https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.247



珠江口盆地中生代陆缘岩浆弧地质特征及构造背景

高阳东,张向涛,张丽丽,吴 哲,劳妙姬,李洪博,吴婷婷

中海石油(中国)有限公司深圳分公司,广东深圳 518054

摘 要:明确珠江口盆地中生代陆缘岩浆弧特征及构造演化过程对于古潜山勘探至关重要.综合构造学、岩石学、 年代学、地球化学与地球物理学现有成果,认为珠江口盆地基底主要为燕山期岩浆杂岩,以中酸性侵入岩为主,中 生代岩浆活动以105~165 Ma最为强烈,发育了 NE-NEE 走向和 NW-NWW 走向两组中生代断裂.区域构造研究表 明中生代期间,珠江口盆地处于古太平洋板片俯冲作用控制的陆缘岩浆弧构造环境,岩浆岩具有流体活动元素富 集、Ta-Nb-Ti亏损的特征,形成复合火山岩-侵入岩"双层"岩性组合.重建了珠江口盆地中生代陆缘岩浆弧5个阶 段的形成演化过程,揭示了珠江口盆地古潜山的成山背景.

关键词:珠江口盆地;中生代;古潜山;岩浆活动;陆缘岩浆弧;构造演化;构造地质学.
中图分类号: P54 文章编号: 1000-2383(2022)07-2317-11 收稿日期:2021-09-25

Geological Characteristics and Tectonic Settings of Mesozoic Continental Margin Magmatic Arc in Pearl River Mouth Basin

Gao Yangdong, Zhang Xiangtao, Zhang Lili, Wu Zhe, Lao Miaoji, Li Hongbo, Wu Tingting Shenzhen Branch of China National Offshore Oil Corporation Limited, Shenzhen 518054, China

Abstract: The characteristics and tectonic evolution of Mesozoic continental margin magmatic arc are crucial to the buried hill exploration and research in Pearl River Mouth Basin. By integrating studies of structural geology, petrology, geochronology, geochemistry and geophysics, it is confirmed that the basement is mainly Yanshan period complex, the lithology is mostly intermediate-acidic igneous and the most intense magmatic event is between 105–165 Ma. Regional tectonic studies suggest that during Mesozoic period, Pearl River Mouth Basin was in the margin magmatic arc environment caused by the subducted paleo-Pacific Ocean Plate. The magmatic rocks are enriched with fluid-indication elements and depleted in Ta-Nb-Ti. "Double layers" of composite volcanic rocks and deep igneous rocks developed. This study has reconstructed five episodes of formation and tectonic evolution of Mesozoic continental margin volcanic arc in Pearl River Mouth Basin, and revealed the orogenic foundation of buried hills in Pearl River Mouth Basin.

Key words: Pearl River Mouth Basin; Mesozoic; buried hill; magmatic activity; continental margin magmatic arc; tectonic evolution; structural geology.

基金项目:中海石油(中国)有限公司重大生产科研项目(No. SCKY-2020-SZ-21).

作者简介:高阳东(1975-),男,教授级高工,长期从事中国海域油气勘探与开发方面的研究.ORCID:0000-0001-8776-1897. E-mail: gaoyd@cnooc.com.cn

引用格式:高阳东,张向涛,张丽丽,吴哲,劳妙姬,李洪博,吴婷婷,2022.珠江口盆地中生代陆缘岩浆弧地质特征及构造背景.地球科学,47 (7):2317-2327.

Citation: Gao Yangdong, Zhang Xiangtao, Zhang Lili, Wu Zhe, Lao Miaoji, Li Hongbo, Wu Tingting, 2022. Geological Characteristics and Tectonic Settings of Mesozoic Continental Margin Magmatic Arc in Pearl River Mouth Basin. *Earth Science*, 47(7):2317–2327.

0 引言

随着珠江口盆地古潜山油气勘探取得历史性 突破(田立新等,2020a,2020b),珠江口盆地中生代 区域构造背景及地质特征研究受到广泛重视.晚中 生代是古太平洋板块汇聚东亚大陆的重要时期 (Engebretson et al., 1985; Isozaki et al., 2010; 李 三忠等,2018;栾锡武等,2021; Xing et al., 2021), 岩浆活动是华南(包括南海北部大陆边缘)中生代 最显著的地质事件,岩浆岩出露约2.4×10⁵ km²,面 积约占 39% (Zhou and Li, 2000; Li and Li, 2007; Zhu et al., 2021). 珠江口盆地与已发现高产基岩 (火成岩)油气藏的越南南部陆架盆地(白虎油田) 有着相似的大地构造背景与形成演化史、相同的烃 源岩系(李平鲁等,1998,1999),因此,珠江口盆地 基底形成的区域背景及构造演化研究,是认识南海 中生界弧-盆结构、盆地原型的关键步骤和评价本 区古潜山油气勘探潜力的重要环节.前人对华南中 生代岩浆岩活动做过大量研究,形成了多种构造模 式,包括平板俯冲模式(Li and Li, 2007; Li et al., 2012)、板片拆沉模式(Wang et al., 2003)、俯冲角度 增大模式(Zhou and Li, 2000)、多期伸展-挤压模式 (Jiang et al., 2015; Chu et al., 2019)、沟-弧-盆体 系(Xu et al., 2016, 2017; Cui et al., 2021)等.但 是,由于海域基底样品数据较少,前人的研究往往 集中在华南陆上,导致珠江口盆地基底构造、成山 过程及岩浆活动的研究不够深入,阻碍了对本地 区古潜山勘探潜力的评价.已有的勘探实践表 明,珠江口盆地古潜山地质构造及其演化非常 复杂,惠州26-6呈现出岩性多样、岩浆活动多 期、构造属性复杂等难题(田立新等,2020a);亟 需通过研究潜山基础地质,尤其是研究古潜山 的成岩、成山过程及构造演化特征来解决.

