

莺歌海盆地深层拆离断层的发现及其形成机制

任建业^{1, 2*} 胡晨¹ 喻静远¹ 宋志斌¹ 王征³

1.中国地质大学, 湖北武汉, 430074

2.中国海油南海油气能源院士工作站, 海南海口, 570312

3.自然资源部第二海洋研究所, 浙江杭州, 310012

摘要: 莺歌海盆地传统上被界定为走滑或走滑伸展型盆地。本文基于宽线二维地震剖面解释, 结合哀牢山-红河断裂带最新厘定的主走滑活动年龄与区域构造事件对比, 重新识别出盆地充填序列中走滑作用的响应界面 T62; 提出一号断层实为形成于红河主走滑作用之前的大型拆离断层, 该断层不仅控制 T62 界面之下规模巨大的宽而深的拆离盆地, 其强烈的拆离作用还导致基底地壳显著薄化与地幔剥露。研究认为, 盆地深层拆离作用受控于印度-亚洲碰撞引发的喜马拉雅构造结周边应力场快速调整; 基于新的研究认识, 本文构建了“断陷-拆离-走滑-拗陷”复合叠加的莺歌海盆地形成演化新模型, 深化了莺歌海盆地成因机制的认识, 对研究区油气与新能源勘探具有重要的指导意义。

关键词: 莺歌海盆地; 一号断层; 拆离盆地; 地幔剥露; 走滑盆地

中图分类号: P736

收稿日期: 2026-2-1

Discovery and Formation Mechanism of the Deep Detachment Fault in the Yinggehai Basin

Ren Jianye^{1,2} Hu Chen¹, Yu Jingyuan¹, Song Zhibin¹, Wang Zheng³

1.China University of Geosciences, Wuhan, 430074, China

2.CNOOC South China Sea Oil & Gas Energy Academician Workstation, Haikou, Hainan 570312, China

3.Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China

Abstract: Traditionally, the Yinggehai Basin has been defined as a strike-slip or strike-slip

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42372133, U25B6026)、国家科技重大专项 (2025ZD1402801) 和中国海油南海油气能源院士工作站基金项目 (NHQNYJIIIN-001)。

作者简介: 任建业 (1963—), 男, 教授, 博士, 主要从事大陆边缘盆地动力学方面的教学和科研工作。

E-mail: jyren@cug.edu.cn; ORCID: 0000-0003-0780-651X

extensional basin. Based on the interpretation of wide-line 2D seismic profiles and comparison with the newly determined timing of major sinistral strike-slip activity along the Ailao Shan–Red River Fault Zone and regional tectonic events, this study re-identifies the response horizon T62, which records the effects of strike-slip motion within the basin's filling sequence. It is proposed that Fault No. 1 is actually a large-scale detachment fault formed prior to the main sinistral activity of the Red River Fault. This fault not only controlled the development of a large and deep detachment basin below the T62 interface but also caused significant crustal thinning and mantle exhumation in the basin basement due to intense detachment. The study suggests that the deep detachment in the basin was controlled by rapid stress field adjustments around the Himalayan syntaxis triggered by the India–Asia collision. Based on these new insights, this paper establishes a novel composite evolutionary model of "rifting–detachment–strike-slip–subsidence" for the Yinggehai Basin. The research deepens the understanding of the basin formation mechanism and has important implications for hydrocarbon and new energy exploration in the study area.

Key Words: Yinggehai Basin; No. 1 Fault; Detachment Basin; Mantle Exhumation; Strike Slip Basin

0 引言

莺歌海盆地位于印支地块、华南地块和南海三大构造单元的交会点上(图 1), 是我国海上重要的天然气聚集区之一(龚再升, 1997; 谢玉洪等, 2015), 先后发现了 DF1-1、DF13 千亿立方米级大型气田和 LD22-1 等一批中小型气田, 显示了广阔的天然气勘探前景。莺歌海盆地主要构造单元包括了河内拗陷、中央拗陷、莺东斜坡、莺西斜坡和临高凸起等构造单元。

莺歌海盆地具有非常高的沉降速率(500-1400m/Myr), 新生代地层最大厚度超过 17 km, 其中新近系-第四系最大沉积厚度达到 10000 m, 以细粒沉积为主, 主要由红河输送(Lei et al., 2015; Clift et al., 2006)。莺歌海盆地边缘斜坡带探井所揭示的前第三系基底主要由花岗岩、变质岩、凝灰质砂岩和灰岩、白云岩组成(龚再升等, 1997)。综合盆地已有钻探资料和地震解释, 以及地层区域上的对比分析, 莺歌海盆地新生界自下而上依次为第三系始新统的岭头组(T100-T80)、渐新统的崖城组(T80-T70)和陵水组(T70-T60), 中新统的三亚组(T60-T50)、梅山组(T50-T40)和黄流组(T40-T30), 上新统的莺歌海组(T30-T20)以及第四系乐东组地层(T20-海底)组成(图 2)。下文将重点阐述的 T62, 是莺歌海盆地的重要构造变革界面, 它将陵水组划分为陵一、二段(T60-T62)和陵三段(T62-T70)。

