

琼东南盆地中央坳陷带岩浆活动及其双动力控制模式

宋志斌¹, 许延成¹, 喻静远¹, 王征², 任建业^{1,3*}

1. 中国地质大学海洋学院, 湖北武汉 430074

2. 自然资源部第二海洋研究所, 海底科学与划界全国重点实验室, 杭州 310012

3. 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

摘要: 琼东南盆地中央坳陷带属于超伸展盆地, 表现为地壳强烈薄化和高热流特征, 并经历活跃的岩浆作用, 形成多期次、广泛分布的火成岩。本文基于覆盖全区 3D 地震数据, 以独特的地震反射结构的识别、追踪、制图和分析为依据, 系统开展中央坳陷带岩浆活动类型、特征和分布规律的研究, 深入分析其发育的区域构造动力学背景。结果表明, 研究区发育岩床、岩墙及岩盖等侵入体和以万户海山为代表的火山建造群及热液喷口。通过岩浆活动与围岩地层之间的关系, 划分出五期岩浆活动幕, 第三、四幕 (15.97-5.7Ma) 是岩浆活动集中发育时期。基于地壳拆离薄化程度的定量计算, 结合前人对海南地幔柱的研究成果, 探讨了琼东南盆地中央坳陷带岩浆活动的区域构造背景, 建立了琼东南盆地地幔柱-板块运动双动力控制的岩浆活动模式。

关键词: 琼东南盆地, 超伸展地壳, 万户海山, 海南地幔柱, 火山建造

中图分类号: P736

收稿日期: 2025-11-17

Magmatic Activity and Dual-Dynamic Control Model in the Central Depression Zone of the Qiongdongnan Basin

Song Zhibin¹, Xu Yancheng¹, Yu Jingyuan¹, Wang Zheng², Ren Jianye^{1,3*}

1. College of Marine Science and Technology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Key Laboratory of Submarine Geosciences, Second Institute of Oceanography, Ministry of

基金项目: 国家科技重大专项项目(No.2025ZD1402801).

作者简介: 宋志斌(1999-), 男, 博士研究生, 主要从事大陆边缘构造演化和岩浆活动方面的研究。ORCID:0009-0008-4307-8998. E-mail: 2202410462@cug.edu.cn

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

作者贡献度说明: 宋志斌: 地震解释, 图件编绘, 论文撰写; 任建业: 提出研究设计, 提供研究资料, 指导修改图件及全文; 许延成: 修改论文与图件; 喻静远: 修改论文与图件; 王征: 修改论文与图件

Natural Resources, Hangzhou 310012, China

3.Hubei Key Laboratory of Marine Geological Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The central depression zone of the Qiongdongnan Basin belongs to the **hyper-extended** basin, which is characterized by strong crustal thinning and high heat flow. It has experienced active magmatism and formed multi-stage and widely distributed igneous rocks. In this manuscript, based on the 3D contiguous seismic data covering the whole area, based on the identification, mapping, tracking, and analysis of unique seismic reflection structures, this study systematically investigates the types, characteristics, and distribution patterns of magmatic activities in the central depression zone, and conducts an in-depth analysis of the regional tectonic dynamics background underlying their development. The results show that the study area has developed intrusive bodies such as sills, dykes and laccoliths, and a wide range of volcanic architecture and hydrothermal vents represented by Wanhu seamount. Through the analysis of the relationship between magmatic activity and surrounding rock strata, five stages of magmatic activity are divided, among which the third and fourth stages (15.97-5.7Ma) are the most concentrated periods of magmatic activity. Based on the quantitative calculation of the thinning degree of crustal detachment, combined with the previous research results of Hainan mantle plume, the regional tectonic background of magmatic activity in the central depression zone of the Qiongdongnan Basin is discussed, and the magmatic activity model controlled by mantle plume-plate movement in the Qiongdongnan Basin is established.

Key words: Qiongdongnan Basin; Hyperextended crust; Wanhu seamount; Hainan mantle plume; Volcanic architecture.

1. 引言

南海是中国最大的边缘海，也是中国唯一发育洋壳的海盆。琼东南盆地位于南海北部伸展型被动陆缘的西部（图 1a），位于海南岛与西沙群岛之间的海域，盆地西部通过 F1 与莺歌海盆地相邻，北部以海南岛与北部湾盆地相隔，东部通过西沙海槽与南海的西北次海盆相连，南部为西沙群岛，东西长约 290km，南北宽约 181km，总体呈东西向展布，面积达 $4.5 \times 10^4 \text{km}^2$ （图 1b）。

前人根据滨海露头观测、深海拖网样品分析、钻井数据以及地球物理勘探资料综合分析，南海属于岩浆活动较为活跃的区域（Sun et al., 2015; Gao et al., 2019; Zhang et al., 2023; 杨天一等, 2025）。现今海南岛的地壳厚度 20-30km，向琼东南盆地中央坳陷带过渡逐步伸展减薄，新生代岩浆活动变得强烈和广泛，前人曾对琼东南盆地岩浆作用开展过研究，认为在在岩石圈强烈伸展减薄的背景下，深部热动力过程导致了显著的高热流异常（施小斌等, 2017）。通过 OBS 数据采集发现琼东南盆地内存在三个贯穿地壳的地震纵波低速异常体，认为该异常是海南

地幔柱岩浆上涌通道的表现（夏少红等，2022），识别出万户海山在内的大规模火山建造及其分布在周缘地层中的侵入体群（Zhao et al.,2016）。而海南地幔柱作为南海西北陆缘岩浆活动的稳定热源，近年通过层析成像及火成岩资料得以更精确界定，其主体位于海南岛、琼东南盆地、西沙地块及中沙海槽之下 400–600 km（夏少红等, 2022； Xia et al., 2024）。

本文数据来源依托于中海石油（CNOOC）有限公司海南分公司，在典型对比确定各类火成岩典型反射特征的基础上，通过高精度三维地震资料的精细解释、特殊处理制图及分析，确定了琼东南盆地中央拗陷带火成岩类型、时空分布规律，结合区域构造事件阐明其发育的区域构造背景。

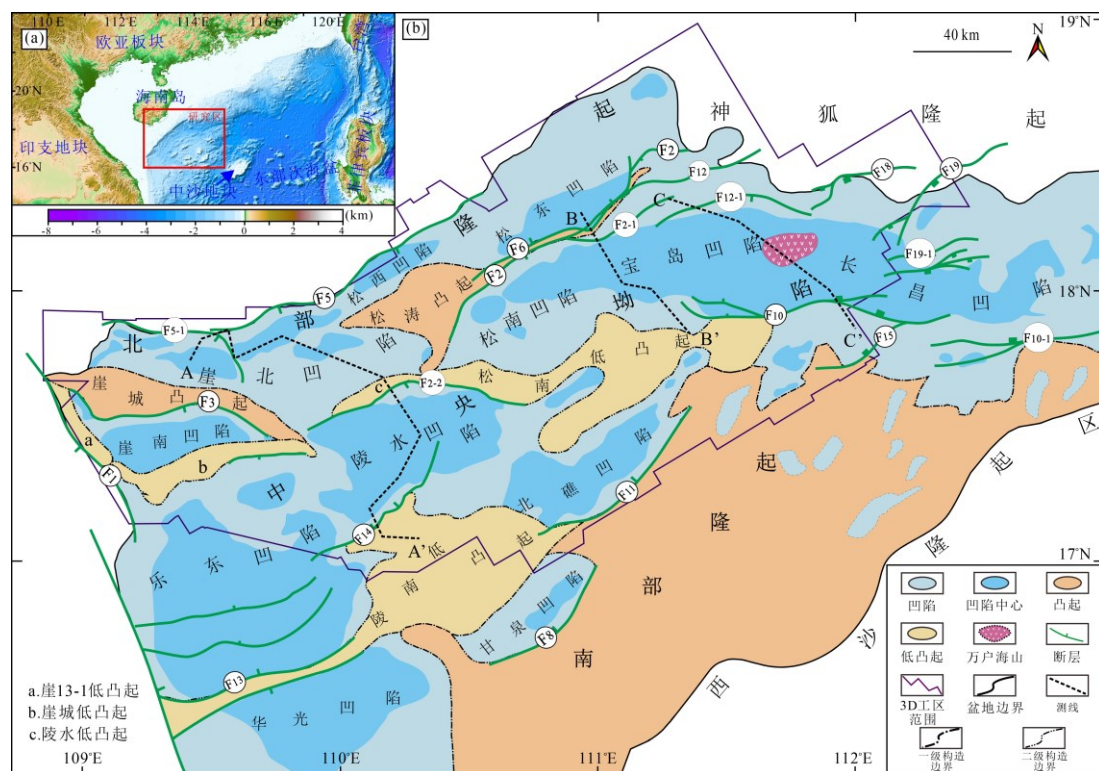


图 1 琼东南盆地构造单元图

Fig.1 Tectonic unit map of the Qiongdongnan Basin.