本文在大量基底岩石样品测试分析的基础 上,应用构造学、岩石学、年代学、地球化学与 地球物理学现有成果和数据,对珠江口盆地基 底开展岩浆活动、先存构造、区域构造背景及 演化特征等方面的综合研究.在明确岩浆活动 期次、范围和特征的基础上,分析了中生代断 裂类型、分布及成因机制,落实了珠江口盆地 古潜山形成的区域构造背景及构造演化过程, 有助于认识珠江口盆地古潜山的成山过程,并 为评价古潜山的勘探潜力提供重要基础.

1 地质背景

珠江口盆地位于南海北部海南岛和台湾岛之 间的陆架和陆坡部位,呈NE-NEE向展布,面积达 $2.6 \times 10^5 \, \text{km}^2$,自北向南盆地呈"三隆三坳"特征(施 和生等,2017).珠江口盆地及邻区中生代位于西太 平洋与特提斯两大构造域交接部位,新生代以来又 经历多期构造运动改造,具有复杂而独特的地质演 化过程(李平鲁等,1999;钟广见等,2011;易海等, 2012; 张成晨等, 2019). 前人研究指出南海陆缘广 泛残留晚中生界(钟广见等, 2011; Xu et al., 2013),属于弧前盆地沉积,具有良好的油气勘探 前景.并且珠江口盆地侏罗纪-白垩纪的岩浆弧花 岗岩记录(Xu et al., 2016, 2017),明显不同于华南 同时代高分异 I 型或 A 型花岗岩,与 Palawan 俯冲 杂岩(Wakita, 2000)、华南板内岩浆岩(李献华等, 2007)一道构成了东亚晚中生代(165~100 Ma)大 陆边缘的"沟-弧-弧后伸展"模式(图1).

2 陆缘岩浆弧地质特征

2.1 岩性特征

珠江口盆地约有150口井钻遇基底,分布在盆 地各个构造单元,基底岩性种类多样,涵盖岩浆岩、 变质岩和沉积岩三大岩类(图2),岩性主要由花岗 岩、花岗闪长岩和二长花岗岩等中酸性侵入岩组成 (图3),含少量火山岩、火山碎屑岩和变质岩.录井、 岩石鉴定和硅碱组分分析结果显示,侵入岩类包括 酸性侵入岩、中性侵入岩、基性侵入岩和碱性侵入 岩(图3);火山岩包括酸性火山岩、中性火山岩、基 性火山岩、碱性火山岩;沉积岩包括砾岩、砂岩、泥 岩、石灰岩和硅质岩;变质岩包括变质砾岩、变质砂 岩、片岩、片麻岩、动力变质岩.比如B13b井基底为 块状构造的花岗岩,主要矿物有钾长石(43.5%)和 多晶石英(29%),次要矿物为黑云母(4%),样品发 生了较为明显的后期次生变化,溶蚀作用强烈(图 2);H25g井基底为深灰色中细粒的花岗闪长岩,主 要矿物有石英(20%)、斜长石(50%)、正长石 (10%)(图2);H32a井基底为灰色中细粒的二长花 岗岩,主要矿物有石英(40%)、斜长石(25%)(图2).

2.2 岩浆年代特征

受限于珠江口盆地钻遇基底的钻井数量以及 技术手段,前人采用K-Ar和Rb-Sr法测得珠江口盆 地基底火成岩的同位素年龄为70.5~153 Ma(李平



图 1 珠江口盆地前新生代基底岩性单元分布 Fig.1 Lithology of pre-cenozoic basement in Pearl River Mouth Basin







Fig.3 Alkali-silica diagram and QAP diagram of pre-Tertiary igneous rocks of Pearl River Mouth Basin





