

蒋蕾茵, 孙晶, 黄铨铮, 等. 地幔榴辉岩包体的同位素定年方法研究进展[J]. 地球科学与环境学报, 2024, 46(1): 114-126.

JIANG Lei-yin, SUN Jing, HUANG Cheng-zheng, et al. Review on Isotopic Dating Methods of Mantle Eclogite Xenoliths[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2024, 46(1): 114-126.

DOI: 10.19814/j.jese.2023.09010

地幔榴辉岩包体的同位素定年方法研究进展

蒋蕾茵¹, 孙晶^{1,2*}, 黄铨铮¹, 吴琪³

(1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)

油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 3. 自然资源部信息中心, 北京 100812)

摘要:地幔榴辉岩包体是寄主岩浆从地球深部地幔携带到地表的俯冲洋壳碎片, 作为一种高压变质岩, 它可能记录着有关大洋地壳原岩、板块俯冲以及后期交代变质过程等重要信息, 因此其年龄也显得尤为重要。通过统计全球超过 500 个已发表的地幔榴辉岩包体的年龄结果, 对比几种常用的地幔榴辉岩包体同位素定年方法, 讨论了不同方法的优缺点及适用情况。结果表明: 金红石 U-Pb 和全岩 Rb-Sr、Sm-Nd、Lu-Hf 全岩等时线法一般给出的是寄主岩浆的年龄或地幔交代的时间, 而榴辉岩中的硫化物 Re-Os 等时线年龄, 锆石 U-Pb 上交点年龄, Sm-Nd、Lu-Hf 石榴子石-单斜辉石双矿物等时线年龄以及锆石 Hf 亏损地幔模式年龄对于其原岩年龄及板块俯冲时代有较为可观的应用前景; 地幔榴辉岩包体最古老年龄的峰值分布在 3.1~2.8 Ga, 与 Kaapvaal 和西伯利亚克拉通构造拼合的时间吻合, 可能代表着全球地幔榴辉岩包体的最早形成时代, 也预示着板块构造可能于中太古代开启。

关键词:板块构造; 地幔榴辉岩包体; 放射性同位素; 定年方法; 锆石 U-Pb 年龄; Sm-Nd 等时线年龄; Lu-Hf 等时线年龄; 硫化物 Re-Os 等时线年龄

中图分类号: P597

文献标志码: A

文章编号: 1672-6561(2024)01-0114-13

Review on Isotopic Dating Methods of Mantle Eclogite Xenoliths

JIANG Lei-yin¹, SUN Jing^{1,2*}, HUANG Cheng-zheng¹, WU Qi³

(1. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. State Key

Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249,

China; 3. Information Center of the Ministry of Natural Resources, Beijing 100812, China)

Abstract: Mantle eclogite xenoliths are subducted oceanic crust fragments carried by host magma from the deep mantle. As a high-pressure metamorphic rock, mantle eclogite xenoliths may record important information about ancient oceanic crust, plate subduction and later metasomatic metamorphism. Therefore, their ages are particularly important. More than 500 published age results of mantle eclogite xenoliths in the world were selected, and several commonly used isotopic dating methods of mantle eclogite xenoliths were compared, and the advantages and disadvantages of different methods and their applicability were discussed. The results show that the rutile U-Pb, and Rb-Sr, Sm-Nd and Lu-Hf whole-rock isochron methods generally date the

收稿日期: 2023-09-04; 修回日期: 2023-12-01 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金项目(42072060); 自然资源部部门预算项目(12110100000180044)

作者简介: 蒋蕾茵(1999-), 女, 浙江台州人, 理学硕士研究生, E-mail: jiangleiyin@gmail.com.

* 通信作者: 孙晶(1987-), 女, 黑龙江大庆人, 副教授, 理学博士, E-mail: sunjing@cup.edu.cn.

age of host magma or the time of mantle metasomatism; the sulfide Re-Os isochron age, zircon U-Pb age and the garnet-clinopyroxene isochron ages of Sm-Nd and Lu-Hf, as well as zircon Hf depleted-mantle model age, have a considerable prospect for the ages of protoliths and tectonic subduction; moreover, the peak of the oldest ages for mantle eclogite xenoliths mostly ranges from 3.1 Ga to 2.8 Ga, which coincides with the age of tectonic amalgamation of Kaapvaal and Siberian cratons. Therefore, it may represent the earliest formation age of mantle eclogite xenoliths, and also indicate that plate tectonics may have started in Mesoarchean.

Key words: plate tectonics; mantle eclogite xenolith; radioisotope; dating method; zircon U-Pb age; Sm-Nd isochron age; Lu-Hf isochron age; sulfide Re-Os isochron age

0 引言

榴辉岩是由石榴子石和绿辉石组成的变质岩。根据产状,榴辉岩可以进一步分为两大类,即造山带榴辉岩和地幔榴辉岩包体。造山带榴辉岩是基性岩浆岩在高压—超高压环境中变质形成的,是板块俯冲—碰撞作用的直接产物,通常出露于地表,年龄一般不超过古元古代(≤ 2.09 Ga)^[1-3];地幔榴辉岩包体是由玄武质岩浆在高压下发生石榴子石和单斜辉石(绿辉石)结晶形成,或代表中太古代至古元古代大洋地壳的再循环碎片,具有多步岩石成因,包括在洋壳扩张脊形成大洋玄武岩和辉长岩,近地表海水和热液蚀变,俯冲通道变质,流体和熔体损失,主要部分再循环到对流地幔,部分进入克拉通岩石圈,经历多变的地幔交代作用,最后经由寄主岩浆(如金伯利岩)喷发到达地表^[4]。地幔榴辉岩包体在很多太古代克拉通中都有被发现过(图1),包括Kaapvaal克拉通^[5-8]、West Africa克拉通^[9-11]、Slave克拉通^[12-13]、西伯利亚克拉通^[14-18]等。

与同时含有陆壳型及洋壳型起源的造山带榴辉岩^[19-23]不同,大量矿物学、地球化学和同位素证据表明,地幔榴辉岩包体的原岩起源于低温、低压条件^[24-25],因此被广泛解释为大洋地壳成因^[10,26-30]。这些来源于地球深部的地幔榴辉岩包体在岩石圈地幔中的体量极小($<1\%$)^[31],却在反演地球深源信息、洋壳俯冲运动和演化过程中起到至关重要的作用。尤其是地幔榴辉岩包体中携带的年龄信息,可能蕴含了有关大洋地壳原岩^[16,32-35]、板块俯冲^[36-37]以及后期交代变质过程^[38-39]等重要时间节点。通过研究地幔榴辉岩包体的年龄,可以建立一套与地幔榴辉岩包体有关的洋壳俯冲模型,并以此来限制板块构造开启的时代^[40-41]。然而地幔榴辉岩包体在高压和高温下存在了数百万年或更长时间,可能受到地幔交代或寄主岩浆的影响,很容易扰乱放射性成

因同位素系统,使得地幔榴辉岩包体的年龄测定困难。

有关地幔榴辉岩包体的年龄研究自20世纪80年代起就陆续被发表。由于定年方法的不同,前人测得的地幔榴辉岩包体年龄数据也有极大的差别,这说明定年方法的选择对于判断地幔榴辉岩包体年龄所代表的含义及地质事件具有重大影响。本文旨在总结全球地幔榴辉岩包体同位素定年数据,分析并探讨各个定年方法的优缺点及具体适用情况,从而提出地幔榴辉岩包体定年方法选择的建议和思路,以期对未来地幔榴辉岩包体的定年工作提供一定参考。

