

doi:10.3799/dqkx.2015.135

# 南海北部陆坡晚白垩世构造逆冲及其成因

王长势<sup>1</sup>,朱伟林<sup>1,2</sup>,钟 锴<sup>2</sup>,许长海<sup>1</sup>

1. 同济大学海洋地质国家重点实验室,上海 200092

2. 中国海洋石油总公司,北京 100010

**摘要:** 地震资料显示南海北部中生界发育褶皱和逆冲断层等挤压构造,但目前对其成因仍存在争议. 通过对南海北部珠江口盆地东南部陆坡的二维地震剖面进行研究,发现在云荔低隆起—兴荔凸起—兴宁凹陷一带存在2条近NW-SE走向并往NE方向逆冲的逆断层,在东沙隆起南部有2条近南—北走向并具有压扭性质的走滑断层,上述4条断层的平面延伸距离分别约为130、110、55和58 km. 综合分析可知,现今位于南海南部的礼乐—巴拉望地块经中侏罗世—早白垩世与华南陆缘发生软碰撞后,在晚白垩世与华南陆缘在现今荔湾—兴宁凹陷一带进行最后的“焊接缝合”,而上述4条断层可作为该次“焊接缝合”的间接证据. 由于太平洋向华南的俯冲板片在晚白垩世发生了后撤,华南大陆边缘在晚白垩世末开始张裂之前可能整体为区域均衡抬升、局部陆—陆碰撞缝合的构造格局.

**关键词:** 南海北部陆缘;礼乐—巴拉望地块;晚白垩世;逆冲断层;走滑断层;碰撞缝合;均衡抬升;海洋地质.

**中图分类号:** P736.15

**文章编号:** 1000-2383(2015)09-1505-12

**收稿日期:** 2015-04-01

## Late Cretaceous Tectonic Thrusting and Its Genesis in Northern Slope of the South China Sea

Wang Zhangshi<sup>1</sup>, Zhu Weilin<sup>1,2</sup>, Zhong Kai<sup>2</sup>, Xu Changhai<sup>1</sup>

1. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China

2. China National Offshore Oil Corporation Limited, Beijing 100010, China

**Abstract:** There are folds and thrust faults in Mesozoic strata in the northern continental margin of the South China Sea, however, their geneses are still in controversy. In this study, 2D seismic profiles in the southeast region of the Pearl River Mouth basin (PRMB) are interpreted. Two northeastwards thrusting faults with approximately NW-SE strike are identified in the area of Yunli lower uplift, Xingli rise and Xingning sag, and two approximately north-south striking compressional strike-slip faults are distinguished in the southern area of Dongsha uplift. The 4 faults mentioned above are about 130, 110, 55 and 58 km long, respectively. It can be concluded that the Liyue (Reed) Bank-Palawan block which lies in the southern continental margin of the SCS underwent a soft collision with South China continental margin in Middle Jurassic to Early Cretaceous, and they finally united and sutured in Late Cretaceous approximately along Liwan to Xingning sags. The afore-mentioned 4 faults may be the circumstantial evidences for the final uniting and suturing between the Liyue Bank-Palawan block and the South China continental margin in the Late Cretaceous. Because of the retreat of the Pacific subducting slab in the Late Cretaceous, the overriding South China continental margin regionally and isostatically uplifted before it began to rift in the latest Cretaceous, whereas the coeval collision between the Liyue Bank-Palawan block and the South China continental margin was localized in the southeast of the PRMB.

**Key words:** northern continental margin of the South China Sea; Liyue (Reed) Bank-Palawan block; Late Cretaceous; thrusting fault; strike-slip fault; uniting and suturing; isostatical uplift; marine geology.

**基金项目:** 国家重大科技专项项目(No. 2011ZX05023-003-003).

**作者简介:** 王长势(1987—),男,博士研究生,主要从事大陆边缘构造及地震资料解释方面的研究. E-mail: wangzhangshizy@163.com

**引用格式:** 王长势,朱伟林,钟锴,等,2015. 南海北部陆坡晚白垩世构造逆冲及其成因. 地球科学——中国地质大学学报,40(9): 1505-1516.

南海位于太平洋、欧亚和印-澳这3大板块之间,其北部陆缘从晚白垩世末期开始张裂(Holloway, 1982; Taylor and Hayes, 1983; Ru and Piggott, 1986),到早渐新世—中中新世南海海盆形成(Taylor and Hayes, 1980, 1983; Briais *et al.*, 1993),一直主要处于拉张环境(雷超等, 2015). 然而,由于南海北部陆缘缺失上白垩统(Taylor and Hayes, 1980; Holloway, 1982; 夏戡原和黄慈流, 2000; Shi and Li, 2012),中、新生界之间普遍为角度不整合(杨树春等, 2008; Hao *et al.*, 2009; 郝沪军等, 2009),且该不整合之下的前新生界中发育有逆冲断层、褶皱等挤压构造(夏戡原和黄慈流, 2000; 郝沪军等, 2001; Yan and Liu, 2004; 刘海龄等, 2007; Li *et al.*, 2008; Tang and Zheng, 2010; 赵美松等, 2012; Ding *et al.*, 2013; Yan *et al.*, 2014),表明南海北部陆缘在张裂之前的晚白垩世经历了构造抬升或裸露遭受剥蚀(夏戡原和黄

慈流, 2000; Li *et al.*, 2008; 杨树春等, 2008; Shi and Li, 2012).

为了对南海北部陆缘晚白垩世的挤压构造及其成因进行研究,本文通过对南海北部珠江口盆地东南部陆坡区大量的二维地震剖面(80 余条,共计约 10 000 km,图 1)进行解释. 首先追踪出了中、新生界地层分界面 Tg,然后对 Tg 界面之下前新生界地层中的挤压构造进行了识别,最终在珠江口盆地东南部云荔低隆起—兴荔凸起—兴宁凹陷—一带区域发现了 2 条近 NW-SE 走向的大型逆冲断层,在东沙隆起南部区域发现 2 条具有压扭性质的走滑断层,这 4 条断层均在晚白垩世发生活动. 结合前人研究成果(Taylor and Hayes, 1980, 1983; Holloway, 1982; 姚伯初, 1996; 任纪舜等, 1999; Zamoras and Matsuoka, 2004; Li *et al.*, 2007; Fyhn *et al.*, 2010; Hall, 2012; 赵美松等, 2012),笔者认为礼乐—巴拉望地块与华南陆缘在晚白垩世进行最

