



南海及邻区岩浆岩时空分布特征及机制

祝 嵩, 姚永坚, 李学杰

Spatio-temporal distribution pattern of magmatic rocks and mechanism in the South China Sea and adjacent areas

ZHU Song, YAO Yongjian, and LI Xuejie

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2020052001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

南海北缘白云凹陷新生代岩浆活动特征与期次

CENOZOIC MAGMATIC ACTIVITIES AND STAGES IN THE BAIYUN SAG, NORTHERN MARGIN OF SOUTH CHINA SEA
海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(6): 34

南海及其围区新生代岩浆活动时序与成因研究

TIMING AND GENESIS OF CENOZOIC MAGMATISMS IN THE SOUTH CHINA SEA AND SURROUNDING AREAS
海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(2): 108

南海北部晚新生代岩浆活动的发育特征与构造意义

CHARACTERISTICS OF LATE CENOZOIC MAGMATIC ACTIVITIES ON THE NORTHERN MARGIN OF SOUTH CHINA SEA AND THEIR TECTONIC IMPLICATIONS
海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(6): 25

龙口近岸海域潮流作用下悬浮泥沙时空分布特征及输运机制

Spatiotemporal distribution pattern and transport mechanism of suspended sediments in Longkou offshore under the action of tidal current
海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(4): 55

东海某凹陷平北区基底岩浆岩优质储层发育模式

The development model for high quality magmatic basement reservoir in a depression of East China Sea
海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(6): 93

南海典型断面表层沉积物中氧化还原敏感元素的分布特征及其控制因素

Distribution pattern and controlling factors of redox sensitive elements in the surface sediments from four typical transects in the South China Sea
海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(2): 90



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020052001

南海及邻区岩浆岩时空分布特征及机制

祝嵩^{1,2}, 姚永坚¹, 李学杰¹

1. 广州海洋地质调查局, 广州 510760

2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458

摘要:南海的岩浆作用自始至终高度活跃, 岩浆活动规模远远超出以前的想象。根据地壳发展阶段及其产生的岩浆作用强度和类型的差异, 结合岩石同位素年龄资料, 将南海及邻区划分为前吕梁期、吕梁期、晋宁期、加里东期、海西期、印支期、燕山期、喜马拉雅期等 8 个岩浆作用时期, 主要分布于南海及周缘的广东、广西、海南岛、台湾岛、中南半岛、加里曼丹岛、菲律宾群岛, 时代从前吕梁期至喜马拉雅期均有出露。南海及邻区最老的岩浆岩是在中南半岛出现的太古代黑云母花岗岩、紫苏花岗岩和辉长岩; 最新的现代岩浆岩海陆均有发现, 南海西南部和菲律宾等地区至今还有火山喷发岩浆活动。南海海区岩浆岩以燕山期和喜马拉雅期为主, 燕山期以中酸性侵入岩为主, 广泛分布于南海陆缘, 尤其南海北部和西南部最甚; 喜马拉雅期以强烈的基性、超基性岩浆活动为主, 遍布于整个南海海区, 以玄武岩为主。总体上, 海区岩浆活动要比陆区晚。

关键词: 岩浆岩; 分布特征; 成因; 南海

中图分类号: P736.3 **文献标识码:** A

Spatio-temporal distribution pattern of magmatic rocks and mechanism in the South China Sea and adjacent areas

ZHU Song^{1,2}, YAO Yongjian¹, LI Xuejie¹

1. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, China

2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China

Abstract: Magmatism in the South China Sea has been active for long. According to the evolutionary stage of the crust and the difference in the intensity and type of the magmatism, combined with the isotopic age data from magmatic rocks, the magmatic activities in the South China Sea and its adjacent areas can be divided into eight stages, i.e. the pre-Luliang, Luliang, Jinning, Caledonian, Hercynian, Indosinian, Yanshanian and Himalayan stages. Magmatic rocks from pre Luliang to Himalayan period are widely distributed in the South China Sea and its surrounding areas such as Guangdong, Guangxi, the Hainan Island, the Taiwan Island, the Indochina Peninsula, the Kalimantan island and the Philippine islands. The oldest magmatic rocks, the Archean biotite granite, perilla granite and gabbro, are outcropped in the Indochina Peninsula; while the latest modern magmatic rocks occur both on land and in the sea. Volcanic eruption remains active up to present. The region of the South China Sea is dominated by the Yanshanian intermediate-acid intrusive magmatic rocks, which are mainly distributed on the continental margin of the South China Sea, especially in the north and southwest. In the Himalayan period, however, the region is dominated by strong basic and ultrabasic magmatic activities, mainly consisting of basaltic rocks. In general, the magmatic activity in sea area is lagged behind that on land.

Key words: magmatic rock; distribution pattern; genesis; South China Sea

南海的岩浆作用自始至终高度活跃, 岩浆活动规模远远超出以前的想象^[1-2]。长期以来, 国内外学者主要从地球物理学角度对南海的形成演化做了大量研究工作, 而通过岩石“探针”手段去揭示地幔深部过程, 进而探讨南海形成演化的相关资料却比较缺乏。南海岩浆岩大多数根据布设在南海及邻区的地震剖面识别。以往专家总结了南海中生代

和新生代岩浆活动的时空分布特征^[3-5], 但他们的数据有限, 近年来不断增加的岩石学数据, 有助于我们进一步理解南海各个时代岩浆活动的特点。南海的研究应该扩展到南海周边区域的岩浆岩^[6], 因此, 对南海及邻区岩浆岩进行岩相学、年代学、地球化学研究, 辨别其物质组成, 反演各个时期岩浆演化历史, 不仅可以了解地球深部的物质组成, 而

资助项目: 中国地质调查局项目 (DD20190378, DD20190366 和 DD20160138); 国家自然科学基金面上项目“中建盆地泥火山和麻坑群的形成机理及差异性地貌的成因”(41676051); 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 (GML2019ZD0201)

作者简介: 祝嵩 (1973—), 男, 工程师, 研究方向为海洋地质, E-mail: Zhusong201@163.com

收稿日期: 2020-05-20; **改回日期:** 2020-07-19. 文凤英编辑

且还可以进一步了解深部的动力学过程。本文梳理了前人以及广州海洋地质调查局对南海及其邻区各个时期岩浆活动的研究成果,总结他们的认识,系统揭示南海及其邻区岩浆岩的发育时代、规模、组成以及构造特征,为今后的相关研究工作提供参考。

1 岩浆岩时空分布特征

根据地壳发展阶段及其产生的岩浆作用强度和类型的差异,结合岩石同位素年龄资料和国际地层委员会推荐年龄值(2017),南海及相邻陆区岩浆岩可分为前吕梁期(>2500 Ma)、吕梁期($2500\sim 1800$ Ma)、晋宁期($1800\sim 543$ Ma)、加里东期($543\sim 410$ Ma)、海西期($410\sim 250$ Ma)、印支期($250\sim 205$ Ma)、燕山期($205\sim 65$ Ma)、喜马拉雅期($65\sim 0$ Ma)8个时期。晋宁期及以前的侵入岩分布局限,位于研究区西北部的古老地块或缝合带附近,燕山期中晚期(中—晚侏罗世)中酸性侵入岩的侵位达到高峰。钻井揭示海区分布的侵入岩比陆区晚,始于加里东期,主要为海西期、印支期、燕山期、喜马拉雅期等4期。南海及邻区喷出岩自晋宁期开始发育,陆区喷出岩各个时期均有分布,海区喷出岩有燕山期和喜马拉雅期。

1.1 前吕梁期

前吕梁期南海及邻区侵入岩出露较少,在中南半岛东部三岐缝合带附近(图1),为太古宙花岗岩,包括黑云母花岗岩和紫苏花岗岩,黑云母花岗岩呈灰白色,花岗结构和块状构造,紫苏花岗岩是与高级变质作用有成因联系的前寒武纪含紫苏辉石的中酸性侵入岩或变质岩^[7]。海南岛琼中也有新太古宙紫苏花岗岩^[8]。

1.2 吕梁期

吕梁期古元古代南海及邻区岩浆岩分布于中南半岛昆嵩陆核中部(图1),多呈小型侵入体,岩性主要为苏长岩、紫苏花岗闪长岩、紫苏花岗岩,位于越南嘉莱省 A Yun Pa 区的巢锐奥地区和昆嵩省 Kon Plong 地区。另外,嘉莱省 K Bang 区的康纳杂岩露头上也有几处小的超镁铁质块体属于这一杂岩体^[7]。

1.3 晋宁期

晋宁期南海及邻区侵入岩分布在广西、海南岛、

中南半岛(图1)。中元古代超基性、基性侵入岩主要分布于广西九万大山和元宝山一带,是一套与基性火山喷发岩有成因联系的变橄榄岩、变辉石岩、变辉长辉绿岩等岩石组合,中性岩体分布在宝坛,为闪长岩或石英闪长岩,新元古代侵入岩有辉长辉绿岩、辉石岩、橄榄岩、闪长岩,分布于桂北的三门、龙胜、马海山3个复背斜轴部^[9]。前寒武纪花岗质岩出露于海南岛西北部的戈枕地区,岩体呈北东-南西向的长椭圆状,受 NE-SW 向的戈枕断裂带控制,有二长花岗岩、花岗闪长岩、钾长花岗岩等,年龄约 1450 Ma^[10]。中南半岛中元古代和新元古代岩浆活动分布于红河、马江、昆嵩等地区,岩浆系列一般由镁铁岩开始,以大中型酸性侵入体至小型碱性岩侵位结束,早期镁铁岩及英闪岩年龄为 $1716\sim 1368$ Ma,晚期高铝碱性花岗岩年龄为 $713\sim 625$ Ma^[11]。

晋宁期南海及邻区喷出岩分布在广西、广东、海南岛。广西北流、陆川一带中元古代喷出岩呈北东、北北东向条带状断续展布,呈透镜状、似层状产于云开岩群,以基性-超基性岩为主,分为洋脊型喷出岩及岛弧型喷出岩两种,其中洋中脊型变质基性火山岩为 1462 ± 28 Ma 大洋拉斑玄武岩(MORB型)^[12],龙胜和三门背斜轴部为细碧-角斑岩系^[9]。广东新元古代增城凝灰岩、信宜的细碧-角斑岩系

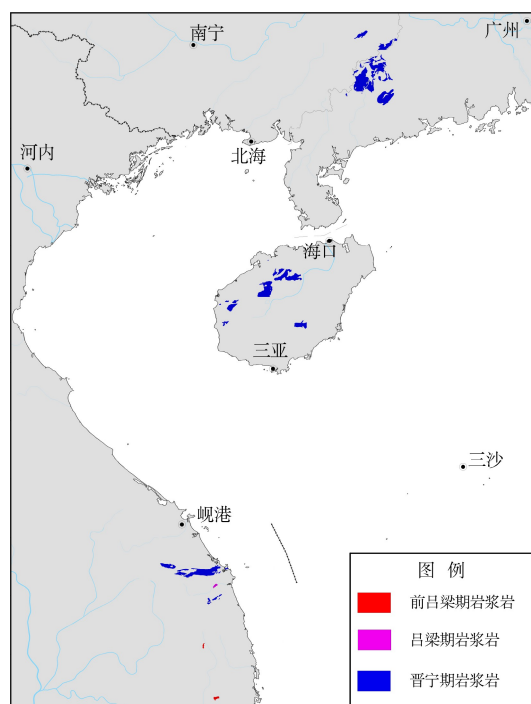


图1 南海及邻区加里东期之前岩浆岩分布图^[7]

Fig.1 Distribution of Pre-Caledonian magmatic rocks in the South China Sea and its adjacent areas^[7]

四周为断层所围限^[13], 梅州 972±8 Ma 变质流纹岩形成于岛弧环境^[14]。海南岛军营-邦溪-和盛发育一条近东西向变基性火山岩带, 属超镁铁质-镁铁质岩石, 其中科马提岩年龄为 1165 Ma^[15] 或 1687 Ma^[16]。

1.4 加里东期

加里东期南海及邻区岩浆侵入活动强烈, 侵入岩主要分布在中南半岛、广西、广东、南海西北部(图 2)。早古生代越南岩浆规模小, 有 455~425 Ma 奥菲奥岩组合, 以高钠、贫钙、碱为特征, 产于马江断裂带中, 长山、昆嵩一带 430 Ma 闪长岩-花岗闪长岩-花岗岩呈岩株产出, 属钙碱性^[11]。加里东期大规模的酸性岩浆侵入广西, 在桂北、桂东南形成较大的花岗岩岩基, 桂西、桂东、桂中有花岗斑岩、花岗岩、花岗闪长岩、花岗闪长斑岩等岩株岩脉零星出露^[9]。早奥陶世—晚志留世, 广东中酸性侵入岩多呈岩基状或大型复式岩体, 出露于吴川-四会断裂带、恩平-新丰断裂、瘦狗岭断裂周边, 并沿北东方向展布, 分布于阳江、高州等地, 包括正长花岗岩、奥长花岗岩、二长花岗岩、花岗闪长岩等^[17]。莺歌海盆地钻孔早志留世花岗岩 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄为 432.7±1.6 Ma^[18]。

值得注意的是, 张业明等^[19]在海南保梅岭发现了加里东期花岗岩, 时代为 369~410 Ma。但如果按传统的加里东期(543~410 Ma)年龄界限, 显然这不属于加里东期花岗岩, 而属于海西期花岗岩。其后的地质学者, 也很少接受海南岛存在加里东期花岗岩的观点。华南地区普遍发育晚奥陶世—早泥盆世花岗岩(主要形成于 450~400 Ma), 加里东

期构造热事件(约 460~420 Ma)强烈, 但是这些在海南岛缺失, 表明至少在晚奥陶世之前, 海南岛并不是华南的组成部分。

加里东期南海及邻区喷出岩分布于广东、海南岛、广西。华南早古生代陆内造山带主要沿武夷-云开一带呈北东向展布, 产出大规模同时代花岗岩, 一度被认为不发育的火山岩在近年被陆续报道, 广东早古生代火山岩形成于 445~435 Ma^[20]。震旦纪火山岩分布在广东信宜、罗定的变中基性火山岩、变安山岩、变中酸性凝灰岩、流纹岩, 海南台农、尧文的基性火山岩, 奥陶纪—志留纪火山岩分布在海南军营, 志留纪火山岩分布在广东罗定、开平等地^[17]。广西大明山和岑溪分布早奥陶世的角斑岩和早志留世的细碧角斑岩^[9], 岑溪市糯垌镇发育志留纪基性喷出岩属洋中脊拉斑玄武岩, ICP-MSU-Pb 同位素年龄为 443.7±2.9 Ma^[21]。

1.5 海西期

海西期南海及邻区侵入岩主要分布在中南半岛、海南岛、广西、广东、南海西北部的北部湾盆地等(图 3)。中南半岛的昆嵩-大叻, 在古生代中期为闪长岩—花岗闪长岩, 多为大岩基, 钠高于钾, 属钙碱系列, K-Ar 年龄为 443~360 Ma 和 336~246 Ma 两组, 高铝花岗岩主要由二长花岗岩和片麻状花岗岩组成, 均为粗粒结构, 富铝, 年龄为 310 Ma, 在古生代晚期为云花岗岩、斜长花岗岩及白岗岩, 富硅、铝和碱, 年龄 280~300 Ma^[22]; 越南北部 I 型花岗岩年龄为 286~272 Ma, 越南中部 S 型石榴子石花岗岩和斜方辉石花岗岩具弱片理化, 其年龄为 260~250 Ma^[23]。海西期广西和广东岩浆活动重心移至桂东南-粤西岩浆分区, 以中酸性岩浆活动为主, 泥盆纪侵入岩位于桂东南-粤西岩浆分区, 为黑云母二长花岗岩, 石炭纪岩浆侵入活动基本发育于吴川-四会断裂带内, 且伴有不同程度的韧性剪切变形, 主要为二长花岗岩和二长花岗斑岩, 均具强烈的糜棱岩化。海南岛分布海西期中酸性侵入岩(花岗闪长岩、二长花岗岩等), 万宁基性侵入岩(辉长岩), 琼北和琼中中性侵入岩(闪长岩), 万宁岩带受控于九所-陵水断裂^[17]; 琼中 S 型石榴子石花岗岩、片麻状花岗岩年龄 278~270 Ma, I 型花岗闪长岩-二长花岗岩片麻状构造, 其年龄为 267±3 Ma, 琼西北 I 型辉长岩-闪长岩-英云闪长岩-花岗闪长岩年龄 299~282 Ma^[23]。北部湾盆地 WZ12-3-2 井 1786.24m、WZ12-3-3 井 1536.4m、WZ12-8-1 井 1335m 和 WZ12-8-2 井 1352 m 处, 钻遇晚二叠世花岗岩^[24]

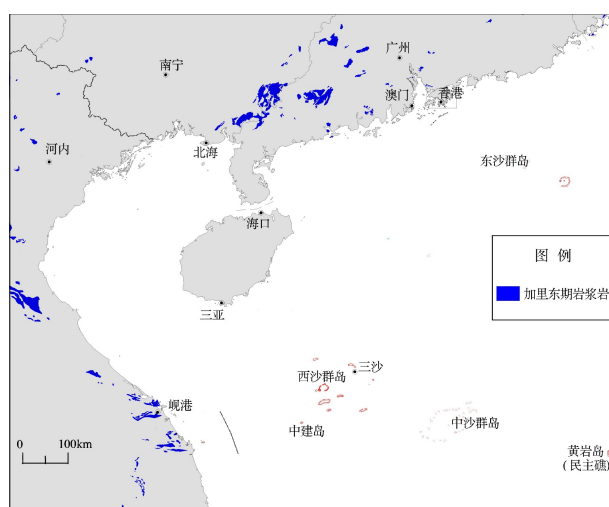


图 2 南海及邻区加里东期岩浆岩分布图^[7]

Fig.2 Distribution of Caledonian magmatic rocks in the South China Sea and its adjacent^[7]

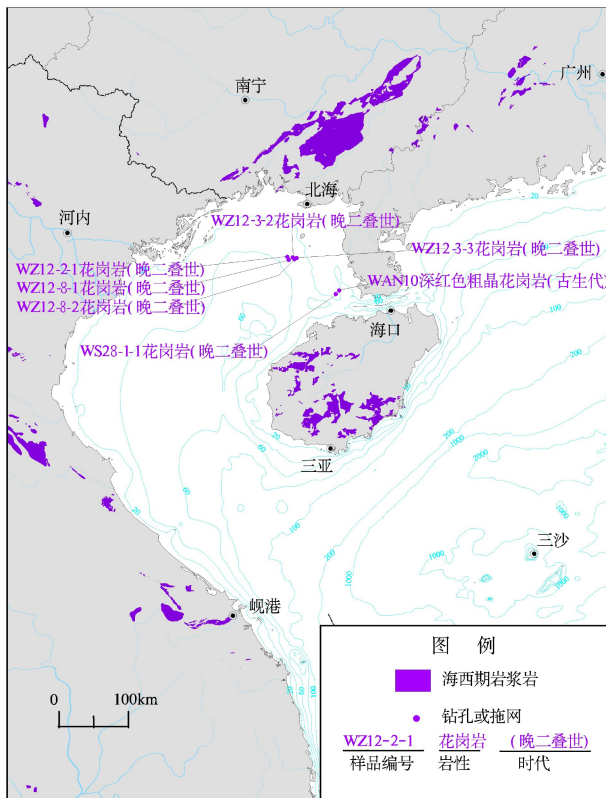


图3 南海及邻区海西期岩浆岩分布图^[7]

Fig.3 Distribution of Hercynian magmatic rocks in the South China Sea and its adjacent areas^[7]

(表1)。北部湾盆地流沙凸起的 WAN10 井 1741~1871.87 m 处古生代的深红色粗晶花岗岩也可能属于海西期^[25](表1)。

海西期南海及邻区喷出岩主要分布在广西、广东、海南岛、台湾和中南半岛。海西期,广西和广东地壳处于相对稳定阶段,火山喷发活动趋于微弱,主要为间歇的火山喷发和溢出。广西的桂西、桂南、桂中等地分布泥盆纪、石炭纪、二叠纪火山岩,厚度小、层次多、熔岩常伴火山碎屑岩,属海底间歇性火山活动产物,与北西向的那坡断裂有关,随着时代变新,火山活动中心有由西向东或向东北方向迁移的趋势,熔岩有玄武岩类、粗面岩类和流纹岩;火山碎屑岩类有熔角砾岩、沉火山角砾岩、凝灰岩等^[9]。广东恩平、开平、平远分布泥盆纪流纹岩、凝灰岩;连平分布石炭纪流纹岩、安山岩、凝灰岩;兴宁、河源、连平、广州分布二叠纪安山岩、凝灰岩^[17]。海南岛屯昌县晨星农场发育石炭纪变安山质火山岩,年龄为 345 ± 4 Ma^[26];高度亏损 N-MORB 型玄武岩年龄为 328.1 ± 2.6 Ma^[27];军营-邦溪地区晚二叠纪 OIB 型洋岛玄武岩指示了东古特提斯洋在海南岛的存在^[28];早石炭世,军营地区发育凝灰岩,琼中地区发育流纹岩^[17]。海西期台湾以基

