

# 南海北部莺琼陆坡浊流沉积数值模拟分析

杨茜<sup>1,2)</sup>, 冯秀丽<sup>1,2)</sup>

1) 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛, 266100;

2) 海底地球科学与勘探技术教育部重点实验室, 青岛, 266100

**内容提要:** 南海北部陆坡发育有大量不同规模的海底滑坡, 浊流沉积分布广泛。在南海北部莺琼陆坡的钻孔记录和地震数据中, 发现多次的地层倒转, 多是浊流沉积造成。本文在地质、地形和地层数据基础上, 利用 SedSim 软件对莺琼陆坡浊流沉积进行数值模拟分析。研究表明, 莺琼陆坡浊流沉积在初期流速较快, 沉积不明显, 中后期因水跃产生夹带作用在平缓地带沉积较厚; 沉积地形为逆流迁移状; 浊流沉积基本分布在 10km 范围内, 沉积厚度会随流动距离的增加而减小, 且会出现层状沉积。

**关键词:** 南海北部; 莺琼陆坡; 浊流沉积; 数值模拟

浊流(turbidity current)是高密度底流携带大量泥沙沿水下斜坡或峡谷流动的重力流的一种特殊形式 (Khrifounoff A et al., 2003)。南海北部陆坡区坡度通常较陡, 很容易发生海底滑坡。此外滑坡体沉积不稳定, 容易发生再次滑塌和搬运, 例如峡谷陡峭侧壁上的滑动和滑塌体, 从而产生大量浊流沉积 (Li W et al., 2015)。研究发现南海北部浊流发育众多, 在东沙、西沙、神狐海域均发现了多个海底滑坡 (Li J et al., 2019); 在珠江口盆地发现了大规模的滑塌沉积, 孙启良等人对其滑塌过程进行重建和体积计算; 在琼东南盆地也发现了大量反复的小规模滑塌沉积。前人对这些滑坡的规模、物源以及触发机制都进行了一定的探索, 但整体研究还待加强 (Li Hua et al., 2014; Chen D et al., 2016; Sun Q et al., 2018; Wang Junqin et al., 2019)。浊流的研究对深海沉积、海洋资源、海底工程等问题有重要的意义, 但是由于国外对海底浊流的研究历史与其他领域的研究相比还较短, 我国对浊流的研究程度还落后于国外, 并且浊流的破坏性较强, 发生难以预测, 难以进行持续性的观测, 对海底浊流的原位直接观察和监测也是研究的前沿和难点之一。近些年来, 国内外对浊流的研究多半是通过建立物理模型进行小

---

基金项目 国家重点研究开发计划 (2017YFC0306703) 资助

作者简介 杨茜, 男, 1996 年生, 中国海洋大学海洋地球科学学院在读研究生, 主要从事海底滑坡浊流沉积模拟等研究。E-mail: 2058184298@qq.com

规模试验 (Sequeiros et al., 2009), 进入 21 世纪, 计算机技术的飞速发展使得将资料数字化处理、进行数值模拟成为可能, 而不断加强的硬件功能不断提高了数字化处理的速度和准确度。目前国际上已出现多款模拟沉积、搬运的正演模拟软件, 如一维的 pyReef-Core (Salles et al., 2018), 二维的 SEDPAK (Kendall et al., 1991; Liu et al., 1998), 三维的 Sedsim (Cantrell et al., 2015)、ReefSAM (Barrett&Webster., 2017) 等。在以往的研究中, 人们习惯于在深度域中分析地层沉积特征及其演化, 但是开展时间域内地层沉积演化同样非常重要, 尤其对于一些事件性沉积 (如重力流) 的识别和演化全过程恢复等 (Liu Jianliang et al., 2020)。有学者对浊流沉积进行了三维数值模拟, 得到了较理想的结果, 成功分析了浊流三维模拟数据的可行性 (Huang X et al., 2012; Jiang Tao et al., 2005; Jiang Tao et al., 2014), 浊流的三维模拟成为该领域的研究热点。

本文在对南海北部莺琼陆坡的钻孔记录和地震数据分析的基础上, 通过 Sedsim 正演模拟软件对莺琼陆坡海底浊流的沉积过程和沉积产物进行数值模拟, 在三维上研究浊流的产生、流动和沉积, 为研究南海北部陆坡海底浊流触发机制、搬运动力过程和沉积历史提供科学依据和技术支撑。

## 1 地质概况

南海为西太平洋最大的边缘海, 被大陆和多个岛屿环绕, 海盆呈半封闭的菱形展布, 有着广阔的陆坡。南海北部陆坡全长大约 900km, 宽度在 130-330km 之间变化, 面积约  $2.13 \times 10^5 \text{km}^2$ , 其展布大致呈北东-南西向, 与相邻陆架构造走向一致。陆坡的底界面整体上沿着 3500m 水深线分布。南海北部陆缘盆地从东往西依次为台西南盆地、珠江口盆地和琼东南盆地三个较大的深水沉积盆地 (图 1)。陆坡区的有利地质地形条件为海底滑坡、浊流沉积提供了良好的发育环境。

