

复杂橄榄岩捕虏体：反演岩石圈演化过程的罕见而重要的样品

张宏福

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, 9825 信箱, 北京 100029

摘要：地幔和/或下地壳中存在 2 类“复杂”橄榄岩捕虏体：一类为“混杂”，即“polymict”橄榄岩捕虏体；另一类为相对常见的“复合”，即“composite”橄榄岩捕虏体。复合橄榄岩捕虏体通常由橄榄岩和辉石岩/麻粒岩或由橄榄岩夹辉石岩脉 2 部分或多部分组成，岩相学上易于辨认，有时手标本上即可辨认。而混杂橄榄岩捕虏体为各种橄榄岩和/或辉石岩来源的矿物和熔体混杂在一起组成的构造岩，岩相学上很难辨认，只有通过矿物组成分析来判断。混杂橄榄岩捕虏体仅见于南非 Kaapvaal 克拉通金伯利岩岩管中，该类捕虏体来源于地幔塑性剪切带，记录了流/熔体参与下的地幔变形和交代作用的全过程。复合橄榄岩捕虏体较常见，出现在全球各类玄武岩和金伯利岩中。复合橄榄岩捕虏体有多种成因，如地幔变形、壳幔过渡带样品、交代作用和堆积成因等等。这些复合橄榄岩捕虏体同样记录了岩石圈地幔和/或下地壳交代作用/改造过程的中间状态。因此，这些罕见而重要的复杂橄榄岩捕虏体为大陆岩石圈动力学演化过程提供了最直接的样品。

关键词：复杂(混杂+复合)；橄榄岩捕虏体；改造过程；大陆岩石圈；动力学演化。

中图分类号：P588.12

文章编号：1000-2383(2006)01-0031-07

收稿日期：2005-09-22

Complex Peridotitic Xenoliths: Rare and Important Samples for Understanding the Lithospheric Evolution

ZHANG Hong-fu

State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, P. O. Box 9825, Beijing 100029, China

Abstract: Two types of “complex” peridotitic xenoliths exist in the earth mantle and/or lower crust: “polymict” peridotitic xenoliths and “composite” peridotitic xenoliths. Composite peridotitic xenoliths usually comprise two or more components of peridotite and pyroxenite/granulite or of peridotite with pyroxenite veins and can be easily identified in petrography, sometimes in hand samples. But the polymict peridotitic xenoliths are tectonites composed of minerals from various peridotites and/or pyroxenites and melts and brought together by mantle shear zone and difficult to identify in petrography, they must be classified by compositional analyses of constituent minerals. Polymict peridotitic xenoliths have only been found in kimberlite pipes from the Kaapvaal craton, South Africa so far. These polymict peridotitic xenoliths originated from the mantle shear zone and recorded the whole evolutionary processes of fluid/melt-assisted mantle deformation and metasomatism. Composite peridotitic xenoliths are relatively common and occur in global basalts and kimberlites of all kinds. Composite peridotitic xenoliths have a variety of origins such as mantle deformation, crust-mantle transitional zone sampling, metasomatism and accumulates, etc. These composite peridotitic xenoliths also record the intermediate stage of metasomatism and modification processes of the lithospheric mantle and/or lower crust. Therefore, these rare and important complex peridotitic xenoliths provide the most direct samples for the geodynamic evolution of the continental lithosphere.

Key words: complex (polymict+composite); peridotitic xenoliths; modification; continental lithosphere; geodynamic evolution.

众所周知,地幔橄榄岩和下地壳麻粒岩捕虏体是反演岩石圈地幔和下地壳组成、特征及其演化过程的直接样品。然而,绝大多数地幔橄榄岩和下地壳麻粒岩捕虏体具有平衡的结构和矿物组成,其能够反演的只是寄主岩(玄武岩、金伯利岩或钾镁煌斑岩)捕获前岩石圈地幔或下地壳的特征即最终结果,而非岩石圈地幔或下地壳的动态演化过程。在这方面,罕见的“复杂”(complex)地幔橄榄岩和/或下地壳麻粒岩捕虏体具有得天独厚的优势,因为这些难得的复杂地幔橄榄岩和/或下地壳麻粒岩捕虏体常具有非平衡的结构和矿物组成,从而记录了岩石圈地幔和/或下地壳的交代/改造过程的中间状态和熔/流体在岩石圈中的迁移方式。因此,这就为真正能反演岩石圈地幔和/或下地壳演化的动力学过程提供了最直接的样品和研究对象。