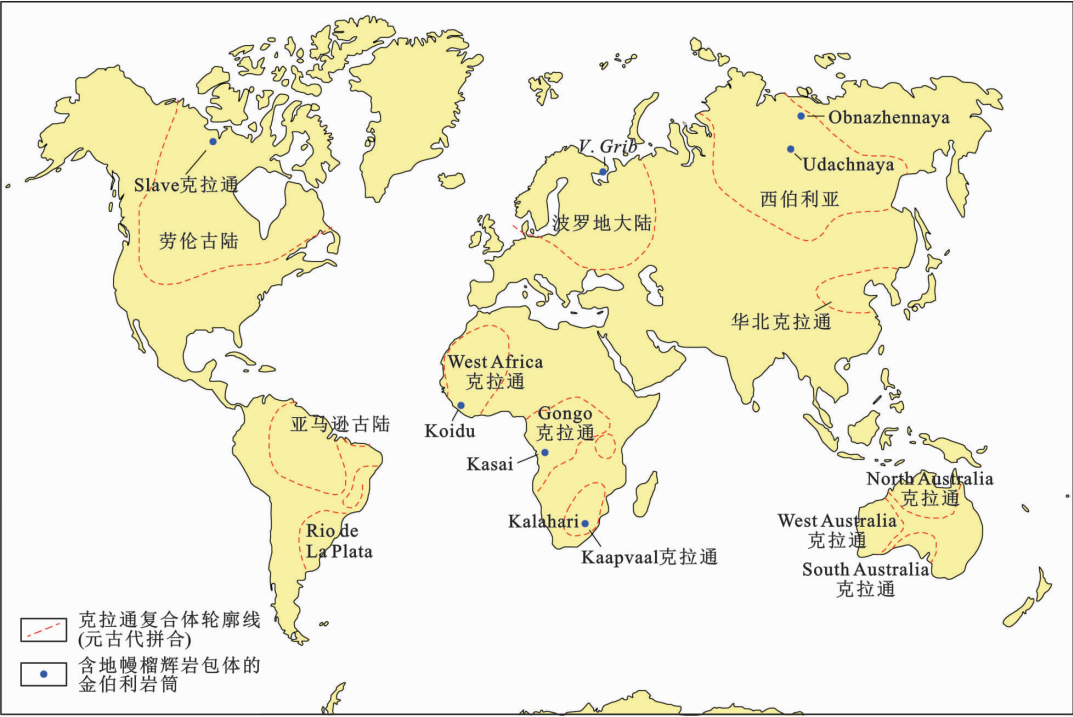
1 定年方法

地幔榴辉岩包体作为一种高级变质岩,同一个样品中测得的年龄可能包括原岩年龄、变质年龄和交代年龄等,年龄范围分布广泛且相当复杂,因此每一个地区的样品都需要结合其同位素定年体系及具体地质事件进行分析。通过文献调研,目前已收集到500余个榴辉岩包体的定年数据,其中包含8个克拉通以及26个产出地幔榴辉岩包体的金伯利岩筒,并按照定年方法及产出地区的不同进行了分类和榴辉岩年龄分布及方法对比的图件绘制,以便进行后续的对比讨论。总体来看,Kaapvaal克拉通为当前地幔榴辉岩包体定年数据最丰富的克拉通;除此之外,Slave、Kasai、West Africa克拉通等都具有较为深入的研究。以下列出目前最为常用的几种地幔榴辉岩包体的同位素定年方法。

1.1 U-Pb 年龄

1.1.1 锆石 U-Pb 年龄

锆石是变质岩中普遍产出的副矿物之一,因其物理和化学性质稳定,富含U、Th等放射性元素,并具有较高的耐火性质和相对较高的封闭温度(>900 °C^[42]),是一种重要的定年矿物。对于具有



图件引自文献[4]和[43],有所修改
图 1 地幔榴辉岩包体的全球分布

Fig. 1 Global Distribution of Mantle Eclogite Xenoliths

复杂演化历史的变质岩,锆石往往具有多期生长和/或重置区域的复杂内部结构^[44]。Melnik 等研究认为,地幔榴辉岩包体中可能含有 4 种类型锆石:①地幔压力下由原始地幔熔体直接结晶形成的榴辉岩中的锆石;②榴辉岩中继承于大洋地壳环境形成的基性岩的岩浆锆石;③变质锆石(包括交代锆石);④寄主金伯利岩中的锆石。然而,只有由原始地幔熔体直接结晶形成的榴辉岩中的锆石才是理想的可以确定榴辉岩形成时间的定年锆石^[45]。

由于榴辉岩演化过程中可能经历地幔热扰动作用、蜕晶化作用以及较低温流体下的重结晶、增生作用等过程^[42,44,46],地幔榴辉岩包体的锆石 U-Pb 年龄通常反映了复杂的变质历史。例如,Slave 克拉通 Jericho 金伯利岩筒中的地幔榴辉岩包体分别产生了 1.676 Ga 与 1.061 Ga^[47]、1.786~0.957 Ga^[12]、1.989~0.806 Ga^[40] 的锆石 U-Pb 年龄,其中最古老的年龄 1.989 Ga 与 1.9 Ga 的 Wopmay 俯冲造山事件相近,为榴辉岩形成时间提供了最小的年龄约束。同时这些年龄还与 Ghost 岩墙群(时代为 1.84 Ga)、麦肯齐堤坝群(1.27 Ga)、Gunbarrel 热事件(0.78 Ga)等^[40-41]相吻合,表明 Jericho 金伯利岩筒中的地幔榴辉岩包体的锆石 U-Pb 体系在形成之后可能受到了这些热事件的扰动。Shchukina 等也认

为地幔榴辉岩包体中锆石的阴极发光图像具有明显的震荡环带,且含有多个年龄^[37,47-48]。因此,无论是年龄统计结果,还是锆石本身的特性,均表明地幔榴辉岩包体锆石的 U-Pb 体系自形成以后难以始终保持封闭。除此之外,地幔榴辉岩包体中锆石 U-Pb 年龄的意义也一直没有达成共识,不同的地质学家分别将其解释为古老继承成分年龄、榴辉岩相变质年龄、退变质晚期重结晶年龄或榴辉岩早期冷却路径的年龄等^[12,48]。因此,从地幔榴辉岩包体中获得的锆石 U-Pb 年龄的意义通常需要结合具体地质区域和热事件进行讨论分析。

锆石的 Hf 同位素模式年龄在地幔榴辉岩包体定年中也有较为可观的应用。在 Hf 同位素研究中,锆石富 Hf 而贫 Lu (¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 值通常小于 0.002),可以认为所测定的 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 值接近其体系形成时的 Hf 同位素组成^[49]。与锆石 U-Pb 体系相比,锆石 Hf 同位素具有更高的封闭温度,在变质事件中的稳定性也更高^[50]。本文统计了来自 Kaapvaal 克拉通、Slave 克拉通、Arkhangelsk 金伯利岩省(俄罗斯西北部)的 29 个地幔榴辉岩包体的锆石 Hf 亏损地幔模式年龄数据,发现其年龄主要集中在 2.5~2.0 Ga,整体较锆石 U-Pb 年龄更古老。Schmidberger 等研究指出,两种定年方法所得

到的年龄差异是因其代表的地质意义不同^[40]。锆石 Hf 亏损地幔模式年龄主要代表了榴辉岩包体的原岩(洋壳)年龄,锆石 U-Pb 年龄则代表了洋壳转化为榴辉岩时的变质年龄。通过获取最古老的锆石 U-Pb 年龄与 Hf 亏损地幔模式年龄的重叠年龄,可以为榴辉岩的变质时间提供最小的年龄约束。

1.1.2 单斜辉石 Pb 模式年龄

单斜辉石(Clinopyroxene)是不相容亲石元素的主要载体,这些亲石元素中包含了放射性衰变系统的母元素(如 Rb、U 等)。例如,Aulbach 等利用 LA-ICPMS 和同位素稀释热电离质谱法(ID-TIMS)测定了 Kaapvaal 克拉通中 Orapa、Koidu 和 Lace 地幔榴辉岩包体中的单斜辉石 U-Pb、Pb-Pb 同位素数据^[51]。结果表明:具有高 Pb 含量和非放射性 Pb 的 Lace 地幔榴辉岩包体样品中的单斜辉石获得了 2.90~2.84 Ga 的单阶段 Pb 模式年龄。Orapa 和 Koidu 地幔榴辉岩包体的年龄则分别为 (2.22 ± 0.54) Ga 和 (2.18 ± 0.45) Ga,与其克拉通边缘的古元古代堆积/碰撞的时间在误差范围内一致。Lace 和 Koidu 地幔榴辉岩包体年龄分别为约 2.6 Ga 和 2.4 Ga,可将其解释为榴辉岩的最小形成年龄。

与锆石 U-Pb 年龄相比,单斜辉石 Pb 模式年龄给出了更古老的榴辉岩形成年龄。Slave 克拉通中 Jericho 金伯利岩筒的地幔榴辉岩包体产生了 2.2 Ga^[52]、2.5~2.2 Ga^[36] 的单斜辉石 Pb 两阶段模式年龄,与锆石 Hf 模式年龄^[40] (2.3~2.2 Ga) 相似,且均老于最老的锆石 U-Pb 年龄(1.989 Ga)。值得一提的是,Kaapvaal 和西伯利亚克拉通地幔榴辉岩包体的单斜辉石 Pb 模式年龄,与锆石 Hf 亏损地幔模式年龄、硫化物 Re-Os 年龄都有着相似的新太古代年龄,代表了地幔榴辉岩包体的最早形成时代。由此可见,单斜辉石 Pb-Pb 定年无论从统计意义上还是年龄解释上,都具有较好的应用前景。

1.1.3 金红石 U-Pb 年龄

金红石也是地幔榴辉岩包体中的副矿物之一,通常以包裹体或者出溶物的形式出现在石榴子石和单斜辉石中,其中包裹体的粒径为 30~150 μm ^[38-39]。金红石 U-Pb 体系的封闭温度为 500 $^{\circ}\text{C}$ ~650 $^{\circ}\text{C}$ ^[53-54],容易遭到后期事件的干扰,测得的金红石 U-Pb 年龄通常代表地幔交代年龄或寄主岩浆的侵位年龄。例如,Ragozin 等对西伯利亚克拉通 Udachnaya 金伯利岩筒中的地幔榴辉岩包体中的金红石 U-Pb 年龄进行了测定,得到了 $(420 \pm$

