

# 马利亚纳岛弧南部前弧方辉橄榄岩的交代作用: 单斜辉石和角闪石的微量元素特征

陈俊兵<sup>①②\*</sup> 曾志刚<sup>①</sup>

(<sup>①</sup> 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071; <sup>②</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要** 来自马利亚纳岛弧南部前弧的方辉橄榄岩是一种高度亏损的橄榄岩, 其中含少量的单斜辉石(0.7 vol%). 在方辉橄榄岩中发现两种类型的角闪石: 镁角闪石与单斜辉石密切伴生, 具有较高的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量(>7%)和较低的  $\text{Mg}^\#$ ; 透闪石在斜方辉石周围出现, 具有较低的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量(<2%)和较高的  $\text{Mg}^\#$ . 单斜辉石和镁角闪石的原始地幔标准化的 REE 分配模式显示 HREE 相对 LREE 的富集, 且镁角闪石的微量元素含量普遍高于单斜辉石. 透闪石的微量元素含量远低于单斜辉石. 与深海橄榄岩中的单斜辉石相比, 马利亚纳岛弧南部前弧的方辉橄榄岩中的单斜辉石出现大量微量元素的相对富集, 只有 Ti 和 HREE 等少量元素除外. 岩石特征和单斜辉石、角闪石微量元素特征暗示这些方辉橄榄岩经历了 2 个阶段的交代作用. 含水熔体的渗透交代引起了 Al, Ca, Fe, Mg, Na 和大量微量元素的迁移. 在含水熔体中, LILE 和 LREE 相对于 HREE 和 Ti 更活跃, 并且大部分微量元素在含水熔体中的活动性显然受到温度和压力的影响.

**关键词** 单斜辉石 角闪石 方辉橄榄岩 交代作用 马利亚纳

单斜辉石在地幔橄榄岩的部分熔融过程中相对于橄榄石和斜方辉石更易熔融<sup>[1,2]</sup>, 并易受到外来交代熔体/流体的影响, 甚至可以作为交代熔体/流体与橄榄岩反应的新生产物出现<sup>[3]</sup>; 角闪石是橄榄岩中最常见的交代矿物之一. 因此对单斜辉石和角闪石的研究是了解橄榄岩的交代作用的重要途径之一.

对伊豆-小笠原-马利亚纳(IBM)岛弧下部地幔楔(mantle wedge)橄榄岩的研究程度还很低<sup>[4-8]</sup>, 这很大程度上是因为地理特征和构造特征造成的取样困难, 并且取得的绝大多数橄榄岩样品普遍遭受了强烈的蛇纹石化作用. 对 ODP 125 航次在 Torishima 海山和 Conical 海山取得的方辉橄榄岩(以下简称 ODP 125 方

辉橄榄岩)的研究表明这些橄榄岩经历了约 15%~25% 的高度部分熔融作用, 全岩和单斜辉石的微量元素特征显示这些橄榄岩遭受了外来流体(熔体)的渗滤富集作用<sup>[5-8]</sup>. 此外, Ohara 和 Ishii<sup>[4]</sup> 描述了来自马利亚纳岛弧南部前弧(fore-arc)的含角闪石橄榄岩(角闪石含量最高可达 35.6 vol%<sup>1)</sup>), 这些橄榄岩也经历了与 ODP 125 方辉橄榄岩相似程度的部分熔融作用; 矿物组成和全岩及矿物常量元素组成显示这些橄榄岩普遍遭受了来自俯冲板片(subducting slab)的含水流体(熔体)的渗滤交代作用, 这种含水流体(熔体)富含 Ti, Al, Fe, K 和 Na.

本文着重分析来自马利亚纳岛弧南部前弧的方

收稿日期: 2006-04-28; 接受日期: 2006-09-11

中国科学院知识创新工程重要方向项目(批准号: KZCX3-SW-223)、国家自然科学基金(批准号: 40376020, 40176020)和国家大洋重大专项课题(批准号: DY105-01-03-1)资助

\* E-mail: [chen3791@126.com](mailto:chen3791@126.com)

1) vol% 为体积分数, 下同

辉橄榄岩(以下简称 SM 方辉橄榄岩)中的单斜辉石和角闪石的微量元素特征, 以期进一步深入了解马里亚纳岛弧南部弧下地幔楔的交代作用。

## 1 地质背景

伊豆-小笠原-马里亚纳(IBM)岛弧体系从日本东京到美国关岛全长约 2500 km, 呈南北走向横亘于西太平洋, 是太平洋板块和菲律宾海板块这两个大洋板块的汇聚处(图 1)。太平洋板块向菲律宾海板块下部的俯冲作用开始于大约 43 Ma 之前<sup>[10]</sup>。从平面形态上, 可以将 IBM 岛弧体系分成南北两部分: 24°N 以北的伊豆-小笠原段呈线性展布; 24°N 以南的马里亚纳段呈弧形展布。南部的马里亚纳段与北部的伊豆-小笠原段最大的区别是马里亚纳段发育明显的活动的弧后盆地——马里亚纳海槽, 从北向南, 马里

