

山东临朐新生代玄武岩携带的单斜辉石晶体中 玻璃质熔体包裹体

张宏福 Eizo Nakamura 张瑾 Ishikawa Akira

(中国科学院地质与地球物理研究所 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029; Institute for Study of the Earth's Interior, Okayama University at Misasa, Tottori 682-0193, Japan. E-mail: hfzhang@mail.iggcas.ac.cn)

摘要 山东临朐新生代玄武岩携带有较多的单斜辉石晶体, 这些单斜辉石中发现存在大量玻璃质熔体包裹体. 玻璃质熔体包裹体形状极不规则, 大小多在 10~50 μm 之间, 并与低镁橄榄石、拉长石和富钙钾长石共生. 原位主、微量元素分析表明玻璃质熔体包裹体富碱($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O} > 10\%$), 高硅($>54\%$)、钙、铁($>4\%$, 质量分数, 下同), 贫镁($\text{Mg}\# < 20$), 富集轻稀土元素($(\text{Ce}/\text{Yb})_{\text{cn}} = 11.6\sim 16.4$), 并具有明显的Eu正异常($\text{Eu}/\text{Eu}^* > 2$), 即为类似响岩质组成. 单斜辉石晶体和玻璃质熔体包裹体及其共生矿物的组成特征说明这些熔体包裹体是寄主玄武岩携带前捕获的外来熔体. 该熔体包裹体的发现为进一步探讨华北东南部中生代岩石圈地幔的演化过程提供了另一个新的途径.

关键词 山东临朐 新生代玄武岩 单斜辉石 熔体包裹体 地壳来源

熔体包裹体或玻璃常见于全球玄武岩携带的尖晶石相橄榄岩捕虏体^[1-4]和中基性火山岩(如玄武岩、玄武安山岩、高镁安山岩等)携带的橄榄石斑晶或捕虏晶^[5-11]中. 这些熔体包裹体的研究对了解地幔橄榄岩中熔体的形成和迁移过程, 地幔熔融和岩浆演化过程等具有重要意义. 然而, 熔体包裹体在玄武质火山岩中的单斜辉石斑晶、捕虏晶中却很少见. 据笔者所知, 仅在Polynesia洋岛玄武岩携带的单斜辉石中曾有过报道^[7], 而在中国华北克拉通内部中生代、新生代玄武岩中尚无明确报道^[12-17]. 笔者在对山东昌乐-临朐新生代玄武岩的研究中, 首次在临朐胸山碱性玄武岩中发现其中单斜辉石晶体中含有众多的熔体包裹体. 本文通过电子探针和离子探针对主、微量元素的测试结果旨在报道这些单斜辉石晶体及其包裹的玻璃质熔体包裹体和子矿物集合体(橄榄石、斜长石、钾长石)的矿物学和地球化学特征, 并推测单斜辉石晶体和熔体包裹体的可能形成过程.

1 地质背景及岩石特征

昌乐-临朐玄武岩分布在郯城-庐江断裂带中段的山东省昌乐县-临朐县境内, 即中生代、新生代沉积断陷盆地内. 该区玄武岩呈似层状直接覆盖在老第三系五图组含煤河湖相沉积岩之上, 形成大面积熔岩台地或熔岩穹丘, 环形火山口随处可见, 柱状节理发育. 区内玄武质岩浆活动主要有三期^[18]: 牛山期岩浆活动(14.48 Ma); 山旺期岩浆活动(9.97 ± 0.91 Ma);

和尧山期岩浆活动 (4.34 ± 0.19 Ma). 在牛山期和山旺期岩浆活动间歇期发育有著名的有“万卷书”之称的含众多昆虫类和植物化石以及琥珀的火山湖相硅藻土页岩^[19], 为中国著名的地质旅游地之一. 该区玄武岩在岩石类型上主要为碧玄岩和碱性玄武岩. 在昌乐五图方山、北岩和临朐山旺等地玄武岩中含有大量的尖晶石二辉橄榄岩捕虏体和歪长石巨晶, 其中五图方山玄武岩中还含有大量的各类辉石岩捕虏体和蓝色-褐色刚玉, 是中国著名的蓝宝石产地^[18].

临朐胸山玄武岩为尧山期岩浆活动产物, 柱状节理发育, 柱体细而密. 玄武岩呈灰黑-暗绿色, 具显微斑状结构(图 1(a)), 块状构造. 斑晶主要为橄榄石和斜长石, 基质为隐晶-玻璃质(图 1(a)). 胸山玄武岩的一个显著特征是普遍含有少量的含玻璃质熔体包裹体的单斜辉石晶体(图 1(a), (b)), 而这些含熔体包裹体的单斜辉石在昌乐-临朐玄武岩区的其他岩体里尚未发现. 另外, 胸山玄武岩未见在其他岩体普遍存在的橄榄岩和辉石岩捕虏体.

