

# 华北克拉通古老岩石圈地幔 及其组成的“逆向演化”

路凤香<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430074; 2. 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**提要:**华北克拉通古老岩石圈地幔演化过程中有 3 种深部地质作用最为重要: ①岩浆的萃取作用; ②不同来源的熔/流体对岩石圈的交代作用; ③软流圈及其熔体与岩石圈的相互作用。在蒙阴金伯利岩的捕虏体样品中发现有早晚两期斜方辉石, 前者是早期粗粒结构橄榄岩残留的矿物; 后者是晚期地幔发生塑性流变后形成的辉石。本文对比了蒙阴和复县两岩区以及南非两种典型结构橄榄岩捕虏体的主、微量元素, 发现较晚期的具剪切结构的橄榄岩难熔程度反而低于较早期的具粗粒结构者。粗粒结构的  $Mg'$  值都大于 0.90 (0.902~0.93),  $Al_2O_3$  含量变化于 0.22%~2.32%; 而具剪切结构者  $Mg'$  值都小于 0.90 (0.86~0.88),  $Al_2O_3$  含量变化于 1.69%~2.75%。表明地幔成分演化时不仅存在受第①种作用制约的地幔不断贫瘠/难熔的正向演化, 而且还存在受第③种作用制约的地幔由贫瘠转向饱满的“逆向”演化趋势。经粗略对比后, 推测在约 3 Ga 的这段地质历史时期内华北克拉通古老岩石圈地幔至少出现过 2 次岩浆萃取事件和两次“逆向演化”过程。与显生宙的相比, 出现在古老岩石圈地幔中的第③种作用规模小, 强度低, 不均一性更为明显。

**关键词:**古老岩石圈地幔; 贫瘠和饱满; 粗粒和剪切结构; “逆向演化”

**中图分类号:** P542.45      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3657(2010)04-1102-10

“克拉通古老岩石圈地幔”一般是指克拉通内部, 显生宙之前的岩石圈地幔。在从太古宙至元古宙这段漫长的地质历史时期, 华北克拉通幔源岩浆活动主要分布在周边的“裂谷”或“坳拉槽”中, 因此应用该时期的幔源岩浆来反演、揭示其内部的古老岩石圈地幔特征比较困难。华北克拉通在 465 Ma 有金伯利岩岩浆的侵位, 该岩浆来源于 222~208 km 的岩石圈-软流圈的交界带<sup>[1]</sup>, 当时华北地区仍然保持了克拉通的基本特征, 因此通过研究金伯利岩所携带的地幔捕虏体和捕虏晶(如金刚石)可以获得古老岩石圈特征的信息。此外, 在显生宙的幔源岩浆捕虏体中也可以捕捉到古老岩石圈地幔的信息。前人对古老地幔的特征做过研究, 并与显生宙地幔做了对比<sup>[1-2]</sup>, 对岩石圈地幔的时代进行过测定及讨论<sup>[3-7]</sup>。最近笔者通过对金伯利岩携带的地幔橄榄岩捕虏体

中矿物(辉石)的主元素及成因研究, 发现其中存在两种斜方辉石且成因有所差异, 代表了两次不同结构橄榄岩形成事件的叠加<sup>①</sup>。本文将继续通过对橄榄岩全岩成分的对比研究为上述结论提供进一步的证据, 并对“古老岩石圈地幔”也存在组成的“逆向演化”问题作出阐述。

## 1 古老克拉通岩石圈地幔组成的一般特征

克拉通岩石圈厚度大、地温低、刚性强, 相比软流圈而言密度低, 且漂浮于其上, 是地球演化过程中的稳定构造单元。古老岩石圈地幔的组成是不均一的, 普遍认为除橄榄岩系列(纯橄榄岩, 方辉橄榄岩, 二辉橄榄岩)外, 还有榴辉岩、辉石岩和各种交代成因的岩石系列, 如果加上各种高压巨晶组合, 地幔成

收稿日期: 2010-07-21; 改回日期: 2010-08-05

基金项目: 国土资源部地壳探测工程专项“地壳深部物质信息识别技术”课题(3-3-2009-24-c)资助。

作者简介: 路凤香, 女, 1935 年生, 教授, 博士生导师, 从事火成岩岩石学及地幔岩石学研究; E-mail: lufx@263.net。

①路凤香. 华北克拉通古老岩石圈地幔的多次地质事件: 来自金伯利岩中橄榄岩捕虏体的启示. 岩石学报, 2010, 待发表.

分则更加复杂, Pearson (2003)<sup>[8]</sup> 对此作了系统的总结。控制地幔组成变化及其不均一性的主要深部作用为:①岩浆的萃取作用;②夭折的岩浆在深部的结晶作用;③壳幔相互作用及板块俯冲作用;④各种不同来源的熔/流体对岩石圈的交代作用;⑤软流圈及其熔体与岩石圈的相互作用。这些都导致了岩石圈地幔成分的重组和改造。

对古老岩石圈地幔而言,第①、④和⑤类作用更为重要,过去对第⑤类作用讨论较少,笔者将在第 3 节中叙述。

岩浆的萃取作用:岩石圈地幔的主要组成是原始地幔通过部分熔融作用分离出地壳同时亏损了玄武质组分(Fe, Al, Ca, Na, K 等)后,形成了难熔的残余物质。前人用不同的方法模拟了原始地幔组成<sup>[9]</sup>,认为未分异的地幔 MgO 含量约为 38%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 3.3%~4.1%, CaO 3.08%~3.21%, 随着熔融作用不断继续,地幔的主元素成分将不断地由饱满(fertile)变为贫瘠/难熔(refractory),熔融岩浆的程度愈高则地幔成分的难熔程度也愈高。相对应的岩石组成主体是方辉橄榄岩,全岩具有高 Mg' (Mg/Mg+Fe) 的特征(一般>0.9),岩石中的橄榄石 Fo 值也高(>0.91)。地幔继续遭受熔融其成分演化的极端代表是金刚石中的包裹体组合,该组合中的橄榄石 Fo 可达 0.94 或更高,石榴石则具有低 CaO (0~6%),高 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (8%~16%) 的特征。

