



海南岛北部白垩系之上发现海西期花岗岩

—华南晚中生代伸展—挤压构造转换新证据

负晓瑞,冯建赞,郑和荣,张英,罗军,曾彦,廖大卫,张乔勋

中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院,北京,100083

内容提要:华南晚中生代经历多期伸展—挤压构造应力场的反转,早—晚白垩世之间伸展转为挤压的构造反转已被广泛证实,晚白垩世晚期华南板块构造反转的证据相对较少。海南岛位于华南板块南部,是古太平洋构造域和古特提斯构造域的叠置区,记录了复杂的构造—岩浆事件,是研究华南和南海北部陆缘构造演化的关键地区。本研究基于中国石油化工股份有限公司在海南岛北部福山凹陷陆区部署实施的地热科学探井—福深热1井,首次在海南岛北部发现一套介于古近系和白垩系之间的花岗质夹层,对花岗质岩芯开展了系统的岩石学、地质年代学、构造地质学分析。研究发现,该套花岗质夹层主要由斜长花岗岩、二长花岗岩、花岗闪长岩组成,多发生矿化蚀变;锆石 U-Pb 结果为 260.7 ~ 250.0 Ma,表明该套花岗质岩石的结晶时代为中二叠世—早三叠世。结合古近系长流组和白垩系报万组沉积时代,本研究将该套花岗质岩石的推覆时代限定在晚白垩世中—晚期—古新世之间。结合区域地质调查、油气钻井、地球物理资料以及前人研究成果,本研究在海南岛北部识别出一期白垩纪晚期 NW—SE 向挤压构造,为华南晚中生代伸展—挤压构造转换的研究提供了新的证据。

关键词:海南岛北部;白垩纪;构造—沉积演化;锆石 U-Pb 定年;挤压构造

华南大陆位于太平洋和特提斯两大构造域的交接部位,受古太平洋板块俯冲及后撤作用的影响,华南晚中生代经历强烈的大陆再造(舒良树和周新民,2002;舒良树等,2012;张岳桥等,2012;张国伟等,2013;Li Jianhua et al., 2014a, 2014b, 2018;唐梅华和巫建华,2017;杨文采,2018, 2022;汪相,2022;李建华等,2024)。前人关于华南晚中生代多期伸展—挤压构造应力场的反转进行了相关研究(Dong Shuwen et al., 2018; Suo Yanhui et al 2020),早/晚白垩世之间伸展转为挤压的构造反转已被广泛证实(Li Jianhua et al., 2012, 2014a, 2014b, 2018, 2020; Wei Wei et al., 2015; Ye Qing et al., 2018),然而,晚白垩世晚期华南板块构造反转的证据相对较少(邢光福等,2009;Yan Yi et al., 2009; Ye Qing et al., 2018; Ding Ruxin et al., 2019; 张族坤等,2019;Suo Yanhui et al., 2020)。

位于中国南海北部的北部湾盆地近年来一直是油气勘探开发的重点地区,前人关于盆地构造、岩

石、沉积、油气藏等已进行了大量研究(朱伟林和江文荣,1998;李美俊等,2007;黄保家等,2012;李春荣等,2012;王观宏等,2015;张昊和童亨茂,2015;鲁宝亮等,2016;Gao Gang et al., 2020; 郑和荣等,2022;廖飞燕等,2024)。福山凹陷位于北部湾盆地南部,其陆区位于海南岛北部,福山凹陷中—新生代沉积—构造演化受到太平洋构造域和特提斯构造域的双重影响,研究其沉积、构造对于理解海南岛北部甚至华南地区构造演化具有重要意义。

2024年4月,作为国家重点研发计划项目《深层地热资源探测评价关键技术研究》的配套工程,中国石化部署实施的我国首口地热科学探井—福深热1井在海南省海口市成功完钻,完钻井深5200m,福深热1井位于海南岛北部,构造位置上属于北部湾盆地福山凹陷。本研究首次在海南岛北部发现一套介于古近系和白垩系之间的花岗质夹层,开展了系统的岩石学、地质年代学、构造地质学分析,在海南岛北部识别出一期晚白垩纪挤压构造,为该地

注:本文为国家重点研发计划(编号:2021YFA0716004,2019YFC0604903),石化联合基金(编号:U20B6001),中国石化科技攻关项目(编号:P23131,P23093)的成果。

收稿日期:2024-10-14;改回日期:2025-03-12;网络首发:2025-03-20;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2025.03.045

作者简介:负晓瑞,男,1993年生,副研究员,主要从事构造地质学研究;Email: yunxrgeo@163.com。

质历史时期伸展—挤压构造转换的研究提供了新的证据,丰富了海南岛北部或华南地区晚中生代构造演化理论。

1 地质背景

北部湾盆地是晚白垩世—新生代的断陷、拗陷叠合盆地,面积约 38000 km²,其中陆域面积约 20000 km²,盆地整体上呈现三拗两隆的构造格局,由北向南依次为北部拗陷、企西隆起、中部拗陷、徐闻隆起、南部拗陷。北部拗陷包括海中、涠西南、纪家等凹陷,中部拗陷包括昌化、海头北、乌石、迈陈等凹陷,南部拗陷包括福山、东坡、锦和、雷东等凹陷(图 1)。

北部湾盆地地层自下而上依次包括寒武系、奥陶系、泥盆系、石炭系、二叠系、白垩系、古近系、新近系和第四系,其中新生代地层最大厚度可达 7000 m (李美俊等,2007;黄保家等,2012;李春荣等,2012; Gao Gang et al., 2020; 吴孔友等,2021)。盆地内岩浆活动主要集中在燕山期和喜马拉雅期,侵入岩以花岗岩类为主,并有少量中性岩及碱性岩,火山岩以玄武岩及少量粗面岩为主,其次为陆相安山岩—英安岩—流纹岩。盆内断裂发育,以 NE 向、NEE 向、NW 向以及近 EW 向展布为主,多为正断裂(李美俊等,2007;孟令箭等,2009;Gao Gang et al., 2020; 吴孔友等,2021)。

福山凹陷位于北部湾盆地最南端,南侧以定安

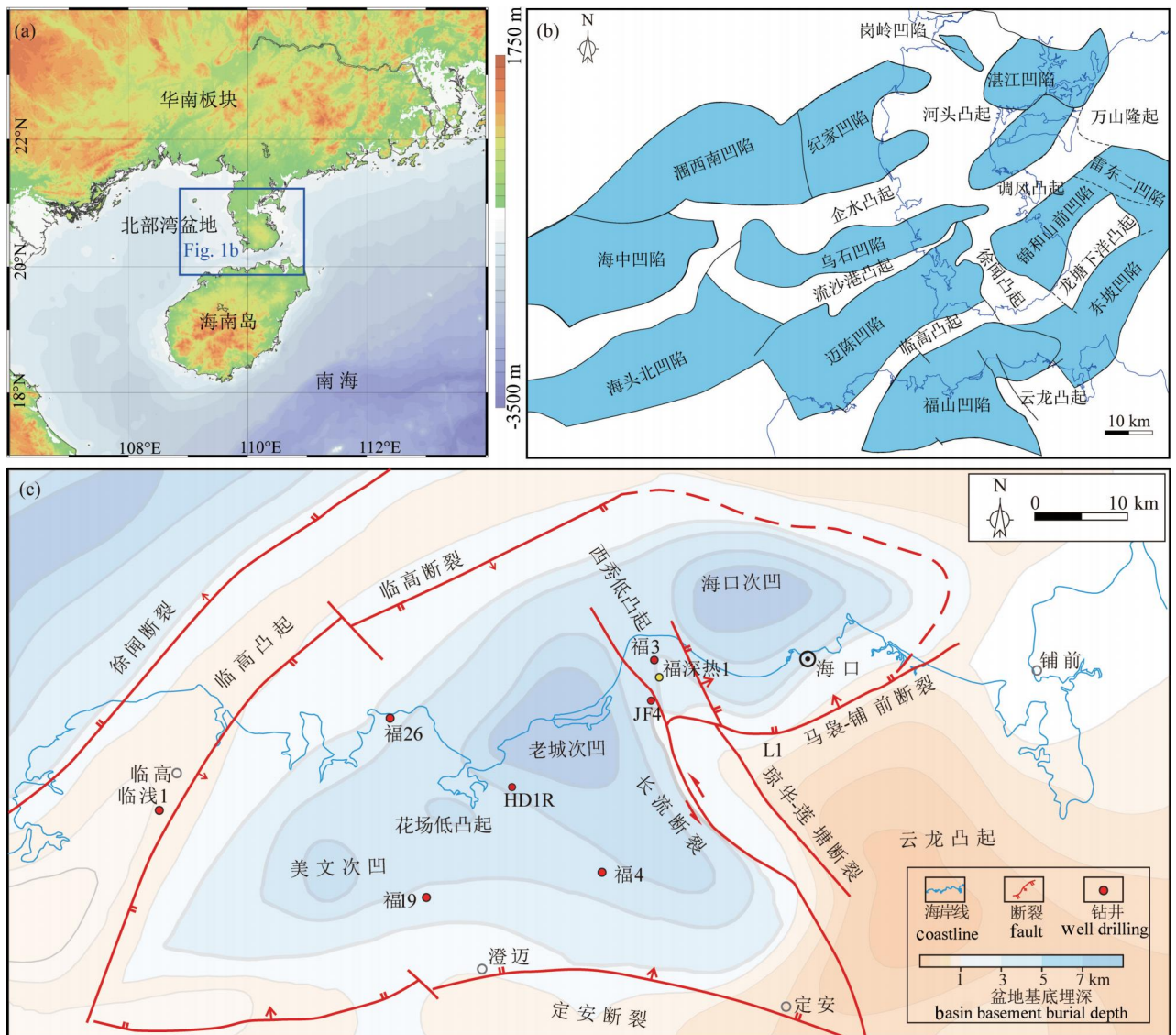


图 1 北部湾盆地南部拗陷福山凹陷大地构造位置(a) (b)及构造单元划分(c)

Fig. 1 Geotectonic location (a) (b) and structural unit division (c) of the Fushan Sag, South Depression, Beibu Bay Basin

断裂为界与琼中隆起带相邻。整体呈现三洼夹两凸的构造格局,从西向东依次为美文次凹、花场低凸起、老城次凹、西秀低凸起、海口次凹。其中,西秀低凸起为本次结合重力、广域电磁、区域地质等资料,重新划分出的三级构造单元(中国石化内部资料)。福山凹陷属于新生代断陷,长期处于伸展环境,新生代基性岩浆活动频发,中—新生界盖层直接覆盖在海西—印支期花岗岩基底之上,在NW—SE向伸展作用下,临高、长流和定安断裂分别构成了凹陷的西、东、南边界(图1c)。西秀低凸起东西两侧分别以长流断裂和琼华—莲塘断裂为界与老城次凹和海口次凹相邻,北侧潜没于琼州海峡,南侧以东西向展布的马袅—铺前断裂为界与云龙凸起相邻(图2)。

长流断裂为控凹深大断裂,走向NNW,倾向SW,倾角 $60^{\circ} \sim 80^{\circ}$,南起定安仙沟,北至海口长流,长约50 km,为张扭性断层;断裂由一系列次级断层组成,为向深部逐渐变缓的铲状正断层。该断裂控制了福山凹陷的沉积和构造演化,在长期的强烈的走滑作用下,形成大量破碎带,且控制着琼北全新世火山岩的分布(闫成国和江娃利,2007)。琼华—莲塘断裂走向大致 330° ,倾向北东或西南,自长流东侧琼华村经永庄水库向南东延伸至永兴镇北侧一带,由自西至东的两条倾向相反的次级正断层组成典型的地垒构造,是西秀低凸起和海口次凹的分界线,控制第四纪多次火山喷发。马袅—铺前断裂走

