

胶辽半岛金伯利岩中地幔捕虏体岩石学特征： 古生代岩石圈地幔及其不均一性

郑建平 路凤香

中国地质大学地球科学学院, 武汉 430074.

School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074.

1998-04-09 收稿, 1998-09-18 改回.

Zheng Jianping and Lu Fengxiang. 1999. Mantle xenoliths from kimberlites, Shandong and Liaoning: Paleozoic mantle character and its heterogeneity. *Acta Petrologica Sinica*, 15(1):65~74

Abstract Paleozoic lithospheric mantle with complex composition and structure relative to Cenozoic mantle beneath eastern part of North China underwent much more complex multi-circles and/or multi-stages history about magmatism, recrystallization, metamorphism and deformation. The concentrations of major elements in mantle peridotites, the $Mg^\#$ values and $Cr^\#$ values of mantle minerals especially from the inclusions in diamonds show the characters with high depletion in basaltic composition, whereas the concentrations of incompatible elements and isotopes show high enrichment nature on Paleozoic lithospheric mantle. The dihedral qualities of high depletion in basalt component and high enrichment in incompatible elements and isotopes are the mantle characters of craton lithosphere. The Pb isotopes of all the mantle xenoliths from Paleozoic kimberlite may reflect their Gondwana inheritance. Although both are Archean in Fuxian (Liaoning province) and Mengyin (Shandong province) lithospheric mantle, the heterogeneity is present, that is, the influence of post-craton by mantle processes in the former is stronger than that in the later. The comparison with Sr and Nd isotopes of Cenozoic mantle shows that the transition and thinning from Paleozoic enriched lithospheric mantle to Cenozoic depleted mantle were accompanied by the replacement and contamination of paleo-lithospheric mantle by newly accreted mantle materials.

Key words Paleozoic, Mantle xenolith, Subcontinental lithospheric mantle, Heterogeneity, Liaoning and Shandong peninsula, China

摘要 华北东部古生代岩石圈地幔经历过复杂的多旋回多阶段熔融岩浆、重结晶、变质和剪切变形历史,因而岩石组成、结构复杂。地幔橄辉岩的主元素、地幔矿物特别是金刚石中的包裹体的 $Mg^\#$ 值及 $Cr^\#$ 值等显示古生代岩石圈地幔高度难熔亏损玄武质的成分特征,而地幔橄辉岩的不相容元素、同位素显示高度富集的特点。这种高难熔和强富集两重性是克拉通岩石圈地幔的特征。Pb 同位素反映华北东部古生代岩石圈地幔具冈瓦纳大陆地幔的特点。复县和蒙阴古生代岩石圈地幔尽管都表现为太古代克拉通地幔的特征,但存在着不均一性,前者受克拉通化后的深部作用影响强于后者。与新生代地幔 Sr、Nd 同位素对比表明富集的古生代岩石圈地幔向亏损新生代的地幔转变和减薄伴有新生地幔物质对古老岩石圈的置换和混合作用。

关键词 古生代; 地幔捕虏体; 岩石圈; 不均一性; 胶辽半岛; 中国

中图法分类号 P588.125

1 引言

以幔源岩浆作为“超深钻”取样的捕获体,是我们认识岩石圈地幔特征的窗口。中国东部新生代地幔以化学不均一性为先导的诸如地幔性质、地幔流体、地幔亏损、交代富化、

对流、剪切变形、局部熔融、壳幔相互作用以及地温研究都已取得了长足的进展(如:支霞臣和陈道公,1994;徐义刚等,1995;樊祺诚和刘若新,1996;陈绍海等,1997;Zhou and Carlson, 1982; Liu, 1992; Xu *et al.*, 1993; Fan and Menzies, 1994; Zhou, 1996; Xu *et al.*, 1997; Zheng *et al.*,

* 本文为国家自然科学基金项目和地矿部青年地质学家基金及壳幔体系开放研究实验室项目资助成果。

第一作者简介:郑建平,男,1964年5月生,博士,副教授,岩石学专业。

1998),并达到了多学科交叉的高度。而对古生代岩石圈地幔特征的了解(路凤香等,1991;刘观亮等,1991;陈丰,1996;路凤香和郑建平,1996;郑建平和路凤香,1996;Zheng *et al.*, 1994)则相对要薄弱。本文就山东蒙阴、辽宁复县古生代金伯利岩中的地幔捕虏体岩相学、矿物化学、地幔热状态及全岩 Sr-Nd-Pb-O 同位素地球化学进行研究和对比,以求增进对华北东部古生代地幔特征及其不均一性的了解,进而为中国东部岩石圈地幔演化研究提供基础资料。

2 深源捕虏体的岩相学特征

2.1 岩石类型

金伯利岩中的深源捕虏体包括橄榄岩类、辉石岩类、金云母岩类、含磷灰石的交代岩石、基性麻粒岩、变苏长岩和变辉长岩等。其中橄榄岩类最丰富,占所发现捕虏体的85%以上。

2.1.1 橄榄岩类

橄榄岩类捕虏体多呈暗绿色,与金伯利岩的颜色相近,小者约5~6cm(多为球体),最大达17.5×12×6cm(大者多为扁平的椭球体,图1a)。包括石榴石方辉橄榄岩、石榴石/铬铁矿二辉橄榄岩、铬铁矿/铬尖晶石纯橄榄岩、异剥橄榄岩以及具辉石岩脉的橄榄岩复合岩石。

岩石中除石榴石、铬尖晶石类矿物有较多新鲜残余外,橄榄石和辉石多被蛇纹石(为主)、滑石、绿泥石及碳酸盐矿物等取代,极少有新鲜残留。在同一样品中还没有发现新鲜的石榴石、铬尖晶石、橄榄石或辉石同时出现的情况。强烈蚀变的岩石可根据蚀变物集合体的特点,颗粒的外形、残存解理的痕迹以及蛇纹石与碳酸盐矿物的分布和量比,进行结构恢复和岩石定名。复县二辉橄榄岩占54%,方辉橄榄岩占34%;蒙阴的方辉橄榄岩比例略高于复县岩区。与南非 Kappvaal 克拉通地幔相比,蒙阴和复县的二辉橄榄岩在捕虏体中所占的比例稍高。由人工重砂矿物石榴石的成分所确定 G_9 (二辉橄榄岩型)和 G_{10} (方辉橄榄岩型)的比例,也显示华北地台东部岩石圈地幔具有较高比例的二辉橄榄岩,表明华北地台岩石圈地幔克拉通化后的深部作用过程要比南非克拉通强,并存在不均匀性。

2.1.2 辉石岩

可分为金云母辉石岩、金云母磷灰石辉石岩、以及含流体包裹体的磷灰石榴石辉石岩。这类岩石的共同特点是主要矿物粒度粗大,而且构成粒状镶嵌的火成结构特征(图1b),矿物组合复杂,无或少橄榄石,矿物之间包裹关系发育,多富含流体包裹体,辉石含量多在50%以上。

2.1.3 金云母岩类

最大达7cm×10cm,金云母含量70%~100%不等,有金云母岩、石榴石金云母岩和橄榄石金云母岩等。包括强变形和基本未变形两种类型。前者又可进一步分为变形定向者和变形杂乱者:其中变形定向者,具残碎斑结构,残碎斑晶

