

渐新世-早中新世莺歌海盆地断层活动特征以及与红河断裂带耦合关系

谢海洋¹, 史冠中^{1*}, 王华¹, 王羽飞¹, 刘思云¹, 魏驿超¹

1.中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

摘要: 莺歌海盆地关键断层与红河断裂带的运动学特征与动力学成因机制存在争议。利用地层回剥技术和平衡剖面恢复方法, 分析莺歌海盆地重要断层在不同时期的盆地沉降量和伸展量, 探讨红河断裂带构造活动与莺歌海盆地形成演化过程。研究表明, 在 30~21 Ma 期间走滑作用主要集中在 Song Lo 断层附近, 水平伸展作用较弱; 同时期的水平伸展作用主要集中在 Chay 断层一带。沉降中心位于河内凹陷的 Chay 断层、Thai Binh 断层与东西向断层带的叠加区域。21~15.5 Ma 期间, 盆地北部发生构造反转, 在临高凸起挤压隆升最为剧烈, Song Lo 断层、莺东和东方断层均发生不同程度的构造反转。Song Lo 断层与红河断裂带的活动特征相似, 莺东断层与东方断层是 Song Lo 断层在莺歌海盆内的南部延伸。印支地块逃逸过程同时伴随着重要的区域伸展过程, 走滑逃逸沿着莺歌海盆地东侧的边界断层发生, 而区域伸展作用在盆地内部及外围普遍存在, 构造反转与陆上左行剪切活动减弱和印支地块的旋转停止有关。

关键词: 红河断裂带; 莺歌海盆地; 构造沉降; 伸展量; 构造反转; 地球动力学; 构造地质。

中图分类号: P548

Characteristics of Oligocene Fault Activity in the Yinggehai Basin and Its Relationship with Left-Lateral Motion on the Ailao Shan-Red River Shear Zone

Xie Haiyang¹, Shi Guanzhong^{1*}, Wang Hua¹, Wang Yufei¹, Liu Siyun¹, Wei Yichao¹

1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The kinematic characteristics and dynamic mechanisms of key faults in the Yinggehai Basin and the Red River Fault Zone remain controversial. This study applies stratigraphic backstripping and balanced cross-section restoration to quantify subsidence and extensional rates of major faults in the Yinggehai Basin across different geological periods, aiming to clarify the tectonic activity of the Red River Fault Zone and the basin's evolutionary history. Results show that between 30 and 21 Ma, strike-slip faulting was primarily concentrated along the Song Lo Fault, while horizontal extension remained relatively minor. During this period, significant extensional deformation was localized in the Chay Fault zone. The main subsidence center was located in the Hanoi Depression, especially in the overlap zone of the Chay Fault, Thai Binh Fault, and east-west trending fault systems. From 21 to 15.5 Ma, tectonic inversion occurred in the northern basin, with the most intense compressional uplift centered on the Lingao Uplift. Concurrently, the Song Lo, Yingdong, and Dongfang Faults experienced varying degrees of tectonic inversion. The tectonic behavior of the Song Lo Fault mirrors that of the Red River Fault Zone, with the Yingdong and Dongfang Faults acting as southern extensions of the Song Lo Fault within the Yinggehai Basin. The escape tectonics of the Indochina Block was marked by substantial regional extension, with

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目 (No. U19B2007); 国家自然科学基金面上项目 (Nos. 42072142, 42172182)。

strike-slip deformation occurring along boundary faults on the eastern margin of the Yinggehai Basin, while extensional tectonics was widespread both within and around the basin. The observed tectonic inversion is closely linked to the reduction of left-lateral shear along onshore faults and the cessation of rotational motion of the Indochina Block.

Key words: Ailao Shan-Red River Shear Zone; Yinggehai Basin; tectonic subsidenc; amount of extension; inversion; geodynamics; tectonics.

0 引言

莺歌海盆地位于南海西部, 其形成演化与印度板块与欧亚板块碰撞以及太平洋板块俯冲的关系密切, 是记录南海西北大陆边缘历史的关键区域。长期以来, 围绕莺歌海盆地的构造演化有两种主要观点, 其一是挤压逃逸模式 (Tapponnier *et al.*, 1986; Briaies *et al.*, 1993), 其二是古南海拖曳模式 (Hutchison, 1996; Hall *et al.*, 2008)。前者认为印度板块与欧亚板块碰撞后, 印支地块的挤出逃逸是驱动盆地形成的主要因素; 后者则认为是古南海洋壳向婆罗洲俯冲导致盆地拉张形成。随着越来越多地球物理资料 (诸如古地磁数据、三维地震数据) 的积累, 有学者提出红河-越东-Lupar 断层是整个南海区域构造变形的重要分界线 (任建业等, 2011)。沿着这条构造界线, 莺歌海盆地主体位于挤出-逃逸构造区, 东侧边界为古南海俯冲拖曳区, 其形成主要受到印支地块挤出逃逸的影响, 部分区域受到古南海洋壳俯冲的影响 (雷超, 2015)。

红河断裂带是莺歌海盆地形成的关键构造单元。红河断裂带发源于青藏高原东南缘, 延伸 1 000 多公里进入南海 (Molnar and Tapponnier 1975; Rangin *et al.*, 1995; 许志琴等, 2011; Clift and Sun, 2006)。红河断裂带陆上部分又称为哀牢山-红河剪切带, 由北向南包括雪山山、点苍山、哀牢山、以及 Day Nui Con Voi (越南境内) 四个变质杂岩体。构造变形和年代学研究表明, 在晚渐新世-早中新世红河断裂带发生左行走滑运动, 在晚中新世-早上新世时期 (8~5 Ma), 红河断裂带发生右旋运动, 这两期走滑运动控制了莺歌海盆地的构造演化 (Tapponnier *et al.*, 1986; Tapponnier *et al.*, 1990; Leloup *et al.*, 1995; Rangin *et al.*, 1995; Jolivet *et al.*, 1999; Fyhn *et al.*, 2009; Fyhn *et al.*, 2018; Schoenbohm *et al.*, 2015)。红河断裂带左旋走滑运动开始的时间、运动模式、位移量以及动力学机制仍然有争议。有研究认为左旋剪切变形开始于 36 Ma 或 34 Ma, 于 21 Ma 进入脆性变形阶段, 并于 17 Ma 结束 (Leloup *et al.*, 1993; Wang *et al.*, 2000; Gilley *et al.*, 2003); 也有研究表明左旋韧性剪切开始于 31 Ma, 27~21 Ma 活动最为强烈 (Searle *et al.*, 2010; Cao *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2012)。王浩博等 (2019) 根据 EBSD 与年代学分析, 认为左行剪切大致为 35~20 Ma, 最晚持续至 13 Ma。张进江等 (2006) 将哀牢山剪切带划分了 58~56 Ma、27~22 Ma 和 13~12 Ma 三期走滑运动, 走滑形式分别为拉张性走滑、简单剪切和挤压性走滑。近海地震资料解释显示在 30~5.5 Ma 发生过显著的左行剪切运动, 并在 15.5 Ma (Rangin *et al.*, 1995) 或渐新世末期 (Fyhn *et al.*, 2018) 由伸展转换为挤压。

莺歌海盆地内的北西向断层及东西向断层构造运动特征与红河断裂带走滑活动关系尚不明确。本次研究从盆地内重要断层的活动特征出发, 进行构造沉降与平衡剖面分析, 开展断层几何学和运动学研究, 构建莺歌海盆地关键断层活动的时空序列, 并与红河断裂带变形特征进行对比, 探讨青藏高原东南缘逃逸构造与南海海盆打开的动力学关系。

1 区域地质背景

莺歌海盆地处于印度板块、欧亚板块以及太平洋板块的汇聚处, 是南海区域重要的伸展型盆地 (郭令智等, 2001; 孙珍等, 2003)。盆地面积约为 $12.17 \times 10^4 \text{ km}^2$, 平面上呈 NNW 向狭长菱形形态。盆地西北部发育一系列密集的北西向走滑断层, 如黑水河断层、马江断层,

与红河断裂带呈雁列式展布；盆地东侧为北部湾盆地、海南岛与琼东南盆地（Ren and Lei, 2011; Chen *et al.*, 2020; Yao *et al.*, 2023）。盆地构造单元包括北部的河内凹陷、临高凸起，中南部的中央凹陷、莺东斜坡和莺西斜坡、广义地堑和中建凸起的一部分（雷超等, 2022; 付红涛等, 2024）（图 1）。河内凹陷主体位于越南境内，陆上部分与红河断裂带接壤，入海与临高凸起相连。河内凹陷形成于始新世，受到北北西走向的断层控制，发育有一系列地堑和半地堑断陷，最大沉积深度达到 3.5 km（Yao *et al.*, 2023）。临高凸起为盆地一宽缓背斜，背斜轴部走向近于南北向，沿 15.5 Ma 地层界线发育明显“上削下超”的不整合面（雷超, 2012）。中央凹陷形态呈现椭圆状，北西向展布，是盆地面积最大，沉积最深（最深处达 17 km）的构造单元，也是油气勘探的主要地区（谢玉洪, 2009）。中央凹陷发现一系列规模巨大的底辟构造，呈雁列式排布，最大半径可达数公里（Lei *et al.*, 2011; 范彩伟, 2018）。中央凹陷两侧为莺西斜坡与莺东斜坡，莺西斜坡为一南北向宽缓斜坡，主要发育莺西断层。莺东斜坡为一北西向单斜构造，主要断层体系为东方断层、莺东断层和 1 号断层。

