

•专题研究•

广西北海涠洲岛(含斜阳岛)第四纪玄武质火山岩的地球化学性质及其源区特征

李昌年, 王方正, 钟称生

(中国地质大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 广西北海涠洲岛(含斜阳岛)是我国最大的第四纪火山岩海岛, 岛内出露中更新世(Q_2)溢流相玄武质火山岩、晚更新世(Q_3)空落-沉积相沉火山碎屑岩和全新世(Q_4)爆发-溢流相玄武质火山岩, 其中中更新世为玄武岩, 全新世多为碧玄岩或苦橄质碧玄岩。两者比较, 前者相对高 SiO_2 、低 MgO ; 后者相对高 MgO 、低 SiO_2 。在地球化学上, 这些玄武质火山岩均属无Eu异常的轻稀土元素富集和无Nb异常的强不相容元素富集类型, 较之原始地幔和N-MORB具较低的Th/La值(0.04~0.28)、La/Nb值(0.52~0.91)、Rb/Nb值(0.45~1.09)、 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值(0.70352~0.70443)以及较高的 ϵNd 值(+3.2~+5.2)。上述特征说明, 晚更新世火山岩经历了以橄榄石和斜长石为主的分离结晶, 全新世火山岩则代表了部分熔融形成的原生岩浆, 同化混染作用对这两种岩浆演化的影响程度很低。根据微量元素和同位素示踪可知, 涠洲岛地区火山岩的源区类似于洋岛, 其岩浆来自更深的软流圈, 且无大陆岩石圈组分的卷入。为此进一步推测, 我国雷琼和北部湾地区深部存在一个从属于南海盆地地幔热柱的亚热柱, 该亚热柱的活动一直持续到全新世。

关键词: 火山岩; 第四纪; 地球化学; 源区; 地幔柱; 广西; 涠洲岛

中图分类号: P588.14; P59

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2005)01-0001-11

Geochemistry of Quaternary basaltic volcanic rocks of Weizhou island in Beihai City of Guangxi and a discussion on characteristics of their source

LI Chang_nian, WANG Fang_zheng and ZHONG Cheng_sheng

(Faculty of Earth Science, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Weizhou island in Beihai City of Guangxi is the largest Quaternary volcanic oceanic island in China. The surface of the island is covered with Middle Pleistocene (Q_2) basaltic volcanic rocks of effusive facies, Late Pleistocene (Q_3) sedimentary pyroclastic rocks of air-fall accumulation facies and Holocene (Q_4) basaltic volcanic rocks of explosive-effusive facies. Among them, Middle Pleistocene is dominated by basalt whereas Holocene by basanite or picritic basanite, with the former having higher SiO_2 and lower MgO than the latter. In geochemistry, these basaltic rocks are enriched in light rare earth elements without Eu anomaly and strong incompatible elements without Nb anomaly. These rocks have lower Th/La (0.14~0.28), La/Nb (0.52~0.91), Rb/Nb (0.45~1.09) and $^{87}Sr/^{86}Sr$ (0.70352~0.70443) ratios and higher ϵNd values (+3.2~+5.2) than other Cenozoic basalts in South China. These characteristics show that Late Pleistocene volcanic rocks were formed through fractional crystallization of olivine and plagioclase, that Holocene basaltic volcanic rocks represent primary magma formed by partial melting, and that crustal contamination seems not important in the formation and

收稿日期: 2004-04-05; 修订日期: 2004-08-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40172024); 国家地质公园申请和建议方案研究项目(016035)

作者简介: 李昌年(1946-), 男, 教授, 主要从事火成岩岩石学和岩石地球化学的教学和研究。

evolution of these two sorts of magma. Based on tracing of trace elements and isotopes, the authors infer that the source of volcanic rocks in Weizhou island is the same as that of the oceanic island. The magma must have originated from asthenosphere without the involvement of lithosphere components. Weizhou island represents asthenosphere window in epicontinental lithosphere of South China. Therefore, it is inferred that there exists a sub-plume in the depth of Leiqiong region and Beibu Bay, which belongs to Nanhai sea mantle plume whose activity lasted until Holocene.

Key words: volcanic rocks; Quaternary; geochemistry; source; mantle plum; Guangxi; Weizhou island

1 地质背景

位于我国广西北部湾的涠洲岛和斜阳岛是目前发现的我国最大的第四纪火山岩海岛,其内火山活动一直延续到全新世(6 900 ± 100a, 据 C¹⁴年龄)^①, 出露面积分别为 24.74 km² 和 1.89 km²。在区域上两岛位于中国东南大陆边缘陆棚(王鸿祯等, 1983; 杨森楠, 1997), 属于南海盆地北部湾拗陷区(王鸿祯等, 1983)。涠洲岛和斜阳岛的北面与已成为大陆的钦州残余古洋盆隔海相望, 东侧和南部为隔海的雷琼第四纪裂谷玄武岩所环绕(广东省地矿局, 1988)。在大地构造上, 涠洲岛地区受太平洋板块(菲律宾板块)、印度板块和欧亚板块的共同作用, 新华夏构造域和喜山构造域在此重叠和复合(王鸿祯等, 1983; Chang Sun_{lin} *et al.*, 1997; 朱炳泉等, 2002)。

根据涠洲岛和斜阳岛火山岩岩相特征和火山岩地层的接触关系, 可将其造岛历史划分为 4 个活动时期, 各时期喷发形成的地层自下而上分别为早更新世湛江组(Q_{1z})沉积-火山岩系、中更新世石岭组(Q_{2s})溢流相玄武质熔岩和爆发相火山碎屑岩系、晚更新世湖光岩组(Q_{3h})空降-沉积相巨厚层玄武质沉火山碎屑岩系^①以及全新世鳄鱼山组(Q_{4e})溢流相玄武质熔岩和碎屑流相层火山碎屑岩系(图 1)。其中湛江组仅见于水下, 地表出露的石岭组与上覆湖光岩组呈平行不整合接触, 鳄鱼山组火山岩与下伏湖光岩组呈角度不整合接触。

2 岩石学特征

涠洲岛和斜阳岛玄武质火山岩是根据 TAS 图(图 2)命名的。图中中更新世(Q₂)火山岩的成分点落在 B 区, 定名为玄武岩; 全新世(Q₄)火山岩除一个样品落在 S1 区定名为钾质粗面玄武岩外, 其余均投

入 U1 碧玄岩区, 其中 12 号、13 号和 14 号样接近苦橄岩成分区, 故定名为苦橄质碧玄岩。此外, 碧玄岩中还常见有橄榄岩的深源包体, 这在中更新世玄武岩中是不可能出现的。显然, 全新世和中更新世玄武质火山岩各有不同的化学成分特征。在岩相上, 碧玄岩为无斑或少斑结构, 气孔构造, 基质为玻基或间隐结构, 斑晶仅为橄榄石(伊丁石化), 偶见斜长石, 基质多为黄色橙玄玻璃, 有时见微晶斜长石; 玄武岩为斑状结构, 基质为间粒间隐结构或粗玄结构, 斑晶矿物为伊丁石化橄榄石、单斜辉石和斜长石, 基质除伊丁石化橄榄石、单斜辉石、斜长石外有时还含有玻璃物质。

3 地球化学特征

3.1 主量元素

涠洲岛和斜阳岛全新世和中更新世玄武质火山岩的主量元素成分列于表 1。在哈克图解中, 全新世和中更新世玄武质火山岩各有不同的成分范围, 其中全新世碧玄岩类相对高 MgO(9.69% ~ 13.14%) 和低 SiO₂(41.61% ~ 47.85%), 且随 MgO 降低其他氧化物有一定的变化趋势, 表现为 SiO₂、Al₂O₃、全碱和 FeO 增加, Fe₂O₃ 降低, CaO 的变化不明显; 中更新世玄武岩相对高 SiO₂(46.34% ~ 50.56%) 和低 MgO(6.08% ~ 9.11%), 且随 MgO 降低 Al₂O₃ 和 K₂O 有所增加, CaO、Na₂O 和 FeO 则略有降低(图 3)。

3.2 稀土元素

全新世和中更新世玄武质火山岩具有不同的稀土元素特征(表 2)。其中, 中更新世玄武岩具有较低的 Σ REE 含量(121.19 × 10⁻⁶ ~ 217.3 × 10⁻⁶)、LREE/HREE 值(2.63 ~ 5.09) 和 δEu 值(0.62 ~ 0.92); 而全新世碧玄岩具较高的 Σ REE 值(191.22 ~ 243.89 × 10⁻⁶)、LREE/HREE 值(4.59 ~ 5.46) 和

① 广西壮族自治区地矿局. 1990. 广西北海市 1:5 万综合地质调查报告.