和基质全由金云母构成(图1c),而变形杂乱者由蛇纹石化橄榄石和金云母组成,强烈变形的金云母和蛇纹石化橄榄石杂乱排列无固定取向,属多期变形迭加的综合结果;后者包括粒状镶嵌的石榴石金云母岩、金云母岩、碳酸盐金云母岩和橄榄石金云母岩,前两种岩石矿物粒度粗大,石榴石发育次变边,后两种岩石中金云母片晶集合体呈短片柱状,围绕单颗粒碳酸盐矿物或橄榄石呈环状生长。

2.2 橄榄岩的结构特征

橄榄岩的结构包括原生粒状结构(粗粒结构)、三种与变质变形重结晶作用有关的残碎斑状结构(图1d)、剪切结构(图1e)和细粒结构(图1f),和与岩浆作用有关的镶嵌结构、包含结构及出溶结构。

原生粒状结构是古老的橄榄岩在发生部分熔融而提取岩浆后耐熔残余在高温条件下重结晶的产物(Mercier, 1976)。残碎斑结构是原生粒状结构在剪切应力作用下经塑性流变形成,而剪切结构则是塑性流变很强的条件下形成的,其中尖晶石的散裂以及橄榄石、辉石的压扁拉长方向代表着剪切应力作用方向。在蒙阴和复县古生代地幔橄榄岩中拉长的橄榄石和尖晶石常有几个方向的交切,表明地幔存在多期应变作用的迭加。细粒结构是高度剪切流变细粒化颗粒动态重结晶的结果。原生粒状结构-残碎斑状结构-剪切结构-细粒结构的变形-重结晶序列在地幔中可能有多次重复,形成多个旋回。残碎斑结构橄榄岩中的残碎斑晶石榴石和辉石中分别有橄榄石(已蛇纹石化)、白云石、石英和铬铁矿、橄榄石等矿物包裹体。两地捕虏体均以剪切变形结构为主体,并有良好的残碎斑结构-剪切结构-细粒结构谱系,但也存在结构比例的地区性差异:复县橄榄岩中残碎斑结构和剪切结构所占比例高于蒙阴,而蒙阴橄榄岩中细粒结构者占相当比例。

上述多旋回和多种结构在橄榄岩、金云母岩中并存,说明华北地台东部古生代岩石圈地幔经历过复杂的多旋回多阶段熔融岩浆、重结晶、变质和剪切变形历史。

3 深源捕虏体的矿物化学

3.1 橄榄石

橄榄石是橄榄岩中最主要的造岩矿物,其 $Mg^{\#}$ 值($Mg/(Mg+Fe)$)直接反映诸如难熔/饱满程度等地幔性质。蒙阴、复县金伯利岩中橄榄岩中橄榄石的 $Mg^{\#}$ 值为0.903~0.940(平均值为0.924),为镁橄榄石,与橄榄岩主元素特征所显示古生代地幔具高难熔地幔组分特征(Zheng, 1998)是完全一致的。两地橄榄岩中橄榄石的 $Mg^{\#}$ 值相似于 Kappvaal 太古代克拉通岩石圈地幔橄榄岩中的橄榄石(0.920, Boyd, 1989),并明显高于显生宙大洋岩石圈地幔橄榄岩中的橄榄石(0.890~0.910, Boyd, 1989),也明显高于胶东半岛新生代具大洋地幔性质橄榄岩中橄榄石高于蒙阴(Zheng, 1998)

