

海南枫木地区基性岩的年代学、 地球化学及其构造意义*

何慧莹, 王岳军, 刘汇川, 张玉芝
(中山大学地球科学与地质工程学院//广东省地质过程与
矿产资源探查重点实验室, 广东 广州 510275)

摘要:海南岛地处印支陆块和华南陆块的交界地带, 具有复杂的构造演化史, 其构造属性及其拼合历史一直备受争议。通过野外调查发现, 在海南岛琼中枫木地区斑状花岗岩内夹持有基性岩。该基性岩的主要组成矿物为斜长石、角闪石和辉石。LA-ICP-MS 锆石定年结果显示该基性岩锆石 U-Pb 年龄为 (240.3 ± 2.6) Ma, 代表了其形成年龄。主、微量元素和同位素地球化学结果显示, 样品 SiO_2 变化于 48.99% ~ 56.00% 之间, 大部分样品高 K_2O (1.90% ~ 3.94%)、 Al_2O_3 (14.56% ~ 17.77%) 含量和 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ (0.58 ~ 1.32) 比值。样品有较高的稀土元素总量 ($\sum \text{REE} = 214.7 \sim 522.7 \mu\text{g/g}$), 显示出右倾岛弧型稀土元素配分模, 其 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 11.2 \sim 31.1$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}} = 2.0 \sim 4.0$, $\delta\text{Eu} = 0.7 \sim 1.1$ 。样品富集大离子亲石元素、亏损 Nb、Ta 和 Ti 等高场强元素, 具有较低的 Nd 同位素组成 ($\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -1.05 \sim -2.53$)。综合分析表明, 枫木地区基性岩源于受到俯冲沉积物和板片流体交代改造的富集地幔, 形成于古特提斯洋俯冲格局下华南与印支陆块间碰撞后伸展构造背景, 暗示 240 Ma 左右华南和印支陆块之间的拼合已趋结束。

关键词: 三叠纪基性岩; 锆石定年; 岛弧地球化学; 碰撞后背景; 枫木; 海南岛

中图分类号: P595 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2016) 04-0146-12

Geochemical and geochronological characteristics of the Fengmu mafic rocks in Hainan and its tectonic implications

HE Huiying, WANG Yuejun, LIU Huichuan, ZHANG Yuzhi

(School of Earth Sciences and Geological Engineering // Guangdong Provincial Key Lab of Geological Processes and Mineral Resource, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Hainan Island, tectonically located between the Indochina and the South China Blocks, has undergone multiphased structural overprinting and complex tectonic evolution. Mafic rocks, newly discovered in the Fengmu area, Central Hainan, are coeval with Triassic porphyritic granite and mainly composed of plagioclase, clinopyroxene and hornblende. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results for the representative sample yield the weighted mean $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of (240.3 ± 2.6) Ma, interpreted as the crystallization age of the mafic rocks. They have SiO_2 ranging from 48.99% to 56.00%, K_2O between 0.63% ~ 3.94% and Al_2O_3 between 14.56% ~ 17.77%, and have a $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ratio of 0.58 ~ 1.32. These rocks show high REE concentrations with $\sum \text{REE} = 214.7 \sim 522.7 \mu\text{g/g}$, and $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 11.17 \sim 31.10$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}} = 2.00 \sim 4.50$, $\delta\text{Eu} = 0.74 \sim 1.14$. They are characterized by subparallel right-sloping REE pattern, similar to those of island arc volcanic rocks, and by enrichment in LREEs and LILEs and depletion in HFSEs with significant Nb-Ta and Ti negative anomalies. The $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ values ranges from

* 收稿日期: 2015-12-11

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973) 基金资助项目 (2014CB440901); 国家自然科学基金资助项目 (41190073, 41372198); 中山大学高校基本业务费资助项目

作者简介: 何慧莹 (1993 年生), 女; 研究方向: 岩石大地构造; E-mail: hehuiy2@mail2.sysu.edu.cn

-1.05 to -2.53. Our data indicate that these rocks originated from the enriched mantle source modified by subduction-related fluid/melt. In combination with other available data, it is proposed that the Fengmu mafic rocks at 240 Ma generated at the post-collision extensional setting of the convergence of the South China with Indochina Block in response to the subduction of the Paleotethyan Ocean.

Key words: Triassic mafic rocks; LA-ICP-MS zircon U-Pb dating; arc affinity; post-collisional setting; Fengmu; Hainan Island

海南岛地处欧亚、印度-澳大利亚和菲律宾板块的交汇部位(图 1a), 受古太平洋构造域和特提斯构造域的双重影响。由于其特殊的地理位置, 一直被认为是研究多块体俯冲造山和特提斯构造演变的理想地带^[1-3]。现阶段对海南构造区域的划分及其地质演化背景仍存诸多争议。例如, 杨树锋等^[4]以东西向的九所-陵水断裂为界将海南岛划分为崖县和琼中两个古生代地体, 并认为海南岛陆壳是华南陆壳的组成部分^[3,5]。Hsü et al.^[6]以昌江-琼海断裂带将海南岛分为南、北两个块体, 并分属华夏地块和印支地块; Metcalfe^[7]则以白沙断裂为界划分出东南和西北两个块体。存在这些争论的一个重要原因是海南岛古生代的构造演化及其在古特提斯演变中的位置等问题的研究不足。也由于其所处大地构造位置的特殊性, 目前对海南岛海西-印支期岩浆岩的岩石成因和构造背景有着不同认识, 如 Li et al.^[8]认为海南岛在古生代末期与东南沿海处于同一构造背景, 主要受古太平洋板块俯冲作用所控制^[8-9]。但越来越多的研究者则倾向于认为, 在晚古生代-早中生代, 海南岛与特提斯洋闭合及印支、华南陆块的拼合关系更为密切^[10-17]。

基性岩作为探索岩石成因和深部动力学机制的重要岩石探针, 能有效用于限定其形成时期研究区的构造背景^[17]。因此, 海南岛海西-印支期基性岩的研究对探讨海南岛古生代构造演化有着重要意义, 能很好地约束华南和印支陆块拼合时的大地构造格局。近年, 众多学者对海南岛全岛范围内广泛出露的海西-印支期花岗岩开展了研究^[8,10-13,16,18-19], 但对海南岛出露的基性岩, 除邦溪-晨星地区 N-MORB 基性岩、琼中钾玄质侵入岩^[20]、万宁辉长辉绿岩^[14]和中沙农场基性岩脉^[17]以外, 是否有更多的基性岩出露则鲜有报道。同时由于对这些岩石精细年代学和系统元素-同位素地球化学工作的不足, 也导致晚古生代末-早中生代初海南岛究竟与古特提斯构造域关系密切、还是受控古太平洋构造域仍存在激烈争论。本文拟通过对海南岛枫木地区与斑状花岗岩紧密共存的基性岩开展了细致的野外调研和精细年代学和系统的地球化

学研究。我们的工作表明, 枫木地区基性岩形成于 240 Ma, 产出于与古特提斯演变更为密切的碰撞后构造背景, 这些资料为进一步认知华南、印支陆块的拼贴时序及其机制提供了重要证据。

1 区域地质和样品岩石学

海南岛与华南大陆以琼州海峡相隔, 岛内主要出露古生代地层, 其次为元古代和中新生代地层^[21-22]。海南岛最古老的地层被认为是出露于抱板、冲卒岭、大蟹岭、上安、石碌、黄竹岭等地的抱板群和石碌群^[23-24], 其形成时代~1.43 Ga, 被认为是海南岛的结晶基底^[25]。下古生界寒武系和奥陶系主要出露于昌江-琼海断裂以南, 岩性为浅变质页岩、砂岩、板岩^[10,18,26]; 志留系仅发育下志留统浅海相砂岩^[27-28]; 石炭系板岩和变火山岩、下二叠统灰岩和中二叠统砂岩分布在九所-陵水断裂以北^[10,18,26-28]。海南岛中生代地层在岛内仅出露上三叠统碎屑岩沉积和白垩系砂岩^[10,18,26], 新生代地层主要出露于岛北地区及其周围。岛上断裂构造发育, 主要以东西向构造与北东向构造为主, 从北至南发育有王五-文教、昌江-琼海、尖峰-吊罗、九所-陵水等多条近东西向断裂^[28], 由西向东则发育有北东向的戈枕断裂和白沙断裂等^[10,18,26,29]。