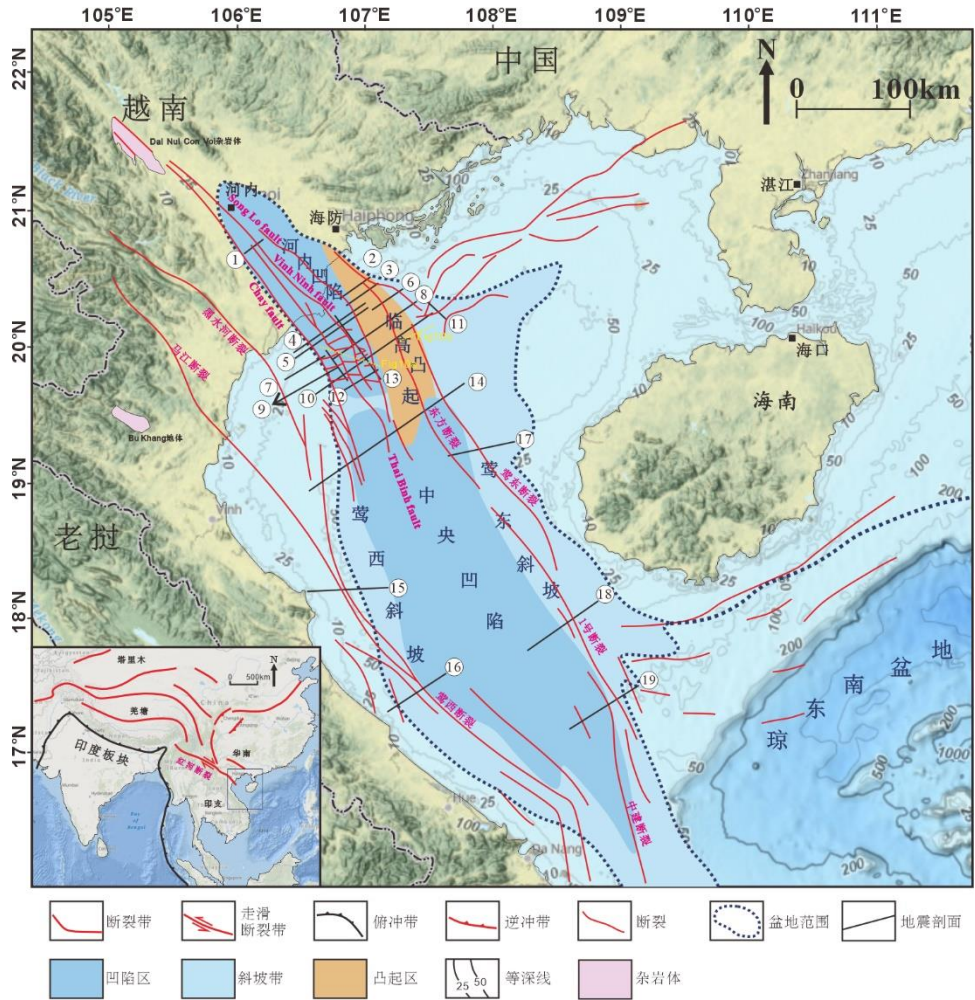


图 1 莺歌海盆地的构造格架

Fig.1 Tectonic framework of the Yinggehai Basin

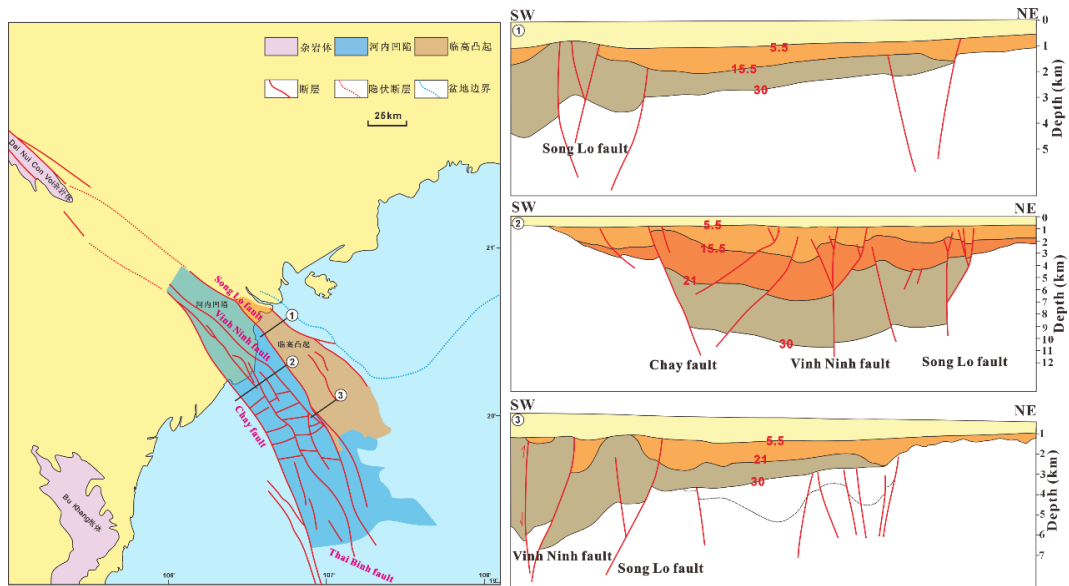


图 2 河内凹陷及临高凸起构造格架

Fig.2 Tectonic framework of the Hanoi Depression and the Lingao Uplift

已有的研究揭示出莺歌海盆地自渐新统至今的完整地层序列，自下而上分别为下渐新统崖城组、上渐新统陵水组、下中新统三亚组、中中新统梅山组、上中新统黄流组、上新统莺歌海组和更新统乐东组（图 3）。崖城组岩性主要为砂岩与砂泥岩互层，沉积环境整体与沼泽-海岸平原相、河流相类似。陵水组在盆地北部为海岸平原相砂、泥岩互层，在中央凹陷主要以半深海相细砂岩和泥岩为主。三亚组整体为滨浅海-半深海相，莺东斜坡带发育斜坡扇与盆底扇沉积。梅山组整体以浅海-半深海相为主，盆地边缘为三角洲沉积，河内凹陷的主要气藏也集中在梅山组。黄流组底界为区域不整合界面，盆地边缘以三角洲相和滨海相的砂岩为特征，凹陷区以浅海相细砂岩为主，莺东斜坡发育重力流水道和海底扇沉积。莺歌海组以厚层泥岩和粉砂岩沉积为主。乐东组发育外陆架浅海相黏土和砂砾层沉积（解习农等, 2009; 肖坤泽等, 2023; 王华等, 2023; 付红涛等, 2024）。

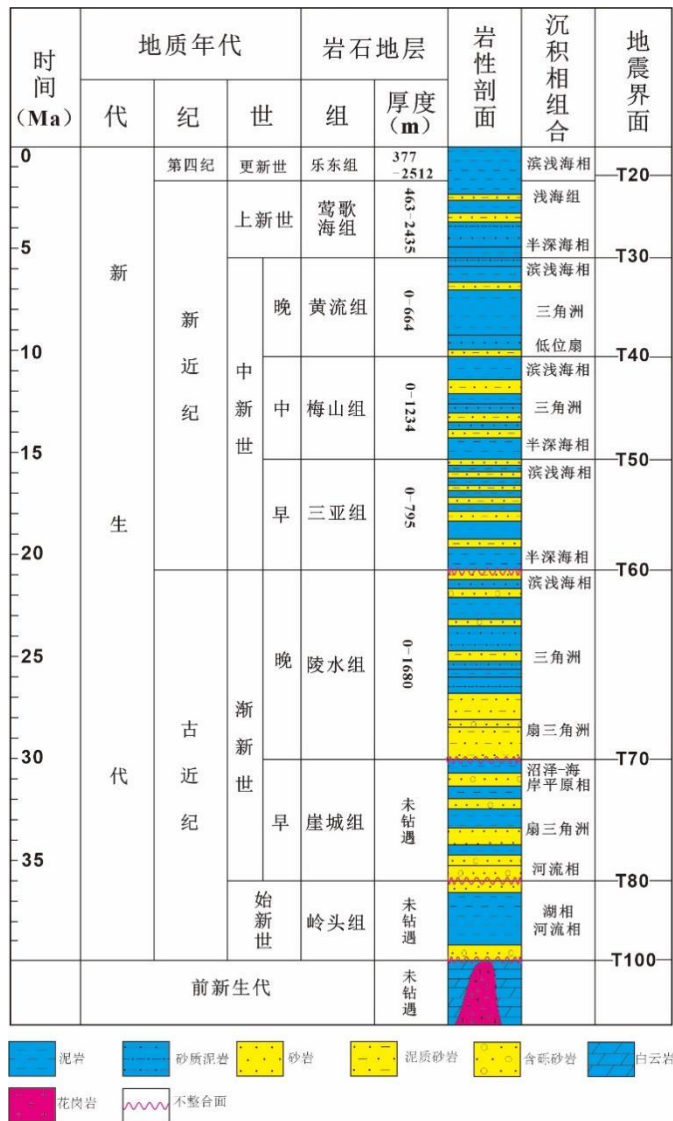


图3 莺歌海盆地综合柱状图（据解习农等, 2009 修改）

Fig.3 Stratigraphic division of the Yinggehai Basin (modified from Xie *et al.*, 2009)

2 研究方法

本文共选取了 8 条北西向断层（Chay 断层、Vinh Ninh 断层、Song Lo 断层、Thai Binh 断层、东方断层、莺东断层、莺西断层、1 号断层），及多条近东西向断层（主要为 Vinh Ninh 断层、Song Lo 断层以及 Chay 断层之间的协调断层），针对 30 Ma（早渐新世末）、21 Ma（早中新世）、15.5 Ma（早中新世末）、5.5 Ma（中新世末）四个关键时间节点开展断层附近沉降量和伸展量计算。其中 Chay 断层、Vinh Ninh 断层、Song Lo 断层、Thai Binh 断层主要发育在河内凹陷区域，为河内凹陷的控凹断层，断层具有明显的多期构造特征，15.5 Ma 后断层仍有活动。莺东断层及东方断层由临高凸起延伸至莺东斜坡区，1 号断层为盆地东侧的边界断层。莺西断层发育于莺西斜坡区，5.5 Ma 后仍有活动。

构造沉降量分析是在压实校正的基础上采用地层回剥技术，去除盆地沉积负荷，校正压实、古水深和海平面变化等因素逐层计算（Steckler and Watts 1978; Allen and Allen, 2013）。计算过程利用 BasinVis 2.0 软件，沿地震剖面构建虚拟井与实际钻井结合方式采集数据，虚拟井主要设置在断层的下盘。模拟过程采用了 Airy 稳态模型，该模型不考虑岩石圈的弯曲，其计算构造沉降值会偏大（Gouiza *et al.*, 2014）。每一口井输入数据主要包括地层的深度、

