

引用格式: 胡在龙, 赵小明, 王勇, 等, 2023. 海南岛木兰头地区混合片麻岩的成因及其地质意义 [J]. 地质力学学报, 29 (5): 720–735. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023067

Citation: HU Z L, ZHAO X M, WANG Y, et al., 2023. Petrogenesis and geological significance of migmatitic gneiss in Mulantou area, Hainan Island [J]. Journal of Geomechanics, 29 (5): 720–735. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023067

海南岛木兰头地区混合片麻岩的成因及其地质意义

胡在龙^{1,2}, 赵小明³, 王 勇^{1,4}, 魏昌欣^{1,2}, 吕昭英^{1,2}, 吕嫦艳¹

HU Zailong^{1,2}, ZHAO Xiaoming³, WANG Yong^{1,4}, WEI Changxin^{1,2}, LYU Zhaoying^{1,2}, LYU Changyan¹

1. 海南省地质调查院, 海南 海口 570206;
2. 海南省海洋地质资源与环境重点实验室, 海南 海口 570206;
3. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004;
4. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083

1. Hainan Geological Survey Institute, Haikou 570206, Hainan, China;
2. Hainan Key Laboratory of Marine Geological Resources and Environment, Haikou 570206, Hainan, China;
3. Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin 541004, Guangxi, China;
4. School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha 410083, Hu'nan, China

Petrogenesis and geological significance of migmatitic gneiss in Mulantou area, Hainan Island

Abstract: In the coastal area of Pujian to Mulantou on Hainan Island, a set of medium to deep metamorphic rocks (Mulantou complex) has been discovered, composed of migmatite, dolomite, shale, and amphibolite, with migmatite being the predominant lithology. This study selected well-developed and typical migmatitic gneisses as the research focus and conducted systematic zircon U-Pb isotope dating and petrological and geochemical studies. The results indicate that the protolith of the Mulantou migmatitic gneisses was intermediate basic volcanic rock formed around 276 Ma. These rocks exhibit geochemical characteristics of island-arc calc-alkaline basalt, suggesting a tectonic setting related to the subduction of the Paleo-Tethys Ocean. Early anatexis metamorphism occurred around 261 Ma, indicating a tectonic environment related to the collision between the South China Block and the Indochina Block. Later metamorphism took place around 248 Ma, signifying a tectonic environment associated with extension following the collision between the South China Block and the Indochina Block. Therefore, the Mulantou migmatitic gneisses preserve a comprehensive record of the tectonic evolution in Hainan Island from the Early Permian to the Early Triassic. They represent the geological consequences of events such as the closure of the Paleo-Tethys Ocean, the collision between the South China Block and the Indochina Block, and the subsequent extension. The discovery of these rocks provides new insights into the eastern extension of the Song Ma suture zone.

Keywords: Hainan Island; migmatitic gneiss; Early Permian–Early Triassic; suture zone; Paleotethys

摘 要: 海南岛铺前–木兰头一带海边发现一套中深变质岩 (木兰头杂岩), 由混合岩、大理岩、片岩和透辉石岩组成, 以混合岩为主。研究选取其中较为发育和典型的混合片麻岩为研究对象, 对其开展了锆石 U-Pb 同位素测年、岩石学和岩石地球化学等系统研究。结果表明, 木兰头混合片麻岩原岩为中基性火山岩, 形成时代为 276 Ma, 具有活动大陆边缘的岛弧钙碱性玄武岩地球化学特征, 指示古特提斯洋俯冲

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (12120113065900); 海南省自然科学基金项目 (420RC744)

This research is financially supported by the Geological Survey Project of the China Geological Survey (Grant No. 12120113065900) and the Fund of the Hainan Provincial Natural Science Foundation of China (Grant No. 420RC744).

第一作者: 胡在龙 (1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事区域地质调查工作。E-mail: 272464990@qq.com

通讯作者: 赵小明 (1970—), 男, 博士, 研究员, 从事基础地质调查和科研工作。E-mail: zxm20040021@163.com

收稿日期: 2023-05-06; **修回日期:** 2023-07-29; **责任编辑:** 王婧

的构造环境；早期发生深熔变质作用时间为 261 Ma，指示华南和印支地块碰撞的构造环境；后期变质作用时间为 248 Ma，指示华南和印支地块碰撞后伸展的构造环境。因此，木兰头混合片麻岩完整记录了海南岛早二叠世—早三叠世的构造演化信息，是古特提斯洋俯冲至关闭、华南和印支地块碰撞等地质事件的产物，其发现为马江缝合带向东延伸的方向提供了新的思路。

关键词：海南岛；混合片麻岩；早二叠世—早三叠世；缝合带；古特提斯洋

中图分类号：P56；P581 **文献标识码：**A **文章编号：**1006-6616 (2023) 05-0720-16

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2023067

0 引言

混合岩常见于古老陆块基底或造山带高级变质地体中（王信水等，2019），形成于一些特定地质条件和构造环境，提供了有关陆块的基底物质组成和形成时代、区域变质及大地构造属性等关键信息。因此，对海南岛混合岩的研究有助于了解海南岛的构造属性和演化历史。早在 20 世纪 60 年代进行的 1:20 万海南岛区域地质调查过程中即识别和圈定了一套混合岩，主要分布在海南岛西部抱板、大蟹岭、冲卒岭、黄竹岭等地。夏邦栋和任震鹏（1979）把这套深变质岩系命名为抱板群。随后，多位学者对琼西一带混合岩或者片麻岩开展了详细的年代学研究，均获得了 14 亿年左右的年龄（李孙雄等，2013；Yao et al.，2017；Zhang et al.，2018；Xu et al.，2020）。这些研究均认为海南岛以混合岩、片麻岩、片岩等深变质岩为特征的岩石组合为抱板群所特有。

作者在 2013 年开展 1:5 万铺前等幅区域地质调查时，首次在海南岛东北部铺前-木兰头一带发现一套中深变质岩（木兰头杂岩），它们在形成时代和岩石成因等方面明显区别于抱板群。刘晓春等（2022）曾对木兰头杂岩不同岩性的岩石分别进行了一些初步的年代学工作，发现其物质组成具有复杂性，主体由二叠纪火山沉积岩系构成，但同时也夹杂着前寒武纪和晚二叠世—中三叠世的沉积岩和侵入岩。在离木兰头东南约 15 km 的潮滩鼻发现的石炭纪榴辉岩（Liu et al.，2021；Xia et al.，2022）为金沙江-哀牢山-马江缝合带延伸到海南岛提供了新的证据，为海南岛晚古生代的大地构造演化研究打开了一个新的窗口（刘晓春等，2022），对研究海南岛晚古生代的构造格局划分、古特提斯洋演化过程等具有极为重要的启示意义。基于此，文章选取木兰头杂

岩中最为发育和典型的混合片麻岩为研究对象，通过系统研究其锆石年代学、岩石学和岩石地球化学特征，以期探讨其形成机制及地球动力学背景，进而对古特提斯洋东延和演化等关键问题提供新的约束。

1 地质背景

海南岛位于思茅-印支地体与华南陆块的边界东延线上（图 1a），即金沙江-哀牢山-马江缝合带东延线上。金沙江-哀牢山-马江缝合带东延的去向问题一直是研究的热点（吴福元等，2020），不少学者提出了不同的看法（Metcalf，1996；李献华等，2000），也有学者提出金沙江-哀牢山-马江缝合带没有东延到海南岛，而是其他缝合带延伸到海南岛（Cai and Zhang，2009；Faure et al.，2016；图 1a）。正因为金沙江-哀牢山-松马缝合带东延线在海南岛及周边的不同划法，海南岛大地构造单元划分和构造属性还有很多争论（杨树锋等，1989；Metcalf et al.，1993；李献华等，2000；潘桂堂和肖庆辉，2015；海南省地质调查院，2017；龙文国等，2022；刘晓春等，2022）。长期以来，海南岛以东西向九所-陵水断裂和王五-文教断裂为界进行构造分区的主张基本上被地学工作者所认可，即以海南岛东西向九所-陵水断裂为界，该断裂以南的三亚地区为南海地块北缘三亚地体，以北属于华南造山带；进一步以王五-文教断裂为界，该断裂以南地区为五指山造山带，以北琼州海峡及其两岸在内的地区属于雷琼裂谷。

海南岛岩石地层除缺失泥盆系和侏罗系外，自中元古界长城系至第四系均有发育（海南省地质调查院，2017）。岛内侵入岩以二叠纪—白垩纪花岗岩类为主，少量长城纪花岗岩；火山岩主要为白垩纪火山岩和新近纪—第四纪火山岩（图 1b）。海南岛区内主要发育东西向和北东向构造，

