

海南岛抱板群内顺层侵位深熔花岗岩锆石 U-Pb定年及其构造意义*

丁式江^{①**} 胡健民^② 宋 彪^③ 陈沐龙^① 谢盛周^① 范 渊^①

(① 海南省地质调查院, 海口 570206; ② 地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; ③ 北京 SHRIMP 离子探针中心, 北京 100037)

摘要 原划前寒武纪抱板群混合岩化长英质片麻岩的岩相学、地球化学特征显示为顺层侵位于抱板群变质地层内的深熔花岗岩. 采用北京离子探针中心 SHRIMP II 对深熔花岗岩的锆石进行 U-Pb 定年, 获得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 368 ± 3.5 Ma(信度 95%, MSDW=1.23), 这个年龄与抱板群变质成因锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄(362.9 ± 6.1 Ma, 95%信度, MSDW=2.04)非常一致, 表明泥盆纪晚期海南岛曾经历过一次强烈的构造热事件, 这也是海南岛第一次发现的确凿的泥盆纪地质记录. 这次热事件很可能是冈瓦纳大陆在泥盆纪开始的裂解过程受来自深部的热动力影响的结果.

关键词 海南岛 泥盆纪 深熔花岗岩 锆石 SHRIMP 法 U-Pb 定年

1 地质构造背景

海南岛位于欧亚板块、印度-澳大利亚板块和太平洋板块的交接部位, 其构造归属、构造划分与演化直接牵扯到对亚洲东部大陆增生、大陆边缘演化及南海形成等重要问题的认识. 九所-陵水断裂带将海南岛划分为崖县和琼中南北两个古生代地块(图 1), 古地磁学及地层、岩石等方面显示它们在白垩纪中期才聚合、拼贴在一起^[1,2]. 北部的琼中地块曾在晚古生代期间沿昌江-琼海断裂沿线拉开成一条近东西向的裂谷^[3]. 海南岛洋中脊型变基性岩发现后, 人们认为这个裂谷带后来被持续拉伸成洋盆^[4,5], 洋岛型基性岩

则代表古特提斯东部大洋残片^[6]. 早中生代时, 大洋闭合, 两侧地块碰撞形成石碌构造混杂堆积^[7]. 也有人认为海南岛被北东向的白沙断层划分为两个地体^[8], 二叠纪之前的海南岛是在泥盆纪晚期与整个华南地块一起从Gondwana大陆北缘分裂出来, 然后向北漂移并拼贴到东南亚大陆边缘^[8,9]. 因此, 海南岛曾存在晚古生代洋壳, 即古特提斯洋曾经穿过海南岛, 相邻陆块在早中生代拼贴, 致使洋壳消失, 也可能拼贴时代再早一些, 与 250 Ma左右形成的Pangea超大陆时代一致^[10].

然而, 尽管华南大陆泥盆系分布非常广泛, 桂北

2004-02-09 收稿, 2005-07-02 收修改稿

* 国土资源部百名杰出青年基金项目、国家自然科学基金项目(批准号: 40272097)资助

** E-mail: dingsj@public.hk.hi.cn

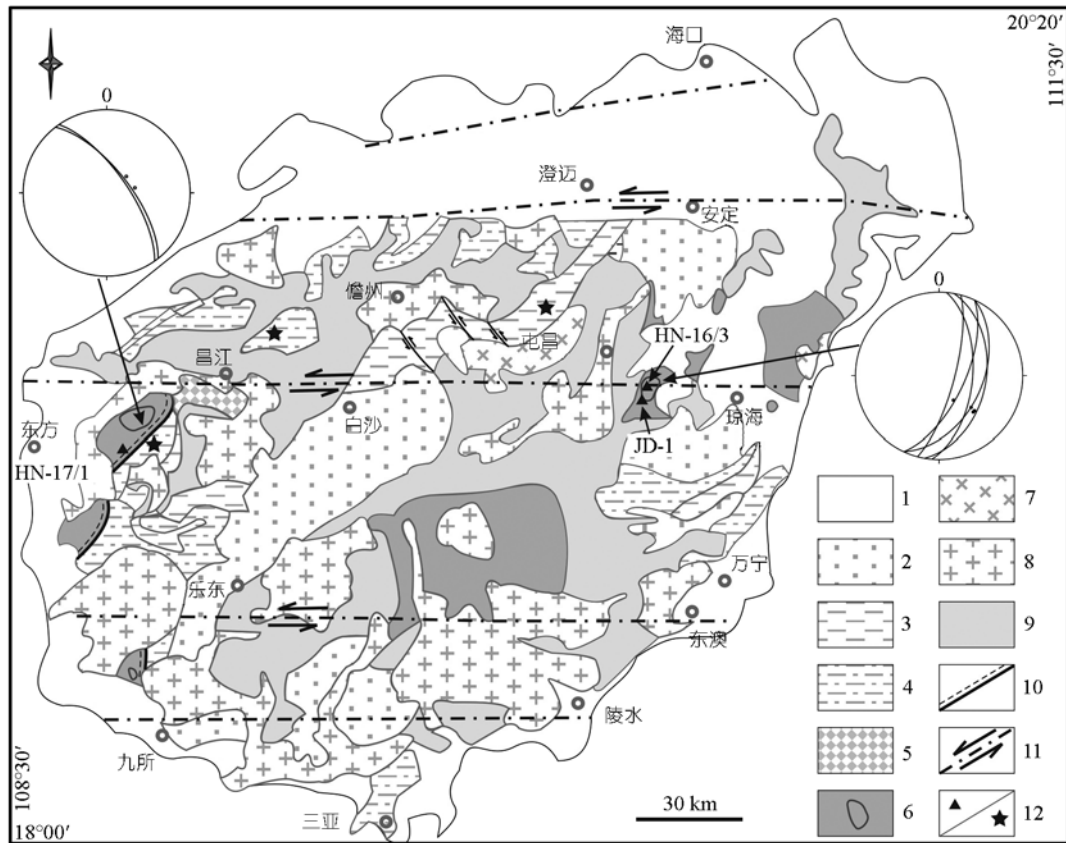


图 1 海南岛地质构造略图

1. 新生界, 2. 白垩系, 3. 石炭-二叠系, 4. 下古生界, 5. 新元古界石砾群, 6. 前寒武纪抱板群, 圈内为深熔花岗岩, 7. 侏罗纪花岗岩, 8. 三叠纪花岗岩, 9. 二叠纪花岗岩, 10. 韧性剪切带, 11. 走滑断层, 12. 锆石采样位置/基性火山岩露头点, 图中所附赤平投影图为深熔花岗岩中发育的韧性剪切变形面理和拉伸线理投影(下半球投影)

地区泥盆系厚度达 5800 m, 钦州一带也达 2000 m 以上^[11], 但海南岛却至今没有发现任何泥盆纪沉积记录, 也没有发现泥盆纪岩浆活动和变质作用等热事件的证据^[12], 海南岛晚古生代洋盆在石炭纪开始拉开前处于什么构造状态一直没有解决, 泥盆纪时海南岛究竟发生了什么? 至今仍然是个谜. 最近作者们在海南岛 1:25 万琼海幅地质调查过程中发现, 原划前武纪抱板群戈枕村组中的混合岩、混合岩化长英质片麻岩等有一部分实为顺层侵位的深熔花岗岩, 锆石 SHRIMP U-Pb 测年表明其形成于泥盆纪晚期, 同时获得的抱板群黑云母二长片麻岩变质锆石年龄也显示了泥盆纪晚期海南岛曾发生过一次强烈的热事件. 这个研究成果对于认识海南岛的构造演化有重要意义.