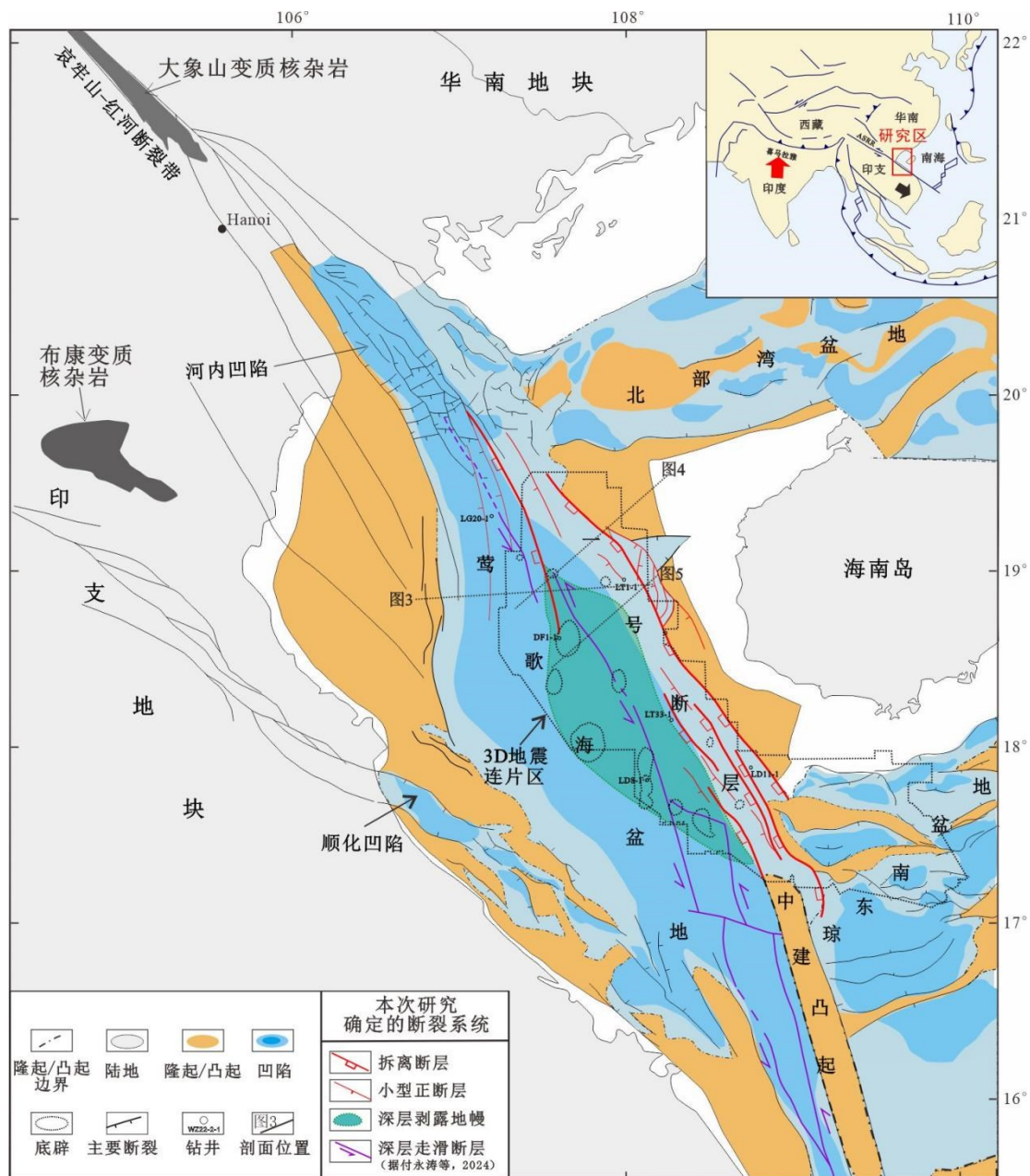


图 1 莺歌海盆地区域构造位置和断裂系统

Fig1. Regional tectonic location and fault system of the Yinggehai Basin

在中国的新生代沉积盆地中，莺歌海盆地深度最大，Moho 面深度最浅，地壳厚度最薄。由于地幔热隆，莺歌海盆地基底之下具备充足的热源供给，加之盆地晚期快速沉积沉降，使其具备了独特的地质条件，成为典型的高温高压盆地。盆地现今的地温梯度 $3-7.5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ，平均达到 $4.5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ，压力梯度 $18-22\text{ kPa/m}$ ，压力系数高达 $1.6-2.2$ ，热流值 62.2 mW/m^2 （龚再升等，1997）。由于盆地基底深度大和强烈的超压影响，中央坳陷中发育了大量串珠状排列的、由泥和热流体幕式上侵活动而形成的“泥-流体底辟构造”（图 1），这种构造对油气聚集成藏具有重要的控制作用，形成了独特的热流体底辟构造成藏体系（谢玉洪等，2015；何家雄等，2006）。盆地 90% 以上的油气储量和 100% 的油气产量来自这些底辟

构造。中央底辟构造带气田成藏条件是莺歌海盆地的天然气成藏动力学研究的关键。

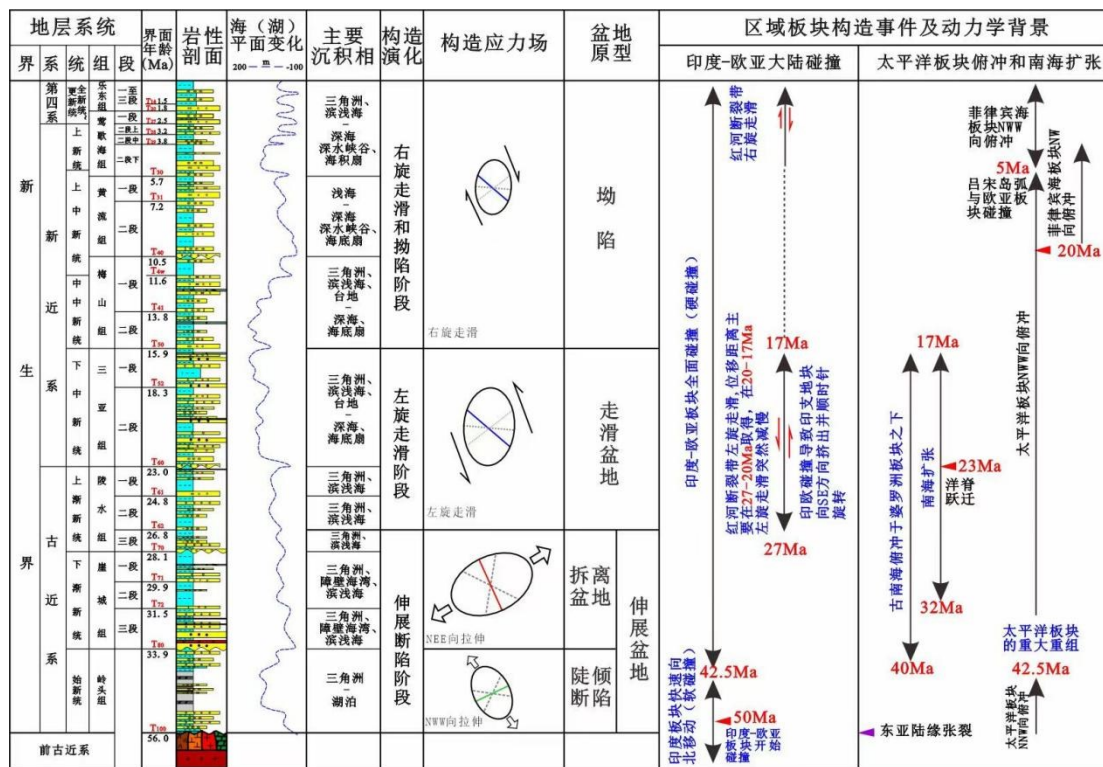


图2 莺歌海盆地地层单元、构造演化及其动力学背景对比图

Fig2. Comparison of stratigraphic units, tectonic evolution, and geodynamic setting of the Yinggehai Basin

在盆地构型上，一般认为，莺歌海盆地具有断坳型双重结构，由于盆地基底深度太大和强烈的超压影响，早期常规的 2D 地震剖面显示的盆地深部反射结构模糊，剖面深部没有探测到典型裂谷盆地中常见的隆坳相间的地堑-地垒系，不过可以在盆地斜坡上识别出零星分布的早期小型断陷（雷超等，2022）。新近系分布范围大，自下而上向盆地边缘超覆，盆地裂后期的沉积厚度远超过盆地断陷期，形成所谓“头重脚轻”负载效应特征。

区域上，哀牢山-红河断裂带作为印度-欧亚大陆碰撞引发的东南亚地块侧向挤出逃逸构造的东部边界，不仅是青藏高原向南海地区构造动力传递的关键通道，更控制了莺歌海盆地的形成与演化，该盆地长期被视为走滑成盆理论的典型实例（龚再升等，1997；Clift et al., 2006）。然而，近年来在莺歌海盆地实施了多条宽线二维地震剖面，与原先的二维地震剖面多局限于上地壳尺度相比，宽线二维地震剖面深达地幔，可以较为清晰地揭示盆地深部结构与构造特征，为从壳幔相互作用的角度研究盆地演化提供了重要基础。业已发现，宽线二维地震剖面的解释结果与传统的走滑变形模式存在显著差异，表明已有理论在解释盆地深部构造属性与形成机制方面存在明显局限。

本文拟基于最新获取的宽线二维地震剖面的解释和分析,深入刻画莺歌海盆地深部构造的几何学与运动学特征,识别并界定其巨大走滑层系之下原型盆地的结构类型,进而揭示其构造演化过程与动力学机制,以弥补现有认识与实测资料之间的差距。

1 哀牢山-红河断裂带传统走滑模型的认识演变

在区域构造上,莺歌海盆地被认为是一个发育在青藏高原西南缘哀牢山-红河断裂向东南海域延伸方向上的、具有独特走滑拉张构造特征的新生代裂谷盆地(龚再升等,1997),盆地的形成机制和演化过程复杂,一直是学术界和石油工业界关注的重要科学问题。哀牢山-红河断裂是东南亚主要的地理和地质不连续带,从西藏到越南河内盆地延伸超过 1000km,在海域区段一般认为与莺歌海盆地的 1 号断层和越东断裂相连,海域区段的延伸距离也在 1000km 左右,延伸总长度达 2000 余公里。在 Tapponnier (1982) 的滑移线场理论和挤出-逃逸构造模型中,该断裂规模更大,可以一直向南延伸到南沙地块西部的 Lupar 线和西 Baram 线断裂带,但是,许多研究者认为不会延伸那么远,而是终止于南海西南次海盆的 V 型尖端 (Fyhn et al., 2009)。

长期以来,人们主要基于哀牢山-红河断裂为一条大型走滑断裂的认识来研究莺歌海盆地的发育机制,沿哀牢山-红河断裂左行张剪应力场作用(茹克,1988;钟志洪等,2004)或右行走滑伸展应力场作用(李思田等,1998)是早期研究中关于莺歌海盆地成因机制的两种明显对立的观点,也有学者认为莺歌海盆地是符合 McKenzie 模型(1978)的纯拉张盆地(丁中一等,1997)或者是走滑拉分盆地(Sun et al., 2003; 付永涛等,2024)。上述观点存在差异,其焦点是哀牢山-红河断裂对盆地形成和演化的影响程度及影响方式。

