

前中生代海南岛与华夏、扬子陆块的关系 ——来自海南岛下二叠统峨查组碎屑锆石年龄的信息

张宗言¹, 柯 学², 卜建军¹, 周进波³, 何卫红⁴

ZHANG Zongyan¹, KE Xue², BU Jianjun¹, ZHOU Jinbo³, HE Weihong⁴

1. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430205;

2. 中国地质大学(武汉)地质调查研究院, 湖北 武汉 430074;

3. 海南省地质调查院, 海南 海口 570206;

4. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 湖北 武汉 430074

1. Wuhan Center, China Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China;

2. Institute of Geological Survey, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;

3. Hainan Geological Survey, Haikou 570206, Hainan, China;

4. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China

摘要:海南地块的亲缘性质归属一直存在分歧。选择海南东方市江边乡白查村峨查组进行碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年, 获得年龄为 635~1814Ma, 具 4 个年龄峰值, 分别为 1700Ma、1580Ma、1073Ma 和 680Ma, 记录了哥伦比亚(1700Ma 和 1580Ma)、罗迪尼亚(1073Ma)和泛非(680Ma)三大地质事件。1700 Ma、1580Ma 和 1073Ma 三个峰值可与南极洲、越南 Song Hien、华夏造山带和扬子陆块东南缘同期的碎屑锆石 U-Pb 年龄峰值对比, 说明海南地块在中元古代与南极洲、越南、华夏和扬子陆块东南缘共同经历了哥伦比亚和格林威尔(罗迪尼亚)造山事件。1700Ma 和 1580Ma 的峰值虽然在扬子陆块东南缘有弱的显示, 但在扬子陆块内部基本没有该年龄峰值的报道, 680Ma 峰值在扬子陆块未出现, 说明中—新元古代海南地块与扬子陆块之间相距较远, 而与华夏、越南和南极洲较近。

关键词:碎屑锆石; U-Pb 年龄; 下二叠统; 海南岛; 华夏陆块; 扬子陆块

中图分类号: P534.5; P597+.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2019)09-1521-08

Zhang Z Y, Ke X, Bu J J, Zhou J B, He W H. The relationship between Hainan Island and Yangtze and Cathaysia Block: Evidence from the U-Pb age of detrital zircons of the Lower Permian Echa Formation in Hainan Island. *Geological Bulletin of China*, 2019, 38(9): 1521-1528

Abstract: The relationship of Hainan Island with Yangtze and Cathaysia Block has been of considerable controversy. This paper presents a study of geochronology of detrital zircon from the Echa Formation, Baicha Village, Dongfang City, Hainan Island. The results show 4 major age peaks, i.e., ~1700Ma, ~1580Ma, 1073Ma and 680Ma, recording the events of Columbia (1700Ma and 1580 Ma), Rodinia (1073Ma) and Pan-African (680Ma). The presence of ~1700Ma, ~1580Ma and 1073Ma age peaks is similar to that of Antarctica, Song Hien in Vietnam, Cathaysia orogenic belt and southeast margin of Yangtze Block, revealing that they all experienced the Columbia and Grenville (Rodinia) orogenic activities. The ~1700Ma and ~1580Ma age peaks only appear on the southeast margin of Yangtze Block, but have not been reported inside the Yangtze Block. The 680 Ma age peak appears in the Hainan Island but not in the Yangtze Block, indicating that the Hainan Island was separated or far away from the Yangtze Block, but was adjacent

收稿日期: 2018-04-10; **修订日期:** 2018-08-20

资助项目: 中国地质调查局项目《海南昌江—广东云浮地区区域地质调查》(编号: DD20190047)、《全国陆域及海区地质图件更新与共享》(编号: DD20190370)、《琼桂二叠纪疑难地层问题及其构造背景》(编号: 1212011220529)

作者简介: 张宗言(1985-), 男, 硕士, 助理研究员, 从事沉积学研究及区域地质调查。E-mail: conodonts@163.com

通讯作者: 何卫红(1971-), 男, 教授, 博士生导师, 从事古生物地层学与沉积学研究。E-mail: whzhang@cug.edu.cn

特提斯动物区和华夏植物区相近,属于特提斯构造域^[13]。海南地块二叠纪的沉积主要分布于海南岛西面石碌镇—东方市江边一线,为弧后陆棚—陆坡沉积建造^[14],沉积了下二叠统峨查组、鹅顶组和上二叠统南龙组。峨查组主体为一套海相碎屑岩地层(图1),邻区的峨查组出现灰岩夹层,产早二叠世牙形石 *Sweetognathus*, *Rabeignathus*, 筴类 *Parafusulina* 等化石^[11]。根据所含化石,峨查组地质时代为早二叠世。

