https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.033



# 南海西部晚中生代岩浆弧:KP1-1-1井碎屑锆石约束

范彩伟1,3,胡林2,胡潜伟2

1. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司,广东湛江 524057 2. 中海石油(中国)有限公司海南分公司,海南海口 570312 3. 中国石油大学地球科学与技术学院,山东青岛 266000

摘 要:晚中生代是古太平洋板块俯冲和南海北部岩浆弧发育时期,开展珠江口盆地KP1-1-1井钻遇的浅变质砂岩的近 源沉积研究有助于揭示岩浆弧源区的构造特点.根据LA-ICPMS碎屑锆石分析,KP1-1-1浅变质砂岩中存在129~ 155 Ma、155~172 Ma和172~196 Ma三个年龄组分,这一特点与区域上构造岩浆事件一致.碎屑岩浆锆石流体活动性元 素富集(如U和Th),高场强元素亏损(如Nb、Hf和Ti);元素组成U/Yb(0.34~3.92)、Sc/Yb(0.48~2.28)、Hf/Th (14.4~186.6)和 Th/Nb (24.3~462.7)具有大陆岩浆弧特点;计算的锆石 Ti 温度为 551~786 ℃,表明属于低温弧岩浆作 用.碎屑岩中172~196 Ma锆石组分记录了东沙-大仑-雁荡岩浆弧向西南的进一步延伸,与侏罗纪早期古太平洋斜向俯 冲到华南陆块之下有关.155~172 Ma岩浆锆石与古板块强烈俯冲有关,对应于华南165~150 Ma大规模花岗质岩浆活 动.129~155 Ma时期板块俯冲减弱或俯冲带后撤,可与浙闽同时期板内强烈火山活动对比.碎屑岩中测得最年轻年龄 为128.8 Ma,表明KP1-1-1钻遇浅变质砂岩形成时代晚于128 Ma,应属于白垩系,不是传统上认为的下古生界岩系. 关键词: 南海;碎屑锆石;岩浆弧;晚中生代;地层厘定;地质年代学. 收稿日期:2021-11-08

**中图分类号:** P597.3 **文章编号:** 1000-2383(2022)07-2328-09

## Late Mesozoic Magmatic Arc: Constraints from Well KP1-1-1 Detrital Zircon U-Pb Data, South China Sea

Fan Caiwei<sup>1,3</sup>, Hu Lin<sup>2</sup>, Hu Qianwei<sup>2</sup>

1. Zhanjiang Branch of CNOOC Limited, Zhanjiang 524057, China

2. Hainan Branch of CNOOC Limited, Haikou 570312, China

3. School of Earth Science and Technology, China University of Petroleum, Qingdao 266000, China

Abstract: The Late Mesozoic is an important tectonic episode for Paleo-Pacific slab subduction and magmatic arc evolution in the South China Sea. The low-metamorphosed sandstone drilled by KP1-1-1 belongs to a proximal deposition which helps to reveal tectonic characteristics of the magmatic arc provenance. Based on LA-ICPMS detrital zircon analysis, age components of 129-155 Ma, 155-172 Ma, and 172-196 Ma are identified from KP1-1-1 sandstone in the western Pearl River Mouth Basin, in accordance with regional tectono-magmatic events. These magmatic zircons which derive from arc-related magmatic source are characterized by low-temperature (551-786 °C), enrichment of fluid-mobile elements (U, Th) and depletion of high field-strength elements (Nb, Hf and Ti). They are characterized by high element ratios of U/Yb (0.34-3.92), Sc/Yb (0.48-2.28), Hf/Th (14.4-186.6), and Th/Nb (24.3-462.7), indicating the related magmatism in a continental arc environment. The age component

基金项目:中海石油(中国)有限公司重大科技专项(No. KJZH-2021-0003-00).

作者简介:范彩伟(1973-),男,教授级高级工程师,主要从事海洋油气地质研究. ORCID: 0000-0003-1517-6255. E-mail:fancw@cnooc.com.cn

引用格式:范彩伟,胡林,胡潜伟,2022.南海西部晚中生代岩浆弧:KP1-1-1井碎屑锆石约束.地球科学,47(7):2328-2336.

Citation: Fan Caiwei, Hu Lin, Hu Qianwei, 2022. Late Mesozoic Magmatic Arc: Constraints from Well KP1-1-1 Detrital Zircon U-Pb Data, South China Sea. Earth Science, 47(7):2328-2336.

of 172-196 Ma from the sandstone registers the Early Jurassic Dongsha-Talun-Yandang magmatic arc further stretching southwest in East to South China Seas, as a result of oblique initial subduction of the Paleo-Pacific slab. The major component of 155-172 Ma reveals an intensified slab subduction and arc-related magmatism in South China Sea, comparable to voluminous granitic magmatism (165-150 Ma) in South China. The minor component of 129-155 Ma found, however, implies a reduced arc-related magmatism due to slow subduction or slab rollback, sharply in contrast to intensified rhyolite volcanism (120-160 Ma) developed in Zhejiang to Fujian coastal areas. The minimum U-Pb age 128.8 Ma of detrital zircon defines the stratigraphic age of KP1-1-1 sandstone as Cretaceous, not the latest Late Proterozoic to Early Paleozoic as traditionally treated.

