

doi:10.3799/dqkx.2016.108

# 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

何慧莹<sup>1,2</sup>, 王岳军<sup>1,2\*</sup>, 张玉芝<sup>1,2</sup>, 陈新跃<sup>3</sup>, 周永智<sup>1,2</sup>

1. 中山大学地球科学与地质工程学院, 广东广州 510275

2. 广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室, 广东广州 510275

3. 湖南科技大学地质系, 湖南湘潭 411201

**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, 其拼合机制及精细时代一直备受争议. 在海南岛昌江—琼海断裂以北的晨星地区识别出一套具高  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值的火山岩, 对其进行了全岩<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 年代学及主、微量元素和同位素地球化学研究. 结果表明, 该火山岩的全岩<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 坪年龄为  $328.1 \pm 2.6$  Ma, 代表了其喷发年龄; 该变基性岩  $\text{SiO}_2$  含量为 46.92%~52.58%, 具有低  $\text{TiO}_2$ 、低  $\text{K}_2\text{O}$ 、高  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的特征; 稀土元素丰度为  $15.1 \times 10^{-6} \sim 28.7 \times 10^{-6}$ , 呈现 N-MORB 型微量元素配分曲线,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  高至 9.02~9.85, 显示出高度亏损的地球化学特征; 其成因被解释为源于受流体交代作用改造的 MORB 型地幔源区. 综合分析表明晨星地区变基性岩的形成可能与古特提斯洋陆俯冲格局下华南与印支陆块间的弧后盆地或有限洋演变有关.

**关键词:** 变基性岩; Nd 同位素; N-MORB; 石炭纪; 东古特提斯演化; 地球化学; 岩石学.

**中图分类号:** P581

**文章编号:** 1000-2383(2016)08-1361-15

**收稿日期:** 2016-02-06

## Extremely Depleted Carboniferous N-MORB Metabasite at the Chenxing Area (Hainan) and Its Geological Significance

He Huiying<sup>1,2</sup>, Wang Yuejun<sup>1,2\*</sup>, Zhang Yuzhi<sup>1,2</sup>, Chen Xinyue<sup>3</sup>, Zhou Yongzhi<sup>1,2</sup>

1. School of Earth Sciences and Geological Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Mineral Resources & Geological Processes, Guangzhou 510275, China

3. Department of Geology, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China

**Abstract:** Hainan Island, located between the Indochina and South China Blocks, has undergone compound structural overprinting and complex tectonic evolution. However, the Late Paleozoic tectonic regime and amalgamation history of the South China with Indochina Blocks are still on debate. Our investigation identified the highly-depleted greenschist-facies basalt at the Chenxing area in the north of the Changjiang-Qionghai fault, Central Hainan Island. This paper presents a set of new geochronological and geochemical data for these metabasites. The representative sample for Chenxing metabasites gave the plateau age of  $328.1 \pm 2.6$  Ma, representing the eruption age. They have  $\text{SiO}_2$  ranging from 46.92 % to 52.58 %,  $\text{TiO}_2$  from 0.48 % to 1.12% and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  from 12.34 % to 17.45 %, and could be classified as basalt. These samples show lower  $\text{K}_2\text{O}$  contents, and HFSEs and REEs contents relative to N-MORB. They are characterized by the left-sloping REE pattern and multi-elemental pattern with a geochemical affinity to N-MORB. These samples show extremely high  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  values ranging from 9.02 to 9.85. Such geochemical characteristics for the Chenxing metabasites show the derivation of the MORB source modified by slab-related fluid. In combination with other available data, the Chenxing metabasites in Central Hainan are formed in the back-arc basin or a restricted ocean basin between the South China and Indochina blocks during the Carboniferous in response to the subduction of

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(No. 41190073); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(No. 2014CB440901); 中山大学中央高校基本业务费项目.

**作者简介:** 何慧莹(1993-), 女, 硕士研究生, 主要从事岩石大地构造研究. E-mail: hehuiy2@mail2.sysu.edu.cn

**\* 通讯作者:** 王岳军, E-mail: wangyuejun@mail.sysu.edu.cn

**引用格式:** 何慧莹, 王岳军, 张玉芝, 等, 2016. 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. 地球科学, 41(8): 1361-1375.

the Paleotethyan main ocean.

**Key words:** metabasites; Nd isotopic composition; N-MORB; Carboniferous; eastern paleotethyan evolution; geochemistry; petrology.

## 0 引言

海南岛地处欧亚板块、印度—澳大利亚板块和菲律宾板块的交汇部位(图 1a),具有复杂的地质构造演化历史(李献华等, 2000a, 2000b; 张业明等, 2005),被认为是研究印支半岛和华南陆块构造演化的窗口. 海南岛的昌江—琼海断裂带南、北两侧地球物理特征差异明显,被认为是一条重要的 EW 向构造边界(李献华等, 2000a). 在该构造边界北侧的邦溪—晨星地区发育有一套总体呈东西向展布的变基性岩,不同的研究者对这些变基性岩的成因及其构造意义有着不同的理解. 夏邦栋等(1991)认为邦溪—军营地区的火山岩为裂谷成因的双峰式火山岩;张业明等(1998)认为邦溪地区火山岩形成于中新元古宙时期的古陆壳裂解;李献华等(2000a, 2000b)认为邦溪—晨星地区岩石的形成与东古特提斯演化有关,代表了东古特提斯洋壳的残片;许德如等(2006)和 Xu *et al.* (2007)则认为其形成与晚古生代时期东古特提斯洋向华南大陆边缘俯冲而产生的弧后扩张有关. 就现有的资料而言,学者们对该变基性岩的岩石性质、形成时代、大地构造意义等仍存在较大争议,现阶段的研究仍不足以有效约束海南岛的构造演化. 为了更好地限定该变基性岩的形成时代,解释岩石成因及其反映的构造意义,笔者对

横贯海南岛东西的邦溪晨星构造带中晨星地区火山岩开展了细致的野外调研和系统的年代学和地球化学测试. 研究发现,晨星地区存在高度亏损 N-MORB 型变基性岩,其形成时代为早石炭世. 该变基性岩的识别为进一步理解海南岛构造演化及其与东特提斯构造带的内在关联提供了重要依据.

## 1 区域地质和样品岩石学特征

海南岛与华南大陆以琼州海峡相隔,岛内主要出露古生界,其次为元古代和中新生代岩石(马大铨等, 1998; 龙文国等, 2002; 许德如等, 2003). 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(张仁杰等, 1991; 张业明等, 1997)的抱板群和石碌群(广东省地质矿产局, 1988; 汪啸风等, 1991a, 1991b). 下古生界地层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(夏邦栋等, 1990; 汪啸风等, 1991a);而志留系仅发育下志留统浅海相砂岩(唐作友和冯少南, 1998; 胡宁等, 2002; 龙文国等, 2007). 上古生界主要分布在九所—陵水断裂以北,出露有泥盆系砂岩、石炭系板岩和变火山岩、下二叠统灰岩和中二叠统砂岩(夏邦栋等, 1990; 汪啸风等, 1991a; 唐作友和冯少南,

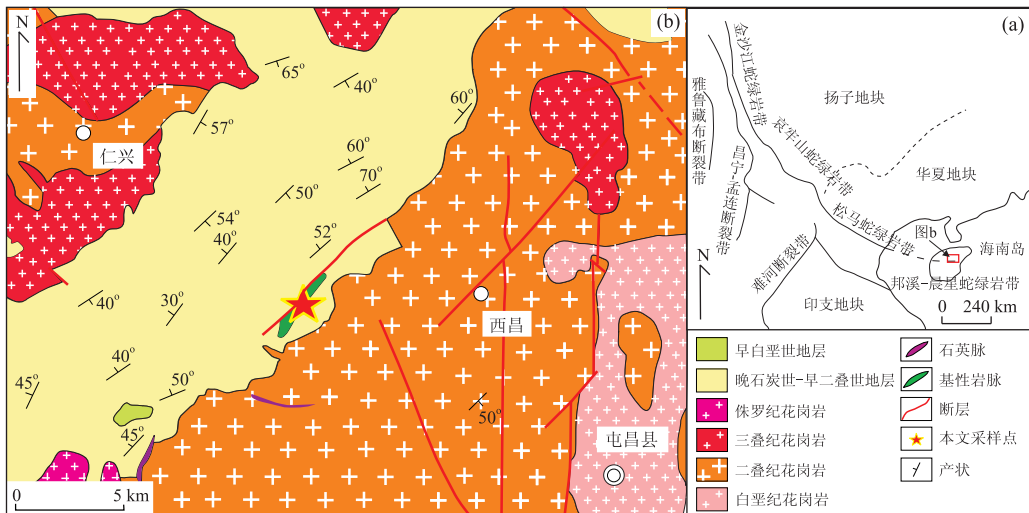


图 1 华南南缘大地构造略图(a)和海南晨星地区地质概况及采样点位置(b)

Fig. 1 Geological sketch in South China (a) and geological sketch of the Chenxing area showing the sampling locations (b)

1998; 胡宁等, 2002; 龙文国等, 2007). 海南岛中生界在岛内发育不全, 仅出露上三叠统碎屑岩沉积和白垩系砂岩(夏邦栋等, 1990; 汪啸风等, 1991a), 新生界主要出露于岛北地区. 岛上断裂构造发育, 主要为 EW 向构造与 NE 向构造, 由北向南发育有王五一文教、昌江—琼海、尖峰—吊罗、九所—陵水等多条近 EW 向断裂(广东省地质矿产局, 1988); 由西向东则发育有 NE 向的戈枕断裂、白沙断裂等(夏邦栋等, 1990, 1991; 汪啸风等, 1991b; 谢文彦等, 2009; 尹新义等, 2010).

海南岛内广泛出露的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为广泛, 其次为燕山晚期的花岗岩及中元古代抱板群花岗岩. 喷出岩主要分布于王五一文教断裂以北的新生代玄武岩区(雷裕红等, 2005). 另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有变基性岩和安山岩(夏邦栋等, 1991; 张业明等, 1998; 李献华等, 2000a, 2000b; Li *et al.*, 2002; 陈新跃等, 2013).

