



红河断裂带对南海西部盆地成盆过程影响机制实验研究

张家轩, 郭玲莉, 张京京, 陶 圩, 赵淑娟, 王光增, 李三忠

Red River Fault Zone affected the formation of basins in the western South China Sea: An experimental study

ZHANG Jiaxuan, GUO Lingli, ZHANG Jingjing, TAO Wei, ZHAO Shujuan, WANG Guangzeng, and LI Sanzhong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2024020101>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

逆冲-走滑作用叠加的复合构造变形机制砂箱模拟研究：以张家口-蓬莱断裂带渤海段为例

Sandbox modeling on the reworking of strike-slip faulting from pre-existing thrusts: A case study of Zhangjiakou-Penglai Fault Zone in Bohai area

海洋地质与第四纪地质. 2024, 44(4): 108-122

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

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

海洋地质与第四纪地质. 2024, 44(1): 81-95

东海洋陆过渡带中—新生代构造变形及动力学机制

MesoCenozoic deformation and dynamic mechanism of the oceancontinent transitional zone in the East China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(1): 71-84

南海西缘曾母西断裂构造特征及其对盆地沉积发育的控制作用

Zengmu Xi fault on the western-border of South China Sea and its control over the sedimentation of the Basin

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(2): 100-108

南海主要断裂（带）与构造分区

Main faults and tectonic divisions in the South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2025, 45(1): 136-153

珠江口盆地陆丰凹陷南部古近系断裂发育特征与油气成藏

Fault characteristics and hydrocarbon accumulation in the southern Lufeng Sag, Pearl River Mouth Basin

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(3): 132-143



关注微信公众号，获得更多资讯信息

张家轩, 郭玲莉, 张京京, 等. 红河断裂带对南海西部盆地成盆过程影响机制实验研究 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2025, 45(2): 79-97.
ZHANG Jiaxuan, GUO Lingli, ZHANG Jingjing, et al. Red River Fault Zone affected the formation of basins in the western South China Sea: An experimental study[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2025, 45(2): 79-97.

红河断裂带对南海西部盆地成盆过程影响机制实验研究

张家轩^{1,2}, 郭玲莉^{1,2}, 张京京^{1,2}, 陶圩^{1,2}, 赵淑娟^{1,2}, 王光增^{1,2}, 李三忠^{1,2}

1. 深海圈层与地球系统教育部前沿科学中心, 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100
2. 青岛海洋科技中心海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237

摘要:红河断裂带的走滑运动对南海西部盆地格架的形成具有一定的影响作用, 本研究通过解构青藏高原隆升间歇期红河断裂带的走滑运动过程, 探讨红河断裂带与南海西部盆地之间成因的关联性问题。通过砂箱物理模拟实验, 模拟研究了印欧板块碰撞背景下红河断裂带的走滑作用对南海西部盆地的形成机制, 特别是对莺歌海盆地和中建南盆地的成盆影响。实验结果表明莺歌海盆地和中建南盆地雏形受控于红河断裂带走滑运动所产生的 NW 向剪切作用, 南海打开过程的近 SN 向伸展作用使盆地规模增大。南海西部莺歌海盆地和中建南盆地早期形成过程中红河断裂带的走滑位移被盆地的边界断层以及内部断层吸收进而控制了盆地 35~23 Ma 的发育演化。

关键词:物理模拟; 成盆动力学; 红河断裂带; 莺歌海盆地; 中建南盆地

中图分类号: P736.1

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2024020101

Red River Fault Zone affected the formation of basins in the western South China Sea: An experimental study

ZHANG Jiaxuan^{1,2}, GUO Lingli^{1,2}, ZHANG Jingjing^{1,2}, TAO Wei^{1,2}, ZHAO Shujuan^{1,2}, WANG Guangzeng^{1,2}, LI Sanzhong^{1,2}

1. Frontiers Science Center for Deep Ocean Multispheres and Earth System, Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, MOE, College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao Marine Science and Technology Center, Qingdao 266237, China

Abstract: The strike-slip movement of the Red River Fault Zone (RRFZ) affected the formation of the basin in the western part of the South China Sea (SCS) to a certain degree. To characterize the tectonic features of the RRFZ during the uplift interval of the Tibetan Plateau and analyze the relationship between the strike-slip in RRFZ and the basins, especially Yinggehai Basin and Zhongjiannan Basin in the western SCS, sandbox analogue modelling experiments were performed in the context of the India-Eurasia collision. Results indicate that the prototypes of the two basins are controlled by the NW-oriented shear stresses generated by the strike-slip movement of the RRFZ, and the SN-oriented tensional stresses with the SCS opening up and the basin sizes expanding. During the early formation stage of the two basins, the displacement due to the strike-slipping was absorbed by the boundary faults and internal faults of the basins, thus controlling the evolution of the basins during the stage from 35 to 23 Ma.

Key words: analogue modelling; basin formation dynamic; Red River Fault Zone; Yinggehai Basin; Zhongjiannan Basin

印度板块与欧亚板块于晚古新世开始碰撞, 至中始新世末期逐渐向欧亚板块楔入^[1]。这种大规模的陆-陆碰撞形成了当今地球上最年轻的造山带(喜马拉雅造山带)和最大的高原(青藏高原)^[2-4], 同时这种碰撞变形也波及到了欧亚板块东南缘, 印支地

块发生了顺时针的旋转挤出, 东南亚地区发生了大规模的逃逸构造, 这一变形模式被称为“挤出逃逸模式”^[5-10], 大型走滑断裂对该模式下的碰撞变形起到了运动调节作用^[11-12]。红河断裂带被认为是印支地块与华南地块的边界, 表现为一条大型走滑断裂

资助项目: 崂山实验室科技创新项目“基于数字孪生的全球深时地貌重塑与资源环境预测”(LSKJ202204400); 国家自然科学基金创新研究群体项目“海底古地貌重建”(42121005); 国家自然科学基金重大计划重点支持项目(92058211); 李三忠教授泰山学者攀登计划项目(tspd20210305); 邢会林教授泰山学者特聘专家计划项目(tstp20221112)

作者简介: 张家轩(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事海洋地质学研究, E-mail: zhangjiaxuan@stu.ouc.edu.cn

通讯作者: 郭玲莉(1985—), 女, 副教授, 硕士生导师, 从事构造地质学及海洋地质学研究, E-mail: guolingli@ouc.edu.cn

收稿日期: 2024-02-01; 改回日期: 2024-03-11. 周立君编辑

带,印度板块和欧亚板块的碰撞导致红河断裂带发生走滑运动以及印支地块发生旋转挤出,对南海及其周缘盆地的打开有重要的影响^[13-14]。

红河断裂带在新生代主要经历了左旋和右旋两种走滑运动。矿物的 U-Pb 年龄、K-Ar 同位素测试、锆石定年以及盆地沉积中心的迁移规律等表明,红河断裂带左旋走滑时间限定于 34~17 Ma^[15-21]。利用莺歌海盆地沉积中心的迁移规律获得红河断裂带左旋向右旋运动的转换时期为 15.5~5.5 Ma^[21],红河断裂带的右旋走滑运动可能开始于 8~5 Ma^[22-26]。红河断裂带的走滑位移量也存在争议,通过对走滑断裂带内的岩石年代学分析、古地磁测量、剪切应变位移等方法推算的红河断裂带左旋走滑位移为 200~800 km^[25, 27-32],右旋走滑位移量为 20~50 km^[22, 24, 26, 28]。前人对红河断裂带陆上部分已做过详细的研究^[15-20],但红河断裂带入海后的延伸问题仍存在争议,主要包括:红河断裂带向东延伸经海南岛南部与西沙海槽断裂带相连^[33]、红河断裂带向南延伸与近 SN 向的南海西缘断裂相连^[34]、红河断裂带从海南岛以南穿过中沙-西沙地块之后与中建南断裂相连并向 SE 方向延伸^[35]。多数研究者认为红河断裂带入海后可能与南部近 SN 向的南海西缘断裂相连^[36-38],可将南部的万安东断裂、卢帕尔断裂和廷贾断裂作为一个大的断裂体系进行研究(图 1)。

南海西部海域从北到南发育有莺歌海盆地、中建南盆地和万安盆地等一系列新生代菱形盆地,这些盆地与红河断裂、南海西缘断裂、万安东断裂等断裂带的演化密切相关。南海西部莺歌海盆地和中建南盆地在 38~23 Ma 进入走滑拉分期^[39]。通过 T70 层序界面的识别将莺歌海盆地的同裂陷阶段划分为断陷期(55~32 Ma)和断拗期(32~23 Ma),在 32~23 Ma 期间对莺歌海盆地起明显控制作用的是红河断裂带的走滑运动^[40]。Sun 等认为莺歌海盆地的走向和裂谷作用主要受 NW 向、NNW 向、SN 向基底断层的控制^[25];钟志洪等认为莺歌海盆地是在 SN 向拉张应力控制下形成的左旋扭张性盆地^[41]。王伟平等认为 66 Ma 中建南盆地初始张裂,23 Ma 盆地内部发生断拗转换^[42]。中建南盆地位于南海西部红河断裂-南海西缘断裂-万安东断裂构造体系上,是在伸展应力与走滑应力共同作用下形成的走滑-拉张复合型盆地^[43-44],其形成和发育演化可能与莺歌海盆地具有一定的相似性^[45-46]。红河断裂带左旋走滑运动时间与上述盆地成盆期次时间吻合,红河断裂带的活动性与莺歌海盆地和中建南盆地的形成演化之间有何关联性?针对莺歌海盆地

和中建南盆地,前人对单个盆地形成演化过程做过大量的研究^[25, 40, 43-45],将南海西部盆地作为整体考虑其形成演化以及宏观动力学过程的研究较少。

物理模拟实验模型通过将自然界的原型在更小的时间和空间尺度上进行一定比例的缩放,从而能够再现盆地的演化过程^[47-51]。本研究设计印支地块强挤出和弱挤出两种实验模型,模拟 38~23 Ma 红河断裂带运动特征及南海西部莺歌海盆地和中建南盆地的构造演化过程。基于数字散斑方法获取不同演化阶段的应变场,结合三维扫描系统测量的地形形貌演变,研究红河断裂带走滑运动对南海西部盆地成盆控制作用。

1 地质背景

南海周边陆架和陆坡发育有众多的新生代盆地,可分为东部俯冲弧后扩张型-弧内拉分盆地、南部伸展逆冲-挠曲型盆地、西部挤出-拉分盆地以及北部走滑-拉分盆地^[52]。其中,南海西部因其叠加有走滑、挤压和伸展等构造作用使其成为南海构造最复杂的区域之一(图 1)。新生代以来南海主要经历了神狐运动、西卫运动、南海运动、白云运动和万安运动等五期构造运动^[53-55],南海西部盆地的断裂活动主要与神狐运动、西卫运动以及万安运动密切相关(图 2),这些构造运动在不同盆地间具有穿时性,记录了各盆地复杂的形成演化过程^[39]。

红河断裂带北起青藏高原,穿越云南及越南北部,向南延伸入南海,总长度超过 1000 km。红河断裂带是新生代以来在金沙江-哀牢山缝合带的基础上形成的一条大型走滑断裂带,红河断裂带经过陆上的雪龙山、点苍山、哀牢山以及 Day Nui Con Voi 山在莺歌海盆地处延伸入海。在印度板块与欧亚板块发生碰撞,青藏高原第一期缓慢隆升时,红河断裂带表现为缓慢的左旋走滑;当青藏高原处于两次隆升作用的间歇期时,印度板块和欧亚板块碰撞产生的位移量主要被红河断裂带的走滑所吸收,在此期间红河断裂带表现为快速的左行走滑;当青藏高原第二期快速隆升时,红河断裂带的左旋走滑变缓直至停止,中中新世以后随着印度板块不断向欧亚板块的楔入,华南板块开始向 SE 方向缓慢移动,此时红河断裂带开始表现为右旋走滑。红河断裂带的运动与南海及其周缘盆地的打开密不可分,其运动时限与南海海盆扩张时间有着良好的对应关系^[57],同时南海西部的一系列盆地在红河断裂带的活动过程中也开始形成。

