\text{m} < D_s, \quad (4) \end{aligned}$$

其中: $\omega_{s,o}$ 为沉降速率(m/s), s 为沉积组分的相对密度 ρ_s / ρ_w ; D_s 为沉积组分代表粒径; ν 为水体的运

动粘度(m²/s)。

3 模拟实验设置

本文模型的设置类比自然中真实的浅水湖盆三角洲,以保证模型的可靠性。

3.1 模型网格划分及初始底型设置

网格的合适与否会影响网格的正交性,将直接影响计算的精度及时长(User Manual of Delft3D-Flow, 2013)。

本文是在充分调研后针对浅水三角洲进行的理论研究,以 Google Earth 平台提供的现代三角洲沉积数据和前人做过的类似研究数据为参考(Edmonds and Slingerland, 2009; Schuurman *et al.*, 2015; 王杨君等,2016),设计了模型的初始条件。

考虑到模型参数设置下所形成三角洲的沉积范围,本次模型设置为:(1)模拟区为 150 km × 200 km、底部形态平缓、向盆地倾斜的楔型水槽;(2)模拟区水深由物源区 -10 m 线性增加至沉积区 20 m,坡度约为 0.002°(图 2);(3)河道为矩形,宽 600 m,与鄱阳湖赣江中部的河宽近似;(4)根据上述几何尺度要求,将河道区域划分为 500 × 6 个网格,湖盆区域划分为 100 × 200 个网格,总网格数量为 30 000 个,其中 ξ 与 η 方向网格尺度均为 100 m。

3.2 模型边界条件和其他参数设置

本文的研究对象为浅水三角洲,其主要的地质营力为河流,波浪和潮汐对其影响较小,因此模型被设置为无构造沉降作用、无波浪与潮汐作用的浅水三角洲,重点讨论河流作用对浅水三角洲形成与演化的影响。故模型中不设置波浪与潮汐场,仅设置进口与出口两个边界条件,位置如图 3。进口边界条件类型(type)设置为河流流量(total discharge)、出口

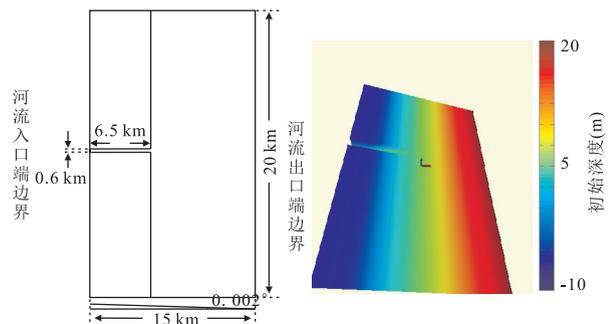


图 2 初始底型三维示意

Fig.2 Initial bed level figure

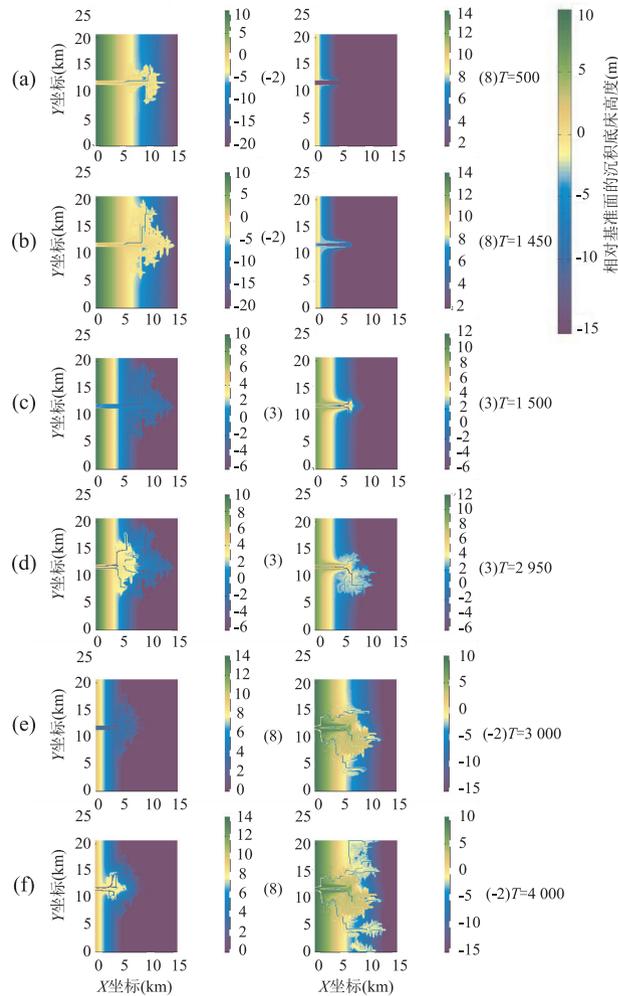


图 3 三角洲演化过程中典型时间切片地貌分布

Fig. 3 Typical time slice geomorphic distribution in delta evolution

左侧为模型 S1(-2~(3~8)); 右侧为模型 S2((8~3)~-2)

表 1 模型类别

Table 1 Model category

模型	流量 (m^3/s)	沉积物浓度 (kg/m^3)	出口水位 (m)	河道宽度 (m)	河床坡度 ($^\circ$)
S1	2 000	0.4	-2~(3~8)	600	0.002
S2	2 000	0.4	(8~3)~-2	600	0.002

边界条件类型设置为水位(water level).

