

龚广传, 李磊, 何旺, 等. 块体搬运沉积顶面沉积过程模拟——以南海北部坡为例[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(12): 75-83.

GONG Guangchuan, LI Lei, HE Wang, et al. Numerical simulation of post-mass transport deposition: a case study of the margin slope of South China Sea[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(12): 75-83.

块体搬运沉积顶面沉积过程模拟

——以南海北部坡为例

龚广传^{1,2,3}, 李磊^{1,2*}, 何旺³, 张威^{1,2}, 高毅凡^{1,2}, 程琳燕^{1,2}, 杨志鹏⁴

(1 西安石油大学地球科学与工程学院, 西安 710065; 2 陕西省油气成藏地质学重点实验室, 西安 710065;

3 中国石化西北油田分公司, 乌鲁木齐 830011; 4 延长油田股份有限公司勘探开发技术研究中心, 延安 716000)

摘要:块体搬运沉积体系 (MTDs) 具有起伏不平的顶面, 会影响后续的浊流沉积, 厘清 MTDs 顶面对后续沉积的控制作用, 有助于了解海底扇的发育规律。基于南海北部琼莺段陆坡的三维地震数据, 对块体搬运沉积体系及其上覆充填物的形态进行刻画, 并使用 Flow3D 进行数值模拟, 分析其顶面对后续沉积的影响。研究认为: ①MTDs 的体部顶面具有低平、宽缓的特点, 可形成宽广低缓的凹槽; 趾部挤压区顶面起伏大, 可形成孤立的凹槽。②MTDs 体部顶面可形成大规模的、连续的海底扇; 趾部顶面凹槽发育小型扇体; 局部隆起的背流面下端可发育规模不一的扇体; MTDs 末端低洼处是大型海底扇形成的有利区。③MTDs 顶面起伏程度越大, 越有利于沉积物卸载、沉积, 形成更大规模海底扇。

关键词:浊流沉积; 块体搬运沉积; 海底扇; 数值模拟

中图分类号: P736; P631.4

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2021.330

0 引言

块体搬运沉积体系 (Mass Transport Deposits, 简称 MTDs) 是地质体被破坏后受重力控制, 从地形高处搬运至低洼区域的沉积体^[1-2]。MTDs 可分为头部拉张区、体部滑移区和趾部挤压区, 各区域均有独特的、可识别的结构^[3]。在大陆架和大陆坡中发育了多期次叠加沉积的 MTDs, 沉积范围广泛^[4], 在海底地貌, 尤其是在陆坡的形成和演化、沉积物由浅海向深海输送的过程中起非常重要的作用。

前人对 MTDs 研究日益深入, 取得很多研究成果。MTDs 分为陡峭的头部、沉积物滑移的体部及堆积挤压的趾部^[5], 其内部在三维地震剖面上主要

呈杂乱反射特征^[6-7], 底部具有侵蚀擦痕^[7]。主要受控于海平面下降、物源进积及断层活动等影响^[6], 天然气水合物的分解^[8]、基底断层的活化和底辟作用^[9]。目前更多的学者开始关注 MTDs 对后续沉积事件的影响, BROWNE 等^[10]认为 MTDs 侵蚀下伏地层, 改变地层压力, 导致下伏地层的流体逃逸, 反过来促进陡峭斜坡失稳引发新一期 MTDs 沉积。NWOKO 等^[1]认为 MTDs 趾部地形起伏大, 可形成孤立的凹槽、在体部区域形成宽广、低缓的凹槽, 并控制后续沉积物的充填。KNELLER 等^[11]认为大型 MTDs 沉积可重塑海底地形, 改变后期浊流沉积路径, 其起伏表面控制后期浊积扇的分布, 凹坑内的浊积扇受浊流浓度和地形共同控制。南海北部琼东南盆地发育有大规模的 MTDs^[4,12-13], 前人研究认为: 岩浆活动^[4]、天然气水合物的分解^[8]、充足的物源供给和相对较高的海平面^[13]是其主要诱发机制。然而, 在 MTDs 顶面对后续沉积的影响、控制方面有待深入研究。因此, 本文基于南海北部陵水区高精度三维地震数据对 MTDs 的形态及展布进行刻画解释, 结合 Flow3D 数值模拟软件进行水动力特征研究, 综合分析 MTDs 起伏表面对后续沉积

收稿日期: 2021-12-29

资助项目: 国家自然科学基金“深水重力流流态转化研究”(41302147); 西安石油大学“研究生创新与实践能力的培养计划”(YCS21112046)

作者简介: 龚广传(1996—), 男, 硕士, 主要从事地震地貌学及深水沉积方面的研究工作. E-mail: 1584460108@qq.com

* 通讯作者: 李磊(1979—), 男, 博士, 教授, 主要从事地震地质综合解释及海洋沉积方面的研究工作. E-mail: lilei@xysu.edu.cn

