

北部湾玄武岩地幔源区性质的地球化学示踪及其构造环境

贾大成^{1,3}, 丘学林², 胡瑞忠³, 卢焱¹

(1. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130026; 2. 中国科学院南海海洋研究所, 广东 广州 510301;
3. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学开放研究实验室, 贵州 贵阳 550002)

摘要:北部湾发育一系列上新世玄武岩,其全岩 K-Ar 年龄为 5.9—2.4Ma,是伴随北部湾盆地拉张而形成的一次较大规模的岩浆活动。岩石化学和微量元素地球化学研究表明,该玄武岩属于碱性玄武岩系,具有 OIB 型微量元素配分模式,形成于较均一的地幔源区,具有以 EM2 型地幔端元为主、混有 HIMU 和 EM1 型端元的地幔源区性质,形成于地幔柱或地幔热点的构造环境。北部湾盆地与红河剪切断裂带具有相同的地幔源区,而与受太平洋板块影响的地幔源区差别较大。玄武岩形成和北部湾盆地拉张主要受印度板块向欧亚板块俯冲导致的红河断裂带大规模剪切走滑控制,5 Ma 左右红河断裂带由左行走滑剪切转变为右行走滑剪切的构造性质转换可能是导致地幔异常扰动和岩浆活动的地球动力学机制。

关键词:玄武岩;地球化学;地幔源区;构造环境;北部湾

中图分类号:P588.145;P59

文献标识码:A

北部湾位于南海的西北部,其形成和演化受欧亚板块、印度板块和太平洋板块间相互作用的影响,形成多期拉张的陆缘盆地和丰富的石油天然气资源。自 20 世纪 70 年代以来,国内外在南海及北部湾进行了大量的地质、地球物理综合调查和研究,对南海及北部湾的地壳结构、构造属性和地球动力学等提出了不同的认识^[1-4],但反映北部湾拉张型大陆边缘深部地球化学性质以及据此探讨岩石圈深部动力学条件的资料较少。在北部湾发育一系列上新世玄武岩,在涠洲岛和广西山口镇地表出露的玄武岩是深部地幔熔融的直接产物,是研究地幔岩浆源区地球化学性质、分析岩浆形成深部构造环境最直接的对象。本文通过对北部湾出露的玄武岩岩石化学和微量元素分析,示踪玄武岩地幔源区的地球化学性质,并与典型地区不同构造环境条件下形成的玄武质岩石进行对比,探讨北部湾玄武岩形成时的深部地球动力学条件,为全面了解南海北部的构造演化历史提供科学依据。

1 北部湾及其邻区玄武岩产出的地质条件及形成时代

在北部湾涠洲岛和广西山口镇均有玄武岩产出(图 1),它们是伴随北部湾拉张而形

收稿日期:2002-09-24; **修订日期:**2002-11-12

基金项目:中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-209)、(KZCX2-102);中国科学院南海海洋研究所边缘海地质与古环境开放实验室基金项目(BYH01A02);中国科学院地球化学研究所矿床地球化学开放研究实验室基金项目(2000)资助

作者简介:贾大成(1958—),男,辽宁新民人,副教授,博士,现主要从事地球化学研究工作。E-mail: jiadacheng@sina.com

成的玄武岩喷发。目前已识别出南湾、横路山、斜阳村和合浦县新圩等 4 个火山口,它们均由 3 个火山喷发旋回组成,形成厚达 300 余米的火山碎屑岩和火山熔岩。主要岩石类型为橄榄玄武岩和杏仁状橄榄粗玄武岩及玄武质凝灰岩。火山岩呈平缓的岩被覆盖于第三系碎屑岩之上,火山喷发间歇期沉积夹层中的介形类化石和植物化石的时代属于晚第三纪^[5]。为了限定玄武岩的形成时代,对涠洲岛和山口镇玄武岩进行了 K-Ar 年龄分析(表 1),获得涠洲岛玄武岩的全岩 K-Ar 年龄 $5.9 \pm 0.2 \text{ Ma}$,山口镇玄武岩的全岩 K-Ar 年龄为 $2.4 \pm 0.1 \text{ Ma}$,虽然这两个年龄值不能精确地代表玄武岩的形成年龄,但可限定其形成时代为上新世—更新世。该期玄武岩的喷发可能为北部湾盆地最晚一期的岩浆活动,是近代北部湾盆地在拉张过程中深部地幔岩浆活动的表现。

为便于不同构造环境条件下地幔源区的对比,选取红河走滑断裂带附近的云南屏边县玄武岩和华南大陆内部的广西玉林地区安山岩,分别代表红河走滑断裂带和华南大陆内部 NE 向断裂带的地幔源区(图 1)。屏边玄武岩紧邻红河走滑断裂带,构成火山喷发机构,由橄榄玄武岩组成,根据本次工作所测得的全岩 K-Ar 年龄为 $1.1 \pm 0.1 \text{ Ma}$ (表 1),这一年龄与在该区获得的⁴⁰Ar-³⁹Ar 加权平均年龄 $1.3 \pm 0.7 \text{ Ma}$ 极为相近^[6],其形成时代亦应为更新世,为红河断裂带南部最晚的一期岩浆活动,其形成与红河断裂带走滑剪切有关,是红河断裂带地幔源区在第四纪时期活动的表现。