Key words: South China Sea; detrital zircon; magmatic arc; Late Mesozoic; stratigraphic age; geochronology.

## 0 引言

南海北部位于华南陆缘,由于特提斯洋关 闭、西太平洋俯冲两大构造域相继作用,使得 这一地区成为基础地质热点研究区域(任建 业, 2018; Xing et al., 2021). 南海北部中生界 油气资源潜力巨大,加之大中型古潜山油气田 相继突破,开启了海域古潜山勘探新领域(Jin et al., 2020; 田立新等, 2020; 谢玉洪和高阳 东,2020).晚中生代东亚陆缘演变进入重要的 板块俯冲期(Maruyama et al., 1997; Isozaki et al., 2010),相关俯冲杂岩带沿日本西南,经中 国台湾、巴拉望至加里曼丹一线分布(Wakita and Metcalfe, 2005). 相关岩浆活动是华南晚中 生代最显著的地质特征,出露面积约 240 000 km<sup>2</sup>(Zhou and Li, 2000). 这一巨型岩浆 岩带进入南海北部海域经越南东南延伸至婆罗 洲.关于其构造模式, Zhou and Li (2000)认为 板块俯冲角度增大控制着华南燕山期岩浆作 用, 对应于板内伸展(J<sub>2-3</sub>)、大陆边缘弧(K<sub>1</sub>)和 俯冲弧后( $K_2$ )环境(Zhou et al., 2006). Li and Li(2007)和Li et al.(2012)应用Flat-slab subduction模型来解释华南大规模岩浆作用, slab foundering 形成非造山岩浆岩(190~150 Ma),俯冲 板块后撤形成伸展及陆弧岩浆岩(J<sub>3</sub>-K<sub>1</sub>). 南海 北部邻近俯冲带海陆结合部,300余口井钻遇 了大量前古近系基底岩石,包括岩浆岩、变质 岩和沉积岩,大部分钻遇岩石样品保留完好,有 助于深入研究古太平洋俯冲及东亚大陆边缘构 造演变细节.本文选用珠江口盆地 KP1-1-1 井钻 遇的浅变质砂岩(深度1884.1~1907.9m),开 展 锆 石 U-Pb 年 代 和 微 量 元 素 分 析, 形 成 南 海 北部晚中生代岩浆活动年龄、构造控制环境 及浅变质岩地层时代约束,为深入认识东亚 陆缘和古太平洋板块俯冲作用提供依据.

## 1 区域地质概况

南海北部在区域上属于华夏地块组成部分.华 夏地块北界为江南造山带,西界为Song Ma缝合带 及越东-万安断裂,南界为中央海盆北缘,东界为台 东纵谷(张功成等, 2018). 南海北部主要包括珠江 口盆地、琼东南盆地、莺歌海盆地、北部湾盆地和台 西南盆地(图1),其前古近系基底岩性组成及垂向 地壳结构均有差异. 南海北部超过300余口井钻遇 了前古近系基底,形成前震旦纪结晶基底、震旦纪-早古生代浅变质岩、晚古生代浅海碳酸盐-碎屑岩 和中生代海相-海陆交互相-陆相4个构造层(孙晓 猛等, 2014; 张功成等, 2018). 南海北部广泛分布 震旦系-下古生界基底,基底岩性以浅变质砂砾岩、 板岩、千枚岩和石英岩为主;上古生界浅海相碳酸 盐岩分布在北部湾和台西南盆地中,而在珠江口和 琼东南盆地缺失(张功成等, 2018). 侏罗系-白垩系 在台西南盆地表现为海相和海陆交互相,在珠江口 盆地为海相和海陆过渡相,在琼东南盆地下白垩统 以陆相火山-沉积为主,在北部湾和莺歌海盆地上 白垩统为红色碎屑岩.南海北部广泛发育晚中生代 侵入岩和火山岩.鲁宝亮等(2011)将南海北部基底 划为3个分区:琼海断裂以西具有2层结构,下部元 古界、上部古生界,缺失中生界;阳江--统暗沙断 裂以东具有3层结构,元古界、古生界和中生界均完 好,两断裂之间以不完全3层结构为特征.南海北部 古潜山油气资源潜力巨大,永乐8区、惠州26-6大型 油气田的发现开启了南海古潜山勘探新领域.松 南-宝岛凹陷特别是YL8-1-1井的钻探成功,其古潜 山花岗岩基岩与印支造山作用有关(谢玉洪和高 阳东, 2020). 珠江口盆地惠州 26-6 油气田的古潜 山基岩以晚中生代闪长玢岩为主(田立新等, 2020),这类岩石与燕山期西太平洋俯冲有关.