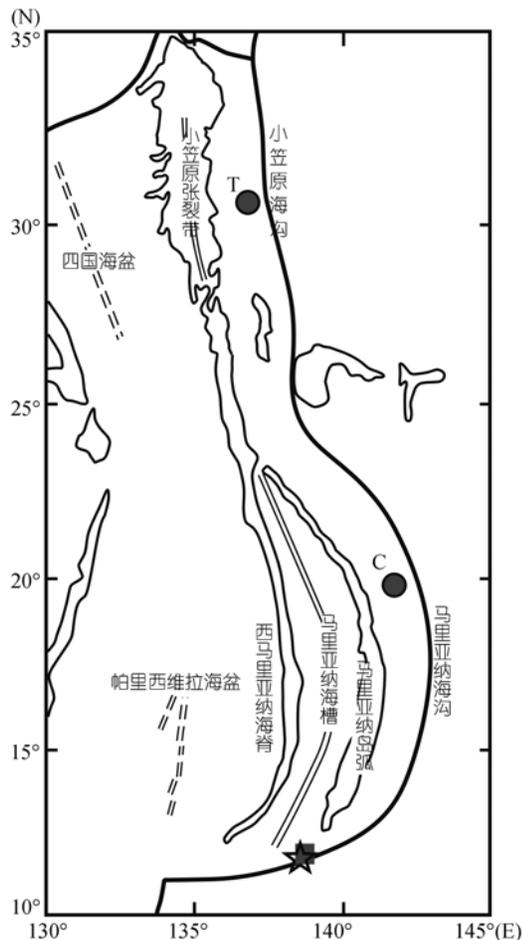


图1 伊豆-小笠原-马里亚纳岛弧体系构造简图

根据Fryer和Pearce修改<sup>[2]</sup>。圆点T为Torishima海山, C为Conical海山; 黑色方块指示Ohara和Ishii<sup>[4]</sup>报道的马里亚纳南部前弧橄榄岩的取样点; 五角星指示本文样品的取样位置

亚纳海槽从张裂的萌芽状态逐渐过渡到真正的海底扩张, 其张裂历史小于 3 Ma<sup>[11]</sup>。

## 2 样品描述及矿物常量元素特征

样品来自日本东京大学海洋研究所 Hakuho R/V KH03-3 航次, 取自马里亚纳海沟南部北西侧斜坡, 水深4900~4500 m。矿物常量元素在中国科学院地球化学研究所进行, 分析仪器为 EPMA-1600 型电子探针, 加速电压 25 kV, 分析结果见表 1 和 2。

含单斜辉石方辉橄榄岩呈碎斑状结构, 相当于 Girardeau和Lagabrielle<sup>[7]</sup>描述的橄榄岩的高温演化的第三阶段(Event 3)。原始矿物组合为橄榄石(77.6 vol%)+斜方辉石(17.3 vol%)+单斜辉石(0.7 vol%)+角闪石(3.4 vol%)+尖晶石(1 vol%)。

橄榄石颗粒最大长度超过 1 cm, 最小约为 0.3 mm(包含于斜方辉石颗粒中), 一般为 1~2 mm, 波状消光常见; 斜方辉石最大可达 3 mm以上, 最小仅为 0.2 mm(被橄榄石包含), 一般为 0.5~2 mm, 呈熔融残余状, 波状消光常见。橄榄石和斜方辉石化学成分比较稳定,  $Mg^{\#}$ 平均值分别为 0.914 和 0.916, 与已知 IBM前弧的橄榄岩中的橄榄石和斜方辉石的化学成分基本相当<sup>[4,5]</sup>, 高 $Mg^{\#}$ 指示这种方辉橄榄岩经历了较高级别的部分熔融作用。

单斜辉石一般为 0.3~1.4 mm, 化学成分也非常稳定,  $Mg^{\#}$ 平均为 0.957, 与ODP 125 方辉橄榄岩<sup>[5]</sup>中的原生单斜辉石相比,  $Al_2O_3$ 含量较低, 而 $Mg^{\#}$ 则相对偏高。

尖晶石一般为 0.3~1 mm, 大部分呈半自形的棱角状, 少数形态不规则, 颗粒边界弯曲。尖晶石的化学成分变化相对较大,  $Cr^{\#}$ 平均为 0.595。晶体颗粒成分环带发育, 即颗粒核心普遍比边缘高 $Cr^{\#}$ (表 1), 这种成分环带在Ohara和Ishii<sup>[4]</sup>描述的Type I型方辉橄榄岩的尖晶石中非常普遍。

角闪石呈柱状晶形, 根据化学成分和附存状态可以将角闪石分为两类(角闪石的定名根据Leake等<sup>[12]</sup>): 第一类为镁角闪石, 与单斜辉石紧密伴生, 以高 $Al_2O_3$ (一般>7%)、低 $Mg^{\#}$ 为特征; 第二类为透闪石, 在斜方辉石边缘出现, 以低 $Al_2O_3$ (一般<2%)、高 $Mg^{\#}$ 为特征(表 2, 图 2)。

方辉橄榄岩的次生变化较弱, 主要表现为斜方辉石的滑石化和橄榄石的蛇纹石化。

表 1 马利亚纳岛弧南部前弧橄榄岩组成矿物电子探针分析结果<sup>a)</sup>

	Ol(7)		Opx(11)		Cpx(12)		Sp2(6)		Sp1	
	<i>x</i>	<i>d</i>	<i>x</i>	<i>d</i>	<i>x</i>	<i>d</i>	<i>x</i>	<i>d</i>	核心	边缘
SiO <sub>2</sub>	40.92	0.15	57.43	0.52	55.29	0.49				
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			0.70	0.26	0.61	0.13	20.48	1.47	19.28	24.42
FeO	8.40	0.31	5.72	0.18	1.43	0.10	23.90	1.04	23.56	21.87
MnO			0.12	0.11						
MgO	49.74	0.39	34.86	0.25	17.76	0.12	10.60	0.57	10.57	11.85
CaO			0.31	0.13	24.94	0.32				
Na <sub>2</sub> O					0.02	0.01				
K <sub>2</sub> O										
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			0.15	0.11	0.30	0.08	44.78	1.96	46.21	41.41
NiO	0.31	0.11	0.03	0.03	0.01	0.01				
总和	99.37	0.35	99.32	0.42	100.36	0.42	99.75	0.52	99.62	99.55
Mg <sup>#</sup>	0.914	0.003	0.916	0.003	0.957	0.003				
Cr <sup>#</sup>							0.595	0.028	0.617	0.532