上世纪 80 年代初, Tapponnier (1982) 提出著名的滑移线场理论和挤出-逃逸挤出构造模型,该模型一经提出就得到广泛的响应,成为东南亚新生代盆地成因研究的理论基础(图 1)。该模型的关键点是强调地壳块体位移集中在狭窄的走滑断层带,以大规模走滑(约 500-1000km, Briais et al., 1993)和深切地壳或岩石圈为特征。沿大型走滑断层的巨大位移可以通过转移到其他类型的构造,如南海洋中脊的扩张而消失。大型走滑断层之间为刚性的地壳块体,主要为侧向水平移动,强烈的走滑作用可导致剪切带部分熔融(Leloup et al., 2001)。基于滑移线场理论建立的左旋走滑作用成盆模式被广泛接受(Tapponnier et al., 1982),普遍认为东南亚泰国、马来西亚、柬埔寨和越南的大部分新生代裂谷盆地,以及莺歌海盆地都是走滑运动的结果。

2 哀牢山-红河断裂左行走滑时限的精确约束

近十多年来,东南亚地质研究取得了极大的进展,人们发现印支地块并非滑移线场理论所假设的刚形体,其内部发育密集的区域断裂体系(Morley et al., 2023),更有多个区域发育了变质核杂岩(Jolivet et al., 2001; Yan et al., 2021; Liu et al., 2019),表明非刚性的韧性变形和相当大的地壳薄化发生。沿哀牢山-红河断裂带出露了多个中下地壳变质岩(Zhang et al., 2014),多被认为与拆离断层和变质核杂岩有关, Jolivet 等(2001)研究提出越南的大象山穹窿和布康穹窿(图 1)中的中下地壳变质岩是被 NE-SW 向拉伸作用形成的拆离断层剥露出来的,在大象山穹窿中,与变质核杂岩相伴的哀牢山-红河断裂发育在中上地壳层次,不是原先认为的那样进入地幔并切穿岩石圈(Cao et al., 2016)。

精细测年研究表明,沿该带的变质核杂岩的剥露时间具有穿时性,在南部的越南东京湾变质核杂岩的剥露年龄为 24Ma,而在哀牢山-红河断裂的北部变质核杂岩的剥露年龄较晚,为 17Ma(Jolivet et al., 2001)。这些变质核杂岩受控于拆离断层,因此其剥露是沿走滑断层带由南向北逐渐遭受 NE-SW 向拉伸作用的结果,据此, Leloup 等(2001)提出所谓的拉链模型,认为印支地块的顺时针旋转导致了沿断层西北区段的差异隆升及随之产生的差异的冷却年龄,解释了左旋运动如何造成了陆上主要区段的压扭和海域区段的伸展。许多模拟实验也印证了印支地块的旋转对莺歌海盆地的发育和演化具有重要的控制作用(Sun et al., 2003; Yang et al., 2024)。

哀牢山-红河断裂的左旋位移的大小是一个长期争论的主题,直接涉及到莺歌海盆地的成因机制。所有南海扩张的纯走滑模型均假定沿红河断裂有大位移(>250 公里)(Leloup et al., 2001),但这些模型都遇到了重大问题,因为它们意味着越南东部近海几乎没有伸展,甚至具有相当大的缩短作用,这与越南近海大型长条形断陷盆地的存在不一致(Fyhn et al., 2009)。Mazur 等(2012)利用板块构造模型,在莺歌海盆地二维重力剖面反演的约束下,确定沿哀牢山-红河断裂的左旋走滑不能超过 250 km 左移。陆上的研究表明,哀牢山-红河断裂在古近纪时期经历了左旋走滑作用(Leloup et al., 2001; Morley et al., 2023),在上新世至第四纪期间则主要发生右旋走滑运动(Allen et al., 1984)。陆上左旋位移距离巨大,可以达到 600km 以上,但是地块内部变形,如印支-兰坪-思茅地块西北部大幅度旋转和挤压变形吸收了大量的位移,到海域区段大幅度减小到几十公里(Replumaz et al., 2003; Li et al., 2017)。Rangin 等(1995)的研究也表明哀牢山-红河断裂向 SE 延伸进入南海之后,在越南东京湾,晚渐新世以后哀牢山-红河断裂在该区的左旋走滑位移量仅几十 km,远远小于 700 ± 200 km 的总位移量(Rangin et al., 1995)。在盆地断裂的组合形态和几何结构上也显示出了上述位移的变化,哀牢山-红河断裂在陆上是单支(北段)到双支(中段),进入南

部的海域则大幅度帚状撒开（朱俊江等，2004），也意味着断距减小和消失；越南北部东京湾哀牢山-红河断裂及其分支断裂向西南弯曲，表明在左旋运动过程中存在一个聚压弯曲，但沿边缘是非常深的莺歌海盆地，若沿哀牢山-红河断裂的位移距离大的话，在释压弯曲背景下很难解释这个大型的超深盆地的形成。

规模巨大的哀牢山-红河断裂分隔了印支地块和华南地块，导致了这两个地块大幅度的差异挤出(Tapponnier et al., 1982)。有两个主要的走滑变形阶段，较年轻的阶段为右旋运动，总走滑位移在 6-60 km 之间 (Leloup et al., 2001; Allen et al., 1984)，通常认为始于 5 Ma。较老的阶段在始新世晚期至中新世早期，为哀牢山-红河断裂活动的主要阶段，表现为左旋运动 (Tapponnier et al., 1982; Leloup et al., 2001)，运动时间是依据来自哀牢山-红河断裂带的变质岩的冷却年龄、地震剖面解释或区域构造对比等，较早的时候确定为 35-17 Ma (Leloup et al., 2001; Gilley et al., 2003)，来自莺歌海盆地的独立证据也支持大约 35 Ma 之后沿哀牢山-红河断裂的左旋运动 (Clift et al., 2006)。后来的同位素测年更精确地约束了哀牢山-红河断裂陆上区段的左旋运动时间为 27-17Ma (Royden et al., 2008; Li et al., 2017; Morley et al., 2023)，且发现走滑位移量主要是在 27-20Ma 期间发生，与先前关于该走滑断裂活动时间的观点，即与南海扩张时间 (32-15Ma) 一致的认识 (Briais et al., 1993) 显著不同。

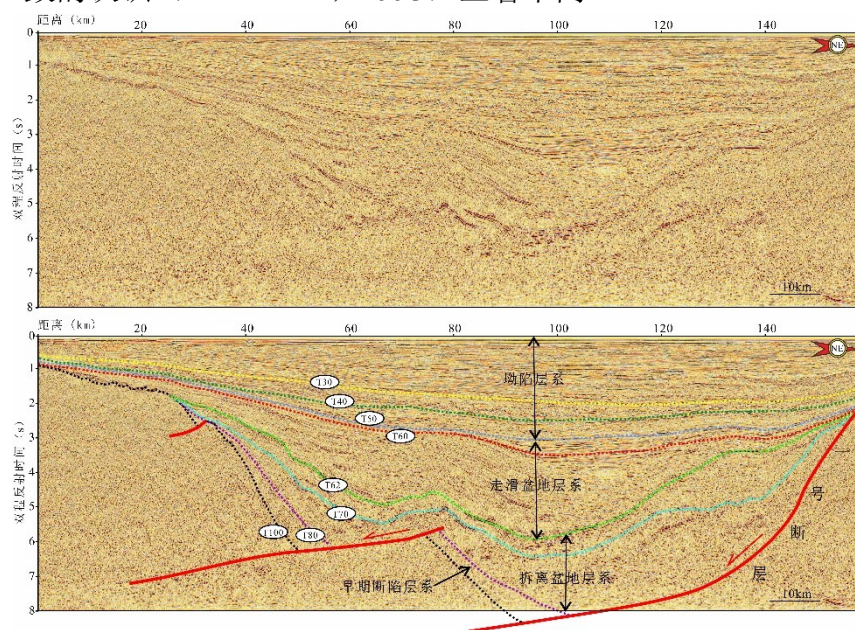


图3 莺歌海盆地二维地震剖面地层界面反射特征

Fig3. Reflection characteristics of stratigraphic interfaces on a 2D seismic profile across the Yinggehai Basin

3 宽线二维地震解释结果对单一走滑成盆模型的挑战

3.1 关键界面的识别及其区域构造变革意义

发育于哀牢山-红河断裂之上的莺歌海盆地是南海西北陆缘新生代最深的沉

降区，结构完整、沉积充填巨厚，断裂有序，资料丰富，为哀牢山-红河断裂发育演化过程提供了连续的地层和构造记录。长期的油气勘探资料的积累，人们已经基本摸清了莺歌海盆地新生代充填序列的主要地层界面及其时代。

