

粤东白垩纪中酸性侵入体成因：锆石Hf同位素约束下的壳幔相互作用

袁依婷, 王勃然, 钱 飞

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2025年5月19日; 录用日期: 2025年7月14日; 发布日期: 2025年7月23日

摘 要

华南地区是中国重要的地质构造单元, 其白垩纪火成岩的时空分布与成因机制长期备受关注。文章介绍了华南东部粤东地区白垩纪中酸性火成岩的锆石Hf同位素探讨粤东白垩纪中酸性侵入体约束下的壳幔相互作用。华南花岗质岩石记录陆壳演化, 岩浆活动受板块作用驱动, 揭示古太平洋俯冲与构造体制转换的壳幔作用。

关键词

白垩纪, 壳幔相互作用, 粤东地区, 锆石Hf同位素

Origin of the Cretaceous Intermediate Acidic Intrusions in Eastern Guangdong: Crust Mantle Interaction Constrained by Zircon Hf Isotopes

Yiting Yuan, Boran Wang, Fei Qian

College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: May 19th, 2025; accepted: Jul. 14th, 2025; published: Jul. 23rd, 2025

Abstract

The South China region is an important geological tectonic unit in China, and the spatiotemporal distribution and genesis mechanism of its Cretaceous igneous rocks have long been of great concern. This article introduces the exploration of zircon Hf isotopes of Cretaceous acidic igneous rocks in

文章引用: 袁依婷, 王勃然, 钱飞. 粤东白垩纪中酸性侵入体成因: 锆石 Hf 同位素约束下的壳幔相互作用[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(7): 1003-1015. DOI: 10.12677/ag.2025.157094

the eastern part of South China and eastern Guangdong, and discusses the crust mantle interaction under the constraint of Cretaceous acidic intrusive bodies in eastern Guangdong. The granitic rocks in southern China record the evolution of the continental crust, and magmatic activity is driven by plate tectonics, revealing the crustal mantle processes of ancient Pacific subduction and tectonic regime transition.

Keywords

Cretaceous, Crust Mantle Interaction, Eastern Guangdong Region, Zircon Hf Isotope

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

华南地区作为中国东南部重要的地质构造单元，其复杂的地质演化过程在花岗质岩石中得到了充分的记录。花岗质岩石作为大陆地壳的主要组成部分，记录了陆壳增生和再造的重要信息[1][2]，广泛的幕式花岗质岩浆作用反映了多期地壳再造事件，揭示了华南复杂的地质演化过程[2][3]。与多旋回、多阶段的岩浆活动相伴随[1]。华南东南部发育大规模的中生代火山岩和侵入岩，这些岩石是多期幕式岩浆活动的产物。这些岩石的形成与多期幕式岩浆活动密切相关，反映了该地区在地质历史时期经历了多次构造-岩浆事件的叠加与改造。

华南东南部中生代侵入岩出露面积约 218,090 平方公里[4][5]，90%以上为中酸性侵入岩和酸性火山岩(包括流纹岩和英安岩)，而基性岩占比相对较少；这一岩石组合特征表明，该地区的岩浆活动以中酸性岩浆为主，可能与陆壳物质的广泛熔融有关。从时间分布来看，这些中酸性火成岩的岩浆活动在印支期和燕山期均有发育，在燕山期的岩浆活动到达顶峰，形成了大规模的岩浆岩带，主要分布在浙闽粤沿海地带，且有向浙闽粤沿海地区逐渐变年轻的趋势(图 1)[4][6]。燕山运动不是单个原因导致的各种构造运动，而是经历了多种情况的叠加汇聚，经历了岩石圈的崩塌减薄和克拉通的破坏，诱发了强烈的岩浆作用[7][8]。

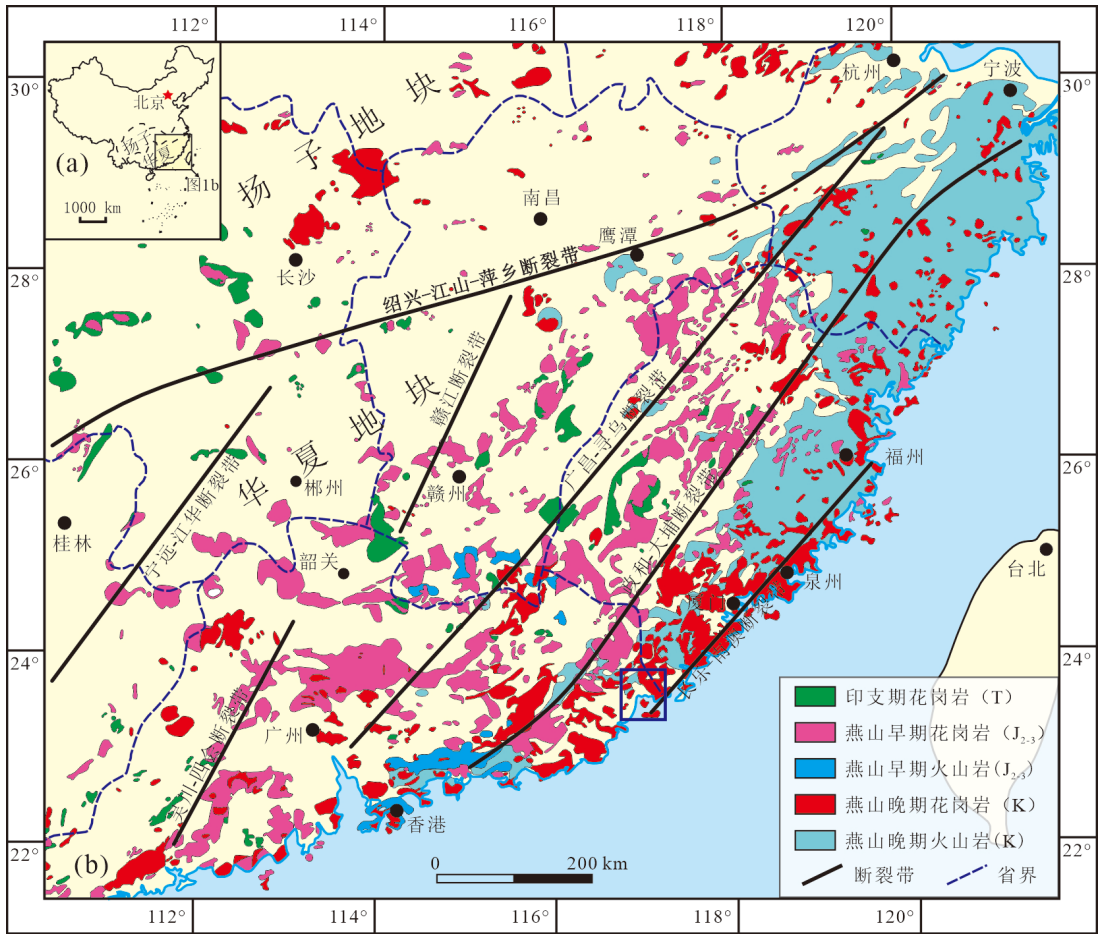
在显生宙期间，华南大陆的沉积构造演化可划分为三个主要构造阶段。在早古生代加里东期，陆内造山作用促使南华裂谷闭合。引发区域性强烈隆升与剥蚀作用，导致志留系地层缺失并形成前泥盆系褶皱基底，伴随深层次韧性剪切变形和壳源深熔作用。造山主事件结束后，早泥盆纪砾岩角度不整合覆盖在变形的基底之上[9]；在早中生代印支期，华南大陆位于古特提斯与古太平洋构造域交汇带，构造体制发生重要转换。伴随古特提斯洋闭合，华南板块先后与印支地块、华北板块发生陆陆碰撞，诱发强烈陆内变形[10]。主碰撞期表现为区域整体隆升与海陆转换，发育基底韧性剪切带和大规模褶皱系统；后碰撞伸展阶段则与加厚地壳的拆沉作用相关，引发广泛的后造山岩浆活动[11][12]；在晚中生代构造格局重组过程中，古特提斯构造域的闭合与古太平洋板块向欧亚大陆的俯冲增强构成了区域动力学演化的两大核心要素[4][13][14]。在板块北西向俯冲作用下，华南大陆形成超 1000 公里的陆内逆冲-褶皱体系，伴随大规模岩浆侵入，构成了全球独具特色的中生代陆内造山-岩浆带。这种构造-岩浆耦合特征为揭示板内变形机制提供了重要研究对象[15]。

