https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.012

海南岛西北部早古生代安山岩的识别及其大地构造意义

周　云[1],赵永山[1],杜宇晶[1],蔡永丰[1,2],冯佐海[1,2],刘希军[1,2],宋宏星[1]

1. 桂林理工大学广西隐伏金属矿产勘查重点实验室,广西桂林　541004
2. 桂林理工大学广西有色金属隐伏矿床勘查及材料开发协同创新中心,广西桂林　541004

摘　要: 为阐明海南岛西北部早古生代构造演化特征,对海南岛西北部邦溪-晨星地区出露的安山岩展开了详细的岩相学和锆石U-Pb年代学分析.安山岩的主要矿物组成为斜长石、角闪石、黑云母和玻璃质.LA-ICP-MS锆石U-Pb定年结果表明,两个代表性的安山岩样品给出了452±8 Ma和453±8 Ma的形成年龄,暗示海南岛西北部存在早古生代火山作用.这些安山岩的形成时代与冈瓦纳大陆北缘各微陆块记录的早古生代岩浆活动信息相似,在时空上与金沙江-点苍山-哀牢山构造带和印支地块分布的早古生代岩浆岩具有耦合性.综合研究认为,点苍山-哀牢山、Truong Son、Tam Ky-Phuoc Son、Kontum和海南岛等地区可能发育原特提斯洋的支洋盆.

关键词: 安山岩;早古生代;原特提斯洋;锆石U-Pb定年;海南岛;岩石学.

中图分类号: P597　　**文章编号:** 1000－2383(2021)11－3850－11　　**收稿日期:** 2021－01－03

Identification of Early Paleozoic Andesite in Northwestern Hainan Island and Its Geotectonic Significances

Zhou Yun[1], Zhao Yongshan[1], Du Yujing[1], Cai Yongfeng[1,2], Feng Zuohai[1,2], Liu Xijun[1,2], Song Hongxing[1]

1. *Guangxi Key Laboratory of Hidden Metallic Ore Deposits Exploration, College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin　541004, China*
2. *Collaborative Innovation Center for Exploration of Hidden Nonferrous Metal Deposits and Development of New Materials in Guangxi, Guilin University of Technology, Guilin　541004, China*

Abstract: In order to decipher the Early Paleozoic tectonic evolution of the northwestern Hainan Island, detailed petrography and zircon U-Pb geochronological analyses of andesites in the Bangxi-Chenxing area were carried out in this study. The andesites are mainly composed of plagioclase, hornblende, biotite and glasses. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results show that two representative andesite samples yield ages of 452±8 Ma and 453±8 Ma, indicating that there is andesitic magmatism in the Bangxi-Chenxing area during the Early Paleozoic. The formation age of the andesites is similar to the time of Early Paleozoic magmatism recorded in the micro-continents along the northern Gondwana. They also show a good coupling with the Early Paleozoic igneous rocks in the Jinshajiang-Diancangshan-Ailaoshan tectonic belt and in the Indochina block. Integrated with regional data, the Diancangshan-Ailaoshan, Truong Son, Tam Ky-Phuoc Son, Kontum and Hainan Island were likely to be branch of Proto-Tethys Oceans during the Early Paleozoic.

Key words: andesite; Early Paleozoic; Proto-Tethys Ocean; zircon U-Pb dating; Hainan Island; petrology.

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.41503021);广西自然科学基金创新研究团队项目(No.2020GXNSFGA297003).

作者简介: 周云(1988－),女,副教授,博士,主要从事岩石地球化学研究.ORCID:0000-0001-9688-6659. E-mail:zhouyun@glut.edu.cn

引用格式: 周云,赵永山,杜宇晶,等,2021.海南岛西北部早古生代安山岩的识别及其大地构造意义.地球科学,46(11):3850－3860.

0　引言

新元古代Rodinia超大陆裂解后逐渐演化产生了原特提斯洋(von Raumer and Stampfli, 2008),其形成时代多被认为是震旦纪至早古生代,并于早古生代晚期由于Gondwana大陆的聚合而关闭(钟大赉, 1998; Li *et al.*,2018a, 2018b).原特提斯洋的遗迹主要呈近东西向(现今方位)分布在东亚各微陆块,如在我国的昆仑、塔里木、羌塘、柴达木、祁连、秦岭等地区均保存有大量510~400 Ma的岩浆活动、变质作用和沉积作用等地质记录(李三忠等, 2016; 杨鑫等, 2020).前人在华南扬子地块西南缘的昌宁-孟连缝合带、澜沧江缝合带和腾冲-保山地块等地区相继报道了早古生代蛇绿岩、变火山岩和过铝质花岗岩(Wang *et al.*, 2013a, 2013b; Nie *et al.*, 2015; 吴喆等, 2020)等岩浆作用信息,暗示原特提斯洋向东南延伸进入了我国的滇西一带,昌宁-孟连缝合带、澜沧江缝合带、腾冲-保山一带发育原特提斯洋主洋盆或支洋盆.近年来,Liu *et al.* (2018)在点苍山-哀牢山构造带识别出了早古生代富铌玄武岩、高镁安山岩和花岗闪长岩,表明点苍山-哀牢山构造带亦发育有原特提斯洋支洋盆.然而,对于原特提斯洋向东南延伸至何处,目前仍不明了,仍缺少精细的年代学证据,不利于深入认识原特提斯洋的构造演化历史.本文在海南岛西北部的西昌-邦溪一带识别出了早古生代安山岩,锆石U-Pb年代学显示其形成于~452 Ma,反映海南岛存在早古生代岩浆活动,其形成时代与点苍山-哀牢山等地区分布的岩浆岩具有可对比性,暗示海南岛可能存在原特提斯洋的支洋盆,这一新认识为深入理解原特提斯洋的构造格局和Gondwana大陆的聚合过程提供了新的证据.

1　区域地质背景和样品描述

1.1　区域地质背景

海南岛位于华南板块的最南缘(图1),一般被认为是华夏地块的组成部分.岛内构造线方向主要呈东西向、北东向和北西向,自南向北分布有九所-陵水、尖峰-吊罗、昌江-琼海和王五-文教4条隐伏断裂(图1;广东省地质矿产局, 1988).

岛内分布的已知最老地层为元古界抱板群、石碌群和石灰顶组,主要由一套高绿片岩相-角闪岩相变质岩系组成(Li *et al.*, 2008).寒武系主要发育在三亚东北部和万宁北部地区,主要由石英砂岩、泥质粉砂岩、粘土岩、千枚岩、硅质岩和碳酸盐岩等组成.奥陶系下部主要由石英砂岩、碳酸盐岩、页岩等组成,上部见粉砂岩、粘土岩、千枚岩、变质细砂岩、碳质板岩夹火山岩,主要分布于邦溪、儋州、屯昌、万宁、五指山、乐东、东方等地区(广东省地质矿产局, 1988).志留系、石炭系、二叠系、白垩系、第四系和少量三叠系也发育于海南岛(图1).

海南岛岩浆作用异常强烈,形成了大规模不同期次的岩浆岩,其中,侵入岩分布面积约占全岛面积的51%,火山岩出露面积约为13%.侵入岩基本上遍布整个海南岛,并以二叠纪和中生代花岗岩类为主(图1);火山岩以新生代玄武岩为主,主要见于海南岛北部的第四系(图1).少量元古代(Li *et al.*, 2008)、志留纪-二叠纪(李献华等, 2000; 谢才富等, 2006; 苟琪钰等, 2019)和白垩纪(Zhou *et al.*, 2015)花岗质岩石和基性-变基性岩分布于海南岛抱板群、昌江、琼中、屯昌、三亚等地区.

