https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.246



南沙海槽构造-地层格架及其动力学意义

高圆圆¹,任建业^{1,2*},佟殿君¹

中国地质大学海洋地质资源湖北省重点实验室,湖北武汉 430074
南方海洋科学与工程广东省实验室(广州),广东广州 511458

摘 要:为了明确南沙海槽的构造-地层格架和成因机制,以区域二维地震剖面的解释为基础,进行断层活动性和沉降史的定量计算,在南沙海槽盆地中确定出Tg、T60、T50和T0四个一级层序界面,以这4个一级层序界面为界,将南沙海槽盆地划分出3个盆地原型:古新世-渐新世(Tg-T60)断陷盆地、早中新世(T60-T50)拗陷盆地和中中新世(T50-T0)前陆盆地;新生代以来,南沙海槽盆地的沉降中心由NW向SE逐渐迁移.区域资料对比分析表明南沙海槽前陆盆地是由多期前陆盆地叠置而成,以沙捞越造山不整合、区域深部不整合和区域浅部不整合这3个不整合面为界,划分出渐新世-早中新世、中中新世-上新世早期和上新世晚期-现今3期前陆盆地;南沙海槽属于第三期前陆盆地的组成单元,目前仍处于发育演化过程中.
关键词:南海;南沙海槽;构造-地层格架;前陆盆地;沙捞越造山运动;海洋地质学.
中图分类号: P736
文章编号: 1000-2383(2022)07-2536-13
收稿日期:2021-09-30

Tectono-Stratigraphic Framework in Nansha Trough and Its Dynamic Significance

Gao Yuanyuan¹, Ren Jianye^{1,2*}, Tong Dianjun¹

Hubei Key Laboratory of Marine Geological Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China

Abstract: In order to clarify the tectono-stratigraphic framework and genetic mechanism of the Nansha trough basin, in this paper, the quantitative calculation of fault activity and subsidence history is carried out based on the interpretation of regional 2D seismic data in the Nansha trough. Four first-order sequence interfaces (Tg, T60, T50 and T0) have been identified in the Nansha trough basin. On the basis of these four first-order sequence interfaces, the Nansha trough basin can be divided into three basin prototypes: the Paleocene-Oligocene (Tg-T60) rift basin, the Early Miocene (T60-T50) depression basin and the Middle Miocene (T50-T0) foreland basin. From the Cenozoic, the Nansha trough basin has gradually migrated from NW to SE. Comparative analysis from the previous study shows that the Nansha trough foreland basin is formed by the superposition of multi-phased foreland basins. Bounded by the Sarawak orogenic unconformity, the deep regional unconformity and the shallow regional unconformity, the Middle Miocene, the Paleocene-oligocene to the Early Pliocene and the Late Pliocene to present. The Nansha trough belongs to the third phase of the whole

引用格式:高圆圆,任建业,佟殿君,2022.南沙海槽构造-地层格架及其动力学意义.地球科学,47(7):2536-2548.

基金项目:南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项(No. GML2019ZD0208);国家重大专项子课题项目(No. 2016ZX05026-004-003);国家自然科学基金面上项目(No. 42172125).

作者简介:高圆圆(1996-),女,博士研究生,主要从事大陆边缘沉积盆地分析等方面的研究.ORCID:0000-0003-3022-0605. E-mail: 2717065291@qq.com

^{*} 通讯作者:任建业, ORCID: 0000-0003-0780-651X. E-mail: jyren@cug. edu. cn

Citation: Gao Yuanyuan, Ren Jianye, Tong Dianjun, 2022. Tectono-Stratigraphic Framework in Nansha Trough and Its Dynamic Significance. *Earth Science*, 47(7):2536-2548.

foreland basin and is still developing now.

Key words: South China Sea; Nansha trough; tectonic-stratigraphic framework; foreland basin; Sarawak orogeny; marine geology.

0 引言

相比较而言,南海南部大陆边缘在南海周边大 陆边缘中具有最为复杂的地质结构和演化历史,以 西巴拉姆线(West baram,为西巴拉姆走滑断层的 简称)为界(Cullen, 2014),目前其西侧表现为宽阔 的被动大陆边缘,而东侧只有非常狭窄的陆架发 育,挤压构造活动仍处于活跃期.位于西巴拉姆线 东侧的南沙海槽是一个地形上的负向单元,其西边 界为西巴拉姆线,向东呈NE向延伸至巴拉巴克断 裂(图1),长约680 km,宽约80~120 km,现今最深 处海水深度为2900m,海槽槽底平坦,但分布着海 山和圆形洼地(陈雪等,2002);南沙海槽前陆盆 地是自中中新世以来发育的前陆盆地(马辉等, 2011),南沙海槽为其前渊带,文莱-沙巴盆地西 北缘的深水褶皱冲断带为其楔顶带;南沙海槽 盆地则是新生代以来由不同原型盆地叠合而成 的复合型盆地.本文将从横向由陆向海(南沙海 槽前陆盆地)与纵向由下至上(南沙海槽盆地) 这两个方向来具体分析阐明南沙海槽地区(前 陆盆地与复合盆地)的时空发育演化过程.

在地质结构上,南沙海槽前陆盆地是位于南海 南部陆缘正在发育的、典型的挤压型盆地,被认为 代表了古南海俯冲最后消亡的遗迹(Hamilton, 1979).国内外学者对南沙海槽盆地的起源、地壳性 质、岩浆活动、构造-地层演化以及褶皱冲断带等进 行了大量研究.尽管有学者认为南沙海槽之下是古 南海的残余洋壳(Hamilton,1979),或是一条晚渐新 世-早中新世俯冲带(Taylor and Hayes,1980),但是 一些重磁震模拟和地震剖面研究结果基本趋向于 该海槽是前陆盆地(Hinz et al.,1989; Hutchison, 2004; Cullen, 2010). Vijayan et al.(2013)对南沙海 槽 3条 NW 向测线进行重磁模拟,证实了减薄的陆 壳从南沙地块一直向东南延伸进入陆上沙巴和沙 捞越之下,深水南沙海槽前陆盆地的形成主要是由 于地壳变薄的均衡补偿,负载作用将诱导这一弹性





薄弱地壳发生基底变形(Clift *et al.*, 2002),进而 有利于形成深且窄的前陆盆地.在南沙海槽东南 缘造山带一侧发育了复杂褶皱冲断系(Hesse *et al.*, 2009; King *et al.*, 2009; Hall, 2013;韩冰等, 2015;唐武等, 2018),并有大规模三角洲沉积向 盆地内部推进(Hutchison, 2004; Morley *et al.*, 2008; King *et al.*, 2010),形成重要生储盖组合 (马良涛等, 2014; Osli *et al.*, 2021).

