https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.064



南海万安盆地构造-层序发育特征与 构造-沉积充填演化

肖鸿议1,何云龙1.2*,解习农1.2,张道军3,陆必宇1,王亚辉3,杨允柳1

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

2. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室,湖北武汉 430074

3. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司,广东湛江 524057

摘 要:万安盆地是南海西南部重要的沉积盆地之一,深入分析其构造-沉积充填特征对于认识南海南部主要构造事件 及其沉积响应具有重要的科学意义.利用覆盖全盆地的二维地震资料,结合国内外的研究成果,对万安盆地构造-层序特 征及其构造-沉积充填演化进行分析.研究表明,万安盆地内新生代以来可识别出8个主要的二级/三级层序界面.沉降 模拟显示,盆地沉降整体表现出一个"快-慢-快"的过程,且整体呈现出东高西低,中高南低的特征.综合构造层序特征 和沉降模拟结果,万安盆地新生代以来沉积演化可分为5个阶段:初始裂陷期、晚期裂陷期、断坳转换期、裂后热沉降期 和裂后加速热沉降期.盆地自形成以来,沉降主要受东亚大陆边缘区域拉张所造成的深部断裂的影响,至上新世,万安断 裂转而成为盆地沉降的主要影响因素,并由此造成了早期盆地沉降中心由中部向西迁移,然后再逐步向东迁移的特征. 渐新世至早中新世为盆地裂陷阶段,以陆源碎屑岩沉积为主,断陷早期可能为湖相,晚期为浅海相;中中新世为盆地断坳 转换阶段,晚中新世以来为盆地裂后热沉降阶段,二者均发育陆源碎屑岩和自生碳酸盐岩两种沉积类型,且裂后热沉降 期碳酸盐岩沉积范围相对缩小,陆缘碎屑岩沉积范围相对扩大.

关键词:南海;万安盆地;构造-层序;沉降模拟;沉积中心;构造-沉积演化;石油地质.
中图分类号: P618 文章编号: 1000-2383(2021)09-3338-14 收稿日期:2020-09-18

Characteristics of Structural-Sequence and Evolution of Tectonic and Sedimentary of Wan'an Basin in South China Sea

Xiao Hongyi¹, He Yunlong^{1,2*}, Xie Xinong^{1,2}, Zhang Daojun³, Lu Biyu¹, Wang Yahui³, Yang Yunliu¹

Abstract: The Wan' an basin is one of the most important sedimentary basins in the southwestern South China Sea. Based on 2D seismic data covering the whole basin, combined with the latest research results, this study analyzes the characteristics of tectonic-sequence and evolution of tectonics-sedimentary infillings of the Wan' an basin. In this study, 8 major 2nd and 3rd order sequence boundaries have been identified in the Wan' an basin. Further subsidence simulation shows that the overall feature of subsidence

引用格式:肖鸿议,何云龙,解习农,等,2021.南海万安盆地构造-层序发育特征与构造-沉积充填演化.地球科学,46(9):3338-3351.

^{1.} Hubei Key Laboratory of Marine Geological Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

^{2.} Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

^{3.} Zhanjiang Branch, CNOOC Limited Company, Zhanjiang 524057, China

基金项目:中国-东盟海上合作基金项目(No. 12120100500017001);国家自然科学基金项目(Nos. 42172125, 41502102);国家"十三五"科技 重大专项(No. 2017ZX05026-005-002).

作者简介:肖鸿议(1995-),男,硕士研究生,主要从事海洋油气地质学研究.ORCID:0000-0003-2904-8051.E-mail:1146616857@qq.com * 通讯作者:何云龙,ORCID:0000-0003-1925-5356.E-mail:ylhe@cug.edu.cn

rate of the basin shows a "high-low-high" process, with rough characteristics of higher in the east and lower in the west, higher in the north and lower in the south. Combined tectonic-sequences and simulation results of subsidence, evolution of tectonicsedimentary infillings of Wan' an basin since Cenozoic can be divided into five stages, which are early rifting stage, late rifting stage, rifting-post rifting transitional stage, thermal subsidence stage and accelerated thermal subsidence stage. Since the formation of the basin, the subsidence has mainly been affected by the deep faults caused by the extension of the East Asian continental margin. In Pliocene, the Wan' an fault became the main influencing factor of the basin subsidence, which resulted in the early migration of the basin subsidence center from the middle to the west, and then gradually to the east. From Oligocene to Early Miocene, the basin was in rifting stage, which was dominated by terrigenous clastic deposits. In Middle Miocene, the basin was in rifting-post rifting transitional stage and thermal subsidence has begun since Late Miocene. In these two stages, except for clastic deposits, carbonate deposits were also developed. In addition, compared to transitional stage, carbonate deposits in the thermal subsidence stage were relatively reduced, and the terrigenous clastic deposits were relatively expanded.

Key words: South China Sea; Wan' an basin; tectonic-sequence; subsidence simulation; depositional center; tectono-sedimentary evolution; petroleum geology.

0 引言

从构造背景来看,南海处于欧亚大陆、印度-澳大利亚板块以及太平洋板块的交汇处.由于受 到三大板块的联合作用,地应力状态复杂,形成了 不同类型、构造演化各异的沉积盆地(图1)(Sun et al., 2009;赵中贤等,2011;Franke et al.,2014; 雷超等,2015;丁巍伟,2021;孙珍等,2021).南海 南部新生代以来,发生了多次大规模的构造运动, 如古新世时期对东部地区影响较大的礼乐运动, 以及始新世-渐新世之交的西卫运动、晚渐新世的 南海运动和中中新世的万安运动,这一系列的构 造事件奠定了南海现今的基本构造格局(Lee and Lawver,1995;丁巍伟,2021;孙珍等,2021).

