

红河断裂带东南的延伸及其构造演化意义^{*}

刘宝明^{①②③**} 夏 斌^② 李绪宣^{②③} 张敏强^{②③} 牛滨华^① 钟立峰^②
金庆焕^{②④} 嵇少丞^{②⑤}

(① 中国地质大学, 北京 100083; ② 中国科学院边缘海地质重点实验室, 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640; ③ 中国海洋石油总公司研究中心, 北京 100027; ④ 国土资源部广州海洋地质调查局, 广州 510075; ⑤ Ecole Polytechnique Montreal, Canada, H3C3A7)

摘要 红河断裂是中国华南与印支地块的分界线, 莺歌海盆地的一号断裂是红河断裂向东进入南海的延伸部分. 根据新的地球物理调查资料和盆地模拟技术的研究认为, 红河断裂是沿着越东断裂向南延伸, 在越南南部海域进一步分为两支断裂: 一支是卢帕尔断裂, 它继续向南延伸并消失于西北婆罗州之下; 另一支是廷贾断裂, 它继续向东南方向延伸可达文莱-沙巴地区. 指出, 万安盆地和位于南沙地块上的沉积盆地具有不同的构造演化历史, 越东断裂和廷贾断裂的连线应是印支地块与南沙地块的分界线, 它们同属陆缘断裂, 并总体表现出以走滑断裂为主的特征, 而卢帕尔断裂应是印支地块上的板内超壳断裂. 重建了红河断裂和南海扩张的演化历史, 所获得的认识对邻区构造演化的理解及该区油气勘探具有重要的指导意义.

关键词 红河断裂 构造演化 断裂 延伸 南海西部

红河断裂带是特提斯构造演化的主要组成部分, 该断裂带位于华南板块与印支板块之间^[1], 是欧亚板块与印澳板块的分界线, 在构造演化史上与青藏高原的隆升及南海海盆的扩张存在着直接的联系. 红河断裂带北起青藏高原, 穿越云南及越南北部, 向东南延入南海, 在陆地部分全长近 1000 km, 是东南亚一条显著的地质、地貌分解线. 该断裂带在陆区构造形迹十分显著, 前人^[2-11]从岩石地球化学、变质作用、变形构造、地质测年和数值模拟^[12]及壳幔结构^[13]等

方面对该断裂带做了许多研究, 提出了一些构造演化模式^[14-16], 并普遍认为这是一条在新生代发生过左行走滑, 近期又发生了右行走滑的大型剪切带^[17]. 红河断裂在南海西北部的延伸特征较明显, Rangin 等^[18]利用沿红河断裂带钻探的钻井资料对地震地层进行了校正, 并划分了两个重要的不整合界面, 时代为 30 Ma 的不整合界面表现出以左旋走滑为主的特征, 而时代为 5.5 Ma 的不整合界面所表现出的右旋走滑特征并不十分明显. Sun 等^[19]根据薄板和厚板模

收稿日期: 2005-10-19; 接受日期: 2006-01-23

* 中国科学院知识创新工程方向项目(批准号: KZCX2-SW-117-03)、中国科学院边缘海重点实验室开放基金(批准号: MSGL04-6)、中国科学院广州地球化学研究所创新项目(批准号: IGCX-03-07)和国家自然科学基金项目(批准号: 40306010)资助

** E-mail: liubm21@163.com

型对莺歌海盆地的构造演化进行了模拟,认为该盆地的构造演化在 5 Ma 之前表现为左旋特征,而 5 Ma 之后右旋特征较明显.该断裂带从陆地至红河口入海后沿莺歌海盆地向东南延伸到海南岛南部,这一段已无争议,但此后如何延伸至今仍无统一的看法.刘昭蜀^[20]提出红河断裂的两种延伸模式:一支为向东延伸,指的是红河断裂经海南岛南部与西沙海槽相连;另一支是向南延伸,与近南北向展布的越东断裂相连.因此,他提出“Y”字型的延伸模式,但他尚未讨论向南延伸的断裂特征.还有学者提出第三种延伸的观点^[21,22],即指出红河断裂延伸到海南岛以南穿过中沙-西沙地块之后就沿着中建南断裂向东南方向延伸的. Ben-Avraham等^[23]和Hilde等^[24]都认为沿越南东部海岸发育一条转换断裂带(即现所谓的越东断裂),此后Ludwig等^[25]提出了南海西缘为剪切边缘的观点,然而因受到当时资料的限制,他们都未对该断裂带在南海西南部的延伸问题进行阐述.自Tapponnier等^[14]提出挤出模式以来,红河断裂作为东南亚滑移的北部边界并与南海的形成演化联系起来,开始倍受地学界的关注.虽然大家广泛接受既定的观点——Tapponnier等^[14]提出的挤出模式而造成印支地块向东南逃逸形成走滑边界,但因该断裂带构造演化的复杂性及其向东南进入南海是如何延伸以及缺乏海上更翔实的资料^[26],对该边界的构造属性研究得不够清楚.关于越南东部和南部海域的地质构造研究的资料也较少.姚伯初等^[27]利用调查的地震资料研究了越东断裂特征,认为该断裂带在地震剖面上表现出具有陡倾的高角度花状走滑断裂构造的典型特征;吴进民^[28]在探讨越南东南部万安盆地新生代构造演化时指出,该盆地主体位于昆嵩地块南缘的印支地块上,但他只讨论了构造运动与成盆的关系,对盆缘断裂(如越东断裂)尚没有更多地阐述;Lee等^[29]分析了中建盆地(即Phu Khanh basin)的构造特征后认为,在南海西部陆架区发育一些近南北向分布的断裂带;Liu等^[30]在分析南沙层块构造时指出万纳断裂(即越东断裂的南段)控制了万安盆地及西南次海盆的演化.但这些学者仅根据自身的资料讨论了

不同地区的地质构造特征,没有很好地把印支地块与南海的构造演化联系起来分析红河断裂-越东断裂及其进一步的延伸问题,在认识上具有片面性.