图 1 南海北部主要盆地、KP1-1-1井位和砂岩岩性照片 Fig.1 Main Cenozoic basins of the northern South China Sea with KP1-1-1 sandstone locality and lithology 据中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 2021.《南海西部海域油气勘探年报(2020年度)》

## 2 样品与测试分析方法

本文碎屑岩样品采自南海珠江口盆地西部 KP1-1-1井(图 1a). KP1-1-1井在1 884.1~ 1907.9m深度钻遇了极粗粒、粗粒到中粗粒浅变质 石英砂岩地层.与上覆新近系珠江组(砂砾岩和泥 岩)为角度不整合接触关系,其下伏地层不明.本文 碎屑岩样品采自1905~1907m岩心深度段,岩石 浅灰色,致密坚硬,变余砂状结构(图 1b、1c).石 英约占45%,次棱角居多,粒径0.2~1.5mm,低 级干涉色;少量长石,约占5%,粒径0.5~1mm, 次棱角状;岩屑以石英居多,约占5%,大小0.3~ 1.8mm;填隙物约占45%,多由细小的重结晶石 英质和绢云母组成.岩石中偶见裂隙.

对样品进行了预处理、矿物分选、锆石制靶、 阴极发光(CL)拍照、锆石选点及U-Pb测试分析. 碎屑岩经粗碎、细碎及筛分获得70~200目颗粒, 再经过电磁仪分选及三溴甲烷重液分选,显微镜 下挑选锆石约1000粒.锆石制靶和CL拍照在南 京宏创地质勘查技术服务有限公司完成.锆石CL 拍照使用日本电子公司的全色阴极发光系统.锆 石U-Pb同位素测试分析在同济大学海洋地质国 家重点实验室完成.激光剥蚀仪为ASI Resolution M50L,使用 Resolution 193nm ArF 准分子激 光剥蚀系统和 Agilent 7900型四级杆质谱仪.剥蚀 类型为单点剥蚀,激光频率为8Hz,能量为4J· cm<sup>-2</sup>,射频功率为1400W,激光束斑直径为 26μm.数据采集时间包括约20s的空白背景信号 和40s的样品剥蚀信号.以标样锆石91500为外标,校正仪器质量歧视与元素分馏;以标样锆石 GJ-1为盲样,检验U-Pb定年数据质量;元素测定 使用NIST610作为外标,以Zr为内标标定锆石中 微量元素含量(Liu *et al.*, 2010).数据离线处理、 U-Th-Pb同位素比值、表面年龄计算等采用软件 ICP-MSDataCal(Liu *et al.*, 2008),年龄计算及谐 和图绘制使用ISOPLOT 3.0(Ludwig, 2003).

#### 3 碎屑锆石特征及U-Pb定年结果

KP1-1-1井前古近系碎屑岩中,碎屑锆石多为 无色或略带黄色,形态上多数为自形-半自形柱状, 碎屑锆石粒径为100~250 μm,长宽比为2:1~3:1. 根据CL阴极发光图像,锆石结构上以振荡环带岩 浆锆石为主,还见其他无环带或雾迷状变质锆石, 本文测年锆石分析点均选取振荡环带发育的岩浆 锆石.KP1-1-1碎屑岩分析测试了130粒锆石,其中 125粒锆石获得了谐和年龄数据,<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 和<sup>207</sup>Pb/<sup>235</sup>U同位素比值均落在U-Pb谐和线上及其 附近(图2).Th/U比值有助于判断锆石类型,岩浆 锆石Th/U值一般大于0.1,变质锆石Th/U值小于



图 2 南海珠江口盆地 KP1-1-1 井碎屑锆石 U-Pb 年龄谐和图和频谱图

Fig.2 Zircon U-Pb concordia diagram and age histogram of Well KP1-1-1 sandstone from the Pearl River Mouth Basin, South China Sea

0.1 (Hoskin and Schaltegger, 2003).本文锆石的U 含量为(141.1~2068.4)×10<sup>-6</sup>, Th含量为(54.5~ 834.9)×10<sup>-6</sup>, Th/U值为0.27~1.98, 属于典型岩 浆成因锆石. 岩浆锆石稀土元素具有 HREE 明显 富集、Ce正异常和Eu负异常等特征.根据U、Pb 分析结果,碎屑岩样品中125个岩浆锆石谐和度 均在 90% 以上,其<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄范围分布在 128.9~195.9 Ma之间. 根据锆石 U-Pb 年龄谐和图 和<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 锆石年龄频谱图(图 2),碎屑岩岩浆 锆石年龄大体上包括129~155 Ma、155~172 Ma 和172~196 Ma三个组分,对应于沉积物源区3期 岩浆活动事件:并以155~172 Ma时期岩浆活动最 为强烈,129~155 Ma 岩浆活动强度次之,172~ 196 Ma时期岩浆活动整体较弱,这些特点与华南 晚中生代构造岩浆活动规律一致.同时,碎屑样 品中测得最年轻锆石U-Pb年龄为128.8 Ma,代 表碎屑岩样品所在地层沉积年龄不早于128 Ma: 应该属于白垩系盆地沉积,与晚中生代西太平 洋俯冲有关,不是传统上认为的下古生界浅变 质岩系,这是本次研究中的一个重要发现.

