



## 边缘海盆地断层差异演化成因的数值模拟：以西湖凹陷平北斜坡带为例

马皓然, 苏金宝, 王毛毛, 任培罡, 谈明轩

### Differential evolution of marginal basin fault: A case from numerical simulation of Pingbei Slope, Xihu Sag

MA Haoran, SU Jinbao, WANG Maomao, REN Peigang, and TAN Mingxuan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022102301>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 西湖凹陷保斜坡带平北地区平湖组“多元控砂”机制分析

“Multifactor control of sandboies distribution” in the Pinghu Formation, Pingbei region of Baochu slop, the Xihu Sag  
海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(6): 115–123

#### 西湖凹陷天台斜坡带北部构造变换带特征及油气地质意义

Characteristics of the structural transfer zone of northern Tiantai slope in Xihu Sag of the East China Sea Basin and their petroleum geological significances

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(6): 93–105

#### 南黄海盆地北部坳陷北凹断裂特征与构造演化

Characteristics and tectonic evolution of the fault system in the north sag of Northern Depression of South Yellow Sea basin

海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(3): 75–84

#### 西湖凹陷中北部反转构造动力学机制的数值模拟

NUMERICAL DYNAMIC MODELING OF TECTONIC INVERSION IN THE NORTHEASTERN XIHU SAG

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(4): 151–166

#### 板块俯冲变形过程二维离散元模拟——对东海陆架盆地成因启示

Two-dimensional discrete element simulation of plate subduction deformation process: An insight into the genesis of East China Sea Shelf Basin

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(5): 163–173

#### 中国近海断坳转换期煤系烃源岩特征——以西湖凹陷平湖组烃源岩为例

Coal-bearing source rocks formed in the transitional stage from faulting to depression nearshore China——A case from the Pinghu Formation in the Xihu Sag

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(6): 102–114



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

马皓然, 苏金宝, 王毛毛, 等. 边缘海盆地断层差异演化成因的数值模拟: 以西湖凹陷平北斜坡带为例 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(1): 81-95.

MA Haoran, SU Jinbao, WANG Maomao, et al. Differential evolution of marginal basin fault: A case from numerical simulation of Pingbei Slope, Xihu Sag [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(1): 81-95.

# 边缘海盆地断层差异演化成因的数值模拟: 以西湖凹陷平北斜坡带为例

马皓然<sup>1</sup>, 苏金宝<sup>1</sup>, 王毛毛<sup>1</sup>, 任培罡<sup>2</sup>, 谈明轩<sup>1</sup>

1. 河海大学海洋学院, 南京 210098

2. 中石化华东石油工程有限公司科技发展分公司, 南京 210098

**摘要:** 东海陆架盆地中生代以来的成盆过程中, 发育了大量陆倾控盆断裂, 其发育模式与形成演化与东亚其他边缘海盆地差异明显。前人关注东海陆架盆地迁移特征, 而忽略了断层差异演化的形成机制, 对断层发育过程控制因素缺少深入研究。西湖凹陷平北斜坡带北部为海倾断层组成的断阶区, 南部为陆倾断层组成的半地堑区, 断裂差异演化指示着东海陆架盆地的成盆过程。本文通过离散元数值模拟, 模拟陆倾和海倾断层的形成及演化, 以探讨断层几何发育特征的控制因素。结果表明, 岩性差异对斜坡带断层演化有较大影响, 较高抗剪强度岩层破裂易产生陆倾控盆断裂, 而低抗剪强度岩石则易形成向海倾断层。应力作用方向是区域差异演化的重要控制因素, 岩石强度相同, 应力作用方向相反时, 断层倾向相反。盆地形成过程中发育众多凹陷斜坡, 但坡度不是断层差异演化的主导因素。平北斜坡带和边缘海盆地的差异演化可能是由基底强度差异或应力方向差异导致的。本文利用离散元数值模拟平北斜坡带断裂差异演化过程, 为东海盆地构造演化机制及边缘海盆地的形成提供了思路和理论依据。

**关键词:** 断层差异演化; 离散元模拟; 边缘海盆地; 西湖凹陷; 平北斜坡带

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022102301

## Differential evolution of marginal basin fault: A case from numerical simulation of Pingbei Slope, Xihu Sag

MA Haoran<sup>1</sup>, SU Jinbao<sup>1</sup>, WANG Maomao<sup>1</sup>, REN Peigang<sup>2</sup>, TAN Mingxuan<sup>1</sup>

1. College of Oceanography, Hohai University, Nanjing 210098, China

2. SINOPEC Huadong Petroleum Engineering Limited Company, Nanjing 210098, China

**Abstract:** In the East China Sea shelf basin, massive landward-dipping boundary faults were developed since the basin was born in the Mesozoic. Its structural geometry and tectonic process differ from those of other East Asian marginal basins. Previous studies focused on mainly tectonic migration of the East China Sea shelf basin, but differential evolution mechanism and its controlling factors in fault geometry were generally neglected. The northern part of the Pingbei Slope is the fault terrace zone formed by seaward-dipping normal faults, while the southern part is half-grabens controlled by landward-dipping normal faults. Differential evolution of faults in this region reflects the overall formation of the entire basin. To clarify the controlling factors, we investigated the development of landward-dipping and seaward-dipping faults by discrete element modeling. Results show that lithological differences affected the fault development. The landward-dipping normal faults tended to develop in the context of high-strength rocks, while seaward-dipping normal faults usually formed in the region of low strength. The stress orientation was another important factor for regional differential evolution, giving rise to faults development in opposite dipping. Although many slopes were developed during the formation of marginal basins, the topographic slope alone were not able to dominate the fault differential evolution. The differential evolution of the Pingbei Slope and the marginal basins might be controlled by the bedrock strength and geostress orientation. This study provided an insight and theory basis for understanding the mechanism of differential evolution in marginal basins.

**Key words:** fault differential evolution; discrete element method; marginal basins; Xihu Sag; Pingbei Slope

资助项目: 国家自然科学基金面上项目“雪峰山构造带形成过程: 来自金佛山与梵净山剖面脆性变形年代学约束”(42272236); 国家重点研发计划(重大自然灾害防控与公共安全)“构建三维公共断层模型和四维构造动态演化模型”(2021YFC3000604)

作者简介: 马皓然(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事海洋地质研究, E-mail: 201311040018@hhu.edu.cn

通讯作者: 苏金宝(1980—), 男, 副教授, 主要从事地质构造、地热等研究, E-mail: sujinbao@hhu.edu.cn

收稿日期: 2022-10-23; 改回日期: 2023-02-16. 周立君编辑

边缘海盆地的成盆演化对认识盆山构造体系、油气成藏分布等具有重要意义,是能源需求与科学研究中的重要课题<sup>[1-2]</sup>。东亚陆缘受太平洋构造域影响,边缘海盆地展现出巨大差异:黄海盆地整体呈 NNE 近 E-W 走向,以发育坳陷构造为主要特征<sup>[3-4]</sup>;渤海湾盆地为“Z”型展布的北断南超半地坳盆地<sup>[5]</sup>;南海北部的北部湾、琼东南等盆地,平面呈 NEE 向或 NE 向展布,且均为半地坳或不地坳,控盆断层向海倾斜,珠江口盆地南部则发育大量陆倾断裂<sup>[6-7]</sup>。东海陆架盆地整体呈 NNE 向展布。成盆过程中,盆地中心向东迁移。盆地内发育大量半地坳和地坳,并以陆倾斜断层为主<sup>[8-9]</sup>。尽管前人提出大量模型解释各盆地的成盆过程<sup>[10-12]</sup>,但对盆地间差异演化机制仍缺乏清晰的认识。

盆地的形成受控于断层的发育,断层系统的差异演化强烈地影响了成盆演化、盆地沉积充填、盆地迁移等过程,还影响了海底滑坡、海啸地震等事件的发生频率<sup>[13-16]</sup>。大陆边缘发育的低角度正断层可能还是加剧地壳减薄和地幔物质折返的关键<sup>[17-18]</sup>。前人认为应力方向、基底拉伸方式、滑脱面倾角、基底表面地形、先存构造等因素均能影响断层系统的几何形态<sup>[19-24]</sup>。但物理模拟使用的砂或黏土等材料强度较低,无法精细地模拟出高强度岩石的变形。此外,在数值模拟中前人关注岩石强度差异对挤压环境中断层发育的影响<sup>[25-26]</sup>,但对伸展环境中断层发育影响因素仍缺乏深入研究。考虑到伸展背景下断层发育的差异性与复杂性,需要对伸展断层形成机制控制因素进行进一步探讨。这有助于更好地理解盆地成盆过程,为盆地差异演化机制提供启示和约束。

西湖凹陷平北斜坡带的断层几何形态变化较大,其北部是 NNE 向为主的海倾断层构成的断阶区,南部则是受控于 NE 向陆倾断层的半地坳区域。其断层几何形态的变化过程是东海陆架盆地成盆过程的缩影,构造演化指示着未来盆地的发育格局。前人关注斜坡带差异演化特征<sup>[27-28]</sup>,但对其成因仍缺乏足够认识。因此,深入研究平北斜坡带差异演化形成机制,对于研究东海陆架盆地等边缘海盆地断裂体系差异具有指示意义。

离散元方法 (DEM) 是一种基于颗粒性质的数值模拟方法,可以用来研究构造变形并定量观测和分析变形系统的应力和应变演化,揭示断层活动性与力学性质<sup>[25-26,29]</sup>。基于此,本文考虑断层发育的影响因素,通过离散元数值模拟和地震反射数据结合的方式,模拟基底岩性、应力方向、基底表面坡度、

应力作用位置变化等差异,分析平北斜坡带构造差异演化的形成机制,进而探讨东海陆架盆地等边缘海盆地成盆演化过程。

## 1 地质概况

### 1.1 区域地质

西湖凹陷位于东海陆架盆地东部坳陷带,是发育在火成岩基底上的新生代断陷盆地<sup>[30]</sup>。凹陷西部与虎皮礁隆起、海礁隆起、渔山东隆起、长江坳陷及钱塘凹陷相接,东部以钓鱼岛隆褶带为界,南部与钓北凹陷相邻,北部毗邻福江凹陷。凹陷内部东西分块,自西向东为西部缓坡带、中央反转带、东部断阶带,并局部发育东西两个次凹。平北斜坡带位于西部斜坡带中段、平湖斜坡带北段(图1)。

区域地球物理调查表明,西湖凹陷断陷作用始于新生代早期,并持续到始新世晚期,期间发育大量的正断层。受海洋作用影响,该时期环境由河沼相向海湾-潮坪相过渡,先后沉积了古新统(T40),下始新统宝石组(T34),主要成分为泥岩、细砂岩及