关于南海的成因及其扩张时序的认识,目前仍然存在较大分歧.目前普遍认为南海的四大边缘属性是北部陆缘张裂、南部挤压变形、东部俯冲消减、西部走滑剪切,除西部边缘外,在其他三个边缘带及中央海盆区开展了许多深部地球物理调查和研究,尤其是北部边缘已开展了多条 OBS 调查测线,从而对这三大边缘属性大家基本获得了如上的共识.而对西部边缘特征由于陆架较窄,工作难度较大,至今相关的研究成果较少,研究程度也很低,所以对红河断裂的延伸一直存在争议,但它又是我们认识印澳-欧亚板块碰撞和南海扩张的主要桥梁,如何认识红河断裂带在南海海域的延伸问题,这将直接影响到人们对南海乃至欧亚板块与印澳板块构造演化模式的建立及其正确理解.本文将利用近几年来调查的地震、重磁资料,通过资料处理、地震地层解释和盆地模拟技术,来分析南海西部陆缘地质构造演化特征及红河断裂带在南海的东延问题,并指出红河断裂是沿着越东断裂带(Da Nang-uy Hoa shear zone)向南延伸,在越南南部海域又分成廷贾断裂和卢帕尔断裂两条断裂的新观点,这条东南亚典型的构造分界线在地质演化历史上总体表现出以走滑断裂为主的特征.

1 地质背景

南海位于印澳、欧亚和太平洋三大板块的交汇处,构造演化相当之复杂.南海从地貌特征上可划分为两个部分,即陆壳和洋壳^[31].陆壳部分包括了南海北部陆架、印支陆架和南海南部广阔的陆架海域(即南沙地块).洋壳部分可进一步划分为西北、西南和中央三个次海盆(图 1).中央次海盆具有东西向对称分布的磁条带(11~5 d), Taylor, Hayes^[32]和 Briais等^[33]认为其地质时代为 32~17 Ma.西南次海盆磁条带较少,且时代仍存在争议. Briais等^[33]认为西北次海盆的磁条带(10~11)时代为 30~32 Ma,而 Ru和Pigott^[34]则认

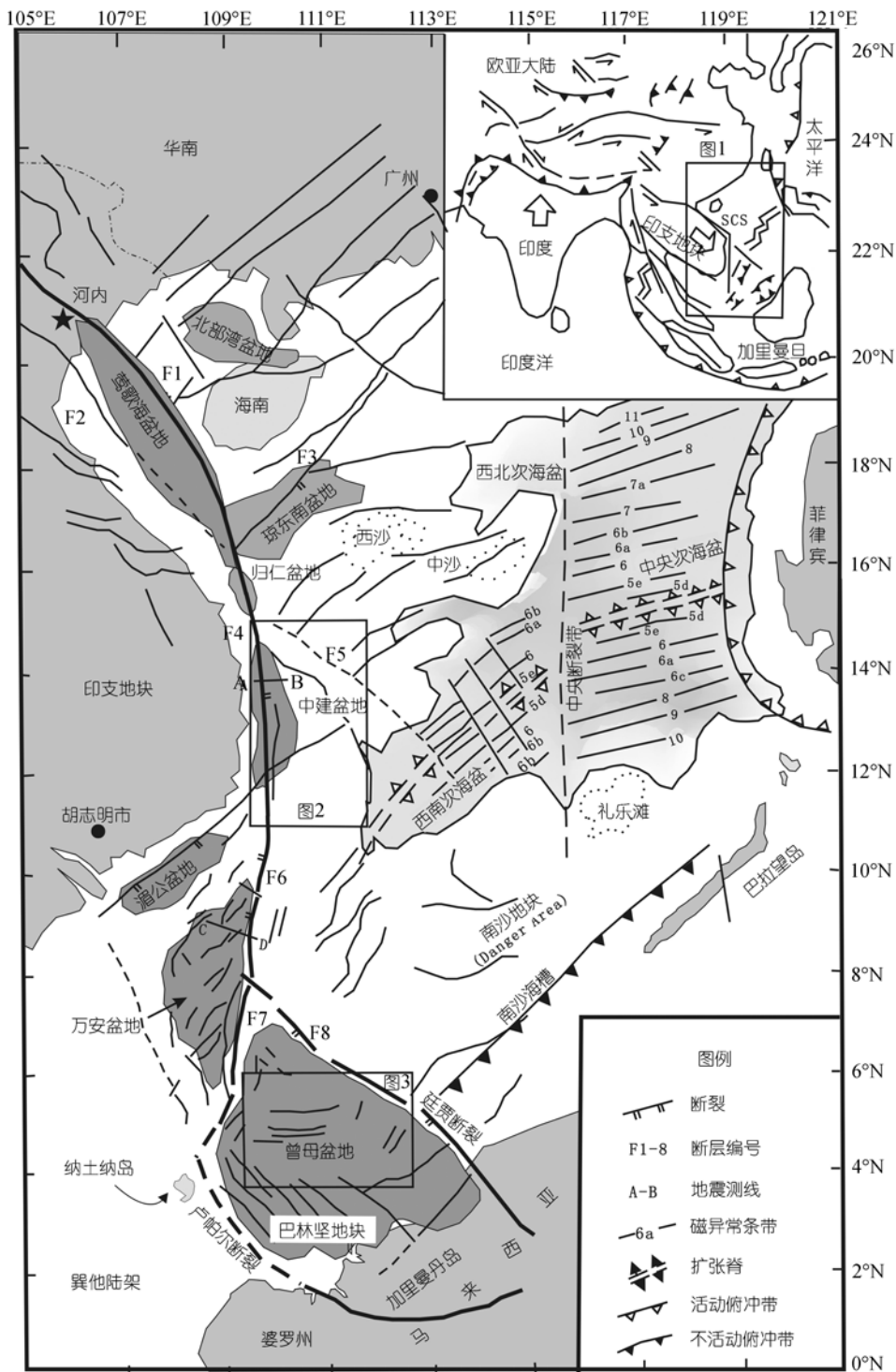


图 1 南海西部地质构造特征与沉积盆地分布图

(据文献 [3, 4, 14~16, 18, 19, 26, 29, 33, 37] 等编制). F1: 莺歌海盆地 1 号断裂, F2: 莺歌海盆地中央断裂, F3: 琼东南盆地 2 号断裂, F4: 越东断裂北段, F5: 中建南断裂, F6: 越东断裂中段, F7: 越东断裂南段(即卢帕尔断裂), F8: 廷贾断裂. A-B 和 C-D 线分别表示文中讨论的地震测线位置

为其时代为 32~34 Ma.所以,目前大家对南海海盆的扩张次数及其扩张时序仍然存在着不同的认识.通过本文的研究,可能有助于加强对这方面的理解.