夭折(failed)岩浆(未能侵位至地壳)在深部的结晶作用:处于稳定状态的克拉通地幔由于地温低,一般不发生大规模的熔融岩浆作用,仅在局部的热扰动的作用下,会发生小规模熔融,在高压状态下,多数形成镁铁-超镁铁质岩浆呈脉状、层状、透视镜体状穿插在周围的地幔橄榄岩中,由于热动力条件所限,未能向上侵位到达地壳。在中国及世界各地玄武岩及金伯利岩的地幔捕虏体样品中发现的“复合捕虏体”以及各类辉石岩就是这种深部作用的产物。

壳-幔相互作用及俯冲作用:古老地幔在克拉通化之前,这两类作用比较活跃,在造山带(或活动带)及古老陆核接触处,可以发生壳-幔相互作用,陆壳岩石可能部分被改造或拆沉到地幔中,使地幔组成发生重组及改造,但在克拉通化之后这类作用则较少发

育。一个存在争议的问题是太古代是否存在板块俯冲作用?目前有不同认识。但至少部分(不是全部!)地幔中的榴辉岩是地壳俯冲进入地幔存留的基性物质,其俯冲成因的观点已经得到多数人的共识。

熔/流体对岩石圈的交代作用:不同深度来源的熔/流体的交代作用使得主元素贫瘠难熔的古老地幔变成微量元素富集(enriched)的地幔,并形成了种类繁多的交代矿物存留在古老地幔或作为捕虏晶出现在金伯利岩中,例如在中国首次发现的沂蒙矿(K(Cr,Ti,Fe,Mg)<sub>12</sub>O<sub>19</sub>)<sup>[10]</sup>,富含不相容元素 K(K<sub>2</sub>O 高达 3.83%),其中的尖晶石包裹体又富含相容元素 Cr(Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 达 57.98%),可以认为该矿物形成于富含相容元素的贫瘠地幔后经富 K、Ti 的熔/流体交代作用形成。在交代矿物中,富钛矿物系列占有重要的地位,如钙沂蒙矿亚种,钛钾铬石(蒙山矿),钡钛铁铬矿(Ba(Ti<sub>3</sub>FeCr<sub>2</sub>Mg<sub>2</sub>)<sub>12</sub>O<sub>19</sub>), Zr-Ti 以及 REE-Ti 氧化物<sup>①</sup><sup>[11-13]</sup>等交代矿物的成因都比较类似,据实验资料他们多形成于 66~120 km 的深度。此外“超深流体”在古老地幔中的作用也不可忽视。金伯利岩的重矿物中出现多种自然元素(如 Fe、Si、Cu、Pb、Zn、Sn、Ag、Au、W、C)、元素的互化物(硅铁矿、含钛硅铁矿、碳化钨、硅钛石、碳化硅)及缺氧矿物(方铁矿),表明这些自然元素和低氧化合物形成于氧逸度很低的介质中,大体位于 IW(自然铁-方铁矿)缓冲反应之下,其氧逸度不仅低于金伯利岩岩浆也低于岩石圈地幔,可能是来自下地幔或过渡带的“超深流体”<sup>[14]</sup>。最近 20 多年,在加拿大、巴西、西非、印度南非等 8 个克拉通中的 12 个地点,在金刚石的包裹体中都发现了下地幔的超高压矿物组合<sup>[15,16,17]</sup>,表明有些金刚石形成与超深流体有着成因联系,这些科学事实不仅使得超深流体的存在得到了进一步的证实,而且还成为了研究深部地幔的重要窗口。

## 2 华北克拉通古老岩石圈的主、微量元素特征

如上节所述,应用金伯利岩中的地幔捕虏体来认识华北克拉通古老岩石圈的主要组成是目前公认的最佳途径。现将代表性的橄榄岩捕虏体的成分列表如下:

### (1) 主元素变化与结构类型的关系

① Zr-Ti 以及 REE-Ti 氧化物因颗粒过细,不易分离,未能作为新矿物上报,所以没有正式命名。

表 1 蒙阴和复县两岩区金伯利岩中代表性的地幔橄榄岩捕虏体化学成分(%)  
Table 1 Chemical composition of kimberlite-borne mantle peridotite xenoliths from Mengyin and Fuxian (%)

地点 序号 岩石类型 结构 样品号	蒙阴				复县				南非索托	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		粗粒+剪切	蛇纹石化石榴橄榄岩	剪切	粗粒	剪切	碳酸盐化橄榄岩	粗粒	PHN1611(石榴橄榄岩)	粗粒
样品号	SP08-1	SP0137	Av. (7)	Av.(2)	Av. (4)	F50-92618	Av.(4)	Av. (4)		
SiO <sub>2</sub>	40.08	40.21	40.94	36.36	38.82	37.65	28.56	42.41	43.7	43.76
TiO <sub>2</sub>	0.13	0.11	0.31	0.18	0.19	0.02	0.06	0.32	0.25	0.04
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.7	1.2	1.33	1.69	0.98	1.36	1.41	2.32	2.75	0.22
FeO	6.51	6.51	5.96	9.223	5.11	5.31	4.75	5.81	10.05	6.43
MnO	0.09	0.09	0.1	0.03	0.05	0.31	0.33	0.15	0.13	0.1
CaO	1.39	1.37	2.93	3.24	0.59	14.36	17.19	5.94	3.26	1.23
MgO	36.34	36.8	33.64	33.17	38.7	21.3	20.67	30.41	37.22	45.31
K <sub>2</sub> O	0.02	0.02	0.09	0.16	0.03	0.05	0.07	0.03	0.14	0.03
Na <sub>2</sub> O	0.02	0.02	0.04	0.15	0.02	0.07	0.05	0.08	0.33	0.07
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.07	0.05	0.16	0.09	0.09	0.03	0.03	0.15		
挥发分	13.43	13.44	13.85	14.53	14.5	18.83	22.86	11.52	2.49	2.55
总合	99.78	99.82	99.48	99.69	99.57	99.54	99.69	99.44	100.74	100.42
Mg'	0.92	0.92	0.91	0.86	0.93	0.88	0.86	0.902	0.87	0.93
MgO(除挥)	41.99	42.53								
资料来源	此次工作	此次工作	文献 [1], [18]	文献 [1], [18]	文献 [1], [18]	此次工作	文献 [21], [18]	文献 [1]	文献[1]	文献[1]