2 分析方法

本文对海南省东方市江边乡白查村二叠系峨查组样品 BC-2-1(图1)中的54粒锆石采用 LA-ICP-MS 锆石原位微区 U-Pb 测年分析方法进行测试。该方法主要利用等离子体质谱计(ICP-MS)进行 U-Th-Pb 同位素分析。锆石分选采用人工重砂法从岩石样品中分选出锆石,挑选晶形完好、有代表性的颗粒用环氧树脂固定并抛光使核部露出,并对制成的锆石靶进行透射光、反射光照片和阴极发光图像(CL)拍摄。本次锆石挑选、制靶和照相均在武汉上谱分析科技有限责任公司完成。通过分析锆石的阴极发光图像及透射光、反射光照片,挑选出合适的锆石颗粒,同时注意避免锆石内部包裹体和裂痕区域,进行锆石 U-Pb 定年测试。

样品 BC-2-1 的锆石 LA-ICP-MS 年龄测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成,采用的 ICP-MS 为美国 Agilent 公司生产的 Agilent7500a,激光剥蚀系统为德国 Lamda Physik 公司生产的 GeoLas2005 深紫外(DUV)193nm UArF 准分子激光剥蚀系统。测试过程中采用氦气作为剥蚀物质的载气,用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST610 进行仪器最佳化。锆石年龄测定采用哈佛大学标准锆石 91500 为外标。实验中采用的激光束斑直径为 32 μm 。仪器参数和详细的分析流程参见文献[15-16],同位素比值数据处理采用 ICPMSDataCal (Ver3.0)软件^[15-17],年龄计算和谐和图绘制采用^[18] Isoplot (ver3.23)程序完成。

3 测试分析结果

测试结果见表1。该样品中锆石多呈半磨圆—半自形状,大小多在 50~100 μm 之间,长宽比在 1:1~1:3 之间,CL 图像(图2)显示,锆石发育清晰

的振荡环带。在此定义锆石的谐和度为 $100\% \times (1 - \text{abs}(\text{Age}^{206\text{Pb}/^{238}\text{U}} - \text{Age}^{207\text{Pb}/^{235}\text{U}}) / ((\text{Age}^{206\text{Pb}/^{238}\text{U}} + \text{Age}^{207\text{Pb}/^{235}\text{U}}) / 2))$ 。

分析结果显示,71%的锆石颗粒 Th/U 值大于 0.4,27%的锆石颗粒 Th/U 值在 0.2~0.4 之间,只有 1 颗锆石 Th/U 值小于 0.1,说明其主要为岩浆成因锆石。在分析锆石时,年龄大于 1000Ma 采用 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 年龄,年龄小于 1000Ma 锆石采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄;谐和度小于 80% 的年龄数据由于误差较大,均剔除。

样品 BC-2-1 中的碎屑锆石 U-Pb 年龄变化范围在 635~1814Ma(图2、图3)。从图3可以看出,峨查组 52 个碎屑锆石年龄频率直方图显示出 4 个峰值,分别为约 1700Ma、约 1580Ma、1073Ma 和 680Ma,主峰值是 1073Ma,次峰值是 1580Ma,分别记录了哥伦比亚(1700Ma 和 1580Ma)、罗迪尼亚(1073Ma)和泛非(680Ma)三大地质事件。

4 讨论

由图4可以看出,BC-2-1 碎屑锆石 1700Ma 峰值见于南极洲^[19]、华夏造山带的武夷地块^[20],在扬子陆块东南缘的南宁—玉林^[2]和整个华夏造山带^[21]也有显示。1580Ma 的峰值与南极洲^[19]的同期峰值对比较好,并在扬子陆块东南缘的南宁—玉林^[2]和整个华夏造山带^[21]也有较好显示。

BC-2-1 碎屑锆石的 1073Ma 主峰值是对罗迪尼亚造山事件的响应^[8]。1000Ma 左右的峰值在南极洲^[19]、越南 Song Hien^[22]、武夷地块^[20]、扬子陆块东南缘^[2]和华夏造山带^[21,23]均有良好显示(图4)。