研究区位于南海西部陆缘,分布着数个大型沉积盆地(图 1),刘宝明等^[35]把这些沉积盆地划分为三种成因类型:剪切拉张型,包括有莺歌海盆地、中建盆地(即越南的富庆盆地-Phu Khanh Basin)和万安盆地(即南昆仑盆地-Nam Con Son Basin);陆缘裂谷型,包括有琼东南盆地、湄公盆地(即Meikong Baisn)和前陆型曾母盆地(Sarawak Basin).这些盆地富含油气藏^[36],且皆分布在印支地块的东南缘,在成因上与红河断裂的演化历史息息相关,断裂对盆地的沉积发育史和盆地的成因机制具有明显的控制作用.

2 红河断裂延伸的证据

2.1 重力、磁力资料

利用重磁调查的资料,可以分析地壳结构和沉

积盆地的基底属性以及超壳断裂.何廉声等^[21]利用南海重磁资料,把南海划分为 8 个重磁异常带.其中中央海盆异常带重力异常变化缓慢,异常梯度小,磁力异常具有明显的方向性.其他异常带重磁异常和磁性基底埋深变化皆大,中沙-西沙异常带与南沙异常带具有类似的重力异常特征,而磁力异常则存在一定的差异,这与南沙地块的基底埋深有关,Wu等^[37]指出,它们具有类似的沉积特征,并把它们划分为同一个沉积分区.最近的地球物理调查资料揭示出,南海西缘中段具有明显的南北向展布的重力(图 2(a))和磁力(图 2(b))串珠状线性异常.从而表明,中沙、西沙和南沙地区与越南陆缘在重磁异常场、沉积发育史方面确实存在着一定的差异性,它们之间应该存在一个不连续的地质界线,这可能就是越东断裂存在的确凿证据.

位于南海南部的曾母盆地,是以 NW 向展布的安平低凸起或廷贾断裂(图 3 中阴影区)与南沙地块分

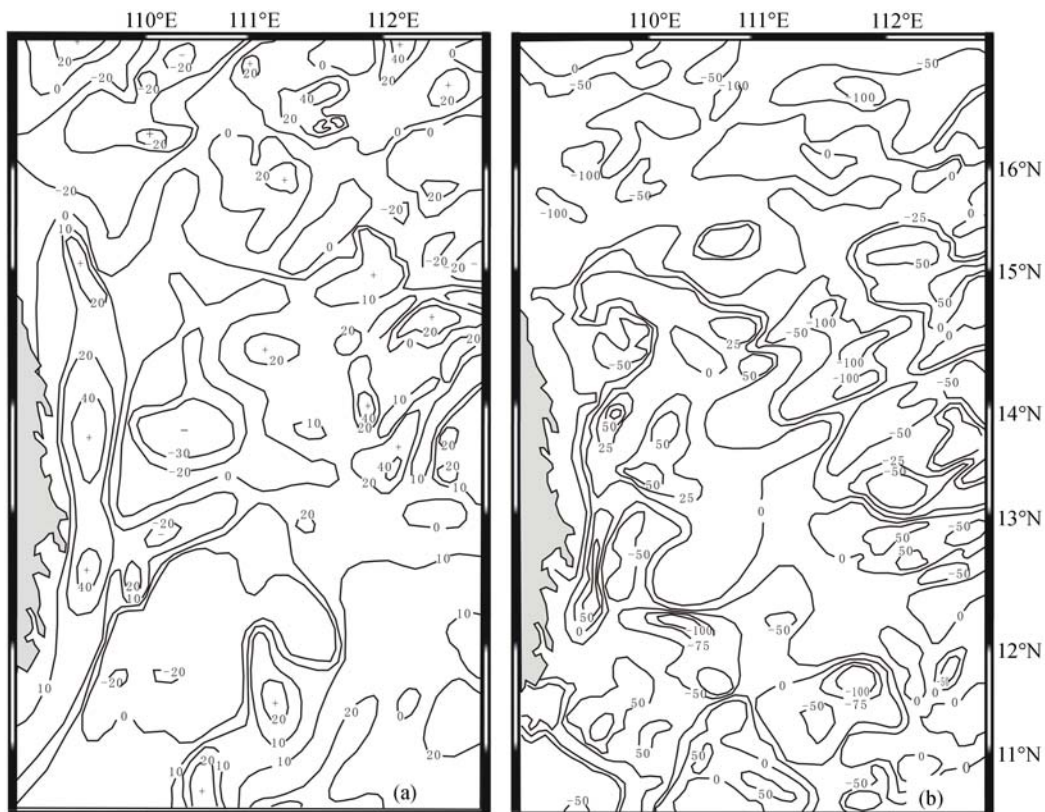


图 2 南海西部中段重力异常(a)和磁力异常(b)分布图(位置见图 1)

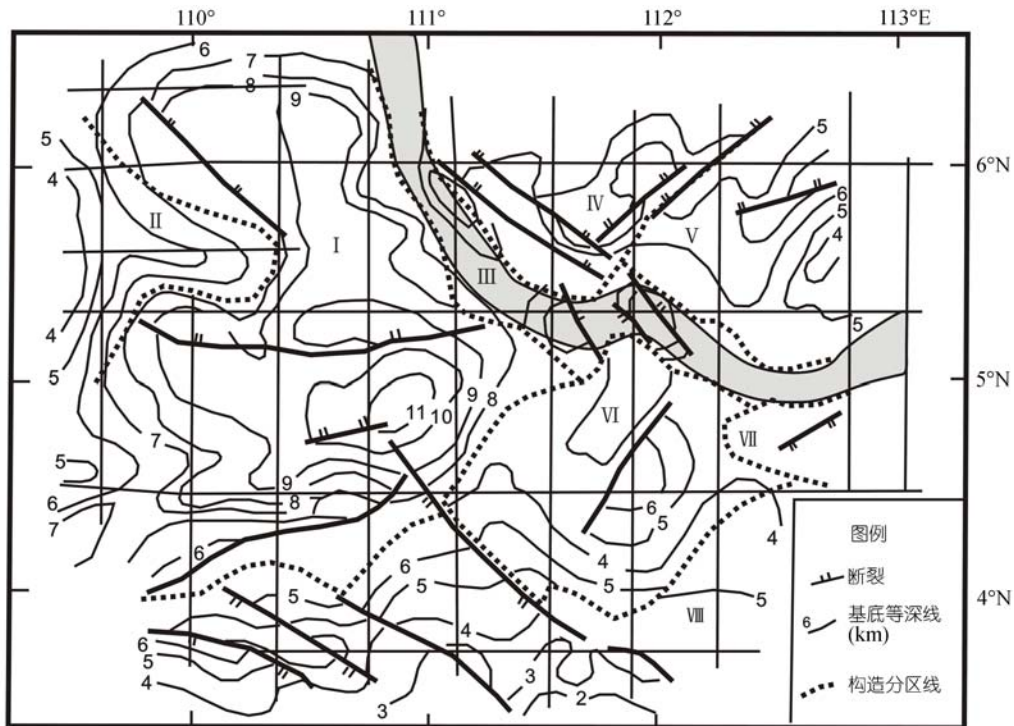


图3 南海南部曾母盆地构造区划图

I-康西拗陷, II-西部斜坡带, III-安平低凸起, IV-南薇盆地, V-北康盆地, VI-南康台地, VII-琼台拗陷, VIII-立地斜坡. 位置见图1