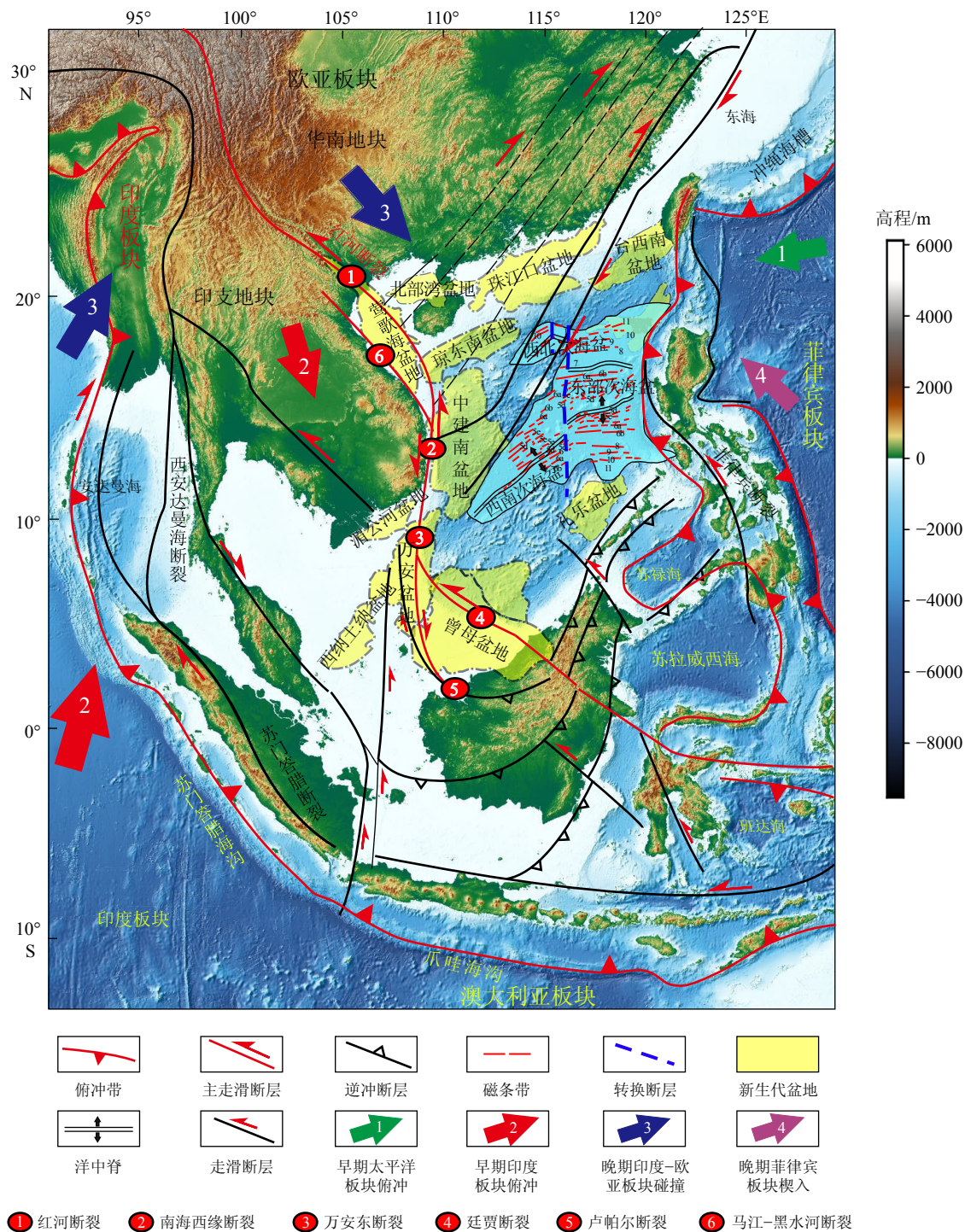


图 1 新生代南海地区大地构造背景^[52, 56]

Fig.1 Tectonic setting of the Cenozoic SCS region^[52, 56]

南海西部的一系列断裂带活动性以及南海西部盆地的形成和演化,受控于神狐运动、西卫运动和万安运动等。神狐运动(对应南海南部礼乐运动)发生于中生代末期至新生代早期,该构造运动使得大陆边缘开始裂解,在中国东部主要表现为地壳的沉降^[58],形成 NE-NNE 向地堑和断层,伴随中酸性岩浆侵入和喷发^[59-61]。在此期间,在南海西部

形成各盆地的雏形,莺歌海盆地表现为张扭性盆地,沉降中心开始往 SE 向迁移,中建南盆地和万安盆地内部出现 NE-NNE 向的次级断裂。西卫运动(对应南海北部珠琼运动)发生于始新世中晚期,主要造成早期地堑盆地的抬升和剥蚀,区域上与南海第一次扩张有关。此次构造运动使南海西部盆地内断陷加剧^[62],盆地发生了明显的扩张,中建南盆

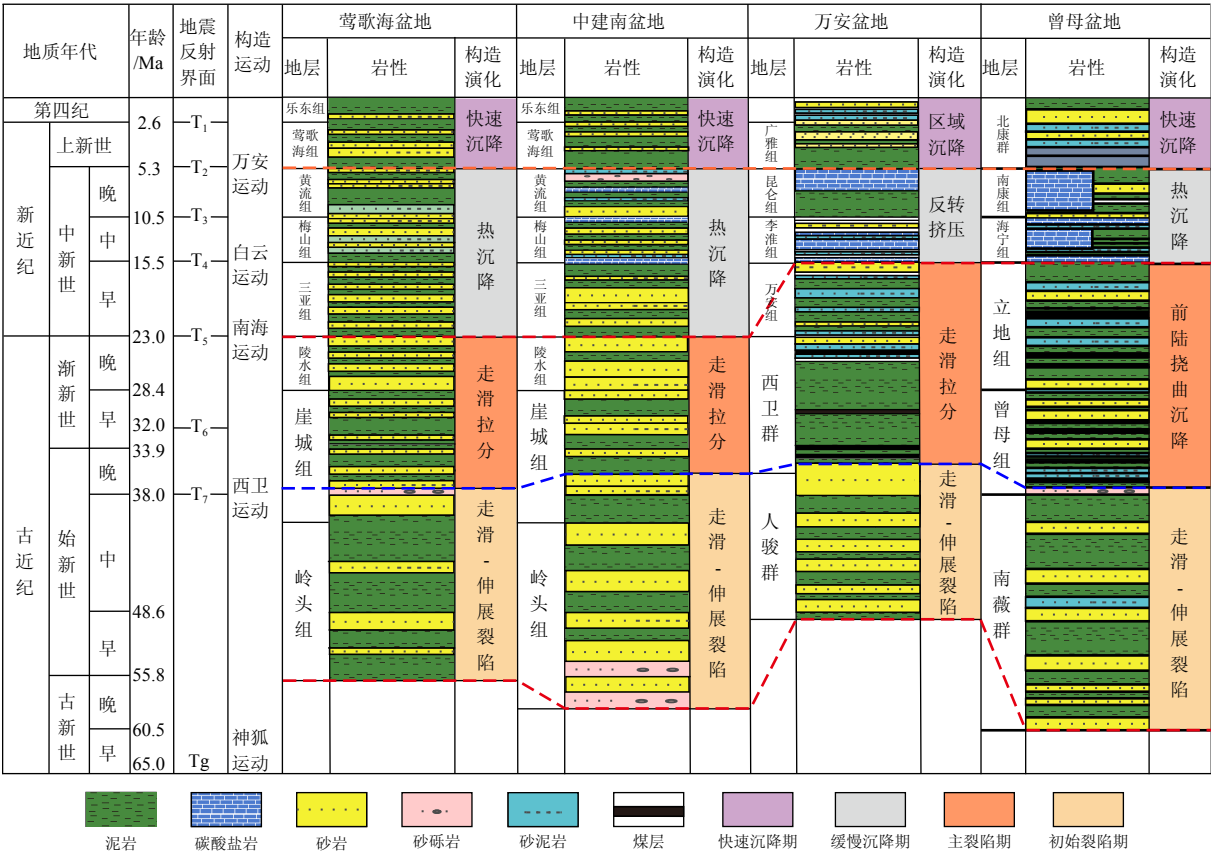


图 2 南海西部构造运动^[39, 64]
Fig.2 Tectonic movements in the western SCS^[39, 64]

地强烈张裂, 万安盆地的北部表现为以拉张为主, 而南部表现为以隆升为主^[63]。在神狐运动和西卫运动之间红河断裂带开始活动, 南海西部的盆地大都处于张扭应力场中, 其进入走滑伸展裂陷期, 形成盆地的裂陷构造层。西卫运动后盆地的裂陷被进一步拉开进入走滑拉分期(图 2), 形成盆地的断拗构造层。万安运动(对应南海北部东沙运动)主要发生于中中新世—晚中新世, 万安运动使得盆地处于短暂的挤压环境, 盆地以整体沉降为主, 该运动产生了一系列 NW 向断裂。此次运动对南海西部盆地中南部的万安盆地和曾母盆地影响较大, 在盆地内部形成了一些反转构造, 对于北部的莺歌海盆地和中建南盆地影响相对较小。在空间上, 它的强度和影响从东到西逐渐减弱^[65]。万安运动后, 红河断裂带开始逐渐由左旋走滑向右旋走滑转变, 南海西部的盆地整体进入区域沉降期, 形成盆地的拗陷构造层。

2 砂箱物理模拟实验

物理模拟是研究地质过程中的运动学和动力

学过程的一种有效方法, 长期以来它一直被用于研究伸展或挤压应力场地区的变形过程^[49, 66-70]。通过物理模拟的方法前人揭示莺歌海地区红河断裂带左旋走滑位移量不超过 200 km, 且红河断裂带的新生代演化应该划分为 4 个阶段^[71]。对于红河断裂带在左旋走滑作用下对盆地成藏的影响, 前人通过物理模拟方法进行了研究, 研究揭示断裂体系以及不同的断裂特征是影响盆地成藏的重要因素^[72]。前人通过建立物理实验模型探讨了底辟构造的沉积建造形成机制, 结果显示, 底辟建造是地貌、沉积速率、温度、压力等综合作用的结果^[73]。物理模拟实验结果和真实地质条件的可类比性是模拟实验成功的关键^[74], 相似性准则起着决定性的作用。在物理模拟实验中, 通过确保实验模型与地质原型之间在关键要素上具有相同的无量纲数或相似的物理行为, 从而使得实验结果可以用来解释地质事实。相似性原则包括: ① 几何学相似: 在物理模拟实验中要保持模型与原型之间尺寸比例的相似; ② 运动学相似: 指实验模型和地质原型在运动特性上保持一致; ③ 动力学相似: 要求模型中力的作用和响应在本质上与原型保持一致。

2.1 模型设计

对于印支地块的向南滑移量问题和旋转量问题前人做过较多的研究^[7, 14, 75], 本研究认为当旋转作用为主导时印支地块表现为弱挤出, 当旋转作用和挤出作用同时发挥作用时印支地块表现为强挤出。红河断裂带-南海西缘断裂带作为印支地块的边界断层, 该边界断层在走滑运动过程中印支地块的旋转挤出作用在断层的不同位置可能产生不同的应力作用, 进而影响南海西部盆地的成盆作用, 因此, 本文设计印支地块强挤出、弱挤出作用模型进行研究。模型一为印支地块弱挤出作用模型, 模型二为印支地块强挤出作用模型。印支地块弱挤出作用模型中, 红河断裂带走滑运动过程中印支地块(图 3 块体 2)的旋转作用为主导, NW-SE 向的挤

出作用较弱; 印支地块强挤出作用模型中, 红河断裂带走滑运动过程中印支地块(图 3 块体 2)旋转作用和 NW-SE 向的挤出作用均占主导。模型装置由板块自由拼装组成的箱体, 箱体的底面、边界拼接样式可以自由变换, 以实现不同样式的构造变形模拟实验(图 3a)。将尺寸为 60 cm×40 cm×1 cm 的刚性基底切割成如图 3a 所示的块体 1 至块体 4, 其中块体 1 和 2 代表印支地块, 块体 3 代表南海北缘, 块体 4 代表南海南缘, F_R 为红河断裂带, F_{W1} 和 F_{W2} 为南海西缘断裂, F_S 为马江-黑水河断裂。块体 1 和块体 2 分别与 1 号和 2 号电机相连, 通过电机推动块体以实现断裂带的走滑作用。在模型右侧块体 3 和块体 4 之间设置一个“V”形开口, 用弹性基底将“V”上下两侧分别与块体 3 和块体 4 连接, 块体 3 和块体 4 分别与 3 号电机和 4 号电机相连, 通过

