

# 汉诺坝橄榄岩捕虏体原位 Re-Os 同位素年龄与多发地幔事件

余淳梅 郑建平 W. L. Griffin

(中国地质大学地球科学学院, 武汉 430074; 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074; GEMOC ARC National Key Center, Department of Earth and Planetary Sciences, Macquarie University, Sydney NSW 2109, Australia. E-mail: [chmyu@cug.edu.cn](mailto:chmyu@cug.edu.cn))

**摘要** 利用 LAM-MC-ICPMS 原位分析技术获得了汉诺坝玄武岩中橄榄岩捕虏体的硫化物 Re-Os 同位素年龄结果。硫化物有矿物包裹体和填充裂隙两种产出形式。其中包裹体硫化物的  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  比值为 0.1124~0.1362,  $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$  比值为 0.0026~1.8027; 填隙状硫化物  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  比值为 0.1174~0.1354,  $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$  比值为 0.0365~1.4469。包裹体硫化物中最大 Re 亏损年龄( $T_{\text{RD}}$ )为 2.1 Ga。Re-Os 同位素比值小于原始地幔现代值的包裹体硫化物获得的等时线年龄为  $(2.3 \pm 1.2)$  Ga。填隙状硫化物与受到后期扰动的包裹体硫化物共同构成的等时线年龄为晚元古年龄值  $(645 \pm 225)$  Ma, 记录着岩石圈地幔形成后的改造事件。此外, 填隙状硫化物所记录的 1.3 Ga ( $T_{\text{Ma}} T_{\text{RD}}$ )的中元古代地质年龄也可能记录着一次深部地质过程。硫化物原位 Re-Os 同位素获得的不同年龄值反映了汉诺坝岩石圈存在多发地幔事件。

**关键词** 原位分析 Re-Os同位素 橄榄岩捕虏体 岩石圈地幔 汉诺坝

陆下岩石圈地幔(SCLM)的形成年龄是了解大陆形成、演化的关键<sup>[1]</sup>。近年来, Re-Os同位素在壳、幔演化示踪及岩石圈地幔定年研究中取得了巨大进展<sup>[2-8]</sup>, 并已成为目前测定SCLM形成年龄的较理想的同位素体系。中国东部广泛发育的新生代碱性玄武岩含有丰富的地幔橄榄岩捕虏体, 为地幔岩 Re-Os体系的研究提供了珍贵的样品。已有的橄榄岩全岩 Re-Os同位素<sup>[9-16]</sup>无疑对东部岩石圈地幔性质及演化研究起了一定的推动作用。但橄榄岩中赋存Re-Os同位素体系的硫化物通常具有多种产状和成因, 以包裹体形式产出的硫化物为地幔部分熔融抽取后的残余, 而填隙状硫化物则为含硫化物的交代流体结晶形成<sup>[17]</sup>, 使得全岩Re-Os同位素具有不同世代混合的问题。而利用多接收器的电感耦合等离子质谱与激光剥蚀探针联机(LAM-MC-ICPMS)则可以原位分析橄榄岩中不同产状单颗粒硫化物的Re-Os同位素比值, 能够更好地揭示深部作用过程的细节<sup>[11,17-21]</sup>。

汉诺坝新生代玄武岩中橄榄岩捕虏体的岩石学、地球化学和同位素地球化学等方面资料, 已有相当积累<sup>[22-26]</sup>。但由于测试技术的原因, 对橄榄岩捕虏

体年龄的报道还较少<sup>[13,27]</sup>。在此基础上, 本文选取汉诺坝幔源橄榄岩捕虏体作为研究对象, 报道了利用 LAM-MC-ICPMS激光原位分析技术获得的该区橄榄岩捕虏体中单颗粒硫化物的Re-Os同位素年龄结果。由包裹体硫化物和填隙状硫化物所确定的不同阶段的年龄值表明汉诺坝地区岩石圈曾经历了多发的地幔事件, 反映出地幔演化的复杂性, 同时也显示出原位Re-Os同位素定年在探讨地幔演化过程细节问题上有其优越性。

## 1 样品与分析技术

根据地质背景、构造演化及变质岩的 $P$ - $T$ - $t$ 轨迹, 华北地块被分为3个区块<sup>[28]</sup>。汉诺坝位处华北地块内部造山带北缘(图1), 紧邻兴蒙造山带。

橄榄岩捕虏体主要采自大麻坪和接沙坝(图1)。样品新鲜, 多呈椭球状, 大小在5~30 cm不等。以尖晶石二辉橄榄岩为主, 另有少量的方辉橄榄岩。常见中、粗粒结构。矿物组合为Ol+Opx+Cpx $\pm$ Sp, 橄榄石含量约40%~75%, 斜方辉石占5%~42%, 单斜辉石5%~25%, 尖晶石<5%。橄榄石扭折带发育, 具细粒结构的样品常可见三联点结构, 说明这样的橄榄岩