9.6) Ma 的年龄^[38],其与前人利用 Re-Os 方法对该地幔榴辉岩包体所测得的年龄 $((2.9 \pm 0.4) \text{ Ga})$ ^[55] 相比明显年轻,但这一年龄比西伯利亚地台东北部砂矿中金红石包裹体的年龄 $((356 \pm 54) \text{ Ma})$ ^[56] 和 Udachnaya 金伯利岩筒中钙钛矿的年龄(约 356 Ma)^[57] 更老,Ragozin 等认为它代表着地幔交代作用的时间^[38]。又如,Sun 等对西伯利亚克拉通 Ob-nazhennaya 金伯利岩筒中的地幔榴辉岩包体进行了金红石 U-Pb 定年,得到了 $(153.8 \pm 1.6) \text{ Ma}$ 的年龄,这一年龄与其寄主岩浆金伯利岩中的钙钛矿 U-Pb 年龄 $((151.8 \pm 1.8) \text{ Ma})$ 在误差范围内一致,代表其寄主金伯利岩的年龄,而非地幔榴辉岩包体的年龄^[39]。因此,地幔榴辉岩包体中的金红石 U-Pb 定年通常只能测出较为年轻的年龄,其可能代表地幔交代的年龄或寄主岩浆的年龄,而非有效的地幔榴辉岩包体的年龄。

1.2 Rb-Sr、Sm-Nd、Lu-Hf 等时线年龄

Rb-Sr、Sm-Nd、Lu-Hf 等时线法是常用的定年方法。Rb-Sr 等时线法主要适用于测定基性和中酸性岩浆岩的形成年龄。变质作用中原岩的 Rb-Sr 同位素系统被改造,因此,等时线年龄可能代表变质事件的年龄或无意义的年龄信息^[58]。Sm-Nd 等时线法与 Rb-Sr 等时线法相似,但由于 Sm、Nd 都是稀土元素,受各种地质作用的影响较弱,且¹⁴⁷Sm 的衰变常数较小,Sm-Nd 等时线法适用于古老岩石的定年($>1.0 \text{ Ga}$)。Lu 和 Hf 存在于石榴子石和锆石等矿物中时,它们的地球化学行为(如不同的矿物/熔体分配)表现出显著的差异。与此同时,Lu 的半衰期为 37 Ga,与其他同位素系统相比,蚀变作用、交代作用不易对 Lu-Hf 体系造成影响^[8]。Lu-Hf 体系具有较高的封闭温度,一般认为石榴子石 Lu-Hf 体系封闭温度高于 700 $^{\circ}\text{C}$,高于或者等于同条件下石榴子石 Sm-Nd 体系的封闭温度^[59]。因此,Lu-Hf 体系因其较高的封闭温度及强抵抗蚀变能力而具有良好的记录和保存地幔榴辉岩包体的古老地质历史的能力。

1.2.1 Rb-Sr、Sm-Nd、Lu-Hf 全岩等时线年龄

地幔榴辉岩包体形成后常受到后期地质作用的影响,尤其是沿缝隙渗入的金伯利岩岩浆以及榴辉岩中的矿物和岩浆之间的反应,都会对榴辉岩中的同位素系统造成干扰。对于大多数地幔榴辉岩包体而言,Rb-Sr、Sm-Nd、Lu-Hf 全岩同位素分析通常无法提供可解释的信息^[8]。从前人已发表的数据来看,Sm-Nd 体系易受到流体交代作用和寄主金伯利

岩岩浆的影响,使得 Sm-Nd 等时线年龄常对应金伯利岩年龄、金伯利岩的热构造事件年龄或者其他无意义的地质年龄^[8,60-61],相应的 Nd 模式年龄也表现出较大的不一致性。

为获得较为准确的地幔榴辉岩包体原岩年龄,前人通常使用重建全岩同位素来进行定年,也就是根据矿物数据和模式估计重建干净的整体成分^[12]来构建等时线。在前人对 Roberts Victor 地幔榴辉岩包体的年龄研究中,Jagoutz 等分别给出了 $(2\ 700\pm100)\text{Ma}$ ^[62]、 $(2\ 763\pm300)\text{Ma}$ ^[8]、 $(2\ 740\pm280)\text{Ma}$ ^[34]的全岩重建 Sm-Nd 等时线年龄,这些年龄与 Roberts Victor 地幔榴辉岩包体样品的 Rb-Sr 内部等时线年龄 $(2\ 760\ \text{Ma})$ ^[8]一致,而相应的 Lu-Hf 全岩重建等时线年龄则相对较为年轻,分别为 $2\ 349\ \text{Ma}$ ^[8]和 $(2\ 340\pm130)\text{Ma}$ ^[34]。

Lu-Hf、Sm-Nd、Rb-Sr 全岩等时线法虽然难以较好地限制地幔榴辉岩包体形成的年龄,但是其记录古老地质事件的能力却有所不同。Sm-Nd 体系易受到地幔交代过程中同位素交换和寄主金伯利岩岩浆的影响,相比之下,Lu-Hf 体系更能保存地幔包体地质历史的能力^[34,36]。以 Slave 克拉通 Diavik 金伯利岩筒中的地幔榴辉岩包体为例,高温和低温榴辉岩共同形成了一条较好的 Lu-Hf 等时线 $((2.10\pm0.03)\text{Ga})$,而 Sm-Nd 体系可能受到地幔中熔体或流体的交代作用而无法形成等时线,与相对较高的全岩轻稀土元素(如 Nd)丰度相对应。Rb-Sr 体系由于 Rb 的易流动性,易受到后期构造热事件或交代事件的影响,全岩等时线多表现为无意义的地质年龄,应用相对较少。

1.2.2 Rb-Sr、Sm-Nd、Lu-Hf 矿物等时线年龄

Rb-Sr、Sm-Nd、Lu-Hf 矿物等时线法的样品是从同一个厘米级尺度的样品中选取干净、无杂质的石榴子石和单斜辉石,测定的矿物相及其封闭温度明确,没有其他副矿物或后期交代作用加入的流体等干扰,更容易得到矿物的结晶年龄或是洋壳年龄等较为古老的年龄。地幔榴辉岩包体的 Lu-Hf、Rb-Sr、Sm-Nd 年龄可从石榴子石和单斜辉石的等时线获得(以下称为“两点等时线年龄”),无论其可能的含义如何,它们给出了从古元古代到喷发年龄的范围^[8,34,36],比通过其他方法得出的太古代年龄要年轻,构成了地幔榴辉岩包体和石榴辉石岩包体已发表年龄的主体。Rb-Sr、Sm-Nd、Lu-Hf 体系两点等时线年龄可以记录寄主金伯利岩岩浆侵位的时间,给出与地质事件无关的冷却年龄,确定地幔榴辉岩

包体变质的时间,以及由于交代作用优先叠加一个相或由于难以获得干净的矿物分离得到人为处理的年龄。尤其是单斜辉石中容易含有金伯利岩污染物,这将导致人为古老的两点等时线年龄。在这种情况下,地幔榴辉岩包体的两点等时线年龄反映了冷却年龄或喷发年龄,这取决于所考虑的地幔部分是否低于或高于放射性成因系统的封闭温度。

由于 Rb-Sr 体系易于受到破坏,榴辉岩 Rb-Sr 等时线年龄多与金伯利岩年龄一致,其内部等时线也多展示为无意义的地质年龄。在前人已发表的文献中,除了 Shchukina 等利用 V. Grib 金伯利岩中 4 个地幔榴辉岩包体的单斜辉石 Rb-Sr 同位素确定了一条较好的等时线 $((2\ 848\pm70)\text{Ma})$,平均标准权重偏差(MSWD)为 1.9,较好地限制了洋壳俯冲事件的时间外,其余的地幔榴辉岩包体 Rb-Sr 等时线均不能较好地确定地幔榴辉岩包体形成年龄或原岩年龄^[61]。在 Sr 同位素示踪方面,一些榴辉岩单斜辉石表现为较高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值,被解释为榴辉岩与变质流体(如金伯利岩岩浆)交代的结果^[12,36,51]。与之相反,榴辉岩单斜辉石中极低的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值标志着 Rb 被有效地从岩石中去除,此时 Sr 模式年龄可以代表榴辉岩原岩经历部分熔融的年龄。Gonzaga 等利用非放射性的单斜辉石 Sr 同位素组成分别计算了 Bellsbank 金伯利岩和 Roberts Victor 金伯利岩中地幔榴辉岩包体的 Sr 模式年龄,分别得到了 3.2~3.0 Ga 和 3.4~3.2 Ga 的太古代年龄,并将其解释为原岩年龄或在榴辉岩相部分熔融的年龄^[34]。

Lu-Hf、Sm-Nd 体系常被用来构建石榴子石-单斜辉石两点等时线。Gonzaga 等比较了来自 Kaapvaal 克拉通 Roberts Victor、Lovedale、Bultfontein 和 Roodekraal 金伯利岩中榴辉岩 Lu-Hf、Sm-Nd 两点等时线年龄,发现 Sm-Nd 两点等时线年龄通常较 Lu-Hf 两点等时线年龄更年轻,且在热构造中的稳定性更差^[34]。本文统计的 Sm-Nd 两点等时线年龄主要与金伯利岩喷发的年龄相对应,表明石榴子石、单斜辉石 Sm-Nd 体系在构造热事件中或被金伯利岩夹带的过程中被部分或全部重置。Lu-Hf 两点等时线年龄也表现为较大的分散性,且多与金伯利岩喷发年龄相近^[27,34]。