年代、岩性、古水深、海平面变化以及剥蚀厚度。其中深度直接从地震剖面中读出，误差主要来自地震平均层速度的变化。本研究地层的年代取自前人关于盆地演化的研究（解习农等, 2009; 任建业和雷超, 2011）。考虑成岩环境的差异，莺歌海盆地不同区域岩性特征略有差异，本次研究将莺歌海盆地划分为四个构造区域（河内凹陷陆上部分、河内凹陷海域部分及临高凸起、莺西斜坡、莺东斜坡），并通过探井（LG1120、LT11A1）推算虚拟井岩性组成。孔隙度及压实参数的经验值参考已有研究数据（Gallagher and Lambeck 1989; Zhao *et al.*, 2015）。古水深数据是最大的误差来源，前人的研究发现，该地区的水深普遍小于 200 m（Lei *et al.*, 2015），本次研究古水深主要根据沉积相、ODP1148 岩心记录和有孔虫数据资料进行定量计算（何卫军等, 2011）。海平面的变化参考海水氧同位素的研究，与莺歌海盆地陆架坡折层序地层的研究相对比，数据吻合度较高（Kenneth *et al.*, 2005; Xie *et al.*, 2008）。

各个时期的伸展量利用 Move 软件通过平衡剖面技术分析研究区的 19 条剖面获取，具体构造位置见表 1。平衡剖面分析采用等面积法，具体过程包括剥蚀量的恢复，去压实校正、断距消除及层拉平操作。剥蚀量恢复采用趋势法根据不整合面展布特征和地层对比进行。伸展断层的平衡剖面恢复主要使用垂直-倾斜剪切机制。通过层拉平操作后得到每期地层的原始未变形的长度（ L_0 ），从而计算每一时期的剖面伸展量 ΔL 以及剖面伸展率 r ，由于没有考虑地层内部的变形，计算的伸展率代表最小伸展率：

$$\Delta L = L_h - L_0, \quad ,$$

$$r = \Delta L / L_0, \quad ,$$

其中 L_h 为变形后的长度， L_0 为层拉平操作后得到每期地层的原始未变形的长度，单位 m。当 ΔL 与 r 为负值时，分别对应剖面挤压量和剖面挤压率。

表 1 剖面发育的主要断层

剖面	主要发育断层	盆地构造单元
1	Thai Binh 断层、Vinh Ninh 断层	河内凹陷
2	Song Lo 断层、东方断层	临高凸起
3	Song Lo 断层、东方断层	
4	Chay 断层、Vinh Ninh 断层、Song Lo 断层、Thai Binh 断层	
5	Chay 断层、Vinh Ninh 断层、Song Lo 断层、Thai Binh 断层	河内凹陷
6	东方断层、	临高凸起
7	Chay 断层	河内凹陷
8	Thai Binh 断层、Vinh Ninh 断层、Song Lo 断层、东方断层	河内凹陷、临高凸起
9	Chay 断层与 Thai Binh 断层之间的东西向断层	河内凹陷
10	Chay 断层、Vinh Ninh 断层、Song Lo 断层、Thai Binh 断层 东方断层、莺东断层	莺西斜坡、临高凸起、莺东斜坡
11	北东向小断层	莺东斜坡
12	Vinh Ninh 断层、Song Lo 断层、Thai Binh 断层	莺西斜坡
13	Vinh Ninh 断层与 Song Lo 断层之间东西向断层	河内凹陷、临高凸起
14	莺西断层、Chay 断层、Thai Binh 断层、东方断层、莺东断层	莺西斜坡、临高凸起、中央凹陷
15	莺西断层	莺西斜坡

16	莺西断层	
17	东方断层、莺东断层	莺东斜坡
18	1 号断层	
19	1 号断层	中央凹陷、莺东斜坡

Table 1 The major faults developed in the section

3 结果

3.1 河内凹陷陆上区域

河内凹陷陆上区域穿越 Thai Binh 断层与 Vinh Ninh 断层的地震剖面构造沉降量计算表明，陆上区域自 30 Ma 以来构造沉降量都呈现逐步减少的趋势，其中 30~21 Ma、21~15.5 Ma 平均构造沉降量分别为 759 m、494 m（图 4、图 5）。

30~21 Ma Vinh Ninh 断层构造沉降量为 894 m，沉降速率最高，达到 0.09 km/Myr；Thai Binh 断层的构造沉降量为 780 m，沉降速率为 0.08 km/Myr（图 3a, 3b）。这个时期 Vinh Ninh 断层与 Thai Binh 断层处于伸展状态，伸展量分别达到了 675 m 与 563 m（图 3a, 3b），两条断层均呈铲状正断层的几何形态。

21~15.5 Ma Thai Binh 断层构造沉降量为 432 m，Vinh Ninh 断层构造沉降量为 323 m。这个时期 Vinh Ninh 断层由伸展转变为挤压缩短，缩短量为 503 m，Thai Binh 断层受到构造反转的影响，断层东侧地层隆升剥蚀，但整个时期整体上仍以拉伸构造为主，断层断面平缓，总体伸展量为 430 m（图 3a, 3b）。因此，21~15.5 Ma 期间挤压构造主要集中在 Vinh Ninh 断层附近，断层由铲状正断层变为逆断层，断层西侧地层发生明显褶皱。

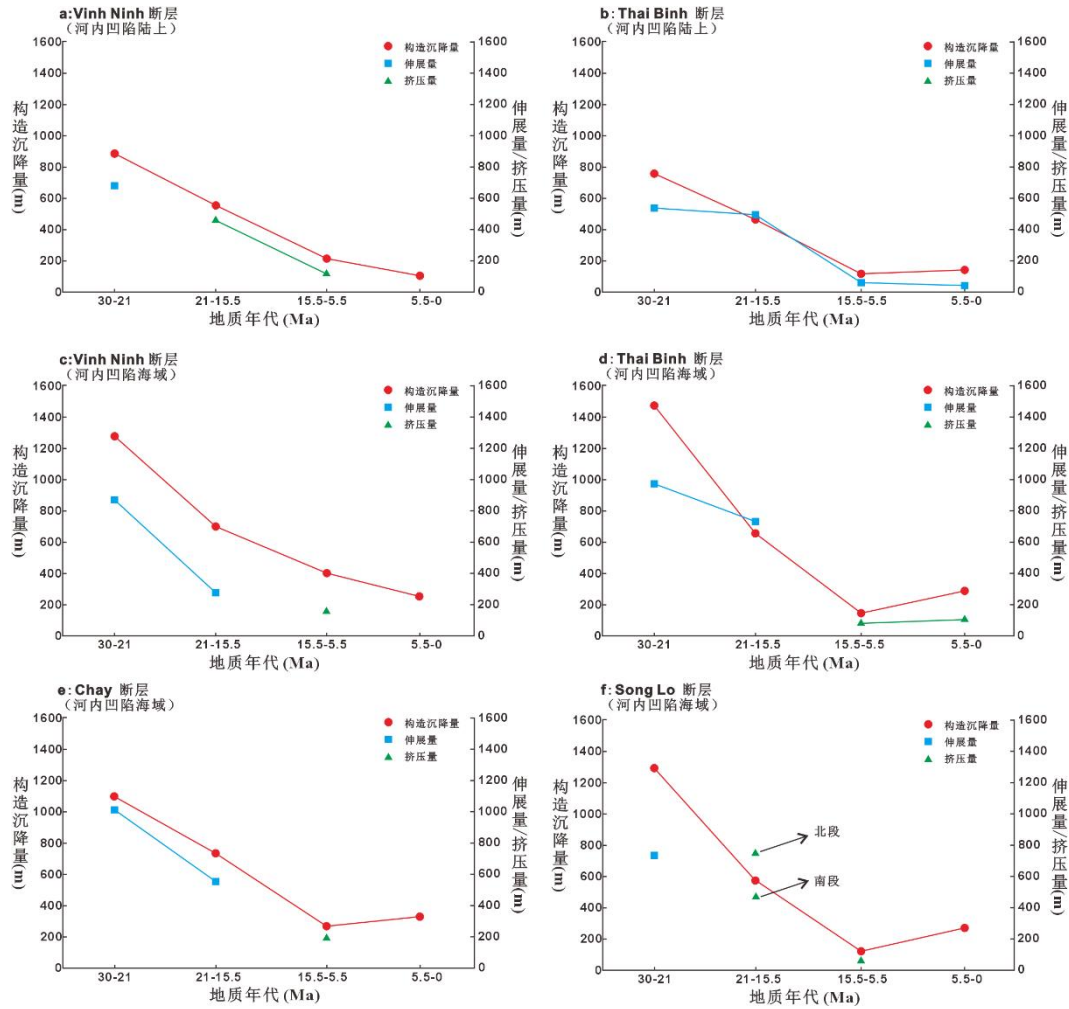


图 4 莺歌海盆地河内凹陷主要断层活动性

Fig.4 The tectonic subsidence and extension (compression) amounts of faults in the Ha Noi Depression

3.2 河内凹陷海域区域及临高凸起

河内凹陷海域区域及临高凸起有 13 条地震剖面穿过 (表 1), 涉及 Chay 断层、Vinh Ninh 断层、Thai Binh 断层、Song Lo 断层、东方断层、莺东断层及多条近东西向断层 (图 1)。东西向断层在平面上呈平行阶状分布, 与北东向断层斜交 (图 4)。本文将 Chay 与 Thai Binh 断层间、Vinh Ninh 与 Song Lo 断层间的东西向断层称为断层带 1 和断层带 2, 它们均为向东南倾斜的铲状正断层。河内凹陷海域部分, 30~21 Ma 期间平均构造沉降量为 1 040 m, 临高凸起平均构造沉降量为 682 m。沉降中心处于 Chay 断层与 Thai Binh 断层之间, 位于北西向断层与东西向断层带的叠加区域, 沉降量大于 1 500 m (图 4)。21~15.5 Ma 期间河内凹陷海域部分平均构造沉降量为 724 m; 临高凸起平均构造沉降量为 138 m (图 4, 图 5)。

