



块体搬运沉积在大陆边缘深水区的发育

齐昆, 龚承林, 金振奎

引用本文:

齐昆, 龚承林, 金振奎. 块体搬运沉积在大陆边缘深水区的发育[J]. 沉积学报, 2024, 42(4): 1309-1325.

QI Kun, GONG ChengLin, JIN ZhenKui. Development of Mass transport Deposits in Deepwater Areas of the Continental Margin: Insights from numerical stratigraphic forward modelling of the Late Quaternary Pearl River margin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2024, 42(4): 1309-1325.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

强制海退体系域识别特征及其油气意义

Recognition Characteristics and Hydrocarbon Significance of a Falling Stage Systems Tract

沉积学报. 2019, 37(2): 345-355 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.128>

东海陆架盆地西湖凹陷平湖组—花港组沉积层序

Eocene Pinghu Formation-Oligocene Huagang Formation Sequence Stratigraphy and Depositional Model of Xihu Sag in East China Sea Basin

沉积学报. 2018, 36(1): 132-141 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-0550.2018.015>

陆架边缘三角洲研究进展及实例分析

Development of Shelf-edge Delta Researches and Typical Case Analyses

沉积学报. 2017, 35(5): 945-957 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2017.05.007>

珠江口盆地白云凹陷陆坡限制型海底峡谷群成因机制探讨

Forming Mechanism of the Slope-confined Submarine Canyons in the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin

沉积学报. 2016, 34(5): 940-950 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2016.05.013>

珠江口盆地重要不整合界面与珠江沉积体系演化分析

Major Unconformities and Sedimentary System Evolution in Pearl River Mouth Basin

沉积学报. 2015, 33(3): 587-594 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2015.03.017>

文章编号: 1000-0550(2024)04-1309-17

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2023.031

块体搬运沉积在大陆边缘深水区的发育 ——来自晚第四纪珠江陆缘地层正演模拟的启示

齐昆^{1,2}, 龚承林^{1,2}, 金振奎^{1,2}

1. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

摘要 【目的】作为大陆边缘地层的重要组成部分,块体搬运沉积(Mass-Transport Deposits, MTDs)一直受到国内外学者的广泛关注,而前人研究中却很少将其与大陆边缘沉积层序的建造建立成因上的联系。【方法】以晚第四纪珠江陆缘的SQ4和SQ5层序为研究对象,综合利用地震资料解释以及地层正演模拟方法,探究了不同层序建造背景对于MTDs发育的影响。【结果】地震资料解释结果表明,MTDs主要在SQ4内发育而在SQ5内鲜有发育,且SQ4中高位体系域发育程度相较于SQ5明显较高。根据晚第四纪珠江陆缘的实际情况,设计了45组Dionisos地层正演模拟实验分析深水MTDs在不同层序建造背景下的发育。在晚第四纪珠江陆缘充足的沉积物供给以及大幅度海平面波动的背景下,深水MTDs对层序建造过程中高位体系域的发育极其敏感;在高位体系域持续时间较长从而进行充分发育的情况下,深水MTDs普遍较容易形成,这与深水MTDs在SQ4和SQ5中的实际发育情况一致。【结论】在SQ4建造过程中,高位体系域充分发育,相应的三角洲—滨岸沉积体系越过了陆架坡折,形成了高起伏和高坡度的斜坡前积体,其具有很大的不稳定性,极易发生斜坡垮塌,从而导致深水MTDs的发育。然而,在SQ5建造过程中,高位体系域发育相对有限,相应的三角洲—滨岸沉积体系只进积到外陆架,形成低起伏和低坡度的斜坡前积体,不利于斜坡垮塌的发生以及深水MTDs的发育。

关键词 块体搬运沉积;沉积层序建造;地层正演模拟;珠江陆缘;晚第四纪

第一作者简介 齐昆,男,1993年出生,博士研究生,深水沉积学,E-mail: qikun205@163.com

通信作者 龚承林,男,教授,E-mail: chenglingong@cup.edu.cn

中图分类号 P512.2 **文献标志码** A

0 引言

块体搬运沉积(Mass-Transport Deposits, MTDs)是指除浊积岩之外的各种重力诱使的沉积体,主要由滑块体(slump)、滑移体(slide)、碎屑流沉积物(debris-flow deposits)组成^[1-2]。作为大陆边缘地层的重要组成部分^[3-4],MTDs一方面与深水油气储层关系密切,可以有效促进岩性油气藏的形成^[5-8];另一方面,其对海域相关工业设施具有潜在破坏隐患,而且可以产生海啸、大洋环流变迁等自然灾害^[9-11]。因此,探究MTDs在大陆边缘深水区的发育具有重要的科学意义和应用价值。

目前,国内外学者已经对深水MTDs的发育展开了较为细致的研究,发现其不仅受到地震、火山喷发、风暴、水合物分解等短期事件的影响,还对沉积

物堆积、海平面波动、地貌变化等长期地质过程具有明显的响应^[12-17]。但是,需要说明的是,前人研究却很少将深水MTDs的发育与大陆边缘沉积层序的建造建立成因上的联系。由于地质资料分辨率有限,再加上地质历史时期基准面变化难以恢复,厘定MTDs发育的层序建造背景往往较难实现,而地层正演模拟技术的发展却为解决这一重要科学问题提供了可能。

本研究以晚第四纪珠江陆缘的两套沉积层序为研究对象,在经典层序地层学模式指导下使用Dionisos运行了45组模拟实验来分析不同层序建造背景对于深水MTDs发育的影响。具体来说,首先利用地震资料对两套目标层序的内部构型进行系统表征,初步认识深水MTDs在晚第四纪珠江陆缘的发育情况;其次参考实际地质资料进行一系列模拟实验

收稿日期:2023-01-03;修回日期:2023-04-02;录用日期:2023-05-05;网络出版日期:2023-05-05

基金项目:国家自然科学基金项目(41972100)[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41972100]

的设计,并进而根据模拟结果建立MTDs发育与层序建造背景的耦合关系;最后选择典型模拟实验进行动态分析,进一步揭示具体层序建造背景下深水MTDs的发育机制。

1 研究区概况

研究区珠江陆缘属于南海北部陆缘的一部分,位于珠江口盆地的中部(图1a)。作为南海北部深水规模最大的盆地(总面积约 $1.75 \times 10^5 \text{ km}^2$),珠江口盆地起源于59.0 Ma的拉伸裂谷,其随后经历了两个主要的构造演化阶段:古近世—渐新世的同生裂谷阶段以及中新世—第四纪的裂谷后阶段^[18-20]。从23.8 Ma开始,南海北部陆缘逐渐形成了明显的陆架—陆坡—海盆底部的地貌结构,与此同时,古珠江不断向其输送陆源碎屑物质,形成了分布广泛的三角洲和深水重力流沉积体系^[21-25]。本研究聚焦于晚第四纪珠江陆缘沉积层序的建造过程,即珠江口盆地中部最年轻的地层序列(图1b)^[26-28]。由于珠江水系源头青藏高原自第四纪以来的剧烈隆升^[29-30],以及东亚季风强度从0.9 Ma以来的普遍增强^[31-33],珠江陆缘在晚第四纪的沉积物供给一直保持在一个十分充足的状态,使得即使在海平面高位时期,三角洲—滨岸沉积体系依然可以进积到陆架边缘^[24-25,34-35]。另一方面,在整个晚第四纪,“东沙运动”一直是南海北部最为主要的新构造活动,其和南海板块与菲律宾板块的汇聚碰撞有关。在东沙岛附近,东沙运动主要表现为东沙脊的隆起、北西走向断裂体系的发育,以及大规模的热流活动^[36-37];在更靠近西部的珠江陆缘附近,东沙运动则对大陆边缘的隆升和沉降有着明显的影响^[38-39],其直接造成了晚第四纪高达250 m的相对海平面变化幅度^[24-25,40]。

综合使用地震、测井、岩心数据,Lin *et al.*^[25]将珠江口盆地的充填序列划分为7个大的复合层序(Composite Sequence, CS):CS1~CS7;其对应由构造沉降和隆升控制的区域性海平面变化和海侵—海退旋回。本研究要开展工作的晚第四纪珠江陆缘属于复合层序CS7,其以T0这一晚上新世(大约2.8 Ma)发育的区域性不整合面作为边界(图1b)。在复合层序CS7内部,前人共识别出6套次一级的沉积层序,按照从老到新的顺序,这些沉积层序被分别命名为SQ1~SQ6,对应的层序边界分别为SB1~SB6^[24-28](图1b)。其中,对于SQ1和SQ2,其代表复合层序内区域

性海侵背景下发育的沉积层序;在上新世末期,由于吕宋岛弧和台湾岛的碰撞,流花运动在珠江口盆地发生,紧随其后,珠江陆缘发生了快速的沉降,进而导致了以上区域性海侵的发生(图1b)。对于SQ3~SQ5,其对应复合层序内区域性海退背景下发育的沉积层序;在早更新世的晚期,由于东沙运动的阶段性活跃,珠江陆缘发生了一定程度的隆升,因此导致了这次区域性海退的发生以及SQ3~SQ5的发育(图1b)。随后发育的SQ6,代表着整个复合层序的结束,由于东沙运动阶段性活跃在SQ6发育后期的停止,珠江陆缘再次发生了大规模的海侵,这使得SQ6演化后期的三角洲体系只能进陆架中部,无法到达陆架边缘,因此,在珠江陆缘的陆架边缘附近只发育SQ6的低位体系域部分(图1b)。前人根据浅层钻孔资料的热释光年龄以及生物地层事件,将SB2~SB6这5个层序边界的形成时间确定为大洋氧同位素阶段(Marine Isotope Stage, MIS)54(MIS54)、MIS38、MIS20、MIS12,以及MIS6^[26-28](图1b)。全球海平面在这些大洋氧同位素阶段的下降以及珠江陆缘在晚第四纪所伴随的充足沉积物供给造成了明显的海退和陆架剥蚀,从而最终形成了这些层序边界。本文以SQ4和SQ5两套沉积层序为研究对象来探究不同层序建造背景对深水MTDs发育的影响,它们对应的上下边界分别为SB4、SB5以及SB6,相应的形成时间分别为795 ka(MIS20)、440 ka(MIS12)、以及140 ka(MIS6)(图1b)。