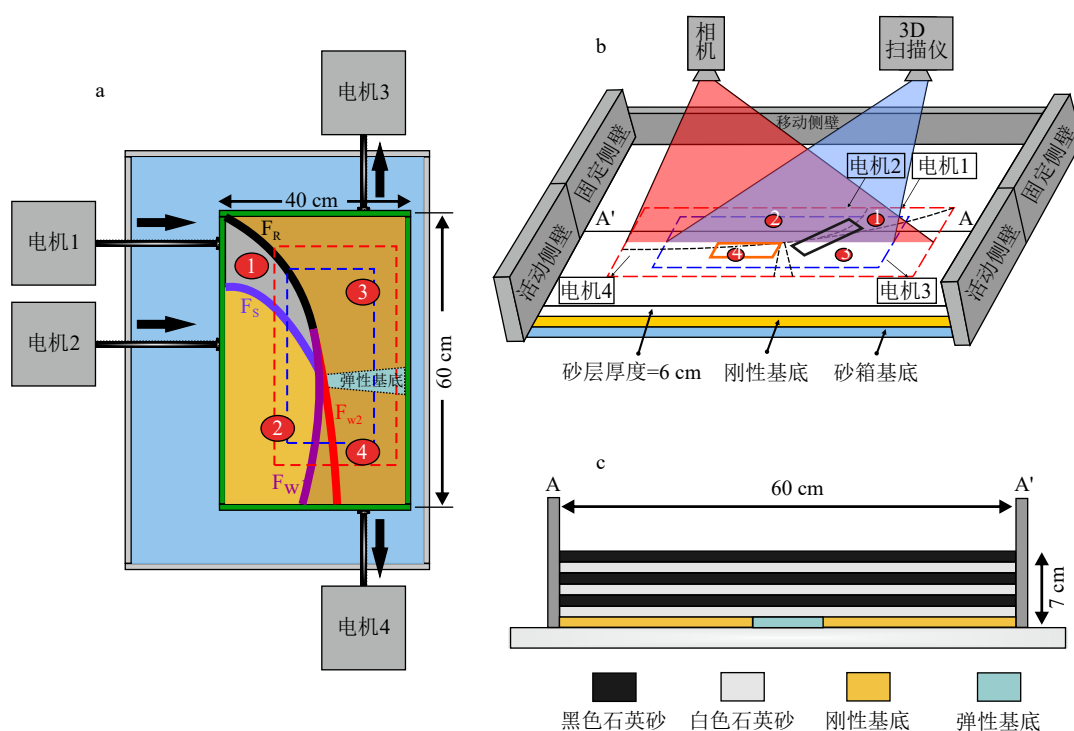


图 3 实验设计

a: 模型基底设计图(顶视图; 数字 1 和 2 为印支地块, 3 为南海北缘, 4 为南海南缘; F_R 为红河断裂带, F_{W1} 和 F_{W2} 为南海西缘断裂, F_S 为马江-黑水河断裂); b: 模型立体图(图 3a 顺时针旋转 180° 的立体效果; 黑色实线框平行短边方向为实验莺歌海盆地的剖面切割方向, 橙色实线框平行短边方向为实验中建南盆地的剖面切割方向; 块体位置与电机位置对应于 a 图); c: 模型剖面图(位置见图 3b 中 AA')。红色虚线框为数字散斑计算区域, 蓝色虚线框为 3D 扫描区域。

Fig.3 The experimental design diagram

a: Model substrate design diagram (top view. Numbers 1 and 2 show the Indochina Block, 3 shows the northern edge of the SCS, and 4 shows the southern edge of the SCS. F_R : the RRFZ; F_{W1} and F_{W2} : the western margin fault of the South China Sea; F_S : the Song Ma Fault); b: the cut-out view of the experimental apparatus (The stereoscopic effect by 180° clockwise rotation of Fig. 3a. The direction of the short parallel edges of the black solid line box is the direction of the section cut in the experimental Yinggehai Basin, and the direction of the short parallel edges of the green solid line box is the direction of the section cut in the experimental Zhongjiannan Basin. The block position and the motor position corresponds to Fig. 3a); c: model section (see Fig. 3b for AA' location). The red dashed boxes are the digital speckle calculation area, and the blue ones are the 3D scanning area.

两台电机进行拉伸模拟 SN 向伸展, 以实现南海海盆的打开。在块体各部分的相互接触位置填充玻璃微珠以更好地实现走滑运动。印支地块弱挤出作用模型(模型一)中, 红河断裂带 F_R 与南海西缘断裂 F_{W1} 相连; 印支地块强挤出作用模型(模型二)中, 红河断裂带的 F_R 与南海西缘断裂的 F_{W2} 相连。模型二相较于模型一更加突出了断裂带走滑过程中印支地块 NW-SN 向的挤出作用。

干燥石英砂的变形特征符合莫尔-库伦破裂准则, 其平均内摩擦角约为 30° , 黏结强度低, 是模拟地壳浅层岩石脆性变形的理想材料^[76-80], 已经被大量的构造物理模拟实验使用。本研究的实验根据相似性原理选用粒度为 $120\sim180\ \mu\text{m}$ 的不同颜色干燥石英砂模拟沉积地层(不同颜色的石英砂仅用来区分不同的实验层), 每层石英砂铺设厚度 $1\ \text{cm}$, 共计铺设厚度 $6\ \text{cm}$ (图 3c)。使用 PVC 泡沫板制作刚性基底, 选用具有特定拉张强度的硅胶制作弹性基底。具体实验参数见表 1。

2.2 实验加载

前人研究结果显示红河断裂带左旋走滑位移量集中在 $200\sim800\ \text{km}$, 本研究选择平均走滑位移量 $500\ \text{km}$ 进行研究。根据相似比 10^{-7} (表 1), 模型中 F_R 、 F_W (红河断裂带-南海西缘断裂带)走滑位移量设置为 $5\ \text{cm}$ 。以往研究表明马江-黑水河断裂活动时间早于红河断裂带^[81-84], 因此, 实验加载第一阶

段为 F_S 断裂带走滑运动, 电机 2 推动块体 2 以 $2\times10^{-3}\ \text{cm/s}$ 的速率运动, 位移量为 $1\ \text{cm}$ 。莺歌海盆地与中建南盆地的裂谷阶段发生在 $23\ \text{Ma}$ 以前, 红河断裂带在 $35\sim23\ \text{Ma}$ 期间发生左旋走滑作用, 南海西缘断裂在此期间表现为右旋走滑, 南海开始发生海底扩张, 本研究认为断裂带走滑性质差异是由于南海的扩张速率大于断裂带走滑速率造成的, 同时 $35\sim23\ \text{Ma}$ 红河断裂带走滑作用显著, 因此, 模型中设计南海扩张速率 $>F_R$ 、 F_W 速率 $>F_S$ 速率。实验加载第二阶段为实现南海西部断裂体系的走滑运动, 电机 1 推动块体 1 以 $4\times10^{-3}\ \text{cm/s}$ 的速率运动, 电机 2 推动块体 2 以 $2\times10^{-3}\ \text{cm/s}$ 的速率运动, 位移量分别为 $5\ \text{cm}$ 和 $4\ \text{cm}$, 同时加入了南海的 SN 向扩张作用, 电机 3 拉伸块体 3 以及电机 4 拉伸块体 4 均以 $6\times10^{-3}\ \text{cm/s}$ 的速率 SN 向伸展, 位移量为 $5\ \text{cm}$ 。实验参数设计见表 2。

2.3 实验数据分析

在实验过程中, 使用数字 CCD 相机间隔 $20\ \text{s}$ 拍摄俯视图像记录模型实验的演化过程, 运用数字散斑(digital speckle correlation method, DSCM)相关方法对实验表面变形进行计算, DSCM 系统中所用的数字 CCD 相机的空间分辨率为 6016×4016 像素, 高分辨率的数字散斑图像有利于分析断层传播以及盆地形成过程中的应变场。实验过程中使用 Surphaser 公司的 75USR 三维激光扫描系统在实验

表 1 实验材料及参数
Table 1 Experimental materials and parameters

材料和物理设置	实验参数	性质	相似比
PVC 泡沫板	抗压强度: $0.6\sim25.0\ \text{MPa}$	刚性	—
硅胶垫	拉张强度: $4.0\sim12.5\ \text{MPa}$	张性	—
石英砂	粒径: $120\sim180\ \mu\text{m}$	摩尔-库仑准则	—
玻璃微珠	粒径: $80\sim100\ \mu\text{m}$	摩尔-库仑准则	—
走滑位移量	$5\ \text{cm}$	—	10^{-7}
地层厚度	$6\ \text{cm}$	—	10^{-5}

表 2 实验参数设计
Table 2 Experimental parameters design

模型	F_R 、 F_W 位移量/cm	模型尺寸/cm	F_R 、 F_W 加载速率 /(cm/s)	F_S 加载速率 /(cm/s)	南海北缘 加载速率 /(cm/s)	南海南缘 加载速率 /(cm/s)
印支地块弱挤出模型	5	$60\times40\times7$	4×10^{-3}	2×10^{-3}	6×10^{-3}	6×10^{-3}
印支地块强挤出模型	5	$60\times40\times7$	4×10^{-3}	2×10^{-3}	6×10^{-3}	6×10^{-3}

加载过程中对模型进行扫描, 该系统对 0.25~2.5 m 半径范围内的物体具有极高的扫描精度, 通过将 3D 扫描数据进行阶段对比进而确定基底位置与表面断裂的位置关系。实验加载结束后, 用水浸湿干砂模型, 待砂体稳定变硬后, 根据研究需要分区域切割及拍照记录, 间隔 1 cm 切割一系列垂直断面, 明晰模型内部的构造特征。两组实验模型均切割 36 条剖面, 蓝色实线为莺歌海盆地构造剖面, 黄色实线为中建南盆地构造剖面。

3 实验结果

3.1 印支地块弱挤出作用模型

3.1.1 平面演化过程

模型一为印支地块弱挤出作用模型, 断裂带及盆地雏形演化过程见图 4, 红河断裂带由基底向上延伸在表面形成断层 F1 和 F2, 南海西缘断裂由基底向上延伸形成断层 F3 和 F5, 马江-黑水河断裂由基底向上延伸形成断层 F4, 莺歌海盆地雏形发育于 F2 和 F4 之间, 中建南盆地雏形发育于 F3 和 F5 之间。具体演化过程如下: 红河断裂带 NW 段向上延伸形成断层 F1(图 4a-b), F1 呈挤压状态(图 4c); 红河断裂带 SE 段向上延伸形成断层 F2(图 4e-f), 应变场上表现为变形集中于断层 F2 处(图 4g-h); 南海西缘断裂向上延伸形成断层 F3(图 4i-j), F1、F2 和 F3 在形成之初均为应力场变化最显著的区域; 随基底块体的旋转及断裂带走滑运动的持续, 当红河断裂带走滑位移量为 4.6 cm 时, F1 向模型的东侧运动, F2 和 F3 呈现近 SN 向延伸, 马江-黑水河断裂向上延伸形成断层 F4, F2 和 F4 之间相互叠接(图 4n), 模型表面的变形集中在断裂带上及断裂叠接区(图 4p); 南海西缘断裂拓展延伸形成断层 F5, 莺歌海盆地与中建南盆地的雏形形成(图 4r)。模型表面的断裂演化过程与基底断裂位置关系如图 5 所示, 莺歌海盆地表现为走滑-伸展作用, 中建南盆地内部表现为强烈的拉张作用(图 4s)。断裂带走滑产生的剪切应力以及印支地块旋转所产生的拉张应力形成了莺歌海盆地和中建南盆地, 南海的扩张扩大了盆地形成后的规模。

3.1.2 剖面特征

模型一的莺歌海盆地剖面中发育多种构造类型(图 6 左侧)。F2 和 F4 作为莺歌海盆地的边界断层控制着盆地雏形。走滑断层 F2 表现为一组负花状构造(剖面 36)。断层 F4 处形成一组小型地垒,

表现为一组正花状构造(剖面 28)。剖面 21 发育两个明显的花状构造且都由一条高角度的基底断层与多条走滑断层组合而呈现“Y”字形, 结构清晰并向下延伸于走滑基底面。剖面 15 中断层集中于红河断裂带所在的区域。断层 F2 在剖面上的展布数量自剖面 33 至剖面 15 逐渐增多, 显示红河断裂带的走滑作用在莺歌海盆地的形成过程中逐渐增强。红河断裂带的走滑运动提供了 NW 向剪切应力, 促使莺歌海盆地雏形形成, 马江-黑水河断裂主要为挤压作用下的一条边界断层。

模型一中建南盆地对应的剖面显示挤压和拉张应力场并存, 中建南盆地东侧为拉张应力场主导, 形成了小型地堑和多条正断层, 而西侧主要发育由挤压作用产生的逆断层(图 6 右侧)。在中建南盆地的北部, 发育多组地堑, 受 F3 走滑作用以及块体 SN 向伸展作用的影响, 地堑两侧断层呈现不对称的形态(图 6 剖面 11)。由于基底块体之间的相互接触使得 F5 处显示为挤压作用, 由此在剖面 6 到剖面 4 中可见正断层。剖面 1 与剖面 11 相同, 均发育地堑构造。南海西缘断裂带走滑、印支地块的旋转以及南海的扩张三者的共同作用使得中建南盆地内部产生了强烈的拉张应力, 最终导致盆地雏形的形成。

