https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.024



海南岛东南海域碎屑锆石年代学 物源示踪及构造指示意义

刘松峰^{1,2,3},李 顺^{1,3},聂 鑫^{1,3},邹俪琦^{1,2},蔡观强^{1,2,3*}

1. 自然资源部中国地质调查局广州海洋地质调查局,广东广州 510760

2. 自然资源部海底矿产资源重点实验室,广东广州 510075

3. 南方海洋科学与工程广东省实验室,广东广州 511458

摘 要:为探索海南岛东南海域表层沉积物来源,揭示物源区主要地质构造演化事件,采用箱式取样法获取8个站位沉积物样品,进行锆石U-Pb定年.结果表明,773个有效年龄分布在33~3205Ma,主要年龄峰集中在燕山期(100Ma、140Ma和159Ma)、印支期(242Ma)和加里东期(439Ma)、次要年龄峰集中在新元古代(776Ma、965Ma)和古元古代(1836Ma、2487Ma),并零星保留太古宙基底年龄信息.少量变质锆石记录了加里东期和印支期强烈的变质事件.与潜在物源区对比分析表明,海南岛东南海域沉积物以约100Ma的年龄峰值为识别标志,主要来源于海南岛.结合前人资料,本研究年龄频谱指示加里东期华夏武夷-云开造山带可延伸到海南岛,海西-印支期古特提斯洋的闭合及印支-华夏地块的碰撞导致其强烈的构造-岩浆-变质作用,燕山期受太平洋板块俯冲的影响发育多期次岩浆活动. 关键词:琼东南海域;沉积物;碎屑锆石;物源示踪;地质演化;构造地质.

中图分类号: P67 **文章编号:** 1000-2383(2021)11-4084-13 **收稿日期:** 2021-02-08

Detrital Zircon Geochronology from Southeastern Sea of Hainan Island: Provenance Tracing and Tectonic Implications

Liu Songfeng^{1,2,3}, Li Shun^{1,3}, Nie Xin^{1,3}, Zou Liqi^{1,2}, Cai Guanqiang^{1,2,3*}

1. Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510760, China

2. Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510075, China

3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory, Guangzhou 511458, China

Abstract: In order to explore the provenance of surface sediments in the southeastern sea of Hainan Island and reveal the evolution history of major geological tectonic events in the provenance area, it used the box corer method to obtain sediment samples from 8 stations, and zircon U-Pb dating analyses were performed. The results show that 773 effective ages are distributed between 33 and 3 205 Ma, and the main age peaks are concentrated in the Yanshanian (100 Ma, 140 Ma and 159 Ma), Indosinian (242 Ma) and Caledonian (439 Ma). The secondary age peaks are concentrated in the Neoproterozoic (776 Ma, 965 Ma) and Paleoproterozoic (1 836 Ma, 2 487 Ma), and the Archean basement age information is scattered. A small number of metamorphic zircons records strong metamorphic events in the Caledonian and Indosinian. A comparative analysis with potential provenance area shows that the

引用格式:刘松峰,李顺,聂鑫,等,2021.海南岛东南海域碎屑锆石年代学物源示踪及构造指示意义.地球科学,46(11):4084-4096.

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(Nos.DD20190627, DD20190209, DD20190577, DD20190378, DD20190366);南方海洋与工程广东 省实验室(广州)人才引进重大专项(Nos.GML2019ZD0201, GML2019ZD0207).

作者简介:刘松峰(1987-),男,工程师,博士,主要从事海洋地质调查与岩石成因大地构造研究.ORCID:0000-0002-3220-5436. E-mail: liusongfeng_cug@163.com

^{*}通讯作者:蔡观强, ORCID:0000-0002-0236-089X. E-mail:caiguanqiang@sina.com

sediments in the southeastern sea of Hainan Island are identified by the age peak of about 100 Ma, which are mainly from Hainan Island. Combined with previous studies, the age spectrum in this study indicates that the Caledonian Wuyi-Yunkai orogenic belt in Cathaysia can extend to Hainan Island, the closure of the Paleo-Tethys Ocean and the collision between the Indosinian and Cathaysia blocks in Hercynian-Indosinian led to its strong tectonism-magmatism-metamorphism, and Hainan Island developed multiple magmatic activities due to the subduction of the Pacific plate in the Yanshanian.

Key words: southeastern sea of Hainan Island; sediment; detrital zircon; provenance tracing; geological evolution; tectonics.

0 引言

沉积盆地中的碎屑沉积物是盆地沉积和构造 演化的直接产物和重要标志,也是了解其物源区特 征的重要载体(Cawood et al., 2003; 闫义等, 2003;杨仁超等, 2013).传统盆地物源分析包括碎 屑组分析、重矿物组合和地震层序等方法,适用于 研究程度较高或单一物源区,但无法确定多旋回盆 地构造叠置区的复杂物源.目前,碎屑锆石U-Pb年 代学和Hf同位素分析作为新型研究方法,已经广 泛应用于源区分析、古地理重建和地质历史演化的 研究,并逐渐发展成为有效的研究手段(Cawood et al., 2003; Yan et al., 2011; 徐亚军等, 2013).

近年来,海南岛西部河流、越南北部红河、越 南中部河流、珠江以及莺歌海盆地、琼东南盆地和 珠江口盆地等进行了大量的碎屑锆石年代学研 究,以探索南海西北陆缘盆地"源-汇"特征(Yan et al., 2011; 王策等, 2015; Shao et al., 2016; 崔 宇驰等, 2018; Wang et al., 2018, 2019). 莺歌海 盆地晚中新世以来物源主要来源于红河、海南岛 和越南中部(Wang et al., 2019). 琼东南盆地物源 主要接收海南岛和西沙隆起的沉积物, 而珠江口 盆地早渐新世明显接收了来自华南大陆河流搬 运的陆缘碎屑物质,盆地南侧则以中生代局部 岩浆岩隆起区为主要物源(Shao et al., 2016; 崔 宇驰等,2018).上述研究初步建立起了各物源 区的年龄识别标志,探索了各盆地的沉积物来 源,但海南岛东南近岸海域沉积物物源研究尚 没有相关碎屑锆石数据发表,仍处于研究空白.