注:此次工作提供的样品是在西北大学大陆动力学国家重点实验室测试,分析人:王建其。



表中所列的,包括此次工作提供的是笔者及课题组成员多年积累的数据,并做了一些合理性选择。为了探讨结构类型与成分的关系,现按结构将样品划分为 3 类(结构不清楚或不典型者未列入其中):粗粒状结构,剪切碎斑结构以及粗粒+剪切结构。前两类结构普遍出现在不同时期的地幔捕虏体中。后一类是此次工作命名的。

在详细观察蒙阴岩区橄榄岩捕虏体的标本后,就会发现有些样品中存在有两类辉石<sup>①</sup>:一种为不规则的粗粒状(Py1),另一种具定向拉长的剪切结构(Py2),这两类辉石在手标本中就可以明确地加以区分(图 1),显微镜下可见拉长具反应边的 Py2 切过不规则粒状的 Py1,表明二者并非同时形成,前者晚于后者。通过对矿物主元素的研究,已经得出 Py1 是早期经部分熔融的难熔残余橄榄岩中的顽火辉石残留,Py2 可能是软流圈来源的熔体与耐熔橄榄岩反应产物的结论<sup>①</sup>。本文为了避免将过去文献中描述的粗粒结构与剪切结构的“过渡类型”与存在两种结构叠加的类型混淆,应用了“粗粒+剪切”结构一词加以区分,强调其中的粗粒辉石是早期的残留,也就是在地幔发生塑性流变和剪切变形时,由于内部受力不均匀,导致较早期的矿物仍然存留于岩石中,当然,残留物质的多少具有高度的不均一性。

对两种结构的成因解释有不同的看法,Cox 等(1973)<sup>[19]</sup>认为粗粒结构是最老的结构类型,Boyd(1973)<sup>[20]</sup>应用地质温压计估算了南非地区两种结构

的平衡温压条件,认为具粗粒结构者多数形成于相对低温/低压的环境,样品来自岩石圈地幔;而剪切结构者多形成于高温/高压的环境,是受到了岩石圈下面高温对流的软流圈的影响逐渐升温,同时发生塑性流变所造成。之后,Goetze(1975)<sup>[21]</sup>又提出了地幔底辟上升模型,认为底辟体外部在上升中与周围地幔发生摩擦导致了塑性变形,形成剪切碎斑结构,而底辟体的内部仍保持了粗粒结构的特征。可见,他们也都暗示了粗粒结构形成早于剪切结构者,这与笔者的观察相符合。

为了探讨全岩组成与结构的关系,笔者选择了 3 种不同结构的橄榄岩来对比他们的成分。从主元素特征发现粗粒和剪切两类不同结构的橄榄岩不仅形成的时序有早晚,而且成分特征也有区别,有趣的是较晚期的具剪切结构的橄榄岩难熔程度低于较早期的具粗粒结构者,而此次工作描述的蒙阴岩区的粗粒+剪切结构橄榄岩与粗粒结构的特征比较相似。

图 3 表示了不同结构橄榄岩的 Mg' 与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的相关关系,这两个参数在一定程度上能反映地幔橄榄岩的难熔程度,Mg' 值高、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量低者难熔程度高;反之则低。蒙阴、复县及南非莱索托的具粗粒结构者在图中均位于 Mg' 值较高 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 较低的 I 区,其中的 Mg' 值都大于 0.90(0.902~0.93),Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含

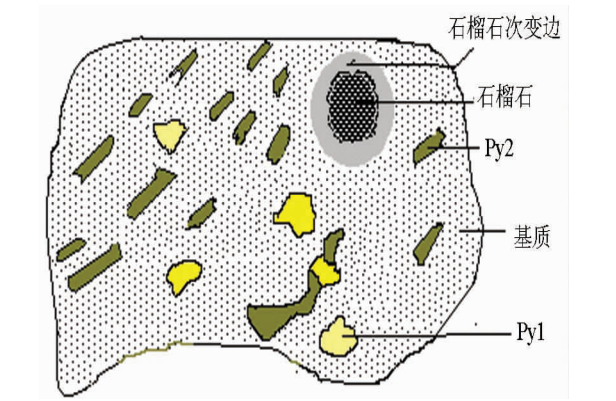


图 1 蒙阴橄榄岩捕虏体(9137)手标本素描(长 10cm)  
Fig.1 Sketch of peridotite xenolith hand specimen (Sp 9137) from Mengyin (specimen length=10cm)

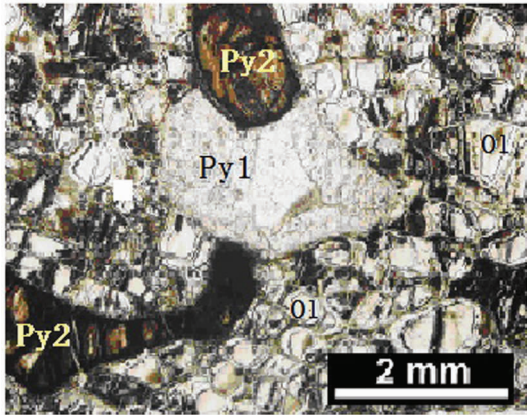


图 2 石榴石橄榄岩中两种辉石的交切关系  
(Sp9137, 单偏光, 蒙阴)  
Fig.2 Photomicrograph showing intersecting relationship of two kinds of pyroxene in garnet peridotite (Sp9137, plainlight, Mengyin)