为充分观察不同条件下三角洲砂体及其河道的演化特征,设置了两组模型(scenario):模型一(S1)与模型二(S2),2组模型除水位设置不同外,其他参数均一致(表 1).

模型流量和泥沙量参数的设置在模型规定范围内类比自然界真实三角洲形成条件获得,同时参考了中华人民共和国水利部所公布的《2015 年中国河流泥沙公报》,鄱阳湖赣江近 10 年年平均流量为

表 2 模型参数

Table 2 Model parameters

基本参数	模拟设定值
网格分辨率	100 m \times 100 m
网格规模	30 000
模拟时长	360 d
时间步长	30 s
地貌演化系数	60
地貌演化间隔时间	720 min
泥沙输运方程	Van Rijn
沉积物组分	3
密度	2 650 kg/m^3
河流长度	6.5 km
河流宽度	600 m
河流深度	3 m
河流流量	2 000 m^3/s
沉积物类型(组分一)——粗砂	Non-Cohesive
中值粒径(组分一)	500 μm
干容重(组分一)	1 600 kg/m^3
初始厚度(组分一)	15 m
沉积物类型(组分二)——细砂	Non-Cohesive
中值粒径(组分二)	200 μm
干容重(组分二)	1 600 kg/m^3
初始厚度(组分二)	20 m
沉积物类型(组分三)——泥	Cohesive
干容重(组分三)	500 kg/m^3
沉降速率(组分三)	0.25 mm/s
组分一的供给量(sand1)	0.15 kg/m^3
组分二的供给量(sand2)	0.2 kg/m^3
组分三的供给量(mud)	0.05 kg/m^3

2 129 m^3/s ,多年平均含沙量为 0.12 kg/m^3 (中国河流泥沙公报,2015).水位的设置综合考虑了模型参数之间的匹配以及前人的研究成果,尹太举等(2012)调查发现,鄱阳湖水体较浅,平均 8.4 m.每个模型的泥沙量一致,沉积物组分设置为 sand1、sand2和 mud 三种,分别代表了河流携带粗粒径沙质、中等粒径沙质和河流携带泥质,其中河流携带粗粒径沙质 0.15 kg/m^3 ,中等粒径沙质 0.2 kg/m^3 ,泥质含量被设置为 0.05 kg/m^3 ,详细参数设置(表 2).

4 模拟结果分析

通过计算模拟,可观察到各模型浅水三角洲随时间的动态演化过程(图 3,图 4);图 4 中每一列为一组模型,每一行为各模型在同一时间点的切片.简单地看,水位的变化对浅水三角洲的展布有着重要的影响.

4.1 平面分布特征

图 3 左侧为水位上升模型 S1,右侧为水位下降

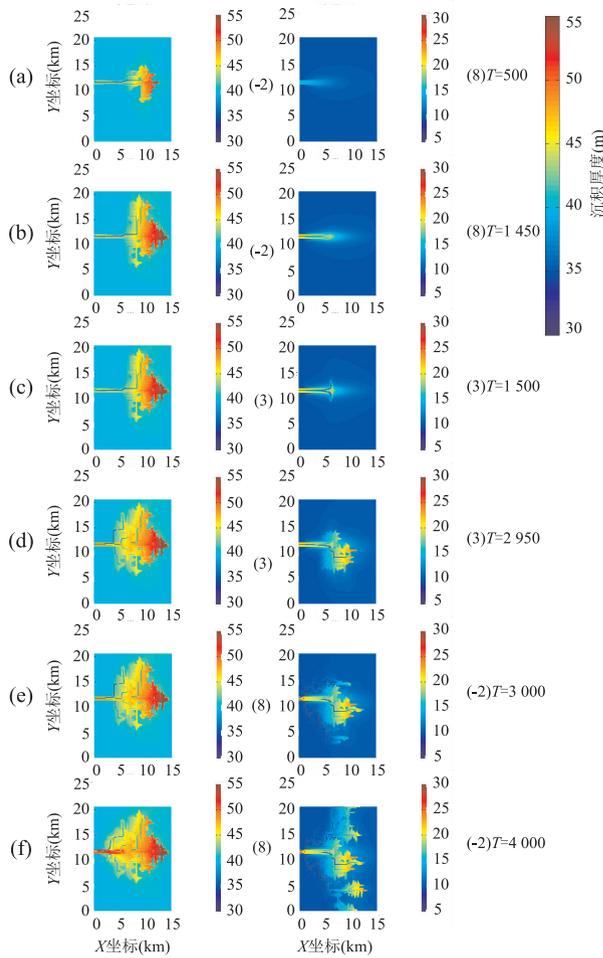


图 4 三角洲演化过程中典型时间切片沉积厚度

Fig.4 Typical time slice deposition thickness in delta evolution

左侧为模型 S1(-2~(3~8));右侧为模型 S2((8~3)~-2)