本次研究的变基性岩采自于屯昌晨星地区, 属于海南岛中部邦溪—晨星变基性岩带的一部分(图 1b). 所采集的基性岩样品出露于晨星农场十一队到十五队一带, 其中定年样品来自晨星农场十一队河沟中(图 2a). 该地变基性岩受北东走向的断层控制, 与下伏地层呈断层接触关系, 平面上呈带状展布. 海南省 1:50 万地质图(广东省地质矿产局, 1988)显示其夹持于该图中所划属的下二叠统峨查组碎屑岩、或被陈新跃等(2013)重新厘定为石炭纪—二叠纪海相火山—碎屑沉积建造中. 样品呈灰黑色(图 2b), 隐晶质结构或细晶结构. 样品均已经历了绿片岩相变质作用, 为变玄武岩样品. 镜下观察

如图 2c 所示, 样品主要有斜长石、角闪石、辉石等小晶体以及少量不透明金属矿物组成, 在杂乱分布的斜长石、角闪石格架中填充辉石和斜长石, 具嵌晶结构. 其中角闪石含量较高, 呈浅绿色柱状弱定向排列, 显示了辉石假象.

## 2 样品分析方法

笔者对在晨星地区所采集的变基性岩 11HN-48B 进行了 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  定年, 并对采集的 8 个样品进行全岩主量元素与微量元素分析, 选取其中的 4 个样品进行 Nd 同位素组成的测定.  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  定年测试在中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室的多接收惰性气体质谱仪上完成, 样品用中国原子能科学研究院 49-2 反应堆进行快中子照射, 氩同位素采用英国 VG 公司制造的 RGA10 质谱计测定. 全岩的主量、微量元素和 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 1%~5%, 详细实验方法见李献华(1996); 微量元素分析采用 PE Elan 6000 型电感耦合等离子体质谱(ICP-MS), 分析精度优于 2%~5%, 具体实验流程参照刘颖等(1996); Sr、Nd 同位素组成分析采用 NEPTUNE 与多接收等离子质谱仪(MC-ICPMS)进行测试, 测定过程中的质量分馏效应分别采用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$  和 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$  进行校正. 详细分析测试流程见韦刚健等(2002)和梁细荣等(2003), 标样 Shin Etsu JNdi-1 的标准 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  为 $0.512093 \pm 0.000006$  ( $2\sigma$ ) ( $n=15$ ).

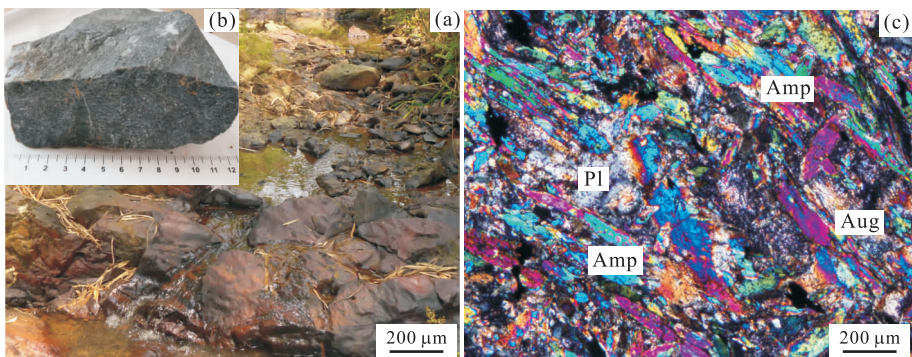


图 2 晨星地区变基性岩野外照片(a), 变基性岩手标本(b)和岩石显微相片(c)

Fig. 2 Field photograph (a), metabasite hand specimens (b) and photomicrograph (c) of the Chenxing metabasite, Central Hainan  
Amp. 角闪石; Pl. 斜长石; Aug. 辉石

表 1 晨星地区代表性变基性岩样品(11HN-48B)的全岩<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 同位素逐步加热结果Table 1 Whole-rock <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar isotopic analyses for incremental heating experiments for the Chenxing metabasite (11HN-48B) in Central Hainan

温度	( <sup>40</sup> Ar/ <sup>36</sup> Ar) <sub>m</sub>	( <sup>39</sup> Ar/ <sup>36</sup> Ar) <sub>m</sub>	( <sup>37</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar) <sub>m</sub>	( <sup>40</sup> *Ar/ <sup>39</sup> Ar) <sub>k</sub>	<sup>40</sup> *Ar(%)	<sup>39</sup> Ar <sub>k</sub> (%)	表观年龄( $t \pm 2\sigma$ )Ma
700 °C	415.923 85	1.129 45	0.007 08	82.172 836	19.76	0.85	390.6 ± 34.2
750 °C	126.050 85	0.196 47	0.013 24	67.996 157	53.94	2.49	328.9 ± 6.5
800 °C	73.232 48	0.021 10	0.001 56	66.996 182	91.48	3.69	324.5 ± 2.0
840 °C	73.851 99	0.018 87	0.000 67	68.276 230	92.45	7.64	330.2 ± 2.0
880 °C	70.559 04	0.008 08	0.000 35	68.171 792	96.62	23.17	329.7 ± 2.1
910 °C	66.323 84	0.003 21	0.001 64	65.375 672	98.57	11.09	317.3 ± 1.9
940 °C	67.343 12	0.004 38	0.000 68	66.048 891	98.08	6.78	320.3 ± 1.9
980 °C	68.582 39	0.006 12	0.003 67	66.773 588	97.36	5.22	323.5 ± 2.0
1 020 °C	69.910 83	0.005 65	0.002 97	68.241 524	97.61	4.62	330.0 ± 2.0
1 060 °C	70.430 95	0.005 71	0.000 51	68.743 569	97.60	5.23	332.3 ± 2.0
1 100 °C	69.406 28	0.004 33	0.001 10	68.127 615	98.16	8.80	329.5 ± 2.1
1 140 °C	67.976 53	0.002 24	0.001 02	67.315 073	99.03	16.64	325.9 ± 2.0
1 170 °C	70.676 69	0.001 93	0.004 71	70.105 585	99.19	3.09	338.3 ± 2.0
1 220 °C	77.837 60	0.006 63	0.036 45	75.882 506	97.49	0.46	363.5 ± 2.3
1 400 °C	92.278 05	0.025 63	0.065 83	84.715 839	91.80	0.24	401.4 ± 32.3

注:m. 样品中测定的同位素比值; \* . 表示放射成因;k. 中子活化过程中由<sup>39</sup>K产生的<sup>39</sup>Ar.

### 3 <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 定年结果

样品 11HN-48B 全岩<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 逐步加热法的不同加热步年龄数据如表 1 所示. 其中初始加热步温度为 700 °C, 样品第 2 步到第 13 步(750 ~ 1 170 °C)的 12 个连续加热步给出了近一致的<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 年龄, 其对应的坪年龄为 328.1 ± 2.6 Ma. 其中析出<sup>39</sup>Ar 占总析出量的 98.5% (图 3), 初始<sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar 为 368.3, 略高于大气值(295.5), 但其年龄谱表现出基本无扰动特征.

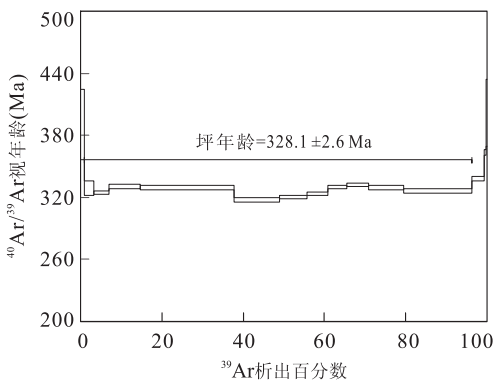


图 3 晨星变基性岩样品 11HN-48B 的<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 坪年龄  
Fig. 3 <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar age spectra of the Chenxing metabasite sample (11HN-48B), Central Hainan

### 4 岩石地球化学特征

样品的主量元素和微量元素分析结果列于表 2.

由表 2 可见, 8 个晨星地区变基性岩样品 SiO<sub>2</sub> 含量为 46.92% ~ 52.58%, TiO<sub>2</sub> 含量为 0.48% ~ 1.12%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 12.34% ~ 17.45%, K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O 含量为 1.74% ~ 2.87%, 大多数样品富 Na<sub>2</sub>O (1.28% ~ 2.78%)、低 K<sub>2</sub>O (0.07% ~ 0.57%), Na<sub>2</sub>O 含量远大于 K<sub>2</sub>O, 除 11HN-48A 与 11HN-48H 的 K<sub>2</sub>O 含量较高. 在图 4a 中, 样品落于玄武岩—玄武安山岩成分范围, 结合岩相学观察, 笔者认为这些样品普遍经历了绿片岩相变质作用, 为变玄武质岩石. 由于绿片岩相变质作用可导致变质过程中 Ca、K、Na 及大离子亲石元素(如 Rb、Sr)等活性元素的迁移, 但高场强元素和稀土元素仍保持其不活动属性, 因此岩性判别辅以 SiO<sub>2</sub>-Zr/TiO<sub>2</sub> 图解更为合适, 所有样品在图 4b 中均落入拉斑玄武岩区. 样品拥有较高的 Cr(404 × 10<sup>-6</sup> ~ 1 170 × 10<sup>-6</sup>)、Ni(138 × 10<sup>-6</sup> ~ 419 × 10<sup>-6</sup>)含量, 与 MgO 含量呈负相关关系(图 5g, 5h). Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 TF<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 与 MgO 含量呈负相关关系, 而 TiO<sub>2</sub> 与 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量在岩浆演化过程中变化不大(图 5).