2007-04-30 收稿, 2007-05-30 接受

国家自然科学基金(批准号: 40602009)、国家杰出青年科学基金(批准号: 40425002)和中国地质大学(武汉)优秀青年教师资助计划(批准号: CUGQNL10)资助项目

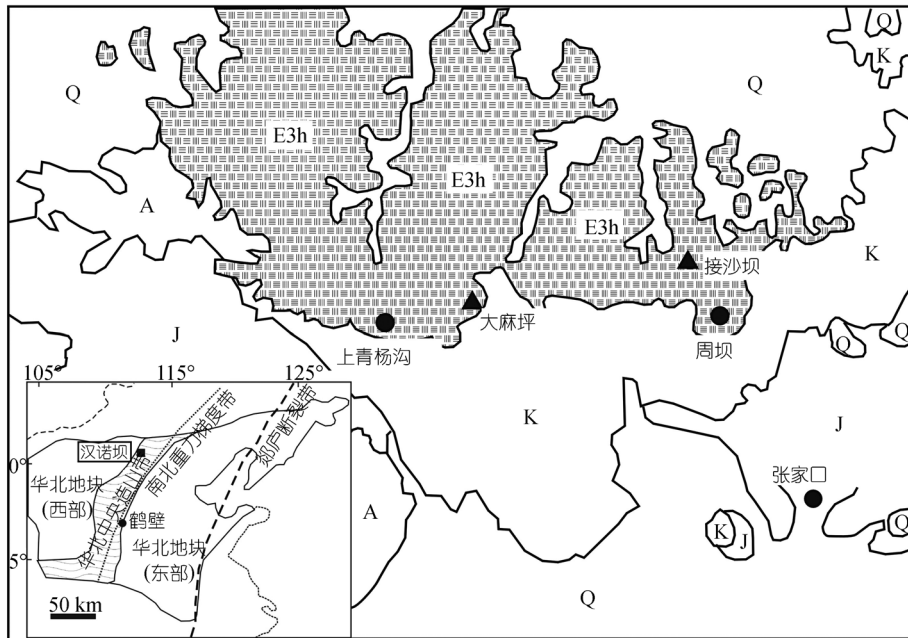


图 1 汉诺坝玄武岩分布及采样位置

A: 太古代; J: 侏罗纪; K: 白垩纪; Q: 第四纪; E3h: 汉诺坝玄武岩

经历了重结晶作用. 大多样品包含非常丰富的硫化物, 并表现如下两种不同产状(图 2): ( ) 被包裹在以橄榄石为主的硅酸盐矿物(如橄榄石)中, 形态多为浑圆状, 少数呈次圆状, 个别大者直径可达 100  $\mu\text{m}$ , 小者仅数微米; ( ) 以填隙状产出, 分布在矿物颗粒之间或沿微裂隙分布, 形态不规则. 橄榄石的 $\text{Mg}^\#$ 为 86.4~92.8, 单斜辉石和尖晶石的 $\text{Cr}^\#$ 值变化比较大(分别为 3.2~28.0 和 7.2~59.5). 单斜辉石的稀土配分型式多样, 除个别样品稀土元素呈平坦型分布外, LREE 分别呈富集型和亏损型分布 [29].

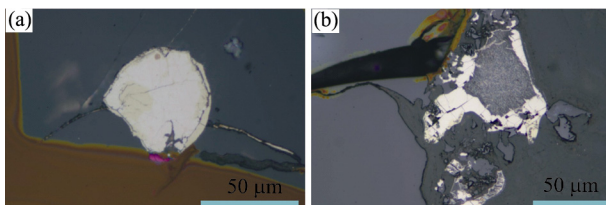


图 2 汉诺坝橄榄岩捕虏体中不同产状硫化物

(a) 橄榄石中硫化物包裹体; (b) 填隙状硫化物

对橄榄岩捕虏体中不同产状的硫化物进行了原位(in situ)的Re-Os同位素测定. 所有样品分析都在澳大利亚Macquarie大学GEMOC中心完成. 将橄榄岩样品磨制成 3 cm  $\times$  2 cm  $\times$  1 cm 的块体或探针片, 并将表面抛光, 在显微镜反光下寻找粒度 > 30  $\mu\text{m}$  的硫化