南沙海槽东南侧为陆地和浅水,迄今为止对这 个区域的地质构造演化研究较为深入;但是其北侧 处于深水区,资料比较少,对于盆地的充填序列、地 层格架及其构造控制的研究也不够深入.本文基于 前人的研究成果,试图通过一条跨南沙陆块、南沙 海槽及其南部褶皱冲断带对接剖面的解释和分析, 从整体上建立南沙海槽盆地的构造-地层格架,阐 明南沙海槽盆地成因属性,并进一步探讨其发育演 化的动力学意义.南沙海槽盆地下伏南沙地块和 婆罗洲地块之间的碰撞带,构造位置独特,既经历 了古南海向婆罗洲下的俯冲,又见证了新南海的 裂陷打开过程,对于古南海的关闭和新南海的打 开研究具有重要的理论意义,同时对于南海南部 陆缘能源资源勘探也具有重要的实际应用价值.

1 区域地质背景

大地构造上,研究区位于太平洋-菲律宾海板 块、欧亚板块和印澳板块这3个板块的交汇中心, 以及特提斯构造域与太平洋构造域的联结地带. 南沙海槽缺少钻井资料,但是根据地震反射特 征,研究区发育火山反射构造,常表现为海底高 地,形成年代为中新世-上新世或第四纪(Franke *et al.*, 2008).南沙海槽地区地壳厚度较薄,较相 邻的曾母盆地大地热流值偏低(马辉等,2012;张 健等,2017),这可能和持续的挤压环境有关.

南沙海槽盆地的构造演化与古南海的俯冲、消亡 以及新南海的裂陷扩张紧密相连(Hutchison,1996; Hall et al., 2008; Tong et al., 2019).晚白垩世-古新 世,太平洋板块的俯冲后撤作用引发了东南亚陆缘广 泛的新生代伸展构造活动,华南陆缘遭受拉张减薄, 发育了广泛的盆岭式断陷盆地系.同时古南海 SE向 俯冲的开始加剧了华南大陆边缘的伸展作用(Chen et al., 2020).古新世-早中新世,随着古南海的持续俯 冲以及新南海的打开,南沙地块从东南亚陆缘裂离并 向南漂移,早中新世时南沙地块结束了断陷活动,开 始广泛发育碳酸盐岩台地.早中新世末期,随着古 南海由西向东剪刀式关闭,其洋壳完全隐没于婆罗 洲陆壳之下,南沙地块与婆罗洲碰撞,沙巴造山运 动开始,在造山带前缘发育了逆冲推覆构造(Hesse *et al.*, 2009; Banerjee and Ahmed Salim, 2021).中 中新世-现今,随着南海扩张的停止,南沙海槽盆 地快速沉降,沉积了巨厚的地层,沙巴造山带的 隆升剥蚀为盆地沉积提供了充足的物源.研究表 明,中南巴拉望的褶皱冲断作用现今已经结束, 目前该带检测不到地震活动,但是根据GPS 监测 数据,挤压变形作用在巴拉望西南的西北沙巴和 沙捞越一带仍在持续(Sapin *et al.*, 2013).

2 南沙海槽盆地构造--地层格架

图 2 为分别跨南沙地块与南沙海槽南侧褶皱 冲断带的对接剖面,显示了南沙海槽前陆盆地整 体结构.在该剖面上可以清楚识别出前陆盆地前 隆带、前渊带与楔顶带这 3 个典型构造单元.楔顶 带即婆罗洲陆架深水区的褶皱冲断带,冲断带的 前缘部位上覆同造山期的沉积物;前渊带位于造 山楔前锋和前隆带之间,沉积了巨厚的地层,并 且其厚度由 NW 至 SE 即前隆至褶皱冲断带方向 逐渐增加,总体呈楔形;前隆带由南沙陆块挠曲 抬升形成,T60之上的地层在前隆带遭受强烈的 剥蚀,前隆带的沉积物厚度较均一且较小.

2.1 地层界面与特征

南沙海槽盆地位于南沙陆坡的东南边缘,是叠 置在中生代基底上的新生代沉积盆地.对比国内层 序地层划分(孙珍等,2011;张厚和等,2017)和国外 以海退和海侵旋回地层划分(Koša,2015)确立南沙 海槽盆地新生代地层划分方案,并在地震剖面上识 别出T0、T20、T30、T40、T50、T60、T70、T80和 Tg这9个新生代地震反射界面(图2).

Tg界面为新生代裂陷盆地充填序列的底界面, 在地震剖面上的反射特征表现为中-低频、中-强振 幅.其上下地震反射差异显著,Tg之下基底的反射 呈杂乱无序状,界面之上是一套中振幅、中-低连续 地震反射层组,剖面上Tg界面表现为对下伏中生 界的强烈削截和界面之上的显著上超.T80表现出 频率较高、中-强振幅的反射特征,是沙捞越造山运 动的响应界面,其与Tg界面一起限定了0~70 km 处多套楔状沉积地层,剖面上具发散结构反射波 组,厚度变化较大.T70界面在剖面上呈中-强振



地震剖面右侧南沙海槽楔顶带据Cullen (2010)

幅、中频的反射特征,局部区域存在下削上超现象, 为一个区域性的不整合界面,对应于南海西北次海 盆的打开,其与T80界面之间为中-强振幅、中频反 射波组,呈亚平行-发散结构,厚度局部变化较大. T60界面表现为强振幅、高频率、连续强反射,在构 造高部位表现出对下伏地层的强烈削截,是南海西 南次海盆开始扩张的响应界面,剖面 20~70 km之 间、T60与T70界面之间限定了一套楔状地层,地 层向NW方向变薄至构造高部位缺失.由于正断 层的切割作用,Tg、T80与T70的连续性均较差, 但早期正断层绝大部分活动至T60界面,所以 T60连续性相对较好,在盆地内广泛发育.Tg-T60界面间地层的发育主要受控于早期伸展作 用下形成的正断层,形成了一个个箕状半地 堑,在剖面 0~150 km 处均可见早期断陷盆地.