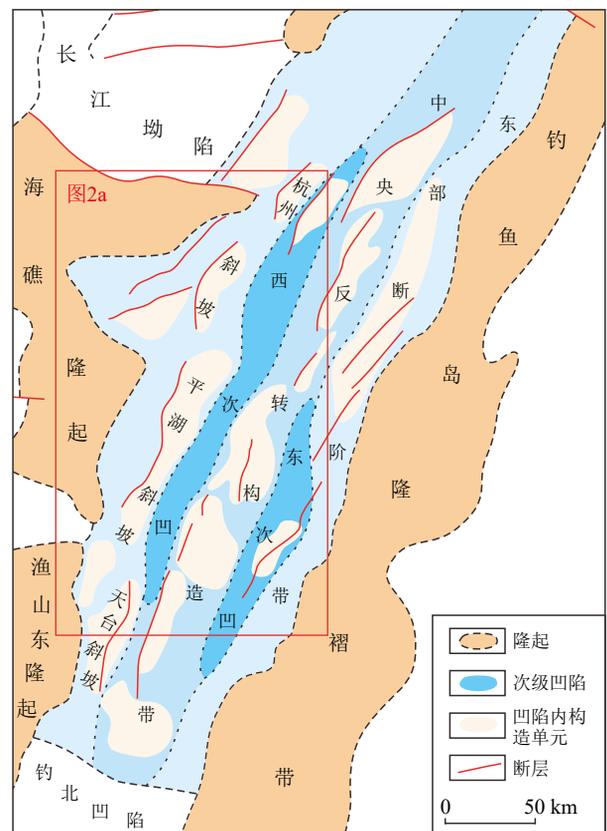


图1 西湖凹陷构造区划示意图<sup>[31]</sup>

Fig.1 Schematic tectonic map of the Xihu Sag<sup>[31]</sup>

泥砂互层, 以及上始新统平湖组(T30), 主要成分为灰质泥岩和粉砂岩。随后, 该区域自晚始新世进入断-拗转换期。拗陷早期的渐新统花港组(T24)以湖盆沉积为主, 砂岩和砾岩自南向北增加。中新世时期, 由于冲绳海槽的开放, 凹陷内发生构造反转, 先后沉积了以泥岩、砂岩及泥沙互层为主的下中新统龙井组(T23)、中中新统玉泉组(T22)及上中新统柳浪组(T20), 该时期仍为河湖相沉积环境。最后, 在区域沉降的作用下沉积了上新统三潭组(T10)及第四系东海群<sup>[8,31]</sup>(表 1)。

西湖凹陷裂谷前基底构成与其他构造单元相似。钻井数据表明, 东海陆架盆地基底以大量的变质岩、火成岩为主, 局部分布中—古生界地层。其中, 变质岩基底以变沉积岩为主, 火成岩基底以花岗岩为主<sup>[32]</sup>。西湖凹陷内部基底重磁数据显示南北两个高磁性异常体, 指示该区域为火成岩基底, 而低磁性异常指示为变沉积岩基底<sup>[32]</sup>(图 2a)。

## 1.2 平北斜坡带断裂构造

平北斜坡带断层平面展布具有明显的分块特征。该区域始新世进入强烈断陷期, 活动正断层数量多、断距大, 具有复杂的平面组合样式(图 2b)。区内断层走向和倾向差异较大, 北部发育一系列平行和亚平行的海倾断层, 断层总体呈 NNE-NE 向;

南部由陆倾断层组成, 大型陆倾断裂呈 NE 向。NNW 向和近 N-S 向小型断裂集中发育在该区域, 部分断裂表现出弧状特征。此外, 该区域西南发育了少量的海倾断层, 呈 NNE 向或近 N-S 向。

剖面上, 北部区域发育密集的海倾断裂, 断裂下断至基底并长期活动, 陆倾断层大都为拉张后期形成的调节断层。北部的断层组合较为简单, 整体呈断阶样式(图 3a)。在新生代断陷过程中, 区内构造演化明显受控于海倾断层(图 3b)。区域伸展始于古新世, 较大的海倾断层形成于该时期。始新世早期, 随着区域进一步伸展, 正断层间的转换带产生新断裂并形成旋转翘倾断块。始新世中后期, 区内产生少量陆倾调节断层, 这些断层大多在平湖组沉积期形成并活动。

南部区域发育以间隔陆倾断裂及相间古隆起为特征的半地堑和不对称地堑(图 4a)。陆倾断层大多呈铲状, 下降盘一侧始新统具有显著的背斜形态, 同时局部发育似花状构造。该区域构造演化过程受控于古新世形成并长期活动的陆倾断裂(图 4b)。始新世时断层活动性开始逐渐减弱, 多数断层在早渐新世停止活动。区域内海倾断层活动性较弱, 局限分布在西缘高带及东侧, 形成时间晚于陆倾断层, 对区域构造演化影响较小。

表 1 西湖凹陷构造演化简表

Table 1 Tectonic evolution of the Xihu Sag

地层系统				年代 /Ma	反射界面	构造运动	盆地演化	
系	统	组	段					
第四系	更新统	东海群		2.6	T10	冲绳运动	区域沉降	
新近系	上新统	三潭组		5.3	T20	龙井运动	拗陷	
		中新统	柳浪组			T22		
	玉泉组		上段			T23		
			下段					
	龙井组		上段					
		下段						
古近系	渐新统	花港组	上段	23.0	T24	花港运动	反转	
			下段					
	始新统	平湖组	上段	33.9	T30	玉泉运动	断-拗转换	
			中段					
			下段					
		宝石组		43.0	T34	平湖运动		断陷
					T40	瓯江运动		
		古新统	(未揭露)					
白垩系	上白垩统	基底		66.0	Tg	雁荡运动		
				100		基隆运动		

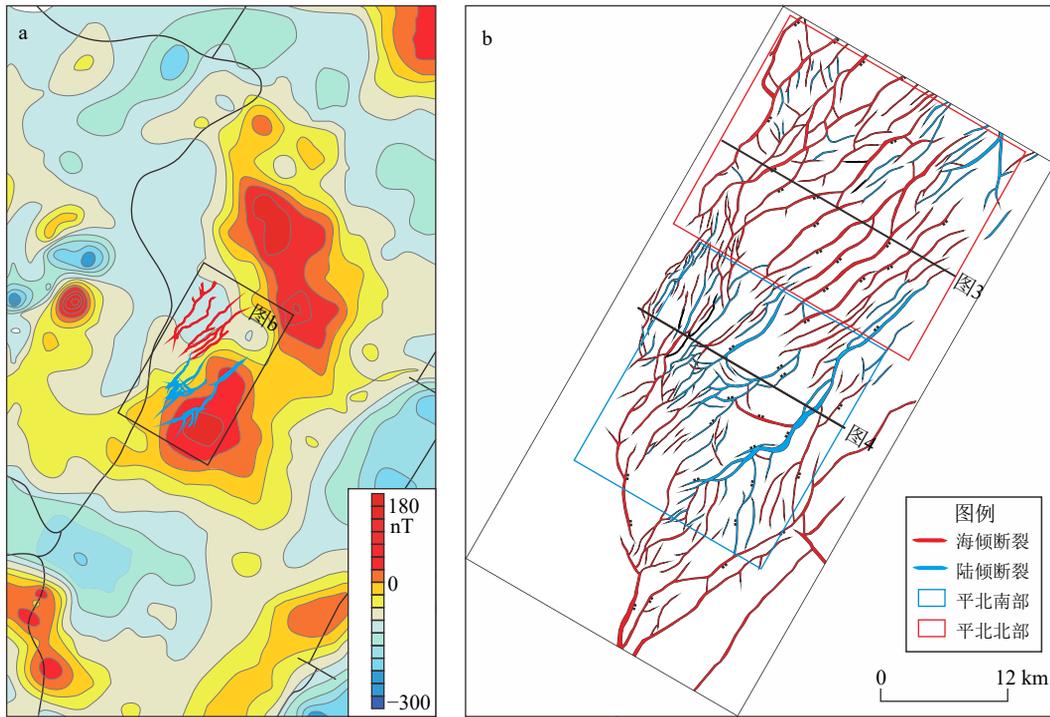


图2 研究区化极航磁异常及断层展布<sup>[27,32]</sup>

a: 西湖凹陷化极航磁异常, b: 平北斜坡带断层展布。

Fig.2 Aeromagnetic anomaly and fault distribution in the study area<sup>[27,32]</sup>

a: Aeromagnetic anomaly in the Xihu Sag, b: fault distribution in Pingbei Slope.

## 2 实验设置

### 2.1 方法原理

离散元方法 (Discrete Element method, DEM) 通过对构建的弹性颗粒系统施加外力后, 应用时间-位移的有限差分法, 计算弹性-摩擦接触颗粒在牛顿第二运动定律下的移动。颗粒间的接触关系遵循 Hertz-Mindlin 接触准则<sup>[33]</sup>。目前, 离散元已被广泛应用于岩土与区域地质构造变形等研究中<sup>[25-26,34]</sup>。与基于相似性原理的砂箱物理模拟不同, 离散元方法可做到对系统内单一变量的精确控制和应用, 通过调整材料的力学参数的方式模拟出与自然界相近的构造变形特征<sup>[29]</sup>。

### 2.2 模型设置

本文首先设置模型 1 为初始模型, 在此基础上修改边界条件, 设置对比模型 (模型 2—5), 评估不同因素对断层活动变化的影响, 分析断层差异演化机制。

#### 2.2.1 初始模型 (模型 1)

初始模型设置参考西湖凹陷平北斜坡带南部

地震反射剖面及其地层序列 (图 4), 模型设置见图 5。参考该剖面主要区域新生代伸展前 13 km 的基底地层长度及伸展过程中最大 5 km 生长断层埋深, 同时为减小边界效应的影响, 模型设置一套 15 km 长、5 km 厚的地层以模拟平北斜坡带裂谷前的新生代基底。根据地层超覆关系, 模型设置同沉积, 在模拟古新世至始新世沉积的同时保持 5 km 的地层厚度。基底顶面铺设一层极薄的红色颗粒将基底与新生代沉积分隔, 颗粒性质与基底相同。

由于西湖凹陷地处东海陆架地区, 基于地形恢复, 模型两侧设置 100 m 高差代表陆架斜坡 (图 5a), 并以此定义海陆方向及断裂倾向, 向右低海拔方向倾斜为海倾, 向左高海拔方向倾斜为陆倾。模型底部红色部分为纵向固定、横向可自由移动的叠合颗粒, 通过滑脱面颗粒的自由移动使上覆地层变形, 这一设置考虑了西湖凹陷基底韧性伸展的特点<sup>[35-36]</sup>。