2 研究资料与方法

2.1 地震资料解释

使用的地震资料位于珠江陆缘的外陆架以及陆坡部分,由中国海洋石油集团有限公司采集,垂向采样速率为4.0 ms,目的层主频为50 Hz,对应的垂向分辨率约为7.5 m。利用二维地震剖面对晚第四纪珠江陆缘的沉积层序SQ4和SQ5进行地震地层学分析,主要通过地层终止关系来进行层序边界的识别,通过地震反射内部结构和外部几何形态来进行地震相的分析以及不同体系域的识别。

2.2 Dionisos地层正演模拟

Dionisos是由法国石油研究院开发的一款地层正演模拟软件,主要基于扩散模式的非线性沉积物搬运规律来模拟大陆边缘沉积层序的建造^[41-43]。在每一个时间步下,Dionisos主要计算三个物理过

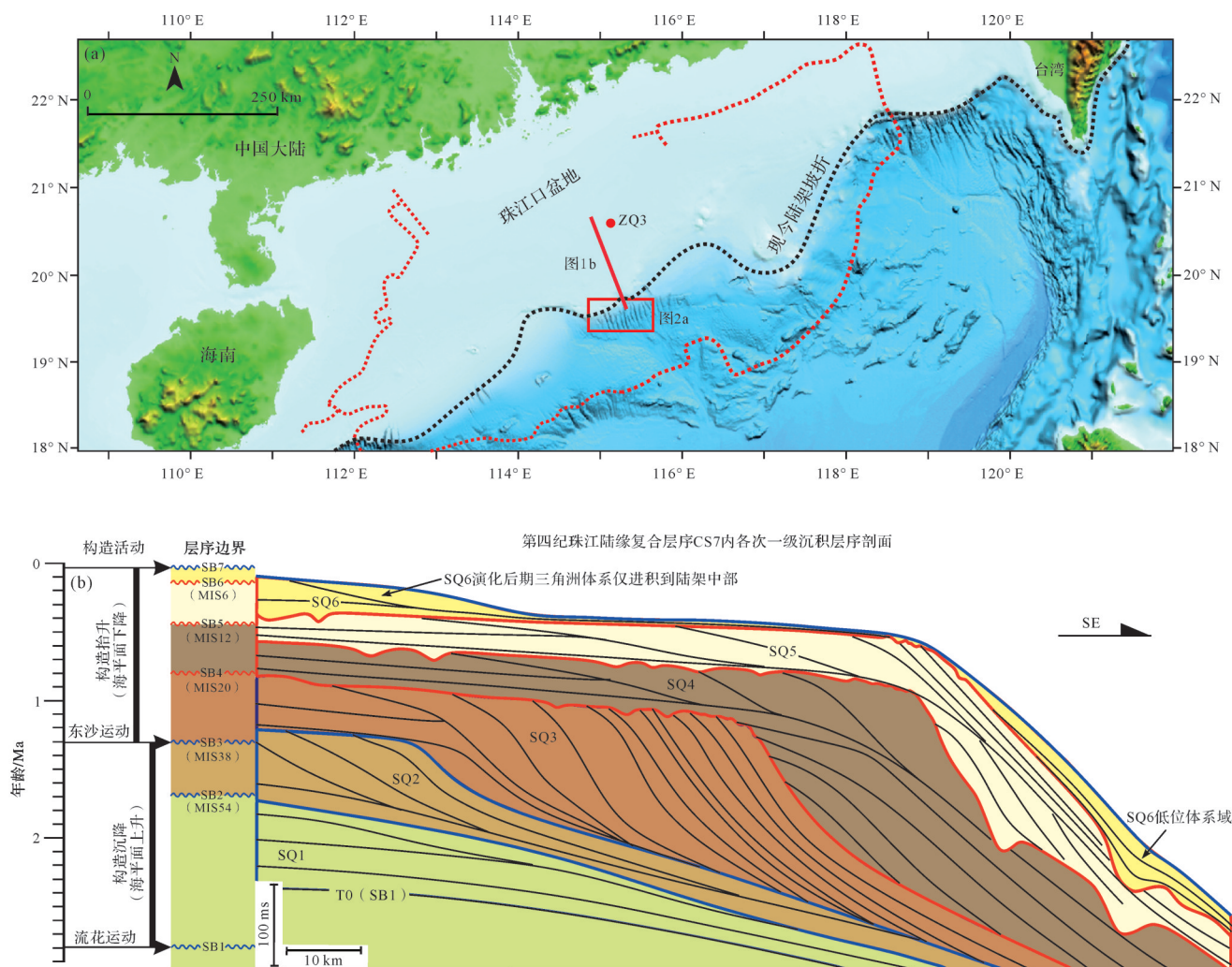


图1 (a)研究区珠江陆缘地貌图;(b)第四纪珠江陆缘层序地层格架(据文献[26-28]修改)

Fig.1 (a) Geomorphological map of the study area on the Pearl River margin; (b) sequence stratigraphic framework of the Quaternary Pearl River margin (modified from references [26-28])

程,分别是可容空间的创造,沉积物的供给,以及沉积物的搬运、侵蚀、和沉积。通过对这些物理过程的计算,该软件可以对地质历史时期盆地规模的地层记录进行正演模拟^[44-48]。

3 地震资料解释与层序构型表征

为了设置合适的模拟实验来探究晚第四纪珠江陆缘层序建造背景对MTDs发育的影响,首先需要对MTDs在SQ4与SQ5内的实际发育情况有所认识。利用地震资料对这两个目标层序的陆坡深水部分(图2)和陆架坡折部分(图3)进行了构型表征。

3.1 SQ4与SQ5陆坡深水部分

SQ4与SQ5分别以SB4和SB5两个不整合面作

为层序边界,根据穿过陆架坡折和陆坡深水部分的区域地震剖面(图2a,b),这两个不整合面在上倾方向与上覆层顶超(图2b中的黑色三角形),在下倾方向,上覆层则明显地上超于该界面之上(图2b中的红色三角形)。另外,根据两个位于陆坡深水区的局部地震剖面,SQ4与SQ5的深水沉积体系表现出截然不同的反射特征;前者主要为杂乱反射或无反射结构,而后者则主要表现为强振幅—连续性好的反射特征(图2c,d)。根据前人对珠江陆缘深水沉积体系的地震相分析结果^[7,49-51],结合作者早期的研究^[52],这两类不同的地震反射特征被分别解释为浊流沉积和MTDs(图2c,d)。因此,可以发现在晚第四纪珠江陆缘,深水MTDs主要发育在SQ4中,在SQ5中则鲜有发育。

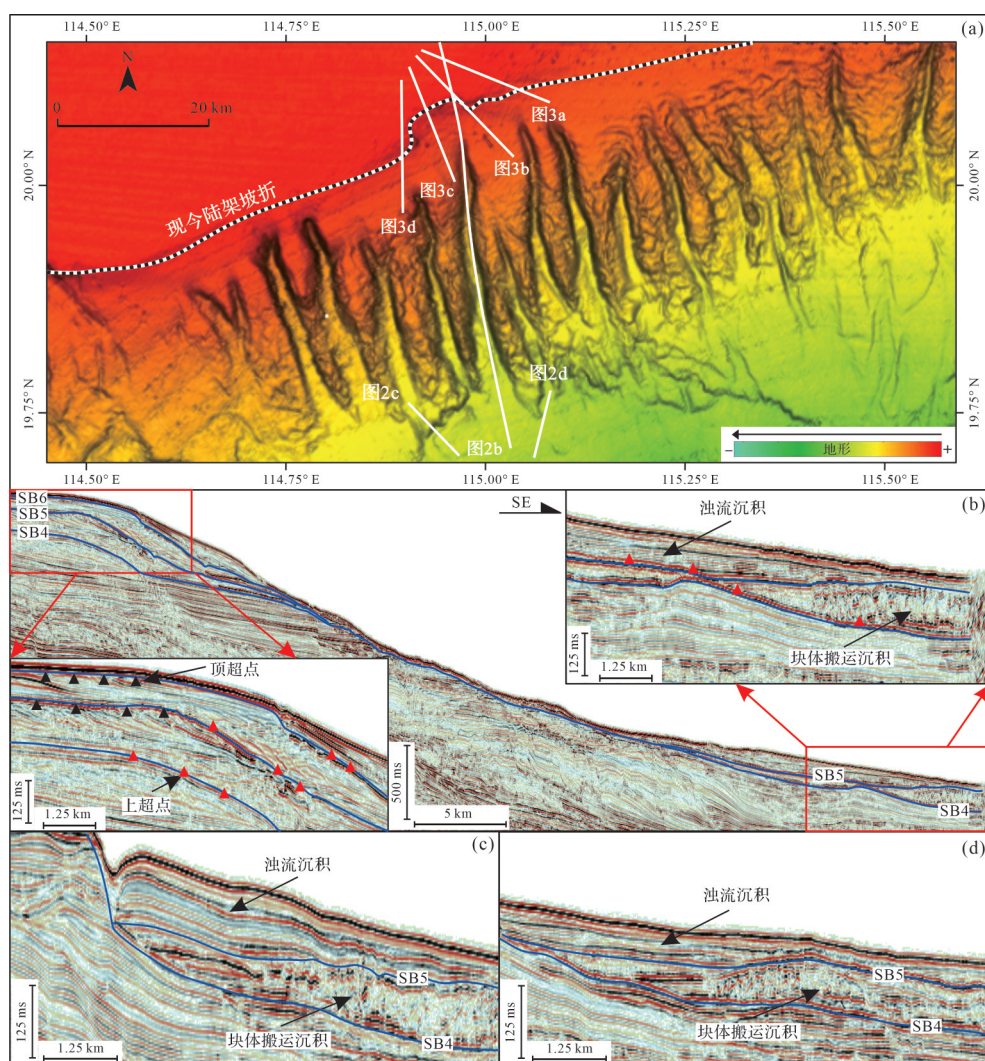


图2 (a)珠江陆缘陆架坡折部分至陆坡深水部分地貌示意图;(b)穿过陆架坡折部分及陆坡深水部分的区域性地震剖面;(c,d)陆坡深水部分的局部地震剖面

Fig.2 (a) Geomorphological map of the Pearl River margin from the shelf-break to deep-water area on the slope; (b) regional seismic section across the shelf-break and deep-water areas on the slope; (c, d) local seismic sections across the deep-water area on the slope