晨星地区变基性岩样品具有较低的稀土元素丰度, ΣREE = 15.12 × 10<sup>-6</sup> ~ 28.67 × 10<sup>-6</sup>, 平均为 20.42 × 10<sup>-6</sup>. 所有样品表现出一致的 LREE 亏损的左倾型配分模式(图 6a), 类似于正常洋中脊玄武岩(N-MORB)配分曲线特征. LREE 相对 HREE 亏损, 其(La/Yb)<sub>N</sub> = 0.25 ~ 0.71, (Gd/Yb)<sub>N</sub> = 0.86 ~ 1.29. 轻稀土元素 La-Sm 含量低于 10 倍球粒陨石含量, 亦低于现今大洋 N-MORB 含量, 比勉略地区蛇绿岩带中亏损型 N-MORB 火山岩更为亏损(许

表 2 晨星地区变基性岩主量(%)和微量元素( $10^{-6}$ )分析结果

Table 2 Major elements (%) and trace elements ( $10^{-6}$ ) analytical results for the Chenxing metabasite

样品	11HN-48A	11HN-48B	11HN-48C	11HN-48D	11HN-48E	11HN-48F	11HN-48G	11HN-48H
SiO <sub>2</sub>	46.03	51.84	51.82	47.11	49.14	46.78	48.93	49.40
TiO <sub>2</sub>	1.12	0.48	0.55	0.56	0.52	0.63	1.09	0.61
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.12	12.43	12.59	14.17	13.89	16.02	14.52	12.08
TFeO	10.59	8.68	9.33	9.62	9.32	10.41	10.72	9.72
MgO	9.08	11.34	10.32	11.01	12.03	10.37	9.50	12.24
CaO	11.69	10.83	11.33	12.07	10.37	11.67	11.54	11.86
K <sub>2</sub> O	0.57	0.09	0.07	0.13	0.07	0.10	0.15	0.47
Na <sub>2</sub> O	1.64	2.78	2.72	2.34	2.44	2.44	2.08	1.28
MnO	0.19	0.12	0.13	0.15	0.14	0.16	0.17	0.18
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.07	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.07	0.03
LOI	1.40	1.09	0.78	2.45	1.68	0.97	0.78	1.68
Total	99.51	99.70	99.67	99.63	99.63	99.58	99.54	99.54
Sc	40.60	36.50	40.60	41.00	38.50	41.00	42.60	48.00
V	293	212	239	224	225	267	298	274
Cr	476	990	1010	974	1140	1170	404	743
Co	56.7	50.8	57.8	50.4	54.6	64.1	47.1	40.6
Ni	255	270	336	307	360	419	138	191
Ga	16.20	8.81	11.80	12.60	11.40	14.90	14.80	11.10
Rb	24.40	1.94	1.22	3.98	1.54	1.13	3.94	22.40
Sr	249	149	186	206	154	163	188	160
Y	18.80	13.80	16.00	14.70	15.40	19.20	20.90	20.10
Zr	49.50	23.50	27.40	25.40	25.40	28.40	50.70	31.80
Nb	1.49	0.76	0.93	0.80	0.84	1.08	1.36	0.60
Cs	1.49	0.14	0.16	5.20	0.18	0.11	0.34	1.35
Ba	78.00	44.40	49.50	51.20	57.30	53.90	39.50	70.00
La	1.64	0.85	1.14	1.08	0.95	0.98	1.93	0.75
Ce	4.35	2.43	2.97	3.10	2.61	2.98	5.04	2.60
Pr	0.82	0.44	0.50	0.50	0.52	0.53	0.91	0.54
Nd	4.91	2.24	2.81	2.89	2.56	3.11	5.45	3.44
Sm	2.07	1.00	1.15	1.18	1.12	1.24	2.14	1.35
Eu	0.77	0.45	0.60	0.47	0.47	0.56	0.89	0.60
Gd	2.84	1.51	1.83	1.77	1.69	2.02	2.96	2.16
Tb	0.49	0.30	0.37	0.35	0.33	0.40	0.53	0.43
Dy	3.21	2.10	2.58	2.40	2.37	2.90	3.43	3.04
Ho	0.68	0.48	0.59	0.54	0.53	0.66	0.74	0.69
Er	1.97	1.46	1.76	1.61	1.59	1.96	2.11	2.07
Tm	0.29	0.21	0.27	0.24	0.24	0.30	0.31	0.32
Yb	1.82	1.44	1.75	1.56	1.56	1.93	1.95	2.07
Lu	0.27	0.21	0.26	0.23	0.23	0.29	0.29	0.31
Hf	1.38	0.65	0.77	0.75	0.68	0.81	1.36	0.84
Ta	0.10	0.05	0.07	0.06	0.06	0.06	0.09	0.04
Th	0.14	0.09	0.10	0.04	0.03	0.10	0.10	0.08
U	0.16	0.07	0.20	0.11	0.16	0.12	0.18	0.21

继峰等, 1997). 晨星地区变基性岩未见 Nb-Ta 和 Ti 异常(图 6b), 不同于该地区同时代岛弧安山岩(陈新跃等, 2013), 但上述样品的微量元素配分模式类似秦岭勉略鞍子山蛇绿岩中变基性岩和湖南新元古代南桥 N-MORB 玄武岩(许继峰等, 2000; Zhang *et al.*, 2013). 与正常洋中脊玄武岩相比(图 6b), 样品的不相容元素均低于现代大洋 N-MORB

丰度, 表明这些样品源自于高度亏损的 N-MORB 型地幔源区.

晨星地区变基性岩的 Nd 同位素数据列于表 3. 从表 3 可以看出, 4 个变基性岩样品均具有很高的 Nd 同位素比值( $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} > 0.513020$ ), 或高于现代洋中脊玄武岩. 根据晨星地区变基性岩已报道的全岩 Sm-Nd、Rb-Sr 等时线年龄、安山岩锆石 U-Pb

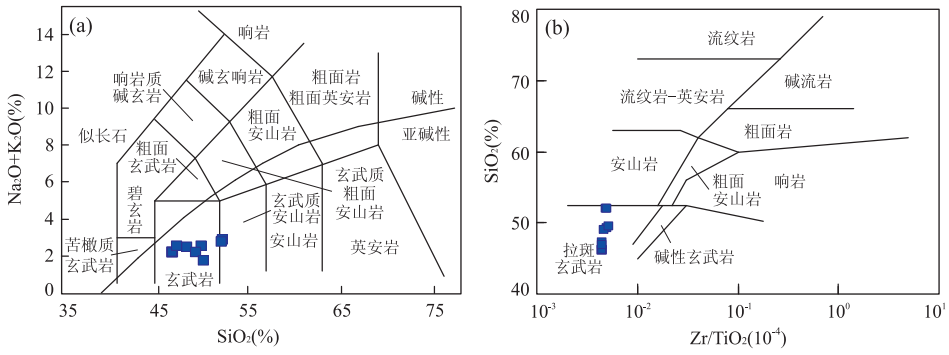


图 4 晨星变基性岩  $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ (a)和  $\text{SiO}_2\text{-(Zr/TiO}_2)$ (b)关系

Fig. 4 Relations of  $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$  (a) and  $\text{SiO}_2\text{-Zr/TiO}_2$  (b) from the Chenxing metabasites

图 a 据 Maitre *et al.* (1989); 图 b 据 Winchester and Floyd(1977)

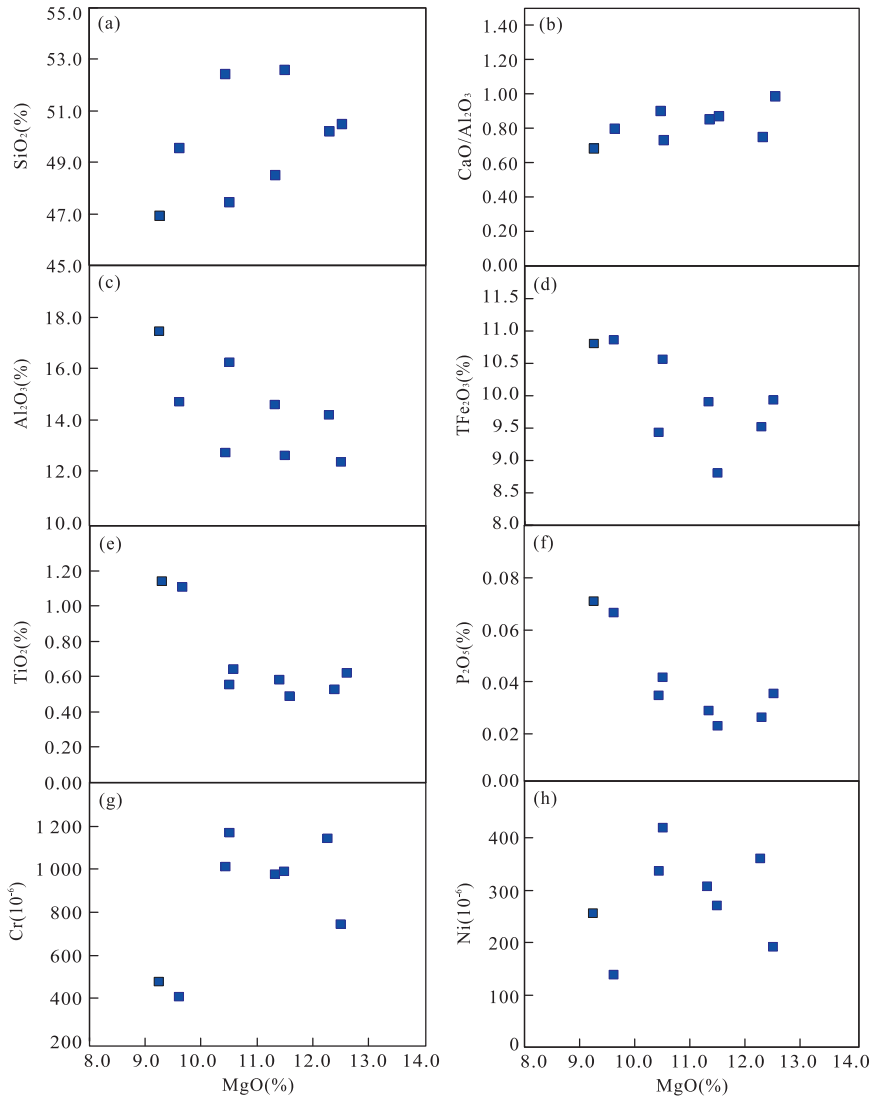


图 5 晨星变基性岩 MgO 与  $\text{SiO}_2$  (a),  $\text{CaO/Al}_2\text{O}_3$  (b),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (c),  $\text{TFe}_2\text{O}_3$  (d),  $\text{TiO}_2$  (e),  $\text{P}_2\text{O}_5$  (f), Cr(g) 和 Ni(h) 相关图解  
Fig. 5 MgO versus  $\text{SiO}_2$  (a),  $\text{CaO/Al}_2\text{O}_3$  (b),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (c),  $\text{TFe}_2\text{O}_3$  (d),  $\text{TiO}_2$  (e),  $\text{P}_2\text{O}_5$  (f), Cr (g) and Ni (h) for the Chenxing metabasite

