9 杨主明. 江西龙南花岗岩稀土风化壳中粘土矿物的研究. 地质科学, 1987, 22: 70~ 80
10 吴澄宇, 黄典豪, 郭中勋. 江西龙南地区花岗岩风化壳中稀土元素的地球化学. 地质学报, 1989, 63: 349~ 362
11 包志伟. 华南花岗岩风化壳稀土元素地球化学研究. 地球化学, 1992, 21: 166~ 174
12 Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motion inferred from major element chemistry of lutites. Nature, 1982, 299: 715~ 717
13 Nesbitt H W. Mobility and fractionation of rare earth elements during weathering of a granodiorite. Nature, 1979, 279: 206~ 210
14 Banfield J F, Eggleton R A. Apatite replacement and rare earth mobilization, fractionation and fixation during weathering. Clays Clay Mineral, 1989, 37: 113~ 127
15 Nesbitt H W, Wilson R E. Recent chemical weathering of basalts. Amer J Sci, 1992, 292: 740~ 777
16 Nesbitt H W, Markovics G, Price R C. Chemical processes affecting alkalis and alkaline earths during continental weathering. Geochim Cosmochim Acta, 1980, 44: 1659~ 1666
17 Kawabe I, Kitahara Y, Naito K. Non-chondritic yttrium/holmium ratio and lanthanide tetrad effect observed in pre-Cenozoic limestones. Geochemical Journal, 1991, 25: 31~ 44

(1999-08-08 收稿, 1999-09-10 收修改稿)

石榴石的成分环带与地幔交代及变形作用

张宏福 ④ M. A. Menzies ④ 周新华 路凤香 (四)

(中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈构造演化开放研究实验室, 北京 100029; ④Department of Geology, Royal Holloway University of London, Egham, Surrey TW20 OEX, UK; (四)中国地质大学地球科学学院, 武汉 430074)

摘要 南非金伯利地区白垩纪金伯利岩携带的复合(Polymict)橄榄岩捕掳体(JJG1414)中含有部分具环带结构的石榴石. 通过对这些环带状石榴石的电子探针、离子探针和激光氟化法释氧分析, 揭示从中心到边缘石榴石存在系统的主、微量元素和氧同位素组成的变化, 通常边部比中心富集 Ca, Ti, Cr, LREE, Sr 和 Nb, 而亏损 Mg, Al 和 ^{18}O. 反映这些石榴石曾受到过熔/流体的改造, 即为流体参与下地幔变形作用非平衡的产物.

关键词 南非 金伯利岩 复合捕掳体 石榴石环带 地幔交代 变形作用

南非金伯利地区白垩纪(约 86 Ma)金伯利岩携带有大量的地幔橄榄岩捕掳体[1], 其中包括有世界上罕见的复合(Polymict)橄榄岩捕掳体[2] 1). 这些复合橄榄岩捕掳体具有非常复杂的矿物组成和组构特征, 某些矿物在正常的岩石圈地幔中是不可能平衡共存的, 因此这些岩石可能代表一套来自不同深度的上地幔岩石(二辉橄榄岩、方辉橄榄岩)和矿物(橄榄石、辉石、石榴石)由地幔剪切作用而混杂在一起的构造岩. 本文涉及的复合捕掳体 JJG1414 为具变斑状结构的石榴石橄榄岩, 岩石已遭受强烈变形, 局部已糜棱岩化, 文献[2]和脚注 1) 已有详细的岩性描述. 尽管未发现含水矿物如金云母等, 但大量的主、微量元素和氧同位素证据表明该岩石曾受到过地幔熔/流体的改造, 即存在流体参与下的地幔变形作用.

1) 1) Zhang H F. Petrology and geochemistry of orr and off-craton mantle rocks: eastern China and southern Africa. Ph D thesis, Royal Holloway University of London, 1998. 1~ 183

JJG1414 中部分粉红色石榴石具环带结构(图 1(a)),通常边缘部位比中心颜色深,为桔红-深红色. 这种深红色石榴石沿粉红色石榴石边缘生长的现象明显不同于南非 Weltevreden 金伯利岩携带的石榴石巨晶的环带结构[3], 后者通常与顽火辉石、金云母、钛铁矿等矿物呈环带状交替生长. 反映各自独特的形成环境. 同样该岩石中细小石榴石亦具有很好的环带结构(图 1(b)),一般可分为中心、内带、外带和边缘,边缘部位通常含少量水. 本文通过系统的主、微量元素和氧同位素分析测试试图再现这些环带状石榴石的形成过程,从而了解形成这些复合橄榄岩捕掳体时深部地质作用的过程及其代表的地质意义.

