科 学 通 报
第 42 卷 第 18 期 Chinese Science Bulletin 1997 年 9 月

【研究简报】

橄榄岩包体结构和化学组成之间的关系及其意义
——以吉林汪清为例

徐义刚
(中国科学院广州地球化学研究所,广州 510640)

关键词 橄榄岩包体 结构 地球化学 吉林汪清

橄榄岩包体的结构反映了上地幔的变形历史,其地球化学组成则记录了地幔所经历的亏

(1957～1958, 1963, 1965, 1969, 1972, 1976, 1982～1983, 1986～1987)都出现在海冰面积变化速度的极大值或负极大值处,而南方涛动指数均出现低值. 除 1957～1958, 1965, 1969 年 3 次 ENSO 外,其余 5 次 ENSO 事件前第 3 年,海冰面积变化速度都出现在负的极大值附近. 对照图 3 和 4,大气滞后 3 年则北太平洋高度场是负距平,北美大陆西部是正距平,美国东南部是负距平——典型的 PNA 结构.

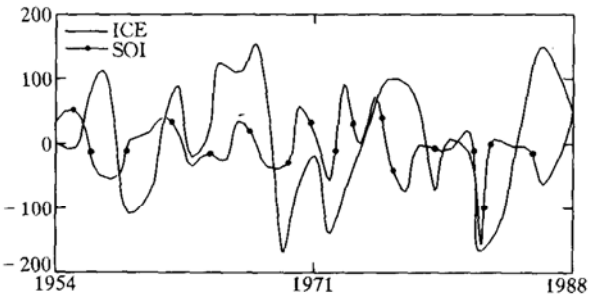


图 5 冬季格陵兰、喀拉海和巴伦支海海冰面积变化速度(经过 3 年滑动平滑)和南方涛动指数(10～12 月平均)变化曲线

3 结论

根据上述分析事实,本文得出以下结论:

(1) 冬季格陵兰、喀拉海和巴伦支海海冰年际变化可以导致北半球大气环流的异常响应,尤是当海冰面积变化超前大气变化 3 年时,可以诱发大气高度场产生 PNA 型环流异常.

(2) ENSO 事件都出现在格陵兰、喀拉海和巴伦支海海冰面积变化速度为极值点处.

(3) 发生 ENSO 事件前第 3 年,格陵兰、喀拉海和巴伦支海海冰面积变化速度有 62.5% 接近负极大值.

参 考 文 献

1 李崇银. 频繁的强东亚大槽活动与 El Niño 发生. 中国科学,B 辑,1988,18(6): 667～674
2 Mysak L A, Manak D K, Marsden R S. Sea-ice anomalies observed in the Greenland and Labrador Seas during 1901～1984 and their relation to an interdecadal Arctic climate cycle. Climate Dynamics, 1990, 5: 111～133
3 杨修群,谢 倩,黄士松. 北极冰异常对亚洲夏季风影响的数值模拟. 海洋学报,1994,16(5): 34～40
4 Gloersen Per. Mudulation of hemispheric sea-ice cover by ENSO events. Nature, 1995, 373: 503～506
5 王绍武. 气候诊断研究进展. 北京:气象出版社,1993. 124～152

(1996-08-02 收稿,1996-12-23 收修改稿)

损和富集过程以及亚固相再平衡过程,而已有的工作通常只强调其中的某一方面. 事实上,上地幔的各种地质作用是橄榄岩结构和化学组成之间形成特殊关系的控制因素[1]. 因此,综合考察橄榄岩结构和地球化学性质能更好地剖析和反演上地幔的演化历史. 为此,我们对产于吉林汪清新生代碱性玄武岩中的尖晶石橄榄岩包体进行了研究. 所研究的包体结构类型包括原生粗粒结构(颗粒直径>4 mm)、介于粗粒和残斑结构之间的过渡型结构以及等粒变晶结构(约1 mm). 工作中首先随机挑出20个样品进行了详细的电子探针分析,然后再对其中的10个样品进行了全岩主量元素成分、单斜辉石稀土元素(REE)含量和Sr-Nd同位素分析. 表1列出了所分析样品的主要岩石学、地球化学特征.

