https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.067



中沙海槽盆地构造与沉积作用及其 对远端裂陷盆地演化的启示

汪斯毓1,王仕胜1,刘艳锐2,吴时国2*

中国地质调查局海口海洋地质调查中心,海南海口 571127
 中国科学院深海科学与工程研究所,海南三亚 572000

摘 要:深水远端裂陷盆地演化是大陆边缘构造研究的热点.中沙海槽盆地位于西北次海盆和西南次海盆之间,是一个临近洋盆的裂陷盆地.根据最新的地球物理资料,揭示了该盆地的沉积层序和构造演化.中沙海槽盆地裂开后期地层厚度约为200~1500m,可划分为6个地震层序.古近系分布局限,仅限于中沙海槽盆地和中沙南盆地的深凹部位;新近系一般厚为200~1100m;第四系厚度薄且变化小.中沙海槽盆地主要特征如下:(1)岩浆活动强烈,岩体数量较多,遍布整个盆地, 地震剖面上的反射特征表明有侵入型和喷出型两类岩石.重磁异常综合解释表明火成岩成分为中-酸性和中-基性两类; (2)裂陷盆地位于拆离的磁性基底隆起之上,磁性基底北深南浅,埋深在6.0~10.4 km之间;(3)莫霍面埋深在15~24 km之间,地壳由陆向海逐渐减薄、由盆地到岛礁逐渐变厚.中沙海槽盆地通常以犁式正断层为边界断层,其构造变形以伸展构造为主,断层走向主要有 NE-SW 向和 NW-SE 向,其中 NE-SW 向控制了新生代沉积坳陷的发育. **关键词:** 地震层序;磁性基底;远端裂陷盆地;构造演化;西沙隆起;南海;海洋地质.

中图分类号: P736 **文章编号:** 1000-2383(2022)03-1094-13 **收稿日期:** 2021-05-23

Tectonics and Sedimentation of the Zhongsha Trough Basin: Implications to the Basin Evolution in Distal Rifting Margin

Wang Siyu¹, Wang Shisheng¹, Liu Yanrui², Wu Shiguo^{2*}

Haikou Marine Geological Survey Center, China Geological Survey, Haikou 571127, China
 Institute of Deep-Sea Science and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Sanya 572000, China

Abstract: The basin evolution in distal rifting margin has been hotspot in the continental margin scientific planning. Zhongsha trough basin located between the Northwest Sub-Basin and Southwest Sub-Basin is a typical distal rifting basin nearby the ocean basin. In this study, the seismic sequence and tectonic have been unraveled based on the newly collected geophysical data. The basin has been filled with sediments of 200-1500 m in thickness and 6 identified seismic sequences. Eogene sequence is limited at trough center; while Neogene sequence covered in the whole basin with thickness of 200-1100 m. Quaternary sedimentary layer is thin hemipelagic deposits. The distal basin has three characters as follows. (1) Intensive magma activity occurred in the whole basin. It was characterized by a large amount of igneous intrusion and eruption on the seismic sections. (2) the rifting basin

基金项目:中国地质调查局项目(No. DD20191027);国家自然科学委-广东省联合基金重点基金项目(No. U1701245).

作者简介:汪斯毓(1988-),男,工程师,主要从事海洋科学研究.ORCID:0000-0002-7907-1981. E-mail:wangsiyuz1@163.com * 通讯作者:吴时国,E-mail:swu@idsse.ac.cn

引用格式:汪斯毓,王仕胜,刘艳锐,吴时国,2022.中沙海槽盆地构造与沉积作用及其对远端裂陷盆地演化的启示.地球科学,47(3):1094-1106.

Citation: Wang Siyu, Wang Shisheng, Liu Yanrui, Wu Shiguo, 2022. Tectonics and Sedimentation of the Zhongsha Trough Basin: Implications to the Basin Evolution in Distal Rifting Margin. *Earth Science*, 47(3):1094-1106.

located over acoustic basement. It has magmatic feature and varied at 6.0-10.4 km buried depth. (3) Buried depth of Moho varies between 15 and 24 km. It is thinner seaward and thick to coral reefal islands. The tectonic deformation is characterized by rifting structures which included NE-SW and NW-SE trending faults, of which the NE-SW striking faults controlled the Cenozoic depression development.

Key words: seismic sequence; acoustic basement; distal rifting basin; tectonic evolution; Xisha uplift; South China Sea; marine geology.

0 引言

张裂大陆边缘盆地的构造演化与深水油气系 统是国内外研究的热点(姚伯初等,1994,2005;李 家彪,2005;Weimer et al., 2006;张功成等,2007; Chen et al., 2020;袁野等,2021).远端张裂盆地,虽 然发育在减薄陆壳之上的超深水沉积盆地,但仍是 十分值得注意的勘探目标.中国地质调查局、中国 海洋石油总公司等权威机构预估南海远端深水沉 积盆地的油气资源量仍然十分丰富(张功成等, 2007;朱伟林等,2007;张浩等,2015).然而,由于远 端深水盆地位于张裂边缘,构造岩浆作用强烈、热 流值高、缺乏有效碎屑岩储层等进一步加大了勘探 的风险(吴时国等,2015;Dong et al., 2020).

中沙海槽盆地,位于南海北部远端大陆边缘,邻近大洋盆地,具有高度减薄的陆壳,特定的热结构和深水沉积体系.然而,目前人们对该盆地尚未展开细致的研究.为了加强对远端张裂盆地的认识,中国地质调查局海口海洋地质调查中心在中沙群岛及其周围完成了1:25万图幅重力、磁力、地震和OBS调查.据此最新资料, 笔者开展了针对中沙海槽盆地构造演化和深水油气理论的相关研究,该研究结果有助于深入探索远端裂陷盆地独特的构造演化模式.