万安盆地位于南海南部西侧,其盆地构造演化 受到板块边缘拉张和走滑断裂活动的共同影响(杨 木壮等,2003;姚永坚等,2013,2018;吴冬等,2015; 王蓓羽等,2020).盆地内新生代以来的沉积地层厚 度超过10000m,经历了陆相、海陆过渡相和海相 等多种沉积环境,尤其在中新世发育了大量的三 角洲相和碳酸盐岩沉积,可作为良好的油气储层 (杨振等,2016).数十年的油气勘探表明,万安盆 地内油气地质条件较好,蕴藏着丰富的油气资 源,具有良好的油气勘探前景.近年来的统计数 据显示,盆地中已累计发现油田30余个,其中有 16个油田位于我国疆域内(赵志刚等,2016).

本文利用覆盖全区的二维地震剖面,结合国 内外最新的钻井资料和研究成果,重新梳理万 安盆地的构造-层序格架,通过沉降量模拟,对 万安盆地不同断裂的沉降特征进行分析,结合 区域构造事件背景划分了万安盆地的构造演化 阶段及重要时期盆地沉积充填特征,相关成果 对于人们重新认识万安盆地构造-沉积演化过 程和盆地的油气勘探具有重要的指导意义.

1 区域地质背景

万安盆地又叫做南昆嵩、南湄公或胡志明盆 地,呈纺锤状,NNE-SSW向展布,南北向长度约 600 km,东西向长度约 200 km,盆地面积约为 8.5× 10⁴ km², 主体水深小于 500 m(图 1). 盆地主体位于 印支地块之上,西南为巽他陆架,东部为南沙地块, 受此三区域的构造演化影响,使得盆地演化较为复 杂(赵志刚等,2016;陈强和金庆焕,2017;丁巍伟, 2021).盆地东部边界为NNE-SSW向的万安断裂, 是南海西缘走滑断裂在万安盆地的部分,形成于中 生代晚期,具有多期活动、影响范围大的特点(Rangin et al., 1995; Liu et al., 2004; 陈强和金庆焕, 2017). 受此断裂的影响, 盆地内发育有大量的 NE-SW 向断裂,控制着盆地内构造单元的展布和地层 的沉积(Sun et al., 2009; 陈强和金庆焕, 2017; 姚永 坚等,2018;王蓓羽等,2020).根据前人研究成果,结 合最新相关认识,万安盆地可以进一步分为南部凹 陷、南部低凸起、中部凹陷、北部凸起、西北断阶 带以及北部凹陷这6个三级构造单元(图1).

万安盆地形成于始新世与渐新世之交,沉积地 层覆盖于中生界的变质岩和岩浆岩基底之上.中生 代末受东南亚大陆边缘区域拖曳作用影响,在古南 海被动大陆边缘构造薄弱带处形成了一系列彼此 分割的NE向小型裂谷型地堑或半地堑,并可能在 始新世晚期形成了万安盆地的雏形,并在渐新世时



Fig.1 General situation of basins in the south of the South China Sea and tectonic unit of Wan'an basin 据姚永坚等(2018)修改

期进入早期裂陷期(杨木壮等,2003;林长松等, 2007).随着新南海西南次海盆的扩张和万安断 裂的走滑,盆地继续裂陷,直至中中新世南沙地 块与婆罗洲地块相撞,叠加万安东断裂的挤压走 滑后,于中中新世末期在盆地内造成构造反转, 而后构造活动基本停止,进入稳定沉降阶段(王 鹏程等,2017;姚永坚等,2018).新生代以来,虽 然全球海平面总体呈现下降趋势,然而盆地区域 相对海平面却是振荡上升(杨楚鹏等,2011).盆 地内自下而上沉积了渐新统砂砾岩、泥岩、下中 新统砂岩、砂泥岩、中中新统细粒碎屑岩及碳酸 盐岩、上中新统粗粒碎屑岩及碳酸盐岩以及上新 统至第四系深海-半深海细粒沉积,这样的沉积 组合使得盆地具有良好的油气潜力(Ngoc et al., 2017; Dung et al.,2018;姚永坚等,2018).

2 盆地构造-层序特征

建立等时地层格架是开展沉积学研究的基础.本次研究中结合前人最新据钻井建立的有限层序格架剖面,通过与全区内地震剖面对比,确立了盆地内主要二级层序界面格架(Matthews et al.,1997;杨楚鹏等,2011;Dung et al., 2018).在此二级层序格架基础之上,对比南海 南、北部典型盆地层序格架,通过进一步层序 地层分析,建立了全盆地三级层序格架(姚伯 初等,2004;解习农等,2015;Dung et al.,2018; 姚永坚等,2018;朱荣伟等,2021).

2.1 构造-地层界面

根据地震和钻井资料,将万安盆地自新生代初 以来划分出T100、T60、T52、T50、T41、T40、T31、 T30这8个二级/三级层序界面(图2).现将本次研





究中 T100、T60、T50、T40和 T30 这 5个二级 层序的界面特征分述如下.

T100界面是盆地基底与沉积地层之间的不整合面,可能对应于南海南部的西卫运动构造事件.此界面连续性较差,为一强振幅、低频率的波状或平行状反射层,在盆地凹陷内靠近边缘界面较为清晰,凹陷中心部位由于埋深大,受到资料品质限制,一般特征不明显.隆起区由于被断层以及侵入体影响而难以区分,但仍可根据界面上下不同的地震相特征而加以识别(图 3a、3e).

T60界面为渐新统和中新统的分界面,晚渐 新世西南次海盆开始张裂,这一事件沿着SW方 向影响至万安盆地区域,使得盆地在此期间形 成大量活动断层,断控沉降影响着盆地形态演 化,形成一套不整合界面(张光学,1996; Barckhausen *et al.*,2014).这一界面为中-强振 幅、低频率的连续至断续的反射层,在隆起和 斜坡处反射能量较强,反射界面清晰,至深凹 处呈杂乱或波状反射,上覆地层与其呈上超或 整合接触,部分区域有削蚀痕迹(图 3a、3e).