开的, 虽然它们都发育了渐新统-第四系的沉积, 但二者间具有明显不同的基底属性: 南沙地块上发育已被钻井证实了的晚中生代基底, 而曾母盆地可能只接受了晚始新世的基底沉积. 需要指出的是, 在南海北部沉积盆地中也发现了晚中生代的沉积, 这表明在南海扩张(32 Ma)前, 南沙地块与南海北部应是连在一起的, 并具有同样的基底属性. 廷贾断裂是红河断裂延伸到南海南部的一个分支, 并具有走滑断层的花状构造特征^[38]. 也就是说红河断裂受到透视镜状巴林坚地块刚性基底的制约而分成了卢帕尔断裂和廷贾断裂两条分支.

2.2 地震数据

从南海西部采集的地震资料上可识别出 4 个重要的地震反射界面, 它们分别对应于 4 个不同时代的沉积不整合面(图 4(a)): SB1 为中渐新世, SB2 为早中新世晚期, SB3 为中中新世和 SB4 为晚中新世. 越南东部及南部调查资料较少, Lee 等^[29]在研究中建盆地时在地震剖面上也发现有类似的地震相特征, 他认为

南海西部分布着一系列近南北向展布的高角度断裂, 这些断裂又被 NW 向展布的缓和断裂带(Tuy Hoa Shear Zone)所错断. 位于南海西部斜坡带上的越东断裂带, 新的地震资料上明显表现出不连续的地震反射特征(图 4(b)). 这条断裂带由多条平行的断裂组成, 并向东或向西表现出高角度的走滑特征, 图 4(a)中的 F4 位置即是该断裂带的主要部位, 并切穿至海底, 从而表明它至今仍具有活动特性. 所以, 从地震剖面来看, 越东断裂是存在的, 而且地震相特征也比较明显.

2.3 构造演化模拟

我们选用横跨万安盆地和南沙地块的地震剖面进行构造演化的数值模拟. 模拟结果认为, 该区盆地经历了渐新世以前和渐新世-中中新世两期裂谷阶段、中中新世-晚中新世的构造反转和上新世之后的区域沉降阶段, 断裂的发育期主要是在盆地形成时的同裂谷阶段^[39]. 区域热沉降阶段构造相对平静, 断裂发育较少. 以 F6 断裂为界, 盆地具有两种演化体

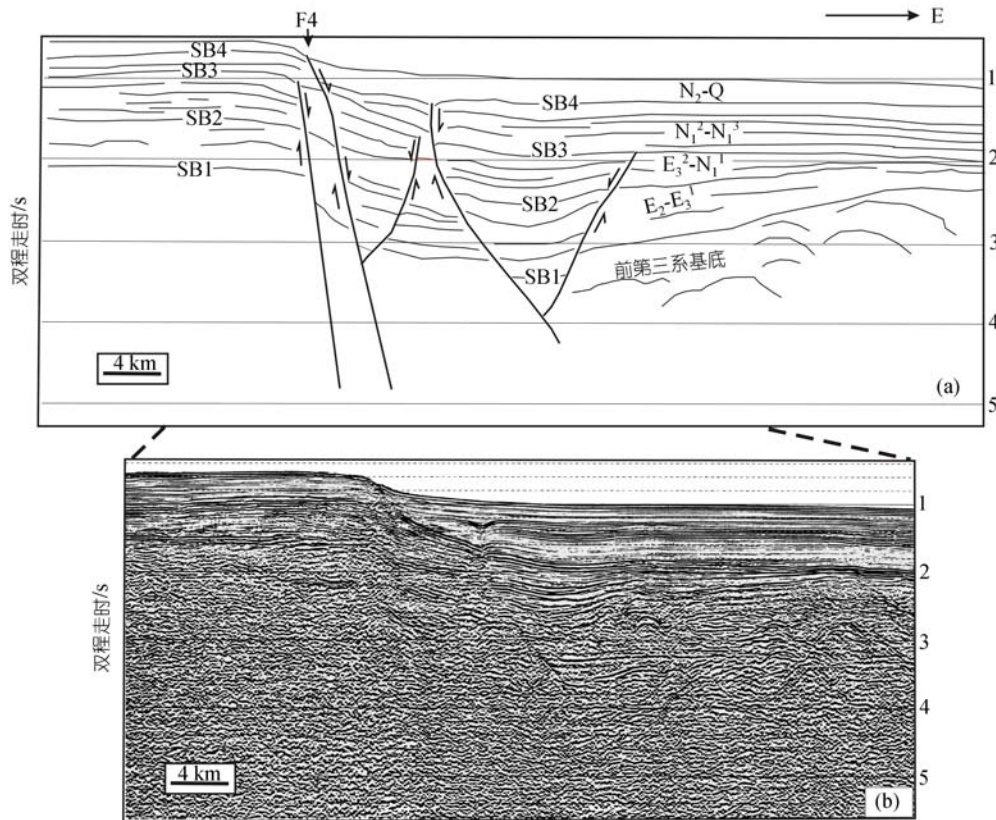


图 4 南海西部陆缘地震解释横剖面图

(a)南海西部地震测线 A-B 的解释剖面; (b)越东断裂地震反射剖面(位置见图 1)。SB1 为中中新世, SB2 为早中新世晚期, SB3 为中中新世和 SB4 为晚中新世

制(图 5), 万安盆地所在的西部地区经历了构造反转演化阶段, 表明构造运动场具有挤压特征, Jiang等^[40]称此次构造运动为米里运动, 并在曾母盆地南部形成中等程度的挤压变形。相反地, 位于南沙地块上的沉积盆地却没有同时期的构造反转特征。