表1 汪清橄榄岩包体的岩石学和地球化学特征[a)]

样品	岩石类型	Cpx/%	CaO/%	MgO/%	$(La/Yb)_N$, Cpx	$^{87}Sr/^{86}Sr$	$^{143}Nd/^{144}Nd$
原生粗粒结构							
W-1	lherz	11.9	2.70	39.81	0.28	0.702 085±11	0.513 397± 5
W-37	lherz	14.7	3.68	37.95	0.67	0.702 634±14	0.513 141± 9
过渡型结构							
W-6	lherz	15.8	3.37	37.93	0.89	0.702 650±19	0.513 208± 9
W-11	lherz	8.6	2.15	41.34	0.51	0.703 578±12	0.513 301± 5
W-77	lherz	11.4	2.72	39.65	0.89	0.702 052±11	0.513 578± 5
等粒变晶结构							
W-5	harz	1.8	0.66	46.24	21.00	0.704 144± 9	0.512 871±13
W-13	harz	3.3	0.83	45.05	7.44	0.703 541±12	0.512 866± 5
W-20	lherz	5.9	1.39	44.43	2.39	0.704 891±12	0.512 835± 7
W-21	lherz	8.5	2.09	42.34	0.28	0.703 309±14	0.513 195± 8
W-22	harz	2.5	0.65	45.40	7.42	0.703 831±12	0.512 780± 5

Cpx——单斜辉石;lherz——二辉橄榄岩;harz——方辉橄榄岩. a) 全岩主量元素、单斜辉石中REE含量和Sr-Nd同位素组成在London大学同位素实验室分别采用XRF, IDMS和TIMS方法获得

1 橄榄岩结构和化学组成之间的关系

1.1 矿物化学和包体结构之间的关系

图1(a)展示了尖晶石的Cr/(Cr+Al)比值和斜方辉石中Al含量之间的关系. 前者是上地幔部分熔融程度的良好指标,而后者则同时与部分熔融程度和平衡温度有关. 图1(a)表明:(1)Al含量随Cr/(Cr+Al)sp的增高而逐渐降低,具等粒变晶结构的包体明显地比粗粒样品亏损玄武质组分;(2)斜方辉石中的Al含量从矿物颗粒中心到边缘逐渐降低,其变化幅度在粗粒样品中较大,在具等粒变晶结构的包体中不明显,反映了后者已趋于热再平衡,而前者尚处热再平衡过程中.

1.2 全岩主量元素含量和包体结构之间的关系

X-荧光光谱(XRF)分析表明包体具有较宽的主元素变化范围(MgO = 37.75% ~ 46.24%, CaO = 0.66% ~ 3.68%), MgO和CaO呈负相关关系(图1(b)),这与世界范围橄榄岩的化学成分变化相一致. 与矿物化学成分反映的事实一样,具等粒变晶结构的包体亏损程度较具原生粗粒和具过渡型结构的样品要高,前者多为与原始地幔相似的饱满型二辉橄榄岩,后者则为方辉橄榄岩和贫单斜辉石的二辉橄榄岩.