a) 橄榄石(Ol)、斜方辉石(Opx)、单斜辉石(Cpx)和尖晶石(Sp2)的算术平均值(*x*)和平均绝对偏差(*d*), 括号内为分析点数; 尖晶石(Sp1)为一个代表性的尖晶石颗粒的核心和边缘的常量元素组成; Mg<sup>#</sup>=Mg/(Mg+Fe), Cr<sup>#</sup>=Cr/(Cr+Al)

表 2 马利亚纳岛弧角闪石的常量元素和微量元素分析结果(单位: μg/g)

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NiO	总和	Mg <sup>#</sup>	名称	
D7-64-3a1 <sup>b)</sup> Tyep 1	46.27	9.51	2.68		19.56	11.57	2.08	0.02	1.82	0.12	93.63	0.929	镁角闪石	
D7-64-5a2 Tyep 1	46.25	9.01	2.37	1.21	19.18	11.34	2.37	0.01		0.04	91.78	0.935	镁角闪石	
D7-64-7a2 Tyep 1	46.32	9.31	2.58	0.03	19.47	11.42	2.36	0.05	1.85	0.04	93.43	0.931	镁角闪石	
D7-64-14a1 Tyep 2	57.14	1.57	1.62		23.74	12.04	0.47			0	96.58	0.963	透闪石	
D7-64-17a1 Tyep 1	47.01	9.42	3.06	0.02	19.52	11.47	2.57	0.01	2.04	0.05	95.17	0.919	镁角闪石	
	Rb	Ba	Th	U	Nb	Ta	La	Ce	Pb	Pr	Sr	Nd	Zr	Hf
D7-64-3a1	0.089	3.83	<0.005	0.006	0.113	<0.003	0.026	0.069	0.740	0.014	7.12	0.118	0.449	<0.030
D7-64-5a2	0.652	25.4	<0.007	0.009	0.266	0.010	0.029	0.095	0.770	0.019	9.04	0.091	0.424	<0.027
D7-64-7a2	0.166	4.71	<0.007	<0.007	0.097	<0.006	0.037	0.076	5.68	0.012	7.63	0.145	0.376	<0.035
D7-64-14a1	0.078	0.660	<0.007	0.142	0.011	<0.003	0.006	<0.004	1.81	0.004	10.8	<0.029	<0.041	<0.027
D7-64-17a1	0.477	17.4	<0.011	<0.011	0.223	0.010	0.046	0.112	1.72	0.014	9.69	0.135	0.463	0.037
	Sm	Eu	Ti	Gd	Tb	Dy	Y	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Sc	V
D7-64-3a1	0.070	0.038	258	0.211	0.044	0.455	3.58	0.152	0.492	0.100	0.790	0.124	126	410
D7-64-5a2	0.081	0.059	316	0.216	0.058	0.426	3.18	0.131	0.408	0.080	0.630	0.117	121	463
D7-64-7a2	0.066	0.038	303	0.207	0.052	0.417	3.71	0.136	0.512	0.089	0.840	0.121	129	430
D7-64-14a1	<0.023	0.009	55.5	0.026	0.003	0.044	0.244	0.006	0.039	0.009	0.042	0.010	50.1	121
D7-64-17a1	0.102	0.034	381	0.136	0.074	0.499	3.92	0.141	0.557	0.086	0.610	0.131	126	442