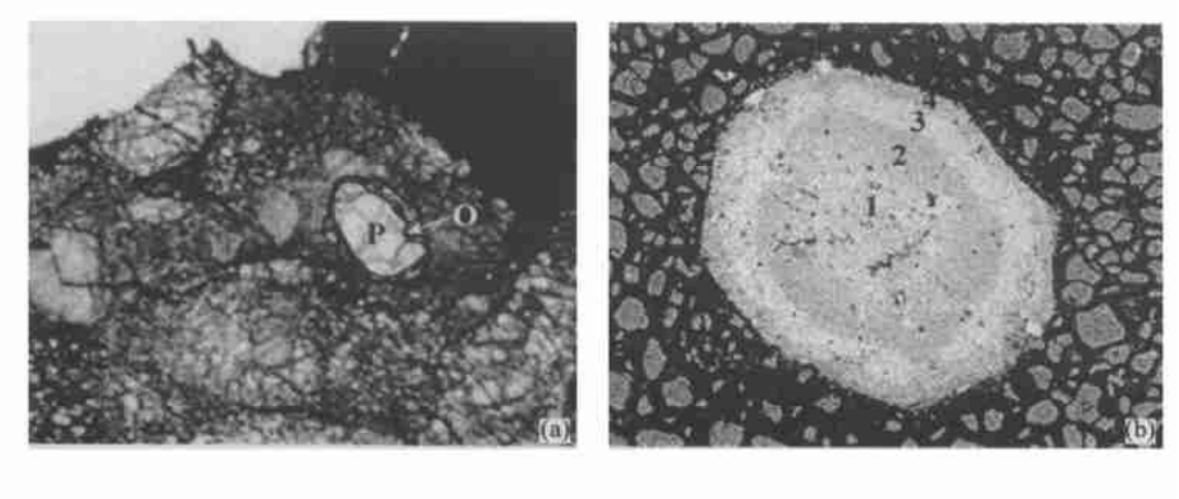

图 1 南非复合捕掳体

(a) 局部显微照片,石榴石具显著的颜色环带,中心为粉红色(P),边缘为桔红色(O),视域宽 4 cm;
(b) 细小环带状石榴石的背散射电子象,视域宽 1 mm. 1——中心,2——内带,3——外带,4——边缘

1 制样与分析技术

复合橄榄岩被切成标准的薄片大小,然后双面抛光至大约 500 μm 厚并详细拍照. 石榴石主、微量元素的含量分别在镀碳和镀金光薄片上用电子探针和离子探针在英国伦敦大学 Birkbeck 学院 JEOL Superprobe 和英国爱丁堡大学 Cameca ^{hu}ims-4f 仪器上直接测定. 随后抛掉镀膜,在双目镜下取出石榴石并将中心和边缘分离,置于超声池里用丙酮浸洗 20 min,称取 1.5 mg 左右以备氧同位素测试. 氧同位素组成用激光氟化法释氧技术(Laser Fluorination)在英国伦敦大学皇家 Holloway 学院 VG Optima 质谱仪上测定[1)].

2 分析结果

南非复合橄榄岩捕掳体中环带状石榴石的主、微量元素及氧同位素组成见表 1. 由表 1 可知从中心到边缘主、微量元素及氧同位素组成存在有规律的变化,通常边缘比中心部位富集 Ca, Ti, Cr, LREE, Sr 和 Nb, 而亏损 Mg, Al 和 ^{18}O, 而且化学成分环带完全与结构环带相吻合. 反映这些石榴石的结构环带是其内部化学成分差异的外在表现.

就常量元素而言,这些环带状石榴石多为 CaO 饱和的铬-镁铝榴石并出现两种完全不同的组成演化趋势. 其一从中心到边缘石榴石中 TiO_2, Al_2O_3 和 MgO 含量缓慢增加, Cr_2O_3, CaO 和 MnO 含量明显降低,而 FeO 含量保持稳定. 尽管这会导致边缘 $Mg^{\#}$ 的升高和 $Ca^{\#}$ 的降低,但总的变化范围很小(表 1 颗粒 3);其二从中心到边缘石榴石中 TiO_2, Cr_2O_3 和 CaO 含量增加很快, FeO 和 MnO 含量增加缓慢,而 Al_2O_3 和 MgO 含量降低, 总的变化范围较大,特别是 Cr 和 Ti

的变化尤为显著(表 1 颗粒 2 和 4). 这与南非 Jagersfontein 地区金伯利岩携带的地幔纯橄岩包体中石榴石环带的化学成分变化趋势相似[4],但后者为低钙石榴石(CaO= 0.9%). 有趣的是这两种相反的组成演化趋势在同一细小自形石榴石的环带中皆可见到(表 1 颗粒 1). 该石榴石具有较大的内核、相对较宽的内带和外带以及狭窄的含水和钠、钾的边缘(图 1(b)),这含水和钠、钾的石榴石似乎代表了石榴石向含水矿物如金云母和/或角闪石转变的中间状态. 很明