所有氧化物值均已 100% 无水化

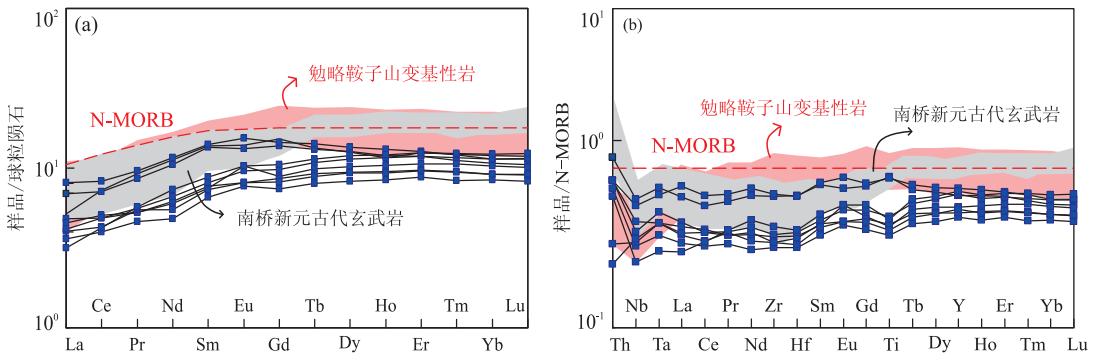


图 6 晨星变基性岩的球粒陨石标准化稀土元素配分模式(a)和标准化微量元素蛛网图(b)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE pattern (a) and N-MORB-normalized trace element spider diagram (b) of the Chenxing metabasite 勉略鞍子山斜长角闪岩数据来自许继峰等(1997, 2000);新元古代南桥玄武岩来自 Zhang *et al.* (2013), 其中球粒陨石和 N-MORB 数据分别引自 Taylor and McLennan(1995)和 Sun and McDonough(1989)

表 3 海南岛晨星地区变基性岩的同位素分析结果

Table 3 The isotopic analytical results for the representative samples from the Chenxing metabasite

样品编号	<sup>87</sup> Rb/ <sup>86</sup> Sr	<sup>147</sup> Sm/ <sup>144</sup> Nd	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	2σ	<sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd	2σ	( <sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr) <sub>i</sub>	( <sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd) <sub>i</sub>	ε <sub>Nd</sub> (t)
11HN-48B	0.038	0.270	0.709 714 42	0.000 000 07	0.513 299	0.000 011	0.709 539	0.512 710	9.85
11HN-48D	0.029	0.265	0.709 639 92	0.000 000 11	0.513 250	0.000 008	0.709 505	0.512 669	9.02
11HN-48F	0.020	0.237	0.708 506 31	0.000 000 15	0.513 202	0.000 011	0.708 413	0.512 685	9.31
11HN-48H	0.405	0.237	0.709 639 92	0.000 000 11	0.513 211	0.000 006	0.707 749	0.512 693	9.48

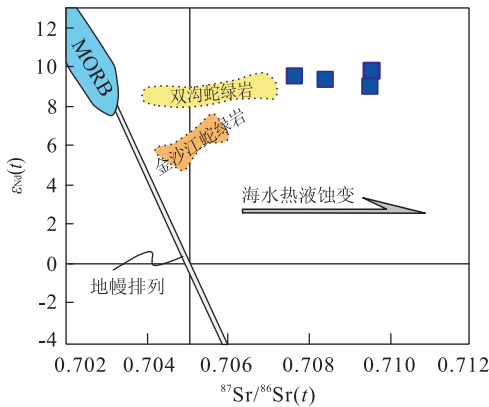


图 7 晨星地区变基性岩<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr(t)-ε<sub>Nd</sub>(t)关系

Fig. 7 Relation of <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr(t)-ε<sub>Nd</sub>(t) from the Chenxing metabasites, Central Hainan

双沟和金沙江蛇绿岩数据来自 Jian *et al.* (2009a, 2009b)

年龄(李献华等, 2000b; 许德如等, 2006; 陈新跃等, 2013)和本文所得到的全岩<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 年龄, 笔者取其喷发年龄为 328 Ma 计算其初始 Nd 同位素值, 得到其 ε<sub>Nd</sub>(t) 值为 9.02~9.85(图 7), 高于金沙江蛇绿岩和南桥玄武岩(Jian *et al.*, 2009a, 2009b; Zhang *et al.*, 2013), 类似于双沟地区蛇绿岩和勉略地区蛇绿岩 ε<sub>Nd</sub>(t) 值(Jian *et al.*, 2009a, 2009b; 许继峰等, 2000)。

## 5 讨论

### 5.1 岩石成因

晨星地区变基性岩烧失量(loss on ignition, 简称为 LOI)较低(0.77%~2.45%), 表明其后期蚀变作用不强. 岩相学和全岩测试分析结果显示, 晨星地区变基性岩虽受到一定程度蚀变作用, 但样品主要氧化物含量与 LOI 并无明显相关性, 因此, 归一化处理的主量元素可用于研究岩石成因和岩浆演化过程. 样品经历了绿片岩相变质作用, 但 Zr 等元素在低级变质作用和蚀变过程中性质稳定, Zr 可以作为判定其他微量元素稳定性的指标(Wang *et al.*, 2007). 本文结果显示所有晨星地区变基性岩的中等不相容元素(如 Hf、Th 等)线性关系明显, 表明绿片岩相变质作用及低温蚀变过程对上述元素的影响不明显, 可通过上述不活动元素来判断源区特征(Frey *et al.*, 1994; Hollanda *et al.*, 2006). 样品有着较高的 MgO、Cr(404 × 10<sup>-6</sup> ~ 1 170 × 10<sup>-6</sup>) 和 Ni(138 × 10<sup>-6</sup> ~ 419 × 10<sup>-6</sup>) 含量, 且随着 MgO 的变化, 晨星变基性岩的 Nb/La 比值较稳定(图 8a), 类似于未被地壳污染的 MORB 值(Sun and McDonough, 1989). 样品 Th 含量较低, 为 0.03 × 10<sup>-6</sup> ~ 0.14 × 10<sup>-6</sup>, 有着较低的 Th/Ce 比值(0.01~0.04) 和 Th/La 比值(0.03~0.11), 远低于大陆地壳的

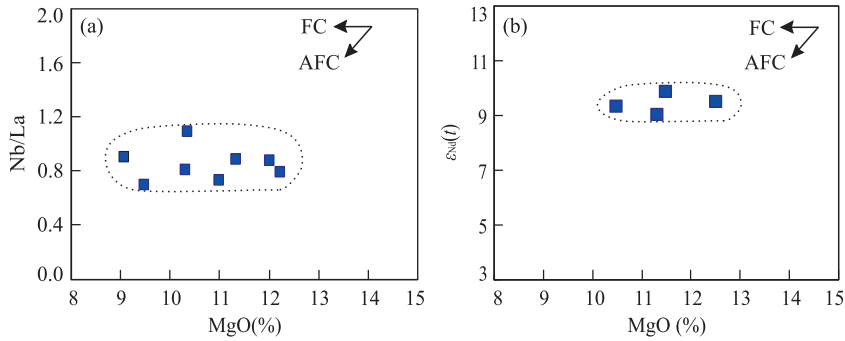
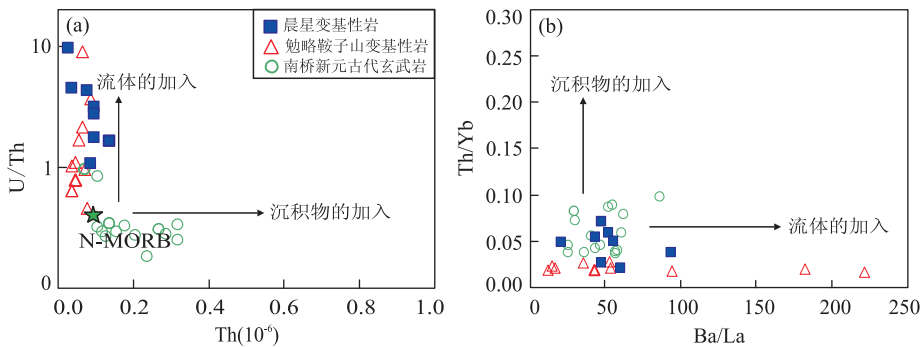
图 8 晨星变基性岩的 Nb/La-MgO 和  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ -MgO 关系Fig. 8 Relations of Nb/La-MgO (a) and  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ -MgO (b) from the Chenxing metabasites据 Zhang *et al.* (2013)修改

图 9 晨星变基性岩的 U/Th-Th(a)和 Th/Yb-Ba/La(b)关系

Fig. 9 Relations of U/Th-Th (a) and Th/Yb-Ba/La (b) from the Chenxing metabasites

勉略鞍子山变基性岩数据来自许继峰等(1997, 2000);新元古代南桥玄武岩来自 Zhang *et al.* (2013)

Th/Ce(约为 0.15)与 Th/La(约为 0.30)比值(Taylor and McLennan, 1995; Plank, 2005). 相应的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值高达 9.02~9.85(图 8b), 远高于受地壳混染岩石. 以上资料表明,晨星变基性岩样品在上升过程中受地壳混染作用不明显. 样品的镁指数为 66~75, MgO 和 Cr、Ni 间呈正相关关系(图 5g, 5h), 反映岩浆中橄榄石和辉石的分离结晶. CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 比值在岩浆演化的过程中较为稳定(图 5b), 稀土元素配分图中未见明显 Eu 异常, 表明岩浆演化过程中斜长石的分离结晶不明显. 随着岩浆演化, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 TiO<sub>2</sub> 含量并无明显变化(图 5e, 5f), 指示其无明显的钛氧化物和磷灰石分离结晶作用.

