

琼东南盆地潜山晚三叠世辉绿岩的年代学、 地球化学及其构造背景

周 虎¹, 付于真^{1,2}, 胡潜伟³, 侯明才², 陈安清²,
曹海洋², 熊富浩^{1,2}, 楚志强¹

1. 成都理工大学 地球与行星科学学院, 成都 610059

2. 油气藏地质及开发工程全国重点实验室(成都理工大学), 成都 610059

3. 中海石油(中国)有限公司海南分公司, 海口 570100

[摘要] 琼东南盆地中生代火成岩潜山是海域油气勘探的热点领域,但由于缺少系统的年代学和地球化学分析,有关潜山基岩的岩石成因与动力学背景仍不清楚,制约了潜山油气藏的进一步勘探。本研究以钻井揭露的辉绿岩为研究对象,开展岩石学、年代学、地球化学和 Lu-Hf 同位素研究,探讨其岩石成因与动力学背景。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学揭示辉绿岩结晶年龄为(236±3) Ma,形成于晚三叠世。辉绿岩中 SiO₂ (47.96%~49.97%) 和 Al₂O₃ (13.16%~13.68%) 的质量分数较低,MgO 的质量分数(6.02%~7.49%) 和 Mg[#] 值(58~61) 较高。岩石具有右倾的稀土配分模式及正 Eu 异常特征,且样品富集大离子亲石元素,亏损高场强元素。岩石具有富集的锆石 Hf 同位素组成($\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -9.08 \sim -4.70$)。岩石成因分析表明,辉绿岩起源于富集地幔熔融,且源区经历了早期俯冲沉积物来源的含水熔体的交代改造。本研究揭示,琼东南盆地晚三叠世辉绿岩形成于碰撞后伸展环境,属于古特提斯造山旋回的产物。

[关键词] 琼东南盆地;潜山;年代学;地球化学;大地构造

[分类号] P588.12⁺1;P595

[文献标志码] A

Geochronology, geochemistry and tectonic setting of Late Triassic diabase in buried hills of Qiongdongnan Basin

ZHOU Hu¹, FU Yuzhen^{1,2}, HU Qianwei³, HOU Mingcai², CHEN Anqing²,
CAO Haiyang², XIONG Fuhao^{1,2}, CHU Zhiqiang¹

1. College of Earth and Planetary Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of
Technology, Chengdu 610059, China;

3. Hainan branch of China National Off shore Oil Limited Corporation, Haikou 570100, China

[收稿日期] 2024-01-04。

[基金项目] 国家自然科学基金项目(41602049);中海石油(中国)有限公司海南分公司科技项目(CCL2021HNFN0242, CCL2021HNFN0248)。

[第一作者] 周虎(1998—),男,硕士研究生,研究方向:火成岩岩石学,E-mail:zhouhu13575@163.com。

[通信作者] 付于真(1985—),女,讲师,研究方向:构造成岩与成藏综合研究,E-mail:fuyuzhen15@cdut.edu.cn。

[引用格式] 周虎,付于真,胡潜伟,等,2024. 琼东南盆地潜山晚三叠世辉绿岩的年代学、地球化学及其构造背景[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),51(4):543-560.

Zhou H, Fu Y Z, Hu Q W, et al., 2024. Geochronology, geochemistry and tectonic setting of Late Triassic diabase in buried hills of Qiongdongnan Basin[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 51(4):543-560.

Abstract: The buried hills containing Mesozoic igneous rocks in the Qiongdongnan Basin are a major site for offshore oil and gas exploration. However, owing to a lack of systematic chronology and geochemical research, the petrogenesis and tectonic setting of the basement rocks remain unclear, hindering further exploration of oil and gas reservoirs in these buried hills. Here, we comprehensively investigate the petrology, zircon geochronology, whole-rock geochemistry, and zircon Lu-Hf isotopes of diabase collected by drilling in the Qiongdongnan Basin to determine its petrogenesis and tectonic setting. The results of LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology reveals a crystallization age of (236 ± 3) Ma for the diabase, indicating that it formation during the Late Triassic. The diabases have low contents of SiO_2 (47.96%~49.97%) and Al_2O_3 (13.16%~13.68%), but are enriched in MgO (6.02%~7.49%) and $\text{Mg}^\#$ (58~61). The sampled rocks exhibit right-sloping rare earth elements pattern and positive Eu anomalies, and are enrich in large ion lithophile elements and depletion in high field strength elements. They are also enrich in zircon Hf isotopes ($\epsilon\text{Hf}(t) = -9.08 \sim -4.70$). The results of petrogenesis analysis indicates that the diabases had originated from the melting of enriched mantle which was metasomatized by early subducted sediments-derived aqueous melts. The results of this study reveals that diabases in the Qiongdongnan Basin formed in a post-collision extension setting, and are products of the Paleo-Tethyan orogeny.

Key words: Qiongdongnan Basin; buried hills; chronology; geochemistry; tectonic

琼东南盆地处于华南板块、印支板块和太平洋板块的交汇区域(图 1-A),发育大量三叠纪—白垩纪岩浆岩,记录了古特提斯和古太平洋两大构造域的构造演化与地球动力学过程(李献华等, 2000; Wang et al., 2018)。琼东南盆地中生代岩浆岩不仅是研究古特提斯与古太平洋板块俯冲动力学过程的重要探针,也是海域潜山油气勘探的重要油气储层,具有规模成储的潜力(卫志杰等, 2024)。因此,精确厘定琼东南盆地中生代潜山基岩的成岩时代、岩石成因与构造背景,将有助于深入认识琼东南盆地中生代油气资源分布规律及成储成藏机制。目前,有关琼东南盆地中生代岩浆岩潜山的研究多聚焦于三叠纪花岗岩类(钟佳和王岩泉, 2022; 郭书生等, 2023; 宋瑞友等, 2023; 唐历山等, 2023),鲜有针对三叠纪基性岩浆岩潜山的系统研究。有关琼东南盆地三叠纪基性岩浆岩的成因机制和动力学背景尚不清楚,这不仅制约了对琼东南盆地潜山基岩究竟形成于古特提斯还是古太平洋构造域的准确认识,也制约了对琼东南盆地三叠纪基岩潜山的成山过程与分布规律的深入研究(Li and Li, 2007; Shen et al., 2018; He et al., 2020; Dilek and Tang, 2021; Cao et al., 2022)。

起源于不同地幔源区和不同构造背景的基性岩浆岩,常常具有显著不同的元素和同位素地球

化学组成。因此,基性岩浆岩是反演区域大地构造演化过程的重要岩石探针(Zhu et al., 2008; Cui et al., 2015; Kou et al., 2018; Xiong et al., 2023)。相较于邻区海南岛三叠纪基性岩浆岩的深入研究(谢才富等, 2006; 唐立梅等, 2010; 陈新跃等, 2014; He et al., 2018),有关琼东南盆地三叠纪基性岩浆岩的研究则尚未见有公开报道。因此,本文以琼东南盆地陵南低凸起 LS32-A 井新近钻遇的辉绿岩为研究对象,开展系统的岩石学、全岩地球化学、锆石 U-Pb 年代学和 Lu-Hf 同位素研究,准确厘定其侵位结晶时代,探讨其岩石成因和构造背景,以期深入认识琼东南盆地三叠纪构造属性和演化过程提供关键证据,为下一步潜山油气勘探提供理论支撑。

1 地质背景及样品描述

琼东南盆地位于海南岛东南部,北依海南隆起,南靠西沙隆起,西与莺歌海盆地以红河断裂带为界,东邻珠江口盆地。琼东南盆地整体呈 NE-SW 向展布,是南海北部陆缘的重要组成部分(李绪宣等, 2006; 谢文彦等, 2009; 冷杰等, 2021)。琼东南盆地属于前古近纪基底上发育的新生代伸展断陷盆地,呈现出隆-坳交替的构造分布格局。其中,乐东陵水凹陷夹于崖南低凸起、陵水低凸起和陵南低凸起之间(王振峰等, 2011)(图 1-B)。

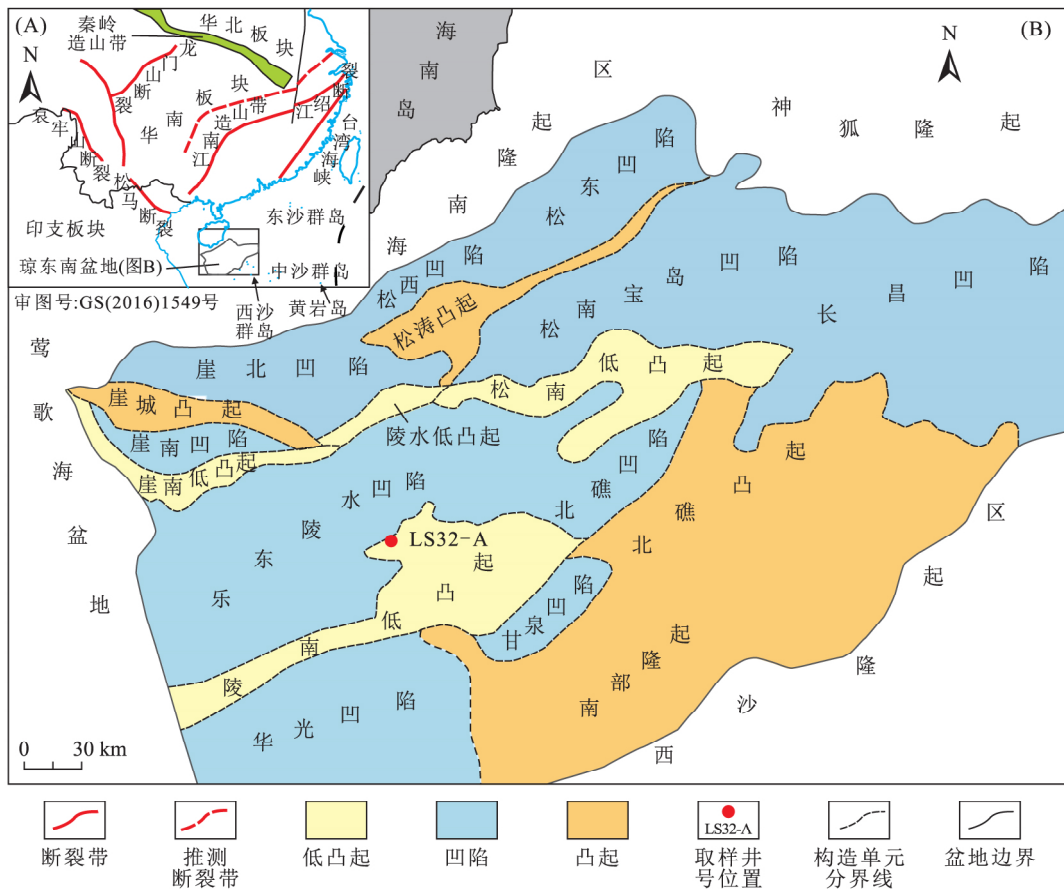


图 1 华南大地构造简图及琼东南盆地构造单元划分图(底图据毛建仁等,2014;刘飞等,2022 修改)
 Fig. 1 Geotectonic framework of southern China and tectonic division of the Qiongdongnan Basin
 (A) 华南大地构造简图; (B) 琼东南盆地构造单元划分图

琼东南盆地的基底由前震旦系、震旦系一下古生界和中生界组成,普遍缺失上古生界(鲁宝亮等,2011;孙晓猛等,2014)。盆地的盖层由新生界岭头组、崖城组、陵水组、三亚组、梅山组、黄流组和乐东组等地层组成。