性岩浆喷发为主,大南澳群中的变质火山岩有绿片岩和角闪岩,其原岩为基性熔岩或火山碎屑岩,属大洋拉斑玄武岩,年龄为 283.7 Ma 和 289 Ma^[29-31]。泰国清迈火山岩带的石炭纪—二叠纪火山岩含安山岩、辉石岩和凝灰岩,标志着晚古生代俯冲作用的火山弧残余^[32]。

1.6 印支期

印支期南海及邻区岩浆岩主要分布在中南半岛、海南岛、广西、广东、南海西北部(图4)。

印支期,印支地块与扬子地块、华夏地块发生碰撞造山作用过程称为印支运动,导致印支期岩浆岩较广泛分布于中南半岛,主要分布在长山山脉和昆嵩-大叻一带以及沿海陆架区,由岩基和岩株产出的花岗岩和花岗闪长岩组成^[22],越南北部 I 型闪长岩-花岗闪长岩-二长花岗岩年龄为 240.4 ± 2.8 Ma^[23]。广西印支期以花岗质侵入岩产出,规模较小,活动重心西移至桂中南岩浆分区六万大山-十万大山一带,仍以中酸性侵入为主,早三叠世岩浆侵入发生于六万大山-大容山隆起区,分布于六万大山、大容山、大隆一带,为二长花岗岩类;中三叠世岩浆活动沿灵山-藤县断裂带分布于防城、钦北、北流一线^[9]。广东超基性、基性、中性、中酸性侵入岩零星分布于吴川-四会断裂和信宜-廉江断裂两侧,并受这些断裂控制,多呈小的岩株、岩墙及岩脉分布^[17]。海南岛海西期—印支期花岗岩是一个较完整的演化系列,主要是花岗闪长岩和二长花岗岩,年龄为 320~220 Ma^[33];海南岛北部与中部沿昌江-琼海断裂碰撞拼合于三叠纪,引发大规模的岩浆活动,形成了一系列琼中和儋县花岗岩体,如琼中岩体为 237 Ma;三叠纪中基性岩分布于万宁辉长岩和辉绿岩脉、分界洲正长岩,为碱性岩浆岩^[34-35]。南海西北部的北部湾盆地涠西南坳陷的 WZ12-3-1 钻井 1420~1490 m 处三叠纪花岗岩年龄为 237.8~243.3 Ma;莺歌海盆地的 LT35-1-1(Y8)井 1715 m 处花岗岩年龄为 224 ± 2 Ma;琼东南盆地 YC13-1-1 井 3822.19 m 处花岗岩年龄为 194~226 Ma^[36-37](表1)。

印支期南海及邻区喷出岩分布在广西、广东和中南半岛。该期是广西火山活动的全盛期,火山岩遍及桂西和桂南,桂中、桂东有零星分布,早、中三叠世强烈而频繁的海底火山喷发,形成一套基、中酸性火山岩,晚三叠世为海相酸性火山喷发^[9]。广东印支期火山活动微弱,仅见于连县早三叠世凝灰岩^[17]。老挝南部三叠纪双峰式火山岩由基性玄武岩和酸性流纹岩组成,基性火山岩起源于亏损的软

表 1 南海侵入岩的钻孔和拖网数据

Table 1 Intrusive rocks collected by borehole and trawling in the South China Sea

编号	位置		水深/m	钻孔深度或钻穿厚度/m	基底岩性	地质时代/Ma	测试方法	所属盆地	数据来源
WZ12-2-1	20.770 785 8°N	108.901 906 4°E		3 075	花岗岩 (γ)	晚二叠世?		北部湾盆地	文献[24]
WZ12-3-1	20.760 086 1°N	108.997 108 3°E		1 490.0	花岗岩 (γ)	237.8±3.6/?		涠西南坳陷	文献[24]
				1 490.0	花岗岩 (γ)	237.8~243.3		涠西南坳陷	文献[36]
WZ12-3-2	20.762 941 7°N	108.979 133 3°E		1 786.24	花岗岩 (γ)	晚二叠世		北部湾盆地	文献[24]
WZ12-3-3	20.755 125°N	109.031 141 7°E		1 536.4	花岗岩 (γ)	晚二叠世		北部湾盆地	文献[24]
WZ12-8-1	20.731 726 1°N	108.920 977 2°E		1 335	花岗岩 (γ)	晚二叠世?		北部湾盆地	文献[24]
WZ12-8-2	20.739 094 7°N	108.998 789 7°E		1 352	花岗岩 (γ)	晚二叠世?		北部湾盆地	文献[24]
WAN10	20.332 666 7°N	109.624 944 4°E		1 741~1 871.87	深红色粗晶花岗岩	古生代 (Pz)		流沙凸起	文献[25]
WS28-1-1	20.282 861 1°N	109.575 527 8°E		1 666	花岗岩 (γ)	晚白垩世		北部湾盆地	文献[24]
HK17-1-1	19.662 616 4°N	107.747 050 6°E		1 525	花岗岩麻岩 (gn)	早白垩世		莺歌海盆地	文献[24, 36-37]
HK30-3-1A	19.251 572 8°N	107.948 845 3°E		1 986	花岗岩麻岩 (gn)	早白垩世		莺歌海盆地	文献[24, 36-37]
YINGQ2或Y7	18.388 522 2°N	108.555 055 6°E		683.4~689.4	黑云母花岗岩 (γβ)	90.41~95.51		莺歌海盆地	文献[24, 36-37]
海2	18.484 331 1°N	108.698 983 1°E		143.09	花岗岩 (γ)	白垩纪 (K)		莺歌海盆地	文献[24, 36-37]
海3	18.408 888 9°N	108.725 416 7°E		312.25	花岗岩 (γ)	白垩纪 (K)		莺歌海盆地	文献[24, 36-37]
LT35-1-1 (Y8)	18.030 088 9°N	108.772 561 1°E		1 715	花岗岩 (γ)	224±2		莺歌海盆地	文献[24, 36-37]
YC13-1-1	17.514 225°N	109.008 755 6°E		3 822.19	花岗岩 (γ)	194~226		莺歌海盆地	文献[24, 36-37]
YC19-1-1	17.384 494 4°N	109.111 744 4°E		5 120.7	花岗闪长岩 (γδ)	白垩纪?		莺歌海盆地	文献[24, 36-37]
YING9	18.081 625°N	110.299 35°E		2 850	花岗岩 (γ)	156~185/106.9		琼东南盆地	文献[24]
QH36-2-1	19.121 472 2°N	111.853 511 1°E		1 251	花岗岩 (γ)	前新生代?		神狐隆起	文献[24]
WC2-1-1	19.849 769 4°N	112.238 9°E		3 594~3 641.3	黑云母闪长岩 (δβ)	118		珠三凹陷	文献[24]
YJ23-1-1	20.411 177 5°N	112.808 749 2°E		1 865~1 874.5	花岗闪长岩	47~55		珠三凹陷	文献[24]
EP25-1-1	20.289 942 8°N	113.122 203 9°E		3 164	花岗岩 (γ)	晚白垩世		珠三凹陷	文献[24]
KP9-1-1	19.820 922 2°N	113.484 916 7°E		1 753/ 23	石英岩 (碎裂花岗岩 (γ) ?)	153±6	Rb-Sr	珠三凹陷	文献[24]
				1 662~1 774	石英岩 (碎裂花岗岩 (γ) ?)	153±6	Rb-Sr	神狐隆起	文献[38]
EP18-1-1A	20.535 386 1°N	113.986 155 6°E		3 448.25	A型花岗岩 (γ)	100.5±1.7	K-Ar	番禺凸起	文献[39]
L2-1A				2 480~2 483.5	二云母花岗岩	100.38±1.46	K-Ar	番禺凸起	文献[38]
				2 480~2 483.5	二云母花岗岩	94.38±1.89	Rb-Sr	番禺凸起	文献[38]
EP25-1-1				3 164/ 26	花岗岩 (γ)			番禺凸起	文献[7]
PY3-1-1	20.975 383 3°N	114.435 868 3°E		3 171/ 21.5	花岗岩 (γ)	90.7±3.3	K-Ar	番禺凸起	文献[7]
PY4-1-1	20.870 4°N	114.600 607 5°E		3 192~3 192.5	花岗岩 (γ)	130±5	K-Ar	番禺凸起	文献[24, 38]
P4-1-1	20.870 4°N	114.600 607 5°E		(3 160?)	花岗岩 (γ)	130±5	K-Ar	番禺凸起	文献[24, 38]
PY14-5-1	20.666 496 9°N	114.214 231 1°E		3 164	花岗岩 (γ)	晚白垩世		番禺凸起	文献[24, 38]
				3 788/ 29	花岗岩 (γ)	晚白垩世		番禺凸起	文献[7]

续表 1

编号	位置		水深/m	钻孔深度或钻穿厚度/m	基底岩性	地质时代/Ma	测试方法	所属盆地	数据来源
PY15-1-1	20.559 178 1°N	114.406 146 4°E		4 401.5/ 78.5	A型花岗岩(γ)	89.8		番禺凸起	文献[7, 24]
PY16-1-1	20.425 699 4°N	114.992 525 3°E		2 375.5/ 13.5	苏长岩			番禺凸起	文献[3, 7]
PY20-1-1				3 856/ 57	黑云母花岗岩			番禺凸起	文献[3, 7]
PY21-3-1	20.463 453 1°N	114.377 409 7°E		4 019.5	黑云母花岗岩(γβ)	晚白垩世		番禺凸起	文献[24]
				4 018~4 019.5	黑云母碎裂花岗岩	89.83±1.32	K-Ar	番禺凸起	文献[38]
				4 019.5~4 068	黑云母碎裂花岗岩	89.83±1.32	K-Ar	番禺凸起	文献[7]
PY24-1-1	20.465 110 3°N	114.912 340 3°E		4 414.3	石英闪长岩(δo)	31.4±1.6		番禺凸起	文献[24]
				4 417	绿帘斜长角闪岩	45.3±2.2		番禺凸起	文献[7]
				4 414.9	绿帘斜长角闪岩	42.5±2.1		番禺凸起	文献[7]
				4 391/ 27.6	闪长岩	42.5±2.1		番禺凸起	文献[7]
				3 577	石英二长岩(ηo)	118.9±2.1	K-Ar	番禺凸起	文献[24]
				3 607~3 609	石英二长岩(ηo)	118.9±2.1	K-Ar	番禺凸起	文献[8, 38]
				3 577.5/ 31.5	石英二长岩(碎裂花岗岩)	118.9±2.1	K-Ar	番禺凸起	文献[7]
ZHU1	21.195 416 7°N	113.573 5°E		1 756.6	粗粒花岗岩(γ)	晚白垩世		珠一凹陷	文献[24]
				1 817.9/ 30.02	粗粒花岗岩(γ)	73~76	K-Ar	珠一凹陷	文献[7]
				1 846~1 847	粗粒花岗岩(γ)	73~76	K-Ar	珠一凹陷	文献[38]
ZHU2	21.381 8°N	114.516 25°E		2 270.2	粗粒黑云母花岗岩(γβ)	70.6		珠一凹陷	文献[24]
				2 372/ 8.2	粗粒黑云母花岗岩(γβ)	70.5	K-Ar	珠一凹陷	文献[7]
ZHU3	21.008 888 9°N	113.603 055 6°E		3 150.3	花岗闪长斑岩(γδπ)	69~70.5		珠一凹陷	文献[24]
ZHU4	21.224 855 6°N	114.272 6°E		3 203.5/ 21.9	粗粒黑云母花岗岩(γβ)	75		珠一凹陷	文献[7, 24]
ZHU5	21.017 858 3°N	114.501 827 8°E		3 231/ 31.3	花岗闪长斑岩(γδπ)	75	K-Ar	珠一凹陷	文献[7, 24]
ZHU7	21.354 638 9°N	114.758 388 9°E		3 664.5/ 18.5	花岗岩(γ)	晚白垩世		珠一凹陷	文献[7, 24]
XJ17-3-1	21.535 631 4°N	114.682 551 7°E		2 122.4~2 124.7	碎裂花岗岩(γ)	79.2±2.8	K-Ar	珠一凹陷	文献[39]
XJ24-3-1A	21.379 335 3°N	114.917 462 5°E		4 318.8~4 319.1	碎裂花岗岩(γ)	98	K-Ar	珠一凹陷	文献[24]
XJ24-3-1A	21.379 335 3°N	114.917 462 5°E		4 123/ 196.1	石英二长岩(碎裂花岗岩)	98	K-Ar	珠一凹陷	文献[7]
XJ24-1-1X	21.345 796 7°N	114.977 826 9°E		3 760/ 93.1	碎裂石英二长岩	84	K-Ar	珠一凹陷	文献[7, 24]
XJ30-1-1X	21.242 608 9°N	114.953 164 4°E		3 152/ 18.1	花岗闪长岩(γδ)	晚白垩世		珠一凹陷	文献[7, 24]
XJ30-2-1X	21.268 579 2°N	114.964 837 8°E		3 577/ 59.2	花岗岩(γ)	晚白垩世		珠一凹陷	文献[7, 24]
XJ36-3-1X	21.141 237 5°N	114.898 523 3°E		3 725/ 127.7	花岗闪长碎裂岩	晚白垩世		珠一凹陷	文献[7, 24]
HZ10-1-1	21.787 43°N	115.651 73°E		2 763/ 26	花岗岩(γ)	晚白垩世		珠一凹陷	文献[7, 24]
HZ25-2-1X	21.236 116 9°N	115.015 341 7°E		3 176/ 20.4	A型花岗碎裂岩(γ)	99.8±1.53	K-Ar	珠一凹陷	文献[7, 38]

续表 1

编号	位置		水深/m	钻孔深度或钻穿厚度/m	基底岩性	地质时代/Ma	测试方法	所属盆地	数据来源
HZ26-1-1	21.1808186°N	115.2542047°E		2470.5	花岗岩 (γ)	前新生代?		珠一凹陷	文献[24]
HZ26-1-2	21.1666197°N	115.2690072°E		2591/ 29	花岗岩 (γ)	前新生代?		珠一凹陷	文献[24]
HZ32-3-2	21.1645289°N	115.1681739°E		2662	花岗岩 (γ)	前新生代?		珠一凹陷	文献[24]
HZ32-2-1	21.1613889°N	115.1699444°E		2718/ 9	花岗岩 (γ)	88.5±3.6/K ₂	K-Ar	珠一凹陷	文献[7, 24, 39]
HZ32-2-2	21.1613136°N	115.1698689°E		2783.5/ 17.5	花岗岩 (γ)	前新生代?		珠一凹陷	文献[7, 24, 39]
HZ32-3-1	21.1645694°N	115.2181278°E		2614/ 11	花岗岩 (γ)	前新生代?		珠一凹陷	文献[7, 24, 39]
HZ32-4-1	21.0886822°N	115.2174694°E		2740/ 11	花岗岩 (γ) 或 火山碎屑岩	前新生代?		珠一凹陷	文献[7, 24, 39]
HZ32-1-1	21.0798314°N	115.2805522°E		2785.5	花岗碎裂岩 (γ)	前新生代?		珠一凹陷	文献[24]
				2785.5/ 13.5	花岗碎裂岩 (石英二长岩)	88.5±3.6	K-Ar	珠一凹陷	文献[7]
LF13-1-1	21.5883236°N	116.15731°E		3193/ 32	S型花岗碎裂岩 (γ)	晚白垩世		珠一凹陷	文献[24]
LF22-1-1	21.4791908°N	116.6324847°E		1726/ 49	花岗岩 (γ)	前新生代?		珠一凹陷	文献[24]
HF28-2-1	20.2650631°N	116.61801°E		3898/ 45.6	苏长岩 (花岗闪长岩?)	92.9、109.25±2.4	K-Ar	珠一凹陷	文献[7]
HJ32-1-1	22.0798547°N	117.2266481°E		1719	花岗岩 (γ)	前新生代?		珠一凹陷	文献[24]
HF33-3-1	22.0085583°N	116.407725°E		3278.2	辉岩闪长玢岩 (vδ)	晚白垩世		珠一凹陷	文献[24]
				3277~3286.5	辉岩闪长玢岩 (vδ)	31.9±0.67		珠一凹陷	文献[7]
HZ33-1-1	21.1485683°N	115.3502656°E		2610~2683.3	花岗岩 (γ)	86.2~93.2		东沙隆起	文献[7]
HZ22-1-1	21.3382947°N	115.6333631°E		2798.5/ 26.5	花岗岩 (γ)	前新生代?		东沙隆起	文献[7, 24, 38]
HZ34-1-1	21.0542189°N	115.5494719°E		2300/ 26	花岗岩 (γ)	前新生代?		东沙隆起	文献[7, 24, 38]
HZ35-1-1	21.09249°N	115.6803603°E		2212.5/ 6.4	花岗岩 (γ)	105	K-Ar	东沙隆起	文献[7, 24, 38]
LH11-1-1A	20.8219019°N	115.6984806°E		1836.5	碎裂花岗闪长岩	90.62±1.49	K-Ar	东沙隆起	文献[38]
L11-1-1A	20.8219019°N	115.6984806°E		1822~1837.5	碎裂花岗闪长岩	72.78±1.37	Rb-Sr	东沙隆起	文献[38]
LH1-1-1X				2572.5/ 20.5	花岗碎裂岩			东沙隆起	文献[7]
LH11-1-2	20.7844997°N	115.8489944°E			花岗岩 (γ)	前新生代?		珠一凹陷	文献[24]
LF15-1-1	21.46°N	116.49°E		2160	闪长岩 (错误?)	40.9±1.63		珠一凹陷	文献[7]
				2166.5	闪长岩 (错误?)	45.1±1.8		珠一凹陷	文献[7]
LH18-1-1	20.5918061°N	116.9363603°E		1838/ 36.5	花岗岩 (γ)	前新生代?		东沙隆起	文献[7, 24]
LH18-2-1	20.5025308°N	116.9559031°E		1864/ 20.3	花岗岩 (γ)	前新生代?		东沙隆起	文献[7, 24]
DS7-1-1	20.6810181°N	116.1058203°E		1333/ 40.7	花岗岩 (γ)	前新生代?		东沙隆起	文献[7, 24]
LH19-4-1	20.2068056°N	116.1330833°E		3068.5	闪长岩 (δ)	早白垩世		白云凹陷	文献[24]
LH21-1-1	20.4725725°N	115.3597025°E		2779	闪长岩 (δ)	前新生代?		白云凹陷	文献[24]
LF35-1-1	21.0586278°N	116.7017308°E		1423~1500	花岗岩	102	Ar/Ar	潮汕凹陷	文献[40]
XY1	16.8413806°N	112.3432639°E		1384	花岗片麻岩 (gnγ)	1450		西沙群岛	文献[24]
				1251~1384.6	花岗片麻岩、花岗岩	1400、627、68.9		西沙群岛	文献[41]
XK1-2	16.8458333°N	112.3472222°E		1260~1262	花岗岩 (γ)	107.8±3.6	U-Pb	西沙群岛	文献[42]