海南岛内火成岩以侵入岩为主, 其中又以海西-印支期花岗岩类分布最广, 主要出露于乐东-五指山-万宁地区, 其次为燕山晚期的花岗岩及中元古代花岗岩^[30]。此外, 在抱板群中发育有斜长角闪岩, 沿海南岛中部的昌江-琼海断裂一带的邦溪-军营和晨星地区发育晚古生代变基性岩和安山岩^[1,2,29,31-32], 并有中生代基性岩零星出露^[14,17,20], 如在海南岛的西部中沙农场和东部万宁地区发现 240 Ma 左右的基性岩^[14,17]。

本次研究的基性岩采自屯昌枫木镇南木色水库加总岭(图 1b)。屯昌地区侵入岩主要为二叠纪和白垩纪花岗岩, 主要分布于海南岛中部屯昌县至琼中县一带。其大地构造位置为五指山隆起区, 向北与雷琼断陷, 向南与南海地台三亚台缘拗陷带为

邻^[33]。野外露头显示该基性岩呈侵入状产于斑状花岗岩中，但同时见该基性岩捕获有斑状花岗岩(图 1c)、样品手标本呈灰黑色或灰绿色，块状构造，部分样品镜下观察可见辉长结构。其矿物组成主要有斜长石、角闪石、辉石和少量碱性长石。斜长石自形程度较高，呈长柱状，含量约为 65%，角闪石含量约为 30%，并含有少量辉石、见呈他粒状分布在自形程度较好的斜长石粒间的碱性长石。

副矿物有锆石、榍石、磷灰石和磁铁矿等(图 2)。

2 年代学分析结果

用于定年的锆石样品取自上述基性岩中的代表性样品(11SY-13)。在避免污染的条件下，通过人工重砂法从新鲜的样品中分选出锆石，双目镜下仔细挑选足够数量的表面平整光滑无裂隙、无包体、形态较好的锆石颗粒。将锆石颗粒用环氧树脂

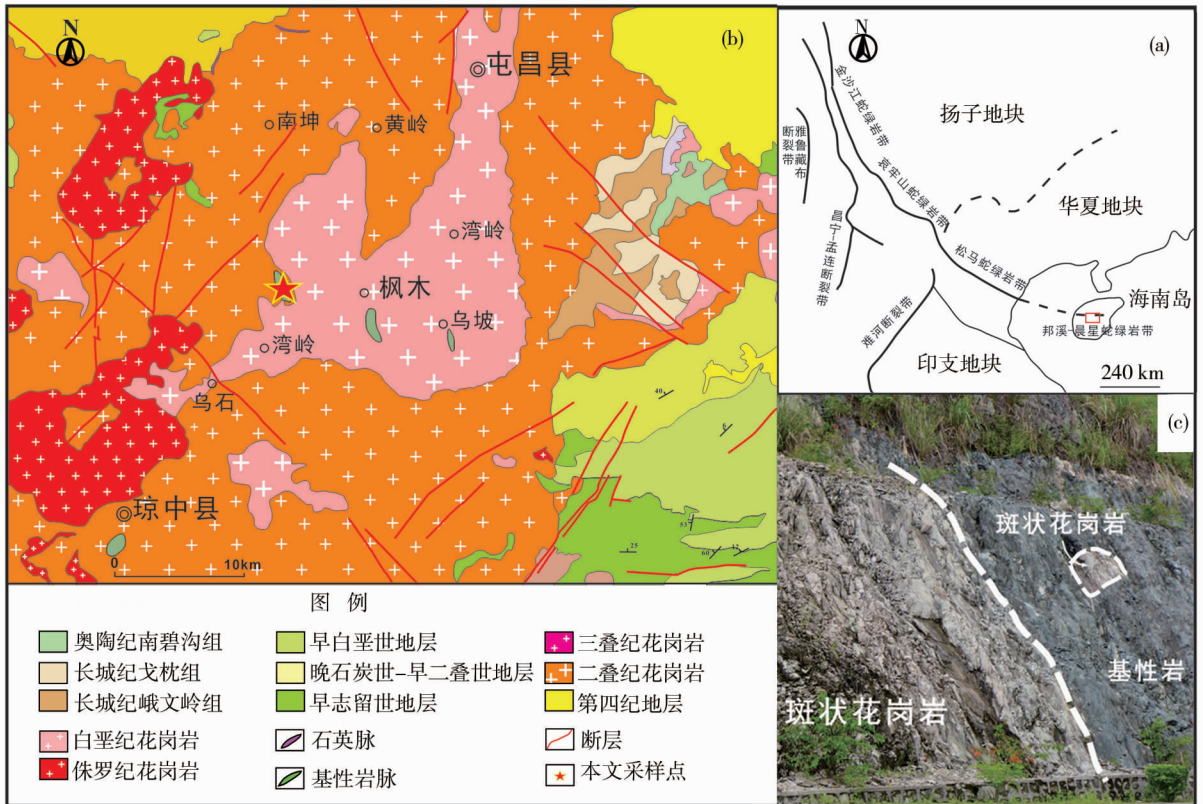


图 1 (a) 华南大陆南缘大地构造概略图; (b) 海南枫木地质概况及采样点位置; (c) 海南枫木基性岩野外照片
Fig. 1 (a) Simplified geological map in South China, (b) Geological map at the Fengmu area showing the sampling locations, (c) Field photograph of the Fengmu mafic rocks, Central Hainan

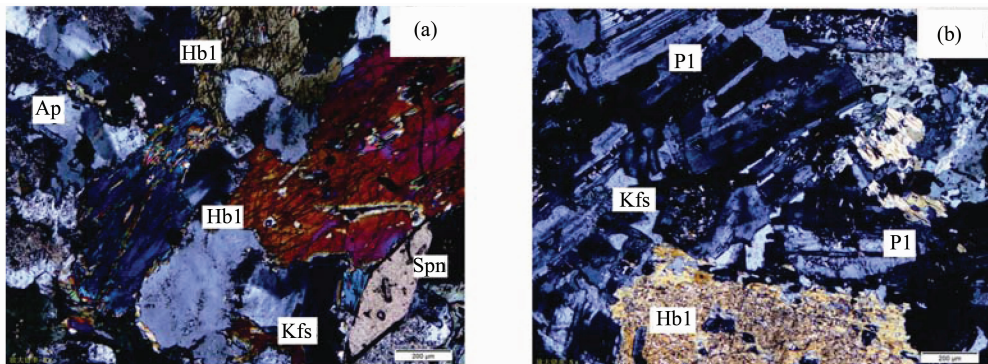


图 2 枫木地区基性岩岩石显微相片 (a-b)
Fig. 2 Photomicrograph (a-b) of the Fengmu mafic rocks in Central Hainan

胶结，细磨至锆石颗粒中心部位后，抛光制成样品靶。通过阴极发光（CL）和背散射电子照相（BSE）检查抛光后的锆石样品内部结构及确定锆石成因类型，并以此作为 U-Pb 同位素测试时选择测试点的参照。锆石 U-Pb 同位素分析使用广州地球化学研究所同位素室国家重点实验室的电感耦合等离子体质谱仪完成，相关分析方法见文献^[34]。所有用于定年的锆石均为透明-半透明柱状矿物，内部具振荡环带，与岩浆成因锆石相似^[35]，代表性锆石的 CL 阴极发光图像如图 3a 所示。样品 11SY-13 的 24 个点的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学测定结果如表 1 和图 3b 所示。24 个锆石分析点的 Th/U 比值，除 11SY-13-04 给出 0.16 以外，变化于 0.36 ~ 2.01，均大于或约等于 0.4，符合岩浆成因锆石的 Th/U 性质比值特征。对²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄进行加权平均计算及谐和图分析，所有的锆石分析点结果均投影在谐和曲线附近，表明这些锆石颗粒形成后 U-Pb 同位素体系是封闭的，基本没有出现 Pb 同位素丢失或加入。所测 24 个点的²⁰⁶Pb/²³⁸U 表观