BC-2-1 碎屑锆石 1700Ma、1580Ma 和 1073Ma 三个峰值可与南极洲、越南 Song Hien、华夏造山带和扬子陆块东南缘同期的碎屑锆石峰值对比,说明海南地块在中元古代与南极洲、越南和华夏相距不远,并与扬子陆块东南缘在物源上可以沟通,它们共同经历了哥伦比亚和格林威尔(罗迪尼亚)造山事件。1700Ma 和 1580Ma 的峰值虽然在扬子陆块东南缘^[2](图4)有弱的显示,但基本没有在扬子陆块内部存在该年龄峰值的报道,无法形成物源年龄峰值,说明中元古代海南地块与扬子陆块之间相距较远,而与华夏和南极洲相距较近。另外,BC-2-1 碎屑锆石出现较弱的 680Ma 的泛非事件早期热事件年龄值,该年龄值虽弱,但在扬子陆块上不出现,在

表1 海南东方县江边乡白查村二叠系峨查组剖面样品碎屑锆石 LA-ICP MS U-Th-Pb 年龄测试数据

Table 1 Zircon LA-ICP-MS U-Th-Pb data for samples from the Permian Echa Formation, Baicha Village, Jiangbian County, Dongfang City, Hainan

测点	元素含量		Th/U	同位素比值				年龄/Ma		谐和度
	Th/ 10^{-6}	U/ 10^{-6}		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	
BC-2-1-01	605	852	0.71	4.000	0.089	0.2821	0.0028	1663	34	97%
BC-2-1-02	405	892	0.45	1.485	0.039	0.1464	0.0015	1018	84	95%
BC-2-1-03	435	378	1.15	3.187	0.083	0.2422	0.0033	1539	42	96%
BC-2-1-04	1411	712	1.98	4.590	0.103	0.3082	0.0040	1761	38	99%
BC-2-1-05	1100	1857	0.59	3.029	0.067	0.2417	0.0028	1432	38	98%
BC-2-1-06	427	639	0.67	2.811	0.084	0.2277	0.0027	1410	55	97%
BC-2-1-07	349	564	0.62	3.228	0.088	0.2454	0.0026	1531	50	96%
BC-2-1-08	474	469	1.01	3.485	0.084	0.2653	0.0029	1528	43	99%
BC-2-1-09	215	931	0.23	4.231	0.091	0.2892	0.0026	1724	39	97%
BC-2-1-10	190	519	0.37	3.357	0.080	0.2532	0.0028	1544	44	97%
BC-2-1-11	387	454	0.85	3.201	0.084	0.2417	0.0025	1539	44	95%
BC-2-1-12	80	151	0.53	2.968	0.116	0.2314	0.0041	1511	76	95%
BC-2-1-13	10	600	0.02	0.819	0.032	0.0975	0.0012	635	87	98%
BC-2-1-14	513	1203	0.43	3.143	0.097	0.2518	0.0055	1420	44	99%
BC-2-1-15	179	334	0.54	2.521	0.074	0.2177	0.0028	1281	83	99%
BC-2-1-16	170	304	0.56	3.415	0.091	0.2631	0.0034	1509	50	99%
BC-2-1-17	286	616	0.46	4.158	0.092	0.2906	0.0026	1676	39	98%
BC-2-1-18	472	648	0.73	2.360	0.064	0.2070	0.0025	1251	52	98%
BC-2-1-19	770	1315	0.59	2.424	0.118	0.2186	0.0060	1174	58	98%
BC-2-1-20	293	601	0.49	3.091	0.071	0.2485	0.0029	1420	43	99%
BC-2-1-21	288	818	0.35	3.048	0.079	0.2368	0.0040	1476	40	96%
BC-2-1-22	120	167	0.72	1.952	0.081	0.1869	0.0034	1120	118	99%