物颗粒用以激光原位分析其Re-Os同位素. 若为块体样, 做完测试后要将上部约 200  $\mu\text{m}$ 厚度的样品磨掉并重新抛光, 以剥蚀出更深部的硫化物, 这样的程序通常重复 3~4 次, 以保证每个样品中的硫化物均能最大程度地被测试. 硫化物的Re-Os同位素是在多接收器的电感耦合Nu等离子体质谱与Merchantek EO LUV266 nm激光剥蚀探针(LAM-MC-ICPMS)的联机上进行. 以He作为载气以提高灵敏度和减少元素分馏, 激光束直径为 50  $\mu\text{m}$ , 激光脉冲速率为 5 Hz, 激光束的脉冲能量为 3~5 mJ. 以合成NiS(PGE-A, Os = 194.2  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )作为内标. 在测试中, 每测完一个样品需重新测一次标样. 通常经过一天的运作测试, 仪器系统误差 < 1%. Pearson等人 [20]对LAM-MC-ICPMS的运行条件、分析过程及数据精度等做了详细介绍. 利用波长色散分析原理和一套天然的及人工标样对硫化物主要元素成分进行了分析, 测试是在Cameca SX-50 电子探针上完成的, 并利用联机的能量色散探测器做了硫化物中元素的分布图像(图 3). 测试时加速电压和工作电流分别是 15 keV和 20 nA.

## 2 分析结果

包裹体硫化物元素分布图像显示其成分分布不均一(图 3), 主要由富 Ni 和贫 Ni 两部分组成, 对 3 个样品中的包裹体硫化物做了成分分析(表 1). S 含量变

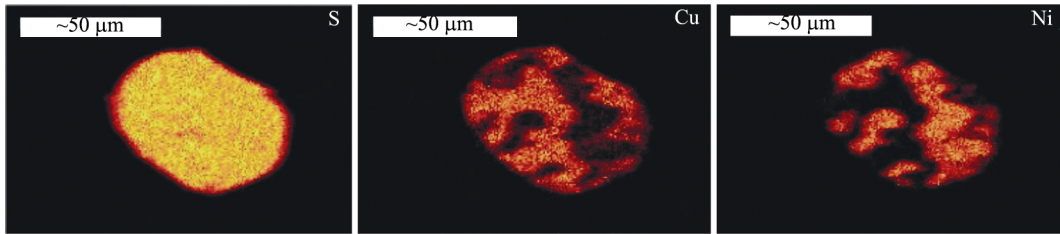


图3 汉诺坝橄榄岩捕虏体中包裹体硫化物元素分布图像(DM02-15)

表1 橄榄岩捕虏体中包裹体硫化物成分测试结果(%)

样品	Co	Fe	Ni	Cu	W	Mg	S	O	Si	Sum	Ni/Fe	(Ni+Fe)/S
DM02-15-1-1	0.25	24.9	40.4	0.28	0.00	0.00	33.2	0.47	0.01	99.5	1.55	1.09
DM02-15-1-2	0.00	29.6	0.51	34.7	0.00	0.00	34.4	0.31	0.02	99.5	0.02	0.50
DM02-15-2-1	0.00	28.7	1.88	35.3	0.00	0.00	33.4	0.54	0.01	99.8	0.06	0.52
DM02-15-2-2	0.31	24.4	40.4	1.19	0.00	0.00	32.9	0.57	0.02	99.8	1.58	1.09
DM02-15-3-1	0.27	32.2	34.1	0.41	0.00	0.00	33.2	0.45	0.01	100.6	1.01	1.11
DM02-15-3-2	0.02	28.1	2.97	32.4	0.00	0.45	32.9	1.66	0.57	99.1	0.10	0.54
DM02-15-4-1	0.32	31.7	21.5	13.2	0.00	0.00	33.4	0.33	0.01	100.4	0.65	0.89
DM02-15-4-2	0.07	29.2	2.56	29.6	0.00	0.75	31.8	6.16	1.29	101.4	0.08	0.57
DM02-19-1-1	0.37	24.8	37.8	3.76	0.00	0.00	33.3	0.50	0.01	100.5	1.45	1.04
DM02-19-1-2	0.00	29.9	0.97	34.7	0.00	0.00	34.1	0.38	0.00	100.0	0.03	0.52
JSB02-1-1-1	0.36	27.7	38.7	0.47	0.00	0.00	32.9	0.40	0.01	100.5	1.33	1.12
JSB02-1-1-2	0.00	30.5	0.50	34.6	0.04	0.00	34.1	0.33	0.01	100.1	0.02	0.52

化于 31.8%~34.4%，Fe 范围值为 24.4%~32.2%，硫化物富Ni 部分Ni 为 34.1%~40.4%，Cu 为 0.28%~3.76%，(Ni+Fe)/S = 1.04~1.12，为镍黄铁矿；贫Ni 部分Ni 含量为 0.50%~2.97%，Cu 为 29.6%~35.3%，为黄铜矿。所测 3 个样品中仅一个颗粒为单硫化物固溶体(MSS)，(Ni+Fe)/S=0.89)，黄铜矿分布在其颗粒边部，与文献所报道的克拉通地幔橄榄岩中包裹体硫化物特征 [1,18] 类似。