图 3 是过莺歌海盆地北东侧的一条二维地震剖面，迄今盆地内最深的钻井 LD11-1 井已经钻穿 T70 界面，为重要界面地质属性识别和区域对比提供了直接依据。同时，依托几乎覆盖全盆地的三维连片地震资料（图 1），包括 T50、T60、T62、T70、T80 和 T100 等在内的重要界面均可全区连续追踪对比，这些界面的年龄如图 2 所示。其中 T50 为区域性上超面，发育时间为 15.9Ma，与沿红河断裂左旋走滑结束时间一致，代表了红河断裂主走滑作用结束事件在莺歌海盆地中的响应界面；T60 为区域性削截界面，发育时间为 23Ma，是南海西北陆缘广泛发育的渐新世末期区域性的构造反转事件在莺歌海盆地中的响应界面（Wang et al., 2025; Hoang et al., 2020）；T62 是区域性前积面（北部）和上超面（中南部），发育时间为 26.8Ma，根据最新的陆上断层岩测试分析资料（Morley 等，2023），与沿红河断裂左旋走滑作用起始时间一致，代表了红河断裂走滑作用起始在莺歌海盆地中的响应界面；T70 是区域上超界面和削截面，发育时间为 28.1Ma；T80 是削截界面，范围局限，发育时间为 33.9Ma。限定早期小型断陷。

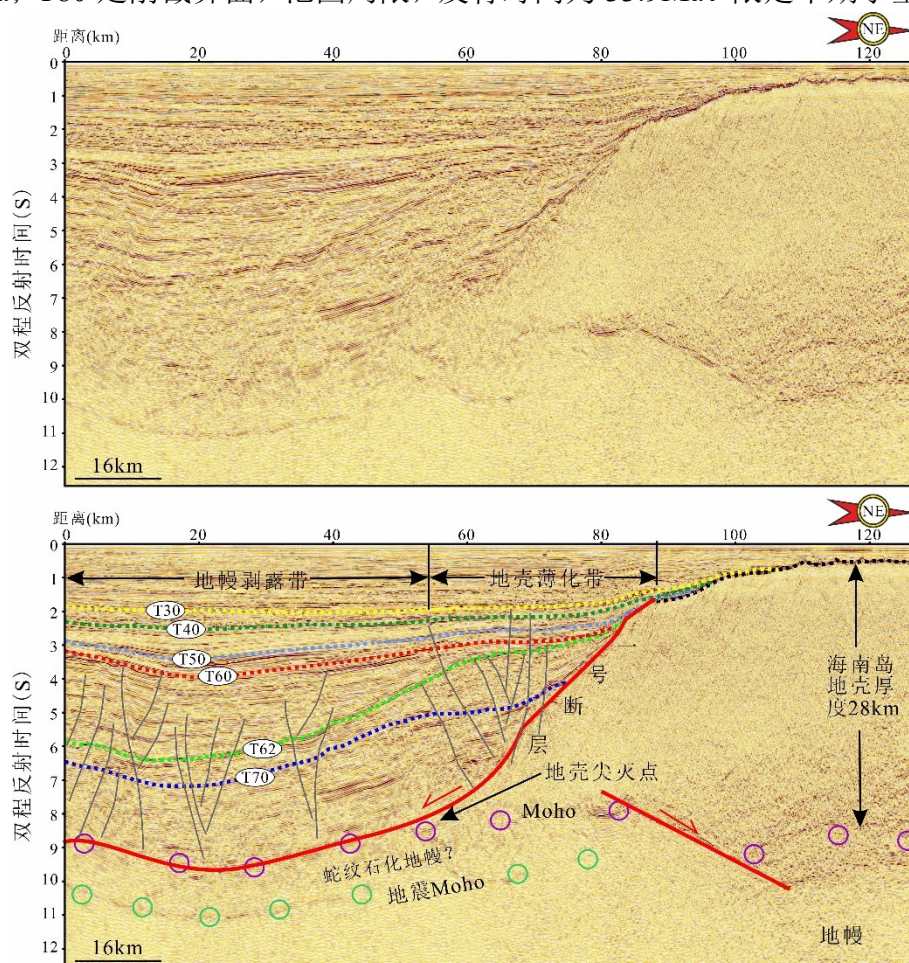


图 4 宽线二维地震剖面上一号断层特征、地壳极端薄化地壳和剥露地幔

Fig4. Geometric characteristics of the No. 1 Fault, extreme crustal thinning, and exhumed mantle on a wide-line 2D seismic profile

3.2 一号断层的深层特征及其属性的确定

宽线二维地震测线显示了盆地中部深层清晰的结构构造。如图 4 所示, 在地震剖面 80 km 位置向下, 可识别出一条沿基底顶界面发育的、西倾的断层。该断层在双程走时 8 秒以上的浅部表现为陡倾的断面形态, 此即莺歌海盆地最大的断层——一号断层, 长期以来该断层被认为是产状陡倾的走滑断层。然而, 继续向深部延伸, 该断层产状明显变缓, 并沿地壳底界—莫霍界面 (Moho) 滑脱, 整体上为一条切穿地壳的西倾大型铲式断层。进一步观测该剖面东部的海南岛 (80km 以东), 基底顶界面 T100 和 Moho 面平行, 限定的地壳厚度在 28-30km, 属于正常或弱伸展地壳。向西进入上述一号断层区域 (实为该区段的基底顶界面), 基底顶界面和 Moho 面在不到 30km 的距离内急速收敛, 显示地壳强烈薄化, 并在 55km 位置二者相交, 意味着地壳尖灭和地幔剥露, 断层面沿地幔剥露面滑脱。通过区域宽线二维地震剖面追踪解释, 剥露地幔从北部的东方区向南延伸到乐东区, 成 NW-SE 向长椭圆形, 与热流体底辟构造集中区域基本一致 (图 1)。

在莺歌海盆地, 常规布格重力异常表现出明显的空间不均衡性。莺东斜坡呈现显著高值, 而沉积层最厚的中部深坳区却无突出显示 (付永涛等, 2024), 这主要受巨厚低密度沉积层的重力屏蔽作用影响。通过对观测重力异常进行沉积层密度改正, 获得了反映深部构造的地壳布格重力异常, 该异常清晰揭示出盆地中部地壳最薄处对应的莫霍面隆起 (于传海等, 2017)。为揭示莺歌海盆地深部结构, 特别是地壳厚度与深部物质属性, 本研究开展了重力反演。数据源自 Sandwell 等 (2014) 的全球卫星测高重力异常与地形数据, 反演模型分层包括海水层、新近纪与古近纪沉积层、地壳及地幔。各层密度依据区域地质背景设定: 海水层 1.03 g/cm³、上地壳 2.75 g/cm³、岩石圈地幔 3.25 g/cm³, 沉积层密度参考王万银等 (2013) 建立的莺歌海盆地地层密度表。图 5 所示反演剖面位于盆地中部近海南岛一侧, 长约 90 km (图 1)。结果显示, 中部深坳区采用超伸展薄地壳模型无法拟合观测重力异常 (图 5a, b), 需引入一个规模约 60 km、顶深 16-18 km 的大规模高密度异常体, 解释为地幔物质侵入 (图 5c, d), 其形态和空间位置与基于地震剖面解释的“地幔剥露”界面高度吻合 (图 1)。这一独立的地球物理证据有力地支持了本文关于岩石圈减薄、地幔物质上涌并沿拆离断层剥露至浅部的构造解释。

此外, 切入基底的纯走滑断层是不会导致地壳薄化, 即使带有一定的伸展分量也难以导致地壳尖灭和地幔剥露, 只有正断层, 特别是水平位移距离巨大的大型拆离断层才有可能产生上述地层或基底的断失效应。与世界许多被动大陆边缘, 如大西洋 Iberia-Newfoundland 共轭边缘 (Peron-Pinvidic et al., 2019) 以及南海珠江口盆地珠二坳陷和珠四坳陷 (Deng et al., 2020; 任建业等, 2018) 的细颈带

和远端带发生强烈的地壳薄化类似，莺歌海盆地深层地壳的强烈薄化、地幔剥露及壳幔重构，极可能正是由沿基底的这类大型拆离断层作用导致。其深部延伸与地壳薄化区密切相关，进一步支持一号断层是控制盆地形成的深部伸展构造，而非单纯的走滑构造。这一认识突破了以往主要依据浅层资料将其简单解释为走滑断层的局限，为理解莺歌海盆地的动力学机制提供了关键依据。