表 1　南非复合捕掳体中环带状石榴石的主、微量元素和氧同位素组成

常量元素含量/%

	颗粒 1				颗粒 2		颗粒 3		颗粒 4	
	1	2	3	4[a)]	粉红	桔红	中心	边缘	中心	边缘
SiO_2	42.26	42.61	42.17	41.73	43.36	42.57	42.88	42.92	42.58	42.06
TiO_2	0.80	1.04	0.90	1.41	0.44	1.34	0.45	0.74	0.16	1.40
Al_2O_3	21.33	21.28	20.02	16.15	22.79	19.58	19.53	19.86	20.81	18.56
Cr_2O_3	2.22	2.12	3.90	4.10	0.79	4.01	5.67	4.98	3.58	4.72
FeO	7.15	6.77	7.26	4.67	7.26	7.52	7.11	7.10	6.66	7.97
MnO	0.22	0.20	0.22	0.23	0.19	0.31	0.31	0.26	0.26	0.32
MgO	20.45	22.53	20.56	16.07	21.13	20.29	19.80	21.06	20.21	19.66
CaO	4.82	3.16	4.77	9.44	4.24	4.39	5.18	3.76	4.79	4.95
Na_2O			4.05							
K_2O			0.60							
	99.3	99.7	99.8	98.4	100.2	100.0	100.9	100.7	99.1	99.6
$Mg^{\#}$ [b)]	83.6	85.6	83.5	86.0	83.8	82.8	83.2	84.1	84.4	81.5
$Ca^{\#}$ [c)]	14.5	9.2	14.3	29.7	12.6	13.5	15.8	11.4	14.6	15.3

微量元素丰度/ $\times 10^{-6}$

	颗粒 1		颗粒 2		颗粒 5	
	中心	边缘[a)]	粉红	桔红	中心	边缘[c)]
La	0.036	0.904	0.017	0.031	0.101	2.600
Ce	0.493	1.810	0.175	0.321	0.868	5.450
Pr	0.182	0.218	0.056	0.127	0.313	0.658
Nd	2.23	1.52	0.63	1.60	3.55	2.90
Sm	1.88	1.16	0.43	1.34	2.66	0.68
Eu	0.99	0.64	0.20	0.61	1.11	0.35
Gd	4.07	3.26	0.90	2.77	4.64	1.85
Tb	0.96	0.79	0.19	0.65	1.00	0.39
Dy	7.15	5.71	1.76	4.78	6.77	3.53
Ho	1.50	1.44	0.49	1.05	1.45	0.66
Er	4.78	4.09	1.62	3.20	4.16	1.88
Tm	0.67	0.79	0.29	0.62	0.58	0.28
Yb	4.56	4.99	1.95	3.70	3.79	1.86
Lu	0.68	0.87	0.30	0.55	0.48	0.24
Y	39.92	36.75	13.63	31.76	39.19	20.08
Sr	0.64	82.60	0.27	0.47	0.66	65.3
Zr	208	138	23	148	461	103
Hf	4.23	4.33	0.66	3.11	10.50	2.44
Nb	0.45	0.56	0.13	0.35	1.17	2.00
ΣREE	30.18	28.19	9.01	21.35	31.47	23.33
La/Yb	0.008	0.181	0.009	0.008	0.027	1.398

氧同位素组成/‰

$\delta^{18}O$			5.38	5.00

a) 含水, b) $Mg^{\#} = 100Mg/(Mg+Fe)$ 原子比, c) $Ca^{\#} = 100Ca/(Ca+Mg)$ 原子比

显从中心经过内外带到边缘, 该石榴石的化学组成存在规律性的变化(图 2) , Al_2O_3 含量系统地降低, Cr_2O_3 和 CaO 含量先降后升(从内带到边缘) , 而 MgO 恰恰相反先升后降, TiO_2 含量总体上增加但幅度很小, 相反 FeO 总体上减少但从内带到外带有微弱增加. 结果, 该石榴石核心的化学组成与外带十分相似(Cr_2O_3 除外) .