2 单斜辉石晶体和熔体包裹体

单斜辉石晶体常呈浑圆状或次棱角状(图 1(a)), 含量很少, 约 2%, 且颗粒较小, 多为 2~8 mm. 单斜辉石晶体皆具有明显的环带结构(图 1(a), (b)). 中心部分单斜辉石呈骨架状(图 1(c)), 骨架中包裹有大量的玻璃质熔体包裹体以及橄榄石、斜长石、钾长石和金属硫化物. 玻璃形状极不规则(图 1(c), (d)), 大小多

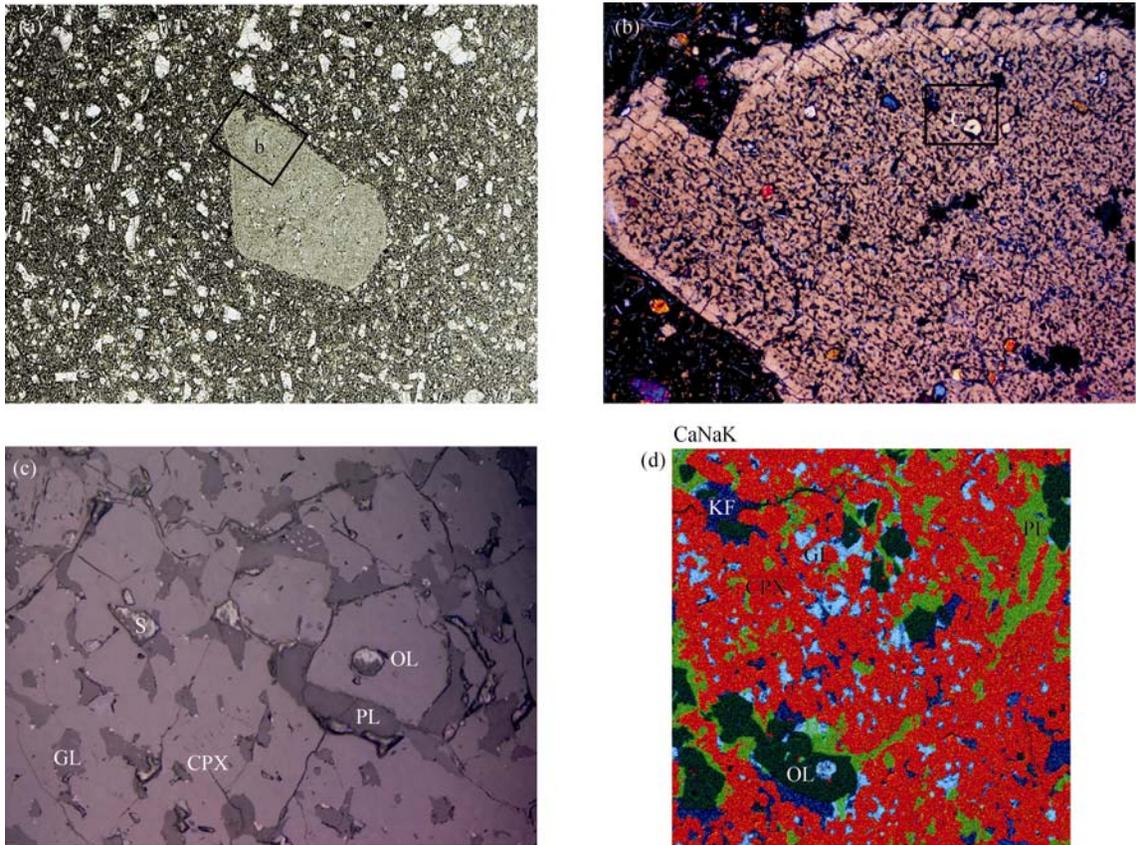


图 1

(a) 玄武岩的显微照片(04LQQ-01), 中心为含熔体包裹体的单斜辉石晶体, 大小约 6 mm; (b) 单斜辉石晶体的显微照片(正交偏光×5); (c) 单斜辉石晶体中心含玻璃和矿物子晶的显微照片(反射光×40); (d) 单斜辉石晶体中心含玻璃和矿物子晶的常量元素面扫描图. CaNaK 三元素合成图上单斜辉石(CPX)为红色, 橄榄石(OL)为黑色, 斜长石(PL)为黄色, 钾长石(KF)为紫色, 玻璃(GL)为天兰色, S: 金属硫化物

在 10~50 μm 之间. 橄榄石结晶较好, 多为自形晶, 而且颗粒也较大, 约 30~100 μm. 斜长石和钾长石形状也很不规则(图 1(d)), 颗粒大小比玻璃稍大, 较大颗粒常分布在橄榄石周围. 硫化物颗粒非常小(<5 μm)且含量很少, 常分布在玻璃中或玻璃边缘(图 1(c)). 单斜辉石晶体边缘具有宽度不等(60~200 μm)的明亮“净边”(图 1(b)), 不含任何矿物和熔体包裹体.

3 测试方法

玄武岩制成标准的探针片, 矿物和玻璃的主量元素含量在镀膜薄片上利用电子探针在中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室的 Cameca SX50 仪器上测定的. 测试电压为 15 kV, 电流 20 nA. 测试结果见表 1. 其微量元素含量是在日本冈山大学固体地球科学研究中心采用离子探针技术(Cameca® ims-5f)利用高强¹⁶O 离子束轰击镀金

光薄片使之产生二次离子流而直接测定的. 离子束直径为 15 μm, 标样采用地幔橄榄岩捕虏体中的单斜辉石和火山玻璃. 详细测试过程和分析精度请见参考文献[20]. 测试结果见表 2.