模型 S2.每个阶段的水位各选取了两个典型的时间切片.模型 S1 中,模型初期水位较低时,随着此阶段时间的推移,沉积体展布范围逐渐扩大,初期形成的支流间湾被后期的河道沉积物所充填,沉积体呈现“头大尾小”的形态;随着沉积空间的减小,河道首先在三角洲头部发生改道(图 5 中红色椭圆圈出部位,5b、5d 分别为 5a、5c 对应的流速分布图),随着沉积空间的进一步减小,河道的位置向尾部迁移(图 6 中红色椭圆圈出部位),最终形成朵叶状的沉积体(图 6b);期间发育较多小面积湖泊(图 6a 中黑色椭圆圈出部位);后期若水位上升,则前期的支流间湾被很好的保存下来;若水位不变,前期的支流间湾、小面积湖泊会被后期的沉积物所充填(图 6b 中黑色椭圆圈出部位).

当水位上升了 5 m 后,此时水位较低时形成的沉积体(第一期)被淹没在水下,且第一期的沉积及沉积现象很好的保存了下来.随着时间的推移,在靠

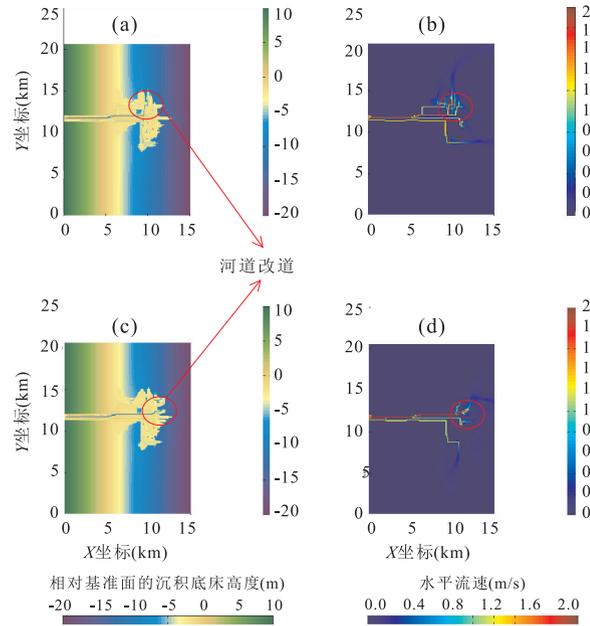


图 5 河道改道演变过程

Fig.5 River diversion evolution process

a.T=500 时刻河道位置;b.T=500 时刻平均流速图上河道分布;c.T=600 时刻河道位置;d.T=600 时刻平均流速图上河道分布(流速大的地方表示河道的分布位置)

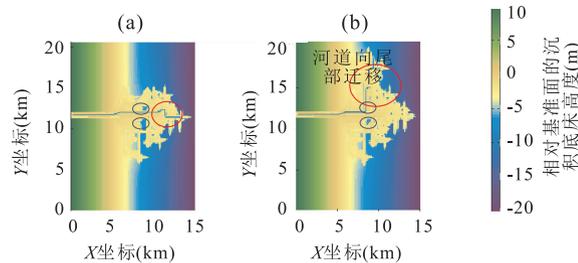


图 6 三角洲形态演化

Fig.6 Delta morphology evolution figure

a.T=1 000 时刻地貌分布;b.T=1 450 时刻地貌分布

近岸的一侧形成第二期的沉积体,覆盖于第一期的沉积体之上,最终的沉积形态为朵状(图 3c 和 3d 中 S1 模型).从图 3 中可观察到第二期沉积体的沉积范围比第一期小.

当水位再次上升 5 m 时,第二期沉积体被淹没在水下,沉积现象也很好的保存了下来.随着时间的推移,第三期沉积体也越来越发育.开始沉积物基本沿着河道沉积,形成顺物源垂直岸线的长条状,随后发育成朵叶状(图 3e 和 3f 中 S1 模型).从图 3 中可观察到第三期沉积体的沉积范围比第二期小,水位上升会发生沉积体的多期叠置现象.

