

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

华北地台东部古生代与新生代岩石圈 地幔特征及其演化

郑建平 路凤香

S. Y. O'Reilly W. L. Griffin 张明

(中国地质大学地球科学学院, 武汉, 430074) (曼魁里大学地质系, 澳大利亚, 悉尼)

内容提要 古生代含金刚石及捕虏体的金伯利岩和新生代含捕虏体的玄武岩先后共同侵位于华北地台东部, 提供了研究自古生代以来板内岩石圈地幔特征及其演化的深源岩石探针。通过对古生代与新生代、新生代时郯庐断裂带内与带外岩石圈地幔物质之间岩相学, 岩石和矿物的主元素、微量元素, 地幔热状态的对比研究, 结合现代地球物理资料, 建立了以新生地幔物质对古老岩石圈置换作用为主的华北地台东部地幔减薄模型。该模型强调, 古老岩石圈地幔业已存在的幔内薄弱带及郯庐断裂带为新生地幔物质和流体提供了通道。

关键词 地幔物质 置换与减薄作用 热侵蚀 幔内薄弱带 郯庐断裂带

基于对古生代与新生代之间、新生代时郯庐断裂带内与带外岩石圈地幔物质是否有差别的考虑, 本文选取山东蒙阴和辽宁复县古生代侵位金伯利岩中捕虏体及金刚石包裹体, 作为了解古生代金伯利岩侵位时及以前岩石圈地幔特征的代表; 同时选取山东临朐山旺和栖霞两地玄武岩中的捕虏体, 作为新生代时郯庐断裂带内与带外地幔特征的代表进行对比研究, 进而探讨华北地台东部岩石圈地幔演化和减薄机制。

1 古生代、新生代地幔捕虏体岩石特征对比

1.1 岩石类型

古生代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、基性麻粒岩类、变苏长岩和变辉长岩等。橄榄岩类达85%以上, 有石榴石方辉橄榄岩、石榴石(或铬铁矿)二辉橄榄岩、铬铁矿纯橄榄岩、异剥橄榄岩以及具辉石岩脉的橄榄岩复合岩石等。其中复县岩区二辉橄榄岩占54%, 方辉橄榄岩占34%; 蒙阴岩区的纯橄榄岩及方辉橄榄岩比例略高于复县岩区的。与南非 Kappvaal 太古宙克拉通地幔相比, 华北地台东部古生代岩石圈地幔的二辉橄榄岩比例较高。新生代玄武岩中捕虏体的岩石类型简单, 以橄榄岩为主, 少量辉石岩、高温基性麻粒岩。橄榄岩中以尖晶石二辉橄榄岩为主, 无或少量石榴石橄榄岩, 基本上无方辉橄榄岩。表明古生代岩石圈地幔相对耐熔成分的方辉橄榄岩在新生代已明显减少, 特别是在深大断裂带内更少或没有。如山旺(断裂带内)与栖霞(断裂带外)相比: 带内的尖晶石二辉橄榄岩中单斜辉石含量高, 出现较多的富单斜辉石二辉橄榄岩。

1.2 结构特征

注: 本文为国家自然科学基金(编号 49733110)和地质矿产部壳幔体系开放研究实验室基金资助项目。

本文 1997 年 10 月收到, 1998 年 4 月改回, 刘淑春编辑。

古生代岩石圈地幔岩石均以剪切变形结构为主,并构成残碎斑结构-剪切结构-细粒结构谱系,但存在地区差别。如复县橄榄岩中残碎斑结构和剪切结构所占比例高于蒙阴橄榄岩中的,而蒙阴橄榄岩中细粒结构者占相当比例。具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(蛇纹石化)、白云石、石英和铬铁矿等包裹体。石榴石次变边呈环带状。多重结构在地幔岩石中特别是在同一块橄榄岩、金云母岩中并存,及复合捕虏体的存在,说明华北地台东部古老岩石圈地幔经历复杂多旋回、多阶段熔融岩浆、重结晶、变质和剪切变形历史。

新生代橄榄岩的粒度变化较大,但最大粒度不及古生代金伯利岩中具捕虏晶成因的粗晶大。除郯庐断裂北部的伊通发育糜棱结构^[1]外,新生代橄榄岩中变形结构强度总体不及古生代金伯利岩中者明显,反映多旋回地幔事件的结构现象也不及古生代中者常见,表明古老岩石圈地幔经受了比新生代地幔更为复杂的历史过程。郯庐断裂带内与带外相比,带内基本上无粗粒结构残存,而细粒结构占明显优势。反映带内的不稳定结构类型所占比例要高于带外,说明大型断裂带的机械作用在地幔岩石中所产生的重要影响。

2 深源捕虏体的矿物化学特征

2.1 石榴石

(1)主元素 金刚石包裹体中石榴石与捕虏体橄榄岩中石榴石相比,具有较高 $Mg^{\#}$ ($Mg/(Mg+Fe)$) 值、 Cr_2O_3 和较低的 CaO 、 TiO_2 、 Al_2O_3 、 FeO 含量。粒状结构橄榄岩中的 Cr_2O_3 含量高于具剪切结构中者。金刚石中的包裹体作为封闭体系,受外界的影响小;而橄榄岩中的石榴石不同,特别是剪切结构橄榄岩中应力、流体的影响,体系是开放的,受后续事件影响强。石榴石 CaO - Cr_2O_3 成分表明,捕虏体中约 55% 的橄榄岩属二辉橄榄岩,这与岩相学观察相符;金刚石中包裹体除少数属二辉橄榄岩(G_9)外,绝大多数属方辉橄榄岩(G_{10}),说明金刚石稳定存在的相对耐熔环境,到金伯利岩侵位时已发生过明显的改造作用。复县有一剪切结构橄榄岩中石榴石的不同位置存在 CaO (4.10% ~ 4.35%)、 Cr_2O_3 (9.9% ~ 10.4%) 变化,该捕虏体中的石榴石为不规则状,有孤立存在的石英和白云石矿物包裹体,显示流体不均匀交代置换作用所形成的“残余孤岛式”结构,该结构与南非金伯利岩地区出现中心为低钙方辉橄榄岩向边部为二辉橄榄岩的环带^[2]不同。