不同产状硫化物Re-Os 同位素分析结果见表 2。包裹体硫化物的  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  比值为 0.1124~0.1362，除两个样品外，其余都低于原始地幔的现代值 0.1296 [5]； $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$  比值为 0.0026~1.8027，同样也跨越了原始地幔  $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$  的现代比值 0.435 [6]，包裹体硫化物Re-Os 比值高于原始地幔者可能与地幔形成过程中含硫化物熔体的多次引入，受到后期Re 加入的影响有关 [4]，也说明研究区地幔在形成过程中经历了较为复杂的熔融抽取作用。具有最高Mg#(92.8)的橄榄石样品中的硫化物(JSB02-2-1)具有最低的  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  和  $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$  比值，该样品中橄榄石含量高达 80%，辉石含量较低，无尖晶石。汉诺坝橄榄岩中包裹体硫化物具有比全岩变化大的Re-Os 同位素比值 ( $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}=0.0476\sim0.3450$ ； $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os} = 0.1166\sim0.1282$ ) [13]。理论上，包裹体硫化物通常有低

的  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  同位素比值，填隙状硫化物则一般具有高于原始地幔的  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  [18]。汉诺坝填隙状硫化物  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  比值为 0.1174~0.1354，除一个样品(DM02-15)Os 同位素比值较高外，其余均低于原始地幔比值，这是否与样品的重结晶作用有关，尚不清楚。填隙状硫化物  $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$  比值为 0.0365~1.4469，大多低于原始地幔相应值。

### 3 讨论

#### 3.1 汉诺坝岩石圈地幔的年龄

依据硫化物的Re-Os 同位素比值所计算的模式年龄( $T_{MA}$ )与Re 亏损年龄( $T_{RD}$ )列于表 2。 $T_{MA}$  记录的是熔体从地幔源区分离后，残留的岩石圈地幔演化至今的时间 [2]。汉诺坝橄榄岩捕虏体中包裹体硫化物的  $T_{MA}$  值为 -3.5~2.2 Ga，填隙状硫化物  $T_{MA}$  值为 -0.8~3.0 Ga。一般而言，硫化物  $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os} > 0.07\sim0.08$ ，则其  $T_{MA}$  不具有年龄意义 [1,19]。汉诺坝橄榄岩捕虏体中仅一个样品的包裹体硫化物(JSB02-2-1)具有低的  $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$  比值(0.0026)，其  $T_{MA}$  为 2.2 Ga。填隙状硫化物中  $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$  比值为 0.0690 与 0.0365 的样品，所对应  $T_{MA}$  分别为 1.4 与 0.9 Ga，给出未来  $T_{MA}$  年龄值的样品可能与后期Re 的加入有关。基于假设部分熔融过程中 Re 全部进入熔体中所计算的 Re



表 2 汉诺坝橄榄岩捕虏体中硫化物 Re-Os 同位素分析结果<sup>a)</sup>

样品	<sup>187</sup> Re/ <sup>188</sup> Os	1se	<sup>187</sup> Os/ <sup>188</sup> Os	1se	T <sub>MA</sub> /Ga	1sd	T <sub>RD</sub> /Ga	1sd	γ <sub>Os</sub>	Mg <sup>#</sup> (Ol)	Cr <sup>#</sup> (Cpx)	产状
JSB02-2-1	0.0026	0.0005	0.1124	0.0040	2.2	0.6	2.1	0.6	-11.6	92.8	25.3	e
DM02-4-1	0.7191	0.0086	0.1292	0.0037	0.4	0.7	-0.3	0.5	1.65	90.8	12.4	e
DM02-4-2	0.1020	0.0220	0.1186	0.0230	1.7	4.5	1.2	3.4	-6.67			e
DM02-5t	0.6090	0.0080	0.1254	0.0030	-0.5	0.9	0.3	0.5	-1.30	89.7	8.56	e
DM02-11-2	1.8027	0.0370	0.1362	0.0057	0.4	0.2	-1.3	0.8	7.14	90.6	9.28	e
DM02-11-4	0.1426	0.0018	0.1219	0.0025	1.2	0.6	0.8	0.4	-4.08			e
DM02-13-1	0.2667	0.0074	0.1246	0.0008	1.1	0.3	0.4	0.1	-2.00	89.9	7.13	e
DM02-15-1	0.2794	0.0028	0.1270	0.0009	0.0	0.4	0.0	0.4	-0.10	89.6	7.29	e
DM02-15-4	0.4456	0.0025	0.1245	0.0006	-3.5	0.9	0.4	0.1	-2.04			e
DM02-9-1	0.0365	0.0026	0.1184	0.0011	1.4	0.2	1.3	0.2	-6.85	91.2	23.7	i
DM02-9-2	0.2155	0.0044	0.1174	0.0008	3.0	0.3	1.4	0.1	-7.60			i
DM02-11-5	0.0690	0.0008	0.1220	0.0011	0.9	0.2	0.7	0.2	-4.00	90.6	9.28	i
DM02-11-8	0.1555	0.0008	0.1212	0.0003	1.4	0.1	0.9	0.0	-4.61			i
DM02-15t-10	1.4469	0.0500	0.1354	0.0097	0.5	0.6	-1.2	1.4	6.56	89.6	7.29	i
DM02-19	0.6586	0.0150	0.1238	0.0044	-0.8	1.0	0.5	0.7	-2.58	90.9	10.7	i

