

华北克拉通东部含金刚石金伯利岩的侵位年龄和 Sr-Nd-Hf 同位素地球化学特征*

张宏福 杨岳衡

ZHANG HongFu and YANG YueHeng

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, 北京 100029

State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2006-08-22 收稿, 2006-12-27 改回.

Zhang HF and Yang YH. 2007. Emplacement age and Sr-Nd-Hf isotopic characteristics of the diamondiferous kimberlites from the eastern North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2):285–294

Abstract This paper first reports the Ar-Ar geochronology of kimberlite-borne phlogopite megacrysts and the Hf isotopic compositions of the diamondiferous kimberlites from the eastern North China Craton. The paper, combined with the Sr-Nd isotopic data, discussed the kimberlite petrogeneses and their tectonic settings. Ar-Ar geochronology of the phlogopite megacrysts demonstrates that both the Mengyin and Fuxian kimberlites have coherent emplacement ages, about 465 ± 2 Ma. This is consistent with the previous results of the perovskite U-Pb age and phlogopite Rb-Sr isochron ages of the kimberlites. The Sr-Nd isotopic data show that both the Mengyin and Fuxian kimberlites have restricted Nd isotopic compositions (ϵ_{Nd} in the range of $-0.4 \sim 0.2$ and $-3.4 \sim -2.3$, respectively). However, these kimberlites have extremely large Sr isotopic compositions (I_{Sr} in the range of $-0.2 \sim 28.1$ and $0 \sim 75$, respectively), in which relative to the Mengyin, the Fuxian kimberlites have lower Nd isotopes and much wider Sr isotopes. Hf isotopic results show that individual kimberlite fields from both the Mengyin and Fuxian regions have quite uniform Hf isotopic compositions, similar to the situation for the Nd isotopes, in which the initial $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ ratios of the Mengyin kimberlites are in the range of $0.282474 \sim 0.282416$ with corresponding ϵ_{Hf} values of $-2.37 \sim -0.30$ and the initial $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ ratios of the Fuxian kimberlites are of $0.282305 \sim 0.282369$ with corresponding ϵ_{Hf} values of $-6.29 \sim -4.04$. This manifests that Mengyin kimberlites have relatively higher Hf isotopic compositions than those of Fuxian kimberlites. In combination with the Sr and Nd isotopic results, it indicates that the difference in Hf isotopic compositions between the Mengyin kimberlites and the Fuxian kimberlites could reflect the difference in proportions of the involvement of the asthenosphere, the lithospheric mantle and the subducted oceanic crust in the origin of the kimberlitic magmas. These Sr-Nd-Hf isotopic features demonstrate that the generation of the Paleozoic kimberlites of the North China Craton was related with the inward subduction of Paleo-oceanic lithosphere from the circum North China Craton towards the interior of the craton.

Key words Ar-Ar geochronology, Sr-Nd isotopes, Hf isotope, Paleozoic, Phlogopite, Kimberlite, Eastern North China Craton

摘要 本文首次报道了我国华北克拉通内部金伯利岩中金云母巨晶的 Ar-Ar 同位素年龄和含金刚石金伯利岩的 Hf 同位素组成特征,并结合金伯利岩的 Sr-Nd 同位素组成特征对华北金伯利岩的岩石成因及其构造背景进行了探讨。金伯利岩中金云母巨晶的年代学分析显示华北克拉通内部的蒙阴和复县金伯利岩具有一致的侵位年龄,约 465 ± 2 Ma。这与以前发表的金伯利岩中钙钛矿的 U-Pb 年龄和金云母的 Rb-Sr 等时线年龄一致。Sr-Nd 同位素结果表明蒙阴和复县金伯利岩皆具有很小的 Nd 同位素变化范围 (ϵ_{Nd} 分别为 $-0.4 \sim 0.2$ 和 $-3.4 \sim -2.3$)。然而,这些金伯利岩却具有极大的 Sr 同位素组成范围 (I_{Sr} 分布为 $-0.2 \sim 28.1$ 和 $0 \sim 75$)。其中复县比蒙阴金伯利岩具有较低的 Nd 同位素和更宽的 Sr 同位素组成。Hf 同位素分析结果表明蒙阴和复县两岩区内部各金伯利岩岩管具有非常一致的铪同位素组成,类似于 Nd 同位素组成特征,其中蒙阴金伯利岩的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 初始值为 $0.282474 \sim 0.282416$,相应的 ϵ_{Hf} 值为 $-2.37 \sim -0.30$;复县金伯利岩的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 初始值为 0.282305

* 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX2-YW-103)、国家自然科学基金委大陆动力学重点项目 (40534022) 和杰出青年科学基金项目 (40225009) 资助成果。

第一作者简介: 张宏福, 男, 1962 年生, 研究员, 地幔岩石学、地球化学专业, E-mail: hfzhang@mail.igcas.ac.cn

~0.282369; 相应的 ε_{Hf} 值为 $-6.29 \sim -4.04$ 。这说明蒙阴金伯利岩与复县金伯利岩相比具有较高的 Hf 同位素组成。结合 Sr-Nd 同位素组成, 暗示蒙阴和复县金伯利岩的 Hf 同位素组成的不同可能反映金伯利岩岩浆形成时软流圈、岩石圈地幔以及俯冲的洋壳物质参与比例的不同。Sr-Nd-Hf 同位素特征说明我国华北古生代金伯利岩的形成同样与华北周边的古大洋岩石圈向华北内部俯冲作用有关。

关键词 Ar-Ar 年代学; Sr-Nd 同位素; Hf 同位素; 古生代; 金云母; 金伯利岩; 华北克拉通东部

中图法分类号 P597.3

金伯利岩在全球所有的古老克拉通上几乎都有产出 (Janse and Sheahan, 1995)。金伯利岩尽管分布较少, 但因其能携带金刚石和地幔岩捕虏体和/或捕虏晶至地表, 故对其研究能够提供地幔深部过程的重要信息。然而, 金伯利岩的起源及其涉及的深部过程仍知之甚少。金伯利岩岩浆通常起源于碳酸岩化的地幔二辉橄榄岩的低程度部分熔融 (如 Dawson, 1980; Mitchell, 1986, 1995; Eggler, 1989; Canil and Scarfe, 1990; Tainton and McKenzie, 1994; Dalton and Presnall, 1998) 或是上升的挥发份与浅部地幔橄榄岩相互作用的产物 (Wyllie, 1980, 1989, 1994; Green *et al.*, 1987)。最近, 金伯利岩携带的金刚石和地幔岩捕虏体中超高高压矿物包裹体 (如 majorite, ferropericlasite, Ca-Si 钙钛矿, magnesio-wustite) 的相继发现揭示至少有些金伯利岩最初起源于地幔转换带 (410 ~ 670 km) 或下地幔、甚至核-幔边界, 即与地幔柱活动有关 (如 Haggerty and Sautte, 1990; Kesson and Fitzgerald, 1992; Harte and Harris, 1994; Harris *et al.*, 1997; McCammon *et al.*, 1997; Davies *et al.*, 1999; Haggerty, 1999; Liu, 1999; Joswig *et al.*, 1999; Collerson *et al.*, 2000; Stachel *et al.*, 2000; Kaminsky *et al.*, 2001)。

我国华北克拉通上亦产出有多个金伯利岩岩区, 其中山东蒙阴和辽宁复县金伯利岩岩区是我国主要原生金刚石产地。这些金伯利岩主要形成于古生代时期 (Dobbs *et al.*, 1994; Lu *et al.*, 1998)。然而, 与金伯利岩形成有关的地幔过程还不是很清楚。这就严重阻碍了对华北克拉通下地幔演化历史和岩石圈减薄过程的理解。本文试图通过对我国典型含金伯利岩的金伯利岩中金云母巨晶的 Ar-Ar 同位素定年进一步限定金伯利岩的侵位年龄, 同时通过金伯利岩的 Sr-Nd-Hf 同位素测试来约束金伯利岩的组成特征及其可能的形成过程。从而对我国华北中生代大规模岩石圈减薄过程发生前的地幔组成特征提供进一步的 Sr-Nd-Hf 同位素制约。