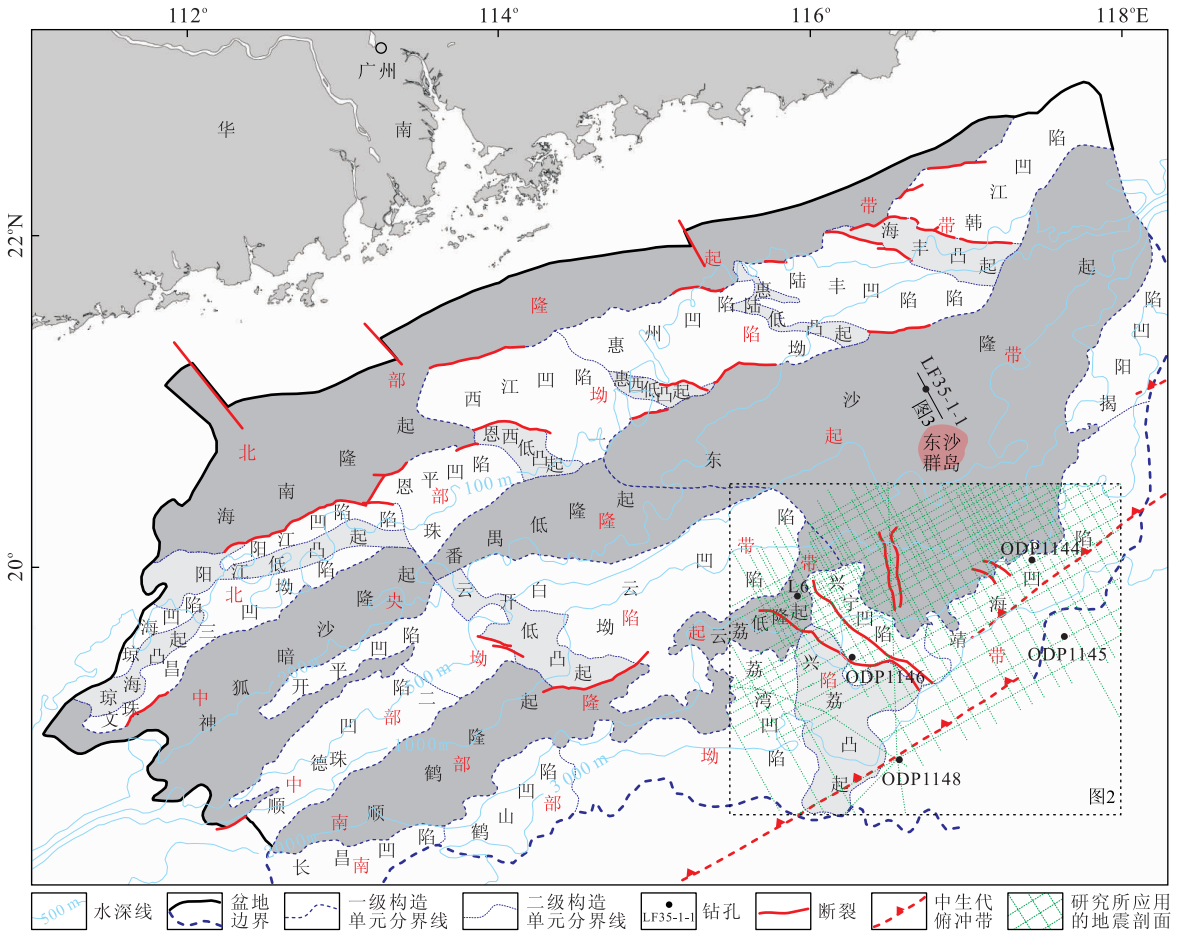


图 1 研究区构造单元及研究资料分布

Fig. 1 The location of the study area

珠江口盆地构造单元引自刘再生等(2014);中生代俯冲带位置引自 Zhou *et al.* (2006);LF35-1-1 井位置引自 Li *et al.* (2008);L6 井位置引自苗顺德等(2013);ODP 四口井位置引自 Wang *et al.* (2003)

后的“焊接缝合”,而上述 4 条断层可作为该次“焊接缝合”的间接证据。

### 1 区域地质概况

研究区位于东沙岛南侧的南海东北部大陆坡上,整体位于东经 115°30'~118°00'、北纬 18°30'~20°30',水深为 500~3 000 m,面积约为 58 000 km<sup>2</sup>,构造单元自 SW 往 NE 主要为荔湾凹陷、兴荔凸起—云荔低隆起、兴宁凹陷和东沙隆起(图 1 和图 2)。

研究区在前震旦纪结晶基底上发育了震旦纪—早古生代的浅海—半深海相浊积岩,晚古生代为隆起而无沉积作用(Sun *et al.*, 2014)。由于缺乏钻孔等直接证据,目前对中生代早期研究区的构造演化和沉积特征尚不清楚,前人通过对南海及其围区的中生代岩性和岩相古地理资料进行整理(周蒂等, 2005a, 2005b; Zhou *et al.*, 2008; Shi and Li, 2012),推测早、中三叠世研究区可能无沉积或为深

海—半深海相沉积环境(Shi and Li, 2012),即古特提斯海盆可能东延到了研究区,但已处于萎缩阶段(周蒂等, 2005a; Zhou *et al.*, 2008)。晚三叠世,受印支运动的影响(骆满生等, 2014),南海西部围区抬升为陆,研究区则为海陆过渡相沉积环境(Zhou *et al.*, 2008; Shi and Li, 2012)。早侏罗世,研究区仍为海陆过渡相沉积环境,局部区域海水加深,可能与古太平洋的海侵有关(Shi and Li, 2012)。中侏罗世,研究区以滨、浅海相沉积环境为主,形成了一套以泥岩、泥质粉砂岩和灰岩为主的沉积(邵磊等, 2007; 吴国瑄等, 2007)。晚侏罗世,古太平洋向欧亚大陆的平俯冲板片发生拆沉(Li and Li, 2007),中国东南大陆沿海一带发生强烈的岩浆活动(Shi and Li, 2012),但研究区海水却不断加深,为深海—岛弧环境,发育了一套以泥岩、放射虫硅质岩夹斑基玄武岩为主的沉积(邵磊等, 2007; 吴国瑄等, 2007)。早白垩世,在太平洋板块向欧亚大陆持续俯冲作用的影响下,研究区仍为深海—岛弧环境(吴国

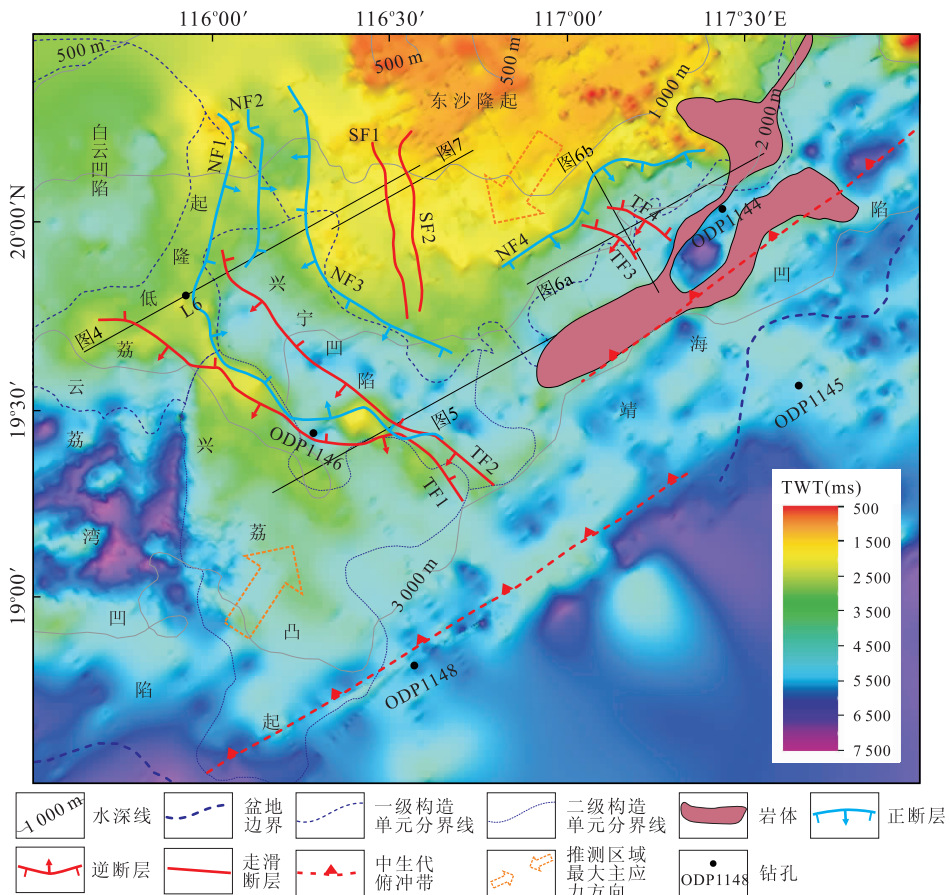


图 2 Tg 界面 TWT 埋深及研究区主要断裂分布

Fig. 2 TWT sketch of the Tg unconformity and the major faults in the study area

TWT. 地震波双程旅行时间; TF1~TF4. 逆冲断层; NF1~NF4. 新生代正断层; SF1, SF2. 走滑断层; 中生代俯冲带引自 Zhou *et al.* (2006)



瑄等, 2007), 主要发育玄武岩、流纹岩与海陆交互相沉积(邵磊等, 2007; 吴国瑄等, 2007; Shi and Li, 2012). 晚白垩世, 太平洋向华南的俯冲板片发生后撤(Holloway, 1982; Zhou *et al.*, 1995; 周蒂等, 2005b), 但研究区主要以剥蚀作用为主(Shi and Li, 2012), 到晚白垩世末期, 研究区才开始张裂, 并一直持续到了古近纪(Holloway, 1982; Taylor and Hayes, 1983; Ru and Pigott, 1986).