3.2 印支地块强挤出作用模型

3.2.1 平面演化过程

模型二为印支地块强挤出作用模型, 断裂带及盆地雏形演化过程如图 7 所示, 红河断裂带由基底向上延伸形成断层 F3 和 F4, 南海西缘断裂由基底向上延伸形成 F2 和 F5, 马江-黑水河断裂由基底向上延伸形成 F1。莺歌海盆地雏形发育于 F1、F3 和 F4 叠接区, 中建南盆地雏形发育在 F2 和 F5 叠接区。具体演化过程如下: 马江-黑水河断裂向上延伸形成断裂 F1(图 7a-b), F1 位于基底块体相互接触区, 表现为挤压特征(图 7c); F1 和 F2 虽相互连接, 但从图 9 的剖面结果上看, 两条断层具有不同的断层性质, 因此应属于两条不同的断层; 红河断裂带走滑位移量为 2 cm 时, F1 和 F3 呈近 NW 向延伸(图 7i-j), 模型表面的变形集中在 F1、F2 和 F3 处(图 7k-l); 随着印支地块的持续旋转, 红河断裂带在模型表面的延伸表现为断裂 F4, 南海西缘断裂在模型表面的延伸表现为断裂 F5, 中建南盆地的雏形出现(图 7m-n), 莺歌海盆地内部表现为走滑-伸展作用, 中建南盆地内部表现为拉张作用(图 7o), 实验表面的变形信息集中在断裂带和盆地成盆区(图 7p);

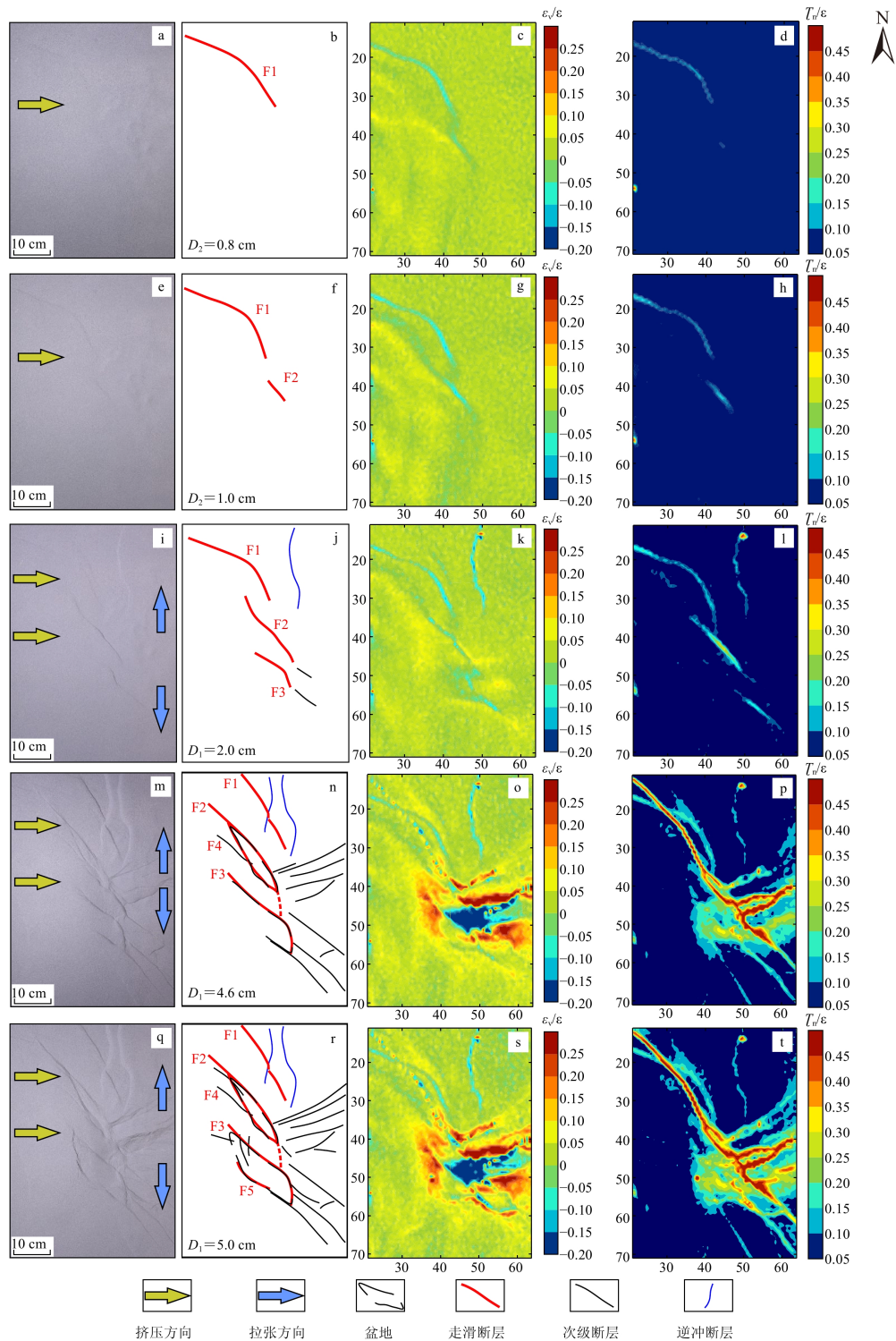


图 4 模型一平面演化

数字散斑区域见图 3b 红色虚线框。黄色箭头推动块体实现断裂带的走滑作用, 蓝色箭头拉张块体实现海盆打开。第 1 列: 实验图像; 第 2 列: 模型演化解释图; 第 3 列: 体应变 (ε_v), 红色和蓝色分别代表拉张和挤压, 颜色越深代表强度越高; 第 4 列: 最大剪应变 (T_v), 颜色从蓝色变为红色代表最大剪应变逐渐变大。 D_1 为电机 1 的位移量, D_2 为电机 2 的位移量。

Fig.4 Model 1 Vertical view (red dashed box in Fig. 3b for the DSCM (digital speckle correlation method) area)

Yellow arrows represent the push direction towards the block to generate the strike-slip, and blue arrows represent the tension of the block to mimicking the opening of the sea basin. The first column: experimental diagram; the second column: model evolution interpretation diagram; the third column: volume strain (ε_v), red and blue represent tension and compression respectively, the darker the color, the higher the strength; the fourth column: maximum shear strain (T_v), change in color from blue to red represents a gradual increase in maximum shear strain. D_1 is the displacement of motor 1 and D_2 is the displacement of motor 2.

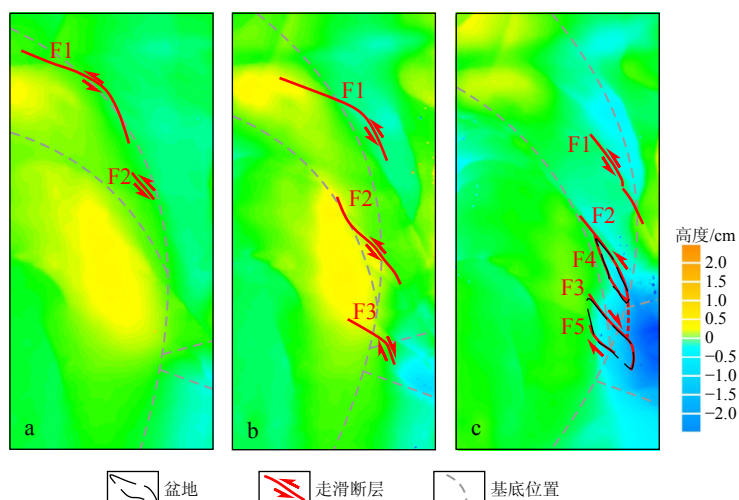


图 5 印支地块弱挤出作用模型 3D 扫描结果
扫描区域见图 3b 蓝色虚线框。

a: 断层 F2 出现时基底断裂位置关系, b: F3 出现时基底断裂位置关系, c: 实验加载结束时盆地与基底断裂位置关系。

Fig.5 3D scanning results of the weak extrusion model of the Indochina Block

The blue dashed box in Fig. 3b.

a: The basement fault location relationship at the time of the appearance of fault F2, b: the basement fault location relationship at the time of the appearance of F3, c: the location relationship between basin and basement fault at the end of experimental loading.

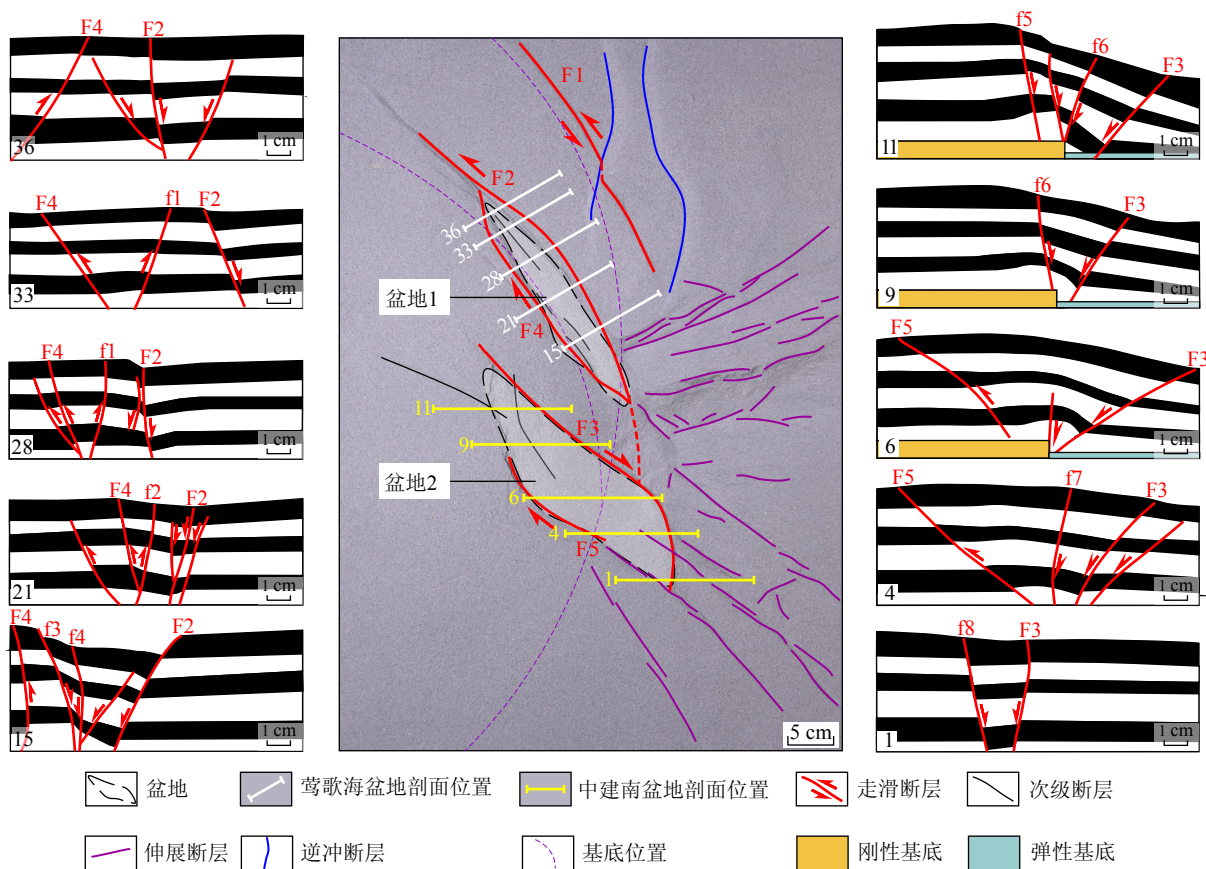


图 6 模型一的盆地剖面构造特征

盆地 1 代表莺歌海盆地, 盆地 2 代表中建南盆地。剖面中“F”断层与模型表面断层对应, “f”断层为次级断层或伸展断层, 剖面图例同图 3c。

Fig.6 Diagram of the internal vertical section of Model 1

Basin 1 represents the Yinggehai Basin and Basin 2 represents the Zhongjiannan Basin. F indicates major faults in the section correspond to those at the model surface, and f signifies secondary or extension faults. For the sectional illustration please see the legend to Fig. 3c.