1.2　样品描述

本文研究的安山岩样品(样品号CX1621和CX1624)分别采自海南岛西北部的邦溪和西昌晨星地区(图1),它们呈似层状或不规则状分别产于《1:50万海南省地质图》划分的奥陶系和二叠系中,其中,邦溪地区安山岩呈东西向展布,出露宽大于50 m,表面风化较严重,呈土黄-土灰色(图2a),新鲜面呈灰黑色,斑状结构,块状构造(图2b),斑晶含量约为80%,主要为斜长石(~60%)、角闪石(~30%)和黑云母(~10%),基质含量约为20%,主要为细颗粒斜长石(~60%)、玻璃质(~35%)和少量黑云母(~5%);斜长石和角闪石斑晶多呈自形-半自形,颗粒大小多在200~300 μm(图2c).西昌晨星地区的安山岩整体呈北东向展布,出露宽大于20 m,岩石较新鲜,碎裂明显(图2d),斑状结构,块状构造,斑晶含量约为90%,主要为斜长石(~50%)、黑云母(~20%)、角闪石(~20%)和石英(~10%),基质含量约为10%,主要为细粒斜长石(~60%)、黑云母(~30%)和玻璃质(~10%);斑晶斜长石和角闪石多呈残斑状(图2e);本文的年代学研究结果显示本区安山岩的形成时代为晚奥陶世,暗示本区原划分的二叠系可能需要解体,部分地层的时代至少不晚于晚奥陶世.

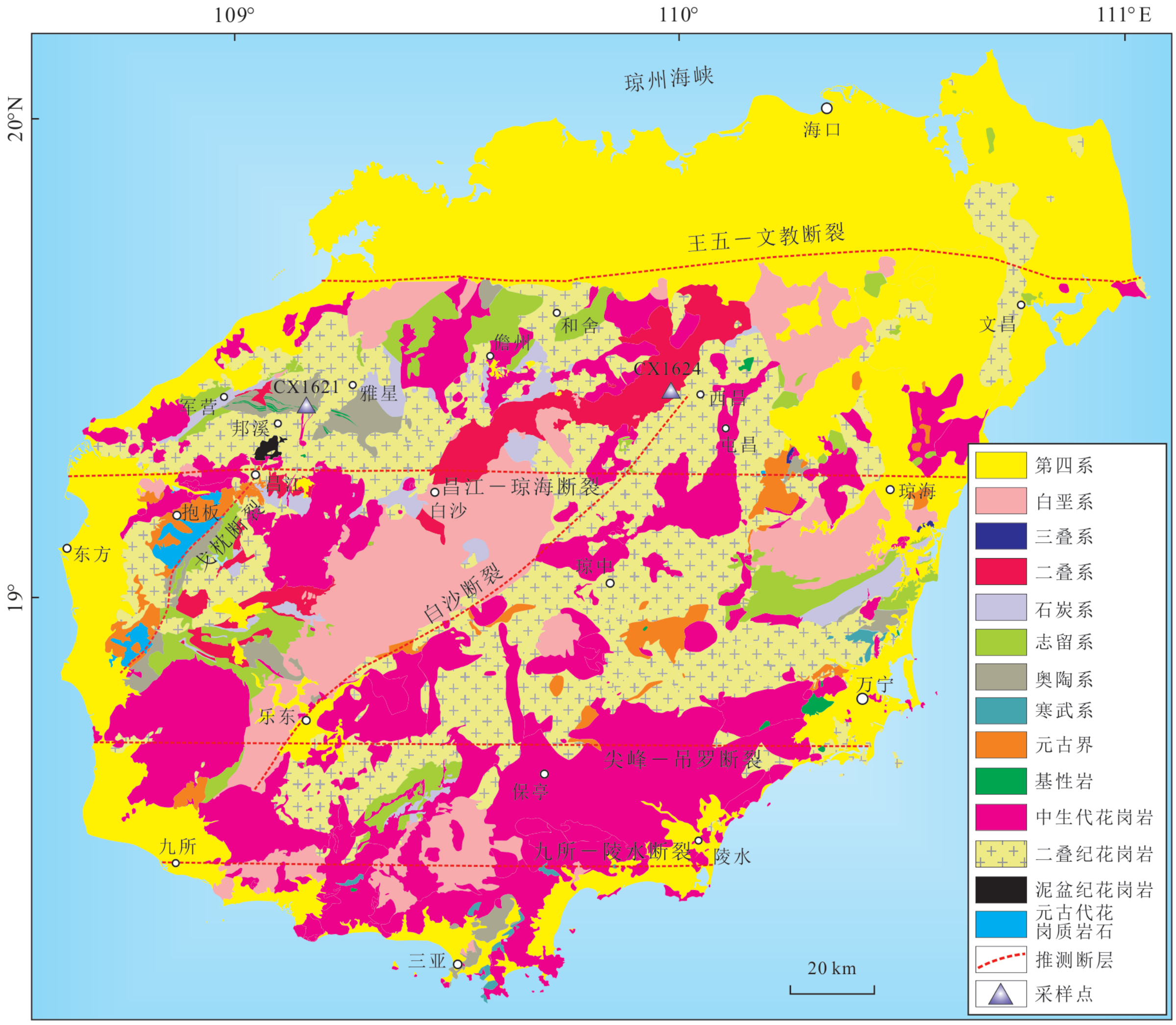

图1 海南岛地质简图

Fig.1 Simplified geological map of Hainan Island

2 锆石年代学分析方法

安山岩中锆石的挑选采用常规的重选和磁选法进行，进一步在双目镜下挑选出颗粒大、晶形好的锆石，并与锆石标样一起粘贴在环氧树脂上制作锆石靶，锆石靶的制作在重庆宇劲科技有限公司完成，锆石靶制作完成后对其进行适当打磨、抛光.

锆石U-Pb年代学测试、透射光、反射光和CL（锆石阴极发光图）图像的拍摄均在桂林理工大学广西隐伏金属矿产勘查重点实验室完成. CL图像的拍摄在JXA8230型电子探针仪上进行，分析电压为15 kV，电流为2×10^{-8} A，通过锆石CL图像可查明其内部结构，为年龄测试点的选择和锆石成因类型的判定提供依据.

锆石U-Pb定年采用激光-电感耦合等离子体质谱仪（LA-ICP-MS）进行，ICP-MS型号为Agilent-7500cx，测试所采用的激光剥蚀系统为NWR-193，输出波长为193 nm，烧蚀斑点为2～150 μm. 实验时采用的激光束斑直径为32 μm，锆石年龄计算采用标准锆石TEM（其年龄为416.75±0.24 Ma）作为外标，元素含量采用美国国家标准物质局人工合成硅酸盐玻璃NIST610作为外标. 实验数据的分析、处理及U-Th-Pb同位素比值和年龄的计算等均采用ICPMSDataCal7.2软件. 锆石U-Pb年龄谐和图的绘制和加权平均值的计算采用国际标准程序Isoplot4.11，单个数据点误差均为1σ，年龄加权平均值置信度为95%.