## 2 区域不整合 Tg 界面

南海区域广布的 Tg 是一个大致介于中生代晚期与新生代之间的不整合界面, 其具体的地质意义应该为张裂期沉积的底界面(Ding *et al.*, 2013; Yan *et al.*, 2014). 由于 Tg 不整合界面代表了长时期的抬升剥蚀或沉积间断(Shi and Li, 2012; Ding *et al.*, 2013; Yan *et al.*, 2014), 而华南陆缘大致从晚白垩世末期开始张裂(Holloway, 1982; Taylor and Hayes, 1983; Ru and Pigott, 1986), 故与 Tg 不整合面相关的区域构造抬升或挤压的开始时间不晚于晚白垩世末期.

Tg 界面在研究区及其邻区地震剖面上较容易识别. 在中生代残留拗陷—潮汕拗陷(郝沪军等, 2001)北部斜坡, 已有 LF35-1-1 井钻遇了侏罗系—白垩系(邵磊等, 2007; 吴国瑄等, 2007), 在过该井的地震剖面上(图 3), Tg 界面为一明显的角度不整合面, 其上覆地层以成层性好、连续性好和平行—近平行层状地震反射为特征, 而下伏地层则被 Tg 界面削蚀, 以地层倾斜或褶皱变形等为主要特征, 并伴随有新生代以前形成的大致自 SE 向 NW 逆冲的逆断层(Li *et al.*, 2008; Hao *et al.*, 2009; Xu *et al.*, 2013; Yan *et al.*, 2014). 在过研究区的众多地震剖面上, Tg 界面及其上覆新生界地震反射特征与过 LF35-1-1 井的地震剖面类似, 且已有 L6 钻孔

证实在研究区西北 Tg 界面之上存在玄武岩和古近系恩平组的河流相沉积岩(苗顺德等, 2013); 研究区 Tg 界面之下前新生界的变形较潮汕拗陷北斜坡更明显、更复杂. 由于在 Tg 界面之上和之下地层产状及地震反射特征存在明显的差异, 故可在地震剖面上比较容易地对其进行识别和层位追踪, 本文最终解释出 Tg 界面的埋深及平面展布特征, 与刘再生等(2014)对该区域新生代盆地构造单元的划分结果一致(图 2).

此外, 在 Tg 界面之下还存在另一明显的角度不整合界面 Th, 其上覆和下伏地层的产状和反射地震特征也存在明显的差异. Xu *et al.* (2013) 通过将 LF35-1-1 井的沉积地层特征与华南陆上的进行对比, 建立了研究区中生界的二维地震地层格架, 认为 Th 为早白垩世末形成的角度不整合界面. 然而, 由于缺乏公开发表的直接的定年数据, 且在 LF35-1-1 井白垩系沉积岩中并没有发现晚白垩世的古生物或孢粉证据(吴国瑄等, 2007), 故本文将 Tg 与 Th 界面之间的地层粗略地标记为 K(白垩系), 且对研究区白垩系、三叠系—侏罗系(T-J)和侏罗系—白垩系(J-K)不进行详细的划分.

## 3 晚白垩世逆冲作用

由于 Tg 界面及其下伏前新生界中的褶皱变形和逆冲断层可能代表了晚白垩世南海北部陆缘一次区域性的抬升或挤压构造运动(夏戡原和黄慈流, 2000; Li *et al.*, 2008; 杨树春等, 2008; Shi and Li, 2012; Ding *et al.*, 2013; Yan *et al.*, 2014), 故对 Tg 界面下伏前新生界中的挤压构造尤其是逆冲断层的识别就显得至关重要.

在过研究区的地震剖面上, Tg 界面之下的前新生界发生了褶皱变形, 并主要发育了 2 条大型逆冲断层(图 2, 图 4 和图 5), 其顶部局部区域被 Tg 界

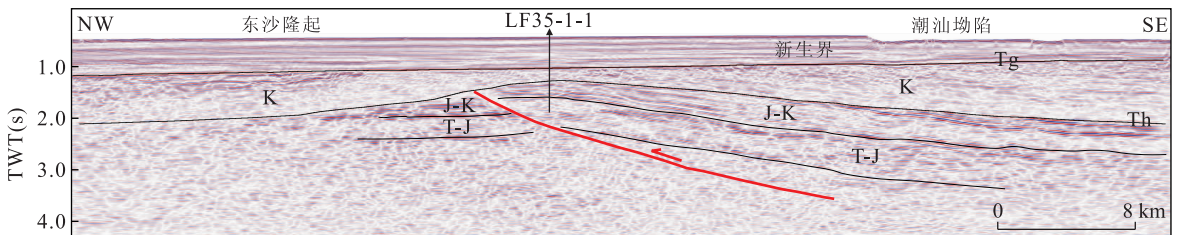


图 3 过 LF35-1-1 井地震剖面

Fig. 3 The seismic profile going through the LF35-1-1 well

据 Li *et al.* (2008)、Xu *et al.* (2013) 和 Yan *et al.* (2014) 修改, 黑色曲线为主要的震层位, 红色线为逆断层, 下图中皆同; 测线位置见图 1

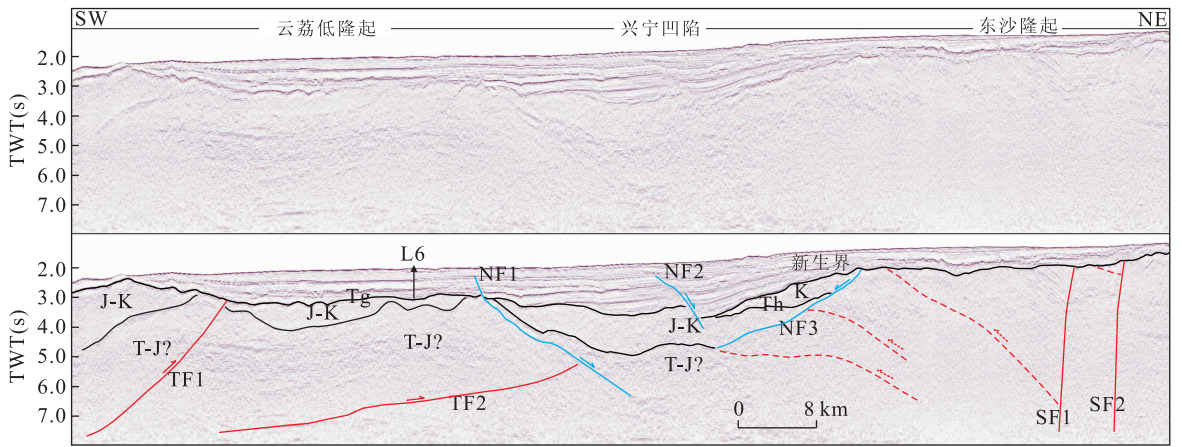


图 4 研究区西北部 NE-SW 向地震剖面及断层特征

Fig. 4 Seismic profile in NE-SW strike showing the faults in the NW region of the study area  
红色虚线为可能的逆断层,蓝色线为正断层,下图中皆同;测线位置见图 2

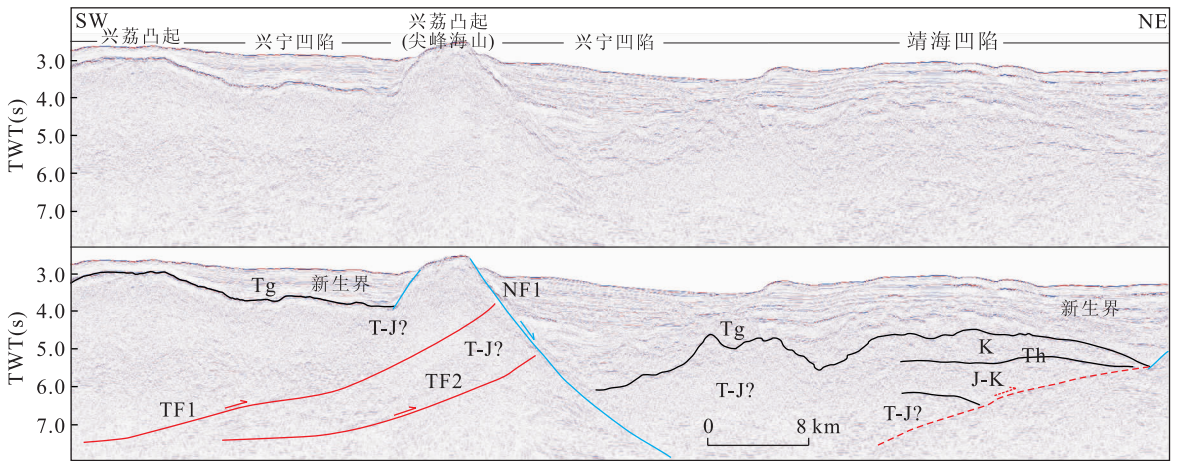


图 5 研究区中部 NE-SW 向地震剖面及断层特征

Fig. 5 Seismic profile in NE-SW strike showing the faults in the central region of the study area  
测线位置见图 2

面削蚀(图 4),表明其形成于晚白垩世末期之前,结合区域地质背景,笔者推断其是在南海北部陆缘张裂之前的晚白垩世发生活动的逆冲断层.为方便表示,下文将这 2 条断层分别编号为 TF1 和 TF2,并对其进行详细描述.