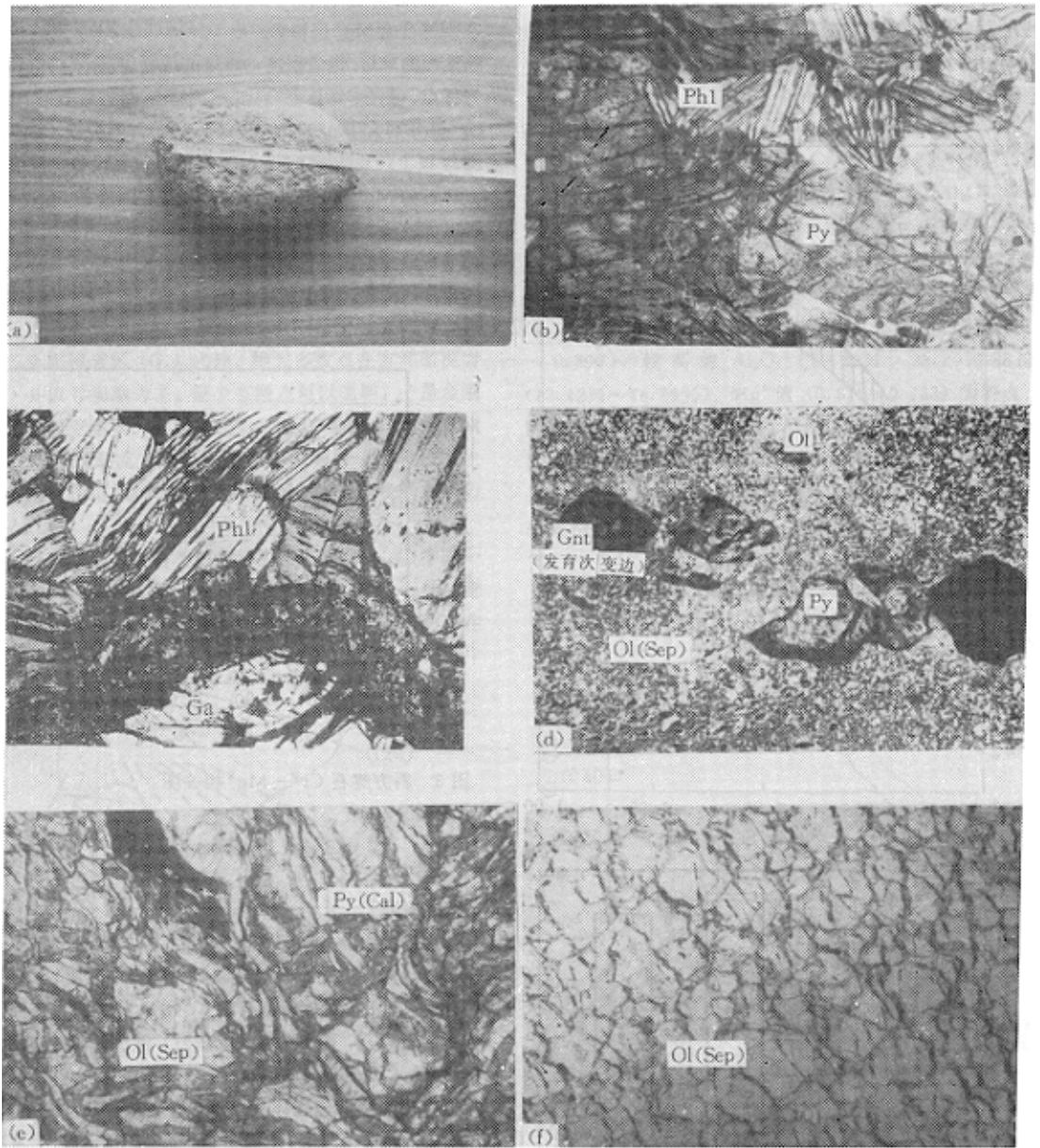


图 1 捕虏体形态及岩相学照片

- (a) 橄榄岩捕虏体，取自辽宁复县金伯利岩，样品号 F50-92340；
- (b) 金云母辉石岩，粗粒镶嵌结构，取自辽宁复县金伯利岩，样品号 F50-92119，2.5×5，单偏光，照片中 Phl 为金云母，Py 为辉石；
- (c) 金云母岩，残碎斑状结构，残碎斑晶和基质由金云母 (Phl) 组成，取自辽宁复县金伯利岩，样品号 F50-92164，2.5×5，单偏光；
- (d) 橄榄岩，残碎斑状结构，残碎斑晶由橄榄石、辉石和石榴石 (发育次变边) 组成，基质由细粒橄榄石 (蛇纹石化) 组成，取自辽宁复县金伯利岩，样品号 F50-9271，2.5×5，单偏光，照片中 Ol (Sep) 代表橄榄石 (蛇纹石化)；
- (e) 橄榄岩，剪切结构，橄榄石 (蛇纹石化) 和辉石 (碳酸盐化) 定向拉长，取自辽宁复县金伯利岩，样品号 F50-9212，2.5×5，正交偏光，照片中 Ol (Sep) 代表橄榄石 (蛇纹石化) 和 Py (Cal) 代表辉石 (碳酸盐化)；
- (f) 橄榄岩，细粒结构，细粒的自形橄榄石 (蛇纹石化) 组成，取自山东蒙阴金伯利岩，样品号 SD95-7，2.5×5，单偏光，照片中 Ol (Sep) 代表橄榄石 (蛇纹石化)。

Fig. 1 The shape and the petrography of xenoliths

是一致的。橄榄石的 $Mg^{\#}$ 值 (0.874~0.912, Zheng *et al.*, 1998)。尽管蒙阴和复县橄榄石的 $Mg^{\#}$ 值峰值相当, 但橄榄石的 Mg/Si 比值相差很大 (图 2), 表明两地古生代时的岩石圈地幔性质存在差异。

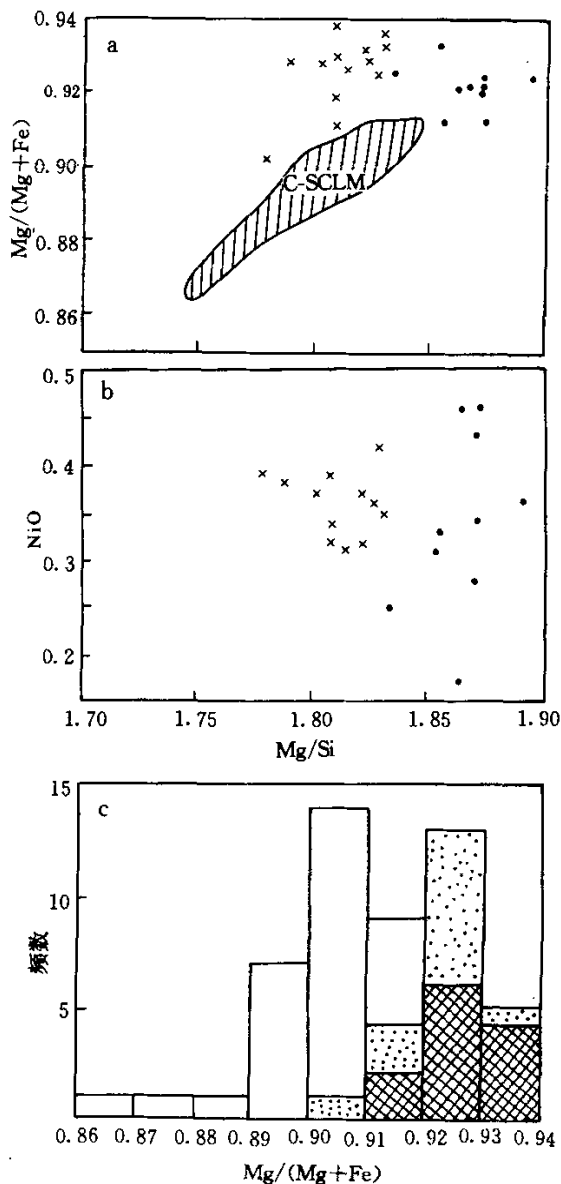


图 2 橄榄岩橄榄石的成分特征对比

a. Mg/Si vs. $Mg/(Mg+Fe)$, 点号为山东蒙阴, 叉号为辽宁复县, C-SCLM 为山东新生代地幔捕虏体; b. Mg/Si vs. NiO ; 点号为山东蒙阴, 叉号为辽宁复县; c. $Mg/(Mg+Fe)$ 值频率分布特征: 阴影区为辽宁复县, 点区为山东蒙阴, 空白为山东新生代地幔捕虏体。

Fig. 2 Comparison of composition in olivines from peridotites

3.2 斜方辉石

辉石的 $Mg^{\#}$ 值和 $Cr^{\#}$ 值 ($Cr/(Cr+Al)$) 也能较好地反映地幔的难熔/饱满程度, 难熔的地幔以高 $Mg^{\#}$ 值和 $Cr^{\#}$ 值为特点。蒙阴、复县金伯利岩中橄榄岩斜方辉石的 $Mg^{\#}$ 值和 $Cr^{\#}$ 值分别大于 0.932 和 0.269, 紫苏辉石分子 (En) 比例在 93.4 以上, 为斜顽辉石。与胶东半岛新生代地幔橄榄岩中斜方辉石的 $Mg^{\#}$ 值 (0.884~0.918) 和 $Cr^{\#}$ 值 (<0.124) 相比, 古生代地幔斜方辉石的成分明显具高难熔地幔的成分特征。如果有限的数据能够说明问题, 尽管两地都属主量元素亏损的克拉通地幔, 但在复县也存在比蒙阴更难熔亏损克拉通地幔的差别 (图 3)。

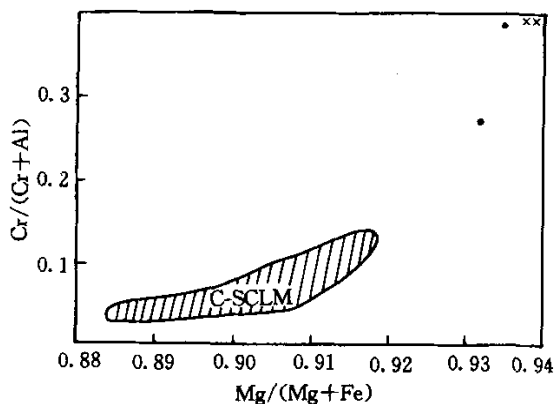


图 3 斜方辉石 $Cr^{\#}$ - $Mg^{\#}$ 相关图

代号同图 2

Fig. 3 $Cr^{\#}$ vs. $Mg^{\#}$ in orthopyroxenes

3.3 石榴石

捕虏体中的石榴石多发育次变边, 构成次变石榴石 (Kelyphite), 但不少情况下仍有新鲜石榴石的残留, 属铬镁铝榴石。金刚石中包裹体石榴石的 Cr_2O_3 含量总体上要高于捕虏体中的石榴石, 而 CaO ($<6.71\%$) 低于橄榄岩中的石榴石 ($<7.59\%$), TiO_2 、 Al_2O_3 、 FeO 也有类似 CaO 的差别; 尽管也有与金刚石包裹体相当高 $Mg^{\#}$ 值的捕虏体, 但包裹体中石榴石的 $Mg^{\#}$ 值总体上要高于捕虏体。如果把金刚石作为封闭体系, 其中的石榴石处于“孤立的封闭体系”中, 受外界的影响小, 而橄榄岩中的石榴石则不同, 体系是开放的, 因而不难理解包裹体与捕虏体相比所具有的高 $Mg^{\#}$ 值、高 Cr_2O_3 和低 CaO 、 TiO_2 、 Al_2O_3 、 FeO 成分特征, 并暗示克拉通地幔经历着复杂的深部作用过程。

