

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

温淑女^{1,2} 梁新权¹ 范蔚茗¹ 王岳军¹ 池国祥³ 梁细荣¹ 周云¹ 蒋英¹

(1. 中国科学院 广州地球化学研究所, 同位素地球化学国家重点实验室, 广东 广州 510640; 2. 中国科学院 大学, 北京 100049; 3. Department of Geology, University of Regina, Regina, Saskatchewan, Canada S4S 0A2)

摘 要: 海南岛分布大量的海西-印支期的花岗岩, 关于这些花岗岩的成因及其成岩背景, 特别是海西期花岗岩, 一直是争论的焦点。本文采用 LA-ICP-MS 对海南岛乐东地区志仲花岗岩体进行了高精度的锆石 U-Pb 同位素年代学及锆石 Hf 同位素组成特征的研究。结果显示, 两个花岗岩样品获得接近的 272 Ma 的结晶年龄, 表明该花岗岩体形成于早二叠世晚期。锆石原位 Hf 同位素组成 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化于 -3.7 至 +2.8 之间, 对应的两阶段模式年龄 t_{DM2} 集中在 1.12 ~ 1.53 Ga, 表现出壳幔混合源区特征。据此, 推测志仲花岗岩的形成岩浆很可能来源于海南中元古代火成岩的重熔, 同时可能有新生地幔物质的加入。其两阶段模式年龄 t_{DM2} 与前人研究的 Nd 二阶段模式年龄计算的结果(1.3 ~ 1.6 Ga) 相近, 表明中元古代是该区一期重要的地壳分异的时间, 即海南岛在中元古代发生过重要的地壳增生事件。结合区域构造-岩浆活动-沉积记录及古地磁资料, 我们趋向于认为海南岛内海西期岩浆作用应该是古特提斯演化过程中构造-岩浆作用的产物, 并非古太平洋西向俯冲-碰撞的结果。

关键词: LA-ICP-MS; 锆石 U-Pb 定年; Hf 同位素; 志仲岩体; 海南岛

中图分类号: P597 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-4552(2013)02-0294-014

0 引 言

花岗岩作为组成大陆地壳的重要组成部分, 其岩浆作用是大陆地壳内部热和物质传递最主要的机制。近年来, 随着大陆动力学研究的兴起, 花岗岩的研究受到越来越多的关注, 成为探索大陆岩石圈结构、组成与演化的有效探针。通过对花岗岩的研究可以追踪壳-幔相互作用的演化轨迹, 进而解译大陆生长、演化的历史。因而, 探索花岗岩的成因及其与大陆地壳生长或深部的壳-幔相互作用过程, 是花岗岩研究的一个重要前沿课题。海南岛出露有大面积晚古生代-中生代花岗质岩石, 对于其精细的时空分布和成因机制, 尚缺乏统一的认识。海南岛

地处欧亚板块、印度板块及太平洋板块的交接部位, 是古特提斯构造域和滨太平洋构造域的叠置区, 具有极其复杂的构造-岩浆作用和大地构造演化历史。因此, 对区域上花岗质岩浆开展研究工作, 为正确理解海南岛在中国东南部和东南亚地区晚古生代-中生代构造和古地理格局具有重要的意义(杨树锋等, 1989; Hsü et al., 1990; 夏邦栋等, 1991; 方中等, 1993; Metcalfe et al., 1993; 陈海泓和肖文交, 1998; 李献华等, 2000a, 2000b)。前人对海南岛内广泛分布的海西-印支期花岗岩开展了一些年代学、岩石学以及地球化学等方面的研究工作(夏邦栋等, 1990; 马大铨等, 1991; 俞受鋈, 1992; 方中等, 1992, 1995; 付建明, 1996; 王大英和云平, 1999; 许德

收稿日期: 2012-10-04; 改回日期: 2012-10-30

项目资助: 中国科学院重大项目(编号: KZCX-YW-45-4)、国家 973 项目(编号: 2010CB808900)、国家科技重大专项(2011ZX5023-004-011) 和国家自然科学基金项目(批准号: 40872080, 41072081) 联合资助。

第一作者简介: 温淑女(1985-), 女, 博士研究生, 主要从事岩石大地构造研究。Email: wenshunv@gig.ac.cn

如等, 2003; 云平等, 2004, 2005; 李孙雄等, 2005)。然而, 由于传统研究方法和技术的局限性, 如花岗岩的形成时代主要采用 Rb-Sr、锆石 U-Pb 稀释法、颗粒锆石逐层蒸发等方法获得了变化较大的形成年龄。同时基于单一的全岩 Sm-Nd 同位素结果, 可能记录的是经过多次地质事件后、被重置而均一化的混合结果, 很难有效识别其岩浆源区的真实信息, 特别是壳-幔相互作用的信息。因此, 无法有效的约束岛内海西-印支期的花岗质岩浆作用精细的时空展布特征, 也就限制了对其物质来源、岩浆演化序列及成岩大地构造背景的理解。

近年来, 随着高精度锆石微区年代学和 Hf 同位素研究的发展, 对海南岛内海西-印支期花岗岩的研究再次引起众多学者的关注(谢才富等, 2005, 2006a, 2006b; Li et al., 2006; 陈新跃等, 2011; 周佐明等, 2011)。目前在花岗岩的成因机制、产出构造背景等研究取得了一些重要的进展。然而, 由于海南岛植被覆盖严重、风化强烈等因素, 新鲜的花岗岩露头较少, 所以在研究程度上仍较局限。而且, 对锆石原位 Hf 同位素的研究还相对缺乏。由于锆石抗风化和干扰的能力强, 其 Hf 同位素体系具有很高的稳定性, 并且大多数锆石中含有 0.5% ~ 2% 的 Hf, 而 Lu 的含量极低, Lu/Hf 比值较低 ($^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值通常小于 0.002), 由 ^{176}Lu 衰变生成的 ^{176}Hf 极少, 因而所测定锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值基本代表了其形成时体系(即源区)的 Hf 同位素组成, 从而为讨论其源区属性和成因提供了重要信息(Patchett et al., 1982; Knudsen et al., 2001; Kinny and Mass, 2003)。配合其微区的 U-Pb 年龄测定, 锆石的微区 Hf 同位素数据可以对该锆石的成因演化提供重要的制约参数(吴福元等, 2007)。因此, 为了更好的讨论花岗岩的岩浆源区及成因过程, 对花岗岩中锆石 Hf 同位素组成的研究也尤为重要。

本文针对海南岛乐东县志仲岩体中的两个黑云母二长花岗岩进行了精确的 LA-ICP-MS 锆石微区 U-Pb 定年及其 Hf 同位素组成的研究, 并结合前人研究成果, 探讨其形成时代、成因机制及其对海南岛大地构造和岩石圈演化的约束。

1 地质背景和岩相学特征

海南岛是一大陆型岛屿, 以琼州海峡与华南大陆相连。该区地层除侏罗系外, 从中元古界至第四系, 均见出露(汪啸风等, 1991a)。中、新元古界抱

板群和石碌群主要出露于抱板、大蟹岭、冲卒岭、上安、黄竹岭、石碌等地(张仁杰等, 1991; 张业明和张仁杰, 1997), 是本区出露最古老的地层, 由高绿片岩相-角闪岩相变质岩组成。下古生界出露齐全, 包括寒武系及奥陶系的浅变质页岩、砂岩、粉砂岩、板岩和下志留统砂岩, 其中寒武系仅发育于三亚和万宁地区(姚华舟和黄照先, 1999; 姚华舟等, 1999; 曾庆奎等, 2003, 2004)。上古生界包括有泥盆系灰岩、砂岩、粉砂岩及泥岩, 石炭系板岩、变火山岩和二叠系灰岩、砂岩等, 主要分布在九所-陵水断裂以北(虞子治, 1989; 陈培哲等, 1997; 唐作友和冯少南, 1998; 胡宁等, 2001; 张仁杰等, 2002; 龙文国等, 2007)。中生界主要有分布于岛东的下三叠统粗碎屑岩、泥页岩及广泛分布的白垩系红色粗碎屑岩夹泥页岩、火山岩等。海南岛构造形迹复杂, 主要以东西向及北东向构造为主, 其次为北西向。东西向构造自北向南以王五-文昌、昌江-琼海、尖峰-吊罗及九所-陵水断裂带为代表, 北东向构造主要有戈枕断裂和白沙断裂(汪啸风等, 1991b)(图1)。

海南岛岩浆活动强烈, 岩浆岩分布广泛, 具有多期次活动特征。侵入岩占全岛面积的 51%, 喷出岩占全岛面积的 13%。侵入岩以中-酸性岩为主, 其中以海西-印支期花岗岩类分布最为广泛, 占全岛面积的 40%; 其次为燕山晚期的花岗岩类, 岩性主要为花岗闪长岩和黑云母二长花岗岩。喷出岩以新生代玄武岩为主, 主要分布在王五-文教断裂以北。此外, 有少量的元古代和加里东期的花岗岩和基性-超基性火山岩出露(雷裕红, 2005)。目前初步填图发现, 早二叠世侵入岩体有五指山(包括便文村、什败、行干、什暗、方满等石英闪长岩、二长岩岩体)和育才(包括红水岭辉长辉绿岩、毫老发、抱郎、志仲、乘顺岭等地细粒含斑黑云(二云)二长花岗岩和石英闪长岩)两个超单元; 中二叠世有通什侵入岩超单元, 包括山牛塘、通什、中林岭、黄山水库等石英闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩等侵入体; 晚二叠世有道票岭和禄马两个花岗岩超单元, 包括保国、那佩、东岭、白茶、大田等 7 个二云母花岗岩侵入体; 早三叠世有尖峰 1 个超单元, 包括尖峰岭、黑领、瘦岭、进岭等 4 个正长花岗岩或花岗斑岩侵入体; 中三叠世有袁水、立才、六连岭、万宁 4 个超单元, 包括石墩、长安、六连岭、前锋、结尾等 14 个黑云母花岗岩或角闪石黑云母二长花岗岩侵入体。显然, 广泛分布的早二叠世-中三叠世花岗岩的时空分布以及地球化学性质和形成背景尚有很大的研究空间。