海南岛具有多阶段、多旋回的演化历史,由于 前寒武纪地质体出露面积有限,导致其地质演化研 究相对薄弱,显生宙以来,海南岛是否受华南加里 东运动的影响?是否存在加里东期岩浆活动?海西-印支期及燕山期的地球动力学机制等一直是海南 岛区域构造演化的重要基础地质问题(汪啸风等, 1991;许德如等,2007;李廷栋等,2017).由于地 壳早期在隆升过程中遭受强烈的风化剥蚀作用, 使得部分古老岩石缺失,无法完整地记录这些构 造演化的信息,并且海南岛经历了印支期、燕山 期和新生代强烈的岩浆作用,对古老地质记录产 生了巨大的破坏.采用近岸海域沉积物碎屑锆石 年代学方法能够比较准确、全面地记录物源区详 细的地质演化信息,进而反演和追索其复杂的地 质演化历史(Cawood et al., 2003; 闫义等, 2003; 王策等, 2015).本研究依托海南岛近岸1:25万海 洋地质调查工作,系统获取海南岛东南海域8个 站位海底表层沉积物样品,进行了碎屑锆石 LA-ICP-MS 原位微区 U-Pb 同位素定年,以探索海南 岛东南海域表层沉积物的物质来源,并结合前人 资料,探讨对海南岛地质构造演化的启示.

1 区域地质背景

海南岛位于华南地块南缘、印支地块和太平洋 板块交汇的大地构造位置,属华夏地块最南端的延 伸部分,具有相对复杂的构造演化历史(图1a;汪 啸风等, 1991; 许德如等, 2007; Li et al., 2008; 陈 新跃等, 2011). 海南岛自北向南主要发育王五-文 教、昌江-琼海、尖峰-吊罗、九所-陵水4条近东西向 断裂和戈枕、白沙2条北东向断裂(图1b).海南地块 最老地层为中元古代抱板岩群(分为戈枕村组和俄 文岭岩组),属深变质表壳岩,时代为1400~ 1800 Ma,构成了海南岛的结晶基底.新元古代至 古生代为沉积盖层发育阶段,经历了板内多阶段裂 解与造山作用.新元古代石碌群和石灰顶组,二者 以角度不整合接触,岩性以绿片岩相-角闪岩相变 质岩为主(张业明等, 2005). 早古生代地层分布范 围较广,寒武-奥陶系为一套低级变质岩,岩性为 千枚岩、变质砂岩、炭质板岩和炭质页岩,中间夹有变 基性火山碎屑岩;志留系包括海南岛北部的浅-深海 相和南部的滨-浅海相碎屑岩及碳酸盐岩(龙文国, 2016).晚古生代地层主要分布在海南岛北部,包括石 炭系和二叠系,缺失泥盆系.石炭系为石英砂岩、砂



Fig.1 The location of Hainan Island and distribution map of surrounding basins (a) and the simplified geological map of Hainan Island (b)

b.据陈新跃等(2011)修编

岩和板岩;二叠系主要为碎屑岩夹碳酸盐岩及 硅质岩,属弧后陆棚-陆坡沉积建造(陈新跃 等,2011).中生代地层在岛内大面积出露,下 三叠统主要发育有砂岩和泥页岩,白垩系以泥 岩、火山岩和砂砾岩为主.新生界主要为砂和 粘土,主要分布于海岸线附近.

海南岛有大面积岩浆岩分布,出露面积约占全 岛陆域面积的72%,其中侵入岩约占全岛面积 49%,火山岩约占全岛面积23%,主要为中酸性、 酸性侵入岩和酸性至基性火山岩(图1b,李廷栋 等,2017).海南岛最早的中元古代和新元古代侵入 岩,仅占海南岛面积的0.46%.在岛内的石碌-公爱 地区出露有中元古代花岗质岩石, 锆石 SHRIMP U-Pb定年获得形成年龄为1400~1460 Ma (许德 如等, 2007; Li et al., 2008).海西-印支期花岗岩 出露最多, 超过全岛岩浆岩总面积的一半, 岩体形 成时代为220~280 Ma (谢才富等, 2006; 陈新跃 等, 2011; 温淑女等, 2013; 李孙雄等, 2016). 燕山 期花岗岩占海南岛面积的13%, 主要分布在白沙断 裂以南, 岩性主要为黑云母二长花岗岩和花岗闪长 岩, 获得的年龄分布在80~160 Ma之间(贾小辉 等, 2010; 王智琳等, 2011). 岛内火山岩主要包括 分布在海南岛南部的中生代白垩纪陆相火山岩和 分布在海南岛北部的新生代火山岩, 岩性以玄武岩



图 2 琼东南海域表层沉积物照片

Fig.2 Photos of the surface sediments from southeastern sea of Hainan Island a.青灰色细砂; b.灰色砂质粘土



图 3 琼东南海域单道地震剖面 Fig.3 Single channel seismic section from southeastern sea of Hainan Island a. *ab* 剖面; b.*cd* 剖面, 剖面位置见图 1b

为主,测得琼北火山岩 K-Ar或 Ar-Ar年龄大致为 38.72~0.42 Ma之间(雷裕红等,2005).除此之外, 岛内还有少量加里东期和寒武纪花岗岩、基性-超 基性火山岩分布(雷裕红等,2005).

2 样品与分析方法

碎屑锆石年代学测试样品取自海南岛东南部三 亚到文昌滨-浅海海域,通过箱式取样器获取海底表 层沉积物,采样深度在0.5m以内,由南向北依次共 计8个站位:SY75、SY409、SY156、SY193、SY224、 SY441、WC14、WC56,采样位置见图1b.沉积物类 型以细砂、粉砂和砂质粘土为主,含生物碎屑,主要 由石英、长石、云母等矿物组成(图2a,图2b).海南 岛东南海域单道地震剖面显示,基底之上为第四纪 沉积物,砂、泥交替出现,沉积物厚度由岛向海方向 逐渐增厚,上超于基底之上,表现为进积和侧向加 积的沉积模式,第四纪下切水道发育且被后期沉积 物填充,晚期浅断层较发育(图3a,图3b).