a) e: 包裹体; i: 填隙状; γ<sub>Os</sub>=[(<sup>187</sup>Os/<sup>188</sup>Os<sub>sample</sub>)/(<sup>187</sup>Os/<sup>188</sup>Os<sub>chondrite</sub>)-1]×100

亏损年龄(T<sub>RD</sub>)代表地幔发生熔融时的年龄 [2]。汉诺坝包裹体状硫化物的 T<sub>RD</sub> 年龄为 -10.3~2.1 Ga, 其中接沙坝样品(JSB02-2-1)中硫化物包裹体获得了与其 T<sub>MA</sub> 较为一致的 Re 亏损年龄 (T<sub>RD</sub>) 为 2.1 Ga (<sup>187</sup>Re/<sup>188</sup>Os = 0.0026, <sup>187</sup>Os/<sup>188</sup>Os = 0.1124); 填隙状硫化物(DM02-9-1)的 T<sub>RD</sub> 年龄值为 1.3 Ga, 与其 1.4 Ga 的 T<sub>MA</sub> 年龄值接近。除此之外, 填隙状硫化物还获得了 0.7~0.9 Ga 的晚元古代 T<sub>RD</sub> 年龄值。就计算年龄值看, 包裹体老于填隙状硫化物 [17-20]。

Re-Os 比值小于原始地幔相应值的包裹体硫化物代表了岩石圈地幔形成过程中部分熔融后的残余相, 汉诺坝橄榄岩捕虏体中比值小于原始地幔现代值的 5 个包裹体硫化物样品数据与原始地幔可构成一条等时线(图 4), 用 Isoplot3.0 软件处理获得了 (2341 ± 1200) Ma 的早元古代年龄。需要指出的是, 若不与原始地幔进行拟合, 获得的等时线年龄则为太古代年龄值 (2918 ± 1750) Ma (图中未表示)。是否需要与原始地幔进行拟合, 本身是一个复杂的问题, 这是由于到底岩石圈地幔经历了多少次熔融提取事件, 不容易说明清楚, 但至少本文的结果说明不止一次。同时由于这两年龄的误差比较大, 仅作为参考等时线年龄, 我们没有强调它们的具体意义, 但因前者更接近上述计算得出的包裹体硫化物(JSB02-2-1, T<sub>MA</sub> T<sub>RD</sub>) 年龄值, 故本文着重讨论该早元古代年龄。这些年龄值都老于汉诺坝橄榄岩捕虏体全岩 Re-Os 同位素年龄 [13,27]。填隙状硫化物与受到后期扰动、Re-Os 比值大于原始地幔现代值的包裹体硫化物样品所构成的参考等时线年龄则为晚元古年龄值 ((645 ± 225) Ma)。