3.2 SQ4与SQ5陆架坡折部分

对SQ4和SQ5陆架坡折部分的内部构型也进行了详细表征,主要是对层序内部的不同体系域进行划分识别(图3)。根据传统的可容空间序列法,层序内部不同体系域可以基于地层序列的叠置样式(滨岸线的迁移轨迹)来进行识别。低位体系域表现为进积—加积的地层样式(P—A序列)和前进—上升的滨岸轨迹点;海侵体系域表现为退积的地层样式(R序列)和后退的滨岸轨迹点;高位体系域对应加积—进积的地层样式(A—P序列)和上升—前进的滨岸轨迹点;强制海退体系域则对应“衰退”的地层样式(D序列)和下降的滨岸轨迹点(表1)^[53]。然而,由于晚

第四纪珠江陆缘充足的沉积物供给及较大幅度的相对海平面变化这一地质条件,以及陆架坡折附近水深急剧增大的特殊地貌背景,陆架坡折部分的不同体系域在一定程度上表现出与理论模式不同的地层叠置样式(表1)。因此,在对SQ4和SQ5的陆架坡折部分进行体系域划分时主要参考Lobo *et al.*^[54]对世界范围内第四纪大陆边缘层序进行内部构型分析时所采用的方法,即主要根据地层内部结构和外部几何形态来进行不同体系域的识别(表1)。在陆架坡折附近,由于可容空间会向下倾陆坡方向急剧增大,低位体系域往往不形成斜坡前积体形态(clinoform),而是表现为向下倾方向逐渐变厚的发散地层结构;海

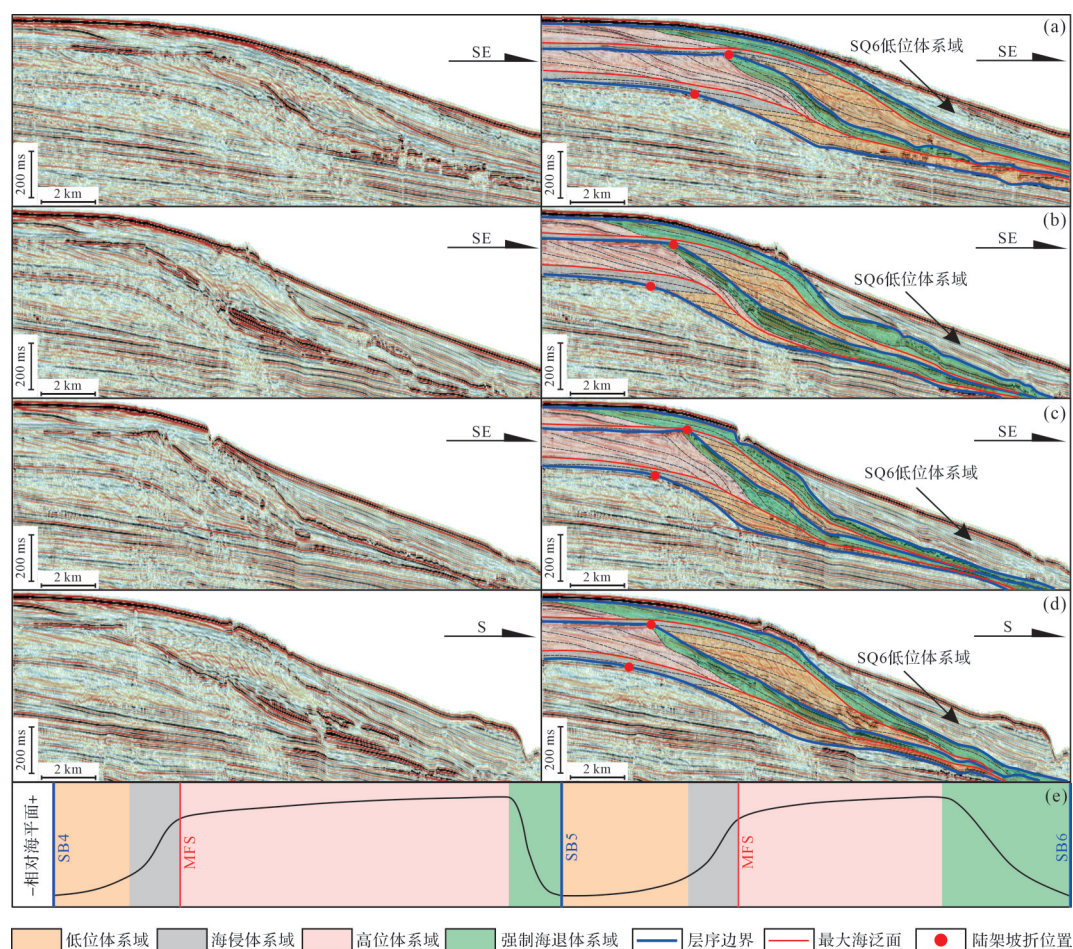


图3 (a~d)晚第四纪珠江陆缘SQ4及SQ5在陆架坡折部分不同体系域的解释;

(e)SQ4及SQ5在层序建造期间所对应的相对海平面变化模式图

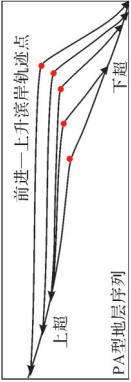
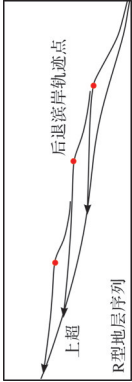
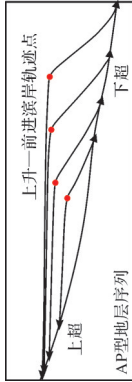
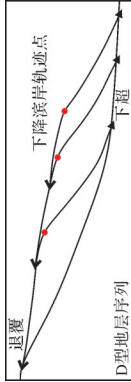
Fig.3 (a-d) Different systems tracts within SQ4 and SQ5 around the shelf-break area on the Late Quaternary Pearl River margin;
(e) schematic diagram showing the change of relative sea levels during the building of SQ4 and SQ5

侵体系域在本质上与可容空间序列法中的特征有些相似,总体呈薄层的披覆形态,内部则为平行结构;高位体系域由于在一定程度上受到后期强制海退时剥蚀作用的影响,其形成的斜坡前积体往往不发育顶积层,底积层则微弱发育,对应切线斜交型的前积结构;至于强制海退体系域,其同样以退覆不整合作为最主要的识别标志,其形成的斜坡前积体顶积层和底积层往往均不发育,内部则表现为平行斜交型的前积结构(表1)。

根据以上体系域识别标准,对SQ4和SQ5在陆架坡折部分的不同体系域进行了详细解释。可以发现这两个沉积层序在内部构型上具有某些相似性,这可以反映三角洲—滨岸沉积体系在沉积层序建造过程中进积—退积的一些基本特征。首先,在SQ4和SQ5中,低位体系普遍发育在陆架坡折以下(图3),

说明在一个相对海平面旋回的早期,即相对海平面刚开始上升的时候,三角洲—滨岸沉积体系已经进积越过了陆架坡折。其次,海侵体系域在SQ4和SQ5中发育十分有限,较难在地震剖面中被识别(图3),表明三角洲—滨岸沉积体系退积到大陆边缘的陆上部分是一个非常快的过程。最后,高位体系域在SQ4和SQ5的陆架坡折附近仍然有明显的发育(图3),说明在海平面高位阶段,三角洲—滨岸沉积体系依然可以进积到陆架边缘,这进一步证明了晚第四纪珠江陆缘充足的沉积物供给这一基本地质情况。另一方面,根据层序内部不同体系域的解释结果,还可以发现高位体系域在SQ4和SQ5中的发育程度存在明显的差异(图3)。在SQ4中,高位体系域相较于其他体系域极其发育,相应的三角洲—滨岸沉积体系甚至进积越过了早期的陆架坡折,然而在SQ5层序中,

表1 晚第四纪珠江陆缘陆架坡折附近不同体系域的识别标准及其与传统可容空间序列法中不同体系域的发育特征^[53]的对比
Table 1 Criteria of recognizing different systems tracts of depositional sequences on the Late Quaternary Pearl River margin and their comparisons with characteristics of systems tracts from the accommodation succession method^[53]

体系域	晚第四纪珠江陆缘层序不同体系域在陆架边缘附近的表现特征			
	可容空间序列法模式不同体系域示意图	主要地层终止关系	外部几何形态	内部地层构型
低位体系域		上倾方向上超于下界面之上	斜坡前积体不明显， 总体呈向上倾方向变薄的趋势	平行或略显 发散结构
海侵体系域		上倾方向上超于下界面之上	薄层披覆	平行结构
高位体系域		上倾方向与上覆层顶超， 下倾方向呈切线型下超	斜坡前积体，其中顶积层几乎不发育， 底积层微弱发育	切线斜交型前积结构
强制海退体系域		上倾方向对上界面削蚀， 表现为退覆不整合， 下倾方向下超于下界面之上	斜坡前积体，其中顶积层和 底积层都不发育	平行斜交型前积结构

虽然高位体系域也有一定的发育,但是其发育程度与低位体系域和强制海退体系域总体相当,相应的三角洲—滨岸沉积体系主要进积到外陆架部分(图3)。

4 Dionisos 地层正演模拟

4.1 模拟方案设计

根据以上对深水 MTDs 在晚第四纪珠江陆缘发育情况的初步认识,本文在 Dionisos 中建立了一个相对简单的二维地质模型,并进而设计了一系列的模拟实验来探究不同层序建造背景对深水 MTDs 发育的影响(图4)^[55-56]。在 Dionisos 中进行地质模型建立和模拟实验设计主要包括三个方面的内容:规模范围与初始地形、沉积物供给与相对海平面变化,以及沉积物扩散搬运。