受印支板块、欧亚板块和古太平洋板块之间的多期次构造作用影响,琼东南盆地发育了大量断裂、褶皱和多期岩浆活动,形成了一系列 NW 向断裂带与中生代岩浆岩(侯明才等,2023)。琼东南盆地钻井揭示,其中生代潜山基岩的岩石类型丰富,尤以三叠纪花岗岩最为发育(唐历山等,2023)。本文样品产自陵南低凸起的 LS32-A 井(图 2-A),其潜山基岩以石英闪长岩为主,其次为辉绿岩。岩相学研究显示,石英闪长岩具半自形粒状结构,主要由斜长石(73%)、石英(15%)、黑云母(10%)和碱性长石(2%)组成(图 2-B)。辉绿岩具典型的辉绿结构,主要矿物为斜长石(50%)和次生成因的纤闪石

(45%),其次为石英(3%)以及钛铁氧化物等副矿物。辉绿岩的斜长石呈自形板柱状,具有显著的绢云母化和黏土化。纤闪石多为辉石次生蚀变成因,呈纤维状集合体,多分布于杂乱排列的斜长石三角格架之中(图 2-C),局部可见绿泥石化现象。

2 分析方法

锆石 U-Pb 定年在油气藏地质及开发工程全国重点实验室(成都理工大学)完成。通过双目镜细致选出锆石颗粒,并制成锆石靶。然后,开展锆石阴极发光图像(CL)分析,进而挑选较自形、无裂纹且环带清晰的岩浆锆石开展 U-Pb 定年。U-Pb 定年采用激光剥蚀-电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)。为检验数据质量,本次实验以 91500 为外标,以标准锆石 Tanz 为盲标;同时,使用 NIST SRM610 为外标、Si 为内标,测定锆石微量元素含量。样品年龄和元素含量计算采用 Iolite4

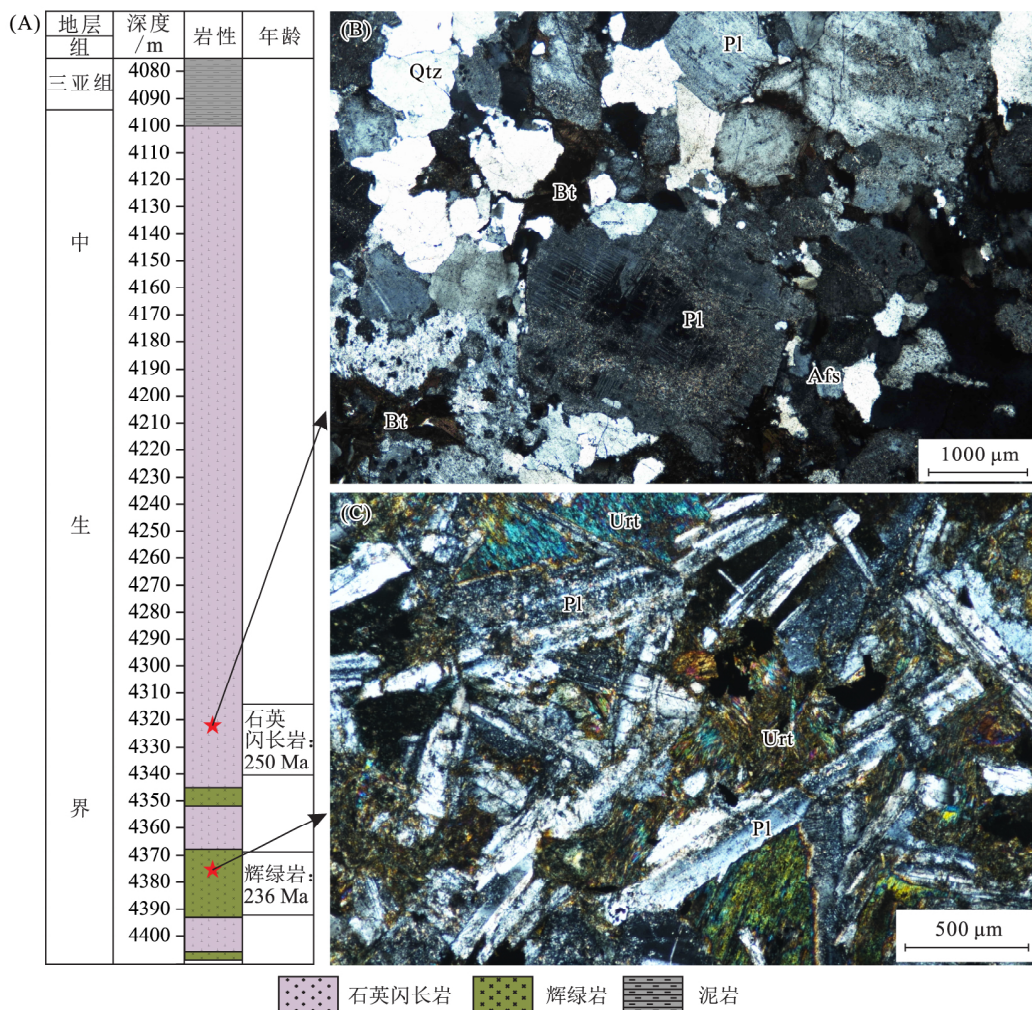


图 2 LS32-A 井岩性柱状图及镜下显微照片
 Fig. 2 Lithology of the columnar section and photomicrographs of Well LS32-A
 (A) 岩性柱状图; (B) 石英闪长岩镜下显微照片; (C) 辉绿岩镜下显微照片。
 Pl. 斜长石; Urt. 纤闪石; Qtz. 石英; Bt. 黑云母; Afs. 碱性长石

进行处理分析(Paton et al., 2010, 2011; Petrus and Kamber, 2012)。全岩样品的主微量元素和锆石 Lu-Hf 同位素分析均在武汉上谱分析科技有限责任公司完成。全岩主量元素分析使用 ZSX Primus II 型波长色散 X 射线荧光光谱仪(XRF)。全岩微量元素分析使用 ICP-MS, 详细流程分析见(Liu et al., 2008)。原位微区锆石 Hf 同位素比值分析则使用激光剥蚀多接收电感耦合等离子体质谱仪(LA-MC-ICP-MS)完成, 实验过程同时测定 Plešovice, 91500 和 GJ-1 三个国际锆石标准, 以校正测试样品, 确保数据真实可靠(Zhang and Hu, 2020), 详细仪器操作条件和分析方法见 Hu et al. (2012)。锆石 Hf 同位素数据分析采用软件 ICPMSDataCal12. 2(Liu et al., 2010)完成。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年代学

本研究对陵南低凸起 LS32-A 井辉绿岩及其围岩石英闪长岩开展了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学和微量元素分析, 分析结果分别见表 1 和表 2。CL 图像显示, 所分析的锆石形态均较好, 多为柱状或短柱状, 发育岩浆环带结构(图 3-A~C)。锆石的 Th/U 比值介于 0.16~0.83 之间, 表明其为典型的岩浆锆石(吴元保和郑永飞, 2004)。石英闪长岩的锆石年龄较为集中, 12 颗锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化于 244~257 Ma 之间, 其加权平均年龄为 (250 ± 3) Ma (MSWD = 1.3)(图 3-A)。辉绿岩的 28 颗锆石可分为新老两组, 且所有点均落在谐和线及其附近。年轻组

表 1 LS32-A 辉绿岩和石英闪长岩的 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年分析结果

Table 1 The results of LA-ICP-MS U-Pb dating of zircons from the diabase and quartz diorite in Well LS32-A

测点号	质量分数/ 10^{-6}		Th/U	同位素比值						年龄/Ma			
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/$	1σ	$^{207}\text{Pb}/$	1σ	$^{206}\text{Pb}/$	1σ	$^{207}\text{Pb}/$	1σ	$^{206}\text{Pb}/$	1σ
				^{206}Pb		^{235}U		^{238}U		^{235}U		^{238}U	
辉绿岩 (LSh-1)													
1	378	1125	0.34	0.0523	0.0011	0.2997	0.0084	0.0414	0.0009	266	7	262	6
2	426	1266	0.34	0.0519	0.0010	0.2880	0.0075	0.0400	0.0007	257	6	253	5
3	1039	1906	0.54	0.0548	0.0012	0.2787	0.0073	0.0366	0.0005	250	6	232	3
4	286	1149	0.25	0.0533	0.0011	0.2721	0.0063	0.0368	0.0005	244	5	233	3
5	776	1417	0.55	0.0506	0.0008	0.2758	0.0055	0.0393	0.0005	247	4	249	3
6	465	945	0.49	0.0535	0.0012	0.2984	0.0088	0.0402	0.0007	265	7	254	4
7	533	1182	0.45	0.0550	0.0010	0.3200	0.0078	0.0421	0.0009	282	6	266	6
8	718	1708	0.42	0.0539	0.0013	0.2805	0.0079	0.0375	0.0005	251	6	238	3
9	333	1109	0.30	0.0539	0.0011	0.2812	0.0078	0.0375	0.0006	252	6	238	4
10	558	1745	0.32	0.0500	0.0009	0.2847	0.0067	0.0412	0.0008	254	5	260	5
11	428	1374	0.31	0.0517	0.0012	0.2717	0.0069	0.0380	0.0005	244	5	240	3
12	1186	1425	0.83	0.0495	0.0010	0.2626	0.0059	0.0383	0.0005	237	5	242	3
13	164	857	0.19	0.0500	0.0009	0.2730	0.0056	0.0395	0.0006	245	4	250	4
14	802	1473	0.54	0.0495	0.0009	0.2691	0.0051	0.0394	0.0006	242	4	249	4
15	1590	1998	0.80	0.0511	0.0008	0.2603	0.0052	0.0368	0.0005	235	4	233	3
16	744	1480	0.50	0.0514	0.0009	0.2684	0.0060	0.0376	0.0005	241	5	238	3
17	522	931	0.56	0.0507	0.0009	0.2623	0.0047	0.0374	0.0005	237	4	236	3
18	206	611	0.34	0.0563	0.0018	0.2788	0.0102	0.0358	0.0007	250	8	226	4
19	601	728	0.83	0.0524	0.0014	0.2610	0.0081	0.0362	0.0009	235	7	229	6
20	131	265	0.49	0.0547	0.0026	0.2814	0.0152	0.0371	0.0008	252	12	235	5
21	654	1769	0.37	0.0501	0.0009	0.2657	0.0057	0.0383	0.0006	239	5	242	4
22	219	331	0.66	0.0517	0.0013	0.2585	0.0079	0.0360	0.0007	233	6	228	5
23	568	1450	0.39	0.0517	0.0008	0.2826	0.0074	0.0394	0.0008	253	6	249	5
24	408	1439	0.28	0.0506	0.0008	0.2682	0.0055	0.0383	0.0007	241	4	242	4
25	741	1794	0.41	0.0549	0.0014	0.2895	0.0088	0.0380	0.0006	258	7	240	4
26	292	1092	0.27	0.0534	0.0010	0.3077	0.0070	0.0416	0.0006	272	5	263	4
27	566	1380	0.41	0.0516	0.0009	0.2840	0.0065	0.0397	0.0007	254	5	251	4
28	542	1623	0.33	0.0518	0.0009	0.3033	0.0086	0.0422	0.0010	269	7	267	6
石英闪长岩 (LSc-1)													
1	648	1495	0.43	0.0519	0.0010	0.2874	0.0064	0.0400	0.0007	256	5	253	4
2	582	1620	0.36	0.0511	0.0008	0.2865	0.0068	0.0404	0.0007	256	5	255	4
3	538	1448	0.37	0.0489	0.0009	0.2722	0.0060	0.0402	0.0007	244	5	254	4
4	350	834	0.42	0.0513	0.0011	0.2747	0.0070	0.0386	0.0006	246	6	244	4
5	225	1014	0.22	0.0524	0.0010	0.2948	0.0070	0.0406	0.0007	262	5	257	5
6	174	1065	0.16	0.0500	0.0010	0.2748	0.0056	0.0398	0.0006	247	4	251	4
7	319	1390	0.23	0.0527	0.0010	0.2849	0.0067	0.0390	0.0006	255	5	246	4
8	582	1944	0.30	0.0509	0.0009	0.2832	0.0056	0.0402	0.0006	253	4	254	4
9	864	1998	0.43	0.0513	0.0008	0.2750	0.0063	0.0387	0.0007	247	5	245	4
10	190	690	0.28	0.0541	0.0037	0.2964	0.0267	0.0389	0.0006	264	2	246	4
11	1642	2087	0.79	0.0514	0.0008	0.2743	0.0062	0.0386	0.0007	246	5	244	5
12	958	2037	0.47	0.0507	0.0009	0.2808	0.0073	0.0400	0.0008	251	6	253	5