锆石分选由河北省廊坊市诚信地质服务公司 完成.每个样品取2kg左右的样品,经碎样、重力 分选、磁选、电磁选等方法排除其他矿物,在双目 镜下挑选出锆石,一般大于1000颗.锆石制靶由 上谱分析测试有限公司完成,选择裂隙少、包裹体 相对少的锆石颗粒制做环氧树脂靶后抛光. 锆石 阴极发光(CL)和LA-ICP-MS U-Pb 同位素定年在 中国地质大学(武汉)地质过程和矿产国家重点实 验室完成,微区激光剥蚀系统为GeoLas 2005,激 光器为193 nm ArF 准分子激光器, 电感耦合等离 子质谱仪为Agilent 7500a,载气为氦气,氩气为补 偿气以调节灵敏度,分析采用的激光束斑直径为 32 µm. 测试过程中每分析6个样品点,分析2次 91500标样.采用软件 ICPMSDataCal 进行分析数 据的离线处理(Liu et al., 2008). 碎屑锆石 U-Pb年 龄大于1000 Ma的采用²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb年龄,小于 1000 Ma的采用²⁰⁶Pb/²⁰⁸Pb年龄,年龄不确定度为 1σ. U-Pb年龄谐和图和年龄分布直方图均采用 Isoplot/Ex_ver3程序完成(Ludwing, 2003).

3 分析结果

3.1 碎屑锆石特征

8件重砂沉积物样品锆石晶形为自形-半自形,透明长柱状、短柱状、粒状等,颗粒大小为50μm× 50μm到150μm×300μm,长宽比在1:1到3:1(图 4).将每件样品代表性的锆石按其年龄从小到大的顺序排列,发现加里东期及前寒武纪的锆石一般磨 圆好,经历较远距离搬运,印支期及之后的锆石棱 角分明磨圆差,反映物源近距离搬运的特征(图4). 锆石 Cl图像显示大部分锆石具有清晰的岩浆振荡 环带,没有明显的核-边结构,少部分锆石振荡环 带不明显,颜色较暗,具有明显的核-边结构 (SY75-83、WC56-20)(图4).锆石 Th/U-Age 图显 示大部分锆石 Th/U比值大于0.1,少部分印支期和 加里东期锆石 Th/U比值小于0.1,燕山期之后和加 里东期之前的锆石 Th/U比值基本大于0.1(图5).

3.2 U-Pb年龄

本文对8件样品分别进行100颗锆石测试分析,舍弃谐和度>110%和<90%的U-Pb年龄后, 共获得773个有效谐和年龄分析点.碎屑锆石LA-ICP-MSU-Pb年龄分析结果见附表1,年龄频谱直 方图和不同地质时期碎屑锆石占比饼状图见图6.

(1)样品SY75,采自陵水县东部海域,93个有

效谐和年龄分布在 89~2 746 Ma. 碎屑锆石年龄呈 现多峰分布的特征,年龄主要集中在 93~157 Ma、 235~252 Ma和 436 Ma年龄区间或峰值,次要年龄 峰为 963 Ma、1 820 Ma、2 450 Ma,其中,加里东期 年龄锆石占比最多约 30% (图 6a).

(2)样品SY409,采自陵水县东部海域,共获得99个有效谐和年龄数据,年龄分布在94~
2477 Ma,具有4个年龄峰值,分别为97 Ma、160 Ma、240 Ma和425 Ma,最大年龄峰值为240 Ma.其中,海西-印支期锆石占比最高,约53%,前寒武纪老锆石数量较少(图6b).

(3)样品SY156,采自陵水县东北部海域, 94个有效谐和年龄范围在98~2192 Ma.年龄频 谱分布特征与样品SY409类似,具有4个年龄 主峰,分别是99 Ma、157 Ma、241 Ma和443 Ma. 海西-印支期锆石占比最高,约64%,前寒武纪 老锆石数量较少约5%(图6c).

(4)样品SY193,采自万宁市东南部海域, 98个有效谐和年龄数据,分布在33~2440 Ma. 最小年龄33 Ma仅有一个点,主要年龄峰集中在 102~160 Ma、246 Ma和433 Ma年龄区间或峰 值,次要峰值为741 Ma和969 Ma.前寒武纪碎屑 锆石占百分比最高为44%(图6d).

(5)样品 SY224,采自万宁市东南部海域, 共获得94个有效谐和年龄数据,年龄范围为91~
3 205 Ma,两颗最老锆石年龄点为3110 Ma和3205 Ma.在谐和年龄频谱特征图上,碎屑锆石年龄主峰集中在97~139 Ma,次峰为239 Ma、415 Ma、777 Ma、945 Ma和1810 Ma,其中,前寒武纪碎屑锆石占百分比最高为53%(图6e).

(6)样品SY441,采自万宁市东部海域,共 得到99个有效数据,年龄范围为81~2146 Ma. 年龄主峰集中在103~156 Ma、248 Ma和446 Ma 区间或峰值,次峰为766 Ma和955 Ma.燕山期 碎屑锆石占百分比最高,为37%,前寒武纪碎 屑锆石占百分比减少为29%(图6f).

(7) 样品 WC14, 采自琼海市东南部海域,共 得到 99 个有效数据,年龄范围为 98~2 146 Ma,主 峰集中在 109~163 Ma、257 Ma和 444 Ma 区间或峰 值,次峰为 761 Ma、850 Ma、992 Ma和 1 820 Ma.加 里东期碎屑锆石占百分比增加到 26% (图 6g).

(8) 样品 WC56, 采自文昌市南部海域, 共得到 97个有效数据, 年龄范围为101~2457 Ma, 主峰集



图 4 海南岛东南海域沉积物样品代表性碎屑锆石阴极发光照片

Fig.4 The cathodoluminescence images of representative detrital zircons of different sediment samples from southeastern sea of Hainan Island

中在120~157 Ma、244 Ma和439 Ma,年龄次峰为 969 Ma.加里东期碎屑锆石占百分比最高为33%, 前寒武纪碎屑锆石占百分比最小为20% (图6h).