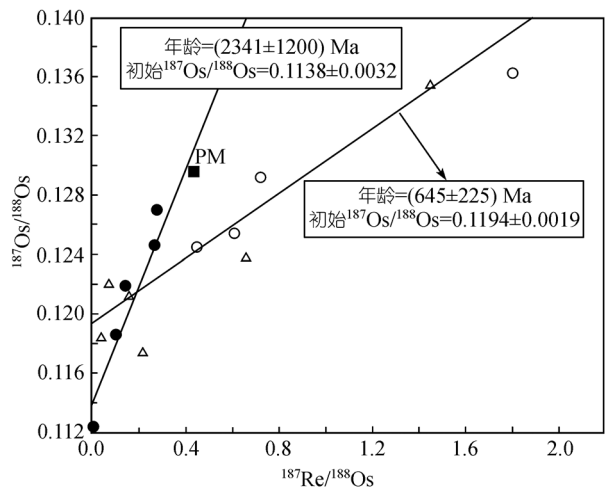


图 4 汉诺坝橄榄岩捕虏体中硫化物 Re-Os 同位素参考等时线年龄

●表示部分熔融后残留的包裹体硫化物; ○表示受到后期扰动的包裹体硫化物; △表示填隙状硫化物

### 3.2 华北东部岩石圈地幔多发事件

华北地块是世界上最古老的克拉通之一。中生代、新生代以来, 华北地块东部古老岩石圈根经受了强烈的改造 [30-32], 古生代时期存在的古老、冷的, 厚达 200 多公里的岩石圈根至新生代时转变为 80~150 km [33]。对于减薄作用发生前后华北东部现存岩石圈地幔的性质和形成时代目前已有许多成果发表, 显示出华北地块存在古老的太古代岩石圈地幔, 如地球化学特征及原位 Re-Os 同位素所揭示的河南鹤壁地区仍残留有太古代岩石圈地幔 [34-36], 辽宁复县古生代金伯利岩中的橄榄岩捕虏体全岩 Re-Os 同位素年龄

也为太古代 [13]。此外,华北东部其他地区的岩石圈地幔年龄则大多为早元古、中元古代 [12~15,27]。本文的硫化物原位Re-Os同位素显示,汉诺坝地区新生代时的陆下岩石圈地幔中硫化物有着从太古代-晚元古代的不同阶段年龄值,可能分别记录了华北东部岩石圈地幔的多次事件及复杂的演化过程。如果汉诺坝与鹤壁岩石圈地幔一样是太古代形成的,那么由地幔部分熔融抽取后残留硫化物获得了 2.3 Ga的参考等时线年龄,则可能意味着该区在此之前曾发生过地幔置换作用 [13,33]。当原始地幔不参与等时线拟合时,获得的太古代年龄值是否在一定程度上反映了汉诺坝现存地幔的古老性质?一般认为地幔橄榄石的  $Mg^{\#}$  直接反映着岩石圈地幔的饱满与亏损程度。就克拉通地幔来说,太古代地幔橄榄岩中橄榄石往往有较高的  $Mg^{\#}$ , 一般 >92 [19,35], 汉诺坝橄榄岩捕虏体中橄榄石出现了较高的  $Mg^{\#}$  (92.8), 并且在岩石地球化学性质上与太古代岩石具有一定的相似性 [29], 但是否汉诺坝地区会象鹤壁一样仍然保留有太古代地幔的残余?需要更多的工作积累。汉诺坝橄榄岩捕虏体 645 Ma的晚元古年龄则可能记录着一次岩石圈地幔改造事件,该年龄值在汉诺坝地区尚未见报道,但华北地块内其他地区有晚元古代地质事件出现,如对辽宁复县下地壳镁铁质捕虏体中锆石U-Pb定年获得的 600~700 Ma的年龄值,被认为与晚元古代软流圈的上涌有关 [37], 汉诺坝的这一年龄是否与这一上涌有关,值得考虑。除获得的 2 个等时线年龄外,汉诺坝橄榄岩捕虏体中填隙状硫化物还记录了 1.3 Ga ( $T_{Ma}$   $T_{RD}$ ) 的中元古代地质年龄。填隙状硫化物为含硫化物交代流体的结晶产物 [17], 虽不能代表岩石圈地幔熔融亏损事件,但可以反映地幔的交代事件,并且其年龄值可在一定程度上制约岩石圈地幔事件年龄 [21]。目前对于华北地块 1.3~1.4 Ga的地质事件报导并不多 [38~41], 被认为与华北地块的一次伸展事件有关 [39]。此外,华北地块南缘信阳橄榄岩捕虏体的锆石中也记录着这一事件 [42,43]。

#### 4 结论

汉诺坝橄榄岩捕虏体中包裹体硫化物最大 Re 亏损年龄 ( $T_{RD}$ ) 为 2.1 Ga。比值小于原始地幔现代值的包裹体硫化物所给出的早元古代-太古代年龄信息暗示该区的古老地幔信息。填隙状硫化物与受到后期扰动的包裹体硫化物共同构成的等时线年龄为晚元古年龄 ((645 ± 225) Ma), 反映了地幔形成后的改造事

件。此外,填隙状硫化物所得到的 1.3 Ga ( $T_{Ma}$   $T_{RD}$ ) 的中元古代地质年龄也可能记录着一次深部地质热事件。新生代时汉诺坝陆下岩石圈地幔中不同硫化物存在多种年龄值,记录着该区多发的地幔事件和复杂的演化历史。