Lee等^[41]在分析万安盆地(即Nam Con Son basin)的构造演化时指出, 该盆地的形成经历了两期裂谷阶段和区域沉降阶段。初始裂谷阶段发生于始新世-早渐新世, 并发育了非海相-浅海相沉积, 这些非海相沉积与湄公盆地同时期的沉积具有类比性。第二期裂谷阶段可持续到晚中新世, 并在万安盆地局部地区形成中-晚中新世的构造反转, 这与构造演化数值模拟的结果是一致的。由此可以推断, 越东断裂南部F6 所在的断裂不仅控制了万安盆地的形成演化和沉积发育史, 而且也是印支地块与南沙地块的分界线。

3 讨论与结论

红河断裂的东延一直存在争议, 有的学者认为是沿着南海北部琼东南盆地中的二号断裂(图 1 中的 F3 位置)向东延伸的, 而有的学者认为是沿着越东断裂向南延伸的。Zhou等^[42]认为南海北部的构造演化具有地壳向东拉伸的“剪刀”模式, 如果红河断裂是沿着南海北部延伸的话, 那么这种模式应该是相反的, 地壳应是向西拉伸的。姚伯初等^[43]认为造成南海北部陆缘地壳结构由北向南呈阶梯状减薄的原因是上地幔物质呈幕式上涌在地壳底部冷却而形成的。根据近几年的OBS调查资料^[44-46], 对南海北部的深部地壳结构进行了研究, 认为该区火山作用不强烈, 属非火山被动型大陆边缘, Shi等^[46]还认为西沙海槽是一个死亡了的裂谷盆地。因此, 我们推测, 目前认为红河断裂东延的“Y”字型^[20]沿着南海北部向东延伸

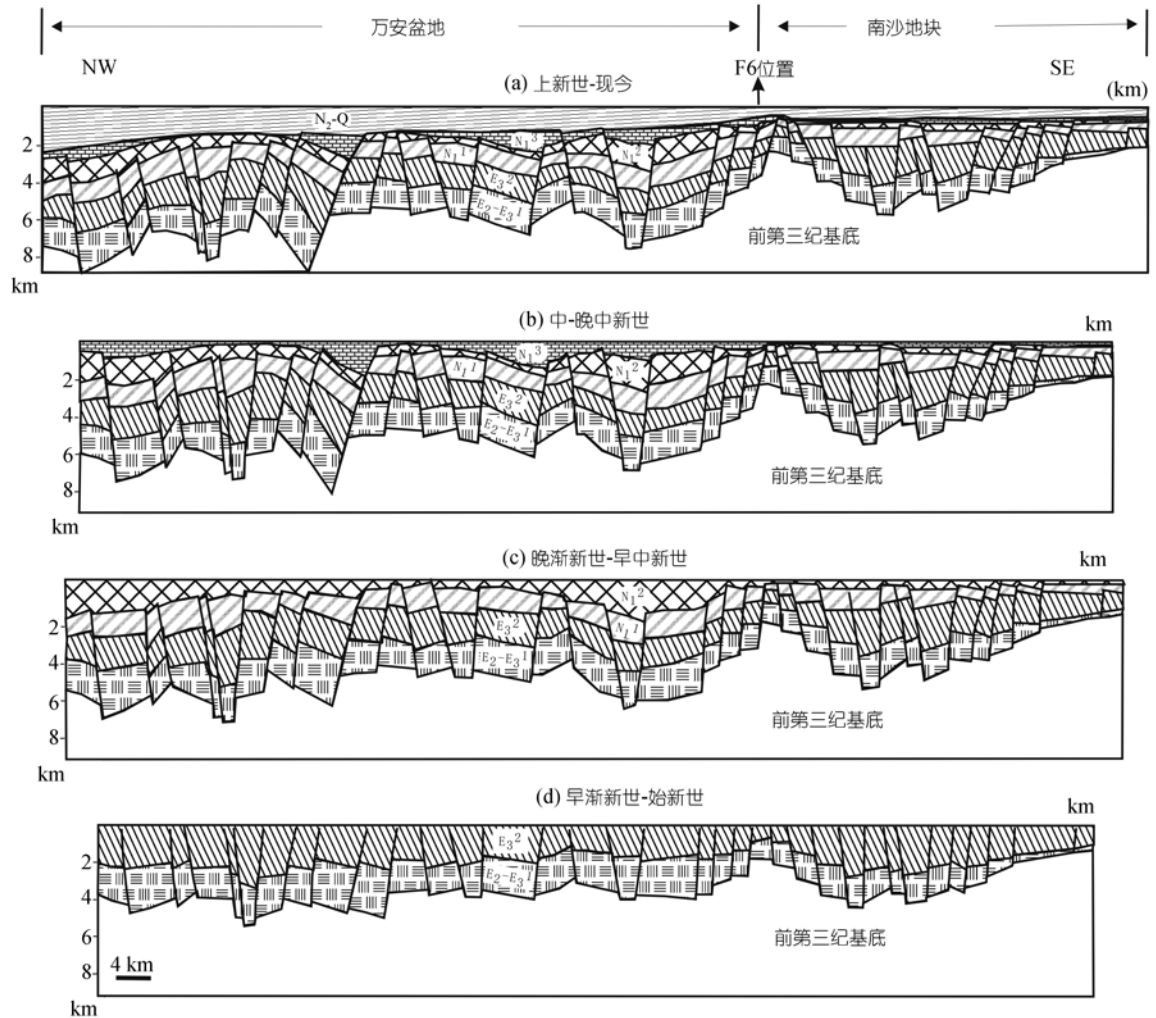


图 5 南海西部越东断裂带地震测线 C-D 的构造演化数值模拟剖面图(位置见图 1)

的那一支尚需要更多的证据才能加以证实。

正如前面所述,持第三种延伸的观点^[21,22]认为红河断裂是经中沙-西沙地块后沿中建南断裂(图 1 中的 F5 断裂)延伸的。但是在姚伯初等^[27]的研究中没有揭示这条重要断裂的存在,而且即便是沿此断层延伸再穿过西南次海盆进入南沙地块上,然而经过这几年的调查研究并未在南沙地块上发现大型的北西向断层与此相连。因此,笔者对持这种延伸的观点表示怀疑。