稀土元素. 尽管不同颗粒石榴石的稀土元素总量和 La/ Yb 比值不同(表 1) , 但 3 颗石榴石的中心部位皆具有非常近似的球粒陨石标准化稀土元素配分型式(图 3) . 这种左倾式的轻稀土亏损的稀土元素配分型式亦是南非 Kaapvaal 克拉通金伯利岩携带的地幔二辉橄榄岩捕掳体中石榴石最常见的型式[6~8], 但完

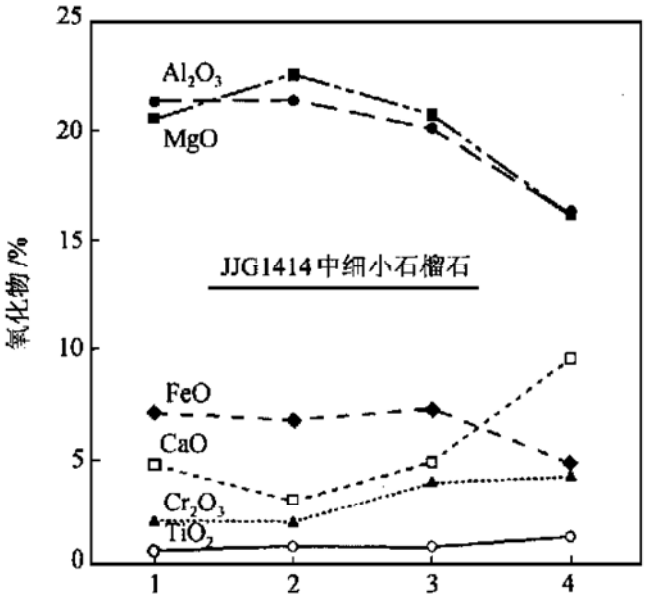

图 2　细小石榴石环带的主元素成分变化

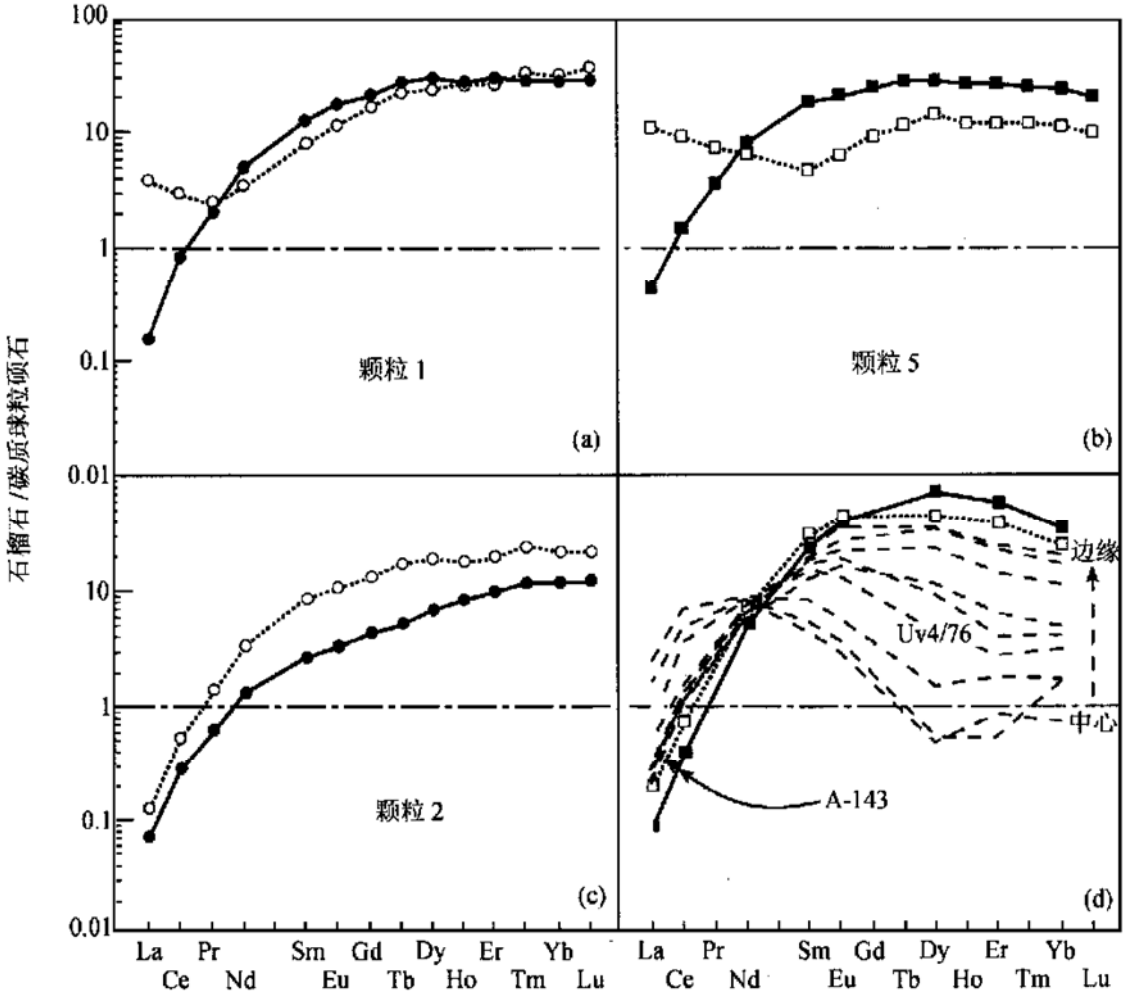

图 3　环带石榴石的稀土元素配分型式

实线为颗粒中心, 点线为边缘部位. (a) 和(c) 分别对应图 1(b) 和图 1(a) 中的石榴石. (b) 为表 1 的颗粒 5. (d) A-143 和 Uv4/ 76 分别为前苏联 Mir 和 Udachnaya 金伯利岩产出的交代橄榄岩和方辉橄榄岩中的环带石榴石[4,5]

全不同于全球橄榄岩型金刚石包体和金伯利岩携带的地幔方辉橄榄岩捕掳体中石榴石常见的正弦态(Sinusoidal)稀土元素配分型式[4,7~9]. 这说明复合捕掳体中环带状石榴石的核心就稀土元素组成而言可能来自于"正常"地幔二辉橄榄岩. 然而,环带状石榴石的边缘部分稀土元素组成及配分型式与中心差异很大,尽管两者具有相似的稀土元素配分型式,颗粒 2 桔红色的边缘比粉红色的核心富集所有的稀土元素(图 3(c)),同时该颗粒边缘比核心亏损^{18}O(表 1). 颗粒 1 含水边缘比中心强烈富集 La 和 Ce,相对亏损中稀土和富集重稀土(图 3(a)),不过总体上二者稀土元素含量除 La 和 Ce 之外变化不大. 颗粒 5(细小含水和钠、钾的石榴石,类似于颗粒 1 含水边缘比中心强烈富集轻稀土$(La/Nd)_N > 0$)和亏损中稀土和重稀土(图 3(b)),具有类似于正弦态稀土元素配分型式. 因此环带状石榴石的边缘具有明显的局域性,反映其独特的生长环境. 其他微量元素如 Sr, Zr, Hf 和 Nb 从中心到边缘亦存在相应变化. Sr 和 Nb 含量随轻稀土的富集而增加,尤其是含水边缘 Sr 可高达82×10^{-6}. 如此高 Sr 含量的石榴石在南非地幔橄榄岩捕掳体及橄榄岩型金刚石中尚不曾出现[8,10,11],仅在西伯利亚 Mir 橄榄岩型金刚石中石榴石包体的边缘有所报道($> 500 \times 10^{-6}$)[9]. 同时这些环带状石榴石不论中心还是边缘 Zr 含量都比较高($100 \sim 460 \times 10^{-6}$,表 1),这也是现有文献中有关地幔橄榄岩及橄榄岩型金刚石中不曾报道的[8~11],仅在含金云母的交代地幔橄榄岩中有所记载[12].