年龄变化于 (228 ± 4) Ma 到 (252 ± 7) Ma 之间，其²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 (240.3 ± 2.6) Ma ($n = 24$, MSWD = 1.08)，解释为该基性岩的结晶年龄（图 3a）。

3 地球化学特征

全岩的主微量元素和 Sr-Nd 同位素组成分析在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完成，主量元素分析采用 Rigaku RIX 2000 型荧光光谱仪（XRF）进行分析，分析精度优于 95%，详细实验方法见文献^[36]；微量元素分析采用 PE Elan 6000 型电感耦合等离子体质谱仪，分析精度优于 95%，具体实验流程参照刘颖等^[37]；Sr、Nd 同位素组成分析采用 NEPTUNE 多接收等离子质谱仪（MC-ICPMS）进行⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 和¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 测试，测定过程中的质量分馏效应分别采用⁸⁶Sr/⁸⁸Sr = 0.119 4 和¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.721 9 进行校正。分析测试流程见文献^[38-39]。

表 1 代表性样品(11SY-13)锆石 LA-ICPMS U-Pb 定年结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results for the Fengmu mafic rock (11SY-13) in Hainan island

测点	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	
		比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄/Ma	1σ	年龄/Ma	1σ	年龄/Ma	1σ
11SY-13-01	1.53	0.052 8	6.072 4	0.276 2	10.227 6	0.037 9	8.229 8	320	132	248	23	240	10
11SY-13-02	0.93	0.054 0	6.884 6	0.298 0	9.008 9	0.040 1	5.810 6	369	148	265	21	253	7
11SY-13-03	1.01	0.056 7	5.274 2	0.282 0	6.519 7	0.036 1	3.832 6	480	112	252	15	228	4
11SY-13-04	0.16	0.051 4	5.609 0	0.265 7	7.289 1	0.037 5	4.655 0	257	124	239	16	237	5
11SY-13-05	0.42	0.051 8	6.216 9	0.275 6	8.379 0	0.038 6	5.617 5	277	136	247	19	244	7
11SY-13-06	0.56	0.050 7	9.124 2	0.274 3	10.812 2	0.039 2	5.801 2	227	198	246	24	248	7
11SY-13-07	1.53	0.051 6	3.600 8	0.265 1	6.545 4	0.037 3	5.466 0	268	81	239	14	236	6
11SY-13-08	1.40	0.051 6	5.206 3	0.280 3	7.286 4	0.039 4	5.097 6	269	115	251	16	249	6
11SY-13-09	0.32	0.051 3	5.546 3	0.262 1	6.769 6	0.037 1	3.881 4	253	123	236	14	235	4
11SY-13-10	1.25	0.051 2	5.337 0	0.271 3	8.282 7	0.038 5	6.334 0	248	118	244	18	243	8
11SY-13-11	1.51	0.051 4	4.303 4	0.274 4	9.172 5	0.038 7	8.100 4	259	96	246	20	245	10
11SY-13-12	1.08	0.050 6	5.834 4	0.274 3	8.115 2	0.039 3	5.640 6	221	130	246	18	249	7
11SY-13-13	1.49	0.051 0	4.543 7	0.262 3	7.879 7	0.037 3	6.437 7	239	102	236	17	236	7
11SY-13-14	2.01	0.051 4	3.200 6	0.279 0	6.968 3	0.039 3	6.189 7	261	72	250	16	249	8
11SY-13-15	1.27	0.052 3	5.785 4	0.277 0	7.340 3	0.038 4	4.517 7	298	127	248	16	243	5
11SY-13-16	1.07	0.051 3	4.401 8	0.268 4	9.800 4	0.037 9	8.756 3	255	98	241	21	240	10
11SY-13-17	1.84	0.052 7	3.638 5	0.276 1	6.517 8	0.038 0	5.407 6	317	81	248	14	240	6
11SY-13-18	1.31	0.052 1	4.262 8	0.266 7	6.210 4	0.037 2	4.516 4	288	95	240	13	235	5
11SY-13-19	0.10	0.051 2	6.599 9	0.272 5	8.886 9	0.038 6	5.951 4	249	145	245	20	244	7
11SY-13-20	1.70	0.051 1	4.058 2	0.267 1	8.029 4	0.037 9	6.928 3	247	91	240	17	240	8
11SY-13-21	0.67	0.052 5	5.437 7	0.283 5	8.529 5	0.0391	6.571 4	309	119	253	19	247	8
11SY-13-22	1.75	0.051 0	4.137 8	0.270 1	6.730 3	0.038 4	5.308 1	239	93	243	15	243	6
11SY-13-23	0.86	0.052 4	5.068 8	0.267 0	7.081 6	0.036 9	4.945 3	304	112	240	15	234	6
11SY-13-24	0.82	0.051 1	4.363 6	0.277 2	8.622 1	0.039 3	7.436 4	245	98	248	19	249	9

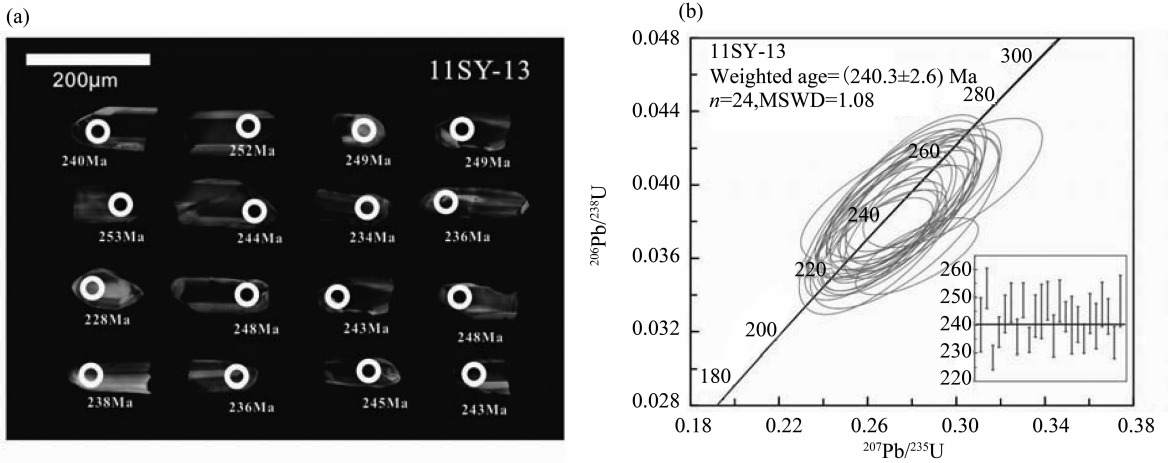


图 3 (a) 枫木基性岩 (11SY-13) 的代表性锆石 CL、测试点位及 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表观年龄, (b) 锆石 U-Pb 谐和图
 Fig. 3 (a) CL image, dating spots and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ apparent ages of the representative zircons and, (b) Concordia diagram of zircons U-Pb dating result from the Fengmu mafic rocks (11SY-13) in central Hainan

枫木地区基性岩的主、微量元素和同位素分析结果列于表 2。由表 2 可见, 9 个枫木地区基性岩样品 SiO_2 (质量分数) 变化于 48.99% ~ 56.00% 之间, 除烧失量较大的 11SY-17A 样品外, 其余样品的 K_2O 较高 (1.90% ~ 3.94%), 具有较高的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ (0.58 ~ 1.32) 比值, $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 为 4.76% ~ 7.05%。此外, 样品 Al_2O_3 变化于 14.56% ~ 17.77% 之间, TiO_2 变化于 0.99% ~ 2.79% 之间, 除极个别 TiO_2 偏高外, TiO_2 基本介于 1.08% ~ 2.19%。在 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - \text{SiO}_2$ 图解中 (图 4), 样品落于二长闪长岩 - 辉长闪长岩成分范围。考虑到样品的全碱含量和 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ (0.58 ~ 1.32), 结合岩相学特征分析, 枫木地区样品为二长辉长岩 - 二长闪长岩的岩石组合。