模型 S2 中,初期水位较高时,沉积物在河道内或者河道边缘沉积,形成初期顺物源垂直岸线的长

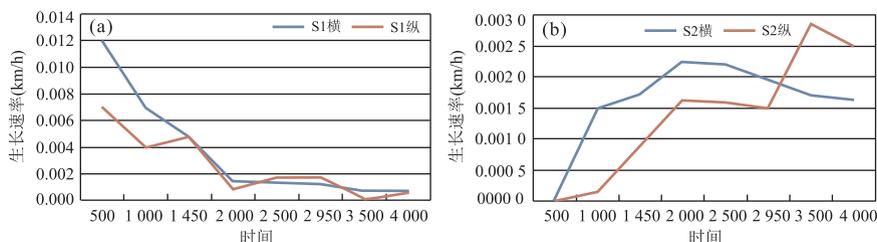


图 7 模型典型时刻生长速率分布

Fig.7 Model typical time growth rate distribution figure

a.模型 S1 典型时刻生长速率;b.模型 S2 典型时刻生长速率

条状天然堤(图 3a 和 3b 中 S2 模型)。

当水位下降了 5 m 后,沉积物开始露出水面,河道发生分叉,沉积物在河道两侧沉积,形成三角洲雏形。随着时间的推移,三角洲形成且向湖盆方向进积,展布范围越来越大;从图 3c 和图 3d 中 S2 模型中发现,由于水动力及沉积厚度原因,左侧河道慢慢被废弃,沉积物开始在河道右侧堆积。

当水位再次下降 5 m 时,由于前一期沉积体的阻挡,其两侧的势能相对降低,水流携带沉积物在河口处沿着沉积体两侧沉积,形成新一期的沉积体;随着时间的推移,沉积体在垂直物源方向展布范围越来越大,向湖盆方向延伸仅有微小变化(图 3e 和 3f 中 S2 模型)。水位下降会形成单个的朵体,若河道的迁移与改道频繁,最终可形成连片的大面积沉积体。

从两个模型的演化过程(图 3)可发现沉积体的生长速率均在低水位时较大,高水位时较小。生长速率用沉积体的长(宽)/时间分别代表其横向生长速率和纵向生长速率。模型 S1 中随着水位的上升,其横向、纵向生长速率降低;模型 S2 中随着水位的下降,其横向、纵向生长速率升高,在 $T=3500$ 、 $T=4000$ 时刻由于模型边界的限制,生长边界已达到最大值,所以随着时间的推移,这两个时刻的生长速率曲线是下降的(图 7),说明水位下降有利于沉积体的发育。

为了定量表征沉积体的形态与规模,对其宽厚比进行统计分析。在垂直物源的方向上,对其宽厚比值进行统计分析,选取模型 $T=500$ 、 $T=1000$ 、 $T=1450$ 、 $T=2000$ 、 $T=2500$ 、 $T=2950$ 、 $T=3500$ 、 $T=4000$ 时刻沉积最大宽度的位置统计其厚度,得到其分布规律(图 8)。

分析发现,在低水位时,沉积体宽厚比较大,容易形成面积大、厚度薄的砂体;水位较高时,沉积体宽厚比小,形成的砂体面积小,但垂向上厚度较厚。

结合上文分析认为,在三角洲沉积过程中随着水位的上升,平面上沉积物会向岸的方向移动(退

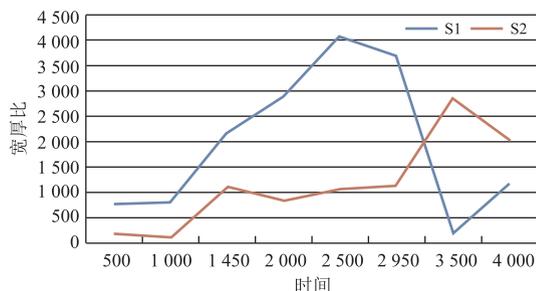
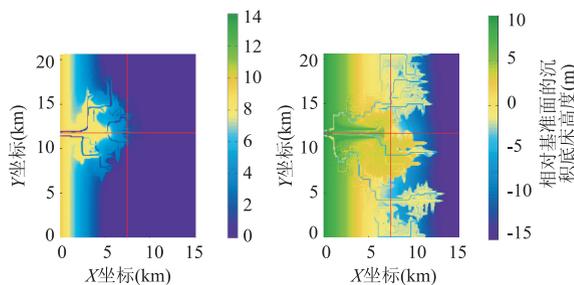


图 8 模型典型时刻沉积体宽厚比分布

Fig.8 Model typical time sedimentary body width thickness ratio distribution figure

蓝色为模型 S1(-2~(3~8));红色为模型 S2((8~3)~-2)

图 9 模型最后时刻($T=4405$)剖面位置Fig.9 Model last time ($T=4405$) profile position figure

左侧为模型 S1(-2~(3~8));右侧为模型 S2((8~3)~-2)

积),且沉积范围较前一期有所减小(图 3d),纵向上沉积体发生多期叠置,总体沉积厚度增加(图 4 左);在水位下降的过程中,沉积物并不是在前期沉积体之上进积,而是沉积在前期沉积体的两侧,使得沉积范围在垂直物源方向逐渐扩大(图 3e, 3f),但纵向上沉积厚度较薄(图 4 右);在水平面稳定的情况下沉积物主要向四周沉积,沉积范围逐渐增加,但纵向上沉积厚度小、连续性差。