2 深熔花岗岩的地质与地球化学特征

2.1 花岗岩围岩及侵位特征

深熔花岗岩体主要侵位于前寒武纪抱板群戈枕村组和峨文岭组, 在琼海东北侧出露规模较大^[13](图 1). 抱板群上部峨文岭组主要为二云石英片岩、长石英岩等组成, 原岩主要为沉积岩, 具低角闪岩相变质矿物组合: 黑云母+白云母+红柱石(+十字石)+铁铝榴石+石英±斜长石, 黑云母+白云母+矽线石+石英±斜长石, 斜长石+角闪石+石英+绿帘石±黑云母; 下部戈枕村组主要岩性为长英质片麻岩、变粒岩及角闪斜长片麻岩组成, 原岩以火成岩为主, 普遍经历过强烈的混合岩化, 具高角闪岩相变质矿物组合: 黑云母+钙质中长石+钾长石+石英+铁铝榴石±角闪石, 角闪

石+中-拉长石+透辉石+石英^[14,15]. 峨文岭组变质温压环境为: $T = 550 \sim 650^{\circ}\text{C}$, $P = 3 \times 10^8 \sim 5 \times 10^8$, 戈枕村组变质温压环境为 $T = 580 \sim 650^{\circ}\text{C}$, $P = 5.44 \times 10^8 \sim 6.35 \times 10^8$ ^[14].

野外地质调查表明, 深熔花岗岩体主体沿戈枕村组、峨文岭组变质地层的片理、片麻理方向侵入, 因此, 总体上与戈枕村组和峨文岭组的地层界线平行分布, 并在后期变形过程中与变质地层发生同步褶皱(图 2). 岩体普遍发生较强的韧性变形, 长石斑晶明显定向, 构成一组拉伸线理(图 3(a)). 韧性变形成长条状的石英与片柱状角闪石、斜长石及黑云母等定向分布构成岩石的糜棱岩化片理或片麻理, 并绕钾长石斑晶形成眼球状构造. 石英组构分析显示明显的简单剪切特征, 采自深熔花岗岩围岩斜长角

闪岩的角闪石也呈强烈定向(图 3(b), (c)). 因此, 海南深熔花岗岩很可能是沿着一组低角度韧性剪切带发育的同构造顺层侵位层状岩体.

抱板群的时代一般被认为是早元古代, 后来由于在一些深熔花岗岩及其中暗色包体获得了一些晚太古宙的Sm-Nd模式年龄数据和锆石上交点年龄数据, 一些研究者曾建议至少戈枕村组的一部分应为晚太古宙^[16-19]. 由于原文献中均没有发表测试数据, 作为一套变质岩石组合的年龄依据不太合适. 作者在海南岛西部二甲一带的一个侵入到抱板群中的片麻状黑云母花岗闪长岩(图 1 样品HN-17)中获得了 $1422 \pm 16 \text{ Ma}$ (MSDW=1.27)的锆石SHRIMP年龄, 并在深熔花岗岩的锆石的核获得了 2700 Ma 年龄数据, 所以本文倾向于抱板群时代至少应当是早元古代.

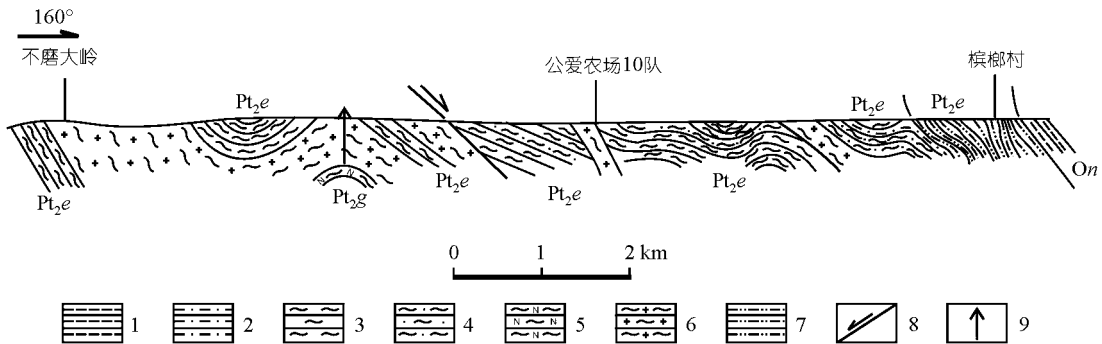


图 2 海南岛泥盆纪顺层的深熔花岗岩与围岩抱板群变质地层同步褶皱

据文献[15]修改. 1. 泥质板岩, 2. 石英岩, 3. 云母片岩, 4. 云母石英片岩, 5. 黑云斜长片麻岩, 6. 深熔花岗岩, 7. 长英质糜棱岩, 8. 断层, 9. 钻孔位置