对离散元法使用的摩擦材料而言, 模型运行时间与模型变形结果相互独立。因此, 在保证模型运行中数值稳定的前提下, 速度的设置完全取决于其便利程度。例如, Morgan<sup>[26]</sup> 设置 2 m/s 的挤压速度研究推覆褶皱中的变形, 而 Hardy<sup>[37]</sup> 将速度设置为 0.01 m/s 和 0.05 m/s 检验薄皮和厚皮拉伸。本实验中, 模型单次计算的时间步长为 50 ms, 右侧挡板以

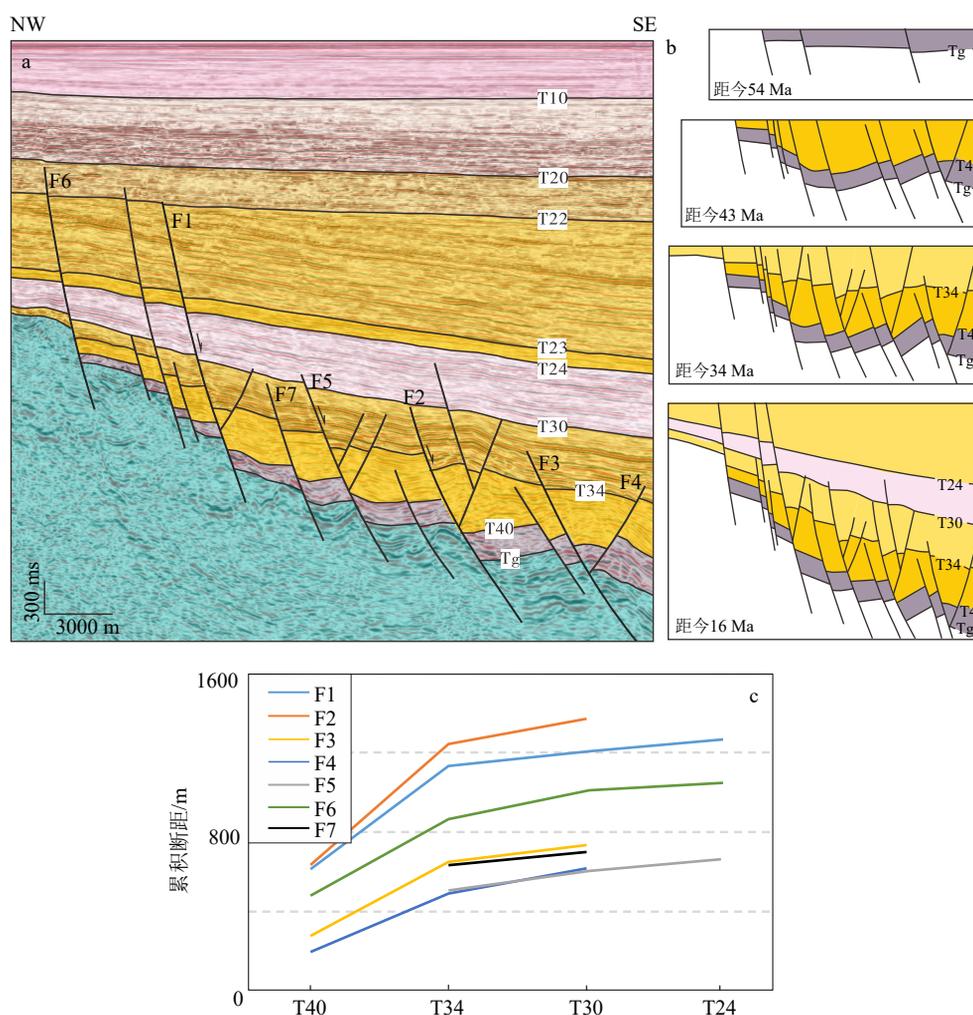


图 3 平北斜坡带北部区域典型构造剖面  
剖面位置见图 2b。a: 地震反射剖面, b: 构造演化图, c: 主要断层断距。

Fig.3 Typical structural profile of the northern area of the Pingbei Slope

See Fig. 2b for location. a: seismic profile; b: tectonic evolution; c: displacement of main fault.

0.2 m/s 的速度向右移动以模拟新生代的伸展。同时, 伸展阶段通过伸展量约束, 根据斜坡带实际的伸展量变化, 规定模型 0~1.5 km 对应古新世伸展, 1.5~2.5 km 对应宝石组沉积期伸展, 2.5~2.7 km 对应平湖组沉积期伸展。

模型中颗粒微观参数设置参考 Morgan<sup>[26]</sup> 的离散元实验设置, 重力加速度为 9.8 m/s<sup>2</sup>, 颗粒密度设置为 2500 kg/m<sup>3</sup>, 泊松比为 0.2, 局部阻尼系数为 0.4, 粘聚力设置为 24.4 MPa, 内摩擦角  $\varphi$  为 22.5°, 摩擦系数选取 0.3。据前人研究可知, 平北斜坡带南部基底岩性为花岗岩为主的火成岩, 而新生代沉积层岩性为泥岩、砂岩及泥砂互层, 参照 Morgan<sup>[26]</sup> 和 Vora<sup>[38]</sup> 的标定设置了粘结参数, 参数设置见表 2。

### 2.2.2 对比模型 (模型 2—5)

前人研究表明, 平北斜坡带南部和北部所受应

力方向、基底表面坡度、基底岩性等均可能存在差异<sup>[30-32, 39-40]</sup>。因此, 本文设置 4 组对比模型来研究斜坡带差异演化的主导因素, 模型见图 5。

(1)模型 2: 平北斜坡带南北基底性质存在根本差异, 与南部火成岩基底不同, 北部基底为低磁性的变沉积岩<sup>[32]</sup>。因此, 根据研究区基底性质差异修改了模型粘结参数, 设置为低强度基底岩石, 参数设置见表 2。

(2)模型 3: 伸展方向改变应力方向, 从而影响区域应力场。西湖凹陷新生代伸展过程中可能存在局部走滑作用<sup>[39]</sup>, 从而改变了斜坡带南北的应力方向。模型 3 左侧挡板以 0.2 m/s 的速度向左侧拉伸以模拟向陆方向伸展对断层发育的影响(图 5b)。

(3)模型 4: 平北斜坡带紧邻海礁隆起, 基底在伸展前可能具有一个较大的表面坡度<sup>[40]</sup>。模型 4 将

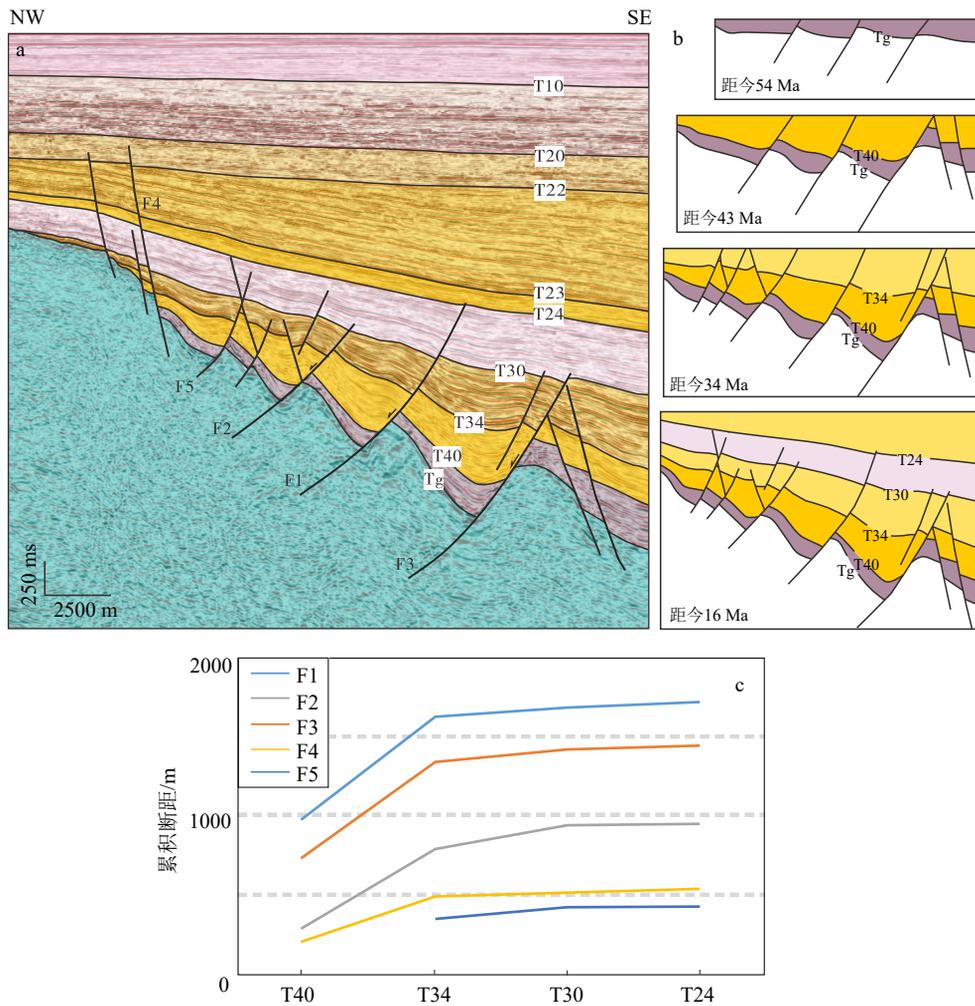


图4 平北斜坡带南部区域典型构造剖面  
剖面位置见图2b。a:地震反射剖面, b:构造演化图, c:主要断层断距。

Fig.4 Typical structural profile of the southern area of the Pingbei Slope

See Fig. 2b for location. a: seismic profile; b: tectonic evolution; c: displacement of main fault.