向NEE,倾向N,倾角大于 70° ,正断兼右旋扭动断层,控制了海口次凹和西秀低凸起的北边界。

2 地层及岩性特征

福深热1井钻遇两套岩浆岩,第一套为1865~2058 m,夹持于古新统长流组 and 上白垩统报万组之间,岩性主要为灰绿色、灰白色、肉红色中粗粒蚀变花岗岩,发育绿泥石化、绿帘石化和绢云母化蚀变,局部夹泥岩、粉砂岩,破碎严重,在1870.00~1877.66 m深度段取芯1回次,取芯进尺7.66 m,芯长7.66 m,收获率100%(图4);第二套为4615~5200 m的花岗岩,岩性为灰白色—浅灰色中—细粒黑云母花岗岩、黑云母二长花岗岩与深灰色—灰黑色中—粗粒片麻状花岗闪长岩、辉石闪长岩等。岩石地层具体分界深度、厚度及岩性简述见表1。

3 样品特征

本文样品采集自福深热1井古新统长流组和上白垩统报万组之间的花岗岩,1870~1877.66 m取芯段采集八个样品(FSR1-1870~FSR1-1877),并采集FSR1-1970、FSR1-2005两个花岗岩屑样品(图3b)。

岩芯不完整,呈碎裂状,断裂面表面见有较多擦痕;矿物未发生变形,高角度裂缝及微裂缝极为发育,断面为黑色,主要为黄铁矿;矿物多发生绿帘石化、绿泥石化、绢云母化(图4)。

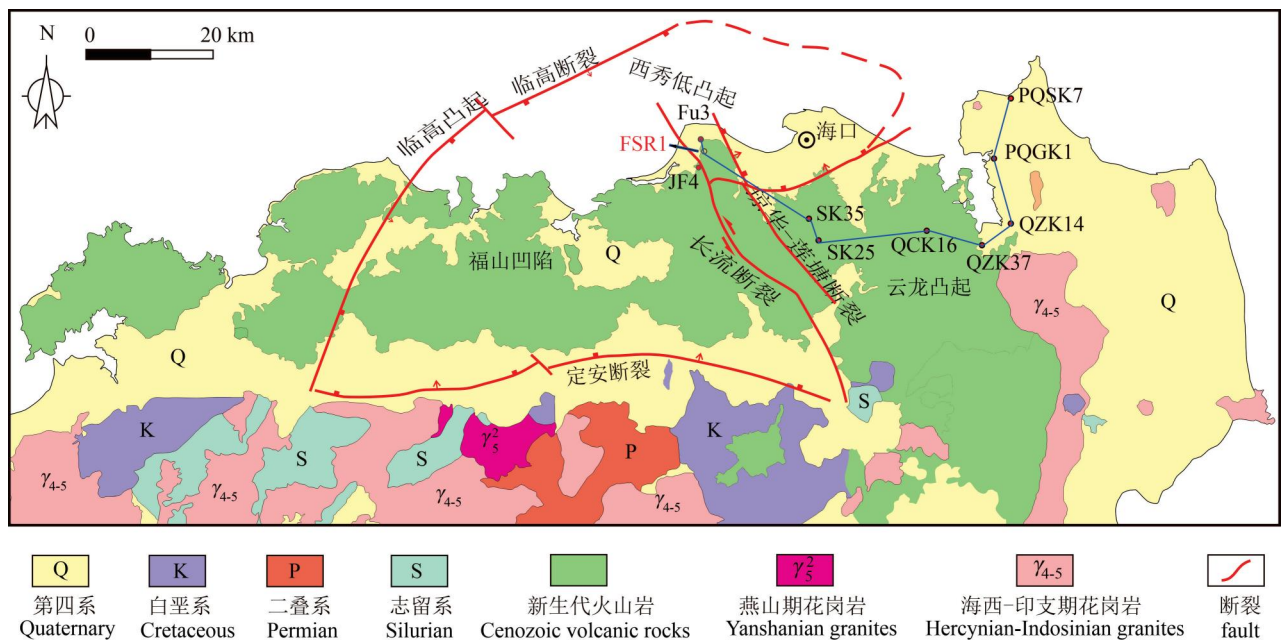
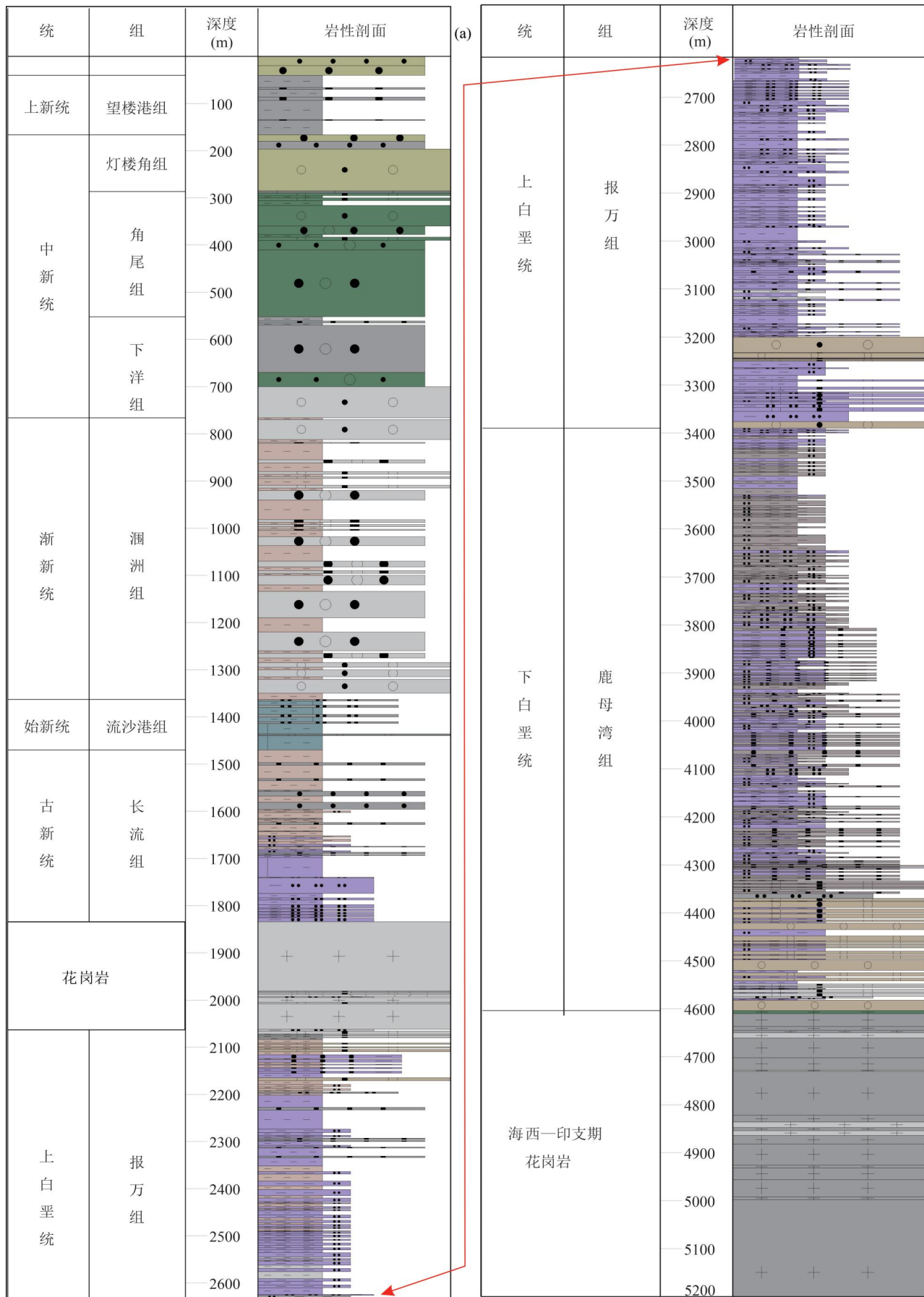


图2 海南岛北部地质简图(修改自李薇等,2019)

Fig. 2 Geological map of northern Hainan Island (modified from Li Wei et al., 2019&)



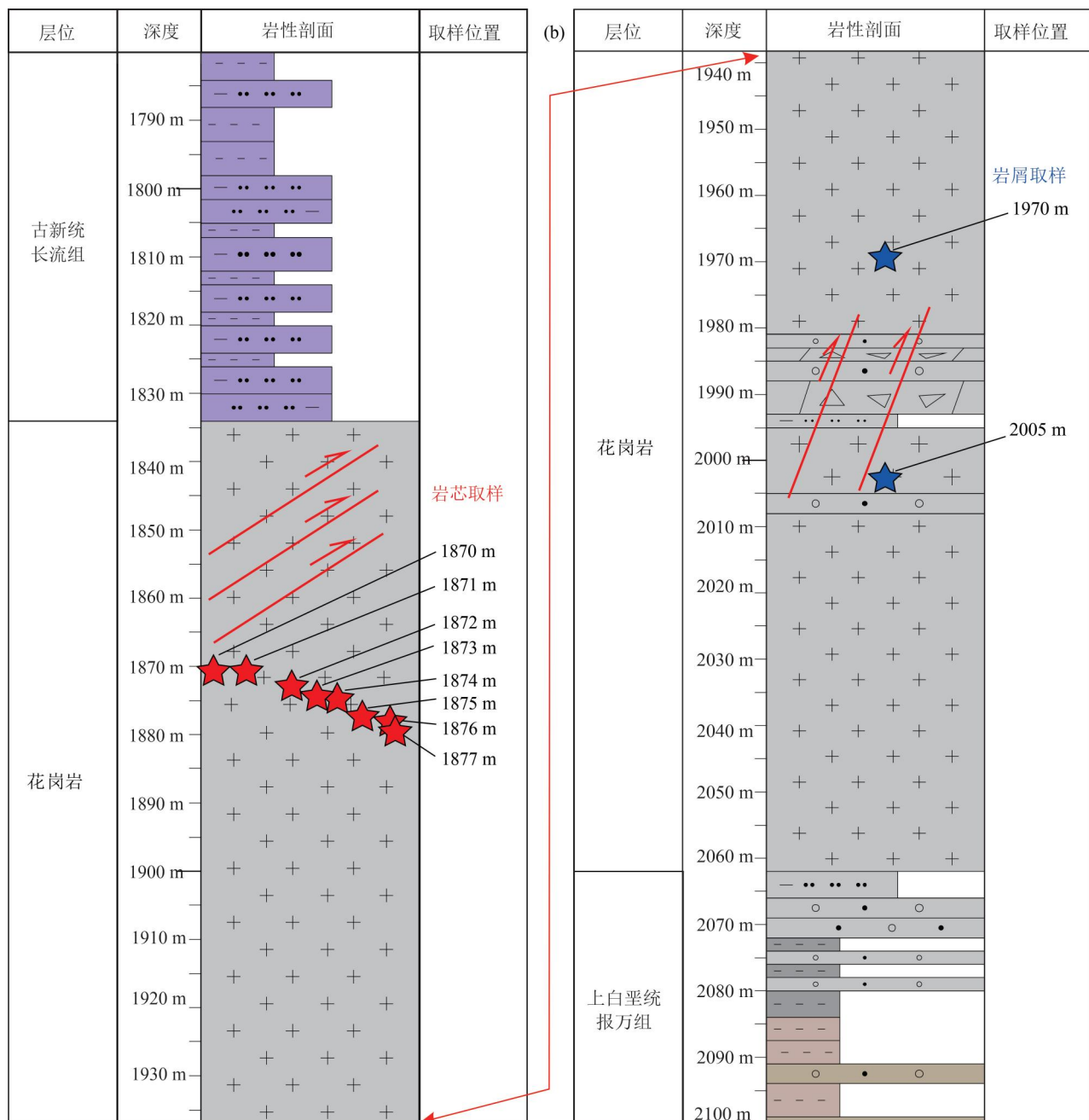


图3 北部湾盆地南部拗陷福山凹陷福深热1井岩性柱状图(a)及采样位置(b)

Fig. 3 Lithological column (a) and sampling location (b) of the Well FSR-1 in the Fushan Sag, Southern Depression, Beibu Bay Basin