越来越多的资料表明,南海西部存在一大型断裂带。图 6(d)中指出了红河断裂带在不同地域的应力场的玫瑰花图,龚再升和李思田等^[47]在分析南海北

部边缘盆地时指出,莺歌海盆地一号断裂的应力场方位由老至新发生了 NW 至 NNW(近 SN) 向顺时针的转向; Rangin 等^[48]认为,越南东部至南部断裂构造的构造演化方向也发生了由近 SN 至 NNE 向的转向。因此,笔者认为,红河断裂这种力学机制上的变化正是印支地块向东南挤出并发生顺时针旋转的佐证。姚伯初等^[27]发现越东断裂具有多条陡倾的花状走滑断裂特征, Lee 等^[29]也指出中建盆地中发育一系列平行的近 NS 向断裂。根据重磁资料和地震资料,我们也证实了越东断裂带存在的事实依据,并且该断裂带至今仍在活动。从中沙-西沙地块的地壳结构来看,它们属于华南的一部分。因此,红河断裂向南的延伸可

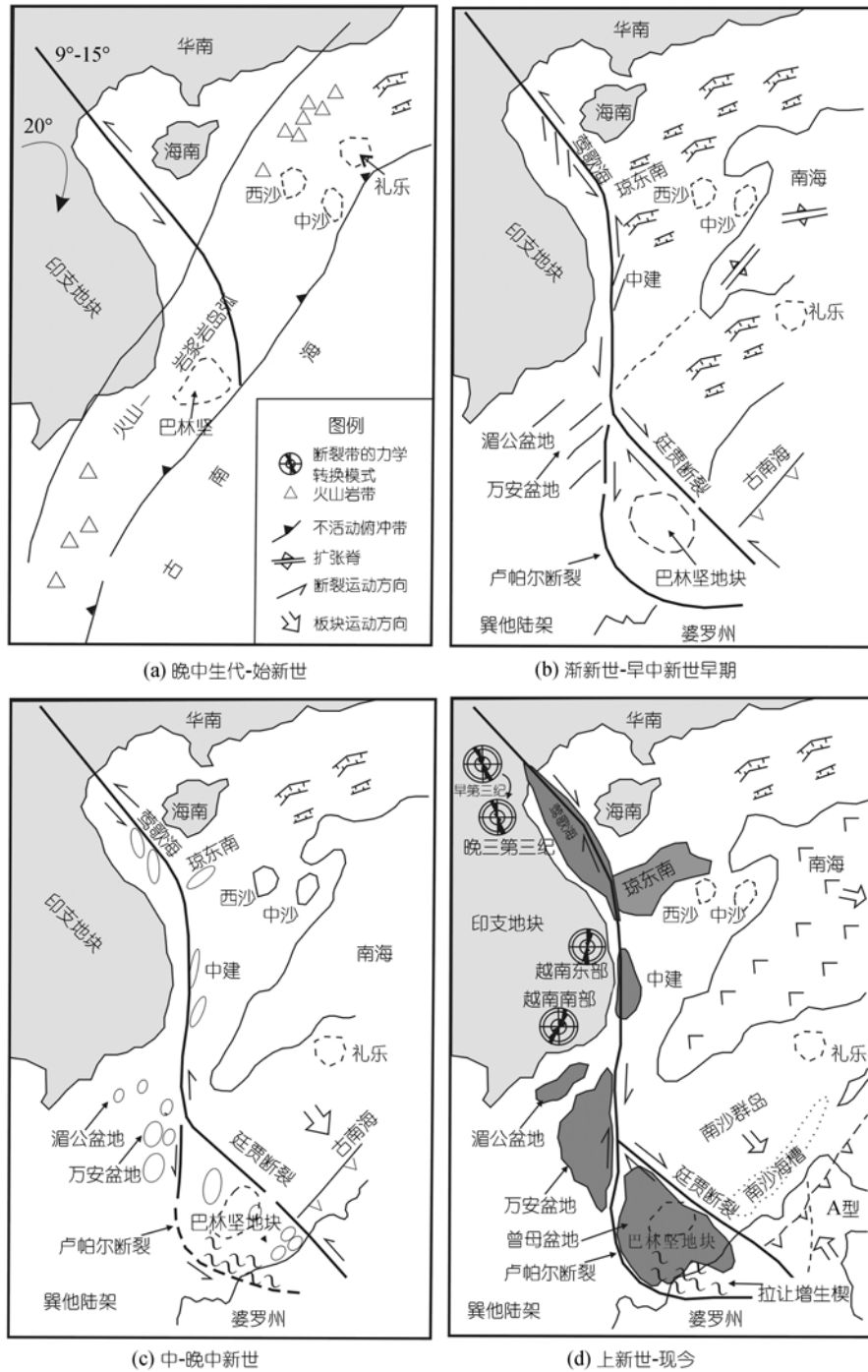


图 6 红河断裂和南海构造演化重建图(据文献 [32,33] 编制)

能是与越东断裂相连的。

许多学者认为，越东断裂向南与卢帕尔断裂相连。然而，我们认为，要回答越东断裂的延伸问题首

先就是要回答巽他陆架东北界在何处，也就是印支地块与南沙地块的分解线在哪里？这一问题以前几乎没有相关资料的报道。Lee等 [49]和Hartono [50]认为印

支地块的东南边缘可延伸到廷贾断裂, 吴进民^[28]也把巴林坚地块归属于印支地块南缘的一部分, 从而表明廷贾断裂应是印支地块的东部边界, 也即支持越东断裂是与廷贾断裂相连的观点. 夏戡原等^[51]把曾母地块和南沙地块统称为南沙地块, 并认为在南海新构造演化史中南沙地块直接与西婆罗州地块发生挤压碰撞, 这也就意味着印支地块的东南边界可能在曾母盆地的南面, 然而, 刘宝明等^[35]经研究支持前者的观点. 本文的研究认为, 红河断裂的延伸不仅与越东断裂相连并直达卢帕尔断裂, 而且它还有可能与廷贾断裂相连. 因此, 红河断裂的延伸经越东断裂后, 在南海西南部海域进一步分为两支, 即卢帕尔断裂和廷贾断裂. 廷贾断裂和越东断裂可能是印支地块的东南边界, 它们同属陆缘断裂; 而卢帕尔断裂属印支地块内部的一条重要的板内超壳断裂.