表2 模型粘结参数设置  
Table 2 The model parameters

	杨氏模量 $E_v$ /Pa	剪切模量 $G_v$ /Pa	抗拉强度 $T_v$ /Pa		剪切强度 $C_v$ /Pa	
			模型1, 3, 4, 5	模型2	模型1, 3, 4, 5	模型2
新生代基底	$2.0 \times 10^8$	$2.0 \times 10^8$	$2.5 \times 10^7$	$8.0 \times 10^6$	$5.0 \times 10^7$	$1.6 \times 10^7$
沉积层			$1.0 \times 10^7$		$2.0 \times 10^7$	

右侧高度分别设置为4000 m和2000 m,以模拟基底伸展前高差1000 m和3000 m的表面斜坡对断层的影响(图5c)。

(4)模型5:模型拉张过程中,应力作用位置始终位于变形区域右侧。模型5拉张前变形区域位于模型左侧,初始长4 km,此后每拉张1 km,变形区域总长度向右增加5 km,以此模拟应力作用位置向海方向迁移对断层发育的影响(图5d)。

### 3 实验结果

#### 3.1 初始模型(模型1):强基底向海伸展

初始模型颗粒变形、应变结果及主要断层的断距累积如图6所示。其中变形应变的定义参考Morgan<sup>[26]</sup>的定义,色标中的红色表示顺时针剪切,

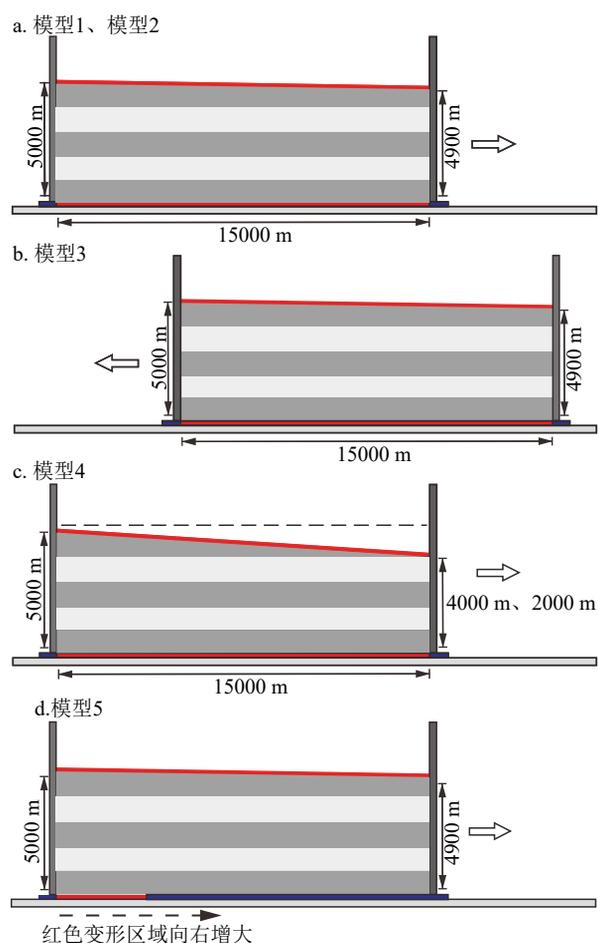


图 5 离散元数值模拟的模型边界条件

a: 向海方向拉伸, 模型 1 强基底, 模型 2 弱基底; b: 模型 3 强基底, 向陆方向拉伸; c: 模型 4, 强基底表面斜坡, 右侧地层厚 4 km、2 km; d: 模型 5 强基底, 应力作用位置向海方向迁移。韧性变形域: 红色, 刚性板: 蓝色。

Fig. 5 Marginal conditions setup of the discrete element numerical simulation

a: Extending toward the sea: Model 1: strong basement rock; Model 2: weak basement rock; b: Model 3: strong basement rock extending toward the continent; c: Model 4: strong basement rock with topographic slope, 4 km and 2 km thickness of the stratum in the right; d: Model 5: strong basement rock with stress location migrating toward the sea. Deformed region: red; rigid region: blue.

蓝色表示逆时针剪切, 颜色越深表示剪切越强。

(1) 伸展 0~1.5 km: 伸展开始后, 地层发生变形。伸展约 1 km 时, 陆倾断层 F1、F2 及 F2 的调节断层(图 6a)开始发育。伸展约 1.1 km 时模型两侧形成陆倾断层 F3 及海倾断层 F4。该时期断层活动性较强, 断层 F1 和 F3 分别积累了约 1000 m 的断距, 占各断层总断距的 60%。断层 F2 积累断距 600 m, 占其总断距的 40%(图 6g)。

(2) 伸展 1.5~2.5 km: 该时期断层活动性逐渐

减弱, 断层 F1、F2、F3 分别积累了 620、595、520 m 断距, 断层活动速率与前 1.5 km 相比, 分别下降了约 60%、60%、70%。同时, 伸展 2 km 时(图 6c), 陆倾断层 F2 顶部开始发育新调节断层, 但该断层活动时间较短, 伸展约 2.5 km 时活动停止。

(3) 伸展 2.5~3 km: 所有断裂活动性急剧降低, 陆倾断层 F1、F2、F3 几乎不再活动, 该阶段断距不超过 100 m。

### 3.2 模型 2: 弱基底向海伸展

弱基岩强度模型的颗粒变形、应变结果及主要断层的断距累积如图 7 所示。

(1) 伸展 0~1.5 km: 模型伸展约 1 km 时, 海倾断层 F1、F2、F3(图 7a)开始发育。伸展约 1.1 km 时生成断层 F3 的陆倾调节断层 F4。该时期海倾断层先后产生, 快速积累了一段断距后活动性略微衰减。断层 F1、F2、F3 分别积累了 560、560、430 m 的断距, 超过各断层总断距的 40%(图 7g)。

(2) 伸展 1.5~3 km: 早期形成的断层活动性减弱。伸展 2.5 km 后, 断层 F2 和 F3 几乎不再活动, 而断层 F1 的滑移速率衰减为前 1.5 km 的 40%。但在该时期产生了新的海倾断层 F5。此外, 部分断层顶部产生小型陆倾断层调节地层变形(如断层 F1), 但活动性微弱, 且活动时间较短。

### 3.3 模型 3: 强基底向陆伸展

向陆伸展模型的颗粒变形、应变结果及主要断层的断距累积如图 8 所示。

(1) 伸展 0~1.5 km: 模型伸展约 1~1.1 km 时先后产生海倾断层 F1、F2 和 F3。该时期断层 F1、F2、F3 分别积累了约 600、520、400 m 的断距(图 8g)。同时断层 F1、F2 顶部发育了调节断层, 但活动性微弱。

(2) 伸展 1.5~3.0 km: 断层 F2、F3 活动性几乎没有变化, 在该时期累积了 700 m 断距, 但断层 F1 活动性急剧降低(图 8g), 伸展 2.5 km 后不再活动。

### 3.4 模型 4: 强基底表面坡度变化

基底表面坡度变化模型的颗粒变形与应变结果如图 9 所示。

(1) 缓坡: 模型伸展过程中先后产生了 3 条陆倾断层 F1、F2、F3, 断层间隔较大(图 9b)。

(2) 陡坡: 断裂区域局限在模型左侧, 陆倾断层 F1、F2、F3 依次产生, 断层间隔较小, 断距较大(图 9d)。

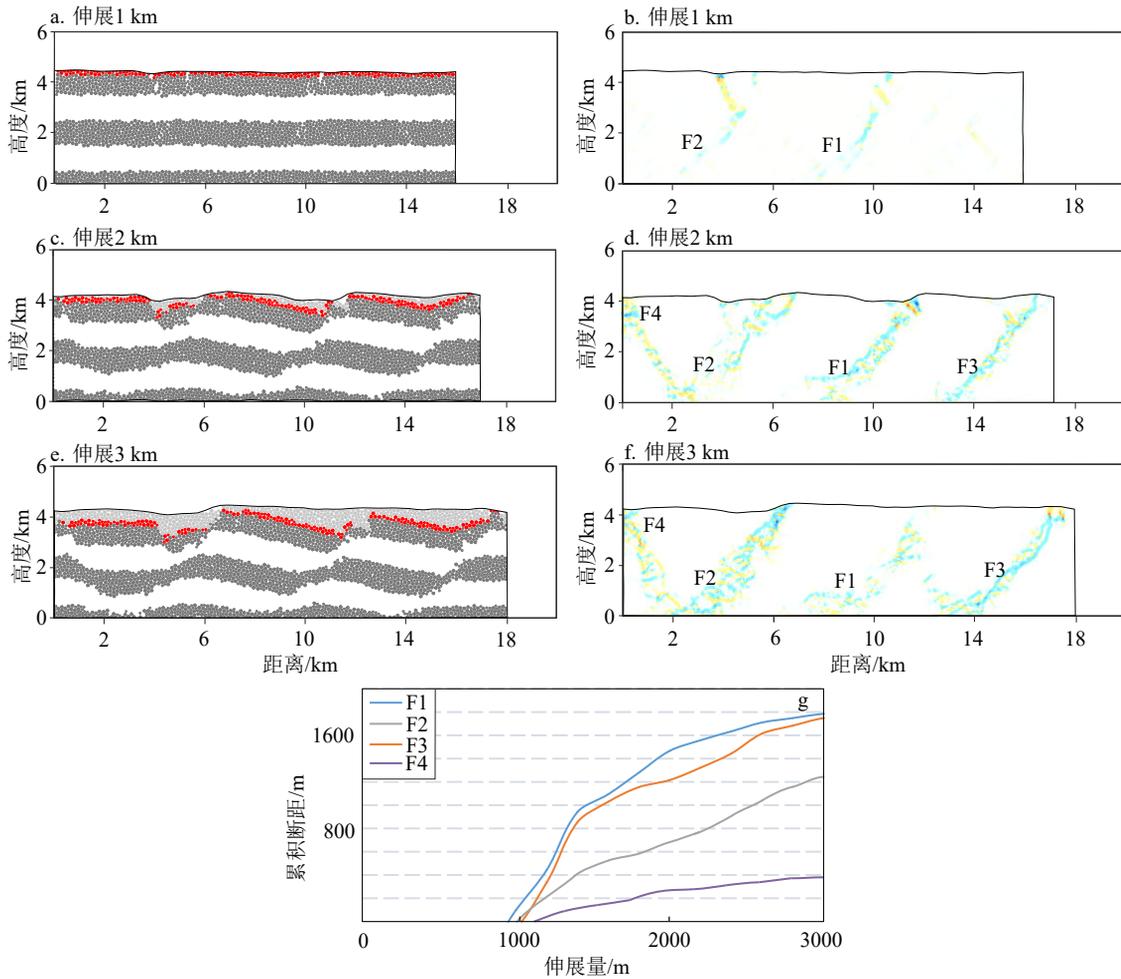


图6 模型1构造变形、体积应变及断层断距统计

a, c, e: 构造变形; b, d, f: 体积应变; g: 断距统计。

Fig.6 Structural deformation and volume strain in Model 1

a, c, e: Structural deformation; b, d, f: volume strain; g: fault displacement.

