



# 海洋地质与第四纪地质

MARINE GEOLOGY & QUATERNARY GEOLOGY

## 水下低凸起背景潮汐沙脊三维地震表征及其沉积过程模拟——以西湖凹陷平湖组为例

柴亚伟, 李磊, 覃军, 刘建斌, 何苗, 张忠波, 杨潘, 赵兴

Three-dimensional seismic characterization of tidal sand ridges in submerged low-profile backgrounds and simulation of their depositional processes—An example from the Pinghu Formation of the Xihu Depression

CHAI Yawei, LI Lei, QIN Jun, LIU Jianbin, HE Miao, ZHANG Zhongpo, YANG Pan, and ZHAO Xing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2024102701>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 龙口湾水动力特征及其对人工岛群建设的响应

Hydrodynamic characteristics of Longkou Bay and its response to artificial island groups

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(1): 81–95

##### 南黄海辐射沙脊群西洋潮流通道的浅部沉积层序及其形成演化再认识

Rethinking on shallow sedimentary sequence and its evolution of the Xiyang tidal channel in the Radial Sand Ridge Field, South Yellow Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(4): 13–26

##### 三亚湾海岸地形时空变化与输沙过程研究

On temporal and spatial variations of coastal topography and sediment transport process in Sanya Bay

海洋地质与第四纪地质. 2025, 45(1): 53–67

##### 构造–沉积耦合过程的数值模拟：以南海北部阳江凹陷为例

Numerical modeling of the coupling between strike-slip faulting and sedimentation: A case from the Yangjiang Sag of northern South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 139–150

##### 基于随机介质理论模拟水合物和游离气储层

Simulation of hydrate and free gas reservoirs based on random medium theory

海洋地质与第四纪地质. 2025, 45(1): 199–209

##### 西湖凹陷平湖斜坡带A气田沉积体系定量表征及海平面变化周期性探讨

Quantitative characterization of the depositional system in Gas field A, Pinghu slope belt, Xihu Sag and its bearing on periodicity of sea level changes

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(3): 12–21



关注微信公众号，获得更多资讯信息

柴亚伟, 李磊, 覃军, 等. 水下低凸起背景潮汐沙脊三维地震表征及其沉积过程模拟——以西湖凹陷平湖组为例 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2025, 45(3): 109-119.

CHAI Yawei, LI Lei, QIN Jun, et al. Three-dimensional seismic characterization of tidal sand ridges in submerged low-profile backgrounds and simulation of their depositional processes—An example from the Pinghu Formation of the Xihu Depression[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2025, 45(3): 109-119.

# 水下低凸起背景潮汐沙脊三维地震表征及其沉积过程模拟——以西湖凹陷平湖组为例

柴亚伟<sup>1,2</sup>, 李磊<sup>1,2</sup>, 覃军<sup>3</sup>, 刘建斌<sup>3</sup>, 何苗<sup>3</sup>, 张忠坡<sup>4</sup>, 杨潘<sup>1,2</sup>, 赵兴<sup>1,2</sup>

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. 中海石油(中国)有限公司上海分公司, 上海 200335

4. 中石化地球物理公司研发中心, 南京 210000

**摘要:**西湖凹陷平湖组地层中广泛分布潮汐沙脊,前人对潮汐沙脊的形成过程和控制因素进行了单因素分析和推测,但未综合考虑多种因素共同对潮汐沙脊成因的影响。本文利用钻测井资料和地震资料对西湖凹陷平湖组的潮汐沙脊形态特征及空间展布进行研究,并通过沉积数值模拟的方法探究潮汐沙脊的形成过程和控制因素。研究取得以下认识:①研究区的潮汐沙脊发育在平湖组中段的水退时期,纵向上多个沙脊叠置,在平面上可以看到孤立分布呈条带状的潮汐沙脊,潮汐沙脊展布方向和潮流方向相近。②潮汐沙脊的形成主要以潮汐作用为主。河流作用将砂体搬运到入海口的河口湾沉积形成了三角洲,为研究区输入了物源。退潮时砂体被向海搬运,涨潮时缓坡上潮流被砂体较厚处阻挡发生偏转;潮流水动力在砂体间的薄弱处冲刷侵蚀,将砂体改造成孤立生长的细长条形潮汐沙脊。③潮汐沙脊的形成受到了潮流水动力和水下低凸起的影响。在潮流水动力较弱的时候,潮流将砂体平铺在水下低凸起上。随着潮流水动力增强,砂体被带向更深的地带,并被侵蚀改造成长条形潮汐沙脊。水下低凸起起到了阻挡的作用。当水下低凸起高度较低时,河流作用较强,潮汐作用对砂体改造不明显;当高度增高时,阻挡了河流作用继续向海的搬运过程,潮汐作用将砂体搬运到缓坡上,并沉积形成了潮汐沙脊。

**关键词:**潮汐沙脊; 数值模拟; 潮流水动力; 水下低凸起

中图分类号:P736

文献标识码:A

DOI: [10.16562/j.cnki.0256-1492.2024102701](https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2024102701)

## Three-dimensional seismic characterization of tidal sand ridges in submerged low-profile backgrounds and simulation of their depositional processes—An example from the Pinghu Formation of the Xihu Depression

CHAI Yawei<sup>1,2</sup>, LI Lei<sup>1,2</sup>, QIN Jun<sup>3</sup>, LIU Jianbin<sup>3</sup>, HE Miao<sup>3</sup>, ZHANG Zhongpo<sup>4</sup>, YANG Pan<sup>1,2</sup>, ZHAO Xing<sup>1,2</sup>

1. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China

2. Shaanxi Key Lab of Petroleum Accumulation Geology, Xi'an 710065, China

3. CNOOC China Limited, Shanghai Branch, Shanghai 200335, China

4. Sinopec geophysical corporation research and development center, Nanjing 210000, China

**Abstract:** Tidal sand ridges are widely distributed in the Pinghu Formation in the Xihu Sag. Previous studies were carried out on single-factor analyses and speculations regarding both the formation process and the controlling factors of tidal sand ridges; however, the combined influence of multiple factors on the genesis of tidal sand ridges was largely ignored. Using drilling and logging data and seismic data, we studied the morphological characteristics and spatial distribution of the tidal sand ridges in the Pinghu Formation of the Xihu Sag, and numerically simulated the formation process and controlling factors of the tidal sand ridges. Results show that: ① The tidal sand ridges are developed during the recession period above T33, and several sand ridges are superimposed in the longitudinal direction. The tidal sand ridges are isolated and distributed in strips, and their directions are similar to that of the tidal currents; ② The formation of tidal sand ridges is mainly affected by tidal

资助项目:中海油“十四五”重大科技课题子课题“西湖凹陷西部斜坡规模性岩性圈闭形成条件、发育规律及关键技术”(CCL2022SHPS010RS);

西安石油大学研究生创新与实践能力培养计划“西湖凹陷平湖组沉积微相的特征与沉积模式的建立”(YCS23213065)

作者简介:柴亚伟(2000—),男,硕士研究生,主要从事地震地质综合解释及海洋沉积研究, E-mail: [1073213387@qq.com](mailto:1073213387@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研究, E-mail: [lilei@xsysu.edu.cn](mailto:lilei@xsysu.edu.cn)

收稿日期:2024-10-27; 改回日期:2025-02-05. 张现荣编辑

action. The river action transports the sand bodies to the estuary bay and forms a delta, providing material sources for the study area. At ebb tide, the sand bodies are transported to the sea, and at flood tide, the tidal current on the gentle slope is blocked by thicker sand bodies and deflected; the tidal hydrodynamics scour and erode the weak points between the sand bodies, transforming the sand bodies into isolated, long, and thin tidal sand ridges; ③ The formation of tidal sand ridges is also affected by tidal hydrodynamics and underwater low rises. At weak tidal hydrodynamics, the tide spreads the sand bodies onto the underwater low rises. With the tidal hydrodynamics increase, the sand bodies are carried to deeper areas and eroded and transformed into long tidal sand ridges. The underwater low rise play a blocking role. When the height of the underwater low rise is low, river action is strong, and the tidal action does not transform the sand bodies much; when the height increases, the river action is blocked from continuing to transport the sand bodies to the sea, the tidal action transports the sand bodies to the gentle slope, and finally form tidal sand ridges.