3 分析结果

安山岩样品的锆石U-Pb定年结果见表1. 用于定年的锆石呈透明状，颜色以浅棕色-褐色为主. 大

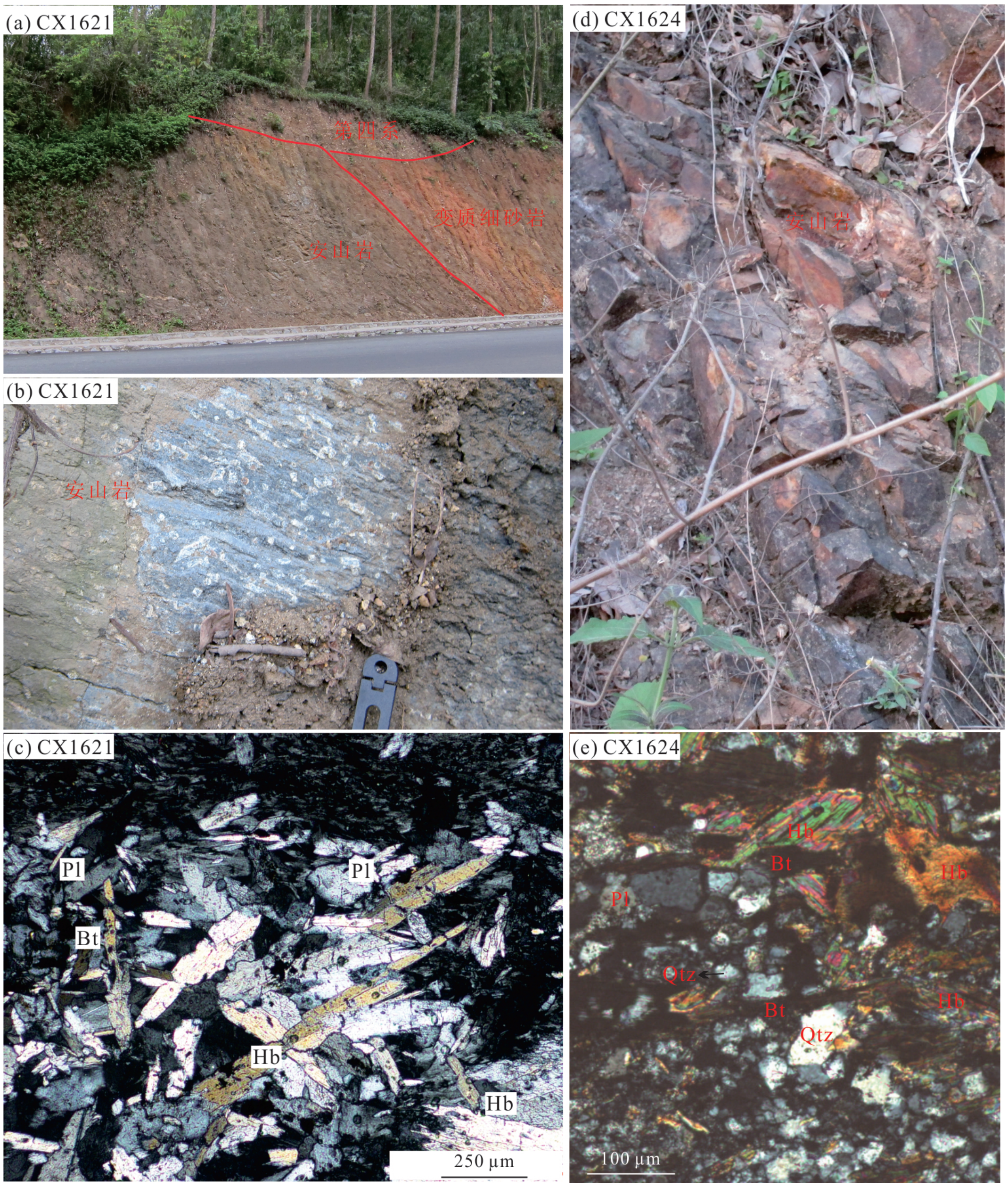

图 2　海南岛西北部邦溪-西昌安山岩野外照片(a, b, d)和显微照片(c, e)

Fig.2　Field photos (a, b, d) and photomicrographs (c, e) of the representative andesites from Bangxi-Xichang, northwestern Hainan Island

a.岩石表面风化较严重; b.新鲜面为斑状结构; d.块状构造; c, e.斑晶主要为斜长石和角闪石. Pl. 斜长石;Hb. 角闪石;Bt. 黑云母;Qtz. 石英

部分锆石呈柱状,长度一般为 100～150 μm,内部发育明显的振荡环带(图 3),其 Th/U 比值较高,均大于 0.2(表 1),为典型的岩浆成因锆石.

样品 CX1621 进行了 20 个锆石点分析测试,其 Th/U 比值变化于 0.23～0.90.有 16 个测试点给出了 452±8 Ma (MSWD = 0.23)的 $^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄(图 3a),代表了其形成年龄;另外有 2 个点给出了 1 428 Ma 和 1 369 Ma 的 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄,可能代表了捕获锆石或继承锆石的年龄.

样品 CX1624 进行了 20 个锆石点的分析,其 Th/U 比值变化范围为 0.24～1.21.其中,有 15 个测试点给出了 453±8 Ma (MSWD = 0.54)的 $^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄(图 3b),代表了其形成时代;另外有 2 个点给出了 1 533 Ma 和 1 528 Ma、3 个点给出了 1 877～1 814 Ma 的 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄,推测为捕获锆石或继承锆石的年龄.

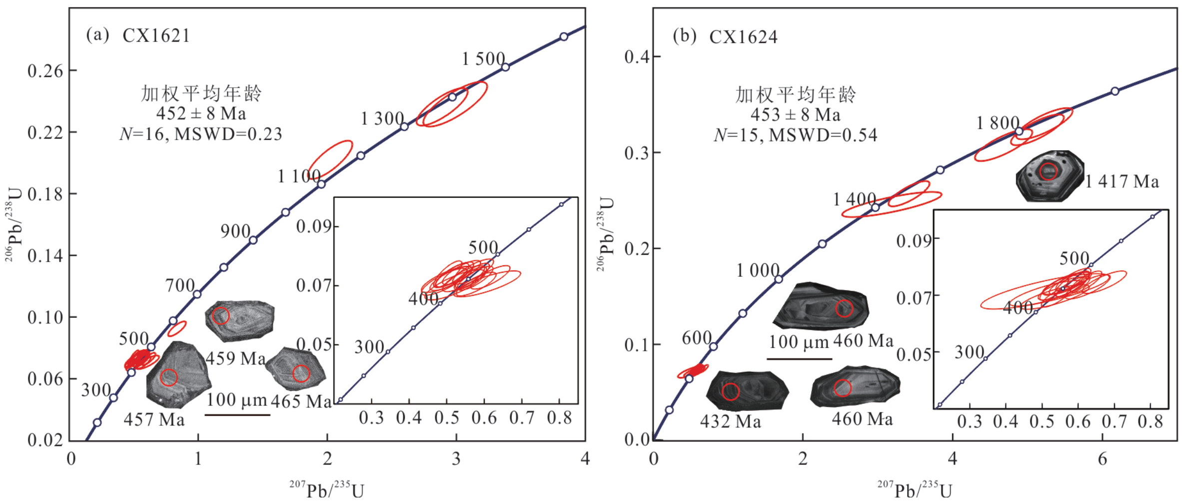

图3 海南岛西北部邦溪-西昌安山岩锆石U-Pb年龄谐和图和代表性锆石CL图像

Fig.3 Zircon U-Pb concordia diagrams and CL images of the andesites from Bangxi-Xichang, northwestern Hainan Island

4 讨论

4.1 海南岛西北部邦溪-晨星地区火山岩形成时代

对于海南岛西北部邦溪-晨星一带分布的火山岩的形成时代前人开展过一些研究.张业明等(1998)提出海南岛邦溪-军营一带变基性火山岩的形成时代可能为～1 165 Ma(Sm-Nd模式年龄).李献华等(2000)认为出露在昌江-琼海断裂带北侧的屯昌晨星和昌江邦溪地区的变基性岩的形成时代为～333 Ma(Sm-Nd等时线年龄),代表了东古特提斯洋的残片.丁式江等(2002)的研究认为屯昌变火山岩形成于～527 Ma(锆石U-Pb交点年龄).He *et al.*(2018)将邦溪-晨星地区变基性火山岩的形成时代限定为330～328 Ma(全岩Ar-Ar和LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄).Li *et al.*(2018b)获得本区安山质-英安质岩石的年龄为～350 Ma,同时还获得了～433 Ma的年龄峰值,并认为后者代表捕获锆石年龄.