4.1.1 规模范围与初始地形

根据上文对 SQ4 和 SQ5 的介绍,其上下三个边界(SB4~SB6)的形成时间分别为 795 ka、440 ka 以及 140 ka,说明一个基准面旋回的时间超过了 300 ky,因此,设置模拟实验的运行时间为 340 ky,时间步则为 5 ky(表2)。另外,因为是在经典层序地层学模式下开展工作,一般假设沿着沉积走向(Y方向)的地层过程在体系域尺度上是一致的^[57-58],所以这里建立了一个相对简单的“二维模型”来模拟沉积倾向方向(X方向)的层序建造过程(图4a、表2)。并且,这种二维模拟实验还具有其他“优势”,一方面,其可以在最大程度上排除三角洲—滨岸沉积体系在沉积走向上自旋回摆动对实验结果所带来的影响;另一方面,可以有效减少软件的运算时间。因此,模型规模被设置为 410 km(X方向)×20 km(Y方向),网格边长则为 10 km。至于模型的初始地形,设置其为一个典型的陆架—陆坡地貌,根据现今珠江陆缘的地貌参数^[22,27,59-60],陆架宽度设为 200 km,对应坡度为 0.06°(1 m/km),陆坡宽度则设为 210 km,对应坡度 1.2°(20 m/km)(图4a、表2)。此外,在 SQ4 和 SQ5 中,低位体系域普遍发育在陆架坡折以下,三角洲—滨岸沉积体系在相对海平面刚开始上升时已经越过陆架坡折,所以在模拟实验中把初始海平面的位置设在陆架坡折以下 50 m 处,相应地,模型中陆架坡折的地形值为 50 m,近物源一端模型边界的地形值则为 250 m(图4a)。

4.1.2 沉积物供给与相对海平面变化

关于模拟实验中的沉积物供给情况,经典层序地层学模式一般假设其不随时间发生明显变化,因此将其设置为常量^[44-45]。因为珠江陆缘在晚第四纪对应充足的沉积物供给,所以将沉积物通量和水通量数值设置得均较大,分别为 5 000 km³/My 和 1 200 km³/My(表2),这两个数值与现今世界范围内大河流所对应的通量参数具有一定的可比性(图4c)。而且,使用这两个数值进行模拟实验的结果显示最终形成的地层规模也与 SQ4 和 SQ5 相差不大,这进一步证明了该沉积物供给情况的设置是合适的。

至于相对海平面的变化,经典层序地层学模式认为其是驱动层序建造的核心因素,因此,将其认定为反映层序建造背景的唯一变量,进而设计了一系列模拟实验(图4b)。为了使模拟的层序建造更加简单直观,相对海平面被设置为线性变化,变化的总幅度根据 Liu *et al.*^[26]和 Lüdmann *et al.*^[40]的研究成果设置为常量 250 m(图4b、表2)。在 SQ4 和 SQ5 中,低位体系域普遍发育在陆架坡折以下(图3),相对海平面在低位时期不应超过陆架坡折位置,所以低位时期的海平面上升幅度被设置为 50 m;相应地,在随后海侵时期,相对海平面上升到近物源一端模型边界对应的幅度则为 200 m(图4b)。此外,在 SQ4 和 SQ5 中,高位体系域上边界在上倾方向与上覆层普遍顶超,且没有明显加积的趋势(图3),推测在高位阶段相对海平面的上升十分有限,并没有在陆架上创造足够的可容空间,所以简单地将高位时期的海平面上升幅度设置为 0 m(图4b)。

作为反映层序建造背景的唯一变量,相对海平面变化情况在不同模拟实验之间是不同的,本研究将这种不同集中在低位体系域、高位体系域、强制海退体系的持续时间上(图4b)。在 SQ4 和 SQ5 中,海侵体系域发育十分有限(图3),说明海侵是一个十分迅速的过程,所以这里将所有模拟实验中海侵体系域的持续时间统一设置为仅占模拟实验运行时间的 10%,即 34 ky(图4b)。此外, SQ4 和 SQ5 中高位体系域在陆架坡折附近普遍发育(图3),这不仅要求充足的沉积物供给,还要求海平面高位阶段必须具有一定的持续时间,所以将所有模拟实验中高位体系域的持续时间设置为最少占模拟实验运行时间的 40%,即 136 ky(图4b)。至于低位体系域和强制海退体系的持续时间,它们在不同模拟实验中从占运

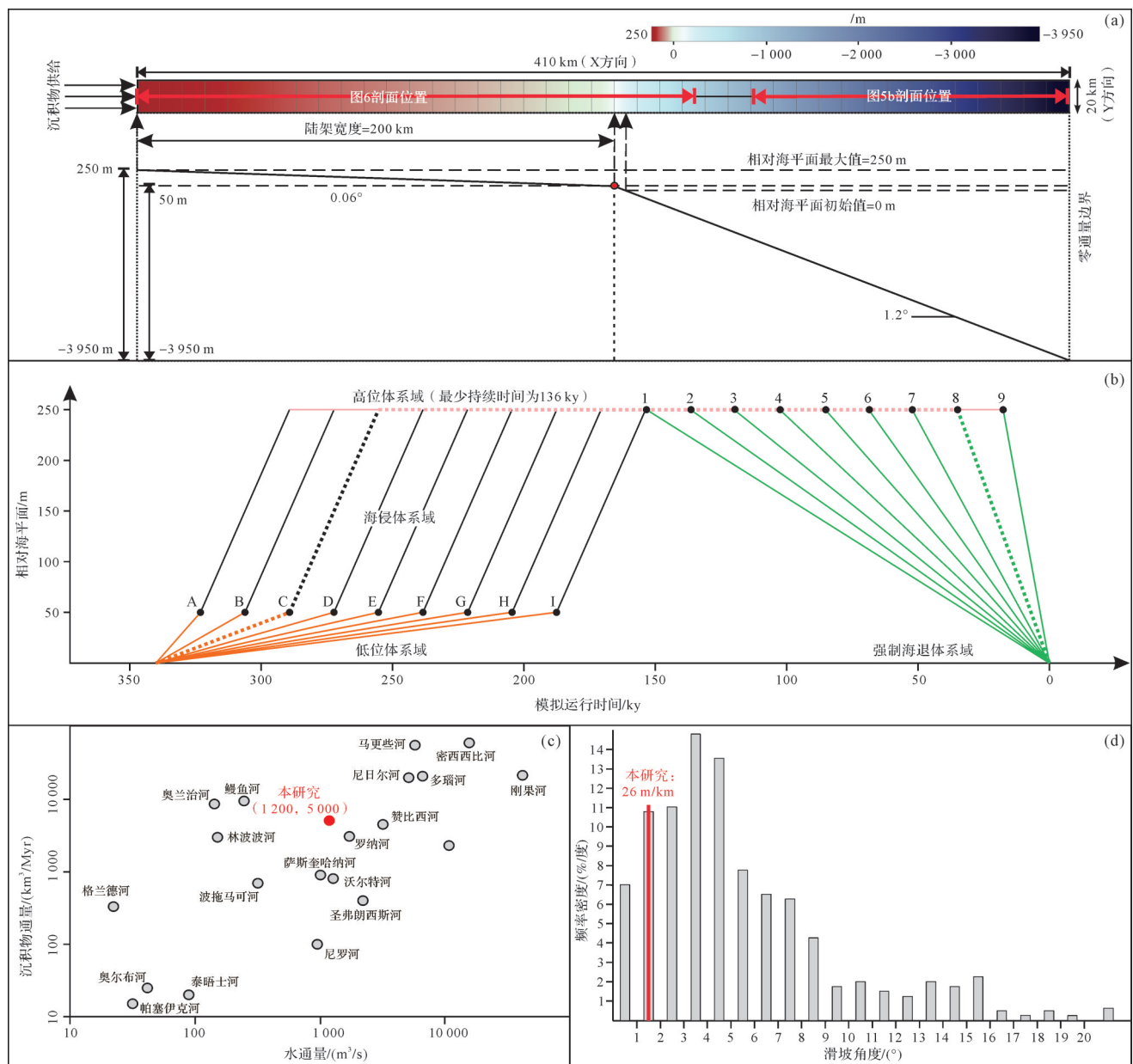


图4 (a) Dionisos 地层正演模拟设置的初始地形条件; (b) Dionisos 地层正演模拟方案中设置的相对海平面变化; (c) Dionisos 地层正演模拟使用的沉积物和水通量常数及其与现今河流参数的对比 (据文献[55]修改); (d) Dionisos 地层正演模拟使用的滑坡临界角度及其与自然界海底滑坡角度的对比 (据文献[56]修改)

Fig.4 (a) Initial bathymetry used in Dionisos modeling; (b) relative sea-level changes used in Dionisos modelling; (c) the sediment and water fluxes used in Dionisos modelling and their comparison with modern rivers (modified from reference [55]); (d) critical failure slope used in Dionisos modelling and its comparison with the worldwide slope failure database (modified from reference [56])

行时间的5%到45%递增,增量为5%。设定低位体系域和强制海退体系域持续时间的变化分别由字母A~I和数字1~9代替,这样一来总共就有45种组合(A1至A9+B2至B9+C3至C9+...+I9=9+8+7+...+1=45),即45组单独的模拟实验(图4b)。以实验C8为例(图4b中加粗虚线),低位体系域、高位体系域、强

制海退体系域对应的持续时间分别占模拟运行时间的15%、65%、10%,即51 ky、221 ky、34 ky。

4.1.3 沉积物扩散搬运参数

在Dionisos地层正演模拟过程中,沉积物的搬运分散是基于水和重力驱动的非线性扩散方程进行的。

表2 Dionisos地层正演模拟中使用的常量参数
Table 2 Constant parameters used in Dionisos stratigraphic forward modelling

模拟参数类别	模拟参数大小
模拟区域长度(x方向)/km	410
模拟区域宽度(y方向)/km	20
模拟网格边长/km	10
模拟运行时间/ky	340
模拟时间步/ky	5
沉积物通量/(km ³ /My)	5 000
水通量/(m ³ /s)	1 200
沉积物构成(砂,泥)/%	20,80
相对海平面变化幅度/m	250
初始陆架坡度/(°)	0.06
初始陆坡坡度/(°)	1.2
模型基底厚度/m	50
陆上重力驱扩散系数(泥)/(km ² /ky)	0.001
陆上重力驱扩散系数(砂)/(km ² /ky)	0.001
水下重力驱扩散系数(泥)/(km ² /ky)	0.001
水下重力驱扩散系数(砂)/(km ² /ky)	0.001
陆上水驱扩散系数(泥)/(km ² /ky)	4 000
陆上水驱扩散系数(砂)/(km ² /ky)	1 000
水下水驱扩散系数(泥)/(km ² /ky)	10
水下水驱扩散系数(砂)/(km ² /ky)	2
m值	1.3
n值	1.5
海底滑坡临界坡度/(m/km)	26
沉积物最大侵蚀速率/(m/My)	100

$$Q_s = K_g S + K_w q_w S^m \quad (1)$$

式中: Q_s 指沉积物通量, K_g 和 K_w 分别是重力驱和水驱的扩散系数, q_w 指水通量, m 和 n 是介于1~2的反应沉积物搬运能力的常量, S 则指的是地形坡度^[61]。以上与沉积物扩散搬运有关的参数的具体数值都详细地列在了表2当中,并且这些数值的大小位于众多已开展的Dionisos地层正演模拟研究所限定的相关参数的范围内^[44-46,62-64]。更为重要的是,使用这些参数开展模拟实验的结果显示最终形成的地层与SQ4和SQ5在地震剖面中的表现具有可比性(图3),这进一步说明了以上参数设定的合理性。