鲁等,1999;陈长民等,2003).本次研究采用封闭 温度较高的锆石 U-Pb 法进行测年, 在同济大学海 洋地质国家重点实验室(MGLAB)LA-ICP-MS分 析室完成,经过样品粉碎、淘洗、重液分离、电磁仪 分选,锆石制靶、抛光、阴极发光拍照(CL)、点位选 取,数据分析等步骤获得锆石年龄数据.比如E18a 样品采自恩平凹陷井深3449m处,岩性为浅灰肉 红色中粗粒角闪石花岗岩,具有24个分析结果较 好的锆石年龄数据,²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄在134.8~ 155.6 Ma之间,获得了150.7±1.7 Ma (MSWD= 2.8, n=11) 和 141.6±1.4 Ma (MSWD=4.6, n= 13)两组年龄,代表晚侏罗世和早白垩世2期岩浆 活动的记录(图4).H35a采自珠江口盆地中央隆起 带井深2217m处,岩性为深灰色细粒石英闪长 岩,26个样品点落在谐和线上或附近形成了一组 年龄,其²⁰⁶Pb/²³⁸U加权平均年龄为126.2±1.1 Ma (MSWD=1.7, n=26) (图 4).

笔者共测得45个火成岩年龄,年龄范围介于 97~197 Ma,均属侏罗纪-早白垩世,处于燕山时期 (图5).数据统计结果反映出5期岩浆活动,包括 95~105 Ma、105~120 Ma、120~140 Ma、140~ 165 Ma和165~200 Ma(图5),其中105~165 Ma最 为强烈,具有期次多、强度大的特点.平面上,早期 (165~200 Ma)岩浆活动零星分布,后期(105~ 165 Ma)岩浆活动范围广泛;并且大致以惠州凹陷西 部低凸起为界,珠一坳陷东侧基底年龄新,普遍小于 120 Ma,西侧年龄偏老,普遍大于120 Ma.

2.3 地球化学特征

珠江口盆地基底样品的主量元素分析结果显示,SiO₂含量为52.04%~76.76%,碱(K₂O+Na₂O) 含量为2.13%~9.15%,铝饱和指数A/CNK值为 0.84~1.20,整体上属准铝质-弱过铝.珠江口盆地 基底花岗岩类具有从钾玄武岩系列向钙碱性系列 过渡的特点(图6a),相比于陆区集中的钾玄武岩和



Fig.5 Magma age and activity episodes of Mesozoic basement in Pearl River Mouth Basin



图 6 珠江口盆地基底花岗岩样品 K₂O-SiO₂图解(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)

Fig.6 K₂O-SiO₂ diagram (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagram (b) of basement granite in Pearl River Mouth Basin

高钾钙碱性,海区有逐渐向钙碱性过渡的趋势.

基底岩体在微量元素组成上富 Rb、Ba、K,亏损 Nb、Ta、Ti(图 6b);稀土元素总量为 66.33×10⁻⁶~ 441.24×10⁻⁶,均值 195.11×10⁻⁶,富含轻稀土,亏损 重稀土,(La/Yb)_N比值为4.08~13.78,分配图呈"右 倾"型.Eu负异常轻微-明显,为0.22~0.90.

前人对华南中生代岩浆活动开展过大量研究 (Li and Li, 2007; Li et al., 2012;李建华, 2013; Chu et al., 2019;李剑锋等, 2020),指出受古太平洋 俯冲作用的影响,从华南内陆向沿海岩浆岩年龄有 逐渐变年轻的趋势.165~100 Ma岩浆活动期无论在 陆区还是在南海及其北部均普遍发育,在形成时代 上具有很好的可比性,但是海、陆两区在岩石化学特 征和形成构造环境上存在明显差异.165~100 Ma 海区花岗岩类的全碱指数(ALK)为4.03~9.03,里特 曼组合指数(δ)为0.61~3.61(L15a=0.04),铝饱和

指数 ASI 为 0.74~1.23 (K9a=0.44), ∑ REE 为 $47.0 \times 10^{-6} \sim 193.6 \times 10^{-6}$ (P21a=293×10^{-6}), δEu 为0.48~1.09 (H25b=0.13). 海区花岗岩主体属于 镁质花岗岩,稀土总量较低,负铕异常并不明显, 壳幔作用较陆区强烈.珠江口盆地北部坳陷带样 品表现为以钾玄岩系列、碱性-碱钙性和晚造山环 境为主,中央隆起带样品表现为以高钾钙碱性和 钙碱性系列、钙碱性-钙性和板块碰撞前环境为 主.同期陆区花岗岩类的全碱指数(ALK)为 4.74~9.66, 里特曼组合指数(δ)为1.44~3.54, 铝 饱和指数ASI为0.78~1.22,∑REE为51.7× $10^{-6} \sim 625.6 \times 10^{-6}$, δEu 为 0.04~0.71, 成 分上 主 要属于准铝质与过铝质过渡区和高钾钙碱性至 钾玄岩过渡系列,稀土总量变化大,负铕异常 中等到显著;大部分具有A型花岗岩特征,属 于板内与同碰撞花岗岩过渡环境.