1 复杂捕虏体类型

“复杂”(complex)捕虏体顾名思义指的是由 2 种或 2 种以上的岩石组成的捕虏体(如橄榄岩+麻粒岩、橄榄岩+辉石岩、堆晶橄榄岩+反应产物等)或是由各种不平衡的矿物和/或岩石组成的捕虏体。岩石圈中存在 2 类复杂橄榄岩捕虏体:一类为罕见的“混杂”(polymict)橄榄岩捕虏体,另一类为相对常见的“复合”(complex)橄榄岩捕虏体。复合橄榄岩捕虏体通常由橄榄岩和辉石岩/麻粒岩或由橄榄岩夹辉石岩脉 2 部分或多部分组成,岩相学上易于辨认,有时手标本上即可辨认。而混杂橄榄岩捕虏体为各种橄榄岩和/或辉石岩来源的矿物和熔体混杂在一起组成的构造岩,岩相学上很难辨认,只有通过矿物组成分析来判断。混杂橄榄岩捕虏体仅见于南非 Kaapvaal 克拉通金伯利岩岩管中,该类捕虏体来源于地幔塑性剪切带即构造岩,记录了流/熔体参与下的地幔变形和交代作用的全过程。复合橄榄岩捕虏体较常见,出现在全球各类玄武岩和金伯利岩中。复合橄榄岩捕虏体成因相对复杂,有多种来源如地幔变形、变质分异、壳—幔过渡带样品、交代作用和堆积成因等等。这些复合橄榄岩捕虏体同样记录了岩石圈地幔和/或下地壳交代作用/改造过程的中间状态。因此,这些罕见而重要的复杂橄榄岩捕虏体为岩石圈的动力学演化过程提供了最直接的样品。

本文的目的主要是介绍这些复杂橄榄岩捕虏体,尤其是那些近年来在华北克拉通古生代金伯利

岩和中生代玄武岩以及中基性侵入岩中发现的复合橄榄岩捕虏体。因为这些捕虏体的发现提供了进一步探讨华北东部岩石圈的动态演化过程的可能。

1.1 南非混杂橄榄岩捕虏体

到目前为止,所有发现的 13 块混杂橄榄岩捕虏体皆产自南非金伯利地区的金伯利岩岩管中。Zhang (1998) 涉及到的是其中的 4 块样品(JJG1414, BD2394, BD344, BD2666)。这些混杂捕虏体皆具有复杂的结构特征(图 1, JJG1414 和 BD2394 见 Zhang *et al.* (2003) 图 1a, 1b), 即既具有残碎斑结构和变形结构又有各种交代结构和重结晶结构,其中最典型的交代结构有斜方辉石交代单斜辉石的现象(图 2), 表现为翠绿色的透辉石(中心)被棕褐色斜方辉石取代(边缘)。少数样品如 BD2666(图 1)变形和岩浆流动现象明显, 表现为橄榄石和辉石的定向排列和出现大量近相互平行的钛铁矿脉。这些混杂捕虏体的矿物颗粒大小和组成皆变化很大(Zhang *et al.*, 2000a, 2000b, 2001a, 2001b, 2003)。橄榄石存在大的变斑晶和小的粒间晶体、大的变斑晶高镁($Fo=92\sim95$)、小的晶体低镁($Fo<90$)。斜方辉石有变斑晶斜方辉石和交代成因的棕褐色斜方辉石(图 2), 其中交代斜方辉石比变斑晶斜方辉石明显富 Al 和 Cr, 但低氧同位素组成(Zhang *et al.*, 2001a)。该斜方辉石交代单斜辉石的现象提供了明确的岩石学证据, 表明在岩石圈地幔中存在交代作用形成的方辉橄榄岩。单斜辉石有被斜方辉石和金云母交代的原生翠绿色透辉石(图 2)和交代斜方辉石的次生单斜辉石(Zhang *et al.*, 2003, 图 1b)。石榴石有各种来源(Zhang *et al.*, 2003), 个别颗粒具有明显的环带结构(Zhang *et al.*, 2000b)。不同来源的石榴石的主、微量元素组成差别很大(Zhang *et al.*, 2003)。同样, 不透明矿物如钛铁矿也存在各种结构类型(Zhang *et al.*, 2001b, 图 1, 2)。而且, 在这些混杂捕虏体中所有矿物如橄榄石、斜方辉石、单斜辉石、石榴石、钛铁矿中, 同类但不同成因的矿物间存在巨大的氧同位素组成的变化(Zhang *et al.*, 2000a, 图 2 和 Zhang *et al.*, 2001b, 图 7)。甚至一块混杂捕虏体中橄榄石的氧同位素组成的变化范围超过了整个地幔橄榄岩中橄榄石的氧同位素组成(Zhang *et al.*, 2000a)。这些混杂捕虏体详细的矿物结构和组成特征已发表, 有兴趣者请参见 Zhang *et al.* (2000a, 2000b)、Zhang *et al.* (2001a, 2001b) 和 Zhang *et al.* (2003)。