1 地质背景

我国华北克拉通由两个太古代陆核, 即东部的冀鲁辽陆核和西部的鄂尔多斯陆核组成 (图 1)。两陆核于早元古代碰撞拼合形成一个统一的华北克拉通 (Zhao *et al.*, 2002)。之后华北克拉通一直处于稳定状态, 直到古生代金伯利岩岩浆喷发为止 (Zhang *et al.*, 1994; 池际尚等, 1996)。四个含金伯利岩岩区: 山东蒙阴、辽宁复县、辽宁铁岭 (张宏福, 1993) 和辽宁桓仁岩区分布在冀鲁辽陆核东部 (图 1)。

近年来发现的第 5 个金伯利岩岩区: 辽宁锦西 (冯闯等, 2000) 与复县金伯利岩岩区隔渤海相望 (图 1)。这个新报道的金伯利岩岩区也由岩脉或岩管组成, 主要侵入到寒武-中奥陶石灰岩中。该岩区的金伯利岩皆遭受了强烈的碳酸岩化, 含大量的金云母, 但不含金刚石 (冯闯等, 2000)。此外, 金伯利岩也分布于冀鲁辽陆核的西侧 (图 1), 靠近元古带造山带, 例如山西应县金伯利岩、河北涉县金伯利岩和河南鹤壁金伯利岩。这些金伯利岩都不含矿, 且皆遭受强烈的碳酸岩化。柳林金伯利岩是唯一一个出现在华北太古代鄂尔多斯陆核上的金伯利岩岩区, 它分布在其东缘 (图 1), 皆是强碳酸岩化的金云母金伯利岩。这些金伯利岩的出现及其携带的地幔橄榄岩捕虏体和金刚石中矿物包裹体皆说明华北克拉通古生代时期存在一个厚的克拉通型岩石圈。

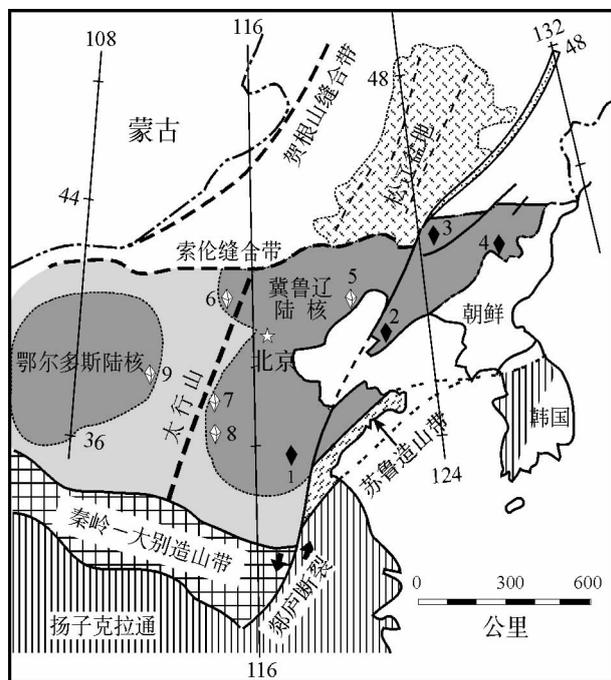


图 1 华北克拉通及其周边主要构造地质简图 (据 Zhang *et al.*, 2003 修改)。“实心菱形”表示含金伯利岩岩区, “空心菱形”表示不含金伯利岩岩区。金伯利岩岩区如下: 1-山东蒙阴; 2-辽宁复县; 3-辽宁铁岭; 4-辽宁桓仁; 5-辽宁锦西; 6-山西应县; 7-河北涉县; 8-河南鹤壁; 9-山西柳林。

Fig. 1 Simplified geological map showing major tectonic units of the North China Craton and its surrounding areas.

2 金伯利岩岩石学

本文主要选择山东蒙阴和辽宁复县含金刚石金伯利岩中的金云母巨晶进行 Ar-Ar 同位素定年以及对山东蒙阴和辽宁复县含金刚石金伯利岩全岩进行 Sr-Nd-Hf 同位素研究。蒙阴金伯利岩岩区分布在太古代冀鲁辽陆核的南部, 郯庐断裂带以西约 90 公里处 (图 1)。该金伯利岩岩区由许多小的不规则岩管或岩脉组成 (Dobbs *et al.*, 1994), 金伯利岩绝大多数侵入到太古界泰山群花岗岩片麻岩中, 少数侵入到古生代石灰岩 (寒武-奥陶纪) 中。蒙阴金伯利岩由以雁行状排列的常马、西峪和坡里三个岩带组成。最大岩脉长 1400 米、宽 3 米。分析样品采自蒙阴金伯利岩岩区最大的含金刚石的岩管: 常马岩带的胜利 1 号岩管中。胜利 1 号岩管由两个在深部相交的小岩管 (胜利 1 号小管和胜利 1 号大管) 组成, 该岩管主要由粗晶斑状金伯利岩、细粒金伯利岩 (表 1) 和金伯利角砾岩组成。粗晶斑状金伯利岩含大量大小不等的蛇

表 1 华北克拉通东部含金刚石金伯利岩的岩石类型

Table 1 Rock types of the diamondiferous kimberlites from the eastern North China Craton

样品号	岩石类型
复县 42 号岩管	
L42-03	粗晶斑状金伯利岩
L42-06	粗晶斑状金伯利岩
L42-07	粗晶斑状金伯利岩
L42-11	细粒金伯利岩
复县 50 号岩管	
L50-2003	含金云母粗晶斑状金伯利岩
L50-2004	细粒金云母金伯利岩
L50-2005	粗晶斑状金云母金伯利岩
L50-2006	粗晶斑状金云母金伯利岩
L50-01	含金云母粗晶斑状金伯利岩
L50-04	粗晶斑状金伯利岩
L50-05	细粒金伯利岩
L50-08	粗晶斑状金云母金伯利岩
L50-10	粗晶斑状金伯利岩
L50-17	粗晶斑状金云母金伯利岩
蒙阴胜利 1 号小管	
Sv1s-01	细粒金伯利岩
Sv1s-04	细粒金伯利岩
Sv1s-06	粗晶斑状金伯利岩
Sv1s-08	粗晶斑状金伯利岩
蒙阴胜利 1 号大管	
SL-2001	粗晶斑状金伯利岩
Sv1b-02	粗晶斑状金伯利岩
Sv1b-05	粗晶斑状金伯利岩
Sv1b-06	细粒金伯利岩
Sv1b-08	细粒金伯利岩

纹石化橄榄石粗晶和斑晶, 分布在细粒的主要由蚀变橄榄石、金云母、碳酸盐矿物、Fe-Ti 氧化物和钙钛矿基质中。

复县金伯利岩岩区分布在太古代冀鲁辽陆核的辽东半岛上, 距郯庐断裂带以东约 80 公里处 (图 1)。该金伯利岩岩区主要侵入到晚元古沉积地层中。复县金伯利岩样品采自该区两个最大的岩管, 即 42 号和 50 号岩管中。与蒙阴金伯利岩不同的是, 复县金伯利岩主要由粗晶斑状金伯利岩和角砾状金伯利岩组成, 含少量的细粒金伯利岩。复县金伯利岩皆含有相对较多的 (4~6 体积%) 金云母粗晶和斑晶 (表 1)。因此, 这些金伯利岩可以定名为粗晶斑状金云母金伯利岩。蒙阴和复县金伯利岩岩区和岩石类型的详细描述已发表, 感兴趣的读者见董振信 (1994), Dobbs *et al.* (1994), 池际尚等 (1996) 和 Tompkins *et al.* (1999)。