T50 在地震剖面中不整合特征明显,表现出 连续性很好的强反射,是南海南部表现最为强烈 的不整合面,对应于南海扩张的停止,界面之上上 超现象十分明显.T60-T50 时期内无明显构造活 动,盆地处于拗陷期,发育了一套低能的薄层碳酸 盐岩,表现为广泛的披覆沉积,在西北巴拉望陆架 盆地内的钻井分层和过井地震剖面上均可识别出 这套碳酸盐岩沉积,该套沉积同下伏早期小断陷 一起延伸进入深水褶皱冲断带之下(图2).

T40界面为中中新世顶界面,在剖面上表现为 中-弱振幅、中-高频反射特征,仅发育于90~ 150 km 处的前渊带和楔顶带内,由于楔顶带内逆冲 断层的切割作用,该界面连续性较差,T40与T50界 面之间地层为一套楔状沉积,向SE方向逐渐增厚. T30界面为晚中新世顶界面,该界面反射波连续性 较好,T30-T40之间地层在前隆带内表现为薄层披 覆沉积,在前渊带内地层厚度明显增大,但50~ 100 km 处横向厚度基本保持不变, 楔顶带内地层被 逆冲断层切割较为剧烈.T20界面为上新世顶界 面,连续性好、中振幅、中-高频,T20与T30限定的 地层整体相对较薄,且厚度变化不大,表现为广泛 的披覆沉积,100~150 km 处该套地层遭受了强烈 的褶皱作用.前隆带内20km处海底(T0)深度最 浅,约1500m,向SE方向深度逐渐增加,至前渊带 内达到最大,且前渊带内海底(T0)深度保持不变,

继续向 SE 方向逐渐变浅.T20 界面与海底之间 的地层在前隆带厚度较薄且基本无变化,前渊 带内表现为 NW 薄 SE 厚的楔状沉积,在楔顶带 内地层厚度基本保持不变,发生褶皱变形. T50-T0 时期内,南沙海槽整体上处于挤压应力 场内,盆地进入周缘前陆盆地演化阶段.

2.2 盆地构造特征

南沙海槽盆地的形成演化经历了华南陆 缘裂陷、古南海俯冲、新南海扩张过程中的地 块裂离与漂移以及古南海俯冲碰撞挤压抬升 等复杂历史(Peng *et al.*,2019).盆地内部既发 育拉伸背景下的伸展构造,也有挤压环境下的 褶皱-逆冲构造(Zhang *et al.*,2020).

2.2.1 伸展构造 晚白垩世末,由于古太平洋板 块的俯冲后撤作用,华南陆缘处于NW向的拉张 构造应力场中,地壳拉伸减薄,发生断裂,形成一 系列盆岭式断陷盆地.早期南沙海槽盆地地层受 高角度正断层控制,其中F₁与F₅断层倾角分别是 75°和80°,为陡倾正断层;F₆、F₂、F₃和F₄的倾角分 别是42°、47°、45°和50°,为中等倾斜正断层.T60 界面之下发育多个半地堑,形成各种类型的伸 展构造组合样式,多米诺式半地堑以及地堑与 地垒(图2),20~45 km处可见多米诺式半地堑, 断层上下盘断块同向同幅掀斜运动,相邻断陷 的基底产状近一致,盆地形态呈锯齿状;100~ 130 km处可见地堑与地垒构造样式,断层规模 相对较小,基底产状近水平,断层未发生旋转.

2.2.2 挤压构造 早中新世南沙地块与婆罗洲碰撞,导致婆罗洲西北部陆架沉积层发生挤压变形,发育了一系列形状、大小相近和倾向一致的低角度逆冲断层,它们组合在一起形成高度叠瓦状的楔状体(图2),伴随有褶皱,发育多个构造脊,褶皱位于逆冲断层上盘.这个楔状体最早被解释为古近纪冲断片(Hinz et al.,1989),但新的地震反射、折射数据以及重力模型证实该楔状体由中中新世沉积组成,位于减薄大陆地壳之上(Franke et al.,2008).

剖面上,深水逆冲推覆构造具有上陡下缓的犁形特征,向深部汇入早中新世碳酸盐岩滑脱面,105 km 处出现褶皱冲断带锋缘,此处中-早中新世地层开始 显著增厚,130~150 km处发育有调节性生长断层,为 三角洲重力滑动作用所致(图 2).T30与T20界面之 间的地层遭受强烈挤压,形成一系列次级褶皱上覆于 叠瓦状冲断片之上,褶皱轴面近于直立,产状不稳定, 可能与沙巴内陆高地的快速隆升(SRU 6~8 Ma) 有关(Cullen, 2010).此外,通过对深水褶皱冲断 带地震剖面的解释识别出断弯、断展和断滑褶皱 等断层相关褶皱以及叠瓦扇和冲起构造这两类逆 冲构造组合样式(唐武等, 2018; Yu *et al.*, 2020).

平面上,南沙海槽楔顶带褶皱冲断带呈 NE-SW向排列,全长约 300 km,呈现出西南段宽、东北 段窄的特点.以拉布安岛与皇路礁连线为界(图1), 南段以发育宽翼脚缓背斜为主,逆冲断层倾角较 小,靠近深水区断层倾角为15°,向陆方向倾角增大 至40°;北段主要发育窄翼脚紧闭褶皱,逆冲断层较 陡,靠近深水区断层倾角为30°,向陆方向可达60° (唐武等,2018).南北两段构造带除几何学差异外, 成因机制也存在差别,表现为南段深水褶皱冲断带 缩短量大致与陆架正断层伸展量相当,而北段褶皱 带缩短量远大于陆架正断层伸展量相当,而北段褶皱 带缩短量远大于陆架正断层伸展量相当,不能及构造伸 缩量的差异可能是北段叠加了 sulu海17 Ma时海底 NW向扩张造成的挤压作用所致(韩冰等,2015).