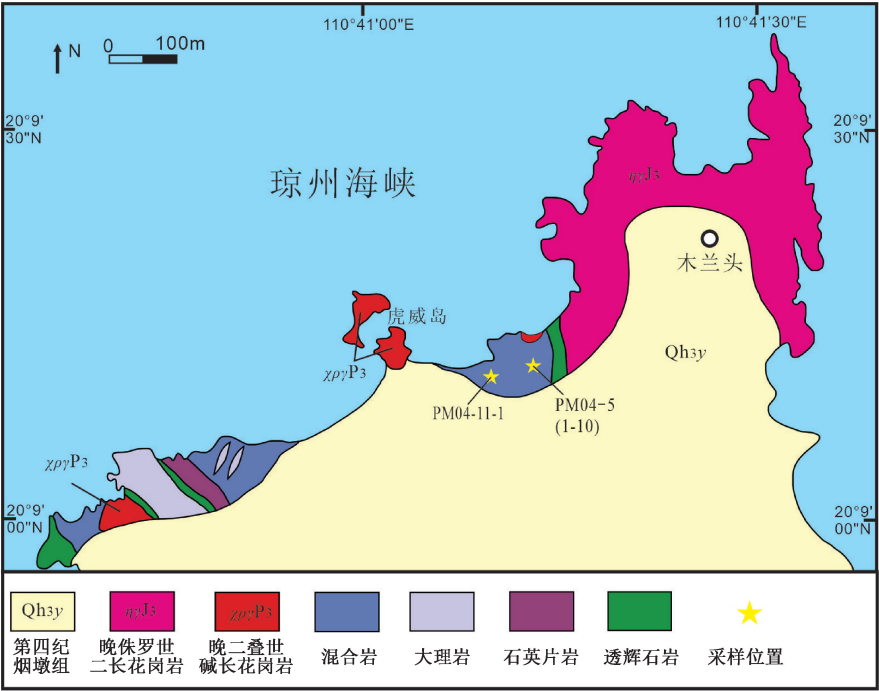


图 2 木兰头地质简图

Fig. 2 Simplified geological map of the Mulantou

详细的野外观察和室内研究。混合片麻岩整体呈不均匀条带状，局部受后期长英质岩脉侵入影响，岩脉附近岩石片麻理产状杂乱无章，岩石绕曲变形（图 3a、3b），从外貌、结构和颜色上可以分为浅色体、中色体和暗色体 3 个组成部分（图 3c、3d）。浅色体为长英质脉，脉体平行或切割围岩片麻理分布（图 3c、3d），脉体含量 10%~12%，宽度 0.2~20.0 cm 不等，其中宽达几十厘米的脉体与中色体一起构成条带状构造，少量宽约 0.2~3.0 cm 的脉体呈细脉状、无根脉状、弯曲脉状、串珠状、褶皱状等；中色体为混合片麻岩主体部分，岩性为条带状构造的黑云角闪斜长片麻岩，柱粒状变晶结构、交代结构，条带状构造，主要矿物为斜长石（50%~75%）、角闪石（10%~30%）、黑云母（5%~10%）、石英（5%~15%）。镜下普遍观察到石英交代斜长石和长石、石英交代角闪石现象，石英条链状相间平行分布，构成条带状构造（图 3e）；暗色体为斜长角闪岩，主要矿物为角闪石（60%~75%）、斜长石（30%~40%）（图 3f），以条带状、中—厚层状分布于混合片麻岩中（图 3c、3d），斜长角闪岩单层厚度约 5~20 cm，其间分布少量长英质脉，脉体宽多在 0.5~1.0 cm 之间，部分<0.2 cm。

3 样品采集和分析方法

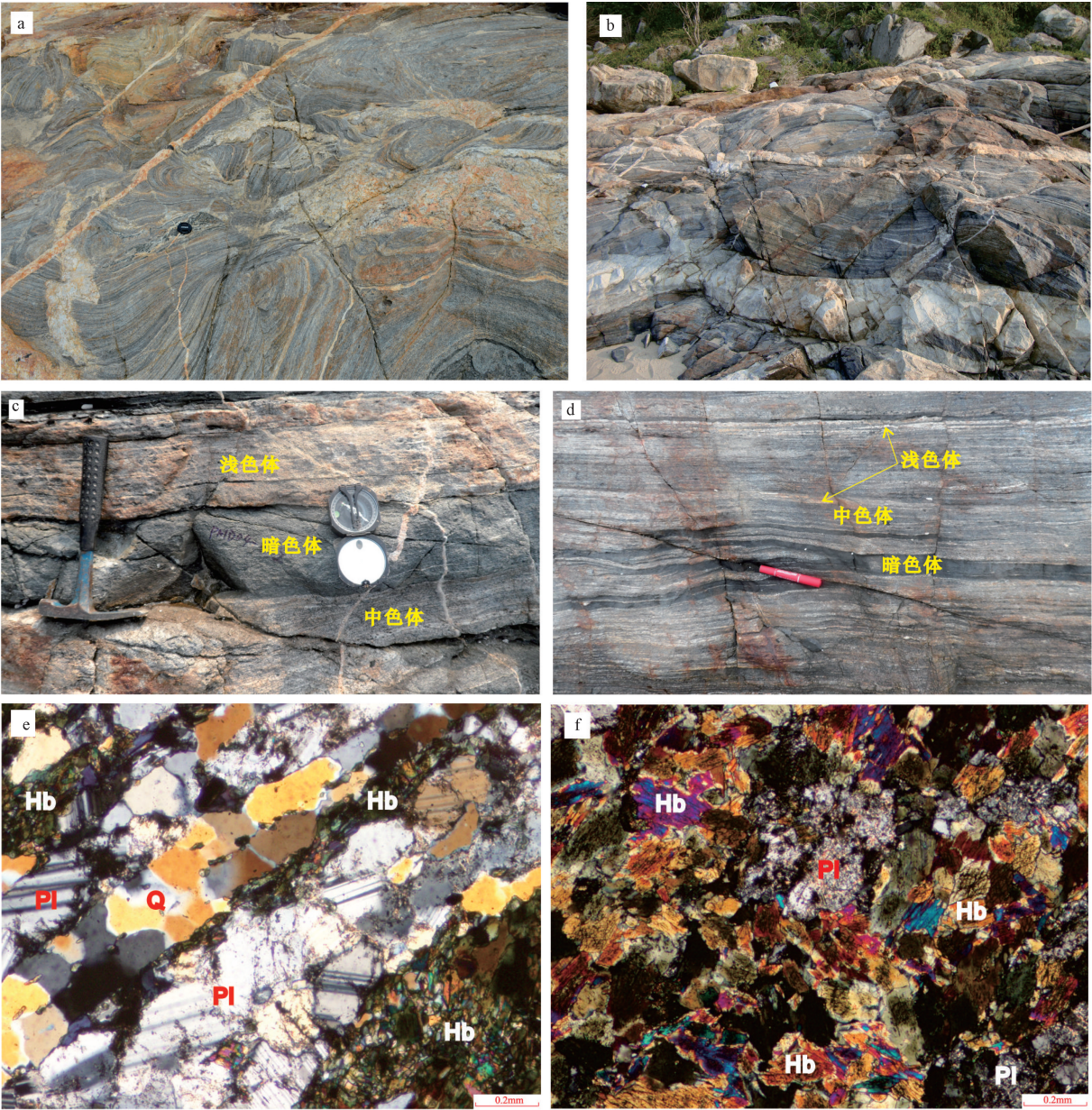
3.1 样品采集

为了研究混合片麻岩各个组成部分间的差别与联系，进而探讨其成因，此次工作在同一地点（20°09′23″N、110°40′55″E）的混合片麻岩中共采集 11 件新鲜样品进行主量元素、稀土元素、微量元素测定，其中浅色体 2 件（PM04-5-6、PM04-5-9）、中色体 5 件（PM04-5-1、PM04-5-3、PM04-5-4、PM04-5-7、PM04-11-1）、暗色体 4 件（PM04-5-2、PM04-5-5、PM04-5-8、PM04-5-10），并选取 1 件中色体（PM04-5-3）进行锆石 U-Pb 年代学分析。

3.2 分析方法

所有岩石样品的全岩主量元素、稀土元素及微量元素分析在武汉综合岩矿测试中心完成，主量元素采用 XRF-1800 顺序扫描式波长色散 X 射线荧光光谱仪（日本岛津公司）进行分析，分析精度优于 3%；微量元素和稀土元素测试采用四酸溶矿 ICP-MS 分析方法在 X2 电感耦合等离子质谱仪上完成，分析精度优于 5%。

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



Pl—斜长石；Hb—角闪石；Q—石英
a—强烈变形混合片麻岩；b—长英质岩脉侵入混合片麻岩；c、d—浅色体、中色体、暗色体野外特征；e—中色体显微照片；f—暗色体显微照片

图3 木兰头地区混合片麻岩野外露头照片及显微照片

Fig. 3 Field photos and photomicrograph of migmatitic gneiss in the Mulantou

(a) Strongly deformed migmatitic gneiss; (b) Felsic dike intrude into migmatitic gneiss; (c and d) Field photos of leucosome, mesosome and melanosome; (e) Photomicrograph of mesosome; (f) Photomicrograph of melanosome

Pl-plagioclase; Hb-hornblende; Q-quartz

光剥蚀电感耦合等离子质谱仪 (LA-ICP-MS) 完成, 激光剥蚀系统为 GeoLas 2005, ICP-MS 型号为 Agilent 7500a, 实验所采用的激光束斑直径 32 μm , 采用 He 作为剥蚀物质的载气, 锆石 91500 作为外标, NIST610 作为内标。U-Pb 同位素定年和微量元素含量处理中采用锆石标样 91500 和玻璃标准物

质 NIST610 作外标分别进行同位素和微量元素分馏校正; 锆石标样 GJ-1 作为未知内标用于同位素比值监控。详细的仪器参数和分析流程见文献 Liu et al. (2008, 2010)。每个样品点的分析数据包括大约 20~30 s 空白信号和 50 s 样品信号。对分析数据的离线处理 (包括对样品信号和空白信号的选择、

仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Pb 同位素比值和年龄计算) 采用软件 ICPMSDataCal 完成。锆石样品的 U-Pb 年龄谐和图、加权平均年龄图绘制均采用 Isoplot 2.7 完成。

4 锆石 U-Pb 年代学

中色体锆石阴极发光 (CL) 图像显示, 锆石形态整体呈浑圆粒状、椭圆粒状、长粒状, 大小 50~150 μm, 可明显分为两类不同锆石: 第一类锆石具有核边结构, 核部呈暗黑色阴极发光, 具岩浆环带, 而边部阴极发光相对较强, 无分带或弱分带结构, 属于典型的变质锆石; 第二类锆石不

具有核边结构, 锆石普遍具有无分带或弱分带结构, 无锆石残留核, 锆石 CL 强度较一致, 且锆石多较自形, 呈长柱状, 类似于浅成岩浆锆石 (图 4)。此次工作共分析 30 个测试点, 其中核部 7 个测试点, 边部 11 个测试点, 无核锆石 12 个测试点, 分析数据结果见表 1。30 个测试点分析显示, 测点均落在谐和曲线上或附近, 7 个核部测点锆石 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄分布范围 280~272 Ma, 加权平均年龄 275.7±2.2 Ma, 11 个边部测点锆石 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄分布范围 264~257 Ma, 加权平均年龄 261.1±2.3 Ma, 12 个无核锆石测点锆石 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄分布范围 254~238 Ma, 加权平均年龄 247.9±3.1 Ma。(图 5)