枫木基性岩样品具有较高的稀土元素丰度, ΣREE 变化于 214.7 ~ 522.7 $\mu\text{g/g}$, 平均 297 $\mu\text{g/g}$ 。在球粒陨石标准化图解 (图 5a) 上, 稀土元素配分曲线显示为 LREE 富集的右倾型配分模式, 类似于岛弧火山岩或活动大陆边缘火山岩配分特征。样品轻、重稀土分异明显, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 11.2 \sim 31.1$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N = 2.0 \sim 4.5$, Eu 异常不明显 ($\delta\text{Eu} = 0.7 \sim 1.1$)。在微量元素蛛网图上 (图 5b), 枫木地区基性岩富集大离子亲石元素 (如 Rb、Ba 等) 及轻稀土元素, 相对亏损高场强元素, 有着明显的 Nb-Ta 和 Ti 负异常, 其配分模式类似弧火山岩, 也与中沙农场和万宁基性岩配分特征类似^[14,17]。 Zr/Nb 比值介于 5.1 ~ 21.5 之间, Nb/La 比值介于 0.22 ~ 0.51 之间, 总体相似于岛弧岩浆岩^[40]。

枫木地区基性岩 Sr-Nd 同位素数据列于表 2。从表 2 可看出, 3 个代表性基性岩样品均具偏低 Nd 同位素比值 ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512381 \sim 0.512463$)。根据基性岩形成年龄 (240 Ma) 计算得到的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值为 0.708470 ~ 0.710762, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值变化于 -2.53 ~ -1.05 之间 (图 6), 略低于万宁地区辉长岩和辉绿岩脉的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值^[14], 总体类似 EMII 地幔源区。

4 讨论

枫木加总岭样品 11SY-13 的锆石形态完整, 有明显振荡环带, 绝大部分锆石 Th/U 比值大于 0.4, 属岩浆成因锆石。24 个分析点给出了 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的加权平均年龄为 $(240.3 \pm 2.6) \text{Ma}$, 代表了枫木基性

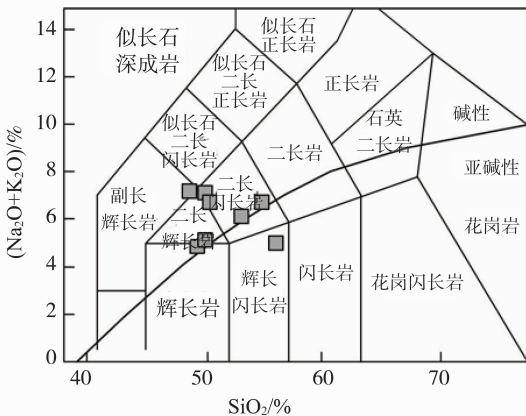


图 4 枫木基性岩 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - \text{SiO}_2$ 质量分数的 TAS 划分图解
 Fig. 4 Rock classification TAS diagrams for the Fengmu mafic rocks, Central Hainan

表2 枫木地区基性岩主量元素氧化物(%)、微量元素($\mu\text{g/g}$)和Sr-Nd同位素组成分析结果Table 2 Major oxides(%), trace element ($\mu\text{g/g}$) and Sr-Nd isotopic analytical results for the Fengmu mafic rocks in Hainan Island

样品编号	11SY-13	11SY-14	11SY-15A	11SY-15B	11SY-15C	11SY-17A	11SY-17C	11SY-17D	11SY-17E
SiO ₂	50.75	56.00	54.95	53.23	54.88	49.65	49.00	50.33	50.28
TiO ₂	1.81	0.99	1.92	2.19	1.85	1.36	2.79	1.34	1.08
Al ₂ O ₃	14.56	15.51	17.59	17.31	17.77	16.57	17.61	15.00	15.08
FeO _i	9.09	7.47	8.81	10.60	9.10	10.11	10.51	8.17	8.52
MgO	6.34	5.21	2.45	2.77	2.39	8.39	4.20	6.66	8.21
CaO	8.58	7.34	6.30	6.59	6.19	3.55	4.15	6.88	7.93
K ₂ O	3.75	1.90	3.22	2.51	3.10	0.63	2.96	3.94	1.84
Na ₂ O	2.82	2.96	3.39	3.47	3.50	4.12	4.08	3.05	3.16
MnO	0.12	0.11	0.12	0.14	0.12	0.15	0.16	0.12	0.15
P ₂ O ₅	1.01	0.24	0.64	0.74	0.62	0.55	0.98	0.91	0.47
LOI	0.85	2.05	0.37	0.35	0.38	4.47	3.17	3.05	2.67
Total	99.68	99.78	99.76	99.89	99.90	99.57	99.64	99.45	99.39
Sc	22.0	24.4	17.7	19.4	16.6	24.3	21.3	20.1	27.1
V	178	182	126	136	133	206	173	189	191
Cr	96.0	115.2	18.2	16.5	13.6	236.4	22.7	228.6	369.6
Co	29.4	24.2	16.2	16.6	14.6	31.7	20.3	26.6	37.0
Ni	89.9	48.6	12.1	12.0	7.8	85.5	15.8	97.1	128.8
Ga	22.9	18.7	25.2	24.5	26.1	23.5	23.5	18.0	19.2
Rb	132	60.9	70.5	66.0	78.7	21.1	103	107	51.1
Sr	1200	626	905	861	967	731	943	1030	966
Y	35.5	20.4	26.2	31.4	27.9	21.3	29.5	27.4	22.4
Zr	97	138	180	161	146	187	313	279	196
Nb	22.20	11.50	29.60	31.80	27.40	12.30	34.00	16.40	9.11
Cs	4.65	1.84	2.10	1.78	2.02	2.57	2.01	1.34	1.60
Ba	1570	474	2570	1210	2160	336	1850	1040	898
La	99.30	27.40	58.20	65.40	65.20	42.70	67.30	51.50	41.80
Ce	228.00	53.00	114.00	129.00	130.00	90.60	145.00	108.00	86.30
Pr	28.20	6.21	15.20	16.80	17.10	11.70	19.60	14.00	11.10
Nd	116.00	26.30	65.20	72.70	69.50	52.30	83.20	59.00	45.70
Sm	20.78	5.60	12.51	13.93	12.95	10.35	15.99	12.29	9.88
Eu	4.07	1.18	3.69	3.65	3.97	2.61	5.00	3.18	2.22
Gd	10.81	4.26	8.51	9.41	9.89	7.00	11.18	9.70	7.06
Tb	1.44	0.63	1.16	1.32	1.21	0.92	1.41	1.24	0.93
Dy	6.62	3.51	5.70	6.25	6.04	4.40	6.74	5.62	4.36
Ho	1.14	0.70	0.98	1.10	0.96	0.82	1.14	1.05	0.82
Er	3.34	2.05	2.67	2.91	2.55	2.18	2.98	2.91	2.26
Tm	0.37	0.29	0.31	0.34	0.30	0.27	0.33	0.35	0.29
Yb	2.29	1.76	1.84	2.03	1.82	1.78	2.04	2.20	1.74
Lu	0.33	0.26	0.28	0.28	0.27	0.26	0.29	0.34	0.27
Hf	3.09	3.55	3.98	3.54	3.52	4.27	6.70	6.56	4.57
Ta	1.35	0.68	1.23	1.37	1.23	0.68	1.80	0.77	0.46
Pb	26.60	14.20	25.40	20.60	24.40	122.00	17.00	8.66	16.30
Th	12.50	8.35	4.48	6.52	5.21	5.02	5.90	5.11	5.45
U	3.53	1.74	1.32	1.35	1.46	1.56	1.87	1.48	1.36
⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	0.318		0.225			0.084			
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0.711 373		0.711 532			0.708 755			
2 σ	8		10			9			
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr _i	0.708 786		0.710 762			0.708 470			
¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	0.108		0.116			0.119			
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	0.512 413		0.512 382			0.512 463			
2 σ	5		4			5			
$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	-1.69		-2.53			-1.05			