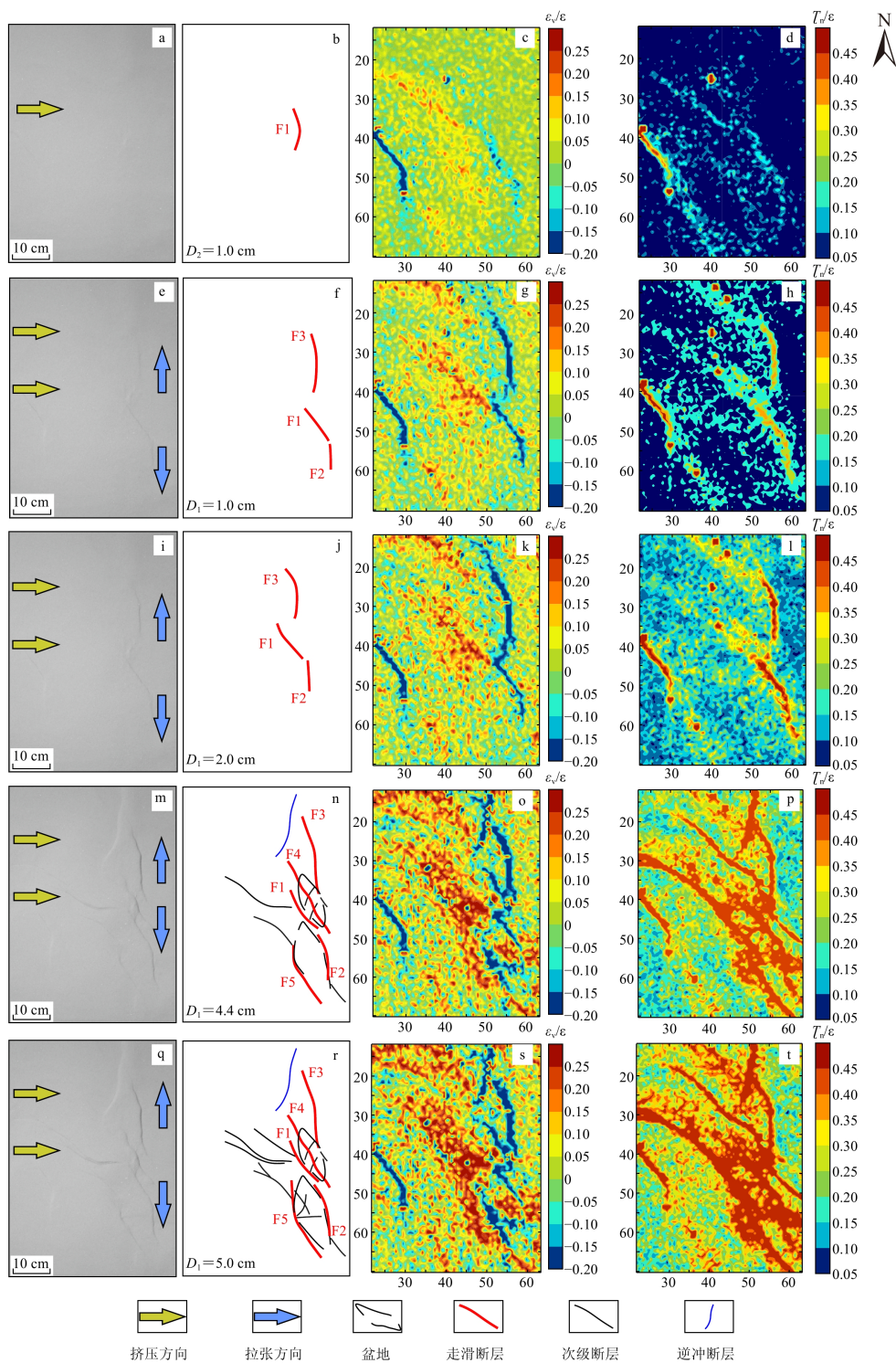


图 7 模型二平面演化

数字散斑区域见图 3b 红色虚线框。黄色箭头推动块体实现断裂带的走滑作用, 蓝色箭头拉张块体实现海盆打开。第 1 列: 实验图像; 第 2 列: 模型演化解释图; 第 3 列: 体应变(ϵ_v), 红色和蓝色分别代表拉张和挤压, 颜色越深代表强度越高; 第 4 列: 最大剪应变(T_n), 颜色从蓝色变为红色代表最大剪应变逐渐变大。 D_1 为电机 1 的位移量, D_2 为电机 2 的位移量。

Fig.7 Vertical view of Model 2 (the red dashed box in Fig. 3b is the DSCM (digital speckle correlation method) area)

Yellow arrows represent the push to the block to generate the strike-slip of the fault zone, and blue arrows represent the tension of the block to realize the opening of the sea basin. The first column: experimental diagram; the second column: model evolution interpretation diagram; the third column: volume strain (ϵ_v), red and blue represent tension and compression respectively, the darker the color, the higher the strength; the fourth column: maximum shear strain (T_n), change in color from blue to red represents a gradual increase in maximum shear strain. D_1 is the displacement of motor 1 and D_2 is the displacement of motor 2.

F_R 、 F_W 、 F_S 走滑位移量均达到 5 cm 时, 莺歌海盆地和中建南盆地的雏形形成。与模型一相同, 在盆地的形成阶段模型的应变场信息变化都集中在断裂带和盆地的成盆区(图 4o-p, 图 7o-p)。模型表面的断裂演化过程与基底断裂位置关系如图 8 所示, 与模型一不同的是, 模型二的中建南盆地形成位置更靠近基底南海西缘断裂的东侧且盆地更近 SN 向展布, 这与真实的地质情况更相符(图 8)。

3.2.2 剖面特征

模型二剖面特征显示莺歌海盆地发育负花状等构造类型(图 9 左侧)。断层 F1 在剖面上表现为逆断层性质, 断层 F3 和 F4 为负花状构造和正断层(剖面 30 至剖面 19), 该组负花状构造和正断层的位置对应于模型基底断裂红河断裂带的位置。模型二的莺歌海盆地构造格架与模型一类似, 红河断裂带走滑产生的 NW 向剪切应力, 形成了莺歌海盆地的雏形, 莺歌海盆地的发育位置由红河断裂带和马江-黑水河断裂所围限。

模型二中建南盆地对应的剖面中同样显示出挤压应力和拉张应力并存(图 9)。走滑作用控制的基底块体相互作用使得断层 F5 处于挤压环境, 剖面中发育逆断层(图 9 中剖面 17 至剖面 7)。受断层 F2 的走滑活动及南海打开对应的伸展作用共同影响, 盆地内发育地堑和正断层(图 9 中剖面 14), 盆地中部发育一组负花状构造(图 9 中剖面 12)。

模型二反映出中建南盆地受南海西缘断裂带的走滑与南海扩张两大控制作用, 断裂带的走滑作用产生的剪切应力奠定了盆地的发展格局, 南海扩张所产生的拉张作用扩大了盆地的规模。

对比两组模型实验, 印支地块的强挤出作用模型与弱挤出作用模型均出现了莺歌海盆地和中建南盆地。而实际研究显示莺歌海盆地位于红河断裂带西侧呈 NW-SE 向展布, 中建南盆地位于南海西缘断裂带东侧呈近 SN 向展布。两组实验模型模拟的莺歌海盆地与实际情况相符, 但模型二显示的中建南盆地为近 SN 向, 且在基底南海西缘断裂带的东侧(图 9), 本研究认为印支地块强挤出作用模型更符合真实地质情况。

4 讨论

4.1 红河断裂带对盆地成盆的影响

莺歌海盆地的成因机制仍存在一些争议, 多数学者认为莺歌海盆地是一个新生代以来受板块活动、南海扩张等多因素影响形成的走滑伸展盆地^[25, 85-87]。Tapponnier 利用刚体挤入模型模拟了印藏碰撞引起印支地块向 SE 方向挤出之后, 红河断裂带以及青藏高原以东的走滑断裂带的走滑性质被越来越多的学者研究^[7]。茹克根据莺歌海盆地的

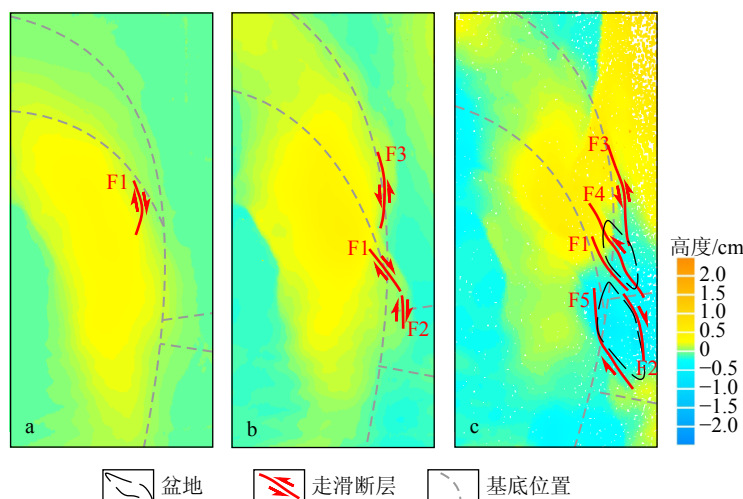


图 8 印支地块强挤出作用模型 3D 扫描结果

3D 扫描区域见图 3b 蓝色虚线框。

a: 断层 F1 出现时基底断裂位置关系, b: F3 出现时基底断裂位置关系, c: 实验加载结束时盆地与基底断裂位置关系。

Fig.8 3D scanning results of the strong extrusion model of the Indochina Block

Blue dashed box in Fig. 3b for the 3D scan area.

a: The basement fault location at the time of the appearance of fault F1, b: the basement fault location at the time of the appearance of F3, c: the location relationship between basin and basement fault at the end of experimental loading.