T50界面是受中中新世初南沙地块与婆罗洲地 块在沙巴地区碰撞、西南次海盆停止扩张、古南海 消亡这一系列事件影响所形成的区域不整合界面 (李春峰和宋陶然,2012;姚永坚等,2013),为盆地 裂陷层和断坳转换层的分界面,界面上下的构造 特征和沉积特征变化较大,界面之下为断陷特征, 断裂发育,地层多被错断,厚度差异大,界面之上 断层活动性减弱,地层沉积厚度较为一致.该界面 是一中-强振幅、中频率的连续性较好的反射层, 局部为断续或杂乱反射,在西部表现为一套中强 振幅地层的地界,而在东部为一套强振幅地层的 顶,界面显示清晰,易于区分(图3a、3b、3d).

T40界面对应万安运动,这一时期的海平面 大规模下降(姚伯初等,2004),盆内部分区域由 于挤压形成了褶皱和反转构造(赵中贤等, 2011),造成海平面下降和部分区域的剥蚀.界面 之上为坳陷特征,地层横向完整连续,厚度较为 均一.此界面以强振幅、低频率、连续平行为特征 (图 3b、3d),广泛分布于盆地各级构造单元,构造 高位处发育碳酸盐岩台地,呈强振幅低频的连续 或断续的丘状反射,与上覆界面上超接触.界面 上方发育有大量的向东进积的反射层,为水下三 角洲,在东部斜坡处界面与上下反射层平行.

T30界面为上新世与中新世之间的界面,为一



图 3 关键构造-地层界面地震反射特征 Fig.3 Characteristics of seismic responses of key structural-stratigraphic boundaries 具体位置见图 4

套较为稳定的反射面,界面上覆地层与之呈上超接触,反射同相轴呈中-强振幅、连续平行的高频反射特征,能够被连续追踪(图3b、3c),上下地层沉积差异较大,界面以下地层展布连续平稳,厚度均一,朝东南倾斜,与之呈整合或顶超接触;界面之上地层厚度变化大,与此界面呈下超接触,西部为厚度较小的缓坡,东部为厚度大的凹陷,并且在东部发育有大量的三角洲前积体以及水下河道.

2.2 构造-地层格架

在关键层序界面限定的基础上,结合构造特征、沉积充填等,将万安盆地自新生代以来划分为 3个不同特征的构造层,下部的裂陷构造层、中部 的断坳转换构造层和上部的坳陷构造层(图4).

裂陷构造层由早期裂陷作用所对应的同裂陷 沉积单元构成,地震剖面上显示为杂乱基底反射之 上的变振幅和低连续性反射.断坳转换构造层代表 了万安盆地由裂陷向坳陷过渡的沉积,是一个构造 活动相对减弱的构造层.盆地内部的断层基本中止 于此构造层的顶界面,而在构造层内部发育的断层 也具有生长断层的特征.晚期的坳陷构造层为盆地 地层的整体沉降沉积,构造活动基本停滞.在这一 构造层中断层不发育,地层连续性好,沉积厚度大.

中部凹陷为万安盆地面积最大的凹陷,裂陷构 造层主要发育大量向东断的高角度正断层,断层规 模差异不大,形成了一系列西高东低的断阶构造, 在东部主要为切穿基底的正断层,具生长断层的特 征,并且有负花状构造.据图4中L1和L2剖面可 知,中部凹陷沉积地层厚度最大处位于中部凹陷 深凹处,东部地层较西部更厚,说明受万安断裂走 滑拉伸作用影响明显.越靠近南部,裂陷构造层的 厚度差异越小,并且断层也逐渐转变为向西断的 正断层.断坳转换构造层中可以明显看到断层断 距的减小和断面两侧地层厚度变化的减小.需要 注意的是,在盆地东部,断层的生长特征更为明 显,而在其西部出现了大量的小型反向调节断层, 构造层西高东低,沉积厚度最大处在凹陷中心区 域,并向两侧逐渐减薄,为明显的断坳特征,同时 也说明在这一构造层形成时期万安断裂的活动对 盆内演化影响减弱. 坳陷构造层在地形上继承前 期的凹隆特征,地层连续性好,断裂基本不发 育,东部地层较厚而西部较薄,在西部边缘为宽 缓的斜坡,由西向东倾伏,地层总体呈勺状,在



图 4 万安盆地南典型测线构造--地层格架综合解释剖面 Fig.4 Mian interpretation profiles showing structure-stratigraphic framework in the south of Wan'an basin

东部发育有大量前积结构,沉积厚度最大处位 于凹陷中心,向南逐渐转移到万安断裂附近.

在南部凹陷,裂陷构造层的断层产状变化明显,逐渐发展为西倾正断层,沉积中心位于中西部的几条规模较大断裂附近,而东部为东高西低的断阶,形成大断层控制沉积,小断层调节的特征.西卫群整体表现为西高东低,虽多被错断,但厚度变化不大,其上的万安组沉积较厚,呈现出非典型箕状断陷充填特征,沉积中心主要位于中部凹陷和南

部凹陷,笔者推测裂陷强度在万安组沉积时期达到 最大(图4中L3剖面).断坳转换构造层中也出现 有反向调节断层,其位置较中部凹陷更靠近东部, 并且受东部断层活动性增强的影响,造成沉积中心 向东迁移,对应西南次海盆扩张停止在万安盆地的 构造响应,比较而言,南部凹陷的断坳转换构造层 厚度较中部凹陷要更小.晚期的坳陷构造层仍然 是西高东低,断层不发育,但厚度上东部明显较西 部更厚,说明沉积过程中受东部影响更大.