2 讨论

石榴石环带的形成和保存与流体参与下的地幔变形作用. 石榴石颗粒内化学成分的极端不均匀性,以及含水边缘强烈富集强不相容元素等现象的存在,暗示这些环带状石榴石曾受到过地幔熔/流体的强烈改造,并未达到平衡状态,为快速结晶的产物. 因为假设石榴石已与交代熔/流体处于完全的化学平衡,那么就已有的石榴石/熔浆的分配系数资料(Sr= 0.003[13]; Ti= 0.6[14]),石榴石边缘极高的 Sr 和 Ti(> 65 和 $8\,400 \times 10^{-6}$)含量需要与之平衡的熔浆具有极不现实的高 Sr 和 Ti($> 21\,600$ 和 $14\,000 \times 10^{-6}$)丰度值,同样石榴石边缘轻稀土元素的强烈富集需要与之平衡的熔浆具有极强的稀土元素分馏. 如此高 Sr 和 Ti 且具极强的稀土元素分馏的熔浆在自然界尚不曾发现. 换言之,环带状石榴石边缘极富且可变的 Sr, Ti 和 REE 丰度只能通过这些元素在石榴石-不相容元素富集的熔浆间的不平衡分配来解释. 而元素在矿物-熔浆间的不平衡分配又只能通过晶体的快速生长来满足. 当熔浆的强不相容元素和 Ti 过饱和时,晶体的快速生长就会出现,因此时的生长速率远大于元素在矿物和熔浆中的扩散速率,故最初结晶出的石榴石必然会富集 Sr, LREE 和 Ti. 随着结晶作用的继续和熔浆中不相容元素含量的降低,其生长速率终将减缓,随后结晶的石榴石将会趋于与熔浆达到近似的化学平衡. 同时一旦交代作用终止于某一阶段,后生的边缘与交代前核心间化学和能量梯度的存在又会导致元素均一化的发生. 元素均一化所需要的时间取决于矿物颗粒的大小、元素扩散速率的大小和环境温度的高低. 以 Sr 为例,假设环境温度为 1 200 ℃,此时 Sr 在石榴石中的扩散速率大约为 $4.4 \times \times 10^{-16} cm^2/s$[9],那么直径约 1 mm 的石榴石的 Sr 均一时间大约需要 18 万年($t = R^2/4D = (0.1cm)^2/(4 \times 4.4 \times 10^{-16} cm^2/s) = 1.8 \times 10^5 a$). 如此短的均一时限就使得石榴石的环带在地幔高温环境下很难得以保存. 可见环带状石榴石在岩石圈地幔中实际出现的机率可能远比人们已观察到的要大得多,只是后期反复的交代作用和/或扩散作用使之再度达到相对化学平衡使环带消失. 这可能就是环带状石榴石仅发现于地幔剪切变形橄榄岩捕掳