根据以上资料的分析, 我们重建了红河断裂与南海构造演化的历史(图 6). Taylor和Hayes^[32]认为晚中生代时期, 东南亚边缘属安第斯型火山岛弧边缘(图 6(a)), 此时中沙、西沙、礼乐和北巴拉望块体皆位于古南海的北部, 而曾母盆地所在地巴林坚地区可能位于古南海的西面, 并与印支地块相邻. 随着印支地块向南迁移 $4^{\circ}\sim 9^{\circ}$ 的纬度, 块体同时发生约 20° 的顺时针旋转. 始新世-渐新世期间红河断裂仍表现为左旋特征, 巴林坚地块由于印支地块顺时针的旋转而拖曳到南沙地块的南面, 同时在莺歌海、中建和万安盆地所在的位置发生早期裂谷, 沉积了类似于南海北部陆架的非海相-浅海相沉积. 渐新世初-早中新世末(图 6(b)), 南海发生海底扩张, 形成了 11~5 d(时代为 32~17 Ma)的磁异常条带, 红河断裂进一步表现为左旋走滑特征, 盆地经历第一期裂谷期并发育了众多断块构造^[39], 形成了 30 Ma的不整合面^[18,29]和南海扩张停止时(17 Ma)的不整合面. 廷贾断裂表现为右旋走滑特征, 并导致古南海俯冲消亡于西北婆罗州之下. 随着澳大利亚板块向北漂移并不断与加里曼丹接近, 西北婆罗州与巴林坚地块发生挤压碰撞, 在巴林坚地块的南部形成大量的克洛克-拉让俯冲增生楔. 中-晚中新世(图 6(c)), 盆地发生第二期裂谷和断块构造, 并以中-晚中新世发生的短暂构造回返(形

成了SB3 不整合面, 图 5)为特征而结束, 在构造高部位形成了碳酸盐岩隆起^[35], 这些碳酸盐岩具有广阔的油气勘探前景^[36]. 上新世-第四纪(图 6(d)), 南海进入了区域沉降期, 沉积了海相至深海相的沉积. 上新世早期, 形成了如Rangin^[18]和Lee等^[29]所提到的时代为 5 Ma的不整合面(SB4), 表明红河断裂由左旋变为右旋走滑的特征, 红河断裂目前仍表现为右旋特征^[17].

以红河断裂为中心, 在断裂的两侧发育了许多沉积盆地, 断裂北部发育有莺歌海和琼东南盆地, 南部发育了万安、曾母盆地, 这些盆地正是以该断裂为跷跷板, 在断裂的南北部盆地都沉积了逾万米的新生代沉积, 这些沉积都具有良好的油气勘探前景. 而越东断裂所处的位置(中建盆地的分布区), 正是印支地块与中沙-西沙块体所挟持的部位, 所形成的盆地规模较小, 沉积厚度也较薄, 并且明显地受到越东断裂的控制. 南海西部海域形成的SB1和SB4 不整合面, 可分别与莺歌海盆地^[18,19]和万安盆地^[29,41]划分的 30 和 5 Ma两个重要的不整合面对应. 本文所获认识将有助于加深对青藏高原的隆升和南海扩张的理解, 并对南海的油气勘探具有重要的指导意义.

致谢 本文得到了菲律宾大学 Jun Yumul 和 Carla Dimalanta 两位教授和国土资源部广州海洋地质调查局许多科技工作者讨论意见的帮助, 在此表示衷心的感谢.

参 考 文 献

- 1 Leloup P H, Robin L, Tapponnier P, et al. The Ailao Shan-Red River shear zone (Yunnan, China), Tertiary transform boundary of Indochina. *Tectonophysics*, 1995, 251: 3—84[DOI]
- 2 Xia B. Terranes of Xizang (Tibet), China. In: Wiley T J, Howell D G, Wong F L, eds. *Terrane Analysis of China and the Pacific Rim*: Houston, Texas, Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources Earth Science Series, 1990, 13: 231—239
- 3 Huchon P, Pichon X L, Rangin C. Indochina Peninsula and the collision of India and Eurasia. *Geology*, 1994, 22: 27—30[DOI]
- 4 Huchon P, Nguyen T N H, Chamot-Rooke N. Finite extension across the south Vietnam basins from 3D gravimetric modelling: relation to South China Sea kinematics. *Mar Petrol Geol*, 1998, 15(7): 619—634[DOI]
- 5 Longley I M. The tectonostratigraphic evolution of SE Asia. *Geol*