续表 1

编号	位置		水深/m	钻孔深度或钻穿厚度/m	基底岩性	地质时代/Ma	测试方法	所属盆地	数据来源
WT-67				3552.3	碎裂黑云母花岗岩	108±3	K-Ar	湄公盆地	文献[4, 43-44]
WT-91				3540.8	黑云母花岗岩闪长岩	149±5	K-Ar	湄公盆地	文献[4, 43-44]
WT-810				3411.8	角闪石黑云母花岗岩闪长岩	135±4	K-Ar	湄公盆地	文献[4, 43-44]
WT-402				3594.1	黑云母花岗岩(微碎裂岩)	108±4	K-Ar	湄公盆地	文献[4, 43-44]
Dragon-3				3548.3	黑云母微斜长石花岗岩	159±5	K-Ar	湄公盆地	文献[4, 43-44]
Dragon-9				2597	黑云母花岗岩(碎裂岩)	178±5	K-Ar	湄公盆地	文献[4, 43-44]
Tamdao-1				3391.5	浅色斑状石英闪长岩	97±3	K-Ar	湄公盆地	文献[4, 43-44]
DaiHung2	8.486 111 1°N	108.69°E		3685	花岗岩	前第三纪		湄公盆地	文献[4, 43-44]
BB-2	8.486 111 1°N	108.69°E		2805.7	花岗岩闪长岩和石英闪长岩	109±5	K-Ar	万安盆地	文献[45]
BB-3	8.4975°N	108.635833°E		3533.1	花岗岩闪长岩和石英闪长岩	105±5	K-Ar	万安盆地	文献[45]
DaiHung-1	8.453 333 3°N	108.644 72°E		3352	花岗岩闪长岩($\gamma\delta$)	前新生代?			文献[24]
15G-1x	10.424 722°N	108.362 78°E		2925	花岗岩(γ)	前第三纪		湄公盆地	文献[24]
15C-1x	9.966 944°N	108.303 89°E		3276	花岗岩(γ)	前第三纪		湄公盆地	文献[24]
28-A-1X	7.397 305 6°N	106.866 84°E		1504	石英闪长岩($\delta\sigma$)	前新生代?		万安盆地	文献[24]
Dua-12-B-1X	7.500 277 8°N	108.267 5°E		3889	花岗岩(γ)	前新生代?		万安盆地	文献[24]
Dua-12-C-1X	7.521 388 9°N	108.022 22°E			花岗岩(γ)	前新生代?		万安盆地	文献[24]
				3587	花岗岩(γ)			万安盆地	文献[43]
Dua-1X	7.439 444 4°N	108.428 89°E		4013	花岗岩(γ)	白垩纪		万安盆地	文献[43]
Cipta-B	6.303 611 1°N	108.548 61°E		3274	花岗岩闪长岩($\gamma\delta$)			万安盆地	文献[43]
AT-1X	5.485°N	108.664 72°E		1768	黑云母花岗岩闪长岩	80±2.4		万安盆地	文献[43]
AS-1X	6.847 85°N	108.424 14°E		1726	黑云母角闪石花岗岩闪长岩	129±7		万安盆地	文献[43]
两兄弟群岛					花岗岩(γ)	70±3		湄公盆地	文献[43]
AP-1X	5.516 969 4°N	109.618 06°E		4199	花岗岩闪长岩($\gamma\delta$)	79.3±4.7	K-Ar	曾母盆地	文献[24]
				4199	深成岩				文献[43]
Non-name-1	1.95°N	109.483 33°E			花岗岩(γ)	75±5	K-Ar	曾母盆地	文献[24]
					花岗岩(γ)	75±5	K-Ar	婆罗洲西北	文献[43]
Non-name-2	1.616 667°N	109.716 67°E			花岗岩(γ)	75.6±4	K-Ar	曾母盆地	文献[24]
					花岗岩(γ)	75.6±4	K-Ar	婆罗洲西北	文献[43]
Ga-bus-6				1301.5	云母角闪石英二长岩	110	K-Ar	纳土纳盆地	文献[22]
Dumaran-1	10.326 667°N	119.939 44°E		2043	超基性岩(σ)	晚白垩世		西北巴拉望	文献[24]
			130	2033	蛇纹石化橄榄岩				文献[46]
SO23-23	9.9°N	115.866 67°E	1900		橄榄辉长岩及流纹凝灰岩	$T_3 \sim J_1$		礼乐滩	文献[24]
			1700		橄榄石辉长岩与流纹岩	$T_3 \sim J_1$		礼乐滩	文献[45]

续表 1

编号	位置		水深/m	钻孔深度或钻穿厚度/m	基底岩性	地质时代/Ma	测试方法	所属盆地	数据来源
SO27-24	9.883 333°N	115.833 33°E	2 100		闪长岩及流纹质凝灰岩	中三叠世 (T ₂) ?		礼乐滩	文献[45]
SO49-16					闪长岩、辉长岩	140~150		中沙海台	文献[41]
SO49-36					闪长岩、辉长岩	140~150		中沙海台	文献[41]
SO23-36	12.1°N	116.58°E	2 373		多孔玄武岩 (角闪岩?)	146			文献[47]
1yDG	11.483333°N	114.066666°E	3 000		细粒黑云母花岗岩	早白垩世晚期		西南次海盆	文献[24]
			3 000		二长花岗岩	109.7、114.2、120	Ar/Ar	西南次海盆	文献[48]
			3 000		二长花岗岩	109.7、114.2、120	K-Ar	西南次海盆	文献[48]
			3 000		二长花岗岩	153.6±0.3、127.2±0.2	U-Pb	西南次海盆	文献[49]
2yDG	11.783333°N	114.943333°E	2 800		花岗岩	早白垩世晚期		西南次海盆	文献[24]
			2 800		斜长花岗岩	159.1±1.6、157.8±1.0	U-Pb	西南次海盆	文献[49]
3yDG	13.466666°N	114.333333°E			花岗闪长岩	早白垩世晚期		西南次海盆	文献[24]
大珍珠海山	12.715842°N	115.931635°E			花岗闪长岩	127~122		西南次海盆	文献[7]

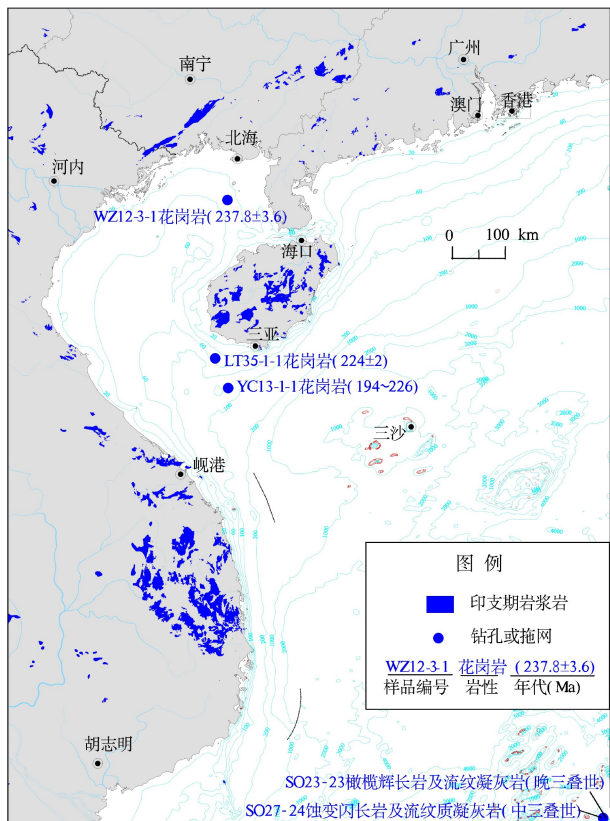


图 4 南海及邻区印支期岩浆岩分布图^[7]
Fig.4 Distribution of Indosinian magmatic rocks in the South China Sea and its adjacent areas^[7]

流圈地幔,受陆壳物质混染作用形成,酸性火山岩来源于壳源岩石的部分熔融,流纹岩 U-Pb 年龄为 229±2 Ma^[50]。

1.7 燕山期

南海及邻区燕山期岩浆活动强烈,以中、酸性花岗岩为主,连片且广泛分布,与太平洋板块向欧亚大陆之下的斜向俯冲有关。燕山期岩浆岩普遍存在陆壳组分参与,成分多属酸性、中酸性。根据地层发育、岩浆活动和构造特征,可分为燕山早期(早侏罗世为燕山一期、中侏罗世为二期、晚侏罗世为三期)和燕山晚期(早白垩世为四期,晚白垩世为五期)(图 5)。

1.7.1 侵入岩

燕山期南海及邻区侵入岩主要分布在广西、广东、海南岛、台湾、中南半岛、加里曼丹、菲律宾、南海北部、中西沙台地、南海南部。

广西燕山期超基性、基性岩体出露很少,除浦北县的香山岩体呈单独岩体出现外(由辉石岩和辉长岩组成),其余的超基性、基性侵入岩多数与中酸性岩石一起形成杂岩体,另外邕宁县也有少量晚侏罗世辉绿岩呈脉状侵入于上白垩统,而中、酸性侵入岩出露广,出露面积 4 566 km²,有黑云母花岗岩、闪长岩、石英二长岩、角闪石岩、正长岩、辉绿玢岩、花岗斑岩等,主要呈岩株产出,多数呈北西-南东向展布,受博白-岑溪断裂、南丹-都安等断裂控制。此外,煌斑岩有都安、天河和沙子等岩带^[9]。

广东侵入岩燕山一期分布在粤北,主要为黑云母花岗岩,钙碱性系列,年龄为 161~196 Ma,河源

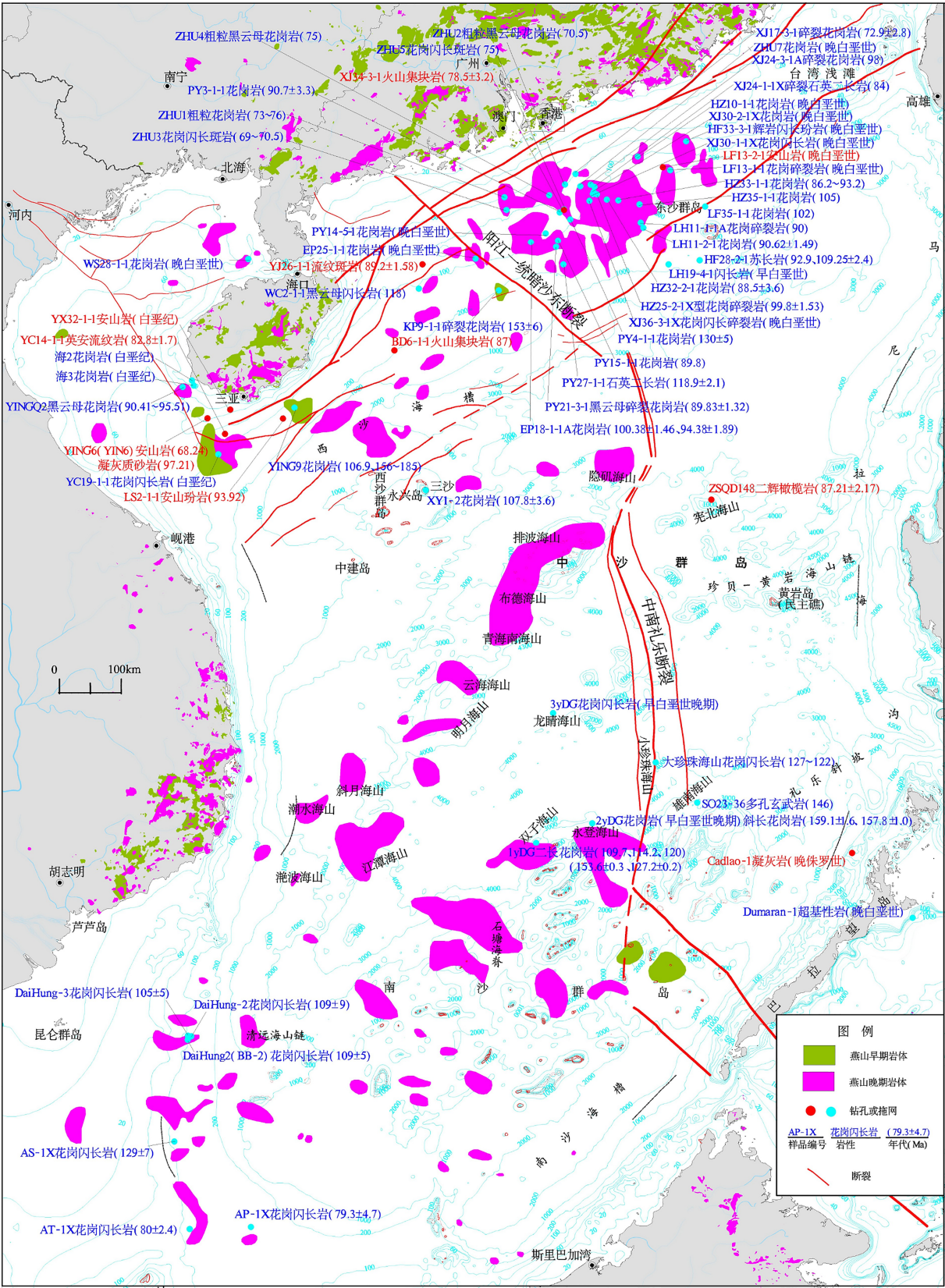


图 5 南海及邻区燕山期岩浆岩分布图^[7]

Fig.5 Distribution of Yanshanian magmatic rocks in the South China Sea and its adjacent areas^[7]

的花岗岩年龄为 200 Ma^[51]; 燕山二期分布在粤西、粤中和粤东北, 主要为钙碱性系列的中酸性二长花

岗岩, 少量中基性至超基性杂岩, 年龄为 141~163 Ma; 燕山三期遍及全省, 主要为黑云母花岗岩, 年龄为

135~145 Ma; 燕山四期分布在粤东、粤西等地, 主要为二长花岗岩和黑云母花岗岩, 年龄为 89~137 Ma; 燕山五期零星分布于全省, 主要为花岗斑岩、石英斑岩等, 年龄为 66~97 Ma^[17, 52]。

海南岛燕山期花岗岩分布在屯昌、邦溪等地, 多期次, 主要是 I 型花岗闪长岩-二长花岗岩-碱长花岗岩, 年龄为 111~87 Ma^[23, 53], 基性岩墙群分布在琼海、昌江、三亚, 为辉绿岩, 碱性系列, 年龄约 101、93 Ma^[34]。

台湾燕山期侵入岩分布于东部, 出露面积约 224 km², 为片麻状花岗闪长岩-辉长岩, 年龄为 97~77 Ma, 属 I 型花岗岩, 块状石英闪长岩年龄为 82±1 Ma^[54-55], 大仑花岗岩年龄为 191±10 Ma^[56]。

中南半岛侏罗纪—早白垩世, 越南 Song Da 带岩浆岩侵入作用以花岗岩为主^[37]。秀丽、大叻大型裂谷断陷中有成群的辉长橄榄岩、辉长岩、苏长岩、辉长辉绿岩、闪长岩及花岗斑岩组成的岩株、岩墙侵入, 侵入体年龄为 130~178 Ma^[43]。晚白垩世—古近纪, 越南岩浆岩分布范围广, 主要集中在东南部富安、多乐、林同、宁顺、平顺等省, 北部仅零星分布, 以二云母花岗岩为主, 还有 I 型闪长岩-花岗闪长岩-二长花岗岩, 呈中、小型岩基、岩株产出, 年龄多为 98~85 Ma^[11, 23]。

加里曼丹岛西南部出露众多的燕山期岩基, 其中施瓦纳山岩基东西长超过 500 km, 南北宽 200 km, 主要为中酸性岩浆的花岗闪长岩和英闪岩, 年龄为 (130.2±2.8) ~ (77.4±1.7) Ma^[4], 闪长斑岩年龄为 82.1±1.7 Ma 和 78.7±2.3 Ma^[57], 属 I 型钙碱系列^[58], 与俯冲活动相关。

菲律宾北巴拉望岛燕山期主要以石英二长岩为代表, 为晚三叠世—早侏罗世^[59]。菲律宾前古近纪花岗岩类零星分布在北巴拉望岛和北棉兰老岛, 多沿前侏罗纪大陆基底边缘产出, 岩体规模较小, 以闪长岩为主^[60], 晚白垩世 Cebu 地区辉长岩年龄为 108 Ma^[61]。

南海北部湾东部海域推测存在近 20 个呈北东、北东东向(个别为北西向)带状排列的隐伏花岗岩体, 其数量由东北至西南呈逐渐减少的趋势, 它们明显受到北东东向断裂的控制(图 5)。根据磁异常特征, 推测这些岩体仍属于印支期—燕山期花岗岩。

珠江口盆地分布燕山期中酸性岩浆岩, 年龄为 70.5~153 Ma, 侵入时间从西北向东南具有逐渐变晚和侵入作用逐渐加强的趋势, 以晚期为主, 分布较广, 规模不大, 侵入岩以浅成多见, 主要成因有陆

壳改造型(相当于 S 型)和过渡重熔型(相当于 I 型)两种, 具有火山弧、板内与同构造碰撞带花岗岩的特征, 属于大陆边缘活动带中期和晚期的产物, 受太平洋板块向欧亚板块俯冲的影响。且此期岩浆岩主要沿基底断裂侵入或喷发, 受基底断裂控制, 其生长方向与断裂走向紧密相关。珠江口盆地东部的潮汕凹陷北坡 LF35-1-1 井附近的侵入体主要呈小规模岩株和岩墙侵入, 在地震剖面上, 该时期形成的岩浆岩一般位于新生代沉积基底之下, 表现为规模巨大丘状隆起, 岩体两侧地层略牵引, 地震反射特征为基底顶面有强反射, 以下为无反射或杂乱反射(图 6), LF35-1-1 井在 1423~1500 m 处主要为花岗岩及花岗闪长岩, 部分为闪长岩, 正长岩极少, 花岗岩⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄 102 Ma^[40], 但杨树春等^[62]认为该井 2412 m 之下为火成岩侵入体, 年龄 103 Ma, 该侵入体为一沿逆掩断裂形成的岩墙。西江凹陷 ZHU1 井在 1846~1847 m 处粗粒花岗岩年龄 73~76 Ma^[39]。东沙隆起 HZ33-1-1 井在 2610~2683.3 m 处花岗岩年龄 86.2~93.2 Ma^[7, 24]。珠一凹陷 L2-1A 井 2480~2483.5 m 处二云母花岗岩年龄为 100.38±1.46 Ma (K-Ar) 和 94.83±1.89 Ma (Rb-Sr); 番禺低隆起 PY27-1-1 井 3607~3609 m 处石英二长岩 K-Ar 年龄 118.9±2.1 Ma; PY21-3-1 井 4019.5~4068 m 处碎裂黑云母花岗岩年龄为 89.83±1.32 Ma^[38], ZHU2 井 2270.2 m 处粗粒黑云母花岗岩年龄为 70.6 Ma^[24], 2372 m 处粗粒黑云母花岗岩为 70.5 Ma^[7]。珠一凹陷 ZHU3 井 3150.3 m 处花岗闪长斑岩年龄 69~70.5 Ma; 珠三凹陷 WC2-1-1 井 3594~3641.3 m 处为黑云母闪长岩, 3572 m 处黑云母闪长岩年龄为 118 Ma^[24](表 1)。神狐暗沙隆起的 KP9-1-1 钻井 1662~1774 m 处碎裂花岗岩 Rb-Sr 等时线年龄为 153±6 Ma^[39, 41]。琼东南盆地 YING9 井 2850 m 处花岗岩年龄 106.9 Ma; YING 9 井 2850 m 处花岗岩年龄 156~185 Ma^[24, 36](表 1)。莺歌海盆地莺东斜坡 YINGQ2(Y7)井 689.4 m 处黑云母花岗岩年龄 90.41~95.51 Ma^[24, 37](表 1)。

西沙群岛宣德环礁的石岛上西科 1 井(XK1) 1261.5 m 处 XK1-2 样品为浅灰色花岗岩, 矿物晶体粗大, 具典型的花岗结构, 分布层段为 1260.52~1262.72 m, 锆石 U-Pb 年龄 107.8±3.6 Ma^[42]; 永兴岛西永 1 井在井深 1251 m 处变质岩基底后期贯入的花岗岩年龄为 68.9 Ma(表 1); XK1 井 1262.8~1268.02 m 层段为肉红色—灰白色碱长花岗岩和二长花岗岩, 为 I 型花岗岩, 其岩浆源在一定程度上受到了幔源组分的影响, 锆石 U-Pb 年龄为 144~

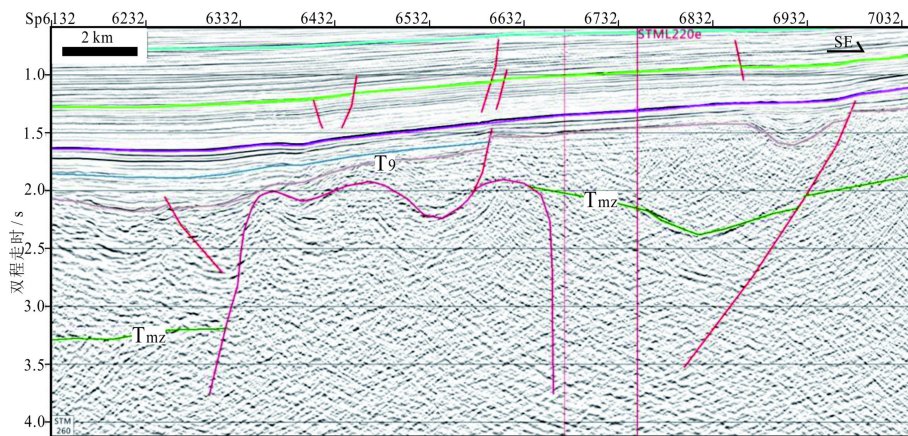


图6 珠江口盆地燕山期岩墙状岩体 (STM 260 测线)