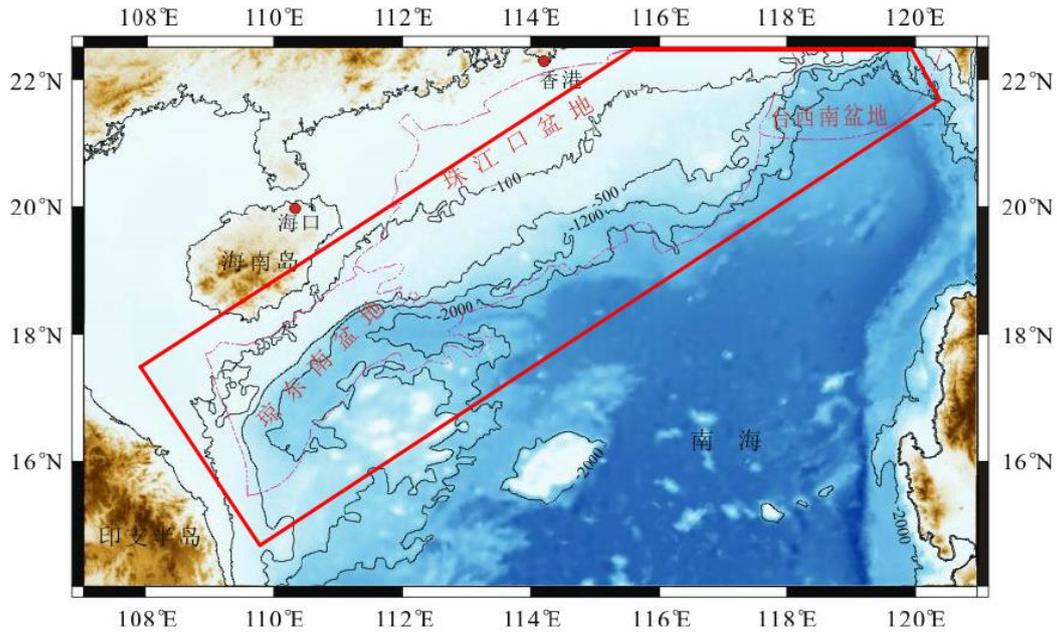


图1 南海北部陆坡示意图

Fig.1 Schematic diagram of northern continental slope of the South China Sea

研究区的位置位于南海北部的莺琼陆坡段，北部为海南岛，南部为西沙群岛，西部毗邻越南陆架，东部为神狐陆坡段。莺琼陆坡在西南部为北北东向，西北部逐渐过渡为北东向。盆地经历了多个期次的构造运动和沉积过程（Taylor B et al., 1983），整体上说经历了古近纪裂陷期和新近纪的热沉降期，裂陷期时接受了始新统湖相、下渐新统海陆过渡相、上渐新统滨-浅海相沉积充填。热沉降期和后来新构造运动时期，盆地接受了从滨浅海相到深海相的连续沉积（Xie X et al., 2006; Lei Chao et al., 2011），在陆架边缘海底观察到的柱状沉积物中有明显的特征变化，最上层的黏土质粉砂突然过渡到砂质沉积物，有长石、石英砂和岩屑等陆源沉积物。当上陆坡的坡度达到一定程度后，陆坡沉积物更容易失稳（Ma Yun et al., 2012; Liu H et al., 2018）。莺琼陆坡的总体陆架坡折宽度最小，坡度最陡，水深急剧变化，由 200m 猛然增加到 2500m 左右，广泛发育有浊流沉积和滑坡地貌。

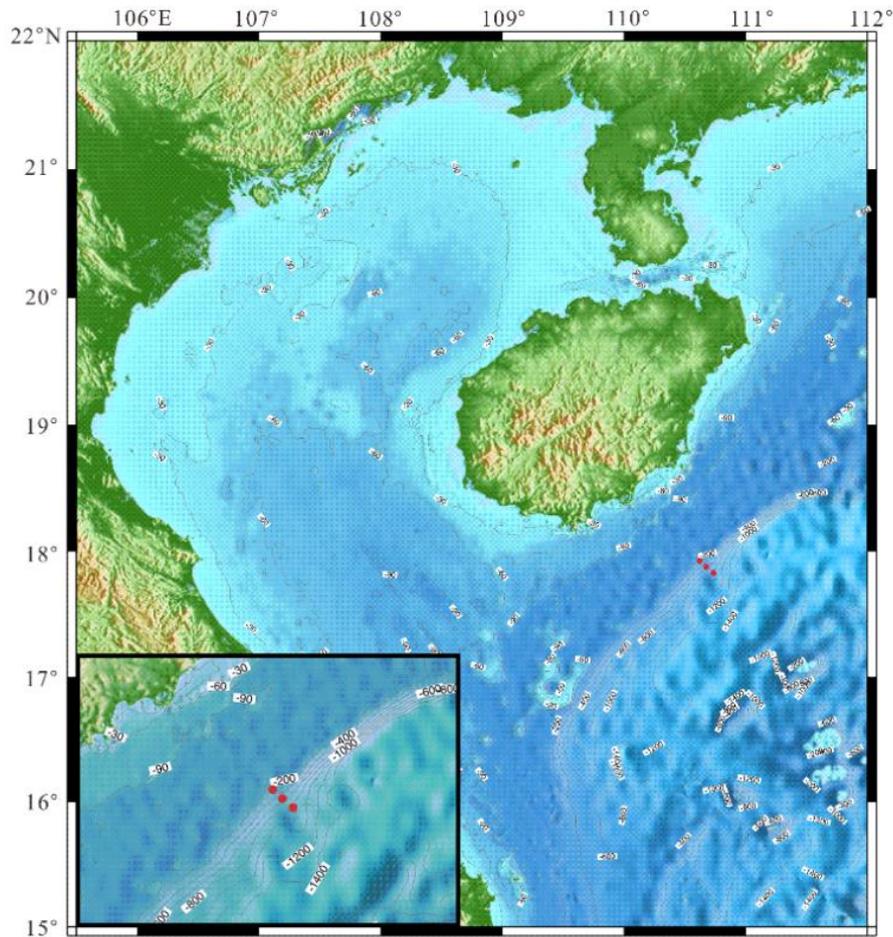


图2 钻孔位置示意图

Fig.2 Borehole location diagram

## 2 数据和方法

研究所用数据材料来自于研究区钻取的 BH1、BH2、BH3 三个深海岩心钻孔，其水深分别为 340m、640m、840m，取样长度分别为 120m，30m，21m（图 2）。三个钻孔岩芯位于海南岛东南部约 150km，陵水 17-2 构造南翼。根据钻孔样品的粒度测试，岩芯沉积物主要有砂质粉砂、粘土质粉砂、粉砂等 3 种类型，除个别层位是粘土质粉砂、砂质粉砂外，绝大部分层位沉积物为粉砂。沉积物为陆源物质，物源主要来自珠江和湄公河，台湾浅滩和红河也提供了部分物源（Lei Zhenyu et al., 2016）。经测年分析，发现钻孔中出现了多次的地层年龄倒转的现象，三个钻孔中均出现了地层倒转，结合粒度测试和沉积速率的变化，认为是滑塌的影响，期间发生多次的浊流沉积。