的影响。

1 区域地质概况

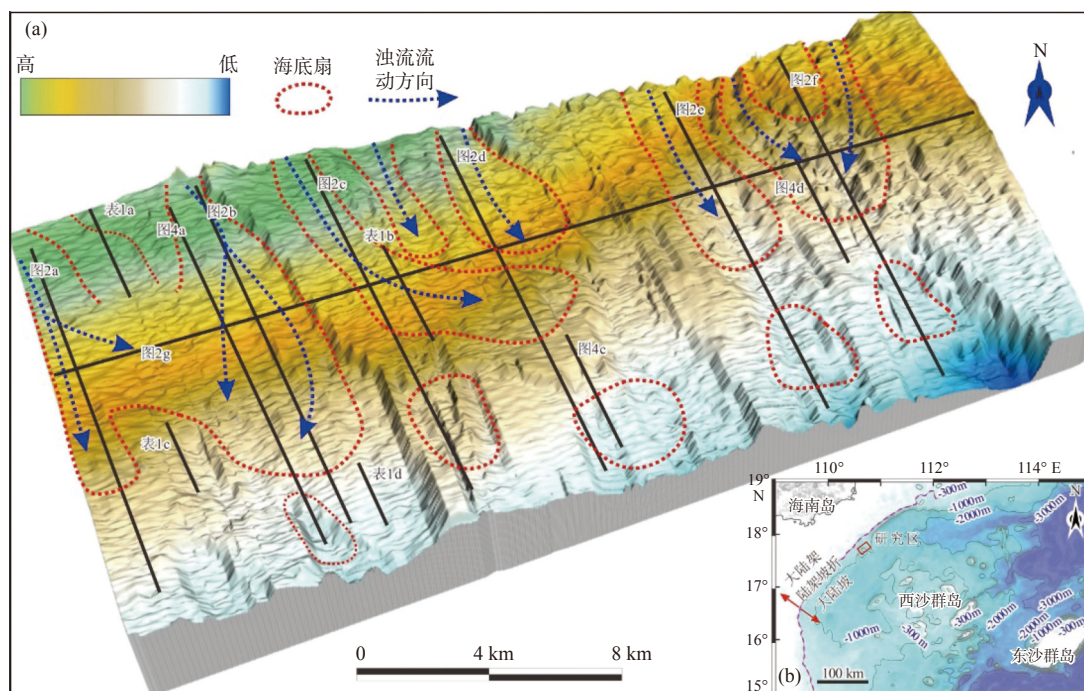
研究区位于中国南海北部大陆边缘、琼东南盆地北部的莺琼陆坡段^[14]。北接北部湾东南出口、海南岛南部,西临越南陆架、南接西沙群岛,呈 NE 走向;具有窄而陡峭的上陆坡(宽约 20 km,坡度约 $2^{\circ}\sim 3^{\circ}$)和宽缓过渡的下陆坡(坡度约 1°)^[14]。该区新生代以来,先后经历南海地块和华南地块的剪切、俯冲挤压和裂谷沉降等,在两次海底扩张后形成^[14];中新世末期以来,南海北部的红河断裂带(通常称为红河物源^[15])向海底输送大量的沉积物,径流量达 $123\text{ km}^3/\text{a}$,总量达 130 Mt ^[14]。故该区中新世末期以来发育大量的 MTDs,本文所研究的 MTDs 是第四纪以来的沉积于南海北部琼东南盆地北部陆坡的沉积体。该区的 MTDs 具有发育规模大、期次

多的特点。MTDs 沉积后常与后期浊流、深海沉积等互层叠加或多期 MTDs 互相侵蚀、叠加。MTDs 是深水陆坡地层的重要组成单元,控制着陆架和陆坡的演化,是形成现今海底地形的关键因素。

2 数据和方法

2.1 数据资料

研究区位于琼东南盆地北部陆坡区(图 1b 红色边框),取地震波在海水中传播的平均速度为 $1\,500\text{ m/s}$,估算研究区水深范围大约 $500\sim 1\,000\text{ m}$,研究区包含 3D 地震数据约 285 km^2 ,地震资料面元为 $12.5\text{ m}\times 12.5\text{ m}$,采样率 2 ms ,地震数据频带宽度范围约为 $10\sim 80\text{ Hz}$,主频约 40 Hz ,垂向分辨率约为 12.5 m 。目标层位解释网格为 20×20 (Inline $\times$ Crossline)。



(a)MTDs 顶面构造图;(b)研究区地理位置^[16]

图 1 研究区地理位置及 MTDs 构造特征图

Fig.1 Location and tectonic characteristic of the study area

2.2 MTDs 的识别

本文根据 MTDs 的蠕虫状、波状、丘状地震反射外形,杂乱、空白、弱振幅和连续性差的地震反射构型^[6-7],对研究区的 MTDs 进行识别。研究区内可识别正断层、逆冲断层、挤压脊、侵蚀擦痕、滑塌

块体。

2.2.1 正断层

常发育在 MTDs 头部陆架坡折处,较易识别。它是地质体受破坏、拉张、向前搬运的指示标志,可指示物源方向^[5]。本研究区中,正断层主要发育在西北、东北部,呈阶梯状发育,由较连续的蠕虫状

弱反射(上盘)过渡到杂乱反射(下盘)。是 MTDs 由蠕动转化为碎屑流的表现。发育规模较大, 垂直断距在 40 ms 左右, 最大可达 60 ms, 水平断距在 500 m 左右, 最大可达 800 m(表 1a)。

表 1 MTDs 识别标志

Table 1 Identification standards of MTDs

沉积单元类型	地震剖面特征	地质模式	特征
正断层			发育在头部, 由较连续的蠕虫状反射过渡为杂乱反射
逆冲断层			发育在趾部, 体部前端, 挤压形成逆冲断层, 上覆常见凹槽
侵蚀擦痕			发育在体部, MTDs 切割下伏地层, 可见侵蚀凹槽
滑塌块体			发育在体部, 孤立地质体出现杂乱反射中, 下伏常见侵蚀凹槽

