

广西北海涠洲岛第四纪晚期火山碎屑流中橄榄岩包体碎块的发现及其地质意义

黄林培¹ 李昌年²

(1. 中国地质大学 研究生院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:广西北海涠洲岛是我国面积最大的第四纪火山岩海岛,岛内出露的最新一次火山喷发产物为碧玄质岩石,它覆盖于晚更新世湖光岩组(Q_3h)层状凝灰岩地层之上。在该火山岩中发现有橄榄岩包体,罕见的是,包体是以火山角砾的形式见于碧玄质火山碎屑流之中,故应是被炸碎的包体碎块,而非原始态包体。这是迄今为止较为特殊的一种橄榄岩包体产状类型,其原始态包体的岩石类型可能为方辉橄榄岩和纯橄岩。岩石结构及探针数据均表明该橄榄岩包体来自岩石圈地幔。包体的温压估算结果为 $960\sim 1\,040^\circ\text{C}$ 和 1.3 GPa ,对应的稳定深度约 40 km 。此外,由于包体来源深度远小于其寄主碧玄质火山岩浆的来源深度(大于 99 km)表明涠洲岛地区第四纪火山碎屑流中的橄榄岩包体是地幔柱来源的碧玄质岩浆在上升经过岩石圈地幔约 40 km 深度时捕获的偶然包体,并在就位前经历过炸碎。

关键词:第四纪晚期;火山碎屑流;橄榄岩;包体碎块;广西涠洲岛

中图分类号:P588.12⁺5;P588.14;P534.63

文献标识码:A

文章编号:1000-6524(2007)04-0321-08

Peridotite xenolith fragments from Late Quaternary pyroclastic flow in Weizhou Island, Beihai, Guangxi

HUANG Lin-pei¹ and LI Chang-nian²

(1. Graduate School, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Faculty of Earth Sciences, 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 latest eruptive product is basanitoid, which covers the tuffite strata of Late Pleistocene Huguangyan Formation (Q_3h). It is worth mentioning that many peridotite xenoliths were found in the strata. They are distributed in the basanitoid pyroclastic flow with the unique form of volcanic breccia, quite different from normal xenoliths. As the xenoliths have experienced blasting, they might be called xenolith fragments. Obviously, such xenoliths constitute one of the most peculiar types of peridotite xenolith occurrence. The original xenoliths might have been dunite and harzburgite. Both rock structure and microprobe data show that these peridotite xenoliths were derived from the oceanic lithosphere mantle. The estimated equilibrium p - T conditions of xenoliths are about 1.3 GPa and $960\sim 1\,040^\circ\text{C}$, with the corresponding stable depth being 40 km . Besides, the xenoliths came from a place much shallower than their host rocks, suggesting that they were accidental xenoliths. And they experienced blasting before emplacement.

Key words: late Quaternary; pyroclastic flow; peridotite; xenolith fragment; Weizhou Island in Guangxi

收稿日期:2006-12-28;修订日期:2007-05-09

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:黄林培(1982-),男,在读硕士,主要从事火成岩岩石学和岩石地球化学的研究,E-mail:bacon768376@126.com。

广西北海涠洲岛位于南海北缘北部湾海域内,总面积为 24.74 km²。在区域上,涠洲岛位于我国东南大陆的大陆边缘,属于大陆架范畴(王鸿祯等,1983;杨森楠,1997)。在大地构造上,涠洲岛地区地处太平洋、欧亚和印澳三大板块共同作用的范围,新华夏构造域和喜马拉雅山构造域在此重叠和复合(王鸿祯等,1983;Chung *et al.*,1997;朱炳泉等,2002)。制约本区火山活动的重要构造为 NW 向右旋走滑红河深断裂,其东南端穿过该研究区,并进入南海盆地北缘(郝芳等,2001)。

涠洲岛的火山造岛历史可分为两个主要时期:早-中更新世溢流相玄武质熔岩和爆发相火山碎屑

岩系(广西壮族自治区地质矿产局,1990^①;樊祺诚等,2006)和晚更新世湖光岩组(Q_{3h})射气岩浆喷发形成的基底涌流堆积相玄武质层火山碎屑岩系(孙谦等,2006;樊祺诚等,2006)(图1)。而该地区持续的玄武质火山作用是第四纪红河断裂和地幔热柱共同活动的结果(李昌年等,2004)。

关于涠洲岛地区玄武质岩石中出露的橄榄岩包体,仅有少数研究论文提及到(黎希明等,1991;李昌年等,2004)。但是,对该地区橄榄岩包体的产状、分布及其与寄主岩关系的论述尚未涉及,更无有关包体岩石学和地球化学特征的研究。笔者这次的调研和发现弥补了这一不足。