Fig.6 Yanshanian dykes in the Pearl River Mouth Basin(STM 260 line)

158 Ma^[63]。中沙海台和北部陆坡 SO49-16 和 SO49-36 采样点采获闪长岩和辉长岩,时代为 140~150 Ma^[41]。中沙浅滩东北端礁基上获得的花岗质岩石单矿物云母 K-Ar 年龄为 126.63 ± 2.02 Ma, 斜长石 K-Ar 年龄为 119.32 ± 1.91 Ma^[64]。

西南海盆东南部洋陆过渡带 1yDG 测站的酸性二长花岗岩年龄为 153.6 ± 0.3 Ma, 2yDG 测站的中性斜长花岗岩 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄为 159.1 ± 1.6 Ma 和 157.8 ± 1.0 Ma^[49](表 1)。1yDG 测站的细粒黑云母花岗岩 Ar-Ar 年龄为 109.7 Ma, K-Ar 年龄为 114.2 Ma (表 1), 离子探针锆石年龄为 120 Ma^[48], 锆石年龄为 127.2 ± 0.2 Ma^[49]。1yDG 测站和 2yDG 测站的花岗岩为 I 型花岗岩^[65], 与同期的西沙地块花岗岩相同, 可能属于华南中生代花岗岩带的组成部分, 为晚侏罗世构造-岩浆热事件的产物。

淡美然岛和亚南巴斯群岛花岗岩年龄分别为 84 和 85 Ma^[4, 22]。纳土纳岛的拉奈花岗岩年龄为 73 ± 2 Ma^[43]。西纳土纳盆地 Ga-bus-6 井在 1301.5 m 处云母角闪石英二长岩 K-Ar 年龄为 110 Ma^[22]。南沙仁爱礁西侧(SO23-23 及 SO27-24 站)分布燕山早期蚀变闪长岩及蚀变橄榄辉长岩^[45]。

湄公盆地 WT-91 井 3540.8 m 处黑云母花岗岩闪长岩年龄为 149 ± 5 Ma; WT-810 井 3411.8 m 处角闪石黑云母花岗岩闪长岩年龄为 135 ± 4 Ma; WT-402 井 3594.1 m 处黑云母花岗岩年龄为 108 ± 4 Ma; WT-67 井 3552.3 m 处黑云母花岗岩年龄为 108 ± 3 Ma; TD-1 (Tamdao-1) 井 3391.5 m 处浅色斑状石英闪长岩年龄为 97 ± 3 Ma; DG-9 (Dragon-9) 井 2597.0 m 处黑云母花岗岩年龄为 178 ± 5 Ma; DG-3 (Dragon-3) 井 3548.3 m 处黑云母微斜长石花岗岩年龄为 159 ± 5 Ma; 两兄弟群岛花岗岩年龄为 70 ± 3 Ma^[43]。

万安盆地 AT-1X 井 1768 m 处黑云母花岗岩闪长岩

年龄为 80 ± 2.4 Ma; DaiHung2 (DH-2) 井 3685 m 处花岗岩为前白垩纪; AS-1X 井 1728 m 处黑云母角闪石花岗岩闪长岩年龄为 129 ± 7 Ma; Dua-1x 井 4013 m 处为白垩纪花岗岩^[43](表 1)。BB-2 井 2805.7 m 处和 BB-3 井 3533.1 m 处花岗闪长岩和浅色石英闪长岩年龄分别为 109 ± 5 和 105 ± 5 Ma^[45](表 1)。

曾母盆地(加里曼丹岛西北角)花岗岩年龄 75 ± 5 和 75.6 ± 4 Ma, 曾母盆地 AP-1X 井 4199 m 处花岗岩闪长岩年龄为 79.3 ± 4.7 Ma^[24, 43](表 1)。

1.7.2 喷出岩

燕山期南海及邻区喷出岩分布于广西、广东、海南岛、台湾、中南半岛、菲律宾、南海北部和西南部海域。燕山期广西晚白垩世火山岩分布较广, 大部分集中在桂东南及桂南一带红色盆地内, 以酸性熔岩和火山碎屑岩为主, 部分为中性、中酸性火山岩, 普遍受区域性断裂构造控制, 组成博白-岑溪、灵山-藤县等中生代火山构造喷发带^[9], 博白玄武质安山岩 K-Ar 年龄为 99.8 ± 2.4 Ma^[66]。燕山期为广东火山活动最强盛时期, 早期为海相中基性火山活动, 晚期为陆相中酸性火山活动, 受断裂控制, 呈北东向带状分布, 组成吴川-四会、恩平-新丰、河源、莲花山、潮安等主要的中生代火山构造喷发带, 以中酸性为主, 包括熔岩类、火山碎屑熔岩类、火山碎屑岩类、沉火山碎屑岩类和火山碎屑沉积岩类以及次火山岩类, 主要发育在粤东地区, 首先发源于河源喷发带, 尔后向西波及、向东增强, 即由西北向东南, 由老到新逐渐迁移的规律。火山活动与同期岩浆侵入活动形影不离, 与同熔型花岗岩类为同源关系, 与重熔型花岗岩类为空间上的叠加关系, 火山岩带与花岗岩带相间分布, 火山岩主要位于断陷带内, 花岗岩主要位于断隆带上^[17]。海南岛南部分布大量白垩纪流纹岩、玄武岩、安山岩^[67]。台湾岛

燕山期变质火山岩主要分布在中央山脉东翼, 为大南澳岩群中的变质火山岩, 原岩为基性熔岩或火山碎屑岩, 锆石年龄为 $93 \sim 103 \text{ Ma}$ ^[31]。太鲁阁带北部苏花高速公路旁的变质安山岩, 化学成分类似于现代大洋岛弧型中钾钙碱性安山岩, 锆石 U-Pb 年龄为 $85 \pm 2 \text{ Ma}$ ^[55], 澎湖地区的花屿安山岩年龄为 $65 \sim 69 \text{ Ma}$ ^[68]。越南 Song Da 带的秀丽盆地发育侏罗纪—早白垩世的玄武岩、粗面岩、安山岩夹陆源碎屑砂岩和火山碎屑岩^[37]; 芽庄安山岩 K-Ar 年龄为 $(85.11 \pm 1.04) \sim (87.61 \pm 1.11) \text{ Ma}$ ^[7]; 大叻安山岩、英安岩和流纹岩及凝灰岩组成厚达 2 000 m 以上的晚侏罗世—白垩纪敦敦永 (Donzyyong) 火山岩^[43]。菲律宾 Cebu 地区玄武安山质火山碎屑岩年龄为 $116.5 \sim 119.7 \text{ Ma}$ ^[61]。

南海珠江口盆地、莺歌海盆地、琼东南盆地、西北巴拉望盆地、西纳土纳盆地分布燕山晚期基性至酸性喷出岩 (表 2)。珠江口盆地东部潮汕凹陷北坡 LF35-1-1 钻井中微体古生物、岩石组合及沉积特征, 反映了该区经历了中侏罗世—晚白垩世海相和陆相沉积旋回中伴随基性和酸性火山喷发, 在 461~1 423 m 处玄武岩 (细碧岩) 具典型粗玄结构、交织结构, 气孔-杏仁构造, 该井安山岩具斑状结构, 玻晶交织结构, 玻基斑状结构等, 气孔-杏仁构造发育在 461~720 m 处和 940~1 423 m 处, 流纹岩具斑状结构, 岩石由酸性火山玻璃及火山尘组成, 含石英、长石斑晶, 常具熔蚀结构; 在 720~940 m 处火山碎屑岩常见熔蚀结构^[40]。珠三凹陷 YJ26-1-1 井 1 700~1 702 m 处流纹斑岩年龄为 $89.2 \pm 1.58 \text{ Ma}$ ^[39]。神狐隆起 BD6-1-1 井 2 133 m 处火山集块岩为 87 Ma ^[24]。莺歌海盆地 YING6 井 2 222.4 m 处安山岩年龄为 68.24 Ma ; YC14-1-1 井 3 158 m 处英安流纹岩年龄为 $82.8 \pm 1.7 \text{ Ma}$ ^[24]。Y5 井凝灰质砂岩年龄为早白垩世 97.21 Ma ^[37]。琼东南盆地 LS2-1-1 井 2 769 m 处安山玢岩年龄为 93.92 Ma ^[24]。西北巴拉望盆地 Cadlao-1 井 3 191.2 m 处为晚侏罗世火山凝灰岩^[46]。南沙仁爱礁西侧 (美济礁东部, SO23-23 及 SO27-24 站) 拖网获得燕山早期流纹质凝灰岩^[47], 仙娥礁以南 SO27-70 拖网块状流纹岩基质属高钾钙碱性序列^[4]。西纳土纳盆地 Terubuk-1 井在 2 563.6 m 处安山质变质熔岩, 年龄为 $169 \pm 7 \text{ Ma}$; Af-1x 井在 3 048~3 094.9 m 处为深灰、绿灰色安山质喷出岩, K-Ar 年龄为 92.4 Ma ^[22]。

1.8 喜马拉雅期

南海及其邻区喜山期的岩浆岩分布广泛, 在南

海海区、华南大陆、中南半岛及台湾-吕宋岛弧、婆罗洲等地区均有出露 (图 7)。根据南海钻井、拖网和 IODP 钻探、地震剖面岩体与围岩地层的接触关系, 结合重磁异常解释和陆缘岩浆岩分布特征和活动时间, 按南海海盆扩张阶段, 将喜马拉雅期岩浆活动分为 3 期次: 扩张前 ($> 32 \text{ Ma}$)、扩张期 ($32 \sim 16 \text{ Ma}$) 和扩张期后 ($< 16 \text{ Ma}$), 南海扩张期后的岩浆作用最强烈。侵入岩零星分布于中南半岛、广东、广西、菲律宾、加里曼丹以及南海北部等地区, 扩张前侵入岩主要分布在华南沿海、中南半岛、菲律宾, 扩张期后侵入岩主要分布在菲律宾、加里曼丹岛。华南大陆地区喷出岩一般为多期次间歇性的喷发活动, 从喜马拉雅早期的含中酸性向喜马拉雅后期的基性岩为主转变; 在空间上具有从周缘陆地往南海迁移的趋势, 南海海区岩浆活动呈现由隆起区向四周减弱之趋势。

1.8.1 南海扩张前

南海扩张前的侵入岩分布在广西、广东、台湾、中南半岛、菲律宾、加里曼丹和南海北缘, 岩浆侵入活动微弱。广西仅有少量超基性岩分布于南丹-都安断裂和凭祥-大黎断裂, 以岩筒产出, 主要为苦橄玢岩 (K-Ar 年龄 $37 \sim 47 \text{ Ma}$)、玻基橄辉岩 (K-Ar 年龄 $33 \sim 35 \text{ Ma}$), 其次为辉绿岩、粒玄岩^[9]。在粤东沿海地区较明显, 以辉长岩为主, 个别可见超基性岩及中性岩^[52], 有莲花山岩带和惠来-汕头-饶平岩带, 分别受控于莲花山断裂带和南澳断裂带^[17]。台湾古近纪有辉绿岩、角闪闪长岩和石英闪长岩^[30, 55]。中南半岛越南 Song Da 晚白垩世—古新世岩浆侵入作用零星分布, 以二云母花岗岩、浅色花岗岩为主^[37]。菲律宾古近纪花岗岩类主要分布在吕宋岛东、西部沿海地区, 西部花岗岩类受前中新世向西倾斜的逆冲断裂构造控制, 发育辉石石英闪长岩、角闪石英闪长岩、奥长花岗岩, 东部花岗岩类年龄为 $36 \sim 49 \text{ Ma}$, 大部分侵入于受向西倾斜的逆冲断裂构造控制的火山岩带中, 有石英闪长岩、二长岩、花岗闪长岩, 其中达沃岩体为 60 Ma , 古马拉斯群岛的闪长岩年龄为 59 Ma , 宿务岛花岗闪长岩年龄为 59.7 Ma ^[60]。加里曼丹岛的沙巴地区中新世之后形成的中酸性岩分布在达富尔湾和基纳巴鲁山, 基纳巴鲁山为黑云母花岗岩和角闪石花岗岩, 斑状闪长岩侵入到超基性岩中。

南海北部湾盆地乌石 16-1-1 钻井流沙港组二段 2 695.5~2 738 m、乌石 16-1-2 井流沙港二段 2 911~2 936 m 处古近纪基性辉长岩^[7], 福山凹陷古近系流沙港组二段泥岩发育大面积巨厚辉长岩类似板内

表 2 南海喷出岩的钻孔和拖网数据
Table 2 Extrusive rocks collected by borehole and trawling in the South China Sea

编号	位置		水深/m	钻孔深度或钻穿厚度/m	基底岩性	地质时代/Ma	测年方法	所属盆地	数据来源
YING6 (YIN6)	17.9209528°N 108.9414694°E			2222.4~2132.1	安山岩 (α)	68.24/K ₂		莺歌海盆地	文献[24, 36]
				2222.4~2132.1	凝灰质砂岩	97.21		莺歌海盆地	文献[24, 36]
YX32-1-1	18.0498178°N 109.2959547°E		680		安山岩 (α)	白垩纪 (K) ?		莺歌海盆地	文献[24, 36]
YC14-1-1	17.6895472°N 109.2135361°E		3158		英安流纹岩 (ελ)	82.8±1.7		莺歌海盆地	文献[24, 36]
Y5					凝灰质砂岩	97.21 (K)		莺歌海盆地	文献[37]
LS2-1-1	17.9196208°N 110.1194206°E		2769		安山玢岩 (αμ)	93.92		琼东南盆地	文献[24]
BD6-1-1	18.9361917°N 111.8582528°E		2133		火山集块岩	87		神狐隆起	文献[24]
WC8-2-1	19.7298319°N 112.1648825°E		2682		流纹斑岩 (λπ)	前新生代?		珠三凹陷	文献[24]
YJ26-1-1	20.2053333°N 112.2934167°E			1702.8	流纹斑岩 (λπ)	89.2±1.6	K-Ar	珠三凹陷	文献[24]
				1700~1702	流纹斑岩 (λπ)	89.2±1.58	K-Ar	珠三凹陷	文献[39]
YJ21-1-1	20.5063347°N 112.4169481°E		1620~1656		流纹岩	51.6		珠三凹陷	文献[24]
YJ21-1-1	20.45°N 112.3°E			1650	流纹岩	51.6±0.2		珠三凹陷	文献[7]
				1648~1656	流纹质岩屑晶屑熔岩	51.6±8.3		珠三凹陷	文献[3]
KP6-1-1	19.8369458°N 113.8571342°E		2728/ 28.7		凝灰角砾岩	前新生代?		珠三凹陷	文献[24]
PY16-1-1	20.48°N 114.85°E			2384	含长石玄武岩 (β)	41.2±2		番禺凸起	文献[69]
				2384~2387	含长石玄武岩 (β)	41.2±2		番禺凸起	文献[3]
XJ33-2-1A	21.11°N 114.3°E		4868.5~4887		玄武岩	24.3±1.3		番禺凸起	文献[3]
XJ34-3-1	21.0090358°N 114.5016478°E		3296/ 4		火山集块岩	78.5±3.2		番禺凸起	文献[24]
HZ18-1-1			3410/ 1		凝灰岩			珠一凹陷	文献[7]
HZ25-1-1X			3041/ 1		火山集块岩			珠一凹陷	文献[7]
HZ32-4-1	21.0886822°N 115.2174694°E		2740/ 11		花岗岩 (γ) 或火山碎屑岩	前新生代?		珠一凹陷	文献[24]
LF1-1-1	21.9°N 116.05°E			3324~3455	流纹质凝灰岩	32±1.4或33.6±0.7		珠一凹陷	文献[69]
				3445.4~3455	凝灰岩	33.58±0.7或32.0±1.4		珠一凹陷	文献[3]
LF13-2-1	21.6324761°N 116.0436628°E		3280		安山岩 (α)	晚白垩世 (K ₂)		珠一凹陷	文献[24]
HF28-2-1	20.2650631°N 116.61801°E		3898/ 45.6		苏长岩 (花岗闪长岩?)	92.9、109.25±2.4		珠一凹陷	文献[7]
HJ32-1-1	22.0798547°N 117.2266481°E		1695/ 24		火山集块岩/凝灰质砂岩	前新生代?		珠一凹陷	文献[7]
BY7-1-1	19.65°N 114°E			3500.7	玄武质熔岩层	35.5±2.78	K-Ar	珠二坳陷	文献[3, 69]
				2752	凝灰岩	17.6±1.8	K-Ar	珠二坳陷	文献[3, 69]
				2429	玄武岩	17.1±2.5	K-Ar	珠二坳陷	文献[3, 69]
HZ33-1-1	21.1485683°N 115.3502656°E		2731		玄武岩	41.1±4		东沙隆起	文献[3]
HZ33-2-2	21.2617428°N 115.4557706°E		2455.5/ 14.5		安山岩 (α)	前新生代?		东沙隆起	文献[24]
LH11-1-2	20.77°N 115.8°E			1800	英安岩	27.2±0.6		珠一凹陷	文献[3, 69]
				1672~1813	玄武岩	27.17±0.55		珠一凹陷	文献[3, 69]

续表 2

编号	位置		水深/m	钻孔深度或钻穿厚度/m	基底岩性	地质时代/Ma	测年方法	所属盆地	数据来源
LH4-1-1	20.85°N	115.5°E		1 669~1979	英安岩、凝灰岩	43.15±0.7		珠一凹陷	文献[69]
HZ21-1-1	21.32°N	115.31°E		4 480~4 696	英安岩	41.1	K-Ar	东沙隆起	文献[69]
				4 591	英安斑岩	27.7±1.8	K-Ar	东沙隆起	文献[7, 38]
				4 588~4 604		41.1±0.67	K-Ar	东沙隆起	文献[7, 38]
HZ27-1-1	21.36°N	115.4°E		3 016~3 066	安山岩	57.1±2.5		东沙隆起	文献[3]
				井底捞块	安山岩	45.3±2.9		东沙隆起	文献[7]
LF15-1-1	21.46°N	116.49°E		2 166.5	玄武岩	45.1±1.63		珠一凹陷	文献[3]
L15-1-1	21.46°N	116.49°E		(2 175?)	玄武岩	45.1±1.63		陆丰坳陷	文献[70]
LF21-1-1	21.4°N	116.37°E		2 223~2 446	流纹质凝灰岩	49.33		珠一凹陷	文献[69]
				2 290	凝灰岩	47.3±1.1		珠一凹陷	文献[7]
ODP1148	18.84°N	116.57°E		3 249	英安质凝灰岩	<1		珠江口盆地	文献[69]
LF35-1-1	21.058 627 8°N	116.701 730 8°E		1 030	流纹岩			珠一凹陷	文献[7]
				1 369~2 376	玄武岩	36~118		珠一凹陷	文献[24]
LW3-1-1	19.9°N	115.4°E		2 746~3 458	砂泥岩夹层含火山岩	珠江组		白云凹陷	文献[71]
SO9-1	18.2997222°N	115.1172222°E			粗面岩	23.29±0.22	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar	双峰海山	文献[57]
SO9-2	18.2997222°N	115.1172222°E			粗面岩	23.8±0.18	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar	双峰海山	文献[57]
SCS-1	21.1666666°N	119.2°E			碱性玄武岩	21±0.2	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar	浦元海山	文献[72]
SCS-2-3	21°10'N	119.2°E			碱性玄武岩	22.1±0.2	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar	浦元海山	文献[72]
CM-1X	14°16'22"N	109°38'17"E		500	玄武岩	中新世		西部陆架	文献[73]
04-B-1X	8.627 777 8°N	108.972 22°E		2 442	火山岩 (v)	白垩纪 (K) ?		万安盆地	文献[24]
				2 442	火山岩 (v)	燕山期的前白垩纪		万安盆地	文献[4]
04-B-2X	8.627 222 2°N	108.890 56°E		2 593	火山岩 (v)	白垩纪 (K) ?		万安盆地	文献[24]
				2 593	火山岩 (v)	燕山期的前第三纪		万安盆地	文献[4]
AY-1X	5.618 888 9°N	109.468 89°E		2 811	火山集块岩	54.6±2.7	K-Ar	曾母盆地	文献[43]
Terubuk-1				2 563.6	安山质变质熔岩	169±7		纳土纳盆地	文献[22]
Af-1x				3 048~3 094.9	喷出岩	92.4	K-Ar	纳土纳盆地	文献[22]
Ilog-1	10.2012333°N	122.6373333°E	57	1 676	砾岩火山岩	? 中中新世			文献[46]
ODP769	08.7853333°N	121.2946666°E	3 644	376.9	凝灰岩和火山泥石流	早中新世晚期			文献[46]
ODP767	04.7916666°N	123.5033333°E	4 916	786.6	玄武岩	上层中始新世粘土岩			文献[46]
SO23-23	9.9°N	115.866 67°E	1 900		橄榄辉长岩及流纹凝灰岩	T ₃ ~J ₁		礼乐滩	文献[24]
			1 700		橄榄石辉长岩与流纹岩	T ₃ ~J ₁		礼乐滩	文献[45]
SO27-24	9.883 333°N	115.833 33°E		2 100	蚀变闪长岩及流纹质凝灰岩	中三叠世 (T ₂) ?		礼乐滩	文献[45]
SO23-36	12.1°N	116.58°E	2 373		多孔玄武岩 (角闪岩?)	146		礼乐滩	文献[47]
SO23-37	12.08°N	116.62°E	3 227~		气孔状玄武岩	0.4	K-Ar		文献[45]
			3 043		气孔状玄武岩	0.4	K-Ar		文献[45]