统计资料表明锆石 Th/U比值可指示锆石 的成因,一般 Th/U比值小于 0.1 的锆石属于变 质成因(吴元保和郑永飞,2004).选取加里东 期和印支期 Th/U比值小于 0.1,且具有明显 核-边结构的锆石年龄做加权平均值.获得 8颗 加里东期变质锆石加权平均值年龄为 443± 3 Ma (图 7a),获得 6颗印支期变质锆石加权平 均值年龄为250±2 Ma(图7b).此外变质锆石 WC59-19具有明显的核-边结构,Th/U比值为 0.05,变质年龄为303 Ma(图4,图5).

4 讨论

4.1 海南岛东南海域沉积物物源分析

海南岛东南海域8个表层沉积物样品碎屑锆石 年龄分布在33~3205 Ma,主要年龄峰集中在燕山 期(100±1 Ma、140±1 Ma和159±1 Ma)、印支期 (242±1 Ma)和加里东期(439±2 Ma),年龄次峰







Fig.6 U-Pb age spectrum diagrams and pie graphs for detrital zircons from the studied samples





Fig.7 The cathodoluminescence images and weighted average ages of metamorphic zircons



Fig.8 Detrital zircon U-Pb age probability density plots of the bedrocks and major drainages of the potential source terranes 数据来源请参见 Wang *et al.*(2018, 2019)

集中在新元古代(776±4 Ma、965±5 Ma)和古元古 代(1836±17 Ma、2487±19 Ma),并零星分布太 古宙基底年龄信息(图8a).其中,最大年龄峰值为 印支期242 Ma,次要峰值依次为燕山期140 Ma、 100 Ma和加里东期439 Ma,表明海南岛东南海域 沉积物主要来自印支期、燕山期和加里东期的物 源.锆石阴极发光图像显示,加里东期及前寒武纪 的锆石一般磨圆好,经历了较远距离(或多阶段、长 时间)搬运,占比较大的印支期及之后的锆石棱角 分明磨圆差,反映物源近距离搬运的特征(图4).

地理位置上,海南岛东南海域表层沉积物潜在 的物源区包括海南岛以及周边华夏地块、印支地块 和扬子克拉通等,主要通过现代红河、越南中部河 流和珠江等河流进行搬运和沉积作用.与海南岛西 部河流碎屑锆石年龄频谱图对比显示,海南岛东南 部海域碎屑锆石频谱更加复杂,具有明显的加里东 期年龄峰(图 8b).越南北部红河和越南中部物源均 缺少海南岛东南海域沉积物燕山期100 Ma和 159 Ma的年龄峰(图 8c和图 8d,王策等,2015).华 南陆缘珠江西部支流物源具有160 Ma、255 Ma、 440 Ma、845 Ma、970 Ma和1855 Ma六个年龄峰 值,缺少燕山期100 Ma的年龄峰(图 8e,崔宇驰 等,2018).扬子克拉通南部物源以印支期263 Ma、 加里东期442 Ma和新元古代865 Ma峰值为主,并

含有大量的古元古代1600~1900 Ma和太古代 2 400~2 600 Ma 碎屑锆石信息, 年龄峰以 865 Ma 为特征标志,同样缺少燕山期100 Ma和159 Ma的 年龄峰(图8f). 华夏地块以新元古代967 Ma和古元 古代1437 Ma为标志,同时具有海西期368 Ma年 龄峰, 而燕山期133 Ma的峰与海南岛东南海域沉 积物燕山期年龄频谱不同(图8g).印支地块东部物 源年龄频谱较简单,年龄频谱包含247 Ma和 469 Ma两个峰值, 与海南岛东南海域沉积物年龄 频谱差别较大(图8h).综合上述年龄谱对比表 明,海南岛东南海域表层沉积物以约100 Ma的 年龄峰值为识别标志,可排除海南岛周缘红河、 越南中部河流及珠江西部河流的输入(或受洋流 影响输入很少), 华夏地块、印支地块和扬子克 拉通也不是其物源区,而注入海南岛东南海域 的岛上河流流域覆盖区可能是其主要物源区.

海南岛东南海域表层沉积物源区年龄频谱图 由南向北存在差异(图6).陵水县南部海域加里 东期和前寒武纪碎屑锆石占比较高为59%(样品 SY75),陵水县东部海域加里东期和前寒武纪碎 屑锆石减少,而海西-印支期锆石明显增多为 53%~64%(样品SY409、SY156),上述特征显然 与三亚市东部早古生代地层(富集加里东期和前 寒武纪碎屑锆石)和陵水县周围大面积的二叠纪-三叠纪岩体分布有关(图1b).向北到万宁市东南 海域前寒武纪碎屑锆石显著增多为44%~53%, 海西印支期碎屑锆石减少(样品SY193、SY224). 从万宁市东部海域到琼海市东南部海域,再到文 昌市南部海域加里东期锆石占百分比呈增加的趋 势(样品SY441、WC14、WC56),其物源明显受到 琼海市南部出露的大面积早古生代地层的影响.

碎屑锆石 U-Pb年龄的累计概率图显示,8件样 品可大致分为3组,表现为位置相邻谱峰相似的特征(图9).第1组样品 SY409和 SY156 以印支期碎 屑锆石为主,第2组 SY193和 SY224 包含相对较多 的前寒武纪锆石,第3组 SY75、SY441、WC14 和 WC56 具有较大的加里东期年龄峰(图9).上述不 同构造期次碎屑锆石占比变化明显受相关入海水 系流域区不同时代地质体分布的影响(图1b).另 外,海南岛尤其是东南海域入海河流水系覆盖区, 分布大面积的印支期和燕山期花岗岩体与本文沉 积物印支期和燕山期主要的年龄谱峰一致(图1b). 因此,海南岛东南海域沉积物物源主要来自海南



图 9 海南岛东南海域样品碎屑锆石 U-Pb 年龄累计概率图

Fig.9 Cumulative probability plot for the detrital zircon U-Pb ages of samples from the southeastern sea of Hainan Island

岛,表现为搬运距离近,与相关入海水系流域区不同时代岩体和地层分布密切相关的特征.