样品 FSR1-1870 ~ FSR1-1873、FSR1-1876 五件样品, 细粒花岗结构, 块状构造。岩石主要斜长石、石英、黑云母及少量不透明矿组成物。斜长石半自形板状, 大小一般 0.5 ~ 1 mm, 定向分布, 被绢云母及白云石、白云母交代, 含量 75% ~ 80%; 石英他形粒状, 大小一般 0.5 ~ 1 mm, 填隙状分布, 波状消光明显, 含量 20% ~ 25%; 黑云母片状, 片直径一般 0.2 ~ 0.5 mm, 含量 1% ~ 5%; 不透明矿物含量 1%

~ 5%; 岩石轻碎裂, 沿裂隙有石英及白云石充填交代。定名为蚀变斜长花岗岩(图 5a—d)。

样品 FSR1-1874, 岩石呈灰色, 花岗结构, 块状构造。斜长石近半自形板状, 大小一般 0.5 ~ 2 mm, 定向分布, 被绢云母及方解石交代, 含量 40% ~ 45%; 钾长石近半自形板状, 大小一般 0.5 ~ 2 mm, 被高岭土及方解石、绢云母交代, 含量 35% ~ 40%; 石英他形粒状, 大小一般 0.5 ~ 2 mm, 填隙

表 1 北部湾盆地南部拗陷福山凹陷福深热 1 井实钻岩石地层及岩性简表

Table 1 Brief rock strata and lithology of the Well FSR-1 in Fushan Sag, Southern Depression, Beibu Bay Basin

统	组	段	深度(m)	岩性概述
			0 ~ 20	灰黄色黏土、沙砂等松散堆积物
上新统	望楼港组		2 ~ 160	灰、灰黄中粒砂岩与泥岩不等厚互层
中新统	灯楼角组		160 ~ 290	浅灰-灰黄色中粒砂岩、细粒砂岩和砂砾岩,底部含 5m 厚玄武岩
	角尾组		290 ~ 550	灰绿色泥岩、砂砾岩、含砾砂岩
	下洋组		550 ~ 770	灰-灰白色、灰绿色泥岩、细砂岩、含砾砂岩及砂砾岩
渐新统	涠洲组	三段	770 ~ 1363	灰白色含砾砂岩及砂砾岩与棕红色泥岩不等厚互层
始新统	流沙港组	一段	1363 ~ 1470	灰色粉砂岩与紫灰色泥岩不等厚互层,底部夹 5m 凝灰岩
古新统	长流组		1470 ~ 1865	上部为棕红色泥岩、粉砂质泥岩与浅灰色细砂岩不等厚互层;中部为棕红色-紫红色泥岩、粉砂质泥岩;底部为紫红色粉砂质泥岩、灰白色泥质粉砂岩夹灰色细砂岩
		花岗岩	1865 ~ 2058	灰绿色、灰白色、肉红色中粗粒蚀变花岗岩,发育绿泥石化、绿帘石化和绢云母化蚀变,局部夹泥岩、粉砂岩
上白垩统	报万组		2058 ~ 3390	上部为灰白色砂砾岩与灰色泥岩不等厚互层;中部为棕红-紫红色泥岩、泥质粉砂岩与灰色细砂岩和杂色砂砾岩不等厚互层;紫红色-棕红色钙质泥岩、钙质粉砂岩,夹少量灰白色泥质粉砂岩和细砂岩
下白垩统	鹿母湾组		3390 ~ 4615	顶部为灰白色、紫红色、杂色砂砾岩、含砾粗砂岩;上部为紫红色-棕红色钙质泥岩、钙质粉砂岩夹少量灰白色泥质粉砂岩和细砂岩;中部为紫红色泥质粉砂岩和紫红色-杂色砂砾岩不等厚互层;下部为紫红色、灰紫色粉砂质泥岩夹紫红色泥岩和灰紫色细砂岩;底部为灰紫色含砾粗砂岩、杂色砾岩、砂砾岩夹灰紫色-紫红色粉砂质泥岩
海西期-印支期花岗岩			4615 ~ 5200	灰白色-浅灰色中-细粒黑云母花岗岩、黑云母二长花岗岩与深灰色-灰黑色中-粗粒片麻状花岗岩闪长岩、辉石闪长岩等

状、定向分布,集合体透镜状定向分布,含量 20% ~ 25%;不透明矿物含量 1% ~ 2%。定名为蚀变中细粒二长花岗岩(图 5e)。

样品 FSR1-1875 和 FSR1-1877,中细粒花岗—碎裂结构,块状构造。岩石主要斜长石、钾长石、石英及黑云母组成,不透明矿物少量。斜长石半自形板状,大小一般 0.5 ~ 2 mm,杂乱分布,被绢云母及方解石、白云母交代,含量 65% ~ 70%;钾长石半自形板状,大小一般 2 ~ 3 mm,星散状分布,含量 5% ~ 10%;石英他形粒状,大小一般 0.5 ~ 1 mm,填隙状分布,可见波状消光,含量 20% ~ 25%;黑云母含量 1% ~ 5%;不透明矿物 5% 左右。定名为蚀变碎裂状中细粒花岗闪长岩(图 5f)。

4 测试方法

笔者等对 FSR1-1871、FSR1-1872、FSR1-1874、FSR1-1877 4 个岩芯样品和 FSR1-1970、FSR1-2005 2 个岩屑样品进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年。

锆石 U-Pb 同位素定年在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成,分析所

用仪器为 AnalytikJena PQMS Elite 型 ICP-MS 及与之配套的 RESOLUTION 193 nm 准分子激光剥蚀系统。激光剥蚀所用斑束直径为 24 μm ,频率为 6 Hz,能量密度约为 6 J/cm^2 ,以 He 为载气。LA-ICP-MS 激光剥蚀采样采用单点剥蚀的方式,测试前先用锆石标样 GJ-1 进行调试仪器,使之达到最优状态。锆石 U-Pb 定年以标样 GJ-1 为外标,微量元素含量利用 NIST 610 做为外标、Si 做内标的方法进行定量计算(Liu Yongsheng et al., 2010)。测试过程中在每测定 10 个样品前后重复测定两个锆石标样 GJ-1 对样品进行校正,并测量一个锆石 Plesovice,观察仪器的状态以保证测试的精确度。数据处理采用 ICPMS DataCal 程序(Liu Yongsheng et al., 2010),测量过程中绝大多数分析点 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 1000$,未进行普通铅校正, ^{204}Pb 含量异常高的分析点可能在计算时剔除,锆石年龄谐和图用 Isoplot 3.0 程序获得。

5 结果

样品锆石多发育振荡环带,未见明显核幔结构,

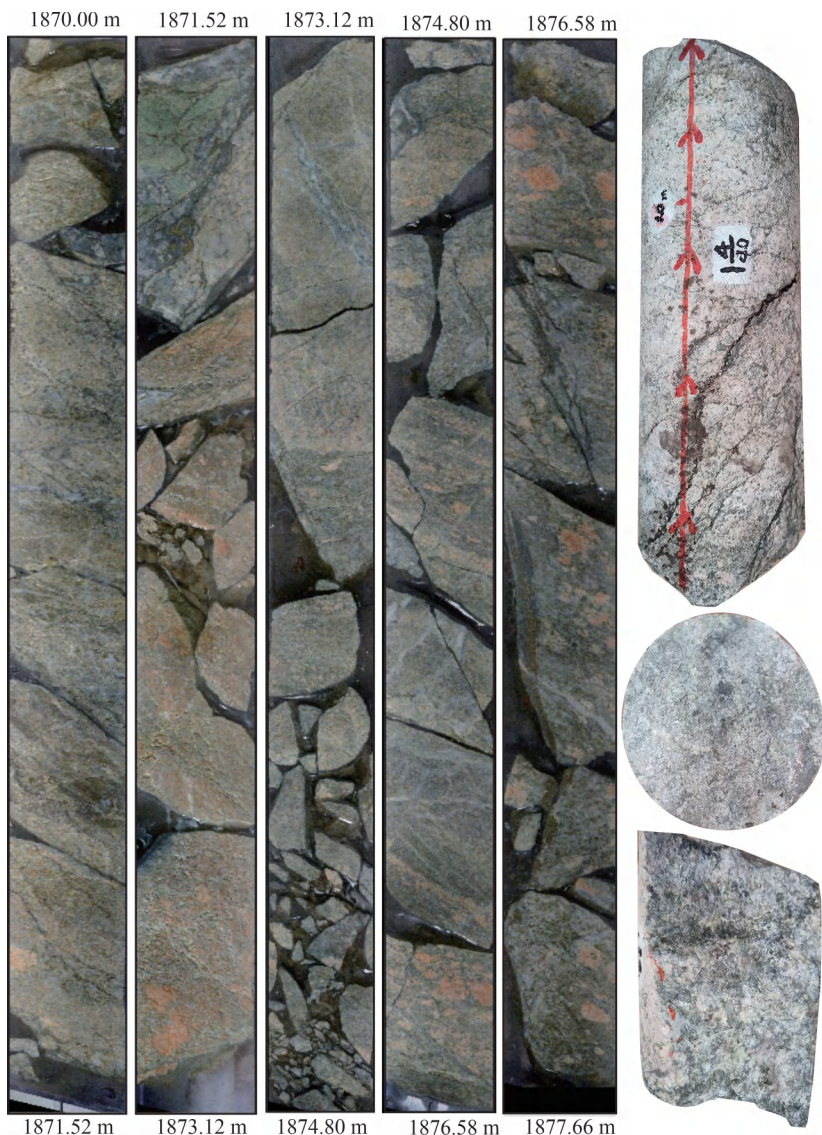


图4 北部湾盆地南部拗陷福山凹陷福深热1井1870.00~1877.66 m花岗岩岩芯照片

Fig. 4 Photo of granite core from 1870.00~1877.66 m in the Fushan Sag, Southern Depression, Beibu Bay Basin

Th/U 值多大于 0.1, 表明为岩浆成因。

样品 FRS1-1871 测年共获得 40 个测点, 剔除谐和度低于 95% 的测点后, 形成年龄聚集区的加权平均年龄为 259.80 ± 0.95 Ma ($MSWD = 1.2, n = 25$) (图 6a, b) (附表 1; 见网络版文末; 纸质版不印刷); 样品 FRS1-1872 测年共获得 40 个测点, 形成年龄聚集区的加权平均年龄为 260.70 ± 0.77 Ma ($MSWD = 0.65, n = 19$) (图 6c, d); 样品 FRS1-1874 测年共获得 40 个测点, 形成年龄聚集区的加权平均年龄为 258.70 ± 0.79 Ma ($MSWD = 1.2, n = 30$) (图 6e, f); 样品 FRS1-1877 测年共获得 60 个测点, 形成年龄聚

集区的加权平均年龄为 259.80 ± 0.77 Ma ($MSWD = 1.12, n = 42$) (图 6g, h)。

样品 FRS1-1970 测年共获得 40 个测点, 形成年龄聚集区的加权平均年龄为 250.1 ± 1.1 Ma ($MSWD = 0.97, n = 30$) (图 6a, b); 样品 FRS1-2005 测年共获得 65 个测点, 其中形成年龄聚集区 1 的加权平均年龄为 250.1 ± 1.1 Ma ($MSWD = 0.46, n = 16$) (图 7c, d), 年龄聚集区 1 的加权平均年龄为 258.8 ± 1.1 Ma ($MSWD = 1.19, n = 31$) (图 7e, f)。

6 讨论

6.1 花岗岩结晶时代与空间分布

海南岛花岗岩体分布广泛, 约占到全岛总面积 1/3 以上, 岩浆活动具有多期特征, 可分为晋宁、加里东、海西—印支以及燕山等多期, 其中以印支期和晚燕山期最为显著 (李孙雄等, 2012; 唐立梅等, 2014; 刘飞等, 2022)。