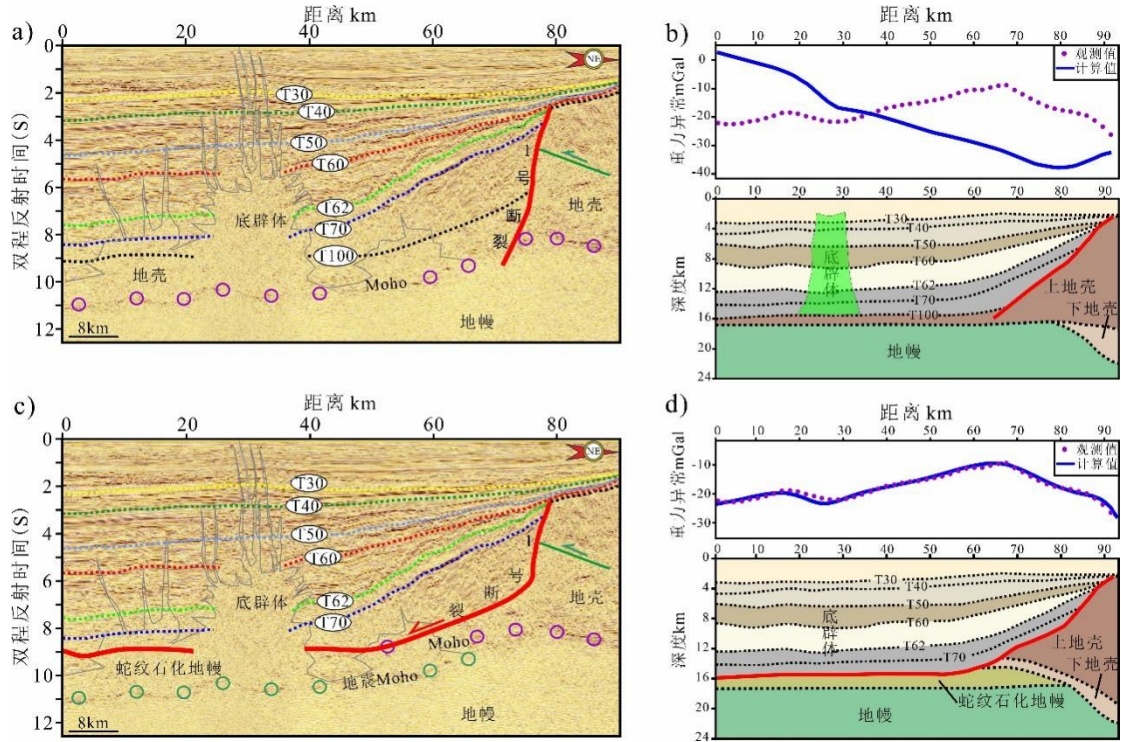


图5 莺歌海盆地典型剖面地震地质解释方案和重力反演（剖面位置见图1所示）a)传统地质解释模式，1号断层为走滑断层，盆地深部为超伸展薄化地壳；b)基于传统解释模式的重力反演结果；c)本文的地质解释模式；d) 基于本文解释模式的重力反演结果。

Fig5. Seismic-geological interpretation scheme and gravity inversion of a typical cross-section in the Yinggehai Basin (the section location is shown in Figure 1)

3.3 深层盆地原型分析

基于前文对一号断层深部拆离断层属性及其活动期止于 T62 界面的厘定，下面将进一步聚焦于 T62 界面所标志的构造变革事件对深层盆地原型演化的控制作用。T62 界面在盆地的东侧几乎上超覆盖了一号断层（图3，4），其与 T100 界面之间为一套由西向东，向1号断层加厚的楔形地层，表明了一号拆离断层的同生断层属性，且其主要活动时期到 T62 界面发育时期为止，之后几乎不再活动。根据前人的研究，T62 界面的时代为 26.8Ma（谢玉洪等，2015，徐长贵等，2024）。海陆对比，莺歌海盆地 T62 (26.8Ma) -T50 (15.9Ma) 之间的一套沉积体（图2、3）对应于与陆上红河断裂的左旋走滑运动时期，即 27-17Ma（Li et al., 2017; Morley et al., 2023）。由此可见，T62 界面是一个区域性的构造变革界面，

代表了红河断层（主）左旋走滑作用的启始在莺歌海盆地中的响应界面。

迄今只在莺歌海盆地越南一侧有钻井（104-QMV-1X）钻遇始新统，地震剖面显示其充填在早期小型半地堑中，不过，由于后期沿拆离断层的旋转，目前该小断陷“悬挂”在莺西斜坡上，边界断层平缓（图3剖面的35km处），重建恢复到原始状态（T80变平），显示其半地堑的边界断层陡倾，并被T80界面削截，表明始新统沉积之后发生了构造变革，本文暂时将其推定为一号断层拆离作用的起始界面，与琼东南盆地类似（Yu et al., 2025）。

综上所述，莺歌海盆地T62界面之下的中深层（T100-T62）并非走滑层系，而是由正断层控制的裂谷层系，以T80为界，其早期（T100-80）为陡倾正断层控制的断陷为特征的原型盆地，而后期（T80-T62）为拆离断层（一号断层）主控的拆离盆地，规模巨大，拆离盆地层系厚度在6-10km（图2、3）。

长期以来，莺歌海盆地因其特殊的构造位置（红河断裂带向海域的延伸区），其形成机制一直被视为以走滑作用为主导。传统观点普遍强调，盆地发育受控于以一号断层为核心的走滑或走滑-伸展断裂体系，该体系被认为主要响应于印支地块逃逸和红河断裂带的左旋走滑活动。然而，前述新的宽线二维地震资料构造分析对这一传统认识提出了根本性质疑：一号断层实为渐新世大型拆离断层。基于这一新认识，莺歌海盆地中始于陵二段（底界为T62）的“走滑作用”的表现其本质究竟是什么？地震剖面显示其更可能是一种大型的窄向斜构造。

在沉积盆地中，“窄向斜”是一种剖面上核部狭窄、两翼陡倾，平面上呈线性或雁列式排列的“V”形或槽形向斜构造，成因多样，在渤海湾盆地辽东湾（万桂梅等，2010）和塔里木盆地克拉苏构造带（王珂等，2023）就分别发育了与走滑伸展或走滑挤压有关的窄向斜构造。莺歌海盆地的窄向斜构造与深层走滑伸展断层活动相关，如图3、4所示，T62到T50限定的盆地走滑层系整体上是一个中间厚两侧变薄的碟形沉积体，伴有花状构造。这套沉积体沿T62界面向两侧层层上超，其间还有一个分隔界面T60，其年龄为23Ma。T60界面之下的走滑层系窄而厚，而其上的则宽而薄。笔者认为，盆地深部基底在斜向伸展或走滑伸展作用下，上覆沉积盖层发生被动挠曲与调节变形而形成狭长、对称的槽状反射结构，其核部充填了显著增厚的生长地层，直观反映了走滑或走滑伸展作用同沉积期的持续沉降而形成的大型窄向斜，它并非深部走滑位移的直接产物，而是盖层为协调基底深部走滑或走滑伸展所产生的差异沉降和不均匀变形而发生的被动挠曲响应。根据付永涛等（2024）的重磁反演研究，莺歌海盆地基底深层走滑作用表现为走滑双重构造样式（图1），地震剖面所揭示的大型窄向斜，正是这一深部走滑变形在盖层中的直接体现，其几何形态直接反映了深部走滑作用的强度和方式，是解析盆地深层构造的关键浅层响应标志，也是连接深层断裂活动与浅层沉

积变形、揭示盆地多期构造叠加与油气圈闭样式的重要纽带。

综上所述，传统认为以走滑作用为特征、控制莺歌海盆地发育演化的一号断层实为大型拆离断层，发育于红河主（左旋）走滑断层作用开始之前，控制了莺歌海盆地深层规模巨大的“宽而深的拆离盆地”，强烈的拆离断层作用导致了莺歌海盆地基底地壳超伸展薄化和地幔的广泛剥露。因此，莺歌海盆地不是单一的走滑盆地，而是由早期简单断陷（T100-80）、拆离盆地（T80-62）、走滑盆地（T62-T50）和坳陷（T50-现今）4个原型盆地叠加而成的复合盆地（图2）。

4 深层拆离盆地成因机制

长期以来，Tapponnier（1982）的“滑移线场-逃逸挤出构造模型”是解释包括莺歌海盆地在内的东南亚盆地成因的经典理论，该模型将盆地视为印度-欧亚大陆碰撞导致印支地块挤出所产生的走滑拉分盆地，强调了走滑作用的主导性。然而，这一传统模型难以解释盆地基底存在的大规模深层拆离构造以及区域应力场从始新世东西向到中新世南北向的系统性偏转，显示出这类单一走滑机制的局限性。