4.2 对海南岛区域构造演化的启示

海南岛的形成和演化一直是地质学家关注的 基础地质问题,采用近岸海域沉积物碎屑锆石年 代学方法能够比较准确、全面地记录物源区详细的 地质演化信息,进而反演其复杂的构造演化历史 (Cawood et al., 2003; 闫义等, 2003; 王策等, 2015). 海南岛东南海域沉积物碎屑锆石年龄频谱 指示了多期岩浆和变质作用的年代学信息(图8a). 4.2.1 前寒武纪年龄信息 据现有地质记录,海 南岛地质演化史可追溯至中元古代,发生于1.4 Ga的抱板运动,使得地壳物质局部发生重熔,形 成以片麻状二长花岗岩为主体的壳源型钙碱性花 岗岩体(许德如等, 2007; Li et al., 2008). 但本研 究并未获得中元古代约1.4 Ga的明显年龄峰(图 8a),原因可能是抱板岩群出露面积小且位于海 南岛西部距离较远.海南岛东南海域沉积物虽然 记录了 2.5 Ga 和 1.8 Ga 的年龄峰值, 但岛上并没 有相同时代古老地质体的出露,那么这些古元古 代、太古代,甚至零星的古太古代锆石从何而来? 是否指示海南岛可能存在更古老的基底?

海南岛新元古代晋宁运动导致石碌群发生低 绿片岩相区域变质作用,成为堆叠在抱板杂岩结晶 基底之上的变质基底(张业明等,2005).本文 965 Ma的峰值与华夏陆块格林威尔期(900~ 1100 Ma)碎屑锆石峰值可对比(王磊等,2015;蒙 麟鑫,2020).776 Ma的年龄峰与扬子地块新元古 代岩浆岩的年龄(740~830 Ma)相似,指示海南岛 可能受到了罗迪尼亚超大陆汇聚和裂解的影响(图 7a; Zhang and Zheng, 2013;高永娟等, 2020).海 南岛东南海域前寒武纪锆石年龄频谱与周缘华夏 地块、扬子克拉通独特的峰值可对比,为海南岛前 寒武纪地体的亲缘性提供了年代学信息(图 8a).

4.2.2 加里东期年龄信息 早古生代加里东运动 在海南岛表现为4幕,分别是早寒武世晚期、晚寒 武世中-晚期、晚奥陶世晚期和早志留世晚期,均表 现为地壳的隆升,产生假整合和不整合面,其中早 志留世晚期可能具有造山性质,但同期岩浆作用较 少(李廷栋等, 2017). 海南岛西部河流碎屑锆石年 龄频谱虽然没有加里东期年龄峰(图8b,王策等, 2015),但在海南岛北部古生界地层和文昌地区第 四系沉积物碎屑锆石年龄谱均有较大加里东期年 龄峰(447 Ma)的记录(莫位任等, 2015; 张立敏等, 2017). 海南岛东方-昌化港西侧海域钻孔中也发现 了加里东期(约435 Ma)片麻状花岗岩(王策等, 2015). 本文年龄频谱 439 Ma的构造-热事件和约 442 Ma变质事件(图4,图5,图7a),指示海南岛加 里东期经历了强烈的岩浆-变质作用.另外,昌江 抱板地区的中元古界抱板群和花岗-绿岩系经历 了强烈的加里东期构造变形、变质作用,发生片 理化或混合岩化, 而保亭和三亚地区下古生界同 样发生强烈的构造变形,发育紧闭褶皱(汪啸风 等,1991).上述海南岛地质事实与华南加里东期 广泛分布的志留纪角度不整合、花岗质岩浆岩、前 泥盆系变形以及变质事件相吻合(Wang et al., 2013),指示早古生代海南岛基底已经和华夏地 块相连,二者共同经历了加里东期造山作用,华 夏武夷-云开造山作用向南可延伸到海南岛.

4.2.3 海西-印支期年龄信息 晚古生代海南岛处 于古特提斯构造域.海南岛邦溪-晨星蛇绿岩形 成于 328~344 Ma,可能是哀牢山蛇绿岩-松马缝 合带的东延,代表古特提斯洋闭合的位置(李献 华等,2000; He *et al.*,2018).最近,在海南岛东 北端木栏头地区发现了一套榴辉岩-高压麻粒岩 组合,锆石 U-Pb变质时代为 300~340 Ma,海南 岛东南海域沉积物中 303 Ma的变质年龄与上述 变质时代一致,表明海南岛在该时期经历了强 烈的构造和变质事件,与古特提斯洋的俯冲有 关(夏蒙蒙等,2019;刘晓春等,2021).

海南岛分布大量的二叠纪-三叠纪花岗质岩

体, 与琼东南海域碎屑锆石最大年龄峰值 242 Ma 一致,其成因主要有古特提斯洋俯冲和古太平洋 俯冲两种观点(陈新跃等, 2011;温淑女等, 2013). 海南岛二叠纪到三叠纪, 从早到晚, 形成 了俯冲型、同碰撞型和后碰撞型花岗岩,构成一 套完整的造山带花岗岩岩浆演化序列(谢才富 等,2006;陈新跃等,2011;温淑女等,2013;李 孙雄等, 2016). 本文获得的印支期约 250 Ma的变 质年龄与越南北部高级变质作用(247~253 Ma, Owada et al., 2007)和华南云开地区大容山和十 万大山麻粒岩相变质作用(250~260 Ma, 彭松柏 等,2004)可对比,可能和印支地块与华南地块碰 撞有关.事实上,目前大多数的学者倾向于认为 古太平洋西向俯冲可能始于中侏罗世(参考文献 见温淑女等,2013),与海南岛及周缘岩浆-变质 事件时空分布不符.因此,海南岛海西-印支期的 构造-岩浆-变质作用记录了古特提斯洋东支由俯 冲消亡到印支地块与华夏地块碰撞完整的过程.