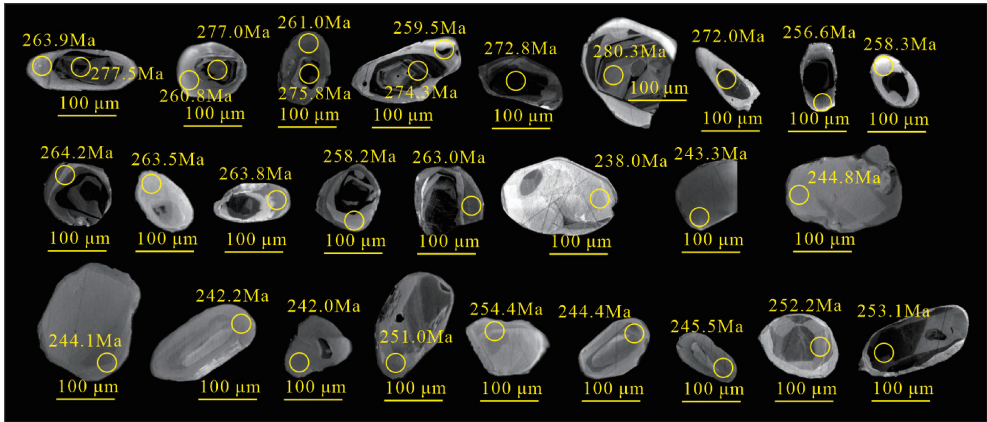


图 4 混合片麻岩 (PMD04-5-3) 锆石阴极发光 (CL) 图像及 LA-ICP-MS U-Pb 同位素年龄值
Fig. 4 Zircon cathodoluminescence (CL) images and LA-ICP-MS U-Pb composition ages for migmatitic gneiss (PMD04-5-3)

5 岩石地球化学特征

5.1 主量元素特征

11 件新鲜样品主量元素、稀土元素和微量元素测定结果见表 2。11 件样品具有较低的 SiO₂ 含量 (43.48%~60.51%), 暗色体 (斜长角闪岩)、中色体 (黑云角闪斜长片麻岩) 和浅色体 (长英质脉) SiO₂ 含量依次增加。Hark 图解中, 混合片麻岩中暗色体 (斜长角闪岩)、中色体 (黑云角闪斜长片麻岩) 和浅色体 (长英质脉) SiO₂ 含量与 TiO₂、MgO、CaO、FeO、Fe₂O₃ 含量呈较好的线性负相关, 与 Na₂O、K₂O 含量呈较好的线性正相关, Al₂O₃ 的含量变化不大 (图 6), 反映了在混合岩化过程中, 长英质矿物的熔出形成的浅色体中 Na₂O、K₂O 含量的增加, 而熔融残留体 (暗色体) 中与暗色矿物有关的 TiO₂、MgO、CaO、FeO、

Fe₂O₃ 含量相应增加, 说明其同源的演化特征, 没有明显的外来物质加入。

5.2 稀土、微量元素特征

混合片麻岩中暗色体 (斜长角闪岩)、中色体 (黑云角闪斜长片麻岩) 和浅色体 (长英质脉) 稀土元素总量 (ΣREE) 相近, 均呈轻稀土 (LREE) 相较富集, 重稀土 (HREE) 亏损。但也存在明显不同, ΣREE 以暗色体 (斜长角闪岩) 最高, 中色体 (黑云角闪斜长片麻岩) 次之, 浅色体 (长英质脉) 最低, 轻重稀土分异程度则与之相反。其中, 暗色体 (斜长角闪岩) ΣREE = 108×10⁻⁶~207×10⁻⁶, LREE/HREE = 3.89~8.45, (La/Yb)_N = 3.11~10.6, δEu = 0.81~0.92, 弱 Eu 负异常; 中色体 (黑云角闪斜长片麻岩) ΣREE = 101×10⁻⁶~207×10⁻⁶, LREE/HREE = 4.78~9.23, (La/Yb)_N = 4.37~11.3, δEu = 0.90~0.96, 无明显 Eu 异常; 浅色体 (长英质脉) ΣREE = 110×

表 1 混合片麻岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析数据

Table 1 LA-ICP-MS U-Pb dating data of zircons from migmatitic gneiss

编号	元素含量/ $\times 10^{-6}$			同位素比值						同位素年龄/Ma						锆石打点类型	
	Pb	Th	U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ		谐和度
01	45.66	228.54	384.93	0.0532	0.0025	0.3243	0.0154	0.0440	0.0005	344.5	105.5	285.2	11.8	277.5	3.0	97%	核
02	25.40	97.81	343.67	0.0542	0.0028	0.3115	0.0158	0.0418	0.0005	388.9	121.3	275.3	12.3	263.9	3.2	95%	边
03	100.61	549.87	479.66	0.0544	0.0021	0.3320	0.0130	0.0439	0.0004	387.1	87.0	291.1	9.9	277.0	2.5	95%	核
04	27.46	105.54	344.42	0.0568	0.0024	0.3244	0.0139	0.0413	0.0004	483.4	94.4	285.3	10.7	260.8	2.7	91%	边
05	49.22	231.91	467.50	0.0521	0.0022	0.3154	0.0134	0.0437	0.0004	300.1	98.1	278.4	10.3	275.8	2.6	99%	核
06	1.61	8.47	23.81	0.0644	0.0290	0.2947	0.1073	0.0413	0.0016	755.3	742.9	262.2	84.2	261.0	9.8	99%	边
07	26.71	116.73	275.58	0.0540	0.0030	0.3230	0.0177	0.0435	0.0005	368.6	130.5	284.2	13.6	274.3	2.9	96%	核
08	12.07	60.26	135.86	0.0565	0.0056	0.3092	0.0307	0.0411	0.0007	472.3	222.2	273.5	23.8	259.5	4.6	94%	边
09	37.91	169.48	464.35	0.0520	0.0024	0.3093	0.0142	0.0432	0.0005	283.4	105.5	273.6	11.0	272.8	3.1	99%	核
10	24.08	88.30	261.48	0.0493	0.0037	0.3011	0.0223	0.0444	0.0006	161.2	166.6	267.2	17.4	280.3	3.4	95%	核
11	39.89	222.39	271.15	0.0519	0.0033	0.3101	0.0199	0.0431	0.0005	279.7	146.3	274.3	15.5	272.0	3.4	99%	核
12	15.17	70.16	183.99	0.0563	0.0040	0.3073	0.0210	0.0406	0.0007	464.9	157.4	272.1	16.3	256.6	4.3	94%	边
13	6.40	24.95	76.84	0.0570	0.0124	0.2944	0.0528	0.0409	0.0009	500.0	410.8	262.0	41.4	258.3	5.5	98%	边
14	11.74	42.28	148.85	0.0505	0.0057	0.2967	0.0305	0.0418	0.0007	220.4	240.7	263.8	23.9	264.2	4.1	99%	边
15	20.01	86.40	202.89	0.0553	0.0079	0.3009	0.0419	0.0417	0.0009	433.4	319.4	267.1	32.7	263.5	5.5	98%	边
16	32.15	152.69	304.07	0.0562	0.0045	0.3238	0.0221	0.0418	0.0006	461.2	149.1	284.8	17.0	263.8	3.7	92%	边
17	30.48	136.25	332.86	0.0546	0.0030	0.3082	0.0164	0.0409	0.0005	394.5	91.7	272.8	12.7	258.2	2.8	94%	边
18	6.01	27.16	44.78	0.0508	0.0140	0.2927	0.0725	0.0416	0.0011	231.6	533.3	260.7	56.9	263.0	6.9	99%	边
19	2.19	13.64	21.36	0.0135	0.0730	0.2848	0.1272	0.0376	0.0015	/	/	254.5	100.5	238.0	9.0	93%	无核
20	9.34	47.64	69.77	0.0538	0.0085	0.2697	0.0428	0.0385	0.0008	364.9	322.2	242.4	34.2	243.3	5.2	99%	无核
21	7.48	32.38	78.92	0.0582	0.0090	0.2912	0.0410	0.0387	0.0008	600.0	337.9	259.5	32.3	244.8	5.2	94%	无核
22	7.21	34.73	73.91	0.0526	0.0078	0.2570	0.0391	0.0386	0.0008	322.3	298.1	232.2	31.6	244.1	4.9	95%	无核
23	8.06	36.21	88.16	0.0453	0.0058	0.2413	0.0300	0.0383	0.0007	/	/	219.5	24.6	242.2	4.3	90%	无核
24	7.02	33.42	85.86	0.0556	0.0084	0.2745	0.0401	0.0383	0.0008	438.9	343.3	246.3	32.0	242.0	5.0	98%	无核
25	17.04	93.30	151.74	0.0574	0.0052	0.3110	0.0282	0.0397	0.0006	509.3	200.0	274.9	21.8	251.0	3.7	90%	无核
26	5.94	40.31	45.78	0.0556	0.0155	0.2758	0.0691	0.0402	0.0012	435.2	523.7	247.3	55.0	254.4	7.5	97%	无核
27	4.35	23.90	41.22	0.0556	0.0134	0.2783	0.0642	0.0386	0.0011	438.9	462.9	249.3	51.0	244.4	6.9	98%	无核
28	19.02	92.68	183.93	0.0489	0.0062	0.2585	0.0297	0.0388	0.0006	142.7	274.0	233.5	23.9	245.5	3.9	94%	无核
29	14.42	75.77	139.44	0.0549	0.0047	0.3039	0.0264	0.0399	0.0006	409.3	189.8	269.5	20.5	252.2	4.0	93%	无核
30	38.60	204.56	317.42	0.0537	0.0025	0.2973	0.0137	0.0401	0.0004	366.7	101.8	264.3	10.7	253.1	2.7	95%	无核