### 3.1 TF1 断层

TF1 断层整体走向为 NW-SE,倾向 SW,平面上从珠江口盆地南部隆起带东段的云荔低隆起一直向东南方向延伸至珠江口盆地南部坳陷带兴荔凸起东北边缘,延伸距离约为 130 km(图 2). TF1 断层在剖面上整体为上陡下缓的犁式断层且向 NE 方向逆冲(图 4 和图 5),在云荔低隆起,断层上盘以杂乱反射夹层状反射为主要特征,而下盘则为连续性较好的层状反射(图 4);在研究区中部靠近 ODP1146

站位区域,TF1 断层在 6~7 s 的 TWT 深度上、下盘之间为明显的断面反射,且上盘地层整体呈背斜形态,成层性较下盘地层相对较好,而下盘则主要为杂乱和空白反射,但隐约见层状反射,这可能表明尖峰海山并非新生代的岩体,而是中生代的断块(图 5),这与 Shi and Li (2012) 对该区的认识也较为一致.

TF1 断面顶部在云荔低隆起被 Tg 不整合面削蚀(图 4),在 SE 方向至兴宁凹陷南部边界则被新生代正断层 NF1 切割(图 5),表明 TF1 最后活动时间不晚于 Tg 界面形成的时间,并且在新生代经历过一定的改造.由于 TF1 断层走向与中生代俯冲带的走向夹角约 60°(图 2),结合区域地质背景(Taylor and Hayes, 1980, 1983; Holloway, 1982; 苏乃容



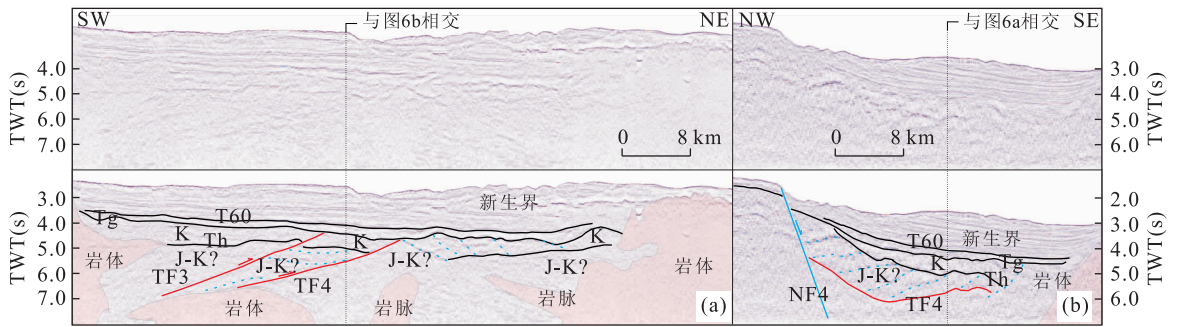


图 6 研究区东北部地震剖面特征及对应解释

Fig. 6 Seismic profiles and the interpretation in the NE region of the study area

a. NE-SW 向剖面; b. NW-SE 向剖面; T60. 渐/中新世不整合, 蓝色虚线为可能的正断层; 测线位置见图 2

等, 1995; 姚伯初, 1996; 夏戡原和黄慈流, 2000; 郝沪军等, 2001; 周蒂等, 2005a, 2005b; Li *et al.*, 2007, 2008; 杨树春等, 2008; Zhou *et al.*, 2008; Hao *et al.*, 2009; 郝沪军等, 2009; Hall, 2012; Shi and Li, 2012; 赵美松等, 2012; Ding *et al.*, 2013; Yan *et al.*, 2014), 笔者推断 TF1 断层是晚白垩世活动的逆冲断层. 由于受地震资料品质的约束, 以及该断层切割深度较深(可切割至 7~8 s 的 TWT 深度; 图 4 和图 5), 故难对其断距进行精确地计算, 但 TF1 作为一条深大逆冲断层, 其形成可能受到深部地壳甚至地幔活动物质的影响.

### 3.2 TF2 断层

TF2 断层走向近似 NW-SE, 整体位于 TF1 断层的东北侧且与其近于平行, 在平面上从珠江口盆地南部拗陷带兴宁凹陷的西北部延伸至凹陷东南边缘, 延伸距离约 110 km(图 2). 与 TF1 断层相同, TF2 断层倾向 SW, 自 SW 向 NE 方向逆冲(图 4 和图 5). TF2 断层断面顶部被新生代的正断层 NF1 切割(图 4 和图 5), 在兴宁凹陷西北部区域, TF2 断层上盘整体为连续性较好的层状反射并具有明显的背斜形态, 下盘则主要以杂乱反射为主(图 4); 在兴宁凹陷南部, TF2 断层上盘地层以杂乱反射为主, 而下盘地层则成层相对较好, 隐约具有背斜形态(图 5).

与 TF1 断层相同, TF2 断层也切割至 7~8 s 的 TWT 深度(图 4 和图 5). 由于 TF2 断层在平面上与 TF1 断层近于平行, 在剖面上与 TF1 断层相伴出现, 笔者结合区域地质背景, 推断其与 TF1 断层为同一组深大逆冲断层, 二者均可能在晚白垩世发生活动.

除了在研究区西部发现有逆冲断裂之外, 笔者在研究区东北部 ODP1144 站位西侧区域, 也发现了一组 NW-SE 走向且向 NE 方向逆冲的逆断层 TF3

和 TF4(图 2 和图 6a). 在 NE-SW 走向剖面上, Tg 之下的 Th 界面明显被 TF3 断层错断, 但 TF3 和 TF4 断层的顶部却被 Tg 不整合面削蚀(图 6a), 这表明这两条断层形成的时间为 Th 界面形成之后、Tg 界面形成之时或之前. 结合区域地质背景, 笔者推断 TF3 和 TF4 与 TF1 和 TF2 同为晚白垩世活动的逆冲断层. 由于 TF3 和 TF4 的逆冲断距较小, 并且受到了新生代大量正断层的改造和岩浆活动的破坏(图 2 和图 6), 目前恢复出其在平面上的展布距离仅为 20 km 左右(图 2), 这远远小于 TF1 和 TF2 断层的规模. 此外, 在 NW-SE 向地震剖面上, Th 界面之下存在着一系列向陆倾斜的断层, 其可能被 TF4 断层切割(图 6b). 由于靠近 Zhou *et al.* (2006) 推测的中生代俯冲带(图 2), 故该处断裂形成的机制可能更为复杂, 这也有待于进一步的研究.

## 4 走滑断层

研究区发育有 1 组近 NS 走向的大型走滑断层 SF1 和 SF2, 二者近于平行, 主要分布在东沙隆起西南部区域, 平面上延伸距离分别约为 55 和 58 km(图 2). 这两条断层近于直立, 顶部被 Tg 界面削蚀(图 4 和图 7), 在地震剖面上断面两侧地层反射特征存在明显的差异: SF1 断层西侧前新生界主要表现为一套倾向 NE 的高频、中等—强振幅的倾斜层状反射, 而东侧则主要为一套近于水平的低—高频、中等—强振幅的近平行层状反射, 再向东至紧邻 SF2 断层的东侧, 前新生界表现为杂乱反射, 该套杂乱反射的地层与 SF2 断层更东侧的地层整体组成一个宽缓向斜(图 4 和图 7).