关于南海北部陆缘演化已有较多论述(Taylor and Hayes, 1983;金庆焕, 1989;姚伯初等, 1994; Nissen et al., 1995;龚再升等, 1997;刘昭蜀等, 2002;李家彪等, 2005;Li et al., 2010;丁巍伟, 2021).20世纪80年代,广州海洋地质调查局与美国 哥伦比亚大学拉蒙特-多尔蒂地质观测所在该区开 展了测深、热流、重力、磁力声纳浮标和单道地震等 综合地球物理调查,揭示了南海海区的地壳结构, 基底性质及构造运动,完善了南海盆地的地质演化 历史(Taylor and Hayes, 1983;姚伯初等, 1994;Nissen et al., 1995).1983-1987年,国家海洋局第二海 洋研究所与联邦德国地球科学与自然资源研究所 在南海中部开展了南海地球科学联合调查.2006-2016年,广州海洋地质调查局先后在中沙海槽邻近区域实施了4个1:100万图幅的海洋区域地质调查,并对区域地质构造、地形地貌、地球物理场特征等进行了综合分析.最新实施的中沙1:25万图幅海洋地质调查,为探索南海区域地质演化历史提供了单道地震、多道地震、重磁测量数据和地质取样数据等大量详实的资料.

然而,远端裂陷盆地基底构造性质、年代地层 格架、构造岩浆活动以及中沙群岛与西沙群岛之间 的构造关系等诸多问题仍需要综合研究和进一步 探索.本文根据中沙群岛海域1:25万调查资料,综 合研究了中沙海槽盆地沉积层序和构造演化,进而 揭示远端张裂盆地的地质构造演化过程.

1 区域地质背景

南海北部陆缘在大地构造位置上位于欧亚 板块、印度-澳大利亚板块与太平洋-菲律宾板 块相互作用的区域(图1),且是太平洋构造域与 特提斯构造域的结合地带,构造特征十分复杂. 相关研究表明古南海在地质历史上受到特提斯 构造域演化的制约,其形成及演化过程与中新 生代时期周边板块的构造活动密切相关(龚再 升等,1997;李家彪等,2005;栾锡武等,2021).

中沙海槽盆地北邻西北次海盆,南邻西南次 海盆.该盆地位于南海北部限制性陆坡,地壳类 型为介于大洋型地壳与大陆型地壳之间的过渡 型地壳(刘昭蜀等,2002),发育一系列阶梯状断 层和不同规模的隆、坳构造带,属于远端裂陷盆 地.主要构造单元包括中西沙地块和深水海盆. 前者位于基底隆升区,在二级构造单元划分上属 于西沙隆起,在隆起上叠置的新生代盆地主要有 中沙海槽盆地、中沙南盆地以及碳酸盐台地.

中沙海槽盆地地形起伏变化大,地貌类型复杂. 该盆地水深范围在2600~3200m之间,地形上主 要表现为低陷的长条带状,沿西南-北东向延伸,主





要由中建斜坡东翼、中沙海台的西侧和槽底平原构 成.海槽槽坡地形陡峭,其中,西侧槽坡由西沙东海 脊南翼陡坡和中建斜坡东翼的众多海山山坡组成, 落差超过 500 m,坡度范围为 3.0°~24.2°;东侧槽坡 由中沙海台西侧台坡、海山山坡和中沙北海岭的海 山海丘山坡构成,落差高达2200m,坡度范围介于 3.8°~20.4°,与西侧槽坡坡度接近.研究区内槽底平 原长为226 km,宽约6.5~52.0 km,等深线稀疏,地 形相对比较平坦,自中部2500m水深段开始向东 北延伸倾斜下降,至深海盆地结束,水深3200m,落 差 700 m, 地形较为平缓, 坡度小于1°; 自中部 2 653 m水深段开始向南部延伸倾斜下降,在 3 830 m 水 深 段 融 入 到 中 沙 南 盆 地, 落 差 高 达 1177 m, 地形较为平缓, 平均坡度约0.28°. 邻近中沙 海槽盆地南北侧的深海盆地整体地形平坦,坡 度变化较小,整体地形变化趋势为自西北、北和 西南向东南部缓缓倾斜下降,自4000m~ 4 200 m 等深线一带向东南逐渐平缓下降,到东 南部水深达到4333m左右,以广阔平坦的平原 地形为主体,平均坡度为0.05°.

岛礁钻探表明,西沙隆起磁性基底主要为前寒 武纪变质岩及侵入岩组成的结晶基底,并且有晚中 生代角闪斜长片麻岩及花岗岩的存在(朱伟林等, 2017;Zhang et al., 2020).西永1井钻探显示,海相 中新统-第四系珊瑚礁沉积层于1251m深处直接 覆盖在前寒武纪变质基底之上,两者呈不整合接触. 其中,变质基底主要由花岗片麻岩、黑云花岗片麻 岩、黑云二长片麻岩及变晶混合岩组成,其同位素 Rb-Sr年龄为前寒武纪晚期(627 Ma)和晚白垩世(96 Ma、68.9 Ma),侵入岩脉年龄为77 Ma.西科1井的井深1257.52 m处存在片麻岩和花岗岩组成的结晶基底.基底岩性为片麻岩,其下为花岗岩岩墙,经Ar-Ar法测年得出它们的变质年龄为110 Ma和80 Ma. 琛科2井钻探深度为928.75 m,并于878.21 m深处发现珊瑚礁碳酸盐岩地层,其下为玄武质火山碎屑岩. 锆石 U-Pb年代学表明该火山碎屑岩的年龄主要集中在105~117 Ma、130~136 Ma、144~158 Ma之间,是晚侏罗世火山碎屑岩(Zhang *et al.*, 2020).