续表 2

编号	位置		水深/m	钻孔深度或钻穿厚度/m	基底岩性	地质时代/Ma	测年方法	所属盆地	数据来源
SO23-38	11.73°N	118.3°E	1 610~1 356		橄榄玄武岩	0.5	K-Ar		文献[45]
					橄榄玄武岩	0.5	K-Ar		文献[45]
SO23-40	12.35°N	118.82°E	1 050~765		气孔状斑晶玄武岩	2.7	K-Ar		文献[45]
SO23-15	8.17°N	119.37°E	3 312		斑状安山岩	14.7±0.6	K-Ar		文献[45]
SO27-70	9.310666°N	115.336166°E	1 589		蚀变斑状流纹岩				文献[47]
Tara-1	11.444333°N	119.066833°E	80.2	2 166.8	火山凝灰岩夹层				文献[46]
Batas-1	11.338333°N	118.928333°E	83.5	2 432.3	火山角砾岩				文献[46]
Cadlao-1	11.3205°N	118.9965°E	94.8	3 191.2	凝灰岩	晚侏罗世			文献[46]
Boayan 1-1A	10.669166°N	118.5595°E	93.7	3 095.2	火山岩				文献[46]
Cacnipa-1	10.648166°N	118.5975°E	76.2	2 775.8	下中新统灰岩下为火山岩				文献[46]
Albion- head1	9.518°N	117.786833°E	9.2	3 776.5	火山碎块				文献[46]
ODP771	8.678166°N	120.679666°E	2 859	304.1	火山碎屑	17.8			文献[46]
ODP768	8.000666°N	121.219666°E	4 395.5	1 268.5	早中新世晚期凝灰岩				文献[46]
Odp184-1 143	9.36°N	113.28°E	2 772		凝灰岩, 火山灰	<2			文献[69]
ZF-1	19.33°N	116.16°E		1 500~2000	流纹英安岩	18.61±4.88	K-Ar	尖峰海山	文献[74]
S8	17.616666°N	116.983333°E	3 429		石英拉斑玄武岩	14.1±1.14	K-Ar	玳瑁海山	文献[75-76]
S8			3 429		石英拉斑玄武岩	13.8±1.03	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar	玳瑁海山	文献[75-76]
9DG	15.233 33°N	117.083 33°E			粗面玄武岩	7.77±0.49	K-Ar	黄岩海山	文献[77]
玳瑁海山	17.22°N	117.01°E			碱性玄武岩	20~26		玳瑁海山	文献[7]
涨中海山	13.68°N	115.27°E			碱性玄武岩	7		涨中海山	文献[7]
CB-2					拉斑玄武岩	38±1.2		宪北海山	文献[74]
ZSQD148	16.7°N	116.8°E			碱性玄武岩（火山角砾）	22.9±0.42	K-Ar	宪北海山	文献[7]
					碱性玄武岩（火山角砾）	15.26±0.26	K-Ar	宪北海山	文献[7]
					二辉橄榄岩（火山角砾）	87.21±2.17	K-Ar	宪北海山	文献[7]
ZSQD119	16.39°N	116.29°E			气孔状伊丁玄武岩	12.4±0.21	Ar-Ar	石星海山	文献[7]
ZSQD150	16.11°N	116.73°E			气孔状拉斑玄武岩	15.04±1.61	Ar-Ar	宪南海山	文献[7]
9	14.8°N	116.5°E			石英拉斑玄武岩	9.5±0.92	K-Ar	珍贝海山	文献[76]
					石英拉斑玄武岩	9.9±1.4	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar	珍贝海山	文献[76]
V36D10	14°N	115.59°E			碱性玄武岩	3.49±0.58	K-Ar	中南海山	文献[78]
NO.8	17.75°N	116.98°E			拉斑玄武岩	13.95	K-Ar	南海海盆	文献[64]
NO.9	15.00°N	116.52°E			拉斑玄武岩	9.7	K-Ar	南海海盆	文献[64]
DR01	15.75°N	116.18°E			碱性玄武岩	11~6		南海海盆	文献[7]
DR02	15.30°N	115.96°E			碱性玄武岩	11~6		南海海盆	文献[7]
DR03	14.95°N	116.21°E			粗玄岩	8~6		南海海盆	文献[7]
D1	13.37°N	111.97°E			碱性玄武岩	0.4		南海海盆	文献[4]

续表 2

编号	位置		水深/m	钻孔深度或钻穿厚度/m	基底岩性	地质时代/Ma	测年方法	所属盆地	数据来源
D3	9.95°N	111.17°E			碱性玄武岩	4.3	K-Ar	南海海盆	文献[4]
黄岩西海山	15.17°N	117.20°E			玄武岩	7.94±0.06		南海海盆	文献[7]
UI431	15.3756333°N	116.999838°E		4240±	拉斑玄武岩	15±0.2		南海海盆	文献[7]
UI433	12.918855°N	115.047473°E		4379±	拉斑玄武岩	17.5		南海海盆	文献[7]
大珍珠海山	12.7158416°N	115.9315°E			花岗闪长岩	127~122		南海海盆	文献[7]
小珍珠海山	12.903086°N	116.5495°E			火山玻璃	0.95		南海海盆	文献[7]
HYD239	15.40720°N	118.54394°E	3093		碱性玄武岩	8.98±0.18	Ar-Ar	黄岩海山	文献[7]
HYD180a	15.14337°N	117.37870°E	2430		碱性玄武岩	7.83±0.06	Ar-Ar	黄岩海山	文献[7]
HYD224	15.26368°N	118.19459°E	2660		碱性玄武岩	7.88±0.01	Ar-Ar	黄岩海山	文献[7]
HYD-104-3	15.56346°N	116.18180°E	815		碱性玄武岩	6.67±0.03	Ar-Ar	涨中海山	文献[7]
HYD66-2	13.67885°N	115.27288°E	1378		碱性玄武岩	8.29±0.06	Ar-Ar	中南海山	文献[7]
HYD-22QZ	15.02395°N	116.51811°E	1064?		碱性玄武岩	8.26±0.03	Ar-Ar	珍贝海山	文献[7]
					碱性玄武岩	9		珍贝海山	文献[7]
S04-11	16.34361°N	116.09922°E	2200		碱性玄武岩	7.91±0.19	K-Ar	宪北海山	文献[79]
S04-12-10	15.57200°N	113.15934°E	1290		碱性玄武岩	4.78±0.11	K-Ar	涨中海山	文献[79]
S04-12-11	15.57200°N	113.15934°E	1290		碱性玄武岩	5.74±0.13	K-Ar	涨中海山	文献[79]
S04-12-18	15.57200°N	113.15934°E	1290		碱性玄武岩	5.18±0.17	K-Ar	涨中海山	文献[79]
S04-12-20	15.57200°N	113.15934°E	1290		碱性玄武岩	4.76±0.12	K-Ar	涨中海山	文献[79]
S04-12-21	15.57200°N	113.15934°E	1290		碱性玄武岩	4.94±0.11	K-Ar	涨中海山	文献[79]
S04-14-1	14.03915°N	115.38454°E	1470		碱性玄武岩	6.33±0.20	K-Ar	中南海山	文献[79]
S08-69-1	10.32166°N	112.53469°E	2280		碱性玄武岩	3.80±0.10	K-Ar	长屿海山	文献[79]

拉斑玄武岩, 呈现板内碱性玄武岩特征, 年龄为 37±1 Ma 和 32±1 Ma^[80], 福山凹陷有浅成侵入的辉绿岩(45 Ma)^[81]。珠江口盆地的侵入岩在地震剖面中展示连续、强振幅反射(图 8), 它与其顶、底板围岩大多平行, 接触面较平坦, 向边部渐渐变薄, 以至尖灭; 其两侧或附近均有断裂存在, 断裂为岩脉的形成提供岩浆通道, 岩浆经断裂向上, 侵入到比较薄弱的沉积岩层中形成。珠江口盆地的珠三凹陷 YJ23-1-1 井 1865~1874.5 m 处花岗闪长岩年龄为 47~55 Ma, 番禺凸起 PY24-1-1 井 4414.3 m 处石英闪长岩年龄为 31.4±1.6 Ma, 4417 m 处绿帘斜长角闪岩年龄为 45.3±2.2 Ma, 4391 m 处闪长岩年龄为 42.5±2.1 Ma^[7, 24](表 1)。台湾海峡盆地九龙江凹陷辉绿岩出现于 PA 井中始新统和 PC 井上始新统^[82]。

南海扩张前喷出岩分布在广东、海南岛、台湾、加里曼丹、南海北部、中央海盆、南海南部。广东三水、连平、河源等裂谷盆地以及粤东沿海断裂带中分布南海扩张前喷出岩, 有喷溢相、爆发相、

喷发沉积相、火山通道相、潜火山相等, 以偏碱性为主, 含熔岩类、火山碎屑岩类和次喷出岩类, 主要为玄武岩, 其次为安山岩、英安岩、粗面岩、流纹岩和凝灰岩, 三水盆地喷出岩古近纪厚度超过 1000 m^[17, 83], 呈现玄武岩-长英质双峰式火山岩系, 岩浆形成与岩石圈拉张环境中双层对流岩浆房有关^[84]。粤东沿海断裂型火山岩分布在汕头-揭阳一带, 沿北东向和北西向构造带的复合部位, 出露橄榄玄武岩岩筒和玄武质角砾岩岩筒^[17], 普宁麒麟火山岩筒 Ar-Ar 年龄为 35±0.4 Ma, 发育大量幔源包体, 其与 OIB 型洋岛玄武岩相同或相似, 均为地幔来源^[85], 三水盆地拉斑和碱性玄武岩、安山岩, 流纹岩、粗面岩等 K-Ar 年龄为 63.9~38.5 Ma^[86-87]。雷琼盆地在始新世的流沙港组和渐新世的润洲组夹有多层玄武岩, 琼北福 7 井深 2140 m 处石英拉斑玄武岩 K-Ar 年龄为 34.78±3.16 Ma^[86, 88]。台湾岛新生代早期岩浆作用以火山喷发活动为主, 一般为中心式喷发类型, 主要为安山岩质熔岩和碎屑岩, 澎湖列

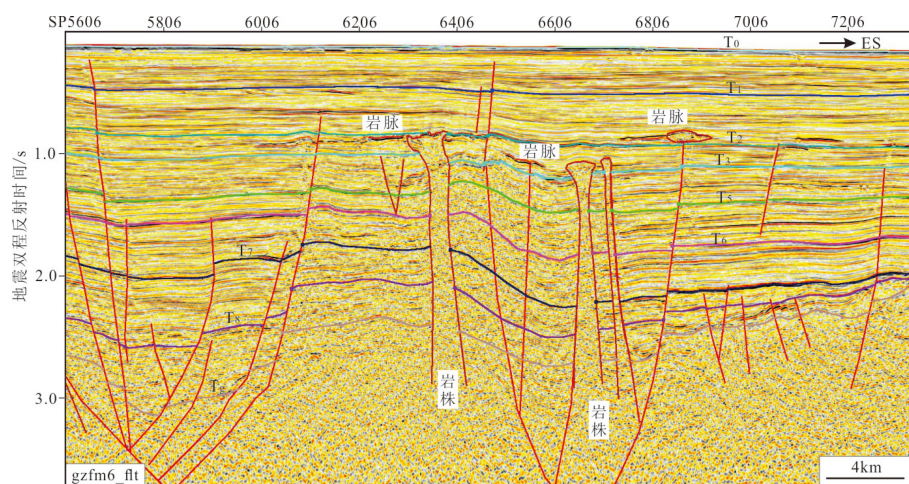


图 8 珠江口盆地珠三坳陷岩浆侵入体地震反射特征 (gzfm6_flt 测线)

Fig.8 Seismic reflection characteristics of magmatic intrusions in the Zhushan depression of the Pearl River Mouth Basin (gzfm6_flt line)

山碎屑岩和部分安山岩, HZ27-1-1 井 3052~3054 m 处安山岩年龄为 57.1 ± 2.5 Ma, YJ21-1-1 井 1648~1656 m 流纹质岩屑晶屑熔岩年龄为 51.6 ± 8.3 Ma; 始新世珠江口盆地主要为英安质火山碎屑岩、玄武安山岩、玄武岩、英安玢岩等, 年龄为 37.7~49.3 Ma, 分别见于 HZ21-1-1、HZ33-1-1、LF15-1-1、LF21-1-1、PY16-1-1 等钻井中^[86](表 2), L1-1-1 井 3454 m 处流纹质凝灰岩年龄为 32.0 ± 1.4 Ma 和 33.6 ± 0.7 Ma, L4-1-1 井 1779.6 m 处英安质凝灰岩年龄为 43.2 ± 0.7 Ma, L21-1-1 井 2446.0 m 处流纹质凝灰岩年龄为 49.33 Ma^[71]。惠州凹陷 HZ21-1-1 井 4480~4696 m 处英安斑岩 K-Ar 年龄为 37.7~41.1 Ma^[38]。南海中央海盆宪北海山拉斑玄武岩 K-Ar 年龄为 38.78 ± 1.25 Ma^[86]。台湾海峡盆地九龙江凹陷 PB 井 2022~2015 m 处安山岩 K-Ar 年龄为 38 Ma^[82]。德国太阳号调查船 23 航次在南沙危险滩上 23KD 取样点采集到渐新世—中新世碳酸盐之下的火山岩和辉长岩^[46], 表明该处古新世—始新世可能存在岩浆活动。曾母盆地 AY-1X 井 2811 m 处火山集块岩年龄为 54.6 ± 2.7 Ma^[43](表 1)。

1.8.2 南海扩张期

南海扩张期岩浆活动在南海周边分布较少, 零星分布于广东、海南岛、台湾、中南半岛和加里曼丹, 海区主要分布在珠江口盆地、台湾海峡和南海中央海盆, 主要是喷出岩。粤东的韭菜地和普寨等地碱性玄武岩年龄为 20.2 ± 0.1 Ma 和 20.8 ± 0.1 Ma^[85]。雷琼盆地这期喷发形成了下洋期玄武岩, 呈夹层状产于下中新统下洋组中^[86]。海南岛文昌有玻基辉橄岩、橄榄玄武岩(K-Ar 年龄 27.4815 ± 0.7864 Ma)、粗玄岩、基性火山凝灰岩, 儋县橄榄粒玄武岩 K-Ar 年龄为 28.4348 ± 0.8781 Ma^[91]。台湾西部新竹凹陷早

中新世火山喷发, 形成拉斑玄武岩、碱性玄武岩和玄武质凝灰岩^[86], Kungkuan 地区的碱性玄武岩年龄为 20~23 Ma^[92], 东部奇美蚀变安山岩或玢岩年龄为 22.8 ± 3.5 Ma, 海岸山脉集块岩年龄为 29.7 ± 4.46 Ma, 兰屿喷出岩年龄为 25.1 ± 3.89 Ma^[30]。泰国中部玄武岩年龄为 24.1 ± 1.0 、 18.1 ± 0.7 Ma, 流纹岩年龄 23.7 ± 0.3 、 20.2 ± 0.4 、 18.8 ± 0.2 Ma, 安山岩年龄为 22.2 ± 0.4 Ma^[93-94]。晚渐新世—中中新世加里曼丹中部英安岩、花岗闪长岩、安山岩、闪长岩、玄武岩和粒玄武岩为 I 型, 其年龄为 30~15 Ma, 东部亚碱性二长花岗岩、白岗岩年龄为 26~17.5 Ma^[4]。

南海东部次海盆主要为橄榄玄武岩, 为亏损型洋中脊玄武岩(N-MORB), 其 U1431 井年龄为 15.6 Ma, 西南次海盆主要为斜斑玄武岩, 为富集型洋中脊玄武岩(E-MORB), 其 U1433 井为 16.3 Ma, U1434 井为 17.3 Ma^[6, 95]。海盆北部玳瑁海山玄武质角砾岩年龄为 16.6 ± 0.8 Ma^[96], 浅钻获得玳瑁海山 4 个不同标高玄武岩年龄为 20~26 Ma, 从山腰向上年龄逐渐变年轻, 表明玳瑁海山是在海底扩张过程中多次喷发形成的, 为洋岛型(OIB)碱性玄武岩^[76]。宪北海山碱性玄武岩普遍低硅高碱, 玄武岩斑晶为橄榄石和辉石, K-Ar 年龄为 15.26 ± 0.26 和 22.9 ± 0.42 Ma^[75, 97]。西北次海盆双峰海山的样品 SO9-1 和 SO9-2 粗面岩年龄分别为 23.29 ± 0.22 Ma 和 23.8 ± 0.18 Ma^[57](表 2)。北部陆坡区的尖峰海山拖网流纹英安岩(ZF-1)和粗面安山质浮岩(ZFF-1, ZFF-2), K-Ar 年龄为 18.61 ± 4.88 Ma^[75](表 2)。因此, 从南海洋中脊大洋拉斑玄武岩、洋岛碱性玄武岩以及靠近北部陆坡的中酸性火山岩, 对应南海扩张过程中岩浆的来源不同, 陆壳混染程度增加。南海扩张期岩浆岩以南海海盆大洋拉斑玄武岩(MORB)为主, 伴随

着洋岛型碱性玄武岩(OIB)和中酸性的岩浆岩,表明岩浆来源不同。

珠江口盆地岩浆活动由北向南呈减弱趋势^[3, 70]。番禺凸起 XJ33-2-1A 井 4868.5~4887 m 处玄武岩年龄为 24.3 ± 1.3 Ma^[3](表 2)。珠一凹陷 LH11-1-2 井钠质粗面岩(有称玄武岩)年龄 27.17 ± 0.55 Ma^[3, 70];白云凹陷 BY7-1-1 井于下中新统珠江组中见 9 层碱性玄武岩和玄武质凝灰熔岩, 2429 和 2432 m 处玄武岩的 K-Ar 年龄分别为 17.1 ± 2.5 Ma 和 20.2 ± 3.0 Ma^[86], 该井早中新世熔岩和玄武岩厚达 431 m, 是珠江口盆地目前发现最厚的海底扩张期喷出岩^[70]。台湾西南海域浦元海山附近拖网的碱性玄武岩样品 SCS-1 和 SCS-2-3, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄分别为早中新世 21 ± 0.2 Ma 和 22.1 ± 0.2 Ma^[73]。西沙隆起的琛航岛琛科 1 井和琛科 2 井火山碎屑岩为板内碱性玄武岩, 喷发时间为 35.5~19.6 Ma^[98]。南海东南部海域晚渐新世岩浆活动较活跃, 发育玄武岩、安山岩和流纹岩的大规模中基性火山。西北巴拉望陆架 1 口井 K-Ar 测年为 22 Ma 的流纹岩^[59]。乌鲁根走滑断裂带北部是火山岩的一个发育区, 以火山岩脉、玄武岩熔岩流及广泛的岩浆侵入作用为特征, 火山活动时期为渐新世—中中新世^[46]。其东北端含石英较多, 为玄武安山岩或英安岩, 化学成分也以钙碱性为主, K-Ar 年龄值变大, SO49-59 的长石 K-Ar 年龄为 22~26 Ma, SO49-55 的全岩或长石 K-Ar 年龄为 11~20 Ma^[47]。