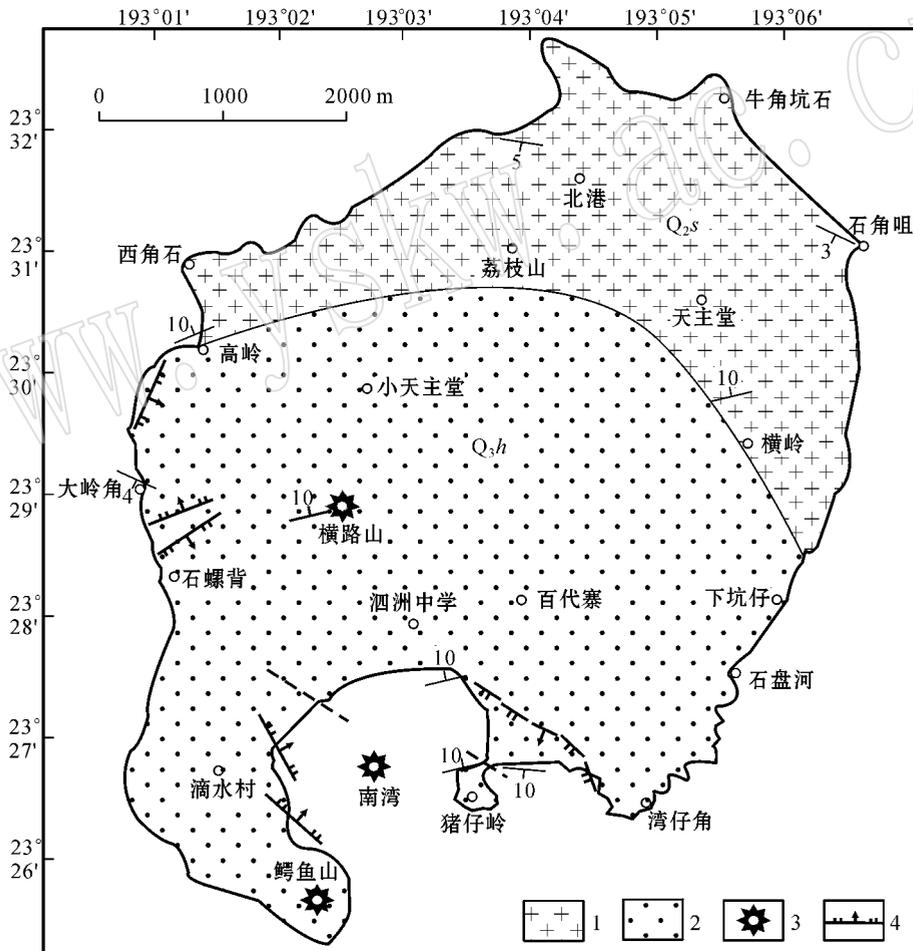


图1 涠洲岛火山岩岩相和地质图(据李昌年等,2005)

Fig. 1 Lithofacies and geological sketch map of Weizhou Island (after Li Changnian *et al.*, 2005)

- 1—伊丁石化橄榄玄武岩(溢流相) 2—含火山角砾的层凝灰岩(基底涌流堆积相) 3—火山口 4—正断层; Q_{2s}—中更新世石茆岭组;
Q_{3h}—晚更新世湖光岩组
1—iddingsitized olivine basalt (effusive facies); 2—agglomerate-bearing tuffite (base surge accumulative facies); 3—crater; 4—normal fault;
Q_{2s}—Miocene Shimaoling Formation; Q_{3h}—Pliocene Huguangyan Formation

① 广西壮族自治区地质矿产局. 1990. 广西北海市 1:50 000 区域综合调查报告[R]. 南宁: 广西壮族自治区地质矿产局.

1 第四纪火山岩及其内的橄榄岩包体

1.1 橄榄岩包体寄主玄武质火山岩的年代问题

涠洲岛橄榄岩包体的寄主岩是一套溢流相玄武质熔岩和碎屑流相层火山碎屑岩系,该套岩系明显覆盖于晚更新世湖光岩组基底涌流相层凝灰岩之上。对于该寄主岩的形成年代问题至今仍存在争论。李昌年等(2004)认为,这是新一次的火山喷发活动,强度大,但范围小,仅分布于岛内西南端,并且该火山机构保存较好,明显可见火山口处玄武质熔岩与晚更新世湖光岩组(Q_3h)层凝灰岩的交切关系,近火山口处层火山碎屑岩的围岩(Q_3h)被后期玄武质火山喷发导致的高温所烘烤,原始层理逐渐消失,并据此说明涠洲岛在晚更新世湖光岩组(Q_3h)之后仍存在着新一期的全新世(Q_4)火山喷发。而樊祺诚等(2006)则认为,这是晚更新世射气喷发的基浪堆积物与岩浆喷发的火山碎屑流互层的结果。由于目前对全新世岩石年龄的确定仍缺乏有效的测试方法,主要是通过碳同位素测试获得,而本次调研未能在该岩系中找到烧焦的木炭进行碳同位素测试,也未见针对该层位的年龄数据的报道,因此对于涠洲岛橄榄岩包体寄主岩的形成时代问题仍有待进一步研究。但可以肯定的是,该岩系是在晚更新世湖光岩组层状凝灰岩之后形成的,是属于第四纪较晚期的喷发产物。