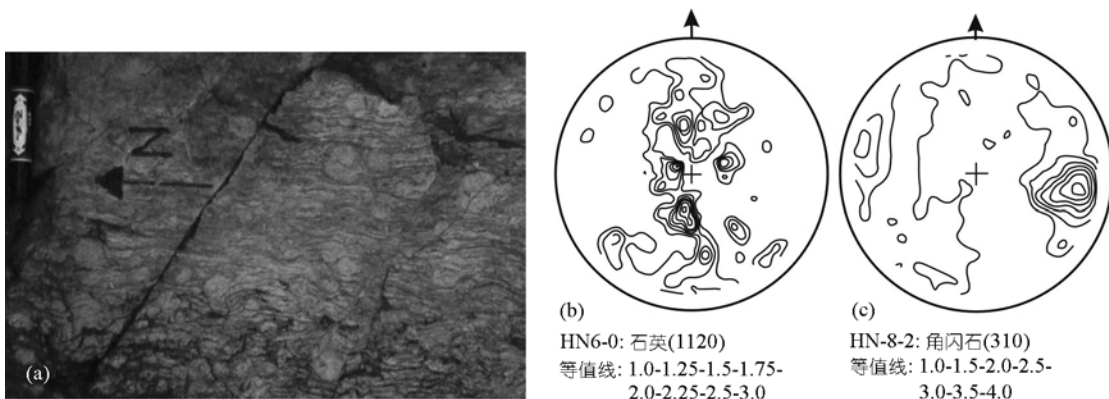


图 3 海南岛泥盆纪顺层侵位的深熔花岗岩普遍发生过强烈的韧性变形

(a) 糜棱岩化巨斑状深熔花岗岩; (b) 深熔花岗岩石英(1120)结构; (c) 围岩斜长角闪片麻岩角闪石(310)结构

2.2 花岗岩岩石特征

深熔花岗岩岩石为灰白色, 条带状构造, 一般具约 10%~20% 的钾长石巨晶, 粒径大多为 $0.6 \times 0.3 \sim 1.2 \times 0.8 \text{ cm}^2$, 野外所见最大的钾长石巨晶可达 5~6 cm 长. 主要矿物成分为钾长石(30%~55%)、斜长石(25%~50%)、石英(25%~35%)、黑云母(2%~5%)、白云母(2%)等, 有时见含有不到 10% 的角闪石及透辉石残晶. 粒状矿物与片状矿物分别聚集形成明显的成分条带, 岩石中各种交代结构发育. 岛内类似岩石都具有不同程度的糜棱岩化, 石英及长石都可见动态重结晶导致的细粒化现象, 并见长石双晶弯曲现象.

2.3 花岗岩地球化学特征

表 1 和 2 分别为花岗岩主元素和微量元素、稀土元素分析结果. 岩石主要氧化物平均含量为, SiO_2 : 72.24%, TiO_2 : 0.33%, Al_2O_3 : 13.93%, FeO : 1.15%, Fe_2O_3 : 1.51%, MnO : 0.04%, MgO : 0.60%, CaO : 0.79%, Na_2O : 2.36%, K_2O : 4.78%, P_2O_5 : 0.08%. $\text{ASI} = 1.41 \sim 2.15$, $\text{A/NCK} = 1.05 \sim 1.57$ (平均 1.35), $\text{A/NK} = 1.21 \sim 2.62$, 铝指数显示岩石为强铝型, 大多数样品点位于 I-S 线的右侧 S 型花岗岩区(图 4). 个别样品的 SiO_2 (如 HN-5/1) 或 Al_2O_3 (如样品 HN-7/5) 较低, 可能与原岩成分有关, 或者与部分熔融程度有关.

稀土总量 $\Sigma\text{REE} = 100.49 \sim 170.56$, 经球粒陨石标准化处理后的稀土配分型式为 LREE 略微富集型, 具 Eu 异常(图 5(a)), $\delta\text{Eu} = 0.21 \sim 0.56$, 轻重稀土元素分

馏不大, $\text{LREE/HREE} = 3.19 \sim 6.84$, $(\text{La})_N/(\text{Lu})_N = 2.08 \sim 6.98$. 用原始地幔标准化所做的蛛网图上, 微量元素富 K, Rb, Th 和 REE 等, 相对亏损 Ba, U, Ta, Nb, Sr, P 和 Ti(图 5(b)), 显示清楚的地壳熔融花岗岩的特征 [20,21].

与上述岩石地球化学研究结果一致, 海南岛抱板群中顺层侵位的深熔花岗岩的岩石学研究认为, 这类花岗岩是比峨文岭组和戈枕村组层位更深的某种壳源物质部分熔融形成, 戈枕村组黑云斜长片麻岩类岩石也是花岗岩的源岩 [14].

采用洋脊花岗岩进行标准化所做的蛛网图上, 非常类似于碰撞后花岗岩的特征 [22]. 在 $(\text{Nb}+\text{Y})\text{-Rb}$ 图上, 几乎所有的点落在板内花岗岩区, 3 个数据点落在火山弧花岗岩区(图 6). 按最初板内花岗岩与火山

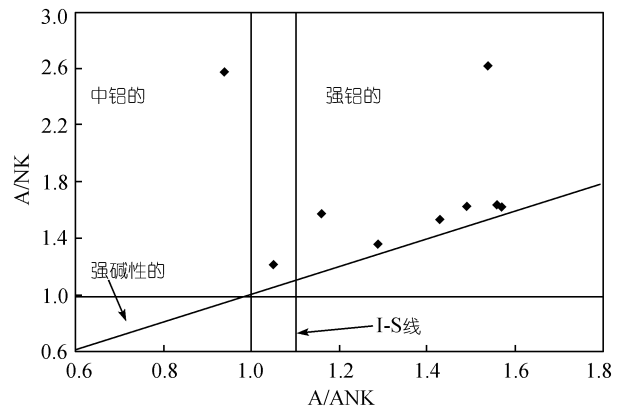


图 4 海南岛泥盆纪深熔花岗岩 A/ANK-A/NK 图

表 1 海南岛顺层侵位深熔花岗岩主元素组成(%)

样品	HN5-1	HN6	HN6-1	HN7-5	HN9-1	HN-11	HN16-3	HN17-2
SiO_2	62.43	74.04	70.88	74.98	75.11	71.07	73.52	72.78
TiO_2	0.68	0.31	0.35	0.13	0.11	0.58	0.35	0.37
Al_2O_3	17.06	13.06	14.95	12.39	14.55	13.24	13.69	13.23
Fe_2O_3	1.74	2.13	2.97	1.02	0.62	1.68	0.62	2.51
FeO	2.93	0.59	0.31	0.64	0.24	2.76	1.22	1.2
MnO	0.07	0.05	0.02	0.02	0.01	0.06	0.02	0.04
MgO	1.59	0.58	0.44	0.11	0.19	0.98	0.64	0.75
CaO	2.52	0.34	0.17	0.84	0.27	1.64	0.29	0.41
Na_2O	1.19	2.27	2.37	2.96	2.37	2.12	1.9	2.38
K_2O	4.21	4.43	4.93	4.97	4.58	4.54	6.41	3.91
P_2O_5	0.12	0.05	0.07	0.02	0.03	0.13	0.12	0.11
LOI	4.95	1.75	2.84	1.35	1.61	0.82	1.23	1.94
总计	99.49	99.6	100.31	99.43	99.67	99.62	100.02	99.64
A/CNK	1.54	1.43	1.57	1.05	1.56	1.16	1.29	1.49
ASI	2.15	1.86	2.00	1.41	2.02	1.60	1.59	1.97

表 2 海南岛顺层侵位深熔花岗岩微量元素、稀土元素组成($\times 10^{-6}$)