古新世-晚渐新世时期,南沙海槽盆地西北 端即靠近南沙地块区域地层沉积厚度大,盆地 沉积主要受正断层控制,形成了一系列半地 堑,此时西北端构造作用十分活跃.中中新世 以来,盆地沉积中心位于前陆盆地系统前渊带 内,由于岩石圈受到强烈水平挤压作用以及褶 皱冲断带前缘的垂向负载作用,盆地东南一侧 岩石圈挠曲下沉为冲断带地表剥蚀物质的沉 积提供可容纳空间;可见,该时期内南沙海槽 盆地南部的褶皱冲断带控制盆地的沉积作用. 新生代以来,控制盆地沉积发育演化的构造由 NW向 SE 从南沙地块迁移至沙巴近岸.

2.3 构造-地层格架与盆地原型

南沙海槽盆地构造-地层格架较为复杂,在不同 的区段具有不同的样式.如前所述,识别了新生界底 界面Tg、下中新统底界面T60、中中新统底界面T50 和海底T0这4个一级层序界面,以及中始新统顶界 面T80、下渐新统南海扩张响应界面T70、上中新统 底界面T40、上新统底界面T30和第四系底界面 T20五个二级层序界面,这些界面是构建南沙海槽 盆地新生代构造-地层格架的基本要素,与构造相 结合控制了不同的盆地原型,南沙海槽盆地则是由 断陷盆地(Tg-T60)、拗陷盆地(T60-T50)以及前 陆盆地(T50-T0)这3个原型盆地叠合而成.





据Hesse et al.(2009)和唐武等(2018);a. 地震测线位置与构造缩短量和伸展量;b. 由婆罗洲向南海方向上构造缩短量和伸展量的变化

图 2 中 AB'为穿过了南沙海槽前陆盆地前隆 带、前渊带以及楔顶带(褶皱冲断带)的NW-SE向 测线(位置见图1),该剖面由下至上依次发育了古 新统-始新统(Tg-T80)、下渐新统(T80-T70)、上渐 新统(T70-T60)、下中新统(T60-T50)、中中新统 (T50-T40)、上中新统(T40-T30)、上新统(T30-T20)以及第四系(T20-T0)这8套地层.古新统-渐 新统(Tg-T60)时期,剖面 0~150 km 处早期断层控 制了一系列半地堑的发育,即在该时期内,现今盆 地的前隆带、前渊带与楔顶带均遭受了拉伸作用, 盆地整体区域构造活动强烈,正断层控制盆地的沉 降和地层的沉积,地层沉积厚度大,形成了一系列 厚达3000~5000m的断陷沉积,主要沉降中心位 于盆地的西北部,盆地处于断陷期.早中新统(T60-T50)时期南沙地块已从华南陆缘裂离,向南漂移, 无物源供给,发育了一层碳酸盐岩盆地,前隆带、前 渊带与楔顶广泛接受沉积,但沉积厚度小、沉积地 层薄,整体披覆于断陷期半地堑之上,早期断层多 终止于T60界面,该时期构造活动弱,盆地处于裂 后热沉降期(拗陷期). 中中新统-现今(T50-T0),盆 地前隆带剥蚀作用严重,沉积厚度薄,水平方向厚 度基本保持不变;前渊带内,沉积地层由NW至SE 逐渐加厚,整体呈现楔形,沉积中心位于前渊带南 侧靠近楔顶带方向,该时期前渊带内的沉积由其南 侧深水褶皱冲断带控制;楔顶带内地层向SE方向 增厚,但主要加厚时期为中-晚中新世(T50-T30). 该时期内盆地向SE方向地层厚度逐渐增 加,沉积中心向SE迁移,处于前陆盆地演化阶段.



F5 in survey Line *AB*'

2.4 南沙海槽断层活动性与沉降史分析

2.4.1 断层活动性分析通过计算 *AB*' 剖面上 0~70 km 处前隆带和前渊带内F₁、F₂、F₃、F₄、F₅ 这5条正断层 Tg-T60 期间断层古落差,定量分 析了断层的活动速率.具体的步骤是,在剖面 上读取这5条断层分别与 Tg、T80、T70 以及





Fig.5 Cenozoic tectonic subsidence and total subsidence rate curve (a), tectonic evolution section (b) in section AA



T60的交点时间深度数值,通过时深转换公式 将双程反射时间换算成深度,将断层不同时期 内下降盘厚度减去上升盘厚度即可得到该断层 的古落差,再将断层在不同时期内的古落差除 以该套地层沉积的时间得到断层活动速率.

南沙地块的时深转换公式如下:

$$Z = 155t^2 + 859t - 14(t \le 2), \tag{1}$$

$$Z = 57.7t^2 + 1\,433.5t - 293.8(2 < t \le 5), \qquad (2)$$

$$Z = 8.5t^2 + 1\ 845.5t - 1\ 604(t > 5),\tag{3}$$

式中:Z为深度(m);t为双程反射时间(s).

计算结果如图4所示:在盆地裂陷早期即Tg-T80时期,F₁、F₂与F₄断层古落差基本在500m左 右,且断层活动速率都较低,其中F₁和F₄断层活动 速率相对较快,为30m/Ma左右,其余断层活动性 较小;在T80-T70时期,断层的古落差与活动速率 都明显增大,其中F,断层的古落差可达2032m,断 层的活动速率达到 203 m/Ma,对于整个盆地而言, 该时期内断层活动性增强;在T70-T60,断层F1、 F₂、F₃和F₄的古落差与活动速率较于前一时期减 小,断层活动性减弱,但断层F₅的活动性相较T80-T70时期加强.可以看出在Tg-T70时期断层F1的 活动性最强,断层对该时期沉积地层的控制作用显 著,此时盆地的沉积沉降在盆地NW端前隆 带之下的断陷内; T70-T60时期, 断层 F_5 的活 动性最强,可知该时期内盆地的沉降中心由 盆地西北端迁移至前渊带之下的断陷内.