3 分析方法

3.1 Ar-Ar 定年

新鲜的金云母巨晶 (L50-22 和 Sv1b-17) 粉碎至 40-60 目, 双目镜下挑选出纯的金云母样品, 并用 5N 稀盐酸溶液清洗除去碳酸盐。然后用去离子水清洗多次并在 80 度的烤箱中蒸干。中国的标准矿物角闪石 (ZBJ) 和黑云母 (ZBH-25) 用作标样, 他们相对于 $2026 \pm 8\text{Ma}$ 的国际标样角闪石 (BSP-1) 的年龄分布为 $132.8 \pm 1.4\text{Ma}$ 和 $132.7 \pm 1.2\text{Ma}$ (王松山, 1992; 桑海青等, 1994)。样品是在中国原子能科学院的 49-2 反应堆中照射的, 同位素比值是在中国科学院地质与地球物理研究所 Ar-Ar 同位素实验室的 RGA10 质谱仪上测定的。详细的装样过程和分析步骤参见桑海青等 (1994)。测试是在 $400 \sim 1500^\circ\text{C}$ 区间逐步加热照射过的样品使样品释放气体, 然后对这些气体进行 10~14 次测定获得的。根据中国科学院地质与地球物理研究所 Ar-Ar 同位素实验室以前的工作结果, 对 ^{40}K 和 ^{40}Ca 的校正如下:

$$(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_a = 294.2; (^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_k = 0.0305;$$

$$(^{40}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{Ca} = 0.000264; (^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{Ca} = 0.000687。$$

表面年龄和标准偏差是根据桑海青等 (1994) 方法计算的。计算时应用的衰变常数来自 Steiger and Jäger (1977)。J 即中子流参数 ($=0.008471$) 精度约 0.25%。分析结果见表 2。等时线年龄是根据 York (1969) 法计算的。

3.2 Sr-Nd 同位素

对于 Sr-Nd 同位素分析, 约 200 目的金伯利岩全岩粉末加上混合的同位素稀释剂, 在 Teflon 杯中用纯化的 HF + HNO₃ 混合酸溶解样品, 然后应用传统的离子交换技术分离。元素和同位素的测试是在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的 VG-354 质谱仪上进行的。Sr 和 Nd 同位素的质量分离矫正是根据 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ 和 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 获得的。详细的样品处理和分析方法见 Zhang *et al.* (2001)。分析结果见表 3。

表 2 逐步加热法获得的金云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 分析数据Table 2 Phlogopite ⁴⁰Ar/³⁹Ar analytical data by incremental-heating experiments

步长 T (°C)	(⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar) _m	(³⁶ Ar/ ³⁹ Ar) _m	(³⁷ Ar/ ³⁹ Ar) _m	(³⁸ Ar/ ³⁹ Ar) _m	³⁹ Ar _k 10 ⁻¹² mol	(⁴⁰ Ar* / ³⁹ Ar _k) ± 1σ	³⁹ Ar _k %	表面年龄 ± 1σ (Ma)
Sv1b-17, J = 0.008471								
400	45.084	0.0197	0.4423	0.0248	4.105	39.28 ± 0.02	2.43	518.25 ± 10.7
500	37.246	0.0242	0.4480	0.0234	5.728	30.11 ± 0.01	3.39	409.92 ± 6.74
600	36.013	0.0150	0.5159	0.0304	6.632	31.61 ± 0.01	3.93	428.07 ± 6.76
700	37.799	0.0179	0.2978	0.0229	9.695	32.52 ± 0.01	5.74	438.98 ± 7.28
800	37.772	0.0098	0.2214	0.0172	10.62	34.87 ± 0.01	6.29	466.97 ± 7.67
880	38.276	0.0120	0.3141	0.0202	11.57	34.73 ± 0.01	6.86	465.39 ± 7.78
940	37.739	0.0095	0.1854	0.0187	12.10	34.91 ± 0.01	7.18	467.39 ± 7.67
1000	37.888	0.0100	0.2291	0.0178	14.93	34.91 ± 0.01	8.85	467.41 ± 7.71
1060	36.336	0.0052	0.2007	0.0148	15.44	34.78 ± 0.01	9.16	465.85 ± 7.33
1120	36.352	0.0055	0.1973	0.0224	37.39	34.70 ± 0.01	22.1	464.90 ± 7.33
1180	37.031	0.0070	0.1657	0.0151	14.84	34.94 ± 0.01	8.80	467.84 ± 7.51
1240	36.724	0.0068	0.1510	0.0163	13.45	40.68 ± 0.01	7.97	464.67 ± 7.40
1320	41.388	0.0222	0.2689	0.0202	8.350	34.84 ± 0.01	4.95	466.66 ± 8.61
1450	49.440	0.0279	0.6586	0.0366	3.733	41.25 ± 0.02	2.21	540.75 ± 12.8
L50-22, J = 0.008471								
420	31.181	0.0090	0.1600	0.0230	8.443	28.50 ± 0.00	7.01	390.15 ± 5.43
550	11.603	0.0087	0.5922	0.0299	16.48	9.056 ± 0.00	13.7	133.38 ± 1.56
650	21.063	0.0159	0.4527	0.0367	4.360	16.38 ± 0.00	3.62	234.43 ± 2.85
750	33.797	0.0243	0.3746	0.0310	6.656	26.62 ± 0.01	5.53	366.97 ± 5.53
850	40.776	0.0226	0.3334	0.0281	7.167	34.11 ± 0.01	5.95	458.00 ± 8.31
930	36.873	0.0072	0.1660	0.0158	11.57	34.73 ± 0.01	9.62	465.35 ± 7.44
1000	36.528	0.0064	0.2205	0.0215	8.953	34.61 ± 0.01	7.44	463.91 ± 7.35
1080	36.151	0.0053	0.1369	0.0156	12.89	34.54 ± 0.01	10.7	463.10 ± 7.25
1160	37.551	0.0087	0.1645	0.0175	11.36	34.95 ± 0.01	9.44	467.92 ± 7.64
1240	36.687	0.0077	0.2288	0.0162	14.98	34.40 ± 0.01	12.4	461.39 ± 7.34
1320	38.043	0.0108	0.3506	0.0419	10.66	34.85 ± 0.01	8.86	466.71 ± 7.79
1450	45.704	0.0164	0.4464	0.0250	6.749	40.86 ± 0.02	5.60	536.33 ± 11.2

M 为经过³⁷Ar (半衰期 35.1 天) 和 ³⁹Ar (半衰期 259 年) 校正后的值。λ_α = 0.581 × 10⁻¹⁰/年; λ_β = 4.962(10⁻¹⁰/年 (Steiger and Jäger, 1977)).