本文对莺琼陆坡的浊流沉积使用 Sedsim 软件进行数值模拟分析。首先提取研究区水深地形数据作为三维数值模拟的网格基底文件，建立基底模型；沉积物

成分和含沙量选取钻孔测得的莺琼陆坡浊流沉积物粒度数据为代表;模拟地形整体长度和坡度按照地震实测地形等比例缩放。在前人物理水槽实验的基础上,通过预实验确定 Sedsim 正演模拟软件有效性,进一步利用研究区资料对南海北部陆坡浊流沉积进行三维数值模拟,输入初始地形表面、水深、沉积物粒度分布、沉积物供给速率等参数,得到浊流的流动和沉积形态,并对其进行分析。

Sedsim 是一款地层正演数值模拟软件,其核心功能为模拟流体运动和沉积物搬运过程。Sedsim 主要以流体动力学方程(Navier-Stokes equations)为核心,使其能够进行稳定地、准确地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。模拟结果准确性一个至关重要的因素为模拟的分辨率,使用 Sedsim 必须检测空间和时间两个离散化参数。空间参数由地形文件和网格文件来影响,包含从厘米到数公里的沉积面积,时间参数可以人为控制,显示时间插值表示每隔多长时间输出一个结果,决定了运行过程中数据的速度和频率;流体采样时间间隔表示流体元件从源释放的频率,即释放新流体元素的时间间隔。在显示时间插值内所发生的多个事件被看成是一种综合事件的结果(Griffiths C M et al., 2001; Huang Xiu., 2012)。

### 3 模拟软件验证分析

前人研究结果证明, Sedsim 在浊流模拟上具有良好的效果,黄秀等在 2012 年对浊流物理水槽实验进行一系列的数值模拟,发现无论改变地形坡角或加入波浪作用,三维数值模拟的结果和物理水槽实验的结果在形态上、数据上以及结果上都有很好的一致性,并且数值模拟大约只花费了物理实验时间的 1/261,能在较短时间间隔内研究更大范围参数的影响,验证了 Sedsim 对浊流三维数值模拟的准确性和可行性。Sedsim 数值模拟有两种方式:一是验证数值模拟可以在所有基本细节(即比例、输入参数、输出几何尺寸和粒度分布)齐全的情况下复制物理实验;二是可以通过数值模拟来代替理想的物理实验,就可以减少实验的预算和工作量同时得到想要的结果。

为进一步验证 Sedsim 模拟软件对海洋中浊流沉积数值模拟的有效性和可行性,在前人浊流水槽实验的已知数据(表 1)基础上,等比例放大建立 Sedsim 模拟中的地形基底模型,如图 3。输入沉积物、斜坡角度、模拟时间、流体密度等一系列参数,运行 Sedsim 对建立的模型进行正演模拟,得到如下结果(图 4):

表 1 物理参数 (Huang X, et al. 2012)  
Table 1 Physical parameters (Huang X, et al. 2012)

实验	触发	时间 (min)	水深 (cm)	放水率 (ml/s)	总泥沙量 (kg)	泥沙成分 (%)					斜率
						粗	中细	细	极细	粘土	
Run 1	无	1446	35	41.7	730	0	5.4	29.9	30.4	34.3	9°
Run 2	波浪	1446	40	41.7	730	0	5.4	29.9	30.4	34.3	9°