在 Tg 界面之下, SF1 断层西侧前新生界整体倾斜, 且隐约发育有向西的下倾上缓的逆冲断层

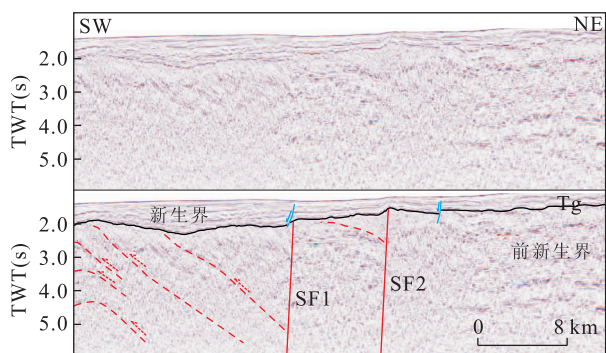


图7 东沙隆起南部 NE-SW 向地震剖面及走滑断层特征  
Fig. 7 Seismic profile in NE-SW strike showing the strike-slip faults in the southern area of the Dongsha uplift  
测线位置见图 2

(图 4 和图 7), 这表明 SF1 断层在新生代之前可能具有压扭性质. 此外, SF1 和 SF2 走滑断层可切割至约 8 s 的 TWT 深度(图 4), 表明其为一组深大断裂. 由于该组断层的走向与中生代俯冲带和新生代的 NF4 断层的走向近于垂直(图 2), 并且靠近 Zhou *et al.* (2006) 所推测的与中生代俯冲相关的大型走滑断层, 故也无法排除其可能为 Zhou *et al.* (2006) 根据重、磁力异常所推测的位于东沙群岛西侧走滑断层的一部分. 由于被 Tg 界面削蚀(图 4 和图 7), SF1 和 SF2 走滑断层最后活动的时间可能为晚白垩世末期华南陆缘开始张裂之前. 考虑到 SF1 和 SF2 西南侧为以 TF1 和 TF2 为代表的晚白垩世逆冲体系, 故笔者推测其在晚白垩世的压扭走滑可能与该逆冲体系相关.

此外, 研究区发育 4 条明显的规模较大的新生代正断层, 其对 Tg 界面以及逆冲断层 TF1 和 TF2 进行了不同程度的切割和改造. 其中, NF1 断层为兴宁凹陷的边界断层(图 4 和图 5), 其在局部区域切割了逆冲断层 TF1 和 TF2(图 2, 图 4 和图 5); NF2 断层为兴宁凹陷内部发育的正断层, 在局部区域将 Tg 界面及其以下的前新生界错断(图 4); NF3 断层与 NF1 断层整体组成兴宁凹陷的边界(图 2 和图 4); NF4 断层则位于东沙隆起的东南部边缘, 并将 Tg 界面错断(图 2 和图 6b).

## 5 讨论

### 5.1 晚白垩世区域应力场分析

笔者在研究区识别出了 10 条主要的断层, 其中最直观地反映晚白垩世区域应力场的为逆冲断层

TF1 和 TF2, 该组断层走向近似 NW-SE, 其反映的晚白垩世区域最大主应力方向与其走向垂直, 即为 NE-SW 向(图 2). 自 TF1 和 TF2 断层 NE 方向, 研究区前新生界发生了不同程度的变形, 在局部区域仍可能发育有向 NE 逆冲的大型逆断层(图 5).

在研究区东北靠近 ODP1144 钻孔的区域, 发育有一组向 NE 逆冲的断层 TF3 和 TF4, 其反映的晚白垩世最大主应力方向与 TF1 和 TF2 反映的相一致. 虽然逆冲的规模远远小于 TF1 和 TF2, 且受到了后期正断层和岩浆活动的强烈改造, 导致 TF3 和 TF4 在平面上的展布距离远远小于 TF1 和 TF2, 但考虑到研究区 Tg 界面之下的前新生界普遍发生倾斜和褶皱变形(图 4~图 7), 笔者推断 TF3 和 TF4 与 TF1 和 TF2 这两组逆冲断层同为晚白垩世 NE-SW 向挤压应力场下的产物. 由于挤压应力在 TF1、TF2 等逆冲断层处已经得到了释放, 故传递至 TF3 和 TF4 断层所在区域时可能已经有所减弱.

由于靠近 Zhou *et al.* (2006) 所推测的与中生代俯冲相关的大型走滑断层, 笔者在东沙隆起南部区域识别出的 SF1 和 SF2 断层可能在晚白垩世逆冲断层 TF1~TF4 活动之前就已经存在. 然而, 由于研究区 Tg 界面之下前新生界地层的变形程度在走滑断层 SF1 和 SF2 的东侧明显弱于西侧(图 4 和图 7), 表明晚白垩世来自南西方向的挤压应力在 SF1 和 SF2 断层处也得到了释放, 这也进一步说明该组走滑断层在晚白垩世发生过活动, 并具有压扭性质.

此外, 虽然新生代红河断裂的走滑距离可能不超过 500 km(Tang and Zheng, 2013), 但印支半岛不仅被挤出导致南海海盆打开(Briais *et al.*, 1993; Cullen *et al.*, 2010), 其还可能在后期发生了顺时针的旋转(Tapponnier *et al.*, 1982), 这与笔者所识别出的逆冲断层和走滑断层可能在新生代也经历过一定程度的旋转相对应, 故其所反映的古应力方向只是一个相对结果, 而非绝对的 NE-SW 向.

### 5.2 构造逆冲的成因探讨

Zhou *et al.* (2006) 发现古太平洋在中侏罗世到早白垩世向华南陆缘俯冲, 俯冲带的走向大约为 NE45°, 其研究反映的最大主应力方向与本文中逆冲断层和走滑断层所反映的研究区晚白垩世最大主应力的方向近于垂直, 这表明这些逆冲和压扭断层在晚白垩世的活动与古太平洋板块向华南陆缘的俯冲已没有直接的联系.

由于在现今南海北部和南部陆缘中、新生界之

间普遍为角度不整合(苏乃容等, 1995; Zhou *et al.*, 1995; 王平等, 2000; 夏戡原和黄慈流, 2000; 郝沪军等, 2001; 李文成等, 2003; 杨树春等, 2008; Hao *et al.*, 2009; 郝沪军等, 2009; Tang and Zheng, 2010; Shi and Li, 2012), 且前新生界中发育有大量的逆冲断层和挤压褶皱(夏戡原和黄慈流, 2000; 郝沪军等, 2001; Yan and Liu, 2004; 刘海龄等, 2007; Li *et al.*, 2008; Tang and Zheng, 2010; 赵美松等, 2012; Ding *et al.*, 2013; Yan *et al.*, 2014), 因此, 华南陆缘在晚白垩世整体处于隆升或挤压状态, 故前文中的大型逆冲和走滑断层也不太可能形成于拉张环境下的构造转换带中。

前人对南海北部(郝沪军等, 2001; Li *et al.*, 2008; Tang and Zheng, 2010; 赵美松等, 2012)和南部陆缘(夏戡原和黄慈流, 2000; Yan and Liu, 2004; 刘海龄等, 2007; 赵美松等, 2012)前新生界的构造变形特征进行过相关研究, 但对其成因以及发生变形的时间仍未有一致的看法。施和生(2011)认为南海北部在晚中生代由于受古太平洋板块俯冲消减的多幕影响, 潮汕坳陷在区域性挤压应力作用下形成了一批大型宽缓褶皱带, 在背斜核部应力较为集中的地方发育了逆冲断层, Yan *et al.* (2014)也认为这些挤压构造为古太平洋向华南陆缘俯冲的远程效应。赵美松等(2012)对南海南、北部陆缘中生界的变形特征进行了对比分析, 发现在南海北部陆缘越靠近海盆的区域变形越强烈, 并发育有自南向北的逆冲推覆, 而在南海南部陆缘表现为自北向南的逆冲推覆, 并最终认为其可能是由于礼乐地块与华南板块在早白垩世发生碰撞而引起, 并形成了“古双峰—笔架碰撞造山带”。笔者在珠江口盆地东南部云荔低隆起—兴荔凸起—兴宁凹陷—东沙隆起一带区域所识别出的向 NE 方向的大型逆冲断层及近 NS 走向的压扭断层支持礼乐地块与华南陆缘发生碰撞这一推断。