在橄榄岩捕虏体中, 具最高 Cr_2O_3 含量者为复县粒状结构的纯橄榄岩 (12.5%), 明显高于具剪切结构者; 蒙阴具粒状结构的纯橄榄岩和方辉橄榄岩 Cr_2O_3 含量也明显高于同地区具剪切结构者; 复县具剪切结构者的 Cr_2O_3 含量 (2.06%~3.23%) 要低于蒙阴相同结构者 (3.61%~7.22%), 暗示复县地幔橄榄岩所经受后期改造影响的强度要强于蒙阴, 或反映两地区的地幔存在差异。

CaO、Cr₂O₃ 在划分地幔石榴石成因类型中具有明显的指示意义。在 CaO-Cr₂O₃ 相关图中能够区分出三种类型橄榄岩：低 Ca 富 Cr 者为方辉橄榄岩型（相当于 G₁₀），富 Ca 者为异剥橄榄岩型（相当于橄辉岩-辉石橄辉岩），介于两者中间者为二辉橄榄岩型。二辉橄榄岩依石榴石中 Cr₂O₃ 含量又分为富集型二辉橄榄岩（Cr₂O₃<4%）、过渡型二辉橄榄岩（4%~6%）和亏损型二辉橄榄岩（Cr₂O₃>6%，Kolesnik，1995）。华北两含金伯利岩区捕虏体及捕虏晶石榴石的 CaO-Cr₂O₃ 成分投点中，复县的辉石岩等包体个别点落入异剥橄榄岩区外，大约有 50% 的点落于二辉橄榄岩之中，包括富集至亏损的类型并以富集型为主；金刚石中包裹体除少数点落入二辉橄榄岩区（G₉）之外，绝大多数点在方辉橄榄岩区（G₁₀）并以亏损型为主。至少有两点可以说明，一是金刚石形成于相对更耐熔的方辉橄榄岩地幔环境中，第二是金刚石形成时的方辉橄榄岩地幔环境在金伯利岩侵入时已发生过一定的改造作用，表明克拉通岩石圈地幔所经受的复杂历史。

图 4 所表示的是复县具剪切结构橄榄岩(F₅₀₋₉₂₇₁)中同一颗石榴石不同位置的 CaO 和 Cr₂O₃ 含量变异关系，不同位置的 CaO (4.10%~4.35%)、Cr₂O₃ (9.9%~10.4%) 均存在

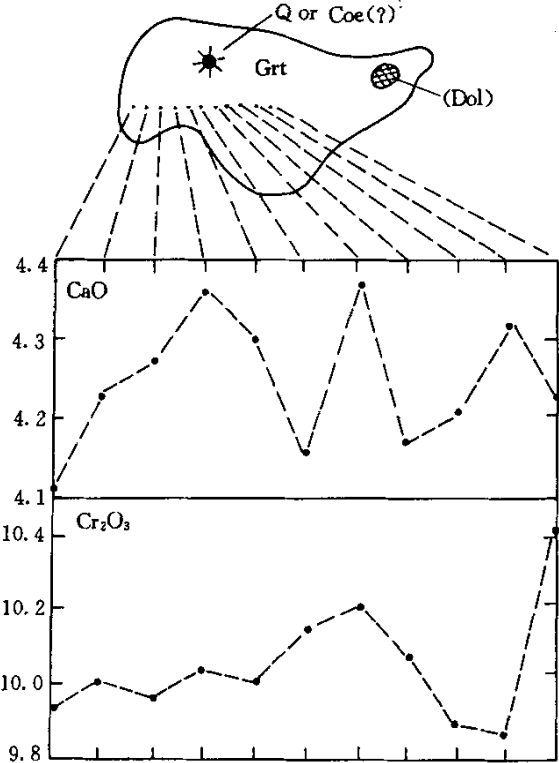


图 4 橄榄岩中石榴石的 CaO, Cr₂O₃变化图
Grt、Dol、Q 和 Coe 分别代表石榴石、白云石、石英和柯石英。
Fig. 4 Variation between CaO and Cr₂O₃ in garnet from peridotite

明显的变化范围，该捕虏体的石榴石为不规则状，有孤立存在的石英（柯石英？）和白云石矿物包裹体，显示出流体不均匀交代置换作用所形成的“残余孤岛式”结果。

3.4 铬尖晶石类矿物

金刚石包裹体铬铁矿以高 Cr₂O₃ (64.7%~67.36%)、MnO (0.79%~0.88%) 为特征，FeO、Cr³⁺、Al₂O₃、MgO、和 Mg[#] 值，分别是 14.17%~15.28%、0.877~0.892、3.94%~6.13%、12.87%~13.50%和 0.594~0.627；地幔橄榄岩中的铬铁矿具极宽的 Cr₂O₃ 变化范围（38.96%~61.03%），稍低的 FeO (10.99%~14.98%)、Cr³⁺ 值 (0.481~0.800)，较高的 Al₂O₃ (10.22%~28.20%)、MgO (13.42%~16.89%)、Mg[#] 值 (0.615~0.733) 为特点。蒙阴的铬铁矿总体上以较低的 Al₂O₃ 和较高的 Cr³⁺ 值。与新生代地幔橄榄岩中的铬尖晶石相比，古生代地幔橄榄岩铬铁矿/铬尖晶石，高 Cr₂O₃、FeO、低 Al₂O₃、MgO，因而高 Cr³⁺ 值和低 Mg[#] 值（图 5）。

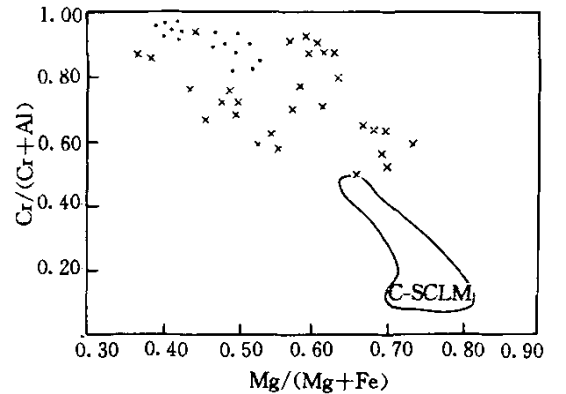


图 5 橄榄岩中铬尖晶石 Mg[#]-Cr³⁺ 相关图
代号同图 2
Fig. 5 Mg[#] vs. Cr³⁺ in chromium spinels from peridotites

4 深源捕虏体 Sr-Nd-Pb-O 同位素地球化学

4.1 Sr-Nd 同位素

华北地台东部金伯利岩中捕虏体的 Sr-Nd-Pb-O 同位素分析结果见表 1。

金伯利岩中捕虏体的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 测试值变化范围是 0.70393~0.71398，其中蒙阴的橄榄岩（0.70393~0.71109）低于复县的橄榄岩（0.71216~0.71398），复县金伯利岩中的辉石岩为 0.70818。¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 测试值变化范围是 0.511406~0.512290，其中蒙阴的橄榄岩（0.512208~0.512290）高于复县橄榄岩（0.51213~0.512189），复县辉石岩具有非常低的 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 测试值（0.511406）。在 ¹⁴³Nd/