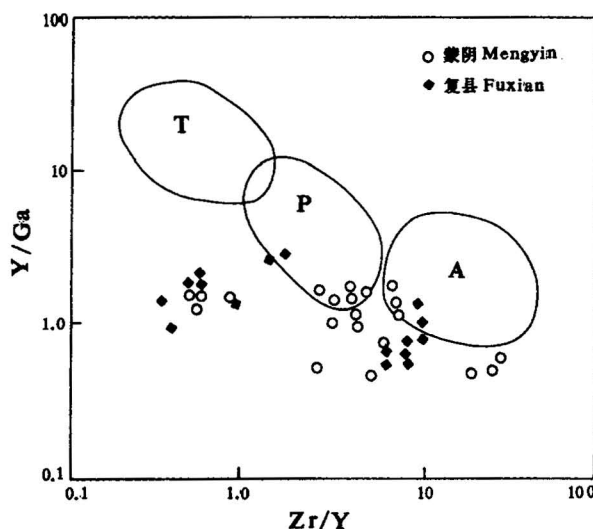


图 1 华北地台东部金伯利岩中石榴石的 Y/Ga - Zr/Y 相关图

Fig. 1 Y/Ga vs Zr/Y in garnet from kimberlites in the eastern part of the North China Block

A—太古宙克拉通;P—古元古代、中元古代克拉通;

T—新元古代克拉通(据 Griffin 等^[4])

A—Archean craton;P—Paleoproterozoic craton and Mesoproterozoic craton;T—Neoproterozoic craton(after Griffin et al. ^[4])

石榴石不同,特别是剪切结构橄榄岩中应力、流体的影响,体系是开放的,受后续事件影响强。石榴石 CaO - Cr_2O_3 成分表明,捕虏体中约 55% 的橄榄岩属二辉橄榄岩,这与岩相学观察相符;金刚石中包裹体除少数属二辉橄榄岩(G_9)外,绝大多数属方辉橄榄岩(G_{10}),说明金刚石稳定存在的相对耐熔环境,到金伯利岩侵位时已发生过明显的改造作用。复县有一剪切结构橄榄岩中石榴石的不同位置存在 CaO (4.10% ~ 4.35%)、 Cr_2O_3 (9.9% ~ 10.4%) 变化,该捕虏体中的石榴石为不规则状,有孤立存在的石英和白云石矿物包裹体,显示流体不均匀交代置换作用所形成的“残余孤岛式”结构,该结构与南非金伯利岩地区出现中心为低钙方辉橄榄岩向边部为二辉橄榄岩的环带^[2]不同。

(2)微量元素 石榴石的 Ni 、 Sr 丰度分别是原始地幔的 0.001 ~ 0.01 倍和 0.01 ~ 0.1 倍, Ga 、 Ce 、 Nb 丰度与原始地幔值相当或略低, Nd 、 Zr 、 Hf 、 Eu 、 Ti 、 Y 、

Dy、Ho 等是原始地幔丰度值的 2~10 倍。构成轻稀土 LREE(Ce—Nd)亏损、中稀土 MREE(Eu—Dy)略有富集,而重稀土 HREE(>Dy)趋向于平坦 REE 配分型式。含石英和白云石包裹体的橄榄岩捕虏体中石榴石,具轻稀土→中稀土→重稀土先升后降的曲线型式,显示强烈的地幔交代作用的影响。该现象与 Hoal 等^[3]所提供的世界范围内克拉通岩石圈地幔中石榴石的 REE 配分型式是一致的,暗示全球范围内克拉通岩石圈地幔后期所经历广泛的地幔交代作用,而与金刚石包裹体所反映的克拉通岩石圈地幔性质存在差别。Y/Ga-Zr/Y 相关图(图 1)也表示了金刚石稳定存在的太古宙克拉通地幔部分已被古元古代、中元古代,甚至新元古代克拉通地幔的置换或混合。

2.2 橄榄石

金刚石包裹体的 $Mg^{\#}$ 值为 0.911~0.940,与金伯利岩中橄榄岩捕虏体的橄榄石 $Mg^{\#}$ 值(0.894~0.944)大体相当,不同的是金刚石包裹体没有或少有贵橄榄石。具粒状结构的橄榄岩捕虏体与具残斑斑结构中者相比,富 MgO 贫 FeO 。古生代含矿金伯利岩中粗晶橄榄石 $Mg^{\#}$ 值为 0.909~0.924,略低于金刚石包裹体中者,它们总体上与 Kappvaal 克拉通岩石圈地幔中者(0.920)^[5]相当。新生代玄武岩中 I 型包体(绿色)橄榄石 $Mg^{\#}$ 值为 0.874~0.912,明显高于 II 型包体(黑色)中者(0.802~0.815)。就 I 型包体而言,郯庐断裂带外栖霞橄榄石的 $Mg^{\#}$ 值略高于带内山旺橄榄石的,并与大洋岩石圈地幔橄榄岩中者(0.890~0.910)^[5]相近,山东山旺的与之相比其值偏低,为 0.874~0.906。随地质时代发展,橄榄石的 $Mg^{\#}$ 值具有总体降低的明显趋势(如 DI→SD→QX),而且地台西缘裂陷带内的鹤壁及郯庐断裂带内的山旺,这种对比更加清楚(图 2),显示华北地台东部具古老克拉通大陆岩石圈地幔性质的方辉橄榄岩或二辉橄榄岩,在新生代已明显受具大洋岩石圈地幔特征的显生宙二辉橄榄岩取代,古生代地幔捕虏体^[6]与新生代地幔单斜辉石^[7]的 Sr-Nd 同位素对比也支持这种认识。同时也说明,古裂陷带与断裂带的熔/流体通道作用,使得深大断裂带内地幔被改造和置换作用更加明显。

2.3 单斜辉石

(1)不同时代地幔岩单斜辉石成分对比 古老岩石圈地幔中的单斜辉石与新生代中者相比,明显高 SiO_2 、低 Al_2O_3 ,并有较低含量的 CaO 、 TiO_2 和较高的 MgO 、 Cr_2O_3 及 Al^{VI}/Al^{IV} 值。这种成分特点很难孤立地用大陆的或洋中脊岩石圈的样品^[8]来区分,或纯粹地用深部作用过程^[9]来解释。较合理的解释应该是古老克拉通岩石圈地幔经历了复杂的多阶段演化历史,并由此出现多重成分特征的单斜辉石在地幔岩中的并存。新生代沿深大断裂带