图 7 珠江口盆地两组中生代断裂发育期次及形成机制 Fig. 7 The development phase and formation mechanism of the pre-existing faults in Pearl River Mouth Basin

2.4 中生代断裂特征

利用钻井约束的高精度三维地震反射资料对 珠江口盆地重点区域的基底属性和先存构造进行 解释.在珠江口盆地珠一坳陷地区识别出NW-NWW 走向和 NE-NEE 走向两组中生代断裂(Ye et al., 2018). 中生代断裂在不同凹陷的表现有所差 别,恩平凹陷以NE-NEE向中生代断裂为主,惠州 凹陷以NW-NWW向中生代断裂为主,陆丰凹陷 NE-NEE 向和 NW-NWW 向两组断裂发育相当;而 深水区白云凹陷由于后期地壳拉伸减薄强烈,岩浆 改造作用强烈,使得中生代断裂较难识别.目前的 较大争议在于断裂的形成时间与成因机制,主要有 两种观点:(1)基于花岗岩侵位时间和断层交切关 系,认为中生代断裂主要在晚白垩世时期形成, NW-NWW 向逆冲断裂体系与古太平洋板片俯冲方 向转变引起的左行压扭应力场有关,是NE向断裂 (R断裂)的共轭反向断裂(R'断裂),NEE向伸展/ 逆冲断裂体系与古南海的扩张、俯冲有关(Ye et al., 2018);(2)受古太平洋 NNW 向俯冲的影响,珠 江口盆地处于 NE 向左行压扭和派生的 NW-SE 向 压应力场作用之下,引发了大规模的岩浆活动,同 时沿NE向剪切面形成左行压扭,沿NW向剪切面 形成左行张扭断裂(陈汉宗等,2005).本次研究基 于基底岩石学、年代学的重新认识,结合区域研究 背景,认为NW深大断裂在印支期已经形成,比如 本区的阳江---统深大断裂、北卫滩深大断裂等,形 成薄弱带,容易诱发后期岩浆侵位和构造再活化; NW-NWW向断裂系在晚白垩世构造转换期密集发

育,与古太平洋俯冲方向转变形成的左行压扭应力 场有关,在喜山运动晚期活化;NE-NEE向断裂受 控于古太平洋板片北西向俯冲作用,燕山运动期持 续发育,并在喜山运动早期率先活化(图7).

3 陆缘岩浆弧形成的区域构造背景 及形成演化过程

3.1 区域构造背景

珠江口盆地基底不同时期的中生代花岗岩类 (Y+Nb)-Rb构造环境判别图指示绝大多数样品都 落在火山弧的判识范围内(图8),还有少量几个数 据(140~165 Ma)落在板内环境,说明珠江口盆地 中生代的陆缘岩浆弧范围并非固定不变.从主量元 素地球化学特征看,H26f井样品主要落于(高钾) 钙-碱性岩,明显区别于L35a井落在拉斑玄武岩与 钙碱性岩过渡区,表明H26f井更远离海沟的火山 弧位置,L35a 井位于靠近海沟的弧前盆地位置 (图 6a). 从微量元素比值看,珠江口盆地基底样 品呈现出明显的Ti、Nb、Ta亏损(图6b),这是火 山弧构造环境的重要标志之一,与华南花岗岩Rb 强烈正异常的现象相区别.珠江口盆地基底样品 A/CNK 值为 0.84~1.20, 属准铝质-弱过铝, 其 P_2O_5 随 SiO₂含量增加而降低,排除了 S 型花岗质 岩的可能性(李献华等,2007),显示出I型花岗质 岩的特征.华南A型花岗岩主要形成于伸展构造 环境(贾小辉等,2009),富集 Rb、Nb、Ta 而贫 Ba, Eu强烈负异常的特征与海上花岗岩类明显不同.

同碰撞花岗岩

南海





图8 珠江口盆地基底花岗岩类(Y+Nb)-Rb构造环境判别 Fig. 8 (Y+Nb)-Rb tectonic setting discrimination by basement granite of Pearl River Mouth Basin

方框代表南海北部样品,圆圈为华南样品;数据引自张成晨等 (2019)、Xu et al. (2016, 2017)、耿红燕等(2006)、徐夕生等(2007)、 邱检生等(2004)、于津海等(2005)和周新民(2007)

综合区域构造背景(Li and Li, 2007; Li et al., 2012; Xu et al., 2016, 2017; Ye et al., 2018; Cui et al., 2021)以及基岩地球化学特征,包括主 量元素、微量元素、稀土元素等,明确了珠江口盆 地主体在中生代处于古太平洋板片俯冲作用控制 的安第斯活动大陆边缘的陆缘岩浆弧背景,其特 征可类比现今南美的安第斯岩浆弧(Busby and Ingersoll, 2011). 珠江口盆地中生代明显不同于华 南同时代高分异 I型或 A型花岗岩,具有流体活 动元素富集、Ta-Nb-Ti亏损的陆缘岩浆弧特征; 其中潮汕凹陷位于弧前盆地,珠江口盆地主体位 于岩浆弧,华南则主要为弧后伸展环境(图9).