晨星变基性岩样品显示出 N-MORB 型特征(图 6), 轻稀土元素相对于重稀土元素更为亏损, 所有元素丰度均低于现代大洋 N-MORB 丰度, 且 La-Sm 元素丰度低于 10 倍球粒陨石含量, 表明其来自于比正常 MORB 岩石更为亏损的地幔源区. 这些岩石并无 Nb、Ta 及 Ti 负异常, 不同于同一地区产出的具 LREE 富集和 Nb-Ta、Ti 亏损的弧安山岩(陈新跃等, 2013). 如此特征类似于南桥玄武岩和勉略

蛇绿岩中变基性岩(Zhang *et al.*, 2013; 许继峰等, 2000), 异常高的正  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值进一步表明这些基性岩来自于高度亏损地幔源区, 且在上升过程中未明显受到地壳的混染.

晨星地区变基性岩的 LREE 相对 HREE 强烈亏损(图 6a), 类似于 N-MORB 配分特征. 但相对 N-MORB 而言, 这些样品具有更低的 Th 含量、Th/Yb (0.02~0.08)和 Th/Zr 比值(0.002~0.004) (Sun and McDonough, 1989; Kepezhinskis *et al.*, 1996), 其 Th/La 比值为 0.03~0.11, 介于 N-MORB(0.05)和大陆地壳储库(约为 0.3)之间(Hoffman and Ranalli, 1988; Sun and McDonough, 1989), 暗示样品可能受到了俯冲富集作用. 样品具有低 TiO<sub>2</sub> (0.48%~1.12%)、高 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (12.34%~17.45%)特征, 特别是 11HN-48A 和 11HN-48F 的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量超过 16%, 表明其源区可能有弧组分参与. Nb/U 比值为 2.86~10.86, 低于未被地壳混染的 N-MORB 或 OIB 比值(Nb/U = 47±10; Sun and McDonough, 1989), 也反映源区弧组分的影响(张玉芝等, 2015). 另外, 图 9a, 9b 中, 样



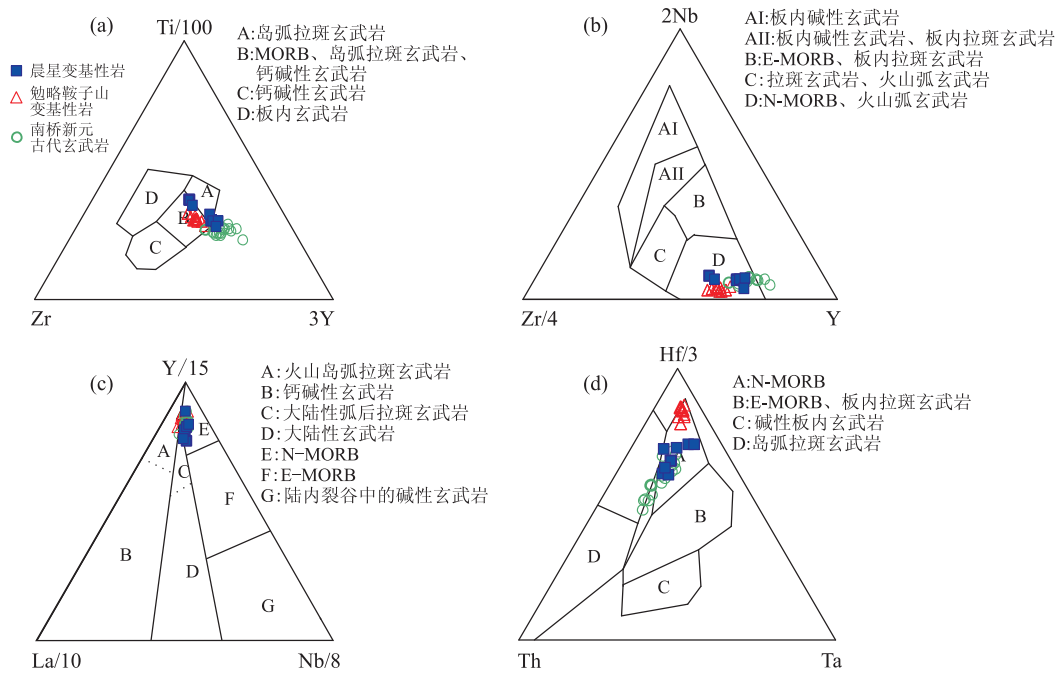


图 10 晨星地区变基性岩的地球化学判别关系

Fig. 10 Geochemical discrimination relations for the Chenxing metabasite

a. 图版据 Pearce and Cann(1973); b. 图版据 Meschede(1986); c. 图版据 Cabanis and Lecolle(1989); d. 图版据 Wood(1980). 勉略鞍子山变基性岩数据来自许继峰等(1997, 2000); 新元古代南桥玄武岩来自 Zhang *et al.* (2013)

品比 N-MORB 有着更高的 U/Th 和 Ba/La 比值, Th/Yb 不随 Ba/La 比值的变化而变化, 同样指示样品源区可能有流体作用的改造 (Wang *et al.*, 2004; Basta *et al.*, 2011). 图 10a 和 10b 显示晨星变基性岩样品落于火山弧与 MORB 型之间. 因此, 笔者推测晨星地区变基性岩来自于受俯冲流体改造的亏损地幔源区.

### 5.2 构造意义

本文所研究的海南晨星变基性岩样品具有异常高的  $\epsilon_{Nd}(t)$  值, 它们与下二叠统和石炭系岩石叠置成构造岩片, 并被海西晚期 (258 Ma) 花岗岩所切割 (李献华等, 2000a), 表明该基性岩应早于晚二叠世. 其代表性的变基性岩样品 (11HN-48B) 虽经历了绿片岩相变质作用, 但该样品析出  $^{39}\text{Ar}$  占总析出量的 98.5%, 表现出未受扰动的年龄谱系, 表明变质温度尚未达到扰动  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  体系的封闭温度, 其全岩  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  坪年龄 ( $328.1 \pm 2.6$  Ma) 能代表其喷发年龄. 事实上, 该年龄与李献华等 (2000b) 在晨星地区所测得的变基性岩 Sm-Nd 等时线年龄 ( $333 \pm 12$  Ma) 和许德如等 (2006) 获得的屯昌变基性岩全岩 Rb-Sr 等时线年龄 ( $344 \pm 11$  Ma) 类似, 略低于与上述变基性岩紧密共生的变安山岩锆石 U-Pb 年龄 ( $345 \pm 4$  Ma; 陈新跃等, 2013). 以上事实表明此

晨星地区火山岩喷发于早石炭世 (约 328 Ma). 以往的研究表明上述火山岩呈透镜状或层状夹持于下二叠统海相碎屑沉积岩中, 应将其划属二叠统 (图 1a). 笔者认为晨星地区出露的原划属为下二叠统的 N-MORB 型变基性岩更可能为石炭系, (广东省地质矿产局, 1988) 中关于晨星地区下二叠统海相火山一碎屑沉积建造应表述为石炭系海相一火山碎屑岩.

现阶段对海南的构造划分仍存在争议, 张业明等 (2005) 和侯威等 (1992) 认为海南岛基底为华南陆壳的组成部分, 并以 EW 向的九所一陵水断裂带为界将海南岛划分为南北两大块体. 杨树锋等 (1989) 同样以 EW 向的九所一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, Hsü *et al.* (1990) 则以昌江一琼海断裂带为界划分海南岛为华夏地块和印支陆块. 本文研究表明晨星变基性岩为早石炭世火山岩, 其形成时间早于印支陆块和华南陆块碰撞的时间 (约 250 Ma), 其地球化学特征类似于高度亏损的 N-MORB 型地幔, 如此特征的基性岩常常产出洋中脊, 弧后盆地或有限洋的构造环境 (李献华等, 2000a, 2000b; 许继峰等, 2000; Zhang *et al.*, 2013). 但是, 晨星地区变基性岩地球化学特征也表明其源区受到了一定程度流体改造作用的影响, 样品落于火山弧和 MORB 型源区之间 (图 10a,

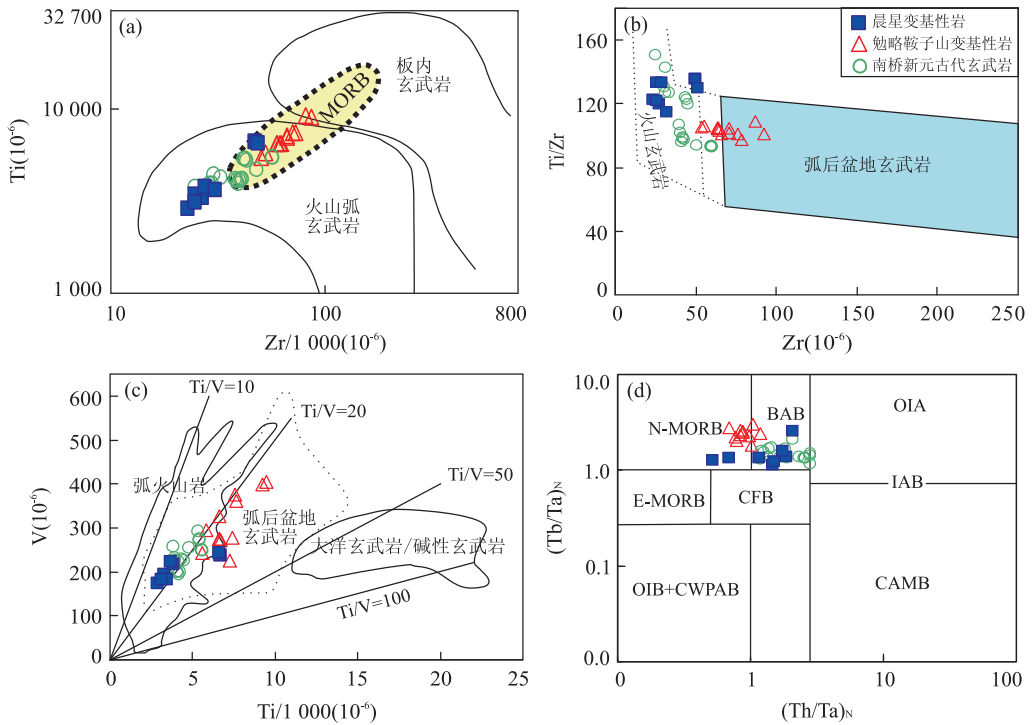


图 11 晨星变基性岩 Ti-Zr/1 000(a), Ti/Zr-Zr(b), V-Ti/1 000(c)和(Tb/Ta)<sub>N</sub>-(Th/Ta)<sub>N</sub>(d)关系