2.4.2 沉降史分析 在前文盆地新生代地层构造特征基础上,应用沉降史模拟方法(EBM), 对剖面 AB'前隆带和前渊带进行回剥反演,进 而更好地阐述盆地沉降过程中构造作用在时 空上的演化,计算结果如图 5 所示.

(1)沉降速率时间变化特征.从图 5a 可以看出: Tg-T80 时期(65.5~42.5 Ma)盆地的沉降速率相对 较低,且横向上变化不大,沉降速率为 80~100 m/ Ma;T80-T70 时期(42.5~32.5 Ma)盆地的沉降速率 显著加快,盆地 10 km 处沉降速率最大,最大可达 400 m/Ma;T70-T60 时期(32.5~23.5 Ma)盆地的 沉降速率开始减小,此时沉降最快的地方位于 70 km 处;T60-T50 时期(23.5~15.5 Ma)盆地进入 了拗陷阶段,此时没有物源供给,开始化学沉积,发 育一套碳酸盐岩,沉降速率显著减小,最大沉积速 率约为 80 m/Ma;T50-T40 时期(15.5~10.5 Ma)盆 地只有前渊带内接受沉积,沉积速率约为 260 m/ Ma; T40-T20时期(10.5~2.6 Ma)盆地的沉降主要 在 SE 端,该时期的沉降速率为 200~260 m/Ma; T20-T0(10.5~0 Ma)盆地沉降速率曲线和前一时 期相似,SE方向前渊带内沉降速率明显加快.

(2)沉降速率空间变化特征.在65.5~32.5 Ma 之间,南沙海槽盆地的主要沉降中心在盆地NW端 前隆带下断陷带内;32.5~23.5 Ma时期,盆地的沉降 中心向海槽前渊带迁移;23.5~15.5 Ma时期,在热沉 降阶段,无明显沉降中心,表现为广泛缓慢沉降特 征;15.5 Ma以后沉降主要发生在深水区,55 km处沉 降速率显著加快,沉降中心位于南沙海槽盆地前渊 带.赵中贤等(2011)对过永署盆地、安渡北盆地和南 沙海槽测线进行了构造沉降模拟,得到的拟合速率 曲线也明确了南沙海槽 SE 端有一明显构造沉降中 心,位于逆冲推覆体前缘,且T50-T40(15.5~ 10.5 Ma)期间 SE 端的挤压和负载作用最强烈.

图 5b中,在盆地的早期阶段,沉降主要集中在 半地堑内,23.5 Ma以前,盆地的沉降作用主要受伸 展正断层的控制,盆地的沉降显示出明显分隔性, 在断层控制的半地堑洼陷内,盆地的沉降较快,而 洼陷之间的隆起或凸起沉降特征不明显.23.5 Ma 开始,盆地结束了早期的断陷盆地演化阶段,以岩 石圈的冷却收缩所导致的缓慢热沉降为主,盆地 开始整体缓慢沉降,进入拗陷期.15.5 Ma以来, 由于前陆造山作用,盆地南部的前渊带沉降规模 最大,北部的前隆带沉降速率较慢.总体上,盆地 的沉降中心自Tg以来至今由NW端前隆带断陷 内逐渐向SE方向迁移至前陆盆地楔顶带.

3 讨论

3.1 南沙海槽前陆盆地发育演化过程

总体上来看,处于西北沙巴陆缘的南沙海 槽前陆盆地在成因上属于南沙地块和婆罗洲地 块碰撞背景下于俯冲地块之上发育的周缘前陆 盆地,向 SE 一侧与文莱-沙巴盆地相连接.

沙捞越造山不整合(SOU)、区域深部不整合 (DRU)与区域浅部不整合(SRU)是南沙海槽与文 莱-沙巴盆地内3个重要的不整合界面(Balaguru, 2006; Cullen, 2010; Madon *et al.*, 2013; Tong *et al.*, 2019). 沙捞越造山运动由Hutchison(1996)命 名,为曾母地块沿着卢帕尔线和婆罗洲碰撞所致. 在海域,表现为穿过一个不整合界面沉积由深海 相迅速转变为浅海相(Madon *et al.*, 2013); 在陆



Fig.6 Stratigraphic column and tectonic events in the Brunei-Sabah Basin (a); tectono-stratigraphic division of Nansha trough-Brunei-Sabah foreland basin (b)

图 a 据 Cullen (2010)修改;图 b 据 Hazebroek and Tan (1993)修改

地,沙捞越造山运动不整合界面将强烈褶皱变形 的 Rajang-Embalun 群和其上覆的渐新统浅海沉积 分隔开来. 文莱-沙巴盆地内, Temburong-crocker 组为深水沉积,对应曾母地块Nyalau组浅海碎屑 物,可能来源于 Rajang-Embaluh 群, Meligan 组为 早中新世沉积,由分选好的砂岩组成,是Temburong 组的继承沉积(Cullen, 2010)(图 6a). Temburong-Meligan系统的上分界线为DRU,即区域 深部不整合,对应于南沙地块与婆罗洲碰撞(沙巴 造山运动)的结束.SRU(区域浅部不整合)是沙 巴内一个明显的不整合面,时间为8.6 Ma左右, 可能与Mt Tinabalu的侵入有关(Balaguru, 2006). Belait 组包括两个主要的沉积体系,即 Champion 三角洲和 Baram 三角洲, 中中新世至今 Champion 三角洲年龄比较老, Baram 三角洲加积于老的 Champion外部陆架和斜坡之上(Cullen, 2010).