4.2 模拟结果展示

为了探究不同层序建造背景对深水MTDs发育的影响,对以上设计的45组模拟实验运行后产生的深水MTDs的体积进行了统计。首先,利用Dionisos的输出功能,将每一个时间步下各模型网格对应的MTDs体积导出为数值文件;然后,利用Python小程序对各个时间步的导出文件进行读取和整理,从而分析各组模拟实验关于深水MTDs的最终结果。这

里的“深水”指的是水深在1 000 m(以初始地形为参考)以下的地区,对应SQ4中MTDs在现今珠江陆缘的最小水深^[50-51,59-60]。另外,为了确保以上统计结果的准确性,在进行模型设计时将远物源一端的边界设置为零通量(图4a),其可以阻止沉积物流出模型范围,从而保证了整个模拟实验的质量守恒。然而,必须承认的是,由于零通量边界的存在,陆源沉积物不得不在其前面堆积,从而造成了类似深海平原的“假象”,但是幸运的是,这个“假象”对深水MTDs体积这个模拟实验结果没有任何影响。在Dionisos地层正演模拟中,MTDs的发育是由斜坡垮塌模型模拟的,对应一个自旋回过程,是非线性的沉积物搬运和堆积的产物。在以上模拟实验中,垮塌临界坡度被统一设置为1.5°,即26 m/km(图4d、表2)。这个数值与Wang *et al.*^[51]早期的研究成果一致,他们通过对晚第四纪珠江陆缘MTDs的地震表征,发现底部垮塌面的坡度介于0.8°~2.3°;而且,通过将这个数值与Hance^[56]建立的全球海底滑坡数据库进行对比,也证明该临界坡度是典型的(图4d)。

根据设计的模拟方案,低位体系域和强制海退体系域持续时间的变化分别由字母A~I和数字1~9代替,以这两个离散变量分别作为左右坐标建立了一个如图5a的三角图。图中由左右两个坐标确定的45个菱形方格代表45组模拟实验,其中,左、右、上三个端元的菱形方格(即I9、A1、A9)分别代表低位体系域、强制海退体系域、高位体系域在模拟运行时间中占比最大的模拟实验(图4b)。将统计得到的各单独模拟实验中深水MTDs的体积大小按照黄绿色标的形式投点到各自对应的菱形方格中,可以直观地展示层序建造过程中不同体系域发育情况,即不同的层序建造背景对深水MTDs发育的影响。最终生成的图5a显示,高位体系域相对于低位和强制海退体系域,其持续时间越长(即越靠近三角图顶端),深水MTDs的体积越大。然而,在高位体系域持续时间不变的情况下,无论低位和强制海退体系域持续时间如何占比(即沿三角图左右端点方向),深水MTDs的体积无显著变化(图5a)。

5 讨论

根据以上45组模拟实验的结果,深水MTDs的体积对层序建造过程中高位体系域的发育极其敏感;在高位体系域持续时间较长从而进行充分发育

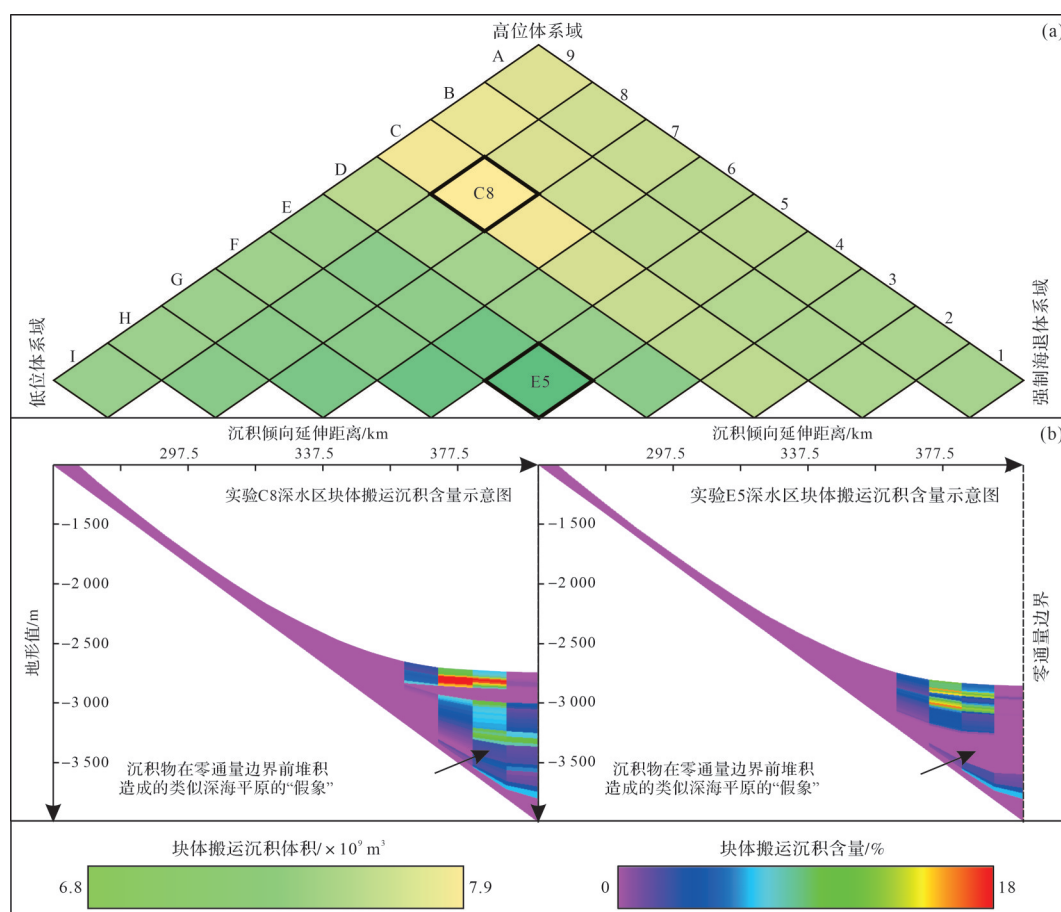


图5 (a) 45组模拟实验运行后产生的深水块体搬运沉积的体积;(b)实验C8和实验E5深水部分(原始地形1000 m水深以下)展示块体搬运沉积百分含量的地层剖面(具体位置见图4a)

Fig.5 (a) Volumes of mass-transport deposits generated by 45 modelling experiments; (b) stratigraphic profile of the deep-water reaches of models C8 and E5 showing the contents of mass-transport deposits (MTDs)

的层序建造背景下,深水MTDs普遍较易发育(图5a)。该规律与深水MTDs在晚第四纪珠江陆缘的实际发育情况相一致;在陆架坡折部分,因为SQ4中的高位体系域相较于SQ5发育程度明显较高,所以在陆坡深水部分,MTDs只出现在SQ4中而在SQ5中则几乎不发育(图3)。

研究认为这种MTDs表现出的与高位体系域充分发育的层序建造背景紧密耦合的关系,与晚第四纪珠江陆缘充足的沉积物供给以及大幅度相对海平面变化这一特殊地质条件有关。在传统的层序地层学理论中,陆源沉积物主要是在海平面下降阶段和低位阶段被搬运到陆架边缘堆积,进而发生斜坡垮塌,造成深水区MTDs的发育^[65-67]。因此,强制海退体系域和低位体系域理应在深水MTDs发育中扮演着更重要的角色。然而,在晚第四纪珠江陆缘,无论强制海退体系域和低位体系域的持续时间多长,幅度达250 m的相对海平面变化都可以保证它们在陆架

坡折以下发育,这在一定程度上削弱了它们对深水MTDs的影响。另一方面,在海平面的高位阶段,晚第四纪珠江陆缘充足的沉积物供给也会造成大规模海退,同样使得陆源沉积物在陆架边缘堆积并发生垮塌,加强了高位体系域的发育程度与深水MTDs发育之间的联系。在大陆边缘,陆源沉积物不仅可以通过三角洲—滨岸沉积体系首先进积到陆架内海底峡谷头部并随后借助峡谷向深水区输送,其还可以通过斜坡垮塌或者异重流的形式直接向陆坡以及海盆底部扩散^[68-70]。因此,深水区内的MTDs往往和浊流沉积交替发育,这样的深水沉积体系除了在晚第四纪珠江陆缘发育外,前人在墨西哥湾西部的斜坡内盆地^[71]、特立尼达岛和多巴哥岛的深水区^[72]、亚德里亚海盆地^[73]也均有发现。本研究利用地层正演模拟方法建立的层序建造背景与深水MTDs发育的耦合关系,一方面可以从地层学的角度为这种MTDs浊流沉积交替发育的深水沉积体系提供成因解释;另

一方面,可以为今后深水区沉积单元的预测提供参考,尤其是与晚第四纪珠江陆缘一样具有强沉积物供给以及高幅度海平面变化背景的大陆边缘盆地。

在晚第四纪珠江陆缘,因为MTDs主要在SQ4深水区发育,而在SQ5中鲜有发育(图2c,d),所以,选择45组模拟实验中深水MTDs体积相差最大的C8和E5来分别代表SQ4和SQ5(图5a)。这两组模拟实验在深水区形成的地层剖面如图5b,可以发现两者在

MTDs的百分含量上确实存在明显的差距。此外,实验C8和实验E5在陆架和上陆坡部分形成的地层剖面与SQ4和SQ5在地震剖面上的表现具有相似性(图3,6),而且这两个模拟实验所使用的相对海平面变化曲线与冯志强等^[59]利用浅层钻孔ZQ3(具体位置见图1)获得的SQ4和SQ5沉积时期的相对海平面变化曲线也具有可比性(图7),均说明实验C8和实验E5可以有效地反应SQ4和SQ5的建造过程。