Shu 等统计了 Slave 和 Kaapvaal 克拉通中 Sm-Nd 和 Lu-Hf 定年数据以及 Bellsbank 金伯利岩筒(Kaapvaal 克拉通)的年龄数据,并提供了从金伯利岩喷发到古元古代的一系列两点等时线年龄^[63]。

除金伯利岩喷发年龄外,其他年龄的含义尚不清楚。前人在研究和文献中对 Sm-Nd 和 Lu-Hf 两点等时线年龄进行数据汇编,以评估此类等时线的意义。目前来说,Rb-Sr、Sm-Nd、Lu-Hf 体系的矿物两点等时线定年法所获得的年龄虽然还不能完全确认其地质意义,却仍是地幔榴辉岩包体年龄研究中一种比较有前景的方法。

1.3 Re-Os 年龄

与 Rb-Sr、Sm-Nd 等亲石性同位素体系不同,Re 和 Os 都是高度亲铁和亲铜元素,在地球形成的早期分异过程中,趋向于集中分配在地核以及硫化物中^[64]。由于大洋地壳是在硫饱和条件下形成的,具有壳源历史的榴辉岩硫化物可能是从其原岩中继承下来的。另一方面,硫可能会在自由移动的硫化物熔体或达到硫化物饱和的交代硅酸盐熔体中移动,因此地幔榴辉岩包体的 Re-Os 同位素系统可以对影响岩石圈演化的事件提供有用的约束。

硫化物是金伯利岩地幔榴辉岩包体中常见的副矿物,Re-Os 体系的亲硫性和在熔体形成时的强烈分馏作用、同时又难以受到后期交代作用影响的特性,使得榴辉岩硫化物能够很好地限制地幔榴辉岩包体的来源和形成年龄^[16]。为了能够更准确地解释结果,重要的是确定榴辉岩相 Re 和 Os 的赋存状态以及这些相是原生的还是引入的^[33]。对于金伯利岩中的地幔榴辉岩包体,由于金伯利岩岩浆渗入的可能性^[25]以及原生 Re-Os 同位素系统可能伴随的破坏,Re-Os 全岩数据解释十分复杂。Aulbach 等研究了 Slave 克拉通 Diavik 金伯利岩中的地幔榴辉岩包体,发现其 Re-Os 全岩同位素系统显示出明显的分散^[33],这可能表明某些样品中的 Re 和 Os 受到了次生硫化物的影响以及受到随后寄主熔体渗透的干扰。

相较于 U-Pb 和 Sm-Nd 体系等其他同位素体系会受到后期热构造事件或金伯利岩岩浆的影响,Re-Os 体系更能保存和记录古老的榴辉岩年龄。原生的硫化物作为包裹体存在于硅酸盐和金刚石中,可以免受交代作用的影响^[65]。尤其是金刚石中榴辉岩硫化物的形成与形成金刚石的 C-H-O-S 流体直接相关,同时金刚石的化学封闭性又能使其中的包裹体免受后期干扰,从而展现出较好的应用前景^[66-67]。Richardson 等所报道的金伯利岩地区榴辉岩硫化物构成了一条 (2.89 ± 0.06) Ga 的等时线(MSWD 值为 1.2),与 Witwatersrand 地块等沿 Colesberg lineament 构造拼合的时间 $(2.93 \sim 2.88$

Ga)^[32-33]一致。

本文统计的来自西伯利亚和 Kaapvaal 克拉通的 71 个地幔榴辉岩包体硫化物 Re-Os 年龄数据(以金刚石中榴辉岩硫化物为主)主要分布在太古代和元古代。榴辉岩硫化物 Re-Os 年龄的峰值与西伯利亚和 Kaapvaal 克拉通各个阶段的构造事件相对应,尤其是相较于其他体系(如 U-Pb、Lu-Hf 体系)记录到的更老的年龄峰值(3.0 Ga),与 Kaapvaal 和西伯利亚克拉通构造拼合的时间更加接近,可能反映了地幔榴辉岩包体最早形成的时间^[16,32-33]。因此,地幔榴辉岩包体硫化物的 Re-Os 定年具有重大的研究意义,但硫化物的分离对实验室的实验方法和技术手段都有着极高的要求^[68]。

2 讨论

2.1 不同定年方法对比

由于定年矿物和同位素定年系统的差异(表 1),不同定年方法所能得到的地幔榴辉岩包体年龄分布在一个极为宽泛的范围内。本文选取并对比了 4 种地幔榴辉岩包体中适用性最高的定年方法(图 2)。由图 2 可知,硫化物 Re-Os 等时线年龄以及锆石 U-Pb 上交点年龄与 Lu-Hf、Sm-Nd 石榴子石-单斜辉石双矿物等时线年龄相比,显示出更为古老的特征,且绝大部分年龄都大于 1.0 Ga,表明这两种方法可以记录到较其他同位素体系相对更老的榴辉岩年龄。相对较为年轻的 Lu-Hf、Sm-Nd 石榴子石-单斜辉石双矿物等时线年龄在 1.7~0 Ga 内皆有分布,可能包含了与榴辉岩冷却以及后期演化等相关的多种地质年龄。地幔榴辉岩包体的硫化物 Re-Os 年龄主要落在 3.0~2.0 Ga,并且从前人的研究中可以得到,榴辉岩硫化物 Re-Os 年龄所记录的太古代年龄构成了已发表地幔榴辉岩包体太古代主体年龄,可能反映地幔榴辉岩包体的最早形成时间。

以 Kaapvaal 克拉通中的地幔榴辉岩包体年龄(图 3)为例,不同定年方法所得到的地幔榴辉岩包体年龄及其地质解释也有着极大的区别。其中,约 2.6 Ga 的锆石 U-Pb 年龄被解释为洪流玄武岩喷发及克拉通的沉降与沉积有关的地质活动^[48]。Sm-Nd、Lu-Hf 双矿物等时线年龄主体分布在 600~100 Ma,同时它也记录了一部分连续的古老年龄信息,Huang 等将前者解释为寄主金伯利岩的喷发年龄^[27],Shu 等则阐述了后者(古老年龄)所包含的多个与克拉通构造演化相关的地幔事件^[28]。硫化物 Re-Os 等时线年龄主要分布在 2.0~0.7 Ga,记录

表 1 地幔榴辉岩包体同位素定年体系对比

Table 1 Comparison of Isotope Dating Systems of Mantle Eclogite Xenoliths

同位素系统	优点	缺点	适用性	文献来源
锆石 U-Pb 定年	较高的耐火性质和较高的封闭温度;可以反映复杂的变质历史	易受到热事件干扰,体系自形成以后难以始终保持封闭	其年龄意义通常需要结合具体地质区域与热事件讨论;结合锆石 Hf 亏损地幔模式年龄可以为榴辉岩的变质时间提供最小的年龄约束	[40]、[45]和[50]
单斜辉石 Pb-Pb 定年	单斜辉石是不相容亲石元素的主要载体,可以获得更加古老的年龄	相关研究较少,没有太多数据支撑	与锆石 Hf 亏损地幔模式年龄相似,可以为榴辉岩的变质时间提供最小的年龄约束	[30]和[36]
金红石 U-Pb 定年	定年矿物在地幔榴辉岩包体中较为常见	封闭温度低,易受后期作用干扰	只能测出较为年轻的年龄,可能代表地幔交代的年龄或寄主岩浆的年龄	[38]和[39]
Rb-Sr、Sm-Nd、Lu-Hf 全岩等时线定年	Lu-Hf 体系封闭温度较高,具有保存地幔包体地质历史的能力;重建全岩同位素年龄	Rb-Sr、Sm-Nd 体系易受到后期热事件影响;渗入的寄主岩浆会对同位素系统造成干扰	重建全岩等时线年龄在一定程度上可以获取地质信息	[8]、[34]和[36]
Rb-Sr、Sm-Nd、Lu-Hf 矿物等时线定年	矿物相及封闭温度明确,没有其他副矿物干扰	给出的年龄范围较广,不能完全确定其地质意义;难以获得干净的矿物分离,得到人为处理的年龄	可以记录寄主岩浆侵位时间;得到与地质事件无关的冷却年龄;确定地幔榴辉岩包体的变质时间	[8]、[34]和[63]
硫化物 Re-Os 等时线定年	作为包裹体存在于硅酸盐和金刚石中,可免受交代作用及后期干扰	硫化物的分离对实验室的实验方法和技术手段要求极高	相较于其他定年体系记录到的更老的年龄峰值,可能反映地幔榴辉岩包体最早的形成时间	[16]、[32]和[33]