本次研究的两个花岗岩样品 (HN0832 和 HN0909) 均采自海南岛乐东县育才超单元志仲岩体 (图 1) , 该岩体呈北东东向展布 , 侵入下志留统空列村组 , 北侧和南侧分别被印支晚期及燕山晚期花岗岩侵入。前人所测得的该岩体同位素年龄有锆石 Pb-Pb 等时线法 282 ± 11 Ma 及 U-Pb 谐和曲线下交点 253 ± 2 Ma (马大铨等 , 1991) , 年龄值变化较大。样品 HN0832 采自乐东志仲镇 ($109^{\circ}14'35''E$, $18^{\circ}37'42''N$) , 岩性为细粒 - 中粗粒巨斑状黑云母二长花岗岩 , 片麻状构造 , 中粒 - 中粗巨斑状花岗结构 , 斑晶为钾长石 , 其主要矿物组成有石英 ($\sim 30%$) 、钾长石 ($\sim 33%$) 、斜长石 ($\sim 29%$) 、黑云母 ($\sim 8%$) , 副矿物有磷灰石、榍石、锆石、磁铁矿等。样品 HN0909 采自乐东千家镇木棉村 ($109^{\circ}10'05''E$, $18^{\circ}38'40''N$) , 岩性为中粒角闪黑云母二长花岗岩 , 片麻状构造 , 中细粒似斑状花岗结构 , 斑晶为钾长石 , 其主要矿物组成包括有石英 ($\sim 28%$) 、钾长石 ($\sim 35%$) 、斜长石 ($\sim 28%$) 、黑云母 ($\sim 7%$) 、角闪石 ($\sim 2%$) , 副矿物为榍石、锆石、磷灰石等。具体采样位置见图 1。

2 分析方法

新鲜的全岩样品粉碎至 $0.3 \sim 0.1$ mm 的粒级 , 经淘洗分选、磁选和重液分离获得富集锆石的重砂。在双目显微镜下挑选出晶形好 , 无裂隙、透明干净的自形锆石颗粒 , 在玻璃板上用环氧树脂固定 , 并抛磨至锆石核部出露 , 然后进行反射光和透射光照相 , 并做阴极发光 (CL) 成像分析 , 并根据 CL 图像显示的锆石内部结构选定位置进行微区 U-Pb 定年和 Hf 同位素分析。锆石阴极发光图像在中国科学院广州地球化学研究所的 JXA-8100 电子探针仪器上完成 , 分析电压为 15 kv , 电流为 3×10^{-8} A。锆石 U-Pb 定年及 Lu-Hf 同位素测定工作均在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。锆石 U-Pb 定年工作所用的等离子体质谱仪 (ICP-MS) 为美国 Varian 公司生产的 820-MS 型。锆石原位 Lu-Hf 同位素测定采用英国 Nu Instruments 公司生产的 Nu Plasma HR 多接收器电感耦合等离子质谱仪 (MC-ICP-MS) 。采用的激光剥蚀系统为德国 MicroLas 公司生产的 GeoLas 200M , 该系统由德国 Lambda Physik 公司的 Complex

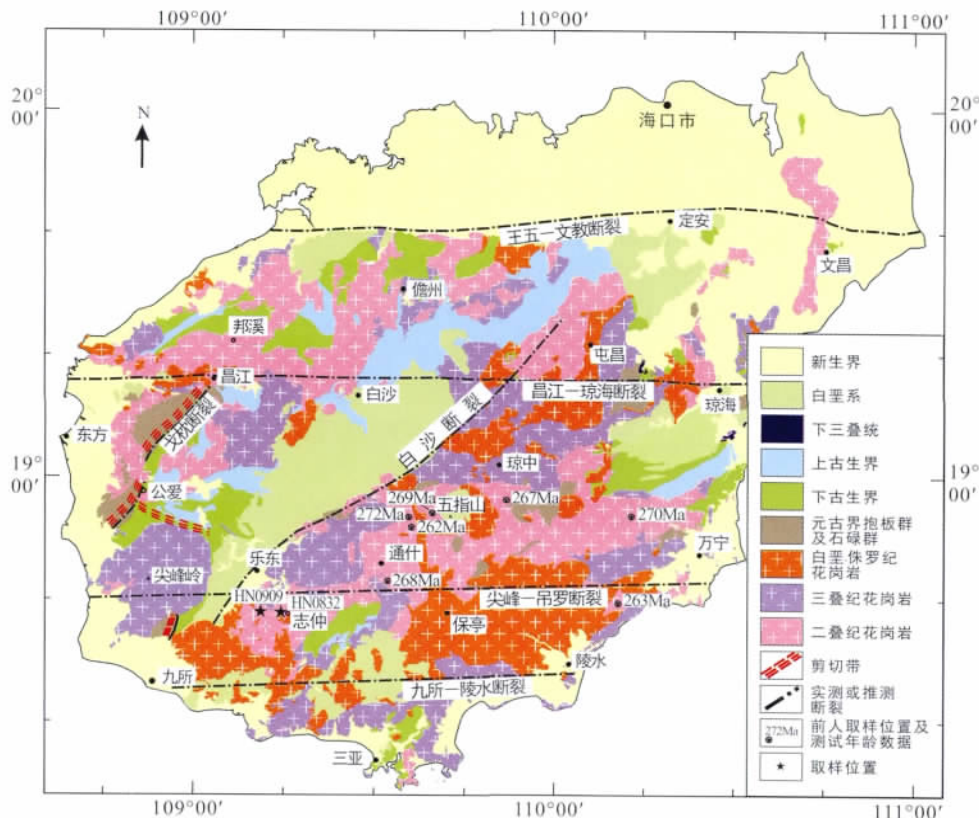


图 1 海南岛地质简图 (图中年龄数据引自 Li et al. , 2006; 谢才富等 2006a; 陈新跃等 2012)

Fig. 1 Simplified geological map of Hainan Island (the noted ages are from Li et al. , 2006; Xie et al. , 2006a; Chen et al. , 2012)

102 ArF 准分子激光器(波长 193 nm) 以及 MicroLas 公司光学系统组成。

锆石原位 Lu-Hf 同位素分析与锆石 U-Pb 定年及微量元素分析的 ICP-MS 使用同一台激光剥蚀系统,对样品进行一次性剥蚀完成,分别由 ICP-MS 与 MC-ICP-MS 两台仪器同时采集各自的信号进行测定(Yuan et al., 2008)。激光剥蚀以 He 作为剥蚀物质的载气,束斑直径为 44 μm ,激光频率为 10 Hz,脉冲能量 90 mJ,每个分析点的气体背景采集时间为 30 s,信号采集时间为 40 s。数据分析前用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST610 进行仪器的最佳化。锆石年龄采用国际标准锆石 91500 进行同位素比值分馏校正,每隔 5 个样品分析点测定一个标样,以保证标样和样品的仪器条件完全一致。在 20 次锆石分析前后各测一次外标 GSE-1G,以 ^{29}Si 作内标来校正锆石中 U、Th 和 Pb 等元素的含量,详细的实验流程和仪器参数可参见文献(Yuan et al., 2004)。数据处理采用 GLITTER 4.4 程序(Jackson et al., 2004);加权平均年龄及谐和图的绘制采用 ISOPLOT 3.0(Ludwig et al., 2003)完成,分析及计算误差均为 1σ 。

Lu-Hf 同位素组成测定用采用 $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu} = 0.02669$ (Bievre and Taylor, 1993) 和 $^{176}\text{Yb}/^{172}\text{Yb} = 0.5886$ (Chu et al., 2006) 进行同位素异位干扰校正计算测定样品的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{177}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值。在样品测定期间,以标样 91500 作为外部标准,其 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 推荐值为 $0.2823075 \pm 58 (2\sigma)$ (Wu et al., 2006), Mon-1、GJ-1 作为外部参考标准,其 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 推荐值为 $0.282739 \pm 26 (2\sigma)$ (Woodhead and Hergt, 2005) 和 $0.282015 \pm 19 (2\sigma)$ (Elhlou et al., 2006)。 ε_{Hf} 的计算采用 ^{176}Lu 的衰变常数为 $1.867 \times 10^{-11} \text{a}^{-1}$ (Scherer et al., 2001)。 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和 Hf 模式年龄计算中采用的球粒陨石和亏损地幔的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值分别为 0.282772(Blichert-Toft and Albarede, 1997) 和 0.28325(Griffin et al., 2002),二阶段模式年龄计算中采用平均地壳的 f_{cc} 为 -0.55(Griffin et al., 2002)。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

大部分锆石以浅棕、浅褐及褐色为特征,无色和紫色锆石少见。透明至半透明,以半透明为主,晶体自形程度较高,多为柱状或短柱状,颗粒长度从

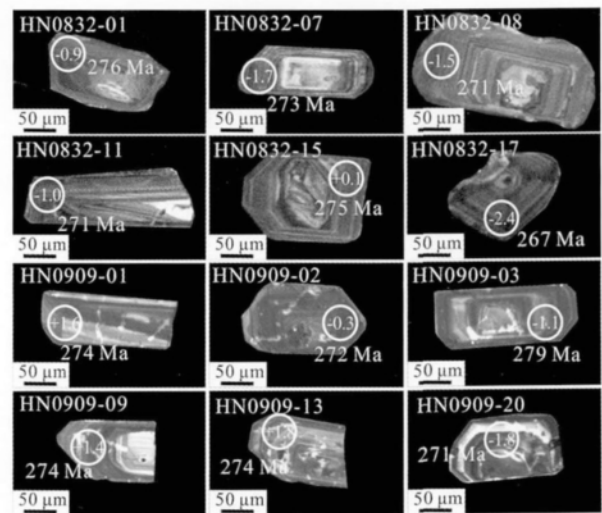


图 2 代表性锆石颗粒 CL 图像

Fig. 2 CL images of representative zircons

150 μm 到 270 μm ,长宽比变化于 1.5 ~ 3 之间。在阴极发光图像上(图 2),大部分锆石具有岩浆振荡环带,且部分具有核部结构,少数具有扇形分带结构,显示典型岩浆成因锆石特征(吴元保等 2004)。