2. 区域地质背景

琼东南盆地位于特提斯构造域与环太平洋构造带的交汇区域，受欧亚板块、印澳板块（印支地块）及太平洋板块相互作用共同控制（任建业等，2018）。新生代以来，在南海扩张及洋脊跃迁、太平洋板块俯冲等构造事件的影响下，盆地逐渐演变为现今的构造格局，在平面上呈现出“南北分带、东西分块”的展布特征。琼东南盆地由北部隆起区、中央拗陷带和南部隆起区 3 个一级构造单元组成（图 1）。北部隆起区包括崖北、崖南、松西和松东等凹陷，位于盆地北部陆架浅水区，为受控于北东向断层的小型地堑和半地堑，沉积厚度相对较薄。南部隆起区也为一系列 NE 向小断陷，甘泉和北礁等凹陷，位于盆地南部，靠近西沙隆起区，构造活动相对较弱。

中央坳陷带是盆地主体和沉降中心,规模巨大,新生代沉积厚度最大可达 12km,自西向东包括了乐东、陵水、松南、宝岛和长昌等凹陷,位于地壳极端薄化区,其中陵水凹陷和宝岛凹陷下伏地壳厚度 6-8km,松南凹陷下伏地壳厚度约 10km,长昌凹陷下伏地壳约至 4-5km。琼东南盆地内主要拆离断层(2号、12号、14号、15号)总体呈 NE 走向,形成于早渐新世;而宝岛-长昌凹陷同时发育 EW 走向的拆离断层(10号与 12-1号),形成时代为晚渐新世,两者在走向与形成时期上差异显著。在 F2、F2-2、F10、F13、F14、F18 等大型低角度拆离断层强烈薄化的作用下,中央坳陷带发育成为深水-超深水盆地。中央坳陷带与南部隆起之间为陵南低凸起和松南低凸起,而与北部隆起带之间为崖南低凸起和松涛凸起。

根据琼东南盆地构造地层格架可以观察到前新生代地层为结晶基底(图 2),由火山岩、碳酸盐岩及变质岩混合物组合而成。始新世(T100-T80)是初始裂陷阶段,主要由砂岩夹杂泥岩组成;早渐新世崖城组(T80-T70)由下到上分为三段,一段由灰岩、粗砾岩夹浅灰色泥岩组成,二段由厚层泥岩夹砂岩组成,三段上部由页岩和泥岩夹杂灰色砂岩组成,可见煤层,下部棕红色砂砾岩夹薄层深灰色泥岩组成;晚渐新世陵水组(T70-T60)分为三段,一、二段表现为灰色块状砂岩与泥岩互层;三段由浅灰色粗砾岩夹灰色泥岩组成;早中新世三亚组(T60-T50)是盆地进入裂后阶段初期的沉积地层,可分为两段,表现为灰色块状砂岩和泥岩不等厚互层;中中新世梅山组(T50-T40)分两段,一段由灰色砂岩夹泥岩和生物灰岩组成,二段表现为块状砂岩和泥岩互层;晚中新世黄流组(T40-T30)分为两段,均表现为灰色泥岩和砂岩、粉砂岩互层;上新世莺歌海组(T30-T20)一段由粘土夹砂岩、粉砂岩组成;二段表现为灰绿色泥岩和砂岩互层。乐东组(T20以上)由灰色粘土夹粉砂岩组成,富含生物碎片。

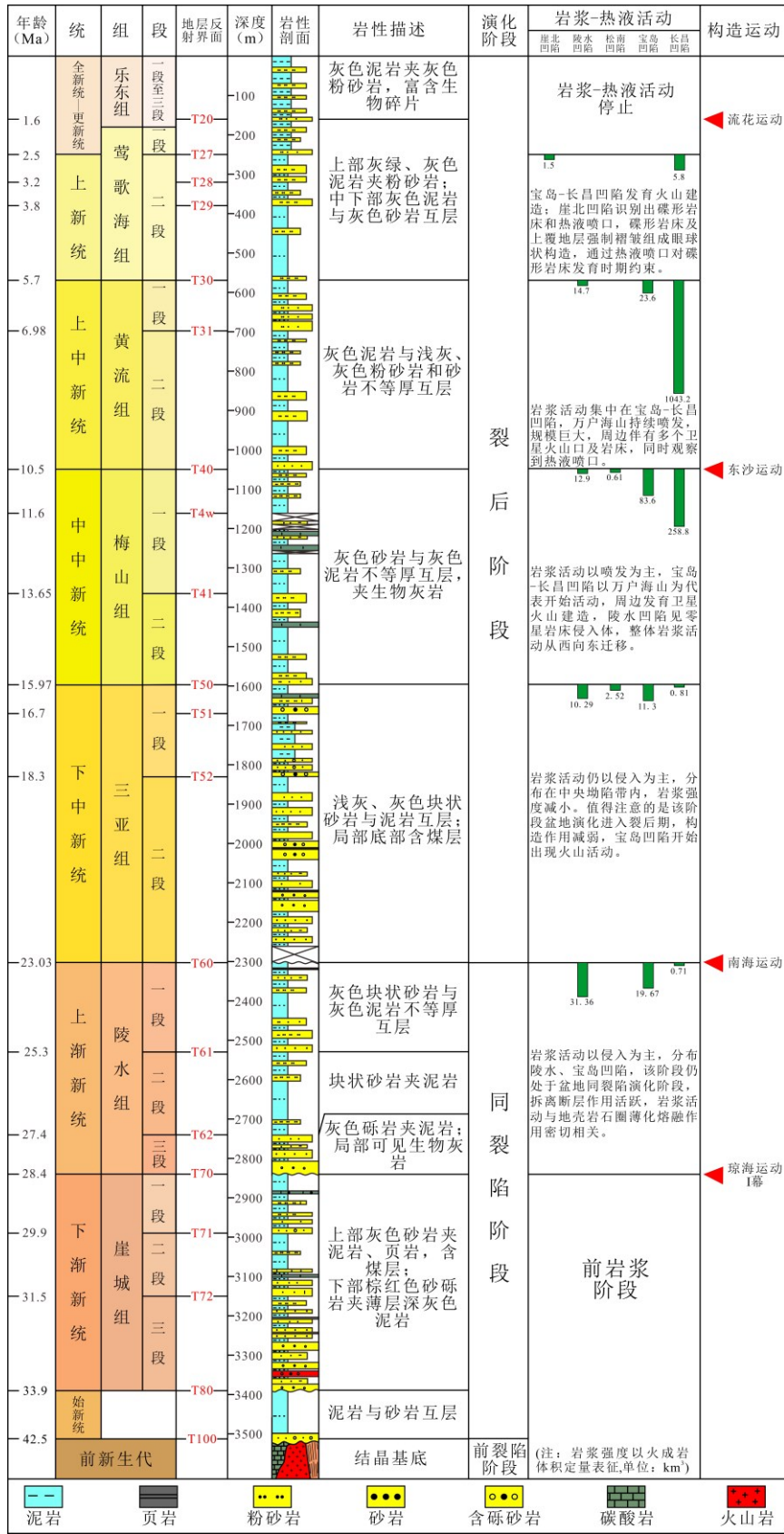


图2 琼东南盆地地层划分、岩浆活动和构造背景综合柱状图 (据裴健翔等, 2024 修改)

Fig.2 Integrated stratigraphic, magmatic, and tectonic column of the Qiongdongnan Basin (modified after Pei et al., 2024).

3. 中央坳陷带岩浆活动时空分布规律

3.1 火成岩地震反射特征及发育时期判别标志

准确判别火成岩类型及其发育时期，关键在于综合运用钻井、地震解释和处理技术。钻井资料作为连接地震反射特征与地下地质体的重要桥梁，能够提供直接的“点”上信息；通过岩心可直接观察和鉴定火成岩类型，借助测井曲线可建立不同岩性的测井响应模式，并对地震剖面进行精确层位标定。然而钻井信息受空间局限性和完整性制约，难以覆盖整个盆地。因此，必须在钻井标定的基础上，广泛依托地震解释与处理技术开展区域研究。通过精细的地震解释，分析火成岩在地震资料中呈现的形态、结构等独特“地震相”特征及其与围岩的时空关系，可以系统识别火成岩类型、确定其特征与分布，进而推断其发育时期。由于不同火成岩在形成方式和岩石物理性质（如速度、密度）上存在差异，他们在地震剖面上往往留下具有鉴别意义的独特“印记”。

由于不同类型火成岩的结构形态与演化阶段各异，因此其地震反射特征和发育时期的判定方法也相应不同，表 1 综合了研究区内主要火成岩类型的地震反射特征及其发育时期的判别标志。但在实际工作中，针对某一特定火成岩体进行类型识别和时期判定时，宜综合运用多种方法相互约束，以提高解释的可靠性。

岩床（基性岩）：地震剖面呈现整合侵入，厚度变化不大，尖端常向上倾斜，其内部和外部反射特征一致，保持平板状结构，若识别出结构复杂、垂向叠加、横向分布广泛的强振幅反射体，多识别为岩床复合体（Mclean et al., 2017;）。因此岩床的标志性识别特征为：地震反射为强振幅连续反射，强振幅尖端与围岩突然截止，或微弱上翘倾斜（Thomson et al., 2004; Planke et al., 2005）。

岩盖：岩浆体纵向变化大，向四周扩散范围较小，底部较平坦，但顶部向上发生隆起，地震剖面上岩盖表现为中间厚两侧薄的平底半圆形，岩盖侵入体上部地层中观察到强振幅连续反射特征，这是由于岩盖作为岩浆源通过断层或岩墙向上输送，在上部地层中形成成层性良好的岩床侵入体（Mclean et al., 2017）。