BC-2-1-23	1143	1078	1.06	2.847	0.063	0.2252	0.0024	1444	40	95%
BC-2-1-24	185	413	0.45	4.498	0.113	0.3146	0.0039	1683	46	98%
BC-2-1-25	325	933	0.35	2.701	0.062	0.2233	0.0022	1361	44	97%
BC-2-1-26	617	633	0.97	3.668	0.078	0.2799	0.0027	1520	39	98%
BC-2-1-27	343	534	0.64	3.645	0.087	0.2765	0.0032	1531	42	99%
BC-2-1-28	212	564	0.38	4.585	0.096	0.3085	0.0032	1758	37	99%
BC-2-1-29	754	1688	0.48	1.873	0.041	0.1698	0.0015	1184	41	94%
BC-2-1-30	747	1156	0.65	2.799	0.067	0.2296	0.0023	1387	44	98%
BC-2-1-31	393	393	1.00	3.592	0.102	0.2704	0.0031	1547	51	99%
BC-2-1-32	81.6	280	0.29	3.034	0.085	0.2537	0.0028	1361	56	97%
BC-2-1-33	322	1526	0.21	3.966	0.074	0.2774	0.0020	1680	33	96%
BC-2-1-34	212	949	0.22	4.076	0.094	0.2758	0.0041	1740	35	95%
BC-2-1-35	285	543	0.53	4.395	0.010	0.3086	0.0033	1676	41	98%
BC-2-1-36	223	753	0.30	4.762	0.121	0.3216	0.0043	1739	46	98%
BC-2-1-37	243	1505	0.16	4.581	0.110	0.2506	0.0033	2122	36	80%
BC-2-1-38	302	426	0.71	4.527	0.099	0.2954	0.0029	1814	42	96%
BC-2-1-39	1062	739	1.44	3.978	0.114	0.2883	0.0053	1609	42	99%
BC-2-1-40	1099	1778	0.62	2.136	0.041	0.2042	0.0019	1080	39	96%
BC-2-1-41	415	567	0.73	3.089	0.071	0.2518	0.0025	1395	45	98%
BC-2-1-42	279	177	1.57	3.619	0.137	0.2835	0.0062	1480	63	96%
BC-2-1-43	227	601	0.38	1.622	0.053	0.1611	0.0027	1029	69	98%
BC-2-1-44	185	631	0.29	1.900	0.052	0.1840	0.0024	1061	58	99%
BC-2-1-45	275	263	1.04	3.699	0.091	0.2539	0.0034	1800	47	92%
BC-2-1-46	390	1413	0.28	1.815	0.038	0.1760	0.0014	1054	43	99%
BC-2-1-47	362	875	0.41	3.974	0.165	0.2257	0.0062	1999	55	78%
BC-2-1-48	188	430	0.44	2.054	0.065	0.1782	0.0021	1276	59	93%
BC-2-1-49	522	697	0.75	3.636	0.095	0.2763	0.0033	1529	48	99%
BC-2-1-50	258	332	0.78	3.357	0.092	0.2678	0.0040	1456	50	97%
BC-2-1-51	467	1248	0.37	4.299	0.094	0.3079	0.0035	1635	39	97%
BC-2-1-52	225	242	0.93	3.510	0.110	0.2782	0.0035	1456	59	96%
BC-2-1-53	205	933	0.22	2.637	0.086	0.2168	0.0046	1351	47	96%
BC-2-1-54	246	422	0.58	3.759	0.093	0.2773	0.0032	1577	51	99%