锆石 U-Pb 同位素分析结果列于表 1,其年龄谱和图见图 3。样品 HN0832 共进行了 21 个点的分析,具有较高且变化较大的 Th、U 含量,分别为 520 ~ 1048 $\mu\text{g/g}$ 和 2214 ~ 3516 $\mu\text{g/g}$,Th/U 比值变化范围为 0.23 ~ 0.41,暗示其岩浆成因的特征(吴元保等 2004)。从 U-Pb 谐和图(图 3a)中可见,所有点均落在谐和线及其附近,表明这些锆石形成以来,U-Pb 体系保持封闭,没有发生放射成因 Pb 或 U 的丢失或加入。21 个分析点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表观年龄变化于 267 ~ 276 Ma,加权平均年龄为 $272.4 \pm 1.5 \text{ Ma}$ (95% 置信度,MSWD = 0.45),代表了该花岗岩的结晶年龄。

样品 HN0909 共进行了 20 个点的分析,与样品 HN0832 相比,除两个分析点具有较高的 Th 和 U 含量(HN0909-05: Th = 667 $\mu\text{g/g}$; U = 1988 $\mu\text{g/g}$; Th/U = 0.34 和 HN0832-16: Th = 1185 $\mu\text{g/g}$; U = 2133 $\mu\text{g/g}$; Th/U = 0.56)外,其他分析点的 Th、U 含量普遍较低,分别为 88 ~ 562 $\mu\text{g/g}$ 和 460 ~ 1703 $\mu\text{g/g}$ 。Th/U 比值为 0.16 ~ 0.40,具有岩浆成因的特征。在 U-Pb 谐和图上(图 3b),大多数点落在谐和线及其附近。其中样品点 HN0909-04 和 HN0909-19 明显偏离谐和线,表现为 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 的比值偏大,可能与 ^{207}Pb 的含量难以测准有关。样品点 HN0909-05 和 HN0909-16 稍微偏离谐和线,且年龄值较小,很可能由于其

表 1 海南岛乐东地区志仲岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素测试结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb results for the Zhizhong granite from the Ledong area in Hainan Island

分析点	²³² Th (μg/g)	²³⁸ U (μg/g)	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb 1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U ±1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U ±1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb ±1σ(Ma)	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U ±1σ(Ma)	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U ±1σ(Ma)
乐东志仲 HN0832									
HN0832-01	520	2214	0.23	0.05520 ± 0.00221	0.34281 ± 0.01359	0.04366 ± 0.00063	420 ± 87	299 ± 10	276 ± 4
HN0832-02	510	2765	0.18	0.05154 ± 0.00116	0.31629 ± 0.00731	0.04315 ± 0.00053	265 ± 51	279 ± 6	272 ± 3
HN0832-03	434	2388	0.18	0.05061 ± 0.00140	0.31065 ± 0.00866	0.04315 ± 0.00055	223 ± 63	275 ± 7	272 ± 3
HN0832-04	526	1811	0.29	0.04999 ± 0.00208	0.30147 ± 0.01239	0.04232 ± 0.00060	194 ± 94	268 ± 10	267 ± 4
HN0832-05	713	2338	0.3	0.05000 ± 0.00153	0.30775 ± 0.00942	0.04326 ± 0.00057	195 ± 69	272 ± 7	273 ± 3
HN0832-06	491	2598	0.19	0.05125 ± 0.00166	0.31711 ± 0.01017	0.04342 ± 0.00057	252 ± 73	280 ± 8	274 ± 4
HN0832-07	441	1720	0.26	0.05072 ± 0.00158	0.31216 ± 0.00975	0.04326 ± 0.00057	228 ± 71	276 ± 8	273 ± 4
HN0832-08	333	2033	0.16	0.05270 ± 0.00141	0.32215 ± 0.00865	0.04296 ± 0.00055	316 ± 59	284 ± 7	271 ± 3
HN0832-09	413	2172	0.19	0.05601 ± 0.00148	0.34461 ± 0.00914	0.04324 ± 0.00055	452 ± 57	301 ± 7	273 ± 3
HN0832-10	360	2011	0.18	0.05120 ± 0.00185	0.31703 ± 0.01138	0.04351 ± 0.00060	250 ± 81	280 ± 9	275 ± 4
HN0832-11	134	1642	0.08	0.05201 ± 0.00142	0.31969 ± 0.00874	0.04318 ± 0.00055	286 ± 61	282 ± 7	273 ± 3
HN0832-12	613	2771	0.22	0.05244 ± 0.00124	0.32592 ± 0.00778	0.04366 ± 0.00054	305 ± 53	286 ± 6	276 ± 3
HN0832-13	192	2185	0.09	0.05334 ± 0.00155	0.32492 ± 0.00944	0.04278 ± 0.00055	343 ± 64	286 ± 7	270 ± 3
HN0832-14	586	2491	0.24	0.05270 ± 0.00144	0.32479 ± 0.00886	0.04329 ± 0.00055	316 ± 61	286 ± 7	273 ± 3
HN0832-15	770	2500	0.31	0.05016 ± 0.00145	0.30955 ± 0.00891	0.04330 ± 0.00055	202 ± 66	274 ± 7	273 ± 3
HN0832-16	392	1861	0.21	0.05221 ± 0.00169	0.31688 ± 0.01018	0.04262 ± 0.00056	295 ± 72	280 ± 8	269 ± 3
HN0832-17	1048	2571	0.41	0.05181 ± 0.00179	0.31221 ± 0.01063	0.04227 ± 0.00057	277 ± 77	276 ± 8	267 ± 4
HN0832-18	466	2344	0.2	0.05091 ± 0.00134	0.31423 ± 0.00826	0.04334 ± 0.00054	237 ± 59	278 ± 6	274 ± 3
HN0832-19	506	3516	0.14	0.05057 ± 0.00117	0.31217 ± 0.00726	0.04334 ± 0.00053	221 ± 53	276 ± 6	274 ± 3
HN0832-20	964	2562	0.38	0.05193 ± 0.00149	0.32033 ± 0.00915	0.04330 ± 0.00055	282 ± 64	282 ± 7	273 ± 3
HN0832-21	896	3356	0.27	0.04986 ± 0.00140	0.30531 ± 0.00854	0.04297 ± 0.00054	188 ± 64	271 ± 7	271 ± 3
乐东千家 HN0909									
HN0909-01	159	750	0.21	0.05257 ± 0.00099	0.31492 ± 0.00581	0.04344 ± 0.00047	310 ± 42	278 ± 4	274 ± 3
HN0909-02	418	1703	0.25	0.05325 ± 0.00091	0.31597 ± 0.00531	0.04303 ± 0.00046	340 ± 38	279 ± 4	272 ± 3
HN0909-03	374	1686	0.22	0.05364 ± 0.00090	0.32692 ± 0.00538	0.04420 ± 0.00047	356 ± 38	287 ± 4	279 ± 3
HN0909-04	455	1640	0.28	0.06007 ± 0.00132	0.32846 ± 0.00705	0.03965 ± 0.00044	606 ± 47	288 ± 5	251 ± 3
HN0909-05	667	1988	0.34	0.05447 ± 0.00109	0.29568 ± 0.00579	0.03936 ± 0.00043	391 ± 44	263 ± 5	249 ± 3
HN0909-06	218	1090	0.2	0.05204 ± 0.00094	0.30233 ± 0.00532	0.04213 ± 0.00045	287 ± 41	268 ± 4	266 ± 3
HN0909-07	118	460	0.26	0.05188 ± 0.00109	0.31219 ± 0.00644	0.04364 ± 0.00048	280 ± 48	276 ± 5	275 ± 3
HN0909-08	181	797	0.23	0.05211 ± 0.00099	0.30166 ± 0.00562	0.04198 ± 0.00045	290 ± 43	268 ± 4	265 ± 3
HN0909-09	461	1295	0.36	0.05401 ± 0.00131	0.32383 ± 0.00766	0.04348 ± 0.00049	371 ± 54	285 ± 6	274 ± 3
HN0909-10	118	730	0.16	0.05169 ± 0.00118	0.30331 ± 0.00679	0.04255 ± 0.00048	272 ± 52	269 ± 5	269 ± 3
HN0909-11	562	1394	0.4	0.05306 ± 0.00106	0.31357 ± 0.00613	0.04287 ± 0.00047	331 ± 45	277 ± 5	271 ± 3
HN0909-12	370	1374	0.27	0.05301 ± 0.00107	0.31322 ± 0.00618	0.04285 ± 0.00047	329 ± 45	277 ± 5	271 ± 3
HN0909-13	435	1188	0.37	0.05281 ± 0.00112	0.31634 ± 0.00658	0.04344 ± 0.00048	321 ± 48	279 ± 5	274 ± 3
HN0909-14	166	569	0.29	0.05214 ± 0.00125	0.32407 ± 0.00757	0.04508 ± 0.00051	292 ± 54	285 ± 6	284 ± 3
HN0909-15	173	713	0.24	0.05192 ± 0.00121	0.31603 ± 0.00716	0.04415 ± 0.00050	282 ± 52	279 ± 6	279 ± 3
HN0909-16	1185	2133	0.56	0.05355 ± 0.00113	0.29027 ± 0.00596	0.03931 ± 0.00044	352 ± 47	259 ± 5	249 ± 3
HN0909-17	88	554	0.16	0.05685 ± 0.00160	0.32532 ± 0.00895	0.04151 ± 0.00050	485 ± 62	286 ± 7	262 ± 3
HN0909-18	414	1216	0.34	0.05272 ± 0.00117	0.30527 ± 0.00661	0.04200 ± 0.00048	317 ± 50	271 ± 5	265 ± 3
HN0909-19	152	768	0.2	0.06424 ± 0.00144	0.36909 ± 0.00806	0.04167 ± 0.00047	750 ± 47	319 ± 6	263 ± 3
HN0909-20	338	1389	0.24	0.05531 ± 0.00122	0.32671 ± 0.00702	0.04285 ± 0.00049	424 ± 48	287 ± 5	271 ± 3