岩墙：地震剖面呈现不整合侵入，厚度均一但深度变化显著，是岩浆沿着地层中存在的裂隙形成的，在三维空间结构具有面状几何特征的结构体。因垂直-近垂直刺穿地层，波阻抗界面难以形成有效反射并被海底地震仪接收，因此在地震剖面中往往呈现弱反射的线性几何特征（Cao et al., 2023）。通常在喷出岩下方，连接上下岩体、倾斜或直立的杂乱反射。

火山建造：岩浆侵入到地层中，并持续向上运移到地表发生喷发，形成火山建造，在地震剖面上表现为火山体外边界强振幅连续反射，内部杂乱空白反射（Sun et al., 2015）。火山在发育过程中，喷出的物质会在其两侧堆积，形成锥形火山；若喷发时爆发力过强，则可能导致地层塌陷，从而形成火山口型火山

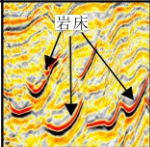
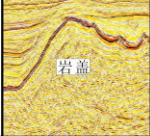
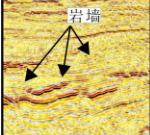
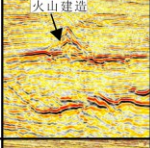
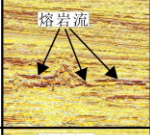
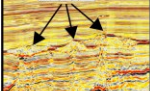
(Bischoff et al., 2019)。

熔岩流：火山喷发时沿火山侧翼溢流出的物质，遇海水后迅速发生冷却，粘度增大，地震剖面中熔岩流呈现连续的强振幅层状反射特征，分布在火山两侧 (Zhao et al., 2016)。

热液喷口：由热液流体和/或火山碎屑沉积物的破裂、运输和喷发形成的类似管状的复合体形式 (Hansen et al., 2006)，这种构造被认为是在海底的裂缝，其中有渗透水产生的地热异常。热液喷口是火山活跃地区附近的结构，主要与岩床复合体有关。Hansen. D. M. et al. (2006) 将热液喷口类型划分为 3 种：圆顶状、眼球状以及火山口状。圆顶状底部平坦，与上覆地层关系表现为上超现象，内部呈现杂乱反射特征；眼球状呈现上凸下凹的边界特征，内部呈现下超反射；火山口状热液喷口类似火山坑，底部突然被截断，上覆地层整合接触，内部几何形态在水平观测呈现洋葱状结构。

表 1 岩浆-热液活动产状类型、地震反射特征及发育时期判定方法汇总

Table.1 Summary of magma-hydrothermal occurrence types, seismic reflection characteristics, and criteria for determining their emplacement ages.

活动类型	产状类型	地震剖面	地震反射特征	发育时期判定方法	
岩浆活动	侵入岩	岩床	 <p>岩床</p>	横向广泛发育 与围岩界限分明 强振幅反射 上覆地层发生褶皱 多以复合体形式出现，各岩床通过岩墙连接，之间存在岩浆供给关系	侵入体与围岩接触关系： (1)上覆地层隆起，形成顶薄翼厚特点，因此具有顶薄翼厚特点的地层判定为侵入体形成时期； (2)上覆地层隆起，将在隆起上首次出现上超的地层判定为侵入体形成时期； 侵入体相关热液喷口的界面：热液喷口形成的底界面作为下方侵入体形成的时间。
		岩盖	 <p>岩盖</p>	边界呈弧形强振幅 内部具良好成层性 上覆地层发生隆起 改造沉积盆地边界	
		岩墙	 <p>岩墙</p>	弱反射特征 两侧地层错断 垂向分布广 线性结构特点 内部狭窄 近垂直发育	
	喷出岩	火山建造	 <p>火山建造</p>	顶底边界呈强反射特征 与围岩分界明显 内部杂乱空白反射 大型火山四周发育卫星火山口 下部地层破碎 岩浆通道不易识别 岩浆通道四周发育岩床侵入体 火山锥侧翼沉积层常有上超现象 呈席状分布 与火山岩指状交错	火山建造底界面所在层位： (1)火山喷发前：岩浆通道两侧明显上牵引现象； (2)火山喷发时：地层呈现强振幅半连续反射，呈放射状； (3)火山喷发后：地层厚度变化不大，与火山建造呈现低角度向上牵引或垂直的不整合接触关系。
		熔岩流	 <p>熔岩流</p>	强振幅层状反射特征 堆积分布在火山锥两侧	
热液活动	热液喷口	 <p>热液喷口</p>	圆顶状底边界与基底整合接触 上覆地层上超 内部呈杂乱反射 眼球状上凸下凹 与基底下挠整合 与地层不整合接触 内部杂乱反射	根据热液喷口底界面来判断其形成时间	

对火成岩产状类型进行系统识别后，进一步判定其发育期次对于研究盆地中岩浆活动的时空分布规律至关重要。目前岩浆活动发育时期判定主要有以下几种

方法：1.侵入体与围岩接触关系（上覆地层厚度、地层接触关系），主要利用出现顶薄翼厚特征的层位，以及上覆地层隆起形成地层上超的现象来对侵入体发育时期进行约束（张峤等，2014）；2.火山建造底界面所在层位，火山喷发前岩浆通道两侧明显上牵引现象，喷发时地层呈强振幅半连续反射，喷发后地层厚度变化不大，与火山建造呈低角度上牵引不整合接触关系（Bischoff et al.,2019）；3.侵入体相关热液喷口所在界面，由于一些侵入体上方并未形成顶薄翼厚的特征或者出现上超现象等，但在其上方观察到因侵入体所导致的热液喷口，因此将热液喷口的喷发时间作为下方侵入体的侵入时期（Alvarenga et al.,2016）。

3.2 中央拗陷带火成岩产状类型

琼东南盆地中央拗陷带主要识别出侵入岩和喷出岩以及相伴生的热液喷口，侵入岩包括岩床、岩盖、岩墙，喷出岩包括火山建造和熔岩流。

根据地震资料在研究区共识别出 4 类岩床侵入体（图 3a），包括碟形岩床、攀升型岩床、板状岩床及岩床复合体。如图 3b、c 所示，岩床地震反射表现为“负-正-负”特征，形态表现为两端上翘，因形似碗碟而命名为碟形岩床，而在岩床侵入过程中会造成上覆地层发生褶皱，形成眼球状构造。在碟形岩床上方观察到相伴生的圆顶状/丘状隆起结构，内部杂乱空白反射，边界反射特征明显，与围岩不整合接触，下部地层明显刺穿，呈上牵引结构，判定为与岩浆活动有关的热液喷口。根据碟形岩床上覆褶皱的上超界面以及热液喷口底界面对碟形岩床发育时期进行约束，图 3b、c 中碟形岩床 T30-T20 时期发育，图 3e 中碟形岩床和热液喷口在 T40-T30 时期发育。

火山活动在琼东南盆地中主要集中发育在宝岛-长昌凹陷，识别到以万户海山为代表的锥形火山（图 4）和火山口型火山（图 5b）。图 4b、c 观察到火山顶底界面呈现强振幅反射特征，下部地层呈“λ”结构向上牵引，两侧地层破碎严重，但分布在火山锥两侧的熔岩流，地震剖面显示其层状结构明显，强振幅半连续堆叠反射。根据火山建造底界面，判断万户海山在 T50 时期开始喷发，后期一直持续到 T30，周边发育的卫星火山口以及熔岩流界面反射特征可以判断万户海山是一个多期次喷发形成的大型火山群。周边发育的火山下方可以观察到碟形岩床，而在岩床之间以及岩床-火山之间识别到岩墙（图 4d），呈现垂直-近垂直刺穿下部地层的弱反射线性结构，可以作为岩浆向上运移的通道。

琼东南盆地中央拗陷带热液喷口主要集中形成于浅部地层，活动范围较为广泛，地震剖面上内部呈现杂乱空白反射，其热液通道粗细不同，如图 3b 所示热液喷口主要表现为圆顶状和眼球状，分布在崖北凹 5 号断裂及陵南低凸起周边，崖北凹陷内热液喷口主要与下方岩床共生，根据热液喷口喷发界面判断其主要在 T30-T20 时期发育。