**Key words:** tidal sand ridges; numerical simulation; tidal hydrodynamics; underwater low rise

潮汐沙脊是沿海地区常见的一种复杂沉积地貌,其形成、发展和演化受到多种因素的影响,包括潮流、复杂海底地形、沉积物供应以及海平面变化等<sup>[1-6]</sup>。国内外专家利用遥感和地面测量等技术对现代沉积的潮汐沙脊特征进行了广泛的研究,对潮汐沙脊的成因机制和演化过程还存在疑问,众多学者也都有不同的推测<sup>[5-10]</sup>。Park 等<sup>[8]</sup>在朝鲜海峡的两端发现了一系列与海岸平行的沙脊,推测海平面极缓慢上升和古河道的高输沙量可能是沙脊形成的原因;Lee 等<sup>[5]</sup>、Liu 等<sup>[7]</sup>、周涵等<sup>[10]</sup>学者在中国渤海、南海和东海等地都发现了受到强潮流持续改造的潮汐沙脊,沙脊呈辐射状或者平行状长条形分布;Park 等<sup>[8]</sup>、Reynaud 等<sup>[9]</sup>在朝鲜海峡、英吉利海峡等海峡两段发现与海岸平行的潮汐沙脊,均推测是海峡地形对潮流流速的改变形成了潮汐沙脊。学者对潮汐沙脊的形态和展布位置进行了描述,但对潮汐沙脊形成过程和控制因素研究时,研究方法与视角都相对单一,没有考虑多种因素共同作用对潮汐沙脊形态和砂体展布所产生的影响。

西湖凹陷平湖组受到潮汐作用明显,前人认为潮汐沙脊作为一种潮汐作用下的沉积体对西湖凹陷的油气勘探具有重要意义<sup>[11-13]</sup>。但是在含油气盆地中对潮汐沙脊三维表征的方法和刻画仍存在争议,Posamentier<sup>[14]</sup>在印尼爪哇盆地里利用连井剖面发现了线状呈反旋回的沙脊,认为是潮汐流侵蚀改造形成的;在中国珠江口盆地中,许多学者通过三维地震资料以及钻测井资料结合的方法分析了潮汐沙脊的演化特征及成因<sup>[15-18]</sup>;谢世文<sup>[19]</sup>在惠州凹陷中利用地震反演技术对潮汐沙脊的形态进行了刻画,佐证潮汐沙脊的存在。结合前人针对潮汐沙脊的研究,认为受到潮流的冲刷形成了单一的潮汐沙脊,总体受到地貌的影响会以近似潮流方向呈辐射状分布在海底地形变化处,由于潮流的反复冲洗,潮汐沙脊总体的分选较好,粒度均一,可以作为良好的储集体<sup>[11-20]</sup>。

本文综合利用研究区钻测井、地震、岩芯等资料,通过沉积构造特征、横向砂体变化等方式识别出西湖凹陷平湖组潮汐沙脊的分布规律,并在此基础上建立数值模型模拟潮汐沙脊的沉积模式,探讨潮汐沙脊的控制因素,这对西湖凹陷平湖组沉积相的识别以及油气勘探具有重要意义。

## 1 地质背景

西湖凹陷是东海陆架盆地中含油气最丰富的凹陷,东部是钓鱼岛隆褶带,西部由北向南依次分布了海礁隆起、渔山东低隆起。整个凹陷由西部斜坡带、中央反转构造带、东部断阶带 3 部分组成<sup>[21]</sup>(图 1a)。在经历了瓯江运动、玉泉运动、花港运动和龙井运动等 4 期重要的构造运动后,形成了早期断陷、中期拗陷和晚期区域沉降 3 大沉积阶段<sup>[22]</sup>。

本文研究的主要目的层是始新统平湖组。平湖组底界面为 T40, 为平湖组与宝石组分界面,顶界面为 T30, 为平湖组与花港组的分界面(图 1c)。从下而上可划分为平下段、平中下段、平中上段和平上段,其顶界面依次对应为 T34、T33、T32、T30<sup>[23]</sup>(图 1c)。平湖组在不同沉积时期的地貌单元是不同的,T40—T34 沉积时期,即平下段沉积时期,断裂活动较强,断槽带内沉积地层厚度大于断垒带上的地层,整体表现为洼隆相间的构造格局,断裂作用对沉积控制强烈。T34—T32 时期,即平中段沉积时期,断层活动逐渐减弱,其中 T33 是平湖组最大海泛面,随着海平面的上升,洼地开始被填平补齐,使得研究区内斜坡形态开始凸显。T32—T30 时期,即平上段沉积时期,陆上物源再次大规模输入,造成斜坡更为平缓。平湖组沉积结束后,玉泉运动使 X 凹陷整体抬升、遭受剥蚀,使该区缺失了部分下渐新统地层,平湖组与上覆花港组为不整合接触,形成广泛的 T30 区域不整合面<sup>[24]</sup>。研究区在 T34—T32 沉积时期形成了水下低凸起的格局,对潮汐水

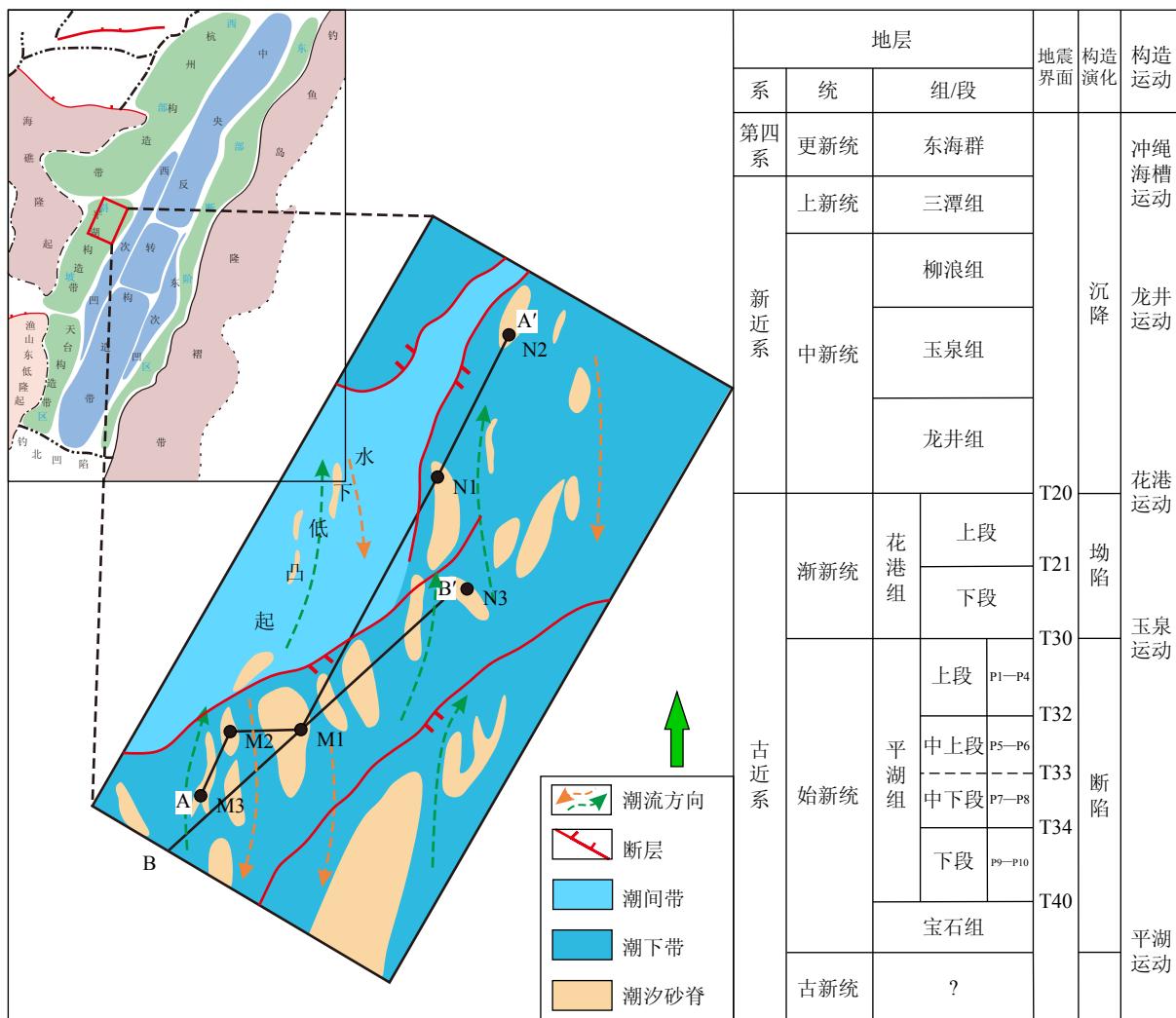


图 1 研究区区域地质背景及地层构造演化柱状图

Fig.1 Histogram of the regional geological background and tectono-stratigraphic evolution of the study area