### 4 锆石微量元素和构造环境

不同构造环境中,相关岩浆作用锆石具有不同的化学成分.Grimes et al. (2015)统计分析了5300件锆石的微量元素,认为元素比值(U/Yb、Nb/Yb、Sc/Yb)是岩浆弧、裂谷、洋岛和洋中脊构造环境的有效识别指标.由于俯冲组分加入,岩浆弧锆石具有明显的活动性不相容元素富集(如U、Th),因而

其U/Yb值一般较高;U/Yb比值在MORB锆石中显 著偏低反映了地幔不相容元素的亏损.与大洋壳锆 石相比,岩浆弧锆石富集Sc、亏损Yb,总体显示Sc/ Yb高值. 多数大陆锆石的 Sc/Yb>0.1, 多数大洋锆 石包括洋岛和洋中脊的 Sc/Yb<0.1. 大陆锆石中 Sc/Yb高值可能与钙碱性岩浆过程中角闪石储存 Sc 有关. 与洋中脊锆石相比, KP1-1-1碎屑岩中岩浆锆 石(128.9~195.9 Ma)具有流体活动性元素富集(U 为  $155.4 \times 10^{-6} \sim 2068.4 \times 10^{-6}$ , Th 为  $54.4 \times 10^{-6} \sim$ 834.9×10<sup>-6</sup>)和高场强元素亏损(Nb为0.8×10<sup>-6</sup>~  $10.0 \times 10^{-6}$ , Hf 为 8 049 × 10<sup>-6</sup> ~ 13 293 × 10<sup>-6</sup>, Ti 为 0.7×10<sup>-6</sup>~16.5×10<sup>-6</sup>)的特点;岩浆锆石振荡环带 发育,Th/U比值高(0.27~1.98)(图 3a). 与全球典 型构造岩浆环境相比,这类锆石形成于岩浆弧构造 环境,其U/Yb比值明显高(0.34~3.92),而Nb/Yb 比值偏低  $(1.5 \times 10^{-3} \sim 19.4 \times 10^{-3})$  (图 3b). Nb/ Yb-Sc/Yb元素协变特点也表明KP1-1-1岩浆锆石 形成于岩浆弧环境(图 3c), 锆石中 Sc 含量(332.6× 10<sup>-6</sup>~497.3×10<sup>-6</sup>)及 Sc/Yb (0.48~2.28) 均为高 值,不同于其他岩浆环境.根据Yang et al. (2012), 锆石Hf、Th和Nb元素地球化学行为不同,岩浆弧 锆石要比板内岩浆锆石拥有更低的 Nb/Hf 和更高 的 Th/Nb 比值;板内岩浆锆石因遭受大陆混染而具 有 Th/Nb 增大和 Hf/Th 减小的特点. 元素协变图 Th/U-Nb/Hf和Th/Nb-Hf/Th能有效识别岩浆 锆石形成的两类构造环境.KP1-1-1碎屑岩中,岩浆 锆石元素具有 Hf/Th 高值(14.4~186.6)、Th/Nb (24.3~462.7) 高值及 Nb/Hf 低值(1×10<sup>-4</sup>~8×







a. Th/U比值; b~d. 构造环境判别, 图b和图c底图据Grimes *et al.* (2015), 图d底图据Yang *et al.* (2012); e. 锆石类型,底图据Grimes *et al.* (2007); f. 锆石 Ti 温度

10<sup>-4</sup>)特点,在构造判别图解中同处于岩浆弧/造 山带构造环境中(图 3d),显著不同于板内/非造 山环境形成的岩浆锆石.