a) 以 D7-64-3a1 为例, D7-64 为样品号, 3a1 为分析点号, 表 3 为相同的标注方法

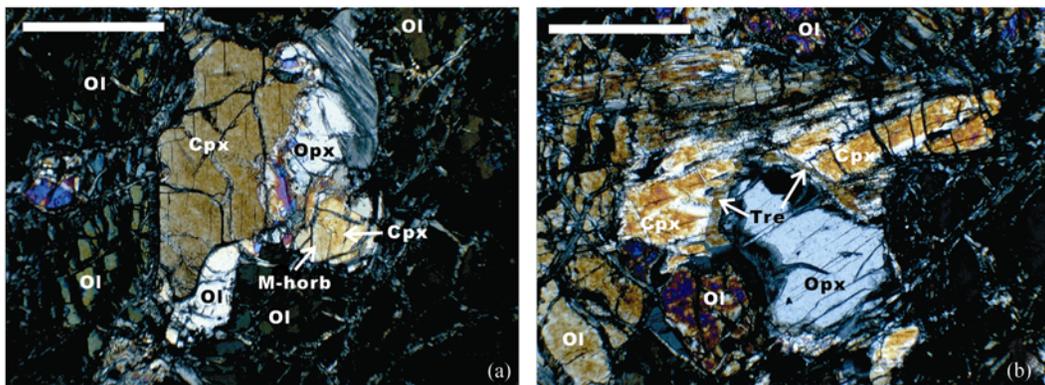


图 2 马利亚纳岛弧南部前弧方辉橄榄岩中角闪石与辉石的伴生关系

(a) 单斜辉石(Cpx)与镁角闪石(M-horb)伴生; (b) 透闪石(Tre)在斜方辉石(Opx)周围呈弧形的带状。白色标尺为 1 mm

### 3 单斜辉石和角闪石的微量元素特征

单斜辉石和角闪石的微量元素原位分析在西北大学大陆动力学教育部重点实验室进行, 等离子质谱仪仪器型号为Agilent7500a, 激光剥蚀进样系统为GeoLas200M, 检测极限从Ta的  $1.2 \times 10^{-9}$  到Ti的  $0.5 \times 10^{-6}$ . 外标采用NIST610, 单斜辉石和角闪石的内标均采用CaO. 分析结果见表 2 和 3. 下文中的所有微量元素比值都是原始地幔<sup>[13]</sup>标准化之后的比值.

### 3.1 单斜辉石

SM 方辉橄岩中的单斜辉石的 REE 原始地幔标准化分配模式(图 3(b))呈比较平滑的左倾模式(La/Yb: 0.04~0.07), La 相对于 Ce 略显富集(La/Ce: 0.90~2.15). 微量元素分配模式(图3(a))显示显著的U, Pb 和 Sr 正异常, 其中 U/Nb 高达 368.97, Pb/Pr 为 162.08~267.08, Sr/Nd 为 5.50~10.18; 尽管强不相容元素 Rb 和 Ba 没有表现为明显的正异常, 但相对于 Ce

表 3 马里亚纳橄岩单斜辉石的微量元素分析结果(单位:  $\mu\text{g/g}$ )

	Rb	Ba	U	Nb	La	Ce	Pb	Pr	Sr	Nd	Zr	Hf	Sm
D7-64-3a2	<0.017	0.044	0.001	<0.008	<0.008	0.012	0.247	<0.004	4.29	<0.027	0.086	<0.026	<0.041
D7-64-4a2	0.030	0.378	0.107	0.009	0.009	0.018	0.670	0.007	9.01	<0.028	0.185	<0.017	<0.017
D7-64-2a1	0.017	0.401	0.006	<0.009	0.012	0.016	0.182	<0.004	5.43	0.062	0.229	<0.018	0.038
D7-64-10a1	0.031	0.209	0.052	<0.008	0.013	0.016	0.347	0.002	4.20	0.039	0.436	<0.024	<0.018
D7-64-7a1	0.019	0.076	<0.006	0.008	0.007	0.020	0.600	<0.003	4.27	<0.026	0.098	0.010	<0.023
D7-64-6a3	0.044	0.199	0.014	<0.008	0.011	0.023	1.00	<0.004	4.86	0.030	0.124	0.025	0.030
D7-64-5a1	<0.015	0.102	<0.003	0.006	0.007	0.015	1.23	<0.004	4.07	0.029	0.064	<0.027	0.027
D7-64-17a2	0.035	0.293	<0.008	<0.012	<0.007	0.017	1.91	<0.007	4.54	<0.039	0.122	<0.034	0.043
	Eu	Ti	Gd	Tb	Dy	Y	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Sc	V
D7-64-3a2	<0.009	60.6	0.038	0.012	0.082	0.459	0.019	0.061	0.017	0.095	0.019	60.7	123
D7-64-4a2	0.008	83.2	0.029	0.010	0.071	0.486	0.020	0.052	0.011	0.135	0.021	67.2	142
D7-64-2a1	0.017	77.4	0.031	0.013	0.167	0.900	0.038	0.102	0.024	0.158	0.033	66.5	178
D7-64-10a1	<0.008	52.6	0.055	0.011	0.093	0.611	0.021	0.061	0.017	0.125	0.024	55.9	106
D7-64-7a1	<0.007	67.8	<0.024	0.011	0.054	0.510	0.023	0.065	0.012	0.096	0.029	59.5	141
D7-64-6a3	0.013	86.4	0.077	0.017	0.138	0.867	0.029	0.138	0.024	0.170	0.026	64.8	164
D7-64-5a1	0.007	62.1	0.034	0.005	0.061	0.419	0.017	0.062	0.010	0.104	0.017	54.8	102
D7-64-17a2	<0.011	82.4	<0.032	0.008	0.050	0.544	0.014	0.074	0.015	0.119	0.022	62.2	119