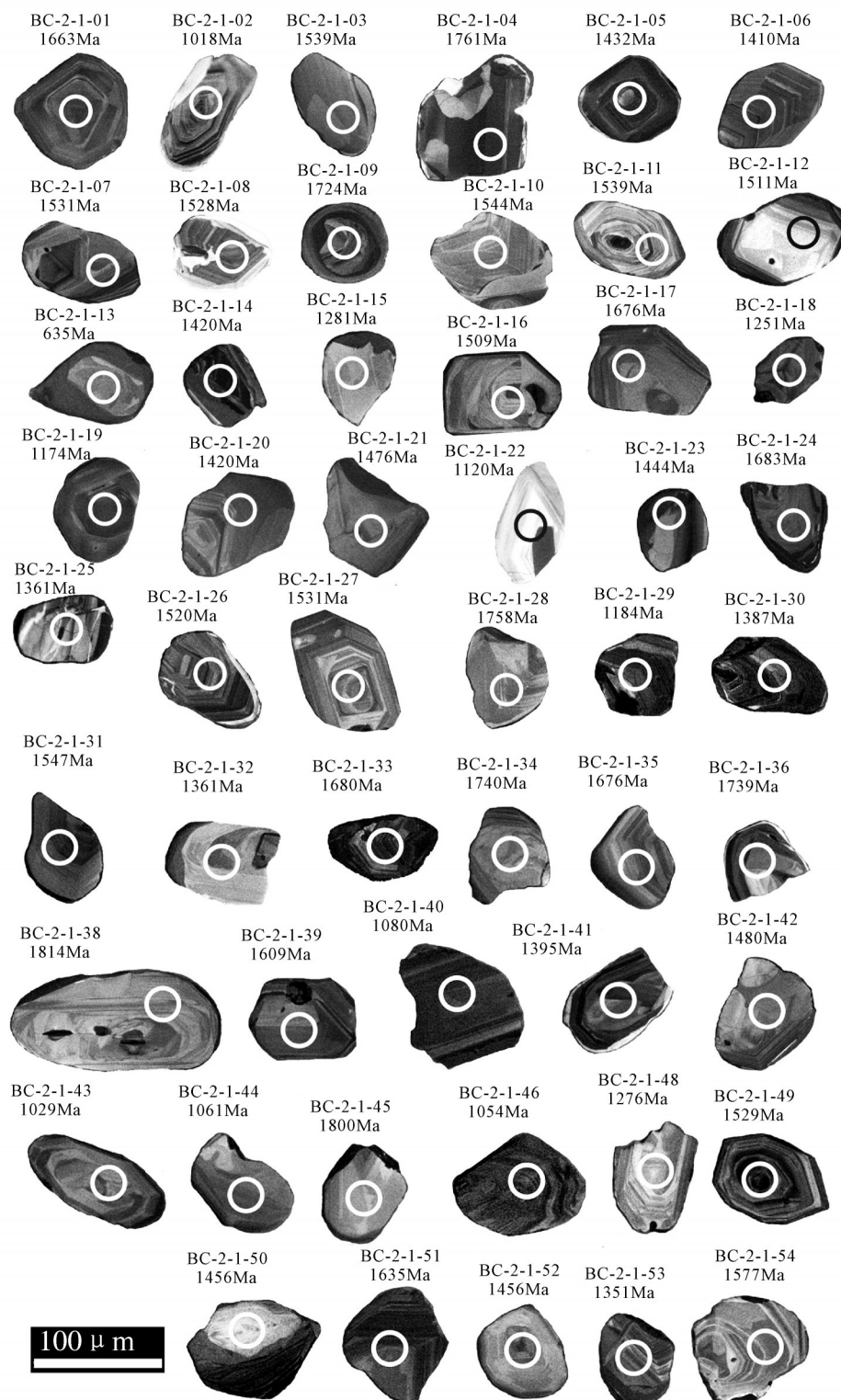


图 2 二叠系峨查组剖面样品(BC-2-1)部分碎屑锆石阴极发光图像

Fig. 2 Cathodoluminescence images of representative detrital zircons from sample BC-2-1 of the Permian Echa Formation

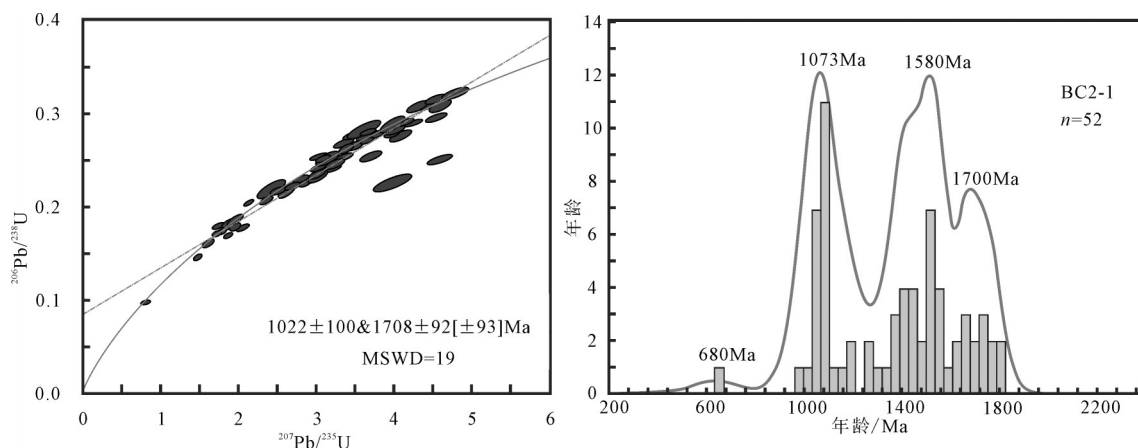


图3 研究区二叠系峨查组剖面样品(BC-2-1)碎屑锆石U-Pb谐和图(a)及年龄谱图(b)

Fig. 3 U - Pb concordia diagrams (a) and probability density diagrams (b) of zircon U - Pb data for samples BC-2-1 from the Permian Echa Formation