为了解释这些深层构造，后造山伸展模式被提出（Li et al., 2021），强调青藏高原在碰撞加厚以后发生岩石圈根部垮塌、软流圈上涌和地壳拆沉作用，从而沿红河断裂带形成了伸展应力场，引发了自西北向东南（45-30Ma）迁移的伸展事件，导致高钾岩浆活动。红河断裂南部布康（Bu Khang）变质核杂岩的研究也证实左旋走滑期间临近海域区段具有 NE-SW 向伸展分量（Jolivet et al., 2001）。这一过程能较好地解释红河断裂带早期的伸展变形、相关岩浆活动以及地壳尺度的拆离作用，为深层构造提供了重要机制。但其仍难以全面刻画区域应力场随碰撞进程演变的复杂时空格局。

另一种模式，即印度与亚洲的碰撞导致喜马拉雅构造结周围的应力场发生动态变化的模式（Huchon et al., 1994; Morley et al., 2023），提供了更具整合性的解释框架。由图6可见，随着喜马拉雅东构造结向北推进，其前方的应力场呈扇形系统性旋转，最大水平挤压应力从早期的近东西向逐渐顺时针转为南北向。这一动态过程直接控制了印支地块及周缘的构造演化：在阶段A（以东西向挤压为主），走滑变形集中于印支半岛西部，可能伴随地壳加厚，为后期伸展拆离准备了物质基础；至阶段B（30-27Ma的过渡期），在青藏高原隆升、印缅山脉变形、爪哇-苏门答腊板块俯冲回撤及南海海底扩张启动四大因素共同驱动下，区域应力场发生重大重组，压扭变形向青藏高原东南部撤退，为地壳伸展和深层拆离创造了关键应力条件。这两个阶段共同促发了莺歌海盆地早期的伸展和地壳尺度拆离作用；阶段C（27-17Ma），哀牢山-红河断裂主要左旋位移开始，深层走滑双重构造及其所控制的浅层窄向斜控制了莺歌海盆地的走滑层系发育。其他地

区广泛的裂后沉降开始表明拉应力的来源已经停止；到阶段 D (<17 Ma)，许多断层上的运动发生穿时反转，泰国裂谷的伸展停止。随印度进一步向北的楔入，青藏高原持续隆起，中下地壳可能开始向东和向南流动并远离高原。

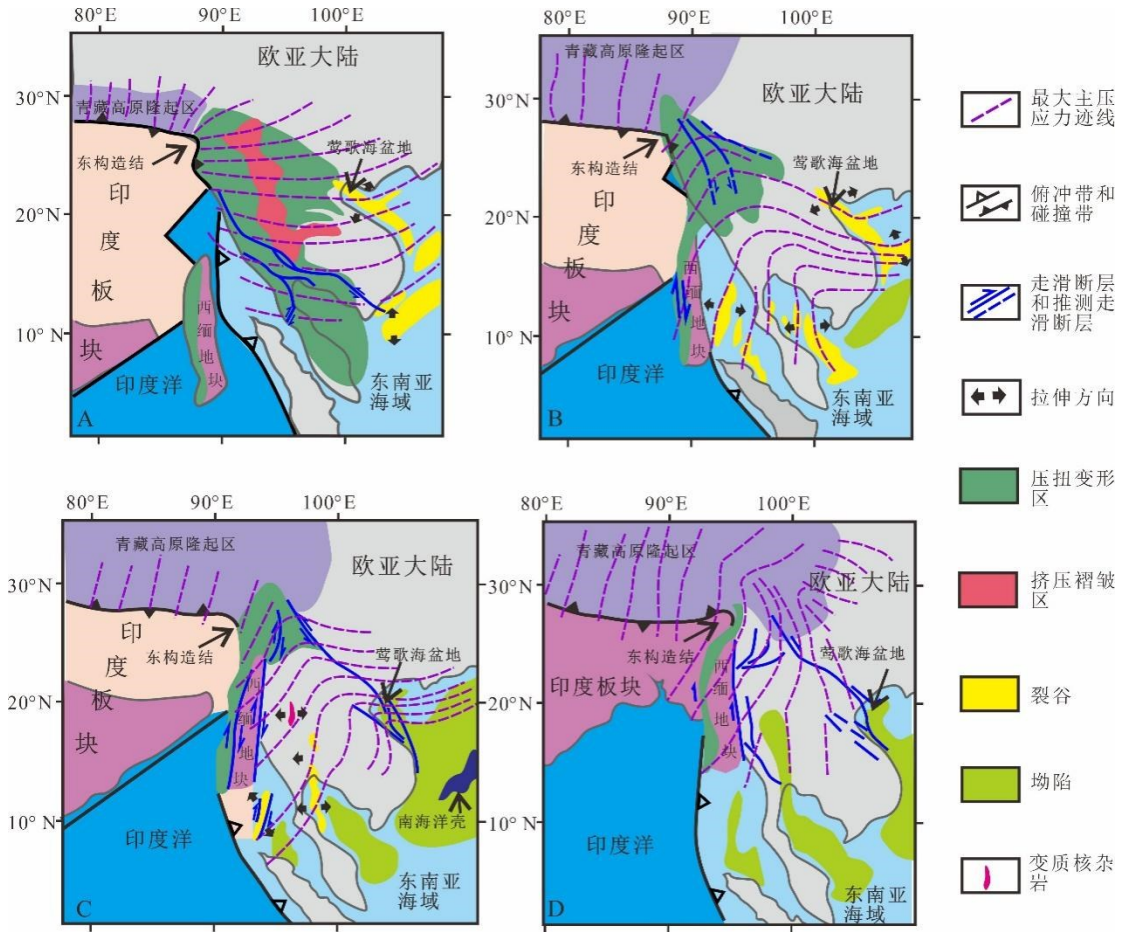


图 6 莺歌海盆地形成演化的区域构造应力场

Fig.6. Regional tectonic stress field during the formation and evolution of the Yinggehai Basin
(据 Huchon et al., 1994; Morley et al., 2023, 修改)

综上所述，莺歌海盆地的形成并非受单一走滑作用机制控制，而是大陆碰撞背景下多阶段动力学过程叠加的复合产物。印度-欧亚大陆碰撞首先引发哀牢山-红河断裂沿线挤压造山，地壳增厚；随后应力场调整，转为 NE-SW 向伸展或张扭，导致哀牢山-红河断裂带由 NW 向 SE 的后造山伸展塌陷、钾质岩浆活动以及莺歌海盆地早期的伸展拆离作用；随后哀牢山-红河断裂带发生大规模左行走滑，塑造了盆地深层的走滑构造与沉积格局；晚中新世以来，随着区域应力场再次变化，断裂活动减弱，盆地整体进入广泛的热沉降与拗陷阶段，接受了巨厚沉积。这一多阶段演化模型，统一于印度板块持续楔入所引发的区域应力场动态旋转与迁移，较好地解释了构造样式的时序转换，也揭示了深部构造与浅部盆地沉降之间的耦合关系，深化了对大陆碰撞带边缘盆地复杂动力学的理解。

5 结语

本文展示的新地球物理探测资料及其初步研究取得的新发现正在打开莺歌海盆地深部全新的面貌。研究表明,莺歌海盆地并不能简单地认为是走滑型盆地,惯常认为是走滑断层的一号断层其实是导致地壳强烈薄化、地幔剥露的大型拆离断层,控制了深层巨厚的拆离盆地层系,且极可能由于强烈的拆离断层作用触发了跨圈层(地幔-地壳-沉积层)强烈的热流体活动和盆地内广泛发育的泥-热流体底辟构造体系。这些新发现标志着对盆地的深层结构和早期演化机制的理解迈出了重要一步。

然而,需要指出,本文的新认识主要依据深部地震资料的解释。深部成像与解释本身存在一定的局限性和多解性,在现有数据支撑下,利用地震剖面推断复杂的深部机制时,需考虑速度误差、多次波和界面误判等多种因素的影响,并对其他可能的构造解释保持开放。