SAMPLE	HN5-1	HN6	HN6-1	HN7-5	HN9-1	HN-11	HN16-3	HN17-2
Rb	203.68	142.48	164.62	167.23	208.78	240.13	208.78	171.02
Ba	464.45	1072.97	724.51	355.05	227.02	550.57	227.02	457.34
Th	11.71	15.37	21.33	28.46	8.98	28.19	8.98	17.43
U	5.67	2.66	4.32	15.42	3.64	8.06	3.64	3.25
Ta	1.89	1.09	1.11	2.09	1.32	1.69	1.32	1.25
Nb	16.59	11.27	11.91	13	11.91	16.95	11.91	12.08
Sr	84.46	93.32	59.37	58.76	68.15	83.85	68.15	74.12
Zr	212.03	157.35	167.87	84.86	44.58	264.97	44.58	196.94
Hf	6.23	5.11	6.03	4.32	1.9	8.65	1.9	6.45
Y	43.6	33.57	32.75	57.27	38.72	62.21	38.72	42.37
La	26.49	28.12	19.36	23.68	17.03	62.86	17.03	35.76
Ce	58.76	57.14	42.54	53.25	35.9	124.75	35.9	56.29
Pr	6.96	7.04	5.12	6.58	4.28	15.82	4.28	9.09
Nd	30.56	27.71	20.4	26.92	16.06	60.87	16.06	35.37
Sm	6.82	5.98	4.77	7.31	3.78	12.35	3.78	7.26
Eu	1.1	0.92	0.79	0.53	0.46	1.33	0.46	0.65
Gd	7.19	6.12	5.19	8.45	3.76	11.29	3.76	6.41
Tb	1.28	1.03	0.95	1.55	0.79	1.93	0.79	1.13
Dy	8.22	6.43	6.23	10.2	6.01	11.74	6.01	7.51
Ho	1.67	1.35	1.31	2.21	1.37	2.4	1.37	1.54
Er	4.91	3.76	3.74	6.29	4.35	6.34	4.35	4.37
Tm	0.69	0.55	0.55	1.01	0.74	0.86	0.74	0.64
Yb	4.49	3.59	3.51	6.36	5.14	5.32	5.14	3.96
Lu	0.67	0.49	0.49	1.01	0.82	0.76	0.82	0.58
Σ REE	159.81	150.23	114.95	155.35	100.49	318.62	100.49	170.56
LREE	130.69	126.91	92.98	118.27	77.51	277.98	77.51	144.42
HREE	29.12	23.32	21.97	37.08	22.98	40.64	22.98	26.14
LREE/HREE	4.49	5.44	4.23	3.19	3.37	6.84	3.37	5.52
(La/Yb) _N	3.95	5.74	3.95	2.34	2.08	8.27	6.98	6.17
ϵ Eu	0.48	0.47	0.49	0.21	0.37	0.34	0.56	0.29

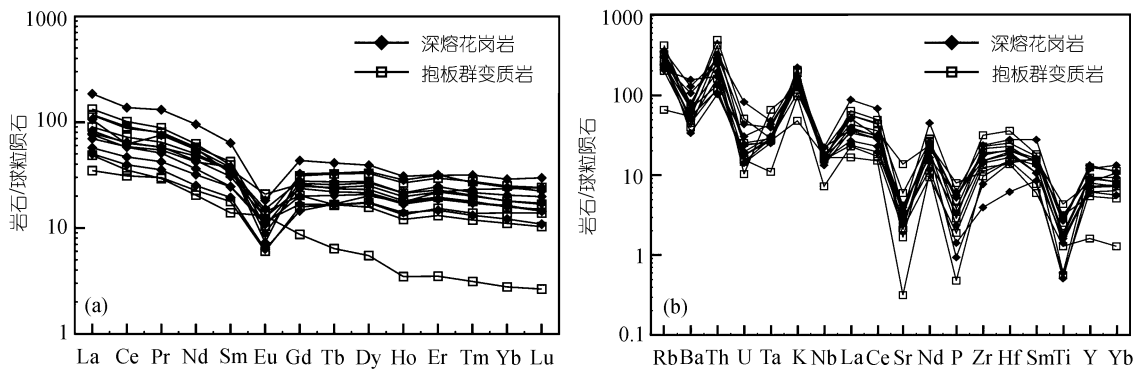


图 5 海南岛泥盆纪深熔花岗岩稀土元素球粒陨石标准化配分型式图(a)与微量元素球粒陨石标准化数据蛛网图(b)

弧花岗岩的定义, 板内花岗岩的构造环境包括正常厚度的大陆地壳、强烈减薄的大陆地壳和大洋地壳三个构造亚类. 本文研究的海南岛顺层侵位花岗岩的

强过铝特征以及其他地球化学特征、岩石学特征已经表明, 它们与大陆板块地壳物质的部分熔融作用有密切的关系. 稀土配分曲线与微量元素蛛网图上, 抱

板群变质岩与深熔花岗岩的分配曲线非常一致(图 5), 深熔花岗岩很可能是由抱板群或者类似组成的地壳物质部分熔融并短距离侵位形成.

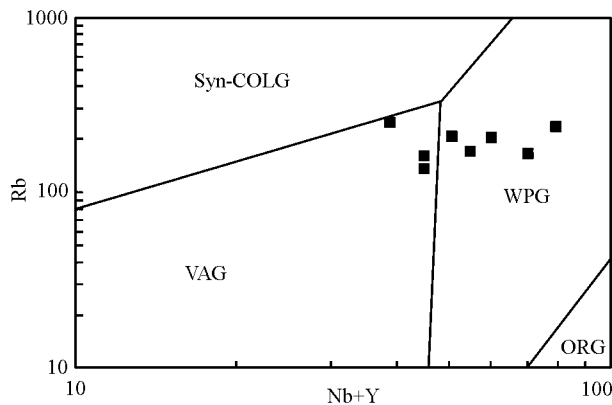


图 6 海南岛泥盆纪深熔花岗岩(Nb+Y)-Rb 图
WPG-板内花岗岩, VAG-火山弧花岗岩, Syn-COLG-同碰撞花岗岩,
ORG-洋中脊花岗岩

3 锆石 SHRIMP 法 U-Pb 定年

3.1 测试方法

锆石 U-Th-Pb 同位素分析在北京离子探针中心 SHRIMP II 上进行. 采用常规的浮选和电磁选方法进行锆石分选, 在双目镜下挑选晶形完好的锆石颗粒. 将待测锆石样品和标准锆石 TEM(年龄为 417 Ma)^[23] 粘贴在环氧树脂表面, 抛光后制成样靶. 在电子显微镜下观察锆石的阴极发光图像和背散射图像, 研究锆石颗粒的类型、结晶生长世代关系, 据此选择锆石颗粒进行测年及确定一次离子束轰击锆石颗粒的具体位置, 避免将离子束轰击到年龄不同的锆石区域, 导致获得的年龄数据意义含混. 然后将样品靶清洗、镀金后, 在 SHRIMP II 上进行测定, 实验流程和条件与文献[24]描述的基本相同. 数据与图形采用 Ludwig 博士编写的 SQUID 1.03d 版和 ISOPLOT 2.49S 版软件进行处理. 普通 Pb 采用实测的 ^{204}Pb 进行校正, TEM 和待测锆石的普通铅均按照 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} = 0.864$, $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} = 2.097$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.052$ 进行, 这些普通铅组成为 Stacey 等^[25] 模式在 417 Ma 时对应的值.