30~21 Ma 期间断层附近构造沉降作用最强。Chay 断层、Vinh Ninh 断层、Thai Binh 断层与 Song Lo 断层构造沉降量分别为 1 080 m、1 273 m、1 460 m 和 1 293 m, 沉降速率分别为 0.12 km/Myr、0.14 km/Myr、0.16 km/Myr、0.14 km/Myr (图 3c, 3d, 3e, 3f)。东西向断层带 1 与断层带 2 构造沉降量分别为 1 485 m 和 1 067 m, 沉降速率为 0.16 km/Myr 和 0.11 km/Myr。东方断层与莺东断层的构造沉降量相对较小, 分别为 965 m、403 m, 沉降速率分别位 0.10

km/Myr、0.04 km/Myr（图 7a, 7b）。伴随强烈的垂向沉降，断层均表现出强烈的伸展作用。Chay 断层、Thai Binh 断层、Song Lo 断层的伸展量分别为 1 070 m、980 m、740 m。30~21 Ma 期间，Chay 断层、Thai Binh 断层和 Song Lo 断层的伸展量与构造沉降量比值分别为 0.99、0.67 和 0.57，暗示走滑作用主要集中在东北侧的 Song Lo 断层带附近，而水平伸展作用主要发育在西南侧的 Chay 断层一带。Vinh Ninh 断层的运动学特征具有明显的分段性，在河内凹陷海域区域由北侧的为纯走滑为主向南过渡为强伸展作用为主，总体伸展量达 860 m（图 3c, 图 6）。东西向断层带 1 和断层带 2 伸展量分别高达 4 574 m 和 2 215 m，断层的伸展量与构造沉降量比值分别为 3.08 和 2.08，说明 30~21 Ma 期间北西向走滑断层之间的近东西向协调断层表现为强烈的近南北向水平伸展作用。此时临高凸起区域的东方断层及莺东断层的伸展量为 549 m 与 468 m（图 7a, 7b）。

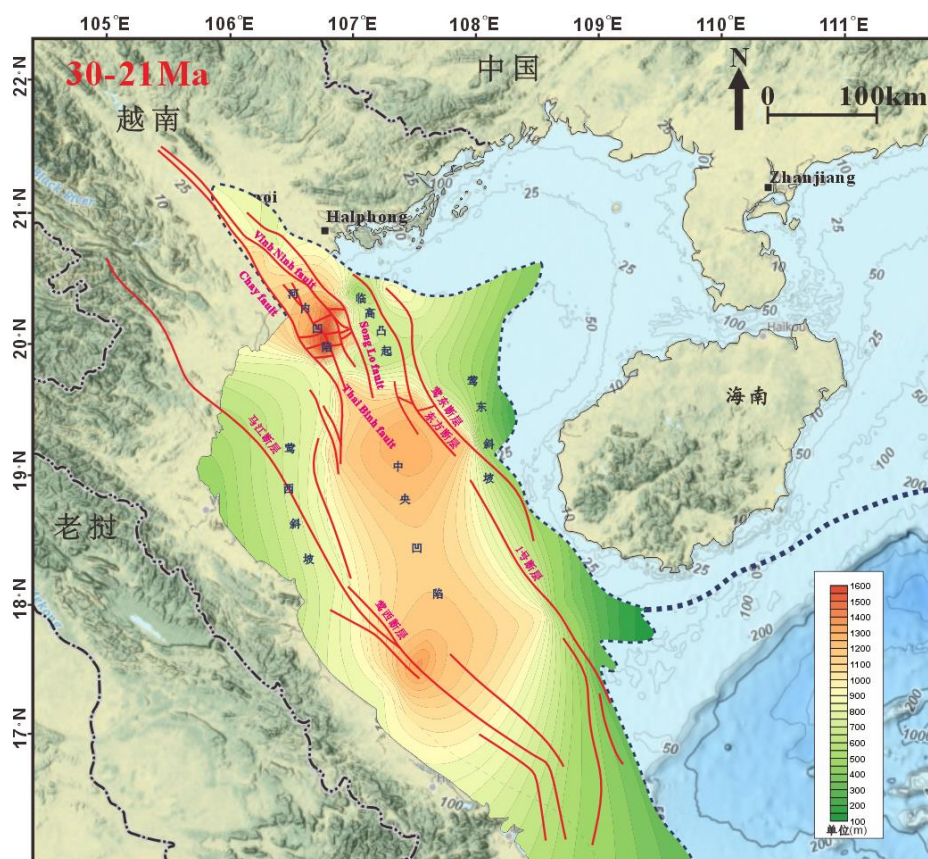


图 5 30~21 Ma 期间莺歌海盆地构造沉降量平面分布

Fig.5 The planar distribution of tectonic subsidence in the Yinggehai Basin during 30-21 Ma

21~15.5 Ma 期间河内凹陷断层的构造沉降量降低，临高凸起东北部发生强烈的构造反转，三亚组地层全部剥蚀（Hoang *et al.*, 2020）。Chay 断层、Vinh Ninh 断层、Thai Binh 断层与 Song Lo 断层构造沉降量分别为 736 m、700 m、741 m、583 m（图 3c, 3d, 3e, 3f）。东西向断层带 1 和断层带 2 的构造沉降量分别为 780 m 和 238 m。东方断层及莺东断层的构造沉降量为 280 m 与 182 m（图 7a, 7b）。

21~15.5 Ma 期间，Song Lo 断层北段挤压量达到 700 m，断层下盘反转隆升，隆升量约为 100~200 m，地震信号出现强烈的角度截断现象，梅山组地层直接覆盖在隆起构造上；Song Lo 断层南段在河内凹陷先伸展后挤压，挤压量为 420 m（图 3f）。Thai Binh 断层与 Vinh Ninh 断层也呈现先伸展后挤压的活动特征，伸展量分别为 430 m 与 260 m，形成正花状构造形态（图 6）。Chay 断层表现为微弱伸展作用，伸展量为 560 m。由此可知，21-

15.5 Ma 期间伸展作用主要发育在 Chay 断层附近，而构造挤压作用集中分布在 Song Lo 断层附近，与构造沉降量总体分布特征一致。东西向断层带 1 与断层带 2 伸展量降低，分别为 840 m 与 620 m，此时断层的伸展量与构造沉降量比值分别为 1.07 和 2.61，近南北向的伸展作用集中在 Vinh Ninh 和 Song Lo 断层之间，与两条断层的差异压扭性走滑活动有关。莺东断层与东方断层出现不同程度的构造挤压作用，挤压量分别为 230 m 与 190 m，渐新世顶界面被强烈侵蚀。

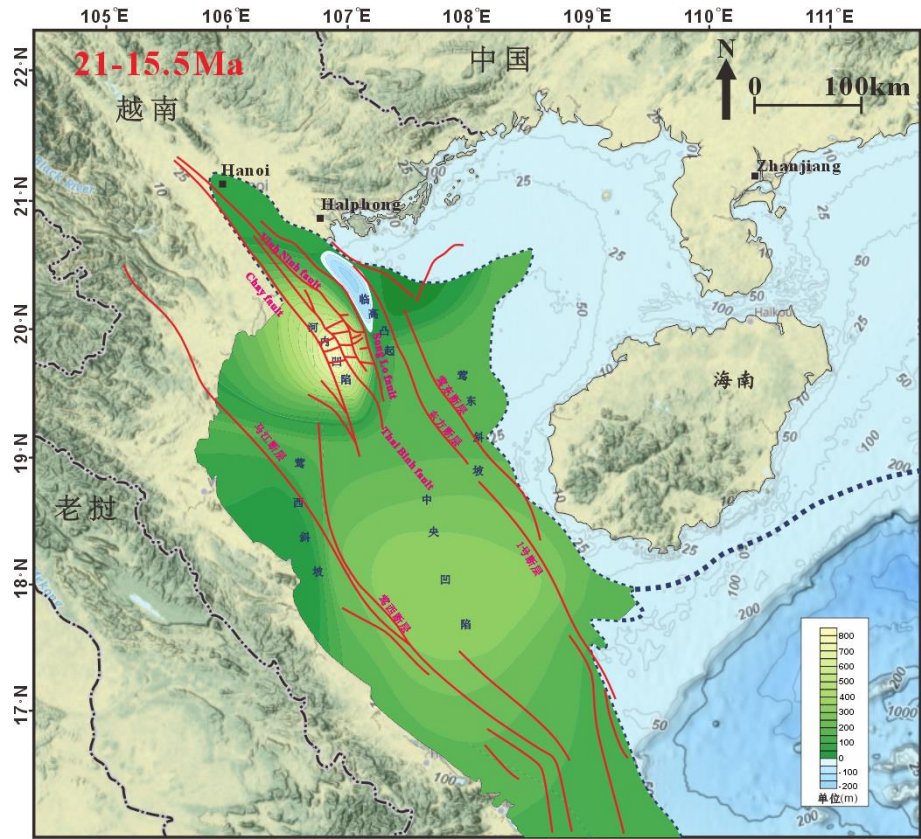


图 6 21~15.5 Ma 期间莺歌海盆地构造沉降量平面分布

Fig.6 The planar distribution of tectonic subsidence in the Yinggehai Basin during 21-15.5 Ma