1.2 橄榄岩包体的产状

此次发现的橄榄岩包体出露于涠洲岛最南端的鳄鱼山海岸,产于碎屑流相火山碎屑岩中(图 2)。多数橄榄岩包体被包含于碧玄质火山角砾和碧玄质集块的火山碎屑物之中,少数则以火山碎屑物形式独立存在。这些包体个体较小,形态上多具棱角状,少数呈次圆状,两者比例约为 10:1,所以多为包体碎块,也即是由一个原始态包体分裂而成的若干部分。这些包体碎块与寄主岩接触界限清楚,但多呈不规则状,以包体碎块最大直径测量,粒径大小多在 1 cm 左右,最大的可达到 1.7 cm。包体含量较少,但分布均一,1 m² 的范围内仅见 1~3 颗。其中,粒径大于 1 cm 的包体碎块多呈墨绿色,可见辉石与橄榄石,属辉橄岩类;而粒径小于 1 cm 的包体碎块多呈黄绿色,未见或少见黑色辉石,为纯橄岩。综上所述得知,本区包体并非通常溢流相熔岩携带出的圆状原始态包体,而是原始态包体经历火山爆发炸碎形成

的包体碎块。由于原始态包体橄榄石含量多而辉石含量少,因此在包体炸碎后往往导致小粒径包体少见或未见含有单斜辉石或斜方辉石,造成小包体碎块多由橄榄石组成,呈黄绿色。这些包体碎块一部分是原始态的橄榄岩包体与碧玄质岩浆同时喷出并流入水体中发生炸碎裂化所形成的,另一部分可能由火山爆发自身炸碎所致。



图 2 橄榄岩包体碎块

Fig. 2 Peridotite xenoliths developed as breccia

2 样品采集和分析方法

涠洲岛橄榄岩包体碎块分布零星,在对样品的采集方面进行了合理的取舍,摒弃了粒度过于细小或是成分过于单一的包体,只采集粒度大于 7 mm 且含有多种矿物的样品。在野外,寄主岩与包体难以机械分离,故不可避免地将包体连同其寄主碧玄质火山岩一并采集。

由于橄榄岩包体颗粒较小,不可能仅用现在的包体碎粒进行成分研究。在室内,为了挑选足够量且能代表包体原始成分的样品进行测试,采取混合法进行制样,也即将在 0.1 km² 的范围内采集的样品尽量除去玄武质岩石的表皮之后粗碎至 20~40 目,然后在双目镜下挑选出包体所含矿物,再将其混合。混合后的样品先在超声波清洗池振动 30 min,再用纯净水清洗 3 次,烘干后磨细至 200~300 目。主量元素的分析是在武汉综合岩矿测试中心进行的,采用 X 荧光光谱仪(XRF,型号 3080E)测得,测试精度达到 5% 以下,相对标准偏差(RSD)小于 9%。微量元素是在中国地质大学(武汉)地质过程

与矿产资源国家重点实验室完成的,样品先经 1mL HNO₃ 和 1mL HF 溶解后采用 Agilent 7500a 等离子体质谱仪(ICP-MS)测定,测试精度达到 1% 以下,相对标准偏差(RSD)小于 7%。

3 橄榄岩包体的岩石学特征

3.1 涠洲岛地区橄榄岩包体的分类命名

在统计矿物含量方面,本文采取面积估算方法,即在每个橄榄岩包体的薄片分别选取 3 个视域进行估计,取其加权平均值作为该薄片矿物的含量,其中橄榄石与斜方辉石的分布频数见图 3。总的来

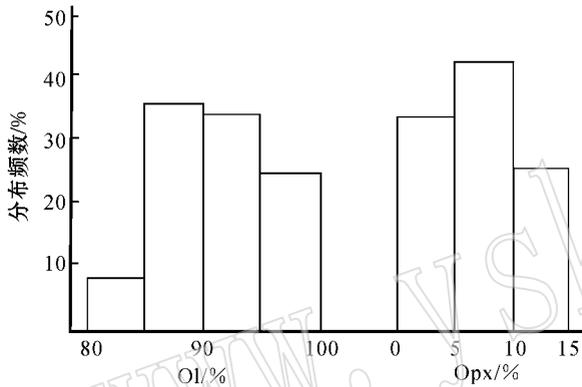


图 3 涠洲岛橄榄岩包体中橄榄石(Ol)和斜方辉石(Opx)分布频数直方图

Fig. 3 Frequency distribution histogram of olivine and orthopyroxene in peridotite xenoliths from Weizhou Island