### 3.5 模型5: 强基底应力作用位置迁移

应力作用位置向海方向迁移模型的颗粒变形、应变结果及主要断层的断距累积如图10所示。

(1) 伸展0~1 km: 伸展早期, 变形区域集中在模型左侧, 依次产生陆倾断层 F1、F2, 断层快速活动后活动性减弱, 该过程中断层 F1、F2 分别累积了 1200、700 m 的断距。

(2) 伸展1~2 km: 随着变形区域变大, 右侧产生了新陆倾断层 F3。同时, 断层 F1 和 F2 活动性发生了不同程度的降低, 其中左侧断层 F1 滑移速率下降较为明显, 仅累积 600 m 断距。

(3) 伸展2~3 km: 随着变形区域的进一步扩大, 断层 F3 活动性几乎不变, 断层 F2 活动性降低, 该时期累积 500 m 断距, 断层 F1 几乎不再活动(图10g)。

## 4 讨论

### 4.1 断层差异演化形成机制

大量地质调查、物理模拟和数值模拟揭示了基底剪切对断层几何形态的控制<sup>[20,41-42]</sup>。当基底发生伸展时, 应变从应力作用位置前端传递到整个模型底部, 并从滑脱面传递到上覆基岩中。该过程使滑脱面对上覆基岩产生摩擦并施加反方向剪切。在剪切力偶的作用下, 基岩中产生倾向与伸展方向相反的断层。因此, 对称伸展将产生地堑和共轭断层(图11a)。单向伸展时, 倾向与伸展反方向的多米诺式断层容纳了地层变形(图11b)。模型1和模型3结果显示出相似的现象, 由于伸展方向改变基底剪切的方向, 强度相同的基岩单向伸展时产生的断

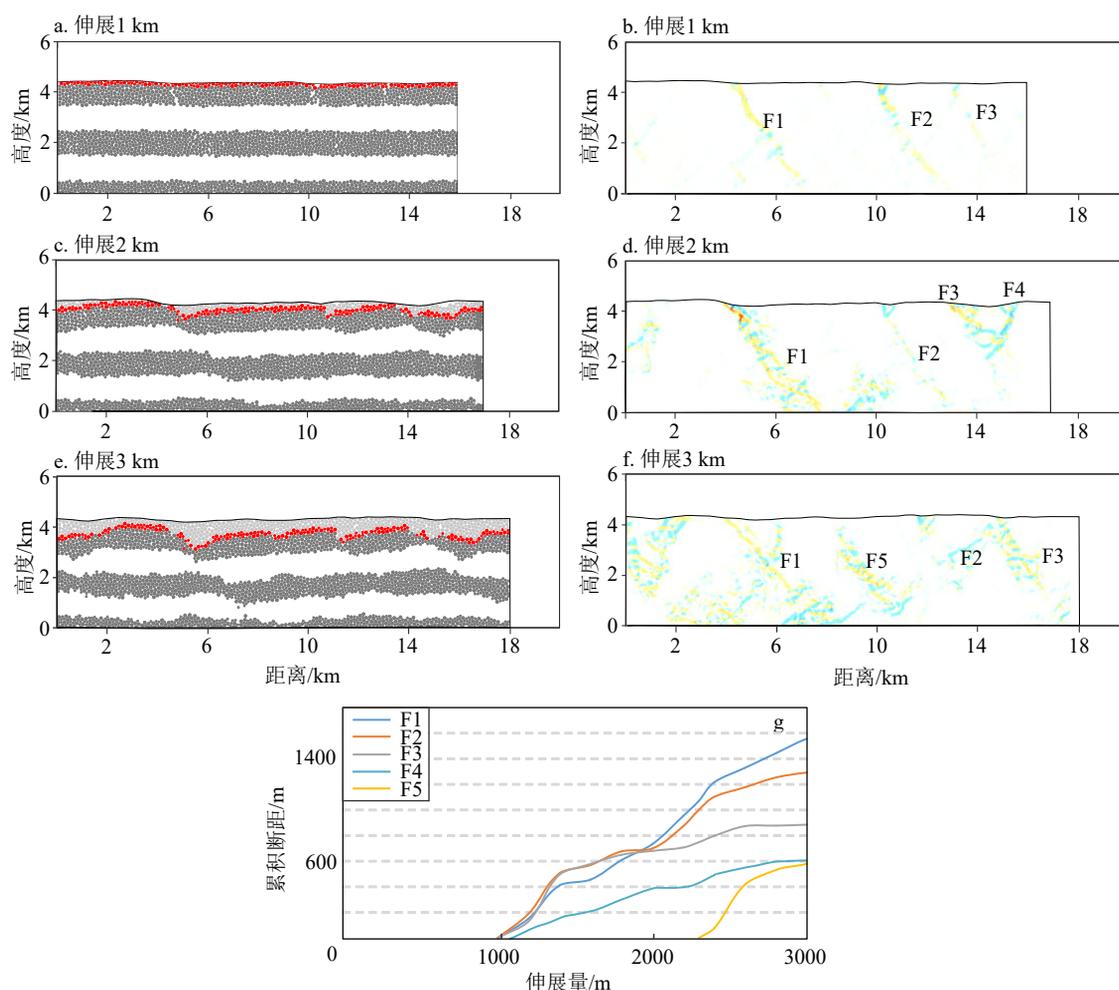


图 7 模型 2 构造变形、体积应变及断层断距统计  
a, c, e: 构造变形; b, d, f: 体积应变; g: 断距统计。

Fig.7 Structural deformation and volume strain in Model 2

a, c, e: Structural deformation; b, d, f: volume strain; g: fault displacement.

层倾向总与伸展方向相反。

脆性上地壳中,不同覆盖单元(如花岗岩、页岩和砂岩)间的强度差异导致了正断层几何特征的变化。通过定义离散元颗粒的粘聚力模拟自然界中岩石宏观上的变形发现,高强度岩层破裂时产生离散的断层,表现出典型的脆性变形;低强度模型变形范围广,应变分散<sup>[25-26]</sup>。此外,Abe等<sup>[43]</sup>的实验中主断层在高粘聚力和低粘聚力时具有相反的倾向。模型 2 得到了类似的结果,低强度岩石向海伸展时,模型应变分散,深部受基底剪切影响产生陆倾断层,浅部则为海倾断裂(图 7f)。其成因与深部韧性变形区域对浅部的剪切有关。岩石强度较低时,底部受基底剪切形成了一个陆倾断层为主的剪切带,该区域影响了浅部岩石的剪切方向,在重力的共同作用下,浅部产生海倾断层(图 11c)。

研究表明,当滑脱面倾角较大时,倾向与滑脱

面坡向相同断层的形成与基底的剪切作用紧密相关<sup>[41,44]</sup>,或受重力作用控制<sup>[45]</sup>。另一方面,基底表面斜坡对断层演化也起类似的作用<sup>[20]</sup>。表面斜坡引起的剪应力变化超过了来自滑脱面剪切的影响。在重力的共同作用下,浅部产生倾向与坡向相同的断层。模型 4 设置了一个较大的表面坡度,但断层倾向仍与坡向相反,同时,右侧较薄基底亦未产生断层。该现象可能与基底强度有关,基底强度较高时,表面斜坡的作用不明显,变形仍受滑脱面剪切影响。早期形成的反坡向断层几何形态可能对后期产生的断层起限制作用。此外,岩石厚度影响了断层的产生和滑动<sup>[46]</sup>,右侧较薄的基底不利于新断层的形成。

在区域伸展过程中,基底先存断层、滑脱层等几何形态影响了新生断层的走向和倾向<sup>[23,47]</sup>。模型 5 中,应力作用位置向海方向发生了迁移,从而使基

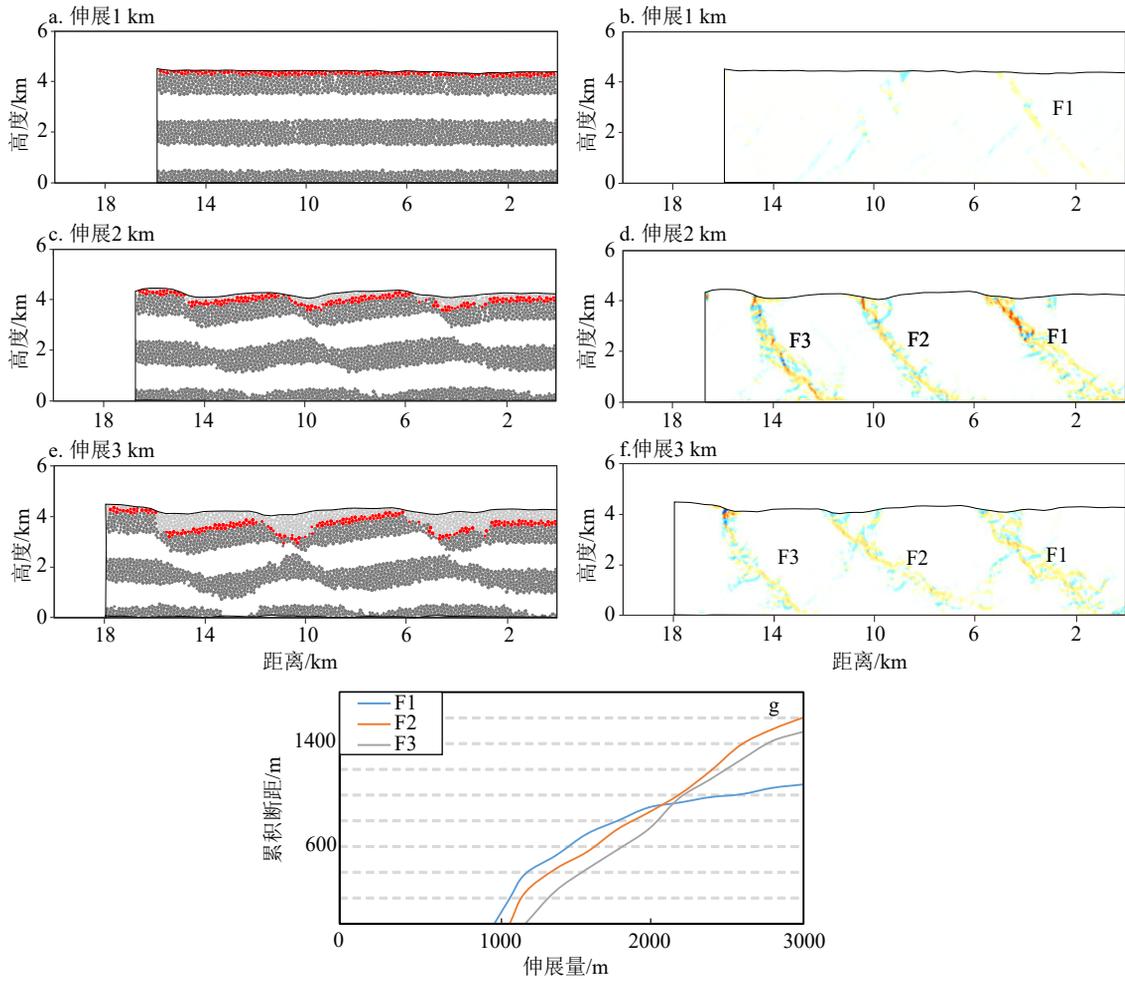


图 8 模型 3 构造变形、体积应变及断层断距统计

a, c, e: 构造变形; b, d, f: 体积应变; g: 断距统计。

Fig.8 Structural deformation and volume strain in Model 3

a, c, e: Structural deformation; b, d, f: volume strain; g: fault displacement.