因此,亟须对莺歌海盆地进行更深入、更广泛的研究。首先,需要将莺歌海盆地置于南海北部大陆边缘演化的整体框架下审视。新认识所揭示的、由一号断层控制的深层极端薄化结构与巨厚同拆离层系,在几何形态,如铲式断层、上盘滚动背斜和沉积响应,即断层控制下的快速沉降与充填上与珠江口盆地等经典的“宽裂谷-拆离-同拆离盆地”体系具有根本相似性,这标志着拆离断层主导的岩石圈伸展薄化机制同样是莺歌海盆地早期演化的核心,从而确立了与南海北部被动陆缘模型的可比性基础。然而,其特殊性亦十分突出,本研究揭示的这套NW向延伸的拆离断层系统其走向明显不同于琼东南盆地和珠江口盆地近东西向延伸的拆离断层系统,强烈暗示其形成受到走滑构造格局的制约和叠加改造。因此,后续研究的关键在于,在加强数据基础与多解性分析的前提下,明确这两套不同走向的拆离系统在时空上的相互关系与转换机制。在此基础上,进一步厘定走滑作用在莺歌海盆地基底和该拆离层系中的具体构造、沉积表现,阐明其与北部陆上哀牢山-红河断裂和南部近南北向越东断裂之间的深部连接关系。最终,揭示在“拆离伸展”与“走滑改造”共同控制下,莺歌海盆地独特且强烈的热流体底辟构造系统的完整成因机制。

目前,莺歌海盆地凭借其丰富的天然气资源、独特的地质条件以及在能源转型中的多重角色,已成为我国海域开展能源转型研究的重要基地,重新认知盆地深部结构构造,加强构造变形、壳幔结构和形成机制研究,不仅有助于揭示这一巨型盆地特殊的构造-热动力演化模式,必将为环海南岛新能源资源勘探提供重要的理论支撑。

References

- Allen, C. R., Gillespie, A. R., Han, Y. A., et al., 1984. Red River and Associated Faults, Yunnan Province, China - Quaternary Geology, Slip Rates, and Seismic Hazard. Geological Society

of America Bulletin, 95: 686-700. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1984\)95<686:rraafy>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1984)95<686:rraafy>2.0.CO;2)

- Briaais, A., Patriat, P., Tapponnier, P., 1993. Updated Interpretation of Magnetic Anomalies and Seafloor Spreading Stages in the South China Sea: Implications for the Tertiary Tectonics of Southeast Asia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 98: 6299-6328. <https://doi.org/10.1029/92JB02280>
- Cao, S., Neubauer, F., 2016. Deep Crustal Expressions of Exhumed Strike-Slip Fault Systems: Shear Zone Initiation on Rheological Boundaries. *Earth-Science Reviews*, 162: 155-176. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.09.010>
- Clift, P. D., Sun, Z., 2006. The Sedimentary and Tectonic Evolution of the Yinggehai-Song Hong Basin and the Southern Hainan Margin, South China Sea: Implications for Tibetan Uplift and Monsoon Intensification. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B6). <https://doi.org/10.1029/2005jb004048>
- Deng, H., Ren, J., Pang, X., et al., 2020. South China Sea Documents the Transition from Wide Continental Rift to Continental Break up. *Nature Communications*, 11(1): 4583. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18448-y>
- Ding, Z. Y., Yang, X. M., Ma, L., 1997. A Study of the Stretching Behavior of the Yinggehai Basin. *Proceedings of the 13th Academic Annual Meeting of the Chinese Geophysical Society 1997*. Beijing, 347.
- Fu, Y. T., Chen, G. F., Wu, T., et al., 2025. Identification of the Central Fault; The Extension of the Red River Fault Zone in the Yinggehai Basin. *Acta Geologica Sinica*, 99(03): 704-718 (in Chinese with English abstract).
- Fyhn, M. B. W., Boldreel, L. O., Nielsen, L. H., 2009. Geological Development of the Central and South Vietnamese Margin: Implications for the Establishment of the South China Sea, Indochinese Escape Tectonics and Cenozoic Volcanism. *Tectonophysics*, 478 (3): 184-214. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.08.002>
- Gilley, L., Harrison, T., Leloup, P., et al., 2003. Direct Dating of Left-Lateral Deformation Along the Red River Shear Zone, China and Vietnam. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B2). <https://doi.org/10.1029/2001jb001726>
- Gong, Z. S., Li, S. T., Xie, T. J., et al., 1997. Distribution of Basins and Hydrocarbon Accumulation in the Northern Continental Margin of the South China Sea. Science Press, Beijing (in Chinese).
- He, J. X., Xia, B., Zhang, S. L., et al., 2006. Origin and Distribution of Mud Diapirs in the Yinggehai Basin and Their Relation to the Migration and Accumulation of Natural Gas. *Geology in China*, 33(6): 1336-1344 (in Chinese with English abstract).

- Hoang, B. H., Fyhn, M. B. W., Tong, D. C., et al., 2020. Paleogene Structural Development of the Northern Song Hong Basin and Adjacent Areas: Implications for the Role of Extrusion Tectonics in Basin Formation in the Gulf of Tonkin. *Tectonophysics*, 789: 228522. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2020.228522>
- Huchon, P., Lepichon, X., Rangin, C., 1994. Indo-China Peninsula and the Collision of India and Eurasia. *Geology*, 22: 27-30. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1994\)022<0027:IPATCO>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1994)022<0027:IPATCO>2.3.CO;2)
- Jolivet, L., Beyssac, O., Goffe, B., et al., 2001. Oligo-Miocene Midcrustal Subhorizontal Shear Zone in Indochina. *Tectonics*, 20, (1): 46-57. <https://doi.org/10.1029/2000tc900021>
- Lei, C., Ren, J. Y., Sternai, P., et al., 2015. Structure and sediment budget of Yinggehai-Song Hong Basin, South China Sea: Implications for Cenozoic tectonics and river basin reorganization in Southeast Asia. *Tectonophysics*, 655: 177-190. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.05.024>
- Leloup, P. H., Arnaud, N., Lacassin, R., et al., 2001. New Constraints on the Structure, Thermochronology, and Timing of the Ailao Shan-Red River Shear Zone, SE Asia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 106: 6683-6732. <https://doi.org/10.1029/2000jb900322>
- Li, J. Y., Cao, S. Y., Neubauer, F., et al., 2021. Structure and Spatial-Temporal Relationships of Eocene-Oligocene Potassic Magmatism Linked to the Ailao Shan-Red River Shear Zone and Post-Collisional Extension. *Lithos*, 396-397: 10263. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106203>
- Li, S. H., Advokaat, E. L., van Hinsbergen, D. J. J., et al., 2017. Paleomagnetic Constraints on the Mesozoic-Cenozoic Paleolatitudinal and Rotational History of Indochina and South China: Review and Updated Kinematic Reconstruction. *Earth-Science Reviews*, 171: 58-77. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.05.007>
- Li, S. T., Lin, C. S., Zhang, Q. M., et al., 1998. Dynamic Process of Episodic Rifting in the Basins of the Northern Continental Margin of the South China Sea and Tectonic Events Since 10 Ma. *Chinese Science Bulletin*, 1998(8): 797-810 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. L., Chen, X. Y., Tang, Y., et al., 2019. The Ailao Shan-Red River Shear Zone Revisited: Timing and Tectonic Implications. *GSA Bulletin*, 132: 1165-1182. <https://doi.org/10.1130/B35220.1>
- Mazur, S., Green, C., Stewart, M. G., et al., 2012. Displacement Along the Red River Fault Constrained by Extension Estimates and Plate Reconstructions. *Tectonics*, 31(5). <https://doi.org/10.1029/2012tc003174>
- McKenzie, D., 1978. Some Remarks on the Development of Sedimentary Basins. *Earth and Planetary Science Letters*, 40: 25-32. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(78\)90071-7](https://doi.org/10.1016/0012-821X(78)90071-7)