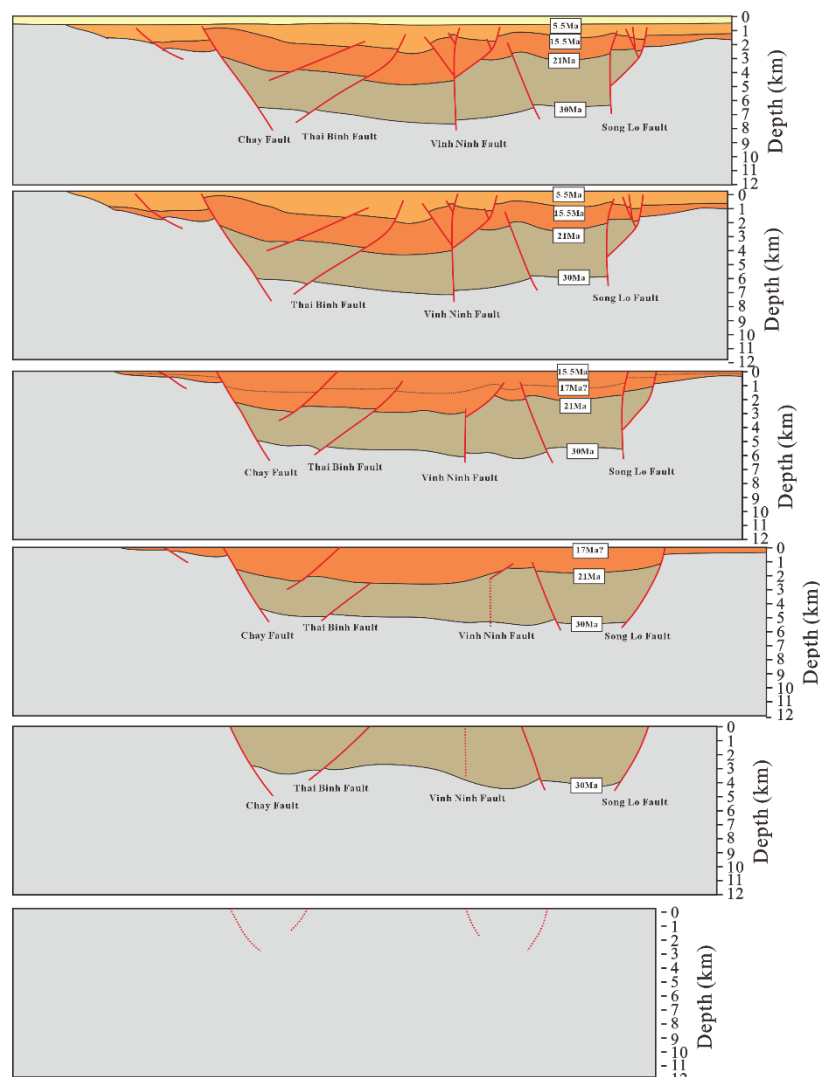


图 7 河内凹陷海域区 Chay 断层、Thai Binh 断层、Vinh Ninh 断层及 Song Lo 断层构造演化（剖面位置见图 1 的 4 号线）

Fig 7 Tectonic evolution of the Vinh Ninh Fault, Chay Fault, and Song Lo Fault in Ha Noi Maritime Depression Area (see section 4 in Fig.1)

3.3 莺西斜坡

莺西斜坡在 30~21 Ma 期间的平均构造沉降量为 842 m，21~15.5 Ma 期间的平均构造沉降量为 300 m（图 4，图 5）。北西向的莺西断层为该区域主要断层，将中央凹陷与莺西斜坡分开。断层由河内凹陷南部延伸至盆地内，与越南中部的马江断层斜交。30~21 Ma 期间莺西断层的构造沉降量为 901 m。此期间莺西断层及其周边次级断层均为正断层，其中莺西断层的伸展量最大，高达 750 m。21~15.5 Ma 期间莺西断层的构造沉降量为 421 m（图 7e）。莺西断层由伸展转换为挤压，挤压量为 158 m，并且挤压作用由北向南逐渐增强。

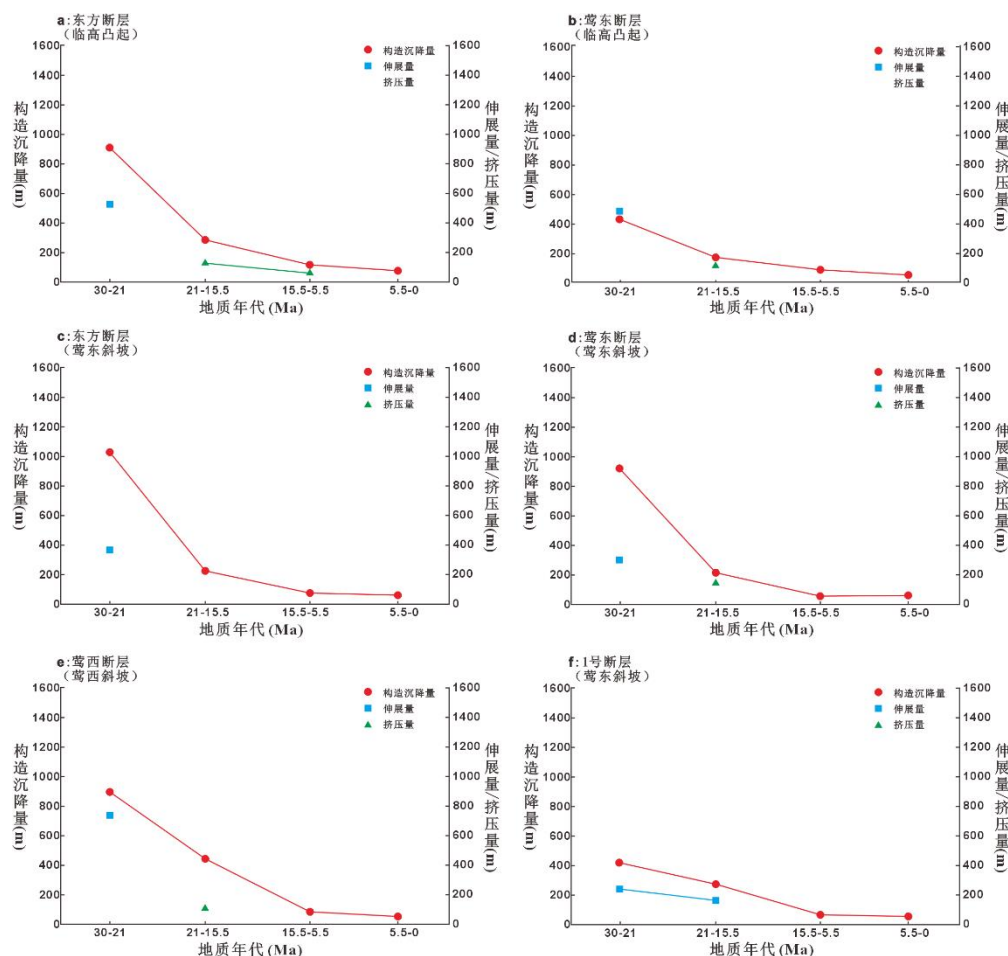


图 8 莺西断层及莺东斜坡主要断层活动性

Fig.8 The tectonic subsidence and extension (compression) amounts of faults on the Yingxi Slope and Yingdong Slope

3.4 莺东斜坡

莺东斜坡主要发育莺东断层、东方断层、1 号断层三条北西向断层。其中莺东断层、东方断层由临高凸起区域延伸至盆地中部，1 号断层由盆地中部延伸至盆地南部。

莺东斜坡在 30~21 Ma、21~15.5 Ma 时期的平均构造沉降量分别为 920 m、254 m（图 4、图 5）。在 30~21 Ma 期间，东方断层、莺东断层构造沉降量分别为 1 010 m 和 928 m，明显高于 1 号断层的 410 m（图 7c, 7d, 7f）。30~21 Ma 期间，伸展活动主要集中在莺东断层与东方断层，伸展量为 314 m 和 376 m，1 号断层的伸展量为 240 m。21~15.5 Ma 期间，东方断层、莺东断层及 1 号断层的构造沉降量减弱，分别为 202 m、212 m、240 m；此期间东方断层水平伸展活动停止，莺东断层发生微弱的挤压反转（图 11c），挤压量为 150 m。1 号断层的伸展活动减缓，伸展量为 181 m（图 7f）。

4 讨论

4.1 断层活动特征与红河断裂带的耦合关系

河内凹陷陆上部分与红河断裂带南部的 Dai Nui Con Voi 变质杂岩体相邻，Dai Nui Con Voi 变质杂岩体边界分别为西南侧的红河断层与东北侧的 Song Chay 断层（Jolivet *et al.*, 2001）。这两条断层与 Chay 断层、Vinh Ninh 断层以及 Song Lo 线性平行分布（Joviet *et al.*, 2001；

Fyhn *et al.*, 2018)。在断层形态上, Thai Binh 断层与 Vinh Ninh 断层均为陡峭的铲状正断层形态, 显示伸展断层的特点。Song Lo 断层较为陡峭, 具有张扭性断层特征(图 2, 图 10b)。在 30~21Ma 期间, 红河断裂带由伸展走滑向简单剪切转换, 断层活动具有明显分段性, 不同断层部位呈现出差异性运动学特征(Morley and Wang 2023; Luo *et al.*, 2024, 图 8)。此时期, 河内凹陷陆上 Thai Binh 断层、Vinh Ninh 断层同样表现出明显的伸展走滑特征, 形成了相对窄且深的裂谷(Zhu *et al.*, 2009)。河内凹陷海域部分, 北西向断层向南逐渐偏转 20°。Chay 断层剖面上为“y 型”, 断面较缓, Thai Binh 断层呈现正花状结构, Song Lo 断层断面较陡, 呈一陡峭的“y 型”, 部分段上部发育正花状构造。沉降量和水平伸展量分析表明, 这些断层的活动性表现出较大差异: 走滑运动主要集中在 Song Lo 断层附近, 而水平伸展量主要分布在西南侧的 Chay 断层一带。临高凸起东侧的莺东断层和东方断层与 Song Lo 断层活动特征类似, 水平伸展量较小, 表现为强烈的走滑活动。莺东斜坡中莺东断层与东方断层走滑伸展活动较临高凸起区域增强。南部的 1 号断层剖面上呈现铲状或“y”型, 呈现斜滑正断层特点, 由北向南断距增加, 这一时期的伸展活动是先存构造活化为左旋走滑断层的结果(肖坤泽等, 2024)。

21~15.5 Ma 期间, 红河断裂带左行剪切运动减弱, 变质岩体的隆升速率减弱(Leloup *et al.*, 2001; Searle, 2010)。此期间莺歌海盆地北西向断层构造活动减弱, 局部发生挤压反转。构造反转主要集中在 Song Lo 断层北部, 表现为隆升形成明显的角度不整合面, Chay 断层与东西向断层带伸展活动减弱(Huang *et al.*, 2020)。Thai Binh 断层与 Vinh Ninh 断层在陆上及河内凹陷海域北部, 局部出现构造反转的现象, 发育正花状构造(Zhu *et al.*, 2009)。河内凹陷海域区域构造反转现象不明显, 可能是 30~21 Ma 期间拉伸形成的巨大的容纳空间缓冲了 21~15.5 Ma 的挤压作用(Fyhn *et al.*, 2018)。莺东断层在临高凸起附近发生强烈的构造反转, 而在莺东斜坡区域挤压反转作用不明显, 东方断层此时期活动性最弱。此时期 1 号断层仍然表现出伸展作用。