4 测试结果

4.1 矿物的主量元素组成

单斜辉石: 单斜辉石晶体的中心部分, 即含玻璃质熔体包裹体的单斜辉石组成比较均匀, 相对富铁和钙, 而贫镁、钠和基本不含 Cr₂O₃. 因此 Mg# 很低, 在 80 左右(表 1). 同时, 单斜辉石含较高的钛, 故为含钛的普通辉石(Wo < 45%). 单斜辉石不含熔体包裹体的边缘部分具有明显的成分环带, 从中心到边缘单斜辉石的 FeO 和 TiO₂ 含量增加, 而 MgO 和 CaO 含量降低. 最边缘与寄主玄武岩接触处 TiO₂ 含量很高, 但 Mg# 值很低, 仅 75. 并含有少量的 Cr₂O₃(表 1).

表 1 单斜辉石及其包裹矿物和玻璃的代表性电子探针分析结果^{a)}

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	NiO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Mg#	Wo	En	Fs	An	Ab	Or
04LQQ-01, 单斜辉石晶体 1																			
Cpx-r1	45.07	3.57	8.67	0.24	6.98			11.93	22.70	0.43			99.60	75.3	50.7	37.1	12.2		
Cpx-r2	47.94	2.34	5.59		6.68			13.45	23.01	0.43			99.44	78.2	49.0	39.9	11.1		
Cpx-c	48.75	2.25	6.37		6.29			13.60	21.61	0.58			99.45	79.4	47.6	41.6	10.8		
Cpx-c	48.88	2.05	6.72		5.73			13.59	21.70	0.73			99.40	80.9	48.1	41.9	9.9		
Cpx-c	48.71	1.91	6.97		6.29			13.76	21.22	0.69			99.55	79.6	46.9	42.3	10.8		
Glass-1	54.98	1.02	22.58		3.86			0.35	1.51	5.82	6.86	0.89	97.87	14.0					
Glass-2	56.17	1.01	22.38		4.17			0.34	1.28	5.48	6.63	0.62	98.09	12.8					
Glass-3	54.13	1.03	21.91		4.85			0.34	1.58	7.01	6.60	0.77	98.23	11.2					
Ol-1t	38.06				22.99	0.40	0.09	38.10	0.50				100.14	74.7					
Ol-2t	38.02				23.10	0.40	0.06	38.02	0.47				100.07	74.6					
Ol-3s	39.12				20.63	0.35	0.05	38.53	0.60				99.28	76.9					
Pl-1	52.82		29.85		0.54				12.95	4.17	0.43		100.76				61.7	35.9	2.4
Pl-2	51.89		30.49		0.51				12.31	4.20	0.40		99.80				60.4	37.3	2.3
Pl-3	51.22		30.27		0.63				12.25	4.14	0.49		99.00				60.3	36.9	2.9
Kf-1	60.33		25.17		0.37			0.28	10.57	0.21	2.71		99.64				74.6	2.7	22.8
Kf-2	60.83		24.53		0.15			0.53	9.67	0.68	2.92		99.31				67.3	8.6	24.2
Kf-3	60.83		24.83		0.14			0.36	10.47	0.34	2.64		99.61				73.6	4.3	22.1
04LQQ-01, 单斜辉石晶体 2																			
Cpx-r1	47.16	2.97	6.37	0.21	7.28			12.78	22.71	0.43			99.91	75.8	49.2	38.5	12.3		
Cpx-r2	47.71	2.60	6.60		6.57			13.20	22.90	0.36			99.95	78.2	49.4	39.6	11.1		
Cpx-c	48.94	2.16	5.64		6.25			13.94	22.58	0.34			99.85	79.9	48.2	41.4	10.4		
Cpx-c	49.18	1.98	6.24		6.07			13.59	21.98	0.53			99.57	80.0	48.2	41.4	10.4		
Cpx-c	48.95	1.84	6.90		5.24			14.75	21.30	0.60			99.58	83.4	46.4	44.7	8.9		
Glass-1	56.25	0.97	21.80		4.64			0.47	2.21	4.39	6.50	1.16	98.39	15.4					
Glass-2	55.54	0.94	22.75		4.71			0.59	1.28	4.65	6.26	1.49	98.21	18.3					
Glass-3	54.06	0.83	21.82		5.00			0.69	2.72	5.51	6.35	0.98	97.96	19.7					
Ol-1	39.33				20.56	0.36	0.07	38.45	0.51				99.28	76.9					
Ol-2	38.67				20.96	0.35	0.10	38.40	0.52				99.00	76.6					
Ol-3	38.77				20.78	0.47	0.10	38.39	0.56				99.07	76.7					
Pl-1	54.97		29.00		0.48				10.93	4.27	0.69		100.34				56.1	39.7	4.2
Pl-2	52.06		30.30		0.45				12.27	3.29	0.63		99.00				64.7	31.4	4.0
Kf-1	60.06		25.00		0.21			0.22	11.02	0.31	2.58		99.40				75.2	3.8	21.0
Kf-2	60.62		24.94		0.20			0.32	10.68	0.43	2.27		99.46				75.4	5.5	19.1

a) 表中氧化物空白处代表未测或数值低于检测线。Cpx: 单斜辉石; Glass: 玻璃; Ol: 橄榄石; Pl: 斜长石; Kf: 钾长石; c: 含熔体包裹体的核心; r1: 边缘带边部; r2: 边缘带中心; t: 极小颗粒; s: 小颗粒