说,包体中橄榄石含量为 80%~100%,斜方辉石含量为 0~15%,单斜辉石含量约为 0~4%,尖晶石含量为 0~3%。岩石命名上先分别将各个包体中的橄榄石、单斜辉石、斜方辉石 3 种矿物含量换算成 100%,再投入超镁铁岩石分类三角图(图 4)中。从图 4 可知,涠洲岛地区橄榄岩包体大多落在了纯橄岩区及其附近,部分落入方辉橄橄榄岩区域中。由于该区橄榄岩包体寄主于火山碎屑流中,发生过炸碎,并非原始态橄榄岩包体,而橄榄石含量又高达 90%左右,因此多出现橄榄石占绝大多数的岩石碎块,造成该区包体碎块岩石定名多投入纯橄岩区。根据上述理由,笔者认为涠洲岛地区原始态包体的主要岩石类型应该为纯橄岩和方辉橄橄榄岩。

3.2 化学成分

涠洲岛橄榄岩包体的主量元素成分列于表 1。包体化学成分与 Ringwood(1975)模拟上地幔岩化

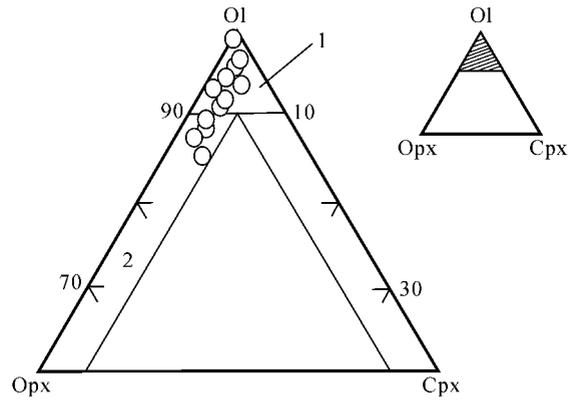


图 4 涠洲岛橄榄岩包体分类三角图

Fig. 4 Classification of peridotite xenoliths in Weizhou Island
1—纯橄岩 2—方辉橄橄榄岩
1—dunite; 2—harzburgite

学成分比较,其易熔组分 TiO₂、Al₂O₃、K₂O + Na₂O 相对亏损, MgO 等难熔组分相对富集,表明包体经历过局部亏损熔融作用,但亏损程度不大,属于弱亏损型(鄂莫岚等,1987)。包体中熔融玻璃的成分(表 1)经 TAS 分类定名(Le Bas, 1986)确认,相当于粗面玄武岩,它与包体寄主碧玄质岩石完全不同。

3.3 矿物成分

橄榄岩包体中矿物的电子探针分析数据见表 2。显微镜下橄榄石呈粒状,粒径多在 2~3 mm,最大可达 5 mm,晶体内部广泛发育有裂纹,化学成分上表现出富 MgO 贫 FeO 的特点, Fo 的平均值为 91.33,属镁橄榄石。斜方辉石呈板状,无色,最大粒径可达 4 mm×3 mm,解理纹平直、稀疏,呈富镁特点, En 值达到 90.35 以上, Fs 值则低于 8.79,属顽火辉石。单斜辉石呈短柱状,粒径 1 mm×1 mm,斜消光,含量较少,属透辉石。尖晶石单偏光镜下为棕褐色,均质体,粒径约 1.5 mm,呈不规则状充填于橄榄石与辉石之间,与新生代玄武岩捕虏体的尖晶石(郑建平, 1999)相比, Cr 含量较低, Al 含量较高, Cr/(Cr + Al) 平均值为 0.145,属于铬尖晶石。

4 讨论

4.1 包体的温压条件

由电子探针数据可以看出,涠洲岛地区橄榄岩包体中各矿物颗粒从核部到边缘其主要元素(氧化物含量 > 10% 的元素)的标准差约为 ±1%,可见同一样品的各矿物成分非常均一,表明并非岩浆结晶,也说明该包体已达化学平衡,可用于平衡温压估算。

表 1 涠洲岛橄榄岩包体与寄主碧玄岩的化学成分

$w_B/\%$

Table 1 Chemical compositions of peridotite xenoliths and their host rocks from Weizhou Island

序 号	样 号	产地	产状	名称	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O	CO ₂	Cr ₂ O ₃	Total	Mg [#]
1	Gly	鳄鱼山	包体碎块	橄榄岩	44.97	0.31	1.81	2.60	7.93	0.14	37.95	2.03	0.23	0.19	0.09	0.89	0.26	-	99.40	0.87
2	Bxy	鳄鱼山	寄主岩	碧玄岩	47.35	2.34	11.65	4.92	6.87	0.19	9.30	10.33	2.34	1.76	0.75	1.79	0.10	-	99.69	0.60
3	X29-2	婆湾	寄主岩	碧玄岩	43.29	2.19	11.15	4.52	6.83	0.17	11.20	10.39	3.51	1.54	0.99	3.18	0.23	-	99.19	0.65
4	1-0	鳄鱼山	熔融玻璃	粗面玄武岩	51.66	2.91	18.59	-	7.85	0.10	4.32	8.32	2.26	3.23	-	-	-	0.013	99.25	0.50