综上, 断层几何学与运动学特征对比表明, Song Lo 断层与哀牢山-红河剪切带直接相关, Song Lo 断层是红河断裂带的直接延伸。在 30~21 Ma 期间两者均呈现出以走滑为主的活动特征, 而 21~15.5 Ma 则以构造挤压为主。Thai Binh 断层、Vinh Ninh 断层和 Chay 断层活动性与 Song Lo 断层的活动性存在差异, 在 30~21 Ma 期间走滑活动同时均呈现出不同程度的伸展量, 21~15.5 Ma 期间则反转构造活动向西南逐渐减弱。东方断层、莺东断层代表了 Song Lo 断层向盆地中心的主要延伸, 30~21 Ma 期间兼具走滑与伸展活动, 21~15.5 Ma 期间表现为不同程度的构造反转。

4.2 走滑伸展作用与莺歌海盆地形成

孢粉地层学证实莺歌海裂谷作用在中-晚始新世打开并持续到渐新世末(Morley and Racey, 2011; Morley, 2014; Fyhn *et al.*, 2018)。此时期北西向断层的走滑伸展运动与莺歌海盆地形成演化关系密切。莺歌海盆地各个构造单元受到北西向断层走滑伸展的作用, 盆地经历不同程度的构造沉降并接受大量沉积。河内凹陷陆上区域北西向断层与红河断裂带直接关联, 30~21 Ma 期间伸展量达 1~1.5 km。河内凹陷海域, 伸展量逐渐增至 3.5~4 km(图 4, 9)。Chay 断层与 Song Lo 断层为河内凹陷的两条边界断层, 其间东西向断层带呈左行阶状错落分布, 沟通了 Chay 断层、Song Lo 断层、Vinh Ninh 断层与 Thai Binh 断层等主要走滑断层。研究表明, 东西向断层带 1 和断层带 2 构造沉降量分别为 1 485 m 和 1 067 m, 沉降速率高达 0.16 km/Myr 与 0.11 km/Myr, 伸展量为 4 574 m 和 2 215 m, 是左旋走滑机制形成的伸展拉张断层, 它们影响了盆地的伸展和沉降的中心, 控制了盆地开启过程和砂体填充(王华等, 2023; 付红涛等, 2024)。莺东斜坡区域, 莺东断层和东方断层是 Song Lo 断层的盆内延伸, 表现同样的构造活动特征, 呈现走滑伸展活动特征(图 9), 较小的伸展量可能与临高凸起区域内次级构造单元的阻碍作用有关(Huang *et al.*, 2020)。这些断层活动性表明, 莺歌

海盆地的边界断层(例如 Song Lo 断层、莺东断层和东方断层)主要以走滑运动为主, 勾勒出莺歌海盆地几何边界, 而盆地伸展作用主要集中在盆地内部和西南一侧, 其伸展量由北西向断层(例如 Chay 断层)以及北西向断裂之间的东西向断层带控制。盆地西部边界断层(莺西断层)伸展量呈现南北差异, 其南部伸展量达 3~3.5 km, 可能是受到马江断层的影响。同时 Chay 断层西侧可能发育与 Chay 断层约 15°~20° 夹角的 Riedel 剪切, 也证实伸展走滑活动 (Fyhn *et al.*, 2018; Hoang *et al.*, 2020)。

莺歌海盆地西南侧的 Bu Khang 地体在 36~21 Ma 经历了一次北东-南西向的拉伸运动, 与莺歌海盆地拉伸运动属于同一时期(Jolivet *et al.*, 1999)。此时期越南北部的次级盆地及北部湾盆地也处于伸展背景, 越南北部的次级盆地裂陷可能开始于中/晚始新世至渐新世之间, 大概持续了 16 Ma 至 12 Ma (Huang, 2013)。这些事实表明, 伸展作用在莺歌海盆地及外围广泛发育, 与盆地边界断层的走滑活动没有必然联系。印支地块沿红河断裂带挤出逃逸控制了莺歌海盆地及周缘地区走滑作用机制 (Huang, 2013; Fyhn *et al.*, 2018)。本研究认为印支地块逃逸过程同时伴随着重要的区域伸展作用过程, 走滑逃逸过程主要发生在莺歌海盆地东侧的边界断层, 而区域伸展作用在盆地内部及外围普遍存在。

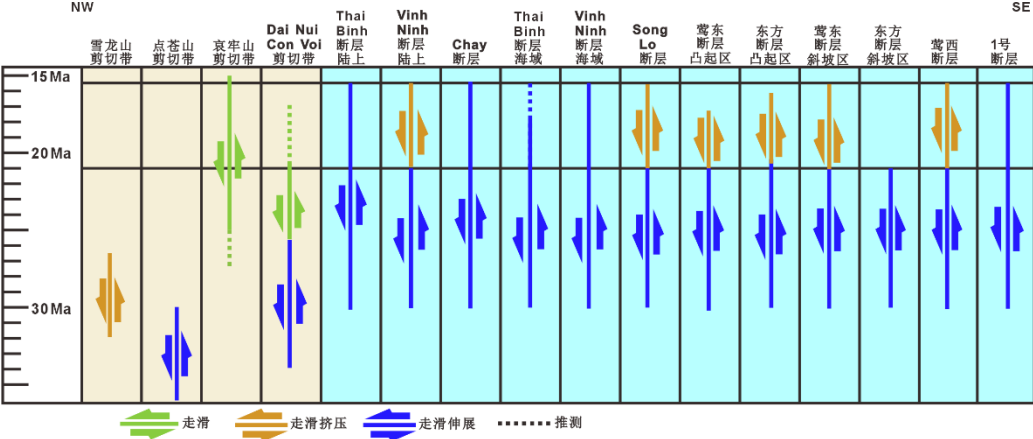


图 9 哀牢山-红河剪切带及莺歌海盆地断层运动特征(雪龙山、点苍山、哀牢山和 Dai Nui Con Voi(资料据 Morley *et al.*, 2023)

Fig.9 Fault movement characteristics of the Ailaoshan-Red River Shear Zone and Yinggehai Basin (data is based on Morley *et al.*, 2023)

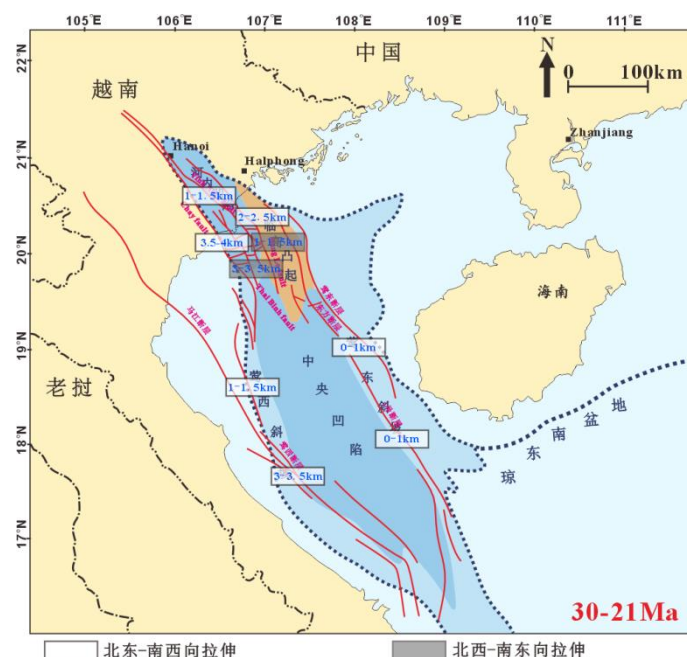


图 10 30~21 Ma 莺歌海盆地伸展量

Fig.10 Extension amounts in the Yinggehai Basin during 30-21 Ma

Song Lo 断层、东方断层、莺东断层以走滑为主；北东-南西向水平伸展量沿着 Song Lo 断层、Thai Binh 断层、Vinh Ninh 断层、Chay 断层向西南逐渐增强

4.3 莺歌海盆地构造反转

红河断裂带内 Dai Nui Con Voi 杂岩体在 26 Ma 左右由走滑伸展转变为简单剪切走滑，左旋运动减弱，在 20 Ma 进入隆升剥露状态 (Jolivet *et al.*, 2001; 任龙龙等, 2020)。该构造隆升与 Song Lo 断层由走滑伸展转换为走滑挤压相对应 (Searle *et al.*, 2010)。21~15.5 Ma 期间构造挤压集中在盆地的东北侧，向盆地中心逐渐减弱。北西向断层表现出伸展活动减弱或构造反转，反转构造向盆地东侧逐渐迁移(图 11)。河内凹陷陆上区域 Thai Binh 断层在东北侧形成隆起，Vinh Ninh 断层反转主要发生在渐新世末-早中新世 (Hoang *et al.*, 2020)。临高凸起北部区域发生挤压隆起，其中 Song Lo 断层东侧构造反转强烈，上盘隆起高度超 100 m，导致三亚组地层缺失。河内凹陷海域部分至中央凹陷区域，构造反转作用不明显。河内凹陷海域部分的 Vinh Ninh 断层发育正花状构造 (图 10)。莺东斜坡的东方断层停止活动，莺东断层和莺西断层南段均有不同程度的挤压隆升(图 11)。

北部湾盆地构造反转特征明显，渐新世地层隆起，早中新世地层剥蚀，中中新世地层与渐新世地层呈角度不整合接触。这一区域的主要特征为高角度的地层削截，显著的地形起伏。同时隆起周围地层呈现超覆的特征。在这些隆起区常常伴随发育同向的逆断层，边界的正断层发生逆转。反转最剧烈为北部湾盆地的西北部 (Fyhn *et al.*, 2018; Hoang *et al.*, 2020)。陆上的 Day Nui Con Voi 的变质杂岩体在 25.2 ± 1.4 Ma 左行韧性剪切结束，在 21~17 Ma 进入脆性走滑阶段 (Leloup *et al.*, 2001)。在这一时期，莺歌海盆地的左行位移大幅度减小，总量小于几十公里，这与陆上的红河剪切带的运动相对应 (Rangin *et al.*, 1995a)。同时印支地块的旋转停止，左行走滑运动抑制性弯曲，形成北东-南西向的反转构造，并在北部湾盆地西北侧反转强度达到最大。因此本文认为构造反转与陆上左行剪切减弱和印支地块的旋转停止有关。