华夏较常见。

上述研究结果表明,中元古代—早二叠世,海南岛与华夏和南极洲的物源交流较密切,而与扬子陆块的物源交流极少,海南岛与扬子陆块从元古宙—古生代长期处于分离状态。海南岛早古生代早期含磷、锰硅质和富含石英的杂砂岩建造与澳大利亚塔斯曼同期建造相似,寒武纪动物群澳大利亚昆士兰地区关系密切,早古生代的古纬度近澳大利亚,早古生代是亲澳大利亚的地块,奥陶纪澳大利亚裂离,于石炭纪—二叠纪向东部华夏靠拢^[9]。前人在海南岛石炭纪和二叠纪地层中发现的双壳类、腕足类、筳类等动物化石均表现出华夏—特提斯生物区系特征^[35-37],植物化石虽然具有华夏植物群的面貌,但缺乏华夏植物群的典型代表,说明海南岛在二叠纪与华夏块体相距不远,但并未相连^[37]。海西—印支运动导致海南岛北部古生代地层发生了区域绿片岩相变质和透入性变形,并形成区域尺度上展布的褶皱带和断裂带,塑造出一幅非常醒目的海南岛弧状构造带^[11, 38]。另外,海南地块约224Ma的印支期巨大花岗岩基的侵入,说明与滇越特提斯带洋盆的关闭和东部华夏块体的碰撞拼合有密切关系^[8, 11, 38]。

5 结 论

(1) 通过海南东方市江边乡白查村峨查组碎屑锆石测年的研究,在BC-2-1样品中获得LA-ICP-MS碎屑锆石U-Pb年龄为635~1814Ma。

(2) BC-2-1样品碎屑锆石U-Pb年龄谱显示出4个年龄峰值,分别为1700Ma、1580Ma、1073Ma和680Ma,记录了哥伦比亚(1700Ma和1580Ma)、罗迪尼亚(1073Ma)和泛非(680Ma)三大地质事件。

(3) 1700Ma、1580Ma和1073Ma三个峰值可与南极洲、越南Song Hien、华夏造山带和扬子陆块东南缘同期的碎屑锆石峰值对比,说明海南地块在中元古代与南极洲、越南、华夏和扬子陆块东南缘共同经历了哥伦比亚和格林威尔(罗迪尼亚)造山事件。

(4) 1700Ma和1580Ma的峰值虽然在扬子陆块东南缘有弱的显示,但基本没有在扬子陆块内部存在该年龄峰值的报道,680Ma峰值在扬子陆块上不出现,说明中—新元古代海南地块与扬子陆块之间相距较远,而与华夏、越南和南极洲相距较近。

致谢: 澳大利亚Deakin大学G.R. Shi(石光荣)教授和中国地质大学(武汉)张克信教授亲赴野外指导工作,海南省地质调查院对野外工作开展给予大力帮助与指导,在此一并致谢。

参考文献

- [1] Yao W H, Li Z X, Li W X, et al. From Rodinia to Gondwanaland: A Tale of detrital zircon provenance analyses from the southern Nanhua Basin, South China[J]. American Journal of Science, 2014, 314: 278 - 313.
- [2] Yao W H, Li Z X, Li W X, et al.. Detrital provenance evolution of the Ediacaran—Silurian Nanhua foreland basin, South China[J]. Gondwana Research, 2015, 28:1449-1465.
- [3] Zhang C L, Santosh M, Zhu Q B, et al. The Gondwana connection