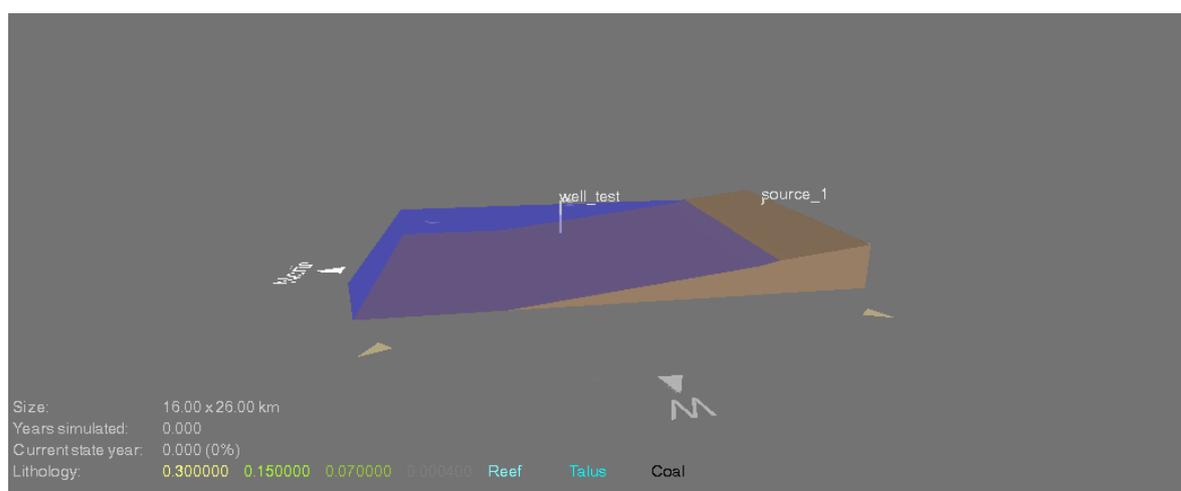


图 3 Sedsim 地形模型

Fig.3 Sedsim terrain model

从运行开始的时间段内,如图 4 所示的模拟结果表明,三角洲系统形成时砂主要沉积在三角洲平原上,而淤泥和粘土则被输送到三角洲前缘,随着输入物质的增加,最初在 a 开始发生滑塌,蔓延于 b 并持续到 c、d,形成不同规模的浊流沉积,产生了许多滑塌痕。从图中可以看出滑塌大致分为三个阶段,首先三角洲平原砂质沉积向三角洲前缘滑塌,在三角洲前缘初步形成粒度较粗的浊流沉积;其次在重力和扰动的作用下,前三角洲的粉砂和粘土质沉积向下滑塌,在前三角洲进一步形成粒度较细的浊流沉积;最后三角洲前缘的砂质和粘土质沉积发生小规模滑塌,与前三角洲形成整体的浊流沉积。模拟结果的形态(图 4, abcd)与已知水槽实验的物理实验结果基本一致。

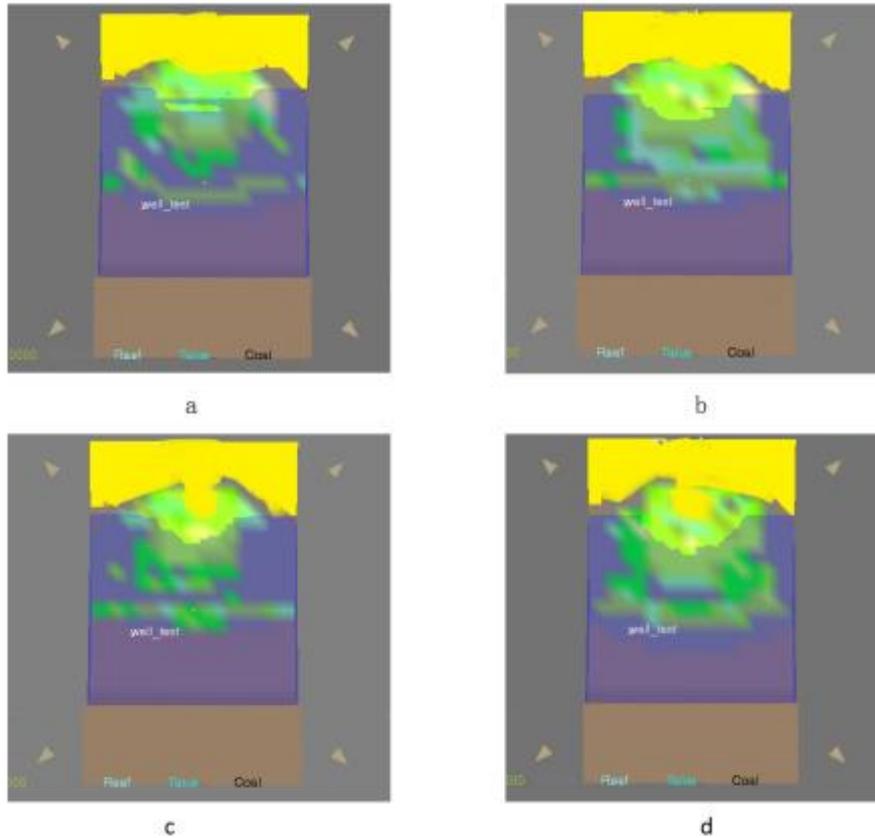


图 4 Sedsim 模拟结果

Fig.4 Sedsim simulation results

#### 4 模拟过程和结果分析

在此基础上对南海北部莺琼陆坡浊流沉积进行数值模拟分析。根据莺琼陆坡钻孔数据以及陵水 17-2 构造测线的地震记录剖面图（图 5），结合水深地形数据得到地形曲线图（图 6），模拟地形整体长度为 18km，在 16km 之后的部分假定为水平地形，模拟过程中按照 1:10 的比例对实际地形缩放。在 Sedsim 中设定整体网格为 50\*20，建立如图 7 所示的基底。模拟所用沉积物来源位置（X，Y）、释放时间（t1，t2）、物源速度（Vx，Vy）、释放速率（Q）、含沙量（C）以及沉积物成分（其中，C coarse（粗），M medium（中），F fine（细），FF finest（极细））等一系列参数详见表 2。入流方式为持续入流型，输入参数后在 Sedsim 中对莺琼陆坡浊流沉积进行模拟分析。