然而, 礼乐地块与华南陆缘究竟何时以何种机制碰撞, 至今仍然是一个未解之谜。虽然已有研究(Taylor and Hayes, 1980; Holloway, 1982; Lee and Lawver, 1995; Schlüter *et al.*, 1996)表明礼乐—巴拉望地块在中生代末期已位于华南大陆南部边缘, 并经新生代陆缘张裂、南海海底扩张而南漂至现今的位置, 但对礼乐地块与华南陆缘发生拼贴的时间, 截至目前并没有统一的认识。Hall(2012)认为在距今 80~90 Ma 的晚白垩世, 太平洋板块向欧亚

大陆的俯冲终止, 包括现今南海南部沙捞越岸外的 Luconia 和南沙地块、南海北部陆缘部分区域在内的大 Luconia-Dangerous Ground 块体在距今约 90 Ma 与亚洲大陆碰撞, 这与姚伯初(1996)认为南沙—礼乐地块在晚白垩世与华南陆缘进行碰撞的观点较为一致。然而, Luconia-Dangerous Ground 作为一个巨大的板块, 如果其与华南板块进行碰撞的话, 在华南陆缘势必存在较大规模的晚白垩世挤压褶皱、逆冲推覆构造或造山带, 但目前南海南北部陆缘并未发现有如此规模和强度的挤压构造(Morley, 2012)。Fyhn *et al.* (2010)认为规模比 Hall(2012)描述的 Luconia-Dangerous Ground 更小的 Luconia 块体在古新世与欧亚大陆碰撞, 使得晚中生代时连在一起的 Phuquoc-Kampot Som 盆地(位于印支半岛及泰国湾)和 Khorat 盆地(位于泰国)在早古新世错断分开, 并反转抬升、遭受剥蚀。然而, Fyhn *et al.* (2010)所描述的缝合带主要位于印支半岛东南陆缘, 且 Luconia 块体自东南方而来与印支半岛陆缘进行碰撞, 很难能将其与研究区内的晚白垩世逆冲断层和前新生界褶皱变形相联系起来。Morley(2012)对 Hall(2012)和 Fyhn *et al.* (2010)的观点进行了概括和补充, 认为潮汕坳陷和台西南盆地中生界微弱的变形表明 Hall(2012)所描述的 Luconia-Dangerous 块体没有与亚洲大陆东南缘碰撞, 而是 Luconia 块体与其南面的婆罗洲碰撞。由于晚白垩世南海区域可能已经发育了近 NS 走向的大型走滑断层(Li *et al.*, 2007), 故 Hall(2012)所描述的 Luconia-Dangerous Ground 块体很可能为一些小块体的集合, 这些块体在晚白垩世沿着几条近 NS 走向的大型走滑断层向北漂移, 最终与华南陆缘碰撞缝合, 礼乐—巴拉望地块作为这些小块体中的一个, 在晚白垩世可能以中南断裂为西部边界向北漂移, 并在现今东沙群岛西南侧荔湾凹陷—兴宁凹陷之间的南海东北部下陆坡区域与华南陆缘碰撞(Li *et al.*, 2007)。然而, 已有研究表明礼乐—巴拉望地块从中侏罗世开始就可能已经位于华南大陆南部边缘并发育了 3 期增生杂岩带(Zamoras and Matsuoka, 2001, 2004), 因此, 其与华南陆缘可能存在另一种碰撞模式。

任纪舜等(1999)认为陆块间除了硬碰撞外, 还存在一种软碰撞模式, 即软碰撞发生后, 逆掩断层并不会立即出现, 两陆块长期处于“联而不合”的状态, 只有经过多旋回叠覆造山之后, 在最终焊合阶段才会出现大规模的逆掩断层。这种软碰撞的模式可以



很好地解释礼乐—巴拉望地块与华南陆缘之间的关系:礼乐—巴拉望地块在中侏罗世—早白垩世以这种“联而不合”的方式与华南板块拼贴在一起,在晚白垩世与华南陆缘进行了最后的“焊接缝合”,并产生了大规模的逆掩断层,笔者在珠江口盆地东南部云荔低隆起—兴荔凸起—兴宁凹陷一带所发现的逆冲断层以及前人(赵美松等, 2012)在现今礼乐滩发现的大型褶皱和冲断构造很可能就是这次挤压运动的产物。从距今约 75 Ma 的晚白垩世开始,太平洋板块向华南的俯冲速率降低(Northrup *et al.*, 1995),俯冲带可能发生了后撤(Holloway, 1982; Zhou *et al.*, 1995; 周蒂等, 2005b),到晚白垩世末礼乐—巴拉望地块开始与华南大陆裂离,并随着早渐新世南海开始扩张而逐渐南漂至现今的位置(Taylor and Hayes, 1980, 1983; Holloway, 1982; Lee and Lawver, 1995)。

由于俯冲板片向海方向后撤(retreat oceanward)可引起上驼板块的边缘(the edge of the over-riding plate)发生抬升而遭受剥蚀(Gvirtzman and Nur, 1999; Clements *et al.*, 2011),故南海南、北部陆缘普遍缺失上白垩统以及中、新生界之间普遍为角度不整合接触等现象可能与晚白垩世太平洋板块后撤引起华南板块南缘的均衡抬升有关。此外,由于晚白垩世太平洋板块发生后撤引起均衡抬升的区域几乎遍及华南陆缘,而礼乐—巴拉望地块与华南陆缘的“焊接缝合”区域仅局限在珠江口盆地东南区域,故在华南陆缘开始张裂之前的晚白垩世,南海北部陆缘可能整体为区域均衡抬升、局部陆—陆碰撞缝合的构造格局。然而,对于上述均衡抬升和陆—陆碰撞缝合二者之间的联系及其地球动力学过程,仍有待于进一步研究。

## 6 结论

(1)珠江口盆地东南部云荔低隆起—兴荔凸起—兴宁凹陷—东沙隆起一带区域在晚白垩世主要发育有 2 条近 NW-SE 走向并向 NE 方向逆冲的大型逆断层和 2 条近 NS 走向的具有压扭性质的走滑断层,其平面展布距离分别约为 130、110、55 和 58 km,这些断层反映了该区域晚白垩世最大主应力方向为 NE-SW 向。

(2)礼乐—巴拉望地块经过中侏罗世—早白垩世与华南陆缘长时期的软碰撞后,在晚白垩世与华南陆缘在现今荔湾凹陷—兴宁凹陷一带发生最后的

“焊接缝合”,形成了大规模的逆掩断层,并使得之前可能就已经存在的走滑断裂再次活动。

(3)南海南、北部陆缘中、新生界角度不整合的广泛发育以及上白垩统的普遍缺失等现象可能与太平洋板块向华南的俯冲带在晚白垩世发生后撤而引起华南陆缘均衡抬升有关,故华南陆缘在发生张裂之前的晚白垩世可能整体为区域抬升遭受剥蚀、局部陆—陆碰撞缝合的构造格局。

致谢:第一作者就本文中的相关问题与同济大学海洋与地球科学学院钟广法教授和李春峰教授进行过讨论;两位评阅老师对本文提出了诸多宝贵的修改意见;中海石油有限公司提供了地震资料,在此一并表示感谢!