Fig. 11 Relations of Zr-Ti/1 000 (a), Ti/Zr-Zr (b), V-Ti/1 000 (c) and (Tb/Ta)<sub>N</sub>-(Th/Ta)<sub>N</sub>(d) from the Chenxing metabasites a. 图版据 Pearce(1982); b. 图版据 Wang *et al.* (2013); c. 图版据 Shervais(1982). 勉略鞍子山变基性岩数据来自许继峰等(1997, 2000); 新元古代南桥玄武岩来自 Zhang *et al.* (2013)

10b, 11a), 兼具 MORB 和弧组分特征, 表明其构造背景更可能为弧前和弧后环境 (Shinjo *et al.*, 1999; Sandeman *et al.*, 2006; Teklay, 2006). 目前在晨星地区尚未报道指示弧前盆地环境的代表性岩石, 如玻安岩、高镁安山岩等, 与本研究所述的变基性岩岩石组合差异明显. 晨星变基性岩在图 11b 中落于弧火山岩环境, 在图 10c 和 10d 中落于 N-MORB 构造环境与弧后盆地构造环境的交界处, 因此笔者推测晨星变基性岩可能形成于弧后盆地演化相关的构造背景. 另外在屯昌晨星农场还发育 LREE 富集和 Nb-Ta 和 Ti 亏损的早石炭世岛弧火山岩 (陈新跃等, 2013), 其很可能与晨星变基性岩构成弧盆格局, 晨星变基性岩应产自与弧后盆地演化有关的环境.

事实上, 李献华等 (2000a, 2000b) 沿昌江—琼海断裂一线的邦溪—晨星一带已识别出了 N-MORB 型角闪岩相变基性岩, 并认为其形成背景或为洋中脊蛇绿岩、或为弧后盆地或裂谷环境产物, 代表了华南和印支地块之间的东古特提斯洋残余. 另外, 沿邦溪—晨星一带向西至越南马江和云南双沟—金沙江一带也发育有同期基性—超基性岩或斜长岩 (Lepvrier *et al.*, 2004; Jian *et al.*, 2009a,

2009b), 如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 (简平等, 1999; Jian *et al.*, 2009a, 2009b)、哀牢山双沟蛇绿岩中辉长岩和斜长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为  $362 \pm 41$  Ma 和  $328 \pm 16$  Ma (简平等, 1998; Jian *et al.*, 2009a, 2009b). 因此, 起源于高度亏损地幔源区、并受到板片流体交代改造的晨星变基性岩, 可能代表了金沙江—哀牢山—马江古特提斯分支的东延部分, 其形成与古特提斯洋的演变关系密切, 海南岛的邦溪—晨星东西向基性岩带可作为印支与华南陆块的拼贴位置 (李献华等, 2000a, 2000b; Li *et al.*, 2002). 上述地质观察也反映自早石炭世开始即已存在华南与印支陆块之间的俯冲拼贴. Li *et al.* (2006) 在五指山地区获得了 267~262 Ma 的弧型花岗片麻岩, 陈新跃等 (2011) 认为五指山花岗片麻岩为碰撞型花岗岩, 其形成时代与越南中部 Truong Son 麻粒岩相变质年龄 (260~270 Ma; Maluskia *et al.*, 2005) 相当. 另外, 海南岛中沙农场和万宁地区发育有 237~242 Ma 的辉长岩和辉绿岩 (陈新跃等, 2014; 唐立梅等, 2010), 三亚地区发育 244 Ma 的石榴霓辉石正长岩 (谢才富等, 2005), 这些早三叠世的岩浆作用形成于造山后伸展构造背景, 与金沙江—哀

牢山构造带碰撞后岩浆作用在时空上相吻合(高睿等, 2010; Liu *et al.*, 2014). 同时在琼西公爱地区发育了 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄为 245 Ma 左右的 NW、NWW 向右旋走滑韧性剪切带(陈新跃等, 2006; Zhang *et al.*, 2013). 晨星地区西延至越南马江一带岩石的变质、变形年龄集中于 245 ~ 240 Ma (Carter *et al.*, 2001; Lepvrier *et al.*, 1997, 2004; Nam *et al.*, 1998). 海南上三叠统为陆相磨拉石沉积建造(夏邦栋等, 1990; 唐友友和冯少南, 1998), 表明 240 Ma 左右华南—印支陆块间的碰撞拼合已经结束(陈新跃等, 2014). 综上所述, 晨星地区 N-MORB 变基性岩带是古特提斯构造演化的重要组成部分, 其向西与越南马江—哀牢山基性—超基性岩和闪长岩—花岗岩带和墨江弧后盆地火山岩带 (Fan *et al.*, 2010; Liu *et al.*, 2014) 一起构成华南和印支陆块之间弧后盆地, 其开始俯冲于早石炭世, 于 260 Ma 左右碰撞, 其拼贴结束于 240 Ma 左右.

## 6 结论

(1) 晨星地区发育 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  坪年龄为  $328.1 \pm 2.6$  Ma 的玄武岩, 其  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值为  $9.02 \sim 9.85$ . 该样品的稀土和微量元素配分模式类似 N-MORB 岩石, 源自于早石炭世高度亏损的 MORB 型地幔源区.

(2) 结合该地区同期发育的岛弧火山岩, 推测晨星地区石炭纪时期发育有与现代大洋相似的弧—盆体系. 晨星地区变基性岩形成于弧后盆地或有限洋构造背景, 向西马江—哀牢山—金沙江一起构成古特提斯构造带东支, 代表了印支和华南拼贴带的构造位置.

## References

Basta, F. F., Maurice, A. E., Bakhit, B. R., et al., 2011. Neoproterozoic Contaminated MORB of Wadi Ghadir Ophiolite, NE Africa: Geochemical and Nd and Sr Isotopic Constraints. *Journal of African Earth Sciences*, 59 (2–3): 227–242. doi:10.1016/j.jafrearsci.2010.10.008

Bureau of Geology and Mineral Resources of Guangdong Province, 1988. Regional Geology of Guangdong Province. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).

Cabanis, B., Lecomte, M., 1989. Le Diagramme La/10-Y/15-Nb/8: Un outil Pour la Discrimination de Series Volcaniques et la Mise en Evidence des Processus de Melange et/ou de Contamination Crustale. *CR Academic Science*

*Series II*, 309:2023–2029 (in French).

Carter, A., Roques, D., Bristow, C., et al., 2001. Understanding Mesozoic Accretion in Southeast Asia: Significance of Triassic Thermotectonism (Indosinian Orogeny) in Vietnam. *Geology*, 29 (3): 211–214. doi:10.1130/0091-7613(2001)029<0211:umaisa>2.0.co;2

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).

Chen, X. Y., Wang, Y. J., Han, H. P., et al., 2014. Geochemical and Geochronological Characteristics of Triassic Basic Dikes in SW Hainan Island and Its Tectonic Implications. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 44 (3): 835–847 (in Chinese with English abstract).

Chen, X. Y., Wang, Y. J., Wei, M., et al., 2006. Microstructural Characteristics of the NW-Trending Shear Zones of Gong'ai Region in Hainan Island and Its  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  Geochronological Constraints. *Geotectonica et Metallogenia*, 30 (3): 312–319 (in Chinese with English abstract).

Chen, X. Y., Wang, Y. J., Zhang, Y. Z., et al., 2013. Geochemical and Geochronological Characteristics and Its Tectonic Significance of Andesitic Volcanic Rocks in Chenxing Area, Hainan. *Geotectonica et Metallogenia*, 37 (2): 99–108 (in Chinese with English abstract).

Fan, W. M., Wang, Y. J., Zhang, A. M., et al., 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): 553–568. doi:10.1016/j.lithos.2010.08.010

Frey, F. A., Garcia, M. O., Roden, M. F., 1994. Geochemical Characteristics of Koolau Volcano: Implications of Intershield Geochemical Differences among Hawaiian Volcanoes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58 (5): 1441–1462. doi:10.1016/0016-7037(94)90548-7

Gao, R., Xiao, L., He, Q., 2010. Geochronology, Geochemistry and Petrogenesis of Granites in Weixi-Deqin, West Yunnan. *Earth Science*, 35 (2): 186–200 (in Chinese with English abstract).