动力形成了削弱或者阻挡作用,直接造成了碎屑沉积物的卸载,导致在水下低凸起向潮下带发育大量潮汐砂体分布,这种潮汐砂体是浅海泥岩背景下形成的有利储层砂体,具有平面分布广,横向变化快的特点。

## 2 潮汐沙脊的时空分布特征

### 2.1 潮汐沙脊的特征

研究区潮汐沙脊位于地貌发生变化的潮下带,往往在浪基面之上、平均低潮线之下,潮流速度较快,形成了与潮流方向近似平行的潮汐沙脊,平面形态有平形状或指状等。在研究区水下低凸起地貌环境下,潮汐沙脊在缓坡上广泛发育(图 1)。

潮汐沙脊测井曲线呈漏斗形或者叠置的漏斗形,齿状,与下伏岩层渐变接触,与上覆岩层突变接

触。岩芯以细砂岩为主,可见双黏土层、双向交错层理、波状层理等潮汐沉积构造。地震剖面上识别出潮汐沙脊呈强振幅或中强振幅透镜状地震反射特征(图 2)。

### 2.2 潮汐沙脊时空展布特征

研究区在平湖组之前属于裂陷时期,盆地内洼隆相间,与外部海洋沟通不畅,水动力较弱,不具备形成潮汐沙脊的条件;在平湖沉积时期处于拗陷阶段,研究区与外部海洋有了一定沟通,总体地貌形成了半封闭海湾的沉积环境,潮汐水动力增强,将来自河流沉积的砂体携带到缓坡并进行改造形成潮汐沙脊(图 3)<sup>[23,25-26]</sup>。因此本文在前人已经讨论过的沉积环境下分析潮汐沙脊的时空展布特征。

图 4 是潮汐沙脊的砂体连井对比图,在钻井中可见潮汐沙脊的测井曲线以漏斗形或者叠置的漏斗形为主,连井呈 SW-NE 走向。纵向上潮汐沙脊

测井相特征		岩相特征		地震相特征	
M1井 GR/API 20—180	井深/m	岩性	测井曲线呈漏斗形	细砂岩为主，发育双向交错层理和双黏土层	NW M1井 SE T32 T33 50 ms 强振幅，透镜状反射特征
N2井 GR/API 20—180	井深/m	岩性	测井曲线呈叠置的漏斗形	细砂岩为主，发育波状层理和双黏土层	W N2 E T32 T33 50 ms 中强振幅，透镜状反射特征

图2 潮汐沙脊测井相、岩相、地震相特征

Fig.2 Characterization of logging, petrographic, and seismic phases of tidal sand ridges

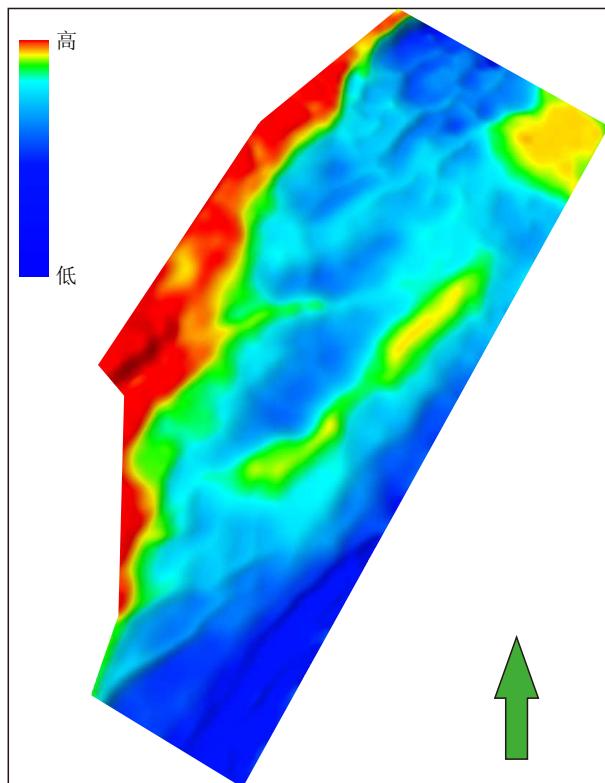


图3 研究区平湖组古地貌图

Fig.3 Paleogeomorphological map of the Pinghu Formation in the study area

砂体厚度变化较大, M1井是该区域平中段地层钻井资料最完善的井, 在T33之下海平面较高, 总体

以浅海陆棚泥为主, 在T33之上随着海水水退过程, 潮汐沙脊叠置发育, 砂体的厚度不均一; 横向上, 潮汐沙脊砂体厚度变化也很大, 结合  $V_p/V_s$  反演剖面, 砂体间的连续性差, 砂体展布独立性较强, 没有太大的对比性(图5b), 潮汐沙脊与浅海陆棚泥突变接触, 与潮汐沙脊孤立发育的特征相吻合。

在平行连井方向的地震剖面中可以看到潮汐沙脊是中低频强振幅透镜状反射(图5a);根据前人研究,  $V_p/V_s$  反演属性预测的砂体与井上砂体吻合度较好<sup>[27]</sup>, 在  $V_p/V_s$  反演剖面中更为直观的砂岩变化(图5b), 可观察到横向上连续性差, 潮汐沙脊间以泥质充填为主, 而垂向上岩性变化较大, 反映了潮汐沙脊与海底泥的突变接触。

潮汐沙脊在平面地震振幅属性图上可以表现出条带状的特征。在浅海陆棚上潮汐沙脊受到潮流的往返作用, 沙脊的粒度较为均一, 与上覆泥岩突变接触, 因此砂泥的波阻抗差异明显, 在地震剖面上表现出强震幅的反射特征, 因此在均方根振幅属性图中可以直观地看到潮汐沙脊呈条带状的平面展布。研究区的振幅属性图(图6)上可观察到多个近似平行的长条状振幅体, 平面上砂体展布受到起伏地形的变化较大, 在地形较深处, 潮流被水下低凸起阻挡发生了偏移, 砂体的走向与低凸起走向近似, 缓坡上砂体顺潮流展布, 略呈放射状, 被潮流来回冲刷在缓坡上孤立分布。

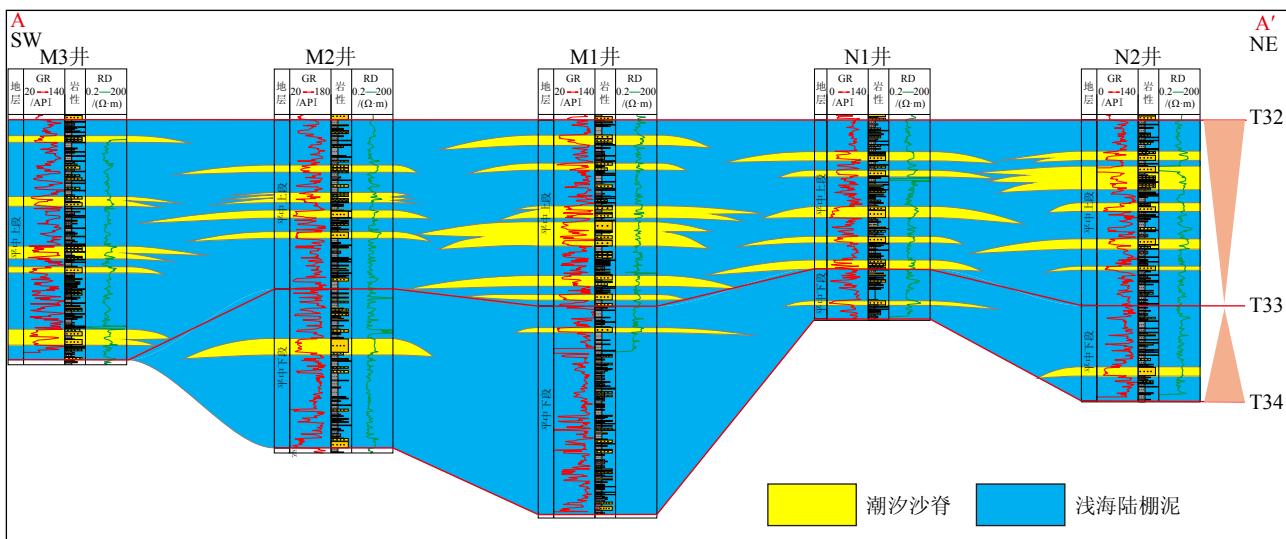


图 4 平中段砂体连井对比图

位置见图 1b。

Fig.4 The inter-well correlation of sand bodies in the middle part of the Pinghu Formation

See Fig. 1b for location.