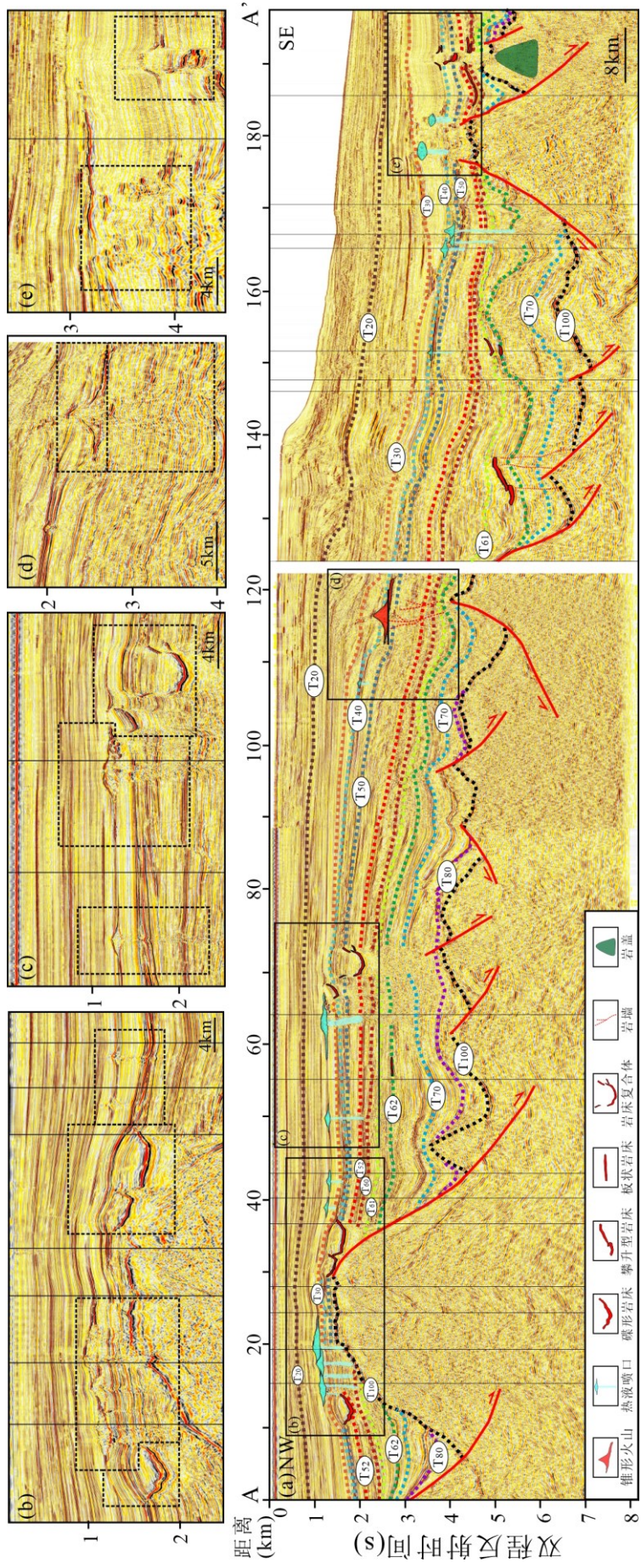


图3 琼东南盆地火成岩、热液活动类型及地震反射特征 (剖面位置见图1)
 Fig.3 Igneous rocks and hydrothermal activity types and their seismic reflection characteristics in the Qiongdongnan Basin (for location see Fig.1).

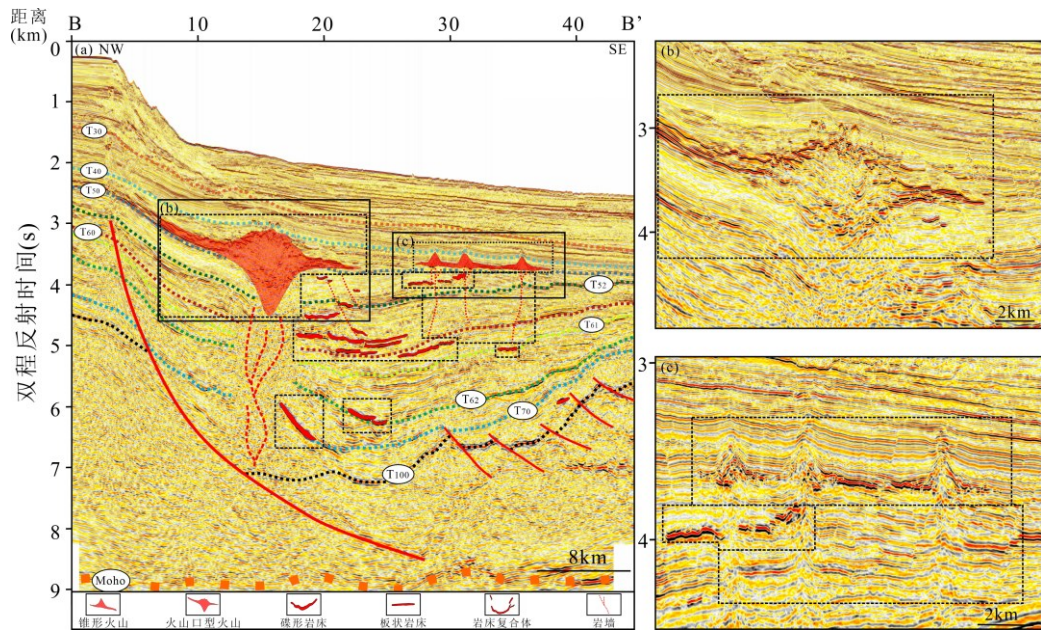


图 4 琼东南盆地火山建造类型及地震反射特征（剖面位置见图 1）

Fig.4 Volcanic edifice types and seismic reflection characteristics in the Qiongdongnan Basin (for location see Fig.1).

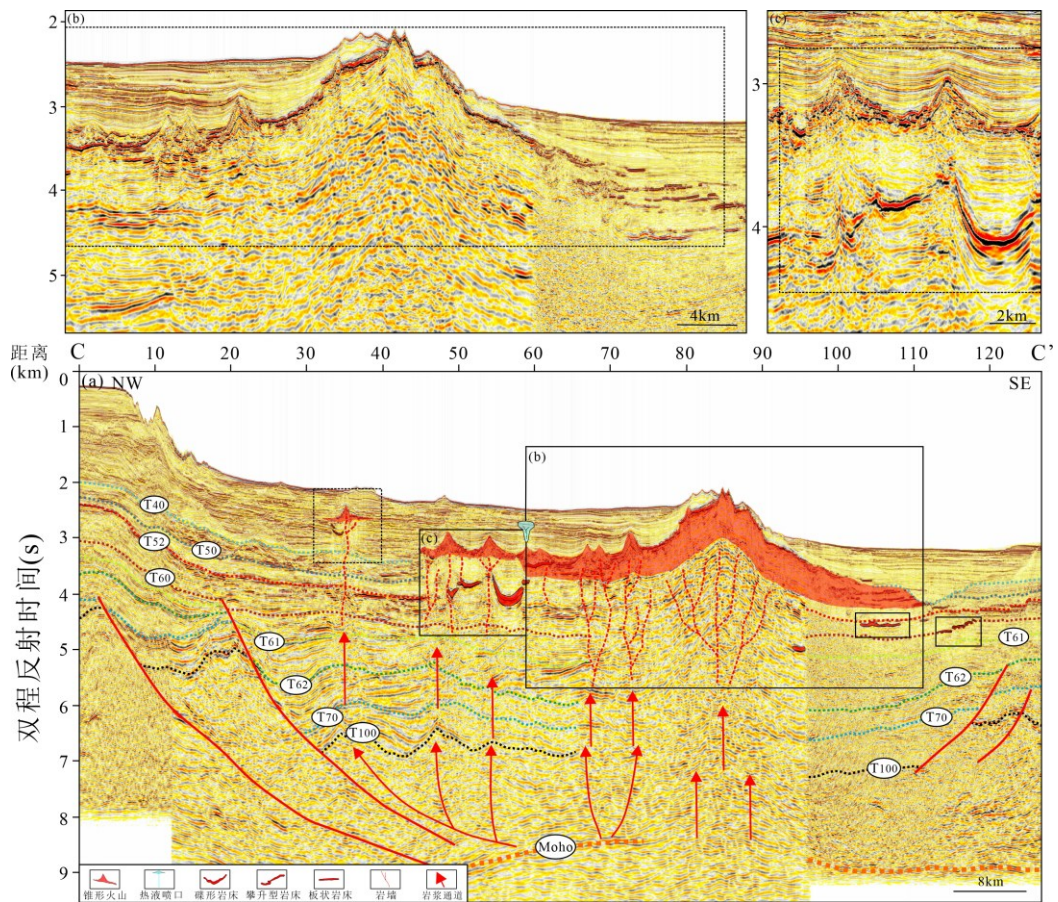


图 5 琼东南盆地万户海山及卫星火山地震反射特征（剖面位置见图 1）

Fig.5 Seismic reflection characteristics of the Wanhu Seamount and its satellite volcanoes in the Qiongdongnan Basin (for location see Fig.1).