3 盆地沉降特征

盆地沉降史研究主要采用回剥法,通过对盆 地沉降历史时期沉降量的定量分析再现盆地的 地质历史.本文在万安盆地中选取了切穿盆地边 缘的多条特征剖面,直接进行整条剖面的沉降模 拟,具体为对剖面数据进行一系列的校正处理 后,利用BacKang V1.0盆地地史分析综合模拟软 件来进行沉降模拟,得到了盆地区域多条二维 "面"上的总沉降量、构造沉降量、总沉降速率以 及构造沉降速率,借此来进一步分析三维"体"上 盆地的构造沉降演化规律(图5~图7).为便于将 盆内沉降特征细化到各三级构造单元内部,在图 中以虚拟井编号来指示不同区域(图5).沉降曲线 表明在盆地的不同部位沉降存在着差异,中部沉 降较南部强,凹陷区域较隆起区强,且存在沉降中 心迁移.这些沉降较强的区域往往发育大量断裂, 尤其以万安断裂和多条 NE-SW 向的控盆断裂或 断裂带为主,反映盆地沉降受构造分割明显.

3.1 万安断裂沉降特征

万安断裂带构成了盆地的东部界线,断裂向下 切穿盆地基底,长期控制着东部区域的演化,从渐 新世至早中新世,万安断裂右旋走滑,盆地东部靠 近万安断裂区域为张性应力区,沉降受万安断裂影 响十分明显,沉降速率呈现持续上升趋势,由渐新 世的260 m/Ma增加至早中新世早期的340 m/Ma, 再继续增大到早中新世晚期的510 m/Ma,断裂的 中部沉降较为强烈,南部稍弱,这一大段时期内,构 造沉降占总沉降的60%以上,说明沉降主要受构造 影响(图5).在图5中,所选取的紧靠万安断裂的三 口虚拟井7、8、9的沉降速率在不同时期的变化趋势 上有良好的对应关系,尤其是在18.3~16.0 Ma这一 阶段出现了沉降速率高峰值的一致性,以及在 11.6~5.3 Ma出现了低峰值的一致性,这些相关现 象指示了万安断裂活动对盆地东缘影响的重要性. 至中中新世,受南沙地块与婆罗洲地块在沙巴地区 碰撞的影响,南海扩张停止,万安断裂走滑由右旋



Fig.5 Subsidence rate histogram of virtual well





Fig.6 Total subsidence and structural subsidence of mian profile L1



图 7 典型剖面L3沉降量和构造沉降量曲线 Fig.7 Total subsidence and structural subsidence of mian profile L3

变为左旋,盆地内形成了由东向西的挤压应力, 万安断裂附近的沉降速率陡然下降至160 m/ Ma,并在晚中新世持续下降至70 m/Ma,最低处 为40 m/Ma.晚中新世时,万安断裂基本停止活 动,构造沉降已不明显,断裂各部位沉降差别不 大,沉降速率也降至最低.而到了上新世,万安 断裂附近的沉降速率再次加大,达到190 m/ Ma,且表现出了中部高、南部低的特点,这可能 与万安断裂的再一次走滑活动有关.

虽然万安断裂自渐新世以来长期影响着盆 地东部区域的构造演化,但从东西向的沉降量剖 面上不难发现,在上新世之前,盆地的沉降中心 主要位于盆内几个凹陷,而非紧邻万安断裂,直 到上新世之后,盆地东部万安断裂周缘才成为盆 地的主要沉降区,且以盆东缘中部偏南最明显.

3.2 次级断裂沉降特征

中生代末,受太平洋板块向欧亚板块俯冲的运动方向和速率发生显著改变的影响,使

得长期处于挤压状态下的东亚边缘岩石圈因 应力松弛而回弹,诱发软流圈上涌、岩石圈拆 沉,在盆地内部形成了大量的 NE-SW 向的断 裂,这些断裂既奠定了盆地的构造格局,也对 盆地沉降演化起着重要的控制作用(图1).

中部凹陷为盆地的最大沉降中心,发育大量的次级断裂.渐新世时期,盆地的沉降中心为中部凹陷,其凹陷深坳处位于中部凹陷的中段虚拟井2、3、5处,受底部断裂影响,使其成为了沉降量最大的区域,可达4300m,沉降速率约400m/Ma,而中部凹陷其他位置的沉降速率差别不大,基本维持在280m/Ma附近.早中新世,次级断裂的沉降速率略有下降,构造沉降占总沉降量的60%~70%,在中部凹陷表现得尤为明显,虚拟井1、2、4、5、6等区域均为下降,这与万安断裂附近沉降速率升高的特征截然不同,并且在18.3~16.0 Ma时期并未有特别高的峰值出现,只是较前一阶段略有上升,说明万安断裂的活动对盆内构造沉降的演化并不是占

据主导地位(图6).中中新世,中部凹陷的沉降速 率升高至330 m/Ma,沉降中心开始向东迁移,且 表现为明显的点状沉降中心特征,对应于虚拟井 5 区域.晚中新世,沉降速率急剧下降到110 m/ Ma,沉降中心的点状特征减弱,但仍继续向东部 迁移.至上新世到第四纪,沉降速率再一次加大, 且呈现出明显的东高西低,盆地中东部沉降速率 在180~280 m/Ma,中部凹陷北缘沉降速率变化 差异更大,构造沉降量只占到30%~40%.