表 2 LS32-A 辉绿岩、石英闪长岩 LA-ICPMS 锆石微量元素分析结果(10⁻⁶)

Table 2 Results of analysis of LA-ICP-MS zircon trace elements from the diabase and quartz diorite in Well LS32-A

点号	Ti	Y	Zr	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf
辉绿岩(LSh-1)年轻一组锆石																		
1	3.72	922	426277	0.08	7.14	0.09	1.10	2.64	0.33	17.60	6.25	78.6	29.1	139	29.2	265	55.1	11298
3	578.00	1343	409166	0.43	12.90	0.24	2.46	5.70	0.64	32.50	10.70	126.0	43.7	192	37.7	327	66.4	11309
4	1.66	573	425373	0.06	3.86	0.04	0.53	1.13	0.23	8.58	3.13	39.7	16.2	85.5	20.0	207	49.4	13511
6	2.81	1316	420439	0.14	7.45	0.28	3.70	7.04	1.05	37.90	11.90	134.0	43.1	180	33.2	279	52.7	10903
9	2.47	1180	429588	0.35	5.40	0.25	2.65	5.49	0.61	31.30	10.10	116.0	38.8	169	32.9	284	56.7	11641
10	2.20	1345	426150	0.08	9.11	0.12	1.71	3.86	0.53	25.00	8.57	107.0	41.1	203	43.7	417	92.5	12386
12	6.41	2087	421551	0.10	27.00	0.31	4.37	10.80	1.30	65.60	20.60	221.0	70.1	292	53.1	435	81.8	10096
14	4.56	1387	426076	0.30	12.10	0.23	2.70	4.77	0.65	29.90	10.10	122.0	43.9	202	41.4	368	74.5	10935
16	720.00	1504	425503	0.52	15.30	0.50	4.16	7.16	0.66	36.60	11.60	134.0	47.0	217	44.7	404	83.2	11091
20	3.07	1363	431165	0.01	12.00	0.08	1.91	4.93	0.67	27.90	9.61	120.0	46.2	223	45.6	409	85.9	10129
21	1.83	1269	434253	0.24	9.99	0.15	1.53	3.72	0.35	25.20	9.15	112.0	40.9	191	39.2	347	71.4	12399
22	5.52	2395	437255	0.03	13.00	0.40	6.68	12.60	2.83	64.50	19.70	231.0	82.9	376	74.8	651	132.0	8544
23	1.54	966	421195	0.59	9.08	0.30	2.15	3.13	0.23	19.60	6.85	84.7	31.1	145	29.0	264	53.8	12953
24	2.10	975	430696	0.29	7.43	0.21	1.79	2.50	0.29	17.40	6.54	82.1	30.6	149	31.2	285	58.2	12839
27	2.26	1353	427509	0.93	13.80	0.66	4.48	5.44	0.61	29.50	10.00	120.0	43.2	203	40.2	362	73.0	12294
28	1.85	1147	431963	0.01	8.28	0.04	0.81	2.45	0.29	19.10	7.15	93.5	35.5	173	37.2	333	69.2	13117
辉绿岩(LSh-1)较老一组锆石																		
2	2.68	1011	421600	9.85	35.80	4.64	23.00	9.23	0.57	24.80	7.54	88.5	32.1	154	31.7	289	59.9	11624
5	3.47	1367	425559	2.34	20.70	1.22	7.80	7.19	0.82	34.50	10.70	123.0	43.2	198	39.9	354	72.2	10619
7	1690.00	1495	417195	1.41	13.50	0.87	6.30	7.45	1.01	35.80	11.30	134.0	47.6	220	44.9	408	84.1	10123
8	3.09	1564	420698	7.58	31.40	3.37	18.30	10.60	0.90	41.20	12.70	145.0	50.1	230	45.8	407	83.1	11043
15	16.20	1651	439639	3.22	23.60	1.74	12.10	9.96	0.93	44.80	13.60	155.0	54.0	242	48.6	420	84.9	12448
11	1.91	1208	435482	7.06	27.50	2.68	13.50	6.22	0.61	24.00	8.30	103.0	38.2	184	38.2	352	72.2	12237
13	1.43	539	432177	5.36	16.60	1.50	6.20	2.06	0.31	8.67	3.05	39.4	16.0	83.0	19.0	192	43.8	13710
17	4.32	1643	432609	2.72	20.20	1.10	7.80	9.76	1.69	48.70	14.80	164.0	53.0	224	42.2	353	69.3	11125
18	4.27	929	438052	9.41	34.10	4.35	22.40	10.00	0.84	27.70	7.94	87.1	29.5	135	26.9	243	51.2	11531
19	5.65	1394	430289	29.20	82.70	7.58	32.60	12.50	1.92	40.20	11.20	126.0	45.4	214	43.8	395	83.3	10301
25	1.80	1819	414327	66.60	111.00	33.23	169.10	50.70	2.69	80.10	18.40	182.0	59.9	264	52.3	447	89.4	11621
26	2.47	856	419696	6.20	23.90	2.97	16.30	6.28	0.40	18.90	5.85	73.0	26.7	129	27.2	246	51.2	12035
石英闪长岩(LSc-1)																		
1	2.35	1093	420632	0.40	9.82	0.33	2.30	3.85	0.40	24.20	8.11	99.5	35.1	162	32.4	284	56.7	11881
2	6.51	1163	412773	5.57	27.20	3.19	17.70	8.03	0.55	29.10	8.79	100.0	36.4	171	35.2	317	66.1	11857
3	2.77	1131	421879	5.63	25.30	2.19	12.60	5.10	0.48	22.30	7.36	91.7	34.3	170	35.8	337	70.6	11645
4	5.69	1293	421063	1.96	15.20	0.97	6.40	7.20	0.34	34.60	10.80	120.0	41.9	192	37.5	319	64.0	11058
5	2.05	588	424491	10.80	32.90	4.27	20.30	6.47	0.50	12.60	3.64	44.8	17.0	90.0	20.4	208	49.7	13483
6	2.43	880	430743	18.60	63.20	9.46	48.10	15.20	0.83	27.30	6.88	78.1	28.0	132	27.4	241	49.5	12626
7	14.50	1151	420859	4.26	19.00	2.35	12.80	6.79	1.10	25.60	8.58	100.0	34.9	162	34.0	312	65.5	12650
8	2.32	1135	421950	7.73	30.80	4.07	22.20	9.07	0.56	25.60	8.03	97.7	35.7	170	35.4	319	66.1	12596
9	3.29	1313	426474	14.80	51.30	5.86	27.20	9.05	0.67	31.50	10.05	118.0	41.3	189	38.3	331	65.7	11776
10	3.12	677	437417	6.20	28.20	3.52	17.90	6.40	0.39	16.30	4.84	57.7	20.9	101	21.2	195	41.3	12574
11	4.88	2106	421030	15.30	66.20	8.40	47.50	22.80	1.03	73.70	20.10	217.0	71.5	310	58.7	504	994.0	10988
12	2.77	1356	427860	2.79	20.20	1.39	8.02	6.12	0.59	30.40	10.10	121.0	42.6	197	39.6	352	70.8	11530

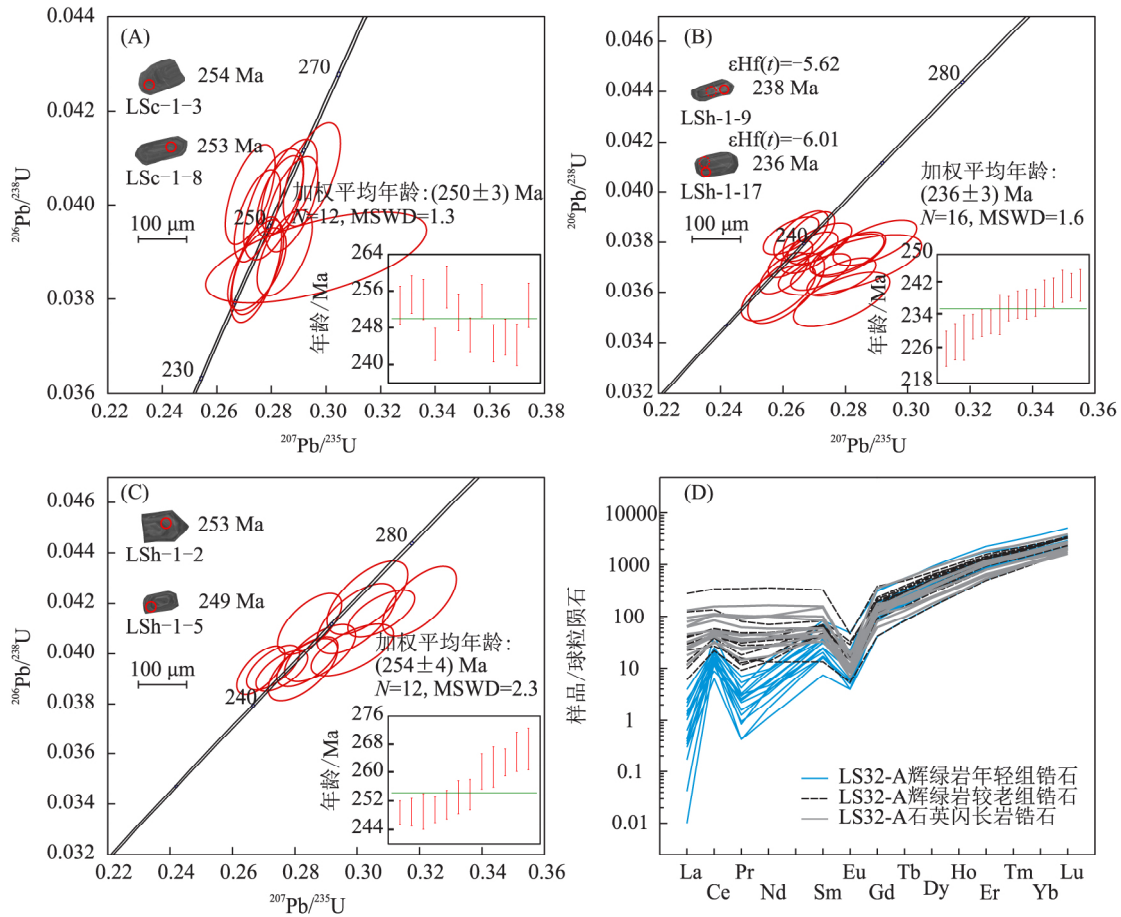


图 3 代表性锆石阴极发光图像、U-Pb 年龄谐和图及锆石稀土元素配分模式图

Fig. 3 Representative CL images, and U-Pb concordia diagrams and chondrite-normalized REE patterns of zircons