南沙海槽前陆盆地包括文莱-沙巴盆地西北缘 深水褶皱冲断带、南沙海槽和南沙地块,由SE向 NW方向经多期逆冲推覆作用逐渐演化而来(图 6b).前人将该前陆盆地的演化主要划分为两阶 段,即渐新世-早中新世为第一期前陆盆地阶段,中 中新世以来为第二期前陆盆地(张翀等,2007;Cullen,2010;王龙樟等,2019).该地区在沙捞越造山 运动之后就处于碰撞造山前陆盆地发育阶段,且碰 撞造山可能是由W向E发展的(Madon *et al.*, 2013).本文以SOU(沙捞越造山不整合)、DRU (区域深部不整合)以及SRU(区域浅部不整合)这 3个不整合界面重新厘定南沙海槽前陆盆地三期 演化阶段:SOU与DRU界面限定了第一期前陆盆 地,发育时间为渐新世-早中新世;DRU与SRU不 整合面之间发育了中中新世-上新世早期第二期 前陆盆地;SRU不整合面与海底之间的沉积为 上新世晚期-现今第三期前陆盆地内的充填,盆 地的基底由伸展的南沙陆壳构成,负载作用使 得这一弹性的薄弱陆壳发生均衡沉降.南沙海 槽三期前陆盆地发育演化模式如图7所示.

沙捞越造山运动奠定了早期(第一期)前陆 盆地的基本格架,始新世角度不整合和巴拉望-沙巴蛇绿岩的抬升等构造-地层证据表明沙捞越 造山运动穿过了沙捞越、加里曼丹并一直延伸进 沙巴和南巴拉望(Cullen, 2010).在沙捞越造山 运动过程中,俯冲于西北婆罗洲之下的南海大陆 地壳通过下地壳的俯冲、褶皱或韧性流动而增 厚,加厚的大陆地壳使内陆高地均衡抬升.西北 婆罗洲内与 Rajang 群同时期的 Crocker 组深水沉 积发生褶皱变形,挤压成山的克拉克组遭受风 化剥蚀,向盆地内输送沉积物,盆地西侧文莱区 域内沉积了 Temburong-西 Crocker 组,而沙巴地 区仍存有古南海洋壳,但洋壳宽度很窄,从 Crocker 组剥蚀而来的物质沉积在残余洋盆上.

中中新世(15.5 Ma)时南沙地块与婆罗洲 完全碰撞,古南海进一步向 NE 方向退缩,沙巴







图 7 南沙海槽前陆盆地演化模式 Fig.7 The evolution model of Nansha trough foreland basin

造山运动的挤压作用使得早期前陆盆地前渊带 内的 Temburong-西 Crocker 组抬升变形卷入造 山带内,仰冲到南沙地块陆壳之上;第二期前 陆盆地开始发育,变形的 Temburong-西 Crocker 组与早期 Crocker 组一起为第二期前陆盆地提 供沉积物,盆地内主要充填了中中新世至上新 世的 Padas-Champion 三角洲和 setap 页岩.

第三期前陆盆地发育于8.5 Ma(SRU)巴拉姆

三角洲开始前积后,SRU的年龄与Mt Tinabalu的 深成岩体最后阶段的冷却和蚀顶发生的时间一致 (Balaguru, 2006),之后 Crocker 山脉的区域抬升导 致了 4~8 km 的剥蚀厚度,向现今的南沙海槽盆地 和文莱-沙巴盆地输送了大量沉积物,发育了 Baram 三角洲.相当长的时间里,Baram 三角洲前缘被错 误地解释为增生楔,从而将南沙海槽与海沟联系起 来(Bol and Van Hoorn, 1980);随后,有学者发现三

角洲前缘并不是俯冲的堆积,而是来自沙巴大陆,代表三角洲沉积的外部界限(Hutchison, 2004).现今的南沙海槽属于前陆盆地前渊沉降带,楔顶带由Baram三角洲前缘褶皱冲断带构成.据西北婆罗洲北部Kinabalu、Labuan和Miri3个观测点近10年的观测数据,西北婆罗洲以3mm/a的速度独立于婆罗洲其他区域向NW运动(Sapin et al., 2013),表明西北婆罗洲近岸的会聚作用一直持续至今,即南沙海槽-文莱沙巴前陆盆地的褶皱冲断带一直向盆地前渊带推进,该前陆盆地仍在发育,且中中新世以来由于沉积物负载作用的加剧,前陆盆地的前隆带一直向婆罗洲方向迁移(王龙樟等, 2019).

4 结论

(1)在南沙海槽盆地中识别出Tg、T60、 T50、T0四个一级层序界面,以及T80、T70、 T40、T30和T20五个二级层序界面.这些界 面与盆地的构造相结合构建了南沙海槽盆地 较为复杂的构造地层格架.

(2)以一级层序界面为界,可将南沙海槽盆 地划分为古新统-上渐新统组成的断陷盆地、 下中新统组成的拗陷盆地以及中中新统以来地 层组成的前陆盆地,这3个原型盆地的叠合构 成了南沙海槽复合型沉积盆地.

(3)南沙海槽前陆盆地包括现今的南沙地 块、南沙海槽和文莱-沙巴盆地西北缘褶皱冲断 带,经由多期前陆盆地演化而来.SOU、DRU、 SRU这3个界面分隔了三期前陆盆地,SOU和 DRU之间限定了第一期前陆盆地,于沙捞越造 山运动之后发育;DRU与SRU限定了第二期前 陆盆地,南沙地块与沙巴完全碰撞后开始发育; SRU与海底限定了第三期也就是现今所见的南 沙海槽前陆盆地,巴拉姆三角洲重力滑动作 用和地壳缩短作用共同控制盆地的发育.