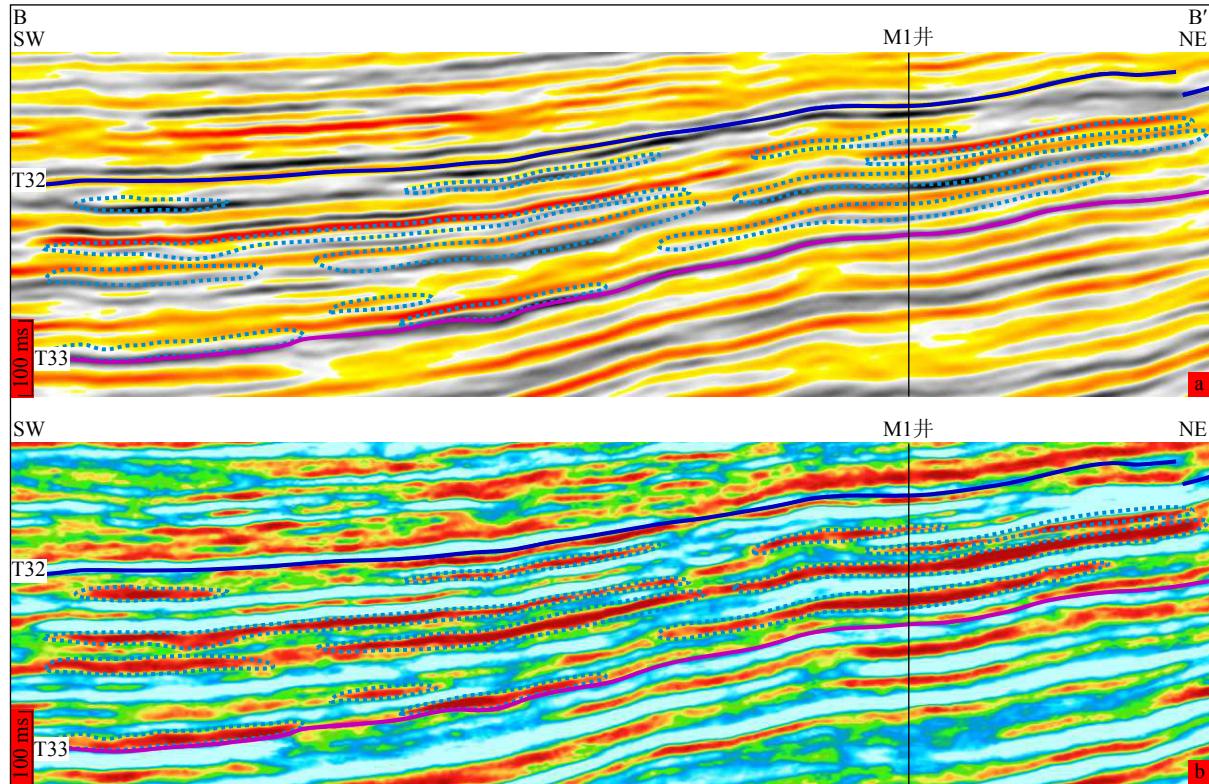


图 5 潮汐沙脊典型地震剖面

位置见图 1b。a: 原始地震剖面, b:  $V_p/V_s$  反演剖面。

Fig.5 Typical seismic profile of tidal sand ridge

See Fig. 1b for location. a: Original seismic profile, b:  $V_p/V_s$  inversion profile.

### 3 沉积数值模拟表征

为厘清研究区潮汐沙脊的形成机理, 在潮汐沙

脊的时空展布和控制因素讨论的基础上, 利用软件 Delft 3D 建立数值模型, 开展数值模拟研究, 并依据现有的三维地震资料、钻探井等资料, 对数值模型的参数进行设置, 通过地貌的控制以及潮流速度的

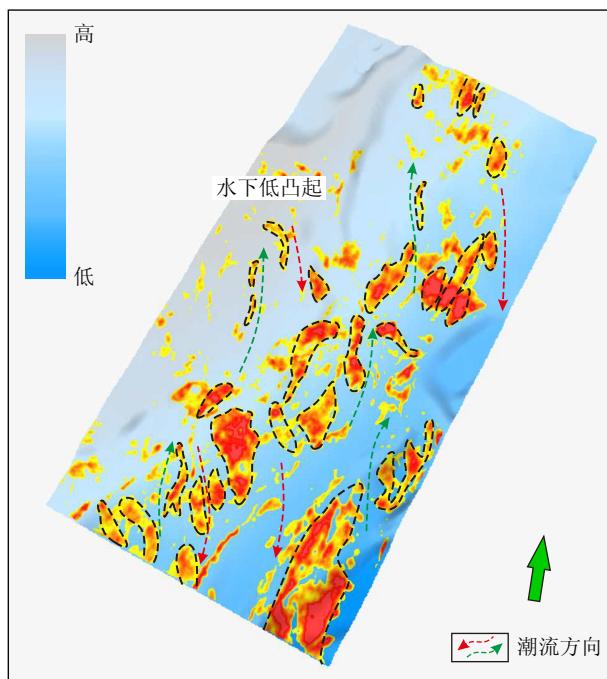


图 6 研究区振幅属性与地貌叠合图

Fig.6 Overlay of amplitude attributes and geomorphology of the study area

变化等因素,模拟潮汐沙脊的形成机理。

### 3.1 数值模型的建立

根据古地貌恢复图建立了初始地形(图 7),左侧河流入海口呈喇叭口,为研究区提供物源输入,右侧为海洋沉积区,网格大小为  $30 \text{ km} \times 30 \text{ km}$ ,内部有一个水下低凸起,低凸起向西与河流入海口相连的地带为平缓地带,低于低凸起,低凸起向东为宽

缓斜坡,与研究区地貌相吻合。根据钻井分析资料,设定了本区的模拟参数(表 1),设定了砂、泥两种沉积物,砂的粒度为  $0.2 \text{ mm}$ ,砂供应量  $0.01 \text{ kg/m}^3$ ,泥供应量  $0.03 \text{ kg/m}^3$ ,砂泥比为  $1:3$ 。根据现代东海沿岸潮汐规律模拟潮汐类型为半日潮( $M_2$ ),潮汐相位变化( $S_2$ ),潮流方向为从南东向北西。实际模拟进程缓慢,跨度较小,因此设置地貌演化系数为 100,以加快演化速度,提高效率,且该参数对模拟精度无影响<sup>[28]</sup>。利用地震、测井等数据推测了模拟的基础数值,能够使得数值模拟的结果与潮汐沙脊的沉积模式进行相互验证,并在这个基础上对数字模拟的参数进行单因素调整,通过设置不同大小的潮差和低凸起高度,以便讨论不同因素对潮汐沙脊的影响因素。

### 3.2 数值模拟结果分析

针对水下低凸起背景下的沉积数值模拟,可以反映在水下低凸起上河流作用和潮汐作用的共同作用,对河流沉积产物以及潮汐沉积产物的分布进行演化,探讨潮汐沙脊的空间展布特征。在模拟的早期(图 8a),河流作用为主,潮汐作用不明显,形成了较为明显的扇状三角洲沉积,在三角洲内有大量沙坝沉积;随着潮汐的增强(图 8b),三角洲的前缘砂体被向海搬运,在低凸起向海的缓坡上发育大片薄层沉积物砂席,同时,河流作用依然较强,三角洲继续向海发育,直到低凸起被阻挡;到模拟中期(图 8c),该时期潮汐和河流作用相互持平,三角洲仍保持较大的范围,三角洲前缘的砂体被潮流逐渐