南部凹陷在渐新世时期沉降速率较中部凹陷 稍低,约在210 m/Ma,且没有明显的沉降中心出 现,整体看来中部和南部的沉降差异不大,说明此 时期盆地雏形初步形成,次级构造单元分块还不明 显(图6).早中新世,南部凹陷的沉降中心开始显 现,位于凹陷中段,且逐渐向东迁移,沉降中心表现 为沉降提速,整体的沉降速率逐渐与中部凹陷持 平,约240 m/Ma.到了中中新世,其沉降中心由"点 状"逐渐转变为"面状",且与中部凹陷不同的是, 其在向西移动,这种差异性迁移反映了此时区域 应力场发生了变化,并且在中新世时期,无论是中 部凹陷,还是南部凹陷,其沉降中心基本上是远离 万安断裂,从距离上看最大能够达到上百公里,说 明此时的沉降主要受深部活动的影响.晚中新世, 盆地南部沉降速率极大地降低到 60 m/Ma 以下, 沉降中心再一次向东部迁移(图7).上新世以后, 沉降速率明显提高,与中部凹陷类似的表现为东 高西低,且沉降中心紧靠东缘万安断裂.

总体来看,万安断裂附近的沉降速率要高于 盆地的其他区域,即呈现出东高西低的特征,但 盆地的沉降中心在多个地质历史时期中距离万 安断裂较远,说明控制沉降中心变化的主要因素 是由深部地幔流动造成的盆地基底的张裂,而在 此期间万安断裂仅影响着盆地东缘,直至上新世 后,盆地的沉降中心才迁移至万安断裂附近.

4 盆地构造演化与沉积充填

在万安盆地的演化过程中,盆地东部的万安大 断裂起着十分重要的作用(张光学,1996; Liu et al., 2004; 陈强和金庆焕,2017),但是研究表明,虽然东 部沉降程度较大,而在大部分地质历史时期中盆地 的沉降中心离万安断裂较远(图6),一方面说明万 安断裂长期控制着盆地东部的构造演化,另一方面 说明受深部活动影响的欧亚板块东南缘的拉张作 用也扮演着十分重要的角色(Franke et al., 2014; 解习农等, 2015).本次研究中,基于盆地沉降模 拟的结果,结合前人对南海构造运动的研究成 果,可将万安盆地的演化分为5个阶段,渐新世 至早中新世的初始裂陷阶段和晚期裂陷阶段,中 中新世的断坳转换阶段,晚中新世的裂后热沉降 阶段以及上新世以来的加速热沉降阶段(图8).

由图 8 可知,以中部凹陷为例,盆地沉积中心 在整个盆地演化充填序列中在剖面上逐渐发生 变化.盆地初始-晚期裂陷阶段,盆地沉积中心主 要受到断层活动控制.此时盆地发育一系列倾向 相对(东部断裂西倾,西部断裂东倾)的断裂,尽 管位于盆地中央,这些断裂活动性均较强,对沉 积控制作用明显,具体表现为断层下降盘厚度相 对变大.整体而言,盆地沉积中心位于中部凹陷 中部.断坳转换阶段,盆地沉积中心逐渐向西迁 移,这种现象在断坳转换的晚期表现更为明显. 热沉降至加速热沉降阶段,盆地整体沉积中心再 次向东迁移,沉积中心由热沉降期的凹陷中部, 逐渐迁移至加速热沉降期的盆地凹陷东侧.

盆地主要裂陷阶段为渐新世至早中新世,约 34.0~16.3 Ma,这一阶段为盆地沉降最为快速的时 期,受到万安断裂的右旋走滑以及东亚大陆边缘区 域拉张的双重影响;根据盆地的地质构造和沉降特 征又可被划分为初始裂陷阶段和晚期裂陷阶段.

4.1 初始裂陷阶段

初始裂陷发生在渐新世及之前.晚始新世,太 平洋板块以NWW 向朝欧亚板块俯冲,而印度-澳 大利亚板块则朝北与欧亚大陆进行硬碰撞,导致印 支地块与华南地块的地幔物质朝着东南部蠕动,在 亚欧大陆东南缘出现张性应力场,形成了一系列初 始的地堑和地垒(Franke et al., 2014; Mansor et al., 2014; 雷超等, 2015). 在此阶段, 中生代晚期形成的 万安断裂,在早渐新世开始右旋走滑,一直持续到 早中新世末,造成万安盆地东部沉降速率加大(图 5),并且形成了许多切割至基底的断裂,地层西薄 东厚,奠定了东断西超的基础(图4),构造格局基本 成型(杨木壮等,2003; Liu et al., 2004). 早期断陷阶 段,万安盆地可能处于陆/湖相沉积.对比此阶段层 序格架,盆地南部凹陷沉积整体范围相对较小,但 是其厚度局部比中部凹陷厚度更大(图4).因此,在 此阶段,万安盆地呈现北部沉积范围广,且由凹陷 中部厚度相对均一可知,此时中部凹陷古地貌相对





平缓;南部沉积厚度变化相对较大,反映此时南部 凹陷呈现出凹陷小、局部较深、古地貌变化相对较 大的特征.且这一特征基本保持至裂陷期结束的 中中新世.如前文所述,此阶段,万安东断裂及盆 地内重要的次级断裂对沉积具有重要的控制作 用,盆地沉积中心主要位于盆地凹陷中部.

4.2 晚期裂陷阶段

晚期裂陷发生在早中新世,南海区域洋中 脊由北部跃迁到西南部,西南次海盆开始扩张 (Barckhausen *et al.*,2014),这一事件沿着扩张 脊的延长线,影响到西南部的万安盆地,万安 断裂右旋运动加剧(李春峰和宋陶然,2012;姚 永坚等,2013;陈强和金庆焕,2017).造成盆 地东部断裂活动性增大,为断控沉降,使得盆 地东部和南部沉降提速(图5),海水从盆地东 部进入,形成滨海平原、浅海相沉积,而盆地 主要接受来自于盆地西部和南部的物源供 给,发育大规模的三角洲沉积(图9).