(A) 石英闪长岩 U-Pb 年龄谐和图; (B) 年轻组辉绿岩 U-Pb 年龄谐和图;

(C) 较老组辉绿岩 U-Pb 年龄谐和图; (D) 锆石稀土元素配分模式图

(实线红圈代表锆石 U-Pb 年龄测试点; 虚线红圈代表锆石 Lu-Hf 同位素测试点)

的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和年龄值变化于 226~242 Ma 之间, 其加权平均年龄为 $(236 \pm 3)\text{Ma}$ ($\text{MSWD} = 1.6$) (图 3-B)。而较老组的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和年龄值变化于 248~266 Ma 之间, 其加权平均年龄为 $(254 \pm 4)\text{Ma}$ ($\text{MSWD} = 2.3$) (图 3-C)。辉绿岩样品较老的一组加权平均年龄与石英闪长岩的结晶年龄 $(250 \pm 3)\text{Ma}$ 在误差范围内一致, 且二者的锆石稀土元素配分模式较为类似 (图 3-D), 指示辉绿岩样品较老的一组锆石可能属于捕获锆石。根据岩石空间分布与年代学特征 (图 2-A), 本文认为陵南低凸起 LS32-A 井辉绿岩形成于晚三叠世 $(236 \pm 3)\text{Ma}$, 且侵入早三叠世石英闪长岩 $(250 \pm 3)\text{Ma}$ 。

3.2 全岩地球化学特征

全岩主量和微量元素分析测试结果见表 3。辉绿岩中 SiO_2 的质量分数为 47.96%~49.97%,

Al_2O_3 的质量分数为 13.16%~13.68%, MgO 的质量分数为 6.02%~7.49%, $\text{Mg}^\#$ 值介于 58~61 之间, 全碱质量分数为 4.35%~5.01%。辉绿岩样品的 LOI 为 4.24%~7.69%。这与样品显著的绢云母化蚀变特征吻合, 表明岩石经历了后期蚀变改造。因此, 本文在讨论岩石系列和岩石成因时, 将避免使用 K, Na 和 Rb 等流体活动性较强的元素, 而采用化学性质稳定的 Nb, Ti 和 Y 等元素。 $\text{SiO}_2\text{-Nb/Y}$ 图解揭示, 样品具有中等的 Nb/Y 比值 (0.28~0.31), 属于亚碱性系列玄武质岩石 (图 4)。

辉绿岩样品的稀土元素总量为 $(81.25 \sim 97.19) \times 10^{-6}$, 具有较一致的球粒陨石标准化稀土元素配分模式图 (图 5-A)。样品相对富集轻稀土元素, 亏损重稀土元素, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 比值介于 3.19~4.24 之间。但样品的 δEu 值变化范围较大

(1.19~13.30),部分样品显示出较高的 Eu 正异常特征。样品具有整体一致的稀土和微量元素组成,

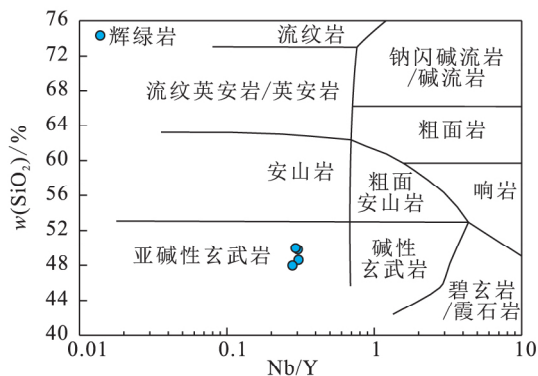


图 4 SiO₂-(Nb/Y)岩石类型判别图 (底图据 Winchester and Floyd, 1977)

Fig. 4 Plot of rock classification of SiO₂ vs. Nb/Y

但部分样品存在显著的 Ba, Sr, Eu 元素质量分数正异常特征,这与矿物蚀变特征一致,反映了流体交代作用的影响。样品富集 Rb, Th, U 等大离子亲石元素,亏损 Nb, Ta, Zr, Hf 等高场强元素,显示出类似于弧岩浆岩的地球化学特征(图 5-B)。

3.3 锆石 Lu-Hf 同位素

陵南低凸起 LS32-A 井辉绿岩的锆石 Lu-Hf 同位素分析结果见表 4。¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 比值大于 0.002 的异常数据予以剔除(LSh-1-13),其余 14 个分析点的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值变化于 0.282 377~0.282 782。样品的 εHf(236 Ma)值变化范围较大(-9.08~-1.53),其 Hf 同位素一阶段模式年龄变化于 0.94~1.24 Ga,与海南岛同期基性岩浆岩的锆石 Hf 同位素组成较为一致(图 6)。

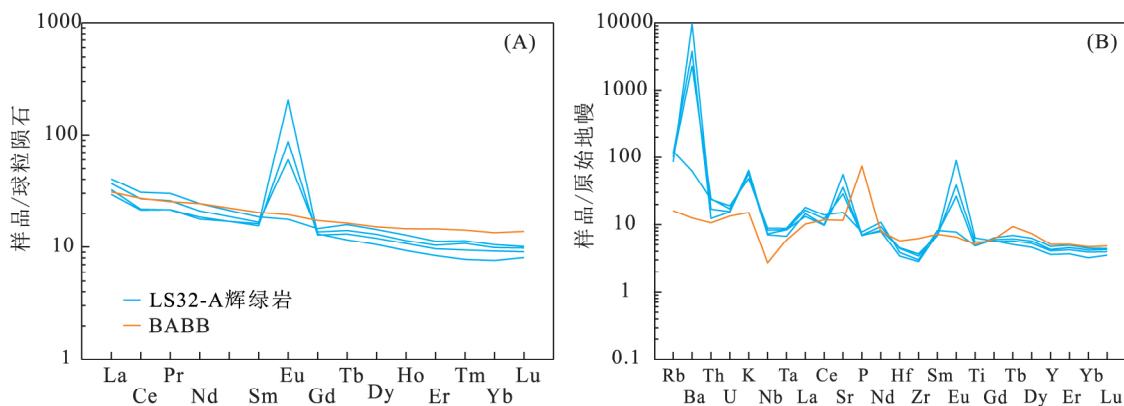


图 5 LS32-A 井辉绿岩的稀土元素配分模式图和微量元素蛛网图 (原始地幔与球粒陨石数据来自 Sun and Mcdonough, 1989;弧后盆地玄武岩 (Back-Arc Basin Basalt, BABB)的数据来自 Shinjo et al., 1999)

Fig. 5 Spider diagrams of chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized trace elements of the diabase in Well LS32-A (A)稀土元素配分模式图;(B)微量元素蛛网图

表 3 LS32-A 井辉绿岩主量(%)和微量(10⁻⁶)元素分析结果

Table 3 Test results of major elements and trace elements of samples from the diabase in Well LS32-A

岩性	辉绿岩				辉绿岩				
样品	LSh-1	LSh-2	LSh-3	LSh-4	样品	LSh-1	LSh-2	LSh-3	LSh-4
SiO ₂	47.96	49.80	48.57	49.97	Lu	0.29	0.31	0.26	0.32
TiO ₂	1.27	1.10	1.48	1.09	Y	18.5	19.3	16.3	21.4
Al ₂ O ₃	13.41	13.39	13.16	13.68	ΣREE	81.3	89.9	87.3	97.2
TFe ₂ O ₃	9.37	9.25	8.46	10.45	(La/Yb) _N	3.19	3.71	4.24	3.85
MnO	0.18	0.18	0.13	0.11	δEu	6.23	4.34	13.30	1.19
MgO	7.49	7.06	6.02	7.35	Sc	29.1	30.5	23.8	27.6
CaO	7.83	8.04	7.33	8.49	V	220	229	189	211
Na ₂ O	2.96	3.08	3.10	2.84	Cr	194	192	144	140
K ₂ O	2.05	1.84	1.87	1.51	Co	38.0	40.0	30.4	43.3

续表 3

岩性	辉绿岩				辉绿岩				
P ₂ O ₅	0.16	0.16	0.16	0.18	Ni	107	104	83.1	182
LOI	6.30	5.63	7.69	4.24	Cu	995	1141	1274	21083
总量	99.42	99.87	98.61	100.09	Zn	721	808	909	13271
Mg [#]	61	60	58	58	Ga	16.2	17.2	14.2	17.2
La	9.11	11.30	10.00	12.40	Rb	73.0	63.6	54.1	77.9
Ce	17.3	21.7	17.6	24.7	Sr	747	601	1168	323
Pr	2.64	3.16	2.63	3.66	Y	18.5	19.3	16.4	21.4
Nd	11.1	12.6	10.7	14.7	Zr	41.1	38.4	31.9	33.9
Sm	3.02	3.25	3.15	3.63	Nb	5.19	5.89	5.02	6.31
Eu	6.42	4.41	15.00	1.30	Cs	3.62	4.27	3.78	5.88
Gd	3.31	3.53	3.39	3.78	Ba	26410	16167	67829	435
Tb	0.61	0.66	0.54	0.74	Hf	1.39	1.36	1.06	1.19
Dy	3.84	4.18	3.37	4.61	Ta	0.34	0.34	0.27	0.36
Ho	0.77	0.82	0.67	0.92	Pb	95.4	101.0	120.0	1328.0
Er	2.02	2.17	1.77	2.36	Th	1.05	2.05	1.45	2.01
Tm	0.30	0.35	0.25	0.37	U	0.33	0.36	0.33	0.40
Yb	1.92	2.06	1.59	2.18					

表 4 LS32-A 井辉绿岩 Lu-Hf 同位素组成

Table 4 Zircon Lu-Hf isotopic compositions of samples from the diabase in Well LS32-A

测试点	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	1σ	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	εHf(0)	εHf(t)	1σ	T _{DM1} (Ga)	T _{DM2} (Ga)	f _{Lu/Hf}
LSh-1										
1	0.282473	0.000027	0.001015	0.042602	-10.56	-5.62	1.07	1.10	1.62	-0.97
2	0.282407	0.000019	0.000855	0.036295	-12.90	-7.58	0.85	1.19	1.76	-0.97
3	0.282467	0.000021	0.001625	0.070913	-10.79	-5.49	0.91	1.13	1.63	-0.95
4	0.282446	0.000020	0.001179	0.051164	-11.53	-5.89	0.88	1.14	1.66	-0.96
5	0.282483	0.000016	0.000797	0.025342	-10.21	-5.60	0.76	1.08	1.61	-0.98
6	0.282436	0.000019	0.001469	0.044423	-11.90	-6.91	0.84	1.17	1.71	-0.96
7	0.282377	0.000026	0.001130	0.043204	-13.95	-8.43	1.06	1.24	1.82	-0.97
8	0.282465	0.000018	0.001063	0.045537	-10.87	-5.57	0.82	1.12	1.63	-0.97
9	0.282455	0.000024	0.001550	0.065732	-11.22	-6.01	0.99	1.14	1.66	-0.95
10	0.282442	0.000022	0.001104	0.045567	-11.66	-6.72	0.92	1.15	1.69	-0.97
11	0.282495	0.000020	0.000734	0.024912	-9.78	-4.70	0.88	1.06	1.57	-0.98
12	0.282591	0.000024	0.001156	0.047266	-6.39	-1.53	0.98	0.94	1.36	-0.97
13	0.282782	0.000039	0.002927	0.126012	0.35	5.06	1.46	0.70	0.94	-0.91
14	0.282463	0.000021	0.000964	0.039963	-10.93	-5.76	0.90	1.11	1.64	-0.97
15	0.282377	0.000021	0.000735	0.029889	-13.98	-9.08	0.90	1.23	1.84	-0.98