Hoffman, P. F., Ranalli, G., 1988. Archean Oceanic Flack Tectonics. *Geophysical Research Letters*, 15 (10): 1077–1080. doi:10.1029/gl015i010p01077

Hollanda, M. H., Pimentel, M. M., Oliveira, D. C., et al., 2006. Lithosphere-Asthenosphere Interaction 344 and the Origin of Cretaceous Tholeiitic Magmatism in Northeastern Brazil: Sr-Nd-Pb Isotopic Evidence. *Lithos*, 86 (1–2): 34–49.

doi:10.1016/j.lithos.2005.04.004

- Hou, W., Chen, H. F., Liang, X. Q., et al., 1992. The Establishment of Precambrian Strata and New Recognition of the Geotectonic Evolution of Hainan Island. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 22(2): 136—143 (in Chinese with English abstract).
- Hsü, K. J., Li, J. L., Chen, H. H., et al., 1990. Tectonics of South China; Key to Understanding West Pacific Geology. *Tectonophysics*, 183(1—4): 9—39. doi: 10.1016/0040-1951(90)90186-c
- Hu, N., Zhang, R. J., Feng, S. N., 2002. Study on Devonian-Carboniferous Boundary in Hainan Island, South China. *Scientia Geologica Sinica*, 37(3): 313—319 (in Chinese with English abstract).
- Jian, P., Liu, D., Kröner, A., et al., 2009a. Devonian to Permian Plate Tectonic Cycle of the Paleo-Tethys Orogen in Southwest China ( I ): Geochemistry of Ophiolites, Arc/Back-Arc Assemblages and within-Plate Igneous Rocks. *Lithos*, 113(3—4): 748—766. doi: 10.1016/j.lithos.2009.04.004
- Jian, P., Liu, D., Kröner, A., et al., 2009b. Devonian to Permian Plate Tectonic Cycle of the Paleo-Tethys Orogen in Southwest China ( II ): Insights from Zircon Ages of Ophiolites, Arc-Back-Arc Assemblages and within-Plate Igneous Rocks and Generation of the Emeishan CFB Province. *Lithos*, 113(3—4): 767—784. doi: 10.1016/j.lithos.2009.04.006
- Jian, P., Wang, X. F., He, L. Q., et al., 1998. U-Pb Zircon Dating of the Shuanggou Pphiolite from Xinping County, Yunnan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 14(2): 207—211 (in Chinese with English abstract).
- Jian, P., Wang, X. F., He, L. Q., et al., 1999. U-Pb Zircon Dating of Anothosite and Plagiogranite from the Jinshajiang Ophiolite Belt. *Acta Petrologica Sinica*, 15(4): 590—593 (in Chinese with English abstract).
- Kepezhinskias, P. K., Defant, M. J., Drummond, M. S., 1996. Progressive Enrichment of Island Arc Mantle by Melt-Peridotite Interaction Inferred from Kamchatka Xenoliths. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(7): 1217—1229. doi: 10.1016/0016-7037(96)00001-4
- Lei, Y. H., Ding, S. J., Ma, C. Q., et al., 2005. Nd Isotopic Constraints on Crustal Growth and Basement Characters of Hainan Island, South China. *Chinese Journal of Geology*, 40(3): 439—456 (in Chinese with English abstract).
- Lepvrier, C., Maluski, H., van Tich, V., et al., 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. doi: 10.1016/j.tecto.2004.07.030
- Lepvrier, C., Maluski, H., Vuong, N. V., et al., 1997. Indosinian NW-trending Shear Zones Within the Truong Son Belt (Vietnam) <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar Triassic Ages and Cretaceous to Cenozoic Overprints. *Tectonophysics*, 283(1—4): 105—127. doi: 10.1016/s0040-1951(97)00151-0
- Li, X. H., 1996. A Discussion on Themodel and Isochron Ages of Sm-Nd Isotopic Systematics; Suitability and Limitation. *Scientia Geologica Sinica*, 31(1): 97—104 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. H., Li, Z. X., Li, W. X., et al., 2006. Initiation of the Indosinian Orogeny in South China; Evidence for a Permian Magmatic Arc in the Hainan Island. *Journal of Geology*, 114(3): 341—353. doi: 10.1086/501222
- Li, X. H., Zhou, H. W., Ding, S. J., 2000a. Metamorphosed Mafic Rocks with N-Type MORB Geochemical Features in Hainan Island; Remnants the Paleo-Tethy Oceanic Crust? *Chinese Science Bulletin*, 45(1): 84—89 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. H., Zhou, H. W., Ding, S. J., et al., 2000b. Sm-Nd Isotopic Constraints on the Age of the Bangxi-Chenxing Ophiolite in Hainan Island; Implications for the Tectonic Evolution of Eastern Paleotethys. *Acta Petrologica Sinica*, 16(3): 425—432 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. H., Zhou, H. W., Sun, L. C., et al., 2002. Geochemical and Sm-Nd Isotopic Characteristics of Metabasites from Central Hainan Island, South China and Their Tectonic Significance. *Island Arc*, 11(3): 193—205. doi: 10.1046/j.1440-1738.2002.00365.x
- Liang, X. R., Wei, G. J., Li, X. H., 2003. Precise Measurement of <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd and Sm/Nd Ratios Using Multiple-Collectors Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometer (MC-ICPMS). *Geochimica*, 32(1): 91—96 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H. C., Wang, Y. J., Cawood, P. A., et al., 2014. Record of Tethyan Ocean Closure and Indosinian Collision along the Ailaoshan Suture Zone (SW China). *Gondwana Research*, 27(3): 1292—1306. doi: 10.1016/j.gr.2013.12.013
- Liu, Y., Liu, H. C., Li, X. H., 1996. Simultaneous and Precise Determination of 40 Trace Elements in Rock Samples Using ICP-MS. *Geochimica*, 25(6): 552—558 (in Chinese with English abstract).
- Long, W. G., Fu, C. R., Zhu, Y. H., 2002. Distintrgration of the Baoban Group in Huangzhuling Area of Eastern Hainan Island. *Journal of Stratigraphy*, 26(3): 212—215 (in Chinese with English abstract).
- Long, W. G., Tong, J. N., Zhu, Y. H., et al., 2007. Discovery of the Permian in the Danzhou-Tunchang Area of

- Hainan Island and Its Geological Significance. *Geology and Mineral Resources of South China*, (1): 38—45 (in Chinese with English abstract).
- Ma, D. Q., Huang, D. X., Xiao, Z. F., et al., 1998. Crystalline Basement in Hainan Island Sequence and Epoch of the Baoban Group. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Maitre, R. W. L., Bateman, P., Dudek, A., et al., 1989. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms. Blackwell, Oxford.
- Maluskia, H., Lepvrier, C., Leyreloupa, A., et al., 2005.  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  Geochronology of the Charnockites and Granulites of the Kan Nack Complex, Kon Tum Massif, Vietnam. *Journal of Asian Earth Sciences*, 25(25): 653—677. doi: 10.1016/j.jseaes.2004.07.004
- Meschede, M., 1986. A Method of Discriminating between Different Types of Mid-Ocean Ridge Basalts and Continental Tholeiites with the Nb-Zr-Y Diagram. *Chemical Geology*, 56(3—4): 207—218. doi: 10.1016/0009-2541(86)90004-5
- Nam, T. N., Toriumi, M., Itaya, T., 1998. P-T-t Paths and Postmetamorphic Exhumation of the Day Nui Con Voi Shear Zone in Vietnam. *Tectonophysics*, 290(3—4): 299—318. doi: 10.1016/s0040-1951(98)00054-7
- Pearce, J. A., 1982. Trace Element Characteristics of Lava from Destructive Plate Boundaries. In: Thorpe, R. S., ed., *Orogenic Andesites and Related Rocks*, John Wiley and Sons, Chichester, 528—548.
- Pearce, J. A., Cann, J. R., 1973. Tectonic Setting of Basic Volcanic Rocks Determined Using Trace Element Analyses. *Earth & Planetary Science Letters*, 19(2): 290—300.
- Plank, T., 2005. Constraints from Thorium/Lanthanum on Sediment Recycling at Subduction Zones and the Evolution of the Continents. *Journal of Petrology*, 46(5): 921—944. doi: 10.1093/petrology/egi005
- Sandeman, H. A., Hanmer, S., Tella, S., et al., 2006. Petrogenesis of Neoproterozoic Volcanic Rocks of the MacQuoid Supracrustal Belt: A Back-Arc Setting for the Northwestern Hearne Subdomain, Western Churchill Province, Canada. *Precambrian Research*, 144(1): 126—139. doi: 10.1016/j.precamres.2005.11.001
- Shervais, J. W., 1982. Ti-V Plots and the Petrogenesis of Modern and Ophioliticlavas. *Earth and Planetary Science Letters*, 59(1): 101—118. doi: 10.1016/0012-821x(82)90120-0
- Shinjo, R., Chung, S. L., Kato, Y., et al., 1999. Geochemical and Sr—Nd Isotopic Characteristics of Volcanic Rocks from the Okinawa Trough and Ryukyu Arc: Implications for the Evolution of a Young, Intracontinental Back Arc Basin. *Journal Geophysical Research*, 104(B5): 10591—10608. doi: 10.1029/1999jb900040
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotope Systematics of Oceanic Basalt: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society Special Publication*, 42(1): 313—345. doi: 10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19
- Tang, L. M., Chen, H. L., Dong, C. W., et al., 2010. Triassic Neuttrall and Basic Rocks in Hainan Island, Geochemistry and Their Geological Significance. *Chinese Journal of Geology*, 45(4): 1139—1156 (in Chinese with English abstract).
- Tang, Z. Y., Feng, S. N., 1998. Discovery of the Permian System in the Daling Area of Hainan Island and Its Significance. *Journal of Stratigraphy*, 22(3): 232—240 (in Chinese with English abstract).
- Taylor, S. R., McLennan, S., 1995. The Geochemical Evolution of the Continental Crust. *Reviews of Geophysics*, 33(2): 241—265. doi: 10.1029/95rg00262
- Teklay, M., 2006. Neoproterozoic Arc-Back-Arc System Analog to Modern Arc-Back-Arc Systems: Evidence from Tholeiite-Boninite Association, Serpentinite Mudflows and Across-Arc Geochemical Trends in Eritrea, Southern Arabian-Nubian Shield. *Precambrian Research*, 145(1): 81—92. doi: 10.1016/j.precamres.2005.11.015
- Wang, X. F., Ma, D. Q., Jiang, D. H., 1991a. Geology of Hainan Island: I; Stratum and Paleontology. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Wang, X. F., Ma, D. Q., Jiang, D. H., 1991b. Geology of Hainan Island III: Structure Geology. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Wang, Y. J., Fan, W., Zhang, Y., et al., 2004. Geochemical,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Geochronological and Sr-Nd Isotopic Constraints on the Origin of Paleoproterozoic Mafic Dikes from the Southern Taihang Mountains and Implications for the ca. 1 800 Ma Event of the North China Craton. *Precambrian Research*, 135(1): 55—77. doi: 10.1016/j.precamres.2004.07.005
- Wang, Y. J., Fan, W. M., Zhao, G. C., et al., 2007. Zircon U-Pb Geochronology of Gneisses in Yunkai Mountains and Its Implications on the Caledonian Event in South China. *Gondwana Research*, 12(4): 404—416. doi: 10.1016/j.gr.2006.10.003
- Wang, Y. J., Zhang, A. M., Cawood, P. A., et al., 2013. Geochronological, Geochemical and Nd—Hf—Os Isotopic Fingerprinting of an Early Neoproterozoic Arc-Back-Arc System in South China and Its Accretionary Assembly along the Margin of Rodinia. *Precambrian Research*, 231(5): 343—371. doi: 10.1016/j.precamres.