①路凤香,华北克拉通古老岩石圈地幔的多次地质事件:来自金伯利岩中橄榄岩捕虏体的启示。岩石学报,2010,待发表。

量变化于 0.22%~2.32%;具剪切结构者位于 II 区,其中的  $Mg'$  值都小于 0.90(0.86~0.88), $Al_2O_3\%$  含量变化于 1.69%~2.75%。蒙阴岩区具粗粒+剪切结构的橄榄岩上述两个参数与粗粒结构者相似,可能与早期高  $Mg$  的辉石和橄榄石存留的数量多有关。

(2)微量元素与结构类型的关系

本文提供的 3 件新的橄榄岩捕虏体的微量元素资料见表 2。

图 4 为 3 件样品的 REE 配分曲线,可见具剪切结构的 F50-92618 其 REE 含量略高于粗粒+剪切结构者,但曲线形式基本相同, $Ba$ 、 $Sr$  含量也略高,但相差并不十分显著。图 4 还标出蒙阴和复县的粗粒与剪切结构橄榄岩的 REE 分布范围(分别由黑线与红线所围限),他们的高值线在 HREE 范围内有区别但 LREE 类似;他们的低值线有比较显著的差别,粗粒结构低于剪切结构的橄榄岩,这说明较晚期的地幔塑性流变与流体交代作用的关系更为密切,其差别则与塑性流变和流体交代作用发育的局部不均一性有关。

3 古老岩石圈地幔的“逆向演化”讨论

“逆向演化”是指地幔组成从“贫瘠”地幔演化为

“饱满”地幔的过程。Boyd<sup>[22]</sup>在研究大洋岩石圈地幔时发现其中的橄榄石含量与其  $Fo$  呈正相关关系,也就是部分熔融程度愈高,橄榄石在岩石中的数量增多, $Fo$  也随之升高,原作者将这一演化趋势称之为“大洋趋势”,这种趋势是单向的,是受部分熔融/岩浆萃取深部作用所制约的结果。大陆地幔的演化要比大洋演化复杂,中国东部新生代的岩石圈大规模的减薄事件足以说明这种复杂性。同样古老地幔的成分演化也并不简单。

研究地区橄榄岩捕虏体的主元素的特征表明,较晚期形成的具剪切结构橄榄岩所遭受的熔融程度反而低于具粗粒结构者,说明古老地幔在长期演化的过程中,并不是仅仅受到熔融作用和岩浆萃取深部作用的制约,也不光是叠加了地幔流体的交代作用后二者的共同制约,它同时还需受到软流圈及其来源的熔体与已经存留的,贫瘠难熔的地幔相互作用所制约。张宏福及其研究集体,对显生宙岩石圈地幔与熔体的相互作用以及造成了地幔组成的不均一性已经做了详细的阐述<sup>[4,5,23]</sup>,但是在古老克拉通岩石圈地幔,这样一个稳定的构造单元中是否也起了重要的或一定的作用呢?本文的主、微量元素的资料可以说明,在古老地幔的演化中上述第⑤种作用也是

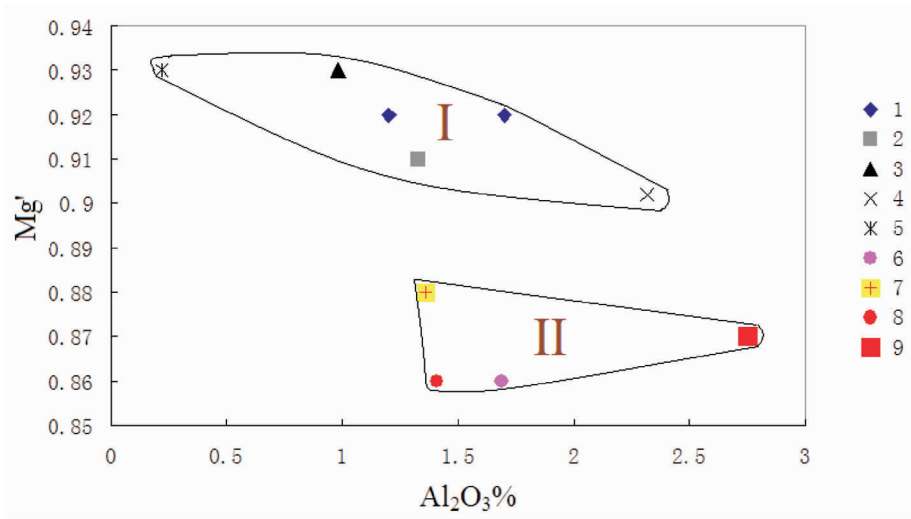


图 3 橄榄岩捕虏体  $Mg'$ - $Al_2O_3$  图解

1—SP08-1, SP9137;2—粗粒+剪切结构 7 件平均(蒙阴);3—粗粒结构 4 件平均(蒙阴);4—粗粒结构 4 件平均(复县);5—PHN1570(典型的粗粒结构,南非);6—剪切结构 2 件平均(蒙阴);7—F50-92618(剪切结构);8—剪切结构 4 件平均(复县);9—PHN1611(典型的剪切结构,南非)

Fig.3  $Mg'$  versus  $Al_2O_3$  diagram for peridotite xenoliths from Mengyin, Fuxian and South Africa

1—SP08-1, SP9137 (coarse-grained + shear texture, Mengyin);2—Coarse-grained + shear texture, average value of 7 samples (Mengyin);3—Coarse-grained texture, average value of 4 samples (Mengyin);4—Coarse-grained texture, average value of 4 samples (Fuxian);5— PHN1570 (typical coarse-grained texture, South Africa);6—Shear texture, average value of 2 samples (Mengyin); 7—F50-92618 (shear texture, Fuxian); 8—Shear texture, average value of 4 samples;9—PHN1611 (typical shear texture, South Africa)

表 2 橄榄岩捕虏体的微量元素成分( $\times 10^{-6}$ )

Table 2 Trace element compositions of peridotite xenoliths from Mengyin and Fuxian ( $\times 10^{-6}$ )