1.3 单斜辉石REE含量和包体结构之间的关系

在不含水的橄榄岩中,90%以上的REE赋存在单斜辉石中,因此,单斜辉石中的REE可

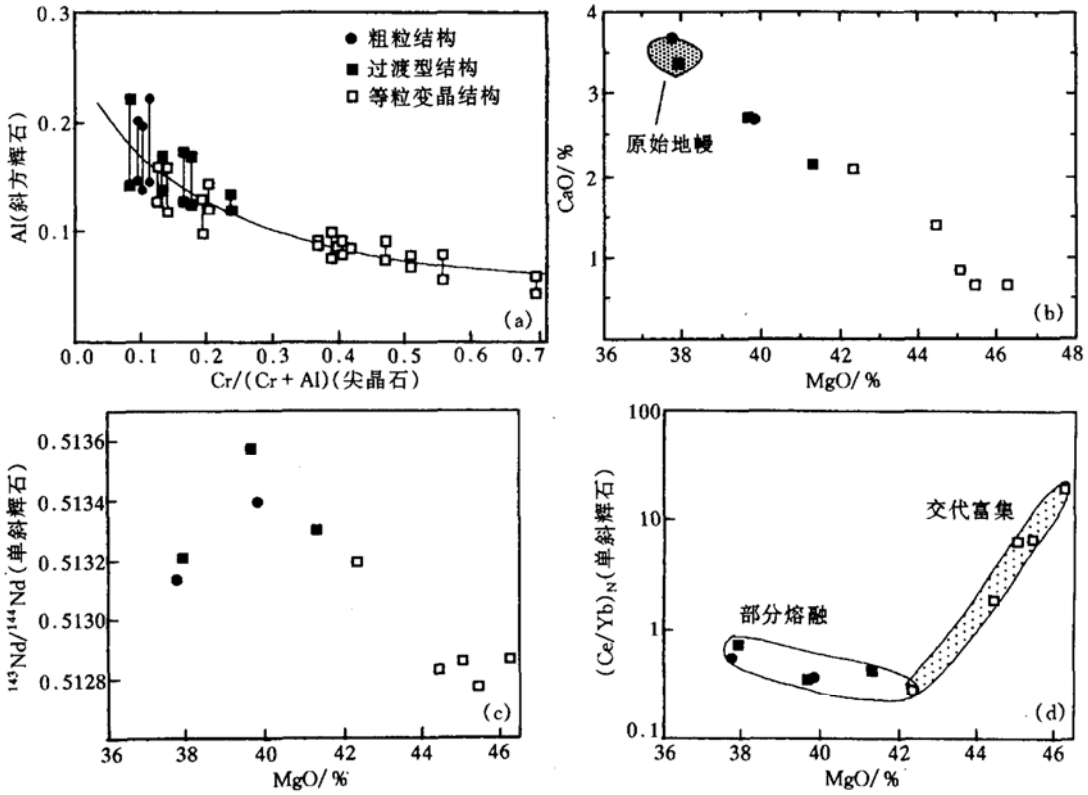


图 1　汪清橄榄岩包体结构和化学组成之间的关系

(a)尖晶石的 Cr/(Cr+Al)比值对斜方辉石中的 Al 含量图解,图中的竖直线代表了每一样品中斜方辉石 Al 含量的变化范围,最高和最低值分别指颗粒中心和边缘的成分;(b)全岩 MgO 含量对全岩 CaO 含量的关系;(c)全岩 MgO 含量对单斜辉石$^{143}Nd/^{144}Nd$的关系;(d)全岩 Mg 含量对单斜辉石的 Ce/Yb 比值的关系

以很好地代表全岩组成[2]. 汪清粗粒橄榄岩中的单斜辉石具有 LREE 亏损的 REE 配分模式($(La/Yb)_N=0.28\sim0.67$),而勺型稀土配分模式(La 至 Sm 呈 U 型,$(La/Yb)_N=1.06\sim1.30$)主要见于所有具过渡型结构和部分具等粒变晶结构的样品中(表 1). LREE 富集型($(La/Yb)_N=2.5\sim21$)配分模式只见于具等粒变晶结构的方辉橄榄岩和贫单斜辉石的二辉橄榄岩中. 这些样品中的 Yb 含量低于亏损 LREE 的橄榄岩包体,表明它们是富 LREE 交代流体与原先亏损 REE 的样品相互作用的产物.

1.4　单斜辉石的 Sr-Nd 同位素组成与包体结构之间的关系

包体结构和成分之间的关系同样反映在放射性同位素组成上(图 1(c), 表 1). 具原生粗粒和具过渡型结构的橄榄岩中的单斜辉石的$^{87}Sr/^{86}Sr$比值小于 0.702 6,$^{143}Nd/^{144}Nd$比值大于 0.513 0,而具等粒变晶结构样品的单斜辉石的$^{87}Sr/^{86}Sr$大于 0.703 3,$^{143}Nd/^{144}Nd$小于 0.513 0.