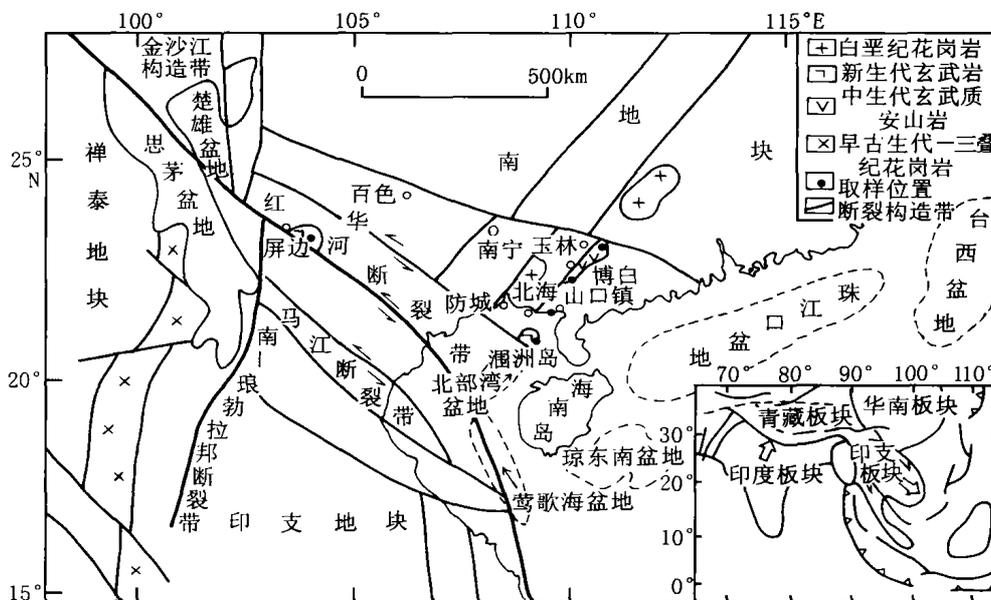


图 1 北部湾及邻区构造和采样位置图

Fig. 1 Tectonic diagram of Beibu Gulf and its adjacent region and locations of the samples

广西东部的玉林 - 合浦 NE 向断裂是华南大陆内部延入北部湾盆地的较为明显的深断裂,与华南东部一系列受太平洋板块作用的深断裂平行。由于断裂带内尚未发现喜山期的岩浆活动,但却广泛出露中生代晚期的安山岩、玄武安山岩,为此以这些安山岩作为受太平洋板块影响地幔源区的代表,对该断裂带内博白玄武质安山岩体所测得的全岩 K-Ar 年龄为 $99.8 \pm 2.4 \text{ Ma}$ (表 1)。

表 1 北部湾及邻区玄武岩 K-Ar 同位素年龄分析结果

Tab. 1 K-Ar isotopic age of basalts in Beibu Gulf and its adjacent region

样品编号	采样地点	岩性	K / %	$^{40}\text{Ar}_{\text{rad}}/\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$	$^{40}\text{Ar}_{\text{rad}}/\%$	年龄/Ma $\pm 1\sigma$
WSH-2	涠洲岛	玄武岩	1.38	1.408 \pm 11	21.48	5.9 \pm 0.2
SK-1	山口镇	玄武岩	1.41	5.825 \pm 12	18.68	2.4 \pm 0.1
PB-2	屏边	安山岩	2.71	5.203 \pm 12	20.23	1.1 \pm 0.1
YL-7	博白	玄武安山岩	1.49	2.651 \pm 10	83.66	99.8 \pm 2.4

分析单位:中国地震局地质研究所 K-Ar 年龄实验室。

2 地球化学特征

2.1 岩石地球化学特征

北部湾玄武岩 SiO_2 含量变化在 45.05%—48.52% 之间(表 2), $\text{Mg}^\#$ 值变化在 63.46—70.59 间,并且与 SiO_2 含量呈负相关,构成连续的岩石演化序列,属于基性火山岩系。玄武岩的里特曼指数(σ)为 2.40—8.00,平均 4.55,属于碱性玄武岩系列,在火山岩 TAS 分类图解中,均一致表现为碱性玄武岩系(图 2),多数样品均具有低钾(K_2O 为 1.32%—1.71%)、较高钠(Na_2O 为 1.82%—2.80%)的特征, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值为 1.27—2.11,平均为 1.67,类似于低钾碱性玄武岩系,与红河断裂带附近的屏边玄武岩在岩石化学组成上基本一致,而与玉林地区安山岩不同(表 2,图 2)。 TiO_2 含量在 0.37%—0.80%,平均为 0.59%,明显高于玉林地区安山岩的 TiO_2 含量,与俯冲消减作用有关的高钾、低钛玄武质岩石明显不同^[7]。

表 2 北部湾及相邻地区玄武岩岩石化学分析结果(重量%)

Tab. 2 Major element analyses of basalts in Beibu Gulf and its adjacent region (wt%)