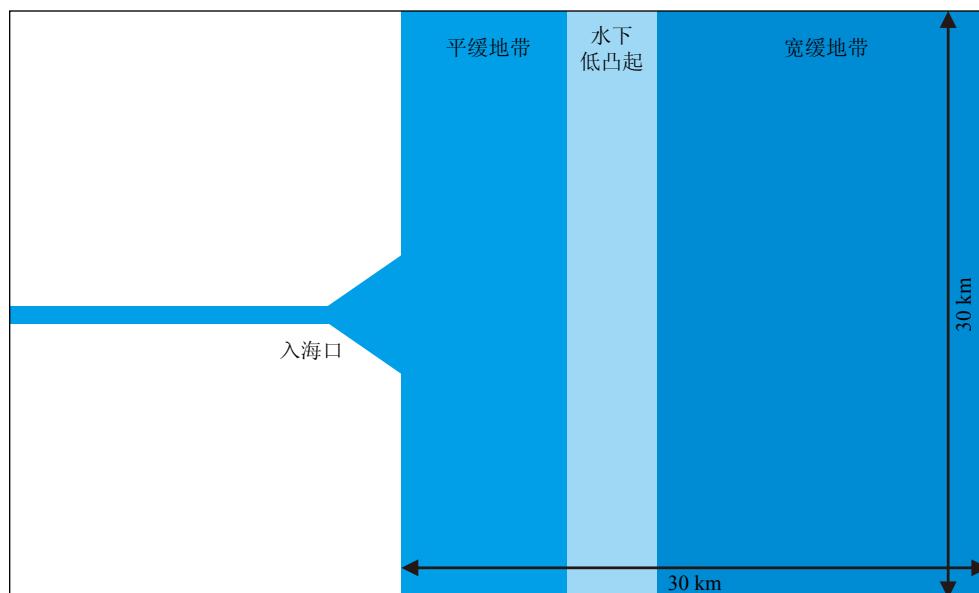


图 7 数值模拟地形图

Fig.7 Numerical simulation for the geomorphology

表 1 沉积过程数值模拟参数设置

Table 1 Parameter settings for numerical simulation of deposition process

模拟参数项	模拟参数
网格单元	502×302
网格单元大小	100 m×100 m
模拟时长	30 d
时间步长	1 min
地貌演化系数	100
床底坡度	0.03°
水深	20 m
沉积物组分	2 (砂质组分, 泥质组分)
沉积物浓度	砂质组分: 泥质组分=1:3
砂质沉积物中值粒径	0.2 mm
河流流量	500 m <sup>3</sup> /s
潮汐 ( $M_2$ ) /m	1.5      3      4.5
潮汐 ( $S_2$ ) /m	1      2      3
水下低凸起高度/m	6      10      14

冲刷, 三角洲沉积将海底渐渐填平, 三角洲在低凸起上发育, 缓坡上沉积的砂席在潮流的来回冲刷下形成了少量条带状的沙脊; 在模拟的后期(图 8d), 潮汐作用大于河流作用, 三角洲的范围被压缩, 三角洲被潮流冲刷, 三角洲内水道变宽, 缓坡上的沙脊被潮汐改造趋向于孤立分布, 沙脊的沉积厚度在向海一侧较大。

沉积模拟结果中的砂体很好地反映了研究区砂体展布的规律。数值模拟结果显示, 河流作用将砂体搬运到入海口形成河流三角洲, 潮流从南东向北西运动, 在退潮时将砂体向海搬运, 涨潮时, 潮流被砂体较厚处或者低凸起底部阻挡发生偏移, 潮流水动力在砂体间的薄弱处冲刷侵蚀, 形成了大量孤立分布的条带状砂体, 砂体的展布与潮流方向相似, 这与地震属性图所反映的研究区潮汐沙脊展布类似。

#### 4 潮汐沙脊的形成因素

潮汐沙脊的形成受到了海平面升降、河流物源

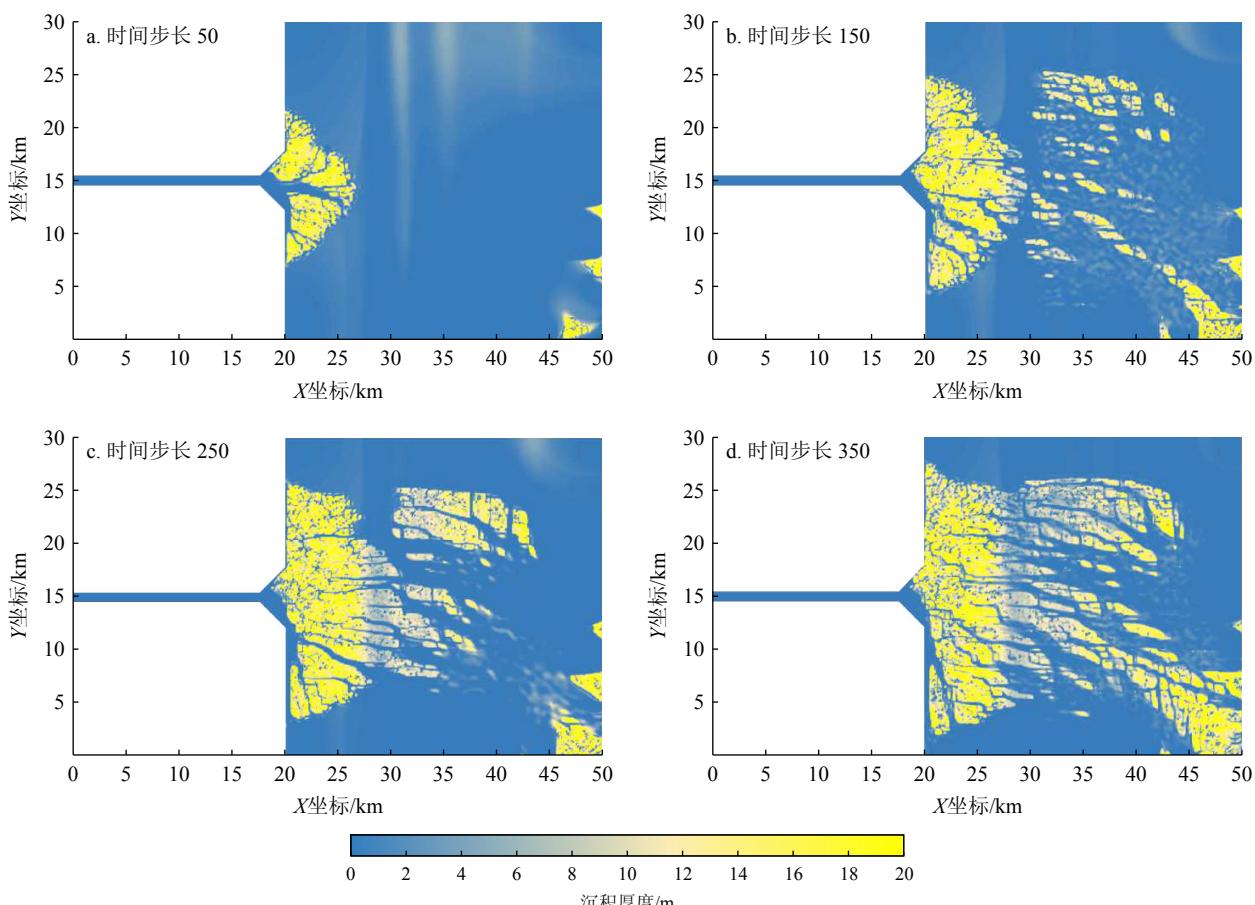


图 8 潮汐沙脊演化模式图

Fig.8 Simulation on the evolutionary pattern of tidal sand ridges

输入、海底地形和潮流水动力的影响<sup>[1-10,29-30]</sup>。通过沉积数值模拟的方式在模拟潮汐沙脊的形成过程中,发现潮汐水动力的改造和水下低凸起的阻挡作用是潮汐沙脊形成的主要因素,因此通过改变潮汐水动力和改变地貌的方式来分析潮汐沙坝形成因素,进而为研究区潮汐沙脊砂体的空间分布预测提供依据。