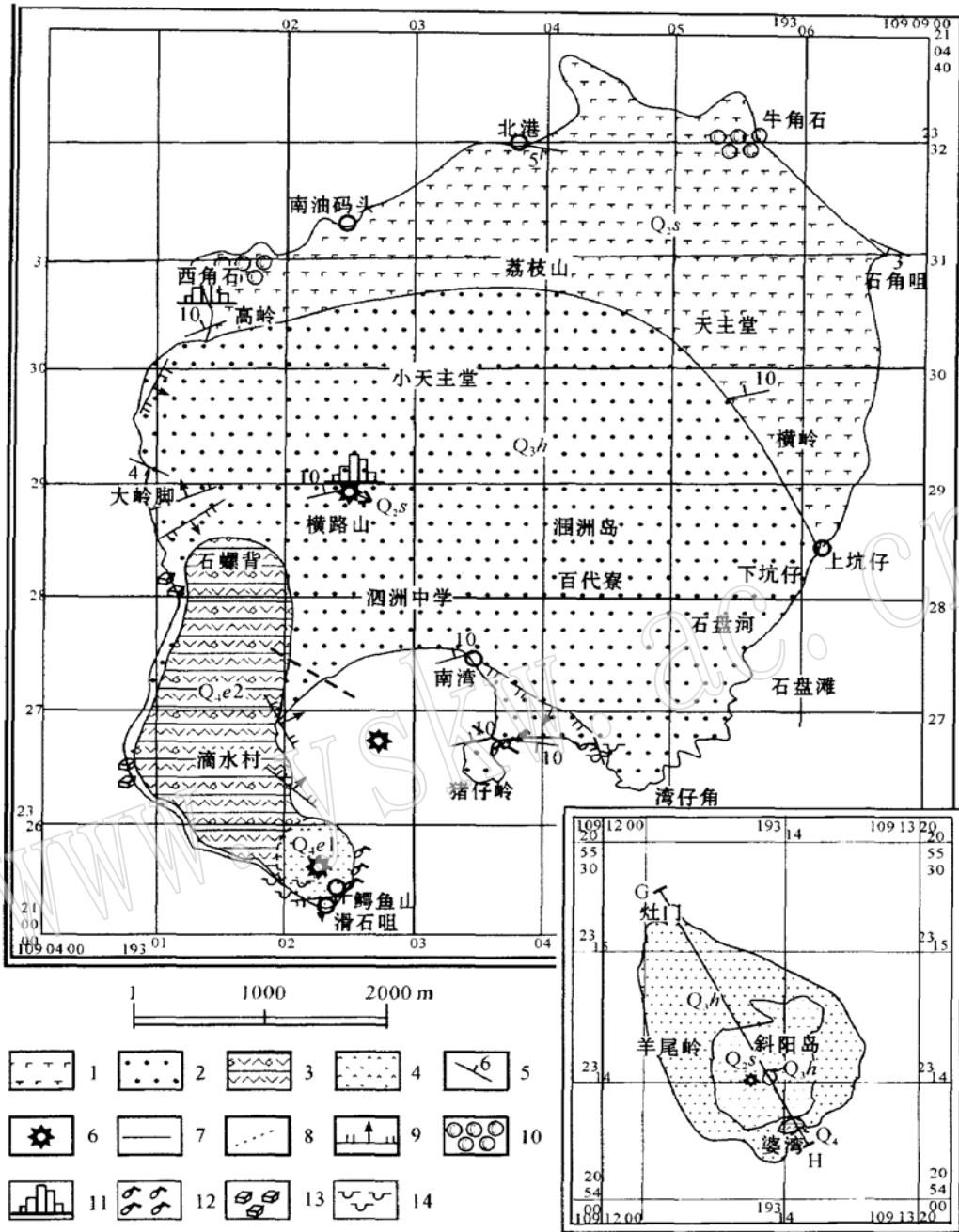


图 1 涠洲岛和斜阳岛火山岩岩相和地质图

Fig. 1 Lithofacies and geological sketch map of Weizhou and Xieyang islands

1—伊丁石化橄榄玄武岩 (溢流相); 2—含火山角砾的凝灰质粗砂岩 (滨海沉积相+ 空落堆积相); 3—含集块的层火山角砾岩 (碎屑流相); 4—含集块的火山角砾岩 (半固结, 近火山口空落堆积相); 5—岩层产状; 6—火山口; 7—地质界线; 8—岩相界线; 9—正断层; 10—球形风化出露点; 11—柱状节理出露点; 12—火山弹出露点; 13—冲击和震陷构造发育处; 14—巨形岩块崩塌处

Q_{2s}—中更新世石卵岭组; Q_{3h}—晚更新世湖光岩组; Q_{4e1}—全新世鳄鱼山组下段; Q_{4e2}—鳄鱼山组上段

1—iddingsitized olivine basalt (effusive facies); 2—agglomerate-bearing tuffaceous gritstone (littoral sedimentary facies + air_fall accumulation facies); 3—agglomerate-bearing layer volcanic breccia (pyroclastic flow facies); 4—agglomerate-bearing volcanic breccia (semi_solidified near_crater air_fall accumulation facies); 5—stratigraphic attitude; 6—crater; 7—geological boundary; 8—lithofacies boundary; 9—normal fault; 10—spherical weathering; 11—columnar joint; 12—volcanic bomb; 13—percussion and quake subsidence structure; 14—slacktip of great block; Q_{2s}—Miocene Shimaoling Formation; Q_{3h}—Pliocene Huguangyan Formation; Q_{4e1}—lower member of Holocene E' yushan Formation; Q_{4e2}—upper member of Holocene E' yushan Formation

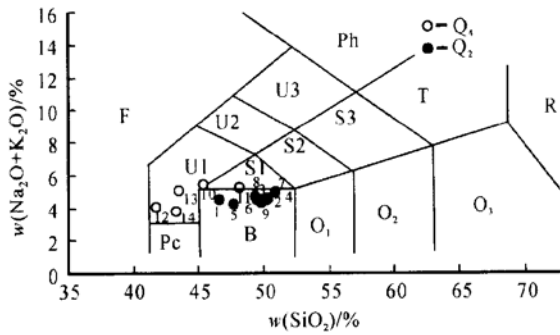


图2 涠洲岛和斜阳岛火山岩的TAS分类命名
(据 Le Maitre 等, 1989)

Fig. 2 TAS classification and names of volcanic rocks in Weizhou and Xieyang islands (after Le Maitre *et al.*, 1989)

图中点号同表1序号

U1—碧玄岩; Pc—苦橄岩; S1—粗面玄武岩; B—玄武岩

Numbers as for Table 1; U1—basanite; Pc—picrite;