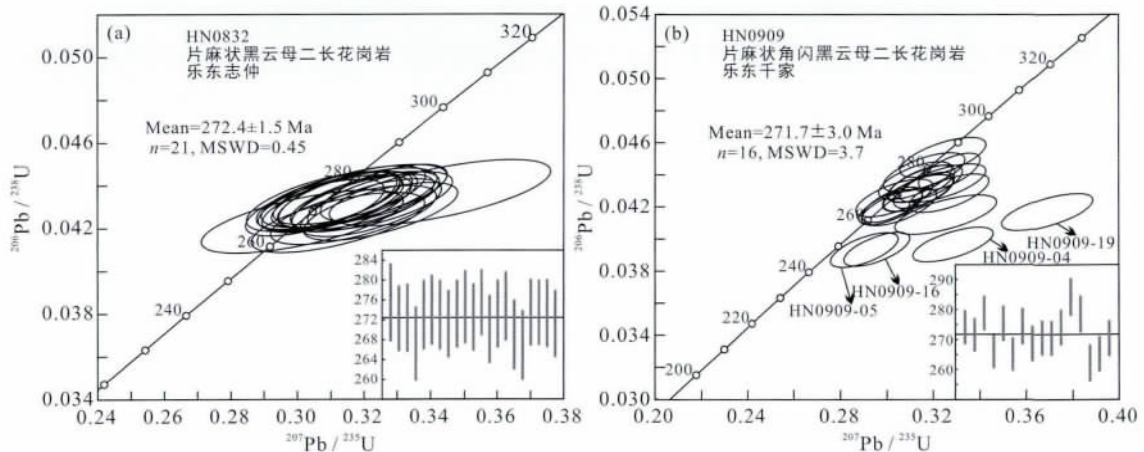


图 3 样品 HN0832 (a) 和 HN0909 (b) 的锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 3 Zircon U-Pb concordia diagrams for samples HN0832 (a) and HN0909 (b)

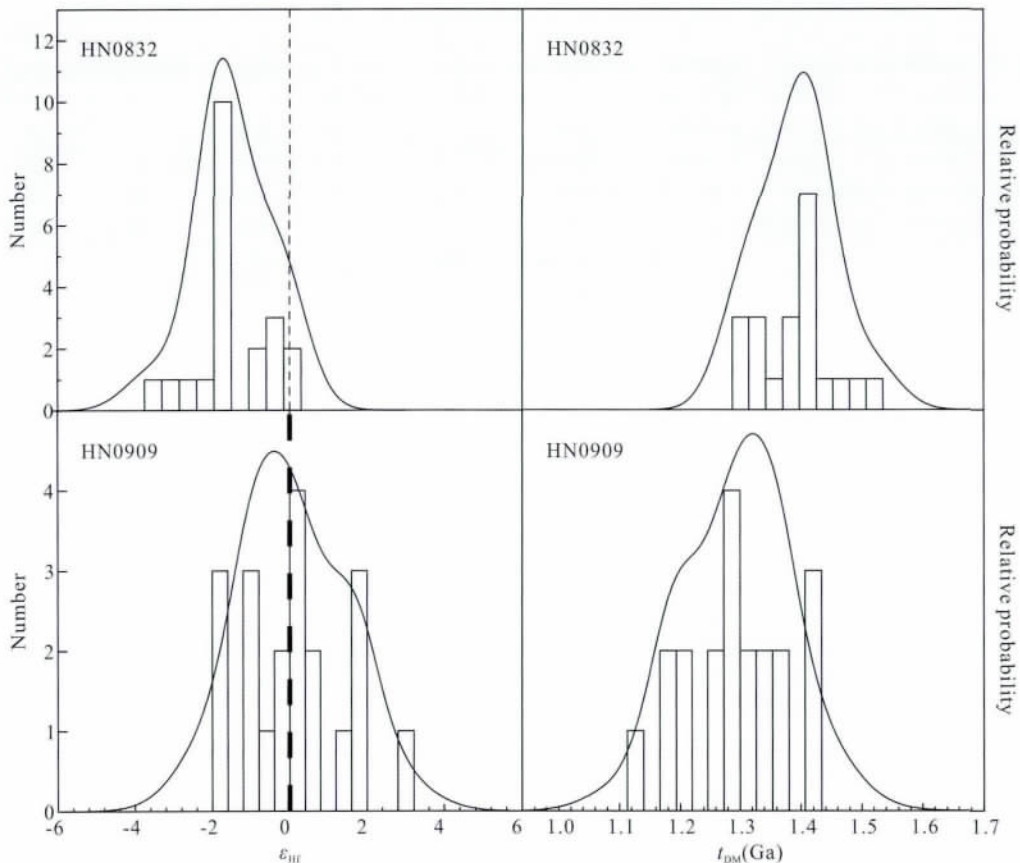


图 4 样品 HN0832 和 HN0909 的锆石 ϵ_{Hf} 值和 t_{DM} 概率直方图

Fig. 4 Probability plots of ϵ_{Hf} and t_{DM} of samples HN0832 and HN0909

Th、U 含量较高,常引起锆石的非晶质化作用,锆石形成时的封闭体系遭破坏,导致了 Pb 丢失,影响同位素比值的测定。其余 16 个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化于 262 ~ 284 Ma,其加权平均年龄为 271.7 ± 3.0 Ma (95% 置信度, $\text{MSWD} = 3.7$),代表该岩石的形成年龄。

3.2 锆石 Lu-Hf 同位素

锆石 Lu-Hf 同位素分析结果和 ϵ_{Hf} 与 t_{DM} 频谱图分别见表 2 及图 4。所有锆石分析点的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值均小于 0.002,表明锆石在形成后具有极低量的放射成因 Hf 积累。样品 HN0832 的 21 个分析点

表 2 海南岛乐东地区志仲岩体锆石 LA-ICP-MS Lu-Hf 同位素分析结果

Table 2 LA-ICP-MS zircon Lu-Hf results for the Zhizhong granite from the Ledong area in Hainan Island

Spot	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	$t_{\text{DM1}}(\text{Ga})$	$t_{\text{DM2}}(\text{Ga})$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
乐东志仲 HN0832										
HN083201	0.049169	0.001390	0.282557	0.000017	-7.6	-1.9	0.6	0.99	1.42	-0.96
HN083202	0.047849	0.001354	0.282596	0.000018	-6.2	-0.5	0.6	0.94	1.33	-0.96
HN083203	0.062393	0.001801	0.282567	0.000019	-7.2	-1.6	0.7	0.99	1.40	-0.95
HN083204	0.03562	0.001032	0.282503	0.00002	-9.5	-3.7	0.7	1.06	1.53	-0.97
HN083205	0.04452	0.001272	0.282594	0.000019	-6.3	-0.6	0.7	0.94	1.33	-0.96
HN083206	0.040878	0.001134	0.282613	0.000017	-5.6	0.2	0.6	0.91	1.29	-0.97
HN083207	0.052197	0.001502	0.282561	0.000014	-7.5	-1.7	0.5	0.99	1.41	-0.95
HN083208	0.02148	0.000621	0.282563	0.000019	-7.4	-1.5	0.7	0.97	1.40	-0.98
HN083209	0.076645	0.001889	0.282527	0.00002	-8.7	-3.0	0.7	1.05	1.49	-0.94
HN083210	0.055157	0.001476	0.282593	0.000017	-6.3	-0.6	0.6	0.95	1.34	-0.96
HN083211	0.052071	0.001443	0.282582	0.000018	-6.7	-1.0	0.6	0.96	1.36	-0.96
HN083212	0.051704	0.001431	0.282558	0.000016	-7.6	-1.8	0.5	0.99	1.42	-0.96
HN083213	0.055463	0.001554	0.282557	0.000019	-7.6	-1.9	0.7	1.00	1.42	-0.95
HN083214	0.045236	0.001252	0.282566	0.00002	-7.3	-1.5	0.7	0.98	1.40	-0.96
HN083215	0.047904	0.001358	0.282612	0.000019	-5.6	0.1	0.7	0.92	1.29	-0.96
HN083216	0.036491	0.001069	0.282566	0.000015	-7.3	-1.5	0.5	0.97	1.40	-0.97
HN083217	0.034686	0.001003	0.28254	0.000014	-8.2	-2.4	0.5	1.01	1.45	-0.97
HN083218	0.044861	0.001325	0.282551	0.000015	-7.8	-2.1	0.5	1.00	1.43	-0.96
HN083219	0.041321	0.001215	0.282555	0.000015	-7.7	-1.9	0.5	0.99	1.42	-0.96
HN083220	0.052563	0.001447	0.282566	0.000017	-7.3	-1.6	0.6	0.98	1.40	-0.96
HN083221	0.046137	0.001314	0.282603	0.000017	-6.0	-0.2	0.6	0.93	1.31	-0.96
乐东千家 HN0909										
HN090901	0.020691	0.000670	0.282652	0.000017	-4.2	1.6	0.6	0.84	1.20	-0.98
HN090902	0.032829	0.001066	0.282601	0.000018	-6.0	-0.3	0.6	0.92	1.32	-0.97
HN090903	0.032767	0.001064	0.282578	0.000015	-6.9	-1.1	0.5	0.96	1.37	-0.97
HN090904	0.037219	0.001192	0.282583	0.000019	-6.7	-0.9	0.7	0.95	1.36	-0.96
HN090905	0.041631	0.001315	0.282611	0.000017	-5.7	0.0	0.6	0.92	1.30	-0.96
HN090906	0.027648	0.000822	0.282626	0.000024	-5.1	0.7	0.9	0.88	1.26	-0.98
HN090907	0.02306	0.000697	0.282686	0.000026	-3.0	2.8	0.9	0.80	1.12	-0.98
HN090908	0.028843	0.000862	0.282613	0.000024	-5.6	0.2	0.9	0.90	1.29	-0.97
HN090909	0.03566	0.001079	0.282648	0.000021	-4.4	1.4	0.7	0.86	1.21	-0.97
HN090910	0.022414	0.000696	0.28266	0.000018	-4.0	1.9	0.6	0.83	1.18	-0.98
HN090911	0.032203	0.001022	0.282589	0.000018	-6.5	-0.7	0.6	0.94	1.34	-0.97
HN090912	0.032302	0.001044	0.282611	0.000022	-5.7	0.1	0.8	0.91	1.29	-0.97
HN090913	0.03766	0.001197	0.282661	0.000021	-3.9	1.8	0.8	0.84	1.18	-0.96
HN090914	0.020763	0.000660	0.282626	0.000021	-5.2	0.7	0.7	0.88	1.26	-0.98
HN090915	0.025682	0.000830	0.282583	0.00002	-6.7	-0.9	0.7	0.94	1.35	-0.98
HN090916	0.032937	0.001148	0.282598	0.000023	-6.1	-0.4	0.8	0.93	1.32	-0.97
HN090917	0.019141	0.000616	0.282554	0.000026	-7.7	-1.8	0.9	0.98	1.42	-0.98
HN090918	0.044154	0.001386	0.28256	0.000031	-7.5	-1.8	1.1	0.99	1.41	-0.96
HN090919	0.018321	0.000618	0.282615	0.00002	-5.6	0.3	0.7	0.89	1.28	-0.98
HN090920	0.029863	0.000977	0.282557	0.000026	-7.6	-1.8	0.9	0.98	1.41	-0.97