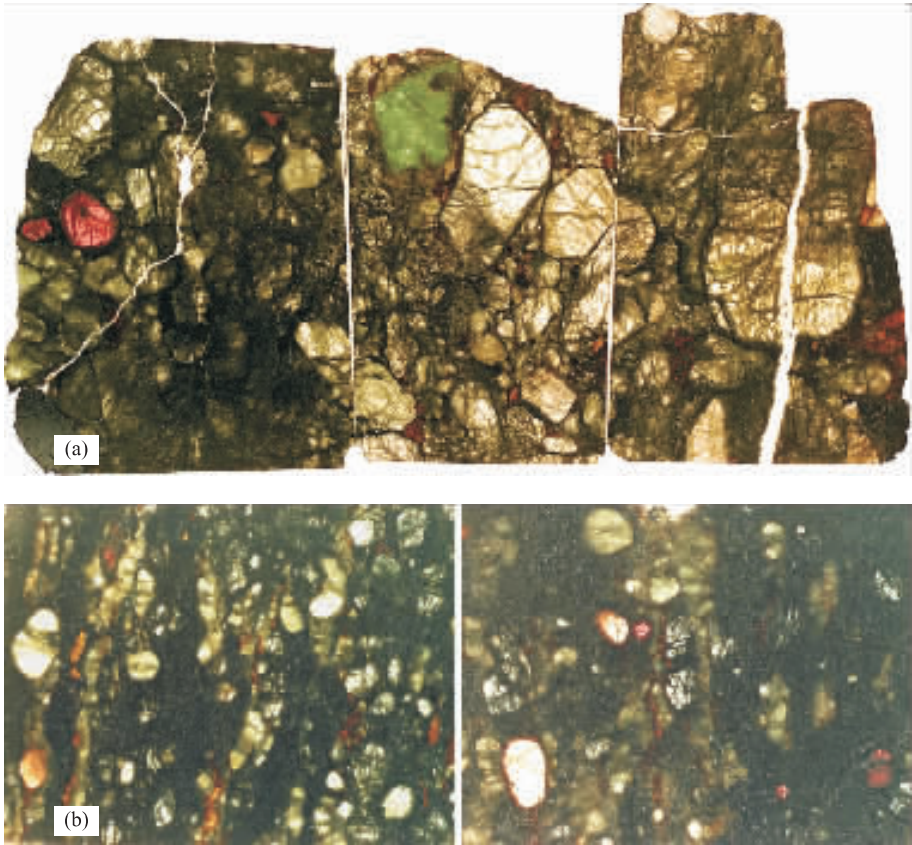


图 1 南非金伯利地区金伯利岩携带的混杂橄榄岩捕虏体

Fig. 1 Kimberlite-borne polymict peridotitic xenoliths from Kimberley, South Africa

视域宽约 5 cm. 图 a 为样品 BD344,紫红色大颗粒为镁铝榴石,黑红色粒间颗粒为金云母,翠绿色为透辉石,黑色为钛铁矿,其他为橄榄石和斜方辉石;图 b 为样品 BD2666,紫红或粉红色为石榴石,黑色为钛铁矿,浅灰色为斜方辉石,白色为橄榄石

这种巨大的结构和矿物组成的不平衡现象揭示了岩石圈地幔中存在熔/流体参与下的地幔变形作用,而地幔变形作用又加速了熔/流体的活动,导致地幔橄榄岩与熔体间发生各种相互作用. 因此,这些混杂橄榄岩捕虏体记录了岩石圈地幔的详细演化过程及其中间状态.

1.2 华北复合橄榄岩捕虏体

华北东部古生代金伯利岩和中、新生代玄武岩以及中基性侵入岩中偶尔含有复合橄榄岩捕虏体,如复县金伯利岩携带的古生代壳—幔过渡带样品(橄榄岩+麻粒岩)、鲁西中基性侵入岩携带的中生代壳—幔过渡带样品(纯橄榄岩+交代辉石岩)、方城玄武岩携带的地幔和/或下地壳底部堆晶岩样品(堆晶纯橄榄岩+辉石岩)和胶州大西状玄武岩携带的岩石圈地幔橄榄岩—熔体相互反应样品(环带状二辉橄榄岩+橄榄岩—熔体反应带). 华北东部中生代岩浆活动中相对较多的复合橄榄岩捕虏体的发现反映该时期华北东部强烈的岩石圈地幔改造过程,如橄

榄岩—熔体的相互作用和熔体在岩石圈中的运移和大量活动以及广泛而强烈的壳—幔相互作用. 因有关这些捕虏体的文章已经发表或即将发表,在此仅简要介绍这些复合捕虏体的基本特征及其所反映的重要地质意义.