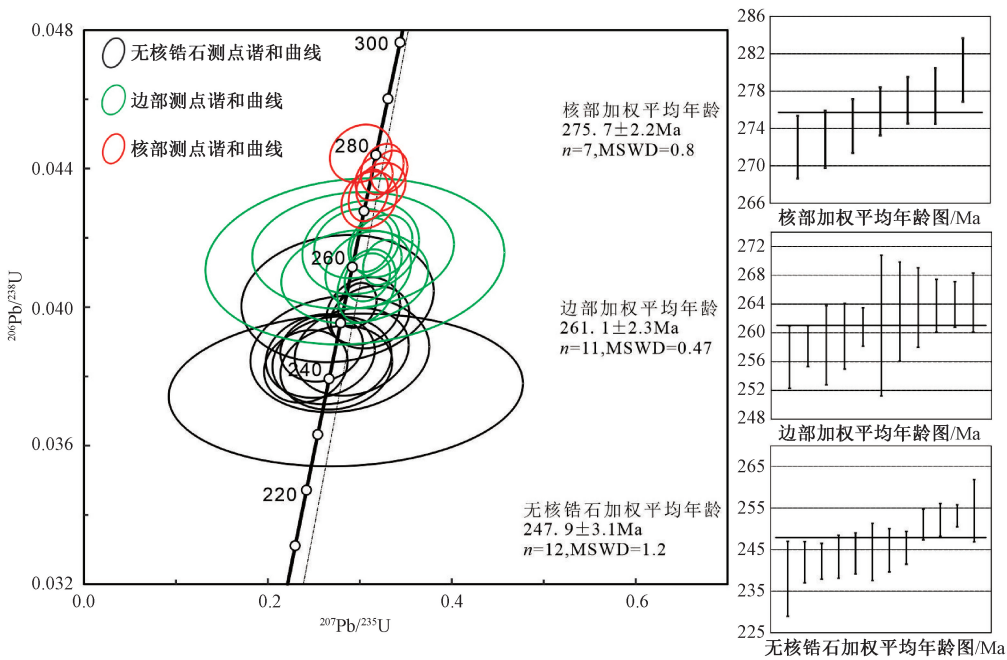


图 5 混合片麻岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 5 Concordia diagrams of zircon U-Pb ages for migmatitic gneiss

表 2 混合片麻岩岩石化学成分

Table 2 Chemical composition of migmatitic gneiss

岩性	浅色体 (长英质脉)			中色体 (黑云角闪斜长片麻岩)				暗色体 (斜长角闪岩)			
样号	PMD04-5-6	PMD04-5-9	PMD04-5-1	PMD04-5-3	PMD04-5-4	PMD04-5-7	PMD04-11-1	PMD04-5-2	PMD04-5-5	PMD04-5-8	PMD04-5-10
SiO ₂	59.72	60.51	50.63	55.93	53.58	50.93	56.94	48.86	43.48	43.51	46.73
TiO ₂	1.36	0.31	1.31	0.96	1.21	1.14	0.95	1.59	2.08	1.60	1.81
Al ₂ O ₃	17.39	18.72	13.42	17.25	16.4	18.58	18.18	14.1	16.06	17.4	17.43
Fe ₂ O ₃	1.86	0.64	1.10	1.09	1.80	1.54	1.08	1.45	3.09	2.12	2.25
FeO	3.70	2.70	7.70	7.30	6.40	7.37	5.43	8.15	10.00	9.77	8.53
TFeO	5.37	3.28	8.69	8.28	8.02	8.76	6.40	9.45	12.78	11.68	10.55
MnO	0.13	0.09	0.19	0.19	0.20	0.18	0.15	0.21	0.24	0.21	0.21
MgO	2.23	1.78	7.84	3.50	4.69	4.29	2.64	7.93	7.35	7.85	5.77
CaO	5.67	6.53	11.94	7.42	8.36	8.16	6.45	11.62	11.77	11.53	10.29
Na ₂ O	3.97	4.45	2.22	3.43	3.23	3.79	4.35	2.03	1.67	1.68	2.64
K ₂ O	1.49	1.92	0.65	1.17	1.31	1.53	1.65	0.97	1.05	1.19	1.36
P ₂ O ₅	0.36	0.27	0.63	0.19	0.43	0.47	0.34	0.58	0.48	0.35	0.78
CO ₂	0.08	0.67	0.27	0.06	0.08	0.12	0.16	0.31	0.08	0.08	0.08
H ₂ O ⁺	1.81	1.19	1.85	1.31	2.09	1.63	1.42	1.94	2.44	2.52	1.86
LOI	1.12	1.78	1.35	0.69	1.26	0.82	0.78	1.70	1.35	1.52	0.95
La	23.82	29.54	26.35	18.26	28.97	38.38	33.89	32.61	15.97	13.12	38.16
Ce	43.44	48.01	51.99	35.66	60.23	81.47	67.44	76.62	41.48	33.47	81.39
Pr	5.62	5.35	6.81	4.69	8.03	10.75	8.45	10.52	6.79	5.71	11.24
Nd	21.35	18.86	27.26	19.00	31.45	40.60	32.05	42.28	31.52	25.65	43.75
Sm	4.06	3.07	5.92	4.48	6.21	7.71	5.98	8.97	7.84	6.36	8.58
Eu	1.58	1.39	1.51	1.34	1.85	2.18	1.78	2.24	2.27	1.92	2.26
Gd	3.36	2.43	5.01	4.42	5.15	6.84	5.12	7.42	7.87	6.28	7.07
Tb	0.50	0.31	0.76	0.75	0.82	1.13	0.78	1.13	1.28	1.05	1.10
Dy	2.75	1.66	3.88	4.55	4.54	6.70	4.38	5.84	7.54	5.95	5.99
Ho	0.53	0.30	0.76	0.96	0.89	1.43	0.83	1.16	1.54	1.17	1.14
Er	1.44	0.79	2.02	2.84	2.36	4.13	2.29	3.24	4.17	3.25	3.09
Tm	0.22	0.14	0.31	0.47	0.36	0.65	0.35	0.50	0.61	0.48	0.45
Yb	1.32	0.77	1.89	3.00	2.23	4.4	2.16	2.88	3.69	2.90	2.72
Lu	0.19	0.11	0.26	0.45	0.31	0.68	0.30	0.41	0.52	0.42	0.37
V	103.80	51.35	170.02	234.01	164.30	167.70	114.30	227.70	308.90	259.60	215.60
Co	8.26	6.61	30.44	19.48	18.85	20.38	13.36	27.16	42.49	39.07	28.97
Ni	2.45	4.22	45.05	1.27	15.90	10.15	1.60	61.81	41.92	32.21	28.05
Ga	20.85	21.97	15.23	19.73	20.70	20.29	20.80	18.35	20.62	18.13	20.10
Rb	85.73	70.83	26.43	39.83	85.22	54.30	46.98	53.60	36.50	58.36	55.66
Sr	673.47	461.41	749.30	412.02	544.87	831.62	707.88	755.55	364.93	399.98	719.08
Y	13.86	7.90	18.99	24.76	22.30	35.85	21.15	29.3	36.33	28.08	29.46
Zr	522.7	148.30	71.10	101.20	112.50	332.90	226.8	87.00	79.90	65.60	142.30
Nb	12.11	3.47	6.80	8.26	12.20	10.52	10.21	11.62	11.26	7.54	12.70
Cs	4.63	1.87	1.03	4.80	5.62	4.60	2.72	4.50	1.88	4.28	4.51
Ba	649.2	537.00	229.64	420.71	402.50	729.80	769.50	254.74	135.60	131.30	472.90
Hf	20.99	7.26	3.38	7.93	8.77	18.61	14.79	5.41	4.55	3.47	9.16
Ta	0.63	0.20	0.44	0.83	0.95	0.64	0.42	0.68	1.00	1.12	0.62
Pb	13.69	12.74	7.11	7.91	11.21	8.54	10.67	6.46	4.99	4.53	7.41
Th	0.46	0.36	0.90	0.53	0.86	0.88	0.55	0.91	0.40	0.37	0.54
U	0.17	0.26	0.28	0.11	0.33	0.10	0.09	0.21	0.26	0.13	0.14

注: 主量元素单位为%, 微量元素和稀土元素单位为×10⁻⁶

10⁻⁶ ~ 113 × 10⁻⁶, LREE/HREE = 9.67 ~ 16.32, (La/Yb)_N = 12.9 ~ 27.6, δEu = 1.27 ~ 1.50, 弱 Eu 正异常 (图 7a)。在微量元素原始地幔标准化蛛网图中 (图 7b), 暗色体 (斜长角闪岩)、中色体

(黑云角闪斜长片麻岩) 和浅色体 (长英质脉) 表现一致, 富集大离子亲石元素 K、Rb、Ba, 除富集高场强元素 Hf 以外, 其他高场强元素 Th、U、Nb、Ta、Zr 均强烈亏损。