$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 采用样品 U-Pb 年龄 (272 Ma) 计算而得; $\varepsilon_{\text{Hf}}(0) = [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} / (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR } \rho} - 1] \times 10000$;

$\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = 10000 \times \{ [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} \times (e^{\lambda t} - 1)] / [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR } \rho} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} \times (e^{\lambda t} - 1)] - 1 \}$;

$t_{\text{DM1}}\text{Hf} = 1/\lambda \times \ln\{ 1 + [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}] / [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}] \}$;

$t_{\text{DM2}}\text{Hf} = t_{\text{DM1}}\text{Hf} - (t_{\text{DM1}}\text{Hf} - t) \times [(f_{\text{cc}} - f_{\text{s}}) / (f_{\text{cc}} - f_{\text{DM}})]$; $f_{\text{Lu/Hf}} = ((^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} - 1)$;

$\lambda = 1.867 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ (Scherer et al., 2001); $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}}$ 和 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}}$ 为样品测量值;

$(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} = 0.0332$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR } \rho} = 0.282772$ (Blichert-Toft and Albaredo, 1997);

$(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.0384$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.28325$ (Griffin et al., 2002); $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{平均地壳}} = 0.015$ (Griffin et al., 2002);

$f_{\text{cc}} = ((^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{平均地壳}} / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} - 1)$; $f_{\text{DM}} = ((^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} - 1)$ 。

的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化于 0.282503 ~ 0.282613, 加权平均值为 0.282568 ± 0.000012 (2σ), ε_{Hf} (272 Ma) 为 -3.7 ~ +0.2, 加权平均值为 -1.49 ± 0.42 。二阶段 Hf 模式年龄(t_{DM2}) 变化于 1.29 ~ 1.53 Ga, 峰值为 1.41 Ga。样品 HN0909 的 20 个分析点的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化于 0.282554 ~ 0.282686, 加权平均值为 0.282612 ± 0.000016 (2σ), ε_{Hf} (272 Ma) 值在零左右波动, 其中 50% 大于 0, 变化于 +0.1 ~ +2.8, 对应的二阶段模式年龄(t_{DM2}) 为 1.12 ~ 1.29 Ga; 其余点的 ε_{Hf} (272 Ma) 值 ≤ 0 , 为 -1.8 ~ 0, Hf 二阶段模式年龄(t_{DM2}) 变化于 1.30 ~ 1.42 Ga; 所有 20 个点给出的 Hf 模式年龄峰值为 1.33 Ga。

4 讨 论

4.1 岩体的形成时代及岩浆作用特征

关于志仲岩体的形成时代, 过去根据岩体之间的侵入接触关系以及传统的锆石 Pb-Pb、U-Pb 同位素测年结果, 将其划分为海西-印支期花岗岩, 约为 282 ~ 253 Ma, 年龄值变化较大, 具有较大的不确定性。本次获得的两个花岗岩样品的年龄值分别为 272.4 ± 1.5 Ma 和 271.7 ± 3.0 Ma, 在误差范围内一致, 表明位于琼中岩基南部的志仲岩体应该形成于约 272 Ma, 属早二叠世晚期。与前人所报道的位于海南岛北部邦溪地区变质基性岩 (269 Ma, Xu et al., 2007)、中部琼中地区过铝质花岗岩 (278 ~ 269 Ma, 谢才富等, 2006a)、五指山地区及万宁、陵水等地的片麻状花岗岩的形成时代 (262 ~ 269 Ma, Li et al., 2006; 陈新跃等, 2012) 相似 (见图 1), 表明它们属于同期岩浆作用不同幕次的产物, 其岩浆作用的特征显示以中酸性侵入岩为主夹少量基性岩浆作用。

4.2 源区属性及其成壳信息

关于海南二叠纪花岗岩的成因及其源区属性前人做过一些研究, 如谢才富等 (2006a) 在琼中地区获得锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 272 Ma 的钾玄质侵入岩, 明显富集大离子亲石元素和轻稀土元素, 强烈亏损 Nb 和 Ta, 结合其富集 Sr-Nd 同位素组成特征 (如 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.70859 \sim 0.71425$; $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -2.77 \sim -7.49$), 认为其来源于 EMII 型地幔源区, 其源区的富集是与石炭纪-早二叠世华南板块向印支板块俯冲时洋壳及陆源沉积物在深部产生的大量流体-熔体对亏损地幔的交代有关。Li et al. (2006) 在五指山地区获得的锆石 SHRIMP U-Pb 年

龄为 267 ~ 262 Ma 准铝至弱过铝质的花岗片麻岩, 地球化学特征指示其为钙碱性 I 型花岗岩, 其初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为 0.7074 ~ 0.7105, ε_{Nd} (265 Ma) 值为 -3.07 ~ -7.72, 可解释其为玄武质岩浆的分离结晶并混染了部分地壳物质的产物, 源区为受到俯冲交代的富集岩石圈地幔。志仲岩体也明显地与琼中和五指山岩体以及菲律宾 Mindoro 岩体具有一致的岛弧地球化学特征, 即相对 Ta、Nb、Hf、Zr、Y 和 Yb 明显富集 K、Rb、Ba、Th、Ce 和 Sm (Knittel et al., 2010; Li et al., 2006; Wen et al., 2013 待发表)。这些花岗岩所具有的幔源信息在本次 Hf 同位素研究中得到进一步证实。两个样品的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围为 -3.7 至 +2.8, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值有正有负, 显示志仲岩体锆石颗粒 Hf 同位素组成的不均一性和壳幔相互作用特征。根据两阶段 Hf 同位素模式年龄计算 $t_{\text{DM2}}(\text{Hf})$ 值变化于 1.12 ~ 1.53 Ga, 形成主要为 1.41 Ga 的峰值, 次要峰值为 1.33 Ga, 揭示其源区可能主要是由地壳中火成岩物质的重熔而成的。部分锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为正值 (表 2, 图 5), 说明在其形成过程中有一定比例新生幔源物质的加入。 ε_{Hf} 和 t_{DM2} 在两个样品中有明显的区别, 可能是源区不均一、幔源组分加入程度不同所致。这些变化的 Hf 同位素说明其源区可能为混合的不均一岩浆源区。

此外, 志仲岩体所有锆石两阶段 Hf 同位素模式年龄 ($t_{\text{DM2}}(\text{Hf})$) 所显示的年龄峰值与 Li et al. (2006) 所获得的五指山片麻岩的 Nd 模式年龄 (1.29 ~ 1.54 Ga), 以及与岛内九所-陵水断裂以北的海西-印支期花岗岩 Nd 模式年龄 (1.3 ~ 2.5 Ga) 的统计峰值 1.4 ~ 1.6 Ga 相近 (许德如等, 2001; 雷裕红等, 2005; 谢才富等, 2006a; Li et al., 2006), 表明该区在中元古代 (~1.4 Ga 时期) 发生过一次重要的成壳事件, 这一事件与海南岛内中元古代花岗质岩浆作用 (1400 Ma) 相吻合 (俞受鳌等, 1992; 丁式江等, 1995; 梁新权等, 1995; 龙文国等, 2001; Li et al., 2002; 许德如等, 2006)。因此, 该区早二叠世花岗质岩浆作用很可能是中元古代地壳中老的火成岩物质再循环的产物, 同时有一定比例新生地幔物质的参与。如同时期变基性岩的存在 (Xu et al., 2007) 以及区域上花岗岩普遍具有较低的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (谢才富等, 2006a; Li et al., 2006) 都是其有力佐证。此外, 其变化的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, 如在 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) - t$ 演化图上, 大多数锆石 Hf 同位素组成落在元古代地壳与亏损地幔演化趋势线之间 (图 5), 可能暗示壳-幔混合作用是该岩体花岗岩形成的重要方式, 也

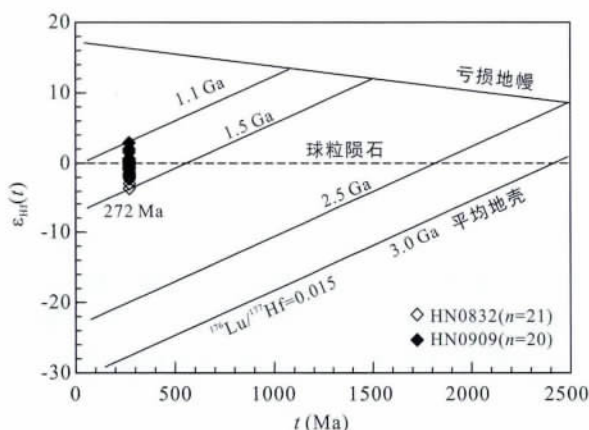


图 5 样品 HN0832 和 HN0909 的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t 投影图
Fig. 5 Plot of $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ vs t for zircons from samples HN0832 and HN0909

是该区晚古生代花岗质岩石成因的重要机制。

4.3 构造意义

海南岛由于其所处的特殊构造位置,位于特提斯和太平洋两大构造域的交汇处,目前对于其广泛分布的海西-印支期花岗岩岩浆的产出构造背景一直存在争议。一部分学者认为岛内广泛发育的海西-印支期岩浆作用与特提斯洋闭合俯冲及随后的印支与华南板块的碰撞拼合有关(李孙雄等 2005; 谢才富等 2006a; 唐立梅等 2010; 陈新跃等 2012); 而另一些研究者认为其岩浆作用与古太平洋的西向俯冲有关,属于华南东南沿海大陆岩浆弧的一部分,指示华南印支造山作用可能开始于早二叠世晚期(约 270 ~ 260 Ma) (Li et al., 2006; Li and Li, 2007)。我们对于海南岛二叠纪花岗岩的形成构造背景的认识倾向于前者。其理由是:

(1) 海南岛所发育的海西-印支期花岗岩,不论岩石类型或地球化学特征,还是形成时代等诸方面,与三江构造带可以进行对比,而与华南造山带明显的不同。至今为止,在华南内部至东南沿岸所发现的印支期花岗岩主要属于中晚三叠世碰撞型或碰撞后花岗岩,如大容山复式花岗岩基和台马紫苏花岗岩都是典型的 S 型花岗岩(王德滋和刘昌实, 1986; 邓希光等 2004; Chen et al., 2011),可能与碰撞挤压逆冲加厚有关; 而呈东西向展布的南岭印支期花岗岩,其形成可能滞后于主碰撞期的伸展阶段(王德滋 2004)。相反,在华南与印支板块之间的三江构造带存在大量的与古特提斯洋俯冲、消亡以及板块碰撞有关的二叠纪-三叠纪的岛弧岩浆岩和碰撞花岗岩,时间跨度比较大,如澜沧江构造带南部

金红地区与俯冲有关的 282 ~ 284 Ma 花岗闪长质侵入岩(Hennig et al., 2009)、金沙江晚古生代蛇绿岩带南侧 263 ~ 268 Ma 侵入杂岩体(Jian et al., 2008)、滇西哀牢山构造带中的代表弧后盆地的 287 Ma 五素火山岩和 265 Ma 雅轩桥火山岩(Fan et al., 2010)、Truong Son 造山带 272 ~ 386 Ma 的 Dienbien 杂岩体(Phan et al., 1991; Lan et al., 2000) 等等。海南岛海西-印支期花岗岩形成时代跨度亦大,从早、中、晚二叠世到早、中、晚三叠世均有发育。岩石形成构造背景也多样,从岛弧型花岗岩到碰撞型或碰撞后花岗岩都有发育(Li et al., 2006; Li and Li, 2007; 谢才富等 2006a; 李孙雄等 2005),与三江构造带所发育的花岗岩可以进行对比。最近,Knittel et al. (2010) 报道了菲律宾 Mindoro 存在具岛弧地球化学特征的二叠纪花岗岩(250 ~ 270 Ma),它可能与海南海西-印支期花岗岩一样亦处于古特提斯构造带上,与古特提斯的形成有关。考虑到红河-哀牢山走滑带新生代的走滑作用(Tapponnier et al., 1990),海南岛与菲律宾可能在晚古生代处于相近的位置,同时都处于古特提斯演化的构造带上。显然,古太平洋板块的西向俯冲很难解释这些岩浆作用的时空特征。事实上,目前大多数的学者倾向于认为古太平洋板块的西向俯冲可能始于中侏罗世(Engelbreton et al., 1985; Zhou et al., 2000; Wang et al., 2005, 2007a; Shu et al., 2008; Morley, 2012);

(2) 海南邦溪、晨星、美子林等地发育晚古生代变基性火山岩,高度亏损 Th、Nb、Ta 和轻稀土元素, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) > 0$,与洋中脊玄武岩类似,可能形成于大洋环境(李献华等 2000a, b)。这与金沙江-双沟-Song Ma 蛇绿岩在形成时代上(360 ~ 300 Ma) 基本一致,可能代表了东古特提斯洋东南侧的残片(Gatinsky, 1986; Van Due Chuong, 1995; Xu et al., 2007)。目前为止,在华南东南沿海以至大陆架尚没有发现同时代的蛇绿岩或基性火山岩出露。

(3) 海南岛二叠纪花岗岩以及一些古老的前寒武纪岩石中普遍发育与三江构造带走向一致的印支期 NW 向定向构造,如琼西公爱及五指山地区 NW 右行韧性剪切带,其变形年龄为 242 ~ 245 Ma(陈新跃等 2006; Zhang et al., 2010)。这与三江造山带和越南 Truong Son 造山带所发育的 258 ~ 240 Ma NW 向右行剪切带在变形时序及构造样式上都非常相似(Lepvrier et al., 1997 2004; Nam et al., 1998; Carter et al., 2001) 暗示它们之间的内在联系。海

南岛所存在的 NW 向韧性构造变形带可能是印支板块与华南板块之间 NW 向构造体系的南延部分,是古特提斯洋闭合、板块碰撞演化过程中所留下的痕迹。

(4) 在越南马江(SONG MA)流域和中国广西右江-十万大山-钦州以及海南等地存在晚二叠世-早三叠世的磨拉石碎屑建造,它们可能是 Truong Son 印支期造山带前陆盆地沉积组成。马江流域出露晚二叠世-早三叠世砾岩、凝灰质砾岩、砂岩、杂砂岩、细砂岩、粉砂岩和泥质岩等,广西右江-十万大山和广东韶关-肇庆等地发育了类似沉积建造,古水流指向从南-北或西南-北东(Cai and Zhang, 2009; Liang et al., 2004; Liang and Li, 2005)。海南岛在东方县南龙村和江边乡零星出露早二叠世深水相沉积和晚二叠世海陆交互相中-细碎屑沉积建造,反映了前陆盆地前渊沉积特点。已有的古地磁资料也显示,海南岛发生了由晚石炭世 35.8°N -早二叠世 21.8°N -早三叠世 16.5°N 的变化,表明海南岛在海西-印支期时发生大规模南移或者顺时针旋转(汪啸风等, 1991b; Carter et al., 2001; Metcalfe, 1999, 2000)。

综上所述,我们认为海南岛早二叠世晚期的岩浆作用应该是古特提斯演化过程中构造岩浆作用的产物,为壳幔相互作用的结果。海南岛现今的地理位置可能与其自晚石炭世开始大规模南移有关。

5 结 论

(1) 高精度的 LA-ICP-MS 微区锆石 U-Pb 定年结果表明,海南岛乐东地区志仲岩体形成于早二叠世晚期,约 272 Ma,与岛内变基性火山岩和中酸性侵入岩的形成时间相似,为同期岩浆作用不同幕次的产物。

(2) 锆石原位 Hf 同位素组成暗示志仲花岗岩岩浆主要是来源于中元古代火成岩物质的重熔,其对应的二阶段 Hf 模式年龄(1.33~1.41 Ga),暗示了岛内一期重要成壳时间,与区域上花岗岩的 Nd 模式年龄相吻合。而 Hf 同位素组成的不均一性和 Hf 模式年龄的不一致性,可能与源区不均一、新生幔源组分加入程度不同有关。

(3) 海南岛内早二叠世晚期花岗岩可能是古特提斯演化过程的产物,并非太平板块西向俯冲的结果。

致谢:衷心感谢海南省地质调查院李孙雄、云平、官军工程师等在野外工作中的热心帮助。

参考文献(References):

- 陈海泓,肖文交. 1998. 多岛海型造山作用——以华南印支期造山带为例. 地质前缘, 5(增刊): 95-102.
- 陈培哲,钟盛中,何圣华,陈贻川. 1997. 全国地层多重划分对比研究(46): 海南省岩石地层. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 陈新跃,王岳军,范蔚茗,张飞飞,彭头平,张玉芝. 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.
- 陈新跃,王岳军,韦牧,范蔚茗,彭头平. 2006. 海南公爱 NW 向韧性剪切带构造特征及其 ^{39}Ar - ^{40}Ar 年代学约束. 大地构造与成矿学, 30(3): 312-319.
- 邓希光,陈志刚,李献华,刘敦一. 2004. 桂东南地区大容山-十万大山花岗岩带 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年. 地质论评, 50(4): 426-432.
- 丁式江. 1995. 琼西戈枕侵入体的地质特征及其发现意义. 大地构造与成矿学, 19(4): 336-343.
- 方中,夏邦栋,于津海,陶仙聪,杨杰东,李惠民. 1992. 海南岛古生代岩石 Rb-Sr 年代学和氧同位素研究. 岩石学报, 8(3): 296-306.
- 方中,徐士进,陈克荣,夏邦栋,赵建新, McCulloch M T. 1993. 海南岛石碌群中双峰火山岩 Sm-Nd 同位素特征兼论石碌铁矿成矿背景. 地球化学, 22(4): 326-336.
- 方中,于津海,夏邦栋,陶仙聪,李惠民. 1995. 海南岛海西-印支期花岗岩和暗色包体的 Sm-Nd 同位素特征. 南京大学学报(自然科学版), 31(2): 338-343.
- 付建明,赵子杰,曾波夫. 1996. 海南岛邦溪-芙蓉田地区花岗岩类单元特征及其形成环境. 广东地质, 11(4): 22-29.
- 高睿,肖龙,何琦,袁静,倪平泽,杜景霞. 2010. 滇西维西-德钦一带花岗岩年代学、地球化学和岩石成因. 地球科学, 35(2): 186-200.
- 胡宁,张仁杰,冯少南. 2002. 海南岛泥盆-石炭系分界线研究. 地质科学, 37(3): 313-319.
- 雷裕红,丁式江,马昌前,傅杨荣,杨坤光,龙文国. 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,陈沐龙,周进波,曾雁玲,莫位明. 2007. 海南岛中部古生代沉积盆地格局及其演化特征. 华南地质与矿产, (2): 41-46.
- 李孙雄,云平,范渊,周进波. 2005. 海南岛琼中地区琼中岩体锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 大地构造与成矿学, 29(2): 227-241.
- 李献华,周汉文,丁式江,李寄嶠,张仁杰,张业明,葛文春. 2000a. 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.
- 李献华,周汉文,丁式江,李寄嶠,张仁杰,张业明,葛文