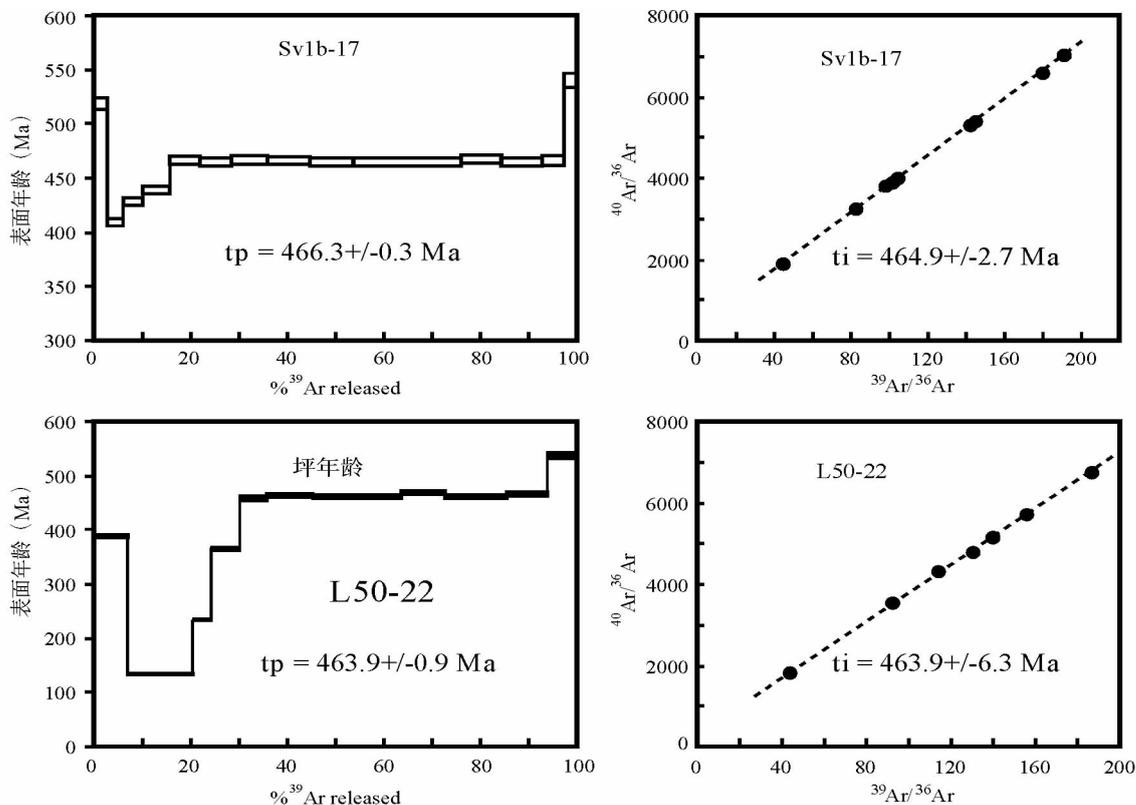


图 2 蒙阴胜利 1 号管 (Sv1b-17) 和复县 50 号管 (L50-22) 产出的两个金云母巨晶的 Ar-Ar 坪年龄和³⁹Ar/³⁶Ar-⁴⁰Ar/³⁶Ar 等时线年龄

Fig. 2 Ar-Ar weighted mean plateau age and ³⁹Ar/³⁶Ar-⁴⁰Ar/³⁶Ar isochron age for two phlogopite megacrysts from the Mengyin Pipe Shengli 1b and the Fuxian Pipe 50.

表 3 华北克拉通东部含金刚石金伯利岩的 Sr-Nd 同位素分析结果

Table 3 Sr-Nd isotopic compositions of the diamondiferous kimberlites from the eastern North China Craton

样品号	Rb ppm	Sr ppm	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \pm 2\sigma$	I_{Sr}	Sm ppm	Nd ppm	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \pm 2\sigma$	ε_{Nd}
复县 42 号岩管										
L42-03	5.70	592.9	0.0218	0.705906 ± 15	25.9	9.28	67.9	0.08313	0.512161 ± 09	-2.6
L42-06	63.39	918.2	0.2030	0.707444 ± 17	30.7	12.38	99.5	0.07897	0.512107 ± 09	-3.4
L42-07	8.65	653.4	0.0386	0.706248 ± 21	29.2	11.39	93.1	0.07912	0.512105 ± 08	-3.4
L42-11	93.55	635.7	0.4450	0.710821 ± 20	55.9	16.00	140.8	0.07293	0.512124 ± 07	-2.7
复县 50 号岩管										
L50-2003	46.31	1002	0.1386	0.708024 ± 20	45.0	8.51	54.8	0.09495	0.512167 ± 08	-3.1
L50-2004	54.38	343.5	0.4920	0.710115 ± 15	41.4	9.53	62.4	0.08779	0.512153 ± 08	-3.0
L50-2005	34.1	226.8	0.4738	0.716620 ± 28	135.6	10.12	84.2	0.07375	0.512145 ± 11	-2.3
L50-2006	58.35	1152	0.1507	0.706400 ± 21	20.8	13.68	103.1	0.08563	0.512161 ± 08	-2.7
L50-01	58.90	1063	0.1800	0.706537 ± 20	20.0	13.52	90.8	0.09134	0.512170 ± 09	-2.9
L50-04	35.49	225.7	0.4815	0.712211 ± 12	72.2	11.20	87.3	0.07843	0.512125 ± 10	-3.0
L50-05	77.83	548.6	0.4347	0.709216 ± 20	34.1	13.91	109.7	0.08157	0.512136 ± 11	-3.0
L50-08	68.67	848.9	0.2425	0.706845 ± 16	18.5	11.65	65.3	0.10020	0.512217 ± 12	-2.5
L50-10	58.96	429.3	0.1627	0.710305 ± 16	75.1	9.73	73.2	0.07532	0.512143 ± 08	-2.4
L50-17	75.42	527.6	0.4322	0.708849 ± 18	29.1	12.57	97.8	0.07634	0.512128 ± 10	-2.8
蒙阴胜利 1 号小管										
Sv1s-01	46.65	1018	0.3360	0.706632 ± 14	6.6	15.23	123.7	0.07204	0.512265 ± 12	0.1
Sv1s-04	24.95	468.0	0.1598	0.706440 ± 14	20.5	9.51	76.1	0.07216	0.512247 ± 07	-0.2
Sv1s-06	64.15	539.7	0.3567	0.706830 ± 14	7.5	9.57	72.2	0.07335	0.512248 ± 09	-0.3
Sv1s-08	10.36	207.8	0.3353	0.706146 ± 15	-0.2	9.06	76.4	0.07071	0.512266 ± 11	0.2
蒙阴胜利 1 号大管										
SL-2001	31.64	327.3	0.1177	0.706700 ± 20	28.1	8.44	70.0	0.06978	0.512256 ± 07	0.1
Sv1b-02	35.01	1504	0.0715	0.704489 ± 20	1.1	10.92	76.2	0.06912	0.512243 ± 08	-0.1
Sv1b-05	35.96	540.5	0.2108	0.706371 ± 15	14.7	11.55	96.3	0.07220	0.512257 ± 08	0.0
Sv1b-06	38.21	1202	0.1041	0.704709 ± 15	1.1	18.00	166.2	0.06964	0.512229 ± 09	-0.4
Sv1b-08	35.41	600.8	0.0747	0.706242 ± 14	25.7	24.20	243.9	0.07070	0.512267 ± 09	0.2
JMP2			0.1228	0.709783 ± 20	71.5			0.10991	0.512298 ± 19	-1.5

球粒陨石均一地幔库 (CHUR) ($^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr} = 0.0847$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7045$, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.1967$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512638$)。 $\lambda_{\text{Rb}} = 1.42 \times 10^{-11}$ /年; $\lambda_{\text{Sm}} = 6.54 \times 10^{-12}$ /年 (Steiger and Jäger, 1977; Lugmair and Marti, 1978)。同位素初始值计算至金伯利岩喷发时, 即 465Ma。JMP2 为华北奥陶纪灰岩。

3.3 Hf 同位素

金伯利岩的铪同位素化学分离是在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完成的。方法简述如下: 将 100mg 样品粉末与 200mg $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 混合均匀后置于铂金坩锅中, 用 XRF 制玻璃片的高频感应炉在 1250°C 下溶解 15 分钟将样品分解, 然后将碱熔的样品用 2 M HCl 溶解, 采用 HCl-单柱 Ln-Spec 提取色谱方法将 Hf 和基体元素及干扰元素分离, 详细的分析方法参见文献 (Xu *et al.*, 2004; 李献华等, 2005; Wu *et al.*, 2006)。分离后的铪同位素测试分析是在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新引进的 Neptune 多接收等离子体质谱仪上进行, 使用 $^{179}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.7325$ 和 JMC-475 标准的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值 = 0.282160 进行质量分馏和外部校正。与本文样品同时分析的玄武岩国际标样 BHVO-2 和 W-2 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 分别为 0.283088 ± 10 和 0.282716 ± 07, 与文献报道的结果均在误差范围内 (Bizzarro *et al.*, 2003; Kleinhanns *et al.*, 2002, Le Fevre and Pin, 2001)。分析结果见表 4。