3.2 样品

3.2.1 样品 HN-16/3

采自海南岛东部定安县中瑞农场, 顺层侵位于抱板群变质岩中的含钾长石巨斑的深熔花岗岩. 岩石为灰白色, 条带状构造, 岩石具约 10%~20% 的钾长石巨晶, 采样露头上所见最大的钾长石巨晶可达 5~6 cm 长, 岛内类似岩石都具有不同程度的糜棱岩化, 长石斑晶明显定向, 构成一组拉伸线理. 薄片下观察, 主要矿物成分为钾长石(25%~30%)、斜长石(30%~35%)、石英(30%~35%)、黑云母(5%)、白云母(5%)等, 粒状矿物与片状矿物分别聚集形成明显的成分条带, 岩石中各种交代结构发育, 石英及长石都可见动态重结晶导致的细粒化现象, 并见长石双晶弯曲现象.

锆石颗粒分为短柱状和长柱状两类, 两者具有相似的结晶结构. 在阴极发光图像和背散射图像中明显显示具两个生长世代, 具有增生锆石的特征. 核部多为浑圆状-次棱角状的碎屑颗粒, 未见矿物生长环带或环带不明显. 碎屑颗粒外包裹新生的发育明显生长环带的锆石, 与典型的岩浆结晶锆石相似, 推测是岩浆结晶过程中生长的锆石. 此外, 阴极发光图像还显示, 两个世代锆石 U 含量差别较大, 核部碎屑锆石 U 含量低得多(图 7-1~6).

3.2.2 样品 JD-1

采自海南岛东部琼海县加定乡抱板群黑云母二长片麻岩. 岩石为灰白-灰色块状构造、具弱的条带-片麻状构造, 薄片下观察具明显的成分分异现象, 形成条带状及片麻状构造, 具鳞片粒柱状变晶结构. 主要矿物成分为斜长石(35%~40%)、钾长石(15%~20%)、石英(30%)、黑云母(10%~15%), 少量绢白云母、绿泥石等.

锆石颗粒多为柱状自形晶体, 分短柱状和长柱状两种, 阴极发光图像和背散射图像显示, 锆石晶体内部特征基本一致, 具明显的矿物生长环带, 往往在矿物颗粒的核部有一个浑圆状-次棱角状的核, 其内往往有黑云母、钾长石、石英及磷灰石等矿物包裹体(图 7-7~11). 这些矿物包裹体一般呈片状或粒状, 是

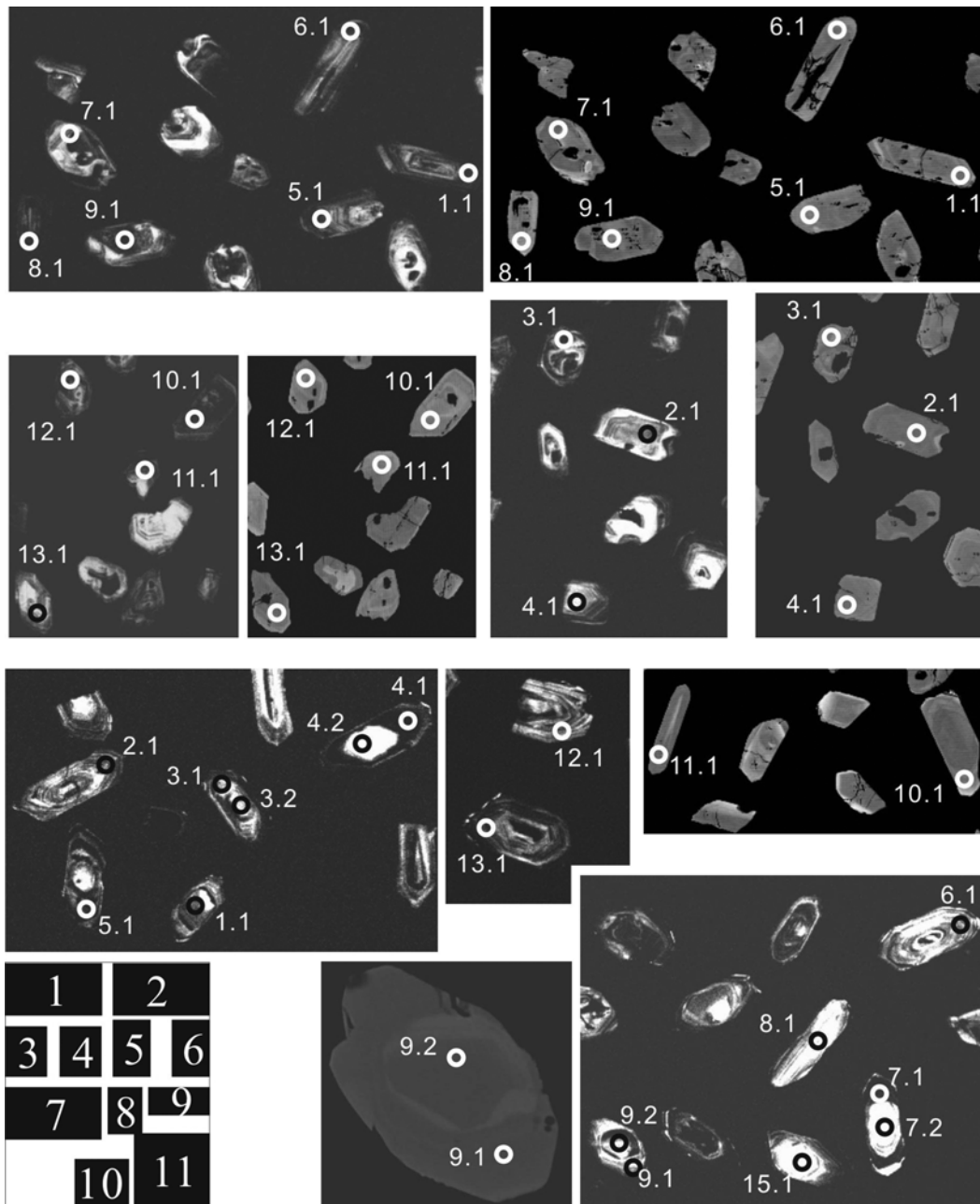


图 7 锆石颗粒阴极发光与背散射图像

1~6. JD-1, 其中 1, 3 和 5 为阴极发光图像, 2, 4 和 6 为背散射图像, 背散射图像中锆石颗粒内部的黑色斑点为钾长石、石英、黑云母及磷灰石等矿物包体; 7~11. HN-16/3, 其中 7, 8 和 11 为阴极发光图像, 9, 10 为背散射图像, 10 为图像 11 中局部放大

锆石变质增生过程中包裹的原岩矿物碎屑. 核部碎屑锆石的浑圆状外形应与第二世代锆石生长前变质成因锆石边缘溶蚀有关. 本样品锆石显示了比较典型的变质增生锆石的特征(图 7-7~11).