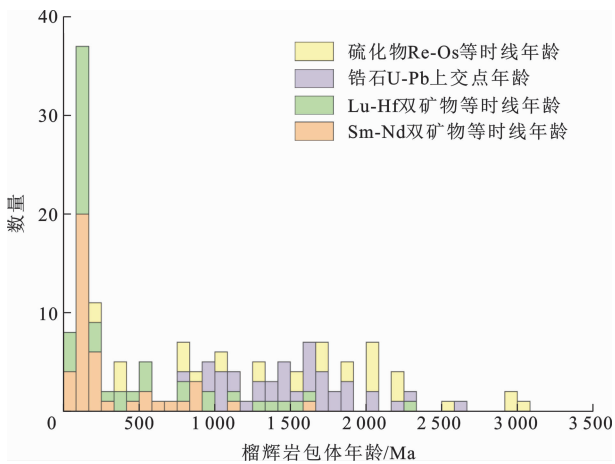


图 2 4 种同位素定年方法的榴辉岩定年结果对比

Fig. 2 Comparison Histogram of Eclogite Ages with Four Isotopic Dating Methods

了元古代及太古代的主要构造岩浆事件^[67],并且相较于其他定年方法获得了最古老的地幔榴辉岩包体年龄。

2.2 定年对克拉通形成的指示

地幔榴辉岩包体的年龄数据具有多样性和复杂性,因此,本文总结了全球金伯利岩年龄数据[图 4(a)]以及加拿大、非洲、俄罗斯等地区 8 个克拉通中由金伯利岩筒携带上来的地幔榴辉岩包体年龄数据[图 4(b)],并选择了两个地幔榴辉岩包体数据最多的 Kaapvaal 和 Slave 克拉通[图 4(c)、(d)]进行对

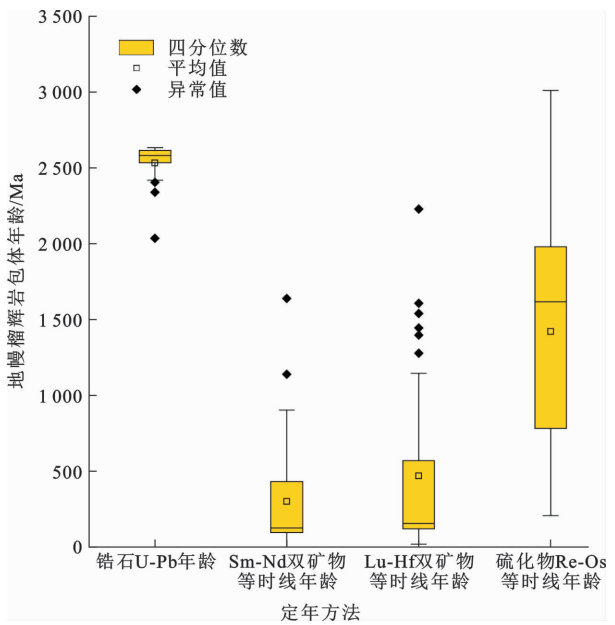
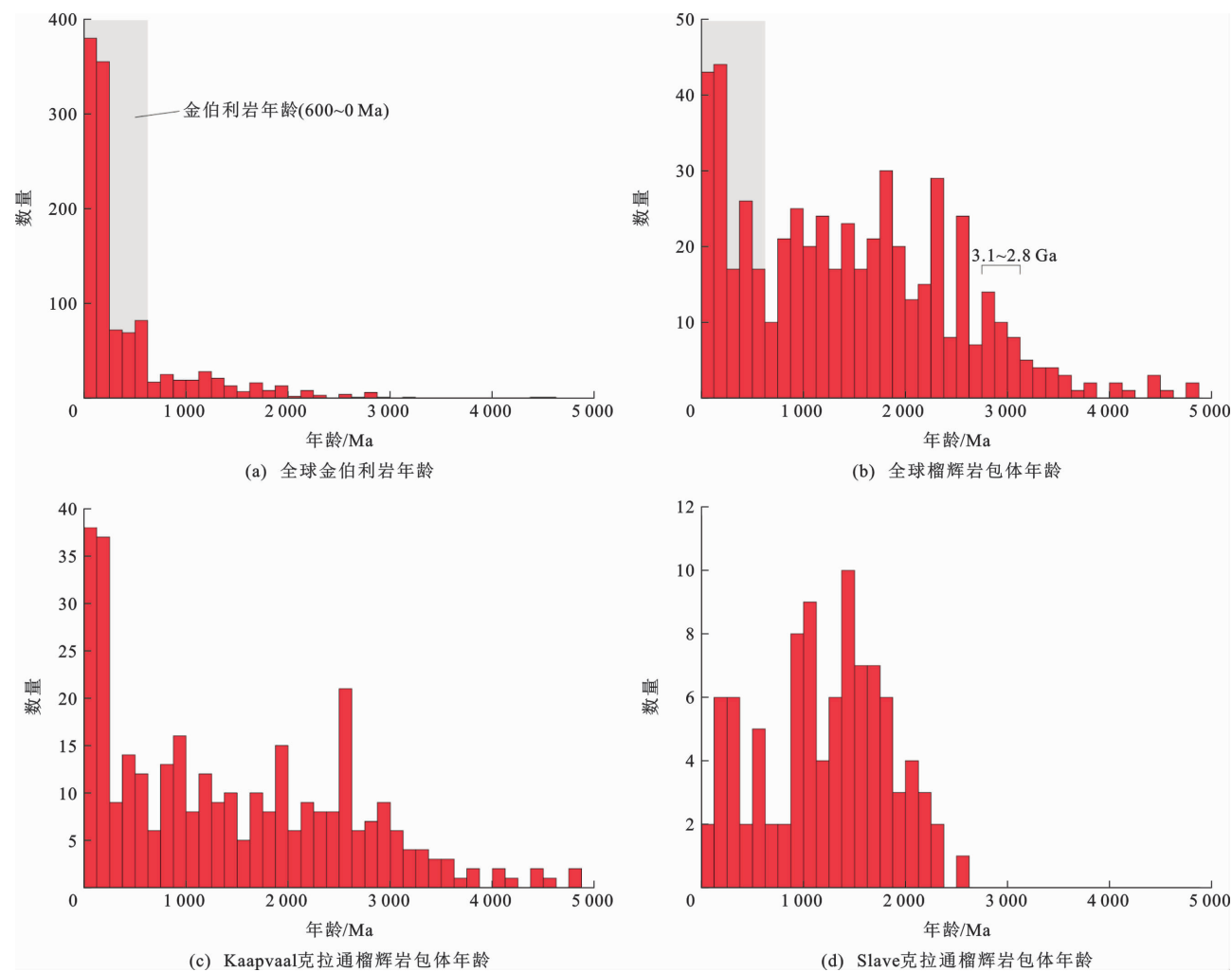


图 3 Kaapvaal 克拉通中地幔榴辉岩包体不同定年方法年龄分布箱线图

Fig. 3 Boxplot of Age Distribution of Mantle Eclogite

Xenoliths in Kaapvaal Craton by Different Dating Methods

比讨论。总体来看,全球金伯利岩的年龄十分年轻,基本分布在 600~0 Ma,只有极少部分老于 600 Ma。大部分地幔榴辉岩包体的年龄都分布在 2.4~0 Ga,其最古老年龄的峰值在 3.1~2.8 Ga,仅有个别年龄老于 3.1 Ga。其中,地幔榴辉岩包体年龄在



图(a)引自文献[69]

图 4 全球金伯利岩与榴辉岩包体年龄柱状图

Fig. 4 Histograms of Global Kimberlite and Eclogite Xenoliths Ages

600~0 Ma 的数据十分丰富,但通过全球金伯利岩的年龄可知,这些地幔榴辉岩包体的定年数据可能更倾向于地幔榴辉岩包体中的同位素体系被金伯利岩浆破坏,从而记录了其寄主金伯利岩的年龄。Kaapvaal 和 Slave 克拉通中的地幔榴辉岩包体年龄在 2.0~0 Ga 区间内都显示出一定的连续性,可能代表着榴辉岩冷却形成、后期交代作用的持续发生,或表示这些同位素体系被后期热事件部分重置的结果。与此同时,不同克拉通中的地幔榴辉岩包体年龄几乎都有大于 2.5 Ga 的古老年龄,这个阶段与世界范围内大陆地壳的形成时间相吻合,可能对应着板块构造的运动时间。而 Kaapvaal 克拉通相较于 Slave 克拉通,获得了更多更古老的地幔榴辉岩包体年龄,甚至有不少大于 3.0 Ga 的年龄,推测其可能为地球板块运动启动或地幔榴辉岩包体的原岩年龄。

2.3 年龄对板块构造的意义

在过去 30 年中,已发表的地幔榴辉岩包体和榴辉岩中的金刚石包裹体年龄在世界范围内主要分布在 3 个时期,分别是中—新太古代(3.0~2.5 Ga)、古元古代(2.2~1.8 Ga)以及新元古代(1.3~1.0 Ga),这些时代标志着世界范围内大陆地壳形成、合并和改造的显著时期^[40,52,66,70-71]。