注: 剖面位置见图1a。

2.2.2 逆冲断层

MTDs 内部具有流变特性, 受摩擦力的影响, 内部发生变形, 沉积体挤压形成逆冲构造。通常发育在 MTDs 的趾部^[5], 呈叠瓦状排列。块体搬运动力越大, 断层断裂越发育, 作用范围越广。在研究区中逆冲断层主要发育在体部末端、趾部区域, 逆冲断层会破坏 MTDs 顶界面, 形成逆冲褶皱, 使小型凹槽发育, 是浊积岩形成的有利区^[1]。在剖面上呈杂乱-波状反射, 同相轴连续性差呈叠瓦状排列(表 1b)。

2.2.3 侵蚀擦痕

MTDs 在搬运过程中会侵蚀固结程度较差的原状地层, 保留较固结或抗侵蚀能力更强的地层^[1](表 1c、d)。在本研究中把 MTDs 侵蚀下伏 MTDs 形成的痕迹也归为侵蚀擦痕(表 1c)。在被侵蚀处的底部会形成明显的凹坑或者侵蚀凹槽, 在整套 MTDs 中均可发育, 常见于体部。其发育规模与 MTDs 搬运能力有关, 搬运动力越强, 侵蚀能力越大, 凹槽的面积、深度越大。在滑塌块体下伏地层常见有侵蚀擦痕(表 1d), 这可能是大型的块体比 MTDs 中的松散的砂泥岩具有更大的重力, 对下伏地层的侵蚀能力更强, 因此产生侵蚀凹槽。

2.2.4 滑塌块体

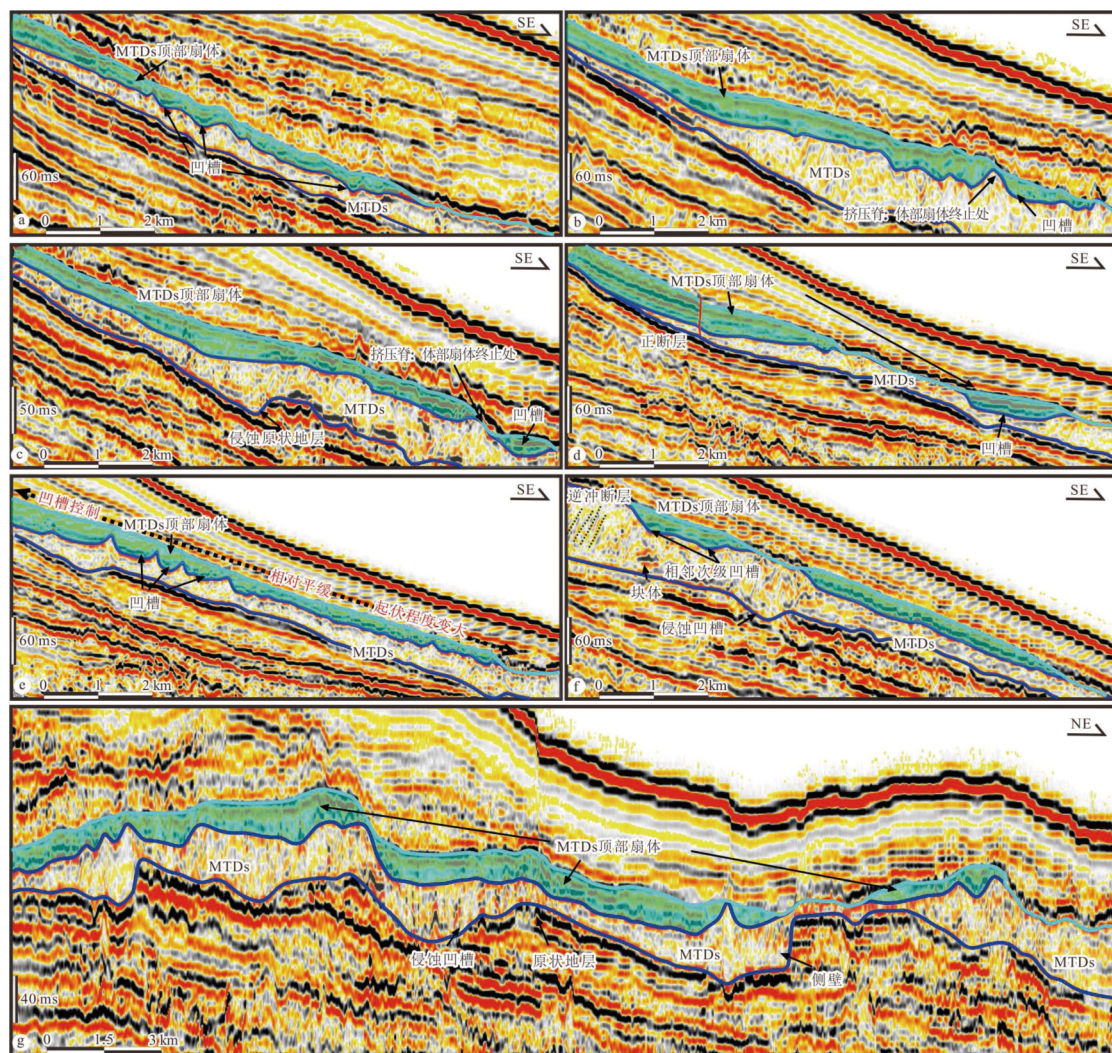
MTDs 在向前搬运过程中, 其内部砂泥岩大多处于松散、未固结状态, 但某些地质体抗破坏能力强, 会保持一定体积的块体形态向前滑动, 造成 MTDs 内部出现孤立地质体的现象。在地震剖面表现为: 杂乱反射的 MTDs 内部出现透镜状、短轴状的孤立异常体(表 1d)。