3.3 时空分布规律

通过对琼东南盆地中央拗陷带火成岩产状类型的识别和发育期次的判定,绘制了琼东南盆地中央拗陷带 5 期岩浆活动幕平面分布图 (图 6)。

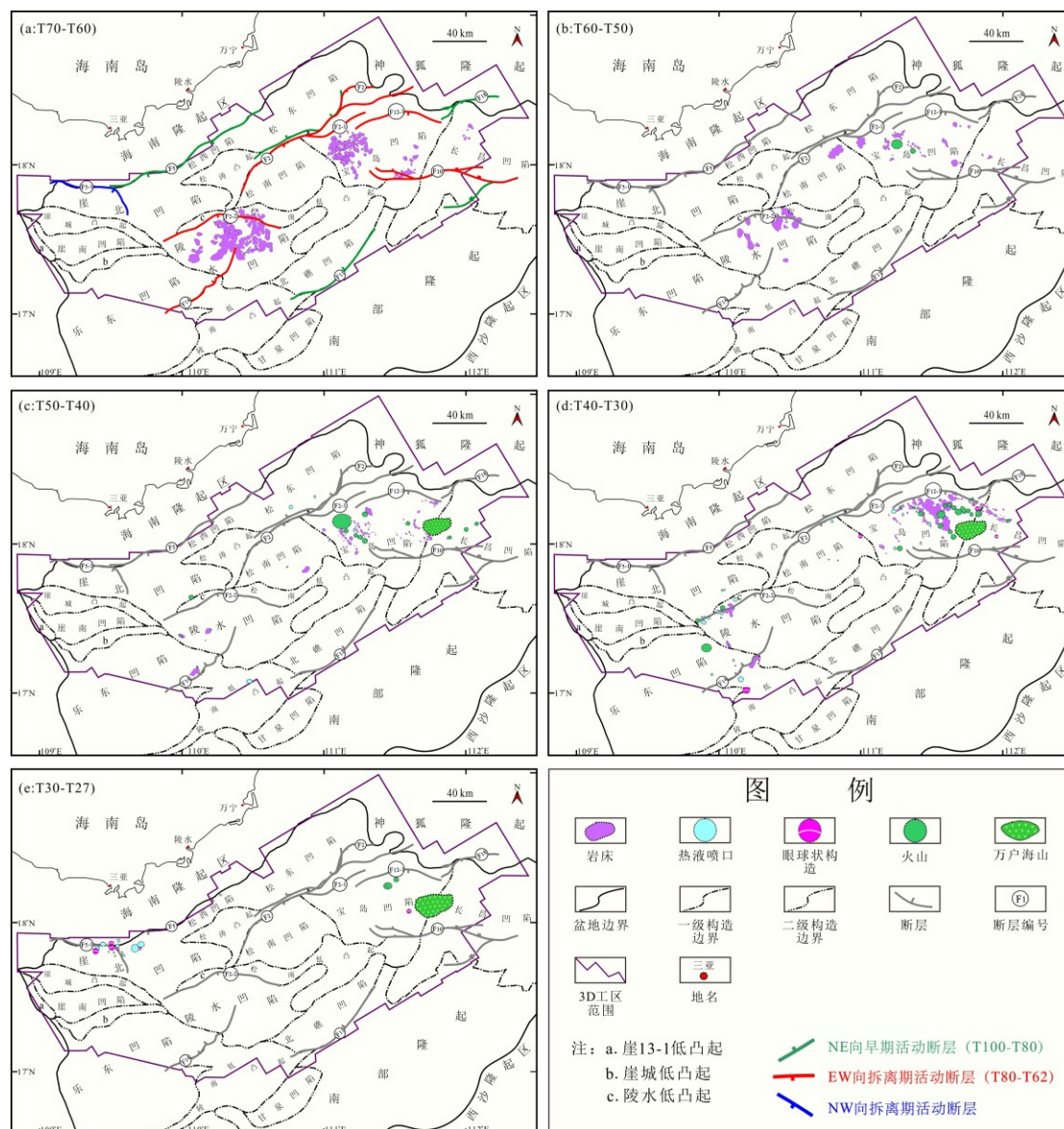


图 6 琼东南盆地中央拗陷带不同时期岩浆活动类型平面分布图

Fig.6 Planar distribution of magmatic activity types in the central depression belt, Qiongdongnan Basin, during different periods.

T70-T60 (28.4-23.03Ma): 如图 6a 所示, 该时期岩浆活动以岩床侵入为主, 主要分布在陵水和宝岛凹陷, 根据地震剖面粗略估算的中央拗陷带火成岩体积约为 52km^3 。本阶段仍处于盆地的同裂陷演化期, 拆离断层活动显著 (Yu 等, 2025; 任建业等, 2018)。在大型低角度拆离断层的作用下, 岩石圈伸展减薄, 导致软流圈地幔上涌发生减压熔融, 所产生的熔融体沿断裂系统向上运移, 进入盆地后引发了大规模的岩浆活动。

T60-T50 (23.03-15.97Ma): 如图 6b 所示, 该时期岩浆活动以侵入为主, 仍

主要分布在陵水凹陷, 松南-宝岛-长昌凹陷, 不过岩浆侵入强度减小, 表现在分布面积比原先减小, 火成岩体积只有约 19 km^3 。值得注意的是, 尽管这个时期盆地的演化进入到裂后期, 拆离断层活动结束, 构造作用减弱, 但是这个阶段在宝岛凹陷开始出现火山活动, 可识别出 2 座火山建造, 体积约为 5.3 km^3 。

T50-T40 (15.97-10.5Ma): 如图 6c 所示, 该时期岩浆活动以喷发为主, 主要分布在宝岛-长昌凹陷, 陵水凹陷见零星岩床侵入体。研究区最大的火成岩-万户海山喷发在 T50 界面之上, 周边观察到 4 座卫星火山, 与万户海山均来自深部同一岩浆源, 其余 7 座火山建造也分布在宝岛凹陷。整体上, 这个时期中央坳陷带的岩浆活动开始从西向东迁移, 火成岩体积约为 356 km^3 (侵入岩占 11.3 km^3 、喷出岩占 344.7 km^3), 意味着该阶段岩浆活动逐渐增强, 以喷发为主。

T40-T30 (10.5-5.7Ma): 如图 6d 所示, 岩浆活动仍然集中在宝岛-长昌凹陷, 此外, 陵水凹陷边界断层 F2-2 和 F14 有少量的岩浆侵入和喷发活动, 形成 3 座较完整的火山建造。宝岛-长昌凹陷岩浆活动以岩床和火山建造为主, 万户海山持续活动, 规模持续增大, 并在周边伴有多个卫星火山口, 同时在万户海山周边观察到 7 个碟形岩床组成的眼球状构造。在陵水凹陷和宝岛-长昌凹陷内还观察到深部岩床或岩墙与海水渗流相互作用形成的热液喷口, 热液喷口的发育时期可以对该地区岩浆活动发育时期起到约束作用。

T30-T27 (5.7-2.5Ma): 如图 6e 所示, 在宝岛-长昌凹陷发育 2 座火山建造, 热液活动主要集中在崖北凹陷 F5 和 F5-1 附近, 识别出 5 个眼球状构造和 12 个热液喷口, 碟形岩床和热液喷口表现出良好的空间伴生关系, 利用热液喷口对碟形岩床发育时期进行约束。

综上所述, 早期岩浆活动主要以侵入体形式伴随着拆离断层活动发生, 主要位于陵水凹陷和宝岛凹陷两个区域活动, 但后来陵水凹陷内部的岩浆活动逐渐减弱, 主活动区迁移至宝岛-长昌凹陷地壳薄化区域; 并在宝岛-长昌凹陷发育强的火山建造, 自晚中新世以来一直持续到上新世, 以万户海山为代表经历了多期次的喷发, 喷发活动主要集中在中-晚中新世期间, T30 之后岩浆活动可能向北发生迁移, 因此在崖北凹陷识别出多个碟形岩床和热液喷口, 琼东南盆地中央坳陷带岩浆活动停止。

4. 讨论

4.1 地壳岩石圈伸展与地幔岩浆熔融

地壳的伸展薄化、直至破裂形成洋壳的过程, 构成了被动大陆边缘地壳岩石圈演化的重要环节 (Deng et al., 2020; Chao et al., 2023)。洋壳是地幔岩石发生熔融的产物, 形成于大洋中脊, 但地幔熔融作用早在洋壳形成之前, 岩石圈伸展薄化过程中就已经开始 (Sutra et al., 2013)。岩浆熔融体的产生主要取决于四个

条件：岩石圈伸展减薄程度、地幔潜在温度、岩石圈初始厚度以及地壳减薄作用时间（Bown et al., 1995）。岩石圈从伸展减薄到破裂的过程，岩浆活动所产生的熔体会展现出多种不同的形态（Sun et al., 2021），当岩石圈开始减薄，一般到 70km 时（Manatschal et al., 2015），熔体开始产生；随着减薄作用增强，岩浆活动也逐渐增强，产生的熔体比例增高，且会沿着地壳岩石圈中的断裂上升，或沿岩石圈中的流变界面，如 Moho 面发生底侵。底侵岩浆往往形成地幔熔体的“转运站”或“岩浆房”，成为盆地中侵入体和喷出体的源区。

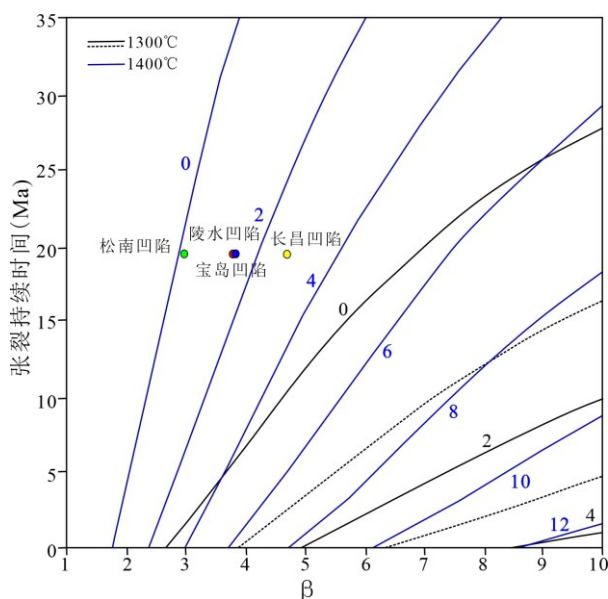


图 7 琼东南盆地岩浆量与张裂持续时间和张裂程度的关系，岩浆量单位：km。（据 Bown et al., 1995 修改）

Fig.7 Relationship between magma volume and rifting duration and extension magnitude in the Qiongdongnan Basin, magma volume unit: km. (modified after Bown et al., 1995).