本文对采自邦溪和西昌晨星地区两个代表性安山岩样品的年代学研究分别获得了452±8 Ma和453±8 Ma的年龄,同时存在少量～1 400 Ma和～1 800 Ma的老年龄信息(图3),这些年龄信息与邦溪地区奥陶系和西昌晨星地区二叠系沉积岩(本文研究样品的围岩)中碎屑锆石的年龄分布不一致(张立敏等,2017),说明本文研究样品中的～450 Ma锆石并非是捕获围岩的.此外,样品中的锆石未见含有石英、钾长石、磷灰石、白云母、黑云母等壳源矿物包裹体,也表明这些锆石并非为捕掳锆石.CL图像显示,锆石多具有继承核和振荡环带,其中继承核给出了元古代年龄,环带为～450 Ma(图3b),说明部分锆石是元古代锆石的继承,而～450 Ma应该代表了样品的形成时代.上述研究成果暗示邦溪-晨星一带分布的火山岩可能为一套混杂岩,包含早古生代(～450 Ma)、早石炭世(350～328 Ma)和元古代等不同时代岩石类型.

4.2 大地构造意义

Rodinia超大陆在新元古代时期裂解后拉开了原特提斯洋的演化序幕(von Raumer and Stampfli, 2008; Li *et al.*, 2018b),原特提斯洋的俯冲作用促使游离在冈瓦纳大陆北缘的各微陆块相继拼贴到冈瓦纳大陆.前人在冈瓦纳大陆北缘的土耳其、伊朗、巴基斯坦、尼泊尔、印支、滇缅泰马等微陆块开展了大量研究工作,获得了众多新元古代晚期-早古生代岩浆活动信息(图4).比如,Okay *et al.*(2008)在土耳其西北部识别出了570±3 Ma和569±2 Ma的花岗质岩石和569±1 Ma的花岗质脉体,并认为这些花岗质侵入岩形成于活动大陆边缘环境,是对原特提斯洋俯冲的响应.伊朗中部Kuh-e-Sarhangi地区花岗质岩石的形成时代为576～536 Ma(Rossetti *et al.*, 2015)、变基性岩的锆石U-Pb年龄为554～534 Ma(Hosseini *et al.*, 2015),它们的形成被认为与原特提斯洋的斜向俯冲汇聚有关(Hosseini *et al.*, 2015; Rossetti *et al.*, 2015).Sajid *et al.*(2018)在巴基斯坦西北部Utla和Mansehra地区报道了480～466 Ma的花岗岩,并认为其形成于安第斯型的活动大陆边缘,是原特提斯洋俯冲至冈瓦纳大陆北缘的产物.尼泊尔中西部发育大量早古生代花岗质岩石(512～467 Ma)及捕掳

表 1　海南岛西北部邦溪-西昌安山岩锆石 U-Pb 同位素测试结果

Table 1　Zircon U-Pb dating results of the andesites from Bangxi-Xichang, northwestern Hainan Island

点号	含量 (10^{-6})		Th/U	同位素比值						年龄 (Ma)					
	^{232}Th	^{238}U		^{207}Pb/^{206}Pb	1σ	^{207}Pb/^{235}U	1σ	^{206}Pb/^{238}U	1σ	^{207}Pb/^{206}Pb	1σ	^{207}Pb/^{235}U	1σ	^{206}Pb/^{238}U	1σ
样品 CX1621															
CX1621-01	96	424	0.23	0.090 0	0.004 5	2.991 7	0.163 4	0.238 0	0.009 6	1 428	96	1 406	42	1 376	50
CX1621-02	201	482	0.42	0.050 8	0.003 3	0.521 3	0.033 2	0.073 9	0.002 8	232	152	426	22	459	17
CX1621-03	117	322	0.36	0.052 3	0.003 2	0.539 5	0.033 5	0.074 5	0.002 7	298	141	438	22	463	16
CX1621-04	206	246	0.84	0.050 4	0.004 6	0.500 6	0.044 9	0.072 2	0.002 9	213	200	412	30	449	18
CX1621-05	223	247	0.90	0.053 9	0.004 6	0.522 5	0.053 0	0.070 3	0.003 4	369	194	427	35	438	20
CX1621-06	364	453	0.80	0.060 8	0.003 3	0.616 1	0.034 7	0.072 9	0.002 6	632	117	487	22	453	16
CX1621-07	183	359	0.51	0.054 4	0.003 6	0.545 1	0.036 8	0.072 4	0.002 9	391	148	442	24	451	18
CX1621-08	243	409	0.59	0.065 2	0.003 6	0.835 4	0.045 7	0.092 4	0.003 2	789	119	617	25	570	19
CX1621-09	626	868	0.72	0.056 9	0.003 0	0.575 7	0.031 5	0.072 6	0.002 7	487	117	462	20	452	16
CX1621-10	162	297	0.54	0.058 6	0.003 4	0.578 4	0.035 1	0.070 6	0.002 6	550	126	463	23	440	16
CX1621-11	162	255	0.64	0.062 3	0.006 0	0.607 9	0.058 8	0.070 7	0.002 9	683	208	482	37	440	17
CX1621-12	283	575	0.49	0.055 2	0.002 8	0.563 2	0.028 4	0.072 6	0.002 5	420	115	454	18	452	15
CX1621-13	400	1 356	0.30	0.087 3	0.003 9	2.889 5	0.130 9	0.236 3	0.008 0	1 369	86	1 379	34	1 367	42
CX1621-14	73	173	0.42	0.072 3	0.004 4	2.021 6	0.114 1	0.201 9	0.008 2	994	118	1 123	38	1 186	44
CX1621-15	230	340	0.68	0.050 7	0.003 5	0.511 9	0.037 2	0.072 5	0.002 7	233	159	420	25	451	16
CX1621-16	87	185	0.47	0.050 6	0.004 4	0.494 1	0.040 6	0.071 4	0.003 0	233	202	408	28	444	18
CX1621-17	222	464	0.48	0.050 5	0.002 9	0.514 3	0.029 6	0.073 5	0.002 7	217	135	421	20	457	16
CX1621-18	186	421	0.44	0.055 3	0.003 4	0.570 3	0.036 0	0.074 8	0.002 8	433	144	458	23	465	17
CX1621-19	590	712	0.83	0.049 6	0.002 4	0.503 0	0.024 8	0.073 9	0.003 0	176	113	414	17	460	18
CX1621-20	487	586	0.83	0.056 3	0.002 7	0.568 4	0.029 8	0.073 4	0.002 8	461	107	457	19	456	17
样品 CX1624															
CX1624-01	318	790	0.40	0.060 3	0.002 7	0.621 5	0.028 8	0.074 7	0.002 5	613	94	491	18	464	15
CX1624-02	65	89	0.73	0.110 9	0.006 1	4.680 6	0.253 1	0.307 7	0.011 0	1 814	100	1 764	45	1 729	54
CX1624-03	259	392	0.66	0.064 8	0.003 6	0.672 2	0.040 5	0.074 5	0.002 6	769	112	522	25	463	16
CX1624-04	112	179	0.63	0.092 0	0.010 4	3.188 8	0.439 2	0.245 8	0.008 6	1 533	219	1 454	107	1 417	45
CX1624-05	725	659	1.10	0.055 9	0.003 6	0.575 9	0.037 0	0.074 2	0.002 5	456	146	462	24	461	15
CX1624-06	45	66	0.68	0.052 4	0.013 5	0.508 4	0.117 2	0.071 3	0.004 1	306	500	417	79	444	25
CX1624-07	74	152	0.49	0.056 7	0.004 7	0.569 0	0.044 4	0.074 2	0.002 6	480	183	457	29	461	15
CX1624-08	90	147	0.61	0.114 8	0.005 3	5.225 1	0.248 5	0.330 0	0.010 8	1 877	84	1 857	41	1 838	52
CX1624-09	81	230	0.35	0.055 7	0.003 9	0.560 0	0.038 2	0.073 9	0.002 6	443	157	452	25	460	16
CX1624-10	116	163	0.72	0.053 7	0.007 9	0.513 0	0.067 5	0.070 6	0.002 9	367	294	420	45	440	18
CX1624-11	271	730	0.37	0.053 8	0.002 7	0.533 5	0.026 0	0.072 1	0.002 6	365	108	434	17	449	16
CX1624-12	232	674	0.34	0.056 1	0.002 8	0.539 0	0.027 1	0.069 3	0.002 3	454	109	438	18	432	14
CX1624-13	312	476	0.66	0.058 6	0.003 2	0.585 8	0.030 8	0.073 0	0.002 4	550	119	468	20	454	15
CX1624-14	109	323	0.34	0.057 0	0.003 0	0.582 4	0.031 9	0.074 0	0.003 0	500	121	466	20	460	18
CX1624-15	277	292	0.95	0.055 4	0.006 6	0.534 8	0.063 2	0.069 4	0.002 9	432	267	435	42	432	17
CX1624-16	181	149	1.21	0.095 0	0.005 1	3.417 7	0.181 0	0.257 0	0.008 7	1 528	102	1 508	42	1 475	45
CX1624-17	230	408	0.56	0.062 6	0.004 6	0.626 0	0.041 3	0.072 9	0.002 8	694	158	494	26	454	17
CX1624-18	187	696	0.27	0.055 2	0.003 1	0.586 5	0.032 0	0.075 5	0.002 6	420	121	469	20	469	15
CX1624-19	135	182	0.74	0.055 7	0.004 7	0.556 2	0.044 3	0.072 3	0.002 7	439	187	449	29	450	16
CX1624-20	40	163	0.24	0.112 9	0.005 1	5.131 5	0.233 9	0.323 6	0.010 6	1 846	83	1 841	39	1 807	52