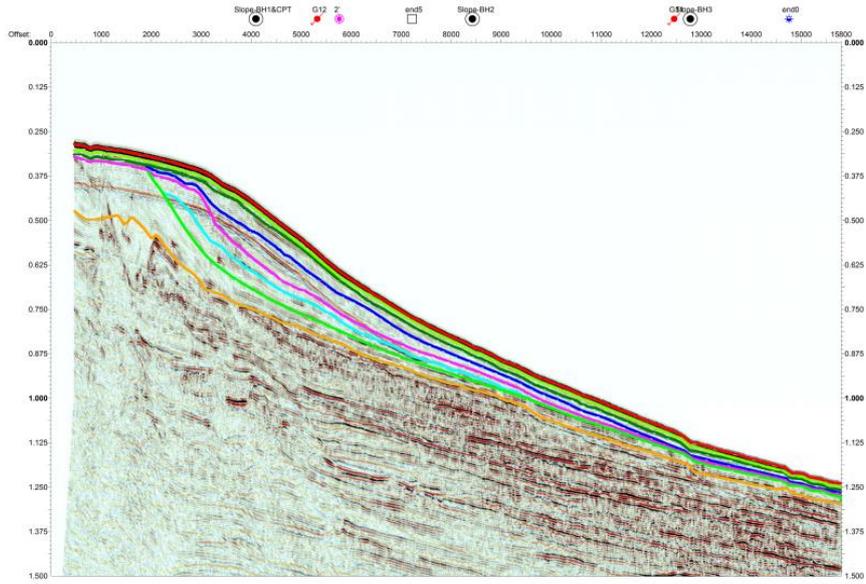


图 5 地震记录剖面图

Fig.5 Seismogram profile

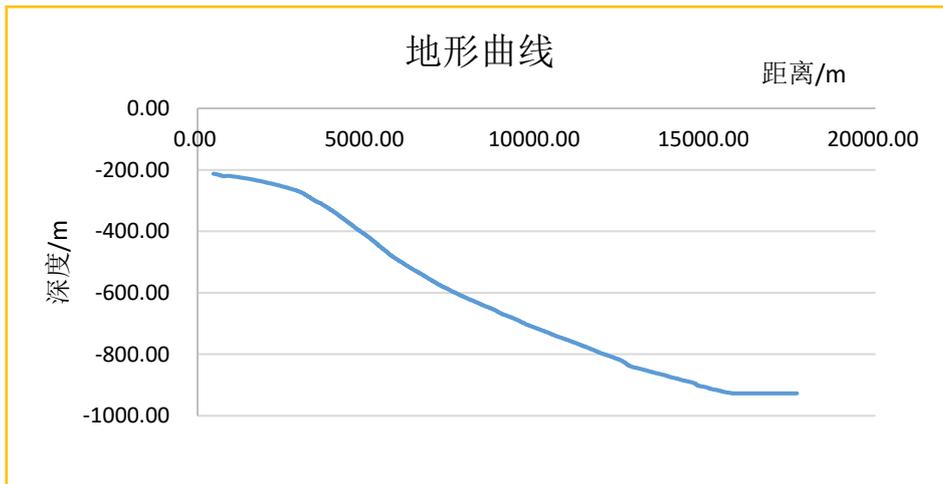


图 6 地形曲线图

Fig.6 Topographic chart

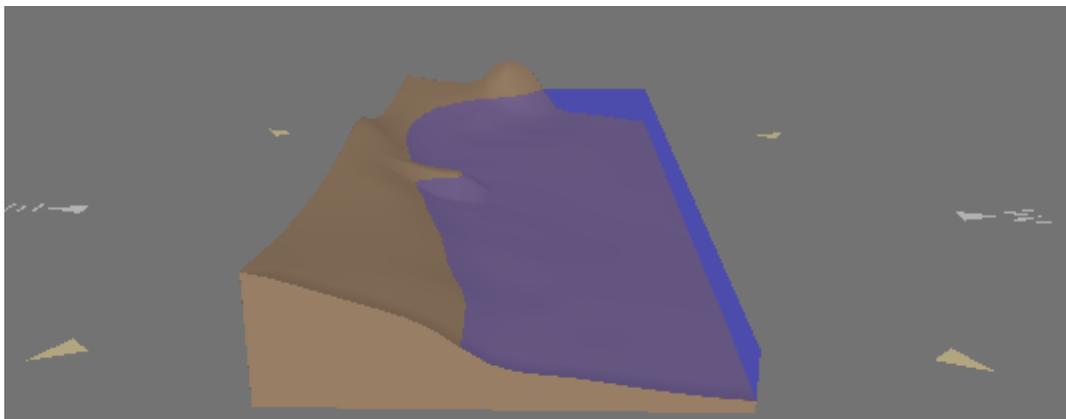


图 7 Sedsim 基底模型

Fig.7 Sedsim basal model

表 2 Sedsim 模型中使用的参数值  
Table 2 Parameter values used in the Sedsim model

source	t1 (年)	t2 (年)	X(m)	Y(m)	Vx (m/sec)	Vy (m/sec)	Q (m <sup>3</sup> /sec)	C (kg/m <sup>3</sup> )	%C	%M	%F	%FF
1	1994.047	1994.24	410	340	0.50	0	4.167	14.34	15.0	50.0	30.0	5.0
2	1995.882	1996.104	420	640	0.50	0	4.167	15.79	15.0	50.0	30.0	5.0
3	1995.877	1996.205	430	840	0.50	0	4.167	10.89	15.0	50.0	30.0	5.0