4 分析结果

4.1 Ar-Ar 年代学

一个采自蒙阴金伯利岩岩区胜利 1 号岩管中的金云母巨晶给出了 466.3 ± 0.3Ma 的坪年龄和 464.9 ± 2.7Ma 的 $^{39}\text{Ar}-^{40}\text{Ar}$ 等时线年龄 (图 2)。另一个采自复县金伯利岩岩区 50 号岩管的金云母巨晶获得的坪年龄为 463.9 ± 0.9Ma, $^{39}\text{Ar}-^{40}\text{Ar}$ 等时线年龄为 463.9 ± 6.3Ma (图 2)。我们认为蒙阴和复县金伯利岩皆是 ~465Ma 侵位的。

4.2 Sr-Nd 同位素

蒙阴金伯利岩具有很小的 Nd 同位素组成变化范围 ($\varepsilon_{\text{Nd}} = -0.4 \sim 0.2$) 和类似原始地幔的 Nd 同位素特征 (表 3 和图 3)。然而, 这些金伯利岩却具有较大的 Sr 同位素组成范围 ($I_{\text{Sr}} = -0.2 \sim 28.1$)。尽管复县金伯利岩也具有很窄的 Nd 同位素组成, 但他们的 ε_{Nd} 值 (-3.4 ~ -2.3) 明显比原始地幔值低 (表 3 和图 3)。复县金伯利岩具有极宽的 Sr 同位素组成 (I_{Sr} 主要在 0 ~ 75, 其中样品 L50-2005 的 I_{Sr} 高

表4 华北克拉通东部含金刚石金伯利岩的铪同位素分析结果

Table 4 Hf isotopic compositions of the diamondiferous kimberlites from the eastern North China Craton

样品号	Lu ppm	Hf ppm	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 测试值	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 初始值	ε_{Hf}	$\varepsilon_{\text{Hf}}/\varepsilon_{\text{Nd}}$
复县42号岩管							
L42-03	0.11	6.08	0.0026	0.282327 ± 06	0.282305	-6.29	2.42
L42-06	0.12	7.10	0.0024	0.282339 ± 06	0.282318	-5.85	1.72
L42-07	0.10	6.64	0.0021	0.282326 ± 07	0.282307	-6.22	1.83
L42-11	0.10	4.19	0.0034	0.282398 ± 23	0.282369	-4.04	1.50
复县50号岩管							
L50-2003	0.11	5.42	0.0029	0.282354 ± 06	0.282329	-5.44	1.76
L50-2004	0.05	5.81	0.0012	0.282373 ± 06	0.282362	-4.27	1.42
L50-2005	0.05	4.72	0.0015	0.282345 ± 23	0.282332	-5.34	2.32
L50-2006	0.09	6.71	0.0019	0.282359 ± 08	0.282342	-4.98	1.85
L50-01	0.10	6.74	0.0021	0.282376 ± 07	0.282358	-4.43	1.53
L50-04	0.07	7.16	0.0014	0.282359 ± 06	0.282347	-4.83	1.61
L50-05	0.08	6.26	0.0018	0.282364 ± 10	0.282348	-4.78	1.59
L50-08	0.09	6.60	0.0019	0.282356 ± 12	0.282339	-5.08	2.03
L50-10	0.11	5.04	0.0031	0.282375 ± 06	0.282348	-4.76	1.98
L50-17	0.08	6.23	0.0018	0.282364 ± 07	0.282348	-4.78	1.71
蒙阴胜利1号小管							
Sv1s-01	0.05	6.88	0.0010	0.282463 ± 07	0.282454	-1.02	-10.25
Sv1s-04	0.04	4.32	0.0013	0.282444 ± 07	0.282433	-1.76	8.82
Sv1s-06	0.04	4.48	0.0013	0.282427 ± 08	0.282416	-2.37	7.91
Sv1s-08	0.03	3.30	0.0013	0.282482 ± 11	0.282471	-0.44	-2.18
蒙阴胜利1号大管							
SL-2001	0.02	4.30	0.0007	0.282480 ± 06	0.282474	-0.30	-3.03
SL-2001*				0.282489 ± 22			
Sv1b-02	0.04	4.19	0.0014	0.282459 ± 08	0.282447	-1.26	12.63
Sv1b-05	0.04	5.22	0.0011	0.282453 ± 09	0.282444	-1.39	
Sv1b-06	0.06	9.52	0.0009	0.282477 ± 04	0.282470	-0.47	1.17
Sv1b-08	0.08	11.37	0.0010	0.282478 ± 05	0.282469	-0.50	-2.48

*: 重复样。Hf 同位素校正所用参数和公式为 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}_{\text{CHUR}} = 0.0322$, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_{\text{CHUR}} = 0.282772$, $\lambda = 1.867 \times 10^{-11}/\text{年}$, $\varepsilon_{\text{Hf}} = ((^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i / (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}, t} - 1) \times 10^4$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}, t} = 0.282772 - 0.0322 \times (e^{\lambda t} - 1)$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i = (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{样品, 测试值}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{样品, 现今值}} \times (e^{\lambda t} - 1)$ 。同位素初始值计算至金伯利岩喷发时, 即 465Ma。

达 135.6)。此外,复县一些金伯利岩具有类似南非和巴西过渡类型(介于 I 型和 II 型之间)金伯利岩的同位素组成,后者常出现在克拉通边缘 (McDonald *et al.*, 1995; Bizzi *et al.*, 1995)。总体上,华北克拉通含金刚石金伯利岩具有介于南非 I 型和 II 型金伯利岩之间的 Sr-Nd 同位素组成 (Hawkesworth *et al.*, 1990) (图 3)。

4.3 Hf 同位素

华北克拉通含金刚石金伯利岩的铪同位素分析结果分别见表 4 和图 4。结果表明蒙阴和复县含金刚石金伯利岩具有完全不同的 Hf 同位素组成,并和钆同位素有很好的正相关性(图 4)。

复县金伯利岩: 华北克拉通内部的复县含金刚石金伯利岩具有非常一致的铪同位素组成。金伯利岩的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 初始比值变化范围很小,为 0.282305 ~ 0.282369 (表 4)。其中复县 50 号岩管中各类金伯利岩具有非常一致的

$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 初始比值,其范围在 0.282329 ~ 0.282362 之间。而 42 号岩管中的细粒金伯利岩和一个粗晶斑状金伯利岩分别具有复县岩区最高和最低的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 初始比值(分别为 0.282369 和 0.282305) (表 4)。取 $t = 465\text{Ma}$ 计算它们的 ε_{Hf} ,复县含金刚石金伯利岩具有非常一致,但很低的 ε_{Hf} 值 (-6.29 ~ -4.04)。这些金伯利岩的 Hf 同位素组成完全不同于华北克拉通中、新生代玄武岩或高镁安山岩的 Hf 同位素组成(图 4) (杨岳衡等, 2006)。

蒙阴金伯利岩: 地处华北克拉通冀鲁辽陆核南缘的蒙阴金伯利岩有着与复县金伯利岩完全不同的铪同位素地球化学特征。蒙阴金伯利岩与复县金伯利岩相比,具有较高的 Hf 同位素组成。其 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 初始比值也比较集中,其范围在 0.282474 ~ 0.282416。而且,胜利 1 号大管和胜利 1 号小管金伯利岩之间没有明显 Hf 同位素组成差别。其 ε_{Hf} 值为 -2.37 ~ -0.30。蒙阴金伯利岩的 Hf 同位素组成与华北北缘乌拉哈达地区中生代高镁安山岩的 Hf 同位素组成很类似