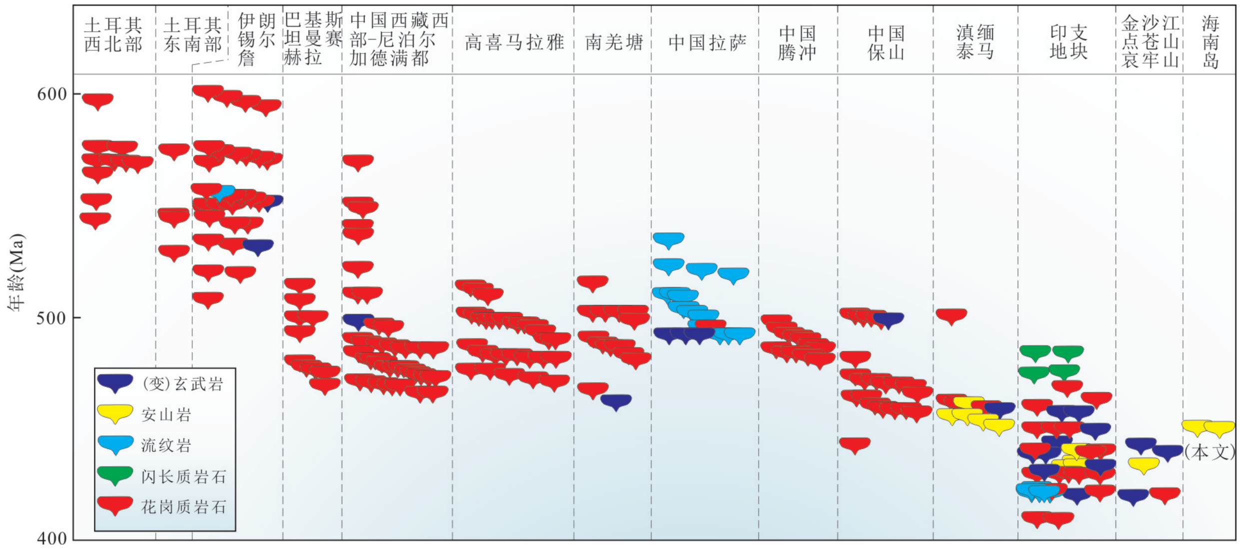

图4　冈瓦纳大陆北缘各微陆块新元古代晚期-早古生代岩浆活动年龄信息

Fig.4　Late Neoproterozoic-Early Paleozoic igneous rocks of different micro-continents along the northern Gondwana

年龄数据来自Okay *et al*.(2008)等近百篇文献,不逐一列出

体(478±6 Ma和477±4 Ma),它们的形成多被认为与原特提斯洋的俯冲汇聚有关(Cawood *et al*., 2007).滇缅泰马地块发育的早古生代岩浆岩以变玄武岩(459±14 Ma, Nie *et al*., 2015)、变安山岩(462~454 Ma,Nie *et al*., 2015)、浅色花岗岩(463~462 Ma,Wang *et al*., 2013a)和片麻状花岗岩(502~460 Ma,Lin *et al*., 2013; Wang *et al*., 2013a; 徐畅等, 2020)为主.其中,变玄武岩起源于交代的地幔源区(Nie *et al*., 2015),为弧岩浆作用的产物(Lin *et al*., 2013),反映了滇缅泰马地块保存有原特提斯洋俯冲的记录(Lin *et al*., 2013; Nie *et al*., 2015).近年来,在印支地块的Truong Son、Tam Ky-Phuoc Son和Kontum等地区也有大量早古生代岩浆活动信息的报道,主要有436~423 Ma流纹岩,447~434 Ma英安岩-安山岩,467~412 Ma花岗岩,485~471 Ma花岗闪长岩,485~470 Ma辉长闪长岩,457~438 Ma辉长岩、辉绿岩,450~434 Ma变辉长岩捕掳体和474~428 Ma片麻岩(Wang *et al*., 2021a, 2021b),其中,辉长岩具有N-MORB地球化学特征,部分闪长质岩石和流纹岩具有埃达克质岩石的地球化学特征(Wang *et al*., 2021a, 2021b),暗示它们的形成与洋壳俯冲作用有关.