因此, 尽管单斜辉石含熔体包裹体的中心和不含熔体包裹体的边缘部分皆为普通辉石, 但组成存在显著差异。

熔体包裹体: 玻璃质熔体包裹体富硅(>54%, 质量分数, 下同)、富碱 (>10%)和富铁(>4%), 而极贫镁(表 1), Mg#值小于 20。该熔体包裹体还含有较高的TiO₂和 P₂O₅。这些熔体包裹体的组成完全不同于华北中生代、新生代玄武岩的组成(贫硅、富铁^[17])。同时, 熔体包裹体在不同的单斜辉石颗粒中其组成也存在微小差别(表 1)。熔体包裹体还含有相对较高的挥发份。

橄榄石: 与熔体包裹体共存的橄榄石富铁贫镁,

镁橄榄石分子仅 74~77 (表 1)。同时橄榄石几乎不含 NiO, 但含有很高的 CaO (0.47%~0.60%, 质量分数, 下同) 和 MnO (0.35%~0.47%)(表 1)。而且, 不同样品和不同颗粒间橄榄石组成变化很小。

长石类: 与熔体包裹体共存的斜长石富钙和钠, 为拉长石(An = 56~65)(表 1)。钾长石组成很特别, 富钙和钾, An 分子很高(67~75), Or 分子较高(19~24)(表 1)。因此, 这种“钾长石”不是典型的 Ab-Or 固溶体, 而是 An-Or 固溶体。应该指出的是因长石结晶没有橄榄石那么好(图 1), 故同一样品不同测试点的组成有时差别较大。但总体上不同样品间组成还是比较一致的。

表 2 单斜辉石、玻璃及长石的代表性微量元素组成(04LQQ-01)^{a)}

μg/g	Cpx-r1	Cpx-r2	Cpx-c1	Cpx-c2	Cpx-c3	Gl-1	Gl-2	Gl-3	Pl-1	Pl-2	Kf-1
La	11.4	7.39	5.63	5.46	5.36	59.2	43.2	40.4	5.39	3.47	0.16
Ce	39.8	22.1	18.2	17.0	15.7	117	76.9	75.3	12.2	6.12	0.282
Pr	6.90	4.10	3.27	2.79	2.83	11.4	7.82	8.20	1.74	0.77	0.036
Nd	45.8	24.7	19.3	19.1	16.2	43.1	25.4	25.9	9.0	3.67	0.20
Sm	13.6	8.88	6.84	6.93	6.21	7.01	4.91	5.37	3.48	1.01	0.48
Eu	3.45	2.81	2.15	2.13	2.01	9.84	4.89	3.35	3.05	2.17	0.55
Gd	14.5	8.34	6.47	6.29	5.82	6.77	4.93	4.14	3.54	1.51	0.114
Dy	8.85	5.70	3.76	4.88	4.25	6.36	4.00	3.47	2.19	0.79	0.102
Er	3.57	2.28	1.65	1.72	1.58	3.78	1.79	1.43	0.80	0.36	0.050
Yb	2.18	1.43	1.04	1.10	0.96	2.72	1.26	1.24	0.50	0.25	0.039
Lu	0.27	0.12	0.11	0.11	0.10	0.36	0.14	0.12	0.056	0.03	0.004
Y	44	29	22	22	20	38	21	21	9.5	3.0	6.7
Sr	157	129	109	105	148	590	397	381	1039	1335	9546
Ba	1.5	25	9.2	1.6	45	1383	701	394	326	285	107
Zr	282	163	99.2	74.8	74.9	294	157	158	39.0	13.6	73.5
Hf	9.1	6.1	4.0	4.0	3.0	5.4	3.0	3.3	1.7	0.22	1.1
Nb	6.2	5.3	2.9	1.8	2.9	156	82	77	2.2	2.0	32
ΣREE	150	88	68	68	61	268	175	169	42	20	2
(Ce/Yb) _{cn}	4.9	4.2	4.7	4.2	4.4	11.6	16.4	16.4	6.6	6.6	1.9
Eu/Eu*	0.74	0.98	0.97	0.96	1.00	4.28	2.99	2.08	2.61	5.33	5.11
Zr/Zr*	0.74	0.72	0.56	0.43	0.49	1.04	0.89	0.86	0.45	0.46	10.0
Nb/Nb*	1.02	1.02	0.84	0.61	0.56	1.50	1.38	1.84	0.11	0.12	5.61

a) Cpx: 单斜辉石; Gl: 玻璃; Pl: 斜长石; Kf: 钾长石. r1: 边缘带边部; r2: 边缘带中心. ΣREE和(Ce/Yb)_{cn}代表稀土元素总量和球粒陨石标准化的Ce/Yb比值. Eu* = (Sm_{cn} + Gd_{cn})/2; Zr* = (Nd_{cn} + Sm_{cn})/2; Nb* = (Ba_{cn} + La_{cn})/2, 其中Zr/Zr*和Nb/Nb*中的Zr和Nb为球粒陨石标准化的值

4.2 微量元素地球化学

单斜辉石: 单斜辉石的中心部分微量元素分布均匀(表 2). 其稀土元素含量低(ΣREE= 61~68 μg/g), 并具有上凸型的 REE 配分型式(图 2), 最高点在 Sm. 无 Eu 异常, 但具有较明显的 HFSE 亏损(Zr/Zr*和 Nb/Nb* < 1, 表 2). 单斜辉石的边缘部分的稀土元素含量明显高(ΣREE= 88~150 μg/g), 亦具有上凸型的 REE 配分型式(图 2). 其相对较高的 HFSE 含量(无 Nb 亏损、Zr 弱亏损)和 Y 区别于中心部分的单斜辉石. 环带的最边部的单斜辉石具有显著的 Eu 负异常.