2013. 03. 020

- Wei, G. J., Liang, X. R., Li, X. H., et al., 2002. Precise Measurement of Sr Isotopic Composition of Liquid and Solid Base Using (LP) MC-ICPMS. *Geochimica*, 31(3): 295—299 (in Chinese with English abstract).
- Winchester, J. A., Floyd, P. A., 1976. Geochemical Magma Type Discrimination: Application to Altered and Metamorphosed Basic Igneous Rocks. *Earth & Planetary Science Letters*, 28(3): 459—469.
- Wood, D. A., 1980. The Application of Th-Hf-Ta Diagram to Problems of Tectonomagmatic Classification and to Establishing the Nature of Crustal Contamination of Basaltic Lavas of the British Tertiary Volcanic Province. *Earth and Planetary Science Letters*, 50(1): 11—30. doi: 10.1016/0012-821x(80)90116-8
- Xia, B. D., Shi, G. Y., Fang, Z., et al., 1991. The Late Palaeozoic Rifting in Hainan Island, China. *Acta Geologica Sinica*, 65(2): 103—115 (in Chinese with English abstract).
- Xia, B. D., Yu, J. H., Fang, Z., 1990. Geochemical Characteristics and Origin of the Hercynian-Indosinian Granites of Hainan Island, China. *Geochimica*, 19(4): 365—373 (in Chinese with English abstract).
- Xie, C. F., Zhu, J. C., Zhao, Z. J., et al., 2005. Zircon SHRIMP U-Pb Age Dating of Garnet-Acmite Syenite: Constraints on the Hercynian-Indosinian Tectonic Evolution of Hainan Island. *Geological Journal of China Universities*, 11(1): 37—47 (in Chinese with English abstract).
- Xie, W. Y., Wang, T., Zhang, Y. W., et al., 2009. Characteristics and Dynamic Analysis of Cenozoic Rifting and Magmatism in Southwest Qiongdongnan Basin. *Geotectonica et Metallogenia*, 33(2): 199—205 (in Chinese with English abstract).
- Xu, D. R., Chen, G. H., Xia, B., et al., 2003. Comment on Several Important Basic Geological Problems in Hainan Island, China. *Geological Science and Technology Information*, 22(4): 37—44 (in Chinese with English abstract).
- Xu, D. R., Xia, B., Li, P. C., et al., 2007. Protolith Natures and U-Pb Sensitive High Mass-resolution Ion microprobe (SHRIMP) Zircon Ages of the Metabasites in Hainan Island, South China: Implications for Geodynamic Evolution since the Late Precambrian. *Island Arc*, 16(4): 575—597. doi: 10.1111/j.1440-1738.2007.00584.x
- Xu, D. R., Xia, B., Nonna, B. C., et al., 2006. Metamorphic Characteristics of the Chenxing Metabasite Massif in Tunchang Area, Hainan Island, South China and Its Tectonic Implication. *Acta Petrologica Sinica*, 22(12): 2987—2992 (in Chinese with English abstract).
- Xu, J. F., Yu, X. Y., Li, X. H., et al., 1997. Discovery of the Highly Depleted N-MORB-Type Volcanic Rocks; New Evidence for the Mianlue Paleo-Ocean. *Chinese Science Bulletin*, 42(22): 2414—2418 (in Chinese).
- Xu, J. F., Yu, X. Y., Li, X. H., et al., 2000. Geochemistry of the Anzishan Ophiolitic Complex in the Mian-Le Belt of Qinling Orogen—Evidence and Implication of the Palaeo-Ocean Crust. *Acta Geologica Sinica*, 74(2): 39—50 (in Chinese with English abstract).
- Yang, S. F., Yu, Z. Z., Guo, L. Z., 1989. The Division and Palaeomagnetism of the Hainan Island and Plate Tectonic Significance. *Journal of Nanjing University (Earth Science Edition)*, 1(1—2): 38—46 (in Chinese with English abstract).
- Yin, X. Y., Ren, J. Y., Lei, C., 2010. Geometrical Characteristics and Formation Mechanism of Intrastratal Faults in the Southeast of the Qiongdongnan Basin. *Geotectonica et Metallogenia*, 34(3): 299—307 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, R. J., Ma, G. G., Jiang, D. H., 1991. Precambrian Geology of Hainan Island. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Zhang, Y. M., Fu, J. M., Zhao, Z. J., et al., 1998. Petrographic Characteristics and Sm-Nd Isotopic Dating of the Metamorphic Basic Volcanic Rocks in Western Part of Hainan Island. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 18(1): 78—84 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. M., Xie, C. F., Fu, T. A., et al., 2005. Tectonic Evolution of Hainan Island. *Science Technology & Engineer*, 5(20): 1485—1487 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. M., Zhang, R. J., Yao, H. Z., et al., 1997. The Precambrian Crustal Tectonic Evolution in Hainan Island. *Earth Science*, 22(4): 395—400 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. Z., Wang, Y. J., Geng, H. Y., et al., 2013. Early Neoproterozoic (~850 Ma) Back-Arc Basin in the Central Jiangnan Orogen (Eastern South China): Geochronological and Petrogenetic Constraints from Meta-Basalts. *Precambrian Research*, 231: 325—342. doi: 10.1016/j.precamres.2013.03.016
- Zhang, Y. Z., Wang, Y. J., Guo, X. F., et al., 2015. Geochronology and Geochemistry of the Cihua Neoproterozoic High-Mg Andesite in the Jiangnan Orogen and Its Tectonic Implications. *Earth Science*, 40(11): 1781—1795 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 广东省地质矿产局, 1988. 广东省区域地质志. 北京: 地质出版社.
- 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.
- 陈新跃, 王岳军, 韩会平等, 2014. 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. 吉林大学学报(地球科学版), 44(3): 835—847.
- 陈新跃, 王岳军, 韦牧, 等, 2006. 海南公爱 NW 向韧性剪切带构造特征及其<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 年代学约束. 大地构造与成矿学, 30(3): 312—319.
- 陈新跃, 王岳军, 张玉芝, 等, 2013. 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. 大地构造与成矿学, 37(2): 99—108.
- 高睿, 肖龙, 何琦, 等, 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.
- 侯威, 陈惠芳, 梁新权, 等, 1992. 海南岛前寒武纪地层的确定及其大地构造演化. 长春地质学院学报, 22(2): 136—143.
- 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.
- 简平, 汪啸风, 何龙清, 等, 1998. 云南省新平县双沟蛇绿岩 U-Pb 年代学初步研究. 岩石学报, 14(2): 207—211.
- 简平, 汪啸风, 何龙清, 等, 1999. 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. 岩石学报, 15(4): 590—593.
- 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.
- 李献华, 1996. Sm-Nd 模式年龄和等时线年龄的适用性与局限性. 地质科学, 31(1): 97—104.
- 李献华, 周汉文, 丁式江, 等, 2000a. 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.
- 李献华, 周汉文, 丁式江, 等, 2000b. 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.
- 梁细荣, 韦刚健, 李献华, 等, 2003. 利用 MC-ICPMS 精确测定<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd 和 Sm/Nd 比值. 地球化学, 32(1): 91—96.
- 刘颖, 刘海臣, 李献华, 1996. 用 ICP-MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素. 地球化学, 25(6): 552—558.
- 龙文国, 符策锐, 朱耀河, 2002. 海南岛东部黄竹岭地区“抱板群”的解体. 地层学杂志, 26(3): 212—215.
- 龙文国, 童金南, 朱耀河, 等, 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.
- 马大铨, 黄香定, 肖志发, 等, 1998. 海南岛结晶基底—抱板群层序与时代. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 唐立梅, 陈汉林, 董传万, 等, 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.
- 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.
- 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.
- 韦刚健, 梁细荣, 李献华, 等, 2002. (LP)MC-ICPMS 方法精确测定液体和固体样品的 Sr 同位素组成. 地球化学, 31(3): 295—299.
- 夏邦栋, 施光宇, 方中, 等, 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, 等, 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, 赵子杰, 等, 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.
- 谢文彦, 王涛, 张一伟, 等, 2009. 琼东南盆地西南部新生代裂陷特征与岩浆活动机理. 大地构造与成矿学, 33(2): 199—205.
- 许德如, 陈广浩, 夏斌, 等, 2003. 海南岛几个重大基础地质问题评述. 地质科技情报, 22(4): 37—44.
- 许德如, 夏斌, Nonna, B. C., 等, 2006. 海南岛屯昌晨星地区变基性岩体变质特征及构造意义. 岩石学报, 22(12): 2987—2992.
- 许继峰, 于学元, 李献华, 等, 1997. 高度亏损的 N-MORB 型火山岩的发现: 勉略古洋盆存在的新证据. 科学通报, 42(22): 2414—2418.
- 许继峰, 于学元, 李献华, 等, 2000. 秦岭勉略带中鞍子山蛇绿杂岩的地球化学—古洋壳碎片的证据及意义. 地质学报, 74(2): 39—50.
- 杨树锋, 虞子冶, 郭令智, 等, 1989. 海南地体划分、古地磁研究块构造意义. 南京大学学报(地球科学), 1(1—2): 38—46.
- 尹新义, 任建业, 雷超, 2010. 琼东南盆地东部层间断层系及其形成机制分析. 大地构造与成矿学, 34(3): 299—307.
- 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.
- 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. 矿物岩石, 18(1): 78—84.
- 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.
- 张业明, 张仁杰, 姚华舟, 等, 1997. 海南岛前寒武纪地壳构造演化. 地球科学, 22(4): 395—400.
- 张玉芝, 王岳军, 郭小飞, 等, 2015. 江南中段慈化地区新元古代高镁安山岩的厘定及其构造意义. 地球科学, 40(11): 1781—1795.