假设初始岩石圈厚度为 125km，拉伸系数 β 为 0-10，张裂持续时间从 0-35m.y.，分别绘制了地幔潜在温度为 1300°C（黑色实虚线）、1400°C（蓝色实线）情况下熔体产生的厚度（图 7）。琼东南盆地经历了约 20 Ma 的裂陷期，在大型低角度拆离断层作用下，地壳持续薄化至现今厚度。具体表现为：陵水凹陷与宝岛凹陷地壳厚度减薄至 7-8 km，长昌凹陷最大减薄至约 6.5 km，松南凹陷则减薄至约 10 km。伸展系数计算结果显示，陵水凹陷与宝岛凹陷的 β 值为 3.5-4，长昌凹陷为 4.6，松南凹陷为 3。上述伸展过程导致岩石圈显著减薄，进而诱发软流圈地幔上涌并发生减压熔融产生熔体。如图 7 所示，假设地幔潜在温度为 1300°C，可以观察到琼东南盆地中央坳陷带产生的熔体很薄甚至缺失。实际情况是无论同裂陷阶段还是裂后阶段，中央坳陷带均具有广泛的岩浆活动。因此琼东南盆地地幔潜在温度要高于 1300°C，假设为 1400°C 的话，陵水凹陷和宝岛凹陷产生的熔体厚度在 1-2km，长昌凹陷产生的熔体厚度在 3km 左右，松南凹陷产生的熔体厚度很薄，不到 1km。

4.2 中央坳陷带岩浆活动的地幔柱-板块运动双动力控制模式

哀牢山-红河断裂是一条从陆地延伸到海域、总长度可达 2000km 的巨型走滑断裂带，早期该断裂表现为左旋位移使得印支地块向 SE 方向挤出，随着印度-欧亚大陆碰撞前缘向北持续移动，华南地块相对于印支地块更为快速的挤出导致该断裂发生左旋向右旋的转换（Allen et al., 1984; Replumaz et al., 2001）。王洋等（2022）的研究也证实，始新世时期，由于印度-欧亚板块碰撞，青藏高原东南缘发生地壳缩短增厚变形，发育一系列逆冲构造和褶皱，哀牢山-红河断裂剪切带呈现 NW 向左旋特征；渐新世-早中新世，受到印澳板块向东南亚洋-陆俯冲后撤的影响，青藏高原东南缘块体发生侧向挤出逃逸，红河断裂呈现 NNW 向展布；中-晚中新世，印度板块持续向北俯冲，此时断裂体系运动学性质发生改变，NW/NNW 的断裂由左旋走滑转变为右旋走滑。贾大成等（2003）提出北部湾普遍发育上新世玄武岩，年龄在 8.9-2.4Ma，与红河断裂后期构造反转从左旋转变为右旋的剪切走滑有关，因为构造应力场的转变，导致地幔发生扰动从而引发岩浆活动。由此可见，自中中新世以来红河断裂发生了右旋，导致华南地块向南漂移。一些研究成果提出，红河断裂中中新世以来的右旋位移量达到 62-69km，其中上新世以来位移量可达 30-32km，而第四纪以来位移量在 7-8km 之间（向宏发等, 2007），目前，哀牢山-红河断裂仍处于右旋走滑之中，意味着华南地块正在由 NW 向 SE 方向运动。

Maruyama et al. (1994) 最早提出在亚洲东南亚地区存在地幔柱，命名为“越南地幔柱”，后来 Lebedev et al. (2003) 通过地球物理勘探资料发现在海南岛下方存在近垂直延伸的地震波低速带，认为有热的地幔物质上升，将此地幔柱命名为“海南地幔柱”，其源区是在 200Ma 前华南地块与华北碰撞后滞留在上下地幔过渡带（410-660km）的大陆岩石圈板块扰动区，赵海玲等（2004）通过火山岩的研究在我国东南沿海地区识别出海南地幔柱活动的轨迹。近年来，海南地幔柱被层析成像资料和火成岩资料进一步精确圈定在海南岛、琼东南盆地、西沙地块和中沙海槽之下 400-600km（夏少红等, 2022; Xia et al., 2024）。

海南地幔柱的地球物理资料相当充分，而受海南地幔柱影响的南海西北地区（海南岛、雷琼半岛、北部湾盆地以及南海等地区）发现大规模的晚新生代碱性玄武岩，同样为海南地幔柱理论提供了有力的岩石学依据。同位素地球化学分析表明涠洲岛和海南岛北部的玄武岩地幔源区相对比较均一（杨文健等, 2020），推测均来自于深部地幔柱，同样在华南大陆边缘、中南半岛均有岩石学证据表明晚新生代玄武岩物质来源与海南地幔柱之间存在联系（冯光英等, 2022）。

琼东南盆地和琼州海峡火山区位于华南陆块南部被动伸展陆缘，作为新生代火山活动强烈的两个热点，主要在晚渐新世和中-晚中新世活动的琼东南盆地热

点区沉积地层埋藏了大量的火山、岩床和热液喷口，而新近纪晚期-第四纪活动的琼州海峡热点区在地表即可以观测到数百个火山口（冯光英等，2022），地球物理成像显示雷琼火山区下方低速异常可自地幔深部延伸至地幔浅部（Zhang et al., 2025）。

地幔柱-岩石圈的相互作用以及被动大陆边缘伸展作用是调控陆内火山活动与岩石圈演化的关键机制（Xia et al., 2024）。琼东南盆地及琼州海峡周边的新生代岩浆活动，本质上是地壳岩石圈超伸展减薄、海南地幔柱的热物质供给，以及新近纪板块运动引发的时空配置转换三者协同作用的结果。首先，地壳的超伸展减薄是基础条件。琼东南盆地中央坳陷带在裂陷期经历强烈伸展，地壳拉张因子超过 3.0，厚度从陆缘约 30km 减薄至中部不足 10km（最薄处不到 5km），这种脆-韧性结合的薄化格局为岩石圈地幔上涌和减压熔融创造了优势通道；其次，海南地幔柱提供了核心热动力。地球物理资料显示，地幔柱上涌的物质在岩石圈尺度发生横向扩展和垂向侵蚀（Xia et al., 2024），其热异常不仅显著提升莫霍面下方的熔融程度（熔体分数可达 4.5%-7.0%），还通过地壳内低速通道促进岩浆底侵（葛佳裕等, 2025）；最后，新近纪板块运动是动态调控因素。印度-欧亚大陆碰撞引发的华南地块向 SE 方向挤出，导致岩石圈持续南移，使得琼东南盆地逐渐漂离原有地幔柱分支，而雷琼地区则同步移至另一分支上方，从而主导了岩浆活动中心的时空迁移。这三者构成一个耦合系统-地幔柱提供热源、地壳薄化提供熔融空间与通道、板块运动则实现热源与通道的时空耦合，共同控制了岩浆强度、分布和序列。

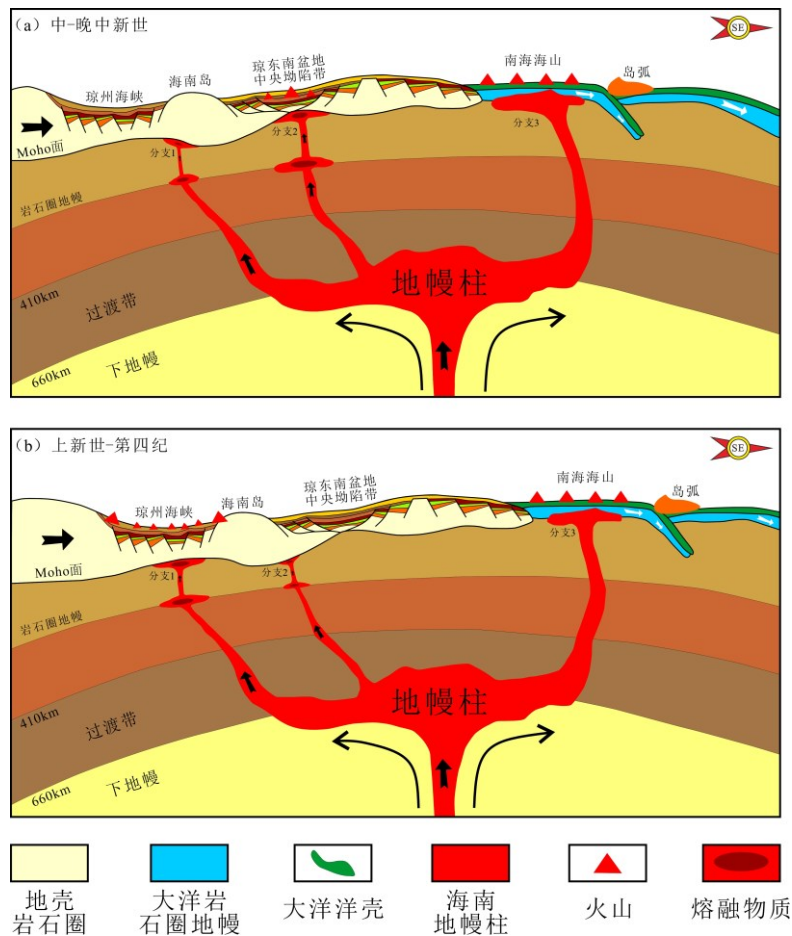


图 8 南海西北部陆缘地幔柱-板块运动双动力控制岩浆活动模式

Fig.8 Mantle plume-plate motion dual geodynamics controlling magmatism on the northwestern SCS margin.