S1—trachybasalt; B—basalt

δEu 值(0.90~0.93)。因此全新世碧玄岩比中更新世玄武岩有更强烈的轻稀土元素富集的分配型式和更不明显的负Eu异常(图4)。

3.3 微量元素

涠洲岛和斜阳岛内中更新世玄武岩和全新世碧玄岩样品的微量元素丰度和比值列于表2。总的来说,它们较之原始地幔和N-MORB有较低的Th/La值(0.05~0.26)、La/Nb值(0.46~0.91)和Rb/Nb值(0.45~1.09)。微量元素原始地幔标准化图解表明,两者均为不相容元素富集型,而且后者的富集程度要高于前者。此外,两者都无Nb的负异常(图5),其特征参数 Nb^* 值 $[2\text{Nb}_N/(\text{K}_N + \text{La}_N)]$ 除一个样品为0.95外,其余均大于1(1.03~2.24)。除此之外,全新世和中更新世玄武质火山岩中微量元素的Zr/Nb、Ba/Nb、Rb/Nb、Ta/Yb和Ba/La值均存在明显的差异(表3)。

3.4 Pb-Sr-Nd同位素体系

涠洲岛和斜阳岛内玄武质火山岩的Pb、Sr和

表1 涠洲岛和斜阳岛溢流相火山岩的化学成分

w_B%

Table 1 Chemical composition of volcanic rocks of effusive facies in Weizhou and Xieyang islands

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
样品号	w4_1	w5_2	w9_1	w9_2	w12_3	w20_4	w22_3	w25_1	x29_1	w14_1	w14_3	w16_7	w16_9	x29_2
产地	牛角石	北港	南油码头	南油码头	上坑仔	石角咀	横路山	南湾	婆湾	鳄鱼山	鳄鱼山	滑石咀	滑石咀	婆湾
时代	Q ₂	Q ₂	Q ₂	Q ₂	Q ₂	Q ₂	Q ₂	Q ₂	Q ₂	Q ₄	Q ₄	Q ₄	Q ₄	Q ₄
SiO ₂	49.83	49.91	50.56	50.05	47.46	49.12	46.34	49.09	49.47	45.18	47.85	41.61	43.08	43.29
TiO ₂	2.01	2.12	2.18	2.15	2.47	2.08	2.48	2.44	2.25	2.38	2.26	2.34	2.14	2.19
Al ₂ O ₃	13.19	13.27	14.47	14.22	14.46	13.86	12.36	14.23	12.87	11.97	11.87	11.81	11.44	11.15
Fe ₂ O ₃	2.96	3.24	3.19	3.69	9.07	4.38	5.45	5.72	4.39	3.36	4.05	5.29	5.33	4.52
FeO	7.20	7.03	6.70	6.07	3.43	6.38	5.97	5.58	6.62	7.87	7.05	6.25	5.50	6.83
MnO	0.15	0.15	0.15	0.19	0.15	0.28	0.16	0.15	0.15	0.17	0.19	0.17	0.19	0.17
MgO	8.85	8.52	6.08	6.45	6.45	6.42	9.11	6.18	8.49	9.97	9.69	12.89	13.14	11.20
CaO	9.82	9.80	9.95	9.58	8.14	9.78	10.58	8.91	9.52	9.96	9.77	10.30	9.01	10.39
Na ₂ O	3.02	2.95	3.11	2.85	2.56	2.85	3.75	2.79	2.94	3.47	3.49	2.64	2.04	3.51
K ₂ O	1.50	1.57	1.84	1.73	1.69	1.64	0.78	1.93	1.37	1.92	1.78	1.43	1.75	1.54
P ₂ O ₅	0.48	0.49	0.54	0.54	0.68	0.53	0.83	0.66	0.55	0.78	0.75	0.74	0.78	0.99
H ₂ O	0.62	0.64	0.84	1.98	2.63	1.76	1.60	1.76	0.80	2.37	0.78	3.00	4.33	3.18
CO ₂	0.11	0.09	0.14	0.23	0.57	0.68	0.28	0.28	0.34	0.34	0.17	1.25	1.02	0.23
Total	99.74	99.78	99.75	99.73	99.76	99.76	99.69	99.72	99.76	99.74	99.70	99.72	99.75	99.19
* [Mg]	0.62	0.60	0.52	0.50	0.50	0.53	0.60	0.50	0.59	0.62	0.62	0.68	0.70	0.64

Q₂为中更新世, Q₄为全新世, 9和14号样采自斜阳岛, 其余样均采自涠洲岛, 各样品均为玄武质岩石。* [Mg]= Mg/(Mg+Fe²⁺)。测试单位为湖北省岩矿测试中心, 应用熔片法在日产理学3080E1型波长色散X射线荧光光谱仪上测定, 分析精度(RSD%)小于0.9。