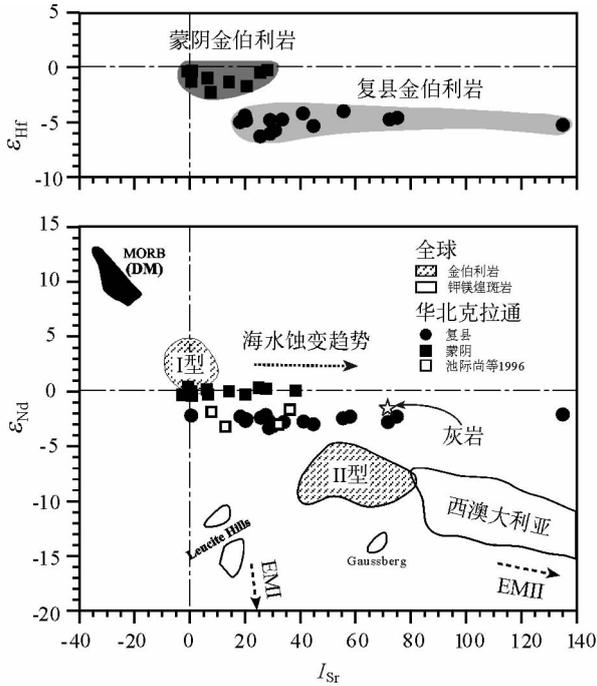


图3 蒙阴和复县金伯利岩的 Sr 与 Nd 和 Hf 同位素图解, 并与全球金伯利岩和钾镁煌斑岩进行对比 (Hawkesworth *et al.*, 1990)。所有同位素数据包括 Tompkins *et al.* (1999) 和池际尚等 (1996) 文章中的 Sr 和 Nd 同位素数据在内皆换算到 465Ma。星号表示华北克拉通奥陶系石灰岩的组成, 与奥陶纪时期海水的同位素组成类似

Fig. 3 Sr vs. Nd and Hf isotopic diagrams for Mengyin and Fuxian kimberlites.

(杨岳衡等, 2006), 尽管二者的 Nd 同位素组成存在很大的区别 (图4)。蒙阴金伯利岩的 Hf 同位素组成靠近全硅酸盐地球的值。

5 讨论

5.1 金伯利岩侵位年龄

金伯利岩侵位年龄的准确厘定对计算同位素的初始比值, 从而探讨金伯利岩的来源问题十分必要。蒙阴胜利 1 号金伯利岩岩管中的一个金云母巨晶的 Ar-Ar 同位素测试结果显示, 其³⁹Ar-⁴⁰Ar 坪年龄和等时线年龄分别为 466.3 ± 0.3 Ma 和 464.9 ± 2.7 Ma (图2)。该年龄与以前发表的该金伯利岩岩管中钙钛矿的 U-Pb 年龄 (456 ± 8 Ma) (Dobbs *et al.*, 1994) 接近。因此, 我们认为蒙阴金伯利岩侵位于 465 ± 2 Ma。同样, 复县 50 号金伯利岩岩管一个金云母巨晶获得的³⁹Ar-⁴⁰Ar 坪年龄为 463.9 ± 0.9 Ma, 其等时线年龄为 463.9 ± 6.3 Ma (图2)。Dobbs *et al.* (1994) 和 Lu *et al.* (1998) 对复县金伯利岩中金云母的 Rb、Sr 同位素进行了分析, 获得其 Rb-Sr 模式年龄分布在 452 ~ 465Ma 之间, 并获得一个很

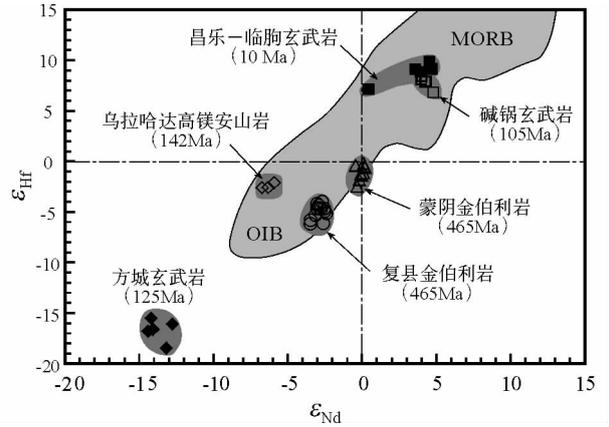


图4 华北克拉通金伯利岩的 ϵ_{Hf} - ϵ_{Nd} 相关关系图。图中 OIB 和 MORB 的 Hf-Nd 同位素变化趋势范围引自文献 (Vervoort *et al.*, 1999); 中、新生代火山岩的 Hf-Nd 同位素同位素组成引自文献 (Zhang *et al.*, 2002, 2003; 杨岳衡等, 2006)

Fig. 4 Plot of ϵ_{Hf} vs. ϵ_{Nd} for the diamondiferous kimberlites from the eastern North China Craton.

好的等时线年龄为 461.7 ± 4.8 Ma。所有这些年龄的一致性说明复县和蒙阴金伯利岩是同期侵位的, 其侵位时间约为距今 465Ma。因此, 表中同位素的初始值和 ϵ_{Hf} 、 ϵ_{Nd} 和 I_{Sr} 值皆换算成 465Ma。

5.2 金伯利岩的 Sr-Nd 同位素组成与海水蚀变

众所周知, 金伯利岩是一种混杂岩, 是由原生结晶矿物 (斑晶)、深源捕虏体 (橄榄岩和/或麻粒岩)、捕虏晶 (橄榄石、辉石、石榴石和尖晶石)、各种地壳围岩碎块以及超镁铁质岩浆、气/流体构成的混杂岩。尽管选择样品分析时尽量选择那些相对细粒的且在显微镜下无各种地壳围岩碎块的样品, 但地壳混染作用或蚀变作用对 Sr-Nd 同位素组成的影响仍然是个不可忽略的问题。蒙阴和复县的金伯利岩很一致的 Nd 同位素组成和变化的 Sr 同位素组成 (图3) 说明地壳混染作用不是造成这些金伯利岩 Sr 同位素巨大变化的主要原因, 因为如果地壳混染作用强烈的话, 随着混染作用的增加其 Nd 同位素应随 Sr 同位素的变化而变化。金伯利岩的极快速侵位固结甚至爆发客观上也不可能造成大的同化混染作用。因此, 尽管华北奥陶纪灰岩具有高的 Sr 同位素比值和类似于复县金伯利岩的 Nd 同位素组成, 华北金伯利岩很宽的 Sr 同位素组成范围亦很难用地壳混染或灰岩的贡献来解释。

那么, 金伯利岩的这种具有海水蚀变特征的同位素组成就是金伯利岩在形成过程中自身熔/流体蚀变作用造成的结果, 即金伯利岩本身的特征。华北金伯利岩的 Sr-Nd 同位素特征介于南非 I 型和 II 型金伯利岩的事实 (图3) 也与其岩石学特征即含相对较多的金云母相吻合。造成金伯利岩自

蚀变作用的流体亦是来源于形成金伯利岩的原始超镁铁质岩浆本身。这说明这些金伯利岩的形成过程中曾受到过海水的影响。奥陶纪灰岩的同位素组成特征说明奥陶纪时海水具有很高的 Sr 同位素组成。不同金伯利岩样品中巨大的 Sr 同位素组成差异可能是来源于软流圈的金伯利岩岩浆本身(斑晶矿物)、岩石圈物质(捕虏晶)和俯冲的洋壳流体(海水蚀变)比例的不同造成的。