除 3 号样品数据引自李昌年等(2005)外,其余均为本文资料;1~3 号样品采用干法全岩分析,4 号样品为探针数据,定名为部分熔融形成的岩浆成分投影于 Le Bas(1986)图得出的岩石名称;探针数据是在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成的,采用 JXA-8100 型电子探针测定,测试精度达到 100×10^{-6} 。

表 2 涠洲岛鳄鱼山橄榄岩包体中矿物的电子探针分析数据

$w_B/\%$

Table 2 Electron microprobe data of minerals in xenoliths from Weizhou Island

样号	1-1H	1-6H	1-7H	1-2H	1-2B	1-8H	1-8B	1-3H	1-3B	1-4H	1-4B	1-5H	1-5B	1-9H	1-9B	1-10H		
产状	Spl 核	Spl 核	Spl 核	Ol 核	Ol 边	Ol 核	Ol 边	Opx 核	Opx 边	Opx 核	Opx 边	Cpx 核	Cpx 边	Cpx 核	Cpx 边	Cpx 核		
SiO ₂	0.013	0.021	0.015	39.53	39.31	40.08	39.42	53.45	54.32	54.42	55.50	52.70	54.12	52.6	53.24	53.24		
TiO ₂	0.031	0.05	0.14	0.001	-	-	0.002	0.10	0.14	0.02	0.038	0.077	0.049	0.15	0.06	0.09		
Al ₂ O ₃	54.35	54.89	55.01	0.002	-	0.01	0.09	4.38	3.47	2.81	2.75	3.61	2.52	3.99	2.87	3.16		
FeO	10.20	10.48	10.43	8.35	8.41	8.22	8.92	5.83	5.94	5.53	5.60	1.71	1.76	2.13	2.20	1.84		
MnO	0.12	0.20	0.18	0.12	0.15	0.17	0.06	0.14	0.13	0.14	0.16	0.07	0.07	0.05	0.07	0.10		
MgO	20.75	20.31	19.87	50.55	50.64	50.47	50.76	33.71	34.12	34.11	34.40	16.33	17.21	16.86	17.05	16.55		
CaO	-	-	-	0.013	0.036	0.09	0.02	0.46	0.43	0.56	0.53	23.11	23.31	22.84	23.10	22.93		
Na ₂ O	0.001	-	0.003	0.004	0.001	-	0.007	0.048	0.039	0.038	0.035	0.82	0.67	0.73	0.62	0.69		
K ₂ O	0.015	0.005	0.01	0.013	0.002	0.001	0.01	0.009	0.026	0.017	-	0.002	0.007	0.004	0.01	0.03		
Cr ₂ O ₃	14.01	13.7	13.82	0.006	-	0.01	-	0.55	0.31	0.58	0.43	1.17	0.79	1.01	0.94	0.97		
Total	99.49	99.66	99.48	98.59	98.55	99.05	99.29	98.68	98.93	98.23	99.44	99.60	100.51	100.36	100.16	99.60		
Mg [#]	0.79	0.78	0.77	0.92	0.91	0.92	0.91	0.91	0.91	0.92	0.92	0.94	0.95	0.93	0.93	0.94		
Fo				91.52	91.47	91.63	91.03											
Wo										0.88	0.81	1.07	1.00	49.00	47.94	47.62	47.59	48.38
En										90.35	90.40	90.68	90.72	48.17	49.24	48.91	48.87	48.58
Fs										8.77	8.79	8.25	8.28	2.83	2.82	3.47	3.54	3.03
名称	A	A	A	B	B	B	B	C	C	C	C	D	D	D	D	D		

A—铬尖晶石, B—镁橄榄石, C—顽火辉石, D—透辉石, 探针数据是在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成的,采用 JXA-8100 型电子探针测定,测试精度达到 100×10^{-6} 。

本文采用 Wells(1977)的二辉温度计估算的平衡温度为 980℃。Brey 和 Kohler(1990)的二辉温度计和斜方辉石温度计在给定 1.0 GPa 下计算的平衡温度为 1 020℃ 和 960℃, 给定 2.0 GPa 下的平衡温度分别为 1 040℃ 和 990℃。因此该区橄榄岩包体的平衡温度是在 960~1 040℃ 之间。再由所得温度根据 Kohler 和 Brey(1990)反推估算其形成压力, 结果表明, 温度在 1 000℃ 左右时, 平衡压力约为 1.3 GPa, 对应的稳定深度为 40 km 左右。