根据Grimes et al. (2007),大陆锆石显著富集活动性不相容元素(如U、Th),大陆和大洋两类锆石具有不同的U/Yb比值,元素U/Yb-Y和U/Yb-Hf 图解有助于区分大洋锆石与大陆锆石.KP1-1-1碎 屑岩中,晚中生代岩浆锆石具有U/Yb高值、Y低值 (521.4×10<sup>-6</sup>~2 889×10<sup>-6</sup>)的大陆锆石特点(图 3e),表明相关岩浆岩与板块俯冲和大陆岩浆弧有 关.锆石中元素Ti含量与岩浆温度的倒数存在对数 线性关系(Watson *et al.*, 2006): lg(Ti<sub>zircon</sub>) = (6.01±0.03) –(5 080±30) / T(K),  $T(\mathbb{C})$  =5 080/ (6.01–lg(Ti<sub>zircon</sub>)) –273. Ti含量主要取决于温度, 基本不受压力的影响.这一锆石Ti温度计成为广泛 使用的单矿物微量元素温度计.地壳中花岗岩类大 量存在, Miller et al. (2003)根据岩浆温度将花岗岩 划分为低温(<800 ℃)和高温两类(>800 ℃). Chappell et al. (2004)认为高温和低温花岗岩具有不 同的岩石学特征, A型花岗岩和碱性岩都是高温 岩浆岩.本文对KP1-1-1碎屑岩中晚中生代岩浆 锆石进行了锆石 Ti 温度计算分析(图 3f), 125 个 谐和岩浆锆石获得了551~786 ℃岩浆温度范围, 中值温度为655.6 ℃;这类岩浆锆石形成于低温岩 浆作用,应该与区域挤压和岩浆弧环境关系密切.

5 讨论与认识

#### 5.1 浅变质砂岩具有近源沉积特点

录井资料显示,KP1-1-1井钻遇灰绿色-深灰色 浅变质石英砂岩(1884~1905.5m),主体属于细粒 到极细粒砂岩,富含泥质和钙质.其主要矿物为石 英,还包括黄铁矿、正长石、斜长石、白云母和少量 白云石.根据薄片观察,主要矿物石英多数为棱角 状到次圆状,矿物分选性和磨圆度不好,岩石中含 有长石矿物,同时富含的泥质多数变成绢云母,锆 石呈现半自形-自形;由此推测浅变质砂岩具有近 源沉积特点.录井资料没有相关的沉积构造描述, 少量岩心也没有观察到典型的沉积构造.根据砂岩 重矿物鉴定结果(图4),其特征重矿物组合钛铁 矿+锆石+金红石+磁铁矿具有岩浆岩母岩特点; 另一重矿物组合包括黄铁矿、重晶石、菱铁矿、白钛 石和锐钛矿,主要属于沉积成岩过程的自生矿物组 合,黄铁矿呈现球霉状集合体.褐铁矿这一重矿物 代表了长期风化和氧化作用,岩石中含有这一不稳 定重矿物也是近源沉积的证据. 地震剖面上, KP-1-1浅变质砂岩层紧邻强反射界面分布(Tg),类似沉 积在神狐隆起上多处表现为断陷结构和局限沉积 体特点,成层构造发育.由于前古近纪神狐隆起长 期遭受风化剥蚀,KP-1-1砂岩应属于隆起风化面之 上的白垩系局限沉积体,这一沉积体随后又遭受风 化剥蚀改造.笔者推测神狐隆起属于晚中生代岩浆 弧的组成部分,初步认为KP-1-1砂岩具有近源沉积 特点,岩石中富含石英和泥质与花岗岩类长期遭受 风化残留有关,特征的岩浆岩重矿物组合和风化 残余褐铁矿也证明了这一点.因此,KP-1-1浅变 质砂岩中的碎屑锆石年代和元素特点可以较好地 反映神狐隆起岩浆弧的演化特点.

#### 5.2 基底浅变质砂岩地层时代厘定

珠江口盆地西部到琼东南盆地基底普遍发 育浅变质砂砾岩、板岩、千枚岩和石英岩,中西 沙隆起和云开隆起是主要物源区(孙晓猛等, 2014),它们与闽粤和海南岛震旦系-下古生界 浅变质岩具有可比性(舒良树等,2008),因此时 代上划归于震旦纪-早古生代,其属于华南加里 东褶皱带向海域的延伸部分(庞雄等,2007).孙 晓猛等(2014)将珠江口盆地KP1-1-1井钻遇的 浅变质砂岩地层(1884~1906.8 m)划归到震旦 系-下古生界.本文在KP1-1-1浅变质砂岩中获 得了129~196 Ma碎屑锆石LA-ICPMS U-Pb年 龄记录,测得最年轻锆石年龄为128.8 Ma,代表 碎屑岩地层形成于128 Ma之前,应属于白垩系, 不是传统上认为的下古生界浅变质岩系.

#### 5.3 碎屑岩物源区岩浆活动的时代限定

20 多口井钻遇花岗岩在南海北部取得了 198.2~195.0 Ma、161.6~148.2 Ma 和 136.5~ 101.7 Ma多期岩浆活动U-Pb年龄记录(Xu et al., 2016, 2017;修淳等, 2016). Zhu et al. (2017)报道 了西沙隆起钻遇的晚侏罗世-早白垩世角闪斜长片 麻岩和花岗岩记录(锆石U-Pb年龄为153、137、 108 Ma),认为它们与东亚陆缘受古太平洋板块大 规模长时间的俯冲密切相关.在南海南部拖网获得 了153.6~159.1 Ma和127.2 Ma的石英闪长岩、花 岗闪长岩和二长花岗岩(Yan et al., 2010). 华南晚 中生代岩浆活动以花岗岩和流纹岩为主,与玄武岩 和辉长岩密切共生(周新民等, 2007),与非造山板