熔体包裹体: 熔体包裹体的不同点的微量元素组成变化较大(表 2). 其稀土元素含量高(ΣREE= 169~268 μg/g)、具有典型的轻稀土元素富集的REE配分型式((Ce/Yb)_{cn}=11.6~16.4)和显著的Eu正异常(图 2). 熔融包裹体的LILE含量很高(Sr=381~590 μg/g; Ba = 394~1383 μg/g), HFSE含量也高(表 2), 并不具有Nb的亏损(Nb/Nb* >>1).

长石类: 斜长石的稀土元素相对含量较低(ΣREE= 20~42 μg/g), 在稀土元素配分图上为轻稀土富集型, 并具有特征的 Eu 正异常(图 2). 斜长石富

Sr(1039~1335 μg/g)和 Ba(285~326 μg/g)等大离子亲石元素, 但 Zr、Hf 和 Nb 等高场强元素则较低, Zr/Zr*和 Nb/Nb*皆小于 1(表 2), 说明斜长石亏损高场强元素. 另外, 斜长石不同颗粒间微量元素组成差别很大. 钾长石含稀土元素量极低(表 2), 其稀土元素总量仅 2 μg/g, 其稀土元素配分型式仍为轻稀土富集型, 并具有很明显的 Eu 正异常(图 2), 在这点上类似于斜长石. 钾长石含极高的 Sr 和较高的 Ba 和 Y. 同时含有很高的 Zr 和 Nb, 不同于斜长石.

5 讨论

5.1 单斜辉石的来源

单斜辉石的明显环带结构、单斜辉石中心和边缘部分主、微量元素组成的显著差异、以及熔体包裹体与寄主玄武岩主、微量元素组成的巨大差异皆说明这些含熔体包裹体的单斜辉石为捕虏晶, 而非完全从寄主岩浆中结晶出来的斑晶. 其中心含熔体包裹体的部分是寄主岩浆在上升过程中捕获的, 而边缘部分为从寄主玄武岩中结晶的. 单斜辉石捕虏晶为普通辉石, 且其极低的铬含量和低的镁值, 完全不同于华北古生代金伯利岩携带的地幔橄榄岩捕虏体和中

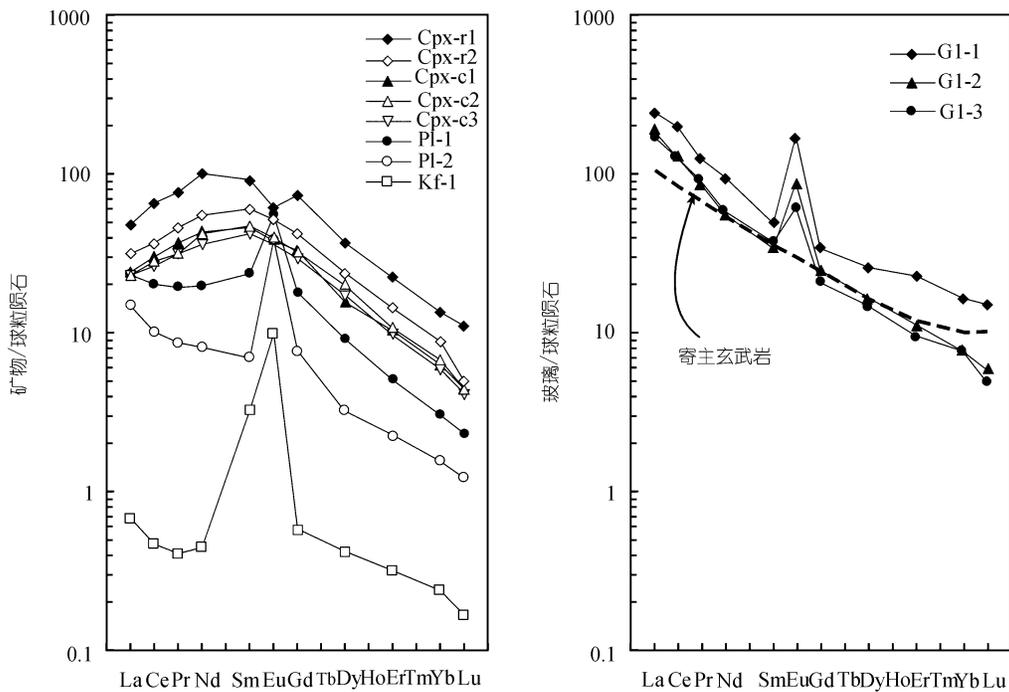


图2 单斜辉石、熔体包裹体和长石类矿物的球粒陨石标准化稀土元素配分图
 稀土元素标准化值来自文献[21]。寄主玄武岩为临胸胸山玄武岩的平均值(张宏福等, 未发表)