我国境内的龙木错-双湖、昌宁-孟连等缝合带/构造带中亦保存有丰富的早古生代岩浆活动记录,如南羌塘地块保存有大量早古生代花岗质片麻岩和少量变玄武岩,它们的形成时代分别为505~468 Ma(Guynn *et al*., 2012)和463±5 Ma(Peng *et al*., 2014),其形成多被认为与原特提斯洋的俯冲事件有关.Ding *et al*.(2015)在拉萨地块识别出了一套寒武纪超钾质流纹岩(522~496 Ma);同时代的变流纹岩(536~492 Ma)和变玄武岩(492 Ma, Zhu *et al*., 2012)亦存在于拉萨地块中,这些岩石普遍被认为形成于安第斯型的活动大陆边缘,是对原特提斯洋俯冲的响应(Zhu *et al*., 2012; Ding *et al*., 2015).在滇西的腾冲地块,广泛发育早古生代片麻状花岗岩(488~484 Ma,Wang *et al*., 2013a)、花岗片麻岩(495~487 Ma,Zhao *et al*., 2016)和浅色花岗岩(492~485 Ma,Wang *et al*., 2013a),这些岩石具有相对亏损的Hf同位素组成($\varepsilon_{Hf}(t)=-1.16\sim+2.09$),表明其成岩过程中有亏损地幔物质的加入(Zhao *et al*., 2016),它们的形成被认为与原特提斯洋俯冲过程中的板片断离有关(Zhao *et al*., 2016),反映了腾冲地块是冈瓦纳大陆北缘陆块向东南延伸的部分(Wang *et al*., 2013a).滇西的保山地块早古生代岩浆岩的主要岩石类型有变玄武岩(499±2 Ma,杨学俊等, 2012)和花岗质岩石(502~448 Ma,Wang *et al*., 2013b; Li *et al*., 2016),它们的形成多与原特提斯洋俯冲板片的回撤或断离有关(Li *et al*., 2016).昌宁-孟连缝合带上早古生代(471±5 Ma,刘桂春等, 2017)蛇绿混杂岩的识别暗示该区洋壳的俯冲消减作用至少于早奥陶世启动.

上述数据资料显示,(1)土耳其和伊朗记录的早古生代岩浆作用信息要早于冈瓦纳大陆北缘的其他微陆块(图4),暗示原特提斯洋的俯冲可能首

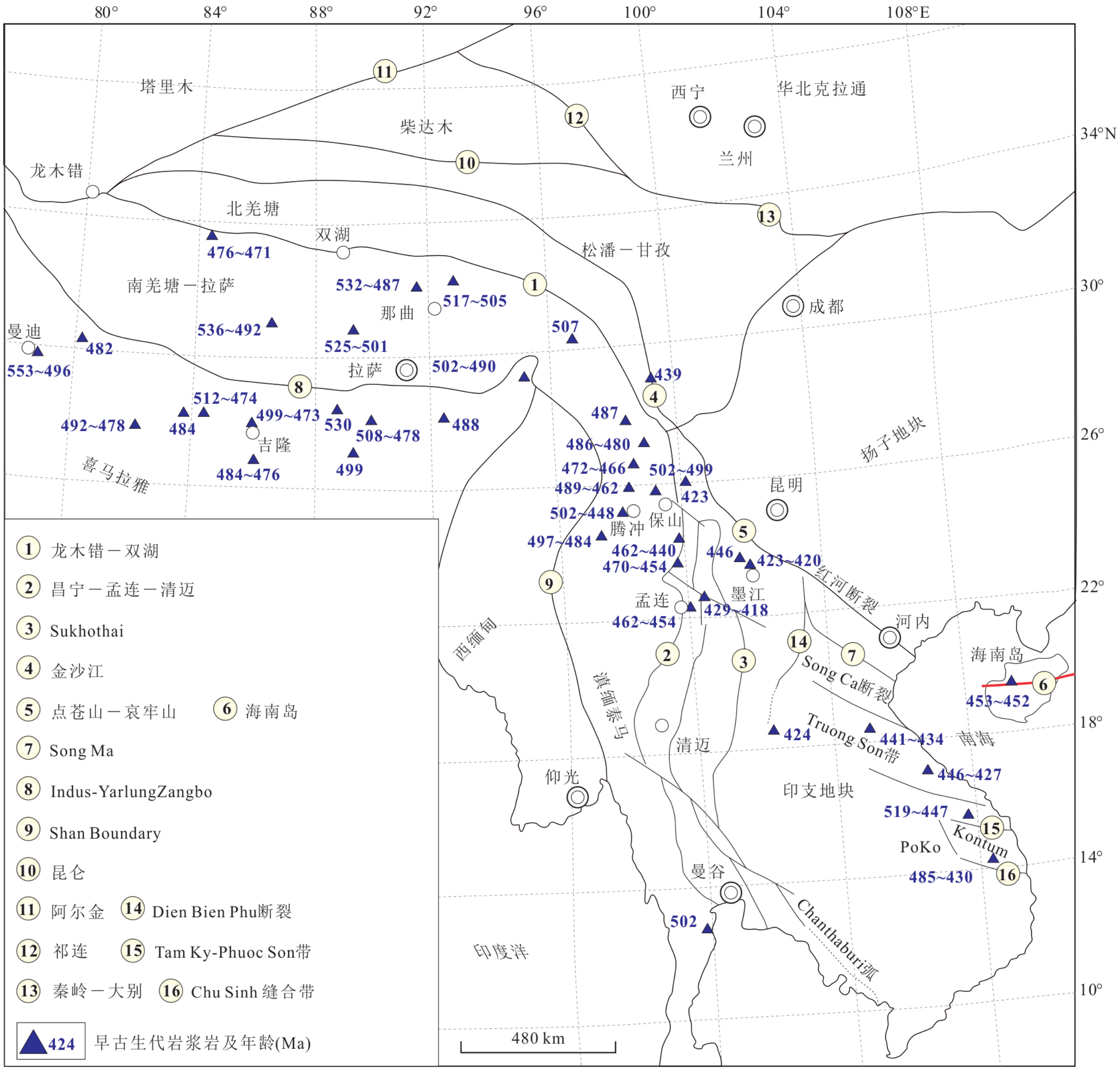

图 5　东南亚原特提斯洋构造格局简图

Fig.5　Sketched tectonic framework of Proto-Tethys Ocean in SE Asia

改编自 Nie *et al*. (2015)和 Wang *et al*. (2021a);年龄数据来自 Guynn *et al*. (2012)等近百篇文献,不逐一列出

先发生在冈瓦纳大陆西北端(如土耳其和伊朗地区);(2)龙木错-双湖-昌宁-孟连缝合带/构造带记录的大量早古生代岩浆岩多被认为是原特提斯洋俯冲-碰撞过程中的产物,推测龙木错-双湖-昌宁-孟连缝合带/构造带代表了原特提斯洋主洋盆的位置.Jian *et al*. (2009)在金沙江蛇绿岩中识别出了 439±4 Ma 的斜长角闪岩捕掳体;Liu *et al*. (2018)在点苍山-哀牢山构造带报道了 423 Ma 花岗岩闪长岩、446～420 Ma 玄武岩和 435 Ma 安山岩,且这些岩石分别具有I型花岗岩、富铌玄武岩和高镁安山岩的地球化学特征,具有此种地球化学特征的岩石组合往往代表了与俯冲作用相关的构造背景;Wang *et al*. (2021a, 2021b)在印支地块的 Truong Son、Tam Ky-Phuoc Son 和 Kontum 地区厘定出了一系列早古生代(450～423 Ma)岩浆岩,包括具有 N-MORB 地球化学特征的辉长岩和埃达克质岩石,指示为岛弧环境;本文在海南岛西北部识别出了～452 Ma安山岩(图 3),它们在时空上与金沙江-点苍山-哀牢山构造带、Truong Son、Tam Ky-Phuoc Son 和 Kontum 等地区分布的早古生代岩浆岩具有耦合性;此外,Fergusson and Colquhoun (1996)通过沉积岩岩石学研究认为海南岛早古生

代火山-碎屑沉积岩与Tasmania地体早古生代沉积建造具有相似性，指示为一个与俯冲作用有关的岛弧环境.因而，我们推测金沙江-点苍山-哀牢山构造带、Truong Son、Tam Ky-Phuoc Son、Kontum地区和海南岛可能代表了原特提斯洋的支洋盆（图5），海南岛在晚奥陶纪世（～452 Ma）已处于向冈瓦纳大陆北缘汇聚阶段.