1.2.1 复县古生代金伯利岩中复合橄榄岩捕虏体
复合橄榄岩捕虏体(图 3a: F50—9229)采自辽宁复县古生代金伯利岩岩区的 50 号岩管中. 复县金伯利岩就位于中奥陶世. 50 号岩管中的金云母巨晶的 Ar-Ar 平均坪年龄为 $(463.9 \pm 0.9) \text{ Ma}$ ^①, 该年龄与 Dobbs *et al.* (1994) 获得的一条很好的金云母 Rb-Sr 等时线年龄即 $(461.7 \pm 4.8) \text{ Ma}$ 一致. 该复合橄榄岩捕虏体由橄榄岩和麻粒岩组成,且橄榄岩和麻粒岩呈互层状产出(图 3a). 橄榄岩和麻粒岩的接触界线有时清楚,但多不太清楚,呈过渡状态. 橄榄岩部分

①Zhang, H. F., *et al.*, 2005. PGE elemental and isotopic constraints on the origin of Mengyin and Fuxian diamondiferous kimberlites from the North China craton; Implication for Paleozoic subducted oceanic slab-lithosphere interaction, in review.

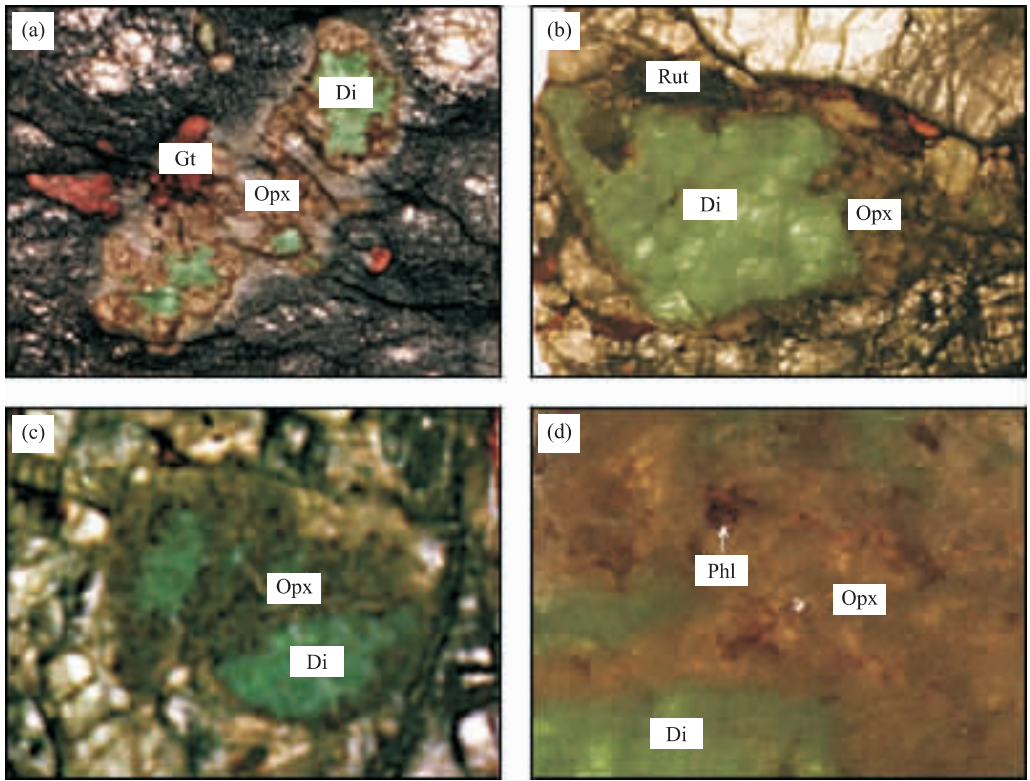


图 2 南非金伯利地区金伯利岩携带的混杂捕虏体的显微照片

Fig. 2 Micro-photographs of kimberlite-borne polymict xenoliths from Kimberley, South Africa

视域宽:图 a 为 1.5 cm, b、c 为 1.3 cm, d 为 0.5 cm. (a)斜方辉石交代单斜辉石,伴随有石榴石的形成(JJG1414);(b)斜方辉石交代单斜辉石,斜方辉石的边缘部位有金红石存在(BD344);(c)斜方辉石交代单斜辉石(BD2394);(d)斜方辉石和金云母交代单斜辉石(BD2394). Di、Opx、Gt、Phl 和 Rut 分别为透辉石、斜方辉石、石榴石、金云母和金红石的缩写. 其黑白图见 Zhang *et al.* (2001a)