References

- Balaguru, A., 2006. Orogeny in Action: Tectonic Evolution and Stratigraphy of Sabah, Seismic and Outcrop Evidence. In: PGCE 2006. Kuala Lumpur Convention Center, Kuala Lumpur.
- Banerjee, A., Ahmed Salim, A. M., 2021. Stratigraphic Evolution of Deep - Water Dangerous Grounds in the

South China Sea, NW Sabah Platform Region, Malaysia. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 201: 108434. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108434

- Bol, A. J., Van Hoorn, B., 1980. Structural Styles in Western Sabah Offshore. Bulletin of the Geological Society of Malaysia, 12: 1-16. https://doi. org/10.7186/ bgsm12198001
- Chen, H., Xie, X. N., Mao, K. N., et al., 2020. Depositional Characteristics and Formation Mechanisms of Deep-Water Canyon Systems along the Northern South China Sea Margin. *Journal of Earth Science*, 31(4): 808-819. https://doi.org/10.1007/s12583-020-1284-z
- Chen, X., Lin, J.F., Xu, S.G., 2002. Dynamic Analysis of Nappe Structure Region in the Southern Margin of the Nansha Trough. Acta Oceanologica Sinica, 24(1): 73– 85 (in Chinese with English abstract).
- Clift, P., Lin, J., Barckhausen, U., 2002. Evidence of Low Flexural Rigidity and Low Viscosity Lower Continental Crust during Continental Break-up in the South China Sea. Marine and Petroleum Geology, 19(8): 951-970. https://doi.org/10.1016/s0264-8172(02)00108-3
- Cullen, A., 2010. Transverse Segmentation of the Baram -Balabac Basin, NW Borneo: Refining the Model of Borneo's Tectonic Evolution. *Petroleum Geoscience*, 16(1): 3-29. https://doi.org/10.1144/1354-079309-828
- Cullen, A., 2014. Nature and Significance of the West Baram and Tinjar Lines, NW Borneo. Marine and Petroleum Geology, 51: 197-209. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2013.11.010
- Franke, D., Barckhausen, U., Heyde, I., et al., 2008. Seismic Images of a Collision Zone Offshore NW Sabah/ Borneo. Marine and Petroleum Geology, 25(7): 606– 624. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2007.11.004
- Hall, R., 2013. Contraction and Extension in Northern Borneo Driven by Subduction Rollback. *Journal of Asian Earth Sciences*, 76: 399-411. https://doi.org/10.1016/ j.jseaes.2013.04.010
- Hall, R., van Hattum, M.W.A., Spakman, W., 2008. Impact of India-Asia Collision on SE Asia: The Record in Borneo. *Tectonophysics*, 451(1-4): 366-389. https:// doi.org/10.1016/j.tecto.2007.11.058
- Hamilton, W., 1979. Tectonics of the Indonesian Region. Uinted States Government Printing Office, Washington, D.C..
- Han, B., Zhu, B.D., Wan, L., et al., 2015. Deep-Water Fold and Thrust Tectonics in Southeastern Nansha Trough. *Geological Review*, 61(5): 1061-1067 (in Chinese with English abstract).

- Hazebroek, H. P., Tan, D. N. K., 1993. Tertiary Tectonic Evolution of the NW Sabah Continental Margin. Bulletin of the Geological Society of Malaysia, 33: 195– 210. https://doi.org/10.7186/bgsm33199315
- Hesse, S., Back, S., Franke, D., 2009. The Deep-Water Fold-and-Thrust Belt Offshore NW Borneo: Gravity-Driven versus Basement-Driven Shortening. *Geological Society of America Bulletin*, 121(5-6): 939-953. https://doi.org/10.1130/b26411.1
- Hinz, K., Fritsch, J., Kempter, E. H. K., et al., 1989. Thrust Tectonics along the North-Western Continental Margin of Sabah/Borneo. *Geologische Rundschau*, 78 (3): 705-730. https://doi.org/10.1007/bf01829317
- Hutchison, C. S., 1996. The 'Rajang Accretionary Prism' and 'Lupar Line' Problem of Borneo. Geological Society, London, Special Publications, 106(1): 247-261. https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1996.106.01.16
- Hutchison, C. S., 2004. Marginal Basin Evolution: The Southern South China Sea. Marine and Petroleum Geology, 21(9): 1129-1148. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2004.07.002
- King, R. C., Hillis, R. R., Tingay, M. R. P., et al., 2009. Present - Day Stress and Neotectonic Provinces of the Baram Delta and Deep-Water Fold-Thrust Belt. *Journal* of the Geological Society, 166(2): 197-200. https:// doi.org/10.1144/0016-76492008-062r
- King, R. C., Backé, G., Morley, C. K., et al., 2010. Balancing Deformation in NW Borneo: Quantifying Plate – Scale vs. Gravitational Tectonics in a Delta and Deepwater Fold-Thrust Belt System. *Marine and Petroleum Geology*, 27(1): 238-246. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2009.07.008
- Koša, E., 2015. Sea-Level Changes, Shoreline Journeys, and the Seismic Stratigraphy of Central Luconia, Miocene - Present, Offshore Sarawak, NW Borneo. Marine and Petroleum Geology, 59: 35-55. https:// doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2014.07.005
- Ma, H., Xu, H.H., Wu, S.M., et al., 2011. Numerical Simulation of Foreland Basin Evolution in Nansha Trough since Middle Miocene. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 31(6): 157-166 (in Chinese with English abstract).
- Ma, H., Xu, H.H., Zhao, J.F., et al., 2012. Thermal Structure of Nansha Trough Foreland Basin. *Journal of Tropi*cal Oceanography, 31(3): 155-161 (in Chinese with English abstract).
- Ma, L.T., Wang, J.F., Niu, J.Y., et al., 2014. Tectonic Characteristics and Hydrocarbon Accumulation Control-

ling Factors in the Baram Delta Province. *Natural Gas Geoscience*, 25(6): 867–873, 927 (in Chinese with English abstract).