- Soc Special Publication, 1997, 126: 311—339
- 6 Chung S L, Lee T Y, Lo C H, et al. Intraplate extension prior to continental extrusion along the Ailao shan-Red River shear zone. *Geology*, 1997, 25(4): 311—314[DOI]
 - 7 张玉泉, 谢应雯, 袁牢山-金沙江富碱侵入岩年代学和 Nd, Sr 同位素特征. *中国科学, D 辑*, 1997, 27(4): 289—293
 - 8 李玉文, 周文戈, 谢鸿森, 等. 红河-金沙江走滑断裂带的岩浆活动特征与深部作用过程初探. *地球物理学报*, 1998, 41(增刊): 115—122
 - 9 赵文津, INDEPTH 项目组著. 喜马拉雅山及雅鲁藏布江缝合带深部结构与构造研究. 北京: 地质出版社, 2001
 - 10 夏斌, 陈根文, 梅厚均, 等. 西藏吉定蛇绿岩铂族元素地球化学及其对地幔过程制约. *中国科学, D 辑*, 2001, 31(7): 578—585
 - 11 Wang J H, Yin A, Harrison T, et al. A tectonic model for Cenozoic igneous activities in the eastern Indo-Asian collision zone. *Earth Planet Sci Lett*, 2001, 188(1/2): 123—133[DOI]
 - 12 傅容珊, 徐耀民, 黄建华, 等. 青藏高原挤压隆升程度数值模拟. *地球物理学报*, 2000, 43(3): 346—355
 - 13 胥颐, 刘建华, 刘福田, 等. 哀牢山-红河断裂带及其邻区的地壳上地幔结构. *中国科学, D 辑*, 2003, 33(12): 1201—1208
 - 14 Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain A Y, et al. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine. *Geology*, 1982, 10: 611—616[DOI]
 - 15 Tapponnier P, Lacassin R, Leloup P H, et al. The Ailao-Red River metamorphic belt: Tertiary left-lateral shear zone between Indochina and South China. *Nature*, 1990, 343: 431—437[DOI]
 - 16 England P, Houseman G. Finite strain calculations of continental deformation 2: comparison with the India-Asia collision zone. *J Geophys Res*, 1986, 91: 3664—3676
 - 17 Allen H G. Basic prerequisites for petroleum exploration and development programs, In: *The South China Sea; hydrocarbon potential and possibilities of joint development; Proceedings of the EAPI/ CCOP workshop*. *Energy*, 1981, 6(11): 1257—1261
 - 18 Rangin C, Klein M, Roques D, et al. The Red River fault system in the Tonkin Gulf, Vietnam. *Tectonophysics*, 1995, 243: 209—222[DOI]
 - 19 Sun Z, Zhou D, Zhong Z H, et al. Experimental evidence for the dynamics of the formation of the Yinggehai basin, NW South China Sea. *Tectonophysics*, 2003, 372(1-2): 41—58[DOI]
 - 20 刘昭蜀著. 南海地质与陆缘扩张说. 北京: 科学出版社, 1988
 - 21 何廉声, 陈邦彦. 南海地质地球物理图集. 广州: 广东地图出版社, 1987
 - 22 万玲, 姚伯初, 吴能友. 红河断裂带入海后的延伸及其构造意义. *南海地质研究*, 2000, 12: 22—32
 - 23 Ben-Avraham Z, Emery K O. Structure Framework of Sunda Shelf. *AAPG Bull*, 1973, 57(12): 2323—2366
 - 24 Hidle T W C, Uyeda S, Kroenke L W. Evolution of the Western Pacific and its margin. *CCOP Techn Bull*, 1976, 10: 1—19
 - 25 Ludwig W J, Kumar N, Houtz R E. Profiler-sonobuoy measurements in the South China Sea Basin. *J Geophys Res*, 1979, 84: 3505—3518
 - 26 Robert H. Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: computer-based reconstructions, model and animations. *J Asian Earth Sci*, 2002, 20: 353—431[DOI]
 - 27 姚伯初, 邱燕, 李唐根. 南海西缘-万安断裂的走滑特征及其构造意义. 见: 姚伯初, 邱燕, 吴能友, 等著. 南海西部海域地质构造特征和新生代沉积. 北京: 地质出版社, 1999. 45—55
 - 28 吴进民. 南沙海域万安盆地新生代构造运动和构造演化. *海洋地质*, 1999, 2: 1—11
 - 29 Lee G H, Joel S. Watkins. Seismic sequence stratigraphy and hydrocarbon potential of the Phu Khanh basin, offshore central Vietnam, South China Sea. *AAPG Bull*, 1998, 82(9): 1711—1735
 - 30 Liu H L, Yan P, Zhang B Y, et al. Role of the Wan-Na fault system in the western Nansha Islands (Southern South China Sea). *J Asian Earth Sci*, 2004, 23(2): 221—233[DOI]
 - 31 刘光鼎主编. 中国海区及邻域地质地球物理特征. 北京: 科学出版社, 1992
 - 32 Taylor B, Hayes D E. Origin and history of the South China Basin. In: Hayes D E, eds. *Tectonic and Geology Evolution of Southeast Asian Seas and Islands, Part 2*. *American Geophys Union. Geophys Monograph*, 1983, 27: 23—56
 - 33 Briais A, Patriat P, Tapponnier P. Updated interpretation of magnetic anomalies and seafloor spreading stages in the South China Sea: Implications for the Tertiary tectonics of Southeast Asia. *J Geophys Res*, 1993, 98: 6299—6328
 - 34 Ru K, Pigott J. Episodic rifting and subsidence in the South China Sea. *AAPG Bull*, 1986, 70(9): 1136—1155
 - 35 刘宝明, 夏斌, 金庆焕, 等. 南海盆地演化及碳酸盐岩油气勘探. *海相油气地质*, 2003, 8(1-2): 40—46
 - 36 金庆焕著. 南海地质与油气资源. 北京: 地质出版社, 1989
 - 37 Wu J M. Evaluation and models of Cenozoic sedimentation in the South China Sea. *Tectonophysics*, 1994, 235: 77—98[DOI]
 - 38 钟广见, 吴进民, 王嘹亮. 南海西南走滑断裂特征及其与氧气的关系. *青岛海洋大学学报*, 1995, 25(4): 495—502
 - 39 刘宝明, 周昌范. 南海西南部万安盆地构造圈闭样式分析. *海洋地质与第四纪地质*, 1997, 17(3): 25—30
 - 40 Jiang S R, Zhou X Z, Huang C L, et al. The stratigraphy, structure and evolution of Zengmu basin. *Tectonophysics*, 1994, 235: 51—62[DOI]

- 41 Lee G H, Lee K, Watkins J S. Geologic evolution of the Cuu Long and Nam Con Son Basins, offshore southern Vietnam, South China Sea. *AAPG Bull*, 2001, 85(18): 1055—1082
- 42 Zhou D, Ru K, Chen H Z. Kinematics of Cenozoic extension on the South China Sea continental margin and its implications for the tectonic evolution of the region. *Tectonophysics*, 1995, 251: 161—177[DOI]
- 43 姚伯初, 曾维军, 陈艺中, 等. 南海北部陆缘东部的地壳结构. *地球物理学报*, 1994, 37(1): 27—35
- 44 Yan P, Zhou D, Liu Z S. A crustal structure profile across the northern continental margin of the South China Sea. *Tectonophysics*, 2001, 338: 1—21[DOI]
- 45 Qiu X L, Ye S Y, Wu S M, et al. Crustal structure across the Xisha Trough, northwestern South China Sea. *Tectonophysics*, 2001, 341: 179—193[DOI]
- 46 Shi X B, Zhou D, Qiu X L, et al. Thermal and rheological structures of the Xisha Trough, South China Sea. *Tectonophysics*, 2002, 351: 285—300[DOI]
- 47 龚再升, 李思田. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集. 北京: 科学出版社, 1997
- 48 Rangin C, Huchon P, Pichon X L, et al. Cenozoic deformation of central and south Vietnam. *Tectonophysics*, 1995, 251: 179—196[DOI]
- 49 Lee T Y. Cenozoic plate reconstruction of the South China Sea. *Tectonophysics*, 1994, 235: 149—180[DOI]
- 50 Hartono H M S, Tjokrosapetro. Geological evolution of the Indonesian Archipelago, *Geosea, V proceedings. Geol Soc Milaysia Bull*, 1986, 20: 97—136
- 51 夏戡原, 黄慈流. 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*, 2000, 7(3): 227—237