标本号	Li	Be	P	Sc	Ti	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr
SP08-1	38.2	0.99	288	8.98	865	45.0	2133	134	2628	24.5	62.3	3.76	3.38	77.6
SP9137	37.4	0.72	198	4.63	648	33.0	1244	111	2437	10.7	40.0	3.39	2.36	57.6
F50-92168	25.9	1.07	103	6.10	283	49.1	1418	13.9	871	73.8	42.3	3.08	1.79	217
Y	Zr	Nb	Mo	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd		
3.36	27.9	22.7	0.22	1.01	68.5	30.4	39.1	3.67	12.1	1.80	0.61	1.44		
2.87	18.8	16.2	0.13	0.84	56.3	27.7	38.2	3.79	13.2	1.85	0.62	1.46		
3.28	6.22	4.44	0.35	2.84	1456	40.1	75.0	9.07	33.6	5.08	1.23	2.81		
Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Pb	Th	U		
0.15	0.69	0.12	0.26	0.037	0.22	0.027	0.79	0.54	0.43	2.30	0.26	1.04		
0.14	0.63	0.095	0.19	0.022	0.14	0.017	0.52	0.40	0.42	1.66	0.27	0.81		
0.27	0.87	0.11	0.22	0.026	0.13	0.015	0.15	0.25	0.51	1.42	0.50	0.27		

注:样品是在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室测试,分析人:张春来。  
SP08-1, SP9137 采自蒙阴,具粗粒+剪切结构;F50-92168 采自复县具剪切结构。

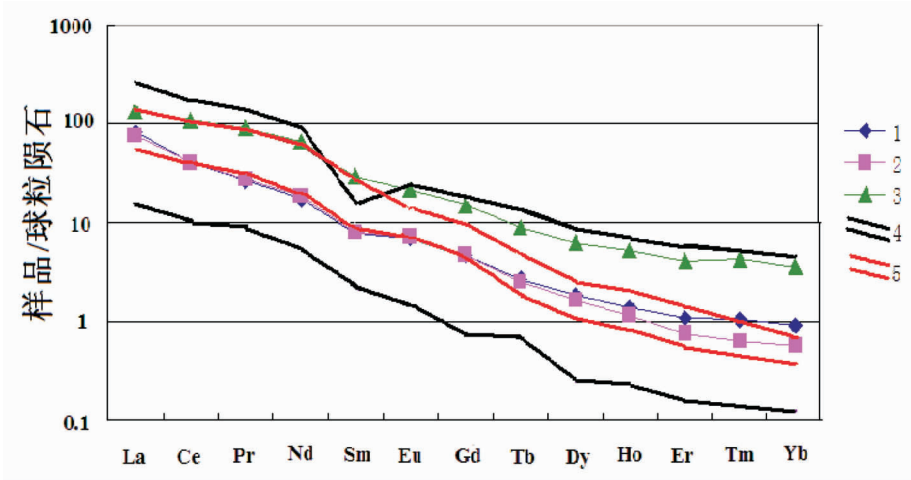


图 4 橄榄岩捕虏体全岩 REE 配分曲线  
1—SP08-1;2—SP9137;3—F50-92618;4—蒙阴、复县两岩区粗粒结构的橄榄岩捕虏体 REE 分布范围;5—蒙阴、复县两岩区剪切结构的橄榄岩捕虏体 REE 分布范围

Fig.4 Chondrite-normalised REE patterns of the mantle Xenoliths from Mengyin and Fuxian.  
1-SP08-1;2-SP9137;3-F50-92618;4-Distribution range of REE patterns for coarse-grained peridotites from Mengyin and Fuxian;  
5-Distribution range of REE patterns for shear texture peridotites from Mengyin and Fuxian

不可忽视的。如果将地幔组成不断地“贫瘠化”称为“大洋趋势(正向的)”,那么从贫瘠地幔反过来转变为饱满的地幔可称为“逆向演化趋势”,控制这种演化趋势的深部作用是软流圈及其熔体对岩石圈的替代和与岩石圈的相互作用。但与中国东部发生在中

新生代的这类作用相比,在古老岩石圈地幔内该作用的规模小、强度小、局部不均一性更为显著。重视了这一作用,可以较好地解释以下事实:

①“逆向演化”可以解释克拉通地幔组成的不均一性;在同一个华北克拉通内部,蒙阴与复县都产



出了具经济价值的金刚石,金刚石的包裹体组合都显示了具有高度贫瘠/难熔的特征,说明两岩区下的岩石圈地幔都经历过高程度的熔融作用及早期的地壳分异过程。然而依据 465 Ma 侵位的金伯利岩中的重矿物石榴石成分及含量的估算<sup>[24]</sup>,在 465 Ma 时两地区古老地幔的组成有差别,在岩石圈的主体部分(130~190 km)蒙阴的方辉橄榄岩约占 50%以上,而复县岩区仅<20%,二辉橄榄岩形成岩石圈的主体组分,这说明复县岩区在金刚石形成之后到金伯利岩侵位前,遭受过软流圈及其熔体对岩石圈的替代和与岩石圈的相互作用(前述的作用⑤)而且强于蒙阴岩区。表明复县岩区岩石圈地幔组成的“逆向演化”较蒙阴更为显著。

②“逆向演化”可以解释地幔橄榄岩年龄数据与深部事件的相关性:前人对古老岩石圈地幔捕虏体做过一定数量的测年,如何理解这些数据,所代表的事件是什么?一般认为,所获得的数据并不是该地区地幔最早的形成年龄,而是代表了最晚的一次地质事件(热扰动)的年龄<sup>[25]</sup>。现将从太古宙到金伯利岩侵位前存在的重要地质事件与地幔年龄的可能对应关系探讨如下:

>3.8 Ga:在华北克拉通内部冀东、泰山等地都报道过 3.6 Ga,3.8 Ga 的地壳年龄数据<sup>[26,27]</sup>,表明该时期的地幔已经发生过高程度的部分熔融,分异出地壳并形成贫瘠地幔。