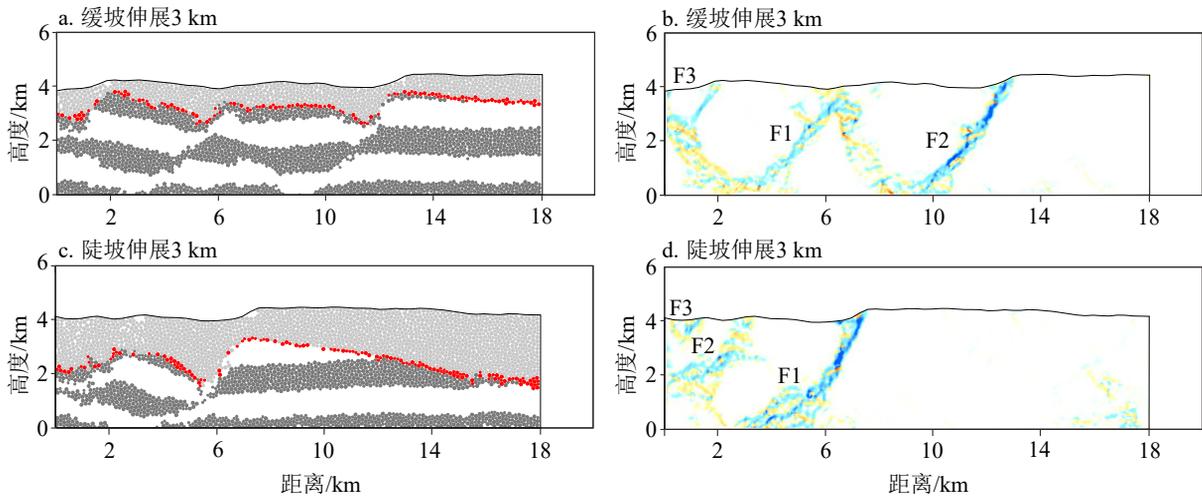


图 9 模型 4 构造变形与体积应变

左: 构造变形, 右: 体积应变。a-b: 高差 1 km, c-d: 高差 3 km。

Fig.9 Structural deformation (left) and volume strain (right) in Model 4

Height difference: 1 km (a, b) or 3 km (c, d).

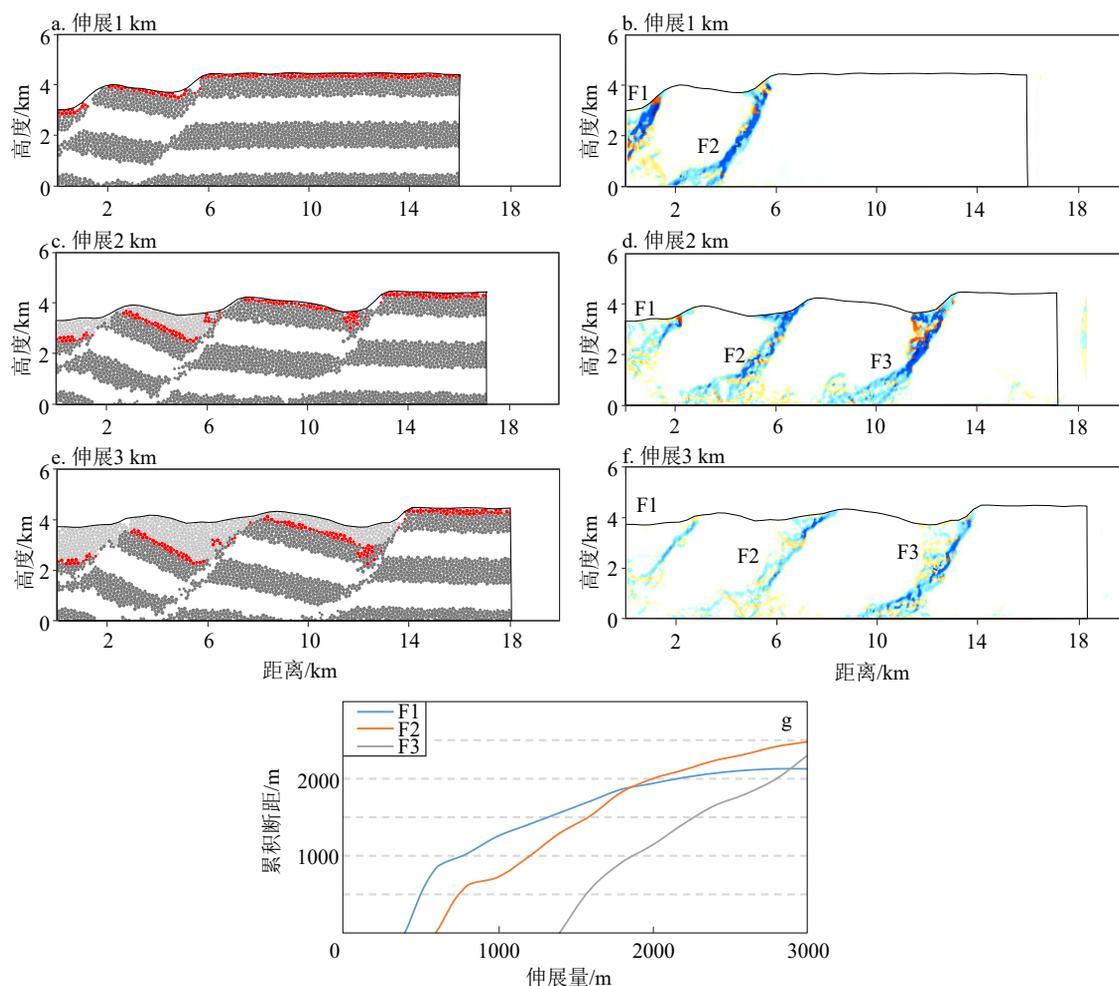


图 10 模型 5 构造变形、体积应变及断层断距统计

a, c, e: 构造变形; b, d, f: 体积应变; g: 断距统计。

Fig.10 Structural deformation and volume strain in Model 5

a, c, e: Structural deformation; b, d, f: volume strain; g: fault displacement.

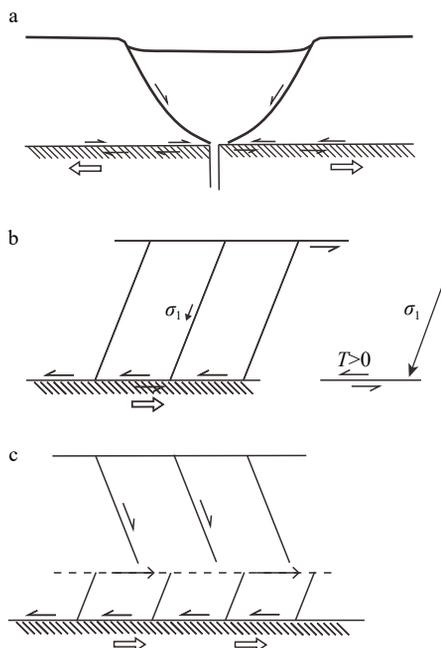
底韧性变形区域不断扩大, 新断层总是在韧性变形的区域上方产生(图 10)。应力作用位置变化虽然控制了断层的构造迁移, 但没有改变断层的几何形态。

#### 4.2 对边缘海盆地的断层差异演化的启示

模型结果显示, 模型 1、4、5 以陆倾断层为主。其中, 模型 1 设置了与地层沉积一致的较缓基底斜坡, 且基岩性质与实际区域基底强度较一致。而模型 4 基底表面坡度较陡, 远超斜坡带伸展前不足  $2^\circ$  的起始坡度, 同时斜坡带尺度的拉张过程较难与模型 5 中应力作用位置向海方向迁移对应。因此, 模型 1 与实际地质条件更为相近, 与斜坡带南部具有可比性。模型 2、3 以海倾断层为主, 同时, 模型 2 较弱的基岩性质和模型 3 向陆的应力方向均符合前人对斜坡带边界条件差异的研究<sup>[32,39]</sup>。因此, 模

型 2、模型 3 均与斜坡带北部有可比性。

值得注意的是, 斜坡带南部与北部区域断陷期均发育了十几条断层, 但控制斜坡带伸展的断层仅有 5 条左右。斜坡带南部所有断层断陷期共累积 5500 m 断距。其中, 陆倾断层 F1、F2、F3、F5 和海倾断层 F4 分布占据南部区域主体, 各断层断距最小 480 m, 最大 1800 m, 分别占所有断层断距之和的 8%~30%, 总计 85%。其他小断层最大断距不超过 120 m, 每条断层占总量的 2% 以下。因此, 断层 F1—F5 控制了斜坡带南部构造演化。模型 1 产生了 3 条大型陆倾断层 F1、F2、F3 及海倾断层 F4, 相对于斜坡带南部, 未发育断层 F5。模型产生的断层间隔为 4 km, 略大于实际剖面中主要断层从右至左 4、3.5、3.5、3 km 的间距。差异原因可能与模型中基底地层颗粒均一、地层强度与实际难以完全一致有关。但模拟出的断层 F1—F4 断陷期分别累积

图 11 不同强度地层伸展示意图<sup>[20]</sup>

a, b: 高强度岩石, c: 低强度岩石。

Fig.11 Extension mode of layers with different strengths<sup>[20]</sup>

a, b: High strength rock; c: low strength rock.