#### 4.1 潮汐水动力

潮汐水动力是潮汐在海洋中周期性水位变化所产生的水流动力,其周期性变化会影响沉积物的输运和沉积过程,潮汐涨落造成的潮差会改变水流速度,影响沉积物的沉积位置和形态,潮汐运动会携带大量的悬浮颗粒,这些颗粒在流动过程中会发生沉降和沉积,从而影响海底沉积的形成<sup>[3-4]</sup>。潮汐沙脊的形成和形态受到潮差大小的影响。

在水下低凸起高度不变的情况下,通过设置不同大小的潮差来影响潮流水动力的大小,对比潮汐沙脊的形成和分布特征。在低潮差( $M_2: 1.5 \text{ m}$ ,  $S_2: 1 \text{ m}$ )情况下河流作用较强,河流三角洲分布较大,在早期沉积后三角洲沉积跨过了水下低凸起,砂体在低凸起上沉积,潮汐水动力开始搬运砂体在缓坡上发育呈长条形砂体,在水深较深的地方潮汐搬运作用进一步减弱,砂体平铺发育(图9a);在中潮差( $M_2: 3 \text{ m}$ ,  $S_2: 2 \text{ m}$ )控制下的三角洲,三角洲输入的砂体跨过水下低凸起后,潮汐水动力对砂体进行改造,通过退潮将大量砂体向深水搬运,涨潮时较厚的砂体对潮汐作用起到阻挡作用,潮汐水动力会在较薄的砂体冲刷,将砂体冲刷改造呈孤立砂体,形成潮汐沙脊(图9b);在高潮差( $M_2: 4.5 \text{ m}$ ,  $S_2: 3 \text{ m}$ )

早期河流作用下,入海口发育了河流三角洲,此时潮汐水动力较强,可以跨过水下低凸起对三角洲进行改造,三角洲内分流水道的宽度因潮汐改造而变更宽,并将大量砂体带到低凸起缓坡上,砂体被潮汐来回冲刷,形成辐射状孤立长条形潮汐沙脊,沙脊间宽度较中潮差时期也更宽广(图9c),说明了河流作用主要是为研究区输入物源,潮汐作用对河流输入物源进行搬运改造。在低潮差潮汐水动力弱时,潮汐主要是搬运作用,对河流沉积的砂体改造能力较弱,使砂体平铺在缓坡上;在潮差较大时,潮汐水动力增强,河流输入的砂体,在退潮时被大量搬运到缓坡上,涨潮时砂体被来回冲刷改造形成了大量潮汐沙脊。

潮汐水动力的强弱可以通过典型的潮汐沉积构造来反映,例如潮汐韵律层是由砂层和泥层交替沉积而成,其厚度的变化直接体现了潮流强度;潮汐复合交错层理、双向交错层理和双黏土层等都能够反映潮流的水动力强度<sup>[31]</sup>。在平中上段的岩芯中双向交错层理较为发育,说明该时期潮流水动力较强。研究区潮流水动力增强,对同期河流三角洲输入的沉积物改造形成潮汐沙脊。潮流水动力是潮汐沙脊形成的关键因素,同时在数值模拟中可以说潮汐沙脊的长轴方向也可以指示潮流方向。

#### 4.2 海底地貌

复杂海底地貌包括海山、海沟、海岭等地质地貌特征,这导致局部水流的变化,进而形成不同形态的沉积体,同时会影响潮流的流向和速度,改变沉积物的输运路径<sup>[1-2]</sup>。水下低凸起会影响潮流的分布和速度,形成局部水体的聚集和流速加快的区

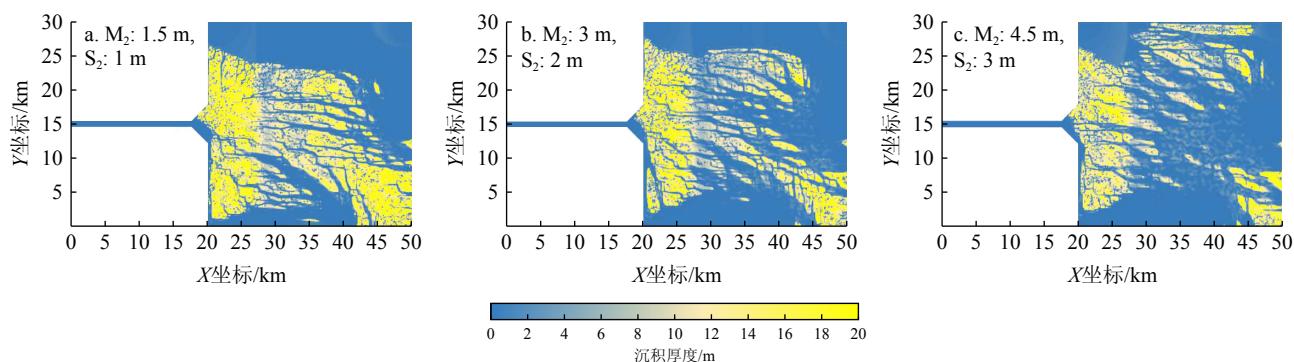


图9 潮差大小对潮汐沙脊的影响

step: 时间步长 350; 水下低凸起高度为 10 m, 水深 20 m。M2: 半日潮潮差; S2: 半日潮相位。

Fig.9 Effect of difference in tidal size on tidal sand ridges

The time step is 350; the height of the low underwater bulge is 10 meters, and the water depth is 20 meters. M2: semi-diurnal tide range;

S2: semi-diurnal tide phase.

域, 导致局部沉积体系的形成<sup>[32]</sup>。水下低凸起的高度对河流作用和潮汐作用都起到了阻挡作用。

在潮差大小一样的情况下, 水下低凸起高 6 m 时, 河流三角洲的沉积很快填平了低凸起左侧的凹槽, 跨过低凸起向海发育, 受到来自潮流的冲刷后, 河流携带的砂体开始沉积, 形成了大块的河流沙坝, 潮汐水动力被沙坝阻挡, 在沙坝内薄弱处进行冲刷改造, 将大的河流沙坝改造呈小块的沙坝分布(图 10a); 在水下低凸起高 10 m 时, 河流作用受到了阻挡, 砂体被河流搬运到低凸起的右侧后, 河流

搬运能力减弱, 在低凸起上潮汐水动力将沙体冲刷呈平铺分布, 同时大量砂体被潮汐的退潮作用带到了较深的地带, 涨潮时潮汐水动力在较厚的沙体受到阻挡作用, 对较薄的砂体进行侵蚀冲刷, 使砂体间形成了较细的水道(图 10b); 在水下低凸起高 14 m 时, 河流三角洲被完全阻挡在低凸起左侧, 大量的砂体被潮汐作用携带到低凸起的右侧, 潮汐沙脊在较深的地带开始顺着潮流方向呈长条状分布(图 10c)。水下低凸起对河流和潮汐作用都起到了阻挡作用, 当水下低凸起较低时, 河流作用较强, 潮汐作用就

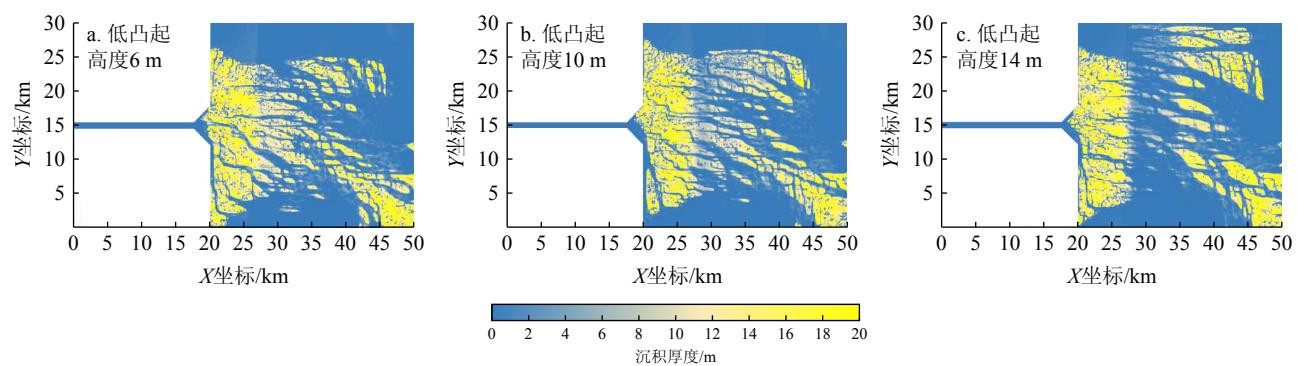


图 10 水下低凸起高度对潮汐沙脊的影响

时间步长: 350; M2: 半日潮潮差; S2: 半日潮相位; 水深: 20 m。

Fig.10 Effect of the height of low underwater rise on tidal sand ridges

Time step: 350; M2: semi-diurnal tide range; S2: semi-diurnal tide phase; water depth: 20 meters.