#### 4.1 浊流流动过程分析

通过 Sedsim 模拟了浊流的流动和沉积的整个过程，图 8 (a、b) 为实验的浊流模拟流动过程示意图。

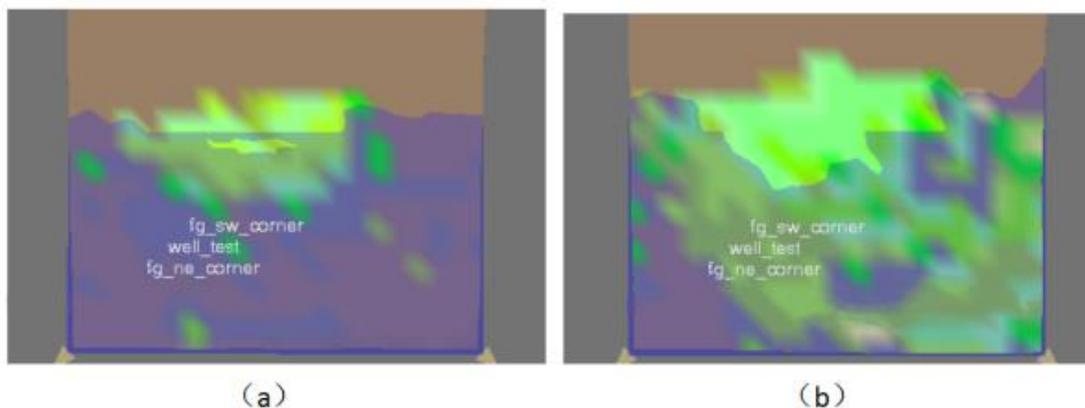


图 8 浊流模拟流动过程图

Fig.8 Turbidity current simulates flow process diagram

(1) a 为模拟初期，浊流刚开始流动，随着沉积物的释放，在陆坡和水平地形都有浊流沉积的产生，但前半部陆坡上的沉积厚度要稍微大于水平地形上的厚度，这是因为浊流流经陆坡时受到沉降作用影响。从图中可看出浊流沉积的量在流动初期比较少，这是因为在初期浊流流速较快，沉积并不明显，且随着流动，在陆坡上的沉积逐渐减缓，等到浊流流动至地形平缓地带时，由于浊流的迅速溃散，此时的沉积也并不明显，模拟初期浊流沉积整体影响范围较小。

(2) b 为模拟中期，从图中可以看出随着模拟时间的增加，相对来讲单个流动事件增多，沉积物也越来越多，沉积物的释放基本完成，再加上浊流在流动过程中受到不规则的波状隆起地形所造成较为明显的减速效果，所以此时浊流流

动的速度减小，浊流沉积逐渐完成。同时可以观察到沉积的时候浊流在水平地形上的厚度要高于在上游陆坡上的厚度，这是因为在从较陡的陆坡流入平缓地带时，浊流会生成一个水跃，其对周围水体会产生一种夹带作用，从而使沉积物继续向下搬运并在水平地形沉降，导致在地形平缓地带的浊流沉积厚度较大。在模拟后期，浊流流动基本停止，浊流沉积基本完成的形态详见图 9。

## 4.2 浊流沉积形态分析

模拟的浊流流动完成之后，整体地形沉积形态如图 9 所示，可以看出，在整体上的沉积较为均匀，平缓地带浊流沉积厚度更大，浊流沉积之后整体地形略有升高，沉积影响范围较大。

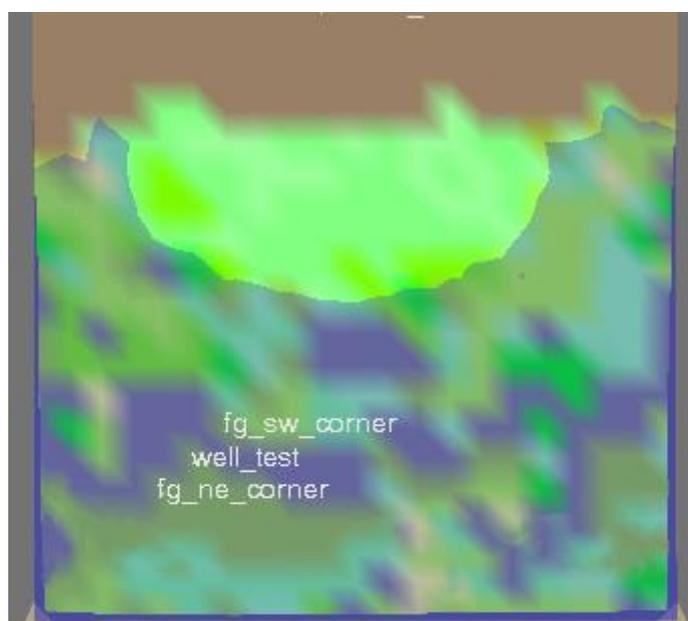


图 9 浊流沉积形态

Fig.9 Turbidity current sedimentary morphology

从最终浊流沉积形态来看，坡度较大的陡峭边壁沉积不明显，说明浊流沉积受到沉积物沉降速度及地形坡度的影响。从图中可以看出，沉积地形为逆流迁移状，形成的沉积体也有向上游迁移的趋势，从这一点也可以看出海底地形对沉积体的形成起到相当重要的作用，这与前人观测和研究得到的结果一致，也验证了模拟结果的正确性和可行性。为了更进一步研究浊流沉积的形成机理，可知在沉积过程中先沉积的碎屑物会被压实，形成一定程度的地形，并会对随后沉积的颗粒产生影响（Straub K M et al., 2009），随着流动时间的增加，沉积越来越大，并逐步向上游迁移，海平面的升降也会对沉积的逆流迁移产生一定影响（Wang Dawei et al., 2018; He Yunlong et al., 2010）。

通过对图 9 浊流沉积最终形态的观察和分析, 模拟结果的沉积特征表现为: 沉积范围大约占据模拟地形的三分之二, 在模拟中的尺度约为 1km, 由于模拟过程中按 1:10 比例对实际地形进行缩放, 所以初步推测南海浊流沉积范围大致为 10km。在陆坡部分的末端较陡的地方由于浊流沉积的堆积出现部分褶皱, 对于模拟中的陆坡来说, 浊流沉积厚度是随着流动距离的增加呈减小的趋势; 在模拟地形模型后半段的水平地形上, 浊流沉积的厚度也是随着流动距离的增加而逐渐减少, 且可以观察到层状沉积, 可以看出本次模拟产生的浊流沉积与实际海底地形具有相同的层状沉积。

综上所述, 浊流沉积一般都会在陆坡和盆底形成扇形沉积, 浊流沉积体在坡角处沉积最厚, 之后浊流的沉积厚度会随着流动距离的增加而逐渐减少, 这些模拟的特征与南海北部陆坡实际海底沉积特点基本一致, 对这些沉积特征进一步的分析会有助于理解和研究浊流沉积形成的浊流机制及原始环境。