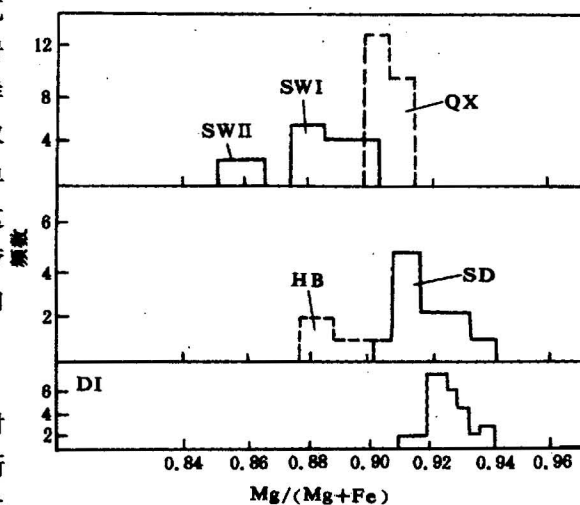


图 2 橄榄石 $Mg^{\#}$ ($Mg/(Mg+Fe)$) 值变化频率直方图

Fig. 2 Frequency distribution of $Mg^{\#}$ in olivines

DI—金刚石包裹体;HB、SD—分别为鹤壁和蒙阴金伯利岩捕虏体;QX—栖霞玄武岩中橄榄岩;SWI、SW II—分别为山旺玄武岩中 I 型和 II 型包体

DI—Inclusion in diamond;HB,SD—Hebi and Mengyin xenoliths in kimberlites;QX—peridotites from Qixia basalts;SWI,SW II—type I and II xenoliths from Shanwang basalts

内的橄榄岩中的单斜辉石(如山旺)与带外(如栖霞)中者相比,明显富 Ti、Na、Al,表明新生代对古生代置换后断裂带内的地幔受改造影响的程度要比带外更明显。

(2)单斜辉石中的微量元素 新生代玄武岩中捕虏体橄榄岩单斜辉石微量元素列于表 1。La/Ce、Th/U、Sm/Nd 值能较好反映地幔源区比值,而且对于来自同一地幔事件的样品应有相同或非常相似比值。然而从同一地区单斜辉石中的 La 和 Ce、Th 和 U、Sm 和 Nd 并未构成一条良好的线性,而是构成多条线性。该现象表示新生代玄武岩对不同深度地幔取样,或者是同一地区的地幔所经历不止一次改造事件,显示地幔中存在多事件的混杂性质。随着单斜辉石中 Mg[#] 值降低,所含 REE 总量有总体升高趋势,其配分曲线型式也存在从亏损经平坦向富集过渡的趋势^[10]。与金刚石中单斜辉石的稀土元素属明显亏损 LREE 型^[11] 明显不同。

表 1 新生代玄武岩中捕虏体橄榄岩的单斜辉石微量元素($\times 10^{-6}$)

Table 1 Trace element concentrations ($\times 10^{-6}$) of clinopyroxenes in xenoliths from Cenozoic basalts

样品号	SW4	SW10	SW12	SW14	sw36-1	sw36-2	sw36-3	sw36-4	sw36-5	SW36	QX1	QX7	QX8	QX14	QX17
Sc	71.81	62.45	66.04	67.56	62.31	69.58	74.01	73.96	62.72	66.90	58.69	75.16	72.09	58.34	60.13
Ti	475.0	7566.3	2696.1	3802.0	1929.0	1982.7	2093.9	1982.7	1926.2	1971.7	100.6	1147.4	1083.3	404.3	57.7
V	262.29	369.85	256.23	287.19	253.04	274.84	284.30	281.46	251.29	261.87	177.67	259.23	260.88	114.80	108.93
Co	19.64	31.64	18.73	20.43	16.53	20.35	20.41	20.27	17.17	19.89	20.56	17.79	18.72	18.21	19.03
Ni	329.55	242.45	308.91	310.32	285.13	320.79	329.69	353.50	291.95	318.86	354.83	275.45	282.99	307.52	312.34
Ga	3.06	11.13	4.01	4.67	3.55	3.38	4.27	4.43	3.10	4.23	1.73	2.63	2.76	2.08	1.67
Sr	34.82	83.37	103.33	120.80	55.10	157.74	302.88	328.42	44.46	130.06	38.44	14.19	11.11	12.04	18.25
Y	15.96	12.32	21.00	19.76	15.24	15.07	17.74	18.75	15.62	15.67	1.66	12.03	11.62	3.76	0.80
Zr	20.73	37.93	23.12	33.92	4.76	7.22	38.48	63.52	5.08	14.92	3.62	6.38	5.29	3.54	1.31
Nb	0.23	0.59	0.17	0.20	0.50	1.31	1.42	1.59	0.55	0.99	0.75	0.17	0.17	0.50	0.77
La	0.22	2.37	3.27	8.19	2.68	7.86	14.13	13.94	1.94	6.74	2.65	0.22	0.19	1.09	1.22
Ce	1.52	7.76	5.03	16.0	73.39	15.18	34.51	34.44	2.76	12.94	4.97	0.75	0.70	2.32	1.56
Pr	0.41	1.42	0.89	1.81	0.30	1.71	4.14	4.46	0.29	1.72	0.46	0.18	0.15	0.38	0.18
Nd	3.03	7.75	3.21	7.27	1.30	4.80	16.84	15.94	1.54	5.34	1.79	1.04	1.03	1.08	0.57
Sm	1.34	2.61	1.57	1.97	0.72	0.93	3.20	2.90	0.86	1.52	0.36	0.45	0.48	0.24	
Eu	0.52	0.99	0.63	0.85	0.37	0.58	1.17	1.04	0.31	0.78	0.20	0.27	0.22	0.13	0.19
Gd	1.96	3.14	2.49	2.53	1.52	1.41	2.89	3.20	1.56	2.03		1.13	1.01	0.31	
Tb	0.37	0.46	0.51	0.47	0.32	0.32	0.46	0.50	0.31	0.86		0.24	0.22	0.07	
Dy	2.87	2.91	3.90	3.63	2.82	2.09	3.37	3.32	2.65	2.69	0.52	1.97	1.77	0.48	
Ho	0.62	0.52	0.94	0.81	0.55	0.67	0.71	0.69	0.69	0.70	0.13	0.50	0.46	0.16	0.10
Er	1.70	1.29	2.46	2.27	1.56	1.77	1.81	2.10	1.39	1.68	0.23	1.42	1.53	0.41	0.22
Tm	0.27	0.14	0.37	0.31	0.28	0.27	0.22	0.31	0.26	0.37	0.12	0.26	0.20	0.10	0.08
Yb	1.69	0.81	2.43	2.10	1.77	1.33	1.81	1.81	1.44	1.68	0.40	1.64	1.40	0.52	0.34
Lu	0.24	0.15	0.35	0.34	0.25	0.24	0.19	0.29	0.22	0.28		0.26	0.21	0.12	0.10
Hf	0.76	1.75	1.03	1.20	0.42	0.56	0.79	1.00	<0.28	0.60		0.40	0.28	0.22	
Pb	0.44	0.42	0.37	0.40	0.42	0.29	0.46	0.35	<0.40	0.99	0.32			0.78	0.41
Th		0.17	0.50	1.15	0.41	0.58	0.64	0.60	0.31	0.55	0.18	0.10		0.11	0.14
U	0.24	0.15	0.21	0.41	0.28	0.21	0.41	0.29	0.54	0.79	0.49			0.45	0.38