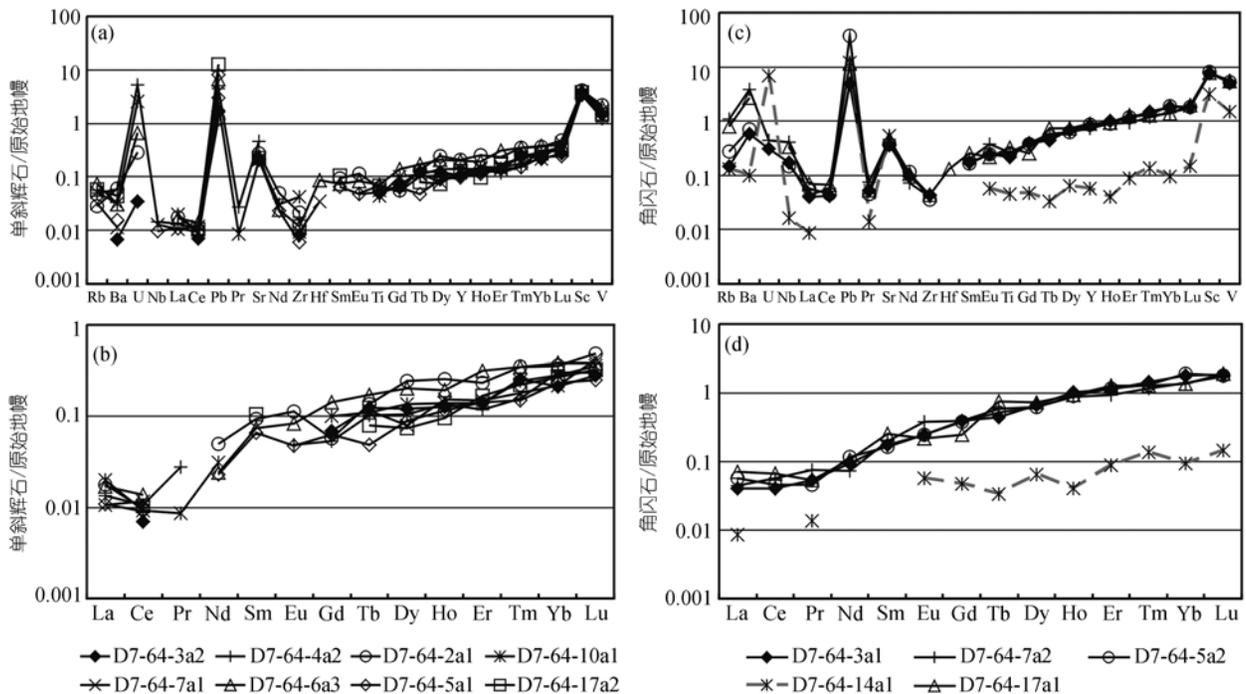


图 3 单斜辉石和角闪石的微量元素、REE 分配模式

也不同程度富集, 如 Rb/Ce 为 2.67~5.62, Ba/Ce 为 0.96~6.24; 大都表现出明显的 Zr 负异常(Zr/Nd: 0.26~0.49)和弱的 Ti 负异常(Ti/Gd: 0.43~1.30).

与来自印度洋中脊的深海橄榄岩(IR)<sup>[14]</sup>中的单斜辉石相比(图 4(a)), 除了Sr含量较高外, SM方辉橄榄岩中的单斜辉石的其他可以比较的微量元素含量远远低于IR橄榄岩; 不过, 两者都表现出Zr的明显负异常和Ti的弱负异常.

SM方辉橄榄岩中的单斜辉石与ODP125方辉橄榄岩中的单斜辉石的微量元素特征很相似, 但仍有细小区别: 与ODP125方辉橄榄岩相比, SM方辉橄榄岩的单斜辉石的Sr含量相对更高, 轻稀土元素(Ce)明显亏损, 其他微量元素普遍略显亏损(如Zr, Ti, Dy和Yb)(图4(a)).

### 3.2 角闪石

镁角闪石的REE原始地幔标准化分配模式(图3(d))呈平滑的左倾模式(La/Yb: 0.02~0.05), 与伴生的单斜辉石的REE分配模式基本平行, 但含量更高, 并且未显示明显的La相对于Ce的富集(La/Ce: 0.78~1.26). 微量元素分配模式(图3(c))显示明显的Ba, Pb和Sr的正异常, 其中Ba/U为1.90~8.69, Pb/Pr为67.21~829.15, Sr/Nd为3.31~6.24; Rb, U, Nb等强不相容元素也相对于LREE不同程度富集, 如Rb/Ce为3.60~19.16, U/Ce为7.41~7.82, Nb/Ce为3.25~7.13; Zr负异常比较明显(Zr/Nd: 0.41~0.55), Ti未表现出明显异常.

透闪石的REE原始地幔标准化分配模式(图3(d))也基本呈平滑的左倾模式, 但比镁角闪石相对平缓

(La/Yb: 0.09), 且含量更低(特别是MREE和HREE). 微量元素分配模式(图3(c))显示明显的U, Pb和Sr的正异常(U/Nb: 422.27; Pb/Pr: 875.70; Sr/Pr: 39.42), Rb, Ba和Nb等强不相容元素相对La均不同程度富集(Rb/La: 15.04; Ba/La: 11.57; Nb/La: 809.43). 与镁角闪石相比, 除了U含量明显较高以及Rb, Pb和Sr含量比较接近以外, 其他各微量元素的含量明显偏低.

## 4 讨论

### 4.1 交代作用

原始矿物组成和橄榄石、斜方辉石的高Mg<sup>#</sup>显示SM方辉橄榄岩经历了高程度的部分熔融作用. 单斜辉石的化学特征显示这些方辉橄榄岩比ODP125方辉橄榄岩还要亏损(如单斜辉石中更低的REE含量).

图5分析了单斜辉石中Mg<sup>#</sup>与其他微量元素的相关性. 对于“无水”熔融残余的深海橄榄岩, 其中单斜辉石的微量元素含量与Mg<sup>#</sup>呈较好的负相关性, 而SM方辉橄榄岩中的单斜辉石的Ce, Sr, Nd, Zr, Sm和Eu等相容程度较低的微量元素显然发生了不同程度的富集现象, 但Ti和HREE等相容程度相对较高的微量元素未发生这种相对富集现象. 单斜辉石的这种相对富集现象在ODP125橄榄岩中也有发现<sup>[6]</sup>(图5). Bizimis等<sup>[15]</sup>认为这种高度亏损的橄榄岩经历了“含水”熔融作用, 使得其中单斜辉石的Ti和HREE含量明显亏损, 并且在熔融过程中不断接受来自俯冲板片物质的加入补充, 从而引起单斜辉石中LREE, MREE, Zr和Sr等的相对富集<sup>[16]</sup>.