4.3 断坳转换阶段

这一阶段为中中新世,时间大约在16.3~ 11.6 Ma,盆地沉降速率放缓,构造演化进入一个新 阶段(图5).中中新世,随着南沙地块与婆罗洲地块 在沙巴区域的碰撞,古南海消亡,新南海西南次海 盆的张裂停止,南海演化的同扩张期结束(Clift, 2014; Savva et al., 2014),万安断裂由以拉张为主 的右旋走滑转变为压扭为主的左旋走滑,在万安盆 地内形成了一系列的挤压背斜、负花状构造和反转 断层等,盆内各局部构造带多表现为断-皱型构造 样式(图4),东西地层沉积厚度差异不大(刘海龄 等,2015).由于海平面的上升及盆内局部隆起的发 育,在盆地的构造高地发育有大量的碳酸盐岩沉 积,东部地区部分剥蚀形成角度不整合面,盆地西 部仍然接受来自盆地西部的物源供给,发育大量的 三角洲沉积,同时在三角洲前缘可能发育源自滑塌 的浊积扇体(图10).这一阶段万安盆地的构造活动 性已经不似早期那么强烈,盆地内部的断层活动减



图 9 万安盆地断陷晚期沉积模式

Fig.9 Sedimentary model of late rifting stage of Wanan basin





弱或停止活动,断距明显减小(图8).对于此阶段沉积中心迁移产生的原因,其很可能来自南海东缘沙巴造山运动对万安盆地产生的远程西向挤压作用.这种作用在盆地内形成大型的背斜和反转构造,对应向斜位于盆地西侧,由于可容纳空间的相对增大和西部物源的影响,导致此阶段盆地沉积中心向西迁移.

4.4 裂后热沉降阶段

热沉降期主要为晚中新世,在11.6~5.4 Ma盆 地内部的断层大多活动已停滞,盆地的沉降速率进 一步降低(图5).区域上,太平洋板块和印度-澳大 利亚板块的运动速度有所加强(Lee and Lawver, 1995;林长松等,2007),受菲律宾板块和欧亚板块 在名都洛岛的碰撞以及澳大利亚板块和欧亚板块 在苏拉威西岛的碰撞的影响,南海发生万安运动 (姚伯初等,2004),造成部分区域削蚀和挤压构造 的形成,盆地沉降总体进入一个低速期,各次级构 造带沉降速率均降低,相对海平面上升,水深进一 步加大,为滨浅海至半深海沉积,同时盆地内部局 部隆起仍然发育了广泛的碳酸盐岩台地(Lü et al., 2013).然而,由于相对海平面上升,碳酸盐岩和生物 礁等沉积和发育范围均相较断坳转换期大大缩小.

4.5 加速热沉降阶段

热沉降加速期为上新世至第四纪,即5.3 Ma至 今,盆地的沉降进入加速沉降阶段,沉降速率由西 向东加大,尤其是位于盆地中东部的中部凹陷,沉 降速率要远大于其他区域(图6).盆地沉降突然加 速的原因,很可能与南海北部莺歌海盆地类似,为 盆缘走滑断裂活化和裂后热沉降共同作用的结果 (崔涛等,2008).就沉积厚度而言,盆地东部区域地 层厚度较大,可以达到西部地层厚度的几倍(图3和 图4),盆地沉积物主要来自于西北部,并且向东推 进,形成大规模的"S"形前积体,而东部的西雅隆起 仅能提供少量物源.裂后热沉降阶段以来沉积中心 的迁移现象,很可能源于湄公河充足的物源供给, 导致万安盆地西侧开始发育的陆坡在此阶段向东 快速推进,进而导致沉积中心再次向东逐渐迁移.

5 结论

本文依据最新解释的地震数据和钻井资料,对 比南海南、北部典型盆地层序发育特征,对万安盆 地的层序格架进行重新梳理,并讨论了盆地各构造 单元的沉降特征,以及其与万安断裂和东亚大陆边 缘区域拉张之间的关系,主要可得出以下结论:

(1)在万安盆地识别出T100、T60、T52、T50、 T41、T40、T31、T30这8个层序界面,结合盆地构 造-层序特征,盆地自下而上划分出裂陷构造层、断 坳转换构造层和坳陷构造层3个构造-地层单元.

(2)新生代以来,万安盆地的沉降演化一直受 到东亚大陆边缘区域拉张所造成的深部断裂和东 缘万安断裂的影响,在上新世以前,盆地的沉降受 深部断裂所控制,沉降中心位于盆地几个凹陷处, 而万安断裂仅对盆地东部有影响,至上新世以后, 盆地沉降转而受东缘万安断裂控制,因此导致了盆 地沉降中心表现出由凹陷中部向西迁移、再向东迁 移的特征,并且在一定程度上可以支持万安盆地是 走滑性质的板块边缘裂谷盆地这一观点.

(3)万安盆地新生代以来可划分出5个构造演化 阶段:渐新世至早中新世为裂陷阶段,进一步可分为 初始裂陷阶段和晚期裂陷阶段,主要发育碎屑岩沉 积,其中初始裂陷的渐新世可能为陆/湖相沉积,晚期 裂陷主要发育源自盆地西部和南部的三角洲沉积;中 中新世的断坳转换阶段以及晚中新世以后的裂后热 沉降阶段和加速热沉降阶段,主要发育陆源碎屑岩 和自生碳酸盐岩等两类沉积,且裂后热沉降阶段特 别是加速热沉降阶段以来,盆地自生碳酸盐岩发育 范围相对缩小,陆缘碎屑岩沉积范围相对扩大.