为尖晶石(二辉)橄榄岩,由橄榄岩、辉石(斜方辉石和单斜辉石)、尖晶石组成,其中橄榄岩和辉石已全部蚀变.在局部出现少量的斜长石,其组成和麻粒岩中斜长石组成一致.麻粒岩为石榴石麻粒岩,主要组成矿物有石榴石(30%)、辉石(紫苏辉石,已完全蚀变,15%)、斜长石(50%)和碱性长石(5%).石榴石呈混圆状,边缘有薄的蚀变边,其不同颗粒间矿物组成非常稳定,平均组成为 40.8%, SiO₂22.2%, Al₂O₃14.9%, MgO13.6%, FeO0.3%, MnO8.1%, CaO(即钙铁铝榴石).斜长石为白色,其不同颗粒组成亦很稳定,平均组成为 57.1%, SiO₂27.9%, Al₂O₃9.5%, CaO6.1%, Na₂O0.3%, K₂O(即中长石).少量碱性长石多出现在石榴石的周围,颗粒较小,平均组成为 62.7%, SiO₂19.1%, Al₂O₃0.4%, Na₂O, 15.0%, K₂O2.7%, BaO(即含钡钾长石).

这种复合橄榄岩捕虏体的发现说明华北东部古生代时期亦存在壳—幔过渡带,即为壳—幔过渡带的直接样品.这同时也说明在古老克拉通地区和在正常地温梯度下,下地壳底部主要为石榴石麻粒岩,而不存在榴辉岩.其壳—幔过渡带岩石类型为下部尖晶石/斜长石橄榄岩和上部石榴石麻粒岩,其中石榴石麻粒岩从底部向上部逐渐增多,而橄榄岩逐渐减少.

1.2.2 鲁西中生代中基性侵入岩中复合橄榄岩捕虏体 鲁西中生代时期发育众多的中基性侵入岩杂岩体,现已发现其中 2 个杂岩体含有复合橄榄岩捕虏体:潍坊地区金岭—湖田岩体(Xu *et al.*, 2003; 张瑾等, 2005)和莱芜地区铁铜沟岩体(Chen and Zhou, 2005).金岭—湖田岩体是早白垩世(Xu *et al.*, 2003)中基性—中偏碱性侵入杂岩体,以闪长岩为主,在上湖田出现少量辉长岩.产出在上湖田辉长岩中的复合橄榄岩捕虏体由纯橄岩和少量交代辉石岩脉组成(张瑾等, 2005, 图 1).其中纯橄岩部分具残斑结构或粒状变晶结构,几乎全由橄榄石(For₂~91.5)组成,不含其他硅酸盐矿物,但含微量铬铁矿.辉石岩部分主要由斜方辉石组成,同时出现少量金云母和斜长石.矿物组合、结构构造和矿物化学研究表明其中纯橄岩为华北东部早期地壳形成时的超镁铁质岩浆的堆晶(张瑾等, 2005).其辉石岩部

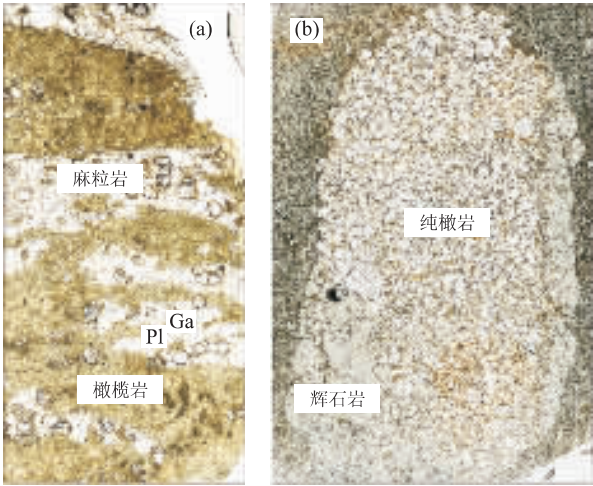


图 3 (a)辽宁复县古生代金伯利岩区 50 号岩管中产出的复合橄榄岩捕虏体(F50-9229)的探针片扫描。(b)方城玄武岩中产出的复合橄榄岩捕虏体(FC-12)的探针片扫描

Fig. 3 (a) Electron probe slice scan of a composite peridotitic xenolith (F50-9229) entrained in No. 50 pipe of Paleozoic Fuxian kimberlite field, Liaoning Province. (b) Electron probe slice scan of a composite peridotitic xenolith (FC-12) entrained in Fangcheng basalts

图 a 视域宽约 2 cm,深色部分为尖晶石/斜长石橄榄岩,浅色部分为石榴石麻粒岩;图 b 视域宽约 1 cm,捕虏体由堆晶橄榄岩(中心)和辉石岩(边缘)组成^②