3.3 测试结果

3.3.1 样品 HN-16/3

SHRIMP 测试分析了 15 粒精选出来的锆石的 19

个数据点, 测试结果列于表 3. 其中 14 个年轻锆石的测定点给出的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 370.0 ± 4.4 Ma(95%置信度误差), $\text{MSDW}=2.02$ (图 8: HN-16/3). 较老的 6 个测定点位于锆石颗粒核部, 其中 3 个测定点较年轻, 其 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄分别为 902 ± 35 Ma, 912 ± 23 Ma, 968 ± 26 Ma; 另外 2 个测定点较老, 其 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄分别为 2752 ± 25 Ma, 2856 ± 15 Ma. 根据核部形态明显不同于边部的特点, 判断核部应为早期碎屑锆石(图 7-1~6). 核部碎屑锆石的平均 $\text{Th}/\text{U} = 0.36\sim 0.66$, 平均 0.51, 环带状结晶部位数据点的 $\text{Th}/\text{U} = 0.08\sim 0.54$, 平均 0.22.

3.3.2 样品 JD-1

共分析了 13 个锆石颗粒 13 个点, 测试结果列于表 4. 其中 9.1 点与其他点相比较, 其年龄明显不同, 疑为样品分选时混入的. 其余 12 个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 362.9 ± 7.0 Ma(95%置信度误差), $\text{MSDW}=4.64$ (图 8: JD-1). 所有数据点的 $\text{Th}/\text{U} = 0.15\sim 0.93$, 平均 0.54.

4 讨论及构造意义

海南岛顺层侵位的含钾长石巨斑深熔花岗岩的锆石 SHRIMP U-Pb 测年获得的 370.0 ± 4.4 Ma 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄, 是迄今为止第一次在岛内获得的泥盆纪晚期花岗岩同位素年龄, 其地球化学特征及前人所做的岩石学研究成果均显示其为 S-型花岗岩. 深熔花岗岩的围岩抱板群黑云母二长片麻岩中变质增生锆石所获得的 SHRIMP U-Pb 年龄为 362.9 ± 7.0 Ma.

深熔花岗岩岩浆作用与围岩变质作用非常一致的年龄, 揭示出在泥盆纪晚期海南岛曾经历过一次强烈的热事件. 这次热事件和可能与整个华南造山带晚加里东期构造热事件有关. 这次热事件很可能影响的地区一直向北延伸到云开山、武夷山地区. 广东西部云开地区发育大体同时代的类似的含钾长石巨斑花岗质岩说明, 不过云开山地区含钾长石巨斑花岗质岩的时代稍早, 其钾长石的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为 410~430 Ma, 属志留纪末到泥盆纪初期^[26], 武夷山中段混合岩黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 为 401 Ma^[27], 而武夷山南麓韧性剪切带动力变质岩中白云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄测试也证明曾存在泥盆纪初构造热事件(坪年龄 391 ± 3 Ma, 等时线年龄 385 ± 5 Ma), 研究认为至少有一期的强烈韧性剪切变形和糜棱岩化作用是该构造事件所导致^[28].

近年来, 大规模的韧性剪切带和脆性断层与地壳物质发生深熔作用、变质作用及花岗岩浆侵位关系已经引起普遍的关注^[29]. 岛内这期花岗岩普遍发生的韧性剪切变形表明, 这次变形具有面状展布的特点, 很可能存在一个水平产状的大型韧性剪切带. 剪切带的发育与热事件之间的诱发关系及先后顺序仍需进一步研究. 另外, 流体的参与、地壳物质成分的差异也对地壳部分熔融有非常大的影响, 尤其地幔玄武岩浆带来的热对地壳物质部分熔融会有更加明显的效果^[30]. 海南岛泥盆纪晚期热事件的发生, 很可能是这些因素共同作用造成的.

根据寒武纪特殊三叶虫、古生界地层及古地磁等资料, 海南岛属亲东冈瓦纳的裂解块体^[1,7,31], 但什么

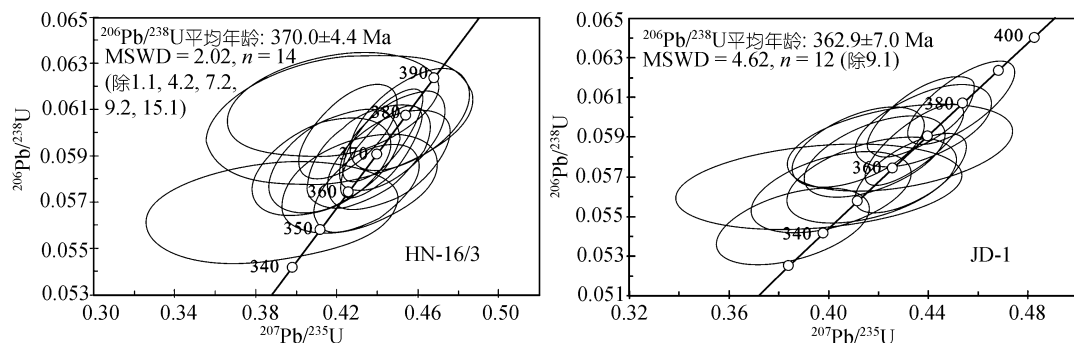


图 8 海南岛顺层侵位深熔花岗岩(HN-16/3)与抱板群长英质片麻岩(JD-1)锆石 SHRIMP II 法 U-Pb 年龄谱和图

Table 1 Composition and abundance of the acritarchs from the Meitan Formation, Honghuayuan section, Tongzi, Guizhou³⁾