图 4 珠江口盆地 KP1-1-1 井浅变质砂岩重矿物组成特点 Fig.4 Characteristics of heavy minerals KP1-1-1 sandstone from the Pearl River Mouth Basin

内伸展构造环境控制有关(Li et al., 2007;徐夕生, 2008),主要包括196~170 Ma、165~113 Ma和106~88 Ma构造岩浆阶段.KP1-1-1浅变质砂岩具有近源盆地沉积特点,推测应属于神狐隆起风化剥蚀面上的局限沉积,沉积物源应是南海北部晚中生代形成的神狐隆起岩浆弧.碎屑锆石U-Pb年龄主要记录了129~155 Ma、155~172 Ma和172~196 Ma三个组分,对应于3期弧岩浆活动和板块俯冲事件.155~172 Ma时期岩浆活动和板块俯冲事件.155~172 Ma时期岩浆活动最为强烈, 129~155 Ma岩浆强度次之,172~196 Ma时期岩浆整体较弱.这些特点基本上与珠江口盆地东部的岩浆弧演化时代具有可比性,也与华南晚中生代主要构造-岩浆事件的形成时间一致.

#### 5.4 南海北部晚中生代岩浆弧和板块俯冲

南海北部120口井钻遇前新生代岩石,绝大多数为I型花岗岩类,具有岩浆弧地球化学特点,对应于198~195 Ma、162~148 Ma和137~102 Ma三个主要俯冲期(Xu et al., 2016);与西沙(Zhu et al., 2017)和南沙拖网(Yan et al., 2010)获得的岩浆弧岩浆岩具有可比性,它们一道组成了受西太平洋俯冲控制的南海北部晚中生代岩浆弧.栾锡武等(2021)认为南海北部高磁异常带是白垩纪古太平洋板块俯冲形成的陆缘火山弧.相关增生杂岩分布在沿日本西南、经中国台湾到巴拉望至加里曼丹一线,勾画出西太平洋板块俯冲带残留展布轮廓(Wakita and Metcalfe, 2005).受板块俯冲控制,华南东南燕山期相应表现为板内伸展(J<sub>2-3</sub>)、大陆边缘弧(K<sub>1</sub>)和俯冲弧后(K<sub>2</sub>)环境(Zhou et al., 2006).

KP1-1-1浅变质砂岩中,碎屑岩浆锆石(129~ 196 Ma)表现出流体活动性元素富集(如U和Th) 和高场强元素亏损(如Nb、Hf和Ti)特点.与全球典 型构造环境相比,本文锆石的U/Yb(0.34~3.92)、 Sc/Yb(0.48~2.28)、Hf/Th(14.4~186.6)和Th/ Nb(24.3~462.7)呈现高值,具有大陆岩浆弧特点. 利用锆石Ti温度计获得了551~786℃低温岩浆温 度,应该与挤压和岩浆弧环境关系密切.KP1-1-1碎 屑岩中172~196 Ma弧岩浆年龄组分,代表了从南 海北部经台湾到东海陆架识别出的东沙-大仑-雁 荡岩浆弧(Xu et al., 2017)向西南进一步延伸,与侏 罗纪早期古太平洋斜向俯冲华南大陆有关.碎屑岩 中155~172 Ma弧岩浆组分与古太平洋板块向华南 板块之下强烈俯冲有关,华南165~150 Ma时期发 生大规模岩浆活动并以分异I型花岗岩为主,伴有 A型花岗岩和正长岩(Li et al., 2007). KP1-1-1碎 屑岩 129~155 Ma年龄组分代表板块俯冲减弱或俯 冲带后撤,与浙闽地区同时期(160~120 Ma)板内 强烈火山活动(以流纹岩和英安岩为主;Liu et al., 2012, 2016)形成鲜明对照.位于南海南部的婆罗 洲,其晚中生代岩浆弧集中形成在132~90 Ma (Breitfeld et al., 2020),明显不同于南海北部,这一 特点对于深化认识西太平洋俯冲东南大陆的差异 性及区域上构建动力学演化模式具有重要意义.