表1 地幔捕虏体的 Sr-Nd-Pb-O 同位素分析结果

Table 1 The analyses results of Sr-Nd-Pb-O isotopes from mantle xenoliths

序号	时代	产地	样品	Rb	Sr	Sm	Nd	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)
1	P	LN	F92178	1.9	181	7.3	47.87	0.71398 (07)	0.09610	0.512172 (08)	39.355 (11)	15.831 (07)	19.529 (9)	7.26
2	P	LN	F9276	41.8	1879	12.81	95.13	0.70818 (12)	0.08484	0.511406 (08)	39.467 (09)	15.856 (07)	19.561 (8)	5.15
3	P	LN	F92142	1.3	319	8.7	53.36	0.71385 (12)	0.10275	0.512189 (13)	39.367 (08)	15.845 (07)	19.627 (8)	6.82
4	P	LN	F9215	2.6	85.7	6.41	43.37	0.71216 (08)	0.09311	0.512132 (07)	39.422 (09)	15.833 (07)	19.532 (8)	6.68
5	P	SD	S95-3	9.6	20.6	1	7.15	0.70393 (06)	0.08833	0.512208 (08)	38.955 (15)	15.650 (09)	18.649 (8)	4.21
6	P	SD	S95-4	22.2	79.4	1.04	6.39	0.71109 (06)	0.10220	0.512290 (15)	38.843 (08)	15.848 (08)	18.650 (9)	4.45
7	P	SD	S9138	6	66	5.5	22.75	0.70823 (08)	0.15228	0.512258 (11)	38.259 (10)	15.529 (06)	18.145 (8)	4.45
8	C	SD	SW1	10.8	1286	6.72	34.49	0.70369 (08)	0.12287	0.512949 (07)	38.032 (15)	15.548 (09)	18.240 (8)	7.95
9	C	SD	SW2	16.3	1142	6.75	34.21	0.70386 (10)	0.12433	0.512947 (09)	38.070 (15)	15.572 (09)	18.271 (9)	8.71
10	C	SD	QX	9.2	1405	13.93	74.51	0.70394 (05)	0.11786	0.512871 (08)	37.943 (22)	15.396 (10)	18.018 (9)	7.52

P 代表古生代; C 代表新生代; LN 代表辽宁; SD 代表山东; 分析单位: 地质矿产部壳幔体系开放研究实验室; 分析人: 凌文黎, 王林森。

$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 相关图上 (图 6), 除辉石岩投点有较大偏离外, 所有橄榄岩的投点均近似构成平行于 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 轴的直线, 显示 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的极大变化, 这与华北古生代岩石圈地幔捕虏体有较多的金云母是一致的。除蒙阴的 Sp9138 投点在 III 象限外, 其他所有投点均在第 IV 象限, 各投点具向富集地幔端元 2 (EM2) 演变的特点, 特别是复县橄榄岩明显向 EM2

靠近。与橄榄岩不相容元素所显示富集地幔特征且复县富集辉石岩则具 EM1 与 EM2 过渡的特点。胶东半岛新生代地幔的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 现代测试值分别是 0.512871~0.512949 和 0.70369~0.70394, 具有明显亏损地幔源的特点。图中也把复县和蒙阴的金伯利岩以及松辽盆地中生代火山岩的 Sr、Nd 同位素也进行了投点, 所有的投点总体展现出金伯利岩中的捕虏体→金伯利岩→中生代火山岩→新生代玄武岩存在自 EM2 端元向 DMM 端元逐渐过渡的同位素演变趋势。其中古生代金伯利岩及其捕虏体, 以及中生代火山岩主要体现富集地幔源区的特征, 而新生代橄榄岩体现亏损同位素地幔的特点。华北东部地幔 Sr、Nd 同位素从富集向亏损的转变暗示存在新生地幔物质对古老岩石圈的置换作用。

4.2 Pb 同位素

金伯利岩中捕虏体的 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化范围分别是 38.259~39.467、15.529~15.856 和 18.145~19.627。蒙阴橄榄岩与复县橄榄岩相比具有高 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的特点。除 Sp9138 具较低的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值外, 两地橄榄岩捕虏体的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 没有明显的差别。复县辉石岩以最高的 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为特征。与 Kappvaal 克拉通地幔中的金云母橄榄岩和金云母钾碱镁闪石橄榄岩相比, 华北东部古生代地幔明显具高 Pb 同位素的特点。

在 Pb-Pb、Pb-Nd、Pb-Sr 同位素关系图上 (图 7), 古生代岩石圈地幔样品投点总体上向 EM2 过渡, 但复县与蒙阴的地区性差别很大。在 Pb-Pb 图所有投点都在北半球参考线的上方, 反映 Pb 同位素具冈瓦纳大陆地幔的特点。新生代地幔样品无不表现出向 DMM 过渡的趋势。

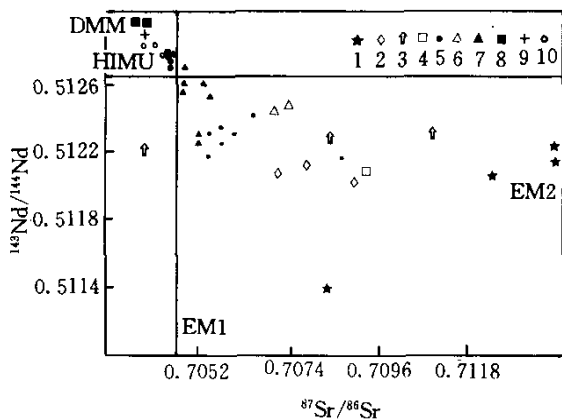


图6 华北东部不同时代地幔岩石 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 相关图

1. 复县金伯利岩中地幔捕虏体 (表1中1~4); 2. 铁岭金伯利岩; 3. 蒙阴金伯利岩中地幔捕虏体 (表1中5~7); 4. 复县金伯利岩; 5. 蒙阴金伯利岩; 6. 鹤壁金伯利岩; 7. 松辽盆地中生代基性火山岩; 8. 山旺玄武岩中地幔捕虏体 (表1中8~9); 9. 栖霞玄武岩中地幔捕虏体 (表1中10); 10. 宽甸玄武岩; (其中1~5为古生代, 6~7为中生代, 8~10为新生代)。

Fig. 6 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ vs. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in mantle xenoliths of different history from eastern part of North China

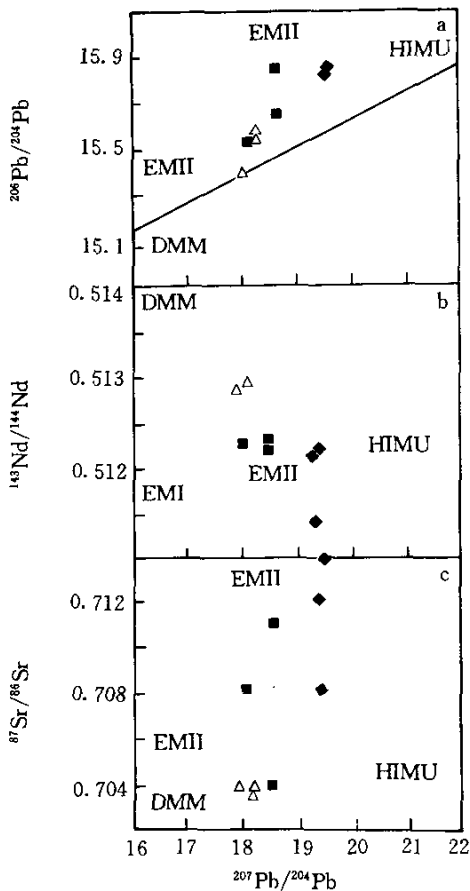


图7 橄榄岩 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (a)、 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (b)、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (c) 相关图