- 春. 2000b. 海南岛洋中脊型变质基性岩: 古特提斯洋壳的残片? 科学通报, 45(1): 84-89.
- 梁新权. 1995. 海南岛前寒武纪花岗岩-绿岩系 Sm-Nd 同位素年龄及其地质意义. 岩石学报, 11(1): 71-76.
- 龙文国, 黄正壮, 王大英. 2001. 琼西花岗闪长岩锆石 Pb-Pb 同位素年龄及其地质意义. 广东地质, 16(2): 7-12.
- 龙文国, 董金南, 朱耀河, 周进波, 李孙雄, 石春. 2007. 海南儋州-屯昌地区二叠纪地层的发现及其意义. 华南地质与矿产, (1): 38-45.
- 罗志高, 王岳军, 张菲菲, 张爱梅, 张玉芝. 2010. 金滩和白马山印支期花岗岩体 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年及其成岩启示. 大地构造与成矿学, 34(2): 282-290.
- 马大铨, 康先济, 赵子杰. 1991. 海南岛侵入岩 // 汪啸风等. 海南地质(二) 岩浆岩. 北京: 地质出版社: 1-167.
- 唐立梅, 陈汉林, 董传万, 沈忠悦, 程晓敢, 付璐露. 2010. 海南岛三叠纪中基性岩的年代学、地球化学及其地质意义. 地质科学, 45(4): 1139-1156.
- 唐作友, 冯少南. 1998. 海南岛大岭地区二叠系的发现及意义. 地层学杂志, 22(3): 232-240.
- 王大英, 云平. 1999. 海南乐东地区晚三叠世 A 型花岗岩基本特征. 广东地质, 14(4): 19-21.
- 王德滋. 2004. 华南花岗岩研究的回顾与展望. 高校地质学报, 10(3): 305-314.
- 王德滋, 刘昌实. 1986. 中国东南部沿海海西-印支旋回花岗岩类的分布规律及其成因. 岩石学报, 2(4): 1-13.
- 王丽娟, 于津海, 徐夕生, 谢磊, 邱检生, 孙涛. 2007. 闽西南古田-小陶花岗质杂岩体的形成时代和成因. 岩石学报, 23(6): 1470-1484.
- 汪啸风, 马大铨, 蒋大海. 1991a. 海南岛地质(一)——地层古生物. 北京: 地质出版社: 131-192.
- 汪啸风, 马大铨, 蒋大海. 1991b. 海南岛地质(三)——构造地质. 北京: 地质出版社: 10-100.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. 岩石学报, 23(2): 185-220.
- 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.
- 夏邦栋, 施光宇, 方中, 于津海, 王赐银, 陶仙聪, 李惠民. 1991. 海南岛晚古生代裂谷作用. 地质学报, 65(2): 103-115.
- 夏邦栋, 于津海, 方中, 王赐银, 楚雪君. 1990. 海南岛海西-印支期花岗岩的地球化学特征及成因. 地球化学, 19(4): 365-373.
- 谢才富, 朱金初, 丁式江, 张业明, 付太安, 李志宏. 2006a. 琼中海西期钾玄质侵入岩的厘定及其构造意义. 科学通报, 51(16): 1944-1954.
- 谢才富, 朱金初, 丁式江, 张业明, 陈沐龙, 付杨荣, 付太安, 李志宏. 2006b. 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.
- 谢才富, 朱金初, 赵子杰, 丁式江, 付太安, 李志宏, 张业明, 徐德明. 2005. 三亚石榴霓辉石正长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄: 对海南岛海西印支期构造演化的制约. 高校地质学报, 11(1): 37-47.
- 许德如, 陈广浩, 夏斌, 陈涛. 2003. 海南岛几个重大基础地质问题评述. 地质科学情报, 22(4): 37-44.
- 许德如, 范蔚茗, 梁新权, 唐红峰. 2001. 海南岛元古宙变质基底性质和地壳增生的 Nd、Pb 同位素制约. 高校地质学报, 7(2): 146-156.
- 许德如, 夏斌, 李鹏春, 张玉泉, 陈广浩, 马驰. 2006. 海南岛北西部前寒武纪花岗质岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及地质意义. 大地构造与成矿学, 30(4): 510-518.
- 徐夕生, 邓平, O'Reilly S Y, Griffin W L, 周新民, 谭正中. 2003. 华南贵东杂岩体单颗粒锆石激光探针 ICPMS U-Pb 定年及其成岩意义. 科学通报, 48(12): 1328-1334.
- 杨树锋, 虞子冶, 郭令智, 施央申. 1989. 海南岛的地体划分、古地磁研究及其板块构造意义. 南京大学学报(地球科学版), 1(1-2): 38-46.
- 姚华舟, 黄照先. 1999. 海南万宁发现奥陶纪地层. 华南地质与矿产, (1): 13-17.
- 姚华舟, 黄照先, 谢才富, 张开明. 1999. 海南岛万宁地区寒武纪地层及其沉积特征. 地层学杂志, 23(10): 270-276.
- 俞受望, 夏萍, 邓铁殷, 李强, 陈毓蔚. 1992. 海南抱板地区中元古代花岗岩副矿物锆石的特征及 U-Pb 同位素年龄测定. 地球化学, 21(3): 213-220.
- 虞子冶. 1989. 海南岛早二叠世冰海相沉积的确定及其板块构造意义. 南京大学学报(自然科学版), 25(1): 108-109.
- 云平, 雷裕红, 吕嫦艳. 2005. 海南岛中北部三叠纪花岗岩源区的铽、钆同位素制约及其意义. 大地构造与成矿学, 29(2): 234-241.
- 云平, 谢盛智, 谢盛周, 吴育波. 2004. 海南岛烟塘岩体的成因及其构造意义. 华南地质与矿产, (2): 40-45.
- 张业明, 张仁杰. 1997. 海南岛前寒武纪地壳构造演化. 地球科学——中国地质大学学报, 22(4): 395-400.
- 张仁杰, 胡宁, 姚华舟, 冯少南. 2002. 海南岛保亭地区南好组的地质时代. 地层学杂志, 26(2): 101-105.
- 张仁杰, 马国干, 蒋大海. 1991. 海南岛前寒武纪地质. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 曾庆奎, 李志宏, 谢才富, 傅太安, 张森. 2003. 论海南岛地区志留系. 地层学杂志, 27(4): 267-275.
- 曾庆奎, 李志宏, 谢才富, 傅太安, 张森. 2004. 海南岛早

- 志留世晚期腕足类 *Xinanospirifer* 的发现——兼论南好组. *古生物学报*, 43(1): 86-93.
- 周佐民, 谢才富, 徐倩, 高太飞. 2011. 海南岛中三叠世正长岩-花岗岩套的地质地球化学特征与构造意义. *地质论评*, 57(4): 515-531.
- Bievre P D and Taylor P D P. 1993. Table of the isotopic compositions of the elements. *International Journal of Mass Spectrometry and Ion Processes*, 123(2): 149-166.
- Blichert-Toft J and Albarede F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(1-2): 243-258.
- Cai J X and Zhang K J. 2009. A new model for the Indochina and South China collision during the Late Permian to the Middle Triassic. *Tectonophysics*, 467(1-4): 35-43.
- Carter A, Roques D and Bristow C. 2001. Understanding Mesozoic accretion in Southeast Asia: Significance of Triassic thermotectonism (Indosinian orogeny) in Vietnam. *Geology*, 29(3): 211-214.
- Chen C H, Hsieh P S, Lee C Y and Zhou H W. 2011. Two episodes of the Indosinian thermal event on the south china block: Constraints from LA-ICPMS U-Pb zircon and electron microprobe monazite ages of the Darongshan S-type granitic suite. *Gondwana Research*, 19(4): 1008-1023.
- Chu N C, Taylor R N, Chavagnac V, Nesbitt R W, Boella R M, Andrew Milton, German C R, Bayon G and Burton K. 2002. Hf isotope ratio analysis using multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry: an evaluation of isobaric interference corrections. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 17: 1567-1574.
- Chuong V D. 1995. Ophiolite zone in Vietnam. *Journal of Geology of Vietnam*, B5-6: 323.
- Elhlou S, Belousova E, Griffin W L, Pearson N J and O'Reilly S Y. 2006. Trace element and isotopic composition of GJ-red zircon standard by laser ablation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(18): A158-A158.
- Engelbreton D C, Cox A and Gordon R G. 1985. Relative motions between oceanic and continental plates in the Pacific basins. *Geological Society of America Special Paper*, 206: 1-59.
- Fan W M, Wang Y J, Zhang A M, Zhang F F and Zhang Y Z. 2010. Permian arc-back-arc basin development along the Ailaoshan tectonic zone: Geochemical, isotopic and geochronological evidence from the Mojiang volcanic rocks, Southwest China. *Lithos*, 119(3-4): 553-568.
- Gatinsky Y G. 1986. Geodynamics of southeast Asia in relation to the evolution of ocean basins. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 55: 127-144.
- Griffin W L, Wang X, Jackson S E, Pearson N J, O'Reilly S Y, Xu X S and Zhou X M. 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: *In-situ* analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes. *Lithos*, 61(3-4): 237-269.
- Hennig D, Lehmann B, Frei D, Belyatsky B, Zhao X F, Cabral A R, Zeng P S, Zhou M F and Schmidt K. 2009. Early Permian seafloor to continental arc magmatism in the eastern Paleo-Tethys: U-Pb age and Nd-Sr isotope data from the southern Lancangjiang zone, Yunnan, China. *Lithos*, 113(3-4): 408-422.
- Hsü K J, Li J L, Chen H H, Wang Q C, Sun S and Sengier A M C. 1990. Tectonics of South China: Key to understanding West Pacific geology. *Tectonophysics*, 183(1-4): 9-39.
- Jackson S E, Pearson N J, Griffin W L and Belousova E A. 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to *in situ* U-Pb zircon geochronology. *Chemical Geology*, 211(1-2): 47-69.
- Jian P, Liu D Y and Sun X M. 2008. SHRIMP dating of the Permo-Carboniferous Jinshajiang ophiolite, southwestern China: Geochronological constraints for the evolution of Paleo-Tethys. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(5-6): 371-384.
- Kinny P D and Maas R. 2003. Lu-Hf and Sm-Nd isotope systems in zircon. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 327-341.
- Knudsen T L, Griffin W L, Hartz E H, Andresen A and Jackson S E. 2001. *In-situ* hafnium and lead isotope analyses of detrital zircons from the Devonian sedimentary basin of NE Greenland: A record of repeated crustal reworking. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 141(1): 83-94.
- Lan C Y, Chung S L, Shen J J S, Lo C H, Wang P L, Hoa T T, Thanh H H and Mertzman A. 2000. Geochemical and Sr-Nd isotopic characteristics of granitic rocks from northern Vietnam. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(3): 267-280.
- Lepvrier C, Maluski H, Vuong N Van, Roques D, Axente V and Rangin C. 1997. Indosinian NW-trending shear zones within the Truong Son belt (Vietnam) $^{40}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}$ Triassic ages and Cretaceous to Cenozoic overprints. *Tectonophysics*, 283(1-4): 105-127.
- Lepvrier C, Maluski H, Tich V Van, Leyreloup A, Thi P T and Vuong N Van. 2004. The Early Triassic Indosinian orogeny in Vietnam (Truong Son Belt and Kontum Massif): Implications for the geodynamic evolution of Indochina. *Tectonophysics*, 393(1-4): 87-118.
- Li X H, Li Z X, Li W X and Wang Y J. 2006. Initiation of