分为中生代时期岩浆底侵作用交代早期堆晶形成的。该复合捕虏体记录了壳—幔相互作用和熔体交代过程。

莱芜地区铁铜沟岩体亦是一个早白垩世(Chen and Zhou, 2004)中基性侵入杂岩体,以辉石闪长岩为主。复合橄榄岩捕虏体(LW0006)产于高镁闪长岩中。主要由纯橄岩和斜方辉石岩组成(Chen and Zhou (2005),图 2, 3),含少量单斜辉石岩脉。该复合捕虏体记录了多期橄榄岩—熔体相互反应即交代作用的中间过程,尽管其原岩即高镁纯橄岩(Fo: 92.3~94.4)是早期地壳形成时的超镁铁质岩浆的堆晶产物(张瑾等,2005)。早期交代熔体富 K 和 Ca,生成矿物为金云母和单斜辉石,即生成含金云母的单斜辉石脉。晚期交代熔体为富 Si 和 Na 熔体,高的熔体—岩石比例导致纯橄岩和早期形成的单斜辉石

岩被反应,生成大量的斜方辉石岩,同时结晶出钠质斜长石、角闪石和低镁橄榄石(Chen and Zhou (2005),图 5, 6)。该复合捕虏体的详细岩石学和交代作用过程描述请参见 Chen and Zhou(2005)。

显然,两地中基性侵入岩中产出的复合橄榄岩捕虏体皆来自于下地壳底部或壳—幔过渡带内部,即为下地壳或壳—幔过渡带的样品。因此,这些复合捕虏体的发现说明中生代时期华北东部存在以岩浆底侵作用为代表的强烈的壳—幔相互作用。大量岩浆底侵作用造成早期下地壳或壳—幔过渡带岩石被改造、反应、交代,生成结构和组成复杂的新生岩石。最终导致下地壳岩石部分被置换,尤其是下地壳的镁铁质部分。

1.2.3 方城中生代玄武岩中复合橄榄岩捕虏体

鲁西方城玄武岩属早白垩世青山组火山岩的一部分,并为华北东部中生代典型的来源于岩石圈地幔的钙碱性火山岩(Zhang *et al.*, 2002)。其中该地区玄武岩中含有众多的橄榄石和辉石捕虏晶(裴福萍等,2004; Zhang *et al.*, 2004; Zhang, 2005)以及辉石岩捕虏体(Zhang *et al.*, 2002)。橄榄石捕虏晶的结构构造和岩石学以及与华北东部古生代金伯利岩和中、新生代玄武岩(许文良等,1999; Fan *et al.*, 2000; Zheng *et al.*, 2001; Yan *et al.*, 2003)中携带的橄榄岩捕虏体中橄榄石的对比研究发现华北东南部晚中生代时期岩石圈地幔存在广泛的橄榄岩—熔体的相互作用(Zhang, 2005)。相互作用的结果造成古老的高镁橄榄岩转变为晚中生代低镁橄榄岩+辉石岩以及岩石圈地幔的快速富集。现在的问题是参与反应的熔体的组成是什么?最近在方城玄武岩中发现的复合橄榄岩捕虏体(FC-12,图 3b)提供了探讨该熔体组成的可能。捕虏体的岩石学和岩石化学研究显示该复合捕虏体为地幔或下地壳底部堆晶岩^②。因此,其纯橄岩和相应的辉石岩的组成可以用来反演结晶出该复合捕虏体的熔体的组成。因堆晶纯橄岩中橄榄石的 Fo 为 81~83,根据橄榄石—熔体的 Fe-Mg 分配系数(0.3 ± 0.03)(Ford *et al.*, 1983),与之平衡的熔体的 $Mg^\#$ 应为 55~60,即结晶出该纯橄岩的熔体的 $Mg^\#$ 约为 55~60。这种熔体不同于寄主玄武岩以及华北新生代玄武岩,因为后者的 $Mg^\#$ 通常大于 65(Zhang *et al.*, 2002 及其附参考文献)。这说明这种低镁熔体可能是地壳来源而非地幔来源。同理,熔体的微量元素组成可以根据单斜辉石岩的微量元素组成获得。单斜辉石的稀土元

^②Zhang, H. F., *et al.*, Recycled crustal melt injection into lithospheric mantle: Evidence from a rare composite xenolith (in preparation).

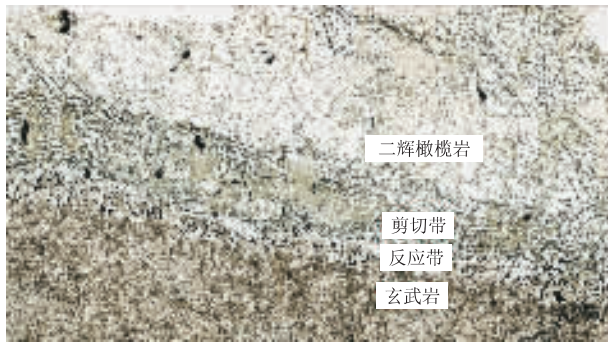


图 4 胶州大西庄晚白垩世王氏群玄武岩携带的具有环带结构的地幔橄榄岩捕虏体的显微照片

Fig. 4 Micro-photograph of zoned mantle peridotitic xenolith entrained in the Daxizhuang Late Cretaceous Wangshi Group basalt, Jiaozhou