图中代号：菱形为复县（古生代）；方块为蒙阴（古生代）；三角为山旺-栖霞（新生代）EMI 为富集地幔端元1；EMII 为富集地幔端元2；DMM 为亏损地幔端元；HIMU 为高 u 地幔端元。

Fig. 7 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (a)、 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (b) and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (c) in peridotites

4.3 氧同位素

金伯利岩中捕虏体的氧同位素变化范围是 4.21‰~7.26‰，其中蒙阴橄榄岩（4.21‰~4.45‰）低于复县橄榄岩（6.68‰~7.26‰），新生代橄榄岩的氧同位素值相对较高，为 7.52‰~8.71‰。不论是古生代与新生代、还是古生代的复县与蒙阴都存在完全不同的 $\delta^{18}\text{O}$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 同位素演化趋势（图 8）。

5 古生代地幔热状态

路凤香和郑建平（1996）曾根据蒙阴和复县金刚石包裹体矿物，应用温压计（Mercier, 1976）进行了计算，获得了约为 38mW/m² 古地温值。古生代地幔橄榄岩中由于还没有

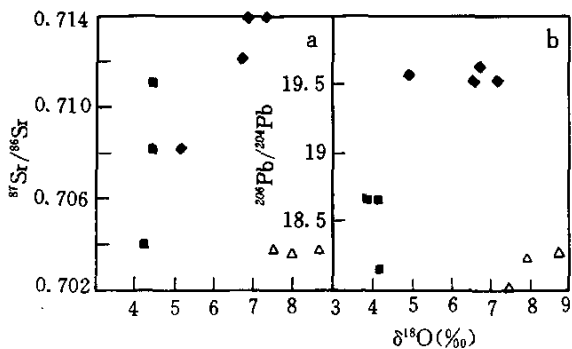


图8 橄榄岩 $\delta^{18}\text{O}$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (a)、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (b) 相关图 代号同图 7

Fig. 8 $\delta^{18}\text{O}$ vs. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (a) and $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (b) in peridotites

发现几种新鲜矿物共存的情况，因此无法利用上述方法进行温压计算。Griffin 和 O'Reilly（1989）及 Ryan *et al.*（1996）发展了由石榴石和铬尖晶石的微量元素 Ni 和 Zn 丰度计算温度、由 Cr_2O_3 等含量计算压力的方法，大大丰富了古老岩石圈地幔的研究。复县和蒙阴地幔捕虏体中石榴石成分及所计算的温压值见表 2。由此所确定的古生代岩石圈地幔地温（>40mW/m²）高于由金刚石包体辉石温压计所确定的地温线，其中 Ca-方辉橄榄岩及部分二辉橄榄岩介于 40~45mW/m² 间，大部分的二辉橄榄岩及异剥橄榄岩为 45~50mW/m²。该地温值远低于中国东部新生代岩石圈地幔地温。地温对比也表明金刚石稳定的亏损橄榄岩（如低 Ca 方辉橄榄岩及亏损二辉橄榄岩）环境，在金伯利岩侵入并捕虏

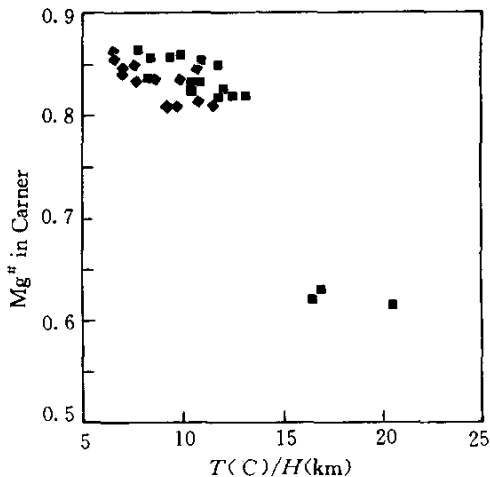


图9 橄榄岩中石榴石 $\text{Mg}^\#$ - $T(^{\circ}\text{C})/H(\text{km})$ 相关图 图中代号：菱形为复县投点；方块为蒙阴投点（其中三个高 T/H 值的点而 $\text{Mg}^\#$ 值低， $\text{Mg}^\#$ 点为辉石岩）。

Fig. 9 $\text{Mg}^\#$ vs. $T(^{\circ}\text{C})/H(\text{km})$ in garnets from peridotites

表2 石榴石成分(%)及其温度压力计算值

Table 2 The composition (%) of garnets and their calculated values of pressure and temperature