SM方辉橄榄岩中, 角闪石的出现进一步说明这

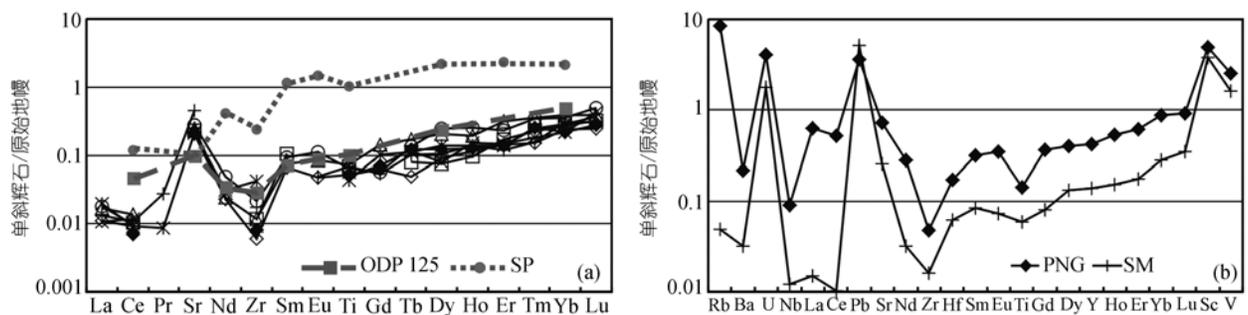


图 4

(a) 马里亚纳岛弧南部前弧(SM)方辉橄榄岩中单斜辉石的微量元素分配模式与深海橄榄岩(SP)<sup>[14]</sup>、ODP 125方辉橄榄岩(ODP 125)<sup>[6]</sup>的单斜辉石的比较; (b) 马里亚纳岛弧南部前弧(SM)方辉橄榄岩中单斜辉石的微量元素分配模式与巴布亚新几内亚Lihir岛弧前缘(PNG)的橄榄岩包体<sup>[15]</sup>的单斜辉石的比较. (a)中SM方辉橄榄岩的图例与图3相同, (a)中ODP 125, SP以及(b)中的PNG和SM皆为平均值