## 5 结论

通过 Sedsim 软件对南海陆坡浊流进行模拟研究, 主要得出以下结论。

浊流沉积初期流速较快, 沉积不明显, 在中后期浊流从陡坡流入地形平缓地带时, 会因水跃对周围水体会产生夹带作用, 继续向前搬运沉积物, 导致平缓地带的沉积物厚度较大。

根据南海实地浊流模拟, 沉积地形为逆流迁移状, 沉积体也出现向上游迁移的趋势。南海浊流沉积基本分布在 10km 范围内, 浊流沉积的沉积厚度会随流动距离的增加而减小, 且会出现层状沉积。

**致谢:** 感谢广州海洋地质调查局在采集岩心样本和地震记录方面的辛勤工作, 感谢国家重点研发计划(2017YFC0306703)的资助。

## References

- Barrett S J, Webster J M. 2017. Reef Sedimentary Accretion Model (ReefSAM): Understanding coral reef evolution on Holocene time scales using 3D stratigraphic forward modelling. *Mar Geol*, 391: 108–126
- Cantrell D L, Griffiths C M, Hughes G W. 2015. New tools and approaches in carbonate reservoir quality prediction: A case history from the Shu'aiba Formation, Saudi Arabia. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 406: 401–425

- Chen D, Wang X, Völker D, Wu S, Wang L, Li W, Li Q, Zhu Z, Li C, Qin Z, Sun Q. 2016. Three dimensional seismic studies of deep-water hazard-related features on the northern slope of South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 77(11):1125~1139.
- Griffiths C M, Dyt C, Paraschivoiu E, Liu K. 2001. *SedSim in hydrocarbon exploration*. Ph. D. thesis, *Geologic modeling and simulation: sedimentary systems*,71~97.
- Huang X, Dyt C, Griffiths C, Salles T. 2012. Numerical forward modelling of 'fluxoturbidite' flume experiments using SedSim. *Marine and Petroleum Geology*, 35(1):190~200.
- He Yunlong, Xie Xinong, Li Junliang, Zhang Cheng, Su Ming. 2010. Depositional Characteristics and Controlling Factors of Continental Slope System in the Qiongdongnan Basin. *Geological Science and Technology Information*, 29(2):118~122(in Chinese with English abstract).
- Huang Xiu. 2012. A Multi-scale Analysis of Microbialite Facies of Shark Bay, West Australia, with Numerical Forward Modelling. Ph.D thesis, China University of Geosciences(Beijing), 1~133(in Chinese with English abstract).
- Jiang Tao, Xie Xinong, Tang Sulin. 2005. Hydrodynamic Simulation of Turbidity and Its Application for Reservoir Prediction. *Geological Science and Technology Information*, 24(2):1~6(in Chinese with English abstract).
- Jiang Tao, Zhang Yingzhao, Tang Sulin, Zhang Daojun, Zuo Qianmei, Lin Weiren, Wang Yahui, Sun Hui, Wang Bo. 2014. CFD simulation on the generation of turbidites in deepwater areas: a case study of turbidity current processes in Qiongdongnan Basin, northern South China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 33(12):127~137
- Kendall C G S C, Strobel J, Cannon R, Bezdek J, Biswas G. 1991. The simulation of the sedimentary fill of basins. *J Geophys Res*, 96:6911~6929
- Khripounoff A, Vangriesheim A, Babonneau N, Crassous P, Dennielou B, Savoyeb B. 2003. Direct observation of intense turbidity current activity in the Zaire submarine valley at 4000 m water depth. *Marine Geology*, 194(3-4):151~158.
- Liu K, Liang T C K, Paterson L, Kendall C G S C. 1998. Computer simulation of the influence of basin physiography on condensed section deposition and maximum flooding. *Sediment Geol*, 122: 181~191
- Lei Chao, Ren Jianye, Pei Jianxiang, Lin Haitao, Yin Xinyi, Tong Dianjun. 2011. Tectonic Framework and Multiple Episode Tectonic Evolution in Deepwater Area of Qiongdongnan

- Basin, Northern Continental Margin of South China Sea. *Earth Science*, 36(1):151~162(in Chinese with English abstract).
- Li Hua, Wang Yingmin, Xu Qiang, Zhuo Haiteng, Wu Jiapeng, Tang Wu, Li Dong, Xu Yanxia. 2014. Interactions between Down-Slope and Along-Slope Processes on the Northern Slope of South China Sea: Products, processes, and Depositional Model. *Acta Geologica Sinica*, 88(06):1120-1129(in Chinese with English abstract).
- Li W, Alves T M, Wu S, Völker D, Zhao F, Mi L, Kopf A. 2015. Recurrent slope failure and submarine channel incision as key factors controlling reservoir potential in the South China Sea (Qiongdongnan Basin, South Hainan Island). *Marine and Petroleum Geology*, 64(7):17~30.
- Lei Zhenyu, Su Ming, Zhang Li, Shuai Qingwei, Sun Ming, Liu Jie, Yang Rui. 2016. Sediment sources and transport patterns of qiongdongnan Basin in Northern Slope of South China Sea since Late Miocene. *Journal of Marine Sciences*, 34(2):35~42(in Chinese with English abstract).
- Liu H , Meng J , Zhang Y , Yang L. 2018. Pliocene seismic stratigraphy and deep-water sedimentation in the Qiongdongnan Basin, South China Sea: Source-to-sink systems and hydrocarbon accumulation significance. *Geological Journal*, 54(1):392~408.
- Li J , Li W , Alves T M , Rebesco M, Wu S. 2019. Different origins of seafloor undulations in a submarine canyon system, northern South China Sea, based on their seismic character and relative location. *Marine Geology*, 413:99~111.
- Liu Jianliang, Liu Keyu. 2020. Estimating stratal completeness of carbonate deposition via process-based stratigraphic forward modeling. *Science China Earth Sciences*, 50:1~9(in Chinese with English abstract).
- Ma Yun, Li Sanzhong, Liang Jinqiang, Suo Yanhui, Dai Liming, Wang Xiaofei, Zhang Bingkun. 2012. Characteristics and Mechanism of Submarine Landslides in the Qiongdongnan Basin, Northern South China Sea. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, (S3):196~205(in Chinese with English abstract).
- Sun Q, Cartwright J, Xie X, Lua X, Yuan S, Chen C. 2018. Reconstruction of repeated Quaternary slope failures in the northern South China Sea. *Marine Geology*, 401(1):17~35.