生代、新生代玄武岩携带的地幔橄榄岩捕虏体和新生代玄武岩携带的辉石岩捕虏体中的单斜辉石(图3)^[15, 22-25], 后者为透辉石, 且含较高的铬($Cr_2O_3 > 0.4\%$)和镁值($Mg\# = 85\sim 93$)。因此, 这些单斜辉石捕虏晶并非来自于地幔橄榄岩和辉石岩, 即不是来源于类似华北古生代金伯利岩和新生代玄武岩携带的常见地幔橄榄岩捕虏体的地幔岩解体矿物。捕虏晶相对较高的 $Mg\#$ (≈ 80)和无Eu负异常亦不同于古老(太古代)下地壳麻粒岩中的单斜辉石(图3), 后者通常具有很低的 $Mg\#$ (< 75)和Eu负异常^[26-28]。故这些捕虏晶也不会来自古老的下地壳。尽管由岩浆底侵作用形成的麻粒岩中的单斜辉石的最高 $Mg\#$ 与这些捕虏晶的 $Mg\#$ 相当, 但绝大多数由岩浆底侵作用形成的麻粒岩中的单斜辉石具有较低的 $Mg\#$ 和较高的 Na_2O 含量(图3)^[27, 29]。故这些含熔体包裹体的单斜辉石捕虏晶也不太可能来自于年轻的底侵下地壳。因此, 具有这种组成特征的单斜辉石捕虏晶很可能来源于由底侵作用形成的含少量斜长石的主要由普通辉石组成的辉石岩, 即来源于壳-幔过渡带。值得注意的是这些单斜

辉石捕虏晶的组成完全落入中生代方城玄武岩携带的单斜辉石捕虏晶的组成范围内(图3), 而后者亦认为主要来自于中生代岩石圈地幔和/壳-幔过渡带的辉石岩¹⁾。

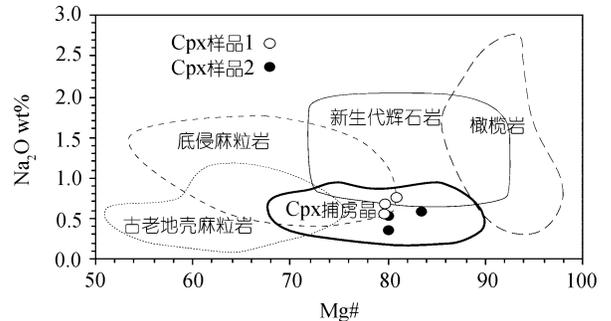


图3 地幔和下地壳岩石中单斜辉石的 $Mg\#$ vs. Na_2O 图解
 橄榄岩、新生代辉石岩、老地壳麻粒岩、底侵麻粒岩分别代表华北古生代金伯利岩和新生代、新生代玄武岩携带的地幔橄榄岩捕虏体、新生代玄武岩携带的辉石岩捕虏体、麻粒岩地体和新生代玄武岩携带的古老麻粒岩捕虏体以及新生代玄武岩携带的由底侵作用形成的麻粒岩中单斜辉石的组成(转引自Zhang等¹⁾); 单斜辉石捕虏晶为华北中生代方城玄武岩中单斜辉石捕虏晶的组成¹⁾

1) Zhang H F, Ying J F, Shimoda G, et al. Importance of melt circulation and crust-mantle interaction in the lithospheric evolution beneath the North China Craton: evidence from Mesozoic basalt-borne clinopyroxene xenocrysts and pyroxenite xenoliths. Lithos, 2006 (待刊)

5.2 熔体包裹体的来源

地幔橄榄岩中熔体包裹体的研究表明尽管其来源很复杂,但主要可分为两类(文献[30]及其所附文献):一类熔体包裹体或玻璃为橄榄岩捕虏体上升过程中捕获的外来熔体或捕虏体自身减压熔融的产物,如角闪石的减压熔融、橄榄岩捕虏体在地壳深度岩浆房中的部分熔融或与岩浆的反应、寄主岩浆的渗滤等;第二类熔体包裹体或熔体囊形成于地幔深度,因此,可以反演地幔过程.该类包裹体包括橄榄岩捕虏体与渗滤的玄武质熔体的反应、各种交代地幔橄榄岩的部分熔融、不混熔的岩浆分离体、俯冲板片熔融形成的熔体迁移进入上覆的亏损地幔楔以及成因不清的交代熔体向地幔橄榄岩的渗滤.