2 地层层序

2.1 地震反射界面特征

基于单道地震和多道地震数据,笔者在研究区 识别出8个地震反射界面,自下而上分别为 T_g 、 T_6 、 T_5 、 T_4 、 T_3 、 T_2 、 T_1 和 T_0 (图2),然而在单道地震剖面上 仅识别出 T_0 、 T_1 、 T_2 、 T_3 .各界面反射特征分述如下:

T_g界面为角度不整合面,主要为中-低频, 变振幅,中低连续-断续,具风化剥蚀面反射特征(图3和图4).界面上部为一套上超的中等连续反射层组;界面之下多为杂乱反射,在隆起区或高部位,界面呈不连续、强振幅反射,可见对下伏地层的削截作用,局部受基底火成岩的影响(图3和图4).T_g界面通常被认为是最早的张裂不整合面(古新统),在南海北部对应于燕山运动末期的神狐运动(姚伯初等,1994,2005).

T₆界面受断层或古隆起限制,在中沙海槽区和



图 2 地震层序与海平面变化特征

Fig.2 Seismic sequence and sea level curve

全球海平面变化参考Haq et al.(1987)和 Miller et al.(2011);地区海平面变化曲线参考西沙海区发表的文献,主要为王振峰等(2015)

中沙南盆地广泛分布.呈中频、中振幅、中-低连续、 双相位的地震反射.界面上、下两套地震反射波组 的反射特征明显不同,界面之上为一套中连续或 杂乱的反射层组,见明显上超特征(图3和图4). T₆界面为渐新统与中新统的分界面,对应于白云 运动,北部陆架的沉积盆地经历了从裂谷期到广 泛沉降的转变,在琼东南盆地表现为裂后不整合 界面.据1148井位年代模型,渐新世/中新世界线 事件开始于23.0 Ma,此时南海的海底扩张脊向 南跃迁(Briais *et al.*,1993;邵磊等,2009).

T₅界面在全区分布较普遍,局部高部位缺失. 总体呈中-高频、中-强振幅、中-高连续的地震反射 特征.该界面上、下地层主要以平行接触为主(图3 和图4),局部见低角度削截.界面上多为连续性较 好、中-高频的平行反射层组.局部因火成岩侵入, 该界面表现为连续的强反射(图3和图4).T₅界面为 中中新统与下中新统的分界面,对应南海停止扩张 的区域构造事件,与南沙地块与婆罗洲地块及菲律 宾岛弧碰撞的时间(15~17 Ma)几乎一致.

T₃界面呈中-高频、中-强振幅、高连续的地震 反射特征.界面上、下反射特征明显不同,多为中- 弱振幅的反射层组(图3和图4).界面与上、下地 震反射波组多以平行接触为主,在构造高部位见 上超或削截.该界面较稳定,易于追踪.T₃界面为 上中新统与中中新统的分界面.区域构造上,反映 菲律宾海板块与欧亚板块于13 Ma在民都洛岛发 生碰撞,南海海盆向东部马尼拉海沟初始俯冲,随 后澳大利亚板块和欧亚板块东南部于10 Ma在苏 拉威西岛发生碰撞(姚伯初等,2004).以上构造事 件在东南亚地区沉积盆地中均有强烈响应,不整 合面特征清晰,在南海表现为沉积速率变快和海 平面快速上升,代表盆地从慢速沉降到快速沉降 的转换期(11.6 Ma),对应南海北部东沙运动.

T₂界面呈高频、中-强振幅、高连续、双相位的 反射特征.在中沙海槽区、中沙南盆地及海盆区, 反射同相轴相对平直、稳定,与上、下地震反射波 组多以平行接触为主,可连续追踪;在西部构造高 部位,见明显的上超现象(图3和图4).局部地区 振幅较弱,连续性变差,较难追踪.T₂界面为上新 统与中新统的分界面,主要受海平面变化控制,与 晚中新世全球最大海平面下降事件相对应.

T₁界面呈高频、中-强振幅、高连续、双相位反

射特征,反射同相轴较平直、稳定,可连续追踪.界 面与上、下地震层序的地震波反射同相轴平行(图3 和图4),局部见削截及河道充填特征,部分地区 遭受滑塌体错断,局部受底冲刷影响,界面缺 失.T₁界面为第四系与上新统的分界面.

T。界面为海底地震反射界面,呈高频、强振幅、高连续、双相位反射特征(图3和图4),随海底起伏变化,在岩体边界处双相位特征不明显.

2.2 地震层序特征

本文根据地震资料的反射界面及反射层 组内部特征,结合区域地质资料进行综合分析,将研究区自上而下划分为A、B、C、D、E、 F共6个地震层序(图3~图5).

SQF(T₆~T_g)形成于晚渐新世,其顶界面为T₆

反射界面,底界面为T_s反射界面,底界较为粗糙,起 伏明显.该层序总体特征为中-低频、中-弱振幅, 中-低连续反射.该层序仅分布于发育较早、沉积厚 度大的凹陷内,与下伏反射层呈不整合接触,上覆 层组在中沙海槽盆地多见上超现象(图3和图4).

SQE(T₅~T₆)表现为中-高频、中-强振幅、 中-高连续反射,以平行-亚平行结构、席状披盖外 形为主,局部呈上超反射结构.对应下中新统三亚 组.该层序发育范围扩大,仅在隆起高部位缺失. 顶界面为T₅反射界面,底界面为T₆反射界面.与 下覆地层在受活动断层的影响方面有较大区别.