体[10, 15]、金刚石包体[4, 9]以及某些“独特的”地幔捕掳体[3, 5]中的主要原因. 一旦石榴石在遭受地幔交代作用的过程中被金刚石所包裹, 它就与周围环境完全隔绝而使其交代过程的瞬间状态得以记载. 同理, 交代作用进行时地幔变形作用的存在就可能将交代形成的石榴石环带“冷冻”起来, 随后的金伯利岩岩浆快速将其带入地表而得以保存. 地幔变形作用之所以能使矿物中元素分配的不平衡得以保存的机理可能在于: 其一变形作用会逐渐将颗粒间熔/流体挤出而使颗粒-流体间的离子交换平衡得以终止; 其二变形作用会使矿物结构发生重组而变得更加致密, 从而可能降低了原子的扩散速率(因为原子的扩散速率不仅取决于原子本身的化学活动性和周围环境的温压条件, 而且还与矿物的结构有关), 致使矿物内扩散平衡趋于减缓. 当然, 另一种可能——交代作用仅发生在寄主岩浆喷发之前不久——亦能使石榴石环带得以很好的保存, 但这很难解释为什么环带状石榴石绝大多数只出现在已遭受变形的地幔橄榄岩包体中的事实. 因此我们认为流体参与下的地幔变形作用才是南非复合橄榄岩捕掳体中出现环带状石榴石的真正原因.

交代流体的性质. 环带状石榴石边缘极度富集 Ca, Sr 和 LREE 的事实, 暗示交代流体的性质更可能为“碳酸岩质”, 因为绝大多数火成碳酸岩都强烈富集 Sr 和 LREE[16], 而且这种熔浆在地幔中即使在极小的体积下亦具有很强的活动性[17]. 然而, 纯粹碳酸岩质交代又很难解释这些环带状石榴石边缘 Ti 和 Zr 的富集特征, 因为火成碳酸岩一般都亏损这两种元素. 这种不一致性可以通过向纯粹碳酸岩熔体中加入另一种富 Ti 和 Zr 的熔体来消除. 其结果这种富 Ti, Zr 同时又富 Sr, LREE 的混合交代介质最可能为含水富钾的硅酸岩质碳酸岩熔浆. 南非复合橄榄岩捕掳体中石榴石若曾受到过这种混合熔浆的交代改造可以解释石榴石环带边缘所观察到的微量元素特征. 金刚石流体包裹体的研究[18, 19]亦证实地幔中存在这种混合熔浆. 这种混合熔浆很可能是原始金伯利岩熔浆晚期分异的产物, 亦或形成于两种单纯的熔浆(碳酸岩熔浆和硅酸岩熔浆)按不同比例的二元混合. 其混合过程可能发生在交代作用之前. 利用一次这种混合熔浆的影响来解释这些石榴石环带的形成, 可能比假设有两次不同性质的交代改造显得更合理一些, 尽管理论上后者也能形成所观察到的微量元素组成. 因此我们认为硅酸岩质碳酸岩熔浆的交代作用是造成这些环带状石榴石的边缘强烈富集强不相容元素和高场强元素的根本原因. 石榴石不同颗粒边缘间化学组成的巨大差异(图 3)可能是硅酸岩熔浆和碳酸岩熔浆混合比例的不同以及处于不同的交代阶段的直接结果[4, 5]. 影响颗粒 5 的熔浆可能比影响颗粒 1 的熔浆含碳酸岩的比例更高一些, 而且交代程度可能更深一些, 从而导致颗粒 5 边缘比中心强烈富集轻稀土而亏损中、重稀土(图 3(b)). 颗粒 5 的边缘比颗粒 1 的边缘相对具有较低的 Zr, Hf 和 Sr 实测值(表 1)但很高的 LREE 含量可能为上述观点提供了证据.