4.2 包体的成因

涠洲岛橄榄岩包体具原生粒状结构和三联点结

构, 且变形结构发育, 后者表现为碎斑结构以及橄榄石的扭折带(图 5a)。此外, 普遍见有部分熔融结构, 如辉石表面的熔融麻点和尖晶石的海绵边。还可见细脉状橙色熔融玻璃分布于橄榄石颗粒之间或橄榄石裂隙中, 此为橄榄岩部分熔融形成的熔浆液滴尚未聚集而呈分散状分布于包体之中所致(图 5b)。这些结构均是地幔岩独有的特征, 表明该区橄榄岩包体应为地幔岩, 而非岩浆结晶矿物堆积成因。

再者, 据探针数据分析, 涠洲岛橄榄岩包体表现出富镁特点。其中橄榄石的 Fo 值为 91.03~91.63, 落入地幔岩中橄榄石的世界平均值范围(Fo 为 90.4

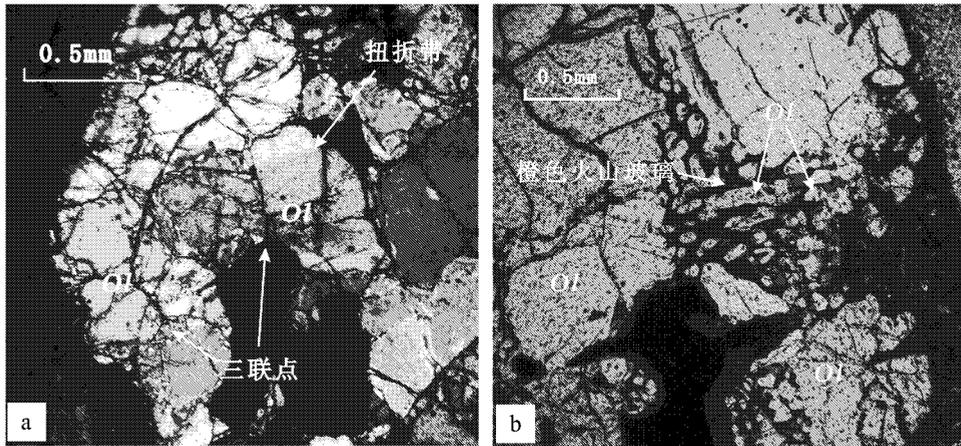


图5 橄榄岩包体的三联点结构、扭折带结构(a)和部分熔融结构(b)

Fig. 5 Equal-angle triple texture, kink band (a) and partial melting texture (b) of peridotite xenoliths

~92.0), 高于中国东南沿海诸省中的平均值(F_o 为 90.0)(史兰斌等, 2003)。斜方辉石为顽火辉石, En 介于 90.35~90.72, 略高于中国新生代幔源斜方辉石的 En 值(一般大于 88%)(Fan and Hooper, 1989), 与橄榄石表现的一致。由此进一步证明了涠洲岛橄榄岩包体为幔源包体。

4.3 包体的来源

来自软流圈地幔的岩浆相对富集高场强元素(HFSE), 如软流圈地幔来源的岩浆的 $Zr/Ba > 0.2$ (Ormerod *et al.*, 1988), $La/Nb < 1.5$ (Fitton *et al.*, 1988) 并且 $La/Ta < 22$ (Leat *et al.*, 1988)。涠洲岛地区橄榄岩包体寄主碧玄质火山岩的 Zr/Ba 平均值为 0.38, La/Nb 平均值为 0.66, La/Ta 平均值为 11.28(表3)。这些比值特征均位于软流圈地幔的特征比值范围内, 说明涠洲岛玄武质火山岩岩浆起源于软流圈地幔。其次, 许多研究(Lightfoot *et al.*, 1993; Ewart *et al.*, 1998; 周金城等, 2005)表明, 岩石圈地幔的玄武质岩浆相对低 Ti , 而来自软流圈的玄武质岩浆相对高 Ti (如 OIB 的 TiO_2 平均含量为 2.86%)。涠洲岛地区玄武质火山岩的 TiO_2 含量为 2.34% 和 2.19%, 属“高 Ti 玄武岩”, 显示了其软流圈地幔来源的特征。第三, 本区碧玄质火山岩的 $Ce/Nb - Th/Nb$ 变异图也证明该岛火山作用与地幔热柱的活动有关(李昌年等, 2005)。

根据 Yoder(1976) $Ne - Ol - Q$ 系相图计算涠洲岛橄榄岩包体寄主碧玄岩岩浆生成压力大于 3 GPa, 对应的岩浆来源深度大于 99 km, 而包体碎块的平衡压力仅为 1.3 GPa 左右, 因此寄主岩浆要比包体碎块的来源更深(图略)。另外, 中国南海区域

表3 寄主碧玄岩微量元素含量及有关比值 $w_B/10^{-6}$

Table 3 Trace element abundances and the related ratios of host rocks in Weizhou Island