5 结论

海南岛西北部安山岩的锆石U-Pb年龄为452±8 Ma、453±8 Ma，形成于早古生代，它们在时空上与扬子地块西南缘的金沙江-点苍山-哀牢山构造带以及印支地块Truong Son、Tam Ky-Phuoc Son、Kontum等地区分布的早古生代岩浆岩具有耦合性.金沙江-点苍山-哀牢山、Truong Son、Tam Ky-Phuoc Son、Kontum等地区和海南岛可能代表了原特提斯洋的支洋盆.

致谢：感谢马莲花、苏小倩、蒙麟鑫和实验室余红霞、李政林老师在锆石年代学分析测试方面的帮助与指导.感谢审稿专家提出的宝贵建议和意见以及编辑部老师的辛勤付出！

References

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

Cawood, P.A., Johnson, M.R.W., Nemchin, A.A., 2007. Early Palaeozoic Orogenesis along the Indian Margin of Gondwana: Tectonic Response to Gondwana Assembly. *Earth and Planetary Science Letters*, 255: 70－84. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.12.006

Ding, H.X., Zhang, Z.M., Dong, X., et al., 2015. Cambrian Ultrapotassic Rhyolites from the Lhasa Terrane, South Tibet: Evidence for Andean-Type Magmatism along the Northern Active Margin of Gondwana. *Gondwana Research*, 27(4): 1616－1629. https://doi. org/10.1016/j.gr.2014.02.003

Ding, S.J., Xu, C.H., Long, W.G., et al., 2002. Tectonic Attribute and Geochronology of Meta-Volcanic Rocks, Tunchang, Hainan Island. *Acta Petrologica Sinica*, 18 (1): 83－90 (in Chinese with English abstract).

Fergusson, C. L., Colquhoun, G. P., 1996. Early Palaeozoic Quartz Turbidite Fan and Volcaniclastic Apron, Mudgee District, Northeastern Lachlan Fold Belt, New South Wales. *Australian Journal of Earth Sciences*, 43(5): 497－507. https: //doi. org/10.1080/08120099608728272

Gou, Q.Y., Qian, X., He, H.Y., et al., 2019. Geochronological and Geochemical Constraints on Lizhigou Middle Triassic Felsic Volcanic Rocks in Hainan and Its Tectonic Implications. *Earth Science*, 44(4): 1357－1370 (in Chinese with English abstract).

Guynn, J., Kapp, P., Gehrels, G.E., et al., 2012. U-Pb Geochronology of Basement Rocks in Central Tibet and Paleogeographic Implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 43: 23－50. https://doi. org/10.1016/j.jseaes.2011.09.003

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. *International Journal of Earth Sciences*, 107(2): 553－570. https: //doi.org/10.1007/s00531-017-1508-3

Hosseini, S.H., Sadeghian, M., Zhai, M., et al., 2015. Petrology, Geochemistry and Zircon U-Pb Dating of Band-e-Hezarchah Metabasites (NE Iran): An Evidence for Back-Arc Magmatism along the Northern Active Margin of Gondwana. *Geochemistry*, 75: 207－218. https://doi.org/10.1016/j.chemer.2015.02.002

Jian, P., Liu, D.Y., Kröner, A., et al., 2009. 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. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.04.006

Li, G.J., Wang, Q.F., Huang, Y.H., et al., 2016. Petrogenesis of Middle Ordovician Peraluminous Granites in the Baoshan Block: Implications for the Early Paleozoic Tectonic Evolution along East Gondwana. *Lithos*, 245: 76－92. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.10.012

Li, S. B., He, H. Y., Qian, X., et al., 2018a. Carboniferous Arc Setting in Central Hainan: Geochronological and Geochemical Evidences on the Andesitic and Dacitic Rocks. *Journal of Earth Science*, 29(2): 265－279. https: //doi.org/10.1007/s12583-017-0936-0

Li, S.Z., Zhao, S.J., Liu, X., et al., 2018b. Closure of the Proto-Tethys Ocean and Early Paleozoic Amalgamation of Microcontinental Blocks in East Asia. *Earth - Science Reviews*, 186: 37－75. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.01.011

Li, S.Z., Zhao, S.J., Li, X.Y., et al., 2016. Proto-Tehtys Ocean in East Asia (Ⅰ): Northern and Southern Border Faults and Subduction Polarity. *Acta Petrologica Sinica*, 32(9): 2609－2627 (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. *Acta Petrologica Sinica*, 16(3): 425－432 (in Chinese with English abstract).

Li, Z.X., Li, X.H., Li, W.X., et al., 2008. Was Cathaysia Part of Proterozoic Laurentia? New Data from Hainan Island, South China. *Terra Nova*, 20(2): 154－164. https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2008.00802.x

Lin, Y.L., Yeh, M.W., Lee, T.Y., et al., 2013. First Evidence of the Cambrian Basement in Upper Peninsula of Thailand and Its Implication for Crustal and Tectonic Evolution of the Sibumasu Terrane. *Gondwana Research*, 24: 1031－1037. https://doi. org/10.1016/j. gr.2013.05.014

Liu, G.C., Sun, Z.B., Zeng, W.T., et al., 2017. The Age of Wanhe Ophiolitic Mélange from Mengku Area, Shuangjiang County, Western Yunnan Province, and Its Geological Significance. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 36(2): 163－174 (in Chinese with English abstract).

Liu, H.C., Xia, X.P., Lai, C.K., et al., 2018. Break-away of South China from Gondwana: Insights from the Silurian High-Nb Basalts and Associated Magmatic Rocks in the Diancangshan-Ailaoshan Fold Belt (SW China). *Lithos*, 318－319: 194－208. https://doi.org/10.1016/j. lithos.2018.08.014

Nie, X.M., Feng, Q.L., Qian, X., et al., 2015. Magmatic Record of Prototethyan Evolution in SW Yunnan, China: Geochemical, Zircon U-Pb Geochronological and Lu-Hf Isotopic Evidence from the Huimin Metavolcanic Rocks in the Southern Lancangjiang Zone. *Gondwana Research*, 28(2): 757－768. https://doi. org/10.1016/j. gr.2014.05.011

Okay, A.I., Bozkurt, E., Satır, M., et al., 2008. Defining the Southern Margin of Avalonia in the Pontides: Geochronological Data from the Late Proterozoic and Ordovician Granitoids from NW Turkey. *Tectonophysics*, 461 (1－4): 252－264. https://doi. org/10.1016/j. tecto.2008.02.004

Peng, Z. M., Geng, Q. R., Pan, G. T., et al., 2014. Zircon SHRIMP Geochronology and Nd-Pb Isotopic Characteristics of the Meta-Basalt in the Central Part of Tibetan Plateau's Qiangtang Region. *Science China Earth Sciences*, 57(3): 428－438. https: //doi. org/10.1007/ s11430-013-4693-3

Rossetti, F., Nozaem, R., Lucci, F., et al., 2015. Tectonic Setting and Geochronology of the Cadomian (Ediacaran-Cambrian) Magmatism in Central Iran, Kuh-e-Sarhangi Region (NW Lut Block). *Journal of Asian Earth Sciences*, 102: 24－44. https://doi.org/10.1016/ j.jseaes.2014.07.034