- Sequeiros, Octavio E, Naruse, Endo H, Garcia N, Marcelo H, Parker, Gary. 2009. Experimental study on self-accelerating turbidity currents. *Journal of Geophysical Research*, 114(5):5~25.
- Straub K M, Mohrig D. 2009. Constructional canyons built by sheet-like turbidity currents: observations from offshore Brunei Darussalam. *Journal of Sedimentary Research*, 79(1-2):24~39.
- Salles T, Pall J, Webster J M, Dechnik B. 2018. Exploring coral reef responses to millennial-scale climatic forcings: Insights from the 1-D numerical tool pyReef-Core v1.0. *Geosci Model Dev*, 11: 2093–2110
- Taylor B, Dennis E, Hayes. Origin and history of the South China Sea basin. 1983. *The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands: Part 2*. American Geophysical Union, 10(2): 23~56.
- Wang Dawei, Bai Hongxin, Wu Shiguo. 2018. The Research Progress of Turbidity Currents and Related Deepwater Bedforms. *Advances in Earth Science*, 33(1):52~65(in Chinese with English abstract).
- Wang Junqin, Zhang Guangxu, Chen Duanxin, Wang Xiujuan, Wang Zhenzhen, Dong Dongdong, Zhuang Lihua, Huang Jie, Zhu Yousheng, Luo Jinhua. 2019. Geological hazards in Lingshui region of Qiongdongnan Basin: type, distribution and origin. *Marine Geology&Quaternary Geology*, 39(4):87~95(in Chinese with English abstract).
- Xie X, Müller R.D, Li S, Gong Z, Steinberger B. 2006. Origin of anomalous subsidence along the Northern South China Sea margin and its relationship to dynamic topography. *Marine and Petroleum Geology*, 23(7):745~765.

### 参考文献

- 何云龙, 解习农, 李俊良, 张成, 苏明. 2010. 琼东南盆地陆坡体系发育特征及其控制因素. *地质科技情报*, 29(2):118~122.
- 黄秀. 2012. 澳大利亚鲨鱼湾微生物席沉积相多尺度正演模拟研究. 博士论文, 中国地质大学(北京), 1~133.
- 姜涛, 解习农, 汤苏林. 2005. 浊流形成条件的水动力学模拟及其在储层预测方面的作用. *地质科技情报*, 24(2): 1~6.
- 雷超, 任建业, 裴健翔, 林海涛, 尹新义, 佟殿君. 2011. 琼东南盆地深水区构造格局和幕式

演化过程分析. 地球科学, 36(1):151~162.

李华, 王英民, 徐强, 卓海腾, 吴嘉鹏, 唐武, 李冬, 徐艳霞. 2014. 南海北部珠江口盆地重力流与等深流交互作用沉积特征、过程及沉积模式. 地质学报, 88(06):1120-1129.

雷振宇, 苏明, 张莉, 帅庆伟, 孙鸣, 刘杰, 杨睿. 2016. 南海北部陆坡琼东南盆地晚中新世以来沉积物来源及输送样式. 海洋学研究, 34(2):35~42.

刘建良, 刘可禹. 2020. 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. 中国科学: 地球科学, 50:1~9

马云, 李三忠, 梁金强, 索艳慧, 戴黎明, 王霄飞, 张丙坤. 2012. 南海北部琼东南盆地海底滑坡特征及其成因机制. 吉林大学学报(地球科学版), (S3):196~205.

王大伟, 白宏新, 吴时国. 2018. 浊流及其相关的深水底形研究进展. 地球科学进展. 33(1): 52~65.

王俊勤, 张广旭, 陈端新, 王秀娟, 王真真, 董冬冬, 庄丽华, 黄杰, 朱友生, 罗进华. 2019. 琼东南盆地陵水研究区海底地质灾害类型、分布和成因机制. 海洋地质与第四纪地质, 39(4):87-95.

## **Numerical simulation and analysis of the Turbidity current deposit in Yingqiong continental slope in the northern South China Sea**

YANG Xi<sup>1,2)</sup>, FENG Xiu Li<sup>\*1,2)</sup>

1) College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao, 266100, China

2) Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, Qingdao, 266100, China

\* Corresponding author: fengxiuli@ouc.edu.cn

### **Abstract**

A large number of submarine landslides of different scales are developed on the continental slope of the northern South China Sea, and turbidity current deposits are widely distributed. In the drilling records and seismic data of Yingqiong continental slope in the northern South China Sea, it is found that many stratigraphic reversals are mostly caused by turbidity current deposition. Based on the geological, topographic and stratigraphic data, The Sedsim software is used to carry out numerical simulation analysis on turbidity current deposition on Yingqiong continental slope in this paper. The research shows that, the turbidity current deposits on Yingqiong continental

slope are relatively fast in the initial stage, and the deposition is not obvious. The entrainment caused by hydraulic jump is relatively thick in the gentle zone in the middle and late stages. The sedimentary topography is counter-current migration, and turbidity current deposits are generally distributed within the range of 10km, the deposition thickness will decrease with the increase of flow distance, and layered deposition will occur.

**Key words:** the northern South China Sea; Yingqiong continental slope; turbidity current deposition; numerical simulation.