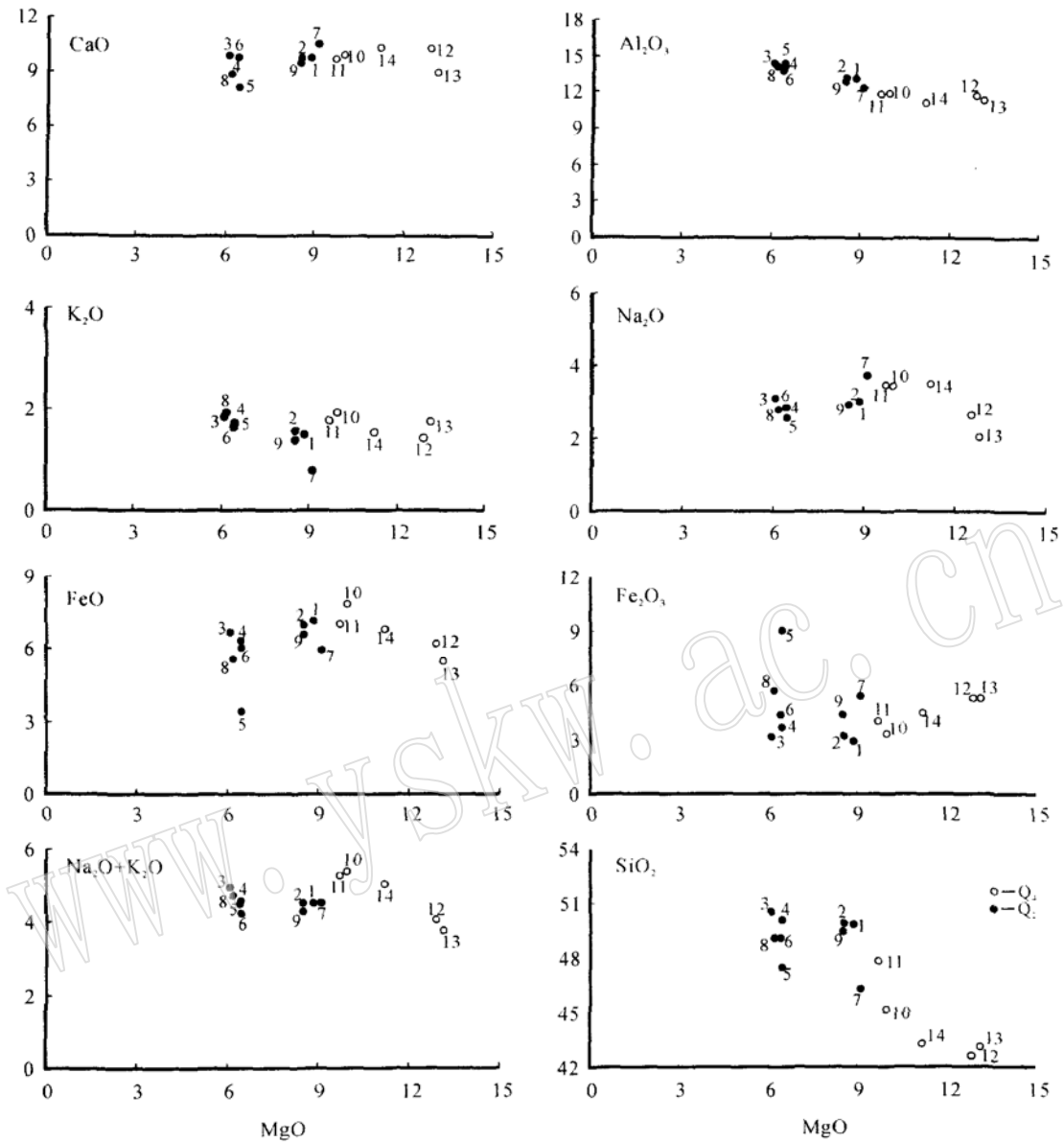


图 3 涠洲岛和斜阳岛火山岩 MgO 与其他氧化物的协变关系

Fig. 3 Covariant relation between MgO and other oxides for volcanic rocks in Weizhou and Xieyang islands

图中点号同表 1 序号; 符号同图 2

Numbers as for Table 1; symbols as for Fig. 2

Nd 同位素值列于表 4。

各玄武质火山岩的²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 值为 17.99~18.58, ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 为 15.503~15.659, ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 为 38.042~38.864, Th/U 值为 3.71~3.88, 其中中新世玄武岩的各种铅同位素比值高于全新世碧玄岩。在²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb - ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 变异图中, 各火山岩的成分点均位于 NHRL 线左侧(图 6)。表 4 中各火山岩的 μ 值为 9.32~9.57, 变化范围较小, 其中斜阳岛火山岩的比值大于涠洲岛。该比值不同于地球

形成早期地幔铅同位素 μ 为 7.91 的单阶段演化趋势, 这证实涠洲岛(含斜阳岛)玄武质火山岩中铅同位素经历了两阶段演化, 由此说明, 在地球铅同位素演化后又有放射性元素 U 和 Th 的富集事件发生。

涠洲岛和斜阳岛各玄武质火山岩的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 和 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 值范围相对集中, 分别为 0.70352~0.70443 和 0.512802~0.512907, 根据计算得到的 εNd 值均大于 1, 为 +3.2~+5.2。在 Sr-Nd 同位素相关图中各玄武质火山岩的成分点均位于图中左上

表2 涠洲岛和斜阳岛溢流相火山岩的稀土元素、微量元素含量及有关比值

 $w_B/10^{-6}$

Table 2 REE and trace element abundances of volcanic rocks of effusive facies in Weizhou and Xieyang islands

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
样品号	w4_1	w5_2	w9_1	w9_2	w12_3	w20_4	w22_3	w25_1	x29_1	w14_1	w14_3	w16_7	w16_9	x29_2
La	18.77	17.55	35.3	26.11	28.76	20.34	38.59	39.69	22.25	36.37	35.87	32.19	36.11	46.25
Ce	41.66	41.15	61.81	54.00	56.40	46.04	80.31	56.68	47.56	77.46	75.41	71.75	74.93	94.77
Pr	5.62	5.71	9.26	6.65	7.18	6.29	9.97	10.20	6.16	9.40	9.21	9.07	9.15	11.36
Nd	22.19	22.98	39.92	26.92	29.02	23.61	36.34	41.23	24.50	35.33	34.57	34.45	32.58	42.51
Sm	4.99	5.07	8.26	5.68	6.27	5.20	7.54	8.28	5.65	7.30	7.27	7.17	7.00	8.43
Eu	1.73	1.76	2.95	1.96	2.19	1.87	2.48	2.91	1.99	2.43	2.38	2.39	2.31	2.80
Gd	4.49	4.59	8.90	5.13	5.83	5.18	6.38	8.17	5.40	6.39	6.31	6.22	6.33	7.26
Tb	0.68	0.68	1.26	0.75	0.85	0.74	0.93	1.13	0.79	0.92	0.91	0.90	0.88	1.03
Dy	3.34	3.38	6.48	3.65	4.29	3.72	4.34	5.50	3.89	4.38	4.42	4.33	4.32	4.80
Ho	0.55	0.56	1.13	0.62	0.72	0.67	0.73	0.94	0.65	0.73	0.74	0.71	0.74	0.79
Er	1.41	1.41	2.94	1.54	1.79	1.71	1.72	2.34	1.61	1.75	1.83	1.74	1.83	1.86
Tm	0.19	0.20	0.38	0.22	0.24	0.23	0.24	0.31	0.22	0.24	0.25	0.24	0.25	0.25
Yb	1.04	1.06	2.06	1.18	1.30	1.15	1.22	1.61	1.19	1.25	1.35	1.26	1.35	1.23
Lu	0.14	0.15	0.29	0.16	0.17	0.16	0.16	0.22	0.15	0.17	0.18	0.17	0.19	0.16
Y	14.62	14.94	36.36	16.23	18.99	31.08	18.69	33.53	17.46	18.89	19.44	18.63	19.44	20.39
ΣREE	121.42	121.19	217.30	150.80	164.00	147.99	209.64	212.74	139.47	203.01	200.14	191.22	197.41	243.89
LREE/HREE	3.59	3.49	2.63	4.12	3.80	2.32	5.09	2.96	3.45	4.85	4.65	4.59	4.59	5.46
(La/Yb) _N	11.67	10.71	11.09	14.33	14.31	11.44	20.45	15.95	12.10	18.83	17.18	16.52	17.30	24.33
δEu	0.90	0.92	0.75	0.90	0.86	0.91	0.90	0.62	0.90	0.92	0.91	0.93	0.91	0.91
Cr	278	279	226	376	308	269	360	286	520	259	285	253	256	291
Ni	192	192	102	186	187	143	250	180	388	215	223	206	210	249
Co	52.6	54.1	47.3	47.9	42.7	48.6	56.7	45.3	48.4	55.4	53.9	54.2	51.6	51.7
Cu	50.2	55.0	58.2	52.9	62.5	54.8	56.8	57.9	43.9	58.1	59.1	54.5	46.2	48.5
Pb	23.3	21.9	9.1	31.3	18.9	12.2	11.6	12.1	19.1	34.8	7.7	32.8	16.6	31.3
Zn	134	128	132	110	144	118	141	150	127	141	139	138	138	123
Se	22.0	22.7	22.8	19.8	23.9	22.8	23.4	21.1	19.3	22.4	23.1	21.6	21.1	19.4
V	161	172	187	189	211	170	185	212	203	195	176	186	184	178
Rb	33.1	33.2	39.3	32.5	33.1	34.5	72.7	39.6	21.6	33.4	27.5	30.2	29.0	31.9
Sr	734	755	871	672	695	737	1103	674	602	1219	991	969	740	1201
Ba	418	370	510	415	546	379	580	730	379	513	498	432	423	564
Cs	0.94	0.61	0.39	0.54	0.67	0.31	1.26	0.75	0.37	0.76	1.03	0.74	0.20	0.49
Ga	22.7	24.0	27.2	22.8	26.1	25.1	25.0	25.3	21.3	24.7	25.2	22.7	23.0	21.0
Be	1.37	1.53	1.99	1.50	1.47	1.56	2.16	1.14	0.86	2.07	2.12	1.94	2.06	1.92
Nb	35.8	37.9	42.6	37.5	47.7	38.0	68.3	43.5	32.1	64.6	61.6	60.5	56.7	70.3
Ta	2.17	1.98	2.28	2.43	2.84	2.23	3.95	2.82	2.32	3.62	3.17	3.72	3.28	4.09
Zr	149	153	174	155	180	159	220	178	143	220	210	202	202	207
Hf	3.58	3.23	3.70	3.93	4.27	3.57	4.84	4.55	3.79	4.84	4.28	4.74	4.53	4.62
Y	17.7	18.0	44.5	17.5	22.4	37.9	22.2	38.7	18.4	22.6	23.9	21.7	22.2	23.1
Th	3.47	1.23	1.67	6.49	4.01	1.75	4.43	6.06	5.78	4.14	2.79	7.10	4.36	12.90
U	1.59	0.32	0.22	2.99	2.06	0.43	1.58	2.14	1.03	1.31	0.69	5.17	2.30	5.53
Ta/Hf	0.60	0.61	0.61	0.62	0.66	0.62	0.88	0.61	0.61	0.74	0.74	0.78	0.72	0.88
Zr/Nb	4.2	4.0	4.1	4.1	3.8	4.2	3.2	4.1	4.4	3.4	3.4	3.3	3.6	3.0
La/Nb	0.52	0.46	0.82	0.69	0.60	0.53	0.56	0.91	0.69	0.56	0.58	0.53	0.63	0.66
Ba/Nb	11.7	9.8	11.9	11.1	11.4	10.0	8.5	16.8	11.8	7.9	8.1	7.1	7.5	8.0
Rb/Nb	0.92	0.87	1.05	0.87	0.69	0.91	1.09	0.91	0.67	0.52	0.45	0.50	0.51	0.45
Th/Nb	0.097	0.032	0.039	0.17	0.084	0.046	0.065	0.14	0.18	0.06	0.045	0.12	0.077	0.18
Ce/Nb	1.16	1.09	1.45	1.44	1.18	1.21	1.18	1.30	1.48	1.20	1.22	1.19	1.32	1.35
Th/La	0.18	0.07	0.05	0.25	0.14	0.09	0.12	0.15	0.26	0.11	0.08	0.22	0.04	0.28
Ba/La	22.27	21.08	14.4	15.9	18.9	18.6	15.0	18.4	17.0	14.1	13.9	13.4	11.7	12.2
Th/Yb	3.3	1.2	0.79	5.5	3.1	1.5	3.6	3.7	4.9	3.3	2.0	5.6	3.2	10.5
Ta/Yb	2.09	1.87	1.10	2.06	2.18	1.94	3.24	1.75	1.95	2.90	2.35	2.95	2.43	3.32
Ba/Th	120	300	305	64	136	216	131	120	66	124	178	61	97	44
Nb/U	22.5	118.4	193.6	12.5	23.1	88.4	43.2	20.3	31.2	49.3	89.3	11.7	24.7	12.7
Nb [*]	1.20	1.28	1.28	1.03	1.29	1.19	2.24	0.95	1.09	1.46	1.46	1.70	1.37	1.58