3 深源捕虏体的地球化学特征

3.1 主元素特征

蒙阴除具剪切结构的 Sp9104 号样品外,其它的橄榄岩均以低 $\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3$ 、和较低 FeO/MgO 值为特征,投点均在线的左侧。复县与蒙阴橄榄岩相比,高 $\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3$,其中剪切结构者有高 $\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3$ 和低 $\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3$ 两种类型。低 $\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3$ 者与具粒状结构者重叠(图

3A), 投点在线的两侧。表明蒙阴的岩石圈地幔比复县的更具耐熔性, 复县岩石圈地幔中具粒状结构者比具剪切结构者更耐熔, 即复县岩石圈地幔总体上比蒙阴的具有相对饱满的玄武质组分, 而且剪切结构者饱满程度更高。与古生代不同的是新生代样品均分布线的右侧。郯庐断裂带内山旺与带外栖霞橄榄岩相比, 具高 $\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3$ 值 (图 3B), 表明郯庐断裂带内岩石圈地幔中比带外的富玄武质组分。

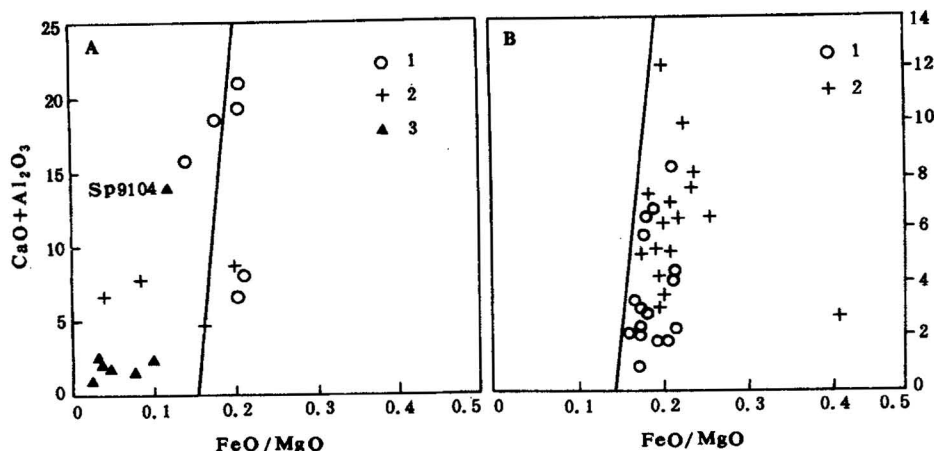


图 3 橄榄岩 $\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3$ - FeO/MgO 相关图

Fig. 3 Diagram of $\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3$ vs FeO/MgO of peridotites

直线右侧是尖晶石相橄榄岩及高温具剪切结构石榴石相橄榄岩, 左侧是低温具粒状结构石榴石相橄榄岩^[12]; A—古生代: 1—复县剪切结构橄榄岩, 2—复县粒状结构橄榄岩, 3—蒙阴橄榄岩 (其中 Sp9104 为剪切结构, 其它为粒状结构); B—新生代: 1—郯庐断裂带外橄榄岩 (栖霞), 2—郯庐断裂带内橄榄岩 (山旺)

The right of the line, spinel peridotite, and garnet peridotite with shear structure and high temperature. The left of the line, garnet peridotite with grain structure^[12]; A—Paleozoic: 1—peridotite with shear structure from Fuxian, 2—peridotite with grain structure from Fuxian, 3—peridotite from Mengyin (Sp9104 belongs to shear structure, Others with grain structure); B—Cenozoic: 1—peridotite from Qixia, lies east of the Tanlu fault, 2—peridotite from Shanwang, lies astride the fault

3.2 稀土元素特征

华北地台古生代岩石圈地幔样品总的特点, 是具有稀土总量高而且富集轻稀土 (图 4), 与 Kappvaal 克拉通的相同岩石相比, 显示了 LREE 富集程度很高的特征。岩石结构与稀土特征的依赖关系也明显不同于 Kappvaal 克拉通。在 Kappvaal 克拉通中具粒状结构橄榄岩被认为属低温型, 来自岩石圈, 具 LREE 富集, La 富集 9~20 倍; 具剪切结构橄榄岩被认为属高温型, 来自软流圈, 既富 LREE 也富集 HREE, 分配型式呈 MREE 下凹型^[13]或平坦型^[14], La 富集 1.2~8 倍。而华北地台东部古生代地幔具粒状结构的橄榄岩含 REE 低 (如图 4 中 F50-8648 和 F50-87), 而具剪切结构橄榄岩含 REE 高 (图 4 中 F9215、F92142)。据石榴石中 Cr_2O_3 含量估算具剪切结构的样品深度为 139~165 km, 属受流体明显交代的岩石圈地幔样品, 表明岩石圈地幔中存在剪切带。新生代玄武岩中的尖晶石二辉橄榄岩稀土总量和轻稀土的富集程度远不及古生代中的, 有的样品 (图 4 中 SS-2) 与球粒陨石值相当。