2.3 MTDs 分布及其顶面沉积特征

研究区位于琼莺段陆坡的上陆坡区, 发育多套 MTDs。MTDs 头部呈楔状, 厚度薄, 向滑动方向先增厚(体部)后减薄(趾部末端)。其头部顶面较平整, 无大的起伏构造, 后期扇体沉积时不受起伏面控制, 连续性好。同时, 由于离物源近、规模大, 在地震剖面上同相轴连续性较好、规模大(图 2a—d)。体部顶面和头部顶面具有相似的结构特点, 但起伏程度增大且体部末端与趾部间存在挤压构造, 所以顶面大规模连续扇体沉积常在体部末端终止, 剖面上表现为同相轴上超尖灭于挤压脊(图 2b—d)。趾部顶面起伏大, 后期扇体受限于挤压脊, 发育于凹槽内, 规模小, 表现为短轴状、透镜状反射, 同相轴上超尖灭于凹槽两侧(图 2c、d、f)。MTDs 内部

为杂乱反射夹弱反射(图 2a–g), 局部见短轴状、连续性较好的同相轴, 解释为滑移块体(图 2f); 叠瓦状排列的同相轴, 解释为逆冲断层(图 2f)。MTDs 对下伏地层具有侵蚀性^[11], 对固结程度弱的地层侵蚀较明显, 造成下伏地层部分缺失(图 2c、g)。研究区 MTDs 大致呈 NW–SE 向展布, 其中东北部发

育 MTDs 趾部(图 2f–g), 规模较大; 在北部边界(图 2d)和西北部边界(表 1a)见 MTDs 头部前端, 规模较小(图 2d、g 和表 1a), 在剖面上由弱反射或蠕虫状反射过渡为杂乱反射。其他地区均可见 MTDs 发育的头部和体部(图 2a–c), 表明本区 MTDs 发育的源头多为陡峭的上陆坡。



剖面位置见图 1a

图 2 研究区 MTDs 三维地震剖面特征

Fig.2 3D seismic characteristics of the MTDs in the study area

3 MTDs 顶面特征及对后续沉积的控制

本研究主要探讨的是 MTDs 顶界面对后续沉积的影响, 为方便研究, 假定是浊流充填而形成的海底扇。对研究区的 MTDs 进行追踪、闭合解释, 然后利用 Surfer 制作 MTDs 的构造顶界面(图 1a)。对 MTDs 的顶界面上覆海底扇(图 2a–f)进行追踪, 使用双狐软件制作海底扇厚度图(图 3a), 利用 Geo-

frame 生成 RMS 振幅属性图(图 3b)。

MTDs 顶面构造图(图 1a)地形起伏特征明显。地形起伏对后续沉积控制作用突出, 沉积厚的地方对应低洼区及局部隆起间的凹槽(图 1a 与图 3a), 主要集中在趾部和体部末端的顶面。在体部顶面, 地震剖面上主要呈弱振幅夹杂乱的席状反射(图 2a–f, 图 4a、d), 在趾部挤压褶皱间等的小型凹槽处呈短轴状强振幅亚平行反射(图 4a、d)、或丘状反射(图 4c)。其连续性较好、振幅较稳定, 故均

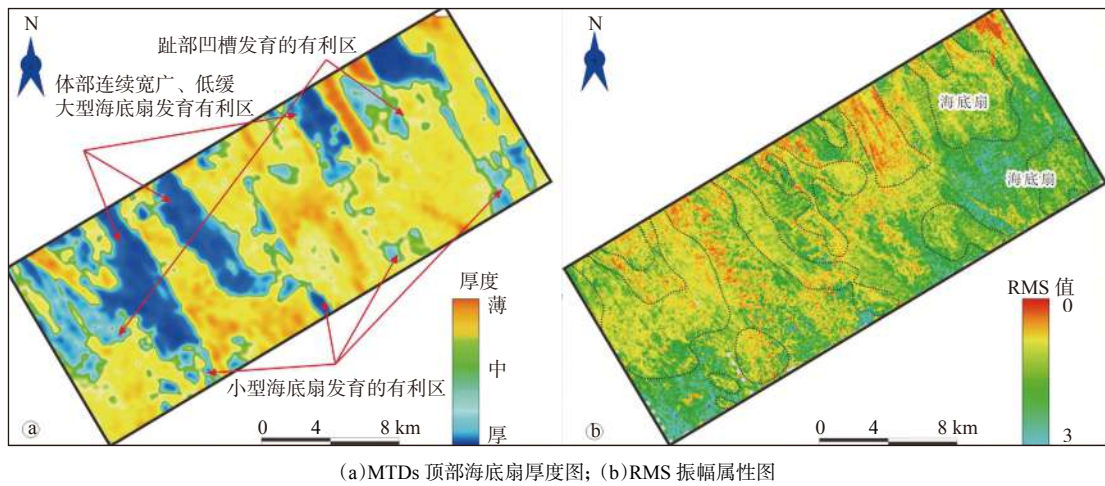
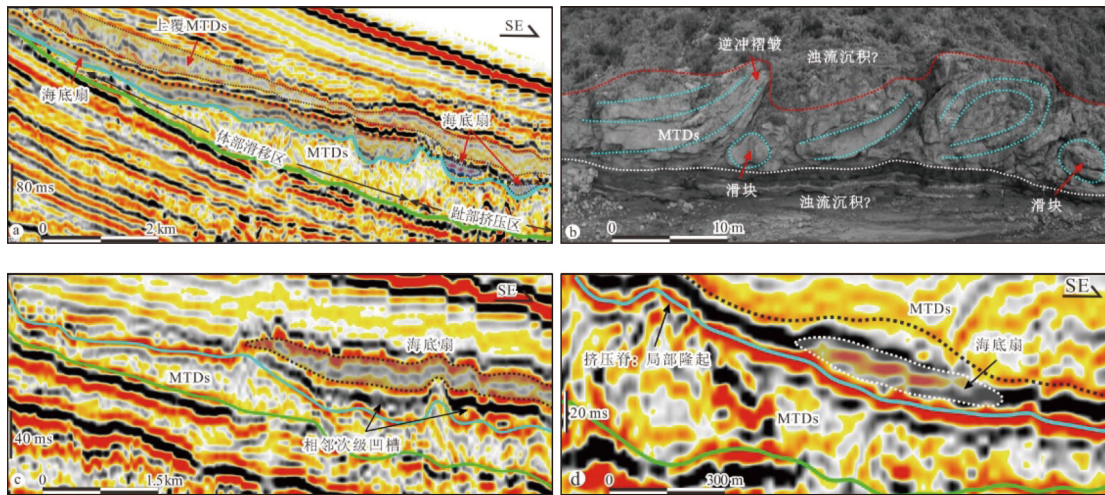