3.4~2.9 Ga:是地幔橄榄岩萃取熔体的时间<sup>[4]</sup>,地幔继续贫瘠化。笔者曾应用金刚石中氮的含量与其

聚集状态估算了金刚石的形成年龄,最早的形成年龄为 3.01 Ga<sup>[28,29]</sup>,据此也可作为地幔处于贫瘠状态的佐证。

2.5 Ga:太古宙末期 (2.5~2.6 Ga)华北地区普遍经历了强烈的变质-变形作用,主体部分形成了一些小的古陆核<sup>[30]</sup>。在已测出的来自金伯利岩的地幔捕虏体或捕虏晶中,2.5 Ga,2.6 Ga,2.68 Ga,2.7 Ga<sup>[31,64]</sup>的数据较多,表明伴随陆核形成的过程中华北克拉通地幔出现过重要的深部地质事件。但是这一事件是继续进行部分熔融导致地幔进一步贫瘠化,还是发生过熔体与古老岩石圈地幔的相互作用,使地幔组成出现过“逆向演化”,目前尚无确切的证据。Gao 等(2002)<sup>[6]</sup>所测定的捕虏体采自复县的金伯利岩中,如果像上节所说,复县岩区地幔组成以二辉橄榄岩为主,那么有可能该时期已经发生过软流圈及其熔体与岩石圈的相互作用。

1.7~1.8 Ga: 古元古代末克拉通周边与内部的活动带褶皱成山,并与古陆核焊接镶嵌形成了完整的华北克拉通<sup>[32]</sup>。在蒙阴橄榄岩捕虏体中获得了 1.6 Ga 的 Re-Os 等时线年龄<sup>[6]</sup>,原作者认为蒙阴太古宙岩石圈地幔在中元古代遭受了相当程度的熔体改造作用。

1.4~1.3 Ga: 是地幔熔融作用比较活跃的时期,形成了地幔高压下“夭折”的辉石岩岩浆<sup>[4]</sup>,推测华北克拉通地幔在中元古代时期发生过比较大的升温 and 熔融作用,他们没有上升到地壳深度,而是在地幔的高压条件下冷却结晶。与此同时,复县金刚石中曾

表 3 华北克拉通岩石圈地幔的年龄与可能对应的事件  
Table 3 Mantle ages of ancient lithosphere responsible to deep processes in North China Craton

时间	深部作用类型	地幔橄榄岩类型	金刚石的生长特点	伴随的交代作用	伴随的塑性流变
2.5Ga 之前	以高程度的部分熔	贫瘠的方辉橄榄岩	已发现的金刚石最		
	融为主,形成 3.6Ga, 3.8 Ga 的地壳 <sup>[26,27]</sup>		早 形 成 于 3.01Ga <sup>[28,29]</sup>		
2.5~1.7Ga	以软流圈及其熔体	部分地区可能发生		可能发生	
	与岩石圈的相互作用为主	“逆向演化”被改造为二辉橄榄岩			
1.4~1.3Ga	以熔融作用为主,形成“夭折”的辉石岩	方辉-二辉橄榄岩 Mg'=0.9-0.93	发生过金刚石被熔体熔蚀事件	熔出的辉石岩熔体可以对周围的地幔发生交代	伴随有不均匀的塑性流变
	以软流圈及其熔体	方辉+二辉橄榄岩	金刚石快速生长	伴随流体交代,部分地区形成含金云母的交代地幔,为熔融金伯利岩岩浆提供了源区条件	
0.9~0.6Ga	与岩石圈的相互作用为主	Mg'=0.86-0.88			

显示了明显的被熔体熔蚀的现象。

0.9~0.6 Ga: 是金刚石重要的生长时期<sup>[28,29]</sup>, 暗示有熔/流体的活动<sup>[33]</sup>, 推测这一时期地幔的交代作用比较活跃, 使得部分岩石圈地幔富集不相容元素, 形成含金云母的地幔, 为熔融金伯利岩岩浆提供了源区的物质条件。同时伴随发生了上地幔剪切变形, 465 Ma 含矿金伯利岩在华北克拉通蒙阴和复县两地区侵位, 当时正处于华北地区大规模的抬升造陆的阶段。

从上述深部地质事件和所对应的时代关系可以看出, 在近 3 Ga 漫长的时期, 古老地幔的演化至少经历过 2 次熔融作用和 2 次软流圈及其熔体与岩石圈的相互作用(“逆向演化”), 由于目前所采集的样品有利于保留距 465 Ma 最近的地质事件, 因此推测 Py1, Py2 分别形成于 1.4~1.3Ga 和 0.9~0.6 Ga。

看来, 正向和逆向演化的交替出现可能是地幔演化复杂性主要原因之一。

## 4 结 论

(1) 在古老地幔的样品中仍然可以保留不同时期地质事件的岩石学记录, 因此在进行年龄测定的同时进行详细的岩相学观察, 以获得更多的成因信息。

(2) 制约华北克拉通古老岩石圈成分演化的主要深部地质作用为 ①岩浆的萃取作用; ②各种不同来源的熔/流体对岩石圈的交代作用; ③软流圈及其熔体与岩石圈的相互作用。

(3) 华北克拉通古老岩石圈地幔中, 早期具粗粒结构的橄榄岩贫瘠程度和 Mg' 值高于较晚期的具剪切结构的橄榄岩, 南非莱索托岩区也有相同的特征。

(4) “逆向演化”是指地幔组成从“贫瘠”地幔演化为“饱满”地幔, 它不仅出现在显生宙地幔组成的演化过程中, 而且也出现在古老岩石圈的演化过程中, 并可以在地幔演化过程中多次发生, 与显生宙的相比, 第③种作用的规模小, 强度低, 不均一性更为明显。