样号	Bxy	X29-2	软流圈范围
La	44.3	46.25	
Ba	517	564	
Nb	67.5	70.3	
Ta	3.94	4.09	
Zr	203	207	
Zr/Ba	0.39	0.37	>0.2
La/Nb	0.66	0.66	<1.5
La/Ta	11.24	11.31	<22

岩石圈底界在 58~66 km 之间(吴能友等, 1999), 涠洲岛地区橄榄岩包体所在位置为 40 km 左右, 指示了该幔源包体应该是来自岩石圈地幔。再者, 前述已证明包体碎块中火山熔融玻璃成分不同于寄主碧玄岩成分。这些都说明涠洲岛地区橄榄岩包体为地幔柱来源的碧玄质火山岩浆在上升经过岩石圈地幔时被俘虏的偶然包体, 随后在到达地表附近又因自身炸碎或连同熔浆破裂而成为碎屑流中的包体碎块。

5 结论

(1) 本区橄榄岩包体呈火山角砾状产于第四纪较晚期的火山碎屑流中, 包体在就位前曾被炸碎。岩石类型为纯橄岩和方辉橄岩。

(2) 利用 Wells(1977)的二辉温度计以及 Brey 和 Kohler(1990)的二辉温度计和斜方辉石温度计估算出涠洲岛地区橄榄岩包体的平衡温度在 960~

1 040℃ 之间, 根据温度反推其形成压力为 1.3 GPa, 对应的稳定深度约为 40 km。

(3) 涠洲岛地区橄榄岩包体具原生粒状结构, 变质变形结构发育, 且部分熔融结构普遍。此外, 包体中橄榄石的 F_o 值高达 91.03~91.63, 斜方辉石的 E_n 值为 90.35~90.72。这些均表明该包体来自岩石圈地幔, 与地幔柱来源的碧玄岩无成因联系, 属偶然包体。