在活动大陆边缘的岩浆活动中，长英质岩石的生成往往伴随着地幔物质的加入[16][17]，俯冲带环境下，来自深部的基性熔体不仅通过底侵作用促进地壳熔融，其本身也常作为重要组分混入最终形成的花

岗质岩浆[18]。而俯冲带应力环境的变化,如俯冲角度的调整、板块汇聚速率的变化等,幔源组分对岩浆体系的贡献程度,可能存在显著的时空差异性[19]。并且基性岩脉或岩墙为区域性地壳拉张作用的产物[20],例如,在俯冲板块回撤或地壳伸展的背景下,幔源岩浆的上涌和底侵作用会增强,从而为中性岩岩浆的形成提供更多的热源和物质来源[21]。

此外,基性岩脉或岩墙的存在为地壳拉张作用提供了重要线索。这些基性岩脉或岩墙通常是基性岩浆从地幔上升至地表的通道,其形成与岩石圈的伸展减薄过程密切相关[22]。在伸展构造背景下,地壳的拉张作用会导致岩石圈减薄,从而为幔源岩浆的上涌创造了有利条件。这些基性岩浆在上升过程中,不仅可能直接形成基性岩脉或岩墙,还可能通过与地壳物质的相互作用,参与中酸性火成岩的形成。例如,基性岩浆的注入可能引发地壳物质的部分熔融,形成混合源区的中基性岩浆,表明基性岩浆从地幔上升到地表的通道,与岩石圈伸展减薄有着密切关系[23]。

粤东处于华南板块东缘,为东南沿海火山-侵入杂岩带的西南端,是环太平洋构造域的重要组成部分。该杂岩带的华南晚中生代岩浆作用的时空演化,表现为粤东(209~86 Ma)到浙东南(140~88 Ma)的渐进式迁移,可能与古太平洋板块俯冲后撤过程相关[24]。因此,粤东地区是揭示华南东部晚中生代火山-侵入杂岩成因、深部岩浆作用过程和构造背景的理想场所。



① 绍兴-江山-萍乡断裂; ② 长乐-南澳断裂; ③ 政和-大埔断裂;
④ 广昌-寻乌断裂; ⑤ 赣江断裂; ⑥ 吴川-四会断裂; ⑦ 宁远-江华断裂(据[13] [25]-[27]修改)

Figure 1. Schematic map of distribution of Mesozoic granite volcanic rocks and tectonic characteristics in South China
图 1. 华南中生代花岗岩-火山岩分布和大地构造特征简图

2. 研究现状

2.1. 花岗岩的研究进展

花岗岩的时空分布规律及其成因类型,为解析大陆地壳的形成与演化过程提供了重要约束,不仅是地球区别于太阳系内其他行星的重要标志[27][28],更是大陆地壳形成、演化与改造的关键物质记录。花岗岩的形成过程直接反映大陆地壳的生长动力学机制,其成因研究涉及地壳增生、分异再造等关键地质过程。我国花岗岩类出露面积达 80 余万平方公里,约占陆域面积的 9%,为相关研究提供了理想天然实验室[29],其形成机制和演化过程对理解大陆地壳的增生、改造以及壳-幔相互作用具有重要意义。花岗质岩石作为火成作用的典型产物,其岩浆起源-运移-侵位过程记录了大陆地壳生长的关键信息[30]。研究表明,前寒武纪克拉通(特别是太古宙)的陆壳主体由 TTG 岩系组成[31],而显生宙新增陆壳主要形成于活动大陆边缘环境。值得注意的是,华北燕山地区可能代表了一种独特的陆壳改造-再生模式,为理解大陆演化提供了新的研究范式。花岗岩的形成主要通过两种方式:地壳岩石部分熔融和基性岩浆结晶分异[28]。地壳岩石的部分熔融是花岗岩形成的主要机制[32][33]这一过程通常发生在地壳深部,由于热流上升或幔源岩浆的底侵作用,地壳岩石发生部分熔融,形成花岗质岩浆。另一种机制是基性岩浆的结晶分异,主要有不同深度条件下的矿物组合分异[34]、熔体反应流与晶粥体模型[35]以及不混溶作用与结晶分异的相互作用等机制[36]。尽管这种方式产生的花岗岩数量较少。无论哪种方式,作为大陆演化的“岩石探针”,花岗岩类记录了从地壳生长、成熟到改造的全过程动力学信息,其物质来源既包含地壳熔融组分,也包含幔源物质的贡献。同位素地球化学研究揭示,花岗岩的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化(-20~-15)记录了从原始地幔到成熟陆壳的多阶段演化信息。例如,华北克拉通 3.8 Ga 的鞍山花岗质片麻岩保存着最古老陆壳生长证据,而青藏高原新生代淡色花岗岩则记录了大陆碰撞过程中的地壳再造过程[37][38]。

花岗岩的成因分类至今仍是岩石学界争论的焦点问题[29][39]。目前广为接受的 Chappell-White 分类体系(1974)将花岗岩划分为 I 型(火成岩源区)和 S 型(沉积岩源区)两大端元,后续补充的 A 型代表非造山环境下的碱性花岗岩。然而,澳大利亚 Lachlan 造山带的最新同位素证据显示,传统 I 型花岗岩中也可能混入沉积源区物质[40],这对经典分类方案提出了挑战。此外,由幔源岩浆直接分异形成的 M 型花岗岩虽不常见,但为理解壳幔相互作用提供了独特样本。

针对花岗岩地球化学多样性特征,前人构建了分离结晶、同化混染、岩浆混合等多成因模型[32]。分离结晶作为岩浆演化的关键分异机制,涉及晶体-熔体系统的物理化学分离过程。包括重力沉降导致的晶体分选;岩浆流动引发的机械分异;应力驱动下的熔体压滤作用;热对流引起的组分再分配等多种机制[41]。然而,鲍文反应序列研究的内容主要涉及基性岩浆,而花岗质岩浆的矿物分异序列尚未明确建立。特别是长英质岩浆的高黏滞特性对结晶分异效率产生显著制约,这使得学界对花岗质岩浆能否发生显著结晶分异存在持续争论[30]。