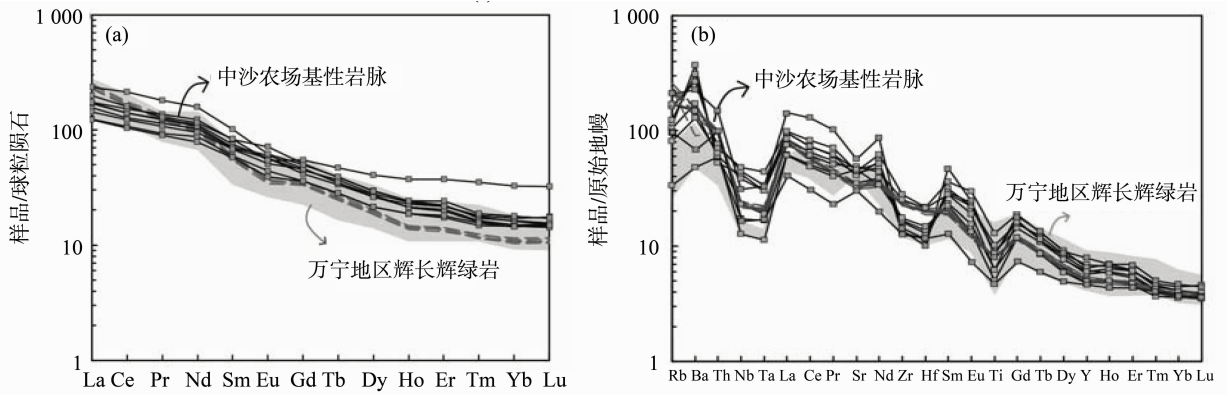


图 5 枫木基性岩球粒陨石标准化稀土元素配分图 (a) 和原始地幔标准化微量元素蛛网图 (b)

Fig. 5 (a) Chondrite-normalized REE pattern and (b) PM-normalized incompatible element spiderdiagram for the Fengmu mafic rocks

万宁地区和中沙农场辉长辉绿岩数据分别引自唐立梅等^[14]和陈新跃等^[17]；
标准化球粒陨石和原始地幔数据分别引自文献^[41-42]

岩的形成年龄。上述年龄与唐立梅等^[14]在海南岛东部万宁地区识别出的角闪辉长岩 (240 ± 2) Ma 及陈新跃等^[17]在岛西南中沙农场报道的基性岩脉 (242.2 ± 2.6) Ma 年龄相似。

枫木地区基性岩绝大部分样品烧失量较低, 样品烧失量与 Nb/La、Th/La 比值、Rb、Ba 和 Sr 等元素含量变化无明显相关性, 反映其未经历过明显蚀变作用。由于地壳物质具有较低的 MgO 含量和 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值, 如需达到样品 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值则要加入较多地壳物质, 而地壳物质的加入必将导致 MgO 含量降低、镁指数降低。样品镁指数平均值为 55, 部分样品镁指数高达 69, 与假设不符。其 Nb/La 比值平均值为 0.35, 低于大陆地壳 Nb/La 比值 (0.7), 且随 MgO 变化而样品 Nb/La 比值较为稳定^[42]。一般来说, 地壳具有富 Th、贫 Nb 特征, 而本区基性岩 Nb-Th 之间并无明显负相关关系。以上结论说明岩浆上升过程中受地壳混染作用影响不大。大部分样品 MgO 含量低于 8.0%, MgO 和 Cr、Ni 间呈正相关关系, 反映岩浆中橄榄石和辉石的分离结晶。CaO/Al₂O₃ 比值在岩浆演化过程中较为稳定, 未见明显 Eu 异常, 表明岩浆演化过程中斜长石的分离结晶作用不明显。随着岩浆的演化, P₂O₅、Fe₂O₃ 和 TiO₂ 含量与 SiO₂ 含量之间呈明显负相关关系, 指示存在钛铁矿和磷灰石分离结晶作用。大多数样品的 Ba 含量 (平均值为 1 285 $\mu\text{g/g}$) 和 Sr 含量 (平均值为 937 $\mu\text{g/g}$) 较为一致, 在岩浆分异过程中它们的总分配系数 K_D 接近于 1, 说明岩浆结晶分异作用不占主导作用, 样品的元素及同位素组成变化仍反映其源区的差异性。

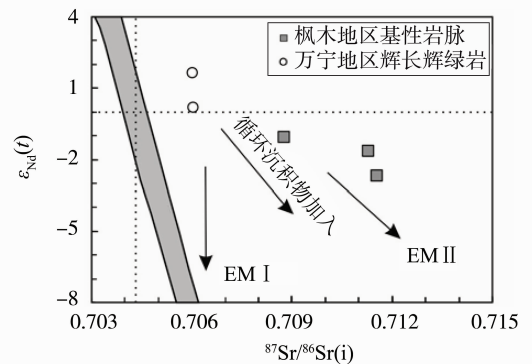


图 6 枫木基性岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(i) - \epsilon_{Nd}(t)$ 图解, 万宁辉长辉绿岩数据引自唐立梅等^[14]

Fig. 6 Initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs $\epsilon_{Nd}(t)$ for the Fengmu mafic rocks

枫木地区基性岩 SiO₂ 含量 (质量分数) 为 48.99% ~ 56.00%, 大部分样品高钾 (1.90% ~ 3.94%)、高 Al₂O₃ (14.56% ~ 17.77%)、高 K₂O/Na₂O (0.58 ~ 1.32) 比值, 相对富集大离子亲石元素 (Rb、Ba 和 Th 等) 和轻稀土元素, 亏损高场强元素 Nb、Ta 和 Ti, 显示出类似于岛弧火山岩配分模式。Zr/Nb 比值介于 5.06 ~ 21.5 之间, Nb/La 比值介于 0.22 ~ 0.51 之间, 在岩浆过程中无明显地壳物质混染情况下, 这些特征暗示岩浆源区壳源物质的参与, 同时 Sr-Nd 同位素组成也支持这一观点 (图 6)。如前所述, 本区的基性岩在上升过程中未发生明显地壳物质的混染, 因此微量元素特征也反映源区存在俯冲板片派生流体或沉积物的交代作用。样品 Nb/U = 6.29 ~ 23.6, Ce/Pb =

0.74 ~ 12.5, 远低于典型未被地壳混染的 MORB 和 OIB 的值 ($Nb/U = 47 \pm 10$, $Ce/Pb = 25 \pm 5$)^[42-43], 且 Zr/Hf 平均值为 45.6, 高于原始地幔的 Zr/Hf 值 36.27 ± 5.0 , 反映其可能受俯冲流体交代作用的影响。在 Th/Yb-Ba/La 和 La/Yb-Sr/La 图解上 (图 7a-b), 样品显示较高的 Th/Yb 和 La/Yb 比值, 指示样品受到了来自俯冲板片再循环地壳物质的影响。Ba/La 和 Sr/La 的变化, 样品具有比 MORB 更高的 Th/Zr 比值和 Ba/Zr 比值、较高的 Th/La 比值和 Ce/Pb 比值, 暗示样品亦受到俯冲板片流体和地壳物质交代作用影响。枫木地区基性岩微量元素

显示岛弧火山岩型配分特征, 排除岩浆过程中地壳混染的明显影响后, 其 Nb-Ta 亏损更可能是俯冲板片或沉积物所释放的流体或熔体改造地幔的结果^[44]。枫木基性岩 $Th/La = 0.08 \sim 0.30$, 平均值为 0.12, 与 EMII 型地幔特征值接近 ($Th/La = 0.12 \sim 0.16$), $\epsilon Nd(t)$ 值变化于 $-2.53 \sim -1.05$ 之间,⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 初始值变化于 0.708 470 ~ 0.710 762, 也显示其源区为富集地幔特征, 进一步表明源区受到了俯冲带入沉积物或蚀变洋壳释放组分的影响^[45], 是受俯冲组分改造的富集地幔楔源区。