4 岩石圈的地幔热状态

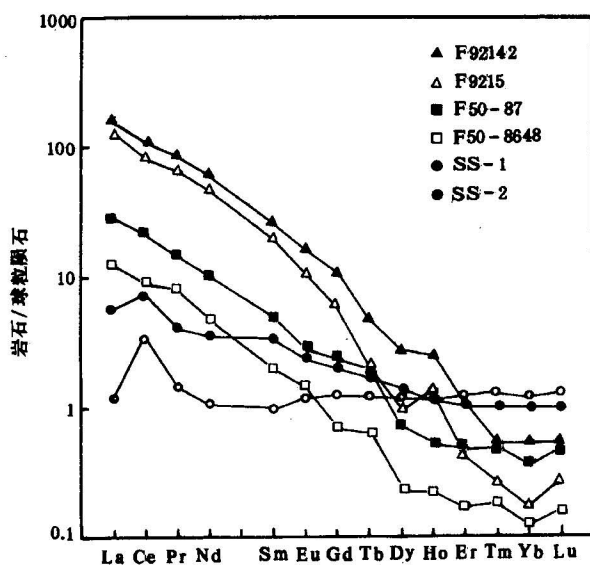


图4 橄榄岩REE配分曲线

Fig. 4 REE distribution pattern of peridotites

F92142, F9215—古生代剪切结构橄榄岩; F50-87, F50-8648—古生代粒状结构橄榄岩; SS-1, SS-2—新生代尖晶石二辉橄榄岩

Sample F92142, F9215—Paleozoic peridotites with shear structure; F50-87, F50-8648—Paleozoic peridotites with grain structure; SS-1, SS-2—Cenozoic spinel lherzolites

区中; 另一方面也表明金刚石稳定的橄榄岩环境, 在金伯利岩侵位并捕虏它们时已发生了明显的改造, 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^[22, 24]。

对山旺和栖霞尖晶石二辉橄榄岩采用不同的温度估算方法^[17, 18]进行平衡温度的计算和对比。在相同深度条件下, 各种方法都表现出山旺高出栖霞25~50℃的良好规律性, 说明沿郯庐断裂带内地幔的温度状态总体上要高于带外的地幔。这表明深大断裂带不仅是热流, 而且也是热质传输通道, 并有流体、化学、热及机械的耦合作用^[25]。山东山旺和安徽女山都在郯庐断裂带上, 由所获得的尖晶石二辉橄榄岩最低估算温度(850℃), 按照女山地温线^[26]所确定的壳幔边界(CMB)^[27]深度为31.5 km, 相当于莫霍面深度^[28]。如果栖霞用地球物理方法所获得的莫霍面深度^[28]和825℃的尖晶石二辉橄榄岩最低温度计算值, 那么所确定的栖霞地温尽管低于女山地温, 但仍高于现代大洋地温。这也与山旺现代热流值(用郯庐断裂带中者, 平均值68.6 mW/m²)明显高于栖霞现代热流值(鲁东, 44.9~55.3 mW/m²)是吻合的。中国东部地区天然气的幔源稀有气体氦同位素对比^[29], 同样表明郯庐断裂带的深部流体通道作用。

5 华北地台东部岩石圈地幔演化

5.1 古老岩石圈地幔存在多发事件和幔内薄弱带

华北地台中奥陶世晚期发生大规模造陆抬升^[30], 同时金伯利岩中携带大量的地幔捕虏体, 反映了岩石圈所处的拉伸状态, 表明大陆克拉通造陆运动与金伯利岩岩浆形成存在内在联系。金伯利岩中强烈变质的基性麻粒岩及变质不彻底的粗粒辉长岩在同一岩管中共存, 表明华

笔者曾采用金刚石包裹体矿物, 应用近年来发表的并经试用良好的地幔温压计^[15~18]及传统的被公认的地幔压力计^[19]进行计算, 获得华北克拉通古地温曲线, 相当于40 mW/m²^[20]。世界范围内含金刚石的低钙方辉橄榄岩或亏损的二辉橄榄岩也在金刚石稳定区内的该范围中^[21]。古生代地幔捕虏体中石榴石和铬尖晶石来源深度及平衡温度值, 分别依据石榴石中Ni温度计, 铬尖晶石中的Zn温度计^[22]及石榴石、铬尖晶石中的Cr₂O₃压力计^[23]获得的。所确定的温压均高于由金刚石中的辉石温压计所确定的40 mW/m²古地温线。高温样品的压力范围多在(20~40)×10⁸ Pa(相当于65~130 km)间, 该深度范围内地幔的交代作用特别发育(如大量的沂蒙矿、钛钾铬石等就发育于该深度范围), 世界范围内不含金刚石的高钙方辉橄榄岩、二辉橄榄岩、异剥橄榄岩也常分布于该区中。一方面表明捕虏体的主要取样位置不在金刚石稳定