花岗岩“晶粥”模式(Crystal Mush Model)是近年来解释花岗质岩浆演化的重要理论之一,其核心观点认为岩浆房并非完全液态,而是由晶体(含量在 40%~60%以上)和晶间熔体组成的混合物(晶粥),晶粥模式还为花岗岩中常见的不平衡结构(如环带矿物、反应边结构)提供了成因解释,在这样的岩浆储库内,局部可能存在以熔体为主的岩浆房,但体积较小(宽度小于 1000 米)[42]。这就意味着,形成中性侵入体的岩浆在壳幔相互作用及上升、侵位、冷却过程中不断发生动态变化,华夏地块东部白垩纪中性侵入体出露规模较花岗岩小得多,这很可能与其岩浆补给通量较小有关。花岗岩形成过程本质上是多源物质在时空上的动态混合过程。从早期幔源岩浆底侵,到中期地壳熔融,再到晚期熔体混合,各阶段都可能留下相应的岩石学与地球化学印记[43][44]。因此,前人提出了多端源贡献解释花岗岩成因,包括岩浆混合、同化混染等[17]。

经过半个世纪的发展,花岗岩研究的技术手段取得了显著进步。全岩地球化学分析、锆石 U-Pb 年龄和 Hf-O 同位素的成果急剧增加,研究手段更加多样化,花岗岩成因研究也逐渐向量化及精细化的方向发展,使人们对花岗岩-火山岩起源、地球动力学背景及其与成矿关系方面的认知更为深刻。

2.2. 华南地区研究现状

华南位于欧亚大陆东南缘,东邻西太平洋,其复杂的地质演化历史与多期次岩浆活动共同塑造了独特的岩石组合格局,经历了漫长的地质演化历史[45]。该区域大地构造格架形成于新元古代扬子-华夏地块的俯冲碰撞,其后又历经志留纪、二叠-三叠纪等关键构造期的强烈改造[27]。这种多期叠加的动力学过程造就了现今复杂的构造形迹。这些事件对华南的地壳演化产生了深远影响。从中生代开始,华南地区内部开始发育大规模的岩浆活动。形成了以花岗岩为主体、火山岩广泛发育的岩浆岩省,其成为研究大陆地壳演化、壳-幔相互作用以及岩浆过程的天然实验室。华南火山岩的研究不仅为理解陆内造山向活动大陆边缘转换过程提供关键证据,地质背景和岩浆活动不仅记录了区域构造演化的历史,还为理解全球板块构造和大陆地壳生长提供了重要窗口[46]。

华南东部花岗岩带具有明显的方向性分布格局,岩石组构主要表现为均质块状结构,部分岩体边部可见透入性片麻状构造,指示变形-变质作用的差异性影响[9],突出特点是时代上的幕式多期次性,其中晚中生代花岗岩占绝大部分,且大规模多金属成矿作用也发生在这一时期。地质调查证实,华南地区花岗岩类覆盖面积达百万平方公里级,形成独特的大花岗岩区[29]。

华南地块的花岗质岩浆活动主要受控于三叠纪印支期与侏罗-白垩纪燕山期两大构造热事件。这两期造山运动不仅重塑了区域地壳架构,更为理解东亚陆缘中生代构造转型提供了关键窗口[47]。印支期花岗岩在华南陆块呈现非均匀分布格局,以湘-桂-赣-粤-闽交界区域最为发育,其中南岭构造带与湘中地区构成两个主要富集中心[48]。值得注意的是,浙东南局部也存在该期岩体的零星出露[3]。燕山期花岗岩主要分布在东南沿海一带,主要以花岗岩为主的侵入杂岩和以流纹岩为主的火山岩系。华南火山岩主要分布于东南沿海地区,受控于长乐-南澳断裂带与政和-大浦断裂带等 NE 向深大断裂系统。中生代火山活动具有明显的阶段性特征,可分为早侏罗世(约 200~170 Ma)、晚侏罗世-早白垩世(160~100 Ma)和晚白垩世(100~65 Ma)三个主要阶段[46]。早侏罗世火山岩出露零散,以高钾钙碱性流纹岩为主,常与同期花岗岩构成火山-侵入杂岩体,如粤北的连州盆地[49]。晚侏罗世至早白垩世为火山活动鼎盛期,形成闽浙火山岩带,展布长度超过 800 公里,最大厚度超 5000 米[50]。该期火山岩以双峰式组合为特征,玄武岩与流纹岩体积比约为 1:3,中间成分安山岩罕见,指示岩浆系统存在显著的成分间隔。晚白垩世火山活动集中于沿海狭窄地带,发育碱性玄武岩与粗面岩组合,伴随 A 型花岗岩侵入,反映岩石圈伸展减薄达到顶峰[51]。

华南陆块从西北内陆向东南沿海方向,岩体形成时代呈现明显的渐进式年轻化特征[3],锆石 U-Pb 定年数据显示,火山活动中心自早侏罗世的内陆地区(如湘赣交界)逐步向东迁移,至晚白垩世集中于现今海岸线附近[52]。在成分上,花岗岩的硅和碱含量逐渐增加。华南燕山期花岗岩的时空分布特征与古太平洋板块北西向俯冲过程呈现显著协同性,指示该期大规模岩浆活动可能主要受控于板块俯冲引发的壳幔相互作用[53]。

关于华南火山岩形成的深部动力学机制,目前存在三种主流观点:① 太平洋板块俯冲主导模型:认为火山岩时空分布受控于伊泽奈崎板块的北西向俯冲,岩浆活动与俯冲角度变化引起的弧后伸展直接相关[54];② 陆内伸展模型:强调古特提斯闭合后的陆内造山垮塌引发岩石圈拆沉,诱发软流圈上涌[55];③ 多板块相互作用模型:主张古太平洋板块与特提斯域板块(如菲律宾海板块)的联合作用导致复杂应力场[56]。

华南花岗岩成因研究近年来取得重要突破。通过整合岩相学、地球化学和同位素年代学等多学科证据,学者们对岩浆源区性质、熔融机制和演化过程有了更深入的认识[37]。然而,关于花岗岩的成因及演化过程仍然存在许多前沿科学问题。因此,我们应利用我国华南板块中生代侵入岩良好的出露条件,结合岩石学、年代学和矿物学等研究,为解决大陆地壳演化中的关键科学问题提供新的思路和证据。

2.3. 粤东地区研究现状

粤东地区位于华南大陆边缘,是东南沿海火山-侵入岩带的西南端,分布着大量的火山-侵入岩[57]。受燕山期岩浆侵入和构造应力的双重改造,区内侏罗系沉积岩普遍经历接触变质作用,尤其在岩体接触带附近形成典型的角岩化带,火山岩系则以高基坪群为代表[58],主要分布于河源-海丰断裂带沿线,构成一系列 NE 向展布的火山沉积盆地。该岩系与下伏地层呈明显角度不整合接触,可划分为两个喷发旋回:上部旋回(500~2800 m)以流纹质熔结凝灰岩为主体,顶部过渡为英安岩-安山岩组合;下部旋回(650~1150 m)发育于盆地边缘,呈现从中酸性火山碎屑岩向底部安山岩的岩相转变[50]。