5.3 金伯利岩起源的同位素制约

我国蒙阴和复县金伯利岩中的金刚石含有橄榄石、斜方辉石、单斜辉石、石榴石、铬铁矿、菱镁矿和碳硅石等矿物包裹体 (Leung, 1990; Harris *et al.*, 1994; Meyer *et al.*, 1994; Wang *et al.*, 1996, 1998, 2000; Wang, 1998; Wang and Gasparik, 2001), 但尚未发现在巴西和纳米比亚金伯利岩金刚石中出现的超高压(下地幔)矿物包裹体 (Kesson and Fitzgerald, 1992; Harte and Harris, 1994; Harris *et al.*, 1997; McCammon *et al.*, 1997; Joswig *et al.*, 1999; Stachel *et al.*, 2000)。因此, 蒙阴和复县金伯利岩不大可能来源于地幔柱, 很可能起源于 670 公里以上的浅部地幔。

金伯利岩岩浆因上升速度快一般认为来不及经历重要的分离结晶作用 (Mitchell, 1986), 加上前已叙及, 这些金伯利岩未发生过大规模的地壳混染作用。因此, 金伯利岩的组成很可能能够直接反映地幔源区组成。蒙阴和复县金伯利岩的 Sr-Nd-Hf 同位素组成 (图 3 和图 4) 暗示华北这些金伯利岩可能来源于多组分混和的地幔源区。首先, 金伯利岩的 Sr 同位素组成明显比来自原始地幔源区的岩浆更富放射成因的 Sr。金伯利岩如此大的 Sr 同位素变化范围却具有稳定的 Nd 和 Hf 同位素组成需要源区有水热蚀变的俯冲洋壳参与其形成。因此, 华北东部金伯利岩的 Sr-Nd-Hf 同位素记录了再循环的洋壳组分参与了这些金伯利岩的形成过程。

6 结论

山东蒙阴和辽宁复县两地金伯利岩具有一致的侵位年龄, 约 465 ± 2 Ma。两地金伯利岩具有不同的 Nd 和 Hf 同位素组成, 而各岩区内部金伯利岩之间却具有非常一致的 Nd 和 Hf 同位素组成。这说明岩区内部不同岩管间的金伯利岩来源一致, 而两岩区金伯利岩可能存在来源上的微弱差别。

致谢 感谢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管辖的 Ar-Ar 实验室桑海青在 Ar 同位素测试过程中以及放射性同位素实验室张任祜、储著银在 Sr、Nd 同位素测试过程中给予的大力帮助。

References

Bizzarro M, Baker J, Ullbeck D. 2003. A new digestion and chemical

- separation technique for rapid and highly reproducible determination of Lu/Hf and Hf isotope ratios in geological materials by MC-ICPMS. *Geostandards Newsletter*, 27: 133–145
- Bizzi LA, De Wit MJ, Smith CB *et al.* 1995. Heterogeneous enriched mantle materials and Dupal-type magmatism along the SW margin of the Sao Francisco Craton, Brazil (in Proc. Int. Symposium on the Physics and chemistry of the upper mantle, Ribeiro). *Journal of Geodynamics*, 20(4): 469–491
- Canil D and Scarfe CM. 1990. Phase relations in peridotite-CO₂ systems to 12 GPa; Implications for the origin of kimberlites and carbonate stability in the Earth's upper mantle. *Journal of Geophysical Research*, 95: 15805–15816
- Chi JS, Lu FX, Zhao CH *et al.* 1996. The Study of Formation Conditions of Primary Diamond Deposits in China. China University of Geosciences, Beijing, 144 pp (in Chinese)
- Collerson K, Hapugoda S, Kamber BS *et al.* 2000. Rocks from the Mantle Transition zone: Majorite-bearing xenoliths from Malaita, Southerwest Pacific. *Science*, 288: 1215–1223
- Dalton JA and Presnall DC. 1998. The continuum of primary carbonatitic kimberlitic melt compositions in equilibrium with lherzolite: Data from the system CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-CO₂ at 6 GPa. *Journal of Petrology*, 39: 1953–1964
- Davies RM, Griffin BL, Pearson NJ *et al.* 1999. Diamonds from the deep: pipe DO-27, Slave Craton, Canada. In: Gurney JJ, Gurney JL, Pascoe MD, Richardson SH (eds). The J B Dawson volume, Proceedings of 7th International Kimberlite Conference, Red Roof Design, Cape town, pp 148–155
- Dawson JB. 1980. Kimberlites and their xenoliths. Springer-Verlag
- Dobbs PN, Duncan DJ, Hu S *et al.* 1994. The geology of the Mengyin kimberlites, Shandong, China. In: Meyer H O A, Leonardos O H (eds). Proceedings of 5th International Kimberlite Conference volume 1. Diamonds: characterization, genesis and exploration, CPRM, Brasilia, pp 106–115
- Dong ZX. 1994. Chinese kimberlites. Science Press, Beijing, 318 pp (in Chinese)
- Eggler DH. 1989. Kimberlites: How do they form? In: Ross J (ed). Kimberlites and related rocks, volume 1, Blackwell, pp 489–504
- Feng C, Zhang HF, Zhou XH. 2000. New kimberlite field found in Liaoxi, China. *Seismology and Geology*, 22 (supl): 95–98 (in Chinese with English abstract)
- Green DH, Falloon TJ, Taylor WR. 1987. Mantle-derived magmas-Roles of variable source peridotite and variable C-H-O fluid compositions. In: Mysen BO (ed). *Magmatic Processes: Physiochemical principles*, volume 1, Geochemical Society, pp 139–154
- Haggerty SE. 1999. A diamond trilogy: Superplumes, supercontinents, and supernovae. *Science*, 285: 851–860
- Haggerty SE and Sautte V. 1990. Ultradeep (greater than 300km), ultramafic upper mantle xenoliths. *Science*, 248: 993–996
- Harris JW, Duncan DJ, Zhang F *et al.* 1994. The physical characteristics and syngenetic inclusion geochemistry of diamonds from pipe 50, Liaoning Province, People's Republic of China. In: Meyer H O A, Leonardos O H (eds). *Diamonds: Characterization, Genesis and Exploration*, CPRM Special Publication 1/B, Brasilia, pp 105–115
- Harris JW, Hutchinson MT, Mursthouse M *et al.* 1997. A new tetragonal silicate mineral occurring as inclusions in lower-mantle diamonds. *Nature*, 387: 486–488
- Harte B and Harris JW. 1994. Lower mantle mineral associations preserved in diamonds. *Mineralogical Magazine*, 58A: 384–385.
- Hawkesworth CJ, Kempton PD, Rogers NW *et al.* 1990. Continental mantle lithosphere, and shallow level enrichment processes in the Earth's mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 96: 256–268
- Janse AJA and Sheahan PA. 1995. Catalogue of worldwide diamond and kimberlite occurrences: a selective and annotative approach. *Journal*