Species	Relative abundance of acritarchs																																						
	<i>D. eobifidus</i>						<i>C. deflexus</i>					<i>A. suecicus</i>					<i>E. hirundo</i>					Ua	Ui																
	AFI1008	AFI1009	AFI1011	AFI1013	AFI1014	AFI1018	AFI1021	AFI1025	AFI1029	AFI1035	AFI1040	AFI1041	AFI1042	AFI1043	AFI1045	AFI1048	AFI1049	AFI1051	AFI1052	AFI1054	AFI1058	AFI1060	AFI1061	AFI1062	AFI1063	AFI1064	AFI1070	AFI1071	AFI1072	AFI1073	AFI1074	AFI1075	AFI1076	AFI1080	AFI1081	AFI1093	AFI1094	AFI1095	AFI1096
<i>Acanthodiacrodium</i> sp.											r												p	r					p	r	r	c					p		
<i>Acanthodiacrodium tassellii</i>									r	c	c	c	c	r	r	c	c	r	a																				
<i>Ampullula erchunensis</i>						?			r	r		r					p																						
<i>Arbusculidium filamentosum</i>									c	a	a	a	c	r	a	a	c	r	r																				
<i>Arkonina tenuata</i>												p																		r	r	p				p			
<i>Athabascaella playfordii?</i>									r	r		r					r																						
<i>Aureotesta clathrata</i> var. <i>simplex</i>									r	r					p									p	r		r	r	r		c	r							
<i>Baltisphaeridium longispinosum</i>																	a	c														r							
<i>Baltisphaeridium granosum</i>									p	p	c	r	c	r	c	r	c	r	r	r	r	r	r	r	a	r	p								a	a	a	a	
<i>Baltisphaeridium</i> sp.1																		r	r					r	c	p			p	c		r							
<i>Baltisphaeridium</i> sp.2	p	r	a	c	p	p	r		p								a	c	c																	a	a	a	a
<i>Baltisphaeridium</i> sp.3															c	c		a												c	c	r	p						
<i>Coryphidium bohemicum</i>							p		p	a	c	a	c	a	a	c	c	p	r					p	p	p				c	p	r							
<i>Coryphidium elegans</i>																																			r	p	r	r	
<i>Cristallinium dentatum</i>										r	r		r		p	c																							
<i>Cymatogalea cuvillieri</i>							r					c			p																								
<i>Cymatogalea granulata</i>	p	p		p				p	c	a	a	a	a	r	a	a	c	r	p				c	c	c	c	a	a	a	a	a	a	a	c	p				
<i>Cymatogalea</i> sp.																		a	c	c		c	r							r						p		r	
<i>Cymatiosphaera</i> sp1																		a	a	c	r	c			c	c	r	p											
<i>Cymatiosphaera</i> sp2														p											r			r				r					r	r	
<i>Dactylofusa velifera</i>									p		r		r	p												r		p	r	a	r	r	c	p	c			r	
<i>Dicrodiacrodium normale</i>																			p														p						
<i>Dictyotidium</i> sp.											p	r		p	r											r										p			

(To be continued on the next page)

(Continued)

Species	Relative abundance of acritarchs																																					
	<i>D. eobifidus</i>						<i>C. deflexus</i>						<i>A. suecicus</i>						<i>E. hirundo</i>						Ua		Ui											
	AFI1008	AFI1009	AFI1011	AFI1013	AFI1014	AFI1018	AFI1021	AFI1025	AFI1029	AFI1035	AFI1040	AFI1041	AFI1042	AFI1043	AFI1045	AFI1048	AFI1049	AFI1051	AFI1052	AFI1054	AFI1058	AFI1060	AFI1061	AFI1062	AFI1063	AFI1064	AFI1070	AFI1071	AFI1072	AFI1073	AFI1074	AFI1075	AFI1076	AFI1080	AFI1081	AFI1093	AFI1094	AFI1095
<i>Leiosphaeridia</i> spp.	r	r	a	c	r	p	r	p	c	c	a	a	c	a	a	c	c	c	c	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	r	a	a	a	a
<i>Leprotolypa evexa</i>																											a	c	c	c	a	r	p	r	c	r	r	a
<i>Lophosphaeridium rarum</i>										r		r		r		r			p	r				r	c		p		c	r	r			r	r	r	r	
<i>Micrhystridium accuminosum</i>	p											c	c	a			p	a						a	a	c	r	r	r					r	r	c		
<i>Micrhystridium henry</i>																																		a	a	r	c	
<i>Micrhystridium</i> sp.										p	r	r												c	c				a			r	a			a		
<i>Multiplicisphaeridium</i> sp.																								p	r				p	r	r			r	r	c		
<i>Multiplicisphaeridium irregulare</i>	r									c	r					p							p												r			
<i>Pachysphaeridium rhabdocladium</i>																	r	r	r					p		r	r	p	a	p	r	p	p	p	r	p	r	
<i>Petaloferidium florigerum</i>											r									p										p	c	r		r	r	r	r	
<i>Peteinosphaeridium dissimile</i>																								p				p	p				r					
<i>Peteinosphaeridium intermedium</i>																		c	c		p										r	r	r	c	r	r	r	
<i>Peteinosphaeridium trifurcatum</i>	p	r	p				r		r	c	r	r	c	c	r	c	a	a	a	r	p	r	r	r	c		c	c	c	r	c	c	r	c	a	a	a	
<i>Pirea sinensis</i>																	c	p	c					p						p	p	p						
<i>Polygonium gracile</i>	c	c	r	r	r	r	c	r	p	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	c	r	c	a	a	c	c	a	a	a	a	a	a	a	a	p	a	a	a
<i>Polygonium</i> sp.	p				p	p				c					r															r	r	a						
<i>Rhopaliophora palmata</i>		r	p	p	p		c		a	c	c	r	c	r	c	a	a	c	r	r										r								
<i>Stelliferidium striatulum</i>																																						
<i>Striatotheca monorugulata</i>										p	r	c		p	r	p														p		r						
<i>Striatotheca principalis parva</i>							p	r	p	a	a	a	a	a	a	a	a	a	r	c	c	c	c	c	r	r	r	r	r	c	a	a	r	r	p	r	p	p
<i>Striatotheca transformata</i>										r	r	r	r	p	p	r	r	p		p																		
<i>Synsphaeridium</i> cf. <i>gotlandicum</i>										c	c	c	c	r							r	r	r	c	r			r	r	r	r							
<i>Tectitheca additionalis</i>										c	p	c	r		r	r	a	c	a												r	r	p					
<i>Tongzia meitana</i>																		c	r																			
<i>Veryhachium lairdii</i>										r		r																						r	r			
<i>Veryhachium trispinosum</i>		p	?				p	p		a	a	a	a	a	c	a	a	a	c	a	p		p	r	r	p		a	r	r	a	a	a	c	p	r	p	p

a) Ua, *U. austrodentatus* Zone; Ui, *U. intersitus* Zone. a, >50; c, 20–50; r, 5–20; p, 0–5

时候从冈瓦纳大陆裂解出来、又何时拼贴到华南地块边缘存在不同的认识^[8,32,33]。一般认为冈瓦纳大陆在泥盆纪发生分裂^[7], 其北部边缘在石炭-二叠纪拉开并分裂向北拼贴到劳亚大陆上^[34]。海南岛作为曾经是冈瓦纳大陆的一部分, 泥盆纪期间的地质变动很可能记录的正是冈瓦纳大陆裂解的信息。