1710、1080、1580、490 m 断距, 与实际断层相差 90~140 m, 断距基本一致(图 12a)。因此, 尽管构造特征存在一定差异, 模型 1 总体反映出斜坡带南部陆倾断层控制的构造特征。

斜坡带北部所有断层断陷期共累积 6400 m 断距。其中, 海倾断层 F1、F2、F3、F5、F6、F7 和陆倾断层 F4 对区域构造演化产生了较大影响, 各断层断陷期断距最小 570 m, 最大 1400 m, 分别占所有断层断距之和的 8%~21%, 总计 87%。其余小断层最大断距不超过 150 m, 占比不足 3%, 对区域演化影响不大。模型 2 发育海倾断层 F1、F2、F3、F5 和陆倾断层 F4, 未产生海倾断层 F6、F7。模型中断层间隔 2 km, 与实际剖面一致。断层差异原因可能与模型精度限制, 或颗粒性质与实际不完全一致有关。但模拟出的断层 F1—F5 断陷期分别累积 1250、1440、830、600、530 m 断距, 均与实际断层断距相差不到 50 m(图 12b)。另一方面, 模型 3 仅产生 3 条主要断层, 断层间隔约 4 km, 远大于实际 2 km 间隔, 断层较难与实际对应, 其构造特征与实际剖面差别较大。因此, 模型 2 比模型 3 更好地反映出斜坡带北部海倾断层控制的构造特征。

平北斜坡带南北构造差异明显, 通过模型对比分析可知, 岩性与应力方向是控制斜坡带差异演化的最主要因素。航磁数据显示, 平北斜坡带南部可

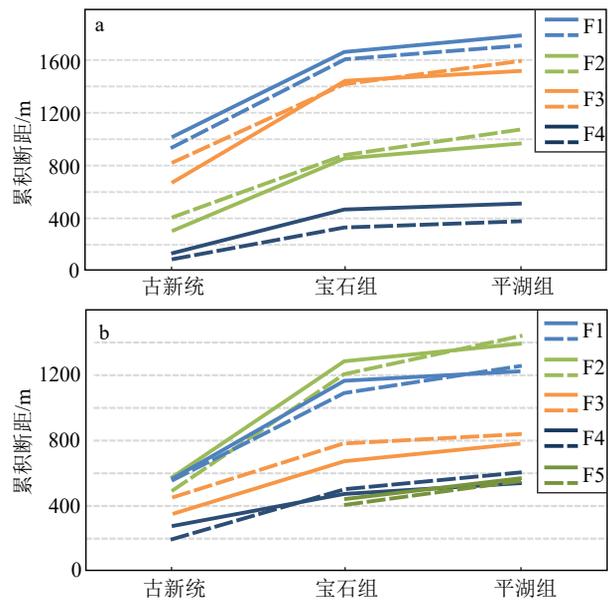


图 12 斜坡带与模型断层断距对比

a: 斜坡带南部与模型 1 断层, 断层名称见图 4a; b: 斜坡带北部与模型 2 断层, 断层名称见图 3a。虚线为模型断层, 实线为剖面断层。

Fig.12 Comparison between slope belt and fault displacement in Model 1

a: Between the southern area and fault displacement in Model 1 (see Fig.4a for names of the faults); b: between the northern area and fault displacement in Model 2 (see Fig.3a for names of the faults). Dotted line: faults in the models; solid line: faults in slope belt.

能为火成岩基底, 北部可能为变沉积岩基底<sup>[32]</sup>。这与模型 1、模型 2 结果一致, 基底岩性控制了斜坡带南、北断层倾向的变化。此外, 尽管受太平洋板块俯冲作用影响, 东海陆架盆地伸展过程中, 盆地向东迁移<sup>[8,48-49]</sup>, 但东海陆架盆地亦存在走滑拉分<sup>[50]</sup>, 西湖凹陷可能是由区域性的基底走滑断层控制<sup>[39,51]</sup>。斜坡带张扭式断层分布指示了该区域可能存在基底走滑断裂, 古新世时的左旋走滑赋予了斜坡带南北相反的应力方向。由模型 1 与模型 3 结果可知, 当基底强度相同时, 斜坡带北部区域在向陆的应力作用下可能产生海倾断层。

东海陆架盆地于晚白垩世开始断陷, 上中生界和新生界地层自西向东逐渐增厚, 发育众多凹陷斜坡。模型 4 中, 基岩表面斜坡坡度变化并没有改变新生断层的倾向, 模型仍以陆倾断层为主(图 9), 基底坡度可能不是东海陆架盆地控盆断层差异演化的主导因素。模型 5 中, 断层发育随应力作用位置向海方向迁移而变化, 新断层在靠近应力作用位置产生, 且断层活动在远离应力作用位置的过程中降低。基于此, 东海陆架盆地的构造迁移可能是由伸展过程中应力作用位置向海盆移动导致的。

由于太平洋板块俯冲后撤的强烈影响<sup>[8]</sup>,东海陆架盆地的成盆过程受向海方向的伸展应力控制。盆地的基岩性质和应力方向共同作用产生了以陆倾控盆断层为主,海倾控盆断层局部发育的盆地结构,并造成了区域盆地断裂组合发育差异演化。与东海陆架盆地内部差异演化类似,南海北缘盆地亦表现差异演化。北部湾盆地和琼东南盆地紧邻红河断裂,以海倾断裂为主<sup>[6-7]</sup>,而珠江口盆地南部早期受陆倾断层控制<sup>[24,52]</sup>。其原因可能与成盆过程中,伸展应力方向差异有关。受原南海板块向婆罗洲方向俯冲的影响,南海北缘在中生代晚期从挤压环境转变为伸展环境<sup>[10,53]</sup>。在俯冲拖曳作用的影响下,向海盆的应力方向主导了南海北缘早期的断陷作用。红河断裂同时期走滑运动<sup>[7,52]</sup>,赋予了南海北缘西侧盆地几乎相反的应力方向。从模型结果而言,基岩性质与应力方向可能是边缘海盆地差异演化的最主要原因。

边缘海盆地差异演化过程中,盆地油气运聚亦存在较大差异。平北斜坡带北部区域的油气圈闭数量多,但规模小而分散;南部区域的油气圈闭数量少,但圈闭规模大,储量高,集中分布在地堑内<sup>[27-28,30-31]</sup>。一直以来,学者们从源、通、储、盖等多因素分析油气分布差异原因。前人认为,岩石物理性质、构造作用、断裂带特征是影响油气运聚的重要因素<sup>[30,54-56]</sup>,而断层差异演化可能是控制油气分布运移的更重要因素。边缘海盆地断层差异演化形成不同类型的盆地,这些盆地内油气聚集亦存在较大差异,确定油气分布显然需要从盆地发育类型机制着手,从控盆因素分析油气运移。岩性与应力差异导致平北斜坡带同时期油气的运移过程与分布的差异,因此,边缘海盆地差异演化机制的研究可能为寻找有利油气储层提供借鉴指导。当然,这也需要进一步研究以深入分析油气运移机制与盆地差异演化机制二者的相关性。

## 5 结论

(1)岩石强度与应力方向是影响断层倾向变化的主要因素,高强度岩石破裂产生与伸展方向相反的断层,低强度岩石破裂产生与伸展方向同向的断层。相同强度的岩石在相反方向的应力影响下,产生的主断层倾向完全相反。基岩表面坡度和应力作用位置不是断层差异演化的主导因素。

(2)中国东部边缘海盆地差异演化可能受基底强度和应力方向差异控制。平北斜坡带南部和北

部断层差异演化可能是由基岩强度差异引起的,或是应力方向差异导致的。东海陆架盆地的陆倾控盆断层可能是向海盆的伸展应力导致的,而南海陆缘盆地的断层发育可能是其基底在不同的应力方向共同作用下的结果。岩性和应力方向差异可能导致盆地差异演化,从而影响同时期油气运聚,但仍需进一步研究二者的相关性。

**致谢:** 本文的数值计算是在南京大学高性能计算中心的计算集群上完成的,数值模拟实验使用东华理工大学李长圣博士研发的离散元数值模拟软件完成。文中采用的应变计算代码修改自莱斯顿大学 Julia K Morgan 和 Thomas Fournier 的脚本,在此表示感谢。

## 参考文献 (References)

- [1] Karig D E. Origin and development of marginal basins in the western Pacific [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1971, 76(11): 2542-2561.
- [2] Xu S M, Ye Q, Li S Z, et al. Sequential patterns in Cenozoic marginal basins of the northwest Pacific [J]. *Geological Journal*, 2016, 51(S1): 387-415.
- [3] 赵淑娟, 李三忠, 索艳慧, 等. 黄海盆地构造特征及形成机制[J]. *地学前缘*, 2017, 24(4): 239-248. [ZHAO Shujuan, LI Sanzhong, SUO Yanhui, et al. Structure and formation mechanism of the Yellow Sea Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(4): 239-248.]
- [4] Wang R, Shi W Z, Xie X Y, et al. Coupling of strike-slip faulting and lacustrine basin evolution: sequence stratigraphy, structure, and sedimentation in the North Yellow Sea Basin (West Bay basin offshore North Korea), eastern China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 120: 104548.
- [5] Zhu Y B, Liu S F, Zhang B, et al. Reconstruction of the Cenozoic deformation of the Bohai Bay Basin, North China [J]. *Basin Research*, 2021, 33(1): 364-381.
- [6] Sun Z, Zhong Z H, Keep M, et al. 3D analogue modeling of the South China Sea: a discussion on breakup pattern [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 34(4): 544-556.
- [7] Wang P C, Li S Z, Suo Y H, et al. Structural and kinematic analysis of Cenozoic rift basins in South China Sea: a synthesis [J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 216: 103522.
- [8] Zhu W L, Zhong K, Fu X W, et al. The formation and evolution of the East China Sea Shelf Basin: a new view [J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 190: 89-111.
- [9] 刘金水, 许怀智, 蒋一鸣, 等. 东海盆地中、新生代盆架结构与构造演化[J]. *地质学报*, 2020, 94(3): 675-691. [LIU Jinshui, XU Huaizhi, JIANG Yiming, et al. Mesozoic and Cenozoic basin structure and tectonic evolution in the East China Sea basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(3): 675-691.]