#### 6 结论

珠江口盆地西部 KP1-1-1 井钻遇的浅变质砂 岩,是神狐隆起长期遭受风化剥蚀作用形成的局限 近源沉积,其特征重矿物组合(钛铁矿、锆石、金红 石和磁铁矿)显示岩浆岩母岩源区特点.这一浅变 质砂岩中存在129~155 Ma、155~172 Ma和172~ 196 Ma三个锆石 U-Pb 年龄组分,代表了相关物源 区三期岩浆活动并以前两期尤为显著.碎屑岩浆 锆石表现出大陆岩浆弧岩浆岩具有的流体活动性 元素富集、高场强元素亏损的地球化学特征,锆石 Ti温度显示低温岩浆作用(551~786℃),指示其 来自与区域挤压相关的弧岩浆岩.KP1-1-1砂岩中 碎屑锆石所揭示的岩浆弧演变,整体上与南海北部 晚中生代岩浆弧演化及华南晚中生代弧后主要构 造岩浆事件一致,为深化古太平洋板块俯冲华南大 陆过程提供了重要约束.碎屑岩中测得最年轻碎 屑锆石年龄(128.8 Ma),表明KP1-1-1浅变质岩应 属于白垩系,不是传统上认为的下古生界岩系.

#### References

- Breitfeld, H. T., Davies, L., Hall, R., et al., 2020. Mesozoic Paleo-Pacific Subduction beneath SW Borneo: U-Pb Geochronology of the Schwaner Granitoids and the Pinoh Metamorphic Group. *Frontiers in Earth Science*, 8: 568715. https://doi.org/10.3389/feart.2020.568715
- Chappell, B. W., White, A. J. R., Williams, I. S., et al., 2004. Low- and High-Temperature Granites. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 95(1-2): 125-140. https://doi.org/10.1017/S0263593300000973
- Grimes, C. B., John, B. E., Kelemen, P. B., et al., 2007. Trace Element Chemistry of Zircons from Oceanic Crust: A Method for Distinguishing Detrital Zircon Provenance. *Geology*, 35(7): 643-646. https://doi.org/

10.1130/g23603a.1

- Grimes, C. B., Wooden, J. L., Cheadle, M. J., et al., 2015. "Fingerprinting" Tectono-Magmatic Provenance Using Trace Elements in Igneous Zircon. *Contributions* to Mineralogy and Petrology, 170(5-6): 1-26. https://doi.org/10.1007/s00410-015-1199-3
- Hoskin, P. W. O., Schaltegger, U., 2003. The Composition of Zircon and Igneous and Metamorphic Petrogenesis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 27– 62. https://doi.org/10.2113/0530027
- 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
- Jin, F. M., Huang, J., Pu, X. G., et al., 2020. Characteristics of the Cretaceous Magmatism in Huanghua Depression and Their Relationships with Hydrocarbon Enrichment. *Journal of Earth Science*, 31(6): 1273-1292. https://doi.org/10.1007/s12583-020-1308-8
- 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(14): 1873–1885. https://doi.org/10.1007/S11434-007-0259-0
- 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
- Liu, L., Xu, X. S., Xia, Y., 2016. Asynchronizing Paleo-Pacific Slab Rollback beneath SE China: Insights from the Episodic Late Mesozoic Volcanism. *Gondwana Research*, 37: 397-407. https://doi.org/10.1016/j.gr.2015.09.009
- Liu, L., Xu, X. S., Zou, H. B., 2012. Episodic Eruptions of the Late Mesozoic Volcanic Sequences in Southeastern Zhejiang, SE China: Petrogenesis and Implications for the Geodynamics of Paleo - Pacific Subduction. *Lithos*, 154: 166-180. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.07.002
- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Gao, S., et al., 2008. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard.

*Chemical Geology*, 257(1-2): 34-43. https://doi.org/ 10.1016/j.chemgeo.2008.08.004

- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Zong, K. Q., et al., 2010. Reappraisement and Refinement of Zircon U-Pb Isotope and Trace Element Analyses by LA-ICP-MS. *Chinese Sci*ence Bulletin, 55(15): 1535-1546. https://doi.org/ 10.1007/S11434-010-3052-4
- Lu, B.L., Sun, X.M., Zhang, G.C., et al., 2011. Seismic-Potential Field Response Characteristics and Identification of Basement Lithology of the Northern South China Sea Basin. *Chinese Journal of Geophysics*, 54(2): 563-572 (in Chinese with English abstract).
- 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).
- Ludwig, K.R., 2003. ISOPLOT 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Berkeley.
- Maruyama, S., Isozaki, Y., Kimura, G., et al., 1997. Paleogeographic Maps of the Japanese Islands: Plate Tectonic Synthesis from 750 Ma to the Present. *Island Arc*, 6(1): 121–142. https://doi.org/10.1111/j.1440-1738.1997.tb00043.x
- Miller, C. F., McDowell, S. M., Mapes, R. W., 2003. Hot and Cold Granites Implications of Zircon Saturation Temperatures and Preservation of Inheritance. *Geology*, 31(6): 529-532. https://doi.org/10.1130/0091 - 7613 (2003)0310529: hacgio>2.0.co;2
- Pang, X., Chen, C.M., Peng, D.J., et al., 2007. The Pearl River Deep-Water Fan System & Petroleum in South China Sea. Science Press, Beijing, 38-42 (in Chinese).
- Ren, J.Y., 2018. Genetic Dynamics of China Offshore Cenozoic Basins. *Earth Science*, 43(10): 3337-3361 (in Chinese with English abstract).
- Shu, L.S., Yu, J.H., Jia, D., et al., 2008. Early Paleozoic Orogenic Belt in the Eastern Segment of South China. *Geological Bulletin of China*, 27(10): 1581–1593 (in Chinese with English abstract).
- Sun, X. M., Zhang, X. Q., Zhang, G. C., et al., 2014. Texture and Tectonic Attribute of Cenozoic Basin Basement in the Northern South China Sea. *Scientia Sinica Terrae*, 44(6): 1312-1323 (in Chinese).
- Tian, L.X., Shi, H.S., Liu, J., et al., 2020. 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., Metcalfe, I., 2005. Ocean Plate Stratigraphy in East