数据由中国地质大学(武汉)壳幔体系开放实验室使用6100DRS等离子体光谱仪(ICP-MS)分析完成;样品产地、时代和岩性同表1。

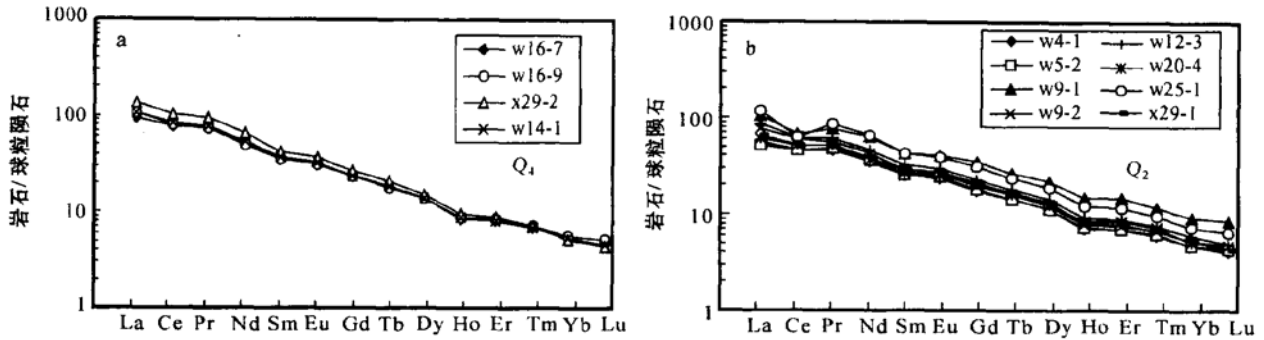


图 4 涠洲岛和斜阳岛火山岩球粒陨石标准化稀土元素分布型式[球粒陨石值据 Boynton(1984)]
 Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns of volcanic rocks in Weizhou and Xieyang islands
 [Chondrite value after Boynton (1984)]

表 3 涠洲岛和斜阳岛 Q₄ 和 Q₂ 玄武质火山岩微量元素比值对比

Table 3 Ratios of trace elements in Q₄ and Q₂ basaltic volcanic rocks in Weizhou and Xieyang islands

	Zr/Nb	Ba/Nb	Rb/Nb	Ta/Yb	Ba/La
Q ₄	< 3.6	< 8.0	< 0.52	> 2.35	< 14.1
Q ₂	> 4	> 8.5	> 0.67	< 2.18	> 14.4

角的第一象限, 而且落在地幔趋势线附近(图 7), 属软流圈地幔的源区。

4 岩石成因讨论

4.1 岩浆形成和演化

Frey 等(1978)认为, 玄武质岩石的[Mg]值在

表 4 涠洲岛和斜阳岛玄武质火山岩的 Pb, Sr, Nd 同位素比值及特征参数

Table 4 Pb, Sr and Nd isotopic ratio and their characteristic parameter of basaltic volcanic rocks

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	w4_1	w5_1	w9_1	w9_2	w12_4	w20_4	w22_3	w25_1	w14_1	w14_3	w16_7	x29_2
²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	18.56	18.58	17.99	18.32	18.26	18.19	18.18	18.47	18.15	18.44	18.35	18.49
²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	15.565	15.562	15.503	15.540	15.506	15.526	15.539	15.620	15.499	15.584	15.546	15.659
²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	38.624	38.595	38.042	38.393	38.222	38.234	38.284	38.515	38.152	38.555	38.369	38.864
Th/U	3.73	3.71	3.77	3.75	3.71	3.75	3.78	3.74	3.73	3.76	3.73	3.88
μ 值	9.38	9.37	9.32	9.36	9.30	9.34	9.37	9.50	9.29	9.43	9.36	9.57
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0.70367	0.70360	0.70379	0.70354	0.70367	0.70377	0.70368	0.70389	0.70443	0.70368	0.70395	0.70352
(1σ)	±3	±3	±5	±3	±6	7	±9	±4	±4	±2	±5	±1
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	0.512884	0.512872	0.512802	0.512906	0.512888	0.512852	0.512869	0.512863	0.512907	0.512858	0.512906	0.512867
(2σ)	±7	±8	±7	±6	±7	±10	±8	±8	±9	±8	±7	±5
εSr	-11.8	-12.8	-10.1	-13.6	-11.8	-10.4	-11.6	-8.6	-0.97	-11.6	-7.8	-13.9
εNd	+4.8	+4.5	+3.2	+5.2	+4.9	+4.2	+4.5	+4.4	+5.2	+4.3	+5.2	+4.4

各同位素比值均为宜昌地质矿产研究所同位素室测定; εNd 值计算使用的 CHUR 标准值为 0.512638; εSr 值计算使用的 CHUR 标准值为 0.7045; Pb 全流程空白值为 $2.0 \times 10^{-8} \sim 4.5 \times 10^{-8}$ g。