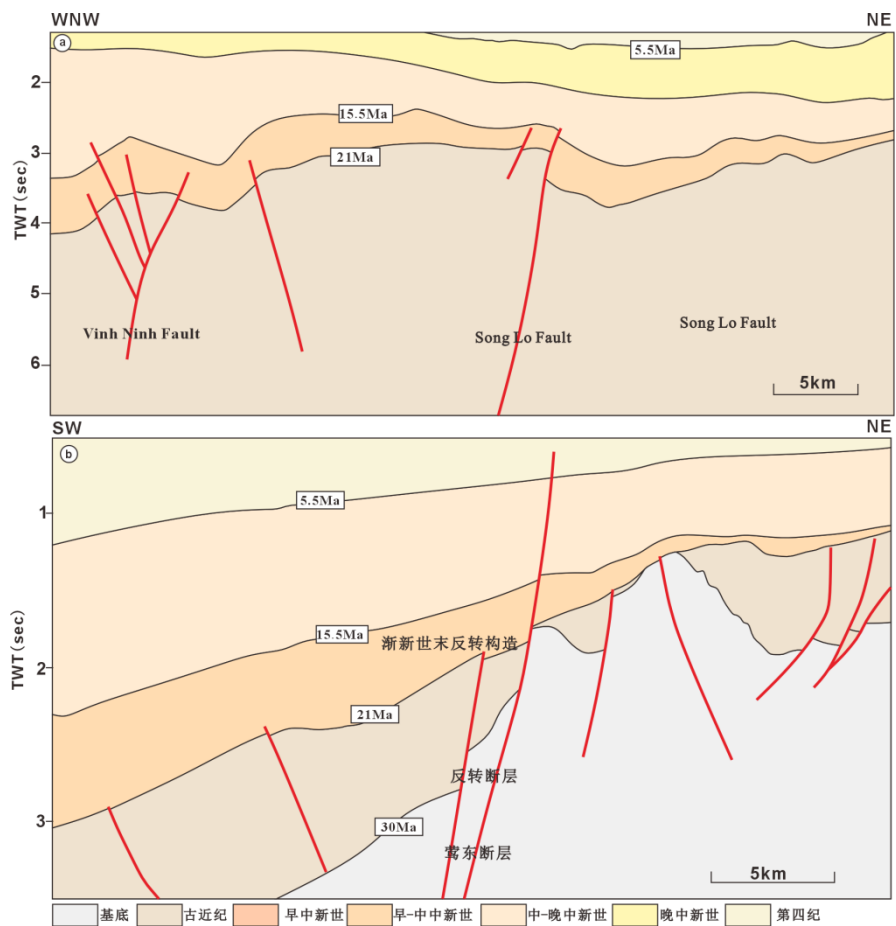


图 11 构造反转类型 (剖面位置见图 1)

Fig.11 Types of inversion in the Yinggehai Basin (see section location in Fig 1)

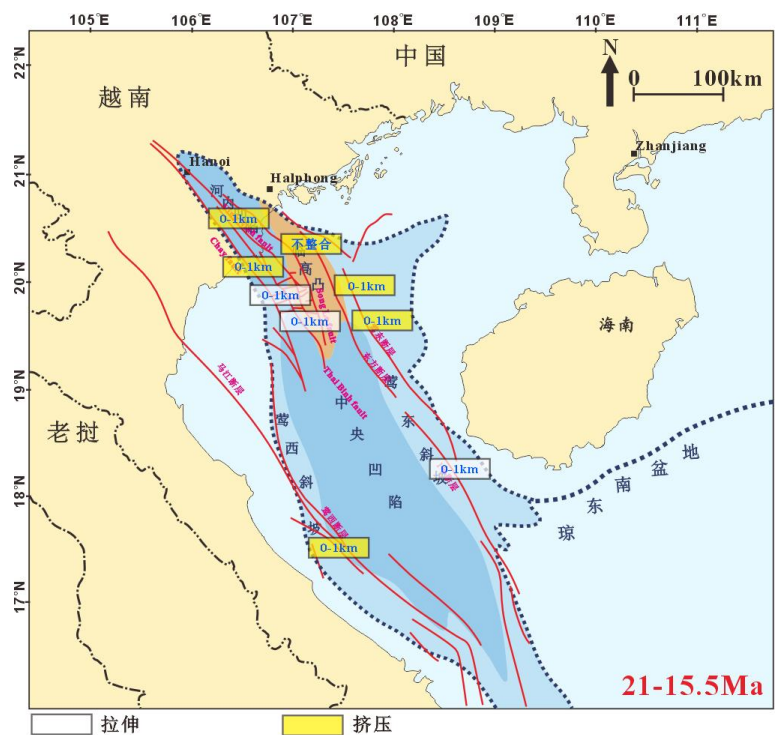


图 12 21~15.5 Ma 莺歌海盆地各个断裂的挤压量

Fig.12 The compression amounts of the different faults in the Yinggehai Basin during 21-15.5 Ma

5 结论

(1) 构造沉降和平衡剖面分析表明, 30~21 Ma 期间走滑作用主要集中在 Song Lo 断层附近, 表现为垂向构造沉降为主, 水平伸展作用较弱; 同时期的水平伸展作用主要集中在 Chay 断层一带。21~15.5 Ma 期间, 构造挤压作用集中发育在 Song Lo、Vinh Ninh 和莺东断层附近。

(2) Song Lo 断层与红河断裂带的活动特征相似, 莺东断层与东方断层是 Song Lo 断层在莺歌海盆内的南部延伸。30~21 Ma 期间 Song Lo 断层、莺东断层和东方断层主要以走滑运动为主, 盆地伸展作用主要集中在盆地内部和西南一侧。伸展作用在莺歌海盆地及外围广泛发育, 其中盆内北西向断裂与东西向断裂带控制了盆地的沉降中心。

(3) 21~15.5 Ma 期间构造反转在盆地西北部最为剧烈, 北西向断层进入河内凹陷后构造挤压活动逐渐减弱。反转构造集中发育在 Song Lo 断层, 并沿莺东断层向南迁移。构造反转与陆上左行剪切减弱和印支地块的旋转停止有关。

参考文献:

- 范彩伟, 2018. 莺-琼盆地高压成因输导体系特征、识别及其成藏过程. 石油与天然气地质, 39(2): 254-267.
- Fan, C. W, 2018. The identification and characteristics of migration system induced by high pressure, and its hydrocarbon accumulation process in the Yingqiong Basin. Oil and Gas Geology, 39(2): 254-267(in Chinese with English abstract).
- 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, 98: 1-16.
- Fu, Y. T, Chen, G. F, Wu, T., et al., 2024. Identification of the Central Fault: The extension of the Red River fault Zone in the Yinggehai basin . Acta Geologica Sinica, 98: 1-16(in Chinese with English abstract).
- 郭令智, 钟志洪, 王良书, 等, 2001. 莺歌海盆地周边区域构造演化. 高校地质学报, (1): 1-12.
- Guo, L. Z, Zhong, Z. H, Wang, L. S, et al., 2001. Regional Tectonic Evolution Around Yinggehai Basin of South China Sea. Geological Journal of China Universities, (1): 1-12(in Chinese with English abstract).
- 何卫军, 谢金有, 刘新宇, 等, 2011. 莺歌海盆地 DF1-1-11 井有孔虫生物地层与沉积环境研究. 地层学杂志, 35(1): 81-87.
- He, W. J, Xie, J. Y, Liu, X. Y, et al., 2011. Foraminiferal Biostratigraphy and Sedimentary Environment Reconstruction Based on Paleontological Data from Bore Hole DF1-1-11, Yinggehai Basin. Journal of Stratigraphy, 35 (1): 81-87(in Chinese with English abstract).
- 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.
- Lei, C., Ren, J. Y, Pei, J. X, et al., 2022. Tectonics of the offshore Red River Fault recorded in the junction of the Yinggehai and Qiongdongnan Basins. SCIENCE CHINA Earth sciences, 52 (1): 81-97(in Chinese with English abstract).
- 雷超, 任建业, 张静. 2015. 南海构造变形分区及成盆过程. 地球科学, 40 (04): 744-762.
- Lei, C., Ren, J. Y, Liu, J., 2015. Tectonic Province Divisions in the South China Sea: Implications for Basin Geodynamics. Journal of Earth Science, 40 (04): 744-762(in Chinese with English abstract).
- 雷超, 2012. 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. 中国地

质大学.

Lei, C., 2012. Structure and Evolution of Yinggehai and Qiongdongnan Basins, South China Sea: Implications for Cenozoic Tectonics in Southeast Asia. China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).

任建业, 雷超, 2011. 莺歌海—琼东南盆地构造-地层格架及南海动力变形分区. 地球物理学报, 54(12): 3303-3314.

Ren, J. Y, Lei, C., 2011. Tectonic stratigraphic framework of Yinggehai-Qiongdongnan Basins and its implication for tectonic province division in South China Sea. Chinese Journal of Geophysics, 54(12): 3303-3314(in Chinese with English abstract).

任龙龙, 张波, 郑德文, 等, 2020. 哀牢山-红河剪切带渐新世的构造体制转换与剥露历史:来自哀牢山南段磷灰石裂变径迹的证据. 岩石学报, 36(6): 1787-1802.

Ren, L. L., Zhang, B., Zheng, D.W., et al., 2020. Tectonic transformation and its exhumation history of the Ailao Shan-Red River shear zone in Oligocene: Evidences from apatite fission track thermochronology of the southern segment of the Ailao Shan range. Acta Petrologica Sinica, 36(6): 1787-1802(in Chinese with English abstract).

孙珍, 钟志洪, 周蒂, 等, 2003. 红河断裂带的新生代变形机制及莺歌海盆地的实验证据. 热带海洋学报, 22: 1-9.

Sun, Z., Zhong, Z. H, Zou, D., et al., 2003. Deformation Mechanism of Red River Fault Zone during Cenozoic and Experimental Evidences related to Yinggehai Basin Formation. Journal of Tropical Oceanography, 22: 1-9(in Chinese with English abstract).

王华, 谢玉洪, 陈思, 等, 2023. 莺歌海盆地晚中新世源-汇系统约束下大型浅海重力流沉积机制. 武汉: 中国地质大学出版社.

肖坤泽, 童亨茂, 杨东辉, 等, 2024. 莺歌海盆地一号断层成因机制新认识:来自三维地震资料和砂箱模拟实验的启示. 地质学报, 98: 1-15.