2　讨论和结论

2.1　岩石学成因

全岩主元素组成特征表明汪清橄榄岩包体的化学成分变化与上地幔不同程度的部分熔融

有关[3]. 然而,稀土元素地球化学揭示出更为复杂的成因历史. 虽然具粗粒和过渡型结构的样品中的 LREE 含量与 MgO 呈负相关关系,符合部分熔融残余模式所预计的趋势,但大多数具等粒变晶结构的方辉橄榄岩中的 LREE 却与 MgO 呈正相关关系(图 1(d)),显然这暗示原先经部分熔融的橄榄岩残余又遭到了后期来自软流圈的富 LREE 低程度初熔熔体/流体的交代[3]. 不过,$^{143}Nd/^{144}Nd$ 和 Sm/Nd 之间缺乏线性关系,暗示该富集过程的年代较新. Kelemen 等人[4]认为许多方辉橄榄岩是熔体和正常二辉橄榄岩反应的产物(溶解单斜辉石,结晶橄榄石和斜方辉石),这一成因模式可以解释为什么富集作用集中出现在较为亏损的方辉橄榄岩和贫单斜辉石的二辉橄榄岩中. 但是,汪清方辉橄榄岩并不具备反应成因方辉橄榄岩的地球化学特征(如低 $Mg^{\#}$,异常的斜方辉石含量,近水平的 REE 配分模式等[4]),特别是有一贫单斜辉石的二辉橄榄岩(WQ91-21)具 LREE 亏损型配分模式,因此我们认为 Frey 等人[3]的二阶段交代模式更适合解释汪清橄榄岩包体的成因,也就是说,后期富集作用虽然改变了微量元素的组成,但对主元素和矿物含量几乎没有影响. LREE 富集作用出现在亏损程度(即单斜辉石含量低,橄榄石含量高)大. 变形程度高的橄榄岩中的原因有:(1)流体在富橄榄石介质中的连结程度高于在贫橄榄石的橄榄岩中的连结程度[5];(2)矿物的定向排列有利于流体的迁移;(3)单斜辉石是不含水橄榄岩中最主要的 REE 赋存矿物,因此,少量的交代流体就可以使方辉橄榄岩中的少量单斜辉石达到与富集 LREE 流体的平衡,而要使饱满型二辉橄榄岩中的单斜辉石在成分上与富集 LREE 流体的平衡需要的流体量要多得多.

2.2 结构和化学组成之关系的动力学启示

Downes[1]总结欧洲(Massif Central, Dreiser Weiher)、北美 Kilbourne Hole 等地的橄榄岩包体数据时,发现未变形的粗粒结构包体亏损 LREE、ε_{Nd}大于 +7,而许多变形的包体(残斑结构和等粒变晶结构)则富集 LREE,ε_{Nd}通常小于 +7. 结合红海 Zabargad 构造橄榄岩岩体的野外产状,Downes 认为在岩石圈张裂、减薄过程中,岩石圈地幔形成了许多小型剪切带,交代流体优先在其中的流动导致了化学组成和变形程度之间的联系.

汪清橄榄岩包体显示了相似的结构和化学组成之间的关系,而且本研究还进一步指出变形程度较高的岩石既强烈富集 LREE,又强烈亏损玄武质组分(图 1(b)、(d)). 显然,Downes 的剪切带模型无法解释这一变化趋势,因为交代流体优先在变形程度较高的剪切带中的流动只能导致变形程度和 LREE 富集程度之间的联系. 可以想象,剪切带的形成应该是随机的,即既在亏损玄武质组分的岩石,又在成分相对原始的岩石中,这一认识得到了吉林伊通糜棱橄榄岩研究结论的支持[6],这些糜棱橄榄岩被认为是上地幔韧性剪切作用的产物,但既有饱满型,又有亏损型包体. 如上所述,交代作用对汪清橄榄岩的主元素和矿物含量没有产生显著的影响,所以按照 Downes 的剪切带模型,主元素成分和结构之间是不会形成任何协变关系的. 由于汪清地区火山岩富含辉石岩,因而 Menzies 等人[7]提出的辉石岩脉交代晕可能是比较重要的交代机制,但该模式遇到了与剪切带模型同样的困难,因为辉石岩脉切割橄榄岩的方式通常也是随机的. 因此,需要寻求另外的动力学模型来解释汪清包体所具有的结构和化学组成之间的关系.