SQD(T₃~T₅)表现为中频、中-强振幅、中-高 连续反射,以亚平行结构为主,相较于层序E,内部 反射波组频率增高、连续性变好.对应中中新统,相



图 5 甲砂碎帽盆地地展坛厅 Fig.3 Seismic sequences across the Zhongsha trough basin a. shd-2测线; b. dbphz165m-1b测线



图 4 地震侧线 nh2d-inl500 解释剖面 Fig.4 Interpretation section of seismic Line nh2d-inl500



图 5 穿过中沙海槽盆地的地震剖面 Fig.5 Seismic section across the Zhongsha trough basin 该剖面揭示了主要构造单元和地震层序;地震剖面位置见图 1

当于琼东南盆地的梅山组.该层序在调查区广泛分布.顶界面为T₃反射界面,底界面为T₅反射界面.

SQC(T₂~T₃)为高频、强振幅、高连续的反射,具平行-亚平行反射结构(图3和图4).顶界上超或整合接触,局部有削截现象,底界上超、整合接触.对应上中新统,相当于琼东南盆地的黄流组,在调查区广泛发育.顶界面为T₂

反射界面,底界面为T₃反射界面.

SQB(T₁~T₂)总体以高频、中-强振幅、中-高连续反射为主(图3和图4),局部可见下切、前 积等地震反射结构.顶界上超或整合接触,局部 有削截现象,底界整合或上超接触,变形微弱、断 裂不发育.对应上新统,相当于琼东南盆地的莺 歌海组,发育范围较广,厚度相对稳定.顶界面为 T₁反射界面,底界面为T₂反射界面.

SQA(T₀~T₁)内部反射层组多以中-弱振幅、 中-高连续、平行-亚平行反射为主,在中沙海槽区 局部呈杂乱、空白反射结构(图3和图4).对应第 四系,相当于琼东南盆地的乐东组,该层序广泛发 育.顶界面为海底,底界面为T₁反射界面,局部因 受到底流冲刷而缺失,甚至形成大型沟谷.中沙海 台周缘斜坡区由于受重力滑塌作用影响,内部反 射结构强烈变形,改变了原始沉积构造面貌.

3 地质构造

3.1 构造运动

新生代以来,南海海盆主要经历了5次构造 运动,分别为神狐运动、南海运动、白云运动、东沙 运动及台湾造山运动.神狐运动发生于晚白垩世-早始新世,是南海北部陆缘沉积盆地成盆初始的 一次重要构造运动.在早白垩世全球性海进转为 晚白垩世海退过程中,在区域性拉张背景下,由于 南海北部陆缘的准平原化,地幔热上隆,上地壳被 削蚀,产生一系列NE向断裂,因而又被称之为 "裂开不整合"或"张裂不整合"(姚伯初等,1994; 龚再升等,1997).本研究区,在地震剖面上,T。反 射界面不整合覆于不同性质的基底上,基底之下 也可见不同的反射特征(图5).神狐运动奠定了 中沙海槽盆地的雏形,导致了西沙隆起和南海北 部 NE 走向断陷的形成,产生了一系列张性基底 断裂和彼此分离的地堑或半地堑.西沙隆起和 中沙隆起的深反射地震剖面表明,可能存在基 底拆离和变质核杂岩体(Franke et al., 2011;李 家彪, 2011; Huang et al., 2020). 所以, 神狐运动 在该区持续时间长,构造和岩浆作用强烈.

南海运动是发生于早、晚渐新世之间的一次重 要构造运动,在各沉积盆地中主要表现为抬升运 动,形成区域性破裂不整合.由于本研究区未见下 渐新统沉积,因此笔者推断在南海运动之前,研究 区一直处于剥蚀状态.该区海相环境与陆相环境在 南海运动时期发生了重要转变,此后形成了陆架陆 坡体系.白云运动发生在中新世与渐新世之间,在 珠江口盆地珠江组与下伏的珠海组之间发育与之 相对应的不整合沉积层.渐新世晚期调查区发生 沉降并接受沉积,并在末期发生白云运动,导致大 部分地区遭受抬升剥蚀.地震剖面上,该运动对应 调查区T₆反射界面,具有明显的削截、上超反射 特征(图3和图4).莺-琼盆地的三亚组与其下伏 的陵水组以及北部湾盆地的下洋组与其下伏 的涠州组之间属于假整合接触.南海东北部海 盆的相应反射界面的上、下层组之间为不整合 接触.基于 ODP1148 孔钻探资料可得出,23.8 Ma时研究区及邻域沉积速率和各种岩石地球 化学分析、孢粉含量曲线、有机质含量等均表 现出明显的突变(邵磊等,2009).基于该区的 地震剖面,在中西沙地区,断裂活动大多持续 到早中新世.因此,该区断拗转换可能延迟至 早中新世末,对应于西南次海盆扩张结束.

东沙运动发生于中中新世晚期和晚中新世早 期(距今约10.5 Ma),对应一次区域性的不整合,在 珠江口盆地韩江组与粤海组之间为不整合或假整 合接触.在海盆与陆坡的过渡带可见向海倾斜的上 超面,标志着该时期两者之间发生过相对强烈的差 异沉降.中中新世末至晚中新世早期,陆缘区沉降 幅度和沉积速率达到高峰期,并伴有区域性的玄武 质岩浆喷溢活动,此构造运动被称为东沙运动(姚 伯初等,1994;Wu et al., 2014).该运动对应研究区 地震剖面上的T₃反射界面,总体上连续,未出现明 显的沉积间断(图 3 和图 4).岩浆活动强烈,对应于 地幔柱活动.同时,该区构造沉降加速,导致该区 碳酸盐台地大量淹没和深海环境的形成.