海南岛经历了早二叠世中—晚期至晚二叠世同碰撞阶段, 发育大量壳幔混合型花岗岩 (I 型)、壳源花岗岩和 A 型花岗岩、铁镁质岩等, 具有弧岩浆的特征, 是古特提斯洋或古太平洋板块向华南板块之下俯冲的产物 (谢才富等, 2006; 李孙雄等, 2012; 刘飞等, 2022; 吕方等, 2023; 齐重向等, 2023)。而三叠纪转入了后碰撞构造岩浆演化阶段 (250 ~ 200 Ma), 中—晚三叠世 (240 ~ 230 Ma) 存在

典型与伸展作用有关的岩浆事件 (Tang Limei et al., 2013a, 2013b; 唐立梅等, 2014; 刘飞等, 2022)。

福深热 1 井白垩系顶部花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 260.7 ~ 250.0 Ma 之间, 表明该套花岗质岩石的结晶时代为中二叠世—早三叠世。海西期花岗岩在北部湾盆地及海南岛北部均有发育, 前人在北部湾盆地乌石凹陷乌石 1 井钻获花岗岩基底, 锆石 U-Pb 结果表明花岗岩形成时代为 254.2 ± 1.3 Ma (郑和荣等, 2020)。福山凹陷花场地区油气钻井揭示, 侵入于古新统长流组流二段的辉绿岩中捕获的锆石, 其

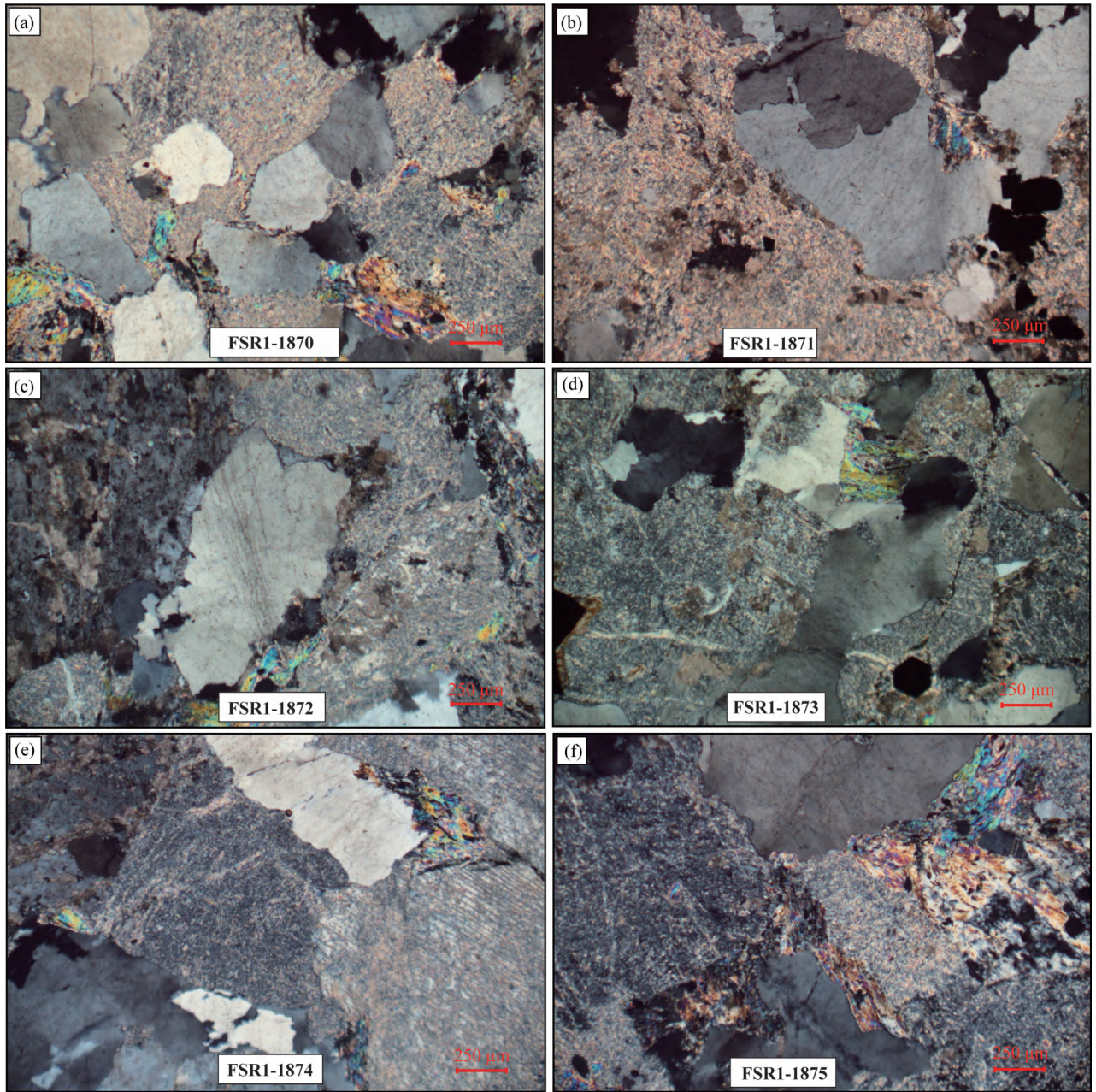


图 5 北部湾盆地南部拗陷福山凹陷福深热 1 井 1870 ~ 1877.66 m 花岗岩显微照片
 Fig. 5 Micrographs of typical granite samples from 1870 ~ 1877.66 m in the Well FSR-1 in
 the Fushan Sag, Southern Depression, Beibu Bay Basin

U-Pb 年龄为 260 ± 8 Ma (林正良等, 2016), 为岩浆在上侵过程中捕获的围岩地质体中的锆石。福山凹陷陆区东侧的基岩浅覆盖区云龙凸起, 钻遇大量海西期花岗岩 (图 8), 钻遇深度在 50 ~ 250 m, 花岗岩顶面发育风化壳及破碎带, 其上发育花岗质砾岩。近年来在海南岛东北部木栏头变质杂岩中的也发现二叠纪侵入岩, 时代为 281 ± 2 Ma、 261 ± 2 Ma (刘晓春等, 2022) 和 275.7 ± 2.2 Ma (胡在龙等, 2023)。

20 世纪 80 年代, 地调部门在北部湾盆地福山

凹陷西秀低凸起上部署实施的福 3 井, 位于福深热 1 井西北侧 2 km, 福 3 井在 1872.5 m 钻穿新生界, 白垩系与古近系之间发育一套岩浆岩, 此前未对该套岩浆岩做定年分析, 本次研究初步认为, 其与福深热 1 井白垩系与古近系之间的岩浆岩为同一套地质体, 表明该花岗质夹层在空间上有一定规模。

6.2 花岗岩推覆时代

本次研究在福深热 1 井 1865 ~ 2058 m 发现的花岗质岩石夹持于上白垩统报万组与古新统长流组

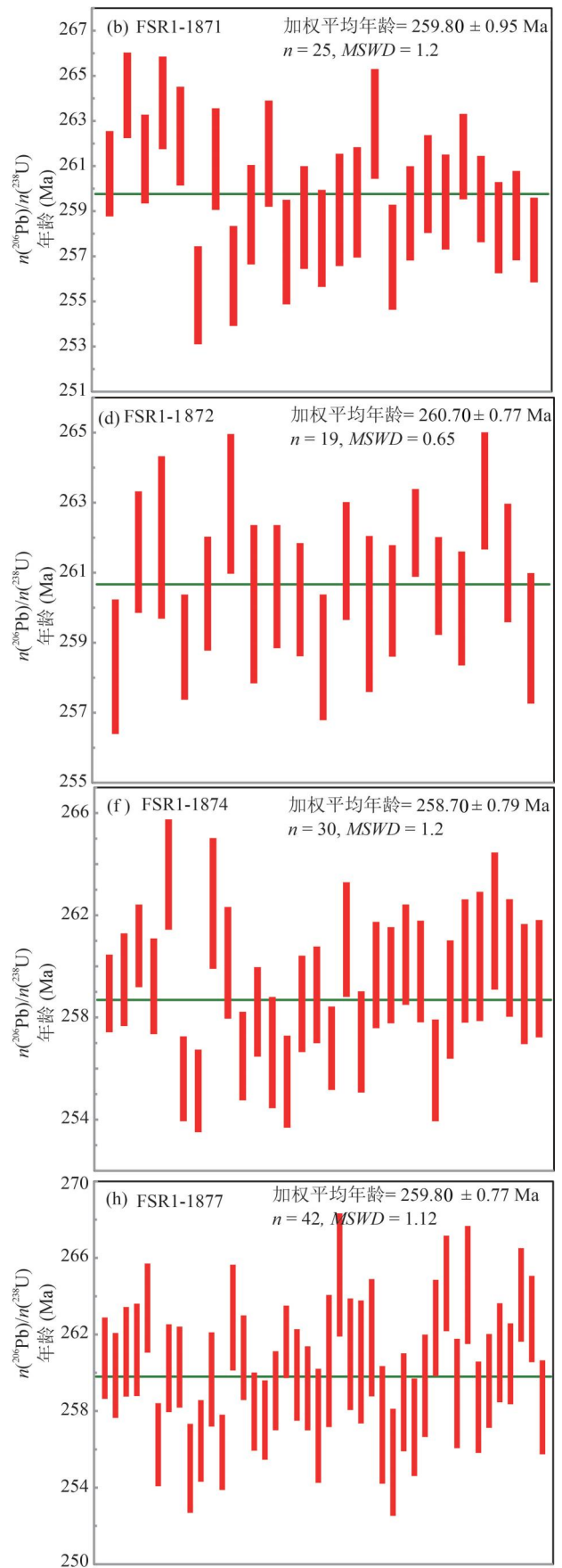
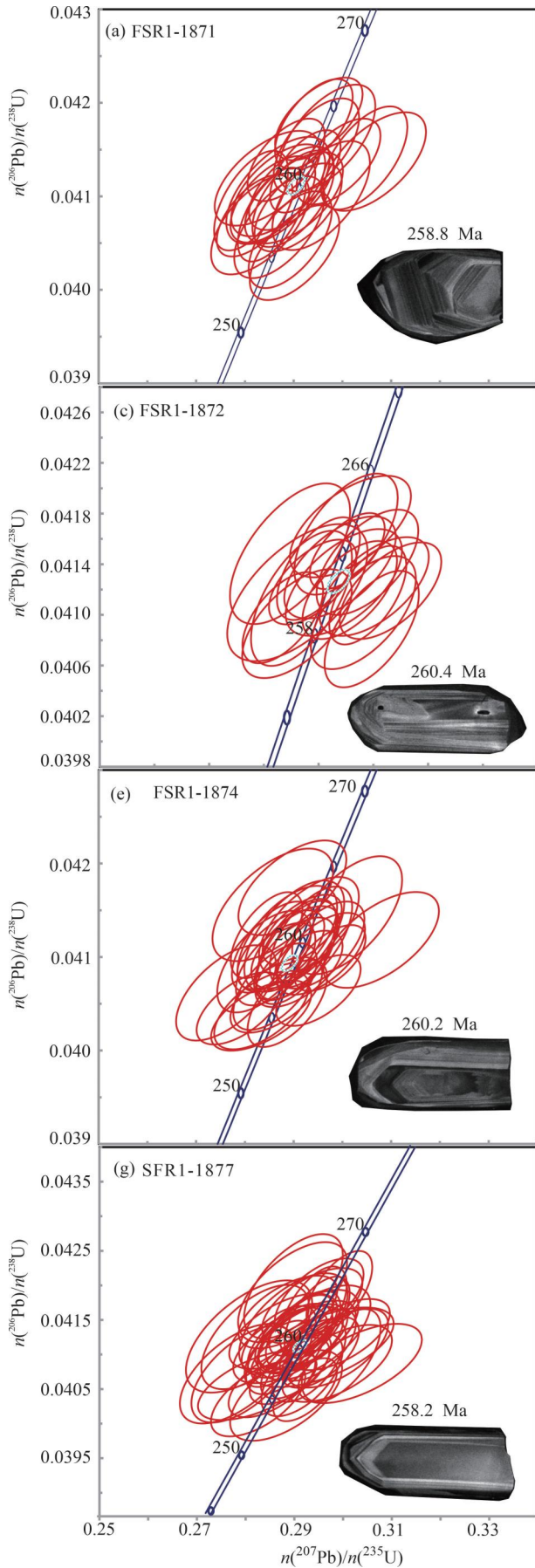