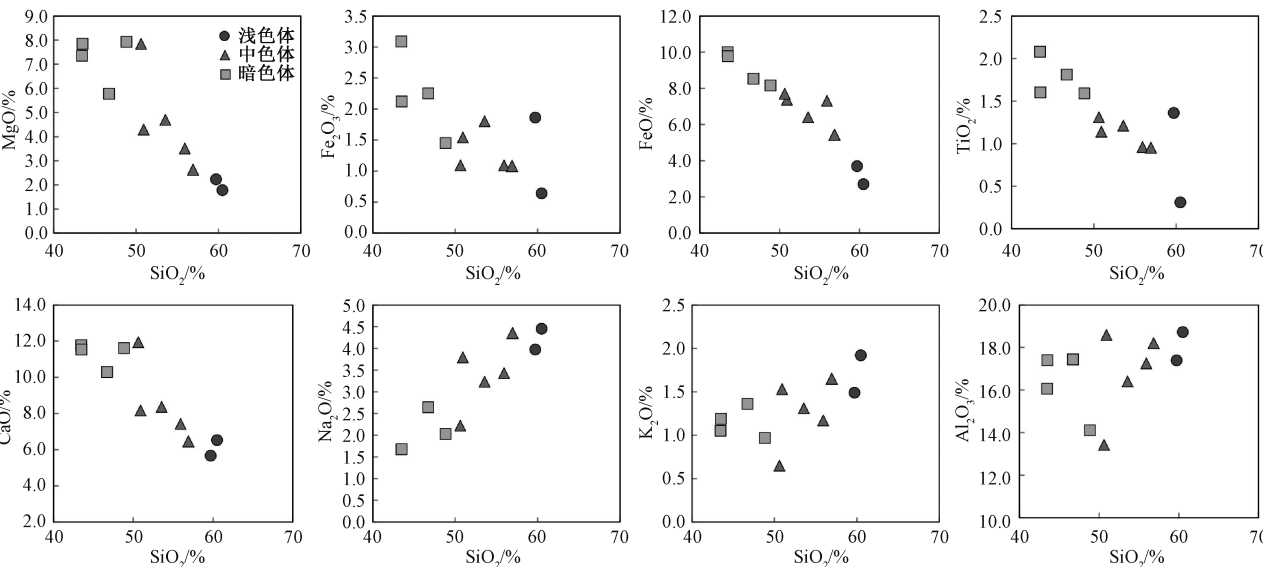
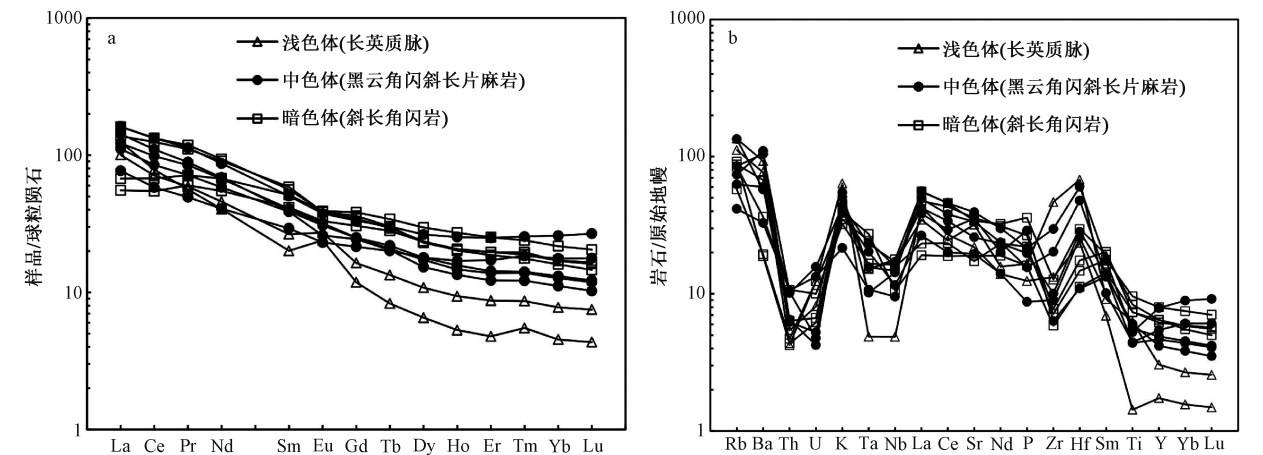


图 6 混合片麻岩 Hark 图解

Fig. 6 Harker diagrams for migmatitic gneiss



a—稀土元素球粒陨石标准化配分模式图；b—微量元素原始地幔标准化蛛网图

图 7 混合片麻岩稀土元素球粒陨石标准化配分模式图和微量元素原始地幔标准化蛛网图（标准化值引自 Sun and McDougall, 1989）

Fig. 7 Chondrite-normalized partition pattern diagram for rare earth elements and primitive mantle-normalized spider diagram for trace elements of the migmatitic gneiss

(a) Chondrite-normalized partition pattern diagram for rare earth elements; (b) Primitive mantle-normalized spider diagram for trace elements

6 讨论

6.1 形成时间约束

在深熔片麻岩中，大部分锆石具有增生边和晶核，晶核 U-Pb 年龄代表其原岩年龄，而核部外围增生边的 U-Pb 年龄则代表其深熔变质作用年龄。此次工作对混合片麻岩中色体（PMD04-5-3）

进行了锆石 U-Pb 同位素分析，从锆石结构上可以分为有核和无核两类，并且都是变质锆石。7 个核部分析点获得的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄分布范围为 280 ~ 272 Ma，加权平均年龄 275.7±2.2 Ma（图 5），代表木兰头混合片麻岩原岩的结晶年龄；11 个边部分析点获得的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄分布范围为 264 ~ 257 Ma，加权平均年龄 261.1±2.3 Ma（图 5），代表木兰头混合片麻岩深熔变质作用年龄。无核锆

石为变质重结晶锆石,代表着变质重结晶发生的时代,12个分析点基于上述分析,获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分布范围为254~238 Ma,加权平均年龄 247.9 ± 3.1 Ma(图5)。木兰头杂岩中混合片麻岩原岩形成于约276 Ma,与已有报道的海南岛邦溪地区变质基性岩(270 Ma; Xu et al., 2007)、昌江地区英云闪长岩(270 Ma; 海南省地质调查院, 2017)、乐东志仲地区花岗岩(272 Ma; 温淑女等, 2013)、木兰头虎威岭斜长角闪岩原岩(276 Ma; 刘晓春等, 2022)的形成时代相似,表明海南岛存在这一时期岩浆活动。混合片麻岩深熔作用变质时代为261 Ma,这一变质事件在海南岛也是有记录的,刘晓春等(2022)在邦溪-晨星地区变玄武岩中获得变质年龄268~260 Ma,区域上越南中部 TruongSon 麻粒岩相变质年龄也是270~260 Ma (Maluski et al., 2005)。混合片麻岩变质重结晶发生的时代为248 Ma,这一变质事件可能与后期大量伟晶岩脉侵入有关,在野外露头上见大量伟晶岩脉侵入(图3b),刘晓春等(2022)对这些伟晶岩脉进行了锆石 U-Pb 同位素测年,获得岩石侵入年龄243 Ma和251 Ma,与混合片麻岩变质重结晶发生的时代相当。

6.2 混合岩成因

关于混合岩的成因目前存在不同的认识,归纳起来可有四种成因机制,即外来岩浆注入作用、热液交代作用、变质分异作用和原地深熔作用(任留东等, 2010),前两种属开放体系,后两种属封闭体系(任留东等, 2011),比较常见的是岩浆注入和原地深熔作用2种成因类型。Sawyer(1999)指出,混合岩中浅色体、中色体和暗色体同时出现是高级变质地体中深熔作用存在的主要标志。木兰头杂岩中的混合片麻岩,浅色体(长英质脉)-中色体(黑云角闪斜长片麻岩)-暗色体(斜长角闪岩)交互构成条带状(图3),且在黑云角闪斜长片麻岩(中色体)中浅色-暗色矿物条带呈细脉状交互,二者无明显界线,指示没有明显的熔体迁移聚集或注入,这与原地深熔作用形成的混合岩特征一致。在主量元素 Harker 图解中(图6),斜长角闪岩-黑云角闪斜长片麻岩-长英质浅色体中 SiO_2 含量与 TiO_2 、 FeO 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 Na_2O 、 K_2O 含量呈较好的线性相关,反映其混合岩化过程中没有明显外来物质加入,岩石的总成分基本保持不变。

封闭体系下的深熔作用,浅色体与变质岩部分的岩石化学应是互补的(任留东等, 2011; 任留东, 2021)。在木兰头混合片麻岩中,长英质浅色体稀土元素略低于暗色体(斜长角闪岩),浅色体与暗色体呈互补关系,加权平均近似与中色体(黑云角闪斜长片麻岩)成分相当(图7a)。在稀土元素球粒陨石标准化分配曲线图中,长英质浅色体呈现Eu正异常,而暗色体中Eu则相应亏损,表明深熔作用使得熔体富集Eu,结晶分离时,Eu进入长石中,使得以长石为主要矿物的浅色体呈现Eu正异常,残余熔体会出现Eu负异常。值得注意的是,木兰头混合片麻岩中浅色体、中色体、暗色体具有相似的微量元素分布特征,几乎亏损所有高场强元素,富集大离子亲石元素(图7b)。高场强元素在流体作用下基本倾向于保留于原岩中,其一致性表明混合片麻岩应该继承了原岩的高场强元素特征,表明其具有同源性,元素分异不明显反映其混合岩化程度较低。综上所述,木兰头混合片麻岩是经深熔作用形成的。

Mehnert(1968)在原地熔融混合岩中区分出古成体和新成体,古成体指混合岩中未受改变或稍受改造的母岩或围岩,即中色体(混合岩中片麻岩);新成体包括浅色体(熔体)和暗色体(残留体),因此混合岩中古成体(片麻岩)更能反映混合岩的来源,此次研究对混合片麻岩中中色体(黑云角闪斜长片麻岩)进行原岩恢复。在尼格里参数 $(\text{al}+\text{fm})-(\text{c}+\text{alk})-\text{Si}$ 图解中(图8a),样品均落入火山岩中,为正片麻岩;在A-C-FM图解中(图8b),大部分样品落入基性火山岩区,仅一个样品落入中性火山岩区,由此推断中色体(黑云角闪斜长片麻岩)原岩为中-基性火山岩。为了进一步恢复原岩的岩石类型,分别采用非活动性元素和活动性元素恢复中色体(黑云角闪斜长片麻岩)原岩。在Nb/Y-Zr/TiO₂图解中(图8c),样品落入亚碱性玄武岩、安山岩和玄武岩与安山岩重叠区域;在TAS图解中(图8d),样品落入安山岩、玄武岩等区域,以上两个图解所得结果基本一致,反映活动性元素在变质作用过程中没有发生迁移,虽然样品点较分散,但整体上都是中-酸性火山岩。在TAS图解中(图8d),大部分样品落入亚碱性区,仅一个样品落入碱性亚碱性分界线附近;在AFM图解中(图8e),所有样品落入钙碱性系列区域。结合中色体(黑