- Morley, C. K., Wang, Y., 2023. The Cenozoic Hyper-Oblique Collision Zone of Indochina: A Re-Appraisal of Escape Tectonics. *Earth-Science Reviews*, 243. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104453>
- Peron-Pinvidic, G., Manatschal, G., Alves, T., et al., 2019. Rifted Margins: State of the Art and Future Challenges. *Frontiers in Earth Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00218>
- Rangin, C., Klein, M., Rogues, D., et al., 1995. The Red River Fault System in the Tonkin Gulf, Vietnam. *Tectonophysics*, 243: 209-222. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(94\)00207-p](https://doi.org/10.1016/0040-1951(94)00207-p)
- Ren, J. Y., Pang, X., Yu, P., et al., 2018. Characteristics and Formation Mechanism of Deepwater and Ultra-deepwater Basins in the Northern Continental Margin of the South China Sea. *Chinese Journal of Geophysics*, 61(12): 4901-4920 (in Chinese with English abstract).
- Replumaz, A., Tapponnier, P., 2003. Reconstruction of the Deformed Collision Zone Between India and Asia by Backward Motion of Lithospheric Blocks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108, (B6): ETG1-1-1-24. <https://doi.org/10.1029/2001jb000661>
- Royden, L. H., Burchfiel, B. C., van der Hilst, R. D., 2008. The Geological Evolution of the Tibetan Plateau. *Science*, 321: 1054-1058. <https://doi.org/10.1126/science.1155371>
- Ru, K., 1988. The Development of Superimposed Basin in the Northern Margin of the South China Sea and Its Tectonic Significance. *Oil & Gas Geology*, 1988(1): 22-31 (in Chinese with English abstract).
- Sandwell David T., R. Dietmar Müller, Walter H. F. Smith, Emmanuel Garcia, Richard Francis. 2014. New global marine gravity model from CryoSat-2 and Jason reveals buried tectonic structure. *Science*, 346(6205): 65-67
- Sun, Z., Zhou, D., Zhong, Z. H., et al., 2003. Experimental Evidence for the Dynamics of the Formation of the Yinggehai Basin, NW South China Sea. *Tectonophysics*, 372: 41-58. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(03\)00230-0](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(03)00230-0)
- Tapponnier, P., Peltzer, G., Ledain, A. Y., et al., 1982. Propagating Extrusion Tectonics in Asia - New Insights from Simple Experiments with Plasticine. *Geology*, 10, (12): 611-616. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1982\)10<611:petian>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1982)10<611:petian>2.0.co;2)
- Wan, G. M., Tang, L. J., Jin, W. Z., 2010. The extensional dextral strike-slip duplex of JZ27-33 Block in Liaodong Bay. *Geology in China*, 37(6): 1584-1591(in Chinese with English abstract).
- Wang, K., Zhang, R. H., Zhao, J. L., et al., 2023. Implication of strike-slipping to tectonic fractures in the Kelasu structural belt, Kuqa Depression, Tarim Basin. *Natural Gas Geoscience*, 34(8): 1316-1327(in Chinese with English abstract).
- Wang Wan -yin, Zhang Jin-ai, Liu Ying, et al., 2013. Research on the tectonic boundary of Ying-

- Qiong basin and adjacent faults' features based on gravity and magnetic data. *Progress in Geophys.*, 28(3): 1575-1583, doi: 10. 6038/ pg20130355. (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z., Ren, J. Y., Hu, C., et al., 2025. Differential Extrusion of Indochina-South China Block and Its Interplay with Slab-Pull Tectonics: Evidence for End-Oligocene Basin Inversion in the Beibuwan Basin. *Tectonics*, 44(1): e2024TC008326. <https://doi.org/10.1029/2024TC008326>
- Xie, Y. H., Li, X. S., Tong, C. X., et al., 2015. High Temperature and High Pressure Gas Enrichment Condition, Distribution Law and Accumulation Model in Central Diapir Zone of Yinggehai Basin. *China Offshore Oil and Gas*, 27(4): 1-12 (in Chinese with English abstract).
- Xu, C. G., Gao, Y. D., Liu, J., et al., 2024. Discovery of “Detachment-core Complex Type” Basins Offshore the Northern South China Sea and Their Oil and Gas Geological Conditions: A Case Study of the Kaiping Sag in the Northern South China Sea. *Earth Science Frontiers*, 31(6): 381-404 (in Chinese with English abstract).
- Yan, J. X., Zhang, T. Y., Liu, J. L., et al., 2021. Lateral Subhorizontal Middle to Lower Crustal Flow in Response to Continental Collision: Evidence from the Diancang Shan Complex Along the Ailao Shan-Red River Belt, Southeastern Tibetan Plateau. *Journal of Structural Geology*, 143: 10423. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2020.104234>
- Yang, X. D., Feng, Y. C., Wu, X. C., et al., 2024. Control by Preexisting Morphology on Layer-Bound Faults in the Southern Qiongdongnan Basin, NW South China Sea. *Journal of Structural Geology*, 188: 105262. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2024.105262>
- Yu C H, Zhao J F, Shi X B, et al., 2017. Sediment density correction of gravity anomaly in the South China Sea and its significance to analyze regional tectonic characteristics. *Chinese J. Geophys.*, 60 (8): 3151-3166. doi: 10. 6038/ cjpg20170822. (in Chinese with English abstract)
- Yu, J. Y., Tong, D. J., Hu, C., et al., 2025. Two Stages of Rifting Control the Crust Thinning and Basin Evolution: Insights from the Southern Qiongdongnan Basin, NW South China Sea. *Basin Research*, 37(3): e70030. <https://doi.org/10.1111/BRE.70030>
- Zhang, B., Zhang, J. J., Liu, J., et al., 2014. The Xuelongshan High-Strain Zone: Cenozoic Structural Evolution and Implications for Fault Linkages and Deformation Along the Ailao Shan–Red River Shear Zone. *Journal of Structural Geology*, 69(PA): 209-233. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2014.10.008>
- Zhong, Z. H., Wang, L. S., Xia, B., et al., 2004. The Dynamics of Yinggehai Basin Formation and Its Tectonic Significance. *Acta Geologica Sinica*, 2004(3): 302-309 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, J. J., Zhan, W. H., Qiu, X. L., et al., 2004. Earthquake Focal Mechanism and Its Tectonic Significance Along the Two Sides of the Red River Fault Zone. *Geotectonica et Metallogenia*,

2004(3): 239-247 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 丁中一,杨小毛,马莉, 1997.莺歌海盆地拉张性质的研究.1997 年中国地球物理学会第十三届学术年会论文集.北京, 347.
- 付永涛,陈鹤霏,吴涛,等, 2024.红河断裂带在莺歌海盆地的延伸——中央断裂的识别.地质学报, 99(3): 704-718.
- 龚再升,李思田,谢泰俊,等, 1997.南海北部大陆边缘盆地分布与油气聚集.北京:科学出版社.
- 何家雄,夏斌,张树林,等, 2006.莺歌海盆地泥底辟成因、展布特征及其与天然气运聚成藏关系.中国地质, 33(6): 1336-1344.
- 雷超,任建业,裴健翔,等, 2022.莺歌海-琼东南盆地结合部记录的红河断裂带向海延伸及其演化过程.中国科学:地球科学, 52(1): 81-97.
- 李思田,林畅松,张启明,等, 1998.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.科学通报, 43(8): 797-810.
- 任建业,庞雄,于鹏,等, 2018.南海北部陆缘深水-超深水盆地成因机制分析.地球物理学报, 61(12): 4901-4920.
- 茹克, 1988.南海北部边缘叠合式盆地的发育及其大地构造意义.石油与天然气地质, (1): 22-31.
- 谢玉洪,李绪深,童传新,等, 2015.莺歌海盆地中央底辟带高温高压天然气富集条件、分布规律和成藏模式.中国海上油气, 27(4): 1-12.
- 徐长贵,高阳东,刘军,等, 2024.南海陆缘“拆离—核杂岩型”盆地发现与油气地质条件:以南海北部开平凹陷为例.地学前缘, 31(6): 381-404.
- 于传海,赵俊峰,施小斌,等, 2017.南海重力异常的沉积层密度改正及其对区域构造特征分析的意义.地球物理学报, 60(8): 3151-3166. Doi:10.6038/cjg20170822.
- 万桂梅,汤良杰,金文正, 2010.辽东湾 JZ27-33 区块伸展型右行走滑双重构造系统.中国地质, 37(6): 1584-1591.
- 王珂,张荣虎,赵继龙,等, 2023.塔里木盆地库车坳陷克拉苏构造带走滑作用对构造裂缝的影响.天然气地球科学, 34(8): 1316-1327.
- 钟志洪,王良书,夏斌,等, 2004.莺歌海盆地成因及其大地构造意义.地质学报, 78(3): 302-309.
- 王万银,张瑾爱,刘莹,张厚和,邱之云,任飞龙, 2013.利用重磁资料研究莺-琼盆地构造分界及其两侧断裂特征.地球物理学进展, 28(3): 1575-1583.
- 朱俊江,詹文欢,丘学林,等, 2004.红河断裂带两侧地震震源机制及构造意义.大地构造与成矿学, 28(3): 239-247.