0.65~0.75 范围时其代表了原生岩浆的成分。根据表 1 可知, 全新世碧玄岩的[Mg]值为 0.62~0.70, 显然该岩石总体上属未分异的原生岩浆。全新世碧玄岩的 MgO 与其他氧化物变异关系证明, 该岩浆也曾发生过橄榄石的低度分离结晶和碱性长石的堆晶作用。与上述不同的是, 涠洲岛中更新世玄武岩的

[Mg]值仅为 0.50~0.62, 较之原生岩浆[Mg]值要低, 表明该岩浆属演化的岩浆, 而且与全新世碧玄岩岩浆具同源性。在前述 MgO 与其他氧化物的变异关系图中, 其 CaO 和 Na₂O 与 MgO 呈不明显的正相关, 而 Al₂O₃ 和 K₂O 与 MgO 呈不明显的负相关, 由此证明, 中更新世玄武岩浆的演化主要受橄榄石和

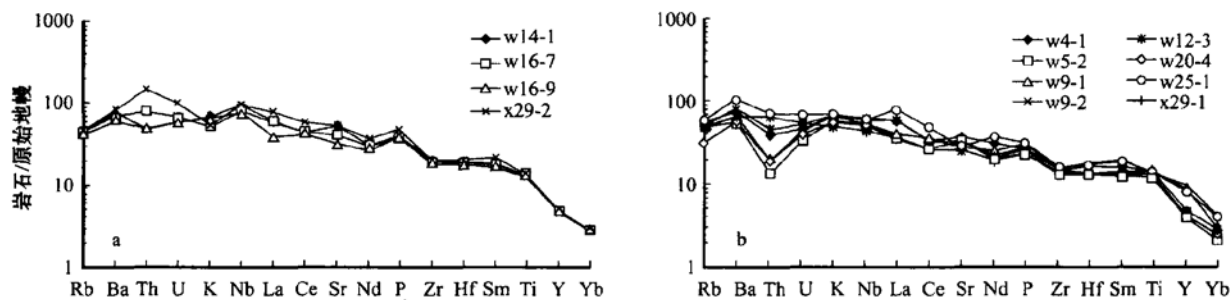


图5 涠洲岛和斜阳岛火山岩原始地幔标准化的微量元素蛛网图[原始地幔值据 McDonough 等(1985)]

Fig. 5 Spidergram of primitive mantle-normalized trace element ratios[primitive mantle values after McDonough *et al.* (1985)]

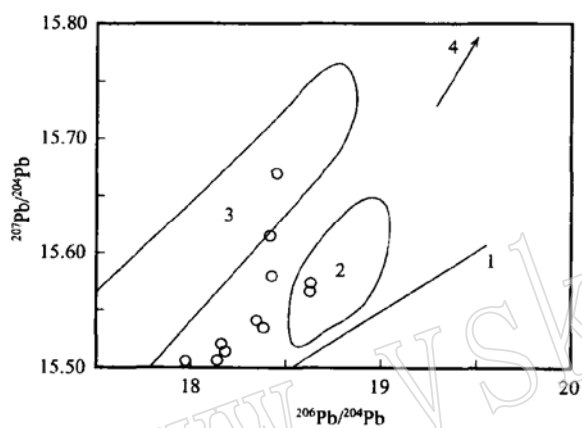


图6 涠洲岛和斜阳岛火山岩的铅同位素比值及源区示踪(据 Norman 等, 1989)

Fig. 6 Isotopic ratio of Pb and their tracing source for volcanic rocks in Weizhou and Xieyang island (after Norman *et al.*, 1989)

1—北半球大洋玄武岩铅同位素成分回归线(NHRL); 2—软流圈地幔+ 消减组分; 3—大陆下岩石圈地幔; 4—富集Th、U的地壳
1—northern hemisphere reference line (NHRL); 2—asthenosphere mantle+ subduction component; 3—subcontinental lithosphere mantle; 4—enriched in Th and U crust

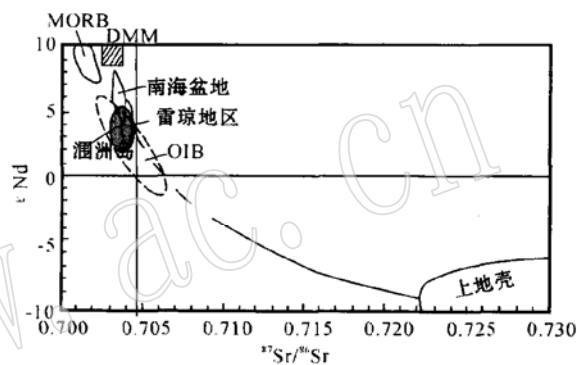


图7 涠洲岛和斜阳岛玄武质火山岩的 $\epsilon Nd - ^{87}Sr / ^{86}Sr$ 成分变异图

Fig. 7 Variation of $\epsilon Nd - ^{87}Sr / ^{86}Sr$ of basaltic volcanic rocks in Weizhou and Xieyang islands

南海盆地和雷琼地区晚新生代玄武质火山岩的范围据 Tu 等(1991, 1992); DMM 为亏损地幔(Jahn, 1986); MORB 和 OIB 分别为洋中脊玄武岩和洋岛玄武岩 (Alle'gre *et al.*, 1981)

The late Cenozoic basaltic volcanic rocks in South China sea Basin and Leiqiong region after Tu *et al.* (1991, 1992); DMM is depleted mantle (Jahn, 1996); MORB and OIB after Alle'gre *et al.* (1981)

斜长石的分离结晶制约(图3)。

在微量元素比值蛛网图中涠洲岛玄武质火山岩均无 Nb 的负异常, 且 Nb* 特征值多大于 1, 说明该地区玄武质火山岩的形成未经岩浆的地壳混染。这一结论在微量元素 Nb - Zr 和 La - Zr 图(图8)中同样可以得到证实。图中各玄武质火山岩的成分点呈较好的正相关线性关系, 说明同化混染作用对涠洲岛地区玄武质岩浆演化的影响是微不足道的(Wilson, 1989)。

4.2 岩浆来源

在微量元素比值蛛网图中, 涠洲岛和斜阳岛玄

武质火山岩为不相容元素富集, 且具 Nb 和 Hf 正异常的特征(图5), 这与洋岛碱性玄武岩的比值曲线十分类似, Th/Yb - Ta/Yb 变异关系可以进一步证明这一点。在图9中, 这些玄武质火山岩的成分点集中在富集地幔区域且具正向斜率的变化趋势, 与图中板内玄武岩(W 矢量)的成分变化是一致的。为此得出结论, 涠洲岛地区具有与洋岛相似的构造背景。

上述事实显然与涠洲岛属大陆边缘的认识存在矛盾, 由此说明, 涠洲岛地区第四纪火山喷发的岩浆来自与洋岛类似、且比岩石圈更深的软流圈, 并非源于大陆边缘岩石圈。

利用 $Ce/Nb - Th/Nb$ 变异图可以很好地示踪涠洲岛玄武质火山岩形成的地球动力学特征(图 10)。图中这些玄武质火山岩的微量元素比值成分点均低于 N_MORB 和原始地幔, 大多位于冰岛地幔热柱 E_MORB 和 OIB 的范围或附近, 表明该火山岛的形成与地幔热柱的活动有关, 这与南海盆地之下存在一个巨大的地幔热柱的认识(Deng *et al.*; 1994; 邓晋福等, 1996)是一致的。该地幔热柱的活动不仅导致岩石圈减薄(也有可能破裂)而且使软流圈顶面埋深变浅, 从而导致大面积的火山喷发。我国雷琼地