图 3 研究区海底扇特征

Fig.3 Characteristics of submarine fan in the study area

图 4 MTDs 顶面海底扇三维地震剖面特征 (a, c, d) (剖面位置见图 1a) 及野外露头特征 (b) ^[11]Fig.4 3D seismic characteristics of the submarine fan (a, c, d) (see Fig.1a for location) and the outcrop showing the control of MTDs top surface (b) ^[11]

方根振幅属性(RMS)往往表现出低值(图 3b)。

MTDs 体部顶面,通常具有低缓宽广、局部隆起少的特点,具有较大可容空间(图 3a)。当浊流沉积在该位置时,沉积物卸载后形成大规模、空间展布连续性较好的海底扇。主要发育在研究区的西北部和北部的上陆坡区(图 2a-c)。过渡到趾部,发育大量局部隆起及孤立凹槽。浊流流经趾部时,会逐个填充这些凹槽,形成短轴状或透镜状的充填物(图 2a-f、图 4a)。当物源供给充足时,浊流充填会溢出凹槽,形成大规模的海底扇(图 2f)、地势越低规模越大(图 4c)。主要发育在研究区南部(图 2b-d)和东北部(图 2e、f)。挤压脊等局部隆起的背流面处于层流区,流体在经过局部隆起迎流面的减速后,在背流面壁面附近易形成相对的低速带,当浊流速度合适时,沉积物会卸载,形成小型海底扇,呈

透镜状强反射,规模小连续性好,主要发育在研究区中部(图 4d)。

浊流在 MTDs 顶面沉积的完整过程可概述为:当浊流流经宽缓的头部、体部顶面凹槽,沉积物卸载、堆积形成规模大、连续性好的海底扇(图 2a-c)。过渡到趾部凹槽,充填各孤立的小凹槽(图 4a),物源充足时,充填物溢出凹槽并连接形成更大的海底扇(图 2f),并随顶面的起伏程度增大而形成更大规模的海底扇(图 2e)。

4 MTDs 顶面对后续沉积控制的水动力分析

本文采用 Flow3D 水动力数值模拟软件,对海底扇形成的水动力环境进行数值模拟实验。通过

建立 MTDs 顶界面模型, 设定不同的参数, 得到模拟结果。分析其流速、能量、沉积物浓度等关键参数对海底扇形成的动力学机制的影响, 以便更好地理解深海陆坡浊流沉积的过程。

4.1 Flow3D 数值模拟原理

Flow3D 是由 Flow Science 开发的三维流体力学软件, 其采用笛卡尔坐标系, 基于自由流动体表面跟踪算法(VFO)对液-液及液-固界面进行较好的追踪, 通过结合有限差分法求解三维 N-S 方程, 其主要的控制方程包括有: 连续性方程、动量方程、 k 方程和 ε 方程, 具体如下所示^[17]。

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

紊动能 k 方程:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k \frac{\varepsilon}{k} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3)$$

紊动能耗散率 ε 方程:

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon}^* G_k \frac{\varepsilon}{k} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

式(1)–(4)中:

t 为时间, s;

u_i 为速度分量, m/s;

x_j 为坐标分量, m;

ρ 为密度黏度系数;

μ 为分子黏性系数;

μ_{eff} 为有效黏性系数;

k 为紊动能;

ε 为紊动能耗散率;

α_k 和 α_ε 分别为 k 和 ε 所对应的紊流普朗特数;

G_k 为紊动动能产生项。

其中, $C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \eta \frac{1 - \eta/\eta_0}{1 + \beta\eta^3}$; $\eta_0 = 4.377$, $\beta = 0.012$, $C_{1\varepsilon} = 1.42$, $C_{2\varepsilon} = 1.68$, η 为湍流时间尺度与平均流时间尺度之比。

4.2 Flow3D 模型建立

本文主要探讨趾部挤压区形成的褶皱间凹槽等小凹槽和挤压脊等局部隆起的背流面处及陆坡末端形成的海底扇的水动力过程。为方便研究, 及充分模拟浊流, 采用物理模型包括: 重力模型、沉积物模型、密度模型、湍流(Renormalized group model)和黏度模型。考虑海底扇(图 2f)在 $1^\circ \sim 2^\circ$ 坡度背景下沉积, 设定几何模型坡度约为 2° , 长约 100 m。其前端为趾部褶皱间凹槽区、中间为平缓倾斜表面, 末端为低平凹槽的陆坡模型(顺物源方向剖面见图 5 灰色实体)。参照 HSU 等^[18] 观测浊流流速为 3.7~20 m/s、假定本实验 4 组浊流初速度为 1、3、7、10 m/s, 浊流组分: 20% 砂+60% 粉砂+20% 黏土。设定浊流入口边界条件为流体流入边界, 出口为流体流出边界, 两边及底面被峡谷的地形的阻隔设为壁面边界, 顶面设为对称边界以减少对浊流流动的干扰^[19]。假定浊流模型表面的粗糙度约为沉积物的平均粒径, 模拟浊流持续作用下, 沉积物在起伏不平陆坡的沉积、充填规律, 分析 MTDs 起伏顶界面对海底扇的沉积控制(表 2d)。