素组成为 $(Ce/Yb)_N=9\sim 16$ 。根据 Foley *et al.* (1994) 的单斜辉石—熔体的分配系数计算出的平衡熔体组成应为 $(Ce/Yb)_N=30\sim 60$ 。该熔体具有极高的 LREE 含量,且不同于软流圈来源的华北新生代玄武岩的组成(Zhang *et al.*, 2002)。这亦说明结晶出该辉石岩的熔体组成不同于软流圈来源的镁铁质熔浆组成。结合辉石岩中含有少量云母、长石和碳酸盐矿物说明熔体富碱、硅和挥发份水和 CO_2 。因此,该复合捕虏体结晶于富硅、富钾和微量元素但低镁的熔体。该复合捕虏体的发现进一步证明晚中生代时期华北东南部岩石圈地幔中存在大量的壳源熔体的迁移。这就不可避免造成橄榄岩—熔体相互作用的发生。

1.2.4 胶州大西庄晚中生代玄武岩中复合橄榄岩捕虏体 复合橄榄岩捕虏体(图 4)采自胶州大西庄晚白垩世(~ 74 Ma, Yan *et al.*, 2003)王氏群玄武岩中,而且是目前世界上发现的唯一一块直接记录橄榄岩—熔体相互作用的岩石圈地幔橄榄岩样品。该复合橄榄岩捕虏体具有明显的环带结构(图 4),由中心尖晶石二辉橄榄岩、剪切带和反应带构成。二辉橄榄岩具中粒结构,主要组成矿物为橄榄石、斜方辉石、单斜辉石和尖晶石,其中橄榄石具有极低的 $Fo(\sim 87)$ 。剪切带具有明显的剪切结构,其组成矿物橄榄石和单斜辉石具有定性排列。反应带具有同结晶结构,主要由颗粒细小的橄榄石、单斜辉石和尖晶石组成。剪切带和反应带中未见斜方辉石。捕虏体明显的环带结构以及主、微量元素如 $Mg^\#$ 和

REE 丰度从中心二辉橄榄岩至边缘反应带的系统变化^③表明橄榄岩—熔体/岩浆的相互反应的确能够发生,其反应结果造成高镁橄榄岩向低镁橄榄岩转变。该复合捕虏体的发现暗示这种橄榄岩—熔体的相互反应可能在华北东南部中生代岩石圈地幔中普遍存在。因此,本文认为这是岩石圈地幔组成转变的重要方式。该复合橄榄岩捕虏体在岩相学上类似于南非金伯利岩中的混杂橄榄岩捕虏体。

2 结论

复杂橄榄岩捕虏体尽管数量少,但地质意义重大。这些复杂橄榄岩捕虏体记录了详细的岩石圈地幔交代/改造过程及其壳—幔相互作用等一系列岩石圈组成变迁的历史阶段。这是“简单”或“普通”地幔橄榄岩或下地壳麻粒岩捕虏体所不及的。因此,加强对复杂橄榄岩捕虏体的寻找和鉴别将是进一步理解岩石圈地幔的改造过程和壳—幔相互作用过程的重要手段,应引起足够重视。

谨以此文祝贺我们敬爱的导师路凤香教授七十七华诞。感谢高山教授和郑建平教授的约稿、郑建平教授赠送样品(F50—9229)以及国家自然科学基金委杰出青年科学基金项目(No. 40225009)和大陆动力学重点项目(No. 40534022)的资助。

References

- Chen, L. H., Zhou, X. H., 2004. Ultramafic xenoliths in Mesozoic diorite in West Shandong Province. *Sci. in China (Series D)*, 47(6): 489—499.
- Chen, L. H., Zhou, X. H., 2005. Subduction-related metasomatism in the thinning lithosphere: Evidence from a composite dunite-orthopyroxenite xenolith entrained in Mesozoic Laiwu high-Mg diorite, North China craton. *Geochem. Geophys. Geosystems*, 6(6): 1—20.
- Dobbs, P. N., Duncan, D. J., Hu, S., et al., 1994. The geology of the Mengyin kimberlites, Shandong, China. In: Meyer, H. O. A., Leonardos, O. H., eds., *Proc. 5th Int. kimberlites Conf. 1. Diamonds: Characterization, genesis and exploration*. CPRM, Brasilia, 106—115.
- Fan, W. M., Zhang, H. F., Baker, J., et al., 2000. On and off the North China craton: Where is the Archaean keel? *J. Petrol.*, 41: 933—950.
- Foley, S. F., Jenner, G. A., Jackson, S. E., et al., 1994. Trace element partition coefficients between phlogopite, clinopy-

③ Zhang, H. F., et al., Transformation of sub-continental lithospheric mantle through deformation-enhanced peridotite-melt reaction: Evidence from a highly fertile and zoned mantle xenolith (in preparation).