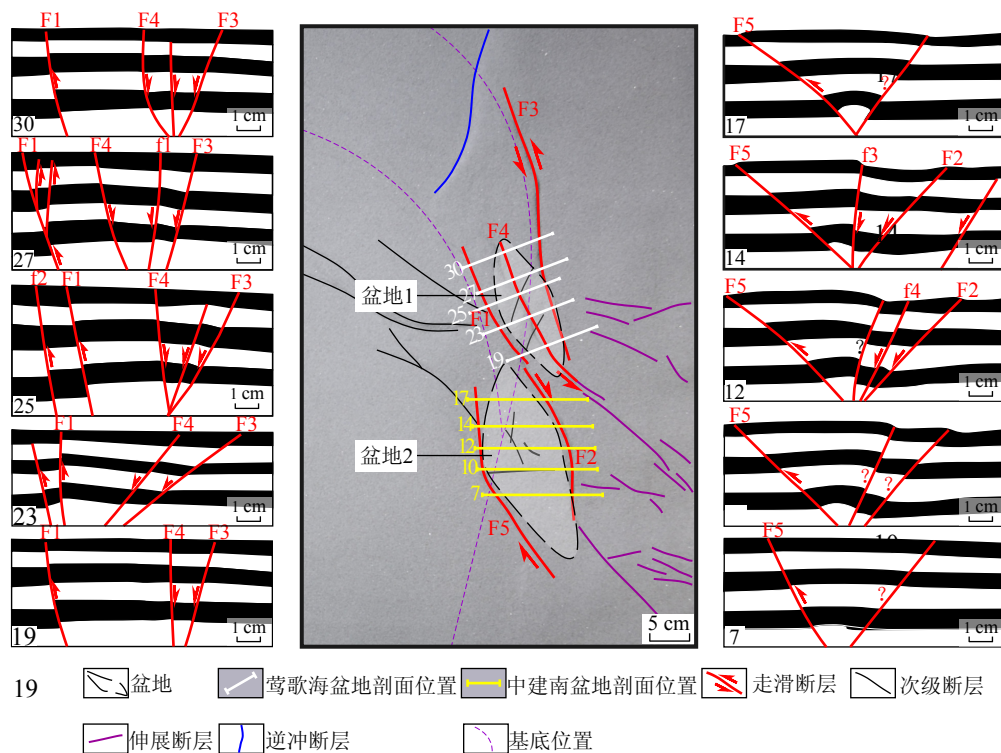


图9 模型二盆地剖面特征

盆地1代表莺歌海盆地,盆地2代表中建南盆地。剖面中“F”断层与模型表面断层对应,“f”断层为次级断层或伸展断层,剖面图例同图3c。

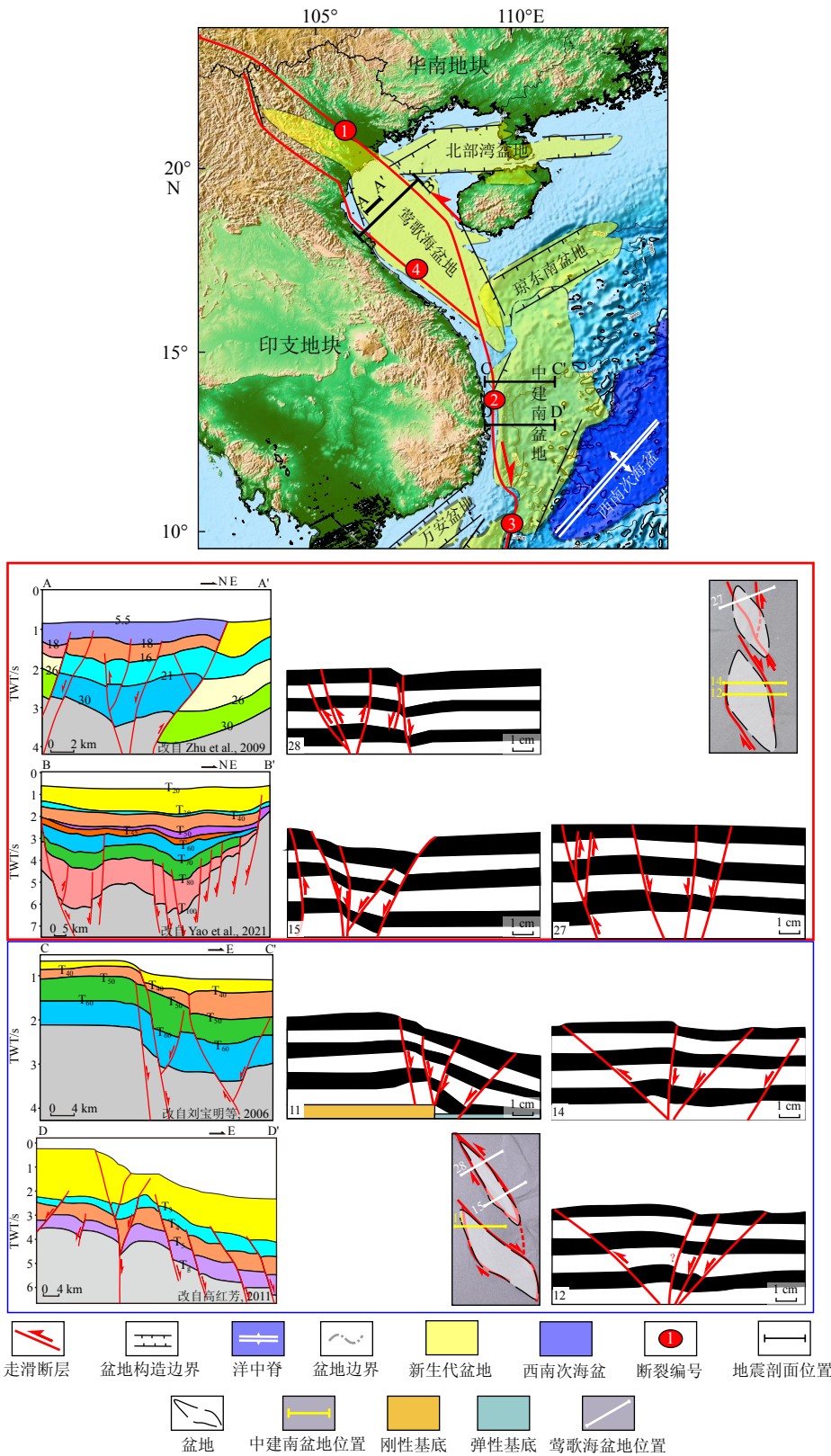
Fig.9 Diagram of the internal vertical section of Model 2

Basin 1: the Yinggehai Basin, Basin 2: the Zhongjiannan Basin. F marks the major faults in the section correspond to those on the model surface, and f denotes the secondary or extension faults. For the sectional illustration please see the legend to Fig. 3c.

发育特点及其所处的大地构造环境认为莺歌海盆地的形成主要受红河断裂带的走向滑动和印支地块顺时针旋转所控制^[88]。孙家振等认为在莺歌海盆地的裂陷阶段经历了两次走滑-伸展作用,这两次走滑伸展作用均与红河断裂带的重新活动有关,红河断裂带的活动改变了盆地的应力模式,控制盆地内部的构造类型与沉积作用^[89]。丁中一等用地震剖面的地层资料代替单井的沉积柱地层资料进行压实校正从而恢复了盆地的热沉降史和埋藏史,将计算得到的热沉降史与 McKenzie 的理论曲线进行对比,结果表明莺歌海盆地是符合 McKenzie 模型的拉张盆地^[90-91],而红河断裂对于莺歌海盆地形成的影响程度需要进一步研究,并且认为在莺歌海盆地的裂谷作用停止后还发生过两次拉张事件,这两次拉张事件发生的时间与南海发生扩张的时间基本吻合,南海大陆边缘盆地构造演化与南海扩张有着良好的对应关系^[92],莺歌海盆地是受南海扩张事件影响的拉张-伸展-裂陷盆地。印度-澳大利亚正北的运动与太平洋板块的快速俯冲阻碍了深部物质向 SE 方向的运动,导致深部地幔物质在南海地区上涌,南海的扩张使盆地处于热沉降阶段,莺歌

海盆地的沉积沉降中心迅速向 SE 方向移动。Li 等认为红河断裂带大规模的左旋走滑运动产生的剪应力以及印支地块的顺时针旋转产生的伸展作用使地壳变薄从而控制了早期莺歌海盆地的形成^[12]。本研究将实际盆地的地震剖面与实验模型的剖面进行对比,在莺歌海盆地实际地震剖面与实验剖面中出现正花状构造(图10剖面28),随着红河断裂带走滑控盆作用的增加出现盆地中部和西部断层数量减少以及东部断层增多与活跃(图10剖面15、27),实验结果表明莺歌海盆地的形成是受红河断裂带的走滑作用控制,印支地块向 SE 方向顺时针旋转逃逸对莺歌海地区产生了拉张应力,在与红河断裂带左旋走滑运动产生的剪切应力的相互叠加下,莺歌海盆地在左行应力场下沿 NW 向发育成盆,其次,马江-黑水河断裂的走滑作用对于早期盆地的形成有一定的作用。

中建南盆地位于南海西部的洋陆过渡带上,其北接莺歌海盆地、琼东南盆地和西沙隆起,南至万安盆地,东侧为西南次海盆,西侧为南海西缘断裂和印支半岛,它形成于南海西缘断裂的走滑运动时期和南海裂谷期。Savva 等认为中建南盆地的形成



演化经历了弥散伸展阶段、减薄阶段、局部剥出阶段以及盆地热沉降的后裂谷凹陷阶段,同时盆地的演化与南海的开放密切相关^[93],南海的伸展作用影响了中建南盆地内部。Fyhn 等认为中建南盆地在裂谷期主要受南海西缘断裂的走滑与南海扩张两大因素的影响,南海西缘断裂的走滑主要影响中建南盆地西部的裂谷作用,在中建南盆地的东部,NE 向伸展断裂的形成表明南海扩张的拉张作用控制了裂谷期的伸展^[94]。Nguyen 认为在中建南盆地的东部显示出与早期裂陷作用同时期的 NW-SE 向伸展的证据^[95],表明部分伸展是由于其他因素如古南海的俯冲拖曳引起^[96]。将中建南盆地的实际地震剖面与实验结果对比,南海西缘断裂带表现为负花状构造(图 10 剖面 11、图 10 剖面 14、12),实验结果证实了中建南盆地的形成受到南海西缘断裂的走滑与南海扩张两大因素的影响,但中建南盆地成盆位置与印支地块的旋转挤出密切相关。中建南盆地是在印欧板块碰撞、太平洋板块运动期间,由于南海西缘断裂的走滑活动使得断裂和断陷加剧、扩大,中建南盆地在此基础上沉积发育,奠定了其菱形展布的构造格局,南海的扩张导致中建南盆地大幅度沉降,范围迅速扩大,从而形成了大型的盆地。

莺歌海盆地和中建南盆地处于红河断裂带与南海海盆的交接位置,南海的海底扩张对于盆地形成的影响作用不可忽视。红河断裂带和南海西缘断裂带作为同一断裂体系在同一时期表现出相反

的运动状态,可能与南海扩张速度有关,在南海打开期间,红河断裂带东侧处于 SN 向的伸展环境中,且 SN 向伸展速率大于红河断裂带的走滑速率,南海北缘(图 3a 中的块体 3)向北的伸展速率较快,使红河断裂带表现为左旋走滑,而南海南缘向南(图 3a 中的块体 4)的拉张速率较快,使南海西缘断裂表现为右旋走滑。本研究所设计的实验针对该区实际地质情况进行了模型简化,未将成盆过程的热效应考虑其中,模型中模拟的演化过程主要集中在脆性上地壳。地质历史时期漫长,运用一个简单的物理模拟模型去反演地质历史中的某一段构造运动过程的全部细节是极为困难的。尽管对研究区进行了地质简化,模型结果还是有助于认识红河断裂带对于莺歌海盆地和中建南盆地形成的影响,进一步理解南海西部盆地成因机制问题。

4.2 新生代以来南海西部盆地构造演化过程

南海西部海域是南海构造演化最为复杂的地区之一,在南海西部广泛发育 NW 向、近 SN 向和 NE 向三组深大断裂。红河断裂带及其在海域的延伸部分作为南海洋盆的西部边界控制着南海西部盆地的发展演化。始新世以来印度板块和欧亚板块发生了全面碰撞,受西卫运动的影响,南海西部受到近 EW 向的挤压作用。渐新世初期古南海向南的俯冲以及南海西北次海盆的扩张在南海西部地区产生了强烈的拉张作用,同时由于断裂带左旋和右旋走滑运动的控制,南海西部盆地进入了裂陷

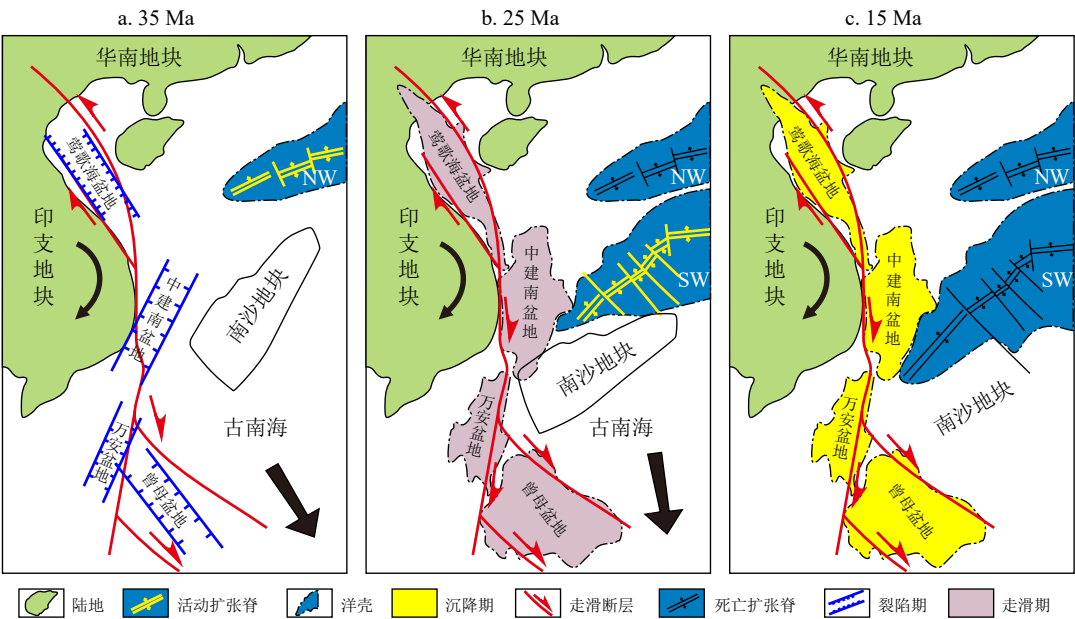


图 11 南海西部区域构造演化示意图^[39, 69, 97]

Fig.11 Tectonic evolution of the western part of the SCS^[39, 69, 97]

期,南沙地块沿西部的红河断裂体系向南滑移(图11a);渐新世—早中新世,随着印支地块持续向欧亚板块楔入以及太平洋板块向欧亚板块的俯冲作用,南海扩张进入了主要的发展阶段,随着南海的扩张,南沙地块进一步向南发生漂移,同时古南海继续快速萎缩,南海西缘断裂体系进入了强烈活动期,南海西部盆地受到强烈的走滑拉分作用(图11b);中中新世—晚中新世,澳大利亚板块向西北加速运动以及南海东部菲律宾海板块的俯冲对东南亚地区产生了挤压应力,南海海盆停止扩张,约23 Ma古南海向南完全俯冲消亡于婆罗洲之下,受南海万安运动的影响,南海西部盆地伸展作用停滞,处于区域整体沉降期,盆地基本不再受控于构造变动(图11c)。本研究模型根据渐新世—早中新世南海西部的区域动力学背景设计,这一时期红河断裂带—南海西缘断裂带的走滑运动通过电机1和电机2推动块体1和块体2实现,南海海盆扩张在南海北缘产生的伸展作用通过电机3拉伸块体3实现,古南海向南漂移以及南沙地块向南发生漂移的过程通过电机4拉伸块体4实现(图3a),模拟实验过程与实际地质过程具有一定的相似性,因此实验结果也较为可靠。

本研究的实验结果验证了南海西部盆地形成的重要影响因素来源于板块之间的相互作用。南海西缘断裂体系的走滑运动控制了南海西部盆地展布与构造格局,而南海扩张作为新生代以来东南亚地区一次重要的构造事件影响了南海西部盆地的形成规模。

5 结论

(1)莺歌海盆地受红河断裂带的走滑作用控制,印支地块向SE方向顺时针旋转逃逸提供张应力,在红河断裂带左旋走滑运动产生的剪切应力叠加下,莺歌海盆地在左行应力场下沿NW向发育成盆,马江-黑水河断裂的走滑作用对于早期盆地形成有一定的作用。

(2)中建南盆地的形成受到红河断裂带-南海西缘断裂的走滑体系及南海扩张作用两大因素的影响,中建南盆地成盆位置与印支地块的旋转挤出密切相关。

(3)红河断裂带的走滑运动所产生的NW向剪切应力控制了莺歌海盆地和中建南盆地雏形,而南海打开所代表的近SN向伸展应力使盆地规模增大,印支地块NW-SN向的挤出决定了盆地展布方向。

致谢: 在实验过程中得到陈欣和吕春晓的帮助,在此表示衷心感谢!