基于上述三因素耦合机制，琼东南盆地中央坳陷带的岩浆活动遵循“地幔柱-板块运动双动力控制模式”。如图 8 所示，在大型低角度拆离断层（如 F2、F10 断裂）作用下，地壳发生强烈减薄，岩石圈地幔因减压发生广泛熔融，而地幔柱的叠加热效应使熔融规模进一步扩大。中-晚中新世时期，海南地幔柱的一个分支（分支 2）稳定位于琼东南盆地中央坳陷带下方，其热输入与盆地超伸展高度匹配。产生的熔融底侵至地壳底部，形成高波速的岩浆源区（地震剖面上表现为莫霍面强双轨反射），并沿先存拆离断层系统上涌，中中新世时期盆地内发育最大规模的火山建造-万户海山，而在晚中新世时期，地幔柱分支活动尤为强烈，万户海山持续喷发，并伴随多个卫星火山的发育，最终在中央坳陷带形成密集的岩床及大规模的火山建造群。

此时，另一地幔柱分支（图 8a 中的分支 1）并未在雷琼地区下方，而是位于海南岛下部，该地区处于非裂谷环境、地壳较厚且缺乏有效断裂通道，岩浆活动受到抑制。至上新世-第四纪，板块运动主导格局转变，随着华南地块向 SE 持续挤出，岩石圈向南移动，中央坳陷带逐渐移离其下的地幔柱分支（图 8 中的分支 2），被厚的

海南地壳遮掩封存，热供给衰弱导致岩浆活动减弱，仅在局部过渡地区，如崖北凹陷残留碟形岩床与热液喷口作为响应。

与此同时，板块运动使雷琼地区迁移至地幔柱分支 1（图 8）上方，该区 NW-SE 向断裂在新构造期活化并成为主导通道（第四纪活动达到顶峰），地壳在伸展作用下减薄，引发岩石圈减压熔融。熔体沿断裂网络上升，在雷琼地区形成大规模火山喷发，其壳内熔体分数显著升高（可达 7%），印证了地幔柱热源与活化断裂的耦合（Zhang et al., 2025）。

因此，琼东南盆地中央坳陷带与琼州海峡地区的新生代岩浆活动，共同构成了南海西北陆缘在时空上相继演化的“双热点”体系。该体系的核心驱动力源于深部相对静止的海南地幔柱热异常与浅部持续南向漂移的岩石圈板块之间的相互作用。研究建立的“地幔柱-板块运动双动力控制模式”是展现了大陆边缘深部过程与板块构造运动相互作用的典型实例，合理解释了琼东南盆地中央坳陷带中-晚中新世的岩浆活动及其后的沉寂，也清晰揭示了琼州海峡地区上新世-第四纪岩浆活动的热源与机制。这一模式表明，南海西北缘自渐新世晚期以来的岩浆活动，是深部地幔柱提供的“稳态热源”与岩石圈板块“时空传送带”效应耦合作用的产物，二者动态匹配造就了不同地质时期、不同空间位置的岩浆活动热点，实现“热源-通道系统”的时空重建，从而控制岩浆活动的递进与转移。

5. 结论

（1）识别出 39 座火山建造（包括锥形火山与火山口型火山），火成岩体可分为侵入岩（岩床、岩盖、岩墙）和喷出岩（火山建造、熔岩流），具有类型丰富、分布广泛、活动强烈的特点，代表南海西北陆缘新生代早期热点活动的特征。

（2）岩浆活动具有明显的时空迁移规律。岩浆活动集中于中央坳陷带超伸展薄化区，晚渐新世时期岩浆活动以侵入体形式沿拆离断层发育，主要集中于陵水凹陷和宝岛凹陷；随后活动中心向宝岛-长昌凹陷迁移，并在中-晚中新世形成以万户海山为代表的多期火山喷发；上新世以来，岩浆活动北迁至崖北凹陷，并伴随强烈热液活动，形成大量热液喷口。

（3）提出研究区岩浆活动的地幔柱-板块运动双动力耦合作用控制模式，揭示了静态地幔柱热源与动态板块运动之间的耦合效应，合理解释了琼东南盆地与琼州海峡地区岩浆活动的时空迁移规律。

References

- Allen, C. R., Gillespie, A. R., Yuan, H., et al., 1984. Red River and Associated Faults, Yunnan Province, China: Quaternary Geology, Slip Rates, and Seismic Hazard. *Geological Society America Bulletin*, 95(6): 686. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1984\)95<686:RRAAFY>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1984)95<686:RRAAFY>2.0.CO;2).
- Alvarenga, R. S., Iacopini, D., Kuchle, J., et al., 2016. Seismic Characteristics and Distribution of Hydrothermal Vent Complexes in the Cretaceous Offshore Rift Section of the Campos Basin, Offshore Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, 74: 12-25. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2016.03.030>.
- Bischoff, A., Nicol, A., Cole, J., et al., 2019. Stratigraphy of Architectural Elements of a Buried Monogenetic Volcanic System. *Open Geosciences*, 11(1): 581~616. <https://doi.org/10.1515/geo-2019-0048>.
- Bown, J. W., White, R. S., 1995. Effect of Finite Extension Rate on Melt Generation at Rifted Continental Margins. *Journal of Geophysical Research*, 100(B9): 18011~18029. <https://doi.org/10.1029/94JB01478>.
- Cao, L., Sun, Q. L., Magee, C., 2023. Reutilization of Fluid Flow Pathways over 54 Million Years, Offshore New Zealand. *Basin Research*, 35(6): 2349~2363. <https://doi.org/10.1111/bre.12801>.
- Chao, P., Manatschal, G., Zhang, C. M., et al., 2023. The Transition from Continental to Lithospheric Breakup Recorded in Proto-Oceanic Crust: Insights from the NW South China Sea. *GSA Bulletin*, 135(3-4): 886-902. <https://doi.org/10.1130/b36371.1>.
- Deng, H. D., Ren, J. Y., Pang, X., et al., 2020. South China Sea Documents the Transition from Wide Continental Rift to Continental Break Up. *Nature Communications*, v. 11, p. 4583, <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18448-y>.
- Feng, G. Y., Liu, F., Niu, X.L., et al., 2022. Mantle Source Composition and Dynamic Mechanism of the Late Cenozoic Shishan Formation Peridotite Basalts in Hainan Island. *Acta Geologica Sinica*, 96(08): 2725-2742 (in Chinese with English abstract).
- Gao, J. W., Bangs, N., Wu, S. G., et al., 2019. Post - Seafloor Spreading Magmatism and Associated Magmatic Hydrothermal Systems in the Xisha Uplift Region, Northwestern South China Sea. *Basin Research*, 31(4): 688~708. <https://doi.org/10.1111/bre.12338>.
- Ge, J. Y., Li, C. Y., Cao, S. X., et al., 2025. Identification of High-Density Anomalies

- in the Lower Crust of Qiongdongnan Basin Based on Joint Inversion of Gravity and Earthquake. *Marine Geology Frontiers*, 14(10):38-49 (in Chinese with English abstract).
- Hansen, D. M., Cartwright, J., 2006. Saucer-Shaped Sill with Lobate Morphology Revealed by 3D Seismic Data: Implications for Resolving a Shallow-Level Sill Emplacement Mechanism. *Journal of the Geological Society*, 163(3): 509~523. <https://doi.org/10.1144/0016-764905-073>.
- Jia, D. C., Qiu, X. L., Hu, R. Z., et al., 2003. Geochemical Tracing of the Nature of the Mantle Source of Basalts in the Beibu Gulf and Tectonic Setting. *Journal of Tropical Oceanography*, (02): 30-39 (in Chinese with English abstract).
- Lebedev, S., Nolet, G., 2003. Upper Mantle Beneath Southeast Asia from S Velocity Tomography. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B1). <https://doi.org/10.1029/2000JB000073>
- Manatschal, G., Lavier, L., Chenin, P., 2015. The Role of Inheritance in Structuring Hyperextended Rift Systems: Some Considerations Based on Observations and Numerical Modeling. *Gondwana Research*, 27(1): 140 ~ 164. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.08.006>.
- Maruyama, S., 1994. Plume Tectonics. *Journal - Geological Survey of Japan*, 100(1), 24-49. <https://doi.org/10.5575/geosoc.100.24>.
- Mclean, C. E., Schofield, N., Brown, D. J., et al., 2017. 3D Seismic Imaging of the Shallow Plumbing System Beneath the Ben Nevis Monogenetic Volcanic Field: Faroe-Shetland Basin. *Journal of the Geological Society*, 174(3): 468 ~ 485. <https://doi.org/10.1144/jgs2016-118>.
- Pei, J. X., Luo, W., Guo, S. Y., et al., 2024. Discovery and petroleum geological significance of delta in the third member of Oligocene Lingshui Formation in southern Baodao Sag, Qiongdongnan Basin, South China Sea. *Petroleum Exploration and Development*, 51(2): 299-310. <https://doi.org/10.11698/PED.20230533>.
- Planke, S., Rasmussen, T., Rey, S. S., et al., 2005. Seismic Characteristics and Distribution of Volcanic Intrusions and Hydrothermal Vent Complexes in the Vøring and Møre Basins. *Petroleum Geology Conference Series*, 6(1): 833~844. <https://doi.org/10.1144/0060833>.
- Ren, J. Y., Pang, X., Yu, P., et al., 2018. Characteristics and Formation Mechanism of Deepwater and Ultra-Deepwater Basins in the Northern Continental Margin of the