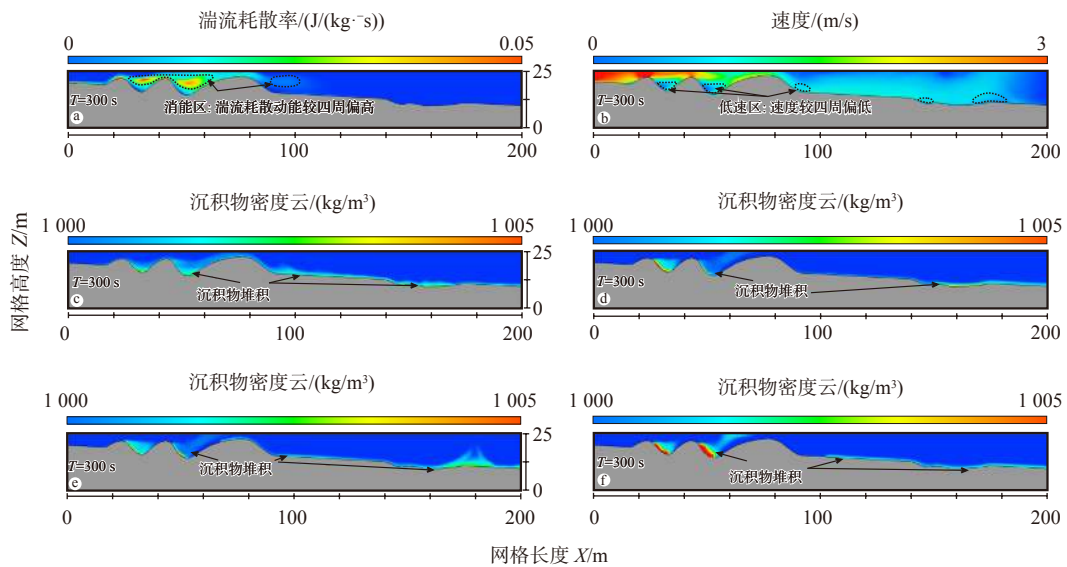
表 2 沉积数值模拟边界条件

Table 2 Boundary conditions of the numerical simulation	
参数项	设定值
浊流初始流速/(m/s)	1~10
颗粒粒径/mm	0.5(砂岩)、0.04(粉砂)、0.005(黏土)
密度/(g/cm ³)	500(砂岩)、2 200(粉砂岩)、1 800(黏土)
重力加速度/(m/s ²)	9.81
陆坡坡度/(°)	2
模拟时间步长/s	2
网格大小/m	0.5×0.5×0.5

4.3 模拟结果及分析

本文选取了浊流沉积处于稳态时的模拟剖面进行分析。选取浊流初速度为 3 m/s 进行消能特性和速度场分布规律分析。选取始速度分别为 1、3、7、10 m/s 进行速度对沉积物充填卸载影响分析, 选取初速度为 1 m/s 和 3 m/s 的砂岩和粉砂岩剖面进行粒径对沉积影响的分析。

结果表明: 对于趾部挤压区的起伏地形, 当浊流流速很低时(可能为浊流流动处于减速阶段或是引发浊流的动力小、流速慢), 其携带的粗颗粒流经 MTDs 顶部凹槽时, 相当于流经海底的消能区, 流体能量迅速衰减(图 5a)、速度减弱(图 5b), 当其



(a) $v=3$ m/s, 流体消能特性; (b) $v=3$ m/s, 速度场; (c-f) 分别为 $v=1$ m/s、 $v=7$ m/s、 $v=3$ m/s、 $v=10$ m/s 时沉积物密度云

图 5 不同速度数值模拟结果

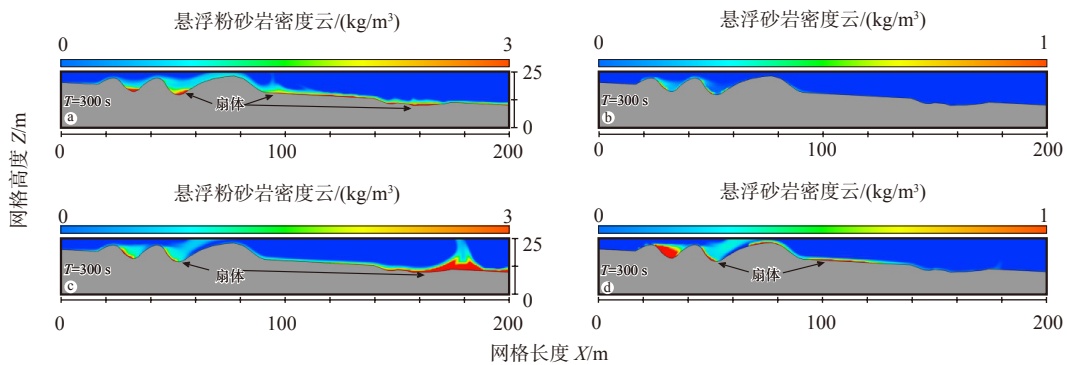
Fig.5 Results of the simulation at different velocities