and Southeast Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(6): 679-702. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2004.04.004

- Watson, E. B., Wark, D. A., Thomas, J. B., 2006. Crystallization Thermometers for Zircon and Rutile. Contributions to Mineralogy and Petrology, 151(4): 413-433. https://doi.org/10.1007/S00410-006-0068-5
- Xie, Y.H., Gao, Y.D., 2020. Recent Domestic Exploration Progress and Direction of CNOOC. *China Petroleum Exploration*, 25(1): 20-30 (in Chinese with English abstract).
- 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
- Xiu, C., Zhang, D.J., Zhai, S.K., et al., 2016. Zricon U-Pb Age of Granitic Rocks from the Basement beneath the Shi Island, Xisha Islands and Its Geological Significance. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 36(3): 115-126 (in Chinese with English abstract).
- 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 Review*, 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, X.S., 2008. Several Problems Worthy to Be Noticed in the Rewearch of Granites and Volcanic Rocks in SE China. *Geological Journal of China Universities*, 14(3): 283-294 (in Chinese with English abstract).
- Yan, Q. S., Shi, X. F., Liu, J. H., et al., 2010. Petrology and Geochemistry of Mesozoic Granitic Rocks from the Nansha Micro-Block, the South China Sea: Constraints on the Basement Nature. *Journal of Asian Earth Sciences*, 37(2): 130–139. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2009.08.001
- Yang, J. H., Cawood, P. A., Du, Y. S., et al., 2012. Detrital Record of Indosinian Mountain Building in SW China: Provenance of the Middle Triassic Turbidites in the Youjiang Basin. *Tectonophysics*, 574-575: 105-117. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.08.027
- Zhang, G.C., Jia, Q.J., Wang, W.Y., et al., 2018. On Tectonic Framework and Evolution of the South China Sea. *Chinese Journal of Geophysics*, 61(10): 4194-4215 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X.M., Chen, P.R., Xu, X.S., et al., 2007. Petrogen-

esis of Late Mesozoic Granite and Dynamic Evolution of Lithosphere in Nanling Region. Science Press, Beijing (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
- Zhou, X. M., Sun, T., Shen, W. Z., et al., 2006. Petrogenesis of Mesozoic Granitoids and Volcanic Rocks in South China: A Response to Tectonic Evolution. *Episodes*, 29(1): 26-33. https://doi.org/10.18814/epiiugs/2006/v29i1/004
- Zhu, W. L., Xie, X. N., Wang, Z. F., et al., 2017. New Insights on the Origin of the Basement of the Xisha Uplift, South China Sea. Science China Earth Sciences, 60(12): 2214-2222. https://doi. org/10.1007/ S11430-017-9089-9

#### 附中文参考文献

- 鲁宝亮,孙晓猛,张功成,等,2011.南海北部盆地基底岩性 地震-重磁响应特征与识别.地球物理学报,54(2): 563-572.
- 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.
- 庞雄,陈长民,彭大钧,等,2007.南海珠江深水扇系统及油 气.北京:科学出版社,38-42.
- 任建业,2018.中国近海海域新生代成盆动力机制分析.地 球科学,43(10):3337-3361.
- 舒良树,于津海,贾东,等,2008.华南东段早古生代造山带 研究.地质通报,27(10):1581-1593.
- 孙晓猛,张旭庆,张功成,等,2014. 南海北部新生代盆地基 底结构及构造属性. 中国科学:地球科学,44(6): 1312-1323.
- 田立新,施和生,刘杰,等,2020.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.
- 谢玉洪,高阳东,2020.中国海油近期国内勘探进展与勘探 方向.中国石油勘探,25(1):20-30.
- 修淳,张道军,翟世奎,等,2016.西沙岛礁基底花岗质岩石 的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义.海洋地质与第四纪地 质,36(3):115-126.
- 徐夕生,2008.华南花岗岩-火山岩成因研究的几个问题.高 校地质学报,14(3):283-294.
- 张功成, 贾庆军, 王万银, 等, 2018. 南海构造格局及其演 化. 地球物理学报, 61(10): 4194-4215.
- 周新民,陈培荣,徐夕生,等,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.