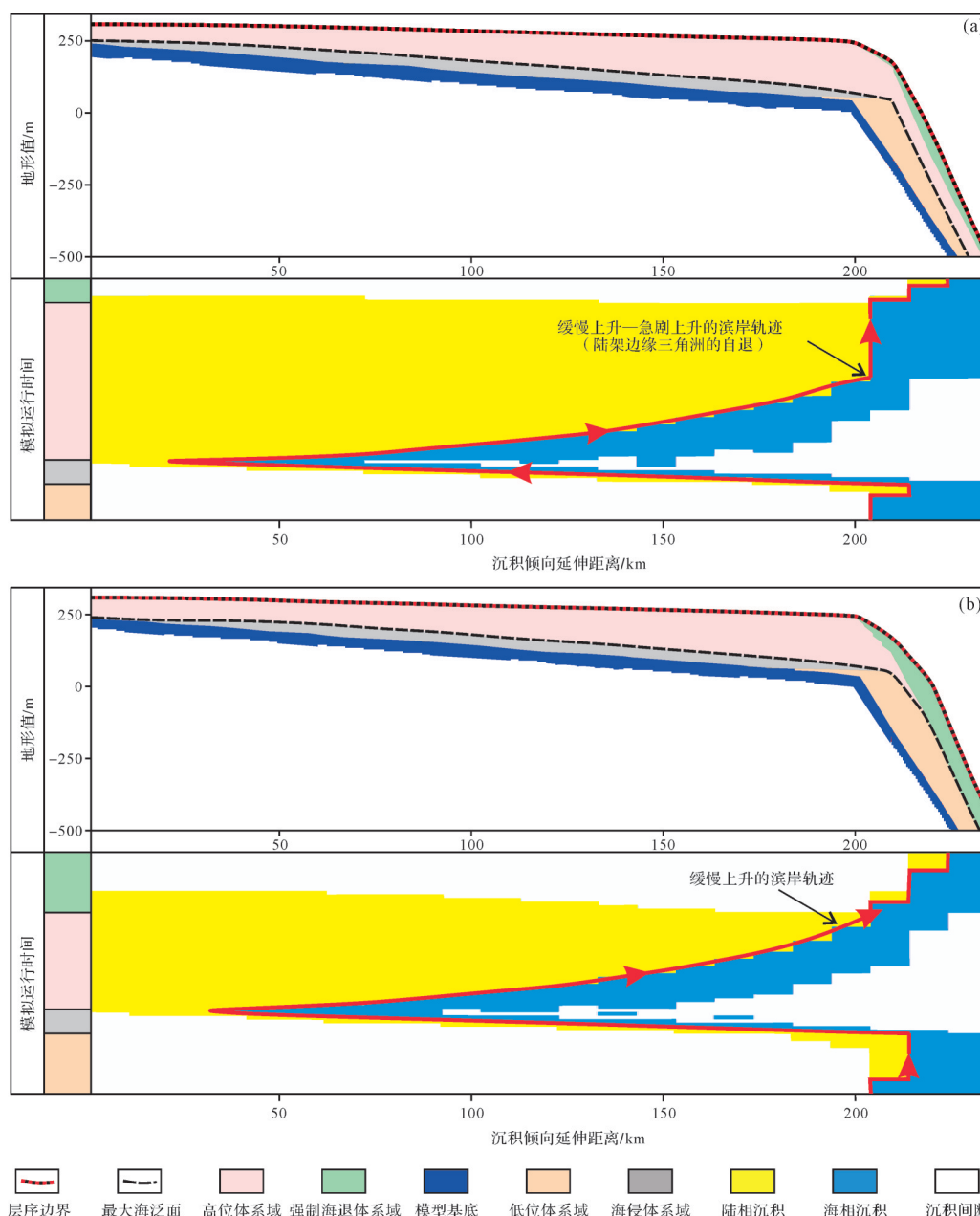


图6 实验C8(a)和实验E5(b)陆架及上陆坡部分展示不同体系域发育的地层剖面(具体位置见图4a)以及相应的年代地层模式图

Fig.6 Stratigraphic profiles of the shelf and upper slope segments of models C8 (a) and E5 (b) and their associated chronostratigraphic diagrams showing the development of different systems tracts

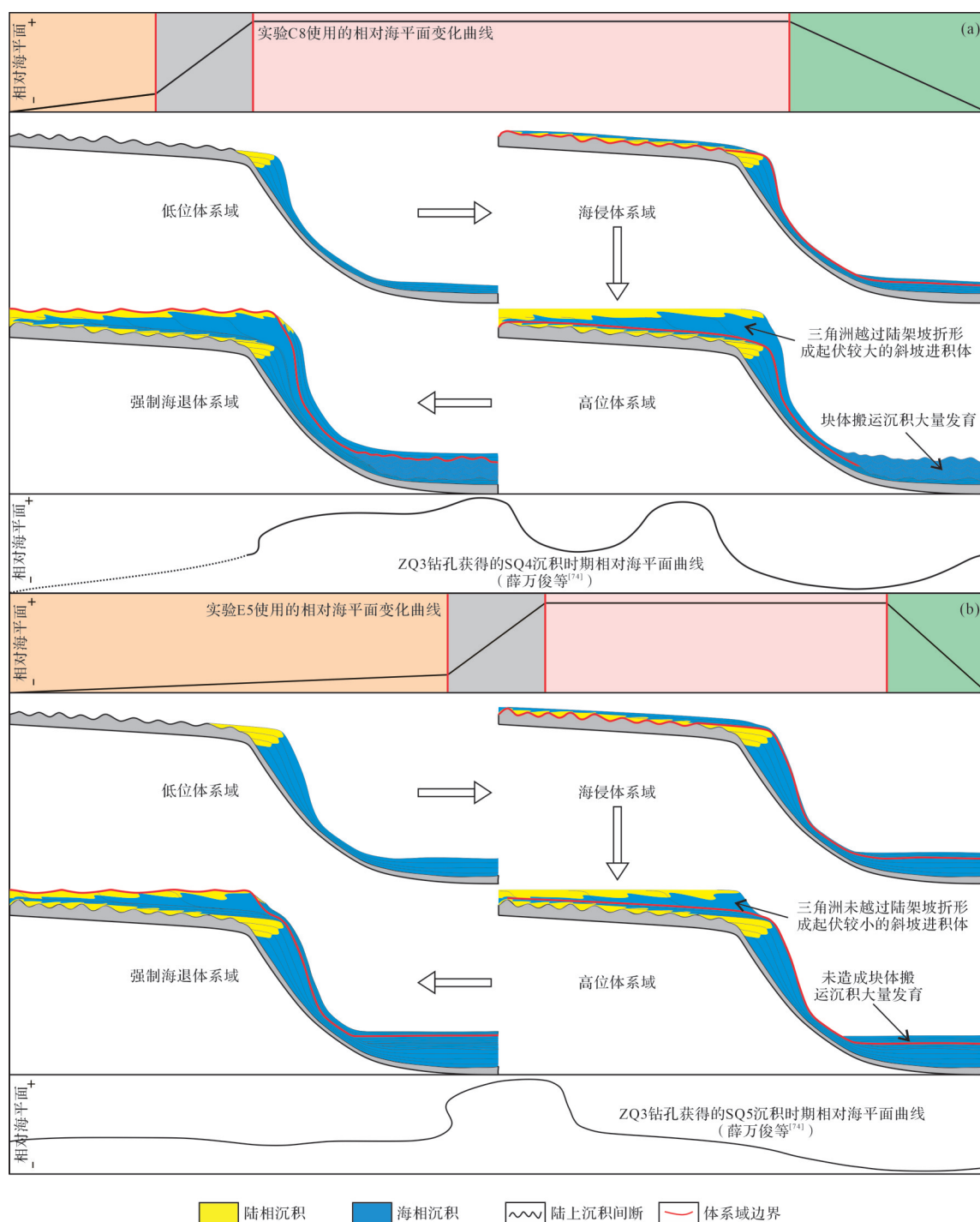


图7 SQ4(a)和SQ5(b)在低位、海侵、高位、强制海退体系域发育阶段建造模式图

Fig.7 Diagram showing the gradual building of SQ4 (a) and SQ5 (b) during successive lowstand, transgressive, highstand, and forced-regression periods

对实验C8和实验E5的结果进行动态展示,从而进一步揭示了深水MTDs在具体层序建造背景下的发育机制(图6,7)。在SQ4中,深水MTDs的形成与高位体系域充分发育的层序建造背景密切相关。在持续时间较长的海平面高位阶段,三角洲—滨岸沉

积体系持续发育并越过了陆架坡折,使得陆架边缘三角洲前缘直接与大陆坡复合,从而形成了具有高起伏和高坡度的斜坡前积体(图6a、图7a)。此外,三角洲—滨岸沉积体系在陆架坡折附近发生了“自退现象”,其对应的地层叠置模式往往由进积向加积突

然转变^[44-45,74];如在图6a中,可以发现滨岸线的轨迹在陆架坡折由缓慢上升突然变为急剧上升。这种三角洲—滨岸沉积体系的强烈加积会进一步增大斜坡前积体的起伏和坡度,从而使得其具有极大的不稳定性,并最终导致斜坡垮塌的发生以及深水MTDs的发育(图7a)。另一方面,在SQ5中,以浊流沉积为主的深水沉积体系对应高位体系域、低位体系域、强制海退体系域均匀发育的层序建造背景。此种情况下,三角洲—滨岸沉积体系虽然进积到外陆架,但并没有越过陆架坡折,水深较浅的大陆架环境下往往会形成低起伏和低坡度的斜坡前积体(图6b、图7b)。因此,在陆架坡折附近,三角洲—滨岸沉积体系总体比较稳定,不利于斜坡垮塌的发生以及深水MTDs的发育(图7b)。

6 结论

(1) 在晚第四纪珠江陆缘的陆坡深水部分,MTDs主要在SQ4内发育,而在SQ5内鲜有发育。SQ4和SQ5内不同体系域的地层叠置样式与传统可容空间序列法有所不同;SQ4中的高位体系域发育程度相较于SQ5明显较高。

(2) 深水MTDs对层序建造过程中高位体系域的发育极其敏感,在高位体系域充分发育的层序建造背景下,深水MTDs普遍较容易发育。

(3) 在SQ4建造过程中,高位体系域充分发育,相应的三角洲—滨岸沉积体系越过陆架坡折,形成了高起伏和高坡度的斜坡前积体,其具有很大的不稳定性,极易发生斜坡垮塌,从而导致深水MTDs的发育。在SQ5建造过程中,高位体系域发育相对有限,相应的三角洲—滨岸沉积体系只进积到外陆架,形成低起伏和低坡度的斜坡前积体,不利于斜坡垮塌的发生以及深水MTDs的发育。