Xiao, K. Z, Tong, H. M, Yang, D. H, et al, 2024. New insight into the mechanism of No.1 fault in the Yinggehai basin: Constraints from three-dimensional seismic data and analogue modelling. Acta Geologica Sinica, 98: 1-15(in Chinese with English abstract).

解习农, 姜涛, 张成, 等, 2009. 南海西部深水区新近系层序地层学与沉积充填演化研究. 湛江: 中海石油(中国)有限公司湛江分公司.

谢玉洪, 2009. 构造活动型盆地层序地层分析及天然气成藏模式—以莺歌海盆地为例. 北京: 地质出版社.

Xie, Y. H, 2009. Sequence stratigraphy analysis and natural gas accumulation model of tectonically active basins: A case study of Yinggehai Basin. Beijing: Geological Publishing Press.

许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等, 2011. 印度-亚洲碰撞大地构造. 地质学报, 85(1): 1-33.

Xu, Z. Q, Yang, J. S, Li, H. B, et al., 2011. On the Tectonics of the India-Asia Collision. Acta Geologica Sinica, 85(1): 1-33(in Chinese with English abstract).

Allen, P. A., Allen, J. R., 2013. Basin analysis: principles and application to petroleum play assessment. Wiley-Blackwell, Oxford.

Briaies, 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, 98: 6299–6328. <https://doi.org/10.1029/92JB02280>.

Cao, S., Liu, J., Leiss, B., et al., 2011. Oligo-Miocene shearing along the Ailao Shan-Red River shear zone: Constraints from structural analysis and zircon U/Pb geochronology of magmatic rocks in the Diancang Shan massif, SE Tibet, China. Gondwana Research, 19(4): 975–993.

<https://doi.org/10.1016/j.gr.2010.10.006>.

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*, 111(6): 148–227. <https://doi.org/10.1029/2005JB004048>.

Fyhn, M. B. W., Cuong, T. D., Hoang, B. H., et al., 2018. Linking Paleogene Rifting and Inversion in the Northern Song Hong and Beibuwan Basins, Vietnam, With Left-Lateral Motion on the Ailao Shan-Red River Shear Zone. *Tectonics*, 37: 2559–2585. <https://doi.org/10.1029/2018TC005090>.

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(3–4): 184–214. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.08.002>.

Gallagher, K., Lambeck, K., 1989. Subsidence, sedimentation and sea-level changes in the Eromanga Basin, Australia. *Basin Research*, 2: 115–131. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.1989.tb00030.x>.

Gilley, L. D., Harrison, T. M., Leloup, P. H., et al., 2003. Direct dating of left-lateral deformation along the Red River shear zone, China and Vietnam. *Journal of Geophysical Research*, 108(B2): 2127. <https://doi.org/10.1029/2001JB001651>.

Gouiza, M., Hall, J., Bertotti, G., 2014. Rifting and pre-rift lithosphere variability in the Orphan Basin, Newfoundland margin, Eastern Canada. *Basin Research*, 27(4): 367–386. <https://doi.org/10.1111/bre.12078>.

Hall, R., 2002. Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: Computer-based reconstructions, model and animations. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20(4): 353–431. [https://doi.org/10.1016/S1367-9120\(01\)00069-4](https://doi.org/10.1016/S1367-9120(01)00069-4).

Huang, B., Tian, H., Wilkins, R. W. T., et al., 2013. Geochemical characteristics, palaeoenvironment and formation model of Eocene organic-rich shales in the Beibuwan Basin, South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 48: 77–89. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2013.07.012>.

Hutchison, C. S., 1996. The ‘Rajang accretionary prism’ and ‘Lupar Line’ problem of Borneo. *Geological Society London Special Publications*, 106: 247–261. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1996.106.01.16>.

Hoang, B. H., Fyhn, M. B. W., Cuong, T. D., 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>.

Jolivet, L., Beyssac, O., Goffé, B., et al., 2001. Oligo–Miocene mid-crustal subhorizontal shear zones in Indochina. *Tectonics*, 20(1): 46–57. <https://doi.org/10.1029/2000TC900021>.

Jolivet, L., Maluski, H., Beyssac, O., et al., 1999. Oligocene–Miocene Bu Khang extensional gneiss dome in Vietnam. Geodynamic implications. *Geology*, 27(1): 67–70. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1999\)027<0067:OMBKEG>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1999)027<0067:OMBKEG>2.3.CO;2).

Kenneth, G. M., Michelle, A. K., James, V. B., et al. 2005. The Phanerozoic Record of Global Sea-Level Change. *Science*, 310: 1293–1298. <https://doi.org/10.1126/science.1116412>.

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>.

- Lei, C., Ren, J. Y., Clift, P. D., et al., 2011. The structure and formation of diapirs in the Yinggehai–Song Hong Basin, South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 28(5): 980–991. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2011.01.001>.
- 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*, 106(B4): 6683–6732. <https://doi.org/10.1029/2000JB900322>.
- Leloup, P. H., Lacassin, R., Tapponnier, P., et al. 1995. The ASRR shear zone (Yunnan, China), tertiary transform boundary of Indochina. *Tectonophysics*, 251(1–4): 3–84. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(95\)00070-4](https://doi.org/10.1016/0040-1951(95)00070-4).
- Leloup, P. H., Harrison, T. M., Ryerson, C., et al., 1993. Structural, petrological and thermal evolution of a Tertiary ductile strike-slip shear zone, Diancang Shan, Yunnan. *Journal of Geophysical Research*, 98(B4): 6715–6743. <https://doi.org/10.1029/92JB02791>.
- Liu, J., Tang, Y., Tran, M. D., et al., 2012. The nature of the Ailao Shan–Red River (ASRR) shear zone: Constraints from structural, microstructural and fabric analyses of metamorphic rocks from the Diancang Shan, Ailao Shan and Day Nui Con Voi Massifs. *Journal of Asian Earth Sciences*, 47: 231–251. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.10.020>.
- Luo, J. S., Hu, G. W., Xie, Z. H., et al., 2024. Multiphase Palaeogene–Miocene deformation history and regional implications of the Yinggehai Basin, offshore Ailao Shan–red river shear zone. *Marine and Petroleum Geology*, 162, 106731. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2024.106731>.
- Molnar, P., Tapponnier, P., 1975. Cenozoic Tectonics of Asia: Effects of a Continental Collision: Features of recent continental tectonics in Asia can be interpreted as results of the India–Eurasia collision. *Science*, 189: 419–426. DOI: 10.1126/science.189.4201.419.
- Morley, C. K., Wang, Y., 2023. The Cenozoic hyper-oblique collision zone of Indochina: A re-appraisal of escape tectonics. *Earth-Science Reviews*, 243, 104453. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104453>.
- Morley, R. J., 2014. Rifting and mountain building across Sundaland, a palynological and sequence Biostratigraphic perspective. *Proceeding of the 38th Annual Convention. Indonesian Petroleum Association, IPA14-G-01. Jakarta.*
- Morley, C. K., 2002. A tectonic model for the Tertiary evolution strike-slip faults and rift basins in SE Asia. *Tectonophysics*, 2002, 347(4): 189–215. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(02\)00061-6](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(02)00061-6).
- Pubellier, M., Rangin, C., Phach, P. V., et al., 2003. The Cao bang–Tien Yen Fault implications on the relationships between the red river fault and the South China Coast belt. *Advances in Natural Sciences*, 4: 347–336.
- Rangin, C., Klein, M., Roques, D., Le, P. X., et al., 1995a. 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).
- Rangin, C., Huchon, P., Le, P. X., et al., 1995b. Cenozoic deformation of central and south Vietnam. *Tectonophysics*, 251: 179–196. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(95\)00006-2](https://doi.org/10.1016/0040-1951(95)00006-2).
- Schoenbohm, L. M., Burchfiel, B. C., Chen, L. Z., et al., 2006. Miocene to present activity along the Red River fault, China, in the context of continental extrusion, upper-crustal rotation, and lowercrustal flow. *Geological Society of America Bulletin*, 118(5–6): 672–688. <https://doi.org/10.1130/B25816.1>.
- Searle, M. P., Yeh, M. W., Lin, T. H., et al., 2010. Structural constraints on the timing of left-lateral along the Red River shear zone in the Ailao Shan and Diancang Shan Ranges, Yunnan, SW China. *Geosphere*, 6(4): 316–338. <https://doi.org/10.1130/GES00580.1>.

- Steckler, M. S., Watts, A. B., 1978. Subsidence of the Atlantic-type continental margin off New York. *Earth and Planetary Science Letters*, 41(1): 1-13. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(78\)90036-5](https://doi.org/10.1016/0012-821X(78)90036-5).
- Tapponnier, P., Lacassin, R., Leloup, P. H., et al. 1990. The Ailao Shan/Red River metamorphic belt: Tertiary left-lateral shear between Indochina and South China. *Nature*, 343(6257): 431–437. <https://doi.org/10.1038/343431a0>.
- Tapponnier, P., Peltzer, G., Armijo, R., 1986. On the mechanics of the collision between India and Asia. *Geological Society, London, Special Publications*, 19: 113–157. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1986.019.01.07>.
- Wang, P. L., Lo, C. H., Chung, S. L., et al., 2000. Onset timing of left-lateral movement along the Ailao Shan-Red River shear zone: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating constraint from the Nam Dinh area, northeastern Vietnam. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(3): 281–292. [https://doi.org/10.1016/S1367-9120\(99\)00064-4](https://doi.org/10.1016/S1367-9120(99)00064-4).
- Xie, X. N., Müller, R. D., Ren, J. Y., et al., 2008. Stratigraphic architecture and evolution of the continental slope system in offshore Hainan, northern South China Sea. *Marine Geology*, 247(3-4): 129-144.
- Yao, Y., Guo, S., Li, X., et al., 2023. Geological Structure and Dynamics of the Yinggehai Active Rift Basin, South China Sea. *Journal of Earth Science*, 34: 1732–1743. <https://doi.org/10.1007/s12583-021-1405-3>.
- Zhao, Z., Sun, Z., Wang, Z. F., et al., 2015. The high resolution sedimentary filling in Qiongdongnan Basin, Northern South China Sea. *Marine Geology*, 361: 11–24. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2015.01.002>.
- Zhu, M. Z., Graham, S., McHargue, T., 2009. The Red River Fault zone in the Yinggehai Basin, South China Sea. *Tectonophysics*, 476: 397-417. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.06.015>.