该地区岩浆侵入体主要出现在火山构造盆地周边及不同构造体系的交汇区域。早期形成的花岗岩体集中分布在研究区西北部,以大规模岩基为主要产出形式,少量呈岩株状;较晚期花岗岩则以中小型岩基和岩株为主,主要见于东南部区域。这两期岩浆侵入体总体呈现东北-西南和近东西向的分布格局,其中深成岩相基具有明显的内部相带分异,而浅成相的岩株和岩脉则相变特征不明显。岩石类型以黑云母花岗岩和二长花岗岩占绝对优势,闪长岩与辉长岩类较为少见。火山岩系中熔岩与火山碎屑岩均十分发育,局部可见少量次火山岩[59]。

研究表明,粤东一带的岩浆成矿作用具有明显的多阶段性,主要发育于中侏罗世、晚侏罗世、早白垩世等不同地质时期。现有年代学资料显示,该区域火山-侵入岩的形成时代基本衔接,反映出粤东在漫长的地质历史中经历了多轮岩浆侵入与成矿过程[57]。

3. 地质背景

华南地块作为东亚大陆关键构造单元,其东邻西太平洋活动带,地处欧亚大陆东南缘,构成了欧亚、印度-澳大利亚及太平洋三大板块的交汇区域[60]。这一特殊的大地构造位置使其成为研究大陆动力学和板块相互作用的重要窗口[1][2]。华南板块的构造演化历史复杂,经历了多次重要的构造事件,包括新元古代的扬子板块与华夏板块的碰撞、中生代的古太平洋板块俯冲以及新生代的构造活动。这些构造事件不仅塑造了华南板块的地质格局,还导致了大规模的岩浆活动和成矿作用。

华南地区的地质构造主要包含扬子地块和华夏地块两大单元。在新元古代时期,这两个地质单元发生了强烈碰撞作用形成江南构造带[9][15]。在扬子地块北缘的崆岭杂岩中,变质沉积岩内的碎屑锆石测年数据表明,该区域存在约 32.75 亿年前的地壳物质,最古老的岩石和地壳遗迹来自崆岭杂岩[61],由扬子地块北部崆岭变质沉积岩碎屑锆石 U-Pb 定年显示地壳物质为 3275 Ma。主要由闪长岩、花岗质片麻岩等深层岩组成。华夏地块的古老基底主要包括浙江的八都群、陈蔡群及福建的麻源群。其中,八都群的变质花岗岩形成于 18.9~18.3 亿年前,而最新研究指出,麻源群和陈蔡群的主体可能形成于新元古代[62]。在约 8.25 亿年前的新元古代晚期,扬子与华夏地块完成拼合,随后发生强烈的构造岩浆活动。进入中生代后,受古太平洋板块俯冲的影响,华南经历了多期构造变革,形成了广泛分布的火山-侵入岩带。该区域的构造演化表现为挤压与伸展交替的幕式特征,塑造了现今复杂的地质格局[15]。

结合区域地质资料查明,粤东地区出露的地层主要为中生代地层,主要包含晚三叠世的小坪组、侏罗纪的金鸡组、漳坪组与高基坪组、早白垩世的官草湖组以及第四纪沉积物。受晚期岩浆侵入及构造活动改造,该区侏罗系地层普遍发生变质现象,沿接触带的泥质岩石普遍出现角岩化。主要出露地层描述

见(表 1)。

华南区域主要发育两组优势走向的断裂构造体系：近东西向断裂带和北东 - 北北东向断裂系[50][58]。粤东地区构造位置特殊，其西北以莲花山断裂为界，东侧受长乐 - 南澳断裂带控制，北部与大埔 - 饶平断裂带相接，南部则受高要 - 惠来东西向隐伏断裂带影响(图 1)[50]，奠定了广东省区域构造的基本格局。前寒武纪基底的边界构造，更是重要的构造单元划分界线。断裂切割深度大，可能为上地幔岩浆底侵的有利通道，制约着该区古、中、新生代地质体的分布、规模和产状[1]。

晚中生代以来，古太平洋板块俯冲导致华南板块出现多次构造事件，主要以挤压和伸展变形交替出现为特征[15]，华南东部地区中生代火成岩，特别是燕山期的岩浆岩具有向洋年轻化的趋势，这与古太平洋俯冲板块后撤作用密切相关。在华南沿海区域，燕山运动晚期形成的花岗岩类与同期火山 - 侵入杂岩共同构成了显著的北东向岩浆岩带。这一岩浆活动的时空分布与古太平洋板块的俯冲过程密切相关。早白垩世时期，高角度俯冲的太平洋板块促使深部地幔物质上升，引发地壳部分熔融，形成大规模岩浆活动。进入晚白垩世，随着板块后撤俯冲作用的进行，区域岩石圈发生显著伸展减薄，软流圈地幔物质进一步上涌，导致更广泛的地壳熔融事件[63]。

Table 1. Main exposed stratum in the in South China
表 1. 区内主要出露地层

地层单位		分布位置	主要岩性特征
系	统、阶(组)		
三叠系	小坪组	中部	细砂岩、泥质粉砂岩和砂质页岩
	金鸡组		上岩层状粉砂岩夹粉砂质页岩、中细粒长石石英砂岩，底部为长石石英细砂岩，厚度为 352~1418 m；下岩泥质粉砂岩、粉砂质泥岩，其中夹层状细粒长石石英砂岩。地层走向 NW-SE，倾角 18°~50°，厚度 700~1695 m
	漳坪组		紫红色凝灰质碎屑岩为主，局部夹火山熔岩和凝灰角砾岩，岩性和厚度变化较大
侏罗系		中部和西北部	下亚组第一岩性主要发育陆相盆地沉积体系，岩性组合包括紫红色火山角砾岩等，厚度 75~780 m，与下伏地层呈明显的角度不整合接触；第二岩性段则以深灰色安山质熔岩及伴生的火山碎屑岩为主，厚度 649~107 m。上亚组第一岩性段以酸性火山岩为特征，主要由流纹岩及其火山碎屑岩构成，夹有多层炭质页岩和凝灰质砂岩，厚度变化较大；第二岩性则以中酸性火山岩为主，英安岩占主导，夹有流纹岩、安山岩等多种火山岩类型，厚度 400~4260 m。
	高基坪组		
白垩系	官草湖组	中部和东南部	下部以紫红色砾岩、砂砾岩为主，夹粉砂岩、凝灰岩及火山熔岩；上部以酸性火山熔岩、熔凝灰岩及角砾凝灰岩为主。
第四系	第四系沉积物	南部、中部和东部的河谷阶地	砾石、砂及粉砂粘土等松散沉积物为主，厚度 > 4 m。

4. 锆石 Hf 同位素约束下的壳幔相互作用

华南地区作为中国重要的地质构造单元之一，其晚中生代地质演化记录了古太平洋板块俯冲 - 碰撞的动力学过程。作为华南陆缘的重要组成部分，粤东地区白垩纪岩浆活动的时空分布特征及其与太平洋板块俯冲的动力学耦合关系，是揭示区域构造 - 岩浆演化机制的关键窗口。自晚三叠世以来，华南地块经历了从特提斯构造域向太平洋构造域的转换过程，这一构造体制的转变直接控制着区域岩浆活动的时空分异。研究表明，华南燕山期岩浆岩在时空分布上呈现显著的分带性，年代学数据显示具有从内陆向沿海地区逐渐年轻化的趋势[3][28]，并且在岩石地球化学特征显示成分上显示内陆到滨海越来越富硅富