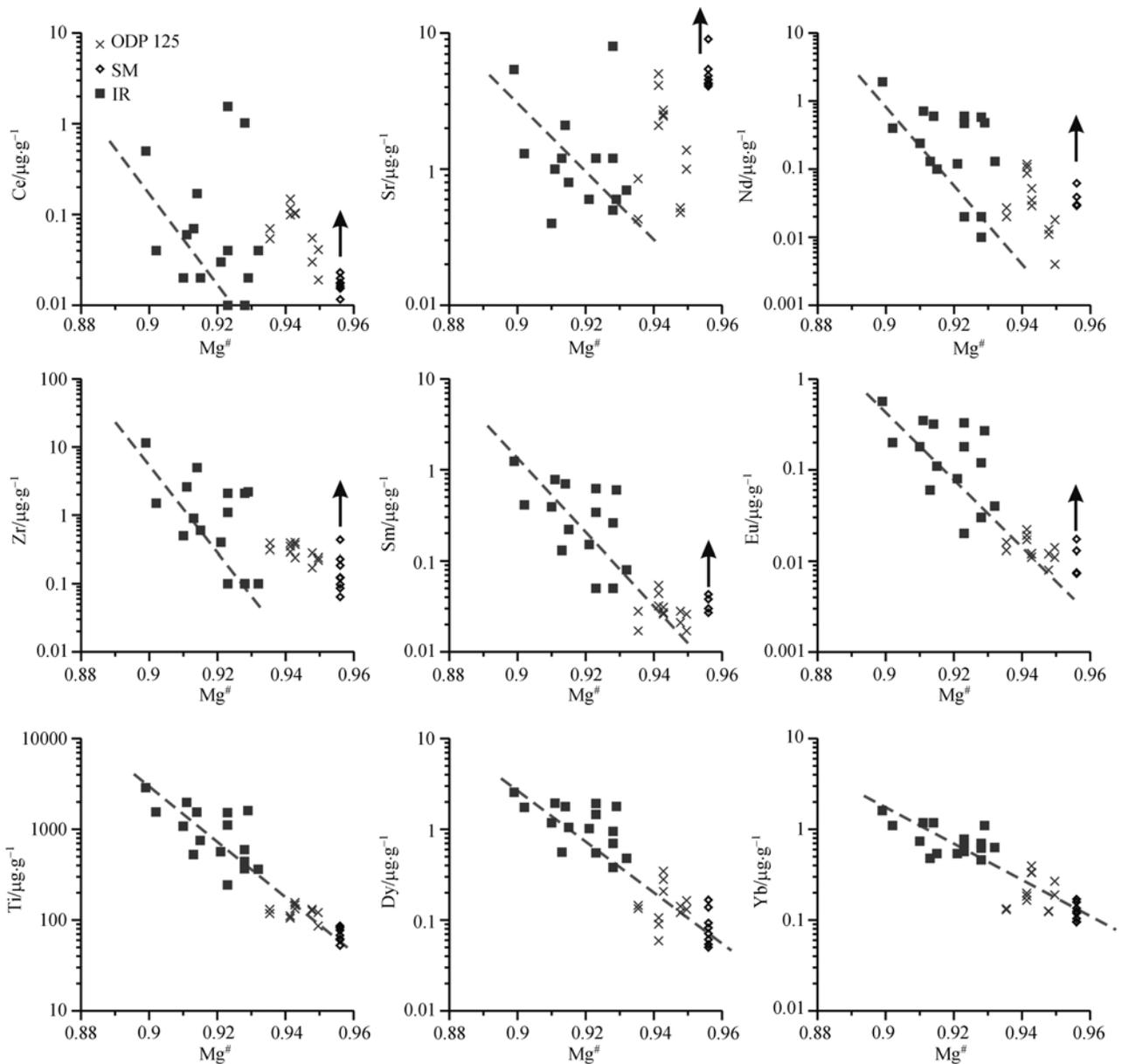


图 5 单斜辉石的  $Mg^{\#}$  与微量元素的相关图

深海橄榄岩(IR)<sup>[44]</sup>、ODP 125 方辉橄榄岩<sup>[6]</sup>的单斜辉石微量元素数据列出以作比较; 虚线指示“无水”部分熔融作用引起的单斜辉石的亏损趋势, 箭头线指示交代作用引起的单斜辉石的富集趋势; SM方辉橄榄岩的单斜辉石的 $Mg^{\#}$ 为平均值

些方辉橄榄岩受到含水介质的交代作用. 研究显示角闪石中Al的含量随着温度和压力的增加而增加<sup>[47]</sup>, 这两种角闪石(镁角闪石和透闪石)的形成代表了 2 个阶段的含水介质的交代作用:

(1) 较高温、压条件下, 含水介质在马里亚纳南部弧下地幔楔中渗透并与单斜辉石反应形成镁角闪石; 镁角闪石与单斜辉石微量元素和稀土元素分配模式的相似性暗示他们是同一期含水介质的渗滤交

代产物.

(2) 较低的温、压条件下, 含水介质交代斜方辉石形成贫  $Al_2O_3$  的透闪石.

#### 4.2 交代介质的性质

SM方辉橄榄岩中单斜辉石的微量元素分配模式与来自巴布亚新几内亚(Papua New Guinea)Lihir岛弧前弧的橄榄岩包体(PNG)<sup>[15]</sup>中的单斜辉石非常相

似(图 4(b)), 且都显示 Rb, U, Pb 正异常和 Zr 和 Ti 的负异常. 对 PNG 方辉橄榄岩的研究认为 PNG 方辉橄榄岩遭受一种高密度的含水熔体的交代作用, 这种高密度的含水熔体富集 LILE 和 LREE 而相对亏损 Zr、Ti 和 HREE, 交代作用引起了 Al, Si, Na, K 和 S 的迁移 [17,18]. SM 方辉橄榄岩和 PNG 方辉橄榄岩中单斜辉石的微量元素特征的相似性暗示马里亚纳南部弧下地幔楔经历了与 Lihir 弧下地幔楔类似的交代作用. SM 方辉橄榄岩经历的第一阶段的交代作用过程中, 镁角闪石的形成暗示交代作用引起了 Al, Si, Ca, Fe, Mg, Cr 和 Na 的迁移, 即这种交代介质与 Lihir 弧下地幔楔中的交代介质一样, 也是一种高密度的含水熔体. 单斜辉石中 LILE(如 Rb, Ba, U, Pb 和 Sr)和 LREE 的富集作用暗示这种含水熔体中 LILE 和 LREE 相对于 HREE 和 Ti 的富集. 这种现象与最近的高温高压实验研究结果是基本一致的 [19], 即 Ti 和 HREE 在俯冲流体和熔体中的活性明显低于比 LILE 和 LREE. 此外, 镁角闪石的形成说明含水熔体中不但容纳了大量 LILE 和 LREE, 还含一定量的 HREE 和 Ti. SM 方辉橄榄岩和 PNG 方辉橄榄岩中单斜辉石的微量元素特征的主要不同之处是前者的微量元素含量明显比后者更亏损, 这可以解释为在交代作用之前, SM 方辉橄榄岩经历了相对更高程度的部分熔融作用.

第二阶段较低温、压条件下的交代作用中, 透闪石作为斜方辉石的交代产物的形成显示交代作用引起了 Al, Ca, Fe, Mg 和 Na 等的大量迁移, 这暗示第二阶段的含水交代介质也可能是一种高密度的含水熔体. 此外, 透闪石与镁角闪石微量元素特征的差异说明温度和压力对微量元素在含水熔体中的活动性有着重要的影响, 温度和压力的升高使 REE(特别是 MREE 和 HREE)和 Ti 在含水熔体中的活动性明显升高, 但对部分 LILE(如 U, Pb 和 Sr)影响不明显.

## 5 总结

马里亚纳岛弧南部前弧方辉橄榄岩是地幔楔高度部分熔融的残余, 并受到后期与俯冲作用相关的地幔交代作用. 这种交代作用可以分为 2 个阶段: (1) 较高温、压条件下, 含水熔体与方辉橄榄岩中的单斜辉石发生反应, 形成镁角闪石, 并引起单斜辉石的部分微量元素的富集. (2) 在相对较低温、压条件下, 含水熔体进一步与方辉橄榄岩中的斜方辉石反应形成

透闪石.