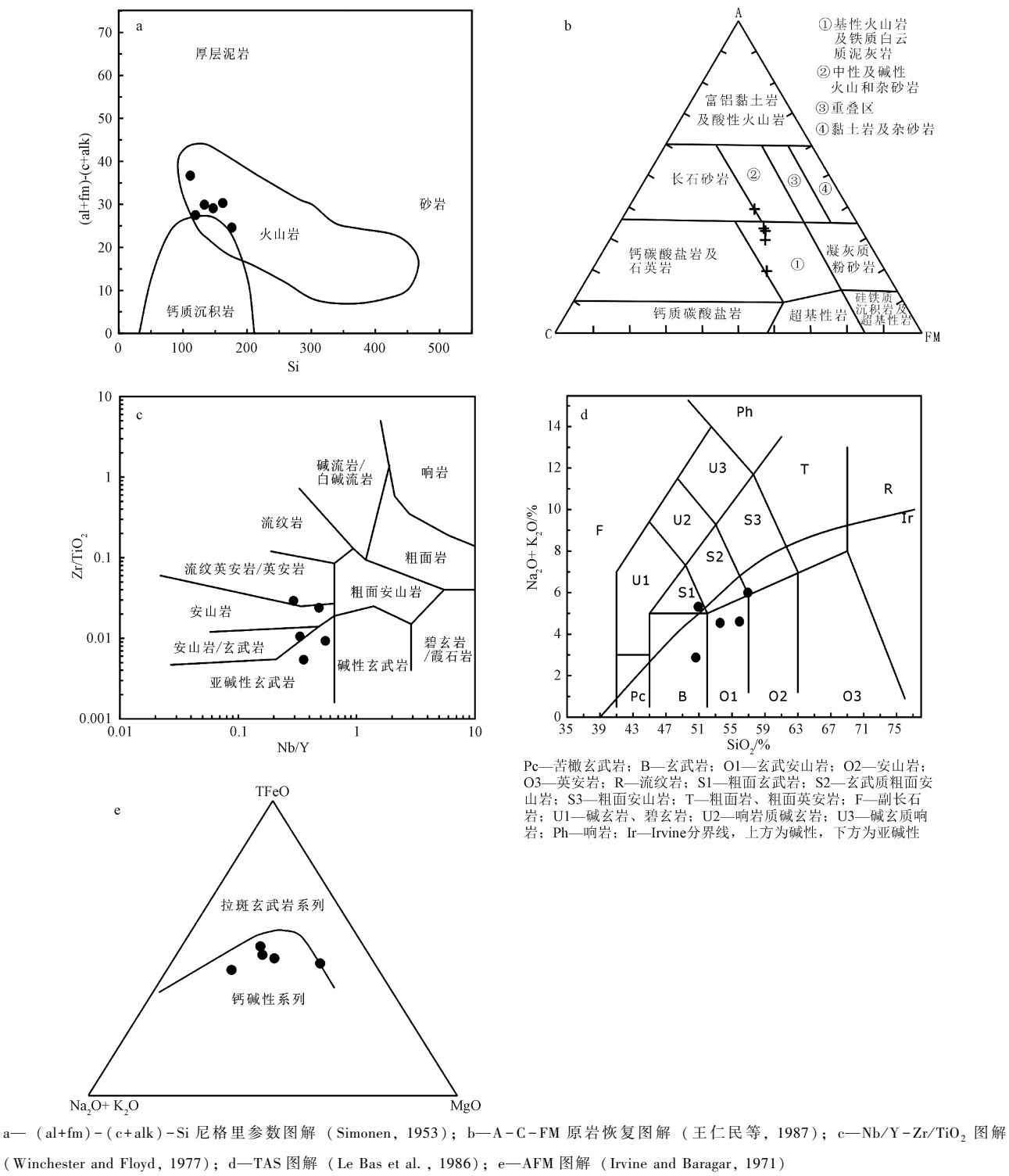


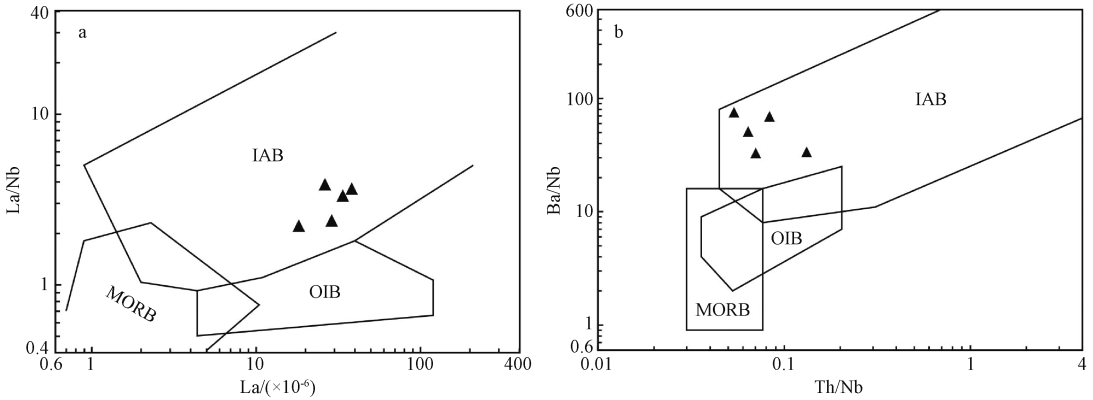
图 8 中色体 (黑云角闪斜长片麻岩) 的地球化学判别图解

Fig. 8 Geochemical discrimination diagrams for mesosome (biotite hornblende plagiogneiss)

(a) $(al+fm)-(c+alk)-Si$ diagram (Schema from Simonen, 1953); (b) A-C-FM diagram (Schema from Wang et al., 1987); (c) $Nb/Y-Zr/TiO_2$ diagram (Schema from Winchester and Floyd, 1977); (d) TAS diagram (Schema from Le Bas et al., 1986); (e) AFM diagram (Schema from Irvine and Baragar, 1971)

云角闪斜长片麻岩) 矿物成分中含少量石英, 主要推断其原岩为钙碱性中—基性火山岩。主要为斜长石和角闪石, 全岩 SiO_2 含量低等特点, 钙碱性火山岩通常产于与俯冲有关的岛弧和

活动大陆边缘环境。黑云角闪斜长片麻岩（中色体）轻稀土（LREE）相对富集，重稀土（HREE）亏损，稀土配分模式近平坦（图 5a），与岛弧火山岩稀土配分模式相似；微量元素原始地幔标准化的蛛网图中（图 5b），富集大离子亲石元素 K、Rb、Ba，高场强元素 Th、U、Nb、Ta、Zr 均强烈亏损，尤其是 Nb、Ta 明显负异常和微弱 Ti 负异常是岛弧火山岩的显著标志（李伍平和路凤香，1999；肖玲玲和蒋宗胜，2010）。



MORB—洋中脊玄武岩；OIB—洋岛玄武岩；IAB—岛弧玄武岩

图 9 中色体（黑云角闪斜长片麻岩）的 La/Nb-La 和 Ba/Nb-Th/Nb 图解（李曙光，1993）

Fig. 9 La/Nb-La, Ba/Nb-Th/Nb diagrams for mesosome (biotite hornblende plagiogneiss) (Li, 1993)

MORB—mid-ocean ridge basalt; OIB—ocean-island basalt; IAB—arc basalt

6.3 大地构造意义

海南岛地质演化史上，晚古生代被认为是古特提斯构造域演化阶段（海南省地质调查院，2017）。因缺少蛇绿岩记录，海南岛上是否存在缝合带目前尚有争议。印支板块至华南板块之间不同学者提出了三条缝合带，哪一条缝合带延伸到海南岛也都存在争论（图 1）。李献华等（2000）在昌江-琼海断裂附近的邦溪-晨星地区发现晚古生代角闪岩相变基性岩，认为可能是华南和印支地块之间的东古特提斯洋残余，其原岩形成年龄为 333 Ma 左右；He et al.（2018）对邦溪和晨星地区变基性岩进行年代学研究，获得晨星地区变基性岩 330 Ma 左右的原岩年龄，并且认为其形成时代可同金沙江、哀牢山和马江缝合带的基性岩对比。夏蒙蒙等（2019）等在海南岛潮滩鼻发现榴辉岩，原岩形成年龄为 364 Ma 左右（Xia et al., 2022），也认为是东古特提斯洋残余。Zhang et al.（2014）对马江缝合带中蛇绿岩进行岩石学和 SIMS 锆石 U-Pb 年龄研究，认为马江蛇绿岩代表了东古特提斯洋中脊上的洋壳，其形成年龄为 340 Ma 左

右。Zhang et al.（2021）对马江缝合带上一组镁铁质和斜长花岗岩进行地球化学和年代学研究，其中获得斜长角闪岩形成年龄 370 Ma 左右，并具有 N-MORB 的地球化学特征，认为马江缝合带在空间上连接了中国西南部的金沙江-哀牢山缝合带和海南南海岛的晨星-邦溪缝合带。以上年龄数据与东古特提斯洋残余时间基本一致，说明马江缝合带可能东延到海南岛（图 10）。

文章研究结果显示，海南岛木兰头混合片麻岩原岩为中基性火山岩，形成于 275.7±2.2 Ma，地球化学特点则进一步暗示其可能形成于与俯冲有关的活动大陆边缘岛弧构造环境。然而在马江缝合带也存在相同时代具岛弧地球化学特征的中基性火成岩（276 Ma, 271 Ma, Liu et al., 2012; 270 Ma, Zhang et al., 2021），并认为可能是古特提斯洋分支洋之一的马江洋向南西俯冲到印支地块之下的产物。以上说明以木兰头为代表的海南岛东北部存在形成时代和构造环境可与马江缝合带相类比的构造-岩浆作用，可能均是东古特提斯洋俯冲引起岛弧型岩浆作用的产物，进一步支持