中—新太古代是重要的与俯冲相关的地幔榴辉岩包体形成时期,其证据来自 Kaapvaal、西伯利亚、西格林兰、西非等克拉通的地幔榴辉岩包体 Sm-Nd 全岩重建等时线、硫化物 Re-Os 等时线、Pb-Pb 模式年龄。Kaapvaal 克拉通 Colesberg Lineament 两侧金伯利岩中地幔榴辉岩包体年龄在 2.9 Ga 处出现明显的年龄峰值,与区域片麻岩锆石 U-Pb 年龄((2.980±0.002)Ga)、地幔橄榄岩 Re-Os 年龄(2.9~2.8 Ga)、钙碱性花岗闪长岩年龄(2.92 Ga)、

南非岩石圈地震结构事件、2.9 Ga 金刚石生成事件等证据共同表明,在中太古代(2.93~2.88 Ga)发生了 Witwatersrand 地块向西俯冲到 Kimberley 地块之下的俯冲事件。与 Kaapvaal 克拉通相似,其他克拉通也都发现类似的太古代地幔榴辉岩包体。例如,西伯利亚 Udachnaya 地幔榴辉岩包体 Re-Os 等时线年龄为 $(2.9 \pm 0.3) \text{ Ga}^{[16]}$, Nunatak 地幔榴辉岩包体单斜辉石 Pb-Pb 年龄为 $(2.7 \pm 0.3) \text{ Ga}^{[72]}$, 南非 Catoca 地幔榴辉岩包体锆石 U-Pb 年龄为 $(2.80 \pm 0.09) \text{ Ga}^{[73]}$, 阿曼地盾 Re-Os 等时线年龄为 $(3.44 \pm 0.76) \text{ Ga}$, Arkhangelsk 地区地幔榴辉岩包体 Rb-Sr 等时线年龄为 $(2.84 \pm 0.07) \text{ Ga}^{[61]}$ 等。Shirey 等发现含金刚石的榴辉岩包体在 3.0 Ga 之后才首次出现,并认为该地幔榴辉岩包体标志着威尔逊旋回的开始^[66]。地幔榴辉岩包体和榴辉岩中的金刚石包裹体在 3.0 Ga 之后才大量出现^[52,66],表明地幔榴辉岩包体形成/保存的过程仅在中一新太古代晚期才变得显著,这可能预示着板块构造时间在 3.44 Ga 已经开启,而在 $< 3.0 \text{ Ga}$ 时洋壳俯冲范围(规模)较大。

现有的地幔榴辉岩包体数据可能表明板块构造最早开启于新太古代,而之后的元古代地幔榴辉岩包体可能是元古代板块周期性汇聚与分散的结果。地幔榴辉岩包体的元古代年龄主要是由锆石 U-Pb、Sm-Nd、Lu-Hf、Rb-Sr 体系确定的,与元古代全球范围内的构造热事件相对应。Shchukina 等报道了来自 Arkhangelsk 金伯利岩省的 V. Grib 岩筒中等粒含锆石地幔榴辉岩包体年龄数据,获得的锆石 U-Pb 年龄主要分布在古元古代(约 1.7 Ga 和约 1.9 Ga)和中元古代(约 1.2 Ga 和约 1.4 Ga),而 Hf 亏损地幔模式年龄则分布在 2.3~2.2 Ga,因为亏损地幔模式年龄代表了与亏损地幔分离的时间(即洋壳的形成时间),洋壳应形成于俯冲作用的 200~300 Ma 之前^[37],所以确定了 Arkhangelsk 金伯利岩省古元古代(1.9~1.7 Ga)的一次俯冲事件。元古代榴辉岩主要出现的 2.2~1.8 Ga 和 1.2~0.9 Ga 两个时期,分别与哥伦比亚超级古大陆的合并(2.1~1.8 Ga)和罗迪尼亚超级古大陆的合并(约 1.0 Ga)相对应^[74-75];除此之外,这两个时间段还对应着克拉通内发育的岩浆热事件,如 Bushveld 杂岩带(2.05 Ga, Kaapvaal 克拉通)、Ghost 岩墙群(1.84 Ga, Slave 克拉通)、麦肯齐火成岩事件(1.27 Ga, Slave 克拉通),可能表明榴辉岩形成之后受到了这些热事件的改造作用^[12,36,76]。

3 结 语

(1)地幔榴辉岩包体的年龄可能包含大洋地壳原岩年龄、板块俯冲年龄、冷却结晶年龄及后期交代年龄,运用合适的同位素体系定年可能会对全球性板块构造的启动时间做出具有重大意义的贡献。

(2)通过统计各种同位素体系的基本原理、封闭温度及应用实例,可以初步得出金红石 U-Pb 定年和 Rb-Sr、Sm-Nd、Lu-Hf 全岩等时线定年对于地幔榴辉岩包体的年龄研究有限,一般给出的是寄主岩浆的年龄或地幔交代的时间,而榴辉岩中的硫化物 Re-Os 等时线、锆石 U-Pb 上交点年龄,Sm-Nd、Lu-Hf 石榴子石-单斜辉石双矿物等时线年龄以及锆石 Hf 亏损地幔模式年龄对于其原岩年龄及板块俯冲时代有较为可观的应用前景。但这些都要建立在实际情况具体分析,并且寻找到合适的矿物颗粒、实验过程未受污染的基础上,才能避免测出混乱或无意义的地质年龄。与此同时,还要通过区域地质概况、地壳活动等信息来进行合理推断,并通过与前人研究或其他定年方法所得到的年龄进行对比来得出可靠的结论。

(3)目前得到的研究表明,全球地幔榴辉岩包体最古老的年龄峰值(3.1~2.8 Ga)与 Kaapvaal、西伯利亚克拉通构造拼合的时间相似,可能反映了榴辉岩最早形成的时间,也可能预示着板块构造于中太古代开启。

参 考 文 献 :

References :

- [1] BOIFACE N, SCHENK V, APPEL P. Paleoproterozoic Eclogites of MORB-type Chemistry and Three Proterozoic Orogenic Cycles in the Ubendian Belt (Tanzania): Evidence from Monazite and Zircon Geochronology, and Geochemistry [J]. Precambrian Research, 2012, 192/193/194/195: 16-33.
- [2] FRANÇOIS C, DEBAILLE V, PAQUETTE J L, et al. The Earliest Evidence for Modern-style Plate Tectonics Recorded by HP-LT Metamorphism in the Paleoproterozoic of the Democratic Republic of the Congo [J]. Scientific Reports, 2018, 8: 15452.
- [3] LOOSE D, SCHENK V. 2.09 Ga Old Eclogites in the Eburnian-Transamazonian Orogen of Southern Cameroon: Significance for Palaeoproterozoic Plate Tectonics [J]. Precambrian Research, 2018, 304: 1-11.
- [4] AULBACH S, SMART K A. Petrogenesis and Geodynamic Significance of Xenolithic Eclogites [J]. An-