碱的特征[64]。该地区花岗质岩石的时空分布、成因机制及与太平洋板块俯冲的耦合关系,一直是构造岩浆演化研究的热点[4]。这种空间分异现象与太平洋板块的俯冲动力学过程存在成因联系,这一时空格局与太平洋板块的北西向俯冲相耦合,表明太平洋板块的俯冲诱发并主导了华南大面积的岩浆活动[65]。

区域构造演化研究表明,中生代华南地块经历了从特提斯构造域向太平洋构造域的转换过程。燕山早期花岗岩(200~135 Ma),主要受古太平洋板片北西向低角度俯冲影响,区域构造体制以挤压为主,导致内陆地区地壳增厚并发生大规模中深成花岗岩侵位[66],主要出露于政和-大浦断裂带以西地区(湘、粤、赣、闽西北),出露形态以大的岩基为主,其次为岩株,如赣南的西华山岩体(锆石 U-Pb 年龄 163~152 Ma)和湘南的香花岭岩体(年龄 158~145 Ma),呈现北东向展布,岩石组合以铝过饱和的 S 型花岗岩为主的深成黑云母花岗岩为主,普遍发育石榴石、堇青石等特征矿物,反映挤压背景下地壳深熔作用[66][67],地球化学特征显示强过铝质($A/CNK > 1.1$)、高 Sr (400~600 ppm)、低 Y (<18 ppm)特征,表明其形成于地壳深熔作用主导的挤压构造背景[28];而燕山晚期花岗岩(135~65 Ma),随着太平洋板块俯冲后撤(rollback)和俯冲角度增大,区域构造体制转变为伸展环境[13],岩石类型从壳源 S 型花岗岩向壳幔混合的 I 型、A 型花岗岩转变,并伴随大量火山岩喷发[28]。这一转变在岩浆记录中表现为:沿海地区岩浆活动逐渐年轻化,主要分布于政和-大浦断裂带以东的沿海地区(粤东、闽南、浙南),呈现出以岩株及小型岩基为特征,岩性偏基性,富含挥发分(如氟),与同期火山岩构成花岗质火山侵入杂岩带,显示伸展背景下地幔物质参与的浅成岩浆活动[66]。大量花岗质火山-侵入杂岩,其时空分布特征具有重要指示意义。两期花岗质侵入体(含大型岩基及小型岩株)在空间分布上主要呈现两个方位:北东向和近东西向。其从岩相学特征来看,规模较大的岩基属于深成侵入产物,具有显著的内部相带分异现象;而体积较小的岩株或岩脉多形成于中浅成-浅成环境,岩相变化相对简单。这种岩浆岩的时空分布规律与古太平洋板块俯冲作用引发的深部动力学过程存在成因联系。早期(早-中侏罗世),太平洋板块向欧亚大陆的北西向俯冲引发挤压应力场,导致内陆地区地壳增厚及中元古代基底岩石的部分熔融,形成以壳源为主的 S 型花岗岩。晚期(早白垩世),板块俯冲后撤(rollback)引发岩石圈伸展减薄,软流圈上涌诱发壳幔混合岩浆作用,沿海地区岩浆活动逐渐年轻化且成分富硅富碱,形成 I 型与 A 型花岗岩组合[67],这一时期对应太平洋板块初始俯冲阶段,俯冲板片脱水引发上覆地壳熔融,形成大陆边缘弧型岩浆岩,形成的火山-侵入岩主要为花岗岩。此外,太平洋板块的俯冲还导致了华南地区地壳的伸展和减薄,为岩浆的上涌和侵位提供了有利的构造条件。这种伸展背景下的岩浆活动不仅形成了大量的花岗岩,还伴随着幔源物质的加入,进一步丰富了岩浆的成因类型和成分特征。

华夏地壳基底作为中国东南部的重要构造单元,其演化过程深刻记录了地壳与地幔的长期相互作用。基底主体由前寒武纪变质岩系构成,包括古元古代至中元古代的片麻岩、角闪岩及新元古代变质沉积-火山岩,伴随多期花岗岩侵入。地球化学与同位素研究为地幔物质参与提供了关键证据:基底中的基性岩脉(如辉绿岩)具有富集或亏损地幔特征,高 $Mg^\#$ 值(>60)和轻稀土富集模式指示幔源岩浆的直接贡献。同位素体系中,部分岩石 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值接近亏损地幔范围,锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 呈现正值(+5~+10),结合高放射性 Pb 同位素比值(如 $^{206}Pb/^{204}Pb > 18.5$),均揭示新生地幔物质的混合。新元古代罗迪尼亚超大陆裂解期间(约 830~750 Ma),软流圈地幔上涌引发双峰式火山活动,基性岩浆底侵改造基底;显生宙加里东期和印支期花岗岩中发现的幔源包体及锆石,进一步证实壳幔相互作用的持续性[68]。动力学模型显示,该基底经历了古元古代陆核形成、新元古代地幔柱改造及显生宙碰撞-伸展驱动的多阶段演化,其中地幔物质通过岩浆底侵、俯冲脱气等方式不断注入。这一过程不仅揭示了华夏地块垂向增生的多源性,也为华南从克拉通向活动边缘转型及钨、锡矿床成矿提供了深部动力与物质基础[69]。

根据总结前人所报道的邻区同时代东南沿海白垩纪侵入体的年龄数据(表 2),可以发现,随着时间有早到晚(140~90 Ma),在早白垩世构造体制转折背景下,同位素组成呈现由早阶段(140~110 Ma)富集型向

晚阶段(110~90 Ma)亏损型演化的趋势,所有锆石均位于球粒陨石演化线附近,华夏地壳基底的演化线以上,为源区有地幔物质加入提供证据(图 2),地幔组分物质参与逐渐增加。其中富集端元的 Hf 同位素组成与中元古代地壳基地特征相吻,验证了粤东地区花岗质岩石主要源于中元古代地壳基地物质的部分熔融。

Table 2. Zircon Hf isotopes of Cretaceous intrusive bodies along the southeast coast

表 2. 东南沿海白垩纪侵入体锆石 Hf 同位素

地区	样品	岩性	分析方法	年龄	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	来源
福建泉州	QZ17	花岗岩	LA-ICP-MS	108.4 Ma	1~3.8	[5]
	QZ22	花岗岩	LA-ICP-MS	133 Ma	-2.8~1	
	QZ55	花岗岩	LA-ICP-MS	91.4 Ma	2.5~4.6	
	QZ62	花岗岩	LA-ICP-MS	111.3 Ma	-0.5~0.9	
广东莲花山	L02	石英斑岩	白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	102 Ma	-1.8~1.11	[59]
	L03	石英斑岩	白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	98.7 Ma	-2.05~-0.47	
	L04	黑云母二长花岗岩	白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	137.5 Ma	-3.92~0.28	
福建莆田	PT07	花岗闪长岩	LA-ICP-MS	100.3 Ma	-4.1~-0.7	[64]
	PT09	花岗岩	LA-ICP-MS	109.5 Ma	-4.3~-2.9	
	PT14	黑云母二长花岗岩	LA-ICP-MS	122.9 Ma	-1.6~1.4	
	PT22	花岗岩	LA-ICP-MS	90.1 Ma	1.9~3.8	
	PT28	花岗岩	LA-ICP-MS	119.5 Ma	-3~2.5	