1.8.3 南海扩张期后

南海扩张期后侵入岩分布于菲律宾、加里曼丹。菲律宾新近纪花岗岩类主要在吕宋岛与棉兰老岛, 主要受断裂控制, 以花岗闪长岩与花岗岩为主^[60]。北巴拉望花岗岩体主要分布于 Capoas 半岛上, 为 I 型黑云母花岗岩, 锆石年龄为 15 Ma, $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 平均年龄 13.4 Ma^[70]。加里曼丹的基纳巴卢的石英二长斑岩、石英闪长斑岩及微晶闪长岩年龄 10~12 Ma^[4]。

南海扩张期后喷出岩分布于广西、广东、海南岛、台湾岛、中南半岛、菲律宾、加里曼丹、南海北部、西沙台地、中央海盆、南海南部。广西喜马拉雅期为基性火山喷发岩, 分布于合浦县新圩和涠洲岛、斜阳岛等地, 受新生代雷琼拗陷控制, 主要为橄榄玄武岩、玄武质凝灰岩^[9], 碧玄岩为玻基斑状结构^[99]。中新世和第四纪火山岩分布于广东雷州半岛^[17, 91]。海南岛玄武岩年龄为 0.098~12.89 Ma^[73], 既有小型的中心式喷发, 又有大规模的面状溢出, 主要为石英拉斑玄武岩、橄榄拉斑玄武岩、橄榄玄

武岩、碱性橄榄玄武岩和碧玄岩等。雷琼地区以气孔玄武岩为主, 局部有玻基辉橄岩^[22]。越南玄武岩厚达几百米, 面积约 23 000 km²^[100], 主要为层间的斑状结构, 含有辉绿岩, 16~10.5 Ma 岩性主要为石英拉斑玄武岩; 8~5 Ma 岩性由石英拉斑玄武岩逐渐过渡到橄榄拉斑玄武岩; 上新世—第四纪以碱性—强碱性玄武岩为主^[101]。台湾岛东部的海岸山脉、兰屿和绿岛, 为 16~0.02 Ma 角闪石安山岩、辉石安山岩、玄武岩、凝灰质砂岩, 台湾西部宝来有玄武岩质火山岩, 澎湖列岛的 11.2~16.2 Ma 碱性玄武岩和拉斑玄武岩以及火山碎屑岩, 8.2 Ma 玄武岩, 晚中新世新竹基性岩浆喷发; 更新世台湾北部中性岩浆喷发形成大屯、基隆和澎佳屿火山群^[86, 102]。菲律宾火山活动始于新近纪, 延续至今, 火山岩的分布与闪长岩、花岗岩带基本一致, 以中性喷发岩为主, 有角斑岩、安山岩、玄武岩、凝灰岩和凝灰角砾岩等^[103], 上新世以后火山活动逐渐增强, 中晚更新世达到高潮, 以中酸性至中基性岩喷发与溢流为主, 主要为安山岩、粗玄岩和英安岩, 晚更新世以后火山活动范围与强度减弱, 以中基性至基性岩溢流为主, 主要为玄武岩、橄榄玄武岩等, 吕宋岛马荣活火山至今还时有喷发^[60]。北巴拉望岛 Capoas 山东部、Taytay 城的东南部, 分布一些玄武岩流, Manguao 湖玄武岩样品为 5 Ma, 可能与南海扩张期后广泛的玄武质岩浆有关^[104]。加里曼丹的沙巴喷出岩年龄为 0~14 Ma^[90], 其中的安山岩、英安岩属钙碱性、中、高钾火山弧序列^[4]。

南海扩张期后, 海区岩浆活动剧烈, 分布范围广泛, 以洋盆残留扩张脊为中心, 岩浆作用向四周陆缘扩展, 沿扩张脊及两侧发育一系列规模宏大的海山链, 如珍贝-黄岩海山链, 海山链两侧也有同方向的海山和海丘, 北侧以海山为主, 如涨中海山、宪南海山; 南侧主要以海丘为主, 山体小, 相对高差几十到几百米不等, 远离扩张脊的大小珍珠海山岩体规模相对较小。在南海尤其海盆及陆坡区, 星罗棋布的火山岩体大多沿断裂向上刺穿甚至直达海底, 形成高差不同和规模大小不一的海丘和海山。在地震剖面上, 南海中央次海盆的黄岩海山、珍贝海山和西南次海盆的中南海山、龙北-龙南海山、长龙海山的火山岩体呈尖峰状, 其顶界穿越地层界面 T_1 , 使之上隆, 并刺穿海底, 为喷发岩体, 岩体顶界面双强轴反射明显, 岩体边界较清晰(图 9、图 10)。

南海海盆部分海山拖网玄武岩年龄为 14.1~3.49 Ma^[22, 49, 75, 77](表 2)。中南海山碱性玄武岩初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 为 0.703, 轻稀土相对富集, 无 Eu 负异常^[22],

其斑晶为橄榄石和次透辉石, 基质为含斜长石微晶的玄武玻璃, 橄榄石和辉石晶体内还见固体包裹体和非晶质熔融包裹体, 固体包裹体主要是早期结晶的一些尖晶石、橄榄石和磷灰石矿物微晶, 非晶质熔融包裹体主要为多相熔融包裹体^[75, 77]。珍贝海山的拉斑玄武岩, 稀土含量均较高, 微量元素含量中 Sr 和 Rb 含量相对较高, 年龄为 9.5 ± 0.92 、 9.9 ± 1.4 Ma^[77, 97]。宪南海山 ZSQD150 站位岩石气孔构造发育(图 11), 为气孔状拉斑玄武岩, Ar-Ar 年龄为 15.04 ± 1.61 Ma。石星海山 ZSQD119 站位为气孔状伊丁玄武岩, 气孔状构造, 拉斑玄武结构, Ar-Ar 年龄 12.4 ± 0.21 Ma。玳瑁海山的石英拉斑玄武岩 K-

Ar 年龄为 14.1 ± 1.14 Ma, Ar/Ar 年龄为 13.8 ± 1.03 Ma; 中南海山碱性玄武岩的 K-Ar 年龄为 3.49 ± 0.58 Ma^[86]。黄岩海山在水深 3348 m 处样品 9DG 粗面玄武岩 K-Ar 年龄为 7.77 ± 0.49 Ma^[78], 表明南海海盆这些海山或海山链是在海底扩张终止后岩浆活动形成的。这些海山, 除珍贝海山一个样品落在粗面安山岩外, 其他均属 OIB 型碱性玄武岩, 排除了残余 MORB 岩浆成因的可能性^[76]。

珠江口盆地部分钻孔于上中新统粤海组中见晚中新世玄武岩呈夹层产生^[86]。莺歌海盆地北侧 Y32-1-1 井石英拉斑玄武岩年龄为 3.85 Ma^[105], 厚达 115 m, 如此大规模的玄武岩浆活动表明有新的裂

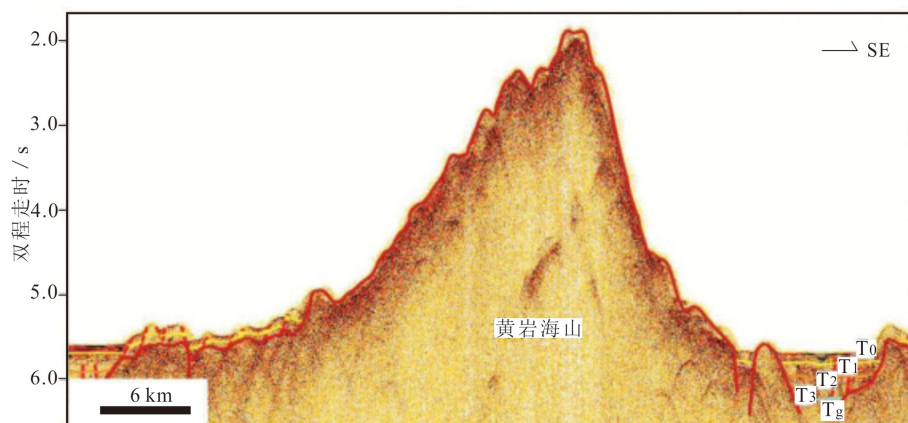


图 9 东部次海盆黄岩海山地震反射特征 (HYS340 测线)

Fig.9 Seismic reflection characteristics of the Huangyan seamount in the Eastern Sub-basin (HYS340 line)

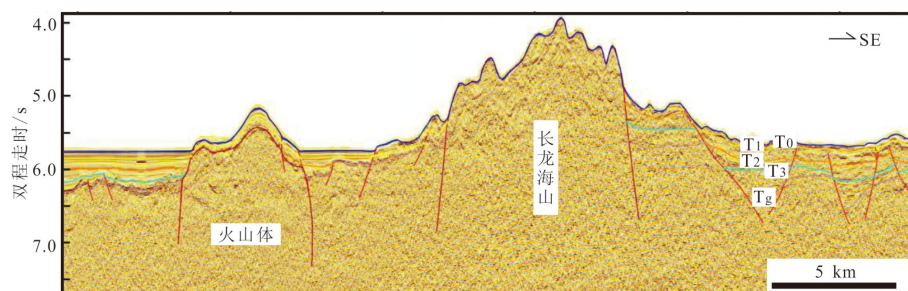


图 10 西南次海盆长龙海山地震反射特征 (ZJHY560 测线)

Fig.10 Seismic reflection characteristics of the Changlong seamount in the southwest sub basin (ZJHY560 line)

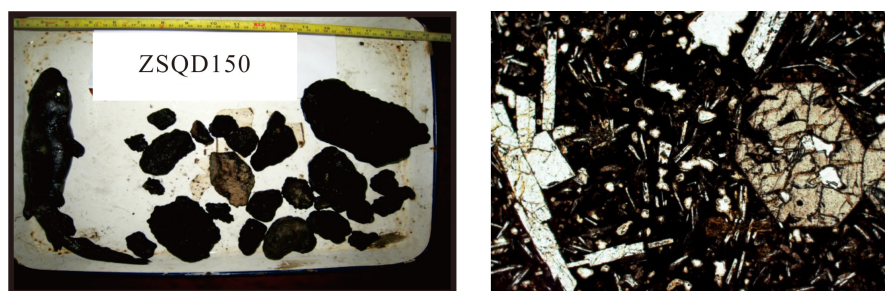


图 11 宪南海山 ZSQD150 站位气孔状拉斑玄武岩岩石拖网照片及镜下单偏光照片 ($\times 50$)

Fig.11 Photos of samples of stomatal tholeiitic basalt and photos under microscope ($\times 50$) at the site ZSQD150 in the Xiannan seamount

陷作用发生^[41]。西沙群岛的东岛浮岩属于中性火山岩,化学组成相当于粗面岩;高尖石岛是第四纪更新世后期火山喷发作用产物,岛上分布的火山碎屑岩具玻璃基质,玻基辉橄岩铷锶年龄 2 Ma,在其邻近海底,有火山喷口或由熔岩组成的海底丘^[106-107]。西沙群岛与雷琼地区喷出岩都有玻基辉橄岩成分。

越南西南海岸线的海底火山至今还在喷发形成橄榄石拉斑玄武岩和碱性玄武岩^[87]。南海西南部拖网 D1、D3 碱性玄武岩年龄分别为 0.4、4.3 Ma^[4]。南海南部 ODP184 航次发现更新统火山灰,含英安-流纹质凝灰岩,火山灰及玻璃,1143 井位样品年龄小于 2 Ma,越往上火山灰越多,反映更新世以来火山活动增强,或者是因为火山玻璃的化学不稳定性使老的火山灰蚀变^[70]。礼乐滩北坡斑状玄武岩(SO23-37, SO23-36),北巴拉望岸外两座孤立海山(SO23-38, SO23-40)以及卡加延海岭-苏禄海的迈安德礁(SO23-15)含橄榄石、单斜辉石和斜长石的多孔玄武岩(SO23-40),K-Ar 年龄为 2.7 Ma;礼乐滩北侧高度多孔的含橄榄石玄武质火山灰在上新世碳质软泥团块(站位 SO23-37)上和角砾岩(SO23-36)中呈熔壳形式产出,这种橄榄玄武岩 K-Ar 年龄为 0.4 Ma。从礼乐滩以东海山上取到的几块橄榄玄武岩(站位 SO23-38,水深 1610~1356 m)的 K-Ar 年龄也与之相似,为 0.5 Ma;卡加延海岭的迈安德礁(SO23-15)于 9300 m 水深处取得了 2 小块安山岩,K-Ar 年龄为 14.7±0.6 Ma^[47](表 2)。

2 岩浆岩形成机制

2.1 断裂

喜马拉雅期之前的岩浆岩在南海北部主要分布在珠江口盆地,其夹持在 NE 向断裂带之间;在南海西部和西南部主要分布在中南礼乐断裂带的西部(图 7),表明断裂带控制了南海岩浆岩分布。

阳江—统暗沙东断裂带为横切珠江口盆地重要的基底或岩石圈断裂,从中生代(或更早)到新近纪都有强烈活动^[108],导致珠江口盆地东西两侧岩浆岩的岩性和岩体形态有较大差异(图 7),也控制了新生代晚期的岩浆活动。南海喜马拉雅晚期岩浆活动,早期通过拉张断裂进行的大规模溢流式喷发,形成石英拉斑玄武岩及橄榄拉斑玄武岩,为南海及周边火山岩主要岩石序列;之后为火山中心式喷发,形成碱性橄榄玄武岩及碧玄岩。

南海北部多个海底火山椭圆底部长轴的走向

与南海北部断裂的走向基本一致,表明这些断裂为后期的岩浆提供了很好的上升通道^[6,109]。Zhao 等^[110]综合运用地震、钻井以及岩石学等方法,揭示了岩浆通道在上地壳的表现形式,在南海北部发现了多期次长时间喷发的裂后岩浆活动,这些岩浆岩体主要发育在断层之上或沿断层发育,表明先存的断层为岩浆喷发提供了末端通道,并影响岩浆喷发的位置,导致南海张裂后岩浆活动频繁,火山分布广泛。

2.2 板块与岩石圈

早中生代中南半岛的陆-陆碰撞(印支运动)使华南在印支期处于近南北向挤压状态,在华南形成了大规模的走向近东西的推覆构造,印支期—燕山早期,中国东南部大陆边缘经历了东西向的古亚洲构造域向北东向的太平洋构造域转换,并发生了大规模的花岗岩浆活动;自燕山晚期开始,中国东南部大陆边缘又经历了古太平洋构造域向新太平洋构造域的转换,形成岩石圈减薄和拉张为主的区域构造环境^[49]。华南的中生代花岗岩时代从内陆到沿海有逐渐变新的趋势。三叠纪花岗岩主要发育于桂东南的大容山-十万大山、海南岛琼中一带及西部的雪峰隆起带和东部的武夷隆起带。大容山-十万大山花岗岩呈 NE 向展布(年龄 236~230 Ma),属同碰撞的 S 型花岗岩。琼中地区同碰撞的 S 型花岗岩年龄 275~250 Ma,后碰撞 A 型花岗岩年龄 243~239 Ma。中晚侏罗世花岗岩主要分布在南岭北部,在南岭南部有零星出露,呈 EW 向展布,属陆内挤压碰撞 S 型花岗岩;晚侏罗世—早白垩世花岗岩主要分布在南岭南部,EW 向展布,属陆内挤压碰撞 S 型花岗岩;早白垩世花岗岩主要分布在福建、广东、浙江沿海地区,呈 NE 向展布,主要为 I 型花岗岩。晚白垩世辉长岩-闪长岩-二长花岗岩-碱性花岗岩组合构成 I-A 型花岗岩组合,主要分布在浙闽沿海地区,形成于大规模拉张的环境。总之,从花岗岩的展布可见,大致从早白垩世开始,南岭地区发生了由 EW 向 NE 向的构造转换,构造环境亦大体上从挤压转向拉张,这是因为中国东南沿海在白垩纪由于太平洋板块向欧亚板块的俯冲,形成沿海一带的 I 型花岗岩,之后由于挤压之后的松弛,从挤压转化为拉张环境,形成沿海一带的 A 型碱性花岗岩,两种花岗岩在空间上紧密共生^[55]。海区中生代晚期太平洋板块向西北聚合,在东亚边缘形成了宽广的挤压域。华南的花岗岩活动延伸到了南海北部陆缘,从珠江口盆地、琼东南盆地、中西沙地区到万安盆地、涠盆盆地、曾母盆地形成一条北东

向的岩浆岩带,以钙碱性喷出岩和中酸性侵入岩为主,构成盆地基底,这条岩浆岩带的形成与中侏罗世—白垩纪中期印支和华南东南缘古太平洋板块向欧亚板块之下的俯冲作用有关。晚中生代古太平洋板块向华南大陆俯冲,改变了该区的地温场平衡,由于俯冲作用产生的剪切热传导到两侧板块,当位于俯冲板块之上的华南板块岩石圈地温场升高达到硅铝质岩石的初熔温度,地壳温度不断增高,熔融区出现重力分异和热对流,对流花岗岩岩浆层逐渐形成^[111]。

晚白垩世末期太平洋俯冲板块后撤以及古南海在古新世东南向的俯冲拖曳作用使南海北部陆缘在新生代处于伸展状态。地壳伸展减薄,花岗岩层也随之减薄。伴随新生代伸展作用,沿断裂有大量的基性及中酸性火山岩浆喷发,但是在珠江口盆地及其周围并没有发现新生代的花岗岩。一方面,伸展后的上地壳厚度一般小于10 km,较伸展前大幅减小,使上地壳等温面相对下降;另一方面,南海北部陆缘可能是以纯剪模式为主的伸展作用,只是起到了减压作用而升温作用不明显。因此伸展作用使花岗岩层减薄,但是没有再次大规模重熔形成新的花岗岩层^[111]。南海北部古新世—早中新世火山活动集中在广东三水、雷琼、台湾海峡、珠江口等断陷盆地内,其中三水盆地火山活动至始新世末随盆地的消亡而结束,中新世中晚期,火山活动除了在南海北部-台湾海峡陆缘盆地中继续进行外,还扩展到福建、浙江东部,上新世火山活动范围逐渐向西缩小到南海北部和雷琼盆地。南海北部-台湾海峡及邻区新生代火山活动在古近纪喷出玄武质-长英质双模式火山岩系,新近纪—第四纪喷出玄武质(碱性玄武岩和拉斑玄武岩组合)火山岩系(除台湾北部更新世安山岩外),反映断裂逐渐深切,岩浆物质来源加深^[86]。这可能是从上新世开始,菲律宾海板块对欧亚板块的碰撞加剧,台湾东部发生强烈的褶皱造山运动,导致台湾海峡裂谷盆地消亡,造成南海北部火山活动由东向西先后结束,并引起台湾北部更新世的钙碱性安山岩喷发。台湾-吕宋岛弧的形成是欧亚板块与菲律宾海板块聚合并发生俯冲和碰撞的结果,它由台湾岛南部到吕宋岛北部的数十个大大小小的火山岛构成,由北向南、自西向东火山年龄显示年轻化的趋势,台湾的海岸山脉岩浆作用主要是中新世,绿岛和兰屿主要是上新世,小兰屿为更新世,吕宋岛为现代活火山,说明板块的俯冲边界由西向东迁移。同时,新生代海底扩张期形成的南海洋壳正在向东俯冲于菲律宾板块

之下,并在吕宋与台湾之间发育了弧火山链。南海海山岩浆的主量与微量元素都显示出富集组分特征,带有强烈的俯冲板块信号,南海在张-破裂过程中表现出岩浆从贫到富的转变,且推测深源岩浆体受俯冲作用的影响;印度板块在西南的俯冲引发地幔上涌,可能为南海提供新生代岩浆源^[6]。西南次海盆和东部次海盆具有明显的组成差异,西南次海盆扩张期玄武岩具有富集型洋中脊玄武岩特征(E-MORB),而东部次海盆同时存在富集型(E-MORB)和亏损型玄武岩(N-MORB),在Sr-Nd-Pb-Hf同位素组成上,两个次海盆都属于印度洋型地幔(地球化学上称为Dupal异常),且存在明显的组成差异,说明南海的两个次海盆之间具有不同的地幔演化历史^[6,95]。