- nual Review of Earth and Planetary Sciences, 2023, 51:521-549.
- [5] MACGREGOR I D, MANTON W I, Roberts Victor Eclogites: Ancient Oceanic Crust[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1986, 91(B14): 14063-14079.
- [6] HATTON C J, GURNEY J J, Roberts Victor Eclogites and Their Relation to the Mantle[M]// NIXON P H. Mantle Xenoliths. New York: John Wiley & Sons, 1987: 453-463.
- [7] MENZIES A H, CARLSON R W, SHIREY S B, et al. Re-Os Systematics of Diamond-bearing Eclogites from the Newlands Kimberlite[J]. Lithos, 2003, 71(2/3/4): 323-336.
- [8] JACOB D E, BIZIMIS M, SALTERS V J M. Lu-Hf and Geochemical Systematics of Recycled Ancient Oceanic Crust: Evidence from Roberts Victor Eclogites[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2005, 148(6): 707-720.
- [9] HILLS D V, HAGGERTY S E. Petrochemistry of Eclogites from the Koidu Kimberlite Complex, Sierra Leone[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1989, 103(4): 397-422.
- [10] BARTH M G, RUDNICK R L, HORN I, et al. Geochemistry of Xenolithic Eclogites from West Africa, Part I: A Link Between Low MgO Eclogites and Archean Crust Formation[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2001, 65(9): 1499-1527.
- [11] BARTH M G, RUDNICK R L, HORN I, et al. Geochemistry of Xenolithic Eclogites from West Africa, Part 2: Origins of the High MgO Eclogites[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2002, 66(24): 4325-4345.
- [12] HEAMAN L M, CREASER R A, COOKENBOO H O, et al. Multi-stage Modification of the Northern Slave Mantle Lithosphere: Evidence from Zircon- and Diamond-bearing Eclogite Xenoliths Entrained in Jericho Kimberlite, Canada [J]. Journal of Petrology, 2006, 47(4): 821-858.
- [13] AULBACH S, PEARSON N J, O'REILLY S Y, et al. Origins of Xenolithic Eclogites and Pyroxenites from the Central Slave Craton, Canada[J]. Journal of Petrology, 2007, 48(10): 1843-1873.
- [14] JERDE E A, TAYLOR L A, CROZAZ G, et al. Diamondiferous Eclogites from Yakutia, Siberia: Evidence for a Diversity of Protoliths[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1993, 114(2): 189-202.
- [15] JACOB D E, JAGOUTZ E, LOWRY D, et al. Diamondiferous Eclogites from Siberia: Remnants of Archean Oceanic Crust[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1994, 58(23): 5191-5207.
- [16] PEARSON D G, SNYDER G A, SHIREY S B, et al. Re-Os, Sm-Nd, and Rb-Sr Isotope Evidence for Thick Archean Lithospheric Mantle Beneath the Siberian Craton Modified by Multistage Metasomatism [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(5): 959-977.
- [17] SNYDER G A, TAYLOR L A, CROZAZ G, et al. The Origins of Yakutian Eclogite Xenoliths[J]. Journal of Petrology, 1997, 38(1): 85-113.
- [18] JACOB D E, FOLEY S F. Evidence for Archean Ocean Crust with Low High Field Strength Element Signature from Diamondiferous Eclogite Xenoliths[J]. Lithos, 1999, 48(1/2/3/4): 317-336.
- [19] GAO X Y, ZHENG Y F, CHEN Y X. U-Pb Ages and Trace Elements in Metamorphic Zircon and Titanite from UHP Eclogite in the Dabie Orogen: Constraints on *P-T-t* Path[J]. Journal of Metamorphic Geology, 2011, 29(7): 721-740.
- [20] ZHANG L F, WANG Y, ZHANG L J, et al. Ultra-high Pressure Metamorphism and Tectonic Evolution of Southwestern Tianshan Orogenic Belt, China: A Comprehensive Review [J]. Geological Society, London, Special Publications, 2019, 474: 133-152.
- [21] 张泽明, 丁慧霞, 董昕, 等. 喜马拉雅造山带两种不同类型榴辉岩与印度大陆差异性俯冲[J]. 地球科学, 2019, 44(5): 1602-1619.
- ZHANG Ze-ming, DING Hui-xia, DONG Xin, et al. Two Contrasting Eclogite Types in the Himalayan Orogen and Differential Subduction of Indian Continent[J]. Earth Science, 2019, 44(5): 1602-1619.
- [22] 龚庭楠, 杜瑾雪, 张立飞, 等. 新疆西南天山榴辉岩高压-超高压峰期变质作用时代: Lu-Hf 同位素年代学证据[J]. 岩石学报, 2023, 39(3): 689-700.
- GONG Ting-nan, DU Jin-xue, ZHANG Li-fei, et al. Ages of Peak HP-UHP Metamorphism of Eclogites from Chinese Southwestern Tianshan: Evidence from Lu-Hf Geochronology [J]. Acta Petrologica Sinica, 2023, 39(3): 689-700.
- [23] 刘晓春, 胡娟, 陈龙耀, 等. 海南洋壳型高温榴辉岩: 基本特征及待解问题[J]. 岩石学报, 2021, 37(1): 143-161.
- LIU Xiao-chun, HU Juan, CHEN Long-yao, et al. Oceanic-type High-temperature Eclogites from Hainan Island, South China: General Characteristics and Unsolved Problems[J]. Acta Petrologica Sinica, 2021,

- 37(1):143-161.
- [24] HELMSTAEDT H, SCHULZE D J. Southern African Kimberlites and Their Mantle Sample; Implications for Archean Tectonics and Lithospheric Evolution [M] // ROSS J. Kimberlites and Related Rocks Volume 1; Their Composition, Occurrence, Origin and Emplacement. New York; Blackwell, 1989; 358-368.
- [25] JACOB D E. Nature and Origin of Eclogite Xenoliths from Kimberlites[J]. Lithos, 2004, 77(1/2/3/4): 295-316.
- [26] GRÉAU Y, HUANG J X, GRIFFIN W L, et al. Type I Eclogites from Roberts Victor Kimberlites; Products of Extensive Mantle Metasomatism[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2011, 75(22): 6927-6954.
- [27] HUANG J X, GRÉAU Y, GRIFFIN W L, et al. Multi-stage Origin of Roberts Victor Eclogites; Progressive Metasomatism and Its Isotopic Effects [J]. Lithos, 2012, 142/143: 161-181.
- [28] SHU Q, BREY G P, GERDES A, et al. Geochronological and Geochemical Constraints on the Formation and Evolution of the Mantle Underneath the Kaapvaal Craton; Lu-Hf and Sm-Nd Systematics of Subcalcic Garnets from Highly Depleted Peridotites [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2013, 113(4): 1-20.
- [29] HUANG J X, GRIFFIN W L, GRÉAU Y, et al. Unmasking Xenolithic Eclogites; Progressive Metasomatism of a Key Roberts Victor Sample[J]. Chemical Geology, 2014, 364: 56-65.
- [30] AULBACH S, HEAMAN L M, JACOB D E, et al. Ages and Sources of Mantle Eclogites; ID-TIMS and *In-situ* MC-ICPMS Pb-Sr Isotope Systematics of Clinopyroxene[J]. Chemical Geology, 2019, 503: 15-28.
- [31] SCHULZE D J. Constraints on the Abundance of Eclogite in the Upper Mantle[J]. Journal of Geophysical Research; Solid Earth, 1989, 94(B4): 4205-4212.
- [32] RICHARDSON S H, SHIREY S B, HARRIS J W, et al. Archean Subduction Recorded by Re-Os Isotopes in Eclogitic Sulfide Inclusions in Kimberley Diamonds [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2001, 191(3/4): 257-266.
- [33] AULBACH S, CREASER R A, PEARSON N J, et al. Sulfide and Whole Rock Re-Os Systematics of Eclogite and Pyroxenite Xenoliths from the Slave Craton, Canada [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2009, 283(1/2/3/4): 48-58.
- [34] GONZAGA R G, MENZIES M A, THIRLWALL M F, et al. Eclogites and Garnet Pyroxenites; Problems Resolving Provenance Using Lu-Hf, Sm-Nd and Rb-Sr Isotope Systems[J]. Journal of Petrology, 2010, 51(1/2): 513-535.
- [35] BREY G P, SHU Q. The Birth, Growth and Ageing of the Kaapvaal Subcratonic Mantle[J]. Mineralogy and Petrology, 2018, 112(1): 23-41.
- [36] SCHMIDBERGER S S, SIMONETTI A, HEAMAN L M, et al. Lu-Hf, *In-situ* Sr and Pb Isotope and Trace Element Systematics for Mantle Eclogites from the Diavik Diamond Mine; Evidence for Paleoproterozoic Subduction Beneath the Slave Craton, Canada[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2007, 254(1/2): 55-68.
- [37] SHCHUKINA E V, AGASHEV A M, ZEDGENIZOV D A. Origin of Zircon-bearing Mantle Eclogites Entrained in the V. Grib Kimberlite (Arkhangelsk Region, NW Russia); Evidence from Mineral Geochemistry and the U-Pb and Lu-Hf Isotope Compositions of Zircon[J]. Mineralogy and Petrology, 2018, 112(1): 85-100.
- [38] RAGOZIN A L, ZEDGENIZOV D A, SHATSKII V S, et al. U-Pb Age of Rutile from the Eclogite Xenolith of the Udachnaya Kimberlite Pipe[J]. Doklady Earth Sciences, 2014, 457(1): 861-864.
- [39] SUN J, MITCHELL R N, KOSTROVITSKY S I, et al. Siberia's Largest Pulse of Kimberlites; U-Pb Geochronology of Perovskite and Rutile from the Obnazhennaya Kimberlite and Its Xenoliths, Siberia Craton[J]. International Geology Review, 2022, 64(12): 1743-1754.
- [40] SCHMIDBERGER S S, HEAMAN L M, SIMONETTI A, et al. Formation of Paleoproterozoic Eclogitic Mantle, Slave Province (Canada); Insights from *In-situ* Hf and U-Pb Isotopic Analyses of Mantle Zircons [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 240(3/4): 621-633.
- [41] SMART K A, TAPPE S, SIMONETTI A, et al. Tectonic Significance and Redox State of Paleoproterozoic Eclogite and Pyroxenite Components in the Slave Cratonic Mantle Lithosphere, Voyageur Kimberlite, Arctic Canada[J]. Chemical Geology, 2017, 455: 98-119.
- [42] LEE J K W, WILLIAMS I S, ELLIS D J. Pb, U and Th Diffusion in Natural Zircon[J]. Nature, 1997, 390: 159-162.
- [43] PEARSON D G, WITTIG N. The Formation and Evolution of Cratonic Mantle Lithosphere; Evidence from Mantle Xenoliths[J]. Treatise on Geochemistry (Second Edition), 2014, 3: 255-292.
- [44] 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb

- 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 2004, 49(16): 1589-1604.
- WU Yuan-bao, ZHENG Yong-fei. Genetic Mineralogy of Zircons and Its Constraints to the Age of U-Pb Geochronology[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(16): 1589-1604.
- [45] MELNIK A E, KOROLEV N M, SKUBLOV S G, et al. Zircon in Mantle Eclogite Xenoliths: A Review [J]. Geological Magazine, 2021, 158(8): 1371-1382.
- [46] 陈道公, 李彬贤, 夏群科, 等. 变质岩中锆石 U-Pb 计时问题评述: 兼论大别造山带锆石定年[J]. 岩石学报, 2001, 17(1): 129-138.
- CHEN Dao-gong, LI Bin-xian, XIA Qun-ke, et al. An Evaluation of Zircon U-Pb Dating for Metamorphic Rocks and Comments on Zircon Ages of Dabie Orogen [J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17(1): 129-138.
- [47] HEAMAN L M, CREASER R A, COOKENBOO H O. Extreme Enrichment of High Field Strength Elements in Jericho Eclogite Xenoliths: A Cryptic Record of Paleoproterozoic Subduction, Partial Melting, and Metasomatism Beneath the Slave Craton, Canada[J]. Geology, 2002, 30(6): 507-510.
- [48] SCHMITZ M D, BOWRING S A. The Significance of U-Pb Zircon Dates in Lower Crustal Xenoliths from the Southwestern Margin of the Kaapvaal Craton, Southern Africa[J]. Chemical Geology, 2001, 172(1/2): 59-76.
- [49] 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报, 2007, 23(2): 185-220.
- WU Fu-yuan, LI Xian-hua, ZHENG Yong-fei, et al. Lu-Hf Isotopic Systematics and Their Applications in Petrology[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(2): 185-220.
- [50] KARAEEVANGELOU M, KOPYLOVA M G, LUO Y, et al. Mineral Inclusions in Lace Diamonds and the Mantle Beneath the Kroonstad Kimberlite Cluster in South Africa[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2022, 177(2): 1-22.
- [51] AULBACH S, HÖFER H E, GERDES A. High-Mg and Low-Mg Mantle Eclogites from Koidu (West African Craton) Linked by Neoproterozoic Ultramafic Melt Metasomatism of Subducted Archaean Plateau-like Oceanic Crust[J]. Journal of Petrology, 2019, 60(4): 723-754.
- [52] SMART K A, THOMAS C, ANTONIO S, et al. A Record of Paleoproterozoic Subduction Preserved in the Northern Slave Cratonic Mantle: Sr-Pb-O Isotope and Trace-element Investigations of Eclogite Xenoliths from the Jericho and Muskox Kimberlites [J]. Journal of Petrology, 2014, 55(3): 549-583.
- [53] 陈安平, 张宏福. 造山带榴辉岩的变质作用 P - T - t 轨迹研究进展[J]. 岩石学报, 2023, 39(1): 170-186.
- CHEN An-ping, ZHANG Hong-fu. Recent Progresses in Metamorphic P - T - t Path of Orogenic Eclogites [J]. Acta Petrologica Sinica, 2023, 39(1): 170-186.
- [54] 李秋立, 杨亚楠, 石永红, 等. 榴辉岩中金红石 U-Pb 定年: 对大陆碰撞造山带形成和演化的制约[J]. 科学通报, 2013, 58(23): 2279-2284.
- LI Qiu-li, YANG Ya-nan, SHI Yong-hong, et al. Eclogite Rutile U-Pb Dating: Constraint for Formation and Evolution of Continental Collisional Orogen [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(23): 2279-2284.
- [55] PEARSON D G, WITTIG N. Formation of Archaean Continental Lithosphere and Its Diamonds: The Root of the Problem[J]. Journal of the Geological Society, 2008, 165(5): 895-914.
- [56] AFANASYEV V P, AGASHEV A M, ORIHASHI Y, et al. Paleozoic U-Pb Age of Rutile Inclusions in Diamonds of the V - VIII Variety from Placers of the Northeast Siberian Platform[J]. Doklady Earth Sciences, 2009, 428(7): 1151-1155.
- [57] KINNY P D, GRIFFIN B J, HEAMAN L M, et al. Shrimp U-Pb Ages of Perovskite from Yakutian Kimberlites[J]. Russian Geology and Geophysics, 1997, 38: 91-99.
- [58] 李曙光, 安诗超. 变质岩同位素年代学: Rb-Sr 和 Sm-Nd 体系[J]. 地学前缘, 2014, 21(3): 246-255.
- LI Shu-guang, AN Shi-chao. Isotope Geochronology of Metamorphic Rocks: Rb-Sr and Sm-Nd Systematics [J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(3): 246-255.
- [59] SCHERER E E, CAMERON K L, BLICHERT-TOFT J. Lu-Hf Garnet Geochronology: Closure Temperature Relative to the Sm-Nd System and the Effects of Trace Mineral Inclusions[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2000, 64(19): 3413-3432.
- [60] PELTONEN P, KINNUNEN K A, HUHMA H. Petrology of Two Diamondiferous Eclogite Xenoliths from the Lahtojoki Kimberlite Pipe, Eastern Finland [J]. Lithos, 2002, 63(3/4): 151-164.
- [61] SHCHUKINA E V, AGASHEV A M, SOLOSHENKO N G, et al. Origin of V. Grib Pipe Eclogites (Arkhangelsk Region, NW Russia): Geochemistry, Sm-Nd and Rb-Sr Isotopes and Relation to Regional Precambrian Tectonics[J]. Mineralogy and Petrology, 2019, 113(5): 593-612.
- [62] JAGOUTZ E, DAWSON J B, HOERNES S, et al.

Anorthositic Oceanic Crust in the Archean Earth [C]// RYDER G, SCHUBERT G. 15th Lunar and Planetary Science Conference. Houston:NASA,1984: 395-396.

[63] SHU Q, BREY G P, GERDES A, et al. Mantle Eclogites and Garnet Pyroxenites: The Meaning of Two-point Isochrons, Sm-Nd and Lu-Hf Closure Temperatures and the Cooling of the Subcratonic Mantle[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2014, 389: 143-154.

[64] 靳新娣, 李文君, 吴华英, 等. 同位素定年方法进展及 ICP-MS 精确定年测试关键技术[J]. 岩石学报, 2010, 26(5): 1617-1624.

JIN Xin-di, LI Wen-jun, WU Hua-ying, et al. Development of Re-Os Isotopic Dating Analytical Technique and Determination Know: How on ICP-MS Precise Dating for Molybdenite[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(5): 1617-1624.

[65] NIKITINA L P, BOGOMOLOV E S, KRYMSKY R S, et al. Nd-Sr-Os Systems of Eclogites in the Lithospheric Mantle of the Kasai Craton (Angola) [J]. Russian Geology and Geophysics, 2017, 58 (11): 1305-1316.

[66] SHIREY S B, RICHARDSON S H. Start of the Wilson Cycle at 3 Ga Shown by Diamonds from Subcontinental Mantle[J]. Science, 2011, 333: 434-436.

[67] GRESS M U, KOORNNEEF J M, THOMASSOT E, et al. Sm-Nd Isochron Ages Coupled with C-N Isotope Data of Eclogitic Diamonds from Jwaneng, Botswana[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2021, 293: 1-17.

[68] 吕 串, 高剑峰, 漆 亮, 等. 硫化物 Re-Os 同位素定年分析方法及其在矿床年代学中的应用: 研究现状及存在问题[J]. 地球科学, 2023, 48(12): 4387-4403.

LYU Chuan, GAO Jian-feng, QI Liang, et al. Analytical Methods and Application of Sulfide Re-Os Isotope Dating of Mineral Deposits: Research Progress and Problems[J]. Earth Science, 2023, 48 (12): 4387-4403.

[69] TAPPE S, SMART K, TORSVIK T, et al. Geodynamics of Kimberlites on a Cooling Earth: Clues to Plate Tectonic Evolution and Deep Volatile Cycles [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2018, 484: 1-14.

[70] RICHARDSON S H, SHIREY S B, HARRIS J W. Episodic Diamond Genesis at Jwaneng, Botswana, and Implications for Kaapvaal Craton Evolution [J]. Lithos, 2004, 77(1/2/3/4): 143-154.

[71] TIMMERMAN S, KOORNNEEF J M, CHINN I L, et al. Dated Eclogitic Diamond Growth Zones Reveal Variable Recycling of Crustal Carbon Through Time [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2017, 463: 178-188.

[72] TAPPE S, SMART K, PEARSON D G, et al. Craton Formation in Late Archean Subduction Zones Revealed by First Greenland Eclogites [J]. Geology, 2011, 39(12): 1103-1106.

[73] NIKITINA L P, KOROLEV N M, ZINCHENKO V N, et al. Eclogites from the Upper Mantle Beneath the Kasai Craton (Western Africa): Petrography, Whole-rock Geochemistry and U-Pb Zircon Age [J]. Precambrian Research, 2014, 249: 13-32.

[74] CONDIE K C. Episodic Continental Growth and Supercontinents: A Mantle Avalanche Connection? [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1998, 163(1/2/3/4): 97-108.

[75] ZHAO G C, CAWOOD P A, WILDE S A, et al. Review of Global 2.1—1.8 Ga Orogens: Implications for a Pre-Rodinia Supercontinent [J]. Earth-science Reviews, 2002, 59(1/2/3/4): 125-162.

[76] AULBACH S, VILJOEN K S. Eclogite Xenoliths from the Lace Kimberlite, Kaapvaal Craton: From Convecting Mantle Source to Palaeo-ocean Floor and Back [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2015, 431: 274-286.