4.2.4 燕山期年龄信息 侏罗纪-白垩纪碎屑锆石 指示燕山期岩浆活动表现为多期次的特征(图 8a),未遭受变质作用的改造(图4,图5),与海南 岛燕山期构造-岩浆事件一致.海南岛中生代在约 200~175 Ma进入构造、岩浆平静期.早燕山期(约 175~150 Ma)海南岛位于滨太平洋构造域,由于 软流圈地幔上涌导致岩石圈破裂,形成了一系列 幔源和壳-幔混合源侵入岩.晚燕山期受太平洋板 块俯冲引起的弧后扩张带控制,花岗岩侵入活动 具有多期次性,发育侏罗纪、白垩纪花岗岩,岩石 缺乏变形组构的记录,属伸展构造环境壳-幔岩浆 混合的产物(贾小辉等,2010;王智琳等,2011).

海南岛东南海域碎屑锆石年龄谱指示海南岛 可能存在比抱板群更古老的基底,新元古代海南岛 记录了格林威尔期和罗迪尼亚超大陆聚合与裂解 的信息.显生宙以来,海南岛主要经历了华夏武夷--云开造山作用、古特提斯洋东支俯冲消亡、印支-华 夏地块碰撞以及太平洋板块俯冲的影响.本文碎屑 锆石年龄频谱,为反演海南岛复杂的构造演化历史 提供了较详细的构造、岩浆和变质年代学信息.

5 结论

(1)海南岛东南海域表层沉积物主要年龄峰
集中在燕山期(100±1 Ma、140±1 Ma和159±
1 Ma)、印支期(242±1 Ma)和加里东期(439±

2 Ma),年龄次峰集中在新元古代(776±4 Ma、 965±5 Ma)和古元古代(1 836±17 Ma、2 487± 19 Ma),并零星分布太古宙基底年龄信息.变质 锆石记录了加里东期和印支期两期强烈的变质事 件,存在一颗变质锆石指示海西期变质事件.

(2)通过与潜在物源区对比分析表明,海南岛东南海域沉积物以约100 Ma的年龄峰值为识别标志,物源主要来自于海南岛,表现为搬运距离近,与海南岛东南海域入海河流流域区不同时代岩体和地层分布密切相关.

(3)结合前人资料,显生宙以来,该年龄频谱指示了海南岛早古生代可能是华南加里东造山带的重要组成部分,海西-印支期古特提斯洋的闭合导致了其强烈的构造-岩浆-变质作用,燕山期受太平洋板块俯冲的影响发育多期次岩浆活动.本研究为认识海南岛地质演化历史提供了较全面的年代学信息.

致谢:感谢中国地质大学(武汉)韩庆森博士 和闭向阳老师在文章讨论和锆石U-Pb定年方面 给予的帮助.两名匿名审稿人提出的宝贵意见, 谨此表示感谢!

References

- Cawood, P. A., Nemchin, A. A., Freeman, M., et al., 2003. Linking Source and Sedimentary Basin: Detrital Zircon Record of Sediment Flux along a Modern River System and Implications for Provenance Studies. *Earth* and Planetary Science Letters, 210(1/2): 259-268. https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00122-5
- Chen, X.Y., Wang, Y.J., Fan, W.M., et al., 2011. Zircon LA-ICP-MS U-Pb Dating of Granitic Gneisses from Wuzhishan Area, Hainan, and Geological Significances. *Geochimica*, 40(5): 454-463 (in Chinese with English abstract).
- Cui, Y.C., Cao, L.C., Qiao, P.J., et al., 2018. Provenance Evolution of Paleogene Sequence (Northern South China Sea) Based on Detrital Zircon U - Pb Dating Analysis. *Earth Science*, 43(11): 4169-4179 (in Chinese with English abstract).
- Gao, Y.J., Zhang, Y.J., An, X.Y., et al., 2020. Detrital Zircon U-Pb Ages of Liangjiehe Formation in East Guizhou Province and Its Implications for Sturtian Glaciation. *Earth Science*, 45(8): 3070-3081 (in Chinese with English abstract).
- He, H. Y., Wang, Y. J., Qian, X., et al., 2018. The Bangxi-Chenxing Tectonic Zone in Hainan Island (South

China) as the Eastern Extension of the Song Ma – Ailaoshan Zone: Evidence of Late Paleozoic and Triassic Igneous Rocks. *Journal of Asian Earth Sciences*, 164: 274–291. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2018.06.032

- Jia, X.H., Wang, Q., Tang, G.J., et al., 2010. Zircon U-Pb Geochronology, Geochemistry and Petrogenesis of the Late Early Cretaceous Adakitic Intrusive Rocks in the Tunchang Area, Hainan Province. *Geochimica*, 39 (6): 497-519 (in Chinese with English abstract).
- Lei, Y.H., Ding, S.J., Ma, C.Q., et al., 2005. Nd Isotopic Constrants on Crustal Growth and Basement Characters of Hainan Island, South China. *Chinese Journal of Geol*ogy, 40(3): 439-456 (in Chinese with English abstract).
- Li, S.X., Wei, C.X., Wang, Y.H., et al., 2016. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating and Its Geological Implications of the Middle-High Grade Metamorphic Rocks in the Diaoluoshan Area, Southeastern Hainan Island. *Geotectonica et Metallogenia*, 40(4): 798-807 (in Chinese with English abstract).
- Li, T.D., Ding, X.Z., Xiao, Q.H., et al., 2017. The Regional Geology of China: Hainan Province. Geological Publishing House, Beijing, 1-736 (in Chinese).
- Li, X.H., Zhou, H.W., Ding, S.J., et al., 2000. SMND Isotopic Constraints on the Age of the Bangxi-Chenxing Ophiolite in Hainan Island: Implications for the Tectonic Evolution of Eastern Paleo-Tethys. Acta Petrologica Sinica, 16(3): 425-432 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. X., Li, X. H., Li, W. X., et al., 2008. Was Cathaysia Part of Proterozoic Laurentia? — New Data from Hainan Island, South China. *Terra Nova*, 20(2): 154—164. https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2008.00802.x
- Liu, X.C., Hu, J., Chen, L.Y., et al., 2021. Oceanic-Type High-Temperature Eclogites from Hainan Island, South China: General Characteristics and Unsolved Problems. *Acta Petrologica Sinica*, 37(1): 143-161 (in Chinese with English abstract).
- 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
- Long, W.G., Zhou, D., Wang, J., et al., 2016. Discovery of Late Ordovician - Early Silurian Graptolites and Its Significance in Daguangba Area of Hainan Island. *Geology and Mineral Resources of South China*, 32(1): 10-14 (in Chinese with English abstract).
- Ludwing, K.R., 2003. Users Manual for Isoplot 3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. *Berkeley Geo*-

chronology Center, Berkeley, 35: 1-39.