台湾运动发生在中新世末至上新世之间(距 今约5 Ma).该期构造运动导致南海北部珠江口 盆地地震反射剖面上的万山组和粤海组之间为不 整合(或假整合)接触关系,在陆坡区粤海组的顶 面常出现剥蚀面的反射特点,在陆架区可以见到 在被夷成平面的基底隆起上沉积了万山组,在西 部陆架区的某些地段可以看到万山组下面的前积 反射结构.在中沙海槽盆地及西沙隆起构造运动 表现为加速沉降和强烈的岩浆活动,该期构造活 动导致大量碳酸盐台地减小和深水重力流沉积十 分发育,整个中沙-西沙海域进入深海环境.

3.2 断裂构造

中沙海槽盆地发育地垒和地堑构造样式,或 以半地堑或箕状构造单独出现,箕状构造的周围 发育侵入体,其侵入作用与箕状构造的形成有密 切联系(图5).地堑构造不对称,表现为一侧断 层数量多,断距小,而另一侧断层数量少,通常 只有一条断层,断距较大(图5).这种不对称地 堑构造与裂谷构造相类似,但规模明显偏小.

断裂构造以正断层为特征,走向为NE-NEE 向和NW向.NE-NEE向断层十分发育,规模和数 量都占优势,剖面上都表现为正断层特征,对新生 代沉积坳陷产生明显的控制作用,是调查区的主 要断裂系统.中中新世-第四纪断层规模比较小, 由于受岩浆活动的影响,部分火成岩体边缘或附 近的断层仍继续活动(邱燕等,2004,2021);而 NW 向断裂发育较少,主要分布在调查区中西 部,数量较少,规模中等.NW向断裂单个规模 不如较大的 NE 向断裂, 但彼此规模相当, 走向 近平行.根据断层切割地层及区域构造应力场 分析,该组断裂与NE-NEE向断裂同期形成, 两者具有共轭特征.中中新世后总体上断裂 活动明显减弱.晚白垩世-古新世的神狐运动 产生第一次拉张断陷运动,新生代张裂沉积 盆地开始发育,形成了一系列 NE-NEE 向边界 断裂控制的初始断陷.该时期研究区处于隆 起剥蚀状态,没有沉积记录,可能由于古老变 质基底刚性较强而不易产生断裂.

盆地断裂伸展作用十分活跃,断层活动一

直持续到 T₅反射层.众所周知,在琼东南盆地 和珠江口盆地,断拗转换面一般为中新世与 渐新世之间的界面,但在本区应该在中新世 与早中新世之间.说明该区断裂活动结束晚, 伸展一直持续到西南次海盆扩张结束.

4 远端裂陷盆地演化特征

4.1 磁性基底埋深变化大

中沙海槽盆地磁性基底南北差异显著,为进一步了解调查区磁性基底分布特征,利用磁异常向上 延拓 25 km(图 6)以消除浅源火成岩的磁异常效 应,获得反映磁性基底的磁异常.本研究使用 Parker法进行磁性基底顶面埋深反演,反演平均深度为 7 km,磁化强度为 800×10⁻³ A/m.由此可见该区 磁性基底顶面起伏较大,主要表现为"北深南浅", 与该区地壳结构特征相吻合(如图7所示).北部磁 性基底埋深在 7.0~10.4 km之间,其中,中沙海槽 北侧深度较大,磁性基底以印支-燕山期的浅变质 岩基底为主,且被同期或喜山期侵入岩复杂化.



Fig.6 Magnetic anomaly map in the study area



图 7 研究区磁性基底埋深分布 Fig.7 Magnetic basement buried depth in the study area

4.2 多期次强烈的岩浆作用

由重磁异常推测出的火成岩分布范围表明,中 沙海槽盆地及邻近海区发育大量岩浆岩,岩体数量 较多,大小不一,分布广泛(图8).磁异常解析信号 模在东部海区的中沙南海槽、盆西海岭和西南次海 盆表现为高值,反映该区岩浆活动强烈.图8中绿色 区域代表推测的燕山期岩浆岩,主要为中酸性花岗 岩类;红色部分则代表推测的喜山期岩浆岩,主要 为中-基性玄武岩类.重磁资料显示的岩体分布及 规模表明,燕山期岩浆岩在调查区分布较为广泛, 其中,西沙东海脊和中沙海槽岩浆岩规模较大,长 轴近5km,短轴近2km;中沙海台南部、中沙北海 岭岩浆岩规模中等,长轴约2km,短轴约1.0~ 1.5 km;东南部海盆内零星分布有小型岩体.喜山 期岩浆岩主要分布在中建斜坡、中沙南盆地和中 沙海台北部,其中中沙南盆地岩体规模最大,长轴 近5 km,短轴近3 km;而规模较小的中沙海台北 部岩体,长轴不足1km.形态上,岩浆岩体大多在 平面上呈现不规则多边形,亦有条带状、近圆状 岩体发育.调查区多道地震资料综合解释结果表 明,该区岩浆岩发育广泛,包括侵入型和喷出型 两大类型.该岩体在地震剖面上主要呈柱状发 育,内部杂乱反射,岩体边界清晰,易于追踪.