4 讨论

4.1 岩石成因与源区属性

4.1.1 琼东南盆地陵南低凸起 LS32-A 井辉绿岩岩石 Eu 正异常成因分析

岩相学和全岩化学分析显示,样品遭受到了后期蚀变改造。因此,对岩石成因进行讨论时,需

要考虑蚀变作用对岩石地球化学组成的影响。样品具有变化范围较大的 Ba[(434~92 198)×10⁻⁶], Sr[(323~1 961)×10⁻⁶]质量分数和 Ba/Rb 比值,且 Ba 和 Sr 元素、δEu 与 LOI 呈现出很好的正相关性(图 7-A~C),表明这些大离子亲石元素的质量分数受蚀变作用的影响较为显著,暗示微量元素蛛网图中的 Ba, K, Sr 和 Eu 正异常可能与

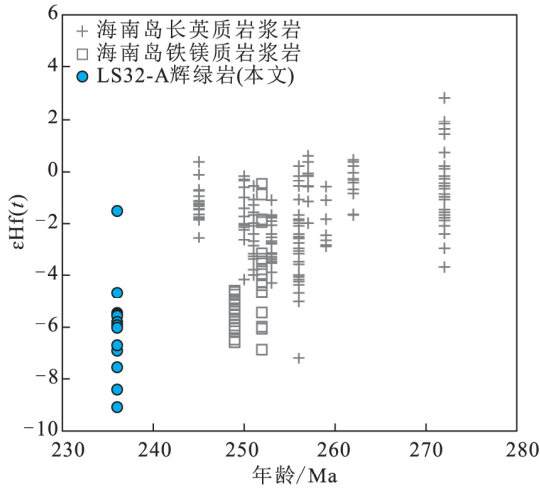


图 6 LS32-A 井辉绿岩锆石 Hf 同位素组成
 Fig. 6 Hf isotopic compositions of zircons in the diabase samples in Well LS32-A
 (海南岛印支期岩浆岩锆石 Lu-Hf 同位素数据来自温淑女等, 2013; 温淑女和庞崇进, 2018; 赵国锋等, 2018; He et al., 2018; Shen et al., 2018)

后期热液蚀变改造作用相关(图 5-B)。而 Rb, Th, U 等大离子亲石元素与 LOI 呈负相关或不具有相关性, 表明上述元素的富集并不是后期热液改造导致的, 其特征可以反映岩浆源区的性质(图 7-D~F)。

Eu³⁺ 在还原环境中可以被还原成 Eu²⁺, 从而在地质过程中区别于其他稀土元素, 呈现出不同的地球化学行为, 表现出 Eu 的异常(Nakada et al., 2017)。本次研究的辉绿岩具有较高的 Eu 正异常, δEu 值介于 1.19 ~ 13.30, 平均值 6.26。

样品的 Eu 正异常的可能原因包括: (1) 母岩浆富含 Eu 特征(Mazzucchelli et al., 1992); (2) 斜长石的堆晶作用(刘强等, 2019; 廖宇斌等, 2020); (3) 富 Eu 的高温热液流体交代作用(Klinkhammer et al., 1983, 1994)。陵南低凸起 LS32-A 井辉绿岩的斜长石质量分数较高(50%), 但均成格架状分布, 与纤闪石等矿物构成辉绿结构, 并无堆晶特征, 且 Eu 正异常与 LOI 呈正相关关系, 因此排除了斜长石堆晶作用的模型。部分样品并不具有较显著的正 Eu 异常(图 5-A), 这与起源于富 Eu 母岩浆结晶的模型不符。岩石具有明显的绢云母化和较高的烧失量, 且样品的 Ba, K, Sr 和 Eu 与烧失量存在正相关性, 这表明蚀变程度越高, 这些元素质量分数越高, 并不是斜长石堆晶造成上述元素的正异常, 这暗示流体交代作用可能是导致正 Eu 异常的主要原因。同时, 具有正异常特征的元素仅局限于 Ba, K, Sr 和 Eu 元素, 而这些元素均在长石和富 K 矿物相中具有高分配系数, 这与岩石具有显著绢云母化的特征相匹配。综上所述, 本文认为陵南低凸起 LS32-A 井辉绿岩的 Eu 正异常是由受后期富 K 流体交代所致。除了上述元素, 样品的稀土和高场强元素质量分数较为均一, 反映高场强元素在后期交代蚀变过程中基本保持稳定, 可用于反演源区属性和岩浆过程。

4.1.2 岩浆源区

陵南低凸起 LS32-A 井辉绿岩样品中 SiO₂

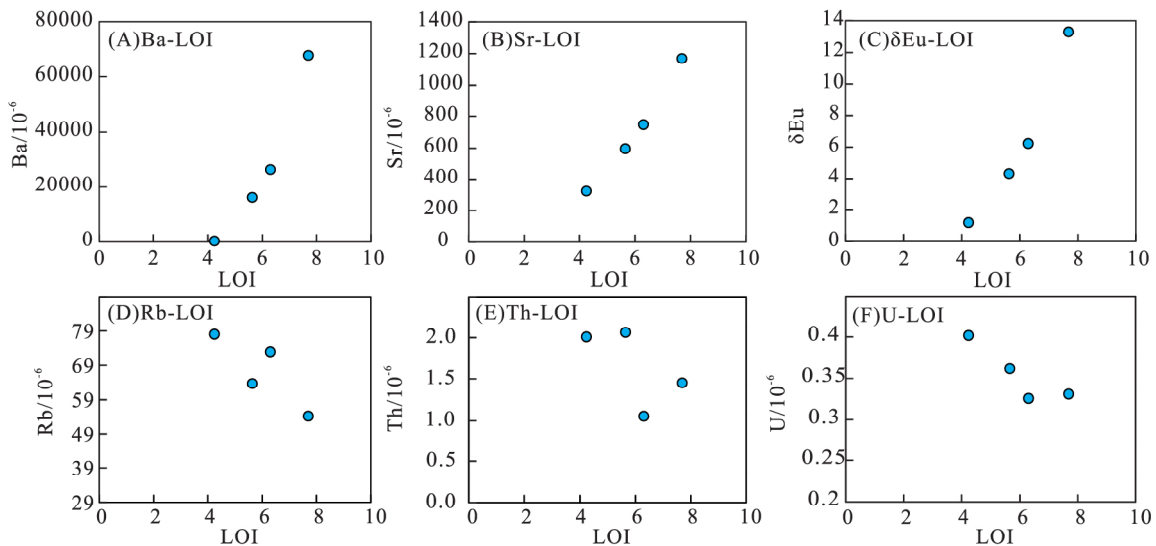


图 7 LS32-A 井辉绿岩烧失量与微量元素蚀变关系图

Fig. 7 Diagrams of trace element vs. loss on ignition of diabase samples in Well LS32-A

的质量分数较低(47.96%~49.97%),MgO 的质量分数(6.02%~7.49%)和 $Mg^\#$ 值(58~61)相对较高,显著不同于硅镁质下地壳来源的岩浆岩,暗示了其幔源成因。同时,样品具有较高的 Cr [(140~194) × 10⁻⁶] 和 Ni [(83.1~182.2) × 10⁻⁶] 及 Nb/Ta 比值(15.18~18.83),也符合幔源岩浆岩特征(Sun and Mcdonough, 1989)。根据深度及其对应的富铝矿物相,可将地幔源区划分为低压的斜长石相地幔、中压的尖晶石相地幔与高压的石榴石相地幔(Sun and Mcdonough,

1989; White and William, 2010)。同时,由于稀土元素在各个矿物相中具有显著不同的分配系数(Nicholls and Harris, 1980),因此,稀土元素含量及其比值可有效限定基性岩的地幔源区类型及部分熔融程度(Johnson, 1993)。原始地幔标准化的(Yb/Sm)_p-(Tb/Yb)_p 图解(p 代表原始地幔标准化)显示(图 8-A),陵南低凸起 LS32-A 井辉绿岩起源于石榴石二辉橄榄岩约 10%~15%的部分熔融,这与(Sm/Yb)-(La/Yb)图解得出的结论相一致(图 8-B)。

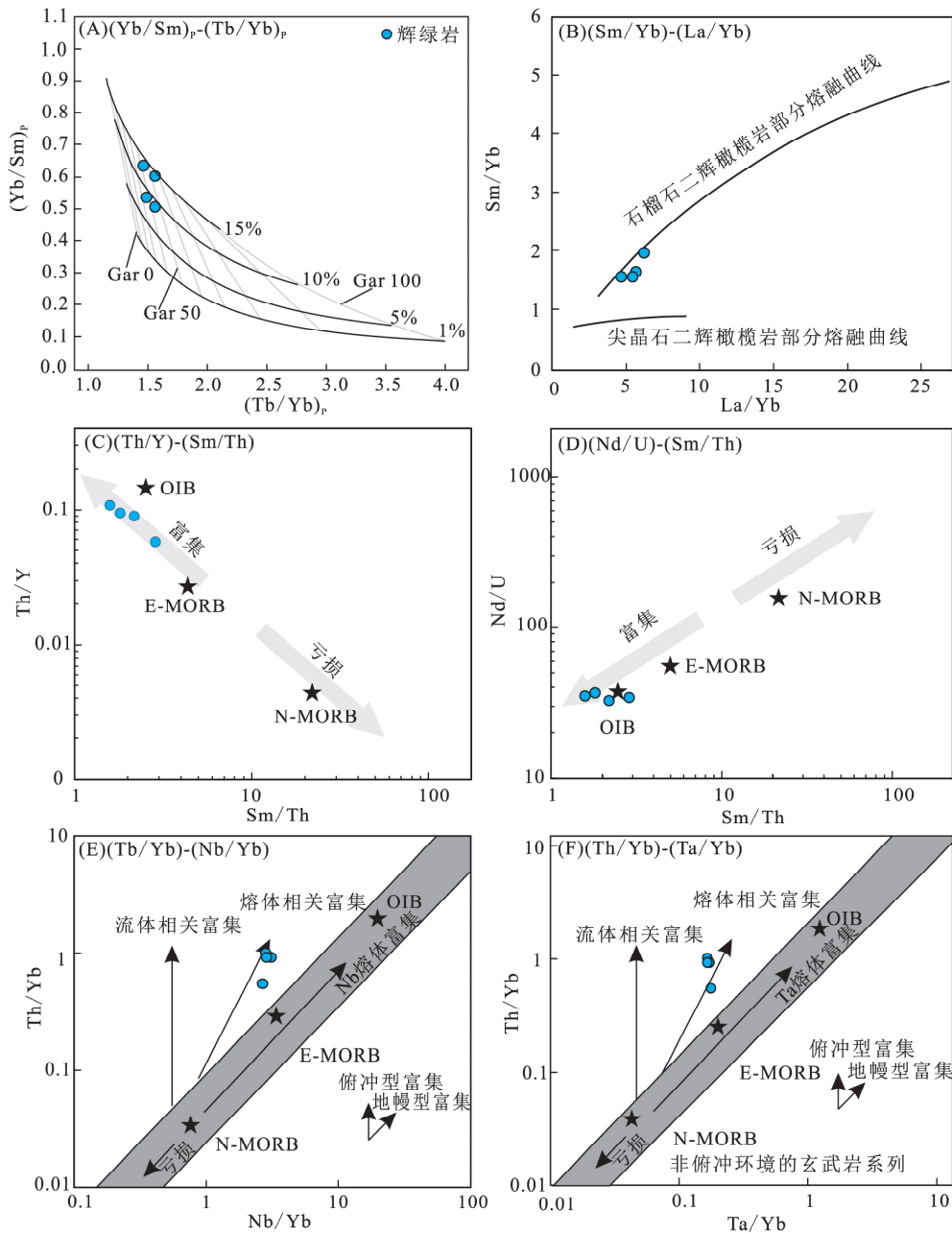


图 8 LS32-A 辉绿岩岩浆源区性质图解

Fig. 8 Diagrams of the characteristics of magmatic source of diabase samples in Well LS32-A