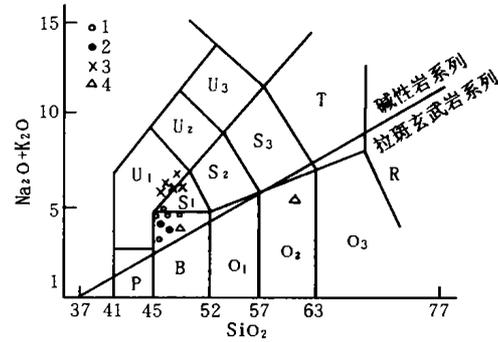
样号	山口镇玄武岩		涠洲岛玄武岩					屏边县玄武岩				玉林	
	Shk-1	Shk-2	WSh-1	WSh-2	WSh-3	WSh-4	WSh-5	PB-1	PB-2	PB-3	PB-4	PB-6	YL
SiO_2	48.52	46.70	45.05	46.12	46.64	48.48	45.99	46.70	44.99	48.36	50.96	46.41	60.72
TiO_2	0.80	0.77	0.72	0.50	0.62	0.37	0.38	0.87	0.80	0.72	0.87	0.80	0.20
Al_2O_3	13.62	15.31	13.34	13.56	14.60	14.65	13.34	13.46	13.34	13.56	11.93	14.56	14.40
Fe_2O_3	1.50	2.99	2.46	2.60	2.63	2.39	1.55	3.60	3.65	2.26	2.31	2.60	1.31
FeO	7.90	6.64	6.50	6.57	7.10	6.30	7.65	6.41	6.25	6.82	6.92	7.64	4.36
MnO	0.18	0.19	0.19	0.20	0.22	0.25	0.19	0.25	0.23	0.25	0.26	0.25	0.14
MgO	7.70	8.11	8.73	7.59	8.01	7.83	8.94	8.61	8.72	7.84	7.98	8.79	3.26
CaO	9.64	9.68	9.46	8.88	8.65	8.25	10.53	9.60	9.74	8.97	8.71	8.59	8.48
Na_2O	2.19	2.31	2.74	2.79	2.80	2.47	1.82	3.44	3.56	3.39	3.25	3.40	2.17
K_2O	1.45	1.42	1.31	1.32	1.70	1.71	1.43	2.85	2.90	2.75	2.79	2.75	2.55
P_2O_5	0.67	0.73	0.80	0.94	0.97	0.86	0.63	0.94	0.97	1.00	1.03	0.94	0.17
CO_2	1.00	0.75	0.80	0.75	0.70	0.85	1.30	0.60	0.70	0.65	0.55	0.80	0.50
总计	99.57	99.44	99.48	99.38	99.44	99.31	99.25	99.43	99.53	99.46	88.47	99.48	99.99
$\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$	1.51	1.63	2.09	2.11	1.65	1.44	1.27	1.21	1.23	1.23	1.16	1.24	0.85
$\text{Mg}^\#$	63.46	68.28	70.59	67.26	67.12	68.79	69.69	70.53	71.29	67.24	67.35	67.28	60.54
σ	2.40	3.76	8.00	5.41	5.56	3.19	3.53	10.69	20.97	7.03	4.58	11.09	1.25

注:分析工作由中国科学院地球化学研究所分析实验室李荪蓉完成,精度优于 1%。 $\sigma = (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})^2 / \text{SiO}_2 - 43$; $\text{Mg}^\# = 100\text{Mg} / (\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$ 。

图 2 北部湾及邻区玄武岩 TAS 分类图

B—玄武岩; U₁—碱玄武岩; U₂—响岩质碱玄武岩;
 U₃—碱玄武质响岩; S₁—粗面玄武岩;
 S₂—玄武质粗面安山岩; S₃—粗面安山岩;
 O₁—玄武安山岩; O₂—安山岩; O₃—英安岩;
 T—粗面岩; R—流纹岩; F—似长石岩; P—苦橄玄武岩;
 1. 涠洲岛玄武岩; 2. 山口镇玄武岩;
 3. 屏边玄武岩; 4. 玉林玄武质安山岩

Fig. 2 TAS diagram for classification of basalts in Beibu Gulf and its adjacent region