通常火山喷出岩的反射特征表现为:外形呈丘 形,内部为强振幅、低频、断续反射,具有斜交、平 行结构,兼有空白杂乱反射结构;火山锥上部常出 现披覆构造和地堑的反射特征;厚度大的火山岩体 (或火山锥)侧翼常有沉积岩上超现象,或沉积岩反 射轴与多期火山岩呈"指状"交错;由于岩浆浸染分 异,火山岩体之下出现杂乱反射,对于侵入岩,则 多表现为"刺穿型"和"层间型"的特征."刺穿型"火 成岩体是指岩浆以巨大膨胀力刺穿沉积岩层,冷凝 后形成与沉积岩层层理不一致的非谐和侵入体. 它们有着形式多样的反射形态和反射特征,比如圆 锥状反射通常表现为清晰的圆锥状轮廓,内部通常 为大量的杂乱短反射段,无正常反射,根部清晰,外 部两侧反射倾角较大,是岩墙侵入体的一种反 映: 而蘑菇状反射通常表现为较清晰的蘑菇状轮 廓,且内部无反射,根部较清楚,顶部有近于弧状 的反射,顶部外侧的一些短的强反射段可能是沿



图 8 中沙海槽盆地及其邻近海区域重磁推测的火成岩平面分布 Fig.8 The igneous map in the Zhongsha trough basin inferred from gravity and magnetic anomaly

层理侵入形成的,是岩株或者岩墙的一种反射特征."层间型"火成岩体是指岩浆沿沉积层层 理侵入形成的岩体,其主要特征是以突发的强 反射出现,延伸距离短,其形状取决于沉积地层 的形状,通常表现出岩盆、岩脉的反射特征.

喜山期岩浆活动可分为早(古新世-始新世)、中(渐新世-中中新世)、晚(晚中新世-全新世)三期.喜山早期即神狐运动期,以裂缝式喷发 玄武岩和溢流玄武岩为主,标志着新生代盆地初始-强烈的断陷作用;喜山中期对应南海运动期, 中央海盆主要为地幔物质分熔的玄武质岩浆生 成的洋壳和耸立在深海平原上的海山,陆缘区则 以中酸性侵入岩为主;喜山晚期基性喷出岩占主 导地位,形成一系列规模宏大的现代海山.

综上所述,新生代以来中沙海槽盆地及其 邻近海区岩浆活动频繁,发育多期次的岩浆 岩,火山、岩浆侵入体和岩浆岩席等以及相关 的构造现象相当丰富.浅部地层的断层和褶皱 可能受火山和沉积物变形双重作用影响,部分 岩浆明显受到断裂构造的控制.晚期岩浆活动 异常强烈,可能与海南地幔柱活动有关.

4.3 拆离的基底断块构造

西沙与中沙是否为同一地块?许多专家认为 它们具有相似的基底结构和沉积盖层特征,推测 中沙群岛海区基底为前新生代的变质岩、花岗岩 和玄武岩等组成的伸展断块构造(Ding and Li, 2012,2016).中德联合调查时在中沙浅滩东北端 礁盘上的 KD21站,拖网获得的黑云斜长片麻岩 具鳞片花岗变晶结构,片麻构造,但没有对其进行 年龄测定.中沙海槽和中沙群岛基底可能为古生 代变质岩,与西沙群岛基底岩性相同.海槽发育受 两侧新生代 NE 和 NEE 向一系列张性断裂带控 制.在西北次海盆拉张期间,在拉张引力的作用 下,中沙海槽盆地莫霍面上隆,导致同属元古代的 西沙地块和中沙地块分开.中沙海槽两侧发育一 系列断裂带,并从两侧向中间断落,槽底被后期沉 积物充填,新生代沉积厚度为500~2000 m.

研究区北部磁性基底埋深在 7.0~10.4 km之间,最深的地方位于中沙海槽北侧,磁性基底主要为印支-燕山期的浅变质岩基底,并被同期或喜山期侵入岩复杂化.调查区南部包括中建斜坡、中沙海台南部及东南陡坡、中沙南盆地、中央海盆,其中中建斜坡、中沙海台南部及东南陡坡磁性基底埋深在 6.5~7.0 km之间,中沙南盆地磁性基底埋深在 6.5~7.0 km之间,中沙南盆大洋玄武岩层顶面埋深在 5.0~6.8 km之间,最浅位于从中沙海台南侧陡坡进入洋盆的区域,该区域水深约4 200 m,反映出该处沉积层相对比较薄(图5).而从中沙海台东陡坡进入中央海盆区域大洋玄武岩层顶面埋深在 6.3~6.9 km之间,水深在4 000~4 300 m之间,反

映出该洋盆区域沉积厚度相对较厚的特征.

重力资料反演表明:中沙海槽盆地的莫霍面埋 深在15~24 km之间,OBS层析成像也证实了该结 果(郝天珧等,2011;黄海波等,2011;Huang et al., 2020).但中沙海台和东岛、浪花礁莫霍面埋深相对 较深,根据重力均衡假说,可以推断中沙海台、东 岛、浪花礁下面发育了"反山根",也说明了中沙 海台、东岛、浪花礁的形成演化受深部地壳结构 制约.洋壳莫霍面从洋陆转换带至洋盆方向,埋 深不断变浅,反映出洋壳不断减薄的趋势.

5 结论

中 沙海 槽 盆 地 裂 后 期 地 层 一 般 厚 200~ 1 500 m,可划分为 6 个地震层序.古近系分布相 对局限,仅在中沙海槽盆地和中沙南盆地的深 凹部位分布;新近系为全区分布,与古近系具有 一定的继承性,地层一般厚 200~1 100 m;第四 系厚度薄且变化小,为区域沉降期产物.

中沙海槽盆地主要经受了5次新生代构造运动,包括神狐运动、南海运动、白云运动、东沙运动和台湾造山运动.该远端张裂盆地处于伸展构造环境,其构造变形以伸展构造为主,断层走向主要有NE-SW向和NW-SE向,其中NE-SW向控制了新生代沉积坳陷的发育.

远端张裂盆地主要特征为:构造岩浆活动强 烈,岩体数量较多,平面分布范围较广.地震剖 面上反射特征证实有侵入型和喷发型两类,而 重磁异常综合解释推测出火成岩成分为中-酸 性和中-基性两类;裂陷盆地位于拆离的磁性基 底隆起之上,磁性基底北深南浅,埋深在 6.0~ 10.4 km之间;莫霍面埋深在 15~24 km之间,地 壳由陆向海逐渐减薄、由盆地到岛礁逐渐变厚.