陵南低凸起 LS32-A 井辉绿岩具有富集大离子亲石元素(Rb, Th, U)和亏损高场强元素(Nb, Ta, Zr, Hf)的特征(图 5-B),暗示地幔源区可能受到俯冲组分的富集改造(Bebout, 2007; Spandler and Pirard, 2013)。孪生的不相容元素具有相似的地球化学性质,其比值不受部分熔融和分离结晶等作用的影响(Castillo et al., 2007; White and William, 2010),因而可反演地幔源区属性及其富集交代机制性质。陵南低凸起 LS32-A 井辉绿岩具有较高的 Th/Y 比值,较低的 Sm/Th 和 Nd/U 比值,具有介于富集洋脊玄武岩(E-MORB)和洋岛玄武岩(OIB)之间的地球化学组成,再次证实其地幔源区具有富集改造特征(图 8-C,D)。

地幔源区的富集机制主要包括俯冲板片相关的熔体或流体的交代作用(Castillo et al., 2007; Pearce, 2008; Zhao et al., 2019),而大离子亲石元素、稀土元素和高场强元素在熔体和流体中具有显著不同的分配系数,其中,大离子亲石元素和稀土元素倾向于进入流体,高场强元素更倾向于在熔体中迁移(Kessel et al., 2005)。因此,较高的 Th/Yb 比值指示俯冲流体的交代富集,而较高的 Nb/Yb 和 Ta/Yb 比值则被认为是受板片熔体交代的结果(Class et al., 2000; Castillo et al., 2007; Pearce, 2008)。Th/Yb-Nb/Yb 和 Th/Yb-Ta/Yb 图解显示,陵南低凸起 LS32-A 井辉绿岩表现出熔体相关的富集趋势(图 8-E,F)。而洋中脊玄武岩标准化的 La_N/Sm_N (N 代表洋中脊玄武岩标准化)比值可有效区分洋壳熔体和沉积物熔体的贡献(Li et al., 2022; Turner and Langmuir, 2022)。陵南低凸起 LS32-A 井辉绿岩具

有较大的 La_N/Sm_N 比值(1.95~2.25),暗示沉积物熔体的显著贡献。同时,岩石具有极低的锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值(图 6),显著不同于俯冲洋壳熔体的交代,也支持交代熔体来源于俯冲沉积物。综上所述,陵南低凸起 LS32-A 井辉绿岩起源于受俯冲沉积物熔体交代的富集地幔熔融。

4.2 岩石成因背景及其地质意义

目前,有关华南三叠纪岩浆活动的构造背景还存在争议,部分学者认为华南于二叠纪—三叠纪时期处于古太平洋板片俯冲的陆缘弧环境,华南印支期岩浆岩是古太平洋板片俯冲消减阶段的弧岩浆产物(Shen et al., 2018; Duan et al., 2018),而另一部分学者则认为华南晚二叠至早三叠世受控于古特提斯构造域,且古特提斯洋盆于早—中三叠世时期已经闭合,华南海南岛及邻区中—晚三叠世岩浆岩属于古特提斯造山旋回碰撞后阶段的产物(唐立梅等, 2013; 何慧莹等, 2016; He et al., 2020)。如前所述,基性岩浆岩是探究古构造环境的关键岩石探针,其 V, Ti, Nb 等高场强元素具有较强的稳定性,不易受流体交代作用的影响,因而可用于有效判断岩石的成因背景(Shervais, 1982; Meschede, 1986)。陵南低凸起 LS32-A 井辉绿岩中 Ti, V 和 Y 的质量分数中等, Nb 和 Zr 的质量分数较低,与富集洋中脊玄武岩和弧后盆地玄武岩特征相似(图 9)。样品亏损 Nb, Ta, Zr, Hf 等高场强元素(图 5-B),具有弧岩浆岩的地球化学特征。结合岩石起源于受俯冲组分交代的地幔熔融,本文认为陵南低凸起 LS32-A 井辉绿岩形成于俯冲增生造山旋回的弧后伸展或者碰撞后伸展环境。

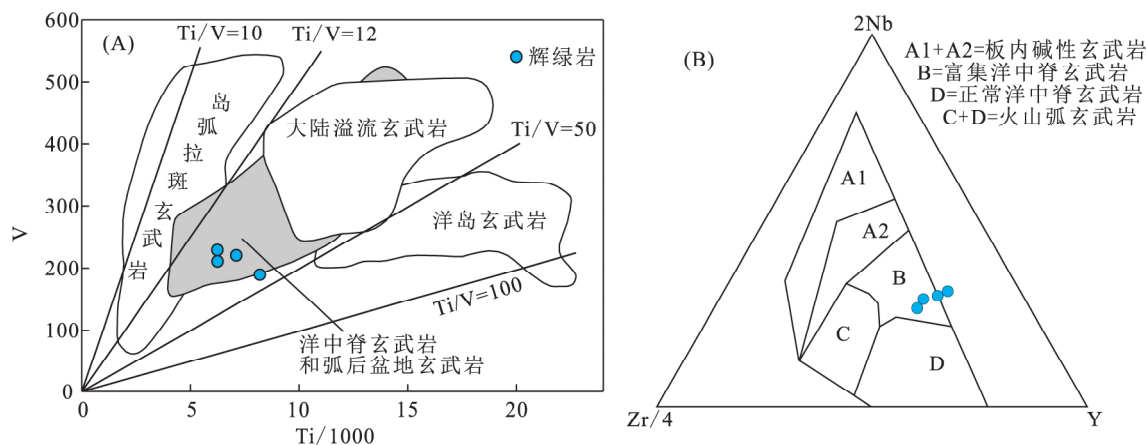


图 9 LS32-A 井辉绿岩构造环境判别图

Fig. 9 Diagrams of tectonic discrimination of the diabase in Well LS32-A

(A) V-Ti 构造环境判别图(底图据 Shervais, 1982); (B) 2Nb-Zr/4-Y 构造环境判别图(底图据 Meschede, 1986)

近年来的研究发现,海南岛于中—晚三叠世晚期处于古特提斯造山旋回的碰撞后伸展阶段,发育峰期变质年龄 237 Ma 的麻粒岩(高维等, 2022)、238~234 Ma 的双峰式岩浆岩(周佐民等, 2011; Tang et al., 2013)、241~237 Ma 的 A 型花岗岩等特殊类型岩石(吕方等, 2023; 齐重向等, 2023)。同时,邻区海南岛的上三叠统砾岩与下伏地层呈角度不整合接触(苟琪钰等,

2019),且不整合面上下地层的沉积相和沉积环境具有突变现象(李三忠等, 2017)。综合邻区海南岛晚三叠世伸展背景的岩石学资料,本文认为琼东南盆地 LS32-A 井辉绿岩与邻区海南岛的同时期富集洋中脊型基性岩一致(唐立梅等, 2010; 陈新跃等, 2014; 何慧莹等, 2016),均属于古特提斯造山旋回碰撞后伸展环境的岩浆产物(图 10)。

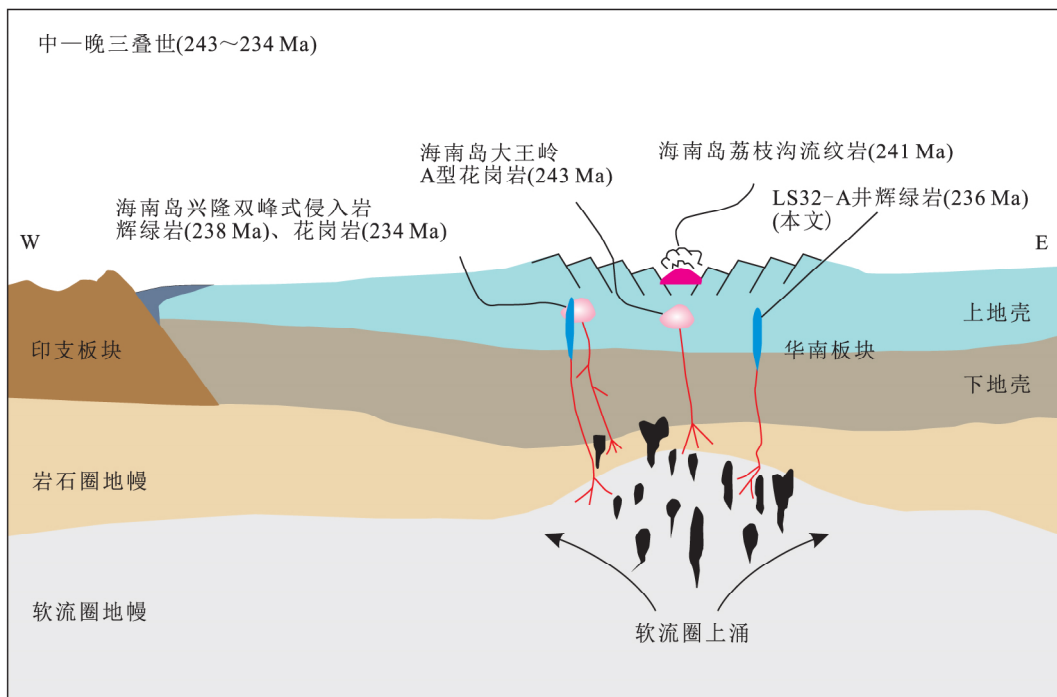


图 10 中晚三叠世华南板块、印支板块构造演化模式图

Fig. 10 Schematic diagram of tectonic evolution in South China and Indochina Blocks during the Triassic

综上所述,本文认为陵南低凸起三叠纪潜山基岩形成于古特提斯造山旋回的碰撞后伸展环境,其成因模型可能是:碰撞后背景下,深俯冲板片发生断离或岩石圈发生拆沉作用,导致深部软流圈地幔上涌;上涌的软流圈地幔促使受俯冲沉积物熔体富集交代的岩石圈地幔发生部分熔融,并形成具有弧岩浆印迹的基性岩浆;基性岩浆上升侵入早三叠世石英闪长岩,并最终结晶形成陵南低凸起 LS32-A 井辉绿岩。此后,晚中生代古太平洋及新生代古南海扩张等多期次构造作用将有助于改造琼东南盆地三叠纪潜山基岩,导致其发育优质裂缝和溶蚀改造孔隙,有利于优质油气储层的形成(侯明才等, 2023; 宋瑞友等, 2023)。显然,时代越老的基岩将经历后期多期次的构造-热液活动的改造,有助于形成优质储层。因此,琼