- the Indosinian orogeny in South China: Evidence for a Permian magmatic arc on Hainan Island. *Journal of Geology*, 114(3): 141–353.
- Li Z X and Li X H. 2007. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model. *Geology*, 35(2): 179–182.
- Li Z X, Li X H, Zhou H W and Kinny P D. 2002. Grenvillian continental collision in south China: New SHRIMP U-Pb zircon results and implications for the configuration of Rodinia. *Geology*, 30(2): 163–166.
- Liang X Q, Li X H and Qiu Y X. 2004. Intracontinental collisional orogeny of the Late Permian to Middle Triassic in South China: Sedimentary records of the Shiwandashan Basin. *Acta Geologica Sinica*, 78(3): 756–762.
- Liang X Q and Li X H. 2005. Late Permian to Middle Triassic sedimentary records in Shiwandashan Basin: Implication for the Indosinian Yunkai Orogenic Belt, South China. *Sedimentary Geology*, 177(3–4): 297–320.
- Ludwig K R. 2003. Isoplot 3.0: A geochronological toolkit for Microsoft Excel. *Berkeley Geochronology Center, Special Publication*, (4): 1–71.
- Metcalf I. 1999. Gondwana dispersion and Asian accretion: An overview // Metcalfe I. Gondwana dispersion and Asian accretion: IGCP 321 final results volume. Rotterdam, Netherlands, Balkema: 9–28.
- Metcalf I. 2000. The Bentong-Raub suture zone. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18: 691–712.
- Metcalf I, Shergold J H and Li Z X. 1994. IGCP 321 Gondwana dispersion and Asian accretion: Fieldwork on Hainan Island. *Episodes*, 16(4): 443–447.
- Morley C K. 2012. Late Cretaceous–Early Palaeogene tectonic development of SE Asia. *Earth-Science Reviews*, 115(1–2): 37–75.
- Nam T N, Toriumi M and Itaya T. 1998. *P-T-t* paths and post-metamorphic exhumation of the Day Nui Con Voi shear zone in Vietnam. *Tectonophysics*, 290(3–4): 299–318.
- Patchett P J, Kouvo O, Hedge C E and Tatsumoto M. 1982. Evolution of continental crust and mantle heterogeneity: Evidence from Hf isotope. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 78(3): 279–297.
- Peng B X, Wang Y J, Fan W M, Peng T and Liang X Q. 2006. LA-ICPMS zircon U-Pb dating for three Indosinian granitic plutons from central Hunan and western Guangdong provinces and its petrogenetic implications. *Acta Geologica Sinica*, 80(5): 660–669.
- Peng T P, Wang Y J, Fan W M, Liu D Y, Shi Y R and Miao L C. 2006. SHRIMP zircon U-Pb geochronology of early Mesozoic felsic igneous rocks from the southern Lancangjiang and its tectonic implications. *Science in China (Series D)*, 49: 1032–1042.
- Phan C T. 1991. Geology of Cambodia, Laos and Vietnam: Explanatory note to the geological map of Cambodia, Laos and Vietnam at 1:1 000 000. *Geological Survey of Vietnam*.
- Scherer E, Munker C and Mezger K. 2001. Calibration of the lutetium-hafnium clock. *Science*, 293: 683–687.
- Shu L S, Faure M, Wang B, Zhou X M and Song B. 2008. Late Palaeozoic–Early Mesozoic geological features of South China: Response to the Indosinian collision events in Southeast Asia. *Comptes Rendus Geosciences*, 340(2/3): 151–165.
- Tapponnier P, Lacassin R, Leloup P H, Schärer U, Zhong D L, Liu X H, Ji S C, Zhang L S and Zhong J Y. 1990. The Ailao Shan–Red River metamorphic belt: Tertiary left-lateral shear between Indochina and South China. *Nature*, 343: 431–437.
- Wang Q, Li J W, Jian P, Zhao Z H, Xiong X L, Bao Z W, Xu J F, Li C F and Ma J L. 2005. Alkaline syenites in eastern Cathaysia (South China): Link to Permian–Triassic transtension. *Earth and Planetary Science Letters*, 230(3–4): 339–354.
- Wang Y J, Zhang Y H, Fan W M and Peng T P. 2005. Structural signatures and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Indosinian Xuefengshan tectonic belt, South China Block. *Journal of Structural Geology*, 27(6): 985–998.
- Wang Y J, Fan W M, Cawood P A, Ji S C, Peng T P and Chen X Y. 2007a. Indosinian high-strain deformation for the Yunkaidashan tectonic belt, south China: Kinematics and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological constraints. *Tectonics*, 26, TC6008, doi: 10.1029/2007TC002099.
- Wang Y J, Fan W M, Sun M, Liang X Q, Zhang Y H and Peng T P. 2007b. Geochronological, geochemical and geothermal constraints on petrogenesis of the Indosinian peraluminous granites in the South China Block: A case study in the Hunan Province. *Lithos*, 96(3–4): 475–502.
- Woodhead J D and Hergt J M. 2005. A preliminary appraisal of seven natural zircon reference materials for *in situ* Hf-isotope analysis. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 29(2): 183–195.
- Wu F Y, Yang Y H, Xie L W, Yang J H and Xu P. 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology. *Chemical Geology*, 234(1–2): 105–126.
- Xu D R, Xia B, Li P C, Chen G H, Ma C and Zhang Y Q. 2007. Protolith natures and U-Pb sensitive high mass-resolution ion microprobe (SHRIMP) zircon ages of the metab-

- asites in Hainan Island, South China: Implications for geodynamic evolution since the late Precambrian. *Island Arc*, 16(4): 575–597.
- Yuan H L, Gao S, Dai M N, Zong C L, Günther D, Fontaine G H, Liu X M and Di Wu C R. 2008. Simultaneous determinations of U-Pb age, Hf isotopes and trace element compositions of zircon by excimer laser ablation quadrupole and multiple collector ICP-MS. *Chemical Geology*, 247(1–2): 100–117.
- Yuan H L, Gao S, Liu X M, Li H M, Günther D and Wu F Y. 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma mass spectrometry. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(3): 353–370.
- Zhang F F, Wang Y J, Chen X Y, Fan W M, Zhang Y H, Zhang G W and Zhang A M. 2010. Triassic high-strain shear zones in Hainan Island (South China) and their implications on the amalgamation of the Indochina and South China Blocks: Kinematic and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological constraints. *Gondwana Research*, 19(4): 910–925.
- Zhou X M and Li W X. 2000. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas. *Tectonophysics*, 326(3/4): 269–287.

Zircon U-Pb Ages, Hf Isotopic Composition of Zhizhong Granitic Intrusion in Ledong Area of Hainan Island and Their Tectonic Implications

WEN Shun^{1,2}, LIANG Xinquan¹, FAN Weiming¹, WANG Yuejun¹,
CHI Guoxiang³, LIANG Xirong¹, ZHOU Yun¹ and JIANG Ying¹

(1. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Department of Geology, University of Regina, Regina, Saskatchewan, Canada S4S 0A2)

Abstract: Late Paleozoic to Early Mesozoic (Hercynian to Indosinian) granitic intrusions widely distribute in Hainan Island, South China. However, no consensus has been achieved in terms of the related tectonic regime of these magmatism activities, the Late Paleozoic granites, in particular. Aiming to provide insights into the time of intrusion, petrogenesis and tectonic setting of the Late Paleozoic granites, zircons from the Zhizhong granite, which is located in the Ledong area in southwestern Hainan Island, were analyzed. *In-situ* zircon U-Pb geochronology and Hf isotope analysis of zircons were analyzed in Northwestern University using LA-ICPMS methods. Zircons from two samples (HN0832 and HN0909) yield similar weighted mean $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of 272.4 ± 1.5 Ma ($n = 21$) and 271.7 ± 3.0 Ma ($n = 16$), respectively. The ages are interpreted as the intrusive age, i. e., the Zhizhong granite intruded in late Early Permian. The $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of the zircons range from -3.7 to $+2.8$, while the Hf two-stage modal ages vary from 1.12 Ga to 1.53 Ga with a peak at 1.33 ~ 1.41 Ga, demonstrating a mantle input for the Zhizhong granite. Thus, a mixed crust-mantle source is envisaged. Furthermore, the parent melts of the Zhizhong granite possibly derived from the melting of the Mesoproterozoic igneous rocks beneath Hainan Island with significant contribution of asthenosphere melts. Moreover, the age peaks of the two-stage Hf modal ages (1.3 ~ 1.4 Ga) of the Zhizhong Granite are similar to the whole rock two-stage Nd modal ages (1.4 ~ 1.6 Ga) of the coeval granites in the adjacent region, which implies that Mesoproterozoic is an important episode of crustal growth in Hainan Island. Combining the regional deformation, sedimentary records and palaeomagnetic data, it can be deduced that the late Early Permian magmatism in Hainan Island was probably geodynamically linked to the collision between the Indochina and South China Block, following the closure of the Paleo-Tethys Ocean rather than the westward subduction of the Paleo-Pacific Plate beneath the Eurasian continent.

Keywords: LA-ICP-MS; zircon U-Pb dating; Hf isotope; Zhizhong granites; Hainan Island