- Meng, L.X., Zhou, Y., Cai, Y.F., et al., 2020. Southwestern Boundary between the Yangtze and Cathaysia Blocks: Evidence from Detrital Zircon U - Pb Ages of Early Paleozoic Sedimentary Rocks from Qinzhou -Fangchenggang Area, Guangxi. *Earth Science*, 45(4): 1227-1242 (in Chinese with English abstract).
- Mo, W. R., Zhu, Y. H., Yuan, Q. M., et al., 2015. The Characteristics and Geological Significance of Quaternary Sediments from Wenchang Area of Hainan Province. *Geology and Mineral Resources of South China*, 31(1): 1-10 (in Chinese with English abstract).
- Owada, M., Osanai, Y., Nakano, N., et al., 2007. Crustal Anatexis and Formation of Two Types of Granitic Magmas in the Kontum Massif, Central Vietnam: Implications for Magma Processes in Collision Zones. *Gondwana Research*, 12(4): 428-437. https://doi.org/ 10.1016/j.gr.2006.11.001
- Peng, S.B., Fu, J.M., Liu, Y.H., 2004. The Discovery and Significance of A - Type Charnokite in Southeast Guangxi, China. Science Technology and Engineering, 4(10): 832-834 (in Chinese with English abstract).
- Shao, L., Cao, L., Pang, X., et al., 2016. Detrital Zircon Provenance of the Paleogene Syn-Rift Sediments in the Northern South China Sea. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 17(2): 255–269. https://doi.org/10.1002/ 2015GC006113
- Wang, C., Liang, X. Q., Foster, D. A., et al., 2019. Detrital Zircon Ages: A Key to Unraveling Provenance Variations in the Eastern Yinggehai-Song Hong Basin, South China Sea. AAPG Bulletin, 103(7): 1525-1552. https://doi.org/10.1306/11211817270
- Wang, C., Liang, X.Q., Zhou, Y., et al., 2015. Construction of Age Frequencies of Provenances on the Eastern Side of the Yinggehai Basin: Studies of LA-ICP-MS U-Pb Ages of Detrital Zircons from Six Modern Rivers, Western Hainan, China. *Earth Science Frontiers*, 22(4): 277-289 (in Chinese with English abstract).
- Wang, C., Wen, S. N., Liang, X. Q., et al., 2018. Detrital Zircon Provenance Record of the Oligocene Zhuhai Formation in the Pearl River Mouth Basin, Northern South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 98: 448– 461. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.08.032
- Wang, L., Long, W.G., Xu, D.M., et al., 2015. Zircon U-Pb Geochronology of Metamorphic Basement in Yunkai Area and Its Implications on the Grenvillian Event in the Cathaysia Block. *Earth Science Frontiers*, 22(2): 25-40 (in Chinese with English abstract).

- Wang, X.F., Ma, D.Q., Jiang, D.H., 1991. Hainan Island Geology (Three): Structural Geology. Geological Publishing House, Beijing, 1-139 (in Chinese).
- Wang, Y. J., Fan, W. M., Zhang, G. W., et al., 2013. Phanerozoic Tectonics of the South China Block: Key Observations and Controversies. *Gondwana Research*, 23(4): 1273-1305. https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.02.019
- Wang, Z.L., Xu, D.R., Zhang, Y.Q., et al., 2011. Zircon LA-ICP-MS U-Pb Dating of the Granodiorite Porphyry from the Shilu Iron Ore Deposit, Hainan Province and Its Geological Implications. *Geotectonica et Metallogenia*, 35(2): 292-299 (in Chinese with English abstract).
- Wen, S.N., Liang, X.Q., Fan, W.M., et al., 2013. Zircon U-Pb Ages, Hf Isotopic Composition of Zhizhong Granitic Intrusion in Ledong Area of Hainan Island and Their Tectonic Implications. *Geotectonica et Metallogenia*, 37(2): 294-307 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y.B., Zheng, Y.F., 2004. The Study on Zircon Genetic Mineralogy and Its Restriction on Explaining of U-Pb Age. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589– 1604 (in Chinese).
- Xia, M.M., Hu, J., Hu, D.G., et al., 2019. The Discovery of Eclogite-High-Pressure Granulite Association from Hainan Island, South China. *Geological Bulletin of China*, 38(10): 1591-1594 (in Chinese with English abstract).
- Xie, C.F., Zhu, J.C., Ding, S.J., et al., 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 (in Chinese with English abstract).
- Xu, D.R., Ma, C., Nonna, B.C., et al., 2007. Petrological, Mineralogical and Geochemical Characteristics of Ordovician Volcanic-Clastic Sedimentary Rocks in Bangxi Area, Northwest Hainan Island, South China: Implications for Provenance and Tectonic Setting. *Geochimica*, 36 (1): 11-26 (in Chinese with English Abstract).
- Xu, Y.J., Du, Y.S., Yang, J.H., 2013. Tectonic Evolution of the North Qilian Orogenic Belt from the Late Ordovician to Devonian: Evidence from Detrital Zircon Geochronology. *Earth Science*, 38(5): 934-946 (in Chinese with English abstract).
- Yan, Y., Carter, A., Palk, C., et al., 2011. Understanding Sedimentation in the Song Hong - Yinggehai Basin, South China Sea. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 12(6): Q06014. https://doi.org/10.1029/ 2011GC003533
- Yan, Y., Lin, G., Li, Z.A., 2003. Provenance Tracing of Sed-

iments by Means of Synthetic Study of Shape, Composition and Chronology of Zircon. *Geotectonica et Metallogenia*, 27(2): 184–190 (in Chinese with English abstract).