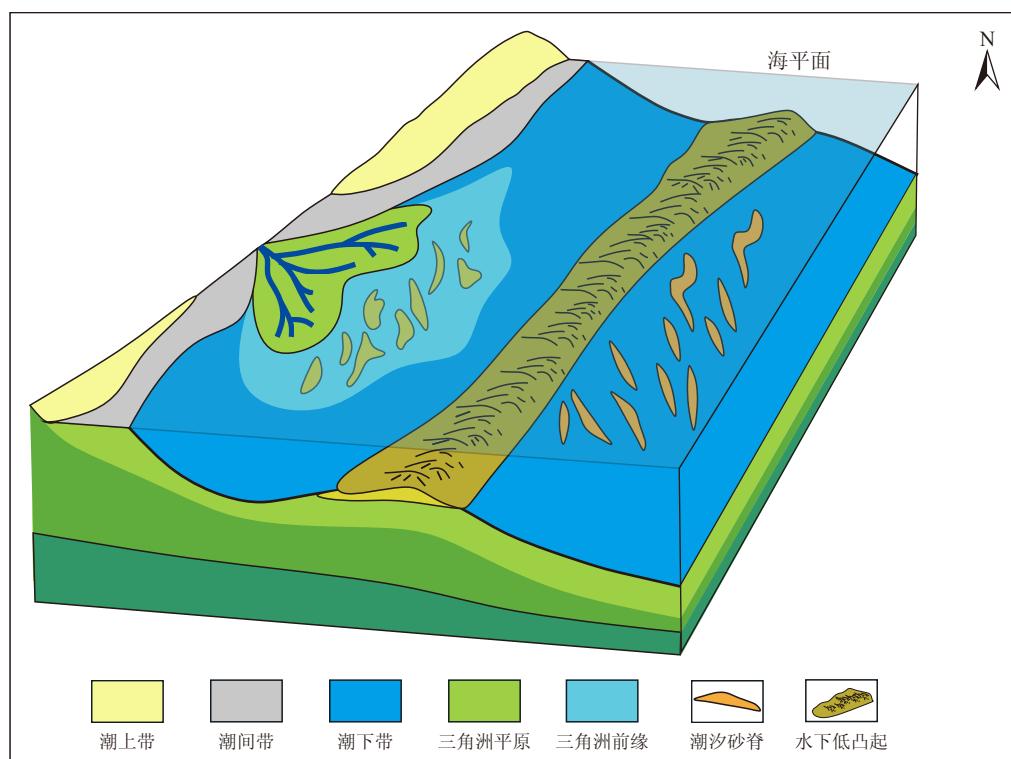


图 11 潮汐沙脊沉积模式图

Fig.11 The sedimentary model of tidal sand ridge formation

是以改造河流砂体为主;水下低凸起完全阻挡了河流作用后,潮汐作用将大量砂体携带到深水地带,砂体顺着潮流方向沉积。

### 4.3 潮汐沙脊沉积模式

在研究区中,通过对地震资料分析以及沉积数值模拟的研究,认为潮汐沙脊的形成与展布受到了水下低凸起和潮汐水动力的影响。水下低凸起阻挡了河流三角洲向海洋方向的继续推进,在地形变化较为显著的地方,潮汐水动力也随之改变,退潮时潮流越过低凸起,将大量河流沉积物携带到深水区域沉积,涨潮时,潮流被低凸起阻挡发生了偏移,潮流水动力对砂体间的薄弱处冲刷侵蚀,将砂体改造成孤立分布的条带状潮汐沙脊,沙脊展布与潮流方向近似(图11)。

## 5 结论

(1)研究区潮汐沙脊是发育在潮下带下、受潮流往返作用形成的平行于潮流方向的条带状沙脊。通过测井曲线和地震剖面分析认为,纵向上潮汐沙脊与陆棚泥突变接触,可能多个潮汐沙脊叠置发育,结合地震剖面和地震平面属性认为在平面上潮汐沙脊呈条带状孤立分布,总体具有辐射状特征。

(2)沉积数值模拟的方法表明,潮汐沙脊的形成主要受到潮汐作用影响,河流作用将沙体搬运到入海口的河口湾沉积形成了三角洲,为研究区输入了物源,潮汐作用在退潮时将砂体向海搬运,涨潮时在缓坡上潮汐水动力被较厚的砂体阻挡,潮流发生了偏转在砂体间的薄弱处冲刷侵蚀,将砂体改造成孤立生长的细长条形潮汐沙脊。

(3)潮汐沙脊的形成受到了潮差大小和水下低凸起高度的影响。潮差小的时候潮汐水动力较弱,对砂体主要是搬运作用,侵蚀作用较弱,砂体被平铺到低凸起上,无法将砂体改造成潮汐沙脊;潮差大的时候潮汐水动力增强,将砂体带到深水地带沉积,并将砂体的形态改造成细长条形,砂体展布方向与潮流方向近似。水下低凸起的高度影响了河流作用的输入,在高度较低的时候,河流沉积跨过了低凸起,在向海的缓坡上发育三角洲沉积,潮汐作用将前缘大块的河流沙坝改造成小块的沙坝;高度较高的时候,河流输入砂体很难通过河流作用跨过水下低凸起,潮汐作用将大量砂体带到低凸起向海的缓坡上,并在缓坡上发育了大量条带状潮汐沙脊。

### 参考文献 (References)

- [1] Du Y F, Zhang J C, Bian C W, et al. Multiscale spatio-temporal variations of suspended sediment fronts in the semi-enclosed Bohai Sea, China[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2023, 128(11): e2023JC019773.
- [2] Mashayek A. Large-scale impacts of small-scale ocean topography[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2023, 964(F1), doi: [10.1017/jfm.2023.305](https://doi.org/10.1017/jfm.2023.305).
- [3] Zhou Z Y, Ge J Z, Van Maren D S, et al. Study of sediment transport in a tidal channel-shoal system: Lateral effects and slack-water dynamics[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2021, 126(3): e2020JC016334.
- [4] Brand E, Montreuil A L, Houthuys R, et al. Relating hydrodynamic forcing and topographic response for tide-dominated sandy beaches[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020, 8(3): 151.
- [5] Lee H J, Jeon C K, Lim H S. Transgressive shelf sands around the Korean Peninsula: a brief review[J]. *Ocean Science Journal*, 2020, 55(4): 465-475.
- [6] Tessier B, Poirier C, Fruergaard M, et al. Role of tidal range and coastline morphology on the evolution of two macrotidal sand spits[J]. *The Depositional Record*, 2025, 11(1): 311-327.
- [7] Liu Z X, Xia D X, Berne S, et al. Tidal deposition systems of China's continental shelf, with special reference to the Eastern Bohai Sea[J]. *Marine Geology*, 1998, 145(3-4): 225-253.
- [8] Park S C, Han H S, Yoo D G. Transgressive sand ridges on the mid-shelf of the southern sea of Korea (Korea Strait): formation and development in high-energy environments[J]. *Marine Geology*, 2003, 193(1-2): 1-18.
- [9] Reynaud J Y, Tessier B, Auffret J P, et al. The offshore quaternary sediment bodies of the English Channel and its Western Approaches[J]. *Journal of Quaternary Science*, 2003, 18(3-4): 361-371.
- [10] 周涵, 黄继新, 冯文杰, 等. 潮控河口湾沙坝发育特征及形成因素分析: 以钱塘江为例 [J]. 地质论评, 2020, 66(1): 101-112. [ZHOU Han, HUANG Jixin, FENG Wenjie, et al. Analysis on formation factors and development characteristics of sand bar in tide-dominated estuaries: a case study based on Qiantang River[J]. Geological Review, 2020, 66(1): 101-112.]
- [11] 吴嘉鹏. 西湖凹陷平湖组潮汐沙脊的发现及意义 [J]. *沉积学报*, 2016, 34(5): 924-929. [WU Jiapeng. Discovery of Tidal Sand Ridges and its significance of Pinghu Formation in Xihu Depression[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2016, 34(5): 924-929.]
- [12] 赵谦. 东海陆架盆地西湖凹陷西部斜坡带平湖组潮河联控沉积体系研究 [D]. 中国地质大学博士学位论文, 2022, doi: [10.27492/d.cnki.gzdzu.2022.000177](https://doi.org/10.27492/d.cnki.gzdzu.2022.000177). [ZHAO Qian. Tidal and river joint-dominated sedimentary system analysis of the Pinghu Formation in the West Slope Belt of Xihu Depression, East China Sea Shelf Basin[D]. Doctor Dissertation of China University of Geosciences, 2022, doi: 10.27492/d.cnki.gzdzu.2022.000177.]
- [13] 徐东浩, 秦兰芝, 李帅, 等. 西湖凹陷平北斜坡平湖组潮坪环境砂体沉积模式及控制因素 [J]. 中国海上油气, 2024, 36(5): 57-67. [XU Donghao, QIN Lan芝, LI Shuai, et al. Sedimentary models and con-