#### 参 考 文 献

- 1 Griffin W L, Spetisus Z V, Pearson N J, et al. *In situ* Re-Os analysis of sulfide inclusions in kimberlitic olivine: New constraints on depletion events in the Siberian lithospheric mantle. *Geochem Geophys Geosyst*, 2002, 3: 1069—1094 [DOI]
- 2 Pearson D G, Carlson R W, Shirey S B, et al. The stabilization of Archaean lithospheric mantle: A Re-Os isotope study of peridotite xenoliths from the Kaapvaal and Siberian cratons. *Earth Planet Sci Lett*, 1995, 134: 341—357 [DOI]
- 3 Pearson D G. The age of continental roots. *Lithos*, 1999, 48: 171—194 [DOI]
- 4 Pearson D G, Irvine G J, Ionov D A, et al. Re-Os isotope systematics and platinum group element fractionation during mantle melt extraction: A study of massif and xenolith peridotite suites. *Chem Geol*, 2004, 208: 29—59 [DOI]
- 5 Meisel T, Walker R J, Irving A J, et al. Osmium isotopic compositions of mantle xenoliths: A global perspective. *Geochim Cosmochim Acta*, 2001, 65(8): 1311—1323 [DOI]
- 6 Bennett V C, Nutman A P, East T M. Constraints on mantle evolution from  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  isotopic compositions of Archean ultramafic rocks from southern West Greenland (3.8Ga) and Western Australia (3.46Ga). *Geochim Cosmochim Acta*, 2002, 66(14): 2615—2630 [DOI]
- 7 Carlson R W. Application of the Pt-Re-Os isotopic systems to mantle geochemistry and geochronology. *Lithos*, 2005, 82: 249—272 [DOI]
- 8 Lee S R, Walker R J. Re-Os isotope systematics of mantle xenoliths from South Korea: Evidence for complex growth and loss of lithospheric mantle beneath East Asia. *Chem Geol*, 2006, 231: 90—101 [DOI]
- 9 孙卫东, 彭子成, 支霞臣, 等. NTIMS 法测定盘石山橄榄岩包体的钨同位素组成. *科学通报*, 1997, 42(21): 2310—2313
- 10 支霞臣. Re-Os 同位素体系和大陆岩石圈地幔定年. *科学通报*, 1999, 44(22): 2362—2371
- 11 靳永斌, 支霞臣, 孟庆, 等. 大别山北部饶拔寨超镁铁岩体的形成时代: Re-Os 同位素法定年. *科学通报*, 2003, 48(24): 2560—2565
- 12 支霞臣, 彭子成, 陈道公, 等. 苏皖地区幔源橄榄岩捕虏体的钨同位素组成、模式年龄及其意义. *岩石学报*, 2001, 17(1): 11—18
- 13 Gao S, Rudnick R L, Carlson R W, et al. Re-Os evidence for replacement of ancient mantle lithosphere beneath the North China craton. *Earth Planet Sci Lett*, 2002, 198: 307—322 [DOI]
- 14 Wu F Y, Walker R J, Ren X W, et al. Osmium isotopic constraints on the age of lithospheric mantle beneath Northeastern China. *Chem Geol*, 2003, 196: 107—129 [DOI]
- 15 Wu F Y, Walker R J, Yang Y H, et al. The chemical-temporal evolution of lithospheric mantle underlying the North China Craton. *Geochim Cosmochim Acta*, 2006, 70: 5013—5034 [DOI]
- 16 Yuan H L, Gao S, Rudnick R L, et al. Re-Os evidence for the age