区和北部湾分布的新生代第四纪玄武质火山岩就是该地幔热柱活动的表现, 而且这种地幔热柱活动一直持续到全新世。这从该区域火山岩岩性分布特征可以得到证实, 如雷琼地区以拉斑玄武岩为主, 碱性玄武岩次之(广东省地矿局, 1998), 而北部湾内的涠洲岛则恰恰相反, 而且还发现有代表地幔热柱成因的苦橄质碧玄岩。在地域上, 雷琼地区和北部湾位于南海盆地北缘, 故其深部只是存在一个从属于南海盆地地幔热柱的地幔亚热柱, 该亚热柱的中心应位于涠洲岛, 同时, 它也是南海盆地地幔热柱向西北

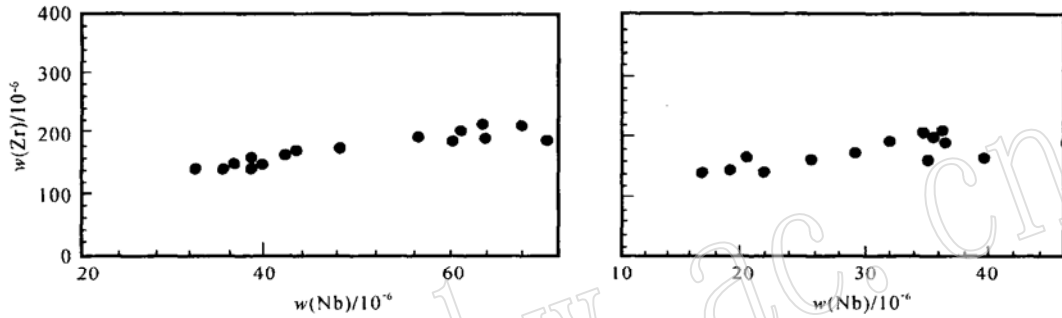


图 8 涠洲岛和斜阳岛玄武质火山岩的 Zr- Nb (a) 和 Zr- La (b) 变异图

Fig. 8 Variation of Zr- Nb (a) and Zr- La (b) for basaltic volcanic rocks in Weizhou and Xieyang islands

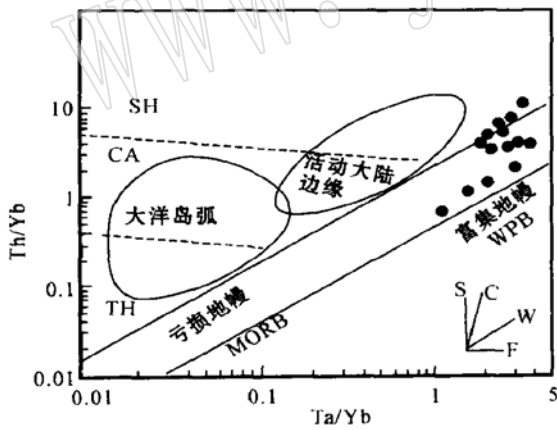


图 9 涠洲岛和斜阳岛玄武质火山岩的 $Th/Yb - Ta/Yb$ 变异图(据 Wilson, 1989)

Fig. 9 Variation of $Th/Yb - Ta/Yb$ of basaltic volcanic rocks in Weizhou and Xieyang islands(after Wilson, 1989) 虚线划分了拉斑玄武质(TH)、钙碱性(CA)和钾玄岩质(SH)区域; 右下边矢量分别代表消减组分(S)、地壳混染(C)、板内富集(W)和分离结晶(F)的影响

The boundaries dashed lines are tholeiitic (TH), calc-alkaline (CA) and shoshonitic (SH) field, the vectors in the right below side represent influence of subduction components (S), within-plate enrichment (W), crustal contamination (C) and fractional crystallization (F)

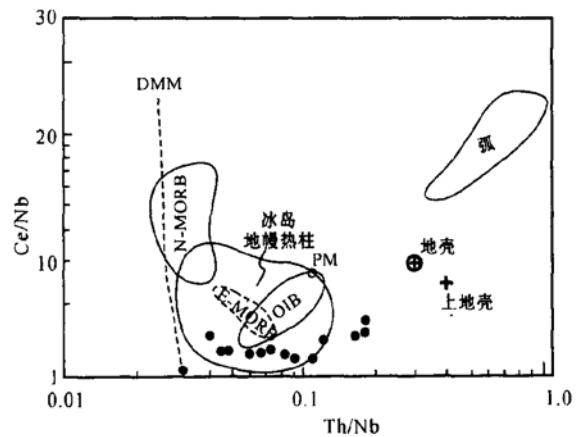


图 10 涠洲岛和斜阳岛玄武质火山岩的 $Ce/Nb - Th/Nb$ 变化图解

Fig. 10 Variation of $Ce/Nb - Th/Nb$ for basaltic volcanic rocks in Weizhou and Xieyang islands PM (原始地幔), DMM (亏损地幔), E-MORB, N-MORB, OIB, 弧, 地壳和上地壳据 Saunders 等(1988, 1991); 冰岛地幔热柱据 Hemond 等(1993)

PM (primitive mantle), DMM (depleted mantle), N-MORB, E-MORB, OIB arcs, crust upper crust are from Saunders *et al.* (1988, 1991); iceland plume is from Hemond *et al.* (1993)

方向扩展的尾柱位置(张招崇等, 2001)。在尾柱的中央, 原有的大陆边缘岩石圈因伸展强烈而导致破裂, 使该地幔热柱在局部位置不能发生与岩石圈底界的相互作用而直接构成软流圈或地幔热柱的窗口。涠洲岛地区玄武质火山岩形成未经历大陆地壳物质的混染也证明了这一点。