- [10] Li C F, Xu X, Lin J, et al. Ages and magnetic structures of the South China Sea constrained by deep tow magnetic surveys and IODP Expedition 349 [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2014, 15(12): 4958-4983.
- [11] Dai L M, Li S Z, Lou D, et al. Numerical modeling of Late Miocene tectonic inversion in the Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin, China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 86: 25-37.
- [12] Wang P Z, Li S Z, Suo Y H, et al. Plate tectonic control on the formation and tectonic migration of Cenozoic basins in northern margin of the South China Sea [J]. *Geoscience Frontiers*, 2020, 11(4): 1231-1251.
- [13] Anders M H, Schlische R W. Overlapping faults, intrabasin highs, and the growth of normal faults [J]. *The Journal of Geology*, 1994, 102(2): 165-179.
- [14] McLeod A E, Dawers N H, Underhill J R. The propagation and linkage of normal faults: insights from the Strathspey-Brent-Statfjord fault array, northern North Sea [J]. *Basin Research*, 2000, 12(3-4): 263-284.
- [15] Tsuji T, Kawamura K, Kanamatsu T, et al. Extension of continental crust by anelastic deformation during the 2011 Tohoku-Oki earthquake: the role of extensional faulting in the generation of a great tsunami [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 364: 44-58.
- [16] Clerc C, Ringenbach J C, Jolivet L, et al. Rifted margins: ductile deformation, boudinage, continentward-dipping normal faults and the role of the weak lower crust [J]. *Gondwana Research*, 2018, 53: 20-40.
- [17] Peron-Pinvidic G, Manatschal G, Osmundsen P T. Structural comparison of archetypal Atlantic rifted margins: a review of observations and concepts [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 43: 21-47.
- [18] Zhao Y H, Ren J Y, Pang X, et al. Structural style, formation of low angle normal fault and its controls on the evolution of Baiyun Rift, northern margin of the South China Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, 89: 687-700.
- [19] McClay K R. Extensional fault systems in sedimentary basins: a review of analogue model studies [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1990, 7(3): 206-233.
- [20] Mandl G. *Faulting in Brittle Rocks*[M]. Berlin: Springer, 1999: 376-406.
- [21] Cowie P A, Underhill J R, Behn M D, et al. Spatio-temporal evolution of strain accumulation derived from multi-scale observations of Late Jurassic rifting in the northern North Sea: a critical test of models for lithospheric extension [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 234(3-4): 401-419.
- [22] Bose S, Mitra S. Controls of listric normal fault styles in the northern Gulf of Mexico: insights from experimental models [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, 35(1): 41-54.
- [23] Deng C, Gawthorpe R L, Finch E, et al. Influence of a pre-existing basement weakness on normal fault growth during oblique extension: insights from discrete element modeling [J]. *Journal of Structural Geology*, 2017, 105: 44-61.
- [24] Bukhari S W H, Li S Z, Liu Z, et al. Deep and surface driving forces that shape the Earth: insights from the evolution of the northern South China sea margin [J]. *Gondwana Research*, 2022, doi:10.1016/j.gr.2022.05.005.
- [25] Hardy S, Finch E. Discrete element modelling of the influence of cover strength on basement-involved fault-propagation folding [J]. *Tectonophysics*, 2006, 415(1-4): 225-238.
- [26] Morgan J K. Effects of cohesion on the structural and mechanical evolution of fold and thrust belts and contractional wedges: discrete element simulations [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2015, 120(5): 3870-3896.
- [27] 杨彩虹, 曾广东, 李上卿, 等. 东海西湖凹陷平北地区断裂发育特征与油气聚集 [J]. *石油实验地质*, 2014, 36(1): 64-69, 82. [YANG Caihong, ZENG Guangdong, LI Shangqing, et al. Fault development characteristics and hydrocarbon accumulation in Pingbei area of Xihu Sag, East China Sea [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2014, 36(1): 64-69, 82.]
- [28] 唐贤君, 蒋一鸣, 张建培, 等. 东海盆地西湖凹陷平北区断陷层断裂特征及其对圈闭的控制 [J]. *海洋地质前沿*, 2019, 35(8): 34-43. [TANG Xianjun, JIANG Yiming, ZHANG Jianpei, et al. Fault characteristic and its control on traps of fault structural layer in the northern Pinghu Slope Belt, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2019, 35(8): 34-43.]
- [29] 李长圣. 基于离散元的褶皱冲断带构造变形定量分析与模拟 [D]. 南京大学博士学位论文, 2019. [LI Changsheng. Quantitative analysis and simulation of structural deformation in the fold and thrust belt based on discrete element method [D]. Doctor Dissertation of Nanjing University, 2019.]
- [30] 江东辉, 蒲仁海, 苏思羽, 等. 断陷盆地斜坡带大型油气田成藏条件: 西湖凹陷平北缓坡断裂与岩性控藏有利区 [J]. *天然气工业*, 2021, 41(11): 33-42. [JIANG Donghui, PU Renhai, SU Siyu, et al. Conditions for the formation of large oil and gas reservoirs in the slope belts of rift basins: fault-and lithology-controlled accumulation zones in the Pingbei slope of Xihu Sag [J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(11): 33-42.]
- [31] 李峻颀, 蒋一鸣, 侯国伟, 等. 坡折带对油气圈闭发育的约束效应: 以平湖斜坡带孔雀亭区平湖组为例 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021, 41(3): 141-150. [LI Junjie, JIANG Yiming, HOU Guowei, et al. Constraints of slope break belt on oil and gas trapping: an example from the Pinghu Formation in the Kongqueting area of Pinghu Slope [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2021, 41(3): 141-150.]
- [32] 蒋一鸣, 邹玮, 刘金水, 等. 东海西湖凹陷中新世末反转背斜构造成因机制: 来自基底结构差异的新认识 [J]. *地球科学*, 2020, 45(3): 968-979. [JIANG Yiming, ZOU Wei, LIU Jinshui, et al. Genetic mechanism of inversion anticline structure at the end of Miocene in Xihu Sag, East China Sea: a new understanding of basement structure difference [J]. *Earth Science*, 2020, 45(3): 968-979.]
- [33] Dean S L, Morgan J K, Fournier T. Geometries of frontal fold and thrust belts: insights from discrete element simulations [J]. *Journal of Structural Geology*, 2013, 53: 43-53.
- [34] Cundall P A, Strack O D L. A discrete numerical model for granular assemblies [J]. *Géotechnique*, 1979, 29(1): 47-65.
- [35] 崔幸, 王亮亮, 罗洪明, 等. 东海陆架盆地南部中生代盆地性质与演

- 化: 砂箱物理模拟检验[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37(4): 181-192. [CUI Xing, WANG Liangliang, LUO Hongming, et al. Sand-box modeling test for Mesozoic basins in southern East China Sea Shelf Basin [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2017, 37(4): 181-192.]
- [36] 李长圣, 尹宏伟, 吴珍云, 等. 一种基于离散元的裂谷盆地伸展过程模拟方法: 中国, CN111008472A[P]. 2020-04-14. [LI Changsheng, YIN Hongwei, WU Zhenyun, et al. A simulation method for the extension of rift basins based on discrete element: CN, CN111008472A[P]. 2020-04-14.]
- [37] Hardy S. Coupling a frictional-cohesive cover and a viscous substrate in a discrete element model: first results of application to thick- and thin-skinned extensional tectonics [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, 97: 32-44.
- [38] Vora H B. Shear fracture growth in granular rocks and porosity-permeability relationships in mudstones[D]. Doctor Dissertation of Rice University, 2019.
- [39] 张绍亮, 张建培, 唐贤君, 等. 东海西湖凹陷断裂系统几何学特征及其成因机制[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2014, 34(1): 87-94. [ZHANG Shaoliang, ZHANG Jianpei, TANG Xianjun, et al. Geometry characteristic of the fault system in Xihu sag in East China Sea and its formation mechanism [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2014, 34(1): 87-94.]
- [40] 郭太宇. 西湖凹陷平湖构造带三维古地形恢复[D]. 中国海洋大学硕士学位论文, 2015. [GUO Taiyu. 3D palaeotopography recovery of Pinghu structural belt in Xihu depression [D]. Master Dissertation of Ocean University of China, 2015.]
- [41] Clerc C, Jolivet L, Ringenbach J C. Ductile extensional shear zones in the lower crust of a passive margin [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 431: 1-7.
- [42] Michon L, Sokoutis D. Interaction between structural inheritance and extension direction during graben and depocentre formation: an experimental approach [J]. *Tectonophysics*, 2005, 409(1-4): 125-146.
- [43] Abe S, van Gent H, Urai J L. DEM simulation of normal faults in cohesive materials [J]. *Tectonophysics*, 2011, 512(1-4): 12-21.
- [44] Yin A. Mechanics of wedge-shaped fault blocks: 2. An elastic solution for extensional wedges [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(B4): 7045-7055.
- [45] McClay K R, Ellis P G. Geometries of extensional fault systems developed in model experiments [J]. *Geology*, 1987, 15(4): 341-344.
- [46] Childs C, Manzocchi T, Walsh J J, et al. A geometric model of fault zone and fault rock thickness variations [J]. *Journal of Structural Geology*, 2009, 31(2): 117-127.
- [47] Henza A A, Withjack M O, Schlische R W. How do the properties of a pre-existing normal-fault population influence fault development during a subsequent phase of extension? [J]. *Journal of Structural Geology*, 2011, 33(9): 1312-1324.
- [48] Su J B, Zhu W B, Chen J, et al. Cenozoic inversion of the East China Sea Shelf Basin: implications for reconstructing Cenozoic tectonics of eastern China [J]. *International Geology Review*, 2014, 56(12): 1541-1555.
- [49] Liu Z, Dai L M, Li S Z, et al. Earth's surface responses during geodynamic evolution: Numerical insight from the southern East China Sea Continental Shelf Basin, West Pacific [J]. *Gondwana Research*, 2022, 102: 167-179.
- [50] Suo Y H, Li S Z, Zhao S J, et al. Continental margin basins in East Asia: tectonic implications of the Meso-Cenozoic East China Sea pull-apart basins [J]. *Geological Journal*, 2015, 50(2): 139-156.
- [51] Wang Q, Li S Z, Guo L L, et al. Analogue modelling and mechanism of tectonic inversion of the Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017, 139: 129-141.
- [52] Wang P C, Suo Y H, Peng G R, et al. Three-stage extension in the Cenozoic Pearl River Mouth Basin triggering onset of the South China Sea spreading [J]. *Gondwana Research*, 2022, doi: 0.1016/j.gr.2022.05.023.
- [53] Cao X Z, Zahirovic S, Li S Z, et al. A deforming plate tectonic model of the South China Block since the Jurassic [J]. *Gondwana Research*, 2022, 102: 3-16.
- [54] Zhu W L, Zhong K, Li Y C, et al. Characteristics of hydrocarbon accumulation and exploration potential of the northern South China Sea deepwater basins [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(24): 3121-3129.
- [55] Qun L. Concept, principle, model and significance of the fault controlling hydrocarbon theory [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2010, 37(3): 316-324.
- [56] Yang C Q, Sun J, Yang Y Q, et al. Key factors controlling Mesozoic hydrocarbon accumulation in the southern East China Sea basin [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 118: 104436.