图 6 北部湾盆地南部拗陷福山凹陷福深热 1 井花岗岩岩芯锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 6 Concordia diagrams for zircon U-Pb analyses of granite Core sample from the Well FSR-1 in the Fushan Sag, Southern Depression, Beibu Bay Basin

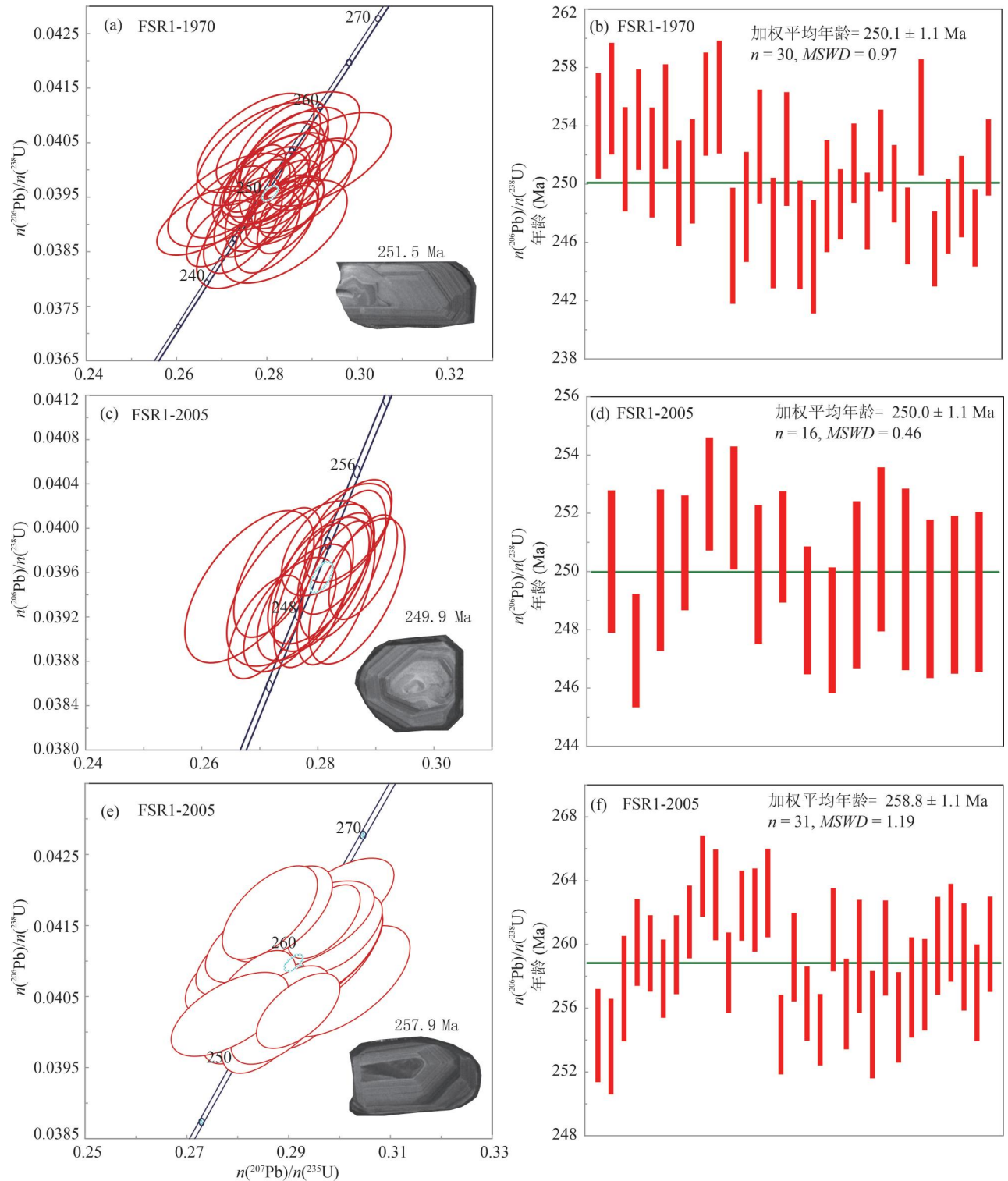


图 7 北部湾盆地南部拗陷福山凹陷福深热 1 井花岗岩岩屑锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 7 Concordia diagrams for zircon U-Pb analyses of granite debris sample from the Well FSR-1 in the Fushan Sag, Southern Depression, Beibu Bay Basin

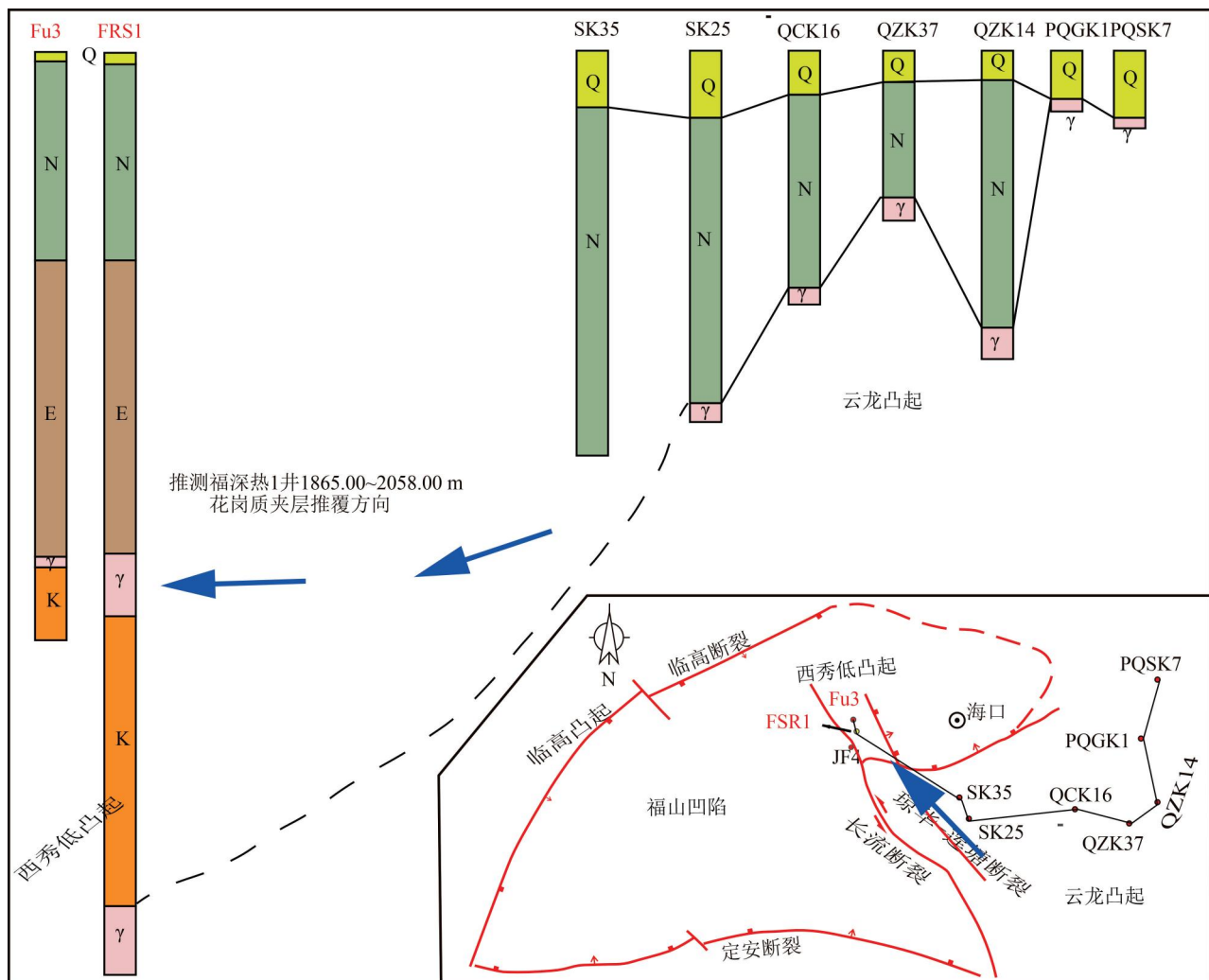


图 8 北部湾盆地南部拗陷福山凹陷西秀低凸起—云龙凸起钻遇花岗岩联井剖面图

Fig. 8 Cross section of the granite met in wells in the Xixiu low High—Yunlong High of the Fushan Sag, Southern Depression, Beibu Bay Basin

之间,该套花岗岩岩石推覆的时间应该介于上下两套地层的沉积时代之间。

海南岛白垩系分为下白垩统鹿母湾组(K_1l)和上白垩统报万组(K_2b)。报万组系中国科学院地质研究所(1958)在乐东县报万村创建,后经多次修订,2012年《海南省区域地质志》将报万组时代定为晚白垩世,代表性剖面为山荣—南美剖面,参考性剖面为乐东县千家镇长茅岭剖面(李孙雄等,2012)。

报万组在海南岛出露较少,仅分布在白沙盆地西南部、阳江盆地、雷鸣盆地、乐东盆地、定安盆地(符国祥等,2001;付璐露等,2010;李孙雄等,2012;许丽丽等,2017)。以紫红色薄—中厚层状泥质细粒长石砂岩夹粉砂岩的出现作为该组底界与下伏鹿母湾组紫灰色凝灰岩夹火山角砾岩呈整合接触,未

见顶,厚度386~1439 m。白沙盆地南西段山荣—南美剖面以细粒长石砂岩为主,夹钙质泥岩、粉砂质细砂岩、长石粉砂岩。长茅剖面,下部主要为含长石岩屑杂砂岩,夹粉砂岩,中部为泥质粗粉砂与粉砂质泥岩不等厚产出,上部为粗中—中细粒岩屑长石杂砂岩、复成分砾岩、含砾长石粗砂岩,夹薄层泥岩、粉砂岩。阳江盆地东太农场尖岭剖面下部为岩屑长石杂砂岩、铁泥质粉砂岩不等厚产出,上部为岩屑长石砂岩、复成分砾岩、粉砂质泥岩、长石石英砂岩(李孙雄等,2012)。本次中国石油化工股份有限公司首次在海南岛北部福山凹陷钻穿白垩系,初步划分的报万组厚度为1332 m。

《海南省区域地质志》(李孙雄等,2012)综合考虑海南白垩纪岩石地层时代的具体情况认为,整合

于报万组之下的鹿母湾组时代已被确定为早白垩世,报万组中含孢粉化石的下段为晚白垩世早期,上段为晚白垩世晚期(李孙雄等,2012)。本研究对福深热 1 井 2120 ~ 2220 m 井段的岩石样品进行了孢粉分析(孢粉挑选和鉴定在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室进行),结果显示福山凹陷钻遇的报万组时代为晚白垩世早期,具体属晚白垩世赛诺期(未发表资料),应属于报万组下段。同时福深热 1 井测井结果显示,报万组顶部 2080 ~ 2200 m 段,电阻率 LLD 异常高,指示该段地层富水,可能由于报万组沉积之后,受构造环境转变,挤压抬升至地表而遭受风化剥蚀改造,孔渗条件较好,表明该套花岗岩推覆时间与报万组沉积之后有一定的时间间隔,笔者等初步将该套花岗岩推覆时间的下限定为晚白垩世中—晚期。