含水熔体在地幔楔中的渗透引起 Al, Ca, Fe, Mg 和 Na 等元素的迁移. 单斜辉石和角闪石的微量元素特征显示 LILE 和 LREE 在含水熔体中的活动性比 HREE 和 Ti 高, 并且, 除了部分 LILE 外, 其他大部分微量元素在含水熔体中的活动性随着温度的升高而升高.

**致谢** 日本东京大学李毅斌博士提供了样品与帮助, 西北大学大陆动力学教育部重点实验室柳小明博士、中国科学院地球化学研究所刘世荣和周国富博士在测试分析时给予了极大帮助与指导, 中国科学院地质与地球物理研究所张宏福研究员给予了指导, 在此一并致谢.

## 参 考 文 献

- 1 Jaques A L, Green D H. Anhydrous melting of peridotite at 0–15 kb pressure and the genesis of tholeiitic basalts. *Contrib Mineral Petrol*, 1980, 73(3): 287–310[DOI]
- 2 Baker M B, Stolper E M. Determining the composition of high-pressure mantle melts using diamond aggregates. *Geochim Cosmochim Acta*, 1994, 58(13): 2811–2827[DOI]
- 3 Yaxley G M, Crawford A J, Green D H. Evidence for carbonatite metasomatism in spinel peridotite xenoliths from western Victoria, Australia. *Earth Planet Sci Lett*, 1991, 107(2): 305–317[DOI]
- 4 Ohara Y, Ishii T. Peridotites from the southern Mariana forearc: heterogeneous fluid supply in mantle wedge. *Isl Arc*, 1998, 7(3): 541–558[DOI]
- 5 Parkinson I J, Pearce J A. Peridotites from the Izu-Bonin-Mariana Forearc (ODP Leg 125): evidence for mantle melting and melt-mantle interaction in a supra-subduction zone setting. *J Petrol*, 1998, 39(9): 1577–1618[DOI]
- 6 Parkinson I J, Pearce J A, Thirlwall M F, et al. Trace element geochemistry of peridotites from the Izu-Bonin-Mariana forearc, Leg 125. In: Fryer P, Pearce J A, Stokking L B, et al, eds. *Proceedings of the Ocean Drilling Program Scientific Results*, vol 125. TX: College Station, 1992. 487–506
- 7 Girardeau J, Lagabrielle Y. Deformation history of peridotites from Mariana forearc, Conical Seamount, Leg 125. In: Fryer P, Pearce J A, Stokking L B, et al, eds. *Proceedings of the Ocean Drilling Program Scientific Results*, vol 125. TX: College Station, 1992. 519–534
- 8 Ishii T, Robinson P T, Maekawa H, et al. Petrological studies of peridotites from diapiric serpentinite seamounts in the Izu-Ogasawara-Mariana forearc, Leg 125. In: Fryer P, Pearce J A, Stokking L B, et al, eds. *Proceedings of the Ocean Drilling Program Scientific Results*, vol 125. TX: College Station, 1992. 445–486
- 9 Fryer P, Pearce J A. Introduction to the scientific results of Leg 125. In: Fryer P, Pearce J A, Stokking L B, et al, eds. *Proceedings*

- of the Ocean Drilling Program Scientific Results, vol 125. TX: College Station, 1992. 3—11
- 10 Stern R J, Fouch M J, Klemperer S L. An overview of the Izu-Bonin-Mariana subduction factory. In: Eiler J, ed. Inside the Subduction Factory, vol 138. Washington DC: American Geophysical Union, 2004. 175—223
- 11 Yamazaki T, Murakami F. Asymmetric rifting of the northern Mariana Trough. *Isl Arc*, 1998, 7(3): 460—470[DOI]
- 12 Leake B E, Woollet A R, Arps C E S, et al. Nomenclature of Amphiboles: Report of the Subcommittee of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names. *Canadian Mineral*, 1997, 35: 219—246
- 13 McDougough W F, Sun S S. The composition of the Earth. *Chem Geol*, 1995, 120: 223—253[DOI]
- 14 Johnson K T M, Dick H J B, Shimizu M. Melting in the oceanic upper mantle: an ion microprobe study of diopsides in abyssal peridotites. *J Geophys Res*, 1990, 95(B3): 2661—2678
- 15 Bizimis M, Salters V J M, Bonatti E. Trace and REE content of clinopyroxenes from supra-subduction zone peridotites: implications for melting and enrichment processes in island arcs. *Chem Geol*, 2000, 165(19): 67—85[DOI]
- 16 Ernst W G, Liu J. Experimental phase-equilibrium study of Al- and Ti-contents of calcic amphibole in MORB—A semiquantitative thermobarometer. *Am Mineral*, 1998, 83: 952—969
- 17 Grégoire M, McInnes B I A, O'Reilly S Y. Hydrous metasomatism of oceanic sub-arc mantle, Lihir, Papua New Guinea Part 2: Trace element characteristics of slab-derived fluids. *Lithos*, 2001, 59(3): 91—108[DOI]
- 18 McInnes B I A, Gregoire M, Binns R A, et al. Hydrous metasomatism of oceanic sub-arc mantle, Lihir, Papua New Guinea: petrology and geochemistry of fluid-metasomatised mantle wedge xenoliths. *Earth Planet Sci Lett*, 2001, 188(1-2): 169—183[DOI]
- 19 Kessel R, Schmidt M W, Ulmer P, et al. Trace element signature of subduction-zone fluids, melts and supercritical liquids at 120–180 km depth. *Nature*, 2005, 437: 724—727[DOI]