- Yang, R.C., Li, J.B., Fan, A.P., et al., 2013. Research Progress and Development Tendency of Provenance Analysis on Terrigenous Sedimentary Rocks. *Acta Sedimentologica Sinica*, 31(1): 99-107 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L.M., Wang, Y.J., Zhang, Y.Z., et al., 2017. Age of Paleozoic Strata in Northern Hainan Island: Constraints from the Detrital Zircon U-Pb Geochronology. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 47 (4): 1187-1206 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. B., Zheng, Y. F., 2013. Formation and Evolution of Precambrian Continental Lithosphere in South China. *Gondwana Research*, 23(4): 1241-1260. https://doi. org/10.1016/j.gr.2012.09.005
- Zhang, Y.M., Xie, C.F., Fu, T.A., et al., 2005. Tectonic Evolution of Hainan Island. Science Technology and Engineering, 5(20): 1485–1487 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈新跃,王岳军,范蔚茗,等,2011.海南五指山地区花岗片 麻岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb年代学特征及其地质意 义.地球化学,40(5):454-463.
- 崔宇驰,曹立成,乔培军,等,2018. 南海北部古近纪沉积物 碎屑锆石 U-Pb 年龄及物源演化. 地球科学,43(11): 4169-4179.
- 高永娟, 张予杰, 安显银, 等, 2020. 扬子东南缘两界河组碎 屑锆石 U-Pb 年龄及其对 Sturtian 冰川作用的启示. 地 球科学, 45(8): 3070-3081.
- 贾小辉,王强,唐功建,等,2010.海南屯昌早白垩世晚期埃 达克质侵入岩的锆石 U-Pb年代学、地球化学与岩石成 因.地球化学,39(6):497-519.
- 雷裕红,丁式江,马昌前,等,2005.海南岛地壳生长和基底 性质的Nd同位素制约.地质科学,40(3):439-456.
- 李孙雄,魏昌欣,汪焰华,等,2016.海南岛东南部吊罗山地 区中深变质岩锆石 U-Pb 定年及其地质意义.大地构造 与成矿学,40(4):798-807.
- 李廷栋,丁孝忠,肖庆辉,等,2017.中国区域地质志:海南 志.北京:地质出版社,1-736.
- 李献华,周汉文,丁式江,等,2000.海南岛"邦溪-晨星蛇绿 岩片"的时代及其构造意义:Sm-Nd同位素制约.岩石 学报,16(3):425-432.
- 刘晓春,胡娟,陈龙耀,等,2021.海南洋壳型高温榴辉岩: 基本特征及待解问题.岩石学报,37(1):143-161.
- 龙文国,周岱,王晶,等,2016.海南岛西部大广坝地区晚奥 陶世-早志留世笔石地层的发现及意义.华南地质与矿

产, 32(1):10-14.

- 蒙麟鑫,周云,蔡永丰,等,2020.扬子与华夏地块西南端界 线:来自钦防地区碎屑锆石U-Pb年代学的制约.地球 科学,45(4):1227-1242.
- 莫位任,朱耀河,袁勤敏,等,2015.海南文昌地区第四系沉 积物特征及其地质意义.华南地质与矿产,31(1): 1-10.
- 彭松柏,付建明,刘云华,2004.大容山-十万大山花岗岩带 中A型紫苏花岗岩、麻粒岩包体的发现及意义.科学技 术与工程,4(10):832-834.
- 王策,梁新权,周云,等,2015.莺歌海盆地东侧物源年龄标志的建立:来自琼西6条主要河流碎屑锆石LA-ICP-MS年龄的研究.地学前缘,22(4):277-289.
- 王磊,龙文国,徐德明,等,2015. 云开地区变质基底锆石 U-Pb年代学及对华夏地块Grenvillian事件的指示.地 学前缘,22(2):25-40.
- 汪啸风,马大铨,蒋大海,1991.海南岛地质(三):构造地质. 北京:地质出版社,1-139.
- 王智琳,许德如,张玉泉,等,2011.海南石碌铁矿床花岗闪 长斑岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及地质意义.大 地构造与成矿学,35(2):292-299.
- 温淑女,梁新权,范蔚茗,等,2013.海南岛乐东地区志仲岩 体锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素研究及其构造意义.大 地构造与成矿学,37(2):294-307.
- 吴元保,郑永飞,2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb年 龄解释的制约. 科学通报,49(16):1589-1604.
- 夏蒙蒙, 胡娟, 胡道功, 等, 2019. 海南岛发现榴辉岩-高压 麻粒岩组合. 地质通报, 38(10): 1591-1594.
- 谢才富,朱金初,丁式江,等,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.
- 许德如,马驰,Nonna,B.C.,等,2007.海南岛北西部邦溪 地区奥陶纪火山-碎屑沉积岩岩石学、矿物学和地球化 学:源区及构造环境暗示.地球化学,36(1):11-26.
- 徐亚军, 杜远生, 杨江海, 2013. 北祁连造山带晚奥陶世-泥 盆纪构造演化: 碎屑锆石年代学证据. 地球科学, 38 (5): 934-946.
- 闫义,林舸,李自安,2003.利用锆石形态、成分组成及年龄 分析进行沉积物源区示踪的综合研究.大地构造与成 矿学,27(2):184-190.
- 杨仁超,李进步,樊爱萍,等,2013.陆源沉积岩物源分析研 究进展与发展趋势.沉积学报,31(1):99-107.
- 张立敏, 王岳军, 张玉芝, 等, 2017. 海南岛北部古生界时 代:碎屑锆石 U-Pb 年代学约束. 吉林大学学报(地球科 学版), 47(4): 1187-1206.
- 张业明,谢才富,付太安,等,2005.海南岛地质构造演化刍论.科学技术与工程,5(20):1485-1487.