Sajid, M., Andersen, J., Rocholl, A., et al., 2018. U-Pb Geochronology and Petrogenesis of Peraluminous Granitoids from Northern Indian Plate in NW Pakistan: Andean Type Orogenic Signatures from the Early Paleozoic along the Northern Gondwana. *Lithos*, 318－319: 340－356. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.08.024

von Raumer, J.F., Stampfli, G.M., 2008. The Birth of the Rheic Ocean-Early Palaeozoic Subsidence Patterns and Subsequent Tectonic Plate Scenarios. *Tectonophysics*, 461(1－4): 9－20. https://doi. org/10.1016/j. tecto.2008.04.012

Wang, B. D., Wang, L. Q., Pan, G. T., et al., 2013a. U-Pb Zircon Dating of Early Paleozoic Gabbro from the Nantinghe Ophiolite in the Changning-Menglian Suture Zone and Its Geological Implication. *Chinese Science Bulletin*, 58(8): 920－930. https: //doi. org/10.1007/ s11434-012-5481-8

Wang, Y.J., Xing, X.W., Cawood, P.A., et al., 2013b. Petrogenesis of Early Paleozoic Peraluminous Granite in the Sibumasu Block of SW Yunnan and Diachronous Accretionary Orogenesis along the Northern Margin of Gondwana. *Lithos*, 182: 67－85. https://doi. org/ 10.1016/j.lithos.2013.09.010

Wang, Y.J., Zhang, Y.Z., Qian, X., et al., 2021a. Early Paleozoic Accretionary Orogenesis in the Northeastern Indochina and Implications for the Paleogeography of East Gondwana: Constraints from Igneous and Sedimentary Rocks. *Lithos*, 382－383: 105921. https://doi.org/ 10.1016/j.lithos.2020.105921

Wang, Y.J., Zhang, Y.Z., Qian, X., et al., 2021b. Ordo-Silurian Assemblage in the Indochina Interior: Geochronological, Elemental, and Sr-Nd-Pb-Hf-O Isotopic Constraints of Early Paleozoic Granitoids in South Laos. *Geological Society of America Bulletin*, 133(1－2): 325－346. https://doi.org/10.1130/B35605.1

Wu, Z., Wang, B.D., Wang, D.B., et al., 2020. Zircon U-Pb Dating of Early Paleozoic Adakites from Nantinghe Ophiolitic Mélange in Changning-Menglian Suture Zone and Its Geological Implications. *Earth Sciences*, 45(8): 3003－3013 (in Chinese with English abstract).

Xie, C.F., Zhu, J.C., Ding, S.J., et al., 2006. Age and Petrogenesis of the Jianfengling Granite and Its Relationship to Metallogenesis of the Baolun Gold Deposit, Hainan Island. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2493—2508 (in Chinese with English abstract).

Xu, C., Wang, Y.J., Qian, X., et al., 2020. Geochronological and Geochemical Characteristics of Early Silurian S-Type Granitic Gneiss in Takengon Area of Northern Sumatra and Its Tectonic Implications. *Earth Science*, 45 (6): 2077—2090 (in Chinese with English abstract).

Yang, X., Xu, X.H., Deng, S., et al., 2020. Proto-Tethys Tectonic Evolution from Ordovician to Devonian in Southwestern Margin of Tarim Block, NW China. *Earth Science*, 45(11): 4153—4175 (in Chinese with English abstract).

Yang, X.J., Jia, X.C., Xiong, C.L., et al., 2012. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Age of Metamorphic Basic Volcanic Rock in Gongyanghe Group of Southern Gaoligong Mountain, Western Yunnan Province, and Its Geological Significance. *Geological Bulletin of China*, 31(2): 264—276 (in Chinese with English abstract).

Zhang, L.M., Wang, Y.J., Zhang, Y.Z., et al., 2017. Age of Paleozoic Strata in Northern Hainan Island: Constraints from the Detrital Zircon U-Pb Geochronology. *Journal of Jilin University* (*Earth Science Edition*), 47 (4): 1187—1206 (in Chinese with English abstract).

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): 80—85 (in Chinese with English abstract).

Zhao, S.W., Lai, S.C., Qin, J.F., et al., 2016. Tectono-Magmatic Evolution of the Gaoligong Belt, Southeastern Margin of the Tibetan Plateau: Constraints from Granitic Gneisses and Granitoid Intrusions. *Gondwana Research*, 35: 238—256. https://doi. org/10.1016/j.gr.2015.05.007

Zhong, D.L., 1998. Paleotethysides in West Yunnan and Sichuan, China. Science Press, Beijing, 1—231 (in Chinese).

Zhou, Y., Liang, X.Q., Kröner, A., et al., 2015. Late Cretaceous Lithospheric Extension in SE China: Constraints from Volcanic Rocks in Hainan Island. *Lithos*, 232: 100—110. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.06.028

Zhu, D.C., Zhao, Z.D., Niu, Y.L., et al., 2012. Cambrian Bimodal Volcanism in the Lhasa Terrane, Southern Tibet: Record of an Early Paleozoic Andean-Type Magmatic Arc in the Australian Proto-Tethyan Margin. *Chemical Geology*, 328: 290—308. https://doi. org/10.1016/j.chemgeo.2011.12.024

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.

丁式江, 许长海, 龙文国, 等, 2002. 海南屯昌变火山岩构造属性及其年代学研究. 岩石学报, 18(1): 83—90.

苟琪钰, 钱鑫, 何慧莹, 等, 2019. 海南荔枝沟中三叠世酸性火山岩年代学、地球化学特征及其构造意义. 地球科学, 44(4): 1357—1370.

李三忠, 赵淑娟, 李玺瑶, 等, 2016. 东亚原特提斯洋(Ⅰ): 南北边界和俯冲极性. 岩石学报, 32(9): 2609—2627.

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. 岩石学报, 16(3): 425—432.

刘桂春, 孙载波, 曾文涛, 等, 2017. 滇西双江县勐库地区湾河蛇绿混杂岩的形成时代、岩石地球化学特征及地质意义. 岩石矿物学杂志, 36(2): 163—174.

吴喆, 王保弟, 王冬兵, 等, 2020. 昌宁-孟连缝合带南汀河早古生代埃达克岩锆石U-Pb年龄及其地质意义. 地球科学, 45(8): 3003—3013.

谢才富, 朱金初, 丁式江, 等, 2006. 海南尖峰岭花岗岩体的形成时代、成因及其与抱伦金矿的关系. 岩石学报, 22 (10): 2493—2508.

徐畅, 王岳军, 钱鑫, 等, 2020. 苏门答腊岛北部Takengon早志留世S型花岗片麻岩年代学、地球化学特征及构造意义. 地球科学, 45(6): 2077—2090.

杨鑫, 徐旭辉, 邓尚, 等, 2020. 塔里木西南大陆边缘原特提斯洋构造演化. 地球科学, 45(11): 4153—4175.

杨学俊, 贾小川, 熊昌利, 等, 2012. 滇西高黎贡山南段公养河群变质基性火山岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄及其地质意义. 地质通报, 31(2): 264—276.

张立敏, 王岳军, 张玉芝, 等, 2017. 海南岛北部古生界时代:碎屑锆石U-Pb年代学约束. 吉林大学学报(地球科学版), 47(4): 1187—1206.

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): 80—85.

钟大赉, 1998. 滇川西部古特提斯造山带. 北京: 科学出版社, 1—231.