研究区单斜辉石中的熔体包裹体来源的可能性有:自身的减压熔融、上升时捕获的寄主熔体、和被寄主玄武岩携带前捕获的外来熔体.熔体包裹体的极低的Mg#、高的全碱含量和具有显著的Eu正异常(表 1, 图 2)等地球化学特征都是单斜辉石在上升过程中自身减压熔融所不可能形成的.因此,这些熔体包裹体不是单斜辉石减压熔融的产物.熔体包裹体的上述地球化学特征亦与寄主玄武岩的地球化学特征如高的Mg#、低的SiO₂含量和无Eu异常等存在很大区别,故这些熔体包裹体也不是单斜辉石在上升过程中从寄主岩浆中捕获的.因此,这些熔体包裹体只可能是单斜辉石捕虏晶被寄主玄武岩捕获之前形成的.此外,和熔体包裹体共生的橄榄石的组成为 $Fo = 74\sim 77$ (表 1),根据橄榄石-熔体分配系数 $K_D = (X_{Fe}^{O1}/X_{Fe}^L)/(X_{Mg}^{O1}/X_{Mg}^L) = 0.3 \pm 0.03$ [31],计算出的与这些橄榄石共生的熔体的Mg#应该在 46~50 之间.这远远高于熔体包裹体的Mg#值,而低于寄主玄武岩的Mg#值(表 1).因此,这些橄榄石不是单斜辉石上升过程中捕获的,是从被单斜辉石包裹的熔体中结晶的.这亦说明熔体包裹体非单斜辉石在上升过程中捕获的寄主岩浆.

地幔橄榄岩或受交代的地幔橄榄岩和辉石岩的部分熔融形成的岩浆如华北中生代、新生代玄武岩一般具有较低的SiO₂和全碱含量、高的Mg#,特别是不具有Eu的正异常.因此,这些熔体包裹体并非来自地幔橄榄岩和辉石岩的部分熔融.古老的基性下地壳的熔融亦很难形成如此低Mg#、高碱的岩浆.故这些熔体包裹体来自于富斜长石的长英质下地壳的高比

例或二次熔融.华北下地壳结构和岩石学研究表明[26~29,30]下地壳下部主要为基性麻粒岩和底侵作用形成的年轻麻粒岩和辉石岩组成,而下地壳上部为长英质麻粒岩.因岩浆形成后通常是向上运移的,而不会进入位于壳-幔过渡带的底侵辉石岩中.因此,这些熔体包裹体可能不是华北下地壳长英质麻粒岩熔融的产物,而可能是俯冲进入地幔的扬子下地壳长英质部分的熔融.尽管这些解释还是初步的,但加强这些熔体包裹体,特别是中生代玄武岩携带的捕虏体或捕虏晶中的熔体包裹体的研究对进一步反演华北东南部岩石圈的演化过程无疑将具有重要意义.

6 结论

山东临朐新生代玄武岩携带的具环带结构的单斜辉石是捕虏晶,为底侵辉石岩的解体矿物.这些单斜辉石捕虏晶中含有众多的玻璃质熔体包裹体,熔体包裹体与低镁橄榄石、拉长石和富钙钾长石共生.熔体包裹体富碱,高硅、钙、铁,贫镁,富集轻稀土元素并具有明显的Eu正异常.该熔体包裹体的发现对进一步探讨华北东南部中生代岩石圈地幔的演化过程具有重要价值.

致谢 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室所属的电子特征实验室的毛騫和马玉光在矿物主元素分析测试中给予了热心帮助,徐义刚研究员和其他评审人对本文初稿提出的建设性修改意见,在此一并致谢.本研究受国家自然科学基金大陆动力学重点项目(批准号:40534022)和国家杰出青年科学基金项目(批准号:40225009)联合资助.

参 考 文 献

- 1 Yaxley G M, Kamenetsky V, Green D H, et al. Glasses in mantle xenoliths from western Victoria, Australia, and their relevance to mantle processes. *Earth Planet Sci Lett*, 1999, 172: 97—109 [DOI]
- 2 Wulff-Pedersen E, Neumann E R, Vannucci R, et al. Silicic melts produced by reaction between peridotite and infiltration basaltic melts: ion probe data on glasses and minerals in veined xenoliths from La Palma, Canary Islands. *Contrib Mineral Petrol*, 1999, 137: 59—82 [DOI]
- 3 Shaw C S J, Klügel A. The pressure and temperature conditions and timing of glass formation in mantle-derived xenoliths from Baarley, West Eifel, Germany: the case for amphibole breakdown, lava infiltration and mineral-melt reaction. *Mineral Petrol*, 2002, 74: 163—187 [DOI]
- 4 Xu Y G, Mercier J C, Menzies M A, et al. K-rich glass-bearing wehrlite xenoliths from Yitong, Northeastern China: petrological and chemical evidence for mantle metasomatism. *Contrib Mineral*