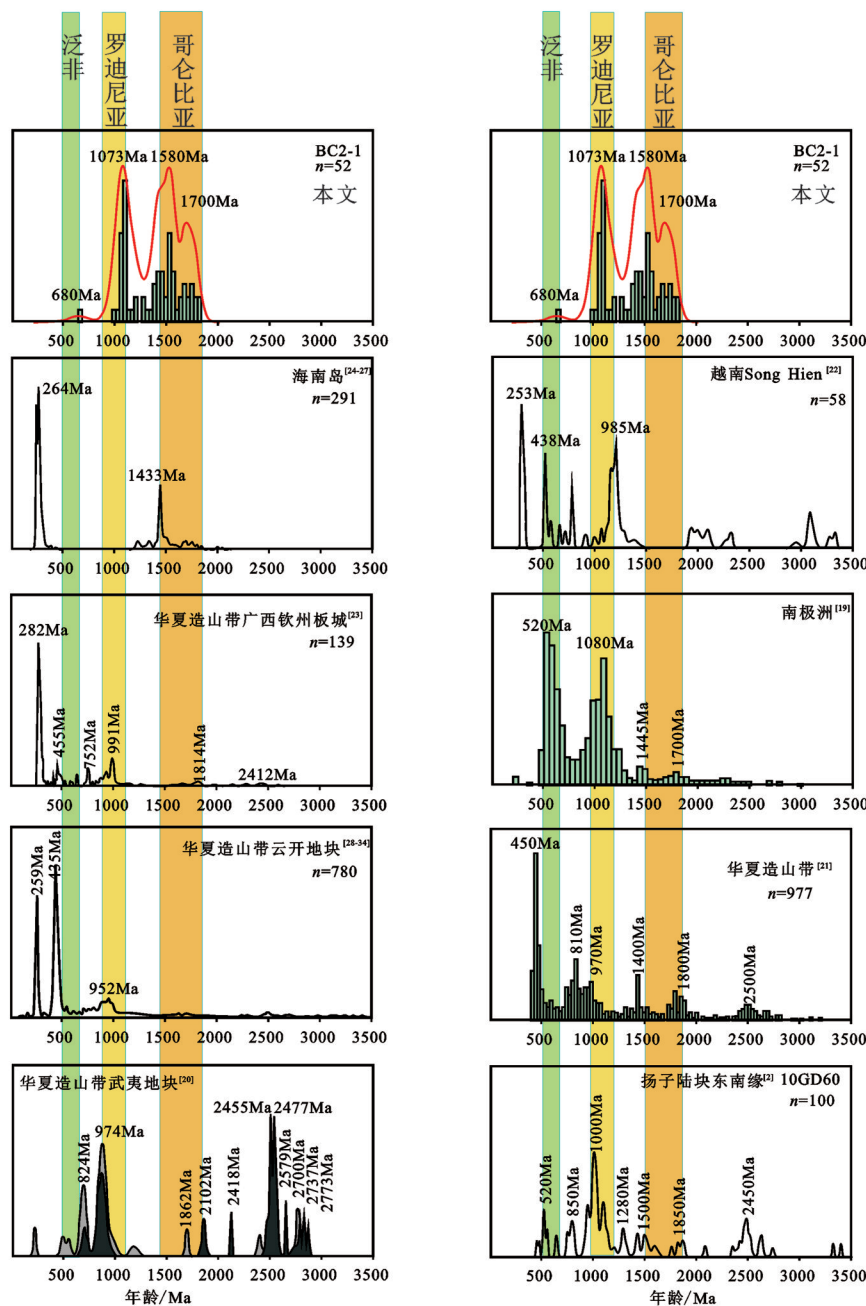


图 4 研究区二叠系峨边组(BC-2-1)与其他地区年龄谱对比

Fig. 4 Detrital zircon U-Pb age probability density diagrams for the Permian clastic sedimentary rocks from Ercha Formation compared with data from other areas

of South China: Evidence From monazite and zircon geochronology in the Cathaysia Block[J]. *Gondwana Research*, 2015, 28:1137-1151.

[4] 张克信, 骆满生, 徐亚东, 等. 中国沉积大地构造图(1:2500000)说明书[M]. 北京:地质出版社, 2015: 1-127.

[5] 张克信, 何卫红, 徐亚东, 等. 中国洋板块地层分布及构造演化[J].

地质前缘, 2016, 23(6):24-30.

[6] 潘桂棠, 陆松年, 肖庆辉, 等. 中国大地构造阶段划分与演化[J]. 地质前缘, 2016, 23(6):1-23.

[7] Li Y C, Zhang K X, He W H, et al.. Division of tectonic-strata superregions in China[J]. *China Geology*, 2018, 2:236-256.