References

Barckhausen, U., Engels, M., Franke, D., et al., 2014. Evolution of the South China Sea: Revised Ages for Breakup and Seafloor Spreading. *Marine and Petroleum Geology*, 58: 599-611. https://doi.org/10.1016/j. marpetgeo.2014.02.022

- Chen, Q., Jin, Q. H., 2017. Activity Features of Wan' an Fault and Its Constraints on Wan' an Basin, Western South China Sea. *Marine Geology Frontiers*, 33(10): 1-8 (in Chinese with English abstract).
- Clift, P. D., 2014. Preface to the Special Collection on the Tectonics of the South China Sea. Marine and Petroleum Geology, 58: 551-554. https://doi.org/10.1016/ j.marpetgeo.2014.07.001
- Cui, T., Xie, X. N., Ren, J. Y., et al., 2008. Dynamic Mechanism of Anomalous Post-Rift Subsidence in the Yinggehai Basin. *Earth Science*, 33(3): 349-356 (in Chinese with English abstract).
- Ding, W. W., 2021. Continental Margin Dynamics of South China Sea: From Continental Break - Up to Seafloor Spreading. *Earth Science*, 46(3): 790-800 (in Chinese with English abstract).
- Dung, B. V., Tuan, H. A., van Kieu, N., et al., 2018. Depositional Environment and Reservoir Quality of Miocene Sediments in the Central Part of the Nam Con Son Basin, Southern Vietnam Shelf. *Marine and Petroleum Geology*, 97: 672-689. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.05.004
- Franke, D., Savva, D., Pubellier, M., et al., 2014. The Final Rifting Evolution in the South China Sea. Marine and Petroleum Geology, 58: 704-720. https://doi. org/10.1016/j.marpetgeo.2013.11.020
- Lee, T. Y., Lawver, L. A., 1995. Cenozoic Plate Reconstruction of Southeast Asia. *Tectonophysics*, 251 (1-4): 85-138. https: //doi.org/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*, 40(4): 744-762 (in Chinese with English abstract).
- Li, C. F., Song, T. R., 2012. Magnetic Recording of the Cenozoic Oceanic Crustal Accretion and Evolution of the South China Sea Basin. *Chinese Science Bulletin*, 57 (20): 1879-1895 (in Chinese).
- Lin, C. S., Chu, F. Y., Gao, J. Y., et al., 2007. On Tectonic Movement in the South China Sea during the Cenozoic. Acta Oceanologica Sinica, 29(4): 87-96 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H. L., Yan, P., Zhang, B. Y., et al., 2004. Role of the Wan-Na Fault System in the Western Nansha Islands (Southern South China Sea). Journal of Asian Earth Sciences, 23(2): 221-233. https://doi.org/ 10.1016/S1367-9120(03)00121-4

- Liu, H. L., Yao, Y. J., Shen, B. Y., et al., 2015. On Linkage of Western Boundary Faults of the South China Sea. *Earth Science*, 40(4): 615-632 (in Chinese with English abstract).
- Lü, C., Wu, S. G., Yao, Y. J., et al., 2013. Development and Controlling Factors of Miocene Carbonate Platform in the Nam Con Son Basin, Southwestern South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 45: 55-68. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2013.04.014
- Mansor, M. Y., Rahman, A. H. A., Menier, D., et al., 2014. Structural Evolution of Malay Basin, Its Link to Sunda Block Tectonics. *Marine and Petroleum Geolo*gy, 58: 736-748. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2014.05.003
- Matthews, S. J., Fraser, A. J., Lowe, S., et al., 1997. Structure, Stratigraphy and Petroleum Geology of the SE Nam Con Son Basin, Offshore Vietnam. *Geological Society, London, Special Publications*, 126(1): 89-106. https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1997.126.01.07
- Ngoc, P. B., Nghi, T., Tin, N. T., et al., 2017. Petrographic Characteristics and Depositional Environment Evolution of Middle Miocene Sediments in the Thien Ung-Mang Cau Structure of Nam Con Son Basin. Indonesian Journal on Geoscience, 4(3): 143-157. https:// doi.org/10.17014/ijog.4.3.143-157
- Rangin, C., Klein, M., Roques, D., et al., 1995. The Red River Fault System in the Tonkin Gulf, Vietnam. *Tectonophysics*, 243(3-4): 209-222. https://doi.org/ 10.1016/0040-1951(94)00207-P
- Savva, D., Pubellier, M., Franke, D., et al., 2014. Different Expressions of Rifting on the South China Sea Margins. *Marine and Petroleum Geology*, 58: 579-598. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2014.05.023
- Sun, Z., Li, F. C., Lin, J., et al., 2020. The Rifting-Breakup Process of the Passive Continental Margin and Its Relationship with Magmatism: The Attribution of the South China Sea. *Earth Science*, 46(3): 770-789 (in Chinese with English abstract).
- Sun, Z., Zhou, D., Wu, S. M., et al., 2009. Patterns and Dynamics of Rifting on Passive Continental Margin from Shelf to Slope of the Northern South China Sea: Evidence from 3D Analogue Modeling. *Journal of Earth Science*, 20(1): 136-146. https://doi.org/10.1007/ s12583-009-0011-6
- Wang, B. Y., Zhang, J., Ai, Y. F., 2020. Analysis of Tectonic Evolution Characteristics of Wan' an Basin in the Southwest of the South China Sea. *Journal of Universi*ty of Chinese Academy of Sciences, 37(6): 784-792 (in

Chinese with English abstract).