序号	样品	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	Mg [#]	Ni	T(°C)	P(GPa)	h(km)
1	Ch	41.37	0.17	15.82	10.11	6.32	0.19	21.69	4.33	0.02	0.00	100.02	0.859	63.4	1120.5	5.18	170.9
2	Ch	41.35	0.14	16.17	10.09	6.49	0.30	21.55	4.37	0.00	0.00	100.46	0.855	62.4	1114.9	5.13	169.3
3	Ch	41.09	0.15	15.83	10.13	6.45	0.30	21.33	4.33	0.01	0.01	99.63	0.855	61.2	1107.7	5.14	169.6
4	Ch	41.06	0.14	15.81	10.49	6.50	0.20	21.32	4.45	0.02	0.00	99.99	0.854	64.0	1123.8	5.18	170.9
5	Ch	41.52	0.13	15.67	10.38	6.19	0.22	21.67	4.51	0.03	0.00	100.32	0.862	64.1	1124.7	5.20	171.6
6	Ch	41.30	0.15	15.86	10.41	6.64	0.25	21.62	4.46	0.00	0.00	100.69	0.846	62.5	1115.0	4.82	159.1
7	Ch	41.21	0.19	15.88	10.25	6.33	0.24	21.57	4.37	0.01	0.00	100.05	0.843	89.3	1259.6	5.03	166.0
8	Ch	41.28	0.00	16.66	9.51	6.64	0.27	20.41	5.51	0.02	0.00	100.30	0.847	97.2	1298.3	5.03	166.0
9	Ch	41.10	0.04	16.19	9.59	6.78	0.18	20.38	5.30	0.00	0.00	99.56	0.842	62.8	1117.2	4.81	158.7
10	Ch	41.61	0.07	19.66	5.22	6.82	0.28	20.93	5.30	0.01	0.00	99.90	0.846	65.5	1132.9	4.84	159.7
11	L	41.94	0.15	20.33	4.47	7.25	0.33	20.93	4.99	0.03	0.00	100.42	0.845	47.9	1024.5	3.91	129.0
12	L	41.73	0.30	21.42	2.81	8.03	0.20	19.68	6.56	0.03	0.01	100.77	0.837	35.6	935.5	3.61	119.1
13	W	41.34	0.57	20.00	3.98	8.38	0.39	19.83	5.90	0.06	0.00	100.45	0.814	42.2	984.7	2.75	90.8
14	L	41.52	0.18	19.75	4.98	7.25	0.37	20.71	5.01	0.04	0.00	99.81	0.808	47.6	1022.4	3.32	109.6
15	L	41.20	0.60	16.75	7.92	6.50	0.21	20.45	6.36	0.05	0.01	100.05	0.836	64.1	1124.7	4.00	132.0
16	L	41.44	0.27	21.59	2.49	8.28	0.27	19.76	6.55	0.04	0.00	100.69	0.849	69.1	1152.8	4.59	151.5
17	W	41.82	0.27	21.45	2.42	8.21	0.28	19.76	6.51	0.01	0.00	100.73	0.810	42.7	988.4	2.61	86.1
18	W	41.23	0.57	19.90	4.09	8.33	0.49	19.60	5.99	0.04	0.01	100.25	0.811	44.5	1001.0	2.60	85.8
19	L	41.93	0.23	20.74	3.62	7.39	0.36	21.14	4.75	0.08	0.00	100.24	0.807	50.4	1040.6	3.35	110.6
20	L	42.41	0.63	20.38	3.20	7.20	0.31	22.09	4.44	0.09	0.01	100.76	0.836	40.9	975.3	3.42	112.9
21	L	41.68	0.55	19.94	3.85	8.34	0.35	19.78	5.95	0.07	0.02	100.53	0.845	97.9	1301.5	3.66	120.8
22	L	42.08	0.06	19.56	5.28	6.34	0.24	21.51	5.21	0.03	0.00	100.31	0.809	52.1	1051.4	3.30	108.9
23	L	41.85	0.03	21.45	3.09	7.56	0.32	21.33	4.79	0.02	0.01	100.45	0.858	62.3	1113.9	4.10	135.3
24	L	41.74	0.11	20.33	4.57	7.48	0.29	21.06	5.01	0.01	0.00	100.60	0.834	53.2	1058.7	3.26	107.6
25	L	40.69	0.40	21.97	0.06	15.71	0.42	14.34	6.40	0.11	0.00	100.10	0.834	33.1	915.8	3.61	119.1
26	LC	42.45	0.41	20.00	3.31	6.97	0.27	21.96	4.75	0.04	0.01	100.17	0.619	44.8	1002.8	1.85	61.0
27	L	42.58	0.49	20.03	3.20	7.04	0.26	22.34	4.80	0.05	0.00	100.79	0.849	107.7	1347.9	3.70	122.1
28	L	41.96	0.72	20.06	3.40	7.72	0.31	21.15	5.39	0.08	0.00	100.79	0.850	115.7	1384.6	3.67	121.1
29	L	42.54	0.44	19.98	3.40	6.87	0.30	22.09	4.72	0.04	0.00	100.38	0.830	78.4	1203.6	3.46	114.2
30	L	42.39	0.62	20.97	2.29	8.01	0.35	21.04	5.03	0.06	0.00	100.76	0.851	113.0	1372.1	3.76	124.1
31	L	42.04	0.60	20.74	2.28	8.03	0.31	21.25	5.06	0.04	0.01	100.36	0.824	70.7	1161.7	2.90	95.7
32	L	40.82	0.38	22.11	0.09	16.40	0.42	14.62	6.36	0.10	0.00	101.30	0.825	37.2	948.0	2.74	90.4
33	LC	42.13	0.60	20.91	2.56	8.43	0.31	21.28	5.01	0.06	0.00	101.29	0.614	88.9	1257.7	1.86	61.3
34	L	42.56	0.36	20.32	3.32	7.07	0.26	22.30	4.69	0.06	0.00	100.94	0.818	117.2	1391.3	3.18	104.9
35	L	42.30	0.41	20.23	3.45	7.34	0.23	22.40	4.64	0.05	0.01	101.06	0.849	115.8	1384.8	3.73	123.1
36	L	42.10	0.61	20.86	2.27	8.28	0.22	20.83	4.90	0.07	0.00	100.14	0.818	78.6	1204.5	2.93	96.7
37	L	42.28	0.60	20.85	2.49	8.42	0.25	21.07	5.05	0.05	0.01	101.07	0.817	74.5	1182.9	3.02	99.7
38	LC	40.80	0.44	22.32	0.08	15.55	0.33	14.78	6.37	0.10	0.00	100.77	0.629	49.7	1036.3	1.85	61.2
39	L	41.92	0.57	19.94	3.20	7.63	0.36	21.08	5.33	0.07	0.00	100.10	0.831	79.3	1208.3	3.40	112.2
40	L	42.51	0.49	19.93	3.06	7.01	0.21	21.96	4.81	0.04	0.00	100.02	0.848	119.6	1402.1	3.60	118.8
41	L	42.04	0.25	18.63	5.34	6.46	0.25	21.88	5.33	0.03	0.00	100.21	0.858	130.1	1448.0	4.42	145.9
42	L	41.63	0.58	17.27	7.12	6.48	0.22	21.05	5.43	0.04	0.00	99.82	0.863	45.1	1005.5	3.89	128.4
43	L	41.97	0.57	17.42	6.65	6.39	0.21	21.06	5.34	0.06	0.00	99.67	0.855	103.7	1329.0	4.74	156.4
44	L	41.72	0.60	17.35	7.16	6.38	0.22	21.09	5.49	0.04	0.01	100.06	0.855	152.1	1540.9	4.94	163.0
45	L	41.83	0.57	17.58	6.81	6.44	0.24	21.50	5.46	0.05	0.00	100.48	0.856	103.7	1329.3	4.76	157.1
46	L	41.71	0.52	17.43	6.79	6.54	0.23	21.15	5.46	0.04	0.00	99.87	0.852	102.9	1325.3	4.74	156.4
47	L	41.65	0.53	17.77	6.87	6.37	0.17	21.17	5.46	0.04	0.00	100.03	0.856	102.8	1324.9	4.73	156.1
48	Ch	41.19	0.63	18.21	6.15	7.36	0.27	20.98	4.98	0.06	0.00	99.83	0.836	75.8	1189.6	4.49	148.2
49	L	41.95	0.12	18.65	6.44	6.80	0.18	20.96	5.22	0.05	0.00	100.37	0.846	72.0	1169.2	4.45	146.9
50	Ch	41.79	0.18	18.54	6.31	7.18	0.33	21.27	5.03	0.06	0.01	100.70	0.841	72.5	1171.9	4.49	148.2
51	L	41.33	0.59	18.29	6.28	7.32	0.26	20.81	5.14	0.07	0.00	100.09	0.835	78.4	1203.4	4.48	147.8
52	L	41.58	0.36	18.46	6.33	7.17	0.33	21.29	5.09	0.04	0.00	100.65	0.841	73.8	1178.7	4.50	148.5

序号 1~25 辽宁复县, 26~52 山东蒙阴; Ch 为 Ca-方辉橄榄岩, L 为二辉橄榄岩, W 为异利辉橄榄岩, LC 为低 Ca-石榴石辉石岩; Ni (μg/g) 为激光 ICP-MS 结果; 其他元素为电子探针分析结果; 表中 h 为推算的形成深度; 分析单位: 澳大利亚 Macquarie 大学; 分析人: 郑建平, 姚士新。

他们时已发生了一定的改造, 形成较多的富集型二辉橄榄岩或异剥橄榄岩。这种改造作用主要是通过长期的熔流体与原橄榄岩相互作用的结果。图 9 表示了蒙阴与复县两地地幔橄榄岩平衡温压的对比, 除蒙阴辉石岩有极低的石榴石 $Mg^{#}$ 值和反映极高的地温增温外, 蒙阴橄榄岩也有稍高的地温增温和较高的石榴石 $Mg^{#}$ 值。