古新统长流组(E_1ch)为不整合于前古近系之上,整合于流沙港组之下的一套杂色碎屑岩,主要是(洪)冲积相沉积,岩性特征为棕红色、紫红色泥岩与棕红色砂岩、砂砾岩不等厚互层,含钙质,岩性总体为下细上粗。区内长流组主要隐伏于北部湾盆地福山凹陷、白莲盆地一带。长流组厚度变化较大,在凸起缺失,在凹陷较厚,福山凹陷钻井揭示的该套地层厚度达到 940 m,在深凹处可达 1700 m(李孙雄等,2012),此次福深热 1 井长流组厚度为 395 m。我们通过对福深热 1 井 1705 ~ 1720 m 井段的孢粉分析表明,该地层时代为古新世(未发表资料),表明该套花岗岩推覆时间上限为古新世。

综上,结合上部长流组 and 下部报万组沉积时代,本研究将福深热 1 井位中 1865 ~ 2058 m 花岗质岩石的推覆时间限定在晚白垩世中晚期—古近纪古新世之间。

6.3 海南岛北部白垩纪晚期挤压构造

福深热 1 井测井结果显示,中—新生界整体倾向 NE,倾角 $6^\circ \sim 41^\circ$,白垩系倾角小于古近系倾角(表 2),夹持于白垩系和古近系之间的花岗质体底部 2057 ~ 2077 m 发育高角度裂缝,总体倾向 SW,与井区西侧 6 km 处的长流断裂产状一致(表 3)。

结合地质年代、测井数据解释的产状、花岗质夹层岩石学特征、断裂构造等,本研究初步分析海南岛北部福深热 1 井白垩系和古近系之间的花岗质夹层的形成机制。该套花岗质岩石结晶形成于中二叠世—早三叠世,在海南岛北部较发育,广域电磁探测结果显示,云龙凸起的花岗质基底成片分布(谭慧等,2020)。晚白垩世中—晚期(报万组沉积之后),

表 2 北部湾盆地南部拗陷福山凹陷福深热 1 井古近系长流组和白垩系地层产状

Table 2 Occurrence of the E_1ch and Cretaceous in Well FSR-1 in Fushan Sag, Southern Depression, Beibu Bay Basin

层位	井段(m)	倾角($^\circ$)	倾向($^\circ$)
E_1ch	1460.0 ~ 1600.0	29 ~ 41	25 ~ 60
K	2400.0 ~ 2641.0	10 ~ 20	45 ~ 68
	2641.0 ~ 2760.0	12 ~ 18	20 ~ 40
	2805.0 ~ 2960.0	6 ~ 16	25 ~ 45
	2960.0 ~ 3300.0	8 ~ 20	30 ~ 50
	3390.0 ~ 3870.0	12 ~ 26	45 ~ 65
	4095.0 ~ 4310.0	7 ~ 16	40 ~ 60

表 3 北部湾盆地南部拗陷福山凹陷福深热 1 井花岗岩底部裂缝产状

Table 3 Occurrence of cracks at the bottom of granite in the Well FSR-1 in Fushan Sag, Southern Depression, Beibu Bay Basin

深度(m)	裂缝	产状	
		倾角($^\circ$)	倾向($^\circ$)
2057.3	高导缝	38	309
2057.6	高导缝	63	225
2063.8	高导缝	55	223
2066.4	高导缝	82	242
2070.8	高导缝	71	301
2073.6	高导缝	48	206
2075.6	高导缝	60	247
2077.3	高导缝	45	105

海南岛北部受到区域挤 NW—SE 向压应力的作用,早期先存断裂长流断裂被重新激活,断层性质转为左旋走滑兼逆冲,将原本位于福深热 1 井东南处,近 200 m 厚度的花岗质地体由云龙凸起走滑推覆至西秀低凸起晚白垩系报万组之上(图 8),花岗体底部 20 m 厚位置因受到长流断裂的作用力最强,发育高密度的高角度裂缝(福深热 1 井 2057 m 至 2077 m),产状与长流断裂一致;同时,作为超壳断裂的长流断裂,该时期的活动,作为流体传输通道,使得深部热液流体向上运动,在断裂走滑作用的温压条件下,使得该套花岗质体发生动力变质作用(低温热液蚀变,200 ~ 300 $^\circ\text{C}$),形成相应的蚀变矿物(黄铁矿),原岩发生绢云母化、绿泥石化等。古近纪,随着南海扩张作用,海南岛南北部发生差异性构造演化,以定安断裂(王五一文教断裂)为界,北部的雷琼裂谷区域伸展沉降,长流断裂转换为伸展和走滑为主,西秀低凸起开始接受古新统长流组沉积,覆盖于该套花岗质岩体之上,之后稳定接受新生界沉积

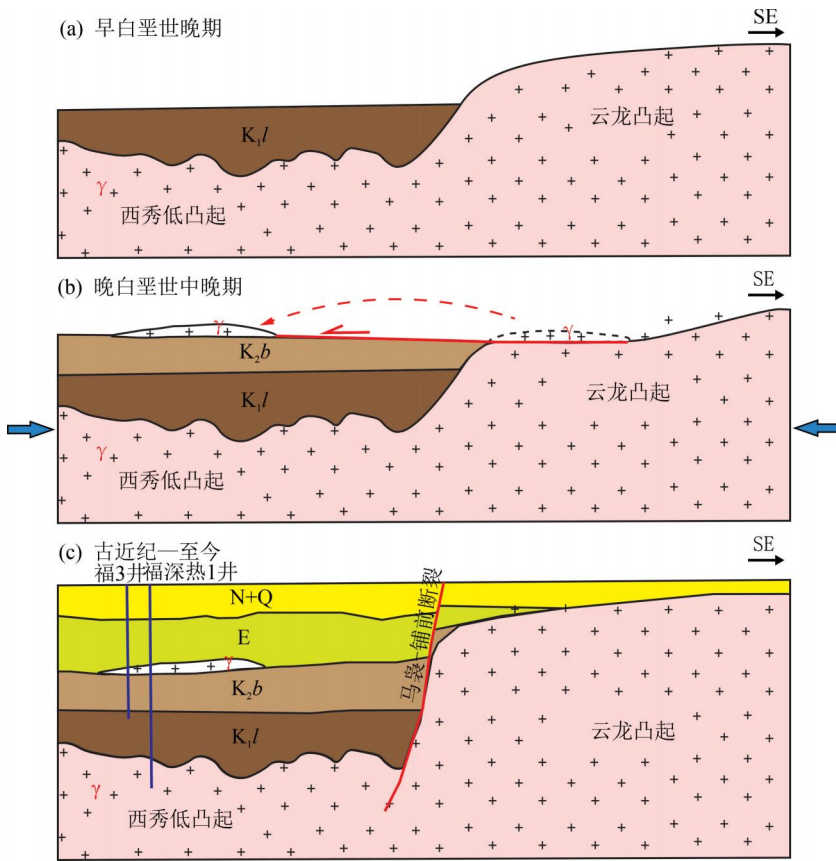


图9 白垩纪至今海南岛北部—北部湾盆地福山凹陷南部构造演化模式图
Fig. 9 Evolution Model of the Northern Hainan Island—Southern Fushan Sag in the Beibu Bay Basin from the Cretaceous to the Present

至今(图9)。

福深热1井内白垩系和古近系之间的花岗质夹层的发现,表明海南岛北部在白垩纪晚期发生了一期NW—SE向挤压构造,该期挤压构造在区域上也有相应的地质记录。秦咏辉等(2022)在对华南南缘广西玉林盆地白垩纪—古近纪的盆地演化研究中,重点分析了盆地上白垩统与古近系之间角度不整合的构造特征、时限及变形机制,认为晚白垩世晚期华南南缘发生了NW—SE向挤压构造反转,形成了白垩系罗文组与古近系邕宁群之间的角度不整合,并结合前人研究,将该事件的年龄限定在82~65 Ma之间;并初步讨论了该期挤压构造反转的动力学机制,认为可能是来自华南以东或以南地区的构造事件,一种观点是同期古南海的扩张洋脊的推力导致了该时期的挤压;另一种观点是晚白垩世向西俯冲的古太平洋板块俯冲角度变小,与上覆板块的耦合度增强驱使华南南缘发生构造反转。张训华等(2008)在认为,白垩纪末—古近纪初南海北部陆

缘由长期的北西—南东向挤压应力场转化为北西—南东向拉张,陆缘解体形成一系列拉张盆地。Ye Qing等(2018)在对南海北部珠江口盆地前新生代断裂系统的研究中,识别出的NEE向断裂系统在72~66 Ma由伸展转为逆冲,认为南海北缘在早白垩世—晚白垩世之交和晚白垩世晚期均发生了由伸展到挤压的构造反转的直接证据。前人在珠江口盆地潮汕凹陷识别出的新生界与上白垩统之间的角度不整合接触关系(张素芳等,2015),以及华南南缘—南海北缘上白垩统上部—古新统下部的大范围缺失(邢光福等,2009; Zhang Gongcheng et al., 2019; Zhang Hao et al., 2020),皆可证明晚白垩世华南挤压构造的存在。华南白垩纪岩浆岩记录(~86 Ma之后华南陆内的岩浆活动基本处于寂静期)也暗示了华南板块在晚白垩世之后处于挤压的构造背景(Li Jianhua et al., 2014b)。

7 结论

(1)本研究在海南岛北部首次发现一套介于古近系长流组和白垩系报万组之间的花岗质岩石,锆石U-Pb定年结果表明该套花岗质岩石结晶时代为中二叠世—早三叠世(260.7~250.0 Ma)。

(2)结合古近系长流组和白垩系报万组沉积时代及花岗岩底部密集的裂隙和蚀变,笔者等认为该套花岗质岩石是在上白垩统报万组沉积之后被推覆于其上,后被古新统长流组沉积覆盖。推覆时间限定在晚白垩世中—晚期—古新世之间。

(3)结合前人研究,笔者等认为,海南岛北部白垩纪晚期存在一期NW—SE向挤压构造,为华南晚中生代伸展—挤压构造转换的研究提供了新的证据。

参 考 文 献 / References

- (The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "•" is in Chinese without English abstract)
- 付璐露,沈忠悦,贺丽,董传万,程晓敢,唐立梅,杨树锋. 2010. 海南岛白垩纪古地磁结果及其构造地质意义. 地质学报, 84