References

- Briais, 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: Solid Earth, 98(B4): 6299-6328. https://doi.org/10.1029/92jb02280
- 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

- 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).
- Ding, W. W., Li, J. B., 2016. Propagated Rifting in the Southwest Sub-Basin, South China Sea: Insights from Analogue Modelling. *Journal of Geodynamics*, 100: 71-86. https://doi.org/10.1016/j.jog.2016.02.004
- Ding, W. W., Schnabel, M., Franke, D., et al., 2012. Crustal Structure across the Northwestern Margin of South China Sea: Evidence for Magma - Poor Rifting from a Wide-Angle Seismic Profile. Acta Geologica Sinica (English Edition), 86(4): 854-866. https://doi. org/10.1111/j.1755-6724.2012.00711.x
- Dong, M., Zhang, J., Brune, S., et al., 2020. Quantifying Postrift Lower Crustal Flow in the Northern Margin of the South China Sea. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 125(2): e2019JB018910. https://doi.org/ 10.1029/2019jb018910
- Franke, D., Barckhausen, U., Baristeas, N., et al., 2011. The Continent - Ocean Transition at the Southeastern Margin of the South China Sea. Marine and Petroleum Geology, 28(6): 1187-1204. https://doi.org/10.1016/ j.marpetgeo.2011.01.004
- Gong, Z. S., Li, S. T., Xia, K. Y., 1997. Basin Analysis and Petroleum Accumulation in the Northern South China Sea. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Hao, T. Y. Xu, Y., Sun, F. L., et al., 2011. Integrated Geophysical Research on the Tectonic Attribute of Conjugate Continental Margin of South China Sea. *Chinese Journal of Geophysics*, 54(12): 3098-3116 (in Chinese with English abstract).
- Haq, B. U., Hardenbol, J., Vail, P. R., 1987. Chronology of Fluctuating Sea Levels since the Triassic. Science, 235(4793): 1156-1167. https://doi.org/10.1126/science.235.4793.1156
- Huang, H. B., He, E. Y., Qiu, X. L., et al., 2020. Insights about the Structure and Development of Zhongsha Bank in the South China Sea from Integrated Geophysical Modelling. *International Geology Review*, 62(7-8): 1070-1080. https://doi.org/10.1080/00206814.2019.1653798
- Huang, H. B., Qiu, X. L., Xu, H. L., et al., 2011. Preliminary Results of the Earthquake Observation and the Onshore - Offshore Seismic Experiments on Xisha Block. *Chinese Journal of Geophysics*, 54(12): 3161-3170 (in Chinese with English abstract).
- Jin, Q. H., 1989. Geology and Hydrocarbon Resources in the

South China Sea. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).

- Li, C. F., Shi, X. B., Zhou, Z. Y., et al., 2010. Depths to the Magnetic Layer Bottom in the South China Sea Area and Their Tectonic Implications. *Geophysical Journal International*, 182(3): 1229-1247. https://doi.org/ 10.1111/j.1365-246X.2010.04702.x
- Li, J. B., 2005. Formation and Evolution of China's Marginal Seas and Resource Effects. China Ocean Press, Beijing (in Chinese).
- Li, J. B., Ding, W. W., Gao, J. Y., et al., 2011. Cenozoic Evolution Model of the Sea-Floor Spreading in South China Sea: New Constraints from High Resolution Geophysical Data. *Chinese Journal of Geophysics*, 54(12): 3004-3015 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. S., Zhao, H. T., Fan, S. Q., 2002. Geology of South China Sea. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Luan, X. W., Wang, J., Liu, H., et al., 2021. A Discussion on Tethys in Northern Margin of South China Sea. *Earth Science*, 46(3): 866-884 (in Chinese with English abstract).
- Miller, K., Mountain, G., Wright, J., et al., 2011. A 180-Million-Year Record of Sea Level and Ice Volume Variations from Continental Margin and Deep-Sea Isotopic Records. *Oceanography*, 24(2): 40-53. https://doi. org/10.5670/oceanog.2011.26
- Nissen, S. S., Hayes, D. E., Yao, B. C., et al., 1995. Gravity, Heat Flow, and Seismic Constraints on the Processes of Crustal Extension: Northern Margin of the South China Sea. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B11): 22447-22483. https://doi.org/ 10.1029/95jb01868
- Qiu, Y., Huang, W. K., Du, W. B., et al., 2021. Analysis on the Formation of the Thin Continental Crust in the South China Sea. *Earth Science*, 46(3): 899-915 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, Y., Peng, X. C., Li, W. C., et al., 2004. Characteristics of Geology and Geophysics of the Slop in Qiongdongnan Basin, the South China Sea. Gresearch of Eological South China Sea, (1): 55-65 (in Chinese with English abstract).
- Shao, L., Pang, X., Zhang, G. C., et al., 2009. Late Oligocene Tectonic Event in the Northern South China Sea and Its Implications. *Earth Science*, 34(5): 717-724 (in Chinese with English abstract).
- 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. American Geophysical Union, Washington, D. C., https://doi.org/ 10.1029/gm027p0023