- South China Sea. *Chinese Journal of Geophysics*, 61(12):4901-4920 (in Chinese with English abstract).
- Replumaz, A., Lacassin, R., Tapponnier, P., et al., 2001. Large River Offsets and Plio-Quaternary Dextral Slip Rate on the Red River Fault (Yunnan, China). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 106(B1): 819 ~ 836. <https://doi.org/10.1029/2000JB900135>.
- Shi, X. B., Yu, C. H., Chen, M., et al., 2017. Analyses of Variation Features and Influential Factors of Heat Flow in the Northern Margin of the South China Sea. *Earth Science Frontiers*, 24(03): 56-64. <https://doi.org/10.13745/j.esf.2017.03.005> (in Chinese with English abstract).
- Sun, Z., Li, F. C., Lin, J., et al., 2021. Tension-Rupture Process and Magmatic Activity of Passive Continental Margin: Attribution of the South China Sea. *Journal of Earth Science*, 46(03):770-789 (in Chinese with English abstract).
- Sun, Z., Wang, Z. F., Sun, Z. P., et al., 2015. Structure and Kinematic Analysis of the Deepwater Area of the Qiongdongnan Basin Through a Seismic Interpretation and Analogue Modeling Experiments. *Acta Oceanologica Sinica*, 34(4): 32 ~ 40. <https://doi.org/10.1007/s13131-015-0585-z>.
- Sutra, E., Manatschal, G., Mohn, G., et al., 2013. Quantification and Restoration of Extensional Deformation along the Western Iberia and Newfoundland Rifted Margins. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14(8): 2575-2597. <https://doi.org/10.1002/gg-ge.20135>.
- Thomson, K., Hutton, D., 2004. Geometry and Growth of Sill Complexes: Insights using 3D Seismic from the North Rockall Trough. *Bulletin of Volcanology*, 66(4): 364~375. <https://doi.org/10.1007/s00445-003-0320-z>.
- Wang, Y., Wang, Y. J., Zhang, P. Z., et al., 2022. Cenozoic Tectonic Evolution of Fault System in Southeastern Margin of Qinghai-Tibet Plateau. *Science China: Earth Science*, 52(05):777-802 (in Chinese with English abstract).
- Xia, S. H., Fan, C. Y., Wang, D. W., et al., 2022. The Ultra-Extended Crustal Structure of Qiongdongnan Basin and the Influence of Hainan Mantle Plume in the Later Period. *Science China: Earth Science*, 52(06): 1113-1131 (in Chinese with English abstract).
- Xia, S. H., Gou, T., Zhao, F., et al., 2024. Late Cenozoic Magmatism of the South China Sea Driven by the Hainan Mantle Plume. *Science bulletin*, 70(5):604-608. <https://doi.org/10.1016/J.SCIB.2024.12.010>.

- Xiang, H. F., Guo, S. M., Zhang, W. X., et al., 2007. Quantitative Study of Large Dextral Dislocations in the Southern Section of the Red River Fault Zone Since the Miocene. *Seismology and Geology*, (01): 34-50 (in Chinese with English abstract).
- Yang, T. Y., Tang, Y., Ren, J. Y., et al., 2025. Rift Evolution and Magmatic-tectonic-stratigraphic Records of Episodic Seafloor Spreading at Southwest Sub-Basin of South China Sea. *Journal of Earth Science*, 50(01):195-216 (in Chinese with English abstract).
- Yang, W. J., Yu, H. M., Zhao, B., et al., 2020. Mantle Source Area and Magmatic Genesis of late Cenozoic Basalt in Weizhou Island, Guangxi. *Acta Petrologica Sinica*, 36(07): 2092-2110 (in Chinese with English abstract).
- Yu, J. Y., Tong, D. J., Hu, C., et al., 2025. Two Stages of Rifting Control the Crust Thinning and Basin Evolution: Insights from the Southern Qiongdongnan Basin, NW South China Sea. *Basin Research*, 37(3): e70030-e70030. <https://doi.org/10.1111/BRE.70030>.
- Zhang, J. Y., Zhao, M. H., Sun, Z., et al., 2023. Large Volume of Magma Involved in South China Sea Rifting: Implication for Mantle Breakup Earlier than Crust. *Tectonophysics*, 853: 229801. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2023.229801>.
- Zhang, Q., Wu, S. G., Lv, F. L., 2014. Seismic Identification and Distribution Pattern of Igneous Rock Bodies on the Northwest Continental Slope of the South China Sea. *Geotectonica Et Metallogenia*, 38(04):919-938. <https://doi.org/10.16539/j.ddgzyckx.2014.04.017> (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z., Deng, Y. F., Xu, Y. G., et al., 2025. Seismological Evidence for Crustal Thinning and Melting Beneath the Leiqiong Volcanic Area, South China: Implications for Plume - Lithosphere Interaction at a Passive Continental Margin. *Geophysical Research Letters*, 52(20): e2025GL115307. <https://doi.org/10.1029/2025GL115307>.
- Zhao, H. L., Liu, Z. W., Li, J., et al., 2004. Cenozoic Volcanism and Mantle Plume in Southeastern Coastal Area. *Acta Geologica Sinica*, (06): 781-788 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y. H., Tong, D. J., Song, Y., et al., 2016. Seismic Reflection Characteristics and Evolution of Intrusions in the Qiongdongnan Basin: Implications for the Rifting of the South China Sea. *Journal of Earth Science*, 27(4): 642~653. <https://doi.org/10.1007/s12583-016-0708-2>.

中文参考文献

- 冯光英, 刘飞, 牛晓露, 等, 2022. 海南岛晚新生代石山组橄榄玄武岩的地幔源区组成及动力学机制. 地质学报, 96(08): 2725-2742.
- 葛佳裕, 李朝阳, 曹淑鑫, 等, 2025. 基于重震联合反演的琼东南盆地下地壳高密度异常识别. 海洋地质前沿, 14(10):38-49.
- 贾大成, 丘学林, 胡瑞忠, 等, 2003. 北部湾玄武岩地幔源区性质的地球化学示踪及其构造环境. 热带海洋学报, (02): 30-39.
- 裴健翔, 罗威, 芮诗阳, 等, 2024. 琼东南盆地宝岛凹陷南部渐新统陵水组三段三角洲的发现及石油地质意义. 石油勘探与开发, 51(02):299-310.
- 任建业, 庞雄, 于鹏, 等, 2018. 南海北部陆缘深水-超深水盆地成因机制分析. 地球物理学报, 61(12):4901-4920.
- 施小斌, 于传海, 陈梅, 等, 2017. 南海北部陆缘热流变化特征及其影响因素分析. 地学前缘, 24(03): 56-64.
- 孙珍, 李付成, 林间, 等, 2021. 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(03):770-789.
- 王洋, 王岳军, 张培震, 等, 2022. 青藏高原东南缘断裂体系新生代构造演化. 中国科学:地球科学, 52(05):777-802.
- 夏少红, 范朝焰, 王大伟, 等, 2022. 琼东南盆地超伸展地壳结构及后期海南地幔柱影响. 中国科学:地球科学, 52(06): 1113-1131.
- 向宏发, 魏顺民, 张晚霞, 等, 2007. 红河断裂带南段中新世以来大型右旋位错量的定量研究. 地震地质, (01): 34-50.
- 杨天一, 唐勇, 任建业, 等, 2025. 南海西南次海盆陆缘演化与幕式扩张的岩浆-构造-地层记录. 地球科学, 50(01):195-216.
- 杨文健, 于红梅, 赵波, 等, 2020. 广西涠洲岛晚新生代玄武岩地幔源区及岩浆成因. 岩石学报, 36(07): 2092-2110.
- 张峤, 吴时国, 吕福亮, 等, 2014. 南海西北陆坡火成岩体地震识别及分布规律. 大地构造与成矿学, 38(04):919-938.
- 赵海玲, 刘振文, 李剑, 等, 2004. 东南沿海地区新生代火山作用和地幔柱. 地质学报, (06): 781-788.