4.2 剖面特征

平面上观察到的主要是浅水三角洲的形态及展布范围等特征,其垂向上的变化需从剖面上进行分析。如图 9 所示,分别选取了两个模型最后时刻的

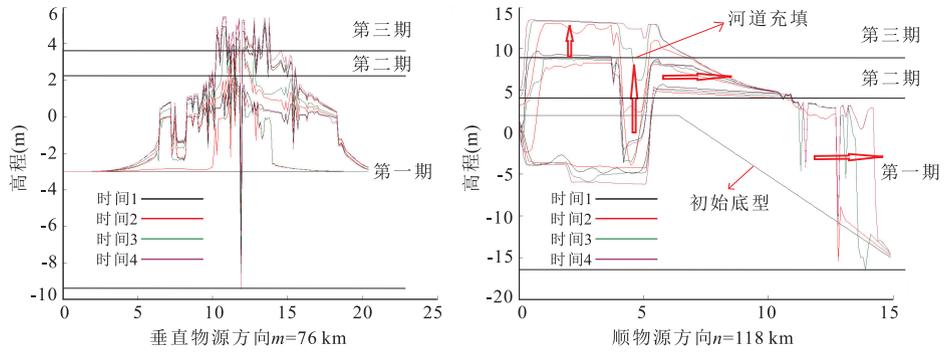


图 10 模型 S1 三角洲沉积地貌

Fig.10 Model S1 delta sedimentary topography figure

时间 1~时间 4 表示各期次的时间递进;左侧为纵剖面(垂直物源 $m=76$);右侧为横剖面(顺物源 $n=118$)

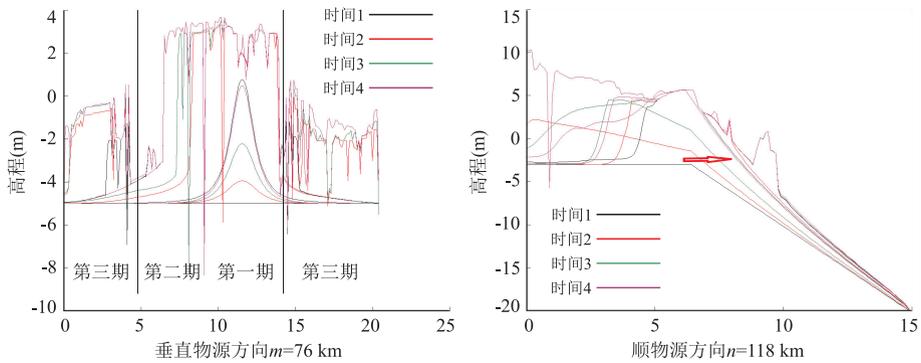


图 11 模型 S2 三角洲沉积地貌

Fig.11 Model S2 delta sedimentary topography figure

说明同图 10

两条剖面.

在垂直物源剖面上,可观察到三期沉积体的叠置情况,沉积物主要以向上的加积增厚为主,沉积范围从第一期至第三期逐渐减小(图 10a);在顺物源的剖面上,三期沉积体以退积为主,其中第一期、第二期自身以进积为主、第三期以向上加积为主,期间可见河道被充填过程(图 10b).

在水位下降过程中,浅水三角洲沉积体的沉积范围广,在垂直物源的方向上随着期次的增加逐渐向两侧展布,第三期沉积体在前两期的左右两侧沉积(图 11a);在顺物源方向上每一期自身都以进积为主,但各个期次间很少见有进积的现象(图 11b).

4.3 模型结果讨论

湖平面变化对浅水三角洲沉积体系的影响前人已有研究,朱筱敏等(2012, 2013)在对浅水三角洲的研究中发现,湖平面下降时期,湖盆发生收缩,河流沉积作用大范围发生,携带碎屑物质向盆地中心推进;湖平面上升期,湖盆发生扩张,沉积主要发生在近物源区,且会造成分流河道位于水下形成水下

分流河道. 马晋文等(2012)对须家河组浅水三角洲砂岩成因机理进行了沉积模拟实验分析,指出湖水水位上升,沉积物向物源区退积;湖水水位下降,沉积物向湖区进积,湖盆范围缩小,砂体纵向延伸远,三角洲面积扩大,湖水水位进退是砂体大面积分布的条件之一.这与本文通过 Delft3D 对浅水三角洲的模拟得到的结论和现象基本一致.通过对比分析认为, Delft3D 数值模拟可较好的对浅水三角洲受湖平面变化影响的情况进行模拟,且可进行推广.传统方法如沉积物理模拟实验往往受人为因素影响较大,且研究对象也较局限, Delft3D 水动力数值模拟为我们提供了一种简便、受人为因素干扰小的研究工具,具有一定的实用价值.