环带状石榴石存在的重要意义. 综上所述, 环带状石榴石的出现本身就说明矿物颗粒内、颗粒间以及石榴石与其他矿物如斜方辉石、单斜辉石间存在不同程度的主、微量元素和氧同位素的不平衡. 因此当利用这些石榴石来计算某些地质参数如岩石和/或矿物形成的温压条件和模式年龄时必须慎之又慎, 特别是对那些高温变形的地幔橄榄岩和金刚石包裹体组合. 因为进行这些参数计算的前提条件——各矿物内和矿物间应处于完全的化学平衡——得不到满足. 南非复合橄榄岩中环带状石榴石(表 1)和西伯利亚交代橄榄岩中环带状石榴石[4]的边缘 Cr 含量普遍较高的事实暗示交代作用过程中有 Cr 的带入. 因此 Cr 含量高的石榴石并不总能说明其形成深度较大, 有时可能恰恰相反. 同理, 当地幔交代作用造成石榴石的边缘轻稀土元

素富集时, 尤其是当 Sm/Nd 比值发生重大改变时(如图 3 中颗粒 5 和 Uv4/76) , 利用这种石榴石来进行年龄测定时必须考虑交代作用的影响, 也就是说要排除可能受交代作用富集了的高 Nd 丰度和可能未受或受交代作用影响较小的低 Sm 丰度的贡献. 否则, 将会造成很大的年龄偏差. 总之, 尽量避免用环带状石榴石估计任何地质参数可能不失为明智之举.

致谢 样品制备与分析是由英国外交部 Overseas Research Students Awards Scheme 和王宽诚教育基金会奖学金项目联合资助下在英国伦敦大学皇家 Holloway 学院完成的. 分析测试过程中得到了伦敦大学 Birkbeck 学院的 Beard A 博士、爱丁堡大学 Hinton R 博士以及伦敦大学皇家 Holloway 学院 Lowry D 博士的大力支持和帮助. 本文的撰写和出版得到了中国科学院地质研究所所长基金的资助. 在此一并表示衷心感谢. 最后感谢徐义刚博士和审稿人对本文提出的建设性修改意见.

参 考 文 献

1 Boyd F R. High- and low-temperature garnet peridotite xenoliths and their possible relation to the lithosphere-asthenosphere boundary beneath southern Africa. In: Nixon P H, ed. Mantle Xenoliths. New York: John Wiley & Sons Ltd, 1987. 403~ 412

2 Lawless P J, Gurney J J, Dawson J B. Polymict peridotites from the Bultfontein and De Beers mines, Kimberley, South Africa. In: Boyd F R, Meyer H O A, eds. The Mantle Sample: Inclusions in Kimberlites and Other Volcanics. American Geophysical Union, 1979. 145~ 155

3 Meyer H O A, Tsai H M, Gurney J J. A unique enstatite megacryst with coexisting Cr-poor and Cr-rich garnet, Weltevreden floors, South Africa. In: Boyd F R, Meyer H O A, eds. The Mantle Sample: Inclusions in Kimberlites and Other Volcanics. American Geophysical Union, 1979. 279~ 291

4 Shimizu N, Boyd F R, Sobolev N V, et al. Chemical zoning of garnets in peridotites and diamonds. Mineralogical Magazine, 1994, 58A: 831~ 832

5 Sobolev V N, Taylor L A, Snyder G A, et al. A unique metasomatised peridotite xenolith from Mir kimberlite, Siberian platform. Extended Abstracts of 5th Int. Kimb Conf, 1995. 555~ 556

6 Shimizu N. Rare earth elements in garnets and clinopyroxenes from garnet lherzolite nodules in kimberlites. Earth Planet Sci Lett, 1975, 25: 26~ 32

7 Hoal K E O , Hoal B G, Erlank A J, et al. Metasomatism of the mantle lithosphere recorded by rare earth elements in garnets. Earth Planet Sci Lett, 1994, 126: 303~ 313

8 Stachel T, Viljoen K S, Brey G, et al. Metasomatic processes in lherzolitic and harzburgitic domains of diamondiferous lithospheric mantle: REE in garnets from xenoliths and inclusions in diamonds. Earth Planet Sci Lett, 1998, 159: 1~ 12

9 Shimizu N, Sobolev N V. Young peridotitic diamonds from the Mir kimberlite pipe. Nature, 1995, 375: 394~ 397

10 Griffin W L, Smith D, Boyd F R, et al. Trace-element zoning in garnets from sheared mantle xenoliths. Geochim Cosmochim Acta, 1989, 53: 561~ 567