2.2 微量元素地球化学特征

北部湾玄武岩的过渡元素 Cr、Ni 含量变化范围不大(表 3),表明结晶分异作用较弱,

表 3 北部湾及相邻地区玄武岩微量元素分析结果

Tab. 3 Trace element analyses of basalts in Beibu Gulf and its adjacent region

元素	山口镇玄武岩		涠洲岛玄武岩					屏边县玄武岩		玉林玄武质安山岩	
	Shk-1	Shk-2	WSh-1	WSh-2	WSh-3	WSh-4	WSh-5	PB-1	PB-2	YL-6-1	YL-7
Sc	18.23	19.05	18.44	17.96	21.67	18.54	21.44	19.96	19.37	17.62	23.24
V	169.41	170.72	188.68	173.74	189.07	167.97	174.33	189.08	191.46	144.60	185.05
Cr	216	219	222	200	226	198	250	182	178	223	299
Co	50.3	51.1	50.2	47.9	51.9	45.4	48.8	44.5	45.1	27.3	35.9
Ni	182	194	181	155	175	143	190	133	129	95	149
Cu	57.0	55.0	51.6	49.6	57.8	52.8	51.8	54.9	56.0	22.8	71.5
Zn	131	136	132	121	139	124	122	144	138	78.6	81.3
Sr	789	710	1183	883	1012	949	646	876	872	585	520
Rb	34.4	31.7	17.3	17.6	37.1	24.1	28.9	85.1	87.6	88.7	64.1
Ba	424	429	512	498	539	471	405	923	824	689	524
Th	4.90	5.06	6.16	6.23	6.59	6.74	4.30	7.52	7.37	13.00	6.88
U	1.21	1.24	1.28	1.06	1.76	1.49	1.06	1.51	1.48	2.82	1.69
Ta	2.98	3.10	3.92	3.80	4.25	3.75	2.86	6.12	6.01	0.68	0.39
Nb	51.50	54.03	72.62	69.08	76.49	67.94	51.35	107.07	105.99	9.39	6.43
Zr	180	185	202	193	211	194	166	281	280	163	134
Hf	4.43	4.71	4.80	4.57	5.05	4.76	4.11	7.20	7.34	4.32	3.60
Y	19.07	18.83	19.94	20.08	20.79	20.33	17.84	28.69	28.36	17.02	16.25
La	31.99	32.93	41.40	39.51	42.34	39.15	28.18	45.53	45.00	35.82	22.49
Ce	61.91	64.03	79.02	77.33	83.19	75.00	57.15	87.55	84.43	68.91	43.84
Pr	7.10	7.19	8.78	8.54	9.33	8.44	6.43	9.79	9.84	7.37	4.88
Nd	30.57	30.37	37.81	36.74	40.16	35.41	28.63	43.95	42.92	28.4	20.51
Sm	6.89	7.03	8.11	7.87	8.93	8.17	6.55	10.39	10.01	5.72	4.05
Eu	2.38	2.35	2.69	2.68	2.82	2.65	2.25	3.22	3.22	1.38	1.16
Gd	6.08	5.88	6.86	6.38	6.93	6.61	5.59	8.94	8.61	3.95	3.43
Tb	0.82	0.82	0.95	0.91	0.98	0.94	0.84	1.20	1.16	0.61	0.52
Dy	4.20	4.20	4.45	4.55	4.825	4.63	3.94	6.04	6.15	3.27	2.96
Ho	0.75	0.76	0.80	0.80	0.85	0.85	0.71	1.09	1.14	0.66	0.60
Er	1.86	1.82	1.84	1.89	2.00	2.11	1.67	3.02	2.79	1.87	1.70
Tm	0.20	0.24	0.22	0.24	0.23	0.23	0.20	0.36	0.34	0.27	0.21
Yb	1.39	1.43	1.33	1.41	1.40	1.43	1.34	2.31	2.45	1.76	1.63
Lu	0.16	0.18	0.17	0.19	0.17	0.18	0.16	0.31	0.30	0.24	0.21
δEu	1.25	1.25	1.23	1.29	1.22	1.23	1.27	1.14	1.18	0.99	1.07
ΣREE	156.30	159.22	194.41	189.04	204.12	185.80	143.64	223.72	218.35	160.22	653.20
(La/Yb) _n	13.70	13.72	18.53	16.66	17.98	16.23	12.45	11.68	10.90	12.11	8.21

注:分析工作由中国科学院地球化学研究所漆亮完成,分析方法 ICP-MS,精度优于 5%。

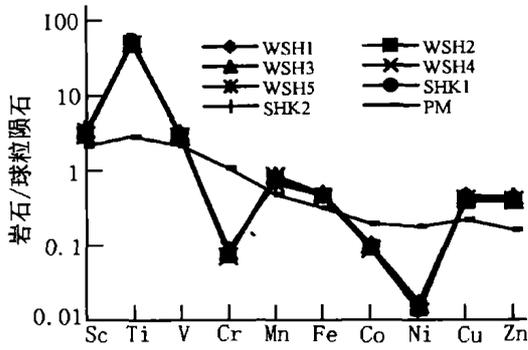


图3 北部湾玄武岩过渡元素配分图
样号和岩性同表3

Fig. 3 Transitional-element distribution patterns of basalts in Beibu Gulf region

过渡元素球粒陨石标准化的分配模式表现为“W”型(图3),明显亏损相容元素Cr、Ni和Co,而不相容元素Ti、V相对富集,显示出地幔源区衍生岩浆的过渡元素特征^[8]。

稀土元素的地球化学特性决定其是能够反映岩浆源区性质和形成方式的指示元素。北部湾玄武岩的稀土元素含量差别不大,ΣREE中等(为143.64—204.12μg·g⁻¹),略低于屏边玄武岩的ΣREE,而玉林地区ΣREE变化较大(表3)。在球粒陨石标准化的稀土元素配分图上,北部湾与屏边玄武岩一样,呈现为一致的右倾平滑配分曲线(图4),表明北部湾与红河断裂带具有同一岩浆源区。北部湾

和屏边玄武岩轻、重稀土分馏较明显,(La)_n/(Yb)_n = 10.90—18.53,均不出现负铕异常(δEu = 1.02—1.12),反映没有斜长石的早期分离结晶,这与玄武岩中均未出现斜长石斑晶相一致。根据瑞利分馏原理可以判别来自同一岩浆源区的岩浆是以何种方式形成,亲湿岩浆元素与亲岩浆元素浓度比值对亲湿岩浆元素浓度的协和关系表明,平衡部分熔融的轨迹呈现出斜率为D的斜线,而分离结晶作用则表现为一水平线^[9],在La/Sm - La图解中,北部湾玄武岩表现出正相关性(图5),反映岩浆的形成以部分熔融方式为主。

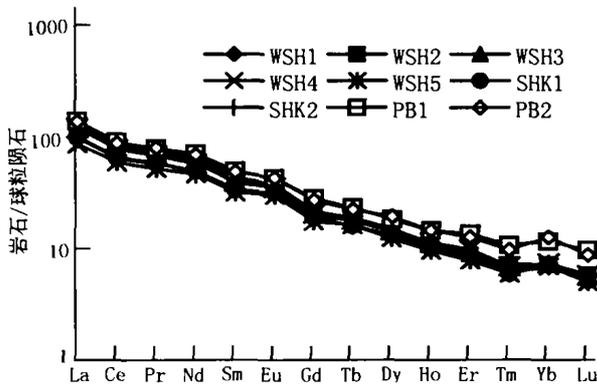


图4 北部湾及邻区玄武岩稀土元素配分图
样号和岩性同表3

Fig. 4 REE distribution patterns of basalts in Beibu Gulf and its adjacent region