(5) 熔/流体的交代作用, 多数与地幔剪切及塑性流变有比较密切的关系。

李廷栋院士一直重视对岩石圈深部作用的研究, 仅以此文祝贺他 80 华诞与从事地质工作 60 周年。

致谢: 感谢《中国地质》为庆祝李廷栋院士, 从事地质事业 60 年暨 80 华诞专辑的约稿。

## 参考文献(References):

- [1] 路凤香, 郑建平. 华北地台古生代岩石圈地幔特征及深部过程[C]//池际尚, 路凤香主编. 华北地台金伯利岩及古生代岩石圈地幔特征. 北京: 科学出版社, 1996: 215-274.  
Lu Fengxiang, Zheng Jianping. The nature and deep processes of Palaeozoic lithospheric mantle beneath North China platform [C]// Chi Jishang, Lu Fengxiang(eds.). Kimberlites and Palaeozoic Mantle Beneath North China Platform. Beijing: Science Press, 1996: 215-274(in Chinese).
- [2] 郑建平. 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, 1999: 126.  
Zheng Jianping. Mesozoic -Cenozoic Mantle Replacement and Lithospheric Thinning Beneath the Eastern China [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1999: 126 (in Chinese).
- [3] 郑建平, 余淳梅, 路凤香, 等. 华北东部大陆地幔橄榄岩组成、年龄、与岩石圈减薄[J]. 地学前缘, 2007, 11(2): 87-97.  
Zheng Jianping, Yu Chunmei, Lu Fengxiang, et al. Age and composition of continental mantle peridotites and implications for the lithospheric thinning, eastern North China [J]. Earth Science Frontiers, 2007, 11(2): 87-97 (in Chinese with English abstract).
- [4] Zhang H F, Goldstein S L, Zhou X H, et al. Evolution of subcontinental lithospheric mantle beneath eastern China: Re-Os isotopic evidence from mantle xenoliths in Paleozoic kimberlites and Mesozoic basalts [J]. Contrib. Mineral Petrol., 2008, 155: 271-293.
- [5] 张宏福. 橄榄岩-熔体相互作用: 克拉通型岩石圈地幔能够被破坏之关键[J]. 科学通报, 2009, 54(14): 2008-2026.  
Zhang Hongfu. Peridotite-melt interaction: a key point for the destruction of cratonic lithospheric mantle [J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54 (14): 2008-2026 (in Chinese).
- [6] Gao S, Rudnick R L, Carlson R W, et al. Re-Os evidence for replacement of ancient mantle lithosphere beneath the North China craton [J]. Earth Planet Sci. Lett., 2002, 198: 307-322.
- [7] Wu F Y, Walker R J, Yang Y H, et al. The chemical temporal evolution of lithospheric mantle underlying the North China craton [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 2006, 70: 5013-5034.
- [8] Pearson D G. Mantle samples included in volcanic rocks: xenoliths and diamonds[J]. Treatise on Geochemistry, 2003, 2 (ISBN: 0-08-044337-0): 171-275.
- [9] Menzies M A. Petrology and geochemistry of continental mantle: an historical perspective [C]// Menzies (ed.). Continental Mantle. Clarendon: Oxford Science Publications, 1990: 31-54.
- [10] 董振信, 周剑雄, 陆琦, 等. 沂蒙矿, K(Cr,Ti,Fe,Mg)<sub>12</sub>O<sub>19</sub>——我国发现的一种新矿物[J]. 科学通报, 1983, 15: 932-935.  
Dong Zengxin, Zhou Jianxun, Lu Qi, et al. Yimengite, K(Cr,Ti,Fe,Mg)<sub>12</sub>O<sub>19</sub>——a new mineral, discovered in China [J]. Chinese Science Bulletin, 1983, 15: 932-935(in Chinese).
- [11] 赵磊. 华北地台金伯利岩矿物学 [C]//池际尚, 路凤香, 主编. 华北地台金伯利岩及古生代岩石圈地幔特征. 北京: 科学出版社, 1996: 55-132.