致谢 在研究过程中得到南京地质矿产研究所陶奎元教授、中国地震局地质研究所樊祺诚教授的指教, 在此表示衷心的感谢。

References

- Brey G P and Kohler T. 1990. Geothermobarometry in four-phase lherzolites II. New thermobarometers, and the practical assessment of existing thermobarometers [J]. *J. Petrol.*, 31(6): 1 353~1 378.
- Chung Sunlin, 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.
- E Molan and Zhao Dasheng. 1987. Cenozoic Basalt and Xenoliths from Depth in Eastern China [M]. Beijing: Science Press, 133~268 (in Chinese).
- Ewart A, Milner S C, Armstrong R A, *et al.* 1998. Erendeka volcanism of the Goboboseb mountains and Messum igneous complex, Namibia. part I: geochemical evidence of early Cretaceous Tristan Plume melts and the role of crustal contamination in the Parana-Etendeka CFH [J]. *J. Petrol.*, 39(2): 191~225.
- Fan Q C and Hooper P R. 1989. The mineral chemistry of ultramafic xenoliths of Eastern China: Implications for upper mantle composition and the paleogeotherm [J]. *J. Petrol.*, 30: 1 117~1 158.
- Fan Qicheng, Sun Qian, Long Anming, *et al.* 2006. Geology and eruption history of volcanoes in Weizhou Island and Xieyang Island, Northern Bay [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6): 1 529~1 537 (in Chinese with English abstract).
- Fitton J G, James D, Kempton P D, *et al.* 1988. The role of lithospheric mantle in the generation of late Cenozoic basic magmas in the western United States. Cox K G and Menzies M A, eds. *Oceanic and continental lithosphere: similarities and differences* [J]. *J. Petrol.*, Special Volume, 331~349.
- Hao Fang, Li Sitian, Gong Zaisheng, *et al.* 2001. Diaper development mechanism and fluid episode charge in the Yinggehai Basin [J]. *Science in China (D)*, 31(6): 471~476 (in Chinese).
- Kohler T B and Brey G P. 1990. Calcium exchange between olivine and clinopyroxene calibrated as a geothermobarometer for natural peridotites from 2 to 60 kb with applications [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 54(9): 2 375~2 388.
- Le Bas M J. 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram [J]. *J. Petrol.*, 27: 745~750.
- Leat P T, Thompson R N, Morrison M A, *et al.* 1988. Compositionally-diverse Miocene-Recent rift-related magmatism in northwest Colorado: partial melting, and mixing of mafic magmas from 3 different asthenospheric and lithospheric mantle sources. Cox K G and Menzies M A, eds. *Oceanic and continental lithosphere: similarities and differences* [J]. *J. Petrol.*, Special Volume, 351~377.
- Li Changnian and Wang Fangzheng. 2004. Holocene volcanic effusion in Weizhou island and its geological significance [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 24(4): 28~34 (in Chinese with English abstract).
- Li Changnian, Wang Fangzheng and Zhong Chensheng. 2005. Geochemistry of Quaternary basaltic volcanic rocks of Weizhou island in Beihai City of Guangxi and a discussion on characteristics of their source [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 24(1): 1~11 (in Chinese with English abstract).
- Li Ximing and Liu Chuanzhang. 1991. Preliminary study on the petrological characteristics of alkali-basalts in Weizhou island, Guangxi [J]. *Guangxi Geology*, 4(1): 43~51 (in Chinese with English abstract).
- Lightfoot P C, Hawkesworth C J, Hergt J, *et al.* 1993. Remobilisation of the continental lithosphere by a mantle plume: major-, trace-element, and Sr-Nd and Pb-isotope evidence from picritic and tholeiitic lavas of the Noril'sk District [J]. *Contrib. Mineral Petrol.*, 114: 171~188.
- Ormerod D S, Hawkesworth C J, Rogers N W, *et al.* 1988. Tectonic and magmatic transitions in the Western Great Basin USA [J]. *Nature*, 333(26): 349~353.
- Ringwood A E. 1975. *Composition and Petrology of Earth Mantle* [M]. New York: McGraw-Hill, 545~582.
- Shi Lanbin, Lin Chuanyong, Chen Xiaode, *et al.* 2003. Discovery of mantle-derived micro-xenoliths from Quaternary basalts in northern Hainan island and its geological implication [J]. *Seismology and Geology*, 25(Suppl): 33~42 (in Chinese with English abstract).
- Sun Qian, Fan Qicheng, Wei Haiquan, *et al.* 2006. Nanwan volcano eruption features on Weizhou Island, Guangxi [J]. *Editorial Committee of Earth Science*, 31(1): 66~70 (in Chinese with English abstract).
- 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): 213~222 (in Chinese with English abstract).
- Wells P R A. 1977. Pyroxene thermometry in simple and complex systems [J]. *Contr. Mineral Petrol.*, 62: 129~139.
- Wu Nengyou, Zeng Weijun, Du Deli, *et al.* 1999. Crust mantle coupling model and vertical evolution of lithosphere of South China Sea region [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 19(1): 31~38 (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* **A**(3~4):247~255(in Chinese with English abstract).
- Yoder H S Jr. 1976, *Generation of Basaltic Magma*[M]. Washington D C: National Academy of Sciences, 265.
- Zheng Jianping. 1999. *Mesozoic-Cenozoic Mantle Replacement and Lithospheric Thinning, East China*[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press(in Chinese).
- Zhou Jincheng, Jiang Shaoyong, Wang Xiaolei, *et al.* 2005. Study on litho-geochemistry of Mid-Jurassic basalts from South China represented by the Fankeng basalts from Yongding of Fujian Province [J]. *Science in China(D)*, **35**(10):927~936(in Chinese with English abstract).
- Zhu Bingquan, Wang Huifen, Chen Yuwei, *et al.* 2002. Geochronological and geochemical constraint on 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).
- 附中中文参考文献**
- 鄂莫岚, 赵大升. 1987. 中国东部新生代玄武岩及深源岩石包体 [M]. 北京: 科学出版社, 133~268.
- 樊祺诚, 孙 谦, 龙安明, 等. 2006. 北部湾涠洲岛及斜阳岛火山地质与喷发历史研究[J]. *岩石学报*, **22**(6):1529~1537.
- 郝 芳, 李思田, 龚再升, 等. 2001. 莺歌海盆地底碎发育机理与流体幕式充填[J]. *中国科学(D)*, **31**(6):471~476.
- 李昌年, 王方正. 2004. 广西北海涠洲岛(含斜阳岛)全新世火山喷发及其地质意义[J]. *矿物岩石*, **24**(4):28~34.
- 李昌年, 王方正, 钟称生. 2005. 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[J]. *岩石矿物学杂志*, **24**(1):1~11.
- 黎希明, 刘传章. 1991. 涠洲岛碱性玄武岩类岩石学特征的初步研究 [J]. *广西地质*, **4**(1):43~51.
- 史兰斌, 林传勇, 陈孝德, 等. 2003. 琼北第四纪玄武岩中微型地幔岩捕虏体的发现及其意义[J]. *地震地质*, **25**(增刊):33~42.
- 孙 谦, 樊祺诚, 魏海泉, 等. 2006. 广西涠洲岛南湾火山喷发特征 [J]. *地球科学*, **31**(1):66~70.
- 王鸿桢, 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.
- 吴能友, 曾维军, 杜德莉, 等. 1999. 南海区域岩石圈的壳-幔耦合关系和纵向演化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, **19**(1):31~38.
- 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]. *地质前缘*, **4**(3~4):247~255.
- 郑建平. 1999. 中国东部地幔置换作用与中生代岩石圈减薄 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 周金城, 蒋少涌, 王孝磊, 等. 2005. 华南中侏罗世玄武岩的岩石地球化学研究——以福建蒲坑玄武岩为例 [J]. *中国科学(D)*, **35**(10):927~936.
- 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.