- Madon, M., Lü, K. C., Wong, R., 2013. The Structure and Stratigraphy of Deepwater Sarawak, Malaysia: Implications for Tectonic Evolution. *Journal of Asian Earth Sciences*, 76: 312–333. https://doi. org/10.1016/j. jseaes.2013.04.040
- Morley, C. K., Tingay, M., Hillis, R., et al., 2008. Relationship between Structural Style, Overpressures, and Modern Stress, Baram Delta Province, Northwest Borneo. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 113 (B9): B09410. https://doi.org/10.1029/2007jb005324
- Osli, L. N., Shalaby, M. R., Islam, M. A., 2021. Source Rock Characteristics and Hydrocarbon Generation Potential in Brunei - Muara District, Brunei Darussalam: A Comparative Case Study from Selected Miocene -Quaternary Formations. Journal of Petroleum Exploration and Production, 11(4): 1679-1703. https://doi. org/10.1007/s13202-021-01142-0
- Peng, X., Shen, C. B., Mei, L. F., et al., 2019. Rift-Drift Transition in the Dangerous Grounds, South China Sea. *Marine Geophysical Research*, 40(2): 163-183. https:// doi.org/10.1007/s11001-018-9353-8
- Sapin, F., Hermawan, I., Pubellier, M., et al., 2013. The Recent Convergence on the NW Borneo Wedge—A Crustal - Scale Gravity Gliding Evidenced from GPS. *Geophysical Journal International*, 193(2): 549-556. https://doi.org/10.1093/gji/ggt054
- Sun, Z., Zhao, Z.X., Zhou, D., et al., 2011. The Stratigraphy and the Sequence Achitecture of the Basins in Nansha Region. *Earth Science*, 36(5): 798-806 (in Chinese with English abstract).
- Tang, W., Zhao, Z.G., Zhang, G.C., et al., 2018. Structural Deformation Characteristics and Genetic Mechanism of Deepwater Fold and Thrust Belts in the Brunei-Sabah Basin. *Chinese Journal of Geophysics*, 61(10): 4281– 4295 (in Chinese with English abstract).
- Taylor, B., Hayes, D.E., 1980. The Tectonic Evolution of the South China Basin. In: Hayes, D.E., ed., The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands. American Geophysical Union, Washington, D.C.. https://doi.org/10.1029/gm023p0089
- Tong, D. J., Ren, J. Y., Liao, Y. T., et al., 2019. Cenozoic Tectonic Events and Their Implications for Constraining the Structure and Stratigraphic Styles from Rifting to Collision at the Southeastern Margin of the South China Sea. *Marine Geophysical Research*, 40(2): 145–161.

https://doi.org/10.1007/s11001-018-09376-0

- Vijayan, V. R., Foss, C., Stagg, H., 2013. Crustal Character and Thickness over the Dangerous Grounds and beneath the Northwest Borneo Trough. *Journal of Asian Earth Sciences*, 76: 389-398. https://doi.org/10.1016/ j.jseaes.2013.06.004
- Wang, L.Z., Yao, Y.J., Zhang, L., et al., 2019. Forebulge Migration since the Mid-Miocene in the Southern South China Sea: Evidences from the Beikang Basin. *Oil & Gas Geology*, 40(1): 123-132 (in Chinese with English abstract).
- Yu, X. Q., Chen, Z. W., Hu, J., et al., 2020. Mesozoic Thrust-Nappe and Extensional Structure Frameworks in the East Segment of Southeast Yangtze Block, Southeast China. *Journal of Earth Science*, 31(4): 772-794. https://doi.org/10.1007/s12583-020-1292-z
- Zhang, C., Wu, S.M., Qiu, X.L., 2007. Formation of Foreland Basins in the South of the South China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 27(1): 61-70 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H.H., He, S.Z., Liu, P., et al., 2017. Evaluation of Source Rocks and Oil-Source Correlation of Zengmu Basin. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 36(3): 466-475 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J., Dong, M., Wu, S.G., et al., 2017. Lithosphere Thermal-Rheological Structure and Geodynamic Evolution Model of the Nansha Trough Basin, South China Sea. *Earth Science Frontiers*, 24(3): 27-40 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. L., Wu, Z. C., Shen, Z. Y., et al., 2020. Seismic Evidence for the Crustal Deformation and Kinematic Evolution of the Nansha Block, South China Sea. Journal of Asian Earth Sciences, 203: 104536. https://doi. org/10.1016/j.jseaes.2020.104536

Zhao, Z.X., Sun, Z., Chen, G.H., et al., 2011. Cenozoic Structural Characteristics and Subsidence Evolution in Nansha. *Earth Science*, 36(5): 815-822 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈雪,林进峰,许时耕,2002.南沙海槽南缘逆掩推复构造 地区的动力学分析.海洋学报(中文版),24(1):73-85.
- 韩冰,朱本铎,万玲,等,2015.南沙海槽东南缘深水逆冲推 覆构造.地质论评,61(5):1061-1067.
- 马辉, 许鹤华, 吴世敏, 等, 2011. 中中新世以来南沙海槽前 陆盆地演化模拟. 海洋地质与第四纪地质, 31(6): 157-166.
- 马辉, 许鹤华, 赵俊峰, 等, 2012. 南沙海槽前陆盆地热结 构. 热带海洋学报, 31(3): 155-161.
- 马良涛, 王居峰, 牛嘉玉, 等, 2014. 巴兰三角洲地区构造特 征及其成藏控制因素. 天然气地球科学, 25(6): 867-873, 927.
- 孙珍,赵中贤,周蒂,等,2011.南沙海域盆地的地层系统与 沉积结构.地球科学,36(5):798-806.
- 唐武,赵志刚,张功成,等,2018.文莱-沙巴盆地深水褶皱 冲断带构造变形特征及成因机制.地球物理学报,61 (10):4281-4295.
- 王龙樟,姚永坚,张莉,等,2019.中中新世以来南海南部前 隆的迁移:来自北康盆地的证据.石油与天然气地质, 40(1):123-132.
- 张翀,吴世敏,丘学林,2007.南海南部海区前陆盆地形成 与演化.海洋地质与第四纪地质,27(1):61-70.
- 张厚和, 赫栓柱, 刘鹏, 等, 2017. 曾母盆地烃源岩评价及油 源探讨. 矿物岩石地球化学通报, 36(3): 466-475.
- 张健, 董森, 吴时国, 等, 2017. 南沙海槽岩石圈热-流变结 构与动力学演化分析. 地学前缘, 24(3): 27-40.
- 赵中贤,孙珍,陈广浩,等,2011.南沙海域新生代构造特征 和沉降演化.地球科学,36(5):815-822.