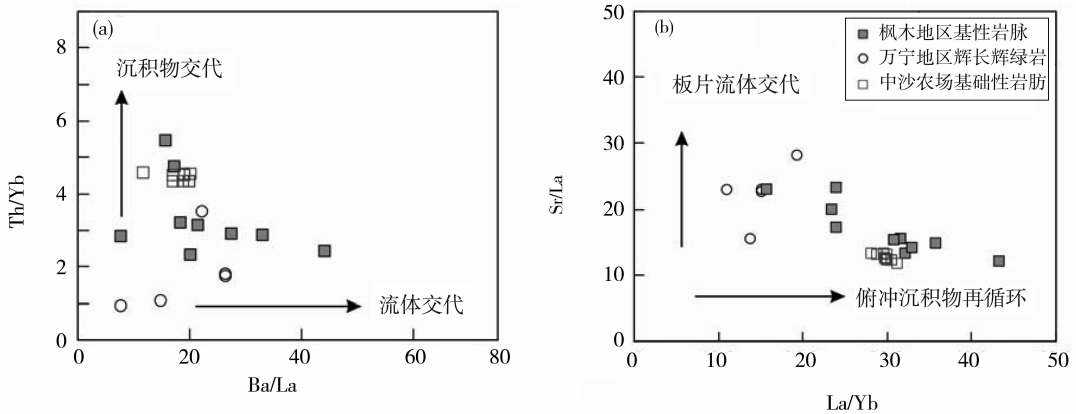


图 7 枫木基性岩的 Th/Yb-Ba/La (a), Sr/La-La/Yb (b) 判别图解, 万宁和琼西南基性岩数据引自唐立梅等^[14]和陈新跃等^[17]

Fig. 7 (a) Th/Yb vs Ba/La and, (b) Sr/La vs La/Yb for the Fengmu mafic rocks, Central Hainan

样品具较高的 Zr 值 (平均值为 $199.7 \mu g/g$) 和 Zr/Y 值 (平均值为 7.5), 表现为大陆玄武岩地球化学特征, 从而推测其可能形成于板内或大陆边缘弧环境, 而非大洋岛弧环境^[46]。在 Zr-Ti (图 8a) 与 Zr-Zr/Y (图 8b) 图解中, 枫木地区基性岩落入板内玄武岩范围^[47]。同样, 在 $Nb * 2-Zr/4-Y$ 图 (图 8c) 中, 样品显示出板内碱性玄武岩地球化学特征。样品 Th/Nb (平均值为 0.40) 比值高于原始地幔的 Th/Nb 比值 (0.11), 且 $Nb/Zr > 0.04$, 推测其产出于具有大陆基底的构造背景^[48]。在 Nb/Zr-Th/Zr 图 (图 8d) 上, 基性岩样品落入拉伸环境。结合区内相关地质背景推测, 考虑到晚古生代印支、华南陆块之间的邦溪-晨星弧后盆地存在俯冲消减作用, 俯冲板片析出的流体和携带的沉积物熔体交代上覆地幔楔, 推测该基性岩形成于造山带伸展垮塌时期的拉张构造环境, 属碰撞后环境的产物, 而非岛弧成因的岩石。因此枫木地区基性岩形成于碰撞后期, 由于造山带垮塌导致减压熔

融, 从而使热界面抬升诱发被改造的地幔熔融。

李献华等^[1-2]在邦溪-晨星地区识别出 N-MORB 型基性岩, 其 Sm-Nd 等时线年龄为 $(333 \pm 12) Ma$ 。何慧莹等^[49]同样在晨星地区识别出 Ar-Ar 坪年龄为 327 Ma、 $\epsilon Nd(t)$ 高达 +9 的 N-MORB 型基性岩。出露的 N-MORB 型基性岩的邦溪-晨星构造带呈东西向展布, 并向西延伸可与越南马江、云南双沟和金沙江等地基性-超基性岩带相连^[50-51]。如哀牢山双沟蛇绿岩中辉长岩和斜长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 $(362 \pm 41) Ma$ 和 $(328 \pm 16) Ma$ ^[50]、云南金沙江斜长岩和斜长花岗岩年龄分别为 $(340 \pm 3) Ma$ 和 $(294 \pm 4) Ma$ ^[51]。Li et al. 和陈新跃等^[8, 15]在五指山地区获得花岗岩片麻岩锆石 U-Pb 年龄为 269 ~ 262 Ma, 认为其属于华南东南沿海大陆岩浆弧的一部分, 其形成原因为沿华南东南海岸的古太平洋板块俯冲作用或与古特提斯演变关系密切^[8-9, 15]。但现有资料表明海南岛海西-印支期的花岗岩在岩石类型与地球化学方面均与华南东部

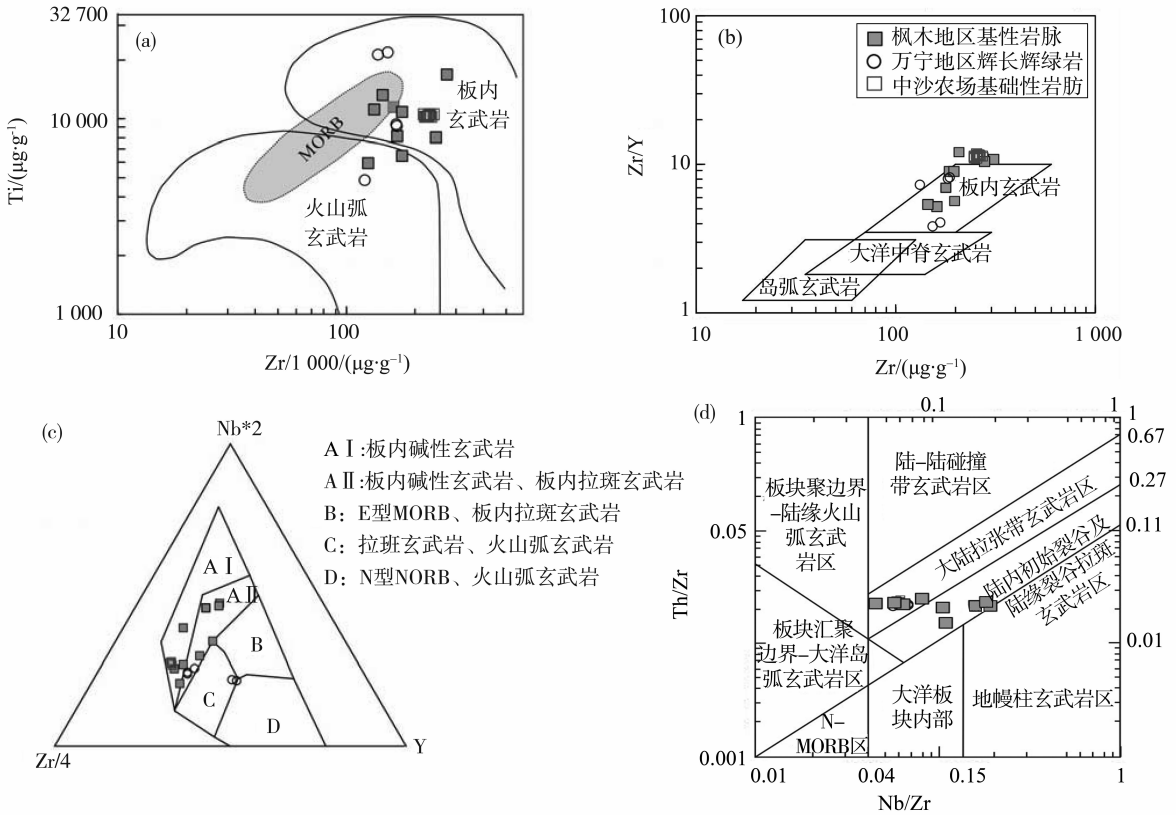


图 8 (a) 枫木基性岩 Ti- Zr、(b) Zr/Y-Y、(c) Nb * 2-Zr/4-Y 和 (d) Th/Zr-Nb/Zr 判别图解
 万宁和琼西南基性岩数据引自唐立梅等^[14] 和陈新跃等^[17]

Fig. 8 (a) Ti- Zr, (b) Zr/Y-Y, (c) Nb * 2-Zr/4-Y and (d) Th/Zr-Nb/Zr for the
 Fengmu mafic rocks, Central Hainan

同期岩浆作用差异明显^[52-53]，且更多学者认为太平洋的西向俯冲始于中侏罗世^[54]。因此，以上证据表明，由邦溪-晨星地区经越南马江、云南哀牢山至金沙江地区发育一个近东西向延伸的晚古生代有限洋盆或弧后盆地，哀牢山-马江-海南一带代表了华南与印支陆块的拼贴边界^[1-2,59]。