- (2): 183~194.
- 胡在龙, 赵小明, 王勇, 魏昌欣, 吕昭英, 吕婧艳. 2023. 海南岛木兰头地区混合片麻岩的成因及其地质意义. 地质力学学报, 29(5): 720~735.
- 黄保家, 黄合庭, 吴国瑄, 游君君. 2012. 北部湾盆地始新统湖相富含有机质页岩特征及成因机制. 石油学报, 33(1): 25~31.
- 李春荣, 张功成, 梁建设, 赵志刚, 徐建永. 2012. 北部湾盆地断裂构造特征及其对油气的控制作用. 石油学报, 33(2): 195~203.
- 李建华, 董树文, 赵国春, 张岳桥, 辛宇佳, 王金铭, 卢运可. 2024. 华南晚中生代大陆变形、深部过程及动力学. 地质学报, <https://doi.org/10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2024005>.
- 李美俊, 王铁冠, 刘菊, 张梅珠, 卢鸿, 马庆林, 高黎惠. 2007. 北部湾盆地福山凹陷原油充注方向及成藏特. 石油实验地质, 29(2): 172~177.
- 李孙雄, 云平, 林义华, 陈哲培. 2012. 海南省区域地质志[M]. 海南省地质调查院. 北京: 地质出版社.
- 李薇, 贾丽云, 胡道功, 张绪教, 夏蒙蒙, 蔺文杰, 袁悦. 2019. 琼北老城剖面记录的马袅—铺前断裂西段晚更新世活动历史. 现代地质, 33(5): 970~978.
- 林正良, 李红敬, 张永超, 廖远涛, 马庆林, 刘恩涛. 2016. 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. 大地构造与成矿学, 40(5): 1064~1074.
- 廖飞燕, 时阳, 张远泽, 卢政环, 郭浩, 李晓寒. 2024. 北部湾盆地福山凹陷晚始新世物源示踪与源汇系统耦合. 地质论评, 70(6): 2243~2254.
- 刘飞, 杨经绥, 冯光英, 牛晓露, 李观龙, 张超凡. 2022. 古太平洋板块晚二叠—早三叠世俯冲后撤: 来自海南岛弧岩浆作用的制约. 岩石学报, 38(11): 3455~3483.
- 刘晓春, 胡娟, 陈龙耀, 夏蒙蒙, 韩建恩, 胡道功. 2022. 海南岛东北部木栏头变质杂岩的组成, 时代及其区域大地构造意义. 地质学报, 96(9): 3051~3083.
- 鲁宝亮, 王万银, 张功成, 冯旭亮, 纪晓琳. 2016. 南海深部过程及与含油气盆地耦合关系研究进展. 地球物理学进展, 31(3): 1342~1350.
- 吕方, 辛宇佳, 李建华, 王金铭. 2023. 海南岛二叠纪—三叠纪构造演化: 源自岩浆岩和变质岩同位素年代学和地球化学的约束. 地质学报, 97(1): 30~51.
- 孟令箭, 童亨茂, 蔡东升, 刘明全, 李绪深. 2009. 北部湾盆地涠西南凹陷断裂系统成因的砂箱实验研究及启示. 高校地质学报, 15(2): 246~255.
- 齐重向, 温淑女, 庞崇进, 梁航, 王勇, 官军, 余红霞. 2023. 海南岛北部中三叠世 A 型花岗岩的成因及其地质意义. 地球化学, 52(01): 69~83.
- 秦咏辉, 田云涛, 陈东旭, 张增杰. 2022. 海南南缘晚白垩世晚期的构造反转及其机制——来自广西玉林盆地的证据. 大地构造与成矿学, 46(5): 911~923.
- 舒良树, 周新民. 2002. 中国东南部晚中生代构造作用. 地质论评, 48(3): 249~260.
- 舒良树. 2012. 华南构造演化的基本特征. 地质通报, 31(7): 1035~1053.
- 谭慧, 凌帆, 瓮晶波, 李杰, 范元亮. 2020. 广域电磁法在海南深层干热岩探测中的应用. 中国石油和化工标准与质量, 1: 150~152.
- 唐立梅, 陈汉林, 董传万. 2014. 海南岛晚中生代花岗闪长岩及其包裹体的锆石 U-Pb 定年及构造意义. 地质科学, 49(1): 259~274.
- 唐梅华, 巫建华. 2017. 华南内陆早白垩世中期挤压构造事件的地质证据. 大地构造与成矿学, 41(2): 258~271.
- 王观宏, 甘华军, 赵迎冬, 陈善斌, 马丽娜. 2015. 北部湾盆地福山凹陷流沙港组湖底扇的沉积特征及其对构造事件的响应. 地质论评, 61(z1): 728~729.
- 汪相. 2022. 中国东南部黄山运动及其花岗质岩浆活动与成矿作用. 地质论评, 68(5): 1677~1728.
- 吴孔友, 刘煜磊, 胡德胜, 刘寅, 张帅, 崔立杰. 2021. 北部湾盆地乌石凹陷东段断裂类型及其形成演化. 地质力学学报, 27(1): 52~62.
- 谢才富, 朱金初, 丁式江, 张业明, 陈沐龙, 傅杨荣, 付太安, 李志宏. 2006. 海南尖峰岭花岗岩体的形成时代、成因及其与抱伦金矿的关系. 岩石学报, 22(10): 2493~2508.
- 邢光福, 陈荣, 杨祝良, 周宇章, 李龙明, 姜杨, 陈志洪. 2009. 东南沿海晚白垩世火山岩活动特征及其构造背景. 岩石学报, 25(1): 77~91.
- 许丽丽, 吴星根, 陈华祝, 黄伟. 2017. 雷鸣盆地白石岭—谷山岭地区白垩系组万组沉积特征研究. 矿产勘查, 8(3): 400~408.
- 闫成国, 江娃利. 2007. 琼北地区北西方向长流—仙沟断裂带晚第四纪活动及与火山活动关系的讨论. 震灾防御技术, 2(3): 230~242.
- 杨文采. 2022. 形成闽浙火山岩带的洋陆转换作用. 地质论评, 68(2): 375~384.
- 杨文采. 2018. 扬子区地壳密度扰动成像和华南燕山期花岗岩成因. 地质论评, 64(5): 1045~1054.
- 张国伟, 郭安林, 王岳军, 李三忠, 董云鹏, 刘少峰, 何登发, 程顺有, 鲁如魁, 姚安平. 2013. 中国华南大陆构造与问题. 中国科学: 地球科学, 43(10): 1553~1582.
- 张昊, 童亨茂. 2015. 裂陷盆地断裂系统叠加模式——以北部湾盆地迈陈凹陷为例. 地质论评, 61(z1): 963~964.
- 张素芳, 张向涛, 张青林, 余清华. 2015. 南海北部白垩系发育特征及构造意义. 海洋地质与第四纪地质, 35(6): 81~86.
- 张训华, 孟祥军, 许红. 2008. 中国海域构造地质学[M]. 北京: 海洋出版社, 1~170.
- 张岳桥, 董树文, 李建华, 崔建军, 施炜, 苏金宝, 李勇. 2012. 华南中生代大地构造研究新进展. 地球学报, 33(3): 257~279.
- 张族坤, 徐亚军, 刘强, 杨坤光, 杜远生. 2019. 华南东部白垩纪晚期—古近纪构造转换的沉积记录——以粤北南雄盆地为例. 大地构造与成矿学, 43(3): 575~589.
- 郑和荣, 罗军, 张英, 冯建赞, 曾彦, 王鸣川. 2022. 北部湾盆地乌石凹陷发现晚二叠世花岗岩: 来自乌石 1 井岩芯锆石 U-Pb 年龄的证据. 中国地质, 49(4): 1350~1352.
- 朱伟林, 江文荣. 1998. 北部湾盆地涠西南凹陷断裂与油气藏. 石油学报, 19(3): 6~10.
- Ding Ruxin, Min Kyoungwon, Zou Heping. 2019. Inversion of topographic evolution using low-T thermal history: A case study from coastal mountain system in Southeastern China. Gondwana Research, 67: 21~32.
- Dong Shuwen, Zhang Yueqiao, Li Hailong, Shi Wei, Xue Huaimin. 2018. The Yanshan orogeny and late Mesozoic multi-plate convergence in East Asia ~ Commemorating 90th years of the 'Yanshan Orogeny'. Science China; Earth Sciences, 61(12): 1~22.
- Fu Lulu, Shen Zhongyue, He Li, Dong Chuangwan, Cheng Xiaogan, Tang Limei, Yang Shufeng. 2010. Cretaceous Paleomagnetic Results from Hainan Island. Acta Geologica Sinica, 84(2): 183~194.
- Gao Gang, Xu Xinde, Ou Tong, Gan Jun, Dang Wenlong, Zhou Xiaoxiao, Liu Fengyan. 2020. Petroleum origins and accumulation

- patterns in the Weixinan sag in the Beibu gulf basin, using subsag b as an example. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 94(5): 1515~1530.
- Hu Zailong, Zhao Xiaoming, Wang Yong, Wei Changxin, Lv Zhaoying, Lü Changyan. 2023#. Petrogenesis and geological significance of migmatitic gneiss in Mulantou area, Hainan Island. *Journal of Geomechanics*, 29(5): 720~735.
- Huang Baojia, Huang Heting, Wu Guoxuan, You Junjun. 2012#. Geochemical characteristics and formation mechanism of Eocene lacustrine organic-rich shales in the Beibuwan Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 33(1): 25~31.
- Li Chunrong, Zhang Gongcheng, Liang Jianshe, Zhao Zhigang, Xu Jianyong. 2012#. Characteristics of fault structure and its control on hydrocarbons in the Beibuwan Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 33(2): 195~203.
- Li Jianhua, Cawood P A, Ratschbacher L, Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, Xin Yujia, Yang Hang, Zhang Peixing. 2020. Building Southeast China in the late Mesozoic: Insights from alternating episodes of shortening and extension along the Lianhuashan fault zone. *Earth-Science Reviews*, 201(11~12): 103056.
- Li Jianhua, Dong Shuwen, Cawood P A, Zhao Guochun, Johnston S T, Zhang Yueqiao, Xin Yujia. 2018. An Andean-type retro-arc foreland system beneath northwest South China revealed by SINOPROBE profiling. *Earth and Planetary Science Letters*, 490: 170~179.
- Li Jianhua, Dong Shuwen, Zhao Guochun, Zhang Yueqiao, Xin Yujia, Wang Jinming, Lu Yunke. 2024#. Late Mesozoic continental deformation, deep processes, and geodynamic evolution of South China. *Acta Geologica Sinica*. <https://doi.org/10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2024005>.
- Li Jianhua, Ma Zhili, Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, Li Yong, Lu Miaohan, Tan Jingqiang. 2014a. Tectonic evolution of Cretaceous extensional basins in Zhejiang Province, eastern South China: Structural and geochronological constraints. *International Geology Review*, 56(13): 1602~1629.
- Li Jianhua, Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, Johnston S T. 2014b. Cretaceous tectonic evolution of South China: A preliminary synthesis. *Earth-Science Reviews*, 134(1): 98~136.
- Li Jianhua, Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, Li Hailong. 2012. Late Mesozoic—Early Cenozoic deformation history of the Yuanma Basin, central South China. *Tectonophysics*, 570~571(11): 163~183.
- Li Meijun, Wang Tieguan, Liu Ju, Zhang Meizhu, Lu Hong, Ma Qinglin, Gao Lihui. 2007#. Oil charging orientation and accumulation characteristics of oil reservoirs in the Fushan sag, Beibuwan basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 29(2): 172~177.
- Li Sunxiong, Yun Ping, Lin Yihua, Chen Zhepei. 2012#. Regional Geology of Hainan Province. Hainan Geological Survey. Geological Publishing House; Beijing: 1~293.
- Li Wei, Jia Liyun, Hu Daogong, Zhang Xujiao, Xia Mengmeng, Lin Wenjie, Yuanyue. 2019#. Late Pleistocene Tectonic History of the Western Segment of Maniao—Puqian Fault: Evidence from the Laocheng Section, Northern Hainan Island. *Geoscience*, 33(5): 970~978.
- Liao Feiyan, Shi Yang, Zhang Yuanze, Lu Zhenghuan, Guo Hao, Li Xiaohan. 2024#. Sediment provenance and source-to-sink coupling of the Late Eocene Fushan Sag in Beibu Bay Basin. *Geological Review*, 70(6): 2243~2254.
- Lin Zhengliang, Li Hongjing, Zhang Yongchao, Liao Yuantao, Ma Qinglin, Liu Entao. 2016#. Geochemistry and Tectonic Implications of the Paleogene Gabbros in Fushan Sag, Beibu Gulf Basin. *Geotectonica et Metallogenia*, 40(5): 1064~1074.
- Liu Fei, Yang Jingsui, Feng Guangying, Niu Xiaolu, Li Guanlong, Zhang Chaofan. 2022#. Late Permian to Early Triassic subduction and retreating of the Paleo Pacific slab: Constraints from continental arc magmatism in Hainan Island. *Acta Petrologica Sinica*, 38(11): 3455~3483.
- Liu Xiaochun, Hu Juan, Chen Longyao, Xia Mengmeng, Han Jianen, Hu Daogong. 2022#. The Mulantou metamorphic complex from northeastern Hainan Island, South China: compositions, ages and tectonic implications. *Acta Geologica Sinica*, 96(9): 3051~3083.
- Liu Yongsheng, Gao Shan, Hu Zhaochu, Gao Changgui, Zong Keqing, Wang Dongbing. 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt—peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths. *Journal of Petrology*, 55(15): 1535~1546.
- Lu Baoliang, Wang Wanyin, Zhang Gongcheng, Feng Xuliang, Ji Xiaolin. 2016#. Overview of the deep processes and their coupling relationships with the petroliferous basins in the South China Sea. *Progress in Geophysics*, 31(3): 1342~1350.
- Lü Fang, Xin Yujia, Li Jianhua, Wang Jinming. 2023#. Permian—Triassic tectonic evolution of Hainan Island: Constraints from geochronology and geochemistry of magmatic and metamorphic rocks. *Acta Geologica Sinica*, 97(1): 30~51.
- Meng Lingjian, Tong Hengmao, Cai Dongsheng, Liu Mingquan, Li Xushen. 2009#. Sandbox modeling on genetic mechanism of fault system in Weixinan Depression of the Beibuwan Basin and its inspiration. *Geol. J. China Univ.*, 15(2): 246~255.
- Qi Zhongxiang, Wen Shunv, Pang Chongjin, Liang Hang, Wang Yong, Guan Jun, Yu Hongxia. 2023#. Formation of Middle-Triassic A-type granites in northern Hainan Island and its geological implications. *Geochimica*, 52(1): 69~83.
- Qin Yonghui, Tian Yuntao, Chen Dongxu, Zhang Zengjie. 2022#. Latest Cretaceous Structural Inversion in Southeast Part of the South China and its Mechanism: Evidence from the Yulin Basin, Guangxi. *Geotectonica et Metallogenia*, 46(5): 911~923.
- Shu Liangshu, Zhou Xinmin. 2002#. Late Mesozoic Tectonism of Southeast China. *Geological Review*, 48(3): 249~260.
- Shu Liangshu. 2012#. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block. *Geological Bulletin of China*, 31(7): 1035~1053.
- Suo Yanhui, Li Sanzhong, Cao Xianzhi, Wang Xinyu, Ian Somerville, Wang Guangzeng, Wang Pengcheng, Liu Bo. 2020. Mesozoic—Cenozoic basin inversion and geodynamics in East China: A review. *Earth-Science Reviews*, 210: 103357.
- Tan Hui, Ling Fan, Weng Jingbo, Li Jie, Fan Yuanliang. 2020#. Application of Wide Area Electromagnetic Method in Deep Hot Dry Rock Exploration in Hainan. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 1: 150~152.
- Tang Limei, Chen Hanlin, Dong Chuanwan, Chu Fengyou. 2013b. Geochronology, Geochemistry and Its Tectonic Significance of Chahe Granites in Hainan Island. *Journal of Earth Science*, 24(4): 619~625.
- Tang Limei, Chen Hanlin, Dong Chuanwan, Yang Shufeng, Shen Zhongyue, Cheng Xiaogan, Fu Lulu. 2013a. Middle Triassic post-orogenic extension on Hainan Island: Chronology and geochemistry