参考文献(References)

- [1] Moscardelli L, Wood L, Mann P. Mass-transport complexes and associated processes in the offshore area of Trinidad and Venezuela[J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(7): 1059-1088.
- [2] Garziglia S, Migeon S, Ducassou E, et al. Mass-transport deposits on the Rosetta province (NW Nile deep-sea turbidite system, Egyptian margin): Characteristics, distribution, and potential causal processes[J]. Marine Geology, 2008, 250(3/4): 180-198.
- [3] Masson D, Harbitz C B, Wynn R B, et al. Submarine landslides: Processes, triggers and hazard prediction[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical, and Engineering Sciences, 2006, 364(1845): 2009-2039.
- [4] Bull S, Cartwright J, Huuse M. A review of kinematic indicators from mass-transport complexes using 3D seismic data[J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26(7): 1132-1151.
- [5] Alves M T. Submarine slide blocks and associated soft-sediment deformation in deep-water basins: A review[J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 67: 262-285.
- [6] Moscardelli L, Wood L. New classification system for mass transport complexes in offshore Trinidad[J]. Basin Research, 2008, 20(1): 73-98.
- [7] 王大伟,吴时国,吕福亮,等. 南海深水块体搬运沉积体系及其油气勘探意义[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2011, 35(5): 14-19. [Wang Dawei, Wu Shiguo, Lü Fuliang, et al. Mass transport deposits and its significance for oil & gas exploration in deep-water regions of South China Sea[J]. Journal of China University of Petroleum, 2011, 35(5): 14-19.]
- [8] 李磊,李彬,王英民,等. 块体搬运沉积体系地震地貌及沉积构型:以珠江口盆地和尼日尔三角洲盆地为例[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(6): 2410-2416. [Li Lei, Li Bin, Wang Yingmin, et al. Seismic geomorphology and sedimentary architectures of mass transport deposits: Cases from Pearl River Mouth Basin and Niger Delta Basin[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(6): 2410-2416.]
- [9] Maslin M, Owen M, Day S, et al. Linking continental-slope failures and climate change: Testing the clathrate gun hypothesis[J]. Geology, 2004, 32(1): 53-56.
- [10] 甘华阳,王家生,胡高韦. 海洋沉积物中的天然气水合物与海底滑坡[J]. 防灾减灾工程学报, 2004, 24(2): 177-181. [Gan Huayang, Wang Jiasheng, Hu Gaowei. Submarine landslide related to natural gas hydrate within benthal deposit[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2004, 24(2): 177-181.]
- [11] Sun Q, Alves M T, Lu X, et al. True volumes of slope failure estimated from a Quaternary mass-transport deposit in the northern South China Sea[J]. Geophysical Research Letters, 2018, 45(6): 2642-2651.
- [12] Hampton M A, Lee H J, Locat J. Submarine landslides[J]. Reviews of Geophysics, 1996, 34(1): 33-59.
- [13] Callot P, Sempere T, Odonne F, et al. Giant submarine collapse of a carbonate platform at the Turonian-Coniacian transition: The Ayabacas Formation, southern Peru[J]. Basin Research, 2008, 20: 333-357.
- [14] Pirmez C, Marr J, Shipp C, et al. Observations and numerical modeling of debris flows in the Na Kika Basin, gulf of Mexico [C]//Proceedings of the offshore technology conference. Houston: OTC, 2004: 1988-2000.
- [15] Canals M, Lastras G, Urgeles R, et al. Slope failure dynamics and impacts from seafloor and shallow sub-seafloor geophysical data: Case studies from the COSTA project[J]. Marine Geology,

- 2004, 213(1/2/3/4): 9-72.
- [16] Gee M J R, Uy H S, Warren J, et al. The Brunei slide: A giant submarine landslide on the north west Borneo margin revealed by 3D seismic data[J]. *Marine Geology*, 2007, 246(1): 9-23.
- [17] 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. [Qin Yanqun, Wan Lunkun, Ji Zhifeng, et al. Progress of research on deep-water mass-transport deposits[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(1): 140-152.]
- [18] Ru K, Pigott J D. Episodic rifting and subsidence in the South China Sea[J]. *AAPG Bulletin*, 1986, 70(9): 1136-1155.
- [19] Franke D, Barckhausen U, Baristean N, et al. The continent-ocean transition at the southeastern margin of the South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(6): 1187-1204.
- [20] Zhao F, Alves T M, Wu S G, et al. Prolonged post-rift magmatism on highly extended crust of divergent continental margins (Baiyun Sag, South China Sea)[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 445: 79-91.
- [21] Gong C L, Wang Y M, Zhu W L, et al. Upper Miocene to Quaternary unidirectionally migrating deep-water channels in the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea[J]. *AAPG Bulletin*, 2013, 97(2): 285-308.
- [22] Zhuo H T, Wang Y M, Shi H S, et al. Contrasting fluvial styles across the mid-Pleistocene climate transition in the northern shelf of the South China Sea: Evidence from 3D seismic data[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2015, 129: 128-146.
- [23] Gong C L, Blum M D, Wang Y M, et al. Can climatic signals be discerned in a deep-water sink?: An answer from the Pearl River source-to-sink sediment-routing system[J]. *GSA Bulletin*, 2018, 130(3/4): 661-677.
- [24] Lin C S, He M, Steel R J, et al. Changes in inner- to outer-shelf delta architecture, Oligocene to Quaternary Pearl River shelf-margin prism, northern South China Sea[J]. *Marine Geology*, 2018, 404: 187-204.
- [25] Lin C S, Jiang J, Shi H S, et al. Sequence architecture and depositional evolution of the northern continental slope of the South China Sea: Responses to tectonic processes and changes in sea level[J]. *Basin Research*, 2018, 30(Suppl. 1): 568-595.
- [26] Liu H Y, Lin C S, Zhang Z T, et al. High-resolution sequence architecture and depositional evolution of the Quaternary in the northeastern shelf margin of the South China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, 38(5): 86-98.
- [27] Wang X X, Wang Y M, Tan M X, et al. Deep-water deposition in response to sea-level fluctuations in the past 30 kyr on the northern margin of the South China Sea[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2020, 163: 103317.
- [28] Liu H Y, Lin C S, Zhang Z T, et al. Shelf-margin architecture and deposition variability across the mid-Pleistocene climate transition, northeastern South China Sea[J]. *Marine Geology*, 2022, 443: 106690.
- [29] 李廷栋. 青藏高原隆升的过程和机制[J]. *地球学报*, 1995, 16(1): 1-9. [Li Tingdong. The uplifting process and mechanism of the Qinhai-Tibet Plateau[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 1995, 16(1): 1-9.]
- [30] Wang G C, Cao K, Zhang K X, et al. Spatio-temporal framework of tectonic uplift stages of the Tibetan Plateau in Cenozoic[J]. *Science China Earth Sciences*, 2011, 54(1): 29-44.
- [31] Métivier F, Gaudemer Y, Tapponnier P, et al. Mass accumulation rates in Asia during the Cenozoic[J]. *Geophysical Journal International*, 1999, 137(2): 280-318.
- [32] Zhang P Z, Molnar P, Downs W R. Increased sedimentation rates and grain sizes 2-4 Myr ago due to the influence of climate change on erosion rates[J]. *Nature*, 2001, 410(6831): 891-897.
- [33] Clift P D, Wan S M, Blusztajn J. Reconstructing chemical weathering, physical erosion and monsoon intensity since 25 Ma in the northern South China Sea: A review of competing proxies[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 130: 86-102.
- [34] Jiang J, Shi H S, Lin C S, et al. Sequence architecture and depositional evolution of the Late Miocene to Quaternary northeastern shelf margin of the South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 81: 79-97.
- [35] Gong C L, Steel R J, Wang Y M, et al. Shelf-edge delta overreach at the shelf break can guarantee the delivery of terrestrial sediments to deep water at all sea-level stands[J]. *AAPG Bulletin*, 2019, 103(1): 65-90.
- [36] 姚伯初, 杨木壮. 南海晚新生代构造运动与天然气水合物资源[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28(4): 93-100. [Yao Bochu, Yang Muzhuang. Tectonic movements in the Late Cenozoic and gas hydrate resources in the South China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2008, 28(4): 93-100.]
- [37] 赵淑娟, 吴时国, 施和生, 等. 南海北部东沙运动的构造特征及动力学机制探讨[J]. *地球物理学进展*, 2012, 27(3): 1008-1019. [Zhao Shujuan, Wu Shiguo, Shi Hesheng, et al. Structures and dynamic mechanism related to the Dongsha movement at the northern margin of South China Sea[J]. *Progress in Geophysics*, 2012, 27(3): 1008-1019.]
- [38] Xie Z Y, Sun L T, Pang X, et al. Origin of the Dongsha event in the South China Sea[J]. *Marine Geophysical Research*, 2017, 38(4): 357-371.
- [39] 何敏, 朱伟林, 吴哲, 等. 珠江口盆地新构造运动特征与油气成藏[J]. *中国海上油气*, 2019, 31(5): 9-20. [He Min, Zhu Weilin, Wu Zhe, et al. Neotectonic movement characteristics and hydrocarbon accumulation of the Pearl River Mouth Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2019, 31(5): 9-20.]
- [40] Lüdmann T, Wong H K, Wang P X. Plio-Quaternary sedimentation processes and neotectonics of the northern continental margin of the South China Sea[J]. *Marine Geology*, 2001, 172(3/4): 331-358.
- [41] Sømme T O, Helland-Hansen W, Granjeon D. Impact of eustatic amplitude variations on shelf morphology, sediment dispersal,