东南盆地潜山油气储层勘探应关注古特提斯造山旋回的潜山基岩。

5 结论

a. LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学揭示,琼东南盆地陵南低凸起 LS32-A 井辉绿岩的结晶年龄为 (236 ± 3) Ma,其围岩石英闪长岩的结晶年龄为 (250 ± 3) Ma。

b. 陵南低凸起 LS32-A 井辉绿岩具有低 SiO_2 和高 $\text{Mg}^\#$ 值特征(58~61),且富集大离子亲石元素,亏损高场强元素。部分样品具有显著的 Ba, K, Sr 和 Eu 正异常,以及富集的锆石 Hf 同位素组成($\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -9.08 \sim -1.53$)。岩石主要起源于受俯冲沉积物熔体富集交代的岩石圈地幔的部分熔融。

c. 综合分析表明,琼东南盆地三叠纪潜山基岩是古特提斯域岩浆活动的产物,陵南低凸起 LS32-A 井晚三叠世辉绿岩形成于碰撞后伸展环境。

致谢:感谢成都理工大学闫东东博士等在论文撰写过程中的有益探讨和帮助。

[参 考 文 献]

- 陈新跃,王岳军,韩会平,等,2014. 琼西南三叠纪基性岩脉年代学、地球化学特征及其构造意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 44(3):835—847.
- Chen X Y, Wang Y J, Han H P, *et al.*, 2014. Geochemical and geochronological characteristics of Triassic basic dikes in SW Hainan Island and its tectonic implications[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 44(3):835—847. (in Chinese)
- 高维,施建荣,孟庆奎,等,2022. 海南岛印支期麻粒岩的发现及其地质意义:来自锆石 U-Pb 定年与微量元素组成的新证据[J]. 地质学报, 96(2):426—444.
- Gao W, Shi J R, Meng Q K, *et al.*, 2022. Discovery and geological significance of the Indosinian granulites in Hainan Island; new evidence from U-Pb dating and trace element composition of zircons[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96(2):426—444. (in Chinese)
- 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[J]. 地球科学, 44(4):1357—1370.
- 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[J]. *Earth Science*, 44(4):1357—1370. (in Chinese)
- 郭书生,陈现军,廖高龙,等,2023. 琼东南盆地永乐 8 区基底花岗岩潜山分带特征[J]. 中国海上油气, 35(3):68—76.
- Guo S S, Chen X J, Liao G L, *et al.*, 2023. Zonation characteristics of the granite basement buried hill in Yongle 8 area of Qiongdongnan Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 35(3):68—76. (in Chinese)
- 何慧莹,王岳军,刘汇川,等,2016. 海南枫木地区基性岩的年代学、地球化学及其构造意义[J]. 中山大学学报(自然科学版), 55(4):146—157.
- He H Y, Wang Y J, Liu H C, *et al.*, 2016. Geochemical and geochronological characteristics of the Fengmu mafic rocks in Hainan and its tectonic implications [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 55(4):146—157. (in Chinese)
- 侯明才,何小胡,金秋月,等,2023. 琼东南盆地中生代潜山成储主控因素及分布规律[J]. 石油与天然气地质, 44(3):637—650.
- Hou M C, He X H, Jin Q Y, *et al.*, 2023. Factors controlling the formation and distribution of Mesozoic buried hill reservoirs in the Qiongdongnan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 44(3):637—650. (in Chinese)
- 冷杰,刘杰,陈安清,等,2021. 珠江口盆地惠州 26-6 潜山中生代中基性火山岩储层成因[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 48(6):661—674.
- Leng J, Liu J, Chen A Q, *et al.*, 2021. Genesis of Mesozoic intermediate-basic volcanic reservoirs in Huizhou 26-6 buried hill, Pearl River Mouth Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 48(6):661—674. (in Chinese)
- 李三忠,臧艺博,王鹏程,等,2017. 华南中生代构造转换和古太平洋俯冲启动[J]. 地学前缘, 24(4):213—225.
- Li S Z, Zang Y B, Wang P C, *et al.*, 2017. Mesozoic tectonic transition in South China and initiation of Palaeo-Pacific subduction[J]. *Earth Science Frontiers*, 24(4):213—225. (in Chinese)
- 李献华,周汉文,丁式江,等,2000. 海南岛洋中脊型变质基性岩:古特提斯洋壳的残片?[J]. 科学通报, 45(1):84—89.
- 李绪宣,钟志洪,董伟良,等,2006. 琼东南盆地古近纪裂陷构造特征及其动力学机制[J]. 石油勘探与开发, 33(6):713—721.
- Li X X, Zhong Z H, Dong W L, *et al.*, 2006. Paleogene rift structure and its dynamics of Qiongdongnan Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 33(6):713—721. (in Chinese)
- 廖宇斌,李碧乐,孙永刚,等,2020. 柴达木盆地北缘锡铁山铅锌矿区辉长岩锆石 U-Pb 年代、岩石地球化学和 Hf 同位素特征[J]. 世界地质, 39(3):495—508.
- Liao Y B, Li B L, Sun Y G, *et al.*, 2020. Zircon U-Pb age, petrochemistry and Hf isotope characteristics of gabbro in Xitieshan Pb-Zn mining area in northern margin of Qaidam Basin[J]. *Global Geology*, 39(3):495—508. (in Chinese)
- 刘飞,杨经绥,冯光英,等,2022. 古太平洋板片晚二叠-早三叠世俯冲后撤:来自海南岛弧岩浆作用的制约[J]. 岩石学报, 38(11):3455—3483.
- Liu F, Yang J S, Feng G Y, *et al.*, 2022. Late Permian to early Triassic subduction and retreating of the

- Paleopacific slab: Constraints from continental arc magmatism in Hainan Island[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 38(11):3455—3483. (in Chinese)
- 刘强,赵志雄,贾元琴,等,2019. 内蒙古北山小黑山辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地球化学特征[J]. *中国地质调查*, 6(1):41—47.
- Liu Q, Zhao Z X, Jia Y Q, *et al.*, 2019. Geochemical characteristics and LA-ICP-MS zircon U-Pb age of the gabbro in Xiaoheishan of Beishan area, Inner Mongolia[J]. *Geological Survey of China*, 6(1):41—47. (in Chinese)
- 鲁宝亮,王璞珺,张功成,等,2011. 南海北部陆缘盆地基底结构及其油气勘探意义[J]. *石油学报*, 32(4):580—587.
- Lu B L, Wang P J, Zhang G C, *et al.*, 2011. Basement structures of an epicontinental basin in the northern South China Sea and their significance in petroleum prospect[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(4):580—587. (in Chinese)
- 吕方,辛宇佳,李建华,等,2023. 海南岛三叠纪-三叠纪构造演化:源自岩浆岩和变质岩同位素年代学和地球化学的约束[J]. *地质学报*, 97(1):30—51.
- Lü F, Xin Y J, Li J H, *et al.*, 2023. Permian-Triassic tectonic evolution of Hainan Island: Constraints from geochronology and geochemistry of magmatic and metamorphic rocks [J]. *Acta Geologica Sinica*, 97(1):30—51. (in Chinese)
- 毛建仁,厉子龙,叶海敏,2014. 华南中生代构造-岩浆活动研究:现状与前景[J]. *中国科学:地球科学*, 44(12):2593—2617.
- Mao J R, Li Z L, Ye H M, 2014. Mesozoic tectono-magmatic activities in South China: Retrospect and prospect[J]. *Science China: Earth Sciences*, 44(12):2593—2617. (in Chinese)
- 齐重向,温淑女,庞崇进,等,2023. 海南岛北部中三叠世 A 型花岗岩的成因及其地质意义[J]. *地球化学*, 52(1):69—83.
- Qi Z X, Wen S N, Pang C J, *et al.*, 2023. Formation of Middle-Triassic A-type granites in northern Hainan Island and its geological implications[J]. *Geochimica*, 52(1):69—83. (in Chinese)
- 宋瑞有,何小胡,万阳,等,2023. 琼东南盆地潜山发育特征与成藏主控因素[J]. *世界石油工业*, 30(6):30—42.
- Song R Y, He X H, Wan Y, *et al.*, 2023. Development characteristics and main control factors of reservoir formation of buried hills in Qiongdongnan Basin[J]. *World Petroleum Industry*, 30(6):30—42. (in Chinese)
- 孙晓猛,张旭庆,张功成,等,2014. 南海北部新生代盆地基底结构及构造属性[J]. *中国科学:地球科学*, 44(6):1312—1323.
- Sun X M, Zhang X Q, Zhang G C, *et al.*, 2014. Texture and tectonic attribute of Cenozoic basin basement in the northern South China Sea [J]. *Science China: Earth Sciences*, 44(6):1312—1323. (in Chinese)
- 唐立梅,陈汉林,董传万,等,2010. 海南岛三叠纪中基性岩的年代学、地球化学及其地质意义[J]. *地质科学*, 45(4):1139—1155.
- Tang L M, Chen H L, Dong C W, *et al.*, 2010. Triassic neutral and basic rocks in Hainan Island, geochemistry and their geological significance[J]. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, 45(4):1139—1155. (in Chinese)
- 唐立梅,陈汉林,董传万,等,2013. 海南岛中三叠世造山后伸展作用:双峰式侵入岩的年代学及地球化学制约[J]. *中国科学:地球科学*, 43(3):433—445.
- Tang L M, Chen H L, Dong C W, *et al.*, 2013. Middle Triassic post-orogenic extension on Hainan Island: Chronology and geochemistry constraints of bimodal intrusive rocks[J]. *Science China: Earth Sciences*, 43(3):433—445. (in Chinese)
- 唐历山,范彩伟,张焱,等,2023. 琼东南盆地花岗岩潜山发育演化及控藏作用[J]. *海洋地质前沿*, 39(3):81—90.
- Tang L S, Fan C W, Zhang Y, *et al.*, 2023. Tectonic evolution of granite buried hill and its control on reservoir accumulation in Qiongdongnan Basin[J]. *Marine Geology Frontiers*, 39(3):81—90. (in Chinese)
- 王振峰,李绪深,孙志鹏,等,2011. 琼东南盆地深水油气成藏条件和勘探潜力[J]. *中国海上油气*, 23(1):7—13.
- Wang Z F, Li X S, Sun Z P, *et al.*, 2011. Hydrocarbon accumulation conditions and exploration potential in the deep-water region, Qiongdongnan basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 23(1):7—13. (in Chinese)
- 卫志杰,甘军,吴怡,等,2024. 琼东南盆地深水潜山油气成藏条件分析及有利目标预测——以陵南低凸起为例[J]. *天然气地球科学*, 35(2):313—326.
- Wei Z J, Gan J, Wu Y, *et al.*, 2024. Analysis of hydrocarbon accumulation conditions and prediction of favorable targets for the buried-hill in the deep water area of Qiongdongnan Basin: Case study of Lingnan Low Uplift[J]. *Natural Gas Geoscience*, 35(2):313—