陆缘岩浆弧是位于大陆地块的边缘山系,拥 有较厚的大陆地壳(30~70 km),既有深部的地幔 成分,也有浅部的地壳部分,复合火山岩-深成侵 入岩组合是陆缘岩浆弧最重要的标志之一.多期 岩浆活动在空间上相互交织,火山岩多由安山岩、 英安质岩石组成,侵入岩以岩基、岩株为主,伴生 的深成岩体多为花岗岩岩基,还有少量辉长岩和 闪长岩质岩体.基于基底岩性证据、综合地球物 理证据以及热史证据,分析认为珠江口盆地陆缘 岩浆弧阶段经历过强烈的剥蚀作用,剥蚀厚度估 计大于4 km (Benjamin et al., 2011), 剥蚀程度较 深,导致深成岩与变质岩出露地表,珠江口盆地 关键井揭示了陆缘岩浆弧不同构造位置成岩组合 特征,比如L35a井揭示了弧前盆地构造位置的中 生代沉积岩-火山岩-花岗岩岩性组合特征: H26f 井揭示了中生代陆缘弧主弧位置发育复合 火山岩-深成侵入岩双层组合特征;而L6a井石 英片岩和H26f井变质中基性喷出岩揭示了陆缘 岩浆弧伴随有构造动力和热接触变质作用.

3.2 陆缘岩浆弧形成演化过程

前人对珠江口盆地古潜山陆缘岩浆弧背景有 所提及(周蒂等,2005; Shi and Li, 2012; Xu et al., 2016, 2017; Cui et al., 2021), 但针对陆缘岩浆弧 的岩性组合和演化过程缺乏详细的论述.本次研究 明确了珠江口盆地古潜山的成山背景受控于南海 北部晚古生代到新生代早期的构造过程,受特提 斯、西太平洋两大构造域相继作用,经历印支运动 和燕山运动两期重大构造事件,经过残留洋盆、有 限造山、造山高峰、区域剥蚀、晚期裂陷5个构造演







Fig.10 Regional tectonic setting of the formation of buried hills in Pearl River Mouth Basin

化阶段(图10),奠定了陆缘岩浆弧古潜山成山背 景:(1)二叠纪-三叠纪印支时期,受控于西部印支 地块和华南地块碰撞增生造山作用,珠江口盆地处 于残余海或陆表海沉积环境,发育一系列NW向大 型断裂系(图10a);(2)早-中侏罗世燕山初期,古特 提斯域影响逐渐过渡为古太平洋域控制,受有限俯 冲作用控制,初始岩浆弧局限展布,该时期古太平 洋板片平板俯冲作用在华南地区发生大规模岩浆 活动(图10b、10c);(3)晚侏罗-早白垩世燕山主期, 受古太平洋板片正向俯冲作用控制,形成大规模的 陆缘岩浆弧,珠一坳陷主体位于陆缘岩浆弧背景, 经历多期岩浆活动影响,发育与俯冲带平行的NE-NEE向断裂系(图10d);(4)晚白垩世燕山晚期,由 于古太平洋板片俯冲后撤引起板缘挠曲回弹,并 伴随局部陆-陆碰撞,引起区域性挤压隆升-剥 蚀,板片俯冲方向的转变导致晚白垩世NWW向 断裂密集发育(图 10e);(5)新生代以来(图 10f), 经历古南海-新南海旋回,发生区域性裂陷作用, 并伴随局部火山活动,潜山掩埋定型.

4 结论

(1)珠江口盆地基底岩性涵盖岩浆岩、变质岩和沉积岩三大类,以花岗岩、花岗闪长岩和二长花岗岩等中酸性侵入岩为主.测年数据

反映其经历了5期岩浆活动,以105~165 Ma最为强烈,与陆上有较好对应关系.

(2) 珠江口盆地发育 NE-NEE 走向和 NW-NWW 走向两组中生代断裂,分析认为其分别受控 于燕山期古太平洋板片的持续俯冲作用和燕山晚 期俯冲方向转变引起的左行压扭应力场.

(3)地球化学证据指示珠江口盆地主体中生代 处于古太平洋板片俯冲作用控制的陆缘岩浆弧构 造背景,明显不同于华南同时代高分异I型或A型 花岗岩,具有流体活动元素富集、Ta-Nb-Ti亏损的 陆缘岩浆弧特征,进一步明确了陆缘岩浆弧的复合 火山岩-深成侵入岩"双层"岩性组合.

(4)重建了珠江口盆地陆缘岩浆弧形成演化 过程,其经历了印支期残留洋盆、燕山初期初始有 限岩浆弧、燕山主期大规模陆缘岩浆弧、燕山晚期 区域隆升-挤压剥蚀、喜山期古南海-新南海旋回 5个阶段,奠定了古潜山成山背景.