- Wang, Z. F., Cui, Y. C., Shao, L., et al., 2015. Carbonate Platform Development and Sea-Level Variations of Xisha Islands: Based on BIT Index of Well Xike-1. *Earth Science*, 40(5): 900-908 (in Chinese with English abstract).
- Weimer, P., Slatt, R. M., Bouroullec, R., et al., 2006. Introduction to the Petroleum Geology of Deepwater Setting. American Association of Petroleum Geologists, Tulsa. https://doi.org/10.1306/st571314
- Wu, S. G., Gao, J. W., Zhao, S. J., et al., 2014. Post-Rift Uplift and Focused Fluid Flow in the Passive Margin of Northern South China Sea. *Tectonophysics*, 615–616: 27–39. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.12.013
- Wu, S. G., Wang, D. W., Yao, G. S., 2015. Geophysical Recognition of Deep Water Deposits and Reservoirs in the South China Sea. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Yao, B. C., Wan, L., Liu, Z. H., 2004. Tectonic Dynamics of Cenozoic Sedimentary Basins and Hydrocarbon Resources in the South China Sea. *Earth Science*, 29(5): 543-549 (in Chinese with English abstract).
- Yao, B. C., Wan, L., Wu, N. Y., 2005. Cenozoic Tectonic Evolution and the 3D Structure of the Lithosphere of the South China Sea. *Regional Geology of China*, 24(1): 1-8 (in Chinese with English abstract).
- Yao, B. C., Zeng, W. J., Hayes, D. E., 1994. The Geological Memoir of South China Sea Surveyed Jointly by China and USA. China University of Geosciences Phess, Wuhan (in Chinese).
- Yuan, Y., Zhao, M. H., He, E. Y., et al., 2021. The Crustal Structures and Rift-Breakup Models of Typical Rifted Margins. *Earth Science*, 46(3): 801-816 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. C., Mi, L. J., Wu, S. G., et al., 2007. Deepwater Area—The New Prospecting Targets of Northern Continental Margin of South China Sea. Acta Petrolei Sinica, 28(2): 15-21 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H., Shao, L., Zhang, G. C., et al., 2015. Distribution and Petroleum Geologic Significance of Eocene Marine Strata in the South China Sea. *Earth Science*, 40(4): 660-670 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y., Yu, K. F., Qian, H. D., et al., 2020. The Basement and Volcanic Activities of the Xisha Islands: Evidence from the Kilometre-Scale Drilling in the Northwestern South China Sea. *Geological Journal*, 55(1): 571-583. https://doi.org/10.1002/gj.3416

- Zhu, W. L., Xie, X. N., Wang, Z. F., et al., 2017. New Insights on the Origin of the Basement of the Xisha Uplift, South China Sea. Science in China (Series D), 47(12): 1460-1468 (in Chinese).
- Zhu, W. L., Zhang, G. C., Yang, S. K., et al., 2007. Natural Gas Geology of Continental Margin Basin in Northern South China Sea. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).

附中文参考文献

- 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.
- 龚再升,李思田,夏堪原,1997.南海北部大陆边缘盆地分 析与油气聚集.北京:科学出版社.
- 郝天珧,徐亚,孙福利,等,2011. 南海共轭大陆边缘构造属
 性的综合地球物理研究.地球物理学报,54(12):
 3098-3116.
- 黄海波, 丘学林, 徐辉龙, 等, 2011. 南海西沙地块岛屿地震 观测和海陆联测初步结果. 地球物理学报, 54(12): 3161-3170.
- 金庆焕, 1989. 南海地质与油气资源. 北京: 地质出版社.
- 李家彪,2005.中国边缘海形成演化与资源效应.北京:海洋 出版社.
- 李家彪,丁巍伟,高金耀,等,2011.南海新生代海底扩张的 构造演化模式:来自高分辨率地球物理数据的新认识. 地球物理学报,54(12):3004-3015.
- 刘昭蜀,赵焕庭,范时清,2002.南海地质.北京:科学 出版社.
- 栾锡武, 王嘉, 刘鸿, 等, 2021. 关于南海北部特提斯的讨

论.地球科学,46(3):866-884.

- 邱燕,黄文凯,杜文波,等,2021.南海边缘海减薄陆壳成因 剖析.地球科学,46(3):899-915.
- 邱燕,彭学超,李文成,等,2004.琼东南盆地陆坡区地质--地球物理特征分析.南海地质研究,(1):55-65.
- 邵磊, 庞雄, 张功成, 等, 2009. 南海北部渐新世末的构造事件. 地球科学, 34(5): 717-724.
- 王振峰,崔宇驰,邵磊,等,2015.西沙地区碳酸盐台地发育 过程与海平面变化:基于西科1井BIT指标分析数据. 地球科学,40(5):900-908.
- 吴时国,王大伟,姚根顺,2015.南海深水沉积与储层的地球 物理识别.北京:科学出版社.
- 姚伯初,万玲,刘振湖,2004. 南海海域新生代沉积盆地构造 演化的动力学特征及其油气资源. 地球科学,29(5): 543-549.
- 姚伯初,万玲,吴能友,2005.南海新生代构造演化及岩石 圈三维结构特征.地质通报,24(1):1-8.
- 姚伯初,曾维军, Hayes, D. E., 1994. 中美合作调研南海地 质专报. 武汉:中国地质大学出版社.
- 袁野,赵明辉,贺恩远,等,2021.张裂陆缘地壳结构特征与 张裂模式.地球科学,46(3):801-816.
- 张功成,米立军,吴时国,等,2007.深水区:南海北部大陆 边缘盆地油气勘探新领域.石油学报,28(2):15-21.
- 张浩, 邵磊, 张功成, 等, 2015. 南海始新世海相地层分布及 油气地质意义. 地球科学, 40(4): 660-670.
- 朱伟林, 解习农, 王振峰, 等, 2017. 南海西沙隆起基底成因 新认识. 中国科学(D辑), 47(12): 1460-1468.
- 朱伟林,张功成,杨少坤,等,2007.南海北部大陆边缘盆地 天然气地质.北京:石油工业出版社.