- and origin of peridotites from the Dabie-Sulu ultrahigh pressure metamorphic belt, China. *Chem Geol*, 2007, 236: 323—338
- 17 Alard O, Griffin W L, Lorand J P, et al. Nonchondritic distribution of the highly siderophile elements in mantle sulfides. *Nature*, 2000, 407: 891—894[DOI]
- 18 Alard O, Griffin W L, Pearson N J, et al. New insights into the Re-Os systematics of sub-continental lithospheric mantle from in situ analysis of sulphides. *Earth Planet Sci Lett*, 2002, 203: 651—663[DOI]
- 19 Griffin W L, Graham S, O'Reilly S Y, et al. Lithosphere evolution beneath the Kaapvaal Craton: Re-Os systematic of sulfides in mantle-derived peridotites. *Chem Geol*, 2004, 208: 89—118[DOI]
- 20 Pearson N J, Alard O, Griffin W L, et al. *In situ* measurement of Re-Os isotopes in mantle sulfides by laser ablation multicollector-inductively coupled plasma mass spectrometry: Analytical methods and preliminary results. *Geochim Cosmochim Acta*, 2002, 66 (6): 1037—1050[DOI]
- 21 Wang K L, O'Reilly S Y, Griffin W L, et al. Proterozoic mantle lithosphere beneath the extended margin of the south China Block: *In situ* Re-Os evidence. *Geology*, 2003, 31(8): 709—712[DOI]
- 22 Song Y, Frey F A. Geochemistry of peridotite xenoliths in basalt from Hannuoba, Eastern China: Implications for subcontinental mantle heterogeneity. *Geochim Cosmochim Acta*, 1989, 53: 97—113[DOI]
- 23 刘丛强, 解广轰, 增田彰正. 汉诺坝玄武岩中地幔岩包体 REE 和 Sr、Nd 同位素地球化学. *岩石学报*, 1996, 12(3): 382—389
- 24 Chen S H, O'Reilly S Y, Zhou X H, et al. Thermal and petrological structure of the lithosphere beneath Hannuoba, Sino-Korean Craton, China: Evidence from xenoliths. *Lithos*, 2001, 56: 267—301[DOI]
- 25 刘勇胜, 高山, 柳小明, 等. 汉诺坝下地壳-上地幔包体的岩石圈热动力学记录. *科学通报*, 2003, 48(14): 1555—1581
- 26 Rudnick R L, Gao S, Ling W L, et al. Petrology and geochemistry of spinel peridotite xenoliths from Hannuoba and Qixia, North China craton. *Lithos*, 2004, 77: 609—637[DOI]
- 27 夏琼霞, 支霞臣, 孟庆, 等. 汉诺坝幔源橄榄岩包体的微量元素和 Re-Os 同位素地球化学: SCLM 的性质和形成时代. *岩石学报*, 2004, 20(5): 1215—1224
- 28 Zhao G C, Cawood P A, Wilde S A, et al. Metamorphism of basement rocks in the Central Zone of the North China Craton: Implications for Paleoproterozoic tectonic evolution. *Precambrian Res*, 2000, 103: 55—88[DOI]
- 29 余淳梅, 郑建平, Griffin W L. 汉诺坝橄榄岩捕虏体的单斜辉石 LAM-ICPMS 分析及其岩石圈地幔演化意义. *地球科学——中国地质大学学报*, 2006, 31(1): 93—100
- 30 Menzies A, Fan W M, Zhang M. Paleozoic and Cenozoic lithoprobes and the loss of >120 km of Archean lithosphere, Sino-Korean craton, China. In: Prichard H M, Alabaster T, Harris N, et al, eds. *Magmatic processes and plate tectonics*, vol 76. London: Geol Soc Spec Pub, 1993. 71—81
- 31 Griffin W L, Zhang A, O'Reilly S Y, et al. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino-Korean craton. In: Flower M, Chung S L, Lo C H, et al, eds. *Mantle Dynamics and Plate interactions in east Asia*. Amer Geodynamics Series, vol 27. American Geophysical Union, Washington D C, 1998. 107—126
- 32 Zheng J P, O'Reilly S Y, Griffin W L, et al. Nature and Evolution of Cenozoic lithospheric mantle beneath Shandong Peninsula North China Platform. *Int Geol Rev*, 1998, 40: 471—499
- 33 郑建平. 中国东部地幔置换作用与中生代岩石圈减薄. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999
- 34 郑建平, 路凤香, Griffin W L, 等. 华北东部橄榄岩与岩石圈减薄中的地幔伸展和侵蚀置换作用. *地学前缘*, 2006, 13(2): 76—85
- 35 Zheng J P, O'Reilly S Y, Griffin W L, et al. Relics of the Archean mantle beneath eastern part of the North China block and its significance in lithospheric evolution. *Lithos*, 2001, 57: 43—66[DOI]
- 36 Zheng J P, Sun M, Zhou M F, et al. Trace elemental and PGE geochemical constraints of Mesozoic and Cenozoic peridotitic xenoliths on lithospheric evolution of the North China Craton. *Geochim Cosmochim Acta*, 2005, 69: 3401—3418[DOI]
- 37 Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. U-Pb and Hf-isotope analysis of zircons in mafic xenoliths from Fuxian kimberlites: evolution of the lower crust beneath the North China craton. *Contrib Mineral Petrol*, 2004, 148: 79—103[DOI]
- 38 侯贵廷, 穆治国. 华北克拉通晚前寒武纪镁铁质岩墙群 K-Ar 年龄及地质意义. *华北地质矿产杂志*, 1994, 9(3): 267—270
- 39 邵济安, 张履桥, 李大明. 华北克拉通元古代的三次伸展事件. *岩石学报*, 2002, 18(2): 152—160
- 40 陆松年, 李怀坤, 李惠民, 等. 华北克拉通南缘龙王石董碱性花岗岩 U-Pb 年龄及其地质意义. *地质通报*, 2003, 22(12): 762—768
- 41 李基宏, 杨崇辉, 杜利林. 河北平山深熔伟晶岩锆石成因及 SHRIMP U-Pb 年龄. *自然科学进展*, 2004, 14(17): 774—781
- 42 Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. Zircons in mantle xenoliths record the Triassic Yangtze-North China continental collision. *Earth Planet Sci Lett*, 2006, 247: 130—142[DOI]
- 43 郑建平, 余淳梅, 路凤香, 等. 华北东部大陆地幔橄榄岩组成、年龄与岩石圈减薄. *地学前缘*, 2007, 14(2): 87—97