- Wang, P. C., Li, S. Z., Guo, L. L., et al., 2017. Opening of the South China Sea (SCS): A Joint Effect of Dextral Strike-Slip Pull-Apart and Proto-SCS Slab Pull. *Earth Science Frontiers*, 24(4): 294-319 (in Chinese with English abstract).
- Wu, D., Zhu, X. M., Zhu, S. F., et al., 2015. Characteristics and Main Controlling Factors of Cenozoic Sequence Stratigraphy in Wan' an Basin, Nansha Islands. *Lithologic Reservoirs*, 27(2): 46-54 (in Chinese with English abstract).
- Xie, X. N., Ren, J. Y., Wang, Z. F., et al., 2015. Difference of Tectonic Evolution of Continental Marginal Basins of South China Sea and Relationship with SCS Spreading. *Earth Science Frontiers*, 22(1): 77-87 (in Chinese with English abstract).
- Yang, C. P., Yao, Y. J., Li, X. J., et al., 2011. Cenozoic Sequence Stratigraphy and Lithostratigraphic Traps in Wan' an Basin, the Southwestern South China Sea. *Earth Science*, 36(5): 845-852 (in Chinese with English abstract).
- Yang, M. Z., Wang, M. J., Liang, J. Q., et al., 2003. Tectonic Subsidence and Its Control on Hydrocarbon Resources in the Wan' an Basin in the South China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 23(2): 85-88 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z., Zhang, G. X., Zhang, L., 2016. The Evolution and Main Controlling Factors of Reef and Carbonate Platform in Wan'an Basin. *Earth Science*, 41(8): 1349– 1360 (in Chinese with English abstract).
- Yao, B. C., Wan, L., Liu, Z. H., et al., 2004. Tectonic Significance and Its Petroleum Effect of the Wan' an Tectonic Movement in the South of the South China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 24(1): 69-77 (in Chinese with English abstract).
- Yao, Y. J., Lü, C. L., Wang, L. J., et al., 2018. Tectonic Evolution and Genetic Mechanism of the Wan' an Basin, Southern South China Sea. Acta Oceanologica Sinica, 40(5): 62-74 (in Chinese with English abstract).
- Yao, Y. J., Yang, C. P., Li, X. J., et al., 2013. The Seismic Reflection Characteristics and Tectonic Significance of the Tectonic Revolutionary Surface of Mid-Miocene (T₃ Seismic Interface) in the Southern South China Sea. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(4): 1274–1286 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. X., 1996. The Formation, Crust Extension and Strike - Slip Tectionics of Wan' an Basin. Geological Research of South China Sea, (8): 14-23 (in Chinese

with English abstract).

- Zhao, Z. G., Liu, S. X., Xie, X. J., et al., 2016. Hydrocarbon Geological Characteristics and Reservoir Forming Conditions in Wan' an Basin, South China Sea. *China Offshore Oil and Gas*, 28(4): 9–15 (in Chinese with English abstract).
- 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).
- Zhu, R. W., Yao, Y. J., Liu, H. L., et al., 2021. Tectonic Contact Relationship of Continental Margins of the Southwest Sub-Basin, South China Sea in Late Mesozoic. *Earth Science*, 46(3): 885-898 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈强,金庆焕,2017.南海西部万安断裂活动特征及其对万 安盆地的控制作用.海洋地质前沿,33(10):1-8.
- 崔涛, 解习农, 任建业, 等, 2008. 莺歌海盆地异常裂后沉降 的动力学机制. 地球科学, 33(3): 349-356.
- 丁巍伟,2021.南海大陆边缘动力学:从陆缘破裂到海底扩 张.地球科学,46(3):790-800.
- 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(4):744-762.
- 李春峰, 宋陶然, 2012. 南海新生代洋壳扩张与深部演化的 磁异常记录. 科学通报, 57(20): 1879-1895.
- 林长松,初凤友,高金耀,等,2007.论南海新生代的构造运动.海洋学报,29(4):87-96.
- 刘海龄,姚永坚,沈宝云,等,2015.南海西缘结合带的贯通 性.地球科学,40(4):615-632.
- 孙珍,李付成,林间,等,被动大陆边缘张-破裂过程与岩浆 活动:南海的归属.地球科学,46(3):770-789.
- 王蓓羽,张健,艾依飞,2020.南海西南部万安盆地新生代

沉降分析及构造意义.中国科学院大学学报,37(6): 784-792.

- 王鹏程,李三忠,郭玲莉,等,2017.南海打开模式:右行走 滑拉分与古南海俯冲拖曳.地学前缘,24(4):294-319.
- 吴冬,朱筱敏,朱世发,等,2015.南沙万安盆地新生界层序 特征和主控因素.岩性油气藏,27(2):46-54.
- 解习农,任建业,王振峰,等,2015.南海大陆边缘盆地构造 演化差异性及其与南海扩张耦合关系.地学前缘,22 (1):77-87.
- 杨楚鹏,姚永坚,李学杰,等,2011.万安盆地新生代层序地 层格架与岩性地层圈闭.地球科学,36(5):845-852.
- 杨木壮,王明君,梁金强,等,2003.南海万安盆地构造沉降 及其油气成藏控制作用.海洋地质与第四纪地质,23 (2):85-88.
- 杨振,张光学,张莉,2016.万安盆地生物礁及碳酸盐台地 的发育演化及控制因素.地球科学,41(8):1349-1360.
- 姚伯初,万玲,刘振湖,等,2004.南海南部海域新生代万安 运动的构造意义及其油气资源效应.海洋地质与第四 纪地质,24(1):69-77.
- 姚永坚, 吕彩丽, 王利杰, 等, 2018. 南沙海区万安盆地构造 演化与成因机制. 海洋学报, 40(5): 62-74.
- 姚永坚,杨楚鹏,李学杰,等,2013.南海南部海域中中新世 (T₃界面)构造变革界面地震反射特征及构造含义.地球 物理学报,56(4):1274-1286.
- 张光学,1996. 地壳伸展及走滑与万安盆地的形成.(8): 14-23.
- 赵志刚,刘世翔,谢晓军,等,2016.万安盆地油气地质特征 及成藏条件.中国海上油气,28(4):9-15.
- 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.
- 朱荣伟,姚永坚,刘海龄,等,2021.南海西南次海盆两侧陆 缘中生代晚期构造接触关系.地球科学,46(3): 885-898.