- of Geochemical Exploration, 53: 73–112
- Joswig W, Stachel T, Harris JW *et al.* 1999. New Ca-silicate inclusions in diamonds-tracers from the lower mantle. *Earth and Planet Science Letters*, 17: 1–6
- Kaminsky FV, Zakharchenko OD, Davies R *et al.* 2001. Superdeep diamonds from the Juina area, Mato Grosso State, Brazil. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 140: 734–753
- Kesson SE and Fitzgerald JD. 1992. Partitioning of MgO, FeO, NiO, MnO and Cr₂O₃ between magnesian silicate perovskite and magnesiowustite-implications for the origin of inclusions in diamond and the composition of the lower mantle. *Earth and Planet Science Letters*, 111: 229–240
- Kleinhanns IC, Kreisig K, Kamber BS *et al.* 2002. Combined chemical separation of Lu, Hf, Sm, Nd, and REEs from a single rock digest: precise and accurate isotope determinations of Lu-Hf and Sm-Nd using multicollector-ICPMS. *Analytical Chemistry*, 74: 67–73
- Le Fevre B and Pin C. 2001. An extraction chromatography method for Hf separation prior to isotopic analysis using multiple collection ICP-mass spectrometry. *Analytical Chemistry*, 73: 2453–2460
- Leung IS. 1990. Silicon carbide cluster entrapped in a diamond from Fuxian, China. *American Mineralogist*, 75: 1110–1119
- Li XH, Qi CS, Liu Y *et al.* 2005. Rapid Separation of Hf from Rock Samples for Isotope analysis by MC-ICPMS: A Modified Single-Column Extraction Chromatography Method. *Geochimica*, 34(2): 109–114 (in Chinese with English abstract)
- Liu LG. 1999. Genesis of diamonds in the lower mantle. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134: 170–173
- Lu FX, Wang Y, Chen MH *et al.* 1998. Geochemical characteristics and emplacement ages of the Mengyin kimberlites, Shandong Province, China. *International Geology Review*, 40: 998–1006
- McCammon C, Hutchinson M, Harris J. 1997. Ferric iron content of mineral inclusions in diamonds from Sao Luiz: A view into the lower mantle. *Science*, 278: 434–436
- McDonald I, De Wit MJ, Smith CB *et al.* 1995. The geochemistry of the platinum-group elements in Brazilian and southern African kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59: 2883–2903
- Meyer HOA, Zhang A, Milledge HJ *et al.* 1994. Diamonds and inclusions in diamonds from Chinese kimberlites. In: Meyer HOA, Leonardos OH (eds.). *Diamonds: Characterization, Genesis and Exploration*. CPRM Special Publication 1/B, Brasilia, pp 98–105
- Mitchell RH. 1986. *Kimberlites: Mineralogy, Geochemistry, and Petrology*. Plenum Press
- Mitchell RH. 1995. *Kimberlites, Orangeites, and Related Rocks*. Plenum Press
- Sang HQ, Wang SS, Qiu J. 1994. The ⁴⁰Ar-³⁹Ar ages of pyroxene, hornblende and plagioclase in Taipingzhai granulites in Qianxi County, Hebei Province and their geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 12(3): 390–400 (in Chinese with English abstract)
- Stachel T, Harris JW, Brey GP *et al.* 2000. Kankan diamonds (Guinea) II: lower mantle inclusion parageneses. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 140: 16–27
- Steiger RH and Jäger E. 1977. Subcommittee on geochronology; convention on the use of decay constants in geochronology and cosmochronology. *Earth and Planetary Science Letters*, 36: 359–362
- Tainton KM and McKenzie D. 1994. The generation of kimberlites, lamproites, and their source rocks. *Journal of Petrology*, 35: 787–817
- Tompkins LA, Meyer SP, Han Z *et al.* 1999. Petrology and geochemistry of kimberlites from Shandong and Liaoning Provinces, China. In: Gurney JJ, Gurney JL, Pascoe MD, Richardson SH (eds.). *Proceedings of 7th International Kimberlite Conference*, volume 2, United States, pp 872–887
- Vervoort J, Patchett P J, Blichert-Toft J *et al.* 1999. Relationships between Lu Hf and Sm Nd isotopic systems in the global sedimentary system. *Earth and Planetary Science Letters*, 168: 79–99
- Wang A, Pasteris JD, Meyer HOA *et al.* 1996. Magnesite-bearing inclusion assemblage in natural diamond. *Earth and Planetary Science Letters*, 141: 293–306
- Wang SS. 1992. Constraints of chlorine on ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating and calculation of high-precision ⁴⁰Ar/³⁹Ar ages. *Science Geologica Sinica*, 18(4): 369–378 (in Chinese)
- Wang W. 1998. Formation of diamond with mineral inclusions of “mixed” eclogite and peridotite paragenesis. *Earth and Planetary Science Letters*, 160: 831–843
- Wang W and Gasparik T. 2001. Metasomatic clinopyroxene inclusions in diamonds from the Liaoning province, China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65: 611–620
- Wang W, Sueno S, Takahashi E *et al.* 2000. Enrichment processes at the base of the Archean lithospheric mantle; observations from trace element characteristics of pyrope garnet inclusions in diamonds. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 139: 720–733
- Wang W, Takahashi E, Sueno S. 1998. Geochemical properties of lithospheric mantle beneath Sino-Korea craton; evidence from garnet xenocrysts and diamond inclusions. *Physics of Earth and Planetary Interiors*, 107: 249–260
- Wyllie PJ. 1980. The origin of kimberlite. *Journal of Geophysical Research*, 85: 6902–6910
- Wyllie PJ. 1989. The genesis of kimberlites and some low-SiO₂, high alkali magmas. In: Ross J (ed.). *Kimberlites and Related Rocks*. Geological Society of Australia Special Publication 14, Blackwell, pp 603–615
- Wyllie PJ. 1994. Experimental petrology of upper mantle materials, processes and products. In: Ribeiro F B (ed). *Journal of Geodynamics, Proceedings of International Symposium on the Physics and Chemistry of the uUpper Mantle*, Pergamon Press, pp 429–468
- Wu FY, Yang YH, Xie LW *et al.* 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology. *Chemical Geology*, 234: 105–126
- Xu P, Wu FY, Xie LW *et al.* 2004. Hf isotopic compositions of the standard zircons for U-Pb dating. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1642–1648
- Yang YH, Zhang HF, Xie LW *et al.* 2006. Petrogenesis of typical Mesozoic and Cenozoic volcanic rocks from the North China Craton: new evidence from Hf isotopic studies. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6): 1665–1671 (in Chinese with English abstract)
- York D. 1969. Least squares fitting of a straight line with correlated errors. *Earth and Planetary Science Letters*, 5: 320–324
- Zhang AD, Xu DH, Xie XL *et al.* 1994. The status and future of diamond exploration in China. In: Meyer HOA, Leonardos OH (eds.). *Proceedings of 5th International Kimberlites Conference*, volume 2, *Diamonds: Characterization, Genesis and Exploration*. CPRM, Brasilia, pp 269–264
- Zhang HF. 1993. Discussion on geochemical characteristics and petrogenesis of kimberlites in Tieling, Liaoning Province. *Geoscience*, 7(4): 458–464 (in Chinese)
- Zhang HF, Sun M, Lu FX *et al.* 2001. Geochemical significance of a garnet lherzolite from the Dahongshan kimberlite, Yangtze Craton, southern China. *Geochemical Journal*, 35: 315–331
- Zhang HF, Sun M, Zhou XH *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. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 144: 241–253
- Zhang HF, Sun M, Zhou XH *et al.* 2003. Secular evolution of the lithosphere beneath the eastern North China Craton; evidence from Mesozoic basalts and high-Mg andesites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(22): 4373–4387

Zhao GC, Wilde SA, Cawood PA *et al.* 2002. SHRIMP U-Pb zircon ages of the Fuping complexes: implications for late Archean to Paleoproterozoic accretion and assembly of the North China Craton. *American Journal of Science*, 302: 191 – 226

附中文参考文献

池际尚, 路凤香, 赵崇贺等. 1996. 中国原生金刚石矿形成条件研究. 中国地质大学出版社, 北京, 144 pp

董振信. 1994. 中国金伯利岩. 科学出版社, 北京, 318 pp

冯闯, 张宏福, 周新华. 2000. 辽西发现金伯利岩. *地震地质*, 22(增刊). 95 – 98

李献华, 祁昌实, 刘颖等. 2005. 岩石样品快速 Hf 分离与 MC-ICPMS 同位素分析: 一个改进的单柱提取色谱方法. *地球化学*,

34(2): 109 – 114

桑海青, 王松山, 裘冀. 1994. 河北省迁西县太平寨花岗岩中辉石、角闪石和长石的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄及其地质意义. *岩石学报*, 12(3): 390 – 400

王松山. 1992. 氩对 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年的制约和高精度 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄的计算. *地质学报*, 18(4): 369 – 378

杨岳衡, 张宏福, 谢烈文等. 2006. 华北克拉通中、新生代典型火山岩的岩石成因: 铷同位素新证据. *岩石学报*, 22(6): 1665 – 1671

张宏福. 1993. 辽宁省铁岭地区金伯利岩的地球化学特征及其成因初探. *现代地质*, 7(4): 458 – 464