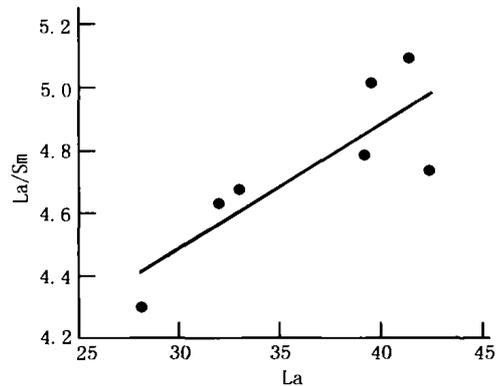


图5 北部湾玄武岩La/Sm-La相关图
Fig. 5 Variational diagram of La vs. La/Sm of basalts in Beibu Gulf region

在微量元素原始地幔标准化比值蛛网图上(图6a、b),北部湾玄武岩与屏边玄武岩一样,大离子亲石元素(LILE)富集并不明显,出现Sr的弱亏损。高场强元素中略富集Ta、Nb、Nd、P等,Ti、Zr、Sm、Hf并未出现亏损和富集,而重稀土元素Yb、Y、Lu亏损,具有较为典型的洋岛玄武岩(OIB)型地幔源区特征(图6a、b),明显不同于与俯冲带相关的高K/Ti - 低Ti富钾质岩石^[7]。而玉林地区的玄武质安山岩与北部湾和屏边玄武岩明显不

同,出现 Sr 和 Ta、Nb、Ti 的亏损,Rb、Th、U 富集,重稀土元素 Yb、Y、Lu 亏损(图 6b),具有与俯冲消减带有关的高钾、低钛玄武岩相似的配分模式^[7],Ta、Nb、Ti 的亏损暗示岩浆源区曾遭受地壳物质的混染或俯冲残留洋壳流体的交代^[10,11],这与玉林地区中生代受太平洋板块俯冲影响的构造环境相一致。对比表明,北部湾与屏边地区应具有相似的源区地球化学性质,而与玉林地区形成较大差别。

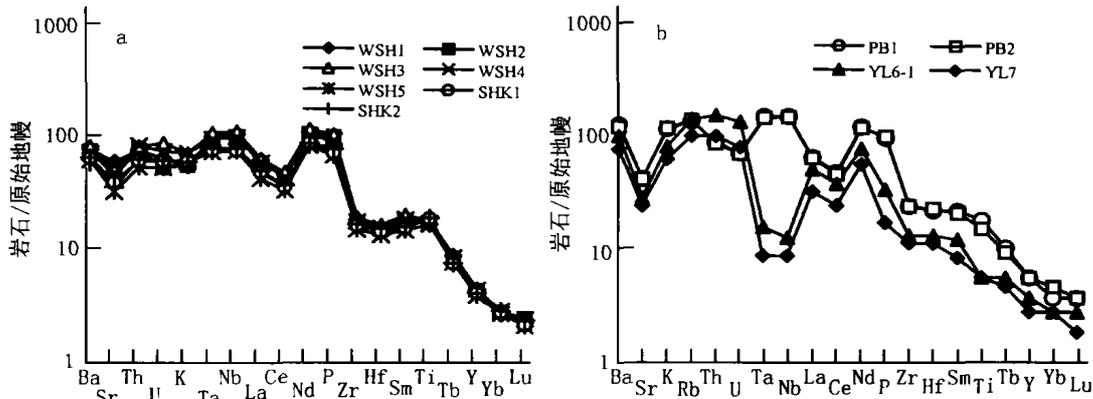


图 6 北部湾及邻区玄武岩经原始地幔标准化的微量元素蛛网图

样号和岩性同表 3;(a)北部湾玄武岩;(b)屏边和玉林地区玄武岩

Fig. 6 Primitive mantle-normalized trace element spidergrams of basalts in Beibu Gulf and its adjacent region

3 玄武岩岩浆源区地球化学性质

北部湾和屏边玄武岩高场强元素 Nb/Ta 比值为 17.29—18.52,平均为 17.75,Zr/Hf 比值为 38.11—42.26,平均为 39.87,分别与原始地幔 (Nb/Ta = 17.5 ± 2.0; Zr/Hf = 36.27) 相近并略高于原始地幔,远高于大陆地壳值 (Nb/Ta = 12—13; Zr/Hf = 11),表明岩浆源区和上升过程中受地壳混染作用不大。利用 Nd 归一化的原始地幔标准化 La、Ce、P、Zr、Ti 和 Y 曲线构成右倾斜的非发散型分布(图 7),表明源区成分较均一,未受到地壳物质的明显混染,岩浆起源于原始地幔的部分熔融,并且北部湾与屏边地区玄武岩具有相同的地幔源区和地球化学组成。而玉林地区的玄武质安山岩 Nb/Ta 比值为 13.83—16.53,平均为 15.37,Zr/Hf 比值为 37.27—37.96,平均为 37.25,其 Nb/Ta 比值明显低于原始地幔值,接近于大陆地壳值,表明岩浆源区和上升过程中可能受到地壳的部分混染。