References

Benjamin, C., Burgess, P. M., Robert, H., et al., 2011. Subsidence and Uplift by Slab-Related Mantle Dynamics: A Driving Mechanism for the Late Cretaceous and Cenozoic Evolution of Continental SE Asia? Geological Society, London, Special Publications, 355(1): 37-51. https://doi.org/10.1144/sp355.3

- Busby, C.J., Ingersoll, R.V., 2011. Tectonics of Sedimentary Basins. Blackwell Science, Cambridge.
- Chen, C. M., Shi, H. S., Xu, S. C., et al., 2003. Formation Conditions of Tertiary Hydrocarbon Accumulation in the Eastern Pearl River Mouth Basin. Science Press, Beijing, 1-30 (in Chinese).
- Chen, H.Z., Wu, X.J., Zhou, D., et al., 2005. Meso-Cenozoic Faults in Zhujiang River Mouth Basin and Their Geodynamic Background. *Journal of Tropical Oceanography*, 24(2): 52-61 (in Chinese with English abstract).
- Chu, Y., Lin, W., Faure, M., et al., 2019. Cretaceous Episodic Extension in the South China Block, East Asia: Evidence from the Yuechengling Massif of Central South China. *Tectonics*, 38(10): 3675-3702. https:// doi.org/10.1029/2019TC005516
- Cui, Y. C., Shao, L., Li, Z. X., et al., 2021. A Mesozoic Andean - Type Active Continental Margin along Coastal South China: New Geological Records from the Basement of the Northern South China Sea. *Gondwana Research*, 99: 36-52. https://doi.org/10.1016/j.gr.2021.06.021
- Engebretson, D. C., Cox, A., Gordon, R. G., 1985. Relative Motions between Oceanic and Continental Plates in the Pacific Basin. *Geological Society of America Special Papers*, 206: 1-60. https://doi.org/10.1130/spe206-p1
- Geng, H.Y., Xu, X.S., O'Reilly, S.Y., et al., 2006. Cretaceous Volcanic-Intrusive Magmatism in Western Guangdong and Its Geological Significance. *Scientia Sinica Terrae*, 36(7): 601-617 (in Chinese).
- Isozaki, Y., Aoki, K., Nakama, T., et al., 2010. New Insight into a Subduction-Related Orogen: A Reappraisal of the Geotectonic Framework and Evolution of the Japanese Islands. *Gondwana Research*, 18(1): 82–105. https://doi.org/10.1016/j.gr.2010.02.015
- Jia, X.H., Wang, Q., Tang, G.J., 2009. A-Type Granites: Research Progress and Implications. *Geotectonica et Metallogenia*, 33(3): 465-480 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, Y. H., Wang, G. C., Liu, Z., et al., 2015. Repeated Slab Advance-Retreat of the Palaeo-Pacific Plate underneath SE China. *International Geology Review*, 57(4): 472-491. https://doi.org/10.1080/00206814.2015.1017775
- Li, J.F., Fu, J.M., Ma, C.Q., et al., 2020. Petrogenesis and Tectonic Setting of the Shaziling Pluton in Jiuyishan Area, Nanling: Evidence from Zircon U-Pb Geochronology, Petrogeochemistry, and Sr - Nd - Hf Isotopes. *Earth Science*, 45(2): 374-388 (in Chinese with English abstract).

- Li, J. H., 2013. The Mesozoic Tectonic Evolution of South China—New Structural and Geochronological Constraints from the Dabashan, Yuanma Basin and Hengshan (Dissertation). Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Li, P. L., Liang, H. X., Dai, Y. D., 1998. Exploration Perspective of Basement Hydrocarbon Accumulations in the Pearl River Mouth Basin. *China Offshore Oil* and Gas (Geology), 12(6):361-369 (in Chinese with English abstract).
- Li, P.L., Liang, H.X., Dai, Y.D., et al., 1999. Origin and Tectonic Setting of the Yanshanian Igeneous Rocks in the Pearl River Mouth Basin. *Guangdong Geology*, 14 (1):1-8 (in Chinese with English abstract).
- Li, S.Z., Suo, Y.H., Li, X.Y., et al., 2018. Mesozoic Plate Subduction in West Pacific and Tectono-Magmatic Response in the East Asian Ocean-Continent Connection Zone. *Chinese Science Bulletin*, 63(16): 1550– 1593 (in Chinese).
- Li, X.H., Li, W.X., Li, Z.X., 2007. On the Genetic Classification and Tectonic Implications of the Early Yanshanian Granitoids in the Nanling Range, South China. *Chinese Science Bulletin*, 52(9): 981–991(in Chinese)
- Li, Z.X., Li, X.H., 2007. Formation of the 1 300-km-Wide Intracontinental Orogen and Postorogenic Magmatic Province in Mesozoic South China: A Flat-Slab Subduction Model. *Geology*, 35(2): 179-182. https://doi.org/ 10.1130/G23193A.1
- Li, Z. X., Li, X. H., Chung, S. L., et al., 2012. Magmatic Switch-on and Switch-off along the South China Continental Margin since the Permian: Transition from an Andean-Type to a Western Pacific-Type Plate Boundary. *Tectonophysics*, 532-535: 271-290. https://doi. org/10.1016/j.tecto.2012.02.011
- Luan, X.W., Wang, J., Liu, H., et al., 2021. A Discussion on Tethys in Northern Margin of South China Sea. *Earth Science*, 46(3): 866-884 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, J.S., Hu, J., McInnes, B. I. A., et al., 2004. Geochronology, Geochemistry and Petrogenesis of the Loogwo Granodioritic Pluton in Guangdong Province. *Acta Petrologica Sinica*, 20(6): 62-73 (in Chinese with English abstract).
- Shi, H. S., Li, C. F., 2012. Mesozoic and Early Cenozoic Tectonic Convergence - to - Rifting Transition Prior to Opening of the South China Sea. *International Geology Review*, 54(15): 1801–1828. https://doi.org/10.1080/ 00206814.2012.677136