事实上,橄榄岩变形通常与地幔底辟上升有关[8]. 徐义刚等人[9]根据岩石变形历史和详细的热历史演算,认为汪清地区上地幔经历了从>1 200℃到 800℃的底辟上升. 由图 1(a)可知,汪清橄榄岩在被寄主玄武岩捕获时尚处在动态热力学不平衡状态,这与伴随底辟上升和底辟之后的热扩散作用是不矛盾的. 具粗粒结构的样品可能位于底辟体的内部[8],与周围岩石

圈地幔的热交换较慢，因而矿物颗粒内部的化学成分变化程度较大(图1(a))，相反，变形程度较高的样品则位于底辟体的两翼，与周围岩石圈地幔的热交换相对较快，从而趋于达到再平衡状态．因此，底辟上升为解释上述结构和化学成分之间的关系提供了可行的动力学框架．

在上地幔底辟上升过程中，从底辟体中心到两翼会形成压力和温度梯度，从而导致部分熔融程度梯度的形成．底辟体外层大量熔体的萃取形成了这样一个结构，即未变形的、弱亏损的二辉橄榄岩被变形了的、强亏损的方辉橄榄岩所包裹．来自深部地幔的交代流体优先沿变形程度较高、富橄榄石的底辟体两翼流动，造成 LREE 在具等粒变晶结构样品中的富集．流体的存在又会以反馈的方式促进重结晶作用．至于那些具过渡型结构的样品在空间上位于粗粒和等粒变晶结构的中间，可以被看作是流体通道的围岩．流体和围岩的反应受色层分离柱交代模式所控制[10]，这就解释了这些样品中特征的勺型稀土配分．

致谢　实验过程中 London 大学 P. Vroon, G. Marriner 博士给予了热情帮助，在此表示感谢．本工作为中国科学院和国家教委留学回国人员基金联合资助项目．

参　考　文　献

1　Downes H. Shear zones in the upper mantle-relation between geochemical enrichment and deformation in mantle peridotites. Geology, 1990, 18(4): 374～377

2　Stosch H G. Rare earth element partitioning between minerals from anhydrous spinel peridotite xenoliths. Geochim Cosmochim Acta, 1982, 46(5): 793～811

3　Frey F A, Green D H. The mineralogy, geochemistry and origin of lherzolite inclusions in Victorian basanites. Geochim Cosmochim Acta, 1974, 38(7): 1 023～1 059

4　Kelemen P D, Dick H J B, Quick J E. Formation of harzburgite by pervasive melt/rock reaction in the upper mantle. Nature, 1992, 358(6338): 635～641

5　Toramaru A, Fujii N. Connectivity of melt phase in a partially melten peridotite. J Geophys Res, 1986, 91(B9): 9 239～9 252

6　Xu Y G, Ross J V, Mercier J C. The upper mantle beneath the continental rift of Tanlu, Eastern China: evidence for the intralithospheric shear zones. Tectonophysics, 1993, 225(1/2): 337～360

7　Menzies M A, Kempton P D, Dungan M. Interaction of continental lithosphere and asthenospheric melts below the Geronimo Volcanic Field, Arizona, USA. J Petrol, 1985, 26(3): 663～693

8　Nicolas A, Lucazeau F, Bayer R. Peridotite xenoliths in Massif Central basalts: textural and geophysical evidence for asthenospheric diapirism. In: Nixon P H ed. Mantle Xenoliths, New York: John Wiley & Sons Ltd, 1987. 563～574

9　徐义刚，林传勇，Menzies M A, 等．吉林汪清尖晶石橄榄岩包体的矿物化学成分指示意义：上地幔温度史和交代作用．地球化学，1996, 25(5): 481～493

10　Navon O, Stolper E. Geochemical consequence of melt percolation: the upper mantle as a chromatographic column. J Geol, 1987, 95(3): 285～307

(1996-12-16 收稿，1997-05-22 收修改稿)