华南显生宙的三次主要的岩浆作用的产物均以花岗质岩石为主(图 1),表明主要为地壳的重循环[70][71],但对花岗质岩浆起源过程中地幔是否有物质贡献缺乏有效的制约,即是否有壳-幔相互作用还不清楚。揭示这些信息对于理解岩浆活动的构造环境和区域构造演化、地壳形成和演化过程具有重要意义。前人认为地幔组分参与花岗岩成岩过程的方式可能有二种情形,其一为幔源基性岩浆底侵与其诱发的地壳物质部分熔融形成的长英质岩浆在地壳深部混合形成壳幔混合岩浆(钙碱性花岗岩)直接参与到花岗岩的形成[72];另一种方式是幔源岩浆首先侵入到地壳基底岩石中形成初生地壳,然后在后期热事件的影响下,这种既有初生地壳又有古老基底地壳构成的混合地壳原岩发生部分熔融,目前大多学者认为第一种演化作用为花岗岩的形成[73]。

晚中生代以来受古太平洋板片俯冲作用的影响,华南构造演化以挤压和伸展变形事件的幕式交替演变为特征[15]。Li 等(2007)认为这期伸展事件在华南大陆范围内引发大规模的岩浆活动,致使岩浆岩主要分布在长江中下游、绍兴-江山缝合带及东南沿海区域。并且形成大量近东北走向的盆地和伸展穹隆等构造。如(沅麻盆地和沿海的火山岩盆地和晚白垩世快速构造抬升形成的伸展穹隆,如衡山穹隆约 96~80 Ma)、越城岭穹隆(100~85 Ma)等[47]。

尽管岩浆岩的成因不尽相同,但大部分学者认为它们的形成背景,均为早白垩世地壳伸展背景,也强调了古太平洋板块俯冲后撤(Roll back)作用在华南晚中生代变形和岩浆事件中的重要性[15]。

粤东地区处于华南大陆边缘之东南沿海火山-侵入岩带的西南端。这些岩浆作用的形成与古太平洋板块向华南板块的俯冲有关。古太平洋板块在华南下方的俯冲作用可能导致覆盖大陆板块的幔源岩浆的下覆,这可能为广东省广泛存在的晚中生代侵入岩岩浆活动提供了大部分热量和部分物质[74]。由于在燕山晚期太平洋板块后撤的原因,使得板块内伸展活动也开始向东南沿海移动,华南花岗岩在时间和空间

分布上由西向东逐渐变年轻趋势[60]。

以上特征说明幔源基性岩浆诱发地壳物质部分熔融后形成长英质岩浆并与幔源基性岩浆的混合作用很可能是粤东形成的主要机制。

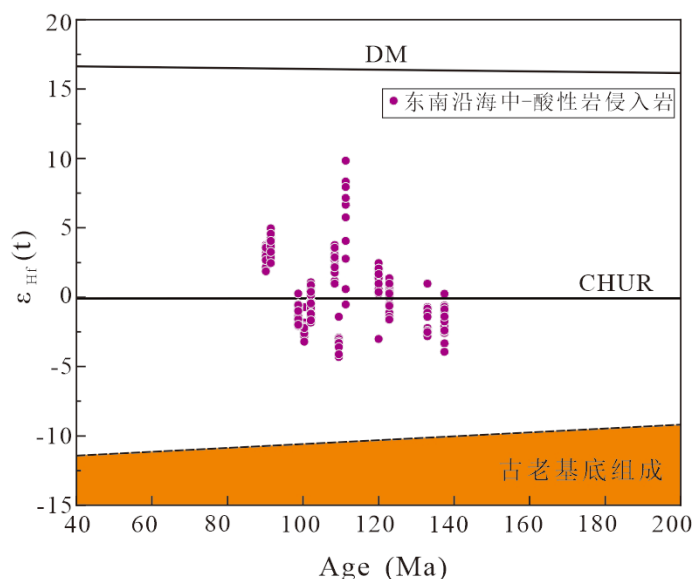


Figure 2. Zircon Hf isotopes and basement composition of Cretaceous intrusive bodies in eastern Guangdong

图 2. 粤东地区白垩纪侵入体锆石 Hf 同位素与基底组成

5. 结论

1) 华南地区地质演化复杂，其花岗质岩石记录了陆壳增生与再造信息。华南东南部中生代岩浆活动以中酸性为主，燕山期达顶峰，具向沿海变年轻趋势，与古太平洋板块俯冲等相关。华南大陆沉积构造演化分三阶段，基性岩脉与地壳拉张、壳幔作用有关。粤东是研究华南晚中生代岩浆作用的理想地，其岩浆活动与板块俯冲后撤相关。

2) 华南晚中生代岩浆活动记录了古太平洋板块俯冲动力学过程。锆石 Hf 同位素显示地幔物质贡献增强。岩浆成分由内陆富铝向滨海富硅碱演化，粤东花岗岩形成机制以幔源基性岩浆底侵诱发壳源熔融混合为主，揭示太平洋构造域主导的壳幔相互作用过程。

参考文献

- [1] 夏炎. 华夏地块幕式岩浆作用与大陆地壳增生和再造[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京大学, 2015.
- [2] 孙涛. 新编华南花岗岩分布图及其说明[J]. 地质通报, 2006, 25(3): 332-335.
- [3] 骆雅琴. 浙江温州北部中酸性岩浆岩的岩石地球化学特征及其成因探讨[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [4] Zhou, X., Sun, T., Shen, W., Shu, L. and Niu, Y. (2006) Petrogenesis of Mesozoic Granitoids and Volcanic Rocks in South China: A Response to Tectonic Evolution. *Episodes*, **29**, 26-33. <https://doi.org/10.18814/epiiugs/2006/v29i1/004>
- [5] Yang, J., Zhao, Z., Hou, Q., Niu, Y., Mo, X., Sheng, D., et al. (2018) Petrogenesis of Cretaceous (133-84 Ma) Intermediate Dykes and Host Granites in Southeastern China: Implications for Lithospheric Extension, Continental Crustal Growth, and Geodynamics of Palaeo-Pacific Subduction. *Lithos*, **296**, 195-211. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.10.022>
- [6] Zhang, Z. and Wang, Y. (2007) Crustal Structure and Contact Relationship Revealed from Deep Seismic Sounding Data in South China. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **165**, 114-126. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2007.08.005>