- Shi, H.S., Shu, Y., Du, J. Y., et al., 2017. Petroleum Geology of Paleogene in Pearl River Mouth Basin. Geology Press, Beijing (in Chinese).
- Tian, L.X., Liu, J., Zhang, X.T., et al., 2020a. Discovery and Accumulation Pattern of HZ26-6 Large-Medium Sized Pan-Buried Hill Oil and Gas Field in Pearl River Mouth Basin. *China Offshore Oil and Gas*, 32(4): 1– 11 (in Chinese with English abstract).
- Tian, L.X., Shi, H.S., Liu, J., et al., 2020b. Great Discovery and Significance of New Frontier Exploration in Huizhou Sag, Pearl River Mouth Basin. *China Petroleum Exploration*, 25(4): 22-30 (in Chinese with English abstract).
- Wakita, K., 2000. Cretaceous Accretionary-Collision Complexes in Central Indonesia. Journal of Asian Earth Sciences, 18(6): 739-749. https://doi.org/10.1016/S1367-9120(00)00020-1
- Wang, Y.J., Fan, W.M., Guo, F., 2003. Geochemistry of Early Mesozoic Potassium - Rich Diorites - Granodiorites in Southeastern Hunan Province, South China: Petrogenesis and Tectonic Implications. *Geochemical Jour*nal, 37: 427-448.
- Xing, G. F., Li, J. Q., Duan, Z., et al., 2021. Mesozoic-Cenozoic Volcanic Cycle and Volcanic Reservoirs in East China. *Journal of Earth Science*, 32(4): 742-765. https://doi.org/10.1007/s12583-021-1476-1
- Xu, C. H., Shi, H. S., Barnes, C. G., et al., 2016. Tracing a Late Mesozoic Magmatic Arc along the Southeast Asian Margin from the Granitoids Drilled from the Northern South China Sea. *International Geology Re*view, 58(1): 71-94. https://doi. org/10.1080/ 00206814.2015.1056256
- Xu, C. H., Zhang, L., Shi, H. S., et al., 2017. Tracing an Early Jurassic Magmatic Arc from South to East China Seas. *Tectonics*, 36(3): 466-492. https://doi.org/ 10.1002/2016TC004446
- Xu, G. Q., Wu, S. H., Zhang, L., et al., 2013. Stratigraphic Division and Depositional Processes for the Mesozoic Basin in Northern South China Sea. *Marine Geophysical Research*, 34(3-4): 175-194. https://doi. org/ 10.1007/S11001-013-9201-9
- Xu, X.S., Lu, W.M., He, Z.Y., 2007. Age and Generation of Fogang Granite Batholith and Wushi Diorite -Hornblende Gabbro Body. *Scientia Sinica Terrae*, 37 (1): 27-38 (in Chinese).
- Ye, Q., Mei, L. F., Shi, H. S., et al., 2018. The Late Cretaceous Tectonic Evolution of the South China Sea Area: An Overview, and New Perspectives from 3D Seis-

mic Reflection Data. *Earth-Science Reviews*, 187: 186-204. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.09.013