6 主要认识

(1) 华北东部古生代岩石圈地幔经历过复杂的多旋回多阶段熔融岩浆、重结晶、变质和剪切变形历史, 因而岩石组成、结构复杂。

(2) 地幔橄榄岩的主元素、地幔矿物特别是金刚石中的包裹体的 $Mg^{#}$ 值及 $Cr^{#}$ 值等显示古生代岩石圈地幔高度难熔亏损玄武质的成分特征, 而地幔橄榄岩的不相容元素、同位素显示高度富集地幔的特点。古生代岩石圈地幔的高难熔和强富集两重性是克拉通岩石圈地幔的特征。

(3) 华北东部古生代岩石圈地幔 Pb 同位素反映冈瓦纳大陆地幔的特点。复县和蒙阴古生代岩石圈地幔尽管都具有太古代克拉通地幔的特点, 但存在着不均一性, 前者受克拉通化后的深部作用影响要强于后者。该不均一性的存在不支持 Xu and Zhu (1994) 有关郯庐断裂带经历 750km 移距的估计。

(4) 华北东部自古生代至新生代地幔 Sr、Nd 同位素从富集向亏损的转变暗示岩石圈的减薄伴有新生代地幔物质对古老岩石圈的置换和混合作用。

References

- Boyd F. 1989. Composition and distinction between oceanic and cratonic lithosphere. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 96: 15~26
- Chen F. 1996. Hydrogen: The important source of fluid in earth interior. *Earth Science Frontiers*, 3: 72~78 (in Chinese with English abstract)
- Chen S, Zhou X, O'Reilly S, Griffin W, Zhang G and Zhang M. 1997. Laser ICP-MS of diopside and its geological meaning, *Chinese Science Bulletin*, 42 (16): 1707~1711 (in Chinese)
- Fan Q and Liu R. 1996. High temperature granulite from Hannuoba basalts. *Chinese Science Bulletin*, 41 (3): 235~238 (in Chinese)
- Fan W and Menzies M. 1994. Sr and Nd isotopic composition of the Ultramafic Xenoliths from eastern China: inferences about the structure of the subcontinental lithosphere mantle and the origin of basaltic magmas. *Geotectonica et Metallogenia*, 18: 39~50
- Griffin W and O'Reilly S. 1989. Ni in chrome pyrope garnets: a new thermometer. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 103: 199~203
- Kolesnik Y. 1995. Genetic classification of pyropes of the ultramafic rocks. Russia, Abstract of 6th International Kimberlite Conference, 286~289
- Liu C. 1992. Isotope and trace element geochemistry of alkali basalts and associated megacrysts from Huangyishan volcano, Kuandian, Liaoning, NE China. *Chemical Geology*, 97: 219~231
- Liu G, Miao Q and Lu Q. 1991. Discovery of new complex inclusions in diamond and their genesis. *Geological Science and Technology Information*, 10 (Sup): 117~124 (in Chinese with English abstract)
- Lu F, Han Z and Zheng J. 1991. Characteristics of Palaeozoic lithospheric mantle in Fuxian, Liaoning province. *Geological Science and Technology Information*, 10 (Sup): 1~20 (in Chinese with English abstract)
- Lu F and Zheng J. 1996. Palaeozoic nature and deep processes of lithospheric mantle in North China platform. In: Chi J and Lu F (Eds). *Kimberlites and Palaeozoic mantle beneath North China platform*. Beijing: Science Press, 215~274 (in Chinese)
- Mercier J. 1976. Single-pyroxene geothermometry and geobarometry. *American Mineralogy*, 61: 601~615
- Ryan C, Griffin W and O'Reilly S. 1996. Garnet geotherms: p - T data from Cr-pyrope garnet xenocrysts in volcanic rocks. *Journal of Geophysical Research*, 101 (B3): 5611~5625
- Xu J and Zhu G. 1994. Tectonic models of the Tanlu fault zone, eastern China. *Intern. Geology Review*, 36: 771~784
- Xu X, O'Reilly S, Griffin W and Zhou X. 1997. The nature of the Cenozoic lithosphere at Nushan, eastern China: in mantle dynamics and plate interactions in East Asia (ed. Flower J), *AGU Spec. Publ.* 167~196
- Xu Y, Menzies M, Mattery D and Lowry D. 1993. The upper mantle beneath the continental rift of Tanlu, Eastern China: evidence for the intra-lithospheric shear zones. *Tectonophysics*, 225: 337~360
- Xu Y, Lin C and Mercier J. 1995. Geothermal line from eastern China and its geological meaning. *Chinese Science (B)*, 25 (8): 874~881 (in Chinese)
- Zheng J, Lu F and Guo H. 1994. Study of fluid inclusions in diamonds. *Chinese Science Bulletin*, 39 (8): 670~675
- Zheng J and Lu F. 1996. Paleo-mantle fluid and its meaning in the evolution of continental craton mantle. *Earth Science Frontier*, 3: 187~194 (in Chinese with English abstract)
- Zheng J, O'Reilly S, Griffin W, Lu F and Zhang M. 1998. Nature and evolution of Cenozoic lithospheric mantle beneath Shandong peninsula, Sino-Korean craton. *Int. Geol. Rev.*, 40: 471~499
- Zheng J. 1998. Phanerozoic evolution of the subcontinental lithospheric mantle, eastern part of North China Block: mantle xenolith evidence. Cape Town: Abstract of 7th International Kimberlite Conference, 107~109
- Zhi X and Chen D. 1994. The neodymium and strontium isotopic compositions of Cenozoic alkalic basalts from Penglai and Lingqu, Shandong province. *Geological Review*, 40: 526~533 (in Chinese with English abstract)
- Zhou X and Carlson R. 1982. Temporal variability of mantle characteristics: Nd isotope of Cenozoic basalts. *E. China. Yearbook of Carnegie Institution of Washington*, 3: 501~505
- Zhou X. 1996. Subcontinental zoning vs lithosphere mapping: Review and preview. *Abstr. Volume of 30th IGC, Beijing, Geol. Soc. China*, Vol. 1 of 3, 118

附中文参考文献

- 陈丰. 1996. 氢——地球深部流体的重要源泉. *地学前缘*, 3: 72~79
- 陈绍海, 周新华, O'Reilly S, Griffin W, 张国辉, 张明. 1997. 透辉石的激光探针 ICP 质谱分析及其深部地质意义. *科学通报*, 42 (16): 1707~1711
- 樊祺诚, 刘若新. 1996. 汉诺坝玄武岩中高温麻粒岩捕虏体. *科学通报*, 41 (3): 235~238

- 刘观亮, 苗青, 陆琦. 1991. 金刚石复杂包裹体的新发现及其成因探讨. 地质科技情报, 10 (增): 117~124
- 路凤香, 韩柱国, 郑建平. 1991. 辽宁复县地区古生代岩石圈地幔特征. 地质科技情报, 10 (增): 1~20
- 路凤香, 郑建平. 1996. 华北地台古生代岩石圈地幔特征及深部过程. 见: 池际尚和路凤香主编, 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, 215~274
- 徐义刚, 林传勇, Mercier J. 1995. 中国东部上地幔地温线及其地质意义. 中国科学 (B), 25 (8): 874~881
- 郑建平, 路凤香. 1996. 古地幔流体及其在克拉通地幔演化中的意义: 以华北地台为例, 地学前缘, (3): 187~194
- 支霞臣, 陈道公. 1994. 山东蓬莱、临朐新生代碱性玄武岩的 Nd、Sr 同位素组成. 地质论评, 40: 526~533