11 Griffin W L, Gurney J J, Ryan C G. Variations in trapping temperatures and trace elements in peridotite-suite inclusions from African diamonds: evidence for two inclusion suites, and implications for lithosphere stratigraphy. Contrib Mineral Petrol, 1992, 110: 1~ 15

12 Shimizu N, All•gre C. Geochemistry of transition elements in garnet lherzolite nodules in kimberlites. Contrib Mineral Petrol, 1978, 67: 41~ 50

13 Green T H, Adam J, Sie S H. Trace element partitioning between silicate minerals and carbonatite at 25 kbar and application to mantle metasomatism. Mineralogy and Petrology, 1992, 46: 179~ 184

14 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: 635~ 641

15 Smith D, Griffin W L, Ryan C G, et al. Trace-element zonation in garnets from the Thumb: Heating and melt infiltration below the Colorado Plateau. Contrib Mineral Petrol, 1991, 107: 60~ 79

16 Nelson D R, Chivas A R, Chappell B W, et al. Geochemical and isotopic systematics in carbonatites and implications for the evolution of ocean-island sources. Geochim Cosmochim Acta, 1988, 52: 1~ 17

17 Watson E B, Brenan J M. Fluids in the lithosphere, 1. Experimentally determined wetting characteristics of CO_2-H_2O fluids and the implications for fluid transport, host-rock physical properties, and fluid inclusion information. Earth Planet Sci Lett, 1987, 85: 497~515
18 Schrauder M, Navon O, Szafranek D, et al. Fluids in Yakutian and Indian diamonds. Mineralogical Magazine, 1994, 58A: 813~814
19 Schrauder M, Navon O. Hydrous and carbonatitic mantle fluids in fibrous diamonds from Jwaneng, Botswana. Geochim Cosmochim Acta, 1994, 58: 761~771

(1999-05-26 收稿, 1999-07-12 收修改稿)

末次冰期极盛期陕西关中地区古气候古环境演变的生物记录

薛祥煦 ④ 周卫建 ④ 周 杰 ④
(西北大学地质系, 新生代地质与环境研究所, 西安 710069; ④中国科学院西安黄土与第四纪地质研究室, 西安 710054)

摘要 在陕西关中西安与咸阳地区间的河流阶地沉积剖面中采集到一批古菱齿象-披毛犀化石, 在研究化石标本的基础上, 作了^{14}C 年代测定及孢粉分析, 研究结果揭示了该区末次冰期极盛期的气候环境特征及其演变过程: 大约在距今 20 ka 时, 气候温凉偏湿, 适于古菱齿象-披毛犀动物群的生存, 稍后气候明显变干、变冷, 许多动物难于适应而大量死亡. 事实说明, 末次冰期极盛期似乎存在气候环境的冷干、凉湿颤动. 其间的凉湿阶段似反映了北半球高纬地区 Henrich 事件在这一地区的记录, 表明了黄土高原与极地、高纬地区的遥相关关系.

关键词 陕西关中 古菱齿象-披毛犀动物群 末次冰期极盛期 古季风降水

黄土高原晚更新世以来的气候环境特征和演变规律, 前人多从磁化率、地球化学、土壤微形态、孢粉及年代学等方面进行研究, 取得了许多成果[1~3]. 然而, 从哺乳动物的角度进行研究一直很少. 作者在咸阳一带进行地质考察时, 在渭河第二级阶地沉积物中发现了一批很有价值的哺乳类化石, 结合^{14}C 测年、孢粉分析和哺乳动物组合的研究, 对关中地区末次冰期极盛期东亚季风的变化特征得到一些新的看法.

1 咸阳七里铺地层剖面

由于建筑用砂, 在西安三桥至咸阳间渭河第二级阶地上挖有许多深约 15~16 m 的砂坑, 在好几个砂坑最底部含泥砾的砂砾石层中分别采得水牛、象、犀牛、鹿及野驴等化石. 以咸阳七里铺(108°46′E, 34°19′N)产水牛等化石的砂坑为例, 剖面自上而下为(图 1):

1 耕作土. 厚 0.4 m.

2 浅灰棕色黄土. 疏松、多孔. 厚 0.3 m.

3 黑垆土. 灰黑色, 具棱块状结构, 富含蚯蚓孔及粪粒. 厚 0.5 m. 在本层近底部两次取样, 提取有机质, 作^{14}C 测年, 结果分别为距今(3 160 ±80) 及(3 160 ±55) a. 本层土样孢粉分析, 木本植物花粉占 63.4%, 以松属、桦属为主, 尚含有少量胡桃属、栎属等; 草本植物花粉占 34.7%, 以蒿、藜属较多, 此外还有少许卷柏及真蕨等孢子.