## References

- Briaux, 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(B4): 6299—6328. doi: 10.1029/92jb02280
- Clements, B., Burgess, P. M., Hall, R., et al., 2011. Subsidence and Uplift by Slab-Related Mantle Dynamics: A Driving Mechanism for the Late Cretaceous and Cenozoic Evolution of Continental SE Asia? *Geological Society, London, Special Publications*, 355(1): 37—51. doi: 10.1144/SP355.3
- Cullen, A., Reemst, P., Henstra, G., et al., 2010. Rifting of the South China Sea: New Perspectives. *Petroleum Geoscience*, 16(3): 273—282. doi: 10.1144/1354-079309-908
- Ding, W. W., Franke, D., Li, J. B., et al., 2013. Seismic Stratigraphy and Tectonic Structure from a Composite Multi-Channel Seismic Profile across the Entire Dangerous Grounds, South China Sea. *Tectonophysics*, 582: 162—176. doi: 10.1016/j.tecto.2012.09.026
- Fyhn, M. B. W., Pedersen, S. A. S., Boldreel, L. O., et al., 2010. Palaeocene-Early Eocene Inversion of the Phuquoc-Kampot Som Basin: SE Asian Deformation Associated with the Suturing of Luconia. *Journal of the Geological Society*, 167(2): 281—295. doi: 10.1144/0016-76492009-039
- Gvirtzman, Z., Nur, A., 1999. Plate Detachment, Asthenosphere Upwelling, and Topography across Subduction Zones. *Geology*, 27(6): 563—566. doi: 10.1130/0091-7613(1999)027<0563:pdauat>2.3.co;2
- Hall, R., 2012. Late Jurassic-Cenozoic Reconstructions of the

- Indonesian Region and the Indian Ocean. *Tectonophysics*, 570—571:1—41. doi:10.1016/j.tecto.2012.04.021
- Hao, H. J., Lin, H. M., Yang, M. X., et al., 2001. The Mesozoic in Chaoshan Depression; A New Domain of Petroleum Exploration. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 15(3):157—163 (in Chinese with English abstract).
- Hao, H. J., Shi, H. S., Zhang, X. T., et al., 2009. Mesozoic Sediments and Their Petroleum Geology Conditions in Chaoshan Sag: A Discussion Based on Drilling Results from the Exploratory Well LF35-1-1. *China Offshore Oil and Gas*, 21(3):151—156 (in Chinese with English abstract).
- Hao, H. J., Zhang, X. T., You, H. Q., et al., 2009. Characteristics and Hydrocarbon Potential of Mesozoic Strata in Eastern Pearl River Mouth Basin, Northern South China Sea. *Journal of Earth Science*, 20(1):117—123. doi:10.1007/s12583-009-0013-4
- Holloway, N. H., 1982. North Palawan Block, Philippines—Its Relation to Asian Mainland and Role in Evolution of South China Sea. *AAPG Bulletin*, 66:1355—1383. doi:10.1306/03b5a7a5-16d1-11d7-8645000102c1865d
- Lee, T. Y., Lawver, L. A., 1995. Cenozoic Plate Reconstruction of Southeast Asia. *Tectonophysics*, 251(1—4):85—138. doi:10.1016/0040-1951(95)00023-2
- Lei, C., Ren, J. Y., Zhang, J., 2015. Tectonic Province Divisions in the South China Sea: Implications for Basin Geodynamics. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 40(4):744—762 (in Chinese with English abstract).
- Li, C. F., Zhou, Z. Y., Hao, H. J., et al., 2008. Late Mesozoic Tectonic Structure and Evolution along the Present-Day Northeastern South China Sea Continental Margin. *Journal of Asian Earth Sciences*, 31(4—6):546—561. doi:10.1016/j.jseaes.2007.09.004
- Li, C. F., Zhou, Z. Y., Li, J. B., et al., 2007. Structures of the Northeasternmost South China Sea Continental Margin and Ocean Basin: Geophysical Constraints and Tectonic Implications. *Marine Geophysical Researches*, 28(1):59—79. doi:10.1007/s11001-007-9014-9
- Li, W. C., Yan, J. S., Wang, L. F., et al., 2003. On the Mesozoic of Liyue Basin, South China Sea. *Geological Research of South China Sea*, 102—107 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. X., Li, X. H., 2007. Formation of the 1 300 km Wide Intracontinental Orogen and Postorogenic Magmatic Province in Mesozoic South China: A Flat-Slab Subduction Model. *Geology*, 35(2):179—182. doi:10.1130/G23193A.1
- Liu, H. L., Xie, G. F., Yan, P., et al., 2007. Tectonic Implication of Mesozoic Marine Deposits in the Nansha Islands of the South China Sea. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 38(3):272—278 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. S., Shi, H. S., Yang, S. K., et al., 2014. The Practice of Self-Operated Exploration and Its Achievements in the Eastern South China Sea. *China Offshore Oil and Gas*, 26(3):1—10 (in Chinese with English abstract).
- Luo, M. S., Lu, L. Q., Jia, J., et al., 2014. Evolution of Sedimentary Basins in China during Mesozoic. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 39(8):954—976 (in Chinese with English abstract).
- Miao, S. D., Zhang, G. C., Liang, J. S., et al., 2013. Delta Depositional System and Source Rock Characteristics of Enping Formation, Liwan Sag in Ultra Deep-Water Area of Northern South China Sea. *Acta Petrolei Sinica*, 34(Suppl. 2):57—65 (in Chinese with English abstract).
- Morley, C. K., 2012. Late Cretaceous-Early Palaeogene Tectonic Development of SE Asia. *Earth-Science Reviews*, 115(1—2):37—75. doi:10.1016/j.earscirev.2012.08.002
- Northrup, C. J., Royden, L. H., Burchfiel, B. C., 1995. Motion of the Pacific Plate Relative to Eurasia and Its Potential Relation to Cenozoic Extension along the Eastern Margin of Eurasia. *Geology*, 23(8):719—722. doi:10.1130/0091-7613(1995)023<0719:motppr>2.3.co;2
- Ren, J. S., Niu, B. G., Liu, Z. G., 1999. Soft Collision, Superposition Orogeny and Polycyclic Suturing. *Earth Science Frontiers*, 6(3):85—93 (in Chinese with English abstract).
- Ru, K., Pigott, J. D., 1986. Episodic Rifting and Subsidence in the South China Sea. *AAPG Bulletin*, 70(9):1136—1155. doi:10.1306/94886a8d-1704-11d7-8645000102c1865d
- Schlüter, H. U., Hinz, K., Block, M., 1996. Tectono-Stratigraphic Terranes and Detachment Faulting of the South China Sea and Sulu Sea. *Marine Geology*, 130(1—2):39—78. doi:10.1016/0025-3227(95)00137-9
- Shao, L., You, H. Q., Hao, H. J., et al., 2007. Petrology and Depositional Environments of Mesozoic Strata in the Northeastern South China Sea. *Geological Review*, 53(2):164—169 (in Chinese with English abstract).
- Shi, H. S., 2011. Tectonic Evolution and Basin-Forming Mechanism of the Northern Margin of the South China