北古老岩石圈壳下所发生的多次增生作用事件。幔内薄弱带是指地幔内与流体活动密切相关的地幔伟晶岩带、幔内剪切带及地幔富集带。古老岩石圈地幔中熔/流体活动形成的地幔伟晶岩(如富含流体的石榴石辉石岩、钛榴石磷灰石岩等),不但富含流体、LREE,也富含放射性生热元素。加之岩石粒度粗大,受破碎的稳定性较差,后续流体传质作用容易渗透和平流,起到幔内薄弱带作用。林传勇等^[1]通过伊通幔源捕虏体中糜棱岩的研究,指出地幔剪切带的存在,并且发现其中有完全不同于寄主玄武岩浆的富钾玻璃熔、流体。华北地台东部古老岩石圈地幔和新生代岩石圈地幔中广泛发育的、反映岩石圈流变行为的残碎斑状结构和剪切变形结构等,而且具该结构的深部岩石更富集不相容元素,是幔内剪切带变形的产物,变形的驱动力与流体的交代作用密切相关^[25,31,32]。流体作为一种传质介质,在构造动力成岩中对变形岩石的化学成分起到明显的带入或带出作用,体系是开放的,在岩石的脆性向脆韧性变形转换过程中起着重要作用。特别是流体所导致的弱化是应变软化的重要途径,即流体对晶质矿物晶格产生弱化作用,并形成比 Si-O 键弱的其他弱键。流体还可以增加润滑性,减少滑动阻力,加速压溶作用和组分的迁移。大陆岩石圈结构、岩性的不均一性是造成应变易于集中的原因,岩石圈中的软弱岩成为应变集中的地带,而应变软化和应变局部化又增加或导致大陆岩石圈结构的更加不均一性。剪切热效应导致剪切带内介质的弱化和软化,降低了岩石的强度、密度和粘度;同时由于均衡补偿效应可以使地幔上隆,并具熔融岩浆作用,部分熔融物又引起矿物颗粒边界弱化,使上地幔的流变强度和有效粘度进一步降低^[33,34]。

5.2 华北地台东部岩石圈地幔演化

软流圈的性质、埋深及热状态直接控制上覆岩石圈动力学的进程^[35],而其又受隙间熔浆、流体数量影响。幔内低阻层^[36]、低速层^[37]、CT 断面资料^[38]及岩石圈地球物理构造格架综合资料^[39],均显示华北地台陆下下地壳及上地幔所发育的低速体不是均匀的层状,而是高、低速相间的不规则的块状显示。现今地幔在不同尺度范围内形成的软硬相间格架,及上地幔复杂的层状—断块构造^[40]、地幔塑性流动网络^[41],可能是幔内薄弱带存在的表现。从华北地幔内低速体的宏观形态上看,呈现“蘑菇云状”,像是低速体从 150 km 深度下沿幔内薄弱带呈不规则柱状体上升,并在 65~130 km 处向四周延展所致。而郯庐断裂带及燕山地区,低速体的上升最为明显。扬子地台与中朝地块在印支期中晚期发生南北向挤压与碰撞,使得中国大陆东部进入陆内发展阶段^[42],同时引起中朝地块东西两部分不均匀缩短,造成 NNE 走向的郯庐断裂带大规模走滑,于 23.3~0.37 Ma 时切入上地幔^[43]。由于郯庐断裂带的深切,把古老岩石圈地幔中业已存在的地幔薄弱带更好的连接起来,构成幔内薄弱带的树枝状网络图案,为新生软流体上升提供良好的通道作用。Vissers^[44]曾讨论地幔剪切带在大陆裂解过程中起着关键性作用,特别是简单剪切变形所产生的强烈不对称构造^[45],以至壳上伸展量明显不同于壳下伸展量,壳幔明显折离,使壳幔变薄区位置明显分离,这将能很好地解释华北地台东部岩石圈地幔演化及其浅部盆地的形成等。地幔熔/流体的活动贯穿地幔的历史演化中,并在不同深度下形成不规则的富含流体的地幔伟晶岩、交代富集带及幔内剪切带(图 5)。它们不但富含流体、LREE,也含放射性生热元素。随着地幔演化的发展,来自深部的熔/流体不断在岩石圈中聚集,至此体系相对平衡,具有流体、化学、热、机械应力的耦合作用,发展的结果有可能进一步引发熔融作用,形成新生熔体的上升或分流。中生代晚期和新生代时期库拉—太平洋板块的俯冲作用,以及郯庐断裂带的影响和深切作用,打破了原有的“平衡”,出现强烈的热、化学、流体及应力的不平衡,即发生拆离作用。地幔对流加剧,上涌的新生软流体顶蚀置换岩石圈,从而造成了沿早期业已