- [7] 董树文, 张岳桥, 龙长兴, 等. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释[J]. 地质学报, 2007, 81(11): 1449-1461.
- [8] 张兆. 华南白垩纪侵入岩区域岩石学、地球化学特征及地质意义[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2021.
- [9] Charvet, J., Shu, L., Faure, M., Choulet, F., Wang, B., Lu, H., *et al.* (2010) Structural Development of the Lower Paleozoic Belt of South China: Genesis of an Intracontinental Orogen. *Journal of Asian Earth Sciences*, **39**, 309-330. <https://doi.org/10.1016/j.jseacs.2010.03.006>
- [10] Lin, W., Wang, Q. and Chen, K. (2008) Phanerozoic Tectonics of South China Block: New Insights from the Polyphase Deformation in the Yunkai Massif. *Tectonics*, **27**, 68-83. <https://doi.org/10.1029/2007tc002207>
- [11] Wang, Q., Li, J., Jian, P., Zhao, Z., Xiong, X., Bao, Z., *et al.* (2005) Alkaline Syenites in Eastern Cathaysia (South China): Link to Permian-Triassic Transtension. *Earth and Planetary Science Letters*, **230**, 339-354. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.11.023>
- [12] 徐先兵, 张岳桥, 贾东, 等. 华南早中生代大地构造过程[J]. 中国地质, 2009, 26(3): 573-593.
- [13] Zhou, X.M. and Li, W.X. (2000) Origin of Late Mesozoic Igneous Rocks in Southeastern China: Implications for Lithosphere Subduction and Underplating of Mafic Magmas. *Tectonophysics*, **326**, 269-287. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(00\)00120-7](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(00)00120-7)
- [14] 张岳桥, 徐先兵, 贾东, 等. 华南早中生代从印支期碰撞构造体系向燕山期俯冲构造体系转换的形变记录[J]. 地学前缘, 2009, 16(1): 234-247.
- [15] 杨航, 辛宇佳, 李建华, 等. 广东莲花山花岗岩体锆石 U-Pb 年龄, 地球化学特征及地质意义[J]. 地球学报, 2022, 43(2): 211-223+I0002-I0011.
- [16] Griffin, W.L., Wang, X., Jackson, S.E., Pearson, N.J., O'Reilly, S.Y., Xu, X., *et al.* (2002) Zircon Chemistry and Magma Mixing, SE China: *In-Situ* Analysis of Hf Isotopes, Tonglu and Pingtan Igneous Complexes. *Lithos*, **61**, 237-269. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(02\)00082-8](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(02)00082-8)
- [17] Kemp, A.I.S., Hawkesworth, C.J., Paterson, B.A. and Kinny, P.D. (2006) Episodic Growth of the Gondwana Supercontinent from Hafnium and Oxygen Isotopes in Zircon. *Nature*, **439**, 580-583. <https://doi.org/10.1038/nature04505>
- [18] 周振华. 内蒙古黄岗锡铁矿床地质与地球化学[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质科学院, 2011.
- [19] 徐义刚. 用玄武岩组成反演中-新生代华北岩石圈的演化[J]. 地学前缘, 2006, 13(2): 93-104.
- [20] 葛小月, 李献华, 周汉文. 琼南晚白垩世基性岩墙群的年代学、元素地球化学和 Sr-Nd 同位素研究[J]. 地球化学, 2003, 32(1): 11-20.
- [21] 张招崇, 柴凤梅, 谢秋红. 热幔-冷壳背景下的高角度俯冲: 海相火山岩型铁矿的形成[J]. 中国地质, 2016, 43(2): 367-379.
- [22] 张贵山, 彭仁, 温汉捷, 等. 闽西南 E-MORB 型基性岩墙成因: 来自地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Sr-Nd 同位素证据[J]. 地球科学, 2021, 46(12): 4230-4246.
- [23] 秦社彩, 范蔚茗, 郭锋, 等. 浙闽晚中生代辉绿岩脉的岩石成因: 年代学与地球化学制约[J]. 岩石学报, 2010, 26(11): 3295-3306.
- [24] 邢光福, 杨祝良, 毛建仁, 等. 东南大陆边缘早侏罗世火成岩特征及其构造意义[J]. 地质通报, 2002, 21(7): 384-391.
- [25] Zheng, J., O'Reilly, S.Y., Griffin, W.L., Zhang, M., Lu, F. and Liu, G. (2004) Nature and Evolution of Mesozoic-cenozoic Lithospheric Mantle beneath the Cathaysia Block, SE China. *Lithos*, **74**, 41-65. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2003.12.008>
- [26] Shu, L.S., Zhou, X.M., Deng, P., Wang, B., Jiang, S.Y., Yu, J.H., *et al.* (2009) Mesozoic Tectonic Evolution of the Southeast China Block: New Insights from Basin Analysis. *Journal of Asian Earth Sciences*, **34**, 376-391. <https://doi.org/10.1016/j.jseacs.2008.06.004>
- [27] Wang, K., Sun, T., Chen, P., Ling, H. and Xiang, T. (2013) The Geochronological and Geochemical Constraints on the Petrogenesis of the Early Mesozoic A-Type Granite and Diabase in Northwestern Fujian Province. *Lithos*, **179**, 364-381. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.07.016>
- [28] 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报, 2007, 23(6): 1217-1238.
- [29] 王德滋, 周金城. 大火成岩省研究新进展[J]. 高校地质学报, 2005, 11(1): 1-8.
- [30] 吴福元, 刘小驰, 纪伟强, 等. 高分异花岗岩的识别与研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2017, 47(7): 745-765.
- [31] Taylor, F.W. (2012) Planetary Crusts: Their Composition, Origin and Evolution, by Stuart Ross Taylor and Scott M. McLennan. *Contemporary Physics*, **53**, 370-371. <https://doi.org/10.1080/00107514.2012.672469>