- Sea in Mesozoic (Dissertation). Tongji University, Shanghai, 96—110 (in Chinese with English abstract).
- Shi, H. S., Li, C. F., 2012. Mesozoic and Early Cenozoic Tectonic Convergence-to-Rifting Transition Prior to Opening of the South China Sea. *International Geology Review*, 54(15): 1801—1828. doi: 10. 1080/00206814. 2012. 677136
- Su, N. R., Zeng, L., Li, P. L., 1995. Geological Features of Mesozoic Sags in the Eastern Part of Pearl River Mouth Basin. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 9(4): 228—236 (in Chinese with English abstract).
- Sun, X. M., Zhang, X. Q., Zhang, G. C., et al., 2014. Texture and Tectonic Attribute of Cenozoic Basin Basement in the Northern South China Sea. *Science China: Earth Sciences*, 57(6): 1199—1211. doi: 10. 1007/s11430—014—4835—2
- Tang, Q. S., Zheng, C., 2010. Seismic Velocity Structure and Improved Seismic Image of the Southern Depression of the Tainan Basin from Pre-Stack Depth Migration. *Terrrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 21(5): 807—816. doi: 10. 3319/TAO. 2010. 01. 03. 01(TT)
- Tang, Q. S., Zheng, C., 2013. Crust and Upper Mantle Structure and Its Tectonic Implications in the South China Sea and Adjacent Regions. *Journal of Asian Earth Sciences*, 62: 510—525. doi: 10. 1016/j. jseaes. 2012. 10. 037
- Tapponnier, P., Peltzer, G., Le Dain, A. Y., et al., 1982. Propagating Extrusion Tectonics in Asia; New Insights from Simple Experiments with Plasticine. *Geology*, 10(12): 611—616. doi: 10. 1130/0091—7613(1982)10<611:petian>2. 0. co;2
- Taylor, B., Hayes, D. E., 1980. The Tectonic Evolution of the South China Sea. In: Hayes, D. E., ed., *The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands; Part 2. Geophys. Monogr.*, 23: 89—104. doi: 10. 1029/GM023p0089
- Taylor, B., Hayes, D. E., 1983. Origin and History of the South China Sea Basin. In: Hayes, D. E., ed., *The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands; Part 2. Geophys. Monogr.*, 27: 23—56. doi: 10. 1029/GM027p0023
- Wang, P., Xia, K. Y., Huang, C. L., 2000. Distribution and Geological & Geophysical Characteristics of Mesozoic Marine Strata in Northeastern Part of South China Sea. *Tropic Oceanology*, 19(4): 28—35 (in Chinese with English abstract).
- Wang, P. X., Zhao, Q. H., Jian, Z. M., et al., 2003. Thirty Million Year Deep-Sea Records in the South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 48(23): 2524—2535. doi: 10. 1007/bf03037016
- Wu, G. X., Wang, R. J., Hao, H. J., et al., 2007. Microfossil Evidence for Development of Marine Mesozoic in the North of South China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 27(1): 79—85 (in Chinese with English abstract).
- Xia, K. Y., Huang, C. L., 2000. The Discovery of Mesozoic Tethys Sedimentary Basins in the South China Sea and Their Oil and Gas Perspective. *Earth Science Frontiers*, 7(3): 227—238 (in Chinese with English abstract).
- Xu, G. Q., Wu, S. H., Zhang, L., et al., 2013. Stratigraphic Division and Depositional Processes for the Mesozoic Basin in Northern South China Sea. *Marine Geophysical Research*, 34(3—4): 175—194. doi: 10. 1007/s11001—013—9201—9
- Yan, P., Liu, H. L., 2004. Tectonic-Stratigraphic Division and Blind Fold Structures in Nansha Waters, South China Sea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(3): 337—348. doi: 10. 1016/j. jseaes. 2003. 12. 005
- Yan, P., Wang, L. L., Wang, Y. L., 2014. Late Mesozoic Compressional Folds in Dongsha Waters, the Northern Margin of the South China Sea. *Tectonophysics*, 615—616: 213—223. doi: 10. 1016/j. tecto. 2014. 01. 009
- Yang, S. C., Tong, Z. G., He, Q., et al., 2008. Mesozoic Hydrocarbon Generation History and Igneous Intrusion Impacts in Chaoshan Depression, South China Sea; A Case of LF35-1-1 Well. *China Offshore Oil and Gas*, 20(3): 152—156 (in Chinese with English abstract).
- Yao, B. C., 1996. Tectonic Characteristics and Evolution of the Nansha Trough. *Geological Research of South China Sea*, (8): 1—13 (in Chinese with English abstract).
- Zamoras, L. R., Matsuoka, A., 2001. Malampaya Sound Group: A Jurassic-Early Cretaceous Accretionary Complex in Busuanga Island, North Palawan Block (Philippines). *The Journal of the Geological Society of Japan*, 107(5): 316—336. doi: 10. 5575/geosoc. 107. 316
- Zamoras, L. R., Matsuoka, A., 2004. Accretion and Postaccretion Tectonics of the Calamian Islands, North Palawan Block, Philippines. *The Island Arc*, 13(4): 506—519. doi: 10. 1111/j. 1440—1738. 2004. 00443. x
- Zhao, M. S., Liu, H. L., Wu, C. H., 2012. Mesozoic Stratigraphic and Structural Features and Collisional Orogeny between the Northern and Southern Continental Margins of the South China Sea. *Progress in Geophysics*, 27(4): 1454—1464 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, D., Chen, H. Z., Sun, Z., et al., 2005a. Three Mesozoic Sea Basins in Eastern and Southern South China Sea and Their Relation to Tethys and Paleo-Pacific



- Domains. *Journal of Tropical Oceanography*, 24(2): 16–25 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, D., Sun, Z., Chen, H. Z., et al., 2005b. Mesozoic Lithofacies, Paleo-Geography, and Tectonic Evolution of the South China Sea and Surrounding Areas. *Earth Science Frontiers*, 12(3): 204–218 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, D., Ru, K., Chen, H. Z., 1995. Kinematics of Cenozoic Extension on the South China Sea Continental Margin and Its Implications for the Tectonic Evolution of the Region. *Tectonophysics*, 251(1–4): 161–177. doi:10.1016/0040-1951(95)00018-6
- Zhou, D., Sun, Z., Chen, H. Z., et al., 2008. Mesozoic Paleogeography and Tectonic Evolution of South China Sea and Adjacent Areas in the Context of Tethyan and Paleo-Pacific Interconnections. *The Island Arc*, 17(2): 186–207. doi:10.1111/j.1440-1738.2008.00611.x
- Zhou, D., Wang, W. Y., Wang, J. L., 2006. Mesozoic Subduction-Accretion Zone in Northeastern South China Sea Inferred from Geophysical Interpretations. *Science in China (Series D)*, 49(5): 471–482. doi:10.1007/s11430-006-0471-9
- ### 附中文参考文献
- 郝沪军, 林鹤鸣, 杨梦雄, 等, 2001. 潮汕坳陷中生界一油气勘探的新领域. *中国海上油气(地质)*, 15(3): 157–163.
- 郝沪军, 施和生, 张向涛, 等, 2009. 潮汕坳陷中生界及其石油地质条件—基于 LF35-1-1 探索井钻探结果的讨论. *中国海上油气*, 21(3): 151–156.
- 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——中国地质大学学报*, 40(4): 744–762.
- 李文成, 严俊嵩, 王立飞, 等, 2003. 礼乐盆地中生界初探. *南海地质研究*, 102–107.
- 刘海龄, 谢国发, 阎贫, 等, 2007. 南沙海区中生界岩相分布及构造特征. *海洋与湖沼*, 38(3): 272–278.
- 刘再生, 施和生, 杨少坤, 等, 2014. 南海东部海域自营勘探实践与成效. *中国海上油气*, 26(3): 1–10.
- 骆满生, 卢隆桥, 贾建, 等, 2014. 中国中生代沉积盆地演化. *地球科学——中国地质大学学报*, 39(8): 954–976.
- 苗顺德, 张功成, 梁建设, 等, 2013. 南海北部超深水区荔湾凹陷恩平组三角洲沉积体系及其烃源岩特征. *石油学报*, 34(增刊 2): 57–65.
- 任纪舜, 牛宝贵, 刘志刚, 1999. 软碰撞、叠覆造山和多旋回缝合合作用. *地学前缘*, 6(3): 85–93.
- 邵磊, 尤洪庆, 郝沪军, 等, 2007. 南海东北部中生界岩石学特征及沉积环境. *地质论评*, 53(2): 164–169.
- 施和生, 2011. 南海北部中生代构造演化与成盆机制研究(博士学位论文). 上海: 同济大学, 96–110.
- 苏乃容, 曾麟, 李平鲁, 1995. 珠江口盆地东部中生代凹陷地质特征. *中国海上油气(地质)*, 9(4): 228–236.
- 王平, 夏戴原, 黄慈流, 2000. 南海东北部中生代海相地层的分布及其地质地球物理特征. *热带海洋*, 19(4): 28–35.
- 吴国瑄, 王汝建, 郝沪军, 等, 2007. 南海北部海相中生界发育的微体化石证据. *海洋地质与第四纪地质*, 27(1): 79–85.
- 夏戴原, 黄慈流, 2000. 南海中生代特提斯期沉积盆地的发现与找寻中生代含油气盆地的前景. *地学前缘*, 7(3): 227–238.
- 杨树春, 全志刚, 贺清, 等, 2008. 潮汕坳陷中生界生烃历史及火成岩侵入影响分析——以 LF35-1-1 井为例. *中国海上油气*, 20(3): 152–156.
- 姚伯初, 1996. 南沙海槽的构造特征及其构造演化史. *南海地质研究*, (8): 1–13.
- 赵美松, 刘海龄, 吴朝华, 2012. 南海南北陆缘中生代地层一构造特征及碰撞造山. *地球物理学进展*, 27(4): 1454–1464.
- 周蒂, 陈汉宗, 孙珍, 等, 2005a. 南海中生代三期海盆及其与特提斯和古太平洋的关系. *热带海洋学报*, 24(2): 16–25.
- 周蒂, 孙珍, 陈汉宗, 等, 2005b. 南海及其围区中生代岩相古地理和构造演化. *地学前缘*, 12(3): 204–218.