本次模拟采用单因素分析法一定程度上反映了湖平面升降变化下浅水三角洲的形成与演化特征,但浅水三角洲的发育不仅受到湖平面变化的影响,还受到盆地构造背景、水体深度、河流作用、气候、物源等要素的影响,真实的浅水三角洲受到所有要素的综合影响,模型是为了方便讨论问题而采用单因

素分析法,若要充分地研究浅水三角洲的形成与演化,必须综合考虑其他因素的共同影响。

若进一步对水动力数值模拟方法在沉积学方面的应用进行研究,研究对象可推广至曲流河、辫状河、冲积扇等沉积体系。

5 结论

本文通过水动力数值模拟研究,分析了湖平面变化情况下浅水三角洲的形成与演化特征,主要得到以下结论:(1)在水位上升的过程中,平面上,浅水三角洲沉积体发生退积、沉积范围变小;纵向上,水位上升会导致多期砂体的叠置,这是形成厚层砂体的主要原因;(2)在水位下降的过程中,与传统理论上的进积型不同的是,沉积主要发生在前期沉积体的两侧,平面上浅水三角洲的展布范围逐渐扩大,但垂向上厚度变化较小;(3)在水平面稳定的情况下沉积物主要向四周沉积,因此水平面稳定是形成大片的连片沉积砂体的重要控制因素;(4)本次模拟基于 Delft3D 水动力数值模拟软件,可在湖平面变化条件下对浅水三角洲的沉积厚度、生长速率、宽厚比等进行定量表征,为沉积学的理论研究提供了一种新的研究手段。

References

- Cai, X. Y., Xin, R. C., 2004. Numerical Simulation on Filling Process of Faulted Basin in Response to Lake-Level Change. *Earth Science*, 29 (5): 539 – 542 (in Chinese with English abstract).
- China River Sediment Bulletin, 2015. Prepared by Water Resources Department of the People's Republic of China. China Water Conservancy and Hydropower Press, Beijing (in Chinese).
- Donaldson, A. C., 1974. Pennsylvanian Sedimentation of Central Appalachians. *Geological Society of America Special Papers*, 148: 47 – 48.
- Edmonds, D. A., Slingerland, R. L., 2009. Significant Effect of Sediment Cohesion on Delta Morphology. *Nature Geoscience*, 3(2): 105 – 109. doi:10.1038/NCEO730.
- Fan, F. P., 2010. The Study of Hydrodynamic Simulation of Poyang Lake Based on Delft3D Model (Dissertation). Jiangxi Normal University, Nanchang (in Chinese with English abstract).
- Fisk, H. N., Kolb, C. R., Mcfarlan, E., et al., 1954. Sedimentary Framework of the Modern Mississippi Delta. *Journal of Sedimentary Petrology*, 24(2): 76 – 99.
- He, Y. B., Wang, G. W., 2007. *Sedimentary Rocks and Sedimentary Facies*. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- He, Y. Z., Chen, H. D., Zhang, J. Q., 2002. Discussion on Sedimentation Mechanism of Two Kind Deltas from Permian-Carboniferous of Central Ordos Basin. *Oil & Gas Geology*, 22 (1): 68 – 71 (in Chinese with English abstract).
- Hu, S. W., Zhai, S. L., 2013. Lake Plane Variation of Dongying Formation in Liaozhong Depression. *Science of Surveying and Mapping*, 38 (2): 56 – 58 (in Chinese with English abstract).
- Huang, X., Liu, K. Y., Zou, C. N., et al., 2013. Forward Stratigraphic Modelling of the Depositional Process and Evolution of Shallow Water Deltas in the Poyang Lake, Southern China. *Earth Science*, 38(5): 1005 – 1013 (in Chinese with English abstract).
- Li, J., Chen, H. D., Lin, L. B., et al., 2011. Genesis and Distribution Pattern of Shallow Water Delta Sandbodies in Member 8 of Lower Shihezi Formation in the Northwest of Ordos Basin. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 38 (2): 132 – 139 (in Chinese with English abstract).
- Liao, G. Q., 2013. Research on the Hydrodynamic and Sediment Numerical Simulation of Liuhe Based on Delft3D (Dissertation). Tsinghua University, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Lou, Z. H., 1999. Controls of the Topography, Climate and Lake Level Fluctuation on the Depositional Environment of a Shallow-Water Delta. *Acta Geologica Sinica*, 73(1): 83 – 92 (in Chinese with English abstract).
- Ma, J. W., Liu, Z. B., Yin, T. J., et al., 2012. Sedimentary Simulation of Xujiahe Formation and Depositional Mechanism of Large Area Sandstone. *Acta Sedimentologica Sinica*, 30(1): 101 – 110 (in Chinese with English abstract).
- Porebski, S. J., Steel, R. J., 2006. Deltas and Sea-Level Change. *Journal of Sedimentary Research*, 76: 390 – 403. doi: 10.2110/jsr.2006.034.
- Postma, G., 1990. An Analysis of the Variation in Delta Architecture. *Terra Nova*, 2(2): 124 – 130.
- Schuurman, F., Shimizu, Y., Iwasaki, T., et al., 2015. Dynamic Meandering in Response to Upstream Perturbations and Floodplain Formation. *Geomorphology*, 253 (5): 94 – 109.
- Shao, Z. Y., 2013. Two-Dimensional Hydrodynamic Numerical Simulation of Chengtong Reach of Yangtze River. *J. of China Three Gorges Univ. (Natural Sciences)*, 35(1): 22 – 25 (in Chinese with English abstract).