- trolling factors of sand bodies in tidal flat environment of Pinghu Formation on Pingbei Slope of Xihu Sag[J]. China Offshore Oil and Gas, 2024, 36(5): 57-67.]
- [14] Posamentier H W. Ancient shelf ridges—a potentially significant component of the transgressive systems tract: case study from offshore northwest Java[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(1): 75-106.
- [15] 李俊良, 王海荣, 张建新, 等. 珠江口盆地西部珠江组潮流沙脊的分布、形态和水动力机制 [J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(5): 671-677. [LI Junliang, WANG Hairong, ZHANG Jianxin, et al. Distribution, geometry and hydrodynamic mechanism of tidal sand ridges in the Zhujiang Formation, the western Zhujiangkou Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(5): 671-677.]
- [16] 吴太霏, 王华, 刘恩涛, 等. 珠三坳陷珠江组一段沉积体系演化过程及其控制因素 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(2): 111-122. [WU Taifei, WANG Hua, LIU Entao, et al. Evolutionary and controlling factors of sedimentary system in the First Member of the Zhujiang Formation in the Zhu III Depression[J]. Geoscience and Technology Bulletin, 2024, 43(2): 111-122.]
- [17] 李伟, 左倩媚, 刘平, 等. 珠江口盆地文昌凹陷浅海陆架砂体沉积特征及油气勘探意义 [J]. 科学技术与工程, 2019, 19(33): 94-100. [LI Wei, ZUO Qianmei, LIU Ping, et al. Sedimentary characteristics of continental shelf sand bodies and their Significance for the Oil-gas Exploration in Wenchang Sag of Pearl River Mouth Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(33): 94-100.]
- [18] 宋广增, 李明, 张帅, 等. 珠三坳陷西北部浅海陆架砂体时空演化及成因机制 [J]. 海洋学报, 2023, 45(2): 62-73. [SONG Guangzeng, LI Ming, ZHANG Shuai, et al. Temporal and spatial evolution and genetic mechanism of shallow continental shelf sandbodies in the Northwestern Zhusan Depression[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2023, 45(2): 62-73.]
- [19] 谢世文, 李庆明, 柳保军, 等. 惠州 X 油区潮流沙脊特征及对开发的指导意义 [J]. 特种油气藏, 2015, 22(2): 70-73. [XIE Shiwen, LI Qingming, LIU Baojun, et al. Features of tidal sand ridges and their instructive significance to Development in X Oil Zone, Huizhou[J]. Specialty Oil and Gas Reservoirs, 2015, 22(2): 70-73.]
- [20] Xing F, Wang Y P, Ni W F, et al. Modeling multi-decadal morphological evolution of the radial-shaped sand ridges in the Southern Yellow Sea, China[J]. CATENA, 2024, 238: 107884.
- [21] 王超, 陈忠云, 秦兰芝, 等. 西湖凹陷天台斜坡带物源交汇区古近系碎屑锆石形态学与年代学示踪 [J]. 石油地质与工程, 2023, 37(6): 29-35,41. [WANG Chao, CHEN Zhongyun, QIN Lanzhi, et al. Morphological and chronological tracing of Paleogene detrital zircons in the provenance intersection area of Tiantai slope in Xihu Sag[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2023, 37(6): 29-35,41.]
- [22] 武法东, 陆永潮, 李思田, 等. 东海陆架盆地第三系层序地层格架与海平面变化 [J]. 地球科学—中国地质大学学报, 1998, 23(1): 13-20. [WU Fadong, LU Yongchao, LI Sitian, et al. Tertiary sequence stratigraphic framework and sea-level changes in the East China Sea Shelf Basin[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 1998, 23(1): 13-20.]
- [23] 蒋一鸣, 邵龙义, 李帅, 等. 西湖凹陷平湖构造带平湖组沉积体系及层序地层研究 [J]. 现代地质, 2020, 34(1): 141-153. [JIANG Yiming, SHAO Longyi, LI Shuai, et al. Deposition system and stratigraphy of Pinghu Formation in Pinghu Tectonic Belt, Xihu Sag[J]. Geoscience, 2020, 34(1): 141-153.]
- [24] 刘景彦, 林畅松, 肖建新, 等. 东海西湖凹陷第三系主要不整合面的特征、剥蚀量的分布及其意义 [J]. 现代地质, 1999, 13(4): 432-438. [LIU Jingyan, LIN Changsong, XIAO Jianxin, et al. Characteristics and erosions of the major tertiary unconformities and their significance to petroleum exploration in the Xihu Trough, The East China Sea[J]. Geoscience, 1999, 13(4): 432-438.]
- [25] 张建培, 徐发, 钟韬, 等. 东海陆架盆地西湖凹陷平湖组-花港组层序地层模式及沉积演化 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(1): 35-41. [ZHANG Jianpei, XU Fa, ZHONG Tao, et al. Sequence stratigraphic models and sedimentary evolution of Pinghu and Huangang Formations in Xihu Trough[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2012, 32(1): 35-41.]
- [26] 张兰, 何贤科, 段冬平, 等. 东海陆架盆地西湖凹陷平湖斜坡带平湖组煤系地层地震沉积学研究 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(4): 140-149. [ZHANG Lan, HE Xianke, DUAN Dongping, et al. Seismic sedimentological analysis of coal stratigraphy of Pinghu Formation in the Pinghu Slope Belt, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(4): 140-149.]
- [27] 江东辉, 杜学斌, 李昆, 等. 东海西湖凹陷保俶斜坡带平湖组“古地貌—古水系—古坡折”特征及其对沉积体系的控制 [J]. 石油实验地质, 2022, 44(5): 771-779,789. [JIANG Donghui, DU Xuebin, LI Kun, et al. Distribution of sedimentary system multi-controlled by palaeo-geomorphology, water system and break during the deposition of Pinghu Formation, Baochu slope belt, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(5): 771-779,789.]
- [28] Schuurman F, Marra W A, Kleinhans M G. Physics-based modeling of large braided sand-bed rivers: Bar pattern formation, dynamics, and sensitivity[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2013, 118(4): 2509-2527.
- [29] 刘雪萍, 卢双舫, 唐明华, 等. 河流-潮流耦合控制下河口湾坝体沉积动力学数值模拟 [J]. 地球科学, 2021, 46(8): 2944-2957. [LIU Xueping, LU Shuangfang, TANG Mingming, et al. Numerical simulation of sedimentary dynamics to estuarine bar under the coupled fluvial-tidal control[J]. Earth Science, 2021, 46(8): 2944-2957.]
- [30] Winterwerp J C. Fine sediment transport by tidal asymmetry in the high-concentrated Ems River: Indications for a regime shift in response to channel deepening[J]. Ocean Dynamics, 2011, 61(2-3): 203-215.
- [31] 彭阳, Steel R J, 龚承林, 等. 潮汐沉积过程及沉积特征研究综述 [J]. 古地理学报, 2023, 25(5): 1069-1089. [PENG Yang, Steel R J, GONG Chenglin, et al. A review on tidal depositional processes and characteristics[J]. Journal of Palaeogeography, 2023, 25(5): 1069-1089.]
- [32] Leuven J R F W, Braat L, Van Dijk W M, et al. Growing forced bars determine nonideal estuary planform[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2018, 123(11): 2971-2992.