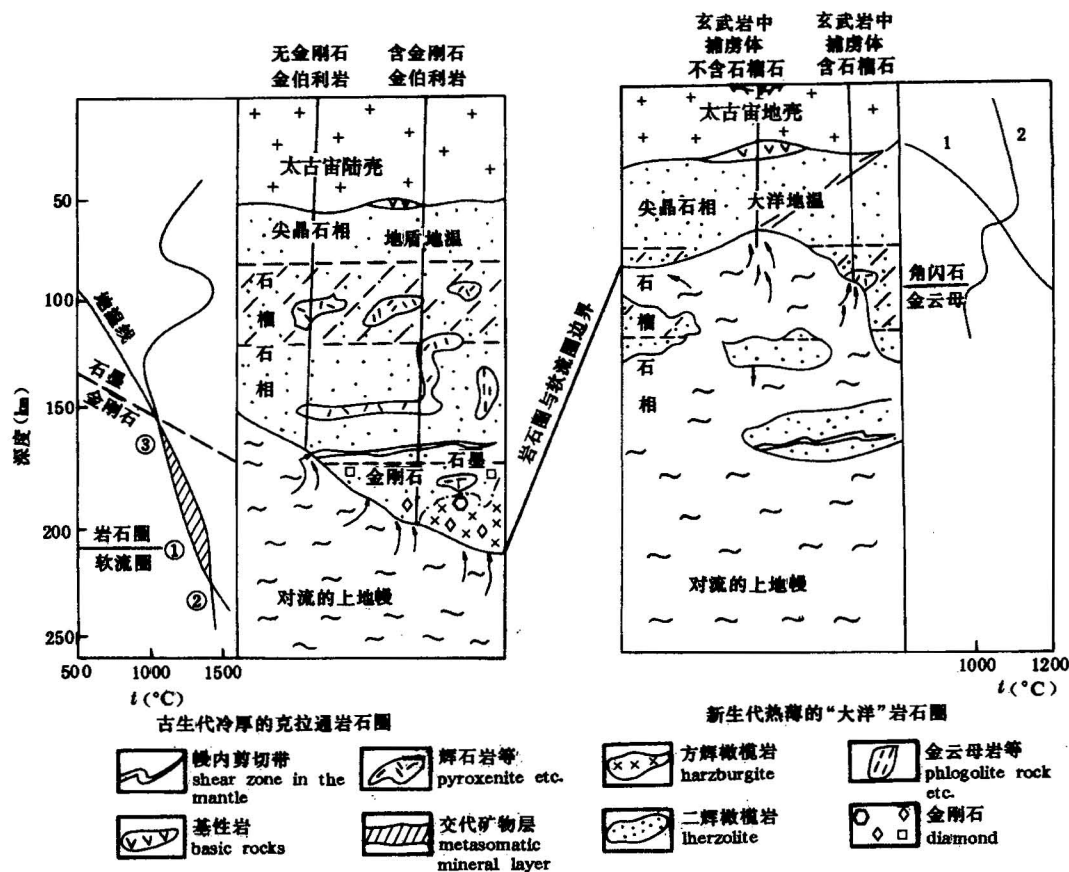


图 5 华北地台东部古生代及新生代岩石圈地幔及软流圈界面变迁示意图

Fig. 5 Sketch map showing changes of the boundary between the lithosphere and asthenosphere during the Palaeozoic—Cenozoic in the eastern part of the North China Block

古生代橄辉岩 CHO 固相线引自 Wyllie^[46]; 新生代的地温线(1)引自徐义刚等^[47]及地幔含少量 CO₂ 和 H₂O 固相线; (2)引自 Olafsson M, Eggler D H^[48]

Palaeozoic peridotite-CHO solidus from Wyllie^[46]; Cenozoic geotherm (1) adapted from Xu et al.^[47] and peridotite solidus bearing H₂O and CO₂; (2) adapted from Olafsson M, Eggler D H^[48]

存在的幔内薄弱带网络,出现类似“蘑菇云状”的地幔不规则减薄。这种减薄以新生软流体取代岩石圈为主,并可能伴随一定程度的岩石圈拆沉作用发生。

参 考 文 献

- 林传勇,史兰斌,陈孝德,张小鸥,徐义刚, Mercier J C C. 浙江新昌石榴石二辉橄辉岩包体的流变特征及其地质意义. 岩石学报, 1995, 11(1): 55~63.
- Schulze D J. Low Ca garnet harzburgites from kimberley, South Africa; Abundance and bearing on the structure and evolution of the lithosphere. NAL of Geolophysical Research, 1995, 100(B7): 12513~12526.
- Hoal K E, Hoal B G, Erlank A J, Shimizu N. Metasomatism of the mantle lithosphere recorded by REE in garnets. Earth Planet. Sci. Lett., 1994, 126: 303~313.
- Griffin W L, O'Reilly S Y. The composition and origin of sub-continental lithospheric mantle. 1998.
- Boyd F R. Composition and distinction between oceanic and cratonic lithosphere. Earth Planet. Sci. Lett., 1989, 96: 15~26.
- 郑建平, 路凤香. 华北地台东部金伯利岩捕虏体 Sr-Nd 同位素研究. 地球学报, 1997, 18(增): 15~18.

- 7 Fan W M, Menzies M A. Destruction of aged lower lithosphere and accretion of asthenosphere mantle beneath eastern China. *Geotectonica et metallogenia*, 1992, 16: 171~179.
- 8 Seyler M, Bonatti E. Na, Al^{IV} and Al^{VI} in clinopyroxenes of subcontinental and suboceanic ridge peridotites: A clue to different melting processes in the mantle? *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1994, 122: 281~289.
- 9 Rivalenti G, Vannucci R, Rampone E, Mazzucchelli M. Peridotite clinopyroxene chemistry reflects mantle precesses rather than continental versus oceanic settings. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1996, 139: 423~437.
- 10 Zheng J P, O'Reilly S Y, Lu F X, Griffin W L. Nature and evolution of Cenozoic lithospheric mantle beneath Shandong peninsula, Sino-Korean Craton. *International Geology Review*, 1998.
- 11 Ireland T R, Rudnick R L, Spetsius Z. Trace elements in diamond inclusions from eclogites reveal link to Archean granites. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1994, 128: 199~213.
- 12 Claude T H. Lithosphere peridotites of the Kappvaal Craton. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1993, 120: 13~29.
- 13 Nixon P H, Boyd F R. Petrogenesis of the granular and sheared ultrabasic nodule suite in kimberlites. in Nixon, Lesotho Kimberlites, Maseru. Lesotho National Development Corporation, 1973. 356~360.
- 14 Hart B. Mantle peridotite and process—the kimberlite sample. In: Continental basalt and mantle xenolith (Ed. Hawresworth and North). *Shiva Geology*, 1983. 98~112.
- 15 Griffin W L, O'Reilly S Y. Ni in chrome pyrope garnets: a new thermometer. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1989, 103: 199~203.
- 16 Griffin W L, O'Reilly S Y. Composition and thermal structure of the lithosphere beneath South Africa, Siberia, and China. *Proton microprobe studies, Internal Symposia*. Beijing, 1992. 20.
- 17 Brey, Kohler. Geothermobarometry in four phase lherzolites. *Journal of Petrology*, 1990, 31: 1313~1378.
- 18 马鸿文. 估算上地幔温压条件与氧化状态的最新热力学方法. *地质科技情报*, 1992, 2: 29~37.
- 19 Mercier J C. Single-pyroxene geothermometry and geobarometry. *American Mineralogy*, 1976, 61: 601~615.
- 20 路凤香, 郑建平, 王方正. 华北克拉通、扬子克拉通与秦岭造山带古地幔组成及状态对比. *地球科学*, 1997, 22(3): 247~251.
- 21 Ryan C G, Griffin W L. Garnet geotherms: $p-t$ data from Cr-pyrope garnet xenocrysts in Volcanic rocks. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101(B3): 5611~5625.
- 22 O'Reilly S Y, Griffin W L. Minor elements in olivine from spinel xenoliths: implications for thermobarometry. *Mineralogical Magazine*, 1997, 61: 257~269.
- 23 郑建平. 辽东半岛金伯利岩成因研究的某些进展. *地质科技情报*, 1989, (4): 20~28.
- 24 林传勇, 徐义刚. 中国东部上地幔岩石变形特征, 流体的作用及软流层(体). 见: 杜乐天主编, *地幔流体与软流圈地球化学*. 北京: 地质出版社, 1996. 312~340.
- 25 郑建平, 路凤香. 古地幔流体及其在大陆克拉通地幔演化中的意义: 以华北地台为例. *地学前缘*, 1996, 3(3~4): 187~194.
- 26 Xu X, O'Reilly S Y, Griffin W L, Zhou X. A xenolith-derived geotherm and the crust-mantle boundary at Qilin, Southeastern China. *Lithos*, 1996, 49: 41~62.
- 27 O'Reilly S Y, Griffin W L. Moho and petrologic crust-mantle boundary coincide under southeastern Australia. *Geology*, 1994, 22: 666~667.
- 28 马杏垣, 刘昌铨, 刘国栋. 江苏响水至内蒙古满都拉地学断面. *地质学报*, 1991, 65(3): 199~215.
- 29 徐永昌. 天然气中的幔源稀有气体. *地学前缘*, 1996, (3): 63~71.
- 30 王鸿祯主编. *中国古地理图集*. 北京: 地质出版社, 1985. 88~92.
- 31 郑建平, 路凤香, 赵磊. 华北地台金伯利岩及金刚石中的地幔流体及其在地幔演化中的作用. *大地构造与矿床学*, 1996, (2): 105~118.
- 32 钟增球, 游振东. 剪切带的成分变异及体积亏损. *科学通报*, 1995, 40(10): 912~916.
- 33 金振民, 金淑燕. 动态部分熔融作用及其地球物理意义. *地质科技情报*, 1993, 12(1): 93~99.
- 34 Cooper C R. Rheology and structure of olivine-basalt in partial melts. *J. Geophys. Res.*, 1986, 91(B9): 9315~9323.
- 35 邓晋福, 赵海岭, 莫宣学, 罗照华. 中国大陆根-柱构造: 大陆动力学的钥匙. 北京: 地质出版社, 1996. 103~121.
- 36 李立. 上地幔内低阻层顶面深度图. 见: 袁学诚主编, *中国地球物理图集*. 北京: 地质出版社, 1996. 51~54.
- 37 朱介寿. 上地幔低速层顶界面深度图. 见: 袁学诚主编, *中国地球物理图集*. 北京: 地质出版社, 1996. 55~58.
- 38 孙继源. 华北地区板内构造及深部过程初探. *地质科技情报*, 1992, 11(1): 4~13.
- 39 袁学诚. 岩石圈地球物理构造格架图. 见: 袁学诚主编, *中国地球物理图集*. 北京: 地质出版社, 1996. 59~62.
- 40 张中杰. 地球深部研究的复杂性及其对策. *地球物理学报*, 1996, 11(3): 10~19.
- 41 王绳祖. 亚洲大陆岩石圈多层构造模型和塑性流动网络. *地质学报*, 1993, 67(1): 1~18.