- Shi, S. S., Ren, J. Y., Zhang, S., et al., 2012. Sequence Stratigraphic Framework and Its Foemation Mechanism of Post-Rift Inversion Successions in North of Songliao Basin, China. *Earth Science*, 37(3): 545—555 (in Chinese with English abstract).
- User Manual of Delft3D-Flow, 2013. Simulation of Multi-Dimensional Hydrodynamic Flows and Transport Phenomena, Including Sediments. Published and Printed by Deltares, Netherlands.
- Wang, Y. J., Yin, T. J., Deng, Z. H., et al., 2016. Terminal Distributary Channels in Fluvial-Dominated Delta Systems from Numerical Simulation of Hydrodynamics. *Geological Science and Technology Information*, 35(1): 44—52 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. Q., 2009. Effect of Lake Level Fluctuations on Turbidite Fan Development in Wang 58 Block. *Northwestern Geology*, 42(1): 51—56 (in Chinese with English abstract).
- Yin, T. J., Li, X. Y., Zhang, C. M., et al., 2012. Sandbody Shaoe of Modern Shallow Lake Basin Delta Sediments—By Taking Dongting Lake and Poyang Lake for Example. *Journal of Oil and Gas Technology*, 34(10): 1—7 (in Chinese with English abstract).
- Yue, S. F., Wang, H., Yan, D. T., et al., 2016. The Sedimentary Characteristics and Evolution Law of Trassic, Luoyi District. *Earth Science*, 41(10): 1683—1695 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, Z. W., Yang, X. H., Zhu, H. T., et al., 2017. Development Characteristics and Significance of Large Delta of Upper Enping Formation, Baiyun Sag. *Earth Science*, 42(1): 78—92 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, C. M., Yin, T. J., Zhu, Y. J., et al., 2010. Shallow-Water Deltas and Models. *Acta Sedimentologica Sinica*, 28(5): 933—944 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, S. M., Xue, H. X., Tang, W. Y., et al., 2013. Numerical Simulation of Smoke Diffusion for the Generator Exhaust System of Semi-Submersible Platform. *Ship & Ocean Engineering*, 42(1): 132—136 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, W. L., Li, J. P., Zhou, X. H., et al., 2008. Neogene Shallow Water Deltaic System and Large Hydrocarbon Accumulations in Bohai Bay China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 26(4): 575—582 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, X. M., Liu, Y., Fang, Q., et al., 2012. Formation and Sedimentary Model of Shallow Delta in Large-Scale Lake. Example from Cretaceous Quantou Formation in Sanzhao Sag, Songliao Basin. *Earth Science Frontiers*, 19(1): 89—99 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, X. M., Pan, R., Zhao, D. N., et al., 2013. Formation and Development of Shallow-Water Deltas in Lacustrine Basin and Typical Case Analyses. *Journal of China University of Petroleum*, 37(5): 7—14 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Y. J., Yin, T. J., Liu, L. L., 2011. Progress and Discussion on Shallow-Water Delta Sediment. *Journal of Oil and Gas Technology*, 33(3): 22—26 (in Chinese with English abstract).
- 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).

附中文参考文献

- 蔡希源, 辛仁臣, 2004. 湖平面相对升降对断陷湖盆充填过程影响的数值模拟. *地球科学*, 29(5): 539—542.
- 范翻平, 2010. 基于 Delft3D 模型的鄱阳湖水动力模拟研究 (硕士学位论文). 南昌: 江西师范大学.
- 何义中, 陈洪德, 张锦泉, 2002. 鄂尔多斯盆地中部石炭—二叠系两类三角洲沉积机理探讨. *石油与天然气地质*, 22(1): 68—71.
- 何幼斌, 王文广, 2007. 沉积岩与沉积相. 北京: 石油工业出版社.
- 胡圣武, 翟书礼, 2013. 辽中凹陷东营期湖平面变化研究. *测绘科学*, 38(2): 56—58.
- 黄秀, 刘可禹, 邹才能, 等, 2013. 鄱阳湖浅水三角洲沉积体系三维定量正演模拟. *地球科学*, 38(5): 1005—1013.
- 李洁, 陈洪德, 林良彪, 等, 2011. 鄂尔多斯盆地西北部盒 8 段浅水三角洲砂体成因及分布模式. *成都理工大学学报 (自然科学版)*, 38(2): 132—139.
- 廖庚强, 2013. 基于 Delft3D 的柳河水动力与泥沙数值模拟研究 (硕士学位论文). 北京: 清华大学.
- 楼章华, 1999. 地形、气候与湖面波动对浅水三角洲沉积环境的控制作用: 以松辽盆地北部东区葡萄花油层为例. *地质学报*, 73(1): 83—92.
- 马晋文, 刘忠保, 尹太举, 等, 2012. 须家河组沉积模拟实验及大面积砂岩成因机理分析. *沉积学报*, 30(1): 101—110.
- 邵准远, 2013. 长江澄通河段二维水动力数值模拟研究. *三峡大学学报 (自然科学版)*, 35(1): 22—25.
- 史双双, 任建业, 张顺, 等, 2012. 松辽盆地北部裂后反转期层序地层格架及其形成机制. *地球科学*, 37(3): 545—555.
- 王亚青, 2009. 湖平面变化对王 58 地区浊积扇形成与演化的控制作用研究. *西北地质*, 42(1): 51—56.
- 王杨君, 尹太举, 邓智浩, 等, 2016. 水动力数值模拟的河控三角洲分支河道演化研究. *地质科技情报*, 35(1):

44—52.