目前对华南与印支陆块拼合的具体时间尚未确定，Li et al.^[8] 在五指山花岗片麻岩具有岩浆弧地球化学特征，其锆石 U-Pb 年龄为 267 ~ 262 Ma。陈新跃等^[15] 认为五指山地区花岗片麻岩 (269 ~ 263 Ma) 和温淑女等^[16] 认为乐东志仲岩体 (272 Ma) 与越南中部地区 Truong Son 麻粒岩相变质作用^[55] (~260 Ma) 时代相近，而判断其属于同碰撞型花岗岩，其形成与华南、印支陆块的碰撞拼合关系密切。由此提出华南和印支陆块的碰撞时间始于 260 Ma，并于 260 ~ 250 Ma 达到碰撞峰期^[15]。同时，王大英和云平^[19] 在乐东县木棉头乡识别出 233 Ma 的碱性花岗岩，谢才富等^[12] 在三亚发现石榴霓辉石正长岩，其年龄 (244 ± 7) Ma，

在分洲界识别出锆石 U-Pb 年龄为 231 Ma 的正长岩^[14]。以上岩石具有 A 型花岗岩相似的元素-同位素地球化学特征，被认为在三叠纪时该区已属于碰撞后拉张构造背景。此外，海南地区上三叠统为陆相磨拉石沉积建造，其不整合于二叠系或下三叠统地层之上^[18,27]。以上资料指示，华南和印支陆块在海南岛地区的晨星-邦溪一带的发生冲拼贴作用，其于 240 Ma 已进入碰撞后伸展阶段。我们的资料表明，枫木地区三叠纪 (240 Ma) 基性岩以高钾、高铝为特征、地球化学方面以富集大离子亲石元素，亏损 Nb、Ta 和 Ti 等高场强元素为特征， $\epsilon_{Nd}(t) = -1.05 \sim -2.53$ ，其与琼西南中沙农场基性岩和万宁地区角闪辉长岩有着相似的形成时代 (240 ~ 242 Ma)^[14,17]，同样是源于受俯冲沉积物和板片流体交代改造的地幔改造源区，产出于伸展构造背景，在时空上可对比于马江、哀牢山构造带碰撞后岩浆作用^[56-57]。因此，结合相关地质背景，晚古生代末，印支和华南陆块间在海南岛地区发生了古特提斯洋盆或弧后盆地的关闭，并于 245 ~

240 Ma 进入碰撞后伸展阶段。一般认为,碰撞后作为造山旋回的一个重要阶段,其发生时间在峰期碰撞作用之后的 15 ~ 20 Ma^[58-59],这与前述海南岛二叠-三叠纪岩浆作用时序相似。这一认识也可从海南岛所经历的变形改造热事件年龄得到验证。陈新跃等和 Zhang et al.^[60-61]在海南岛公爱 and 五指山、长征等地发现有 NW-NWW 向右旋走滑韧性剪切带,其变形年龄在 245 ~ 248 Ma (剪切带糜棱岩内云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 坪年龄),并可与印支北部 Song-Ma, DaNang-Khe Sanh 等地发育的同期右旋 NW / NWW 向韧性剪切带^[62]相联系,这些剪切带被认为是印支与华南陆块自东向西顺时针旋转拼合的产物。同时,在琼中长征、琼西南冲卒岭等地发育的 NE 向左旋压扭性剪切带的韧性变形年龄被限定在 229 ~ 190 Ma (糜棱岩云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄),而北东向晚三叠世热事件可对比于华南内部雪峰、云开一带的 NE / NNE 向左旋压扭性剪切带^[57,63],自晚三叠世以来海南北部与华南内陆具有相似的构造演化特征。因此推测,华南与印支陆块之间的俯冲作用于早石炭世即已开始,在 260 ~ 240 Ma 左右为同碰撞阶段,240 Ma 以来进入碰撞后伸展阶段,此时受板片断离或者拆沉作用软流圈上涌、造山带伸展垮塌的影响,导致早期受俯冲组分改造的地幔源区熔融形成如枫木所见的碰撞后岩浆作用。

5 结 论

1) 海南岛枫木地区基性岩脉 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 (240.3 ± 2.6) Ma, 为基性岩脉的形成年龄;

2) 枫木地区基性岩脉富 K₂O 和 Al₂O₃、高 K₂O/Na₂O 比值、富集大离子亲石元素、亏损 Nb、Ta 和 Ti 等高场强元素,表现出大陆边缘弧的稀土和不相容元素配分模式,源区为受俯冲板片脱水流体和再循环沉积物交代的改造源区。

3) 枫木地区基性岩脉的形成受邦溪-晨星弧后盆地俯冲消减作用的影响,印支块体-华南陆块的碰撞 240 Ma 左右已经属于碰撞后的伸展构造背景,华南块体和印支块体之间的拼合已趋结束。

参考文献:

[1] 李献华,周汉文,丁式江,等. 海南岛洋中脊型变质基性岩:古特提斯洋壳的残片?[J]. 科学通报,2000,45(1):84-88.
 [2] 李献华,周汉文,丁式江,等. 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

[J]. 岩石学报,2000,16(3):425-432.
 [3] 张业明,谢才富,付太安,等. 海南岛地质构造演化刍论[J]. 科学技术与工程,2005,5(20):1485-1487.
 [4] 杨树锋,虞子冶,郭令智,等. 海南岛的地体划分、古地磁研究及其板块构造意义[J]. 南京大学学报(地球科学版),1989,1(1/2):38-46.
 [5] 侯威,陈惠芳,梁新权,等. 海南岛前寒武纪地层的确定及其大地构造演化[J]. 长春地质学院学报,1992,22(2):136-143.
 [6] HSÜ K J, LI J L, CHEN H H, et al. Tectonics of South China: Key to understanding West Pacific geology [J]. Tectonophysics, 1990, 183(1/2/3/4): 9-39.
 [7] METCALFE I. Gondwana dispersion and Asian accretion: fieldwork on Hainan Island [J]. Episodes, 1993, 16(4):443-447.
 [8] LI X H, LI Z X, LI W X, et al. Initiation of the Indosinian Orogeny in South China: Evidence for a Permian magmatic arc in the Hainan Island [J]. J Geol, 2006, 114(3):341-353.
 [9] LI Z X, LI X H. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model [J]. Geology, 2007, 35(2):179-182.
 [10] 汪啸风,马大铨,蒋大海. 海南岛地质(三)——构造地质 [M]. 北京:地质出版社,1991:10-100.
 [11] 李孙雄,云平,范渊,等. 海南岛琼中地区琼中岩体锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学,2005,29(2):227-233.
 [12] 谢才富,朱金初,赵子杰,等. 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[J]. 高校地质学报,2005,11(1):47-57.
 [13] 谢才富,朱金初,丁式江,等. 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[J]. 岩石学报,2006,22(10):2493-2508.
 [14] 唐立梅,陈汉林,董传万,等. 海南岛三叠纪中基性岩的年代学、地球化学及其地质意义[J]. 地质科学,2010,45(4):1139-1156.
 [15] 陈新跃,王岳军,范蔚茗,等. 海南五指山地区花岗岩片麻岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学特征及其地质意义[J]. 地球化学,2011,40(5):454-463.
 [16] 温淑女,梁新权,范蔚茗,等. 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 [J]. 大地构造与成矿学,2013,37(2):294-307.
 [17] 陈新跃,王岳军,韩会平,等. 琼西南三叠纪基性岩脉年代学、地球化学特征及其构造意义[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2014,44(03):835-847.
 [18] 夏邦栋,于津海,方中,等. 海南岛海西-印支期花