- 42 王鸿祯,莫宣学. 中国地质构造述要. 中国地质, 1996, 8: 31~35.
- 43 万天丰. 郯庐断裂带的形成与演化: 综述. 现代地质, 1996, (2): 45~52.
- 44 Vissers R L, Drury M R, Hoogerduijn S E, Spiers C J. Mantle shear zones and their effect on lithosphere strength during continental breakup. *Tectonophysics*, 1995, 249: 155~171.
- 45 Lister S R. Detachment models for the formation of passive continental margins. *Tectonics*, 1991, 10(5): 1038~1064.
- 46 Wyllie P J. Transfer of subcratonic carbon into kimberlites and rare earth carbonatites. *Geochem. Soc. Pub.*, 1989, (1): 107~119.
- 47 徐义刚, 林传勇. 中国东部上地幔地温线及其地质意义. 中国科学(B辑), 1995, 25(8): 875~881.
- 48 Olafsson M, Eggler D H. Phase relation of amphibole, amphibole, Carbonate and Phlogophite Carbonate Peridotite; Petrological Constrains on the asthenosphere. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1983, 64: 305~315.

Comparison between Palaeozoic and Cenozoic Lithospheric Mantle in the Eastern Part of the North China Block

—With a Discussion of Mantle Evolution

Zheng Jianping, Lu Fengxiang

(School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China)

S. Y. O'Reilly, W. L. Griffin and Zhang Ming

(GEMOC, School of Earth Sciences, Macquarie University, Sydney, NSW2113, Australia)

Abstract

Palaeozoic diamond-and xenolith-bearing kimberlites and Cenozoic xenolith-bearing basalts, erupted in the eastern part of the North China Block (NCB), provide excellent mantle probes for research on intraplate processes and the Phanerozoic evolution of the subcontinental lithospheric mantle (SCLM). In this study, the mineral inclusions in diamond and xenoliths from Mengyin (Shandong province) and Fuxian (Liaoning province) kimberlites were chosen for constraining the nature of Palaeozoic SCLM, while xenoliths from the Shanwang and Qixia basalts (in Shandong province) were chosen for constraining the natures of Cenozoic SCLM. Shanwang lies astride the Tancheng—Lujiang (Tanlu) fault zone, a major lithospheric fault in eastern China, and Qixia lies east of the fault zone. Based on the research on the petrography of mantle xenoliths, petrochemistry, major and trace element geochemistry of mantle minerals, mantle heat state, combined with the modern geophysical data, it is concluded that the attenuation and replacement of the Palaeozoic SCLM by upwelling asthenospheric materials through thermal erosion and possibly delamination resulted in the formation of irregular-shaped hot bodies, mainly along weakness zones within the mantle. The Tanlu fault played an important role in the Cenozoic replacement of the pre-existing lithospheric mantle.

Key words: asthenospheric material; replacement and attenuation; thermal erosion; weakness zone in the mantle; Tancheng—Lujiang fault zone

作者简介

郑建平,男,1964年5月生。1988年于中国地质大学(武汉)获岩石学硕士学位,1997年获博士学位。现任中国地质大学(武汉)地球科学学院副教授,从事地幔岩岩石学的研究。通讯地址:430074,武汉中国地质大学地球科学学院。