- Petrol, 1996, 125: 406—420 [\[DOI\]](#)
- 5 Falloon T J, Green D H. Glass inclusions in magnesian olivine phenocrysts from Tonga: evidence for highly refractory parental magmas in the Tonga arc. *Earth Planet Sci Lett*, 1986, 81: 95—103 [\[DOI\]](#)
 - 6 Ohnenstetter D, Brown W L. Compositional variation and primary water contents of differentiated interstitial and included glasses in boninites. *Contrib Mineral Petrol*, 1996, 123: 117—137 [\[DOI\]](#)
 - 7 Saal A E, Hart S R, Shimizu N, et al. Pb isotope variability in melt inclusions from oceanic island basalts, Polynesia. *Science*, 1998, 282: 1481—1484 [\[DOI\]](#)
 - 8 Rose E F, Shimizu N, Layne G D, et al. Melt production beneath Mt. Shasta from boron data in primitive melt inclusions. *Science*, 2001, 293: 281—283 [\[DOI\]](#)
 - 9 夏林圻. 硅酸盐熔体包裹体均匀化过程的动力学性质. *地质科学*, 1984, 3: 323—329
 - 10 夏林圻. 岩浆岩中的熔体包裹体. *地学前缘*, 2002, 9 (2): 403—414
 - 11 Eiler J M, McInnes B, Valley J W, et al. Oxygen isotope evidence for slab-derived fluids in the sub-arc mantle. *Nature*, 1998, 393: 777—781 [\[DOI\]](#)
 - 12 鄂莫岚, 赵大升. 中国东部新生代玄武岩及深源岩石包体. 北京: 科学出版社, 1987
 - 13 池际尚. 中国东部新生代玄武岩及上地幔研究(附金伯利岩). 北京: 中国地质大学出版社, 1988
 - 14 刘若新. 中国新生代玄武岩的年龄和地球化学. 北京: 地震出版社, 2002
 - 15 闫峻, 陈江峰, 谢智, 等. 鲁东晚白垩世玄武岩中的幔源捕虏体: 对中国东部岩石圈减薄时间制约的新证据. *科学通报*, 2003, 48(14): 1570—1574
 - 16 Zhang H F, Sun M, Zhou X H, et al. Secular evolution of the lithosphere beneath the eastern North China Craton: evidence from Mesozoic basalts and high-Mg andesites. *Geochim Cosmochim Acta*, 2003, 67(22): 4373—4387 [\[DOI\]](#)
 - 17 Zhang H F, Sun M, Zhou X H, et al. Mesozoic lithosphere destruction beneath the North China Craton: evidence from major, trace element, and Sr-Nd-Pb isotope studies of Fangcheng basalts. *Contrib Mineral Petrol*, 2002, 144: 241—253
 - 18 王萍, 李国昌. 山东昌乐新生代玄武质岩石中的刚玉及共存矿物. *中国非金属矿工业导刊*, 1996, 4: 23—28
 - 19 王胜源, 刘明渭, 梁邦启, 等. 山东省昌乐县新生代火山口新发现及旅游地质意义. *山东国土资源*, 2003, 8: 48—50
 - 20 Nakamura E, Kushiro I. Trace element diffusion in jadeite and diopside melts at high pressures and its geochemical implication. *Geochim Cosmochim Acta*, 1998, 62: 3151—3160 [\[DOI\]](#)
 - 21 Anders E, Grevesse N. Abundances of the elements: meteoritic and solar. *Geochim Cosmochim Acta*, 1989, 53: 197—214 [\[DOI\]](#)
 - 22 许文良, 郑常青, 王冬艳. 辽西中生代粗面玄武岩中地幔和下地壳捕虏体的发现及其地质意义. *地质论评*, 1999, 45(增刊): 444—449
 - 23 Fan W M, Zhang H F, Baker J, et al. On and off the North China Craton: where is the Archaean keel? *J Petrol*, 2000, 41: 933—950 [\[DOI\]](#)
 - 24 Zheng J P, O'Reilly S Y, Griffin W L, et al. Relict refractory mantle beneath the eastern North China block: significance for lithosphere evolution. *Lithos*, 2001, 57: 43—66 [\[DOI\]](#)
 - 25 Rudnick R L, Gao S, Ling W L, et al. Petrology and geochemistry of spinel peridotite xenoliths from Hannuoba and Qixia, North China Craton. *Lithos*, 2004, 77: 609—637 [\[DOI\]](#)
 - 26 张国辉, 周新华, 陈绍海, 等. 下地壳和壳幔过渡带的高度化学不均匀性: 河北汉诺坝玄武岩中捕虏体的地球化学证据. *地球化学*, 1998, 27(2): 153—163
 - 27 Liu Y S, Gao S, Jin S Y, et al. Geochemistry and petrogenesis of lower crustal xenoliths from Hannuoba, North China: implications for the continental lower crustal composition and evolution at convergent margin. *Geochim Cosmochim Acta*, 2001, 65(15): 2589—2604 [\[DOI\]](#)
 - 28 Huang X L, Xu Y G, Liu D Y. Geochronology, petrology and geochemistry of the granulite xenoliths from Nushan, east China: Implication for a heterogeneous lower crust beneath the Sino-Korean Craton. *Geochim Cosmochim Acta*, 2004, 68: 127—149 [\[DOI\]](#)
 - 29 樊祺诚, 刘若新. 汉诺坝玄武岩中高温麻粒岩捕虏体. *科学通报*, 1996, 41(3): 235—238
 - 30 Shaw C S J. Dissolution of orthopyroxene in basaltic magma between 0.4 and 2 GPa: further implications for the origin of Si-rich alkaline glass inclusions in mantle xenoliths. *Contrib Mineral Petrol*, 1999, 135: 114—132 [\[DOI\]](#)
 - 31 Ford C E, Russell D G, Craven J A, et al. Olivine-liquid equilibria: temperature, pressure and composition dependence of the crystal/liquid cation partition coefficients for Mg, Fe²⁺, Ca and Mn. *J Petrol*, 1983, 24: 256—265

(2006-04-18 收稿, 2006-06-12 接受)