参考文献 (References)

- [1] 张连生, 钟大赉. 从红河剪切带走滑运动看东亚大陆新生代构造[J]. 地质科学, 1996, 31(4): 327-341. [ZHANG Liansheng, ZHONG Dalai. The Red River strike-slip shear zone and Cenozoic tectonics of East Asia Continent[J]. Chinese Journal of Geology, 1996, 31(4): 327-341.]
- [2] Molnar P, Fitch T J, Wu F T. Fault plane solutions of shallow earthquakes and contemporary tectonics in Asia[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1973, 19(2): 101-112.
- [3] Allègre C J, Courtillot V, Tapponnier P, et al. Structure and evolution of the Himalaya-Tibet orogenic belt[J]. *Nature*, 1984, 307(5946): 17-22.
- [4] Chang C F, Chen N S, Coward M P, et al. Preliminary conclusions of the Royal Society and Academia Sinica 1985 Geotraverse of Tibet[J]. *Nature*, 1986, 323(6088): 501-507.
- [5] Peltzer G, Tapponnier P. Formation and evolution of strike-slip faults, rifts, and basins during the India-Asia Collision: an experimental approach[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1988, 93(B12): 15085-15117.
- [6] Tapponnier P, Molnar P. Slip-line field theory and large-scale continental tectonics[J]. *Nature*, 1976, 264(5584): 319-324.
- [7] Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain A Y, et al. Propagating extrusion tectonics in Asia: new insights from simple experiments with plasticine[J]. *Geology*, 1982, 10(12): 611-616.
- [8] Armijo R, Tapponnier P, Han T L. Late Cenozoic right-lateral strike-slip faulting in southern Tibet[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1989, 94(B3): 2787-2838.
- [9] Tapponnier P, Molnar P. Active faulting and tectonics in China[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1977, 82(20): 2905-2930.
- [10] Tapponnier P, Molnar P. Active faulting and Cenozoic tectonics of the Tien Shan, Mongolia, and Baykal Regions[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1979, 84(B7): 3425-3459.
- [11] Huchon P, Le Pichon X, Rangin C. Indochina Peninsula and the collision of India and Eurasia[J]. *Geology*, 1994, 22(1): 27-30.
- [12] Li L, Lu S P, Gao R, et al. Seismic reflection imaging of a deep-penetrating red river fault in the Yinggehai Basin, northwest of the South China Sea[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(19): e2023GL104598.
- [13] Zhou D, Ru K, Chen H Z. Kinematics of Cenozoic extension on the South China Sea continental margin and its implications for the tectonic evolution of the region[J]. *Tectonophysics*, 1995, 251(1-4): 161-177.
- [14] Briais A, Patriat P, Tapponnier P. Updated interpretation of magnetic anomalies and seafloor spreading stages in the South China Sea: implications for the tertiary tectonics of southeast Asia[J]. *Journal of Geo-*

- physical Research:Solid Earth, 1993, 98(B4): 6299-6328.
- [15] Gilley L D, Harrison T M, Leloup P H, et al. Direct dating of left-lateral deformation along the Red River shear zone, China and Vietnam[J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 2003, 108(B2): 2127.
- [16] Zhong D L, Tapponnier P, Wu H W, et al. Large-scale strike slip fault: The major structure of intracontinental deformation after collision[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1990, 35(4): 304-309.
- [17] Wang P L, Lo C H, Lee T Y, et al. Thermochronological evidence for the movement of the Ailao Shan—Red River shear zone: A perspective from Vietnam[J]. *Geology*, 1998, 26(10): 887-890.
- [18] Zhang L S, Schärer U. Age and origin of magmatism along the Cenozoic Red River shear belt, China[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1999, 134(1): 67-85.
- [19] Schärer U, Zhang L S, Tapponnier P. Duration of strike-slip movements in large shear zones: the Red River belt, China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1994, 126(4): 379-397.
- [20] 曹淑云, 刘俊来, Leiss B, 等. 哀牢山-红河剪切带左行走滑作用起始时间约束: 点苍山高温糜棱岩的显微构造与热年代学证据 [J]. *地质学报*, 2009, 83(10): 1388-1400. [CAO Shuyun, LIU Junlai, Leiss B, et al. Timing of initiation of left-lateral slip along the Ailao Shan-Red River shear zone: microstructural, texture and Thermochronological evidence from high temperature Mylonites in Diancang Shan, SW China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(10): 1388-1400.]
- [21] 孙桂华, 彭学超, 黄永健. 红河断裂带莺歌海段地质构造特征 [J]. *地质学报*, 2013, 87(2): 154-166. [SUN Guihua, PENG Xuechao, HUANG Yongjian. Geological structure characteristics of Red River Fault Zone in the Yinggehai Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(2): 154-166.]
- [22] Allen C R, Gillespie A R, Han Y, et al. Red River and associated faults, Yunnan Province, China: Quaternary geology, slip rates, and seismic hazard[J]. *GSA Bulletin*, 1984, 95(6): 686-700.
- [23] Rangin C, Klein M, Roques D, et al. The Red River fault system in the Tonkin Gulf, Vietnam[J]. *Tectonophysics*, 1995, 243(3-4): 209-222.
- [24] Replumaz A, Lacassin R, Tapponnier P, et al. Large river offsets and Plio-Quaternary dextral slip rate on the Red River fault (Yunnan, China)[J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 2001, 106(B1): 819-836.
- [25] Sun Z, Zhou D, Zhong Z H, et al. Experimental evidence for the dynamics of the formation of the Yinggehai Basin, NW South China Sea[J]. *Tectonophysics*, 2003, 372(1-2): 41-58.
- [26] Schoenbohm L M, Burchfiel B C, Chen L Z, et al. Miocene to present activity along the Red River fault, China, in the context of continental extrusion, upper-crustal rotation, and lower-crustal flow[J]. *GSA Bulletin*, 2006, 118(5-6): 672-688.
- [27] Tapponnier P, Peltzer G, Armijo R. On the mechanics of the collision between India and Asia[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1986, 19(1): 113-157.
- [28] Leloup P H, Lacassin R, Tapponnier P, et al. The Ailao Shan—Red River shear zone (Yunnan, China), Tertiary transform boundary of Indochina[J]. *Tectonophysics*, 1995, 251(1-4): 3-10,13-84.
- [29] 任纪舜, 金小赤. 红河断裂的新观察 [J]. *地质论评*, 1996, 42(5): 439-442. [REN Jishun, JIN Xiaochi. New observations of the Red River Fault[J]. *Geological Review*, 1996, 42(5): 439-442.]
- [30] Leloup P H, Arnaud N, Lacassin R, et al. New constraints on the structure, thermochronology, and timing of the Ailao Shan—Red River shear zone, SE Asia[J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 2001, 106(B4): 6683-6732.
- [31] Leloup P H, Tapponnier P, Lacassin R, et al. Discussion on the role of the Red River shear zone, Yunnan and Vietnam, in the continental extrusion of SE Asia *Journal*, Vol. 163, 2006, 1025-1036[J]. *Journal of the Geological Society*, 2007, 164(6): 1253-1260.
- [32] Mazur S, Green C, Stewart M G, et al. Displacement along the Red River Fault constrained by extension estimates and plate reconstructions[J]. *Tectonics*, 2012, 31(5): TC5008.
- [33] 姚伯初, 曾维军, 陈艺中, 等. 南海西沙海槽, 一条古缝合线 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1994, 14(1): 1-10. [YAO Bochu, ZENG Weijun, CHEN Yizhong, et al. Xisha trough of South China Sea—an ancient suture[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1994, 14(1): 1-10.]
- [34] 刘海龄, 姚永坚, 沈宝云, 等. 南海西缘结合带的贯通性 [J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2015, 40(4): 615-632. [LIU Hailing, YAO Yongjian, SHEN Baoyun, et al. On linkage of western boundary faults of the South China Sea[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2015, 40(4): 615-632.]
- [35] 万玲, 姚伯初, 吴能友. 红河断裂带入海后的延伸及其构造意义 [J]. *南海地质研究*, 2000(12): 22-32. [WAN Ling, YAO Bochu, WU Nengyou. The extending of Honghe Faults in the South China Sea and its tectonic significance[J]. *Geological Research of South China Sea*, 2000(12): 22-32.]
- [36] Tapponnier P, Lacassin R, Leloup P H, et al. The Ailao Shan/Red River metamorphic belt: tertiary left-lateral shear between Indochina and South China[J]. *Nature*, 1990, 343(6257): 431-437.
- [37] 姚伯初, 万玲, 吴能友. 大南海地区新生代板块构造活动 [J]. *中国地质*, 2004, 31(2): 113-122. [YAO Bochu, WAN Ling, WU Nengyou. Cenozoic plate tectonic activities in the Great South China Sea area[J]. *Geology in China*, 2004, 31(2): 113-122.]
- [38] 刘宝明, 夏斌, 李绪宣, 等. 红河断裂带东南的延伸及其构造演化意义 [J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2006, 36(10): 914-924. [LIU Baoming, XIA Bing, LI Xuxuan, et al. Southeastern extension of the Red River fault zone (RRFZ) and its tectonic evolution significance in western South China Sea[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2006, 49(8): 839-850.]
- [39] 安慧婷, 李三忠, 索艳慧, 等. 南海西部新生代控盆断裂及盆地群成因 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(6): 95-111. [AN Huiting, LI Sanzhong, SUO Yanhui, et al. Basin-controlling faults and Formation mechanism of the Cenozoic Basin groups in the western South China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2012, 32(6): 95-111.]
- [40] 雷超. 南海北部莺歌海—琼东南盆地新生代构造变形格局及其演化过程分析 [D]. 中国地质大学博士学位论文, 2012. [LEI Chao. Struc-