5 结论

(1) 涠洲岛和斜阳岛全新世火山岩为碧玄岩, 并含有橄榄岩的深源包体; 中更新世火山岩为玄武岩, 两者具有不同的成分范围。

(2) 全新世碧玄岩属原生岩浆结晶形成, 未经历分离结晶和同化混染作用; 中更新世玄武岩属演化的岩浆, 为单斜辉石分离结晶所形成。

(3) 两岛玄武质岩浆的源区同为洋岛, 为南海盆地热柱从属的地幔亚热柱持续到全新世还在活动的产物。

References

- Alle'gre C J, Dupre B, Lambred B, *et al.* 1981. The subcontinental versus suboceanic debate I. lead, neodymium, strontium isotopes in primary alkali basalts from a shield area: the Ahaggar volcanic suite [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 52(1): 85~ 92.
- Boynton W V. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies [A]. Hederson P. *Rare Earth Element Geochemistry* [C]. Amsterdam: Elsevier Science, 63~ 114.
- Chung Sun_lin, Cheng Hai, Jahn Bor_ming, *et al.* 1997. Major and trace element, and Sr_Nd isotope constraints on the origin of paleogene volcanism in the South China prior to the South China Sea opening [J]. *Lithos*, 40: 203~ 220.
- Deng Jinfu, Zhao Hailing, Mo XuanXue, *et al.* 1994. Mantle plume beneath the East Asia continent and lithosphere motion[A]. *Internatconf. Arctic Marg. Magadam. Abst*[C].
- Deng Jinfu, Zhao Hailing, Mo Xuanxue, *et al.* 1996. *Continental Roots_Plume Tectonics of China—Key to the Continental Dynamics* [M]. Beijing: Geological Public. House (in Chinese with English abstract).
- Frey F A and Prinz M. 1978. Ultramafic inclusion from San Carlos, Arizona: petrologic and geochemical data bearing on their petrogenesis [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 38: 129~ 176.
- Guangdong Bureau of Geology and Mineral Resources. 1988. *Regional Geology of Guangdong Province* [M]. Beijing: Geological Public. House (in Chinese).
- Hemond C, Arndt N T, Lichtenstein U, *et al.* 1993. The heterogeneous iceland plume: Nd_Sr_O istopes and trace element constraints [J]. *J. Geophysical Res.*, 98(B9): 15 833~ 15 850.
- Jahn B M. 1986. Mid_ocean ridge or marginal basin origin of the east Taiwan ophiolite: Chemical and isotopic evidence [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 922: 194~ 206.
- Le Maitre R W, Bateman P, Dudek A, *et al.* 1989. *A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms: Recommendation of the International Union of Geological Subcommission on the Systematic of Igneous Rocks* [M]. Oxford: Blackwell Scientific.
- McDonough W F and Sun S S. 1985. Isotopic and geochemical systematics in Tertiary - Recent basalts from southeastern Australia and implication for the sub_continental lithosphere [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 49: 2 051~ 2 067.
- Norman M D and Leeman W P. 1989. Geochemical evolution of Cenozoic_Cretaceous magmatism and its relation to tectonic setting, southwestern Idaho, U.S.A. [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 94(1~ 2): 78~ 96.
- Saunders A D, Norry M J and Tarney J. 1988. Origin of MORB and chemically_depleted mantle reservoirs: Trace element constraints [J]. *J. Petrology (special lithosphere issue)*, 415~ 445.
- Saunders A D, Norry M J and Tarney J. 1991. Fluid influence on the trace element compositions of subduction zone magmas [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society, London*, A335: 337~ 392.
- Tu K, Flower M F J, Carlson R W, *et al.* 1991. Sr_Nd and Pb isotopic compositions of Hainan basalts (South China): implications for a subcontinental lithosphere Dupal source [J]. *Geology*, 19: 567~ 569.
- Tu K, Flower M F J, Carlson R W, *et al.* 1992. Magmatism in the South China Basin. 1. isotopic and trace element evidence for an endogenous Dupal mantle component [J]. *Chem. Geol.*, 97(1/2): 47~ 63.
- Wilson M. 1989. *Igneous Petrogenesis: A Global Tectonic Approach* [M]. London: Unwin Hyman.
- Wang Hongzhen, Yang Sennan and Li Sitian. 1983. Mesozoic and Cenozoic basin formation in east China and adjacent regions and development of the continental margin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 57(3): 213~ 223 (in Chinese with English abstract).
- Yang Sennan, 1997. Tectonic framework and tectonic transformation of the Pacific continental margin belts in the Mesozoic and Cenozoic [J]. *Earth Science Frontiers*, 4(3~ 4): 247~ 255 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaochong, Wang Fusheng, Fang, Weiming, *et al.* 2001. A discussion on some problem concerning the study of the Emeishan basalts [J]. *Acta Petrological et Mineralogica*, 20(3): 239~ 246. (in Chinese with English abstract).
- Zhu Bingquan, Wang Huifen, Chen Yuwei, *et al.* 2002. Geochronological and geochemical constraint of the Cenozoic extension of Cathaysian lithosphere and tectonic evolution of the border sea basins in East Asia [J]. *Geochimica*, 31(3): 213~ 221 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 邓晋福, 赵海玲, 莫宣学, 等. 1996. 中国大陆根-柱构造——大陆动力学的钥匙[M]. 北京: 地质出版社.
- 广东省地矿局. 1988. 广东省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
- 王鸿楨, 杨森楠, 李思田. 1983. 中国东部及邻区中-新生代盆地发育及大陆边缘区的构造发展[J]. 地质学报, 57(3): 213~ 223.
- 杨森楠. 1997. 中-新生代太平洋陆缘带的构造格局和构造转换[J]. 地学前缘, 4(3~ 4): 247~ 255.
- 张招崇, 王福生, 范蔚茗, 等. 2001. 峨眉山玄武岩研究中的一些问题讨论[J]. 岩石矿物学杂志, 20(3): 239~ 246.
- 朱炳泉, 王慧芬, 陈毓蔚, 等. 2002. 新生代华夏岩石圈减薄与东亚边缘海盆构造演化的年代学与地球化学制约研究[J]. 地球化学, 31(3): 213~ 221.

• 简讯 •

与镁铁-超镁铁质岩有关的岩浆矿床成矿体系
研究新进展会议(IGCP 479)在香港召开

2004年12月11~15日,由IGCP 479(International Geological Correlation Program 479)主办的与镁铁-超镁铁质岩有关的岩浆矿床成矿体系研究新进展会议在香港大学召开。IGCP 479主要研究21世纪铂族元素可持续应用与发展——应对机遇与挑战等问题。作为该项目在亚洲地区首次举办的会议,主要目的是了解中国及世界与镁铁-超镁铁质岩有关的岩浆矿床成矿体系研究的新思路及新方法,为IGCP 479项目所研究的关键性科学问题提供一些基础资料。

此次会议有来自中国、加拿大、美国、英国、印度、南非、澳大利亚、埃及、芬兰、俄罗斯等国家的研究所、大学及私人公司的代表百余人参会。会上交流的发言报告多达135个,展板5件。

会议期间举办了培训、交流和野外考察等活动。在会前的课程培训中,几位该领域的国际知名学者就有关问题做了为期3天的深入讲解。课程涵盖了岩浆型Cu₂Ni-PGE矿床研究的基础理论问题、该类型著名矿床的地质特征及矿床成因模式、矿床勘查常用地球化学方法等几个方面,既有基础理论介绍,又有实例讲解,体现了理论与实际研究紧密结合的特点。

加拿大著名学者Anthony J. Naldrett介绍了世界几个著名的岩浆型Cu₂Ni-PGE硫化物矿床(如Busheveld、Noril'sk Sudbury、Voisey's Bay)的最新研究成果,指出了形成该类大型矿床的必要条件;澳大利亚学者Reid R. Keays介绍了形成岩浆型Cu₂Ni-PGE矿床的母岩浆过程及其特征,并讲解了如何运用PGE特征指导岩浆型Cu₂Ni-PGE硫化物矿床勘查活动;英国学者Hazel Prichard介绍了利用铂族元素矿物特征揭示不混溶硫化物液滴的分离结晶过程,并用以研究大型岩浆型Cu₂Ni-PGE矿床的形成过程;加拿大学者C. Michael Lesher介绍了定量模拟岩浆型Cu₂Ni-PGE硫化物矿床成矿过程的方法;美国学者Edward M. Ripley和Chusi Li分别介绍了运用稳定同位素地球化学特征和橄榄石特征研究该类矿床的成矿过程,并用以指导找矿实践。

会议交流以岩浆型Cu₂Ni-PGE硫化物矿床、Fe-Ti-V氧化物矿床的基础理论与实验方法及其成因模式研究为主要内容,以典型矿床为主要研究对象,对当前该类型矿床形成的理论、PGE分析测试方法、世界各地(中国金川、峨眉山、俄罗斯的Noril'sk、南非的Bushveld、印度、芬兰)的岩浆型Cu₂Ni-PGE硫化物及Fe-Ti-V氧化物矿床的最新研究成果进行了广泛的讨论与交流。

会议交流活动结束后,苏尚国博士带领会议代表约10人前往中国甘肃金川岩浆型Cu₂Ni-PGE矿床进行参观考察;钟宏博士与赵均红博士带领会议代表约15人前往中国四川的攀枝花钒钛磁铁矿矿床进行参观考察。

此次会议的成功召开不仅展示了岩浆型Cu₂Ni-PGE硫化物矿床、Fe-Ti-V氧化物矿床的最新研究成果,更为重要的是加强了我国学者与世界学者之间的交流与合作,对中国及世界在该领域的研究发展起到了积极的推动作用。

(柴凤梅 供稿)