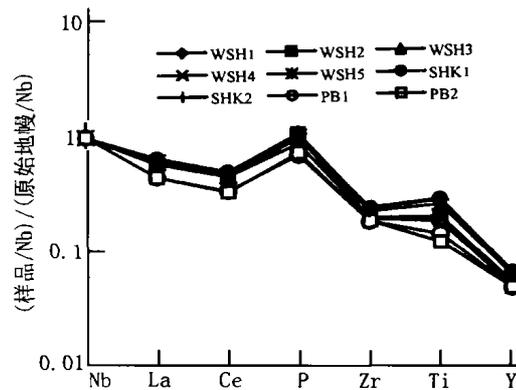


图 7 北部湾及邻区玄武岩 Nb 标准化蛛网图
样号和岩性同表 3

Fig. 7 Niobium-normalized spidergrams of basalts in Beibu Gulf and its adjacent region

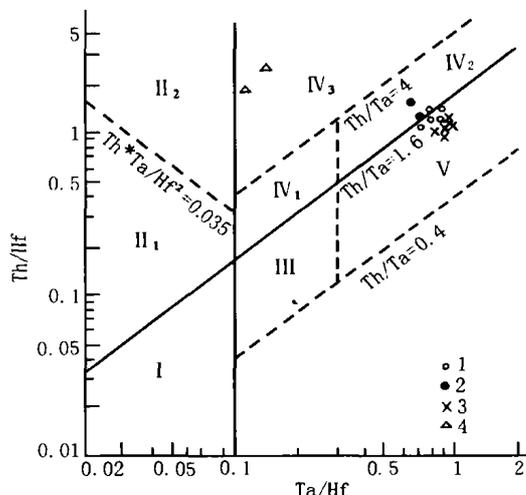


图 8 北部湾及邻区玄武岩 Th/Hf - Ta/Hf 图解
 I. 板块发散边缘; II₁. 大洋岛弧玄武岩区;
 II₂. 陆缘岛弧及陆缘火山弧玄武岩区;
 III. 大洋板内洋岛, 海山玄武岩区及 T-MORB, E-MORB 区; IV₁. 陆内裂谷及陆缘裂谷拉斑玄武岩区; IV₂. 陆内裂谷碱性玄武岩区;
 IV₃. 大陆拉张带(或初始裂谷)玄武岩区;
 V. 地幔热柱玄武岩区; 1. 涠洲岛玄武岩;
 2. 山口镇玄武岩; 3. 屏边玄武岩;
 4. 玉林玄武质安山岩

Fig. 8 Th/Hf vs. Ta/Hf diagram of basalts in Beibu Gulf and its adjacent region

由于强不相容元素(Rb、Ba、Th、Nb、Ta、La 等)具有相似的全岩配分系数,部分熔融和结晶分离过程都不会造成这些元素之间的强烈分异,因此这些元素之间的比值亦可以直接用来示踪地幔源区特征^[11]。通过对比(表 4),北部湾和屏边玄武岩兼具有 EM2、HIMU 和 EM1 型端元混合而成的地幔源区的特征,在 3 个地幔端元中更偏向 EM2 型地幔端元,而与玉林地区的玄武质安山岩差别较大。对沿红河断裂带 16 Ma 以来碱性玄武岩的同位素研究表明,它们具有低⁸⁷Sr/⁸⁶Sr(0.703—0.705)、²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb(18.17—18.39)、²⁰⁷Pb/²⁰¹Pb(15.51—15.57)、²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb(38.03—38.69)、¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd(0.5127—0.5131)的特征^[13],与 OIB 的同位素组成相似,反映其岩浆活动起源于亏损的但可能受到地幔交代作用富集的地幔源区。

表 4 北部湾及邻区玄武岩与不同地幔端元微量元素比值对比表

Tab. 4 Ratios between different trace elements for mantle and crustal reservoirs and comparison with basalts in Beibu Gulf and its adjacent region

元素 比值	原始 地幔	亏损 地幔	大陆 地壳	OIB			北部湾地区	屏边地区	玉林地区
				HIMU	EM1	EM2			
Zr/Nb	14.8	30	16.2	27—5.5	3.5—13.1	4.4—7.8	2.76—3.51	2.63—2.65	17.5—20.9
La/Nb	0.94	1.07	2.2	0.64—0.82	0.78—1.32	0.79—1.19	0.54—0.62	0.43	3.5—3.81
Ba/Nb	9.0	4.3	54	4.7—6.9	9.1—23.4	6.4—13.4	6.93—8.24	7.77—8.62	73.4—81.5
Ba/Th	77	60	124	39—85	80—204	57—105	80.0—94.1	112—123	53.0—76.2
Rb/Nb	0.91	0.36	4.7	0.30—0.43	0.69—1.23	0.58—0.87	0.24—0.67	0.79—0.83	9.45—9.97
Th/Nb	0.117	0.07	0.44	0.07—0.12	0.09—0.13	0.10—0.17	0.08—0.09	0.07	1.07—1.38
Th/La	0.125	0.07	0.20	10—0.16	0.09—0.15	0.11—0.18	0.15—0.17	0.15—0.16	0.31—0.35
Ba/La	9.6	4.0	25	6.2—9.36	11.3—19.1	7.3—13.5	12.4—14.4	18.3—19.1	19.2—23.3
Th/U	4.1		3.8		4.5—4.8		4.05—4.82	4.98—4.99	4.07—4.6