大规模顺层侵位岩浆岩体一般都被认为与大的顺层拆离或顺层推覆构造面的发育有关, 海南岛泥盆纪顺层侵位深熔花岗岩普遍发育糜棱岩化, 不但石英已经发生拉丝状韧性变形, 长石也发育双晶弯曲等明显韧性变形构造, 表现出角闪岩相变质温度条件下的构造变形特征^[35,36], 这与抱板群角闪岩相变质作用环境是一致的^[13]。海南岛及邻近的华南造山带武夷山、云开山地区泥盆纪深熔花岗岩以及其他构造热事件, 很可能是冈瓦纳大陆裂解过程中地壳深处顺层拆离发生的同构造岩浆活动, 这有点类似 Rodinian 超大陆裂解时华南地块的情况, 因地幔柱上涌导致 Rodinian 超大陆裂解, 而上升的地幔柱同时也造成了华南地块深部产生了大量的深熔花岗岩浆侵位^[37]。因此, 海南岛泥盆纪顺层侵位深熔花岗岩的发现, 对解释冈瓦纳大陆裂解过程和时代具有重要意义。

参 考 文 献

- 1 杨树峰, 虞子冶, 郭令智, 等. 海南岛的地体划分、古地磁研究及板块构造意义. 南京大学学报 (地球科学版), 1989, 1~2: 38~46
- 2 任纪舜, 王作勋, 陈炳蔚, 等. 从全球看中国大地构造——中国及邻区大地构造图简要说明. 北京: 地质出版社, 1999. 1~50
- 3 夏邦栋, 施光宇, 方 中, 等. 海南岛晚古生代裂谷作用. 地质学报, 1991, 2: 103~115
- 4 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. 岩石学报, 2000, 16 (3): 425~432
- 5 李献华, 周汉文, 丁式江, 等. 海南岛洋中脊型变基性岩: 古特提斯洋壳的残片? 科学通报, 2000, 45 (1): 84~88
- 6 Li Xianhua, Zhou Hanwen, Chung Sunlin, et al. Geochemical and Sm-Nd isotopic characteristics of metabasites from central Hainan Island, south China and their tectonic significance. *Island Arc*, 2002, 11: 193~205 [DOI]
- 7 Hsu K J, Li Jiliang, Chen Haihong, et al. Tectonics of south China: key to understanding west Pacific geology. *Tectonophysics*, 1990, 183: 9~39 [DOI]
- 8 Metcalfe I, Shergold I H, Li Zhengxiang. IGCP 321 Gondwana dispersion and Asian accretion: Field-work on Hainan Island. *Episodes*, 1994, 16 (4): 443~447
- 9 Metcalfe I. Pre-Cretaceous evolution of SE Asian terranes. *Geological Society Special Publication*, 1996, 106: 97~122
- 10 Wang Hongzhen, Mo Xuanxue. An outline of tectonic evolution of China. *Episodes*, 1995, 18: 6~16
- 11 程裕淇. 中国区域地质概论. 北京: 地质出版社, 1994. 313~384
- 12 车自成, 刘 良, 罗金海. 中国及邻区区域大地构造学. 北京: 科学出版社, 2002. 433~435
- 13 海南地勘局地调院. 1: 25 万区域地质调查: 琼海县幅 (E49C001002), 2004
- 14 马大铨, 黄定香, 陈哲培, 等. 海南省抱板群研究的新进展. *中国区域地质*, 1997, 16 (2): 130~136
- 15 马大铨, 黄定香, 肖志发, 等. 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, 1998. 1~60
- 16 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. *长春地质学院学报*, 1992, 2: 133~143
- 17 梁新权. 海南岛前寒武纪花岗岩-绿岩系 Sm-Nd 同位素年龄及其地质意义. *岩石学报*, 1995, 11 (1): 71~76
- 18 张业明, 张仁杰, 姚华舟, 等. 海南岛前寒武纪地壳构造演化. *地球科学-中国地质大学学报*, 1997, 22 (4): 395~400
- 19 梁新权. 海南岛昌江灰色片麻岩包体及其地球化学特征. *大地构造与成矿*, 1998, 22 (4): 346~352
- 20 White A J R, Chappell B W. Granitoid types and their distribution in the Lachlan Fold Belt, south-eastern Australia. *Geol Soc Am Mem*, 1983, 159: 21~34
- 21 Chappell B W, White A J R. I- and S-type granites in the Lachlan fold belt. *Transactions of the Royal of Edinburgh: Earth Sciences*, 1992, 83: 1~26
- 22 Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 1984, 25 (4): 956~983
- 23 Black L P, Kamo S L, Allen C M, et al. TEMORA 1: a new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology. *Chemical Geology*, 2003, 200: 155~170 [DOI]
- 24 宋 彪, 张玉海, 万渝生, 等. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论. *地质论评*, 2002, 48 (增刊): 26~30
- 25 Stacey J S, Kramers J D. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. *Earth and Planetary Science Letters*, 1975, 26: 207~228
- 26 陈 文, 张思红, 邵建国. 激光显微探针 ³⁹Ar-⁴⁰Ar 测年方法的两个应用研究实例. *地球学报*, 1997, 18 (增刊): 102~104
- 27 黄 标, 孙明志, 武少兴, 等. 武夷山中段加里东期混合岩的特征及成因讨论. *岩石学报*, 1994, 10 (4): 427~440
- 28 舒良树, 卢华复, 贾 东, 夏 菲, 福 赫. 华南武夷山早古生代构造事件的 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 同位素年龄研究. *南京大学学报(自然科学)*, 1999, 35 (6): 668~674
- 29 Whitney D L, Teyssier C, Fayon A K, et al. Tectonic controls on

- metamorphism, partial melting, and intrusion: timing and duration of regional metamorphism and magmatism in the Nigde Massif, Turkey. *Tectonophysics*, 2003, 376: 37~60[DOI]
- 30 Petford N, Cruden A R, McCaffrey K J W, et al. Granite magma formation, transport and emplacement in the earth's crust. *Nature*, 2000, 408: 669~673[DOI]
- 31 陈海泓, 孙 枢, 李继亮, 等. 华南早三叠世的古地磁学与大地构造. *地质科学*, 1994, 29 (1): 1~9
- 32 方宗杰, 殷德伟. 海南岛东方早二叠世双壳类动物群及其古生物地理学研究——兼评南龙杂砾岩的冰川成因说. *古生物学报*, 1995, 34 (3): 301~315
- 33 张仁杰, 王成源, 胡 宁, 等. 海南法门期生物地层. *中国科学*, D 辑, 2001, 31 (5): 406~412
- 34 Sengor A M C. Plate tectonics and orogenic research after 25 years: A Tethyan perspective. *Earth Science Review*, 1990, 27: 1~201[DOI]
- 35 Simpson C, Wintsch R P. Evidence for deformation-induced K-feldspar replacement by myrmekite. *Journal of Metamorphic Geology*, 1989, 7
- 36 许志琴, 张建新, 徐惠芬, 等. 中国主要大型山链韧性剪切带及动力学. 北京: 地质出版社, 1997. 111~121
- 37 Li Zhengxiang, Li Xianhua, Kinny P D, et al. The breakup of Rodinia: did it start with a mantle plume beneath South China? *Earth Planetary Science Letters*, 1999, 173: 171~181[DOI]