- and sequence stratigraphic interpretation: Icehouse versus greenhouse systems[J]. *Geology*, 2009, 37(7): 587-590.
- [42] Granjeon D, Joseph P. Concepts and applications of a 3-D multiple lithology, diffusive model in stratigraphic modeling[M]//Harbaugh J W, Watney W L, Rankey E C, et al. Numerical experiments in stratigraphy: Recent advances in stratigraphic and sedimentologic computer simulations. Tulsa: SEPM Special Publication, 1999: 197-210.
- [43] Granjeon D. 3D forward modelling of the impact of sediment transport and base level cycles on continental margins and incised valleys[M]//Martinius A W, Ravnås R, Howell J A, et al. From depositional systems to sedimentary successions on the Norwegian continental margin. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2014: 453-472.
- [44] Harris A D, Covault J A, Madof A S, et al. Three-dimensional numerical modeling of eustatic control on continental-margin sand distribution[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2016, 86(12): 1434-1443.
- [45] Harris A D, Baumgardner S E, Sun T, et al. A poor relationship between sea level and deep-water sand delivery[J]. *Sedimentary Geology*, 2018, 370: 42-51.
- [46] Harris A D, Covault J A, Baumgardner S, et al. Numerical modeling of icehouse and greenhouse sea-level changes on a continental margin: Sea-level modulation of deltaic avulsion processes[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 111: 807-814.
- [47] Hawie N, Covault J A, Dunlap D, et al. Slope-fan depositional architecture from high-resolution forward stratigraphic models [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, 91: 576-585.
- [48] Hawie N, Covault J A, Sylvester Z. Grain-size and discharge controls on submarine-fan depositional patterns from forward stratigraphic models[J]. *Frontier in Earth Science*, 2019, 7: 334.
- [49] 吴时国, 秦志亮, 王大伟, 等. 南海北部陆坡块体搬运沉积体系的地震响应与成因机制[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(12): 3184-3195. [Wu Shiguo, Qin Zhiliang, Wang Dawei, et al. Seismic characteristics and triggering mechanism analysis of mass transport deposits in the northern continental slope of the South China Sea[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(12): 3184-3195.]
- [50] Sun Q L, Xie X N, Piper D J W, et al. Three dimensional seismic anatomy of multi-stage mass transport deposits in the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea: Their ages and kinematics[J]. *Marine Geology*, 2017, 393: 93-108.
- [51] Wang X X, Wang Y M, He M, et al. Genesis and evolution of the mass transport deposits in the middle segment of the Pearl River canyon, South China Sea: Insights from 3D seismic data [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 88: 555-574.
- [52] Qi K, Gong C L, Fauquembergue K, et al. Did eustatic sea-level control deep-water systems at Milankovitch and timescales?: An answer from Quaternary Pearl River margin[J]. *Sedimentary Geology*, 2022, 439: 106217.
- [53] Neal J, Abreu V. Sequence stratigraphy hierarchy and the accommodation succession method[J]. *Geology*, 2009, 37(9): 779-782.
- [54] Lobo F J, Ridente D. Stratigraphic architecture and spatio-temporal variability of high-frequency (Milankovitch) depositional cycles on modern continental margins: An overview[J]. *Marine Geology*, 2014, 352: 215-247.
- [55] Milliman J D, Farnsworth K L. River discharge to the coastal ocean—A global synthesis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2011: 384-415.
- [56] Hance J J. Development of a database and assessment of sea-floor slope stability based on published literature[D]. Austin: University of Texas at Austin, 2003: 1-75.
- [57] Madof A S, Harris A D, Connell S D. Nearshore along-strike variability: Is the concept of the systems tract unhinged?[J]. *Geology*, 2016, 44(4): 315-318.
- [58] Burgess P M. Research Focus: The future of the sequence stratigraphy paradigm: Dealing with a variable third dimension[J]. *Geology*, 2016, 44(4): 335-336.
- [59] 冯志强, 冯文科, 薛万俊, 等. 南海北部地质灾害及海底工程地质条件评价[M]. 南京: 河海大学出版社, 1996: 178-200. [Feng Zhiqiang, Feng Wenke, Xue Wanjuan, et al. Evaluation of marine geologic hazards and engineering geological conditions in the northern South China Sea[M]. Nanjing: Hehai University Press, 1996: 178-200.]
- [60] 陈泓君, 蔡观强, 罗伟东, 等. 南海北部陆坡神狐海域峡谷地貌形态特征与成因[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(5): 19-26. [Chen Hongjun, Cai Guanqiang, Luo Weidong, et al. Features of canyon morphology and their origin in the Shenhu area, northern slope of the South China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2012, 32(5): 19-26.]
- [61] Tucker G E, Slingerland R L. Erosional dynamics, flexural isostasy, and long-lived escarpments: A numerical modeling study [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1994, 99(B6): 12229-12243.
- [62] Prince G D, Burgess P M. Numerical modeling of falling-stage topset aggradation: Implications for distinguishing between forced and unforced regressions in the geological record[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2013, 83(9): 767-781.
- [63] Csato I, Granjeon D, Catuneanu O, et al. A three-dimensional stratigraphic model for the Messinian crisis in the Pannonian Basin, eastern Hungary[J]. *Basin Research*, 2013, 25(2): 121-148.
- [64] Gong C L, Li D W, Steel R J, et al. Delta-to-fan source-to-sink coupling as a fundamental control on the delivery of coarse clastics to deepwater: Insights from stratigraphic forward modelling [J]. *Basin Research*, 2021, 33(6): 2960-2983.
- [65] Vail P R, Mitchum R M, Thompson III S. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 4: Global cycles of relative changes of sea level[M]//Payton C E. Seismic stratigraphy: Applications to hydrocarbon exploration. Oklahoma: American As-

- sociation of Petroleum Geologists, 1977: 83-97.
- [66] Mitchum R M. Seismic stratigraphic expression of submarine fans[M]//Berg O R, Woolverton G D. Seismic stratigraphy II: An integrated approach to hydrocarbon exploration. Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists, 1985: 117-138.
- [67] van Wagoner J C, Posamentier H W, Mitchum R M, et al. An overview of the fundamentals of sequence stratigraphy and key definitions[M]//Wilgus C K, Hastings B S, Posamentier H, et al. Sea-level changes: An integrated approach. Tulsa: SEPM Society for Sedimentary Geology, 1988: 39-45.
- [68] Petter A L, Steel R J. Hyperpycnal flow variability and slope organization on an Eocene shelf margin, Central Basin, Spitsbergen [J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(10): 1451-1472.
- [69] Jorjy S J, Droxler A W, Mallarino G, et al. Bundled turbidite deposition in the central Pandora Trough (gulf of Papua) since Last Glacial Maximum: Linking sediment nature and accumulation to sea level fluctuations at millennial timescale[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2008, 113(F1): F01S19.
- [70] Covault J A, Graham S A. Submarine fans at all sea-level stands: Tectono-morphologic and climatic controls on terrigenous sediment delivery to the deep sea[J]. Geology, 2010, 38 (10): 939-942.
- [71] Beaubouef R T, Friedmann S J. High resolution seismic/sequence stratigraphic framework for the evolution of Pleistocene intra slope basins, western gulf of Mexico: Depositional models and reservoir analogs[M]//Weimer P, Slatt R M, Coleman J, et al. Deep-water reservoirs of the world. Houston: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Foundation 20th Annual Bob F. Perkins Research Conference, 2000: 40-60.
- [72] Brami T R, Pirmez C, Archie C, et al. Late Pleistocene deep-water stratigraphy and depositional processes, offshore Trinidad and Tobago[M]// Weimer P, Slatt R M, Coleman J, et al. Deep-water reservoirs of the world. Houston: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Foundation 20th Annual Bob F. Perkins Research Conference, 2000: 104-115.
- [73] Pellegrini C, Asioli A, Bohacs K M, et al. The Late Pleistocene Po River lowstand wedge in the Adriatic Sea: Controls on architecture variability and sediment partitioning[J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 96: 16-50.
- [74] Burgess P M, Steel R J, Granjeon D. Stratigraphic forward modeling of basin-margin clinoform systems: Implications for controls on topset and shelf width and timing of formation of shelf-edge deltas[J]. SEPM Special Publication, 2008, 90: 35-45.

Development of Mass-transport Deposits in Deep-water Areas of the Continental Margin: Insights from numerical stratigraphic forward modelling of the Late Quaternary Pearl River margin

QI Kun^{1,2}, GONG ChengLin^{1,2}, JIN ZhenKui^{1,2}

1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

Abstract: [Objective] As an important part of the continental-margin strata, mass-transport deposits (MTDs) attract considerable attention from researchers worldwide. However, previous studies rarely related the development of MTDs to the building of depositional sequences. This study took SQ4 and SQ5 on the Late Quaternary Pearl River margin as the study objects to investigate the influence of different sequence-building backgrounds on the development of MTDs. [Methods] Through the integrated method of seismic interpretation and numerical stratigraphic forward modelling, MTDs are shown to primarily occur in the deep-water reaches of SQ4, whereas in the deep-water part of SQ5, they rarely occurred. Near the shelf-slope break, the existence of different systems tracts suggests that highstand system tracts in SQ4 are highly developed compared with their counterparts in SQ5. Based on the real condition of the Late Quaternary Pearl River margin, a total of 45 modelling experiments with varying relative sea-level changes were designed in Software DionisosFlow 2016 to investigate the development of mass-transport deposits for different backgrounds of depositional sequence building. [Results] The results prove that for high sediment supply (with sediment discharge being 5 000 km³/My and water discharge being 1 200 m³/s) and high amplitude of relative sea-level changes (up to 250 m), the development of MTDs is sensitive to the development of highstand systems tracts during sequence building; When highstand systems tracts are longer and experience sufficient development, MTDs are easily formed in deep-water areas, which is in consistent with the real condition of MTDs within SQ4 and SQ5. [Conclusions] Moreover, the models representing SQ4 and SQ5 (Model C8 and Model E5) further explain the occurrence mechanism of MTDs. During the building of SQ4, highstand system tracts are fully developed (with the duration of highstand systems tracts accounting for 65% of the elapsed model run), and the associated delta-shoreline systems overreach the shelf break, causing delta fronts to merge onto the continental slope and form clinothems with high reliefs and slopes; those clinothems are highly unstable and drive the occurrence of mass wasting processes, leading to the deposition of MTDs in deep water. During the building of SQ5, the development of highstand systems tracts is limited (with the duration of highstand systems tracts accounting for 40% of the elapsed model run), and the associated delta-shoreline systems prograde to the outer shelf but do not overreach the pre-existing shelf-slope break, forming clinothems with low reliefs and slopes, which disfavor the occurrence of mass wasting processes and the development of MTDs in deep water. Those controls of different sequence-building backgrounds on the formation of MTDs in deep water provide a useful method for predicting the submarine depositional elements, which are important for hydrocarbon exploration and development in the future.

Key words: mass-transport deposits; depositional sequence building; stratigraphic forward modelling; Pearl River margin; Late Quaternary