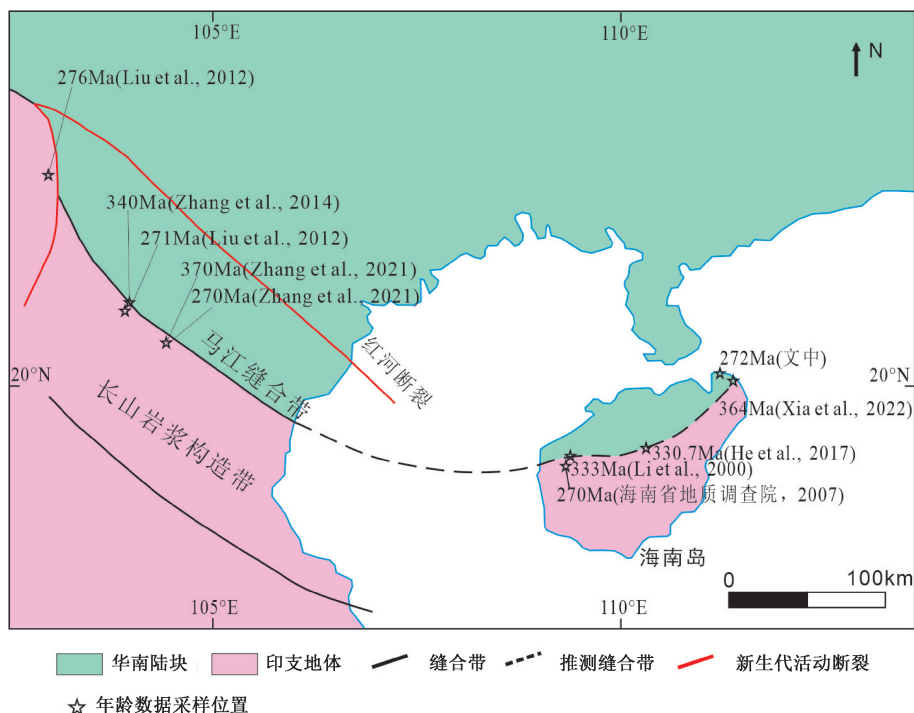


图 10 马江缝合带东延位置示意图

Fig. 10 Position diagram of Song Ma suture

马江缝合带东延到海南岛。

然而马江缝合带东延到海南岛的位置和走向仍需进一步约束。文章对海南岛内古特提斯洋残余的发现地和活动大陆边缘的岛弧型岩浆岩出露地点进行了收集,通过归纳初步推测马江缝合带向东延伸可能经过邦溪、晨星,然后转向东北经过木兰头一带(图 10)。李孙雄等(2006)总结了整个海南岛古生代地层走向和花岗岩斑晶定向方向,提出由北西→近东西→北向的弧形构造带,并认为该弧形构造带可能与古特提斯洋闭合有关。需要指出的是,该弧状构造带与文中推测的缝合带走向一致,因而很好地支持了这一推测。

He et al. (2020) 认为海南岛二叠纪—三叠纪花岗岩类的时空格局与金沙江—哀牢山—马江构造带上的长山岩浆岩构造带一致,与古特提斯构造有关,那么海南岛二叠纪—三叠纪岩浆作用是由东古特提斯洋俯冲到华南和印支地块碰撞引起的。陈新跃等(2011)对海南岛五指山地区花岗片麻岩进行研究,认为其形成于 269~263 Ma 印支与华南块体的碰撞拼合作用,代表了中二叠世一次重要的地质构造热事件。文中研究的木兰头混合片麻岩深熔作用变质时间(261 Ma)与海南五指山地区花岗片麻岩的形成年龄相近,对应着这一重要地质构造热事件的中深变质作用记录,表明混合片麻岩深熔作用与印支与

华南块体的碰撞作用有关。

根据学者(刘晓春等, 2021; Xia et al., 2022)对潮滩鼻榴辉岩的研究及文中对木兰头混合片麻岩的研究,认为海南岛东北部潮滩鼻榴辉岩和木兰头混合片麻岩记录了古特提斯洋打开—俯冲关闭、华南和印支地块碰撞等构造演化的重要信息: 364 Ma 潮滩鼻榴辉岩原岩形成,表明这一时期古特提斯洋的存在;随后古特提斯洋开始俯冲, 297 Ma 潮滩鼻地区发生变质作用,形成榴辉岩;随着俯冲作用的持续, 276 Ma 岛弧型岩浆作用导致木兰头混合片麻岩的原岩形成;随之古特提斯洋关闭,华南和印支地块碰撞拼合在一起,地壳不断加厚,在强大的碰撞造山作用下, 261 Ma 木兰头地区发生深熔变质作用,形成混合片麻岩;碰撞后伸展环境形成, 246 Ma 大量伟晶岩脉侵入,混合片麻岩再次经历变质作用。

综上所述,木兰头地区混合片麻岩是古特提斯洋俯冲关闭、华南和印支地块碰撞等地质事件的产物,记录了海南岛东北部早二叠世—早三叠世构造演化的重要信息。

7 结论

(1) 木兰头地区混合片麻岩由浅色体(长英

质脉)、中色体(黑云角闪斜长片麻岩)、暗色体(斜长角闪岩)交互呈条带状构成,原岩为中基性火山岩,是经深熔作用形成的。

(2) 混合片麻岩中锆石获得 276 Ma、261 Ma、248 Ma 三组年龄,分别代表原岩形成年龄、深熔作用变质年龄和后期变质年龄,对应古特提斯洋俯冲、印支与华南块体的碰撞、碰撞后伸展的构造环境。

(3) 混合片麻岩是古特提斯洋俯冲关闭、华南和印支地块碰撞等地质事件的产物,该认识为马江缝合带向东延伸到海南岛及在海南岛的走向提供了新的思路。

致谢:感谢海南省地质调查院区调队李孙雄、官军、袁海军、林义华、梁定勇、袁勤敏等同志在野外调查过程中的指导与帮助;感谢杜瑾雪老师审阅并提出修改意见;感谢两位审稿专家和编辑百忙之中审阅全文并提出建设性宝贵意见。

References

- CAI J X, ZHANG K J, 2009. A new model for the Indochina and South China collision during the Late Permian to the Middle Triassic [J]. *Tectonophysics*, 467 (1-4): 35-43.
- 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 [J]. *Geochimica*, 40 (5): 454-463. (in Chinese with English abstract)
- FAURE M, LIN W, CHU Y, et al., 2016. Triassic tectonics of the southern margin of the South China Block [J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 348 (1): 5-14.
- Hainan Geological Survey Institute, 2017. Regional geology of China · Hainan chronicle [M]. Beijing: Geology Press. (in Chinese)
- HE H Y, WANG Y J, ZHANG Y H, et al., 2018. Fingerprints of the Paleotethyan back-arc basin in Central Hainan, South China: geochronological and geochemical constraints on the Carboniferous metabasites [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 107 (2): 553-570.
- HE H Y, WANG Y J, CAWOOD P A, et al., 2020. Permo-Triassic granitoids, Hainan Island, link to Paleotethyan not Paleopacific tectonics [J]. *GSA Bulletin*, 132 (9-10): 2067-2083.
- HU Z L, WANG Y, ZHAO X M, et al., 2019. The identification of Jurassic stratigraphy in southern Hainan Island: Evidence from detrital zircon U-Pb ages and Hf isotopic compositions [J]. *Geological Bulletin of China*, 38 (10): 1740-1757 (in Chinese with English abstract).
- IRVINE T N, BARAGAR W R A, 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8 (5): 523-548.
- LE BAS M J, LE MAITRE R W, STRECKEISEN A, et al., 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram [J]. *Journal of Petrology*, 27 (3): 745-750.
- LI S G, 1993. Ba-Nb-Th-La diagrams used to identify tectonic environments of ophiolite [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 9 (2): 146-157. (in Chinese with English abstract)
- LI S X, FAN Y, MO W M, et al., 2006. Characteristics of arc structure zones in the Paleozoic Era of Hainan Island, and its geological implications [J]. *Mineral Resources and Geology*, 20 (3): 232-236. (in Chinese with English abstract)
- LI S X, GAO L Z, CHEN M L, et al., 2013. Zircon SHRIMP age constraints of the Mesoproterozoic migmatization age in Hainan Island [J]. *Journal of Stratigraphy*, 37 (4): 635-636. (in Chinese)
- LI W P, LU F X, 1999. New progress of the study of geologic setting for calc alkline volcanic rocks [J]. *Geological Science and Technology Information*, 18 (2): 15-18. (in Chinese with English abstract)
- LI X H, ZHOU H W, DING S J, et al., 2000. Sm-Nd isotopic constraints on the age of the Bangxi-Chenxing ophiolite in Hainan Island: implications for the tectonic evolution of eastern Paleo-Tethys [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 16 (3): 425-432. (in Chinese with English abstract)
- LIU J L, TRAN M D, TANG Y, et al., 2012. Permo-Triassic granitoids in the northern part of the Truong Son belt, NW Vietnam: Geochronology, geochemistry and tectonic implications [J]. *Gondwana Research*, 22 (2): 628-644.
- LIU X C, CHEN Y, WANG W, et al., 2021. Carboniferous eclogite and garnet-omphacite granulite from northeastern Hainan Island, South China: Implications for the evolution of the eastern Palaeo-Tethys [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 39 (1): 101-132.
- LIU X C, HU J, CHEN L Y, et al., 2021. Oceanic-type high-temperature eclogites from Hainan Island, South China: General characteristics and unsolved problems [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37 (1): 143-161. (in Chinese with English abstract)
- LIU X C, HU J, CHEN L Y, et al., 2022. The Mulantou metamorphic complex from northeastern Hainan Island, South China: compositions, ages and tectonic implications [J]. *Acta Geologica Sinica*, 96 (9): 3051-3083. (in Chinese with English abstract)
- LIU Y S, GAO S, HU Z C, et al., 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths [J]. *Journal of Petrology*, 51 (1-2): 537-571.
- LIU Y S, HU Z C, GAO S, et al., 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard [J]. *Chemical Geology*, 257 (1-2): 34-43.
- LONG W G, ZHOU D, KE X Z, et al., 2022. Early Paleozoic tectonics of Hainan Island: Constraints from the detrital zircons U-Pb geochronology on Early Silurian sandstones [J]. *South China Geology*, 38 (1): 79-93. (in Chinese with English abstract)
- MALUSKI H, LEPVRIER C, LEYRELOUP A, et al., 2005. ⁴⁰Ar-³⁹Ar geochronology of the charnockites and granulites of the Kan Nack complex, Kon Tum Massif, Vietnam [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 25 (4): 653-677.