板块运动与岩石圈冷却造成了陆缘和板内伸展,进而导致减压熔融,产生大量岩浆^[6,112]。越南新生代玄武岩是岩石圈拉张减薄造成地幔减压熔融的产物^[87,100]。Larsen等^[113]通过南海大洋钻探发现在南海陆壳破裂过程中存在岩浆活动,即软流圈物质上涌造成岩石圈最终破裂过程中伴随洋中脊玄武岩类型的岩浆活动。南海扩张期间岩浆活动来自于对流地幔的减压熔融,南海的扩张造成了周缘板块处于挤压环境,因此岩浆活动只出现在南海海盆及周边海域^[83],例如珠江口盆地白云凹陷BY7-1-1井早中新世熔岩和玄武岩厚达431 m,是南海目前发现最厚的喷出岩,暗示了海盆周边岩浆活动强烈,而当南海扩张停止后,周缘板块的应力得到释放,引发南海及周边地区上地幔的熔融,因此,南海扩张期后,南海及周边地区岩浆活动强烈。而且,南海及邻区扩张期后的原生岩浆主要为碱性玄武岩,扩张期的原生岩浆为拉斑玄武岩,扩张期前的原生岩浆为碱性玄武岩和拉斑玄武岩^[87,100]。华南沿海及南海晚新生代碱性玄武岩岩浆形成于较高的压力环境,拉斑玄武岩岩浆形成于岩石圈减薄的较低压力环境^[88,97]。因此,可能晚新生代(南海扩张期后)南海的地壳被拉张至很薄,玄武熔岩沿裂隙喷溢,而晚更新世以来,拉张压力可能减弱,地壳趋于稳定及增厚,幔源部分熔融程度降低,使岩浆的压力增大,碱质增高。珠江口盆地新生代岩浆活动总的发展趋势是由含较多中酸性岩石的钙碱性系列发展到碱性玄武岩和拉斑玄武岩系列,岩浆成分中的深源物质逐渐增多,代表了岩石圈拉裂伸展的构造环境。

综上所述,可认为南海及邻区岩浆成因是多板块汇聚俯冲、多方向挤压-伸展造山和软流圈上涌的产物。

3 结论

(1)根据地壳发展阶段及其产生的岩浆作用强度和类型的差异,结合岩石同位素年龄资料,将南海及邻区划分为8个岩浆作用时期:前吕梁期、吕梁期、晋宁期、加里东期、海西期、印支期、燕山期和喜马拉雅期。

(2)南海及邻区岩浆岩分布广泛,主要发育于南海及周缘的广东、广西、海南岛、台湾岛、中南半岛、加里曼丹岛、菲律宾群岛,时代从前吕梁期至喜马拉雅期均有出露。南海及邻区最老的岩浆岩是在中南半岛的太古代黑云母花岗岩、紫苏花岗岩和辉长岩;最新的岩浆岩海陆均有发现,如菲律宾群岛火山喷发形成的现代火山岩。总体上,海区岩浆活动比陆区晚。

(3)南海海区岩浆岩以燕山期和喜马拉雅期为主,燕山期以中酸性侵入岩为主,广泛分布于南海陆缘,尤其南海北部和西南部最强烈。喜马拉雅期以强烈的基性、超基性岩浆活动为主,遍布整个南海海区,主要为玄武岩。喜马拉雅期晚期(晚中新世—第四纪),南海的岩浆活动较强烈,在地震剖面上,常见刺穿各个时代沉积层直达海底的岩浆活动,在海底形成海山和海丘,有的海山高出海底上千米。

(4)南海及邻区花岗岩在空间上多数岩体产于背斜构造的轴部,或分布在断裂带中及其两侧,在时间上它们多数是同期构造运动的产物,因此,南海及邻区岩浆岩与断裂、褶皱、板块运动、岩石圈扩张等构造运动有密切关系。

参考文献 (References)

- [1] 汪品先, 翦知湮. 探索南海深部的回顾与展望[J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 62(10): 1473-1488. [WANG Pinxian, JIAN Zhimin. Exploring the deep South China Sea: Retrospects and prospects [J]. Science China Earth Sciences, 2019, 62(10): 1473-1488.]
- [2] Sun Z, Lin J, Qiu N, et al. The role of magmatism in the thinning and breakup of the South China Sea continental margin: Special Topic: The South China Sea Ocean Drilling [J]. National Science Review, 2019, 6(5): 871-876.
- [3] 李平鲁, 梁慧娴. 珠江口盆地新生代岩浆活动与盆地演化、油气聚集的关系[J]. 广东地质, 1994, 9(2): 23-34. [LI Pinglu, LIANG Huixian. Relation between Cenozoic igneous activity and basin evolution and oil-gas accumulation in Pearl River Mouth basin [J]. Guangdong Geology, 1994, 9(2): 23-34.]
- [4] 周蒂, 刘海玲, 陈汉宗. 南沙海区及其周缘中-新生代岩浆活动及构造意义[J]. 大地构造与成矿学, 2005, 29(3): 354-363. [ZHOU Di, LIU Hailing, CHEN Hanzong. Mesozoic-Cenozoic magmatism in southern South China Sea and its surrounding areas and its implications to tectonics [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2005, 29(3): 354-363.]
- [5] Yan P, Deng H, Liu H L, et al. The temporal and spatial distribution of volcanism in the South China Sea region [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2006, 27(5): 647-659.
- [6] 林间, 李家彪, 徐义刚, 等. 南海大洋钻探及海洋地质与地球物理前沿研究新突破[J]. 海洋学报, 2019, 41(10): 125-140. [LIN Jian, LI Jiabiao, XU Yigang, et al. Ocean drilling and major advances in marine geological and geophysical research of the South China Sea [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2019, 41(10): 125-140.]
- [7] 李学杰, 杨楚鹏, 姚永坚, 等. XX海域1: 100万海洋区域地质调查成果集成与应用研究成果报告[R]. 广州海洋地质调查局内部报告, 2018: 1-1439. [LI Xuejie, YANG Chupeng, YAO Yongjian, et al. Report on integration and application of 1: 1 million marine regional geological survey results in XX sea area [R]. Internal report of Guangzhou Marine Geological Survey Bureau, 2018: 1-1439.]
- [8] 张业明, 张仁杰, 姚华舟, 等. 海南岛前寒武纪地壳构造演化[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 1997, 22(4): 395-400. [ZHANG Yeming, ZHANG Renjie, YAO Huazhou, et al. The Precambrian crustal tectonic evolution in Hainan island [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 1997, 22(4): 395-400.]
- [9] 广西壮族自治区地质矿产局. 广西壮族自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1985: 1-853. [Bureau of Geology and Mineral of Guangxi Zhuang Autonomous Region. Regional Geology of Guangxi Zhuang Autonomous Region [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1985: 1-853.]
- [10] 许德如, 夏斌, 李鹏春, 等. 海南岛西北部前寒武纪花岗岩SHRIMP锆石U-Pb年龄及地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 2006, 30(4): 510-518. [XU Deru, XIA Bin, LI Pengchun, et al. SHRIMP U-Pb dating of Zircon from the Precambrian granitoids in northwest Hainan island and its geological implications [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2006, 30(4): 510-518.]
- [11] 吴良士. 越南社会主义共和国地质构造与区域成矿[J]. 矿床地质, 2009, 28(5): 725-726. [WU Liangshi. Geological tectonic and regional mineralization of Vietnam [J]. Mineral Deposits, 2009, 28(5): 725-726.]
- [12] 覃小锋, 周府生, 胡贵昂, 等. 云开地块北缘MORB型火山岩的首次发现及其大地构造意义[J]. 地质科技情报, 2005, 24(3): 20-24. [QIN Xiaofeng, ZHOU Fusheng, HU Guiang, et al. First discovery of MORB volcanic rock and its tectonic significance on the north margin of the Yunkai block, southeastern Guangxi [J]. Geological Science and Technology Information, 2005, 24(3): 20-24.]
- [13] 郭良田, 洪裕荣, 黄继春, 等. 粤西信宜地区坑坪细碧-角斑岩系的发现及其地质意义[J]. 地质通报, 2005, 24(7): 648-654. [GUO Liangtian, HONG Yurong, HUANG Jichun, et al. Discovery of the Kengping spilite-kratophyre series in Xinyi, western Guangdong, China and its geological significance [J]. Geological Bulletin of China, 2005, 24(7): 648-654.]
- [14] 舒良树. 华南构造演化的基本特征[J]. 地质通报, 2012, 31(7):

- 1035-1053. [SHU Liangshu. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block [J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31 (7): 1035-1053.]
- [15] 张业明, 付建明, 赵子杰, 等. 海南岛西部变基性火山岩的岩石特征及Sm-Nd同位素定年[J]. 矿物岩石, 1998, 18 (1): 79-84. [ZHANG Yeming, FU Jianming, ZHAO Zijie, et al. Petrographic characteristics and Sm-Nd isotopic dating of the metamorphic basic volcanic rocks in western part of Hainan island [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 1998, 18 (1): 79-84.]
- [16] 梁新权, 范蔚茗, 许德如. 海南岛屯昌玄武质科马提岩Sm-Nd同位素年龄及其地质意义[J]. 地质科学, 2000, 35 (2): 240-244. [LIANG Xinquan, FAN Weiming, XU Deru. Sm-Nd age of Tunchang basaltic komatiites and its geological significance in Hainan island [J]. Scientia Geologica Sinica, 2000, 35 (2): 240-244.]
- [17] 广东省地质矿产局. 广东省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1988: 1-941. [Bureau of Geology and Mineral of Guangdong Province. Regional Geology of Guangdong Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988: 1-941.]
- [18] 周云, 梁新权, 梁细荣, 等. 莺歌海盆地志留纪花岗岩的发现及其构造意义[C]//2013年全国岩石学与地球动力学研讨会(摘要). 广州: 中国地质学会, 2013: 732-733. [ZHOU Yun, LIANG Xinquan, LIANG Xirong, et al. Discovery and tectonic significance of Silurian granites in Yinggehai Basin[C]//2013's National Symposium on Petrology and Geodynamics (Abstract). Guangzhou: Geological Society of China, 2013: 732-733.]
- [19] 张业明, 徐安武, 付建明, 等. 海南岛几个重大基础地质问题的探讨[J]. 地质评论, 1998, 44 (6): 568-575. [ZHANG Yeming, XU Anwu, FU Jianming, et al. Some important fundamental geological problems in Hainan Island [J]. Geological Review, 1998, 44 (6): 568-575.]
- [20] 张喜松, 徐夕生. 华南早古生代火山岩分布、岩石成因及地质意义[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2015, 45 (S1): 75. [ZHANG Xisong, XU Xisheng. Distribution, petrogenesis and geological significance of Early Paleozoic volcanic rocks in South China [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2015, 45 (S1): 75.]
- [21] 黄义聪, 卓伟华. 广西岑溪糯垌基性火山岩研究[J]. 广东地质, 2013 (1): 11-15. [HUANG Yicong, ZHUO Weihua. Study on basic volcanic rocks in Nuodong, Cenxi, Guangxi [J]. Guangdong Geology, 2013 (1): 11-15.]
- [22] 金庆焕. 南海地质与油气资源[M]. 北京: 地质出版社, 1989. [JIN Qinghuan. Geology and petroleum resources of the South China Sea[M]. Beijing: The Geological Publishing House, 1989.]
- [23] 毛建仁, 厉子龙, 叶海敏. 华南中生代构造-岩浆活动研究: 现状与前景[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 57 (12): 2853-2877. [MAO Jianren, LI Zilong, YE Haimin. Mesozoic tectono-magmatic activities in South China: Retrospect and prospect [J]. Science China Earth Sciences, 2014, 57 (12): 2853-2877.]
- [24] 邱燕, 王立飞, 黄文凯, 等. 中国海域中新代沉积盆地[M]. 北京: 地质出版社, 2016: 1-233. [QIU Yan, WANG Lifei, HUANG Wenkai, et al. Mesozoic Cenozoic sedimentary basins in China Sea area[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2016: 1-233.]
- [25] 赵汉卿, 梁经喜. 南海北部湾地区湾5井完井地质总结报告[R]. 茂名石油工业公司南海石油勘探指挥部, 1979. [ZHAO Hanqing, LIANG Jingxi. Summary report on completion geology of well Wan 5 in Beibu Gulf area of South China Sea[R]. South China Sea petroleum exploration headquarters, Maoming Petroleum Industry Company, 1979.]
- [26] 陈新跃, 王岳军, 张玉芝, 等. 海南晨星安山质火山岩地球化学、年代学特征及其构造意义[J]. 大地构造与成矿学, 2013, 37 (1): 99-108. [CHEN Xinyue, WANG Yuejun, ZHANG Yuzhi, et al. Geochemical and geochronological characteristics and its tectonic significance of andesitic volcanic rocks in Chenxing Area, Hainan [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2013, 37 (1): 99-108.]
- [27] 何慧莹, 王岳军, 张玉芝, 等. 海南岛晨星早石炭世高度亏损N-MORB型玄武岩及其地质意义[J]. 地球科学, 2016, 41 (8): 1361-1375. [HE Huiying, WANG Yuejun, ZHANG Yuzhi, et al. Extremely depleted Carboniferous N-MORB metabasite at the Chenxing area (Hainan) and its geological significance [J]. Earth Science, 2016, 41 (8): 1361-1375.]
- [28] 王智琳, 许德如, 吴传军, 等. 海南岛晚古生代洋岛玄武岩(OIB型)的发现及地球动力学暗示[J]. 岩石学报, 2013, 29 (3): 875-886. [WANG Zhilin, XU Deru, WU Chuanjun, et al. Discovery of the Late Paleozoic ocean island basalts (OIB) in Hainan Island and their geodynamic implications [J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29 (3): 875-886.]
- [29] 章金海, 洪清照, 何立士. 台湾省岩浆岩变质岩概况[J]. 中国地质, 1984 (7): 26-28. [ZHANG Jinhai, HONG Qingzhao, HE Lishi. Overview of magmatic metamorphic rocks in Taiwan Province [J]. Chinese Geology, 1984 (7): 26-28.]
- [30] 福建省地质矿产局. 台湾省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1992: 1-223. [Fujian Province Bureau of Geology and Mineral Resources. Regional geology of Fujian Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992: 1-223.]
- [31] 黄长煌. 台湾玉里带变质岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄及其地质意义[J]. 地质通报, 2017, 36 (10): 1722-1739. [HUANG Changhuang. U-Pb isotopic ages of zircon from Yuli Belt in Taiwan and its geological significance [J]. Geological Bulletin of China, 2017, 36 (10): 1722-1739.]
- [32] Tan B K. "Suture zones" in peninsular Malaysia and Thailand: Implications for Palaeotectonic reconstruction of southeast Asia [J]. Journal of Southeast Asian Earth Sciences, 1996, 13 (3-5): 243-249.
- [33] 夏邦栋, 于津海, 方中, 等. 海南岛海西-印支期花岗岩的地球化学特征及成因[J]. 地球化学, 1990 (4): 365-373. [XIA Bangdong, YU Jinhai, FANG Zhong, et al. Geochemical characteristics and origin of the Hercynian-Indosinian granites of Hainan Island, China [J]. Geochimica, 1990 (4): 365-373.]
- [34] 唐立梅, 陈汉林, 董传万, 等. 中国东南部晚中生代构造伸展作用——来自海南岛基性岩墙群的证据[J]. 岩石学报, 2010, 26 (4): 1204-1216. [TANG Limei, CHEN Hanlin, DONG Chuanwan, et al. Late Mesozoic tectonic extension in SE China: Evidence from the basic dike swarms in Hainan Island, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26 (4): 1204-1216.]
- [35] 唐立梅, 陈汉林, 董传万, 等. 海南岛三叠纪中基性岩的年代学、地球化学及其地质意义[J]. 地质科学, 2010, 45 (4): 1139-1155.

- [TANG Limei, CHEN Hanlin, DONG Chuanwan, et al. Triassic neutral and basic rocks in Hainan Island, geochemistry and their geological significance [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2010, 45(4): 1139-1155.]
- [36] 何家雄, 刘海龄, 姚永坚, 等. 南海北部边缘盆地油气地质及资源前景[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008: 1-185. [HE Jiaxiong, LIU Hailing, YAO Yongjian, et al. Margin basins' petroleum geology and resources prospect of northern South China Sea [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008: 1-185.]
- [37] 尤龙, 王璞珺, 吴景富, 等. 莺歌海盆地前新生代基底特征[J]. 世界地质, 2014, 33(3): 511-523. [YOU Long, WANG Pujun, WU Jingfu, et al. Basement characteristics of Yinggehai basin in pre-Cenozoic [J]. *Global Geology*, 2014, 33(3): 511-523.]
- [38] 李平鲁, 梁慧娴, 戴一丁. 珠江口盆地基岩油气藏远景探讨[J]. 中国海上油气(地质), 1998, 12(6): 361-369. [LI Pinglu, LIANG Huixian, DAI Yiding. Exploration perspective of basement hydrocarbon accumulations in the Pearl River Mouth Basin [J]. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 1998, 12(6): 361-369.]
- [39] 李平鲁, 梁慧娴, 戴一丁, 等. 珠江口盆地燕山期岩浆岩的成因及构造环境[J]. 广东地质, 1999, 14(1): 1-8. [LI Pinglu, LIANG Huixian, DAI Yiding, et al. Origin and tectonic setting of the Yanshanian igneous rocks in the Pearl River Mouth Basin [J]. *Guangdong Geology*, 1999, 14(1): 1-8.]
- [40] 邵磊, 尤洪庆, 郝沪军, 等. 南海东北部中生界岩石学特征及沉积环境[J]. 地质评论, 2007, 53(2): 164-169. [SHAO Lei, YOU Hongqing, HAO Hujun, et al. Petrology and depositional environments of Mesozoic strata in the northeastern South China Sea [J]. *Geological Review*, 2007, 53(2): 164-169.]
- [41] 龚再升, 李思田, 谢泰俊, 等. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 27-41. [GONG Zaisheng, LI Sitian, XIE Taijun, et al. Continental Margin Basin Analysis and Hydrocarbon Accumulation of the Northern South China Sea [M]. Beijing: Science Press, 1997: 27-41.]
- [42] 朱伟林, 解习衣, 王振峰, 等. 南海西沙隆起基底成因新认识[J]. 中国科学: 地球科学, 2017, 60(12): 2214-2222. [ZHU Weilin, XIE Xinong, WANG Zhenfeng, et al. New insights on the origin of the basement of the Xisha Uplift, South China Sea [J]. *Science China Earth Sciences*, 2017, 60(12): 2214-2222.]
- [43] 吴进民, 杨木壮. 南海西南部地震层序的时代分析[J]. 南海地质研究, 1994(6): 16-29. [WU Jinmin, YANG Muzhuang. Age analysis of seismic sequences in the southwestern south China Sea [J]. *Geological Research of South China Sea*, 1994(6): 16-29.]
- [44] 龚铭, 李唐根, 吴亚军, 等. 南沙海域构造特征与盆地演化[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2001: 1-87. [GONG Ming, LI Tanggen, WU Yajun, et al. The Structural Characteristics of the Nansha Sea Basin Evolution [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2001: 1-87.]
- [45] Areshev E G, Dong T L, San N T, et al. Reservoirs in fractured basement on the continental shelf of southern Vietnam [J]. *Journal of Petroleum Geology*, 1992, 15(4): 451-464.
- [46] Schlüter H U, Hinz K, Block M. Tectono-stratigraphic terranes and detachment faulting of the South China Sea and Sulu Sea [J]. *Marine Geology*, 1996, 130(1-2): 39-78.
- [47] Kudrass H R, Wiedicke M, Cepek P, et al. Mesozoic and Cainozoic rocks dredged from the South China Sea (Reed Bank area) and Sulu Sea and their significance for plate-tectonic reconstructions [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1986, 3(1): 19-30.
- [48] 邱燕, 陈国能, 刘方兰, 等. 南海西南海盆花岗岩的发现及其构造意义[J]. 地质通报, 2008, 27(12): 2104-2107. [QIU Yan, CHEN Guoneng, LIU Fanglan, et al. Discover of granite and its tectonic significance in southwestern basin of the South China Sea [J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(12): 2104-2107.]
- [49] 鄢全树, 石学法, 王昆山, 等. 南沙微地块花岗岩岩石LA-ICP-MS锆石U-Pb定年及其地质意义[J]. 地质学报, 2008, 82(8): 1057-1067. [YAN Quanshu, SHI Xuefa, WANG Kunshan, et al. LA-ICPMS zircon U-Pb dating of granitic rocks from the Nansha micro-block, South China Sea, and its geological significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(8): 1057-1067.]
- [50] 刘书生, 范文玉, 罗茂金, 等. 老挝南部帕莱通双峰式火山岩锆石U-Pb定年及岩石地球化学特征[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2014, 44(2): 540-553. [LIU Shusheng, FAN Wenyu, Luo Maojin, et al. Zircon U-Pb dating and geochemistry characteristics of the Bimodal volcanic rocks in Phlaythong area, Southern Laos [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2014, 44(2): 540-553.]
- [51] 徐克勤, 孙鼎, 王德滋, 等. 华南多旋迴的花岗岩类的侵入时代、岩性特征、分布规律及其成矿专属性的探讨[J]. 地质学报, 1963, 43(1): 1-26. [XU Keqin, SUN Nai, WANG Dezi, et al. Discussion on the intrusive age, lithologic characteristics, distribution regularity and metallogenic exclusivity of multicycle granitoids in South China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1963, 43(1): 1-26.]
- [52] 梁敦杰, 许益民. 广东省区域地质基本特征[J]. 中国区域地质, 1988(1): 9-15. [LIANG Dunjie, XU Yimin. The basic characteristics of regional geology of Guangdong Province [J]. *Regional Geology of China*, 1988(1): 9-15.]
- [53] 许德如, 陈广浩, 夏斌, 等. 海南岛几个重大基础地质问题评述[J]. 地质科技情报, 2003, 23(4): 37-44. [XU Deru, CHEN Guanghao, XIA Bin, et al. Comment on several important basic geological problems in Hainan island, China [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2003, 23(4): 37-44.]
- [54] 黄长煌. 台湾东部未变形花岗岩LA-ICP-MS锆石U-Pb定年及其地质意义[J]. 地质通报, 2017, 36(10): 1740-1749. [HUANG Changhuang. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the undeformed granite in eastern Taiwan and its geological significance [J]. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(10): 1740-1749.]
- [55] 张开毕, 徐维光, 陈淑华, 等. 台湾区域地质概论[J]. 福建地质, 2017, 36(2): 79-93. [ZHANG Kaibi, XU Weiguang, CHEN Shuhua, et al. Geological survey in Taiwan area [J]. *Geology of Fujian*, 2017, 36(2): 79-93.]
- [56] 张成晨, 许长海, 何敏, 等. 东海到南海晚中生代岩浆弧及陆缘汇聚体制综述[J]. 地球科学进展, 2019, 34(9): 950-961. [ZHANG Chengchen, XU Changhai, HE Min, et al. Late Mesozoic convergent continental margin with magmatic arc from East to South China Seas: A review [J]. *Advances in Earth Science*, 2019, 34(9): 950-961.]