注:地幔端元数据引自[12]。

4 玄武岩形成的构造环境和地球动力学条件的讨论

地幔柱假说的提出很好地解释了夏威夷群岛 - 皇帝岛等岛链的成因^[14],然而地幔柱

地球化学研究均以夏威夷群岛、冰岛等热点区产出的玄武岩化学组成作为洋岛玄武岩的典型组分,并将其视为深部地幔柱岩浆成分的代表^[15]。目前对于判断大陆玄武岩是否来自深部地幔柱源区,一般都是通过与洋岛玄武岩的化学成分和同位素组成的对比来确定的,即都是将热点洋岛玄武岩视为来自 670 km 处地震不连续面或幔-核过渡带的两类热边界层的地幔热柱物质为代表^[16]。然而,大陆玄武岩要比大洋玄武岩复杂得多,其中最主要的问题是存在大陆岩石圈混染的干扰。由于北部湾和屏边地区玄武岩的微量元素排除了地壳物质大规模混染的可能和玄武岩高场强元素比值接近原始地幔,表明该区的 OIB 型分布反映为地幔柱的成岩构造环境,其形成可能是软流圈地幔上涌导致深部地幔部分熔融的结果。玉林地区玄武质安山岩所具有的低 TiO_2 、岛弧或活动大陆边缘型微量元素配分模式以及受地壳物质的混染或俯冲残留洋壳流体交代的特征,反映为岛弧或活动大陆边缘的成岩构造环境。

在判别成岩构造环境的 $\text{Th}/\text{Hf} - \text{Ta}/\text{Hf}$ 地球化学判别图解中^[17],北部湾和屏边地区玄武岩较集中地落入地幔柱玄武岩区,个别投在陆内裂谷碱性玄武岩区,而玉林地区玄武质安山岩则投在大陆拉张带(或初始裂谷)玄武岩区(图 8)。反映北部湾应与红河剪切断裂带具有相同的构造环境,而与太平洋板块作用的关系不大。

北部湾恰处于印澳板块、欧亚板块和太平洋板块的接合部位,由此对北部湾及南海盆地拉张和岩浆活动的地球动力学条件出现多种不同的认识。其中一种主要观点认为印澳板块向欧亚板块碰撞后的俯冲,导致中南半岛沿哀牢山-红河断裂带向东南挤出,挤出活动可能开始于晚古新世,在始新世达到高峰^[18]。另一种主要观点认为与太平洋板块和欧亚板块间会聚速率减小有关,由晚白垩世的平均会聚速率 $130\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 减小至始新世的 $38\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。Northrup 等^[19]指出,太平洋板块-欧亚板块会聚速率显著降低可能与水平压应力在太平洋板块与欧亚板块间的传递减小有关,由此引起欧亚大陆东缘自晚白垩世开始伸展,并在始新世发生广泛的伸展活动。岩石圈拉张和岩浆活动必然产生相应的深部地幔物理和化学状态的改变,相同的构造环境和地球动力学条件往往具有相似的地幔组成,因此,地幔物理和化学特征是反映深部地球动力学条件的有效手段。通过北部湾玄武岩地幔源区与代表红河断裂带的屏边玄武岩地幔源区和代表太平洋板块作用条件的玉林玄武质安山岩地幔源区的对比,显示北部湾与红河断裂带具有相似的地幔源区,而与太平洋板块作用的构造环境有较大的差别,反映北部湾盆地拉张和 1—5Ma 时期岩浆活动的深部地球动力学条件主要受印澳板块与欧亚板块俯冲而产生的走滑-挤出作用控制,说明 Tapponnier 等提出的挤出模式在北部湾是有效的。然而在 1—5Ma 时期岩浆活动产生的动力学机制方面仍有不同的认识, Lee 等提出岩浆活动是在区域转换应力场结束和南海停止扩张后,区域应力场恢复时期大规模侵入或喷发^[20],并提出该时期的岩浆活动可能与吕宋弧和台湾岛碰撞更为密切^[2]。笔者认为,导致北部湾 1—5Ma 时期岩浆活动的动力学机制至少应与红河断裂带的构造性质转换有关,红河断裂带从中生代晚期产生左行走滑剪切,到古新世印支板块挤出,但在 5 Ma 左右出现明显的右行走滑剪切^[21],这与南海北部和北部湾岩浆活动多集中在 5 Ma 以后决非偶然关系,该构造应力场的转变,必然造成深部动力学条件的改变和地幔的异常扰动,由此产生地幔上涌和岩石圈减薄,在断裂交汇部位首先形成地幔热点和岩浆喷发。虽然目前对于何种机制促使红河断

裂带由左行走滑剪切转变为右行走滑剪切仍是一个有待解决的问题,但印澳板块与欧亚板块俯冲角度的改变,导致华南板块的挤出速率超过印支板块可能是一种较为合理的解释^[1],然而这仍需要进一步的印证。

5 结 论

北部湾涠洲岛和山口镇出露的玄武岩是上新世以来伴随北部湾盆地拉张而形成的一次较大规模的岩浆活动。该玄武岩属于碱性玄武岩系,形成于较均一的地幔源区,具有以EM2型地幔端元为主,兼具有HIMU和EM1型端元混合而成的地幔源区性质,具有OIB型微量元素配分模式,形成于地幔柱或热点的构造环境。

北部湾玄武岩与红河剪切断裂带的屏边更新世玄武岩具有相似的岩石化学和微量元素组成特征,而与受太平洋板块影响的岛弧或活动大陆边缘内的玉林地区玄武质安山岩形成较大的差别。北部湾盆地应与红河剪切断裂带具有相同的地幔源区。北部湾盆地拉张的深部地球动力学条件主要受印澳板块向欧亚板块俯冲控制,该俯冲致使沿红河断裂带形成大规模的剪切走滑,5 Ma B. P. 左右红河断裂带由左行走滑剪切转变为右行走滑剪切的构造性质转换可能是导致地幔异常扰动和岩浆活动的地球动力学机制,在岩石圈减薄和断裂交汇处构成地幔上涌,形成地幔热点和玄武岩浆喷发。