- constraints of bimodal intrusive rocks. *Science China (Earth Sciences)*, 56(5): 783~793.
- Tang Limei, Chen Hanlin, Dong Chuanwan. 2014#. Zircon U-Pb dating and tectonic significance of Late Mesozoic granodiorite and its enclaves from Hainan Island. *Chin. J. Geol.*, 49(1): 259~274.
- Tang Meihua, Wu Jianhua. 2017#. Geological Evidence for Compression Events in the Middle Period of Early Cretaceous in Southeast China. *Geotectonica et Metallogenia*, 41(02): 258~271.
- Wang Guan hong, Gan Huajun, Zhao Yingdong, Chen Shanbin, Ma Lina. 2015#. Sedimentary characteristics of the bottom fan of the Liushagang Formation in the Fushan Sag of the Beibu Bay Basin and its response to tectonic events. *Geological Review*, 61(z1): 728~729.
- Wang Xiang. 2022#. Huangshan Movement in SE China and its granitic magmatism and mineralization. *Geological Review*, 68(5): 1677~1728.
- Wei Wei, Faure Michel, Chen Yan, Ji Wenbin, LinWei, Wang Qingchen, Yan Quanren, Hou Quanlin. 2015. Back-thrusting response of continental collision: Early Cretaceous NW-directed thrusting in the Changle—Nan'ao belt (Southeast China). *Journal of Asian Earth Sciences*, 100: 98~114.
- Wu Kongyou, Liu Yulei, Hu Desheng, Liu Yin, Zhang Shuai, Cui Lijie. 2021#. Types and evolution of faults in the east area of the Wushi sag, Beibuwan Basin. *J. Geomechanics*, 27(1): 52~62.
- Xie Caifu, Zhu Jinchu, Ding Shijiang, Zhang Yeming, Chen Mulong, Fu Yangrong, Fu Taian, Li Zhihong. 2006#. Age and petrogenesis of the Jianfengling granite and its relationship to metallogenesis of the Baolun gold deposit, Hainan Island. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2493~2508.
- Xing Guangfu, Chen Rong, Yang Zhuliang, Zhou Yuzhang, Li Longming, Jiang Yang, Chen Zhihong. 2009#. Characteristics and tectonic setting of Late Cretaceous volcanic magmatism in the coastal Southeast China. *Acta Petrologica Sinica*, 25(1): 77~91.
- Xu Lili, Wu Xinggen, Chen Huazhu, Huang Wei. 2017#. Study of sedimentary characteristics of Cretaceous Baowan Formation in Baishiling—Gushanling area, Leiming Basin. *Mineral Exploration*, 8(3): 400~408.
- Yan Chengguo, Jiang Wali. 2007#. Relationship Between the Activity of the Changliu · Xiangou Fault Zone in Late · Quaternary and Volcanic Activity in North Hainan Island. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2(3): 230~242.
- Yan Yi, Andy Carter, Bin Xia, Lin Ge, Stephanie Bricchau, Hu Xiaojiong. 2009. A fission-track and (U—Th)/He thermochronometric study of the northern margin of the South China Sea: An example of a complex passive margin. *Tectonophysics*, 474(3): 584~594.
- Yang Wencai. 2022#. The ocean—continent transition process on formation of Zhejiang—Fujian volcanic rock belt. *Geological Review*, 68(2): 375~384.
- Yang Wencai. 2018#. Crustal Density Imaging of Yangtze Craton and Formation of the Yanshanian Granitites in South China. *Geological Review*, 64(5): 1045~1054.
- Ye Qing, Mei Lianfu, Shi Hesheng, Camanni Giovanni, Shu Yu, Wu Jing, Yu Lu, Deng Peng, Li Gang. 2018. The Late Cretaceous tectonic evolution of the South China Sea area: An overview, and new perspectives from 3D seismic reflection data. *Earth-Science Reviews*, 187: 186~204.
- Zhang Gongcheng, Shao Lei, Qiao Peijun, Cao Licheng, Pang Xiong, Zhao Zhigang, Xiang Xuhong, Cui Yuchi. 2019. Cretaceous—Palaeogene sedimentary evolution of the South China Sea region: A preliminary synthesis. *Geological Journal*, 55(8): 2662~2683.
- Zhang Guowei, Guo Anlin, Wang Yuejun, Li Sanzhong, Dong Yunpeng, Liu Shaofeng, He Dengfa, Cheng Shunyou, Lu Rukui, Yao Anping. 2013#. Tectonic and problems of South China. *Scientia Sinica(Terrae)*, 43(10): 1553~1582.
- Zhang Hao, Shao Lei, Zhang Gongcheng, Cui Yuchi, Zhao Zhigang, Hou Yuanli. 2020. The response of Cenozoic sedimentary evolution coupled with the formation of the South China Sea. *Geological Journal*, 55(2): 1~22.
- Zhang Hao, Tong Hengmao. 2015#. Stacking patterns of fault systems in rift basins: A case study of the Maichen Sag in the Beibu Bay Basin. *Geological Review*, 61(z1): 963~964.
- Zhang Sufang, Zhang Xiangtao, Zhang Qinglin, She Qinghua. 2015#. Characteristics of the cretaceous in the northern south china sea and tectonic implications. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 35(6): 81~86.
- Zhang Xunhua, Meng Xiangjun, Xu Hong. 2008#. Tectonic Geology in China Seas. Beijing: China Ocean Press: 1~170.
- Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, Li Jianhua, Cui Jianjun, Shi Wei, Su Jinbao, Li Yong. 2012#. The new progress in the study of Mesozoic tectonics of South China. *Acta Geoscientia Sinica*, 33(3): 257~279.
- Zhang Zukun, Xu Yajun, Liu Qiang, Yang Kunguang Du Yuansheng. 2019#. Sedimentary Records of the Late Cretaceous—Paleogene Tectonic Transition in the Eastern South China Block: A Case Study of the Nanxiong Basin, Northern Guangdong Province. *Geotectonica et Metallogenia*, 43(3): 575~589.
- Zheng Herong, Luo Jun, Zhang Ying, Feng Jianyun, Zeng Yan, Wang Mingchuan. 2022#. Discovery of Late Permian granites in Wushi Sag, Beibuwan Basin: Evidence for zircon U-Pb age from cores of Well Wushi 1. *Geology in China*, 49(4): 1350~1352.
- Zhu Weilin, Jiang Wenrong. 1998#. Relations between fractures and hydrocarbon reservoirs in Weixinan Sag. *Acta Petrolei Sinica*, 19(3): 6~10.

Hercynian granite over Cretaceous sediments discovered in northern Hainan Island

—New evidence of late Mesozoic extension—compressional tectonic transformation in South China

YUN Xiaorui, FENG Jianyun, ZHENG Herong, ZHANG Ying, LUO Jun,
ZENG Yan, LIAO Dawei, ZHANG Qiaoxun

Petroleum Exploration and Production Research Institute, Sinopec, Beijing, 100083

Objectives: South China experienced multiple periods of extensional—compressional tectonic stress field reversals during the Late Mesozoic. The tectonic reversal from extension to compression between the Early Cretaceous to Late Cretaceous has been widely confirmed, but there is relatively little evidence of tectonic reversal during the Late Cretaceous. Hainan Island is located in the southern part of the South China Plate and is an overlapping area of the ancient Pacific tectonic domain and the ancient Tethys tectonic domain. It records complex tectonic—magmatic events and is a key area for studying the tectonic evolution of the continental margins of South China and the northern South China Sea.

Methods: This study is based on the geothermal scientific exploration well FSR 1 deployed and implemented by SINOPEC in the Fushan Sag in the northern part of Hainan Island. For the first time, a set of granite interlayers between the Paleogene and Cretaceous was discovered in the northern part of Hainan Island, and systematic petrological, geochronological, and structural geological analyses were conducted on granite core samples.

Results: The research results indicate that the granite interlayers in this set are mainly composed of plagioclase granite, diorite granite, and granodiorite, which undergo mineralization and alteration; The zircon U-Pb results range from 260.7 ~ 250.0 Ma, indicating that the crystallization age of this set of granite rocks is from the Middle-Permian to the Early-Triassic; Combining the sedimentary ages of the Changliu Formation of the Paleogene and the Baowan Formation of the Cretaceous, this study limits the thrusting time of the granite rock set to between the middle—late Late Cretaceous and the Paleocene.

Conclusions: Based on regional geological surveys, oil and gas drilling, geophysical data, and previous research results, this study identified a late Cretaceous NW—SE trending compressional structure in the northern part of Hainan Island, providing new evidence for the study of the Late Mesozoic extensional compressional structure transition in South China.

Keywords: northern Hainan Island; Cretaceous; tectonic—sedimentary evolution; zircon U-Pb dating; compressional structure

Acknowledgments: This work was funded by National Key Research and Development Program of China (Nos. 2021YFA0716004, 2019YFC0604903), Joint Fund Program of the National Natural Science Foundation of China and Sinopec (No. U20B6001) and the Sinopec Science and Technology Research Programs (Nos. P23131, P23093)

First author: YUN Xiaorui, male, born in 1993, Ph. D., assistant professor, is mainly engaged in tectonic geology; Email: Yunxrgeo@163.com

Manuscript received on: 2024-10-14; Accepted on: 2025-03-12; Published online on: 2025-03-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2025.03.045

Edited by: ZHANG Yuxu