- [57] Li X H, Li J B, Yu X, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of seamount trachytes from the South China Sea and implications for the evolution of the northwestern sub-basin [J]. *Geoscience Frontiers*, 2015, 6 (4): 571-577.
- [58] Hutchison C S. Geological Evolution of South-East Asia[M]. Oxford: Oxford University Press, 1989: 1-368.
- [59] Holloway N H. North Palawan block, Philippine-its relation to Asian mainland and role in evolution of South China Sea [J]. *AAPG Bulletin*, 1982, 66 (9): 1355-1383.
- [60] 吴良士. 菲律宾地质构造及其区域成矿主要特征[J]. 矿床地质, 2012, 31 (3): 642-644. [WU Liangshi. Geological tectonic and regional mineralization of Philippine [J]. *Mineral Deposits*, 2012, 31 (3): 642-644.]
- [61] 邓江洪, 杨晓勇, 孙卫东. 菲律宾群岛中部Cebu地区早白垩火山弧型(VA)蛇绿岩年代学、地球化学研究及其构造意义[C]//中国地球科学联合学术年会. 北京: 中国地球物理学会, 2014: 1770. [DENG Jianghong, YANG Xiaoyong, SUN Weidong. Chronology, geochemistry and tectonic significance of Early Cretaceous volcanic arc (VA) ophiolite in Cebu area, central Philippines[C]//Annual Meeting of China Geoscience Federation. Beijing: Chinese Geophysical Society, 2014: 1770.]
- [62] 杨树春, 全志刚, 贺清, 等. 潮汕坳陷中生界生烃历史及火成岩侵入影响分析: 以LF35-1-1井为例[J]. 中国海上油气, 2008, 20 (3): 152-156. [YANG Shuchun, TONG Zhigang, HE Qing, et al. Mesozoic hydrocarbon generation history and igneous intrusion impacts in Chaoshan depression, South China sea: a case of LF35-1-1 well [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2008, 20 (3): 152-156.]
- [63] 修淳, 张道军, 翟世奎, 等. 西沙岛礁基底花岗岩的锆石U-Pb年龄及其地质意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 36 (3): 115-126. [XIU Chun, ZHANG Daojun, ZHAI Shikui, et al. Zircon U-Pb age of granitic rocks from the basement beneath the Shi Island, Xisha islands and its geological significance [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36 (3): 115-126.]
- [64] 金翔龙. 南海地球科学研究报告[J]. 东海海洋, 1989, 7 (4): 10-19. [JIN Xianglong. The geosciences research report in South China Sea [J]. *Donghai Marine Science*, 1989, 7 (4): 10-19.]
- [65] 鄢全树, 石学法, 高晶晶, 等. 南沙地块花岗岩质岩石矿物学特征及其成因信息[J]. 矿物学报, 2012, 32 (1): 131-138. [YAN Quanshu, SHI Xuefa, GAO Jinjin, et al. Mineralogical characteristics of granitic rocks from the Nansha Block (South China Sea) and its implications for magmatic process [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2012, 32 (1): 131-138.]
- [66] 贾大成, 丘学林, 胡瑞忠, 等. 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[J]. 热带海洋学报, 2003, 22 (2): 30-39. [JIA Dacheng, QIU Xuelin, HU Ruizhong, et al. Geochemical nature of mantle reservoirs and tectonic setting of basalts in Beibu gulf and its adjacent region [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2003, 22 (2): 30-39.]
- [67] 周云, 梁新权, 梁细荣, 等. 海南白垩纪六罗村组火山岩的年代学、地球化学特征及其大地构造意义[J]. 大地构造与成矿学, 2015, 39 (5): 903-918. [ZHOU Yun, LIANG Xinquan, LIANG Xirong, et al. Geochronology and geochemistry of Cretaceous volcanic rocks from Liuluo Formation in Hainan Island and their tectonic implications [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2015, 39 (5): 903-918.]
- [68] Chen C H, Hsieh P S, Wang K L, et al. Zircon LA-ICPMS U-Pb ages and Hf isotopes of Huayu (Penghu Islands) volcanics in the Taiwan Strait and tectonic implication [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 37 (1): 17-30.
- [69] 阎贫, 刘海龄. 南海及其周缘中生代火山活动时空特征与南海的形成模式[J]. 热带海洋学报, 2005, 24 (2): 33-41. [YAN Pin, LIU Hailing. Temporal and spatial distributions of Meso-Cenozoic igneous rocks over South China Sea [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2005, 24 (2): 33-41.]
- [70] 邹和平, 李平鲁, 饶春涛. 珠江口盆地新生代火山岩地球化学特征及其地球动力学意义[J]. 地球化学, 1995, 24 (S1): 33-45. [ZOU Heping, LI Pinglu, RAO Chuntao. Geochemistry of Cenozoic volcanic rocks in Zhujiangkou Basin and its geodynamic significance [J]. *Geochimica*, 1995, 24 (S1): 33-45.]
- [71] 王友华, 王文海, 蒋兴迅. 南海深水钻井作业面临的挑战和对策[J]. 石油勘探技术, 2011, 39 (2): 50-55. [WANG Youhua, WANG Wenhai, JIANG Xingxun. South China Sea deepwater drilling challenges and solutions [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2011, 39 (2): 50-55.]
- [72] Wang K L, Lo Y M, Chung S L, et al. Age and geochemical features of dredged basalts from offshore SW Taiwan: the coincidence of intra-plate magmatism with the spreading south China Sea [J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2012, 23 (6): 657-669.
- [73] Vu A T, Fyhn M B W, Xuan C T, et al. Cenozoic tectonic and stratigraphic development of the Central Vietnamese continental margin [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 86: 386-401.
- [74] 李兆麟, 丘志力, 秦社彩, 等. 南海海山玄武岩形成条件研究[J]. 矿物学报, 1991 (4): 325-333. [LI Zhaolin, QIU Zhili, QIN Shecai, et al. A study on the forming conditions of basalts in seamounts of the South China Sea [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 1991 (4): 325-333.]
- [75] 邱华宁, 魏静娴, 徐义刚, 等. 南海玳瑁火山岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年初步结果[C]//“南海深海过程演变”重大研究计划2013年度学术研讨会论文集. 上海: 同济大学海洋地质国家重点实验室, 2013: 16. [QIU Huaning, WEI Jingxian, XU Yigang, et al. Preliminary results of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of Daimao hill volcanic rocks in the South China Sea[C]//Proceedings of 2013 Annual Symposium on "the Evolution of Deep Sea Processes in the South China Sea". Shanghai, 2013: 16.]
- [76] 王贤觉, 吴明清, 梁德华, 等. 南海玄武岩的某些地球化学特征[J]. 地球化学, 1984 (4): 332-340. [WANG Xianjue, WU Mingqing, LIANG Dehua, et al. Some geochemical characteristics of basalts in the South China Sea [J]. *Geochimica*, 1984 (4): 332-340.]
- [77] 王叶剑, 韩喜球, 罗照华, 等. 晚中新世南海珍珠-黄岩海山岩浆活动及其演化: 岩石地球化学和年代学证据[J]. 海洋学报, 2009, 31 (4): 93-102. [WANG Yejian, HAN Xiqiu, LUO Zhaohua, et al. Late Miocene magmatism and evolution of Zhenbei-Huangyan seamount in the South China Sea: evidence from petrochemistry and chronology [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2009, 31 (4): 93-102.]
- [78] Taylor B, Hayes D E. Origin and history of the south China Sea

- basin[C]//Hayes D E. The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands, Part 2. Washington, DC: American Geophysical Union, 1983, 27: 23-56.
- [79] 鄢全树. 南海新生代碱性玄武岩的特征及其地球动力学意义[D]. 中国科学院研究生院博士学位论文, 2008: 1-132. [YAN Quanshu. Geochemistry of Cenozoic alkali basalts from the South China Sea and its geodynamical significance[D]. Doctor Dissertation of University of Chinese Academy of Sciences, 2008: 1-132.]
- [80] 林正良, 李红敬, 张永超, 等. 北部湾盆地福山凹陷古近纪辉长岩地球化学特征及构造意义[J]. 大地构造与成矿学, 2016, 40(5): 1064-1074. [LIN Zhengliang, LI Hongjing, ZHANG Yongchao, et al. Geochemistry and tectonic implications of the Paleogene Gabbros in Fushan Sag, Beibu Gulf Basin [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2016, 40(5): 1064-1074.]
- [81] 李美俊, 卢鸿, 王铁冠, 等. 北部湾盆地福山凹陷岩浆活动与CO₂成藏的关系[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(1): 55-59. [LI Meijun, LU Hong, WANG Tieguan, et al. Relationship between magma activity and CO₂ gas accumulation in Fushan depression, Beibuwan basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2006, 17(1): 55-59.]
- [82] 钱星, 张莉, 徐立明, 等. 台湾海峡盆地九龙江凹陷火成岩发育特征及其油气地质意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015, 35(5): 111-116. [QIAN Xing, ZHANG Li, XU Liming, et al. Igneous rocks in Jiulongjiang sag of Taiwan strait basin and implications for petroleum geology [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2015, 35(5): 111-116.]
- [83] 徐文刚, 魏静娴, 邱华宁, 等. 用火山岩制约南海的形成演化: 初步认识与研究设想[J]. 科学通报, 2012, 57(24): 3150-3164. [XU Yigang, WEI Jingxian, QIU Huaning, et al. Opening and evolution of the South China Sea constrained by studies on volcanic rocks: Preliminary results and a research design [J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(24): 3150-3164.]
- [84] Chung S L, Cheng H, Jahn B M, et al. Major and trace element, and Sr-Nd isotope constraints on the origin of Paleogene volcanism in South China prior to the South China Sea opening [J]. Lithos, 1997, 40(2-4): 203-220.
- [85] Huang X L, Niu Y L, Xu Y G, et al. Geochronology and geochemistry of Cenozoic basalts from eastern Guangdong, SE China: constraints on the lithosphere evolution beneath the northern margin of the South China Sea [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2013, 165(3): 437-455.
- [86] 邹和平. 南海北部-台湾海峡及邻区新生代火山活动时序与分布[J]. 华东地质学院学报, 1993, 16(1): 24-31. [ZOU Heping. Episodes and distribution of Cenozoic volcanism in Northern part of South China sea and Taiwan strait as well as their neighboring areas [J]. Journal of East China Geological Institute, 1993, 16(1): 24-31.]
- [87] 杨蜀颖. 南海玳瑁海山与相邻陆域玄武岩的地球化学特征及其构造意义[D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文, 2015: 1-112. [YANG Shuying. Geochemical characteristics of basalts from the Daimao seamount in the South China Sea (SCS) and from the SCS's neighboring lands: Implications for the regional tectonic evolution[D]. Doctor Dissertation of China University of Geosciences (Beijing), 2015: 1-112.]
- [88] 冯国荣. 华南沿海晚新生代玄武岩基本特征及其与构造环境的关系[J]. 中山大学学报论丛, 1992(1): 93-103. [Feng Guorong. Basic characteristics and relationship to tectonic environment of the Late Cenozoic basalts along the coast of South China Sea [J]. Supplement to the Journal of Sunyatsen University, 1992(1): 93-103.]
- [89] 杨胜雄, 邱燕, 朱本铎, 等. 南海地质地球物理图系(1: 200万)[M]. 天津: 中国航海图书出版社, 2015. [YANG Shengxiong, QIU Yan, ZHU Benduo, et al. The atlas of geology and geophysics of the South China Sea (1: 2000000)[M]. Tianjin: China Navigation Publications Press, 2015.]
- [90] Soeria-Atmadja R, Noeradi D, Priadi B. Cenozoic magmatism in Kalimantan and its related geodynamic evolution [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 1999, 17(1-2): 25-45.
- [91] 孙嘉诗. 南海北部及广东沿海新生代火山活动[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1991, 11(3): 45-67. [SUN Jiashi. Cenozoic volcanic activity in the northern South China Sea and Guangdong coastal area [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1991, 11(3): 45-67.]
- [92] Chung S L, Yang T F, Lee C Y, et al. The igneous provinciality in Taiwan: Consequence of continental rifting superimposed by Luzon and Ryukyu subduction systems [J]. Journal of Southeast Asian Earth Sciences, 1995, 11(2): 73-80.
- [93] Barr S M, Cooper M A. Late Cenozoic basalt and gabbro in the subsurface in the Phetchabun Basin, Thailand: Implications for the Southeast Asian Volcanic Province [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 76: 169-184.
- [94] 曾罡, 郑丽波, 陈立辉, 等. 南海洋脊抽吸作用对其周边新生代玄武岩岩浆活动的影响[J]. 高校地质学报, 2017, 23(3): 373-382. [ZENG Gang, ZHENG Libo, CHEN Lihui, et al. Influence of ridge suction on Cenozoic basaltic Magmatism in the surroundings of the South China Sea [J]. Geological Journal of China Universities, 2017, 23(3): 373-382.]
- [95] Zhang G L, Luo Q, Zhao J, et al. Geochemical nature of sub-ridge mantle and opening dynamics of the South China Sea [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2018, 489: 145-155.
- [96] Yan Q S, Castillo P, Shi X F, et al. Geochemistry and petrogenesis of volcanic rocks from Daimao Seamount (South China Sea) and their tectonic implications [J]. Lithos, 2015, 218-219: 117-126.
- [97] 杨蜀颖, 方念乔, 杨胜雄, 等. 关于南海中央次海盆海山火山岩形成背景与构造约束的再认识[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2011, 36(3): 455-470. [YANG Shuying, FANG Nianqiao, YANG Shengxiong, et al. A further discussion on formation background and tectonic constraints of igneous rocks in central sub-basin of the South China Sea [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2011, 36(3): 455-470.]
- [98] 李诗颖, 余克服, 张瑜, 等. 西沙群岛基底火山碎屑岩中单斜辉石的矿物化学特征及其地质意义[J]. 海洋学报, 2019, 41(7): 65-76. [LI Shiying, YU Kefu, ZHANG Yu, et al. Mineral chemistry of clinopyroxene in pyroclastic rocks of the Xisha Islands and their geological significance [J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(7): 65-76.]
- [99] 樊祺诚, 孙谦, 隋建立, 等. 北部湾涠洲岛及斜阳岛火山岩微量元素

- 和同位素地球化学及其构造意义[J]. 岩石学报, 2008, 24(6): 1323-1332. [FAN Qicheng, SUN Qian, SUI Jianli, et al. Trace-element and isotopic geochemistry of volcanic rocks and its tectonic implications in Weizhou Island and Xieyang Island, Northern Bay [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(6): 1323-1332.]
- [100] Hoang N, Flower M. Petrogenesis of Cenozoic basalts from Vietnam: Implication for origins of a 'Diffuse Igneous Province' [J]. *Journal of Petrology*, 1998, 39(3): 369-395.
- [101] Lee T Y, Lo C H, Chung S L, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating result of Neogene basalts in Vietnam and its tectonic implication [C]//Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia. American Geophysical Union, 1998, 27: 317-330.
- [102] Yang T F, Tien J L, Chen C H, et al. Fission-track dating of volcanics in the northern part of the Taiwan-Luzon Arc: eruption ages and evidence for crustal contamination [J]. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 1995, 11(2): 81-93.
- [103] 杜劲光. 菲律宾地质矿产概况[J]. 地质与勘探, 1984(9): 33-36. [DU Jingguang. The geological features and ore deposits in Philippine [J]. Geology and Exploratory, 1984(9): 33-36.]
- [104] Tu K, Flower M F J, Carlson R W, et al. Magmatism in the South China Basin: 1. Isotopic and trace-element evidence for an endogenous Dupal mantle component [J]. *Chemical Geology*, 1992, 97(1-2): 47-63.
- [105] 真允庆, 牛树银, 孙爱群. 南海热幔柱构造与油气分布[J]. 地质找矿论丛, 2013, 28(3): 401-411. [ZHEN Yunqing, NIU Shuyin, SUN Aiqun. The mantle plume structure and oil-gas distribution in the South China Sea [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2013, 28(3): 401-411.]
- [106] 韩宗珠, 吕迎秋, 许红, 等. 西沙群岛浮岩的岩石地球化学特征及成因[J]. 海洋地质前沿, 2017, 33(6): 1-8. [HAN Zongzhu, LV Yingqiu, XU Hong, et al. Petro-geochemistry and genesis of the pumices at Dongdao of Xisha islands [J]. Marine Geology Frontiers, 2017, 33(6): 1-8.]
- [107] 业治铮, 何起祥, 张明书, 等. 西沙群岛岛屿类型划分及其特征的研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1985, 5(1): 1-13. [YE Zhizheng, HE Qixiang, ZHANG Mingshu, et al. Classification and characteristics of islands in the Xisha archipelago [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1985, 5(1): 1-13.]
- [108] 张丙坤, 李三忠, 夏真, 等. 南海北部深水区新生代岩浆岩分布规律及其与海底地质灾害的相关性[J]. 海洋学报, 2014, 36(11): 90-100. [ZHANG Bingkun, LI Sanzhong, XIA Zhen, et al. Distribution of Cenozoic igneous rocks and its relation to submarine geological hazards in the deepwater area of the northern South China Sea [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 36(11): 90-100.]
- [109] Fan C Y, Xia S H, Zhao F, et al. New insights into the magmatism in the northern margin of the South China Sea: spatial features and volume of intraplate seamounts [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2017, 18(6): 2216-2239.
- [110] Zhao F, Alves T M, Wu S G, et al. Prolonged post-rift magmatism on highly extended crust of divergent continental margins (Baiyun Sag, South China Sea) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 445: 79-91.
- [111] 刘安, 吴世敏. 珠江口盆地花岗岩成因探讨及其对油气资源指示意义[J]. 地学前缘, 2011, 18(1): 141-148. [LIU An, WU Shimin. A discussion on the formation of granite in the Pearl River Mouth Basin and its implication to hydrocarbon resource [J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(1): 141-148.]
- [112] Song X X, Li C F, Yao Y J, et al. Magmatism in the evolution of the South China Sea: geophysical characterization [J]. *Marine Geology*, 2017, 394: 4-15.
- [113] Larsen H C, Mohn G, Nirrengarten M, et al. Rapid transition from continental breakup to igneous oceanic crust in the South China Sea [J]. *Nature Geoscience*, 2018, 11(10): 782-789.