- ture and evolution of Yinggehai and Qiongdongnan Basins, South China Sea: implications for Cenozoic Tectonics in Southeast Asia. Doctor Dissertation of China University of Geosciences, 2012.]
- [41] 钟志洪, 王良书, 夏斌, 等. 莺歌海盆地成因及其大地构造意义 [J]. *地质学报*, 2004, 78(3): 302-309. [ZHONG Zhihong, WANG Liangshu, XIA Bin, et al. The dynamics of Yinggehai Basin Formation and its tectonic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(3): 302-309.]
- [42] 王伟平, 姚永坚, 蔡周荣, 等. 中建南盆地后扩张期 T_5 和 T_3 不整合面的发育特征及对南海科学钻探的意义 [J]. *地质学报*, 2022, 96(8): 2822-2832. [WANG Weiping, YAO Yongjian, CAI Zhouong, et al. Characteristics of unconformity T_5 and T_3 in the Zhongjiannan Basin and their significance for scientific drilling in the South China Sea during the post-spreading Period[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, 96(8): 2822-2832.]
- [43] 高红芳, 陈玲. 南海西部中建南盆地构造格架及形成机制分析 [J]. *石油与天然气地质*, 2006, 27(4): 512-516. [GAO Hongfang, CHEN Ling. An analysis of structural framework and Formation mechanism of Zhongjiannan Basin in the west of South China Sea[J]. *Oil & Gas Geology*, 2006, 27(4): 512-516.]
- [44] 陈玲. 中建南盆地局部构造特征 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28(5): 69-75. [CHEN Ling. Analysis of local tectonic characters of Zhongjiannan Basin in South China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2008, 28(5): 69-75.]
- [45] 高红芳, 王衍棠, 郭丽华. 南海西部中建南盆地油气地质条件和勘探前景分析 [J]. *中国地质*, 2007, 34(4): 592-598. [GAO Hongfang, WANG Yantang, GUO Lihua. Petroleum geological conditions and prospects in the Zhongjiannan Basin in the western South China Sea[J]. *Geology in China*, 2007, 34(4): 592-598.]
- [46] Liu H, Luan X W, Guo L L, et al. Fault distribution and Formation mechanism of a magnetic quiet zone in the northern South China Sea[J]. *Geological Journal*, 2016, 51(S1): 331-345.
- [47] Dooley T, McClay K. Analog modeling of pull-apart basins[J]. *AAPG Bulletin*, 1997, 81(11): 1804-1826.
- [48] Sims D, Ferrill D A, Stamatakis J A. Role of a ductile décollement in the development of pull-apart basins: Experimental results and natural examples[J]. *Journal of Structural Geology*, 1999, 21(5): 533-554.
- [49] Sun Z, Zhou D, Zhong Z H, et al. Research on the dynamics of the South China Sea opening: Evidence from analogue modeling[J]. *Science in China Series D:Earth Sciences*, 2006, 49(10): 1053-1069.
- [50] Wu J E, McClay K, Whitehouse P, et al. 4D analogue modelling of transtensional pull-apart basins[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26(8): 1608-1623.
- [51] Ding W W, Li J B. Propagated rifting in the Southwest Sub-Basin, South China Sea: insights from analogue modelling[J]. *Journal of Geodynamics*, 2016, 100: 71-86.
- [52] 李三忠, 索艳慧, 刘鑫, 等. 南海的盆地群与盆地动力学 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(6): 55-78. [LI Sanzhong, SUO Yanhui, LIU Xin, et al. Basin dynamics and Basin groups of the South China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2012, 32(6): 55-78.]
- [53] Taylor B, Hayes D E. The tectonic evolution of the South China Basin[M]//Hayes D E. The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands. Washington: American Geophysical Union, 1980: 89-104.
- [54] Li S Z, Suo Y H, Li X Y, et al. Mesozoic tectono-magmatic response in the East Asian ocean-continent connection zone to subduction of the Paleo-Pacific Plate[J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 192: 91-137.
- [55] Hui G G, Li S Z, Guo L L, et al. A review of geohazards on the northern continental margin of the South China Sea[J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 220: 103733.
- [56] 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.
- [57] Lee T Y, Lawver L A. Cenozoic plate reconstruction of Southeast Asia[J]. *Tectonophysics*, 1995, 251(1-4): 85-138.
- [58] 徐旭辉, 高长林, 黄泽光, 等. 中国盆地形成的三大活动构造历史阶段 [J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(2): 155-162. [XU Xuhui, GAO Changlin, HUANG Zeguang, et al. Three stages of tectonic movements in Formation of petroliferous basins in China[J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(2): 155-162.]
- [59] Pigott J D, Ru K. Basin superposition on the northern margin of the South China Sea[J]. *Tectonophysics*, 1994, 235(1-2): 27-50.
- [60] Morley C K. A tectonic model for the Tertiary evolution of strike-slip faults and rift basins in SE Asia[J]. *Tectonophysics*, 2002, 347(4): 189-215.
- [61] Lei C, Ren J Y. Hyper-extended rift systems in the Xisha Trough, northwestern South China Sea: implications for extreme crustal thinning ahead of a propagating ocean[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 77: 846-864.
- [62] 姚永坚, 姜玉坤, 曾祥辉. 南沙海域新生代构造运动特征 [J]. *中国海上油气(地质)*, 2002, 16(2): 113-117. [YAO Yongjian, JIANG Yukun, ZENG Xianghui. Cenozoic tectonic movements in Nansha area, South China Sea[J]. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 2002, 16(2): 113-117.]
- [63] 张光学, 白志琳. 南海西南部万安盆地构造样式特征、成因及找油意义 [J]. *石油实验地质*, 1998, 20(3): 210-216. [ZHANG Guangxue, BAI Zhilin. The characteristics of structural styles and their influences on oil and gas accumulation of the Wan'an Basin in the Southwestern South China Sea[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 1998, 20(3): 210-216.]
- [64] 解习农, 张成, 任建业, 等. 南海南北大陆边缘盆地构造演化差异性对油气成藏条件控制 [J]. *地球物理学报*, 2011, 54(12): 3280-3291. [XIE Xinong, ZHANG Cheng, REN Jianye, et al. Effects of distinct tectonic evolutions on hydrocarbon accumulation in northern and southern continental marginal basins of South China Sea[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(12): 3280-3291.]
- [65] Suo Y H, Li S Z, Jin C, et al. Eastward tectonic migration and transposition of the Jurassic-Cretaceous Andean-type continental margin along Southeast China[J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 196: 102884.
- [66] Serra S, Nelson R A. Clay modeling of rift asymmetry and associated

- structures[J]. *Tectonophysics*, 1988, 153(1-4): 307-312.
- [67] McClay K, Bonora M. Analog models of restraining Stepovers in strike-slip fault systems[J]. *AAPG Bulletin*, 2001, 85(2): 233-260.
- [68] McClay K R, Dooley T, Whitehouse P, et al. 4-D evolution of rift systems: insights from scaled physical models[J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86(6): 935-959.
- [69] 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.
- [70] He W G, Shen C B, Wu L, et al. Deformational in curved fold-and-thrust belts: as a function of backstop shape and basal friction: insights from analogue modeling and application to the Pamir salient, Hindu Kush region[J]. *Journal of Structural Geology*, 2022, 162: 104680.
- [71] 孙珍, 钟志洪, 周蒂, 等. 红河断裂带的新生代变形机制及莺歌海盆地的实验证据 [J]. *热带海洋学报*, 2003, 22(2): 1-9. [SUN Zhen, ZHONG Zhihong, ZHOU Di, et al. Deformation mechanism of Red River fault zone during Cenozoic and experimental evidences related to Yinggehai Basin Formation[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2003, 22(2): 1-9.]
- [72] 杨刚. 莺歌海盆地红河断裂带左旋走滑构造物理模拟研究 [D]. 成都理工大学硕士学位论文, 2018. [YANG Gang. The research on the structural physical simulation of left-lateral strike-slip in Red River Fault Zonem, Yinggehai Basin[D]. Master Dissertation of Chengdu University of Technology, 2018.]
- [73] 何文刚, 沈传波, 吴磊, 等. 底辟构造启动及其沉积建造形成机制探讨: 来自物理模拟的启示 [J]. *大地构造与成矿学*, 2023, 47(5): 1069-1084. [HE Wen'gang, SHEN Chuanbo, WU Lei, et al. Diapiric initiation and Formation mechanism: insights from analogue modeling[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2023, 47(5): 1069-1084.]
- [74] Venâncio M B, Da Silva F C A. Structures evolution along strike-slip fault zones: the role of rheology revealed by PIV analysis of analog modeling[J]. *Tectonophysics*, 2023, 851: 229764.
- [75] 杨振宇, Besse J, 孙知明, 等. 印度支那地块第三纪构造滑移与青藏高原岩石圈构造演化 [J]. *地质学报*, 1998, 72(2): 112-125. [YANG Zhenyu, Besse J, SUN Zhiming, et al. Tertiary squeeze-out of the Indo-China Block and lithospheric evolution of the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1998, 72(2): 112-125.]
- [76] Naylor M A, Mandl G, Supsteijn C H K. Fault geometries in basement-induced wrench faulting under different initial stress states[J]. *Journal of Structural Geology*, 1986, 8(7): 737-752.
- [77] McClay K R. Deformation mechanics in analogue models of extensional fault systems[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1990, 54: 445-453.
- [78] Marques F O, Nogueira C R. Normal fault inversion by orthogonal compression: Sandbox experiments with weak faults[J]. *Journal of Structural Geology*, 2008, 30(6): 761-766.
- [79] Dooley T P, Schreurs G. Analogue modelling of intraplate strike-slip tectonics: a review and new experimental results[J]. *Tectonophysics*, 2012, 574-575: 1-71.
- [80] Reber J E, Cooke M L, Dooley T P. What model material to use? A review on rock analogs for structural geology and tectonics[J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 202: 103107.
- [81] Findlay R H, Trinh P T. The Structural setting of the Song Ma Region, Vietnam and the Indochina-South China plate boundary problem[J]. *Gondwana Research*, 1997, 1(1): 11-33.
- [82] Ngo T X, Santosh M, Tran H T, et al. Subduction initiation of Indochina and South China blocks: insight from the forearc ophiolitic peridotites of the Song Ma Suture Zone in Vietnam[J]. *Geological Journal*, 2016, 51(3): 421-442.
- [83] Wang Y, Lin W, Faure M, et al. Correlation among the Ailaoshan-Song Ma-Song Chay orogenic belts and implications for the evolution of the eastern Paleo-Tethys Ocean[J]. *Tectonophysics*, 2022, 843: 229618.
- [84] Wu W J, Su C M, Wen S, et al. Three-dimensional velocity structure beneath the Song Ma area, Vietnam[J]. *Journal of Structural Geology*, 2024, 179: 105038.
- [85] 李思田, 林畅松, 张启明, 等. 南海北部大陆边缘盆地幕式裂陷的动力过程及 10Ma 以来的构造事件 [J]. *科学通报*, 1998, 43(8): 797-810. [LI Sitian, LIN Changsong, ZHANG Qiming, et al. Episodic rifting of continental marginal basins and tectonic events since 10 Ma in the South China Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(1): 10-23.]
- [86] 郭令智, 钟志洪, 王良书, 等. 莺歌海盆地周边区域构造演化 [J]. *高校地质学报*, 2001, 7(1): 1-12. [GUO Lingzhi, ZHONG Zhihong, WANG Liangshu, et al. Regional tectonic evolution around Yinggehai Basin of South China Sea[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2001, 7(1): 1-12.]
- [87] 孙向阳, 任建业. 莺歌海盆地形成与演化的动力学机制 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2003, 23(4): 45-50. [SUN Xiangyang, REN Jianye. Dynamical mechanism for generation and evolution of Yinggehai Basin, the South China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2003, 23(4): 45-50.]
- [88] 茹克. 南海北部边缘叠合式盆地的发育及其大地构造意义 [J]. *石油与天然气地质*, 1988, 9(1): 22-31. [RU Ke. The development of superimposed Basin on the northern margin of the South China Sea and its tectonic significance[J]. *Oil & Gas Geology*, 1988, 9(1): 22-31.]
- [89] 孙家振, 李兰斌, 杨士恭, 等. 转换—伸展盆地—莺歌海的演化 [J]. *地球科学*, 1995, 4(3): 243-249. [SUN Jiazhen, LI Lanbin, YANG Shigong, et al. Evolution of transform-extension Yinggehai Basin[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 1995, 4(3): 243-249.]
- [90] 丁中一, 杨小毛, 马莉, 等. 莺歌海盆地拉张性质的研究 [J]. *地球物理学报*, 1999, 42(1): 53-61. [DING Zhongyi, YANG Xiaomao, MA Li, et al. A study of the stretching behavior of the Yinggehai Basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1999, 42(1): 53-61.]
- [91] McKenzie D. Some remarks on the development of sedimentary basins[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1978, 40(1): 25-32.
- [92] 解习农, 任建业, 王振峰, 等. 南海大陆边缘盆地构造演化差异性及其与南海扩张耦合关系 [J]. *地学前缘*, 2015, 22(1): 77-87. [XIE Xinong, REN Jianye, WANG Zhenfeng, et al. Difference of tectonic evolution of continental marginal basins of South China Sea and rela-

- tionship with SCS spreading[J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(1): 77-87.]
- [93] Savva D, Meresse F, Pubellier M, et al. Seismic evidence of hyper-stretched crust and mantle exhumation offshore Vietnam[J]. *Tectonophysics*, 2013, 608: 72-83.
- [94] Fyhn M B W, Nielsen L H, Boldreel L O, et al. Geological evolution, regional perspectives and hydrocarbon potential of the northwest Phu Khanh Basin, offshore Central Vietnam[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26(1): 1-24.
- [95] Nguyen H H, Carter A, Hoang L V, et al. Evolution of the continental margin of south to central Vietnam and its relationship to opening of the South China Sea (East Vietnam Sea)[J]. *Tectonics*, 2022, 41(2): e2021TC006971.
- [96] Vu A T, Wessel Fyhn M B, Xuan C T, et al. Cenozoic tectonic and stratigraphic development of the Central Vietnamese continental margin[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 86: 386-401.
- [97] 王海富. 南海海域新生代盆地构造演化的差异性及其成因分析 [D]. 西安石油大学硕士学位论文, 2018. [WANG Haifu. Differences and causes of tectonic evolution of the Cenozoic basins in the South China Sea and its adjacent regions[D]. Master Dissertation of Xi'an Shiyou University, 2018.]