- [32] Clemens, J.D. (2012) Granitic Magmatism, from Source to Emplacement: A Personal View. *Applied Earth Science*, **121**, 107-136. <https://doi.org/10.1179/1743275813y.0000000023>
- [33] Huppert, H.E. and Sparks, R.S.J. (1988) The Generation of Granitic Magmas by Intrusion of Basalt into Continental Crust. *Journal of Petrology*, **29**, 599-624. <https://doi.org/10.1093/petrology/29.3.599>
- [34] 郭小飞. 哀牢山构造带白垩纪以来的岩浆与变质作用及其大地构造指示[D]: [博士学位论文]. 广州: 中国科学院, 2017.
- [35] Cashman, K.V., Sparks, R.S.J. and Blundy, J.D. (2017) Vertically Extensive and Unstable Magmatic Systems: A Unified View of Igneous Processes. *Science*, **355**, eaag3055. <https://doi.org/10.1126/science.aag3055>
- [36] 王坤, 董欢, 曹永华, 等. 中基性岩浆的不混溶作用及存在的问题[J]. 地质论评, 2017, 63(3): 739-757.
- [37] 徐夕生, 贺振宇. 花岗岩研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2012, 31(3): 205-209.
- [38] 翟明国, 张旗, 陈国能, 等. 大陆演化与花岗岩研究的变革[J]. 科学通报, 2016, 61(13): 1414-1420.
- [39] 李献华, 李武显, 李正祥. 再论南岭燕山早期花岗岩的成因类型与构造意义[J]. 科学通报, 2007, 52(9): 981-991.
- [40] Kemp, A.I.S., Hawkesworth, C.J., Foster, G.L., et al. (2007) Magmatic and Crustal Differentiation History of Granitic Rocks from Hf-O Isotopes in Zircon. *Science*, **315**, 980-983. <https://doi.org/10.1126/science.1136154>
- [41] Petford, N., Koenders, M.A. and Clemens, J.D. (2020) Igneous Differentiation by Deformation. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **175**, Article No. 45. <https://doi.org/10.1007/s00410-020-1674-3>
- [42] 马昌前, 李艳青. 花岗岩体的累积生长与高结晶度岩浆的分异[J]. 岩石学报, 2017, 33(5): 1479-1488.
- [43] Hibbard, M.J. (1981) The Magma Mixing Origin of Mantled Feldspars. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **76**, 158-170. <https://doi.org/10.1007/BF00371956>
- [44] Laumonier, M., Scaillet, B., Pichavant, M., et al. (2014) On the Conditions of Magma Mixing and Its Bearing on Andesite Production in the Crust. *Nature Communication*, **5**, Article No. 5607. <https://doi.org/10.1038/ncomms6607>
- [45] 舒良树. 华南构造演化的基本特征[J]. 地质通报, 2012, 31(7): 1035-1053.
- [46] 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, 44(12): 2593-2617.
- [47] Li, Z.X. and Li, X.H. (2007) Formation of the 1300-km-Wide Intracontinental Orogen and Postorogenic Magmatic Province in Mesozoic South China: A Flat-Slab Subduction Model. *Geology*, **35**, 179-182. <https://doi.org/10.1130/G23193A.1>
- [48] 周新民. 对华南花岗岩研究的若干思考[J]. 高校地质学报, 2003, 9(4): 556-565.
- [49] 樊燊, 黄琨, 段慧毓, 等. 粤西北连州盆地构造演化对岩溶作用及岩溶塌陷的控制[J]. 地质科技通报, 2024, 43(4): 273-290.
- [50] 贾丽辉. 东南沿海粤东地区晚中生代花岗质岩石成因研究与含矿性评价[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2018.
- [51] 刘磊. 中国东南部晚中生代幕式火山岩浆作用及古太平洋板块俯冲机制[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京大学, 2015.
- [52] Xu, X., Dong, C., Li, W. and Zhou, X. (1999) Late Mesozoic Intrusive Complexes in the Coastal Area of Fujian, SE China: The Significance of the Gabbro-Diorite-Granite Association. *Lithos*, **46**, 299-315. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(98\)00087-5](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(98)00087-5)
- [53] 徐夕生. 华南花岗岩-火山岩成因研究的几个问题[J]. 高校地质学报, 2008, 14(3): 283-294.
- [54] 索艳慧, 李三忠, 曹现志, 等. 中国东部中生代反转构造及其记录的大洋板块俯冲过程[J]. 地学前缘, 2017, 24(4): 249-267.
- [55] 王德滋, 周金城, 邱检生, 等. 中国东南部晚中生代花岗质火山-侵入杂岩特征与成因[J]. 高校地质学报, 2000, 6(4): 487-498.
- [56] 刘光鼎. 中国大陆构造格架的动力学演化[J]. 地学前缘, 2007, 14(3): 39-46.
- [57] 范飞鹏, 肖惠良, 陈乐柱, 等. 粤东莲花山地区多期岩浆锆石年代学、Hf 同位素组成及其成矿作用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50(5): 1462-1490.
- [58] 马一开, 黎刚, 颜文. 基于重矿物地球化学手段的南海东北部陆架沉积物物源研究[J]. 海洋学报, 2020, 42(7): 108-118.
- [59] 徐晓春, 岳书仓. 粤东地区中生代火成岩的时空分布, 岩石特征及成岩物化条件[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 1993, 16(1): 1-12.

- [60] 丁聪, 赵志丹, 杨金豹, 等. 福建石狮白垩纪花岗岩与中基性脉岩的年代学与地球化学[J]. 岩石学报, 2015, 31(5): 1433-1447.
- [61] Zhang, Y., Yang, J.H., Sun, J.F., *et al.* (2015) Petrogenesis of Jurassic Fractionated I-Type Granites in Southeast China: Constraints from Whole-Rock Geochemical and Zircon U-Pb and Hf-O Isotopes. *Journal of Asian Earth Sciences*, **111**, 268-283. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2015.07.009>
- [62] 李晔. 华南东南部早白垩世演化及其地质意义——来自长乐-南澳地区变质和岩浆作用的启示[D]: [博士学位论文]. 武汉: 中国地质大学, 2016.
- [63] 朱雪丽, 杨金豹, 侯青叶, 等. 福州复式岩体的成因: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学及 Hf 同位素约束[J]. 岩石学报, 2021, 37(4): 1235-1254.
- [64] 周伟强. 福建莆田地区晚中生代花岗岩年代学、地球化学及岩石成因[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2016.
- [65] 邱检生, 肖娥, 胡建, 等. 福建北东沿海高分异 I 型花岗岩的成因: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Nd-Hf 同位素制约[J]. 岩石学报, 2008, 24(11): 2468-2484.
- [66] 何珍明, 江媛媛, 刘腾, 等. 华南燕山期花岗岩与钨多金属成矿关系初探[J]. 自然科学, 2015, 3(4): 178-184.
- [67] 张盼盼, 郑瑜林, 郭靖. 华南燕山构造亚阶段花岗岩及其岩浆作用研究新进展[J]. 能源研究与管理, 2018(2): 9-13.
- [68] 赵风清, 金文山, 甘晓春, 等. 华夏地块前加里东期变质基底的特征以及深部地壳性质[J]. 地球学报: 中国地质科学院院报, 1995, 16(3): 235-245.
- [69] 马振东, 陈颖军. 华南扬子与华夏陆块古-中元古代基底地壳微量元素地球化学示踪探讨[J]. 地球化学, 2000, 29(6): 525-531.
- [70] Charvet, J., Cluzel, D., Faure, M., *et al.* (1999) Some Tectonic Aspects of the Pre-Jurassic Accretionary Evolution of East Asia. *Gondwana Dispersion and Asian Accretion, IGCP 321 Final Results Volume*, Balkela, 37-65.
- [71] Faure, M., Shu, L., Wang, B., Charvet, J., Choulet, F. and Monie, P. (2009) Intracontinental Subduction: A Possible Mechanism for the Early Palaeozoic Orogen of SE China. *Terra Nova*, **21**, 360-368. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2009.00888.x>
- [72] Castro, A., la Rosa, J.D.D., Fernández, C. and Moreno-Ventas, I. (1995) Unstable Flow, Magma Mixing and Magma-Rock Deformation in a Deep-Seated Conduit: The Gil-Márquez Complex, South-West Spain. *Geologische Rundschau*, **84**, 359-374. <https://doi.org/10.1007/s005310050011>
- [73] Li, Z., Qiu, J.S. and Xu, X.S. (2012) Geochronological, Geochemical and Sr-Nd-Hf Isotopic Constraints on Petrogenesis of Late Mesozoic Gabbro-Granite Complexes on the Southeast Coast of Fujian, South China: Insights into a Depleted Mantle Source Region and Crust-Mantle Interactions. *Geological Magazine*, **149**, 459-482. <https://doi.org/10.1017/S0016756811000793>
- [74] Zhou, D., Sun, P., Jiang, S., Liu, X. and Wang, Q. (2023) Geochronology and Geochemistry of Early Cretaceous High-Silica Granites in the Nan'ao Island, South China: Petrogenesis and Implications for Lithospheric Extension. *Journal of Asian Earth Sciences*, **245**, Article 105558. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2023.105558>