- roxene and matrix in an alkaline lamprophyre from Newfoundland, Canada. *Mineral. Mag.*, 58A:280—281.
- Ford, C. E., Russell, D. G., Craven, J. A., et al., 1983. Olivine-liquid equilibria: Temperature, pressure and composition dependence of the crystal/liquid cation partition coefficients for Mg, Fe^{2+} , Ca and Mn. *J. Petrol.*, 24:256—265.
- Pei, F. P., Xu, W. L., Wang, Q. H., et al., 2004. Mesozoic basalt and mineral chemistry of the mantle-derived xenocrysts in Feixian, western Shandong, China: Constraints on nature of Mesozoic lithospheric mantle. *Geol. J. China Universities*, 10(1): 88—97 (in Chinese with English abstract).
- Xu, W. L., Wang, D. Y., Gao, S., et al., 2003. Discovery of dunite and pyroxenite xenoliths in Mesozoic diorite at Jinling, western Shandong and its significance. *Chin. Sci. Bull.*, 48(15):1599—1604.
- Xu, W. L., Zheng, C. Q., Wang D. Y., 1999. The discovery of mantle- and lower crust-derived xenoliths in Mesozoic trachybasalts from western Liaoning, and their geological implications. *Geological Review*, 45 (Suppl.): 444—449 (in Chinese).
- Yan, J., Chen, J. F., Xie, Z., et al., 2003. Mantle xenoliths from Late Cretaceous basalt in eastern Shandong Province: New constraint on the timing of lithospheric thinning in eastern China. *Chin. Sci. Bull.*, 48(19): 2139—2144.
- Zhang, H. F., 1998. Petrology and geochemistry of on- and off-craton mantle rocks: Eastern China and southern Africa: [Dissertation]. University of London, Royal Holloway, 183.
- Zhang, H. F., 2005. Transformation of lithospheric mantle through peridotite-melt reaction: A case of Sino-Korean craton. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 237:768—780.
- Zhang, H. F., Matthey, D. P., Grassineau, N., et al., 2000a. Recent fluid processes in the Kaapvaal craton, South Africa: Coupled oxygen isotope and trace element disequilibrium in polymict peridotites. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 176:57—72.
- Zhang, H. F., Menzies, M. A., Gurney, J., et al., 2001a. Cratonic peridotites and silica-rich melts: Diopside-enstatite relationships in polymict xenoliths, Kaapvaal, South Africa. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 65:3365—3377.
- Zhang, H. F., Menzies, M. A., Matthey, D. P., 2003. Mixed mantle provenance: Diverse garnet compositions in polymict peridotites, Kaapvaal craton, South Africa. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 216(3):329—346.
- Zhang, H. F., Menzies, M. A., Matthey, D. P., et al., 2001b. Petrology, mineralogy and geochemistry of oxide minerals in polymict xenoliths from the Bultfontein kimberlites, South Africa: Implication for low bulk-rock oxygen isotopic ratios. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 141:367—379.
- Zhang, H. F., Menzies, M. A., Zhou, X. H., et al., 2000b. Textural and chemical zoning in garnets related to mantle metasomatism and deformation processes. *Chin. Sci. Bull.*, 45(2):174—180.
- Zhang, H. F., Sun, M., Zhou, X. H., et al., 2002. 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.*, 144:241—253.
- Zhang, H. F., Ying, J. F., Xu, P., et al., 2004. Mantle olivine xenocrysts entrained in Mesozoic basalts from the North China craton: Implication for replacement process of lithospheric mantle. *Chin. Sci. Bull.*, 49(9): 961—966.
- Zhang, J., Zhang, H. F., Ying, J. F., et al., 2005. Are the peridotitic xenoliths entrained in Late Mesozoic intermediate-mafic intrusive complexes on the North China craton the direct samples of lithospheric mantle? *Acta Petrol. Sin.*, 21(6) (in press) (in Chinese with English abstract).
- Zheng, J. P., O'Reilly, S. Y., Griffin, W. L., et al., 2001. Relict refractory mantle beneath the eastern North China block: Significance for lithosphere evolution. *Lithos*, 57:43—66.

附中文参考文献

- 裴福萍, 许文良, 王清海, 等, 2004. 鲁西费县中生代玄武岩及幔源捕虏晶的矿物化学: 对岩石圈地幔性质的制约. 高校地质学报, 10(1): 88—97.
- 许文良, 郑常青, 王冬艳, 1999. 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, 45(增刊): 444—449.
- 张瑾, 张宏福, 英基丰, 等, 2005. 华北晚中生代中基性侵入岩中橄榄岩捕虏体是岩石圈地幔直接样品? 岩石学报, 21(6)(待刊).