- Zhao Lei . Mineralogy for kimberlites in North China platform[C]// Chi Jishang, Lu Fengxiang (eds.). Kimberlites and Palaeozoic Mantle Beneath North China Platform. Beijing: Science Press, 1996:215–274 (in Chinese).
- [12] 陆琦, 周湖云. 山东金伯利岩蒙山矿(Mathiasite)研究的新进展[J]. 矿物学报, 1994, 14(4):343–347
- Lu Qi, Zhou Huyun. New advance of study on Mathiasite in kimberlite from Sandong province [J]. Acta Mineralogica Sinica, 1994, 14(4):343–347(in Chinese with English abstract).
- [13] 陆琦, 周湖云. 金伯利岩新发现的两种 Zr–Ti, Ree–Ti 氧化物矿物[J]. 矿物学报, 1997, 17(3):270–275.
- Lu Qi, Zhou Huyun. New discovery for two minerals Zr–Ti, Ree–Ti oxides from kimberlite [J]. Acta Mineralogica Sinica, 1997, 17(3):270–275 (in Chinese with English abstract).
- [14] 路凤香. 深部地幔及深部流体 [J]. 地学前缘, 1996, 3(3/4):181–186.
- Lu Fengxiang. Deep mantle and its fluids [J]. Earth Science Frontiers, 1996, 3(3/4): 181–186(in Chinese with English abstract).
- [15] Scott–Smith B H, Danchin R V, Harris J W, et al. Kimberlites near Orroroo, South Australia [C]// Kornprobst J (ed.). Kimberlites II: The Mantle and Crust–mantle Relationships (Proc. Third Int. Kimberlite Conf.) Elsevier, Amsterdam, 1984:121–142.
- [16] McCammon C. Geophysics—deep diamond mysteries [J]. Science 2001, 293(5531): 813–814.
- [17] Harris J W. Diamond geology[C]//Field J E (ed.). The Properties of Natural and Synthetic Diamond. London: Academic Press, 1992:345–393.
- [18] 路凤香, 赵磊, 郑建平. 与金伯利岩相关的地幔流体及软流圈地球化学 [C]//杜乐天, 刘若新, 邓晋福, 等. 主编. 地幔流体与软流圈地球化学, 北京:地质出版社, 1996:97–153.
- Lu Fengxiang, Zhao Lei, Zheng Jianping. Geochemistry of mantle fluids and asthenosphere relative to kimberlite[C]// Du Letian, Liu Ruoxin, Deng Jinfu (eds.). Geochemistry of mantle fluids and asthenosphere. Beijing: Geological Publishing House, 1996:97 – 153(in Chinese with English abstract).
- [19] Cox K G, Gurney J J, Harte B. Xenoliths from the Matsoku pipe [C]// Nixon P H (ed.). Lesotho kimberlites. Masern:Lesotho National Development Corporation, 1973:76–100.
- [20] Boyd F R. A pyroxene geotherm[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1973, 37:2533–46.
- [21] Goetze C. Sheared lherzolites:from the point of view of rock mechanics[J]. Geology, 1975, 3:172–173.
- [22] Boyd F R. Compositional distinction between oceanic and cratonic lithosphere [J]. Earth Planet Sci. lett., 1989, 96:15–26.
- [23] Zhang H F. Transformation of lithospheric mantle through peridotite–melt reaction:A case of Sino–Korean craton [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 237:768–780
- [24] Griffin W L, Zhang A D, O'Reilly S Y, et al. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino–Korean Craton[C]// Flower M F J, Chung S L, Lo C H, et al (eds). Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia. Washington, D C:Amer. Geophys. Union Geodyn Ser., 1998, 27:107–126
- [25] 吴福元, 杨进辉, 储著银, 等. 大陆岩石圈地幔定年[J]. 地学前缘, 2007, 14(2):76–86.
- Wu Fuyuan, Yang Jinhui, Chu Zhuyin, et al. Dating the sub – continental lithospheric mantle[J] . Earth Science Frontier, 2007, 14 (2):76–86(in Chinese with English abstract).
- [26] 周红英, 刘敦一, 万渝生, 等. 鞍山地区 3.3Ga 岩浆热事件—SHRIMP 年代和地球化学新证据[J]. 岩石矿物学杂志, 2007, 26 (2):123–131.
- Zhou Hongying, Liu Dongyi, Wan Yusheng, et al. Hot magma event of 3.3Ga in An–Shan area—New evidence on the SHRIMP age and geochemistry [J]. Acta Petrological et Mineralogica, 2007, 26(2):123–131 (in Chinese with English abstract).
- [27] Liu D Y, Nutman A P, Compston W, et al. Remnants of  $\geq 3800$  Ma crust in Chinese part of Sino–Korean craton[J]. Geology, 1992, 14:83–86.
- [28] Chen M H, Lu F X, Di J R, et al. CL and FTIR analysis on the diamonds in Wafangdian, Liaoning Province [J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(21):1986–1990.
- [29] Lu F X, Chen M H, Di J R, et al. Nitrogen distribution in diamonds from the kimberlite pipe No.50 at Fuxian in Eastern China; A CL and FTIR Study [J]. Phys. Chem. Earth (A), 2001, 26 (9–10):773–780.
- [30] Lu Songnian , Zhao Guochun , Wang Huichu, et al. Precambrian metamorphic basement and sedimentary cover of the North China Craton: A review[J]. Precambrian Research, 2008, 160:77–93.
- [31] Wu F Y, Walker R J, Ren X W, et al . Osmium isotopic constraints on the age of lithospheric mantle beneath northeastern China [J]. Chem. Geol., 2003, 196:107–129.
- [32] Zhao Guochun. Palaeoproterozoic assembly of the North China Craton[J]. Geol. Mag., 2001,138 (1):89–91.
- [33] 路凤香, 郑建平, 陈美华, 等. 金刚石的形成与流体的关系[C]//裴荣富, 翟裕生, 张本仁主编. 深部构造作用与成矿. 北京:地质出版社, 1999:115–121.
- Lu Fengxiang, Zheng Jianping, Chen Meihua, et al. The relationship between diamond formation and fluids [C]// Pei Rongfu, Zhai Yusheng, Zhang Benren (eds.). Tectonism and Mineralization in Deep Level. Beijing: Geological Publishing House, 1999: 115–121(in Chinese).

## Ancient lithospheric mantle and the “inverse evolution” of its components in North China Craton

LU Feng-Xiang<sup>1,2</sup>

(1. Faculty of Earth Science, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;

2. State key Laboratory of Geological processes and Mineral Resources, Wuhan 430074, Hubei, China)

**Abstract:** The component evolution of ancient lithospheric mantle was constrained by three deep-seated geological processes, i.e., ① melt extraction, ② lithospheric mantle metasomatism of melt/fluid from different sources, and ③ interaction between lithosphere and asthenosphere /asthenospheric melt. Two stage enstatites (Py1 and Py2) were discovered in a sample of peridotite xenolith from Mengyin kimberlite. The enstatites of the early stage are residual minerals in the early peridotites with coarse-grained texture. However, the enstatites of the late stage were formed under the plastic rheological condition. A comparison of major and trace elements between the two kinds of peridotites from Mengyin, Fuxian and South Africa shows that the coarse-grained peridotites have higher  $Mg'$  (0.902~0.93) and lower  $Al_2O_3$  (0.22%~2.32%) values, whereas the peridotites with shear texture have lower  $Mg'$  and higher  $Al_2O_3$  (1.69%~2.75%) values, suggesting that the late stage peridotites have lower refractory degree than the early stage peridotites. This phenomenon finds expression in the mantle component evolution process not only controlled by melt extraction but also by the interaction between lithosphere and asthenosphere / asthenospheric melt. The action caused the evolution of mantle composition from refractory back to fertile, and such an evolution trend is called “inverse evolution”. At least two magma extraction events and two “inverse evolution” processes occurred in ancient lithospheric mantle of North China Craton approximately during the 3 Ga geological period. Compared with the action ③ in Phanerozoic, it was characterized by smaller scale, lower strength and more obvious heterogeneity.

**Key words:** ancient lithospheric mantle; barren/refractory and fertile; coarse-grained and shear textures; “inverse evolution”

---

**About the first author:** LU Feng-xiang, female, born in 1935, professor, supervisor of doctor candidates, engages in the study of igneous and mantle petrology; E-mail: lufx@263.net.