尹太举,李宣玥,张昌民,等,2012.现代浅水湖盆三角洲沉积砂体形态特征——以洞庭湖和鄱阳湖为例.石油天然气学报,34(10): 1—7.

岳绍飞,王华,严德天,等,2016.洛伊地区三叠系沉积体系特征及演化规律.地球科学,41(10): 1683—1695.

张昌民,尹太举,朱永进,等,2010.浅水三角洲沉积模式.沉积学报,28(5): 933—944.

曾智伟,杨香华,朱红涛,等,2017.白云凹陷恩平组沉积晚期大型三角洲发育特征及其意义.地球科学,42(1): 78—92.

中国河流泥沙公报,2015.中华人民共和国水利部编.北京:中国水利水电出版社.

周书敏,薛鸿祥,唐文勇,等,2013.半潜式平台发电机排气系统烟气扩散数值仿真研究.航海工程,42(1):

132—136.

朱伟林,李建平,周心怀,等,2008.渤海新近系浅水三角洲沉积体系与大型油气田勘探.沉积学报,26(4): 575—582.

朱筱敏,刘媛,方庆,等,2012.大型坳陷湖盆浅水三角洲形成条件和沉积模式:以松辽盆地三肇凹陷扶余油层为例.地质前缘,19(1): 89—99.

朱筱敏,潘荣,赵东娜,等,2013.湖盆浅水三角洲形成发育与实例分析.中国石油大学学报(自然科学版),37(5): 7—14.

朱永进,尹太举,刘玲利,2011.浅水型三角洲沉积研究进展及问题讨论.石油天然气学报,33(3): 22—26.

邹才能,赵文智,张兴阳,等,2008.大型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.

(上接 2068 页)

陈诚,朱怡翔,石军辉,等,2016.断陷湖盆浅水三角洲的形成过程与发育模式——以苏丹 Muglad 盆地 Fula 凹陷 Jake 地区 AG 组为例.石油学报,37(12): 1508—1517.

陈世悦,徐凤银,刘焕杰,2000.华北晚古生代层序地层与聚煤规律.东营:石油大学出版社,8—36.

丁修建,柳广弟,黄志龙,等,2016.有机质供给和保存在烃源岩形成中的控制作用.地球科学,41(5): 832—842.

付立新,楼达,李宏军,等,2016.印支—燕山运动对大港探区古潜山形成的控制作用.石油学报,37(增刊 2): 19—30.

金振奎,苏奎,张永生,等,2011.湿地的沉积特征及石油地质意义.中国石油大学学报,35(3): 1—6.

李江海,王洪浩,李维波,等,2014.显生宙全球古板块再造及构造演化.石油学报,35(2): 207—218.

李维波,李江海,王洪浩,等,2015.二叠纪古板块再造与岩相古地理特征分析.中国地质,42(2): 685—694.

李一赫,尚尧,张顺,等,2016.多物源复合式浅水三角洲沉积特征与沉积模式.大庆石油地质与开发,35(3): 1—9.

李增学,魏久传,余继峰,等,2010.海侵事件与海侵成煤机制研究.北京:地质出版社,185—191.

刘为,2015.大港油田中南部上古生界沉积相分析(硕士学位

论文).武汉:长江大学.

马永生,田海芹,2006.华北盆地北部深层层序古地理与油气地质综合研究.北京:地质出版社,15.

桑树勋,刘焕杰,施健,1997.成煤环境的比较沉积学研究.徐州:中国矿业大学出版社,13—35.

史宗伟,2010.黄河下游稳定主槽之节点整治.见:李原园编,中国水情分析研究报告文集.北京:中国水利水电出版社,505—513.

Tucker, M.E., Wright, V.P., 2015.碳酸盐岩沉积学.北京:石油工业出版社,25—61.

王桂梁,琚宜文,郑孟林,2007.中国北部能源盆地构造.徐州:中国矿业大学出版社,227.

于志海,杨池银,廖前进,等,1997.黄骅坳陷天然气地质.北京,石油工业出版社,69—81.

岳绍飞,王华,严德天,等,2016.洛伊地区三叠系沉积体系特征及演化规律.地球科学,41(10): 1683—1695.

张鹏飞,邵龙义,代世峰,2001.华北地台晚古生代海侵模式雏形.沉积学报,3(1): 15—24.

竺可桢,1981.中国国家地理地表水.北京:科学出版社,162—166.