- 岗岩的地球化学特征及成因[J]. 地球化学, 1990, 19(4): 365-373.
- [19] 王大英, 云平. 海南乐东地区晚三叠世 A 型花岗岩基本特征[J]. 广东地质, 1999, 14(4): 19-21.
- [20] 谢才富, 朱金初, 丁式江, 等. 琼中海西期钾玄质侵入岩的厘定及其构造意义[J]. 科学通报, 2006, 51(16): 1944-1954.
- [21] 马大铨, 黄香定, 肖志发, 等. 海南岛结晶基底——抱板群层序与时代[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1998: 1-52.
- [22] 许德如, 夏斌, NONNA B C, 等. 海南岛屯昌晨星地区变基性岩体变质特征及构造意义[J]. 岩石学报, 2006, 22(12): 2987-2992.
- [23] 广东省地质矿产局. 广东省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1988: 1-602.
- [24] 张业明, 张仁杰, 姚华舟, 等. 海南岛前寒武纪地壳构造演化[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1997, 22(4): 395-400.
- [25] LI X H, ZHOU H W, CHUNG S L, et al. Geochemical and Sm-Nd isotopic characteristics of metabasites from central Hainan Island, South China and their tectonic significance[J]. *Island Arc*, 2002, 11(3): 193-205.
- [26] 汪啸风, 马大铨, 蒋大海. 海南岛地质(一)——地层古生物[M]. 北京: 地质出版社, 1991: 131-192.
- [27] 唐作友, 冯少南. 海南岛大岭地区二叠系的发现及意义[J]. 地层学杂志, 1998, 22(3): 232-240.
- [28] 龙文国, 童金南, 朱耀河, 等. 海南儋州-屯昌地区二叠纪地层的发现及其意义[J]. 华南地质与矿产, 2007(1): 38-45.
- [29] 夏邦栋, 施光宇, 方中, 等. 海南岛晚古生代裂谷作用[J]. 地质学报, 1991, 65(2): 103-115.
- [30] 雷裕红, 丁式江, 马昌前, 等. 海南岛地壳生长和基底性质的 Nd 同位素制约[J]. 地质科学, 2005, 40(3): 439-456.
- [31] 张业明, 付建明, 赵子杰, 等. 1998. 海南岛西部变基性火山岩的岩石特征及 Sm-Nd 同位素定年[J]. 矿物岩石, 1998, 18(1): 78-84.
- [32] 陈新跃, 王岳军, 张玉芝, 等. 海南晨星安山质火山岩地球化学、年代学特征及其构造意义[J]. 大地构造与成矿学, 2013, 37(01): 99-108.
- [33] 贾小辉, 王强, 唐功建, 等. 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[J]. 地球化学, 2011, 39(6): 497-519.
- [34] XIA X P, SUN M, GENG H Y, et al. Quasi-simultaneous determination of U-Pb and Hf isotope compositions of zircon by excimer laser-ablation multiple-collector ICPMS[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2011, 26: 1868-1871.
- [35] WU Y, ZHENG Y. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(15): 1554-1569.
- [36] LI X H, QI C S, LIU Y, et al. Petrogenesis of the Neoproterozoic bimodal volcanic rocks along the western margin of the Yangtze Block; new constraints from Hf isotopes and Fe/Mn ratios[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50: 2481-2486.
- [37] 刘颖, 刘海臣, 李献华. 用 ICP-MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素. 地球化学[J]. 1996, 25(6): 552-558.
- [38] 韦刚健, 梁细荣, 李献华, 等. (LP)MC-ICPMS 方法精确测定液体和固体样品的 Sr 同位素组成[J]. 地球化学, 2002, 31(3): 295-299.
- [39] 梁细荣, 韦刚健, 李献华, 等. 利用 MC-ICPMS 精确测定 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 和 Sm/Nd 比值[J]. 地球化学, 2003, 32(1): 91-96.
- [40] BROPHY J G, MARSH B D. On the origin of high-alumina arc basalt and the mechanics of melt extraction [J]. *Journal of Petrology*, 1986, 27(4): 763-789.
- [41] TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The continental crust: its composition and evolution; an examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks [M]. London: Blackwell Scientific Pub, 1985.
- [42] SUN S S. Chemical and isotopic systematics of ocean basalts; implications for mantle composition and processes[J]. *Geol Soc London Spec Publ*, 1989, 42: 313-345.
- [43] HOFFMAN A W, JOCHUM K P, SEUFER M, et al. Nd and Pb in Oceanic Basalts: New Constraints on Mantle Evolution[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1986, 79: 33-45.
- [44] GILL J B. *Orogenic andesites and plate tectonics* [M]. New York: Springer-Verlag, 1981: 1-390.
- [45] WEAVER B L. The origin of ocean Island basalt end-member compositions; Trace element and isotopic constraints [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1991, 104: 381-397.
- [46] 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 利用地球化学方法判别大陆玄武岩和岛弧玄武岩[J]. 岩石矿物学杂志, 2007, 26(1): 77-89.
- [47] PEARCE J A, NORRIS M J. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rocks [J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 1979, 69(1): 33-47.
- [48] 孙书勤, 张成江, 黄润秋, 板块汇聚边缘玄武岩大地构造环境的 Th、Nb、Zr 判别[J]. 地球科学进展, 2006, 21(6): 593-598.
- [49] 何慧莹, 王岳军, 张玉芝, 等. 海南岛晨星早石炭世高度亏损 N-MORB 型玄武岩及其地质意义[J]. 地

- 球科学, 2016. 待刊
- [50] 简平, 汪啸风, 何龙清, 等. 云南新平双沟蛇绿岩 U-Pb 年代学初步研究[J]. 岩石学报, 1998, 14(2): 207-211.
- [51] 简平, 汪啸风, 何龙清, 等. 金沙江蛇绿岩中斜长岩和斜长花岗岩的 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 岩石, 1999, 15(4): 590-593.
- [52] 邓希光, 陈志刚, 李献华, 等. 桂东南地区大容山-十万大山花岗岩带 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年[J]. 地质论评, 2004, 50(4): 426-432.
- [53] WANG Y J, FAN W M, CAWOOD P A, et al. Indosinian high-strain deformation for the Yunkaidashan tectonic belt, South China: kinematics and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological constraints[J]. *Tectonics*, 2007, 26, TC6008.
- [54] ZHOU X M, LI W X. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas [J]. *Tectonophysics*, 2000, 326(3/4): 269-287.
- [55] MALUSKIAA H, LEPVRIER C, LEYRELOUPA A, et al. $^{40}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}$ geochronology of the charnockites and granulites of the Kan Nack complex, Kon Tum Massif, Vietnam [J]. *J Asian Earth Science*, 2005, 25(4): 653-677.
- [56] 高睿, 肖龙, 何琦, 等. 滇西维西-德钦一带花岗岩年代学、地球化学和岩石成因[J]. 地球科学, 2010, 35(2), 186-200.
- [57] WANG Y J, ZHANG A M, FAN W M, et al. Petrogenesis of Late Triassic-collisional basaltic rocks of the Lancangjiang tectonic zone, southwest China, and tectonic implications for the evolution of the eastern paleotethys: geochronological and geochemical constraints [J]. *Lithos*, 2010, 120: 529-546.
- [58] CVETKOVIĆ V, PRELEVIĆ D, DOWNES H, et al. Origin and geodynamic significance of Tertiary postcollisional basaltic magmatism in Serbia (central Balkan Peninsula) [J]. *Lithos*, 2004, 73: 161-186.
- [59] ENGLAND C, HOUSEMAN G A. The mechanics of the Tibetan plateau [J]. *Phil Tran Roy Soc Lon*, 1999, 326: 301-319.
- [60] 陈新跃, 王岳军, 韦牧, 等. 海南公爱 NW 向韧性剪切带构造特征及其 $^{39}\text{Ar} - ^{40}\text{Ar}$ 年代学约束[J]. 大地构造与成矿学, 2006, 30(3): 312-319.
- [61] ZHANG F F, WANG Y J, CHEN X Y, et al. 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 [J]. *Gondwana Research*, 2011, 19(4): 910-925.
- [62] LEPVRIER C, MALUSKI H, VAN TICH V, et al. The Early Triassic Indosinian orogeny in Vietnam (Truong Son Belt and Kontum Massif): Implications for the geodynamic evolution of Indochina [J]. *Tectonophysics*, 2004, 393(1/2/3/4): 87-118.
- [63] WANG Y J, ZHANG Y H, FAN W M, et al. Structural signatures and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Indosinian Xuefengshan tectonic belt, South China Block [J]. *Journal of Structural Geology*, 2005, 27: 985-998.