326. (in Chinese)
- 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.
- 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)
- 温淑女,庞崇进,2018. 海南岛晚二叠世大岭岩体岩石成因: 锆石原位 Hf 同位素制约[J]. 桂林理工大学学报,38(4):654-662.
- Wen S N, Pang C J, 2018. Petrogenesis of the late Permian Daling intrusion on Hainan Island; Constraints from in-situ zircon Hf isotopes[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 38(4):654-662. (in Chinese)
- 吴元保,郑永飞,2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报,49(16):1589-1604.
- 谢才富,朱金初,丁式江,等,2006. 琼中海西期钾玄质侵入岩的厘定及其构造意义[J]. 科学通报,51(16):1944-1954.
- 谢文彦,王涛,张一伟,等,2009. 琼东南盆地西南部新生代裂陷特征与岩浆活动机理[J]. 大地构造与成矿学,33(2):199-205.
- Xie W Y, Wang T, Zhang Y W, *et al.*, 2009. Characteristics and dynamic analysis of Cenozoic rifting and magmatism in Southwest Qiongdongnan Basin[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 33(2):199-205. (in Chinese)
- 赵国锋,刘汇川,钱鑫,等,2018. 琼东南晚二叠世 I 型花岗岩成因及其构造指示[J]. 地球科学,43(4):1321-1332.
- Zhao G F, Liu H C, Qian X, *et al.*, 2018. Petrogenesis of late Permian I-type granites in SE Hainan Island and its tectonic implication for Paleotethyan evolution [J]. *Earth Science*, 43(4):1321-1332. (in Chinese)
- 钟佳,王岩泉,2022. 琼东南盆地松南低凸起花岗岩年代学、地球化学特征及构造环境[J]. 吉林大学学报(地球科学版),52(1):134-148.
- Zhong J, Wang Y Q, 2022. Geochronology, geochemical characteristics and tectonic environment of granite in Songnan Low Uplift, Qiongdongnan Basin[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 52(1):134-148. (in Chinese)
- 周佐民,谢才富,徐倩,等,2011. 海南岛中三叠世正长岩—花岗岩套的地质地球化学特征与构造意义[J]. 地质论评,57(4):515-531.
- Zhou Z M, Xie C F, Xu Q, *et al.*, 2011. Geological and geochemical characteristics of Middle Triassic syenite-granite suite in Hainan Island and its geotectonic implications[J]. *Geological Review*, 57(4):515-531. (in Chinese)
- Bebout G E, 2007. Metamorphic chemical geodynamics of subduction zones[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 260(3-4):373-393.
- Cao G Y, Li X, Xie G G, *et al.*, 2022. Petrogenesis of late Permian to Middle Triassic magmatic rocks on northern Hainan Island, South China: Implications for crust-mantle interaction and the tectonic evolution of the Paleo-Tethys [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 234:105238.
- Castillo P R, Rigby S J, Solidum R U, 2007. Origin of high field strength element enrichment in volcanic arcs: Geochemical evidence from the Sulu Arc, Southern Philippines[J]. *Lithos*, 97(3-4):271-288.
- Class C, Miller D M, Goldstein S L, *et al.*, 2000. Distinguishing melt and fluid subduction components in Umnak Volcanics, Aleutian Arc [J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 1(6):1-28.
- Cui X Z, Jiang X S, Wang J, *et al.*, 2015. Mid-Neoproterozoic diabase dykes from Xide in the western Yangtze Block, South China: New evidence for continental rifting related to the breakup of Rodinia supercontinent [J]. *Precambrian Research*, 268:339-356.
- Dilek Y, Tang L M, 2021. Magmatic record of the Mesozoic geology of Hainan Island and its implications for the Mesozoic tectonomagmatic evolution of SE China: Effects of slab geometry and dynamics in continental tectonics [J]. *Geological Magazine*, 158(1):118-142.
- Duan L, Meng Q R, Christie-Blick N, *et al.*, 2018. New insights on the Triassic tectonic development of south China from the detrital zircon provenance of Nanpanjiang turbidites [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 130(1-2):24-34.
- He H Y, Wang Y J, Cawood P A, *et al.*, 2020. Permian-Triassic granitoids, Hainan Island, link to Paleotethyan not Paleopacific tectonics [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 132(9-10):2067-2083.
- He H Y, Wang Y J, Qian X, *et al.*, 2018. The Bangxi-chexing tectonic zone in Hainan Island (South China) as the eastern extension of the Song Ma-Ailaoshan zone: Evidence of late Paleozoic and Triassic igneous rocks[J].

- Journal of Asian Earth Sciences, 164: 274–291.
- Hu Z C, Liu Y S, Gao S, *et al.*, 2012. Improved in situ Hf isotope ratio analysis of zircon using newly designed X skimmer cone and jet sample cone in combination with the addition of nitrogen by laser ablation multiple collector ICP-MS [J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 27(9): 1391–1399.
- Johnson K T M, 1993. Experimental cpx/and garnet/melt partitioning of REE and other trace elements at high pressures; Petrogenetic implications [J]. Mineralogical Magazine, 58: 454–455.
- Kessel R, Schmidt M W, Ulmer P, *et al.*, 2005. Trace element signature of subduction-zone fluids, melts and supercritical liquids at 120–180 km depth [J]. Nature, 437(7059): 724–727.
- Klinkhammer G, Elderfield H, Hudson A, 1983. Rare earth elements in seawater near hydrothermal vents [J]. Nature, 305(5931): 185–188.
- Klinkhammer G P, Elderfield H, Edmond J M, *et al.*, 1994. Geochemical implications of rare earth element patterns in hydrothermal fluids from mid-ocean ridges [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 58(23): 5105–5113.
- Kou C H, Liu Y X, Huang H, *et al.*, 2018. The Neoproterozoic arc-type and OIB-type mafic-ultramafic rocks in the western Jiangnan Orogen; Implications for tectonic settings [J]. Lithos, 312: 38–56.
- Li H J, Hermann J, Zhang L F, 2022. Melting of subducted slab dictates trace element recycling in global arcs [J]. Science Advances, 8(2): eabh2166.
- Li Z X, Li X H, 2007. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model [J]. Geology, 35(2): 179–182.
- 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.
- 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.
- Mazzucchelli M, Rivalenti G, Vannucci R, *et al.*, 1992. Primary positive Eu anomaly in clinopyroxenes of low-crust gabbroic rocks [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 56(6): 2363–2370.
- Meschede M, 1986. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram [J]. Chemical Geology, 56(3–4): 207–218.
- Nakada R, Shibuya T, Suzuki K, *et al.*, 2017. Europium anomaly variation under low-temperature water-rock interaction: A new thermometer [J]. Geochemistry International, 55(9): 822–832.
- Nicholls I A, Harris K L, 1980. Experimental rare earth element partition coefficients for garnet, clinopyroxene and amphibole coexisting with andesitic and basaltic liquids [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 44(2): 287–308.
- Paton C, Hellstrom J, Paul B, *et al.*, 2011. Iolite: Free-ware for the visualisation and processing of mass spectrometric data [J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 26(12): 2508–2518.
- Paton C, Woodhead J D, Hellstrom J C, *et al.*, 2010. Improved laser ablation U-Pb zircon geochronology through robust downhole fractionation correction [J]. Geochemistry Geophysics Geosystems, 11(3): 1–36.
- Pearce J A, 2008. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust [J]. Lithos, 100(1–4): 14–48.
- Petrus J A, Kamber B S, 2012. VizualAge: A novel approach to laser ablation ICP-MS U-Pb geochronology data reduction [J]. Geostandards and Geoanalytical Research, 36(3): 247–270.
- Shen L W, Yu J H, O'Reilly S Y, *et al.*, 2018. Subduction-related middle Permian to early Triassic magmatism in central Hainan Island, South China [J]. Lithos, 318: 158–175.
- Shervais J W, 1982. Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas [J]. Earth and Planetary Science Letters, 59(1): 101–118.
- Shinjo R, Chung S L, Kato Y, *et al.*, 1999. Geochemical and Sr-Nd isotopic characteristics of volcanic rocks from the Okinawa Trough and Ryukyu Arc: Implications for the evolution of a young, intracontinental back arc basin [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 104(B5): 10591–10608.
- Spandler C, Pirard C, 2013. Element recycling from subducting slabs to arc crust: A review [J]. Lithos, 170: 208–223.
- Sun S S, McDonough W F, 1989. Chemical and isotopic

- systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society of London Special Publications, 42(1): 313–345.
- Tang L M, Chen H L, Dong C W, *et al.*, 2013. Middle Triassic post-orogenic extension on Hainan Island: Chronology and geochemistry constraints of bimodal intrusive rocks [J]. Science China Earth Sciences, 56(5): 783–793.
- Turner S J, Langmuir C H, 2022. Sediment and ocean crust both melt at subduction zones[J]. Earth and Planetary Science Letters, 584: 117424.
- 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.
- White, William M, 2010. Oceanic island basalts and mantle plumes: The geochemical perspective[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 38(1): 133–160.
- Winchester J A, Floyd P A, 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. Chemical Geology, 20(4): 325–343.
- Xiong F H, Liu Q, Hou M C, *et al.*, 2023. Petrogenesis of Neoproterozoic mafic dykes in western Yangtze Block, South China: Implications for the assembly and break-up of Rodinia [J]. International Geology Review, 65(14): 2191–2211.
- Zhang W, Hu Z C, 2020. Estimation of isotopic reference values for pure materials and geological reference materials[J]. Atomic Spectroscopy, 41(3): 93–102.
- Zhao J H, Zhou M F, Wu Y B, *et al.*, 2019. Coupled evolution of Neoproterozoic arc mafic magmatism and mantle wedge in the western margin of the South China Craton[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 174(4): 1–16.
- Zhu W G, Zhong H, Li X H, *et al.*, 2008. SHRIMP zircon U-Pb geochronology, elemental, and Nd isotopic geochemistry of the Neoproterozoic mafic dykes in the Yanbian area, SW China[J]. Precambrian Research, 164(1–2): 66–85.

(责任编辑:甘娟娟)



(上接第 542 页)

- Zhao J X, Huang D C, Luo Y, *et al.*, 2009. Diagenetic features of reservoirs in the Chang-6 member, south Ordos basin [J]. Natural Gas Industry, 29(3): 34–37+133–134. (in Chinese)
- 郑荣才, 文华国, 韩永林, 等, 2006. 鄂尔多斯盆地白豹地区长 6 油层组湖底滑塌浊积扇沉积特征及其研究意义 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 33(6): 566–575.
- Zheng R C, Wen H G, Han Y L, *et al.*, 2006. Discovery and significance of sublacustrine slump turbidite fans in Chang 6 oil-bearing formation of Baibao region in Ordos Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 33(6): 566–575. (in Chinese)
- 邹才能, 杨智, 董大忠, 等, 2022. 非常规源岩层系油气形成分布与前景展望[J]. 地球科学, 47(5): 1517–1533.
- Zou C N, Yang Z, Dong D Z, *et al.*, 2022. Formation, distribution and prospects of unconventional hydrocarbons in source rock strata in China[J]. Earth Science, 47(5): 1517–1533. (in Chinese)
- Beard D C, Weyl P K, 1973. Influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated sand [J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 57(2): 349–369.
- Li P, Zheng M, Bi H, *et al.*, 2017. Pore throat structure and fractal characteristics of tight oil sandstone: A case study in the Ordos Basin, China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 149: 665–674.
- Xiao L, Bi L, Yi T, *et al.*, 2023. Pore structure characteristics and influencing factors of tight reservoirs controlled by different provenance systems: A case study of the Chang 7 members in Heshui and Xin'anbian of the Ordos Basin[J]. Energies, 16(8): 3410.

(责任编辑:黄维婷)