- Yi, H., Zhang, L., Lin, Z., 2012. Mesozoic Tectonic Framework and Basin Distribution Characteristics of Northern Margin of South China Sea. *Petroleum Geol*ogy & *Experiment*, 34(4): 388-394 (in Chinese with English abstract).
- Yu, J.H., Zhou, X.M., Zhao, L., et al., 2005. Mantle-Crust Interaction Generating the Wuping Granites: Evidenced from Sr-Nd-Hf-U-Pb Isotopes. Acta Petrologica Sinica, 21(3): 651-664 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, C.C., Xu, C.H., He, M., et al., 2019. Late Mesozoic Convergent Continental Margin with Magmatic Arc from East to South China Seas: A Review. Advances in Earth Science, 34(9): 950-961 (in Chinese with English abstract).
- Zhong, G.J., Wu, S.M., Feng, C.M., 2011. Sedimentary Model of Mesozoic in the Northern South China Sea. *Journal of Tropical Oceanography*, 30(1): 43-48 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, D., Sun, Z., Chen, H.Z., et al., 2005. Mesozoic Lithofacies, Paleo-Geography, and Tectonic Evolution of the South China Sea and Surrounding Areas. *Earth Science Frontiers*, 12(3): 204-218 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X. M., 2007. Petrogenesis of Late Mesozoic Granite and Dynamic Evolution of Lithosphere in Nanling Region. Science Press, Beijing, 403-649 (in Chinese).
- Zhou, X. M., Li, W. X., 2000. Origin of Late Mesozoic Igneous Rocks in Southeastern China: Implications for Lithosphere Subduction and Underplating of Mafic Magmas. *Tectonophysics*, 326(3-4): 269-287. https://doi. org/10.1016/S0040-1951(00)00120-7
- Zhu, W. L., Cui, Y. C., Shao, L., et al., 2021. Reinterpretation of the Northern South China Sea Pre -Cenozoic Basement and Geodynamic Implications of the South China Continent: Constraints from Combined Geological and Geophysical Records. Acta Oceanologica Sinica, 40(2): 13-28. https://doi.org/ 10.1007/S13131-021-1757-7

附中文参考文献

- 陈长民,施和生,许仕策,等,2003.珠江口盆地(东部)第三系 油气藏形成条件.北京:科学出版社,1-30.
- 陈汉宗,吴湘杰,周蒂,等,2005.珠江口盆地中新生代主要 断裂特征和动力背景分析.热带海洋学报,24(2): 52-61.

- 耿红燕,徐夕生,O'Reilly,S.Y.,等,2006.粤西白垩纪火 山-侵入岩浆活动及其地质意义.中国科学:地球科学, 36(7):601−617.
- 贾小辉, 王强, 唐功建, 2009. A型花岗岩的研究进展及意义. 大地构造与成矿学, 33(3): 465-480.
- 李剑锋,付建明,马昌前,等,2020.南岭九嶷山地区砂子岭 岩体成因与构造属性:来自锆石U-Pb年代学、岩石地 球化学及Sr、Nd、Hf同位素证据.地球科学,45(2): 374-388.
- 李建华,2013.华南中生代大地构造过程:源于北部大巴山和 中部沅麻盆地、衡山的构造变形及年代学约束(博士学 位论文).北京:中国地质科学院.
- 李平鲁,梁慧娴,戴一丁,1998.珠江口盆地基岩油气藏远 景探讨.中国海上油气(地质),12(6):361-369.
- 李平鲁,梁慧娴,戴一丁,等,1999.珠江口盆地燕山期岩浆岩 的成因及构造环境.广东地质,14(1):1-8.
- 李三忠, 索艳慧, 李玺瑶, 等, 2018. 西太平洋中生代板块俯 冲过程与东亚洋陆过渡带构造-岩浆响应. 科学通报, 63(16): 1550-1593.
- 李献华,李武显,李正祥,2007.再论南岭燕山早期花岗岩 的成因类型与构造意义.科学通报,52(9):981-991.
- 栾锡武, 王嘉, 刘鸿, 等, 2021. 关于南海北部特提斯的讨论. 地球科学, 46(3): 866-884.
- 邱检生, 胡建, McInnes, B. I. A., 等, 2004. 广东龙窝花岗 闪长质岩体的年代学、地球化学及岩石成因. 岩石学 报, 20(6): 62-73.

- 施和生, 舒誉, 杜家元, 等, 2017. 珠江口盆地古近系石油地 质. 北京: 地质出版社.
- 田立新,刘杰,张向涛,等,2020a.珠江口盆地惠州26-6大 中型泛潜山油气田勘探发现及成藏模式.中国海上油 气,32(4):1-11.
- 田立新, 施和生, 刘杰, 等, 2020b. 珠江口盆地惠州凹陷新领域勘探重大发现及意义. 中国石油勘探, 25(4): 22-30.
- 徐夕生,鲁为敏,贺振宇,2007.佛冈花岗岩基及乌石闪长 岩-角闪辉长岩体的形成年龄和起源.中国科学:地球 科学,37(1):27-38.
- 易海,张莉,林珍,2012.南海北部中生代构造格局与盆地 发育特征.石油实验地质,34(4):388-394.
- 于津海,周新民,赵蕾,等,2005. 壳幔作用导致武平花岗岩 形成: Sr-Nd-Hf-U-Pb 同位素证据. 岩石学报,21(3): 651-664.
- 张成晨, 许长海, 何敏, 等, 2019. 东海到南海晚中生代岩浆
 弧及陆缘汇聚体制综述.地球科学进展, 34(9): 950-961.
- 钟广见,吴世敏,冯常茂,2011.南海北部中生代沉积模式. 热带海洋学报,30(1):43-48.
- 周蒂,孙珍,陈汉宗,等,2005.南海及其围区中生代岩相古 地理和构造演化.地学前缘,12(3):204-218.
- 周新民,2007. 南岭地区晚中生代花岗岩成因与岩石圈动力 学演化.北京:科学出版社,403-649.