[8] Lin S F, Xing G F, Davis D W, et al. Appalachian-style multi-

- terrane Wilson cycle model for the assembly of South China[J]. *Geology*, 2018, 46: 319–322.
- [9]殷鸿福,吴顺宝,杜远生,彭元桥. 华南是特提斯多岛洋体系的一部分[J]. *地球科学*, 1999, 24(1): 1–12.
- [10]马大铨,黄香定,肖志发,等. 海南岛结晶基底-抱板群层序与时代[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1997.
- [11]李孙雄,云平,林义华,等. 海南省区域地质志[M]. 北京:地质出版社, 2017.
- [12]陆松年,郝国杰,王惠初,等. 中国变质岩大地构造图(1:2 500 000)说明书[M]. 北京:地质出版社,2015.
- [13]汪啸风,马大铨,蒋大海,等. 海南岛地质(一)地层古生物[M]. 北京:地质出版社,1992.
- [14]何卫红,唐婷婷,乐明亮,等. 华南南华纪一二叠纪沉积大地构造演化[J]. *地球科学*, 2014, 39(8): 929–953.
- [15]Liu Y S, Hu Z C, Gao S, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 2008, 257(1/2): 34–43.
- [16]Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al. 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 of mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 2010, 51(1&2): 537–571.
- [17]Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, et al. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(15): 1535–1546.
- [18]Ludwig K R. ISOPLOT 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley Geochronology Center, California, Berkeley, 2003: 39.
- [19]Paulsen T, Deering C, Sliwinski J, et al. Evidence for a spike in mantle carbon outgassing during the Ediacaran period[J]. *Nature Geoscience*, 2017, 10: 930–934.
- [20]Li Z X, Li X H, Wartho J A, et al. Magmatic and metamorphic events during the early Paleozoic Wuyi-Yunkai orogeny, southeastern South China: New age constraints and pressure-temperature conditions[J]. *GSA Bulletin*, 2010, 122: 772–793.
- [21]Wan Y S, Liu D Y, Wilde S. A., et al. Evolution of the Yunkai Terrance, South China: Evidence from SHRIMP zircon U-Pb dating, geochemistry and Nd isotope[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 37: 140–153.
- [22]Halpin J A., Tran H T, Lai C K, et al. U-Pb zircon geochronology and geochemistry from NE Vietnam: A ‘tectonically disputed’ territory between the Indochina and South China blocks[J]. *Gondwana Research*, 2016, 34: 254–273.
- [23]Ke X, Zhang Z Y, Yang J H, et al. Radiolarian and detrital zircon in the Upper Carboniferous to Permian Bancheng Formation, Qinfang Basin, and the geological significance[J]. *Journal of Earth Science*, 2019(in press).
- [24]Chen C H, Hsieh P S, Lee C Y, et al. Two episodes of the Indosinian thermal event on the South China Block: Constraints from LA-ICP-MS U-Pb zircon and electron microprobe monazite ages of the Darongshan S-type granitic suite[J]. *Gondwana Research*, 2011, 19: 1008–1023.
- [25]Li Z X, Li X H, Zhou H W, et al. Grenvillian continental collision in south China: New SHRIMP U-Pb zircon results and implications for the configuration of Rodinia[J]. *Geology*, 2002, 30(2): 163–166.
- [26]Li X H, Li Z X, Li W X, et al. Initiation of the Indosinian Orogeny in South China: Evidence for a Permian Magmatic Arc on Hainan Island[J]. *The Journal of Geology*, 2006, 114: 341–353.
- [27]Li Z X, Li X H, Li W X, et al. Was Cathaysia part of Proterozoic Laurentia?—new data from Hainan Island, South China[J]. *Terra Nova*, 2008, 20: 154–164.
- [28]Yu J H, O’Reilly, Wang S Y, et al. Components and episodic growth of Precambrian crust in the Cathaysia Block, South China: Evidence from U-Pb ages and Hf isotopes of zircons in Neoproterozoic sediments[J]. *Precambrian Research*, 2010, 181: 97–114.
- [29]Wang Y J, Wu C M, Zhang A M, et al. Kwangsian and Indosinian reworking of the eastern South China Block: Constraints on zircon U-Pb geochronology and metamorphism of amphibolites and granulites[J]. *Lithos*, 2011, 127: 239–260.
- [30]彭松柏,金振民,刘云华,等. 云开造山带强过铝深熔花岗岩地球化学、年代学及构造背景[J]. *地球科学*, 2006, 1: 110–120.
- [31]覃小锋,潘元明,李江,等. 桂东南云开地区变质杂砂锆石 SHRIMP U-Pb 年代学[J]. *地质通报*, 2006, 25(5): 553–559.
- [32]Zhang A M, Wang Y J, Fan W M, et al. Earliest Neoproterozoic (ca. 1.0 Ga) arc-back-arc-basin nature along the northern Yunkai Domain of the Cathaysia Block: geochronological and geochemical evidence from the metabasite[J]. *Precambrian Research*, 2012, 220/221: 217–233.
- [33]Zhao L, Guo F, Fan W M, et al. Crustal evolution of the Shiwandashan area in South China: Zircon U-Pb-Hf isotopic records from granulite enclaves in Indo-Sinian granites[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(19): 2028–2038.
- [34]Chen C H, Liu Y H, Lee C Y, et al. Geochronology of granulite, charnockite and gneiss in the poly-metamorphosed Gaozhou Complex (Yunkai Massif), South China: Emphasis on the in-situ EMP monazite dating[J]. *Lithos*, 2012, 106: 83–92.
- [35]张志存. 海南岛西部筴类再研究[J]. *微体古生物学报*, 1992, 9(2): 151–164.
- [36]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[J]. *古生物学报*, 1996, 34(3): 301–315.
- [37]李国胜. 石炭纪二叠纪的海南岛何在? [J]. *南海地质研究*, 1995, (七): 69–79.
- [38]马力,陈焕疆,甘克文,等. 中国南方大地构造和海相油气地质(上) [M]. 北京:地质出版社, 2005: 1–451.