参考文献:

- [1] 郭令智,钟志洪,王良书,等. 莺歌海盆地周边区域构造演化[J]. 高校地质学报, 2001, 7(1):1—12.
- [2] 吴世敏,周 蒂,丘学林. 南海北部陆缘的构造属性问题[J]. 高校地质学报, 2001, 7(4):319—426.
- [3] 张 健,汪集旸. 南海北部陆缘构造扩张的深部地球动力学特征[J]. 中国科学(D辑), 2000, 30(6):561—567.
- [4] 姚伯初,曾维军,陈艺中,等. 南海北部陆缘东部的地壳结构[J]. 地球物理学报, 1994, 37(1):27—35.
- [5] 广西壮族自治区地质矿产局. 广西壮族自治区区域地质志[M]. 北京:地质出版社, 1984, 359—362.
- [6] 王江海,尹 安, Harrison T M, 等. 青藏东缘新生代两类高钾岩浆活动的热年代学研究[J]. 中国科学(D辑), 2002, 32(7): 529—536.
- [7] Rogers N W. Potassic magmatism as a key to trace- element enrichment processes in the upper mantle[J]. J Volcan Geother Res., 1992, 50: 85—99.
- [8] 李昌年. 火山岩微量元素地球化学[M]. 北京:地质出版社, 1992, 1—164.
- [9] 赵振华. 微量元素地球化学原理[M]. 北京:科学出版社, 1997, 1—169.
- [10] Fitton J G, James D, Leeman M P. Basic magmatism associated with Late Cenozoic extension in the western United States: Compositional variation in space and time[J]. Geophys Res., 1991, 96:13 693—13 711.
- [11] Gill J B. Orogenic andesites and plate tectonics[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1981, 358—360.
- [12] Weaver B L. The origin of ocean island basalt end-member composition: trace element and isotopic constraints [J]. Earth Planet Sci Lett., 1991, 104: 381—397.
- [13] Wang J H, Yin A, Harrison T M, *et al.* A tectonic model for Cenozoic igneous activities in the eastern Indo-A-sian collision zone[J]. Earth Planet Sci Lett., 2001, 188: 123—133.
- [14] Morgan W J. Convection plumes in the lower mantle[J]. Nature, 1971, 230: 42—43.
- [15] Hofmann A W, White W M. Mantle plume from ancient oceanic crust[J]. Earth and Planetary Science Letters., 1982, 57: 421—436.

- [16] Davies G F, Richards M A. Mantle convection[J]. *Journal of Geology*, 1992, **100**: 151—206.
- [17] 汪云亮,张成江,修淑芝. 玄武岩形成的大地构造环境的 Th/Hf-Ta, Hf 图解判别[J]. *岩石学报*, 2001, **17**(3): 413—421.
- [18] Tapponnier P, Lacassin R, Leloup P H, *et al.* The Ailo Shan-Red River metamorphic belt: Tertiary left lateral shear between Indochina and South China[J]. *Nature*, 1990, **243**: 431—437.
- [19] Northrup C J, Royden L H, Burchfiel B C. Motion of the Pacific plate relation to Eurasia and its potential relation to Cenozoic extension along the eastern margin of Eurasia[J]. *Geology*, 1995, **23**: 719—722.
- [20] Tung-Yi Lee, Ching-Hua Lo. Ar/Ar Dating result of Neogene basalts in Vietnam and its tectonic implication [A]. In: Martin F, Flower J, eds. *Mantle dynamics and plate interactions in East Asia*[C]. *Geodynamics Science*, 1998, v. 27, published by AGU, 317—330.
- [21] Leloup P H, Lacassin R, Tapponnier P, *et al.* The Ailo Shan-Red River shear zone (Yunnan, China), Tertiary transform boundary of Indochina[J]. *Tectonophysics*, 1995, **251**: 3—84.

GEOCHEMICAL NATURE OF MANTLE RESERVOIRS AND TECTONIC SETTING OF BASALTS IN BEIBU GULF AND ITS ADJACENT REGION

JIA Da-cheng^{1,3}, QIU Xue-lin², HU Rui-zhong³, LU Yan¹

(1. *College of Geo-exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China*;
2. *South China Sea Institute, The Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China*; 3. *Open Laboratory of
Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, The Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China*)

Abstract: A series of basalts develops in the Beibu Gulf region. The K-Ar ages of the basalts ranges from 5.9Ma to 2.4Ma. They were formed by a large-scale magmatic activity associated with extension of the basin in the Beibu Gulf. Geochemical studies of major elements and trace elements indicated that the basalts belong to an alkali series and are similar to OIB. The basalts may be derived from a uniform mantle source. The mantle source has the nature of EM2 end-member composition associated with HIMU and EM1 end-member. The basalts might be formed in a plume or mantle hot spot. Formation of the basalts and extension of the basin in the Beibu Gulf were controlled by the large-scale strike-slip of the Red-River fault zone, which was caused by subduction between Indo-Australia plate and Eurasia plate. Tectonic conversion from left lateral shear to right lateral shear of the Red-River fault zone at about 5 Ma may be attributed to the geodynamic mechanism of mantle abnormal change and magmatic activity.

Key words: basalt; geochemistry; mantle reservoir; tectonic setting; Beibu Gulf