- MEHNERT K R, 1968. Migmatites and the origin of granitic rocks [M]. Amsterdam: Elsevier Publishing Company.
- METCALFE I, SHERGOLD J H, LI Z X, 1993. IGCP 321 Gondwana dispersion and Asian accretion: fieldwork on Hainan Island [J]. Episodes, 16 (4): 443-447.
- METCALFE I, 1996. Gondwanaland dispersion, Asian accretion and evolution of eastern Tethys [J]. Australian Journal of Earth Sciences, 43 (6): 605-623.
- PAN G T, XIAO Q H, 2015. Tectonic Map of China (1:2500000) [M]. Beijing: Geology Press. (in Chinese)
- REN L D, GENG Y S, DU L L, et al., 2011. Anatexis and migmatization of the Fuping Complex, North China Craton [J]. Acta Petrologica Sinica, 27 (4): 1056-1066 (in Chinese with English abstract).
- REN L D, WANG Y B, YANG C H, et al., 2010. Metamorphism, migmatization and granites of the Mashan Complex in Heilongjiang Province, Northeast China [J]. Acta Petrologica Sinica, 26 (7): 2005-2014. (in Chinese with English abstract)
- REN L D, 2021. Anatexis and enrichment mechanism of the Fe-Ti oxide minerals in the quartzofeldspathic gneisses from the Larsemann Hills, East Antarctica. Journal of Geomechanics, 27 (5): 736-746. (in Chinese with English abstract)
- SAWYER E W, 1999. Criteria for the recognition of partial melting [J]. Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy, 24 (3): 269-279.
- SIMONEN A, 1953. Stratigraphy and sedimentation of the Svecofennidic, early Archean supracrustal rocks in southwestern Finland [J]. Bulletin of the Geological Society of Finland, 160: 1-64.
- SUN S S, MCDOUGALL W F, 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition of the earth and mantle evolution [J]. Earth and Planetary Science Letters, 35: 429-448.
- WANG R M, HE G P, CHEN Z Z, et al., 1987. Graphical discriminance of the protolith of metamorphic rocks [M]. Beijing: Geology Press. (in Chinese)
- WANG X S, JIANG T, GAO J, et al., 2019. Contrasting migmatites in the southern Chinese Central Tianshan: Petrogenesis and geological implications [J]. Acta Petrologica Sinica, 35 (10): 3233-3261. (in Chinese with English abstract)
- WANG Y J, QIAN X, CAWOOD P A, et al., 2018. Closure of the East Paleotethyan Ocean and amalgamation of the Eastern Cimmerian and Southeast Asia continental fragments [J]. Earth-Science Reviews, 186: 195-230.
- WEN S N, LIANG X Q, FAN W M, et al., 2013. Zircon U-Pb ages, Hf isotopic composition of Zhizhong granitic intrusion in Ledong area of Hainan Island and their tectonic implications [J]. Geotectonica et Metallogenia, 37 (2): 294-307. (in Chinese with English abstract)
- WINCHESTER J A, FLOYD P A, 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements [J]. Chemical Geology, 20: 325-343.
- WU F Y, WAN B, ZHAO L, et al., 2020. Tethyan geodynamics [J]. Acta Petrologica Sinica, 36 (6): 1627-1674. (in Chinese with English abstract)
- XIA B D, REN Z P, 1979. Stratigraphy and sedimentary formation in Shilu and surrounded area in Hainan Island [J]. Journal of Nanjing University (1): 43-55. (in Chinese with English abstract)
- XIA M M, HU J, HU D G, et al., 2019. The discovery of eclogite-high-pressure granulite association from Hainan Island, South China [J]. Geological Bulletin of China, 38 (10): 1591-1594. (in Chinese with English abstract)
- XIA M M, LIU X C, CHEN Y, et al., 2022. New U-Pb zircon and geochemical constraints on Late Devonian Back-arc basin origin of eclogite protoliths from northeastern Hainan Island, South China [J]. Lithos, 418-419: 106677.
- XIAO L L, JIANG Z S, 2010. Geochemistry and tectonic environment of Amphibolites of the Zanhuan metamorphic complex [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 29 (4): 339-347. (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 [J]. Island Arc, 16 (4): 575-597.
- XU Y J, CAWOOD P A, ZHANG H C, et al., 2020. The Mesoproterozoic Baoban Complex, South China: A missing fragment of western Laurentian lithosphere [J]. GSA Bulletin, 132 (7-8): 1404-1418.
- YANG S F, YU Z Y, GUO L Z, et al., 1989. The division and palaeomagnetism of the Hainan Island and plate tectonic significance [J]. Journal of Nanjing University (Earth Sciences Edition), 1 (1-2): 38-46. (in Chinese)
- YAO W H, LI Z X, LI W X, et al., 2017. Proterozoic tectonics of Hainan Island in supercontinent cycles: New insights from geochronological and isotopic results [J]. Precambrian Research, 290: 86-100.
- ZHANG L M, WANG Y J, QIAN X, et al., 2018. Petrogenesis of Mesoproterozoic mafic rocks in Hainan (South China) and its implication on the southwest Hainan-Laurentia-Australia connection [J]. Precambrian Research, 313: 119-133.
- ZHANG R Y, LO C H, LI X H, et al., 2014. U-Pb dating and tectonic implication of ophiolite and metabasite from the Song Ma suture zone, northern Vietnam [J]. American Journal of Science, 314 (2): 649-678.
- ZHANG Y Z, YANG X, WANG Y J, et al., 2021. Rifting and subduction records of the Paleo-Tethys in North Laos: Constraints from Late Paleozoic mafic and plagiogranitic magmatism along the Song Ma tectonic zone [J]. GSA Bulletin, 133 (1-2): 212-232.

附中文参考文献

- 陈新跃, 王岳军, 范蔚茗, 等, 2011. 海南五指山地区花岗岩片麻岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学特征及其地质意义 [J]. 地球化学, 40 (5): 454-463.
- 海南省地质调查院, 2017. 中国区域地质志·海南志 [M]. 北京: 地质出版社.

胡在龙, 王勇, 赵小明, 等, 2019. 海南岛南部侏罗系的发现: 来自碎屑锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素的证据 [J]. 地质通报, 38 (10): 1740-1757.

李曙光, 1993. 蛇绿岩生成构造环境的 Ba-Th-Nb-La 判别图 [J]. 岩石学报, 9 (2): 146-157.

李孙雄, 范渊, 莫位明, 等, 2006. 海南岛古生代弧状构造带的特征及其地质意义 [J]. 矿产与地质, 20 (3): 232-236.

李孙雄, 高林志, 陈沐龙, 等, 2013. 海南岛中元古代混合岩化作用时代的锆石 SHRIMP 年龄制约 [J]. 地层学杂志, 37 (4): 635-636.

李伍平, 路凤香, 1999. 钙碱性火山岩构造背景的研究进展 [J]. 地质科技情报, 18 (2): 16-19.

李献华, 周汉文, 丁式江, 等, 2000. 海南岛邦溪-晨星蛇绿岩片的时代及其构造意义: Sm-Nd 同位素制约 [J]. 岩石学报, 16 (3): 425-432.

刘晓春, 胡娟, 陈龙耀, 等, 2021. 海南洋壳型高温榴辉岩: 基本特征及待解问题 [J]. 岩石学报, 37 (1): 143-161.

刘晓春, 胡娟, 陈龙耀, 等, 2022. 海南岛东北部木兰头变质杂岩的组成、时代及其区域大地构造意义 [J]. 地质学报, 96 (9): 3051-3083.

龙文国, 周岱, 柯贤忠, 等, 2022. 海南岛早古生代大地构造格局: 来自志留纪早期碎屑锆石年代学的约束 [J]. 华南地质, 38 (1): 79-93.

潘桂堂, 肖庆辉, 2015. 中国大地构造图 (1:2500000) [M]. 北京: 地质出版社.

任留东, 耿元生, 杜利林, 等, 2011. 华北克拉通阜平杂岩的深熔和混合岩化作用 [J]. 岩石学报, 27 (4): 1056-1066.

任留东, 王彦斌, 杨崇辉, 等, 2010. 麻山杂岩的变质-混合岩化作用和花岗质岩浆活动 [J]. 岩石学报, 26 (7): 2005-2014.

任留东, 2021. 东南极拉斯曼丘陵长英质片麻岩的深熔作用与铁钛氧化物的聚集机制. 地质力学学报, 27 (5): 736-746.

王仁民, 贺高品, 陈珍珍, 等, 1987. 变质岩原岩图解判别法 [M]. 北京: 地质出版社.

王信水, 江拓, 高俊, 等, 2019. 中天山地块南缘两类混合岩的成因及其地质意义 [J]. 岩石学报, 35 (10): 3233-3261.

温淑女, 梁新权, 范蔚茗, 等, 2013. 海南岛乐东地区志仲岩体锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素研究及其构造意义 [J]. 大地构造与成矿学, 37 (2): 294-307.

吴福元, 万博, 赵亮, 等, 2020. 特提斯地球动力学 [J]. 岩石学报, 36 (6): 1627-1674.

夏邦栋, 任震鹏, 1979. 海南岛石碌及其外围地区的地层和沉积建造 [J]. 南京大学学报 (地质专刊) (1): 43-55.

夏蒙蒙, 胡娟, 胡道功, 等, 2019. 海南岛发现榴辉岩-高压麻粒岩组合 [J]. 地质通报, 38 (10): 1591-1594.

肖玲玲, 蒋宗胜, 2010. 赞皇斜长角闪片麻岩地球化学特征及其构造环境探讨 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 29 (4): 339-347.

杨树锋, 虞子治, 郭令智, 等, 1989. 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), 1 (1-2): 38-36.