动能难以克服重力, 便会沉降下来; 且随着流体的向前搬运, 效果更明显 (图 5c-f)。此处沉积的海底扇一般较小且孤立分布, 在地震剖面上表现为短轴状、透镜状反射, 上超尖灭于凹槽两侧 (图 2f、图 4a), 受地形限制非常明显。

对于挤压脊等局部隆起的背流面处而言。一方面由于浊流经过褶皱区和隆起前端迎流面的减速, 到达局部隆起时速度已较低, 有利于颗粒的沉降; 另一方面流体顺着背流面向下流动时, 会在靠近底部壁面 (MTDs 的顶面) 形成较薄且低速的层流区 (相当于一个台阶状的消能区^[20]), 当流速合适的时候颗粒会卸载、沉降, 形成海底扇 (图 4d、图 5c), 从动力学来看这种成因的扇体为粒度较细。此外, 后期的等深流等或其他作用力会在漫长的地质时期不断侵蚀局部隆起顶部, 并搬运至背流面下部沉积, 同样可能形成此类海底扇。在地震剖面上表现

为短轴状强反射, 规模较小 (图 4d)。一般当流速较小时才能形成此类海底扇 (图 5c); 当流速很大时, 浊流虽然经过凹槽类消能区减速, 但动能仍较大, 在局部隆起的背流面流动时, 颗粒难以沉降, 形成过路沉积。速度越大, 颗粒会被搬运至更远处, 难以在此处形成海底扇 (图 5d-f)。

陆坡末端凹陷, 地形低平, 是潜在的有利沉降区。浊流经过减速, 到达此处时速度很低, 颗粒极易沉积卸载。此时主要剩下粉砂和泥质等细颗粒, 不断堆积后形成大规模的深海扇 (图 5c)。当流速增大, 能达到此处的颗粒增多, 深海扇的规模变大 (图 5e)。若流速过大则会把沉积物搬运至更远处, 深海扇规模反而变小 (图 5d、f)。当流速合适时, 粉砂质和泥质等细粒物质增多, 形成更大的海底扇 (图 6a、c); 粗粒组分越多, 效果则相反 (图 6b、d)。



(a) $v=1$ m/s, 粉砂岩浓度; (b) $v=1$ m/s, 砂岩浓度; (c) $v=3$ m/s, 粉砂岩浓度; (d) $v=3$ m/s, 砂岩浓度

图 6 不同岩性组分数值模拟结果

Fig.6 Results of simulation with different-sized deposits

4.4 模拟结果验证

选取研究区北部海底扇地震剖面(图 2e—f)与实验结果(图 6a—d)对比分析,二者吻合程度较高。浊流在流经凹槽时,沉降充填,形成小型海底扇(图 2e—f、图 6a、d);在流经局部隆起后的斜坡,浊流减速沉降堆积成规模较大的海底扇(图 2f、图 6a);在末端凹槽处,堆积以细粒粉砂为主的海底扇(图 2d、图 4c 和图 6c)。限于实验条件及篇幅的影响,本文尚未开展其他类型的 MTDs 顶面的模拟、分析与对比,将在后续研究中开展该方面的研究。

4.5 MTDs 顶面扇体沉积模式

MTDs 的头部、体部和趾部具有不同的顶面特征。当浊流流经这些位置时,两者共同作用,形成了多种成因的海底扇。

MTDs 体部的顶界面具有低平宽缓的特点,当浊流流经此处时,砂泥岩颗粒由浊流本体向四周扩散、沉降后形成海底扇,具有规模大、连续性好的特点(图 2a—d)。

MTDs 趾部顶面起伏大,易形成孤立的、小型凹槽。浊流流经此处时,其动能耗散、动能大幅降低,大粒径颗粒优先在重力作用下沉降,堆积而成小型的海底扇,物源充足时,浊流充填物会溢出,不同凹槽间的海底扇相连通(对比图 2f 和图 4a)。在地震剖面上表现为短轴状、透镜状强反射,上超尖灭于凹槽两侧。

MTDs 前缘挤压脊等局部隆起的背流面的底部存在一个低速区,浊流经时大幅耗散动能,当流速足够小时颗粒会沉降在此处,形成规模较小的扇体。此处沉积的扇体受流速影响较大,速度过大会形成过路沉积(对比图 5c、d)。速度合适时,且物源充足时会形成大规模扇体(对比图 2f、图 4d)。同时,随陆坡的起伏程度的增大,沉积物充填卸载的越多,海底扇规模就越大(图 2e)。

在 MTDs 末端,地形平坦、低洼。浊流携带的细颗粒经过远距离搬运,动能减到足够小,便会沉降,形成海底扇。这种海底扇一般为浊流携带的细粒沉积物沉降而形成,粒度一般较小,但是扇体的规模较大(图 4c)。

5 结论

MTDs 具有起伏不平的顶面,在不同的区域有

不同的特征,对后续重力流沉积产生显著的影响。其特征和影响可总结为:

(1) MTDs 的体部顶面具有低平、宽缓的特点,可形成宽广低缓的凹槽;趾部挤压区顶面起伏大,可形成孤立的凹槽。

(2) MTDs 体部顶面可形成大规模的、连续的海底扇;趾部顶面凹槽发育小型扇体;局部隆起的背流面下端可发育规模不一的扇体;MTDs 末端低洼处是大型海底扇形成的有利区。

(3) MTDs 顶面起伏程度越大,就越有利于沉积物卸载、沉积,形成更大规模海底扇。

参考文献:

- [1] NWOKO J, KANE I, HUUSE M. Mass transport deposit (MTD) relief as a control on post-MTD sedimentation: insights from the Taranaki Basin, offshore New Zealand[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 120: 104489.
- [2] 刘铮,陈端新,朱友生,等. 基于水下自主航行器(AUV)的神狐峡谷谷底块体搬运沉积特征及其对深水峡谷物质输运过程的指示[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021, 41(2): 13-21.
- [3] 王大伟,吴时国,秦志亮,等. 南海陆坡大型块体搬运体系的结构与识别特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(5): 65-72.
- [4] 杜浩,石万忠,梁金强,等. 琼东南盆地块体搬运沉积体系成因及其对水合物成藏的影响[J]. *石油地球物理勘探*, 2021, 56(4): 869-881, 676.
- [5] BULL S, CARTWRIGHT J, HUUSE M. A review of kinematic indicators from mass-transport complexes using 3D seismic data[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2008, 26(7): 1132-1151.
- [6] 秦雁群,万仑坤,计智锋,等. 深水块体搬运沉积体系研究进展[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(1): 140-152.
- [7] 李磊,王英民,徐强,等. 南海北部白云凹陷21Ma深水重力流沉积体系[J]. *石油学报*, 2012, 33(5): 798-806.
- [8] 唐常锐,徐秀刚,孙秉才,等. 天然气水合物分解诱发海底滑坡影响因素分析及致灾风险评价[J]. *海洋地质前沿*, 2021, 37(5): 14-21.
- [9] 李林,张成,闫春,等. 琼东南盆地华光凹陷大型海底重力滑动系统特征及其成因机制[J]. *地球科学*, 2021, 46(10): 3707-3716.
- [10] BROWNE G H, BULL S, ARNOT M J, et al. The role of mass transport deposits contributing to fluid escape: Neogene outcrop and seismic examples from north Taranaki, New Zealand[J]. *Geo-Marine Letters*, 2020, 40(5): 1-19.
- [11] KNELLER B, DYKSTRA M, FAIRWEATHER L, et al. Mass-transport and slope accommodation: implications for turbidite sandstone reservoirs[J]. *AAPG Bulletin*, 2016, 100(2): 213-235.
- [12] 孙启良,解习农,吴时国. 南海北部海底滑坡的特征、灾害评估和研究展望[J]. *地学前缘*, 2021, 28(2): 258-270.
- [13] 王俊勤,张广旭,陈端新,等. 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[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(4): 87-95.

- [14] 王海荣, 王英民, 邱燕, 等. 南海北部陆坡的地貌形态及其控制因素[J]. *海洋学报(中文版)*, 2008, 30(2): 70-79.
- [15] TANABE S, HORI S, SAITO Y, et al. Song Hong (Red River) Delta evolution related to millennium-scale Holocene sea-level changes[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2003, 22(21): 2345-2361.
- [16] 朱友生, 王艳秋, 冯湘子, 等. 琼东南盆地陵水17-2深水气田开发区表层沉积物类型及工程地质特性[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2022, 42(1): 45-56.
- [17] 蒋卫威, 鱼京善, 陈寅生, 等. 基于FLOW3D的梅溪洪濂段桥梁雍水三维数值模拟[J]. *南水北调与水利科技*, 2021, 19(4): 776-785.
- [18] HSU S K, KUO J, LO C L, et al. Turbidity currents, submarine landslides and the 2006 Pingtung Earthquake off SW Taiwan[J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2008, 19(6): 767-772.
- [19] HUANG H, IMRAN J, PIRMEZ C. Numerical modeling of poorly sorted depositional turbidity currents[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112: 1-15.
- [20] 高仁祖, 吴海涛, 顾声龙, 等. 台阶式溢洪道的 δ -LES-SPH数值模拟[J/OL]. *计算力学学报*, 2022: 1-10. Doi. 10.13673/j.cnki.cn37-1359/te. 202201022.

Numerical simulation of post-mass transport deposition: a case study of the margin slope of South China Sea

GONG Guangchuan^{1,2,3}, LI Lei^{1,2*}, HE Wang³, ZHANG Wei^{1,2},
GAO Yifan^{1,2}, CHENG Linyan^{1,2}, YANG Zhipeng⁴

(1 School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China; 2 Shaanxi Key Laboratory of Oil and Gas Accumulation Geology, Xi'an 710065, China; 3 Northwest Oilfield Branch of SINOPEC, Urumqi 830011, China; 4 Exploration and Development Technology Research Center, Yanchang Oilfield Co. Ltd., Yan'an 716000, China)

Abstract: The mass transport deposits (MTDs) have largely-undulating top surface, which would affect post-MTD turbidity currents deposition and distribution. A systematic study on the MTD deposition is helpful for interpreting the deposit pattern of submarine fan. Based on 3D seismic data in the Qiongying continental slope of the northern South China Sea, the MTD sedimentary system, and its overburden deposits, and the impact of the top surface on post-MTD sedimentation were numerically simulated using the Flow3D. Results show that: ① the top surface of translational domain is flat and gentle, on which distributed broad-gentle troughs; and the top surface of the toe domain fluctuates greatly, forming an isolated troughs. ② On the top surface of the translational domain forms a large and continuous submarine fan, while a small submarine fan can form in the toe domain; the slip slope of local uplift can develop different-sized submarine fans. The terminal domain is a favorable area for large submarine fans formation. ③ The greater relief of the top surface, the more conducive to sediment unloading and deposit, and the larger submarine fan formation.

Key words: turbidity currents deposition; mass transport deposition; submarine fan; numerical simulation