



引文格式: 李艳广, 霍金晶, 孙国超. 岩石薄片原位磷灰石 U-Pb 定年技术探讨: 超基性岩年代学分析的新视角[J]. 西北地质, 2025, 58(4): 197–206. DOI: 10.12401/j.nwg.2025010

Citation: LI Yanguang, HUO Jinjing, SUN Guochao. Rock Thin Section Scale In-Situ Apatite U-Pb Dating Technique Discussion: A New Perspective on Ultramafic Rock Geochronology Analysis[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(4): 197–206. DOI: 10.12401/j.nwg.2025010

## 岩石薄片原位磷灰石 U-Pb 定年技术探讨: 超基性岩年代学分析的新视角

李艳广<sup>1,2,3</sup>, 霍金晶<sup>4</sup>, 孙国超<sup>4,\*</sup>

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心/西北地质科技创新中心, 陕西 西安 710119; 2. 自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 陕西 西安 710119; 3. 中国地质调查局造山带地质研究中心, 陕西 西安 710119; 4. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026)

**摘要:** 超基性岩作为地幔岩石的主要组分, 其形成时代对理解地球内部结构和动力学过程具有重要意义。由于超基性岩岩浆硅元素不饱和, 难以结晶出锆石, 而作为超基性岩中常见的副矿物, 磷灰石凭借其独特的晶体化学特征, 成为超基性岩年代学研究的重要对象。随着原位微区分析技术的进步, 磷灰石 U-Pb 定年技术得到了显著发展, 定年的精度和可靠性显著提高。然而, 在超基性岩薄片上进行原位磷灰石定年分析仍然需要解决一些棘手的问题, 如普通铅的校正问题、矿物的成因分析以及岩石薄片制备过程中的污染控制等。笔者分析了超基性岩定年研究现状, 综述了岩石原位定年技术和磷灰石 U-Pb 定年技术的研究进展, 探讨了磷灰石 U-Pb 定年技术在超基性岩原位定年中的应用前景, 并对未来研究方向进行了展望。

**关键词:** 磷灰石; 超基性岩; 原位 U-Pb 定年; 薄片尺度

中图分类号: P597; P588.12

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)04-0197-10

### Rock Thin Section Scale In-Situ Apatite U-Pb Dating Technique Discussion: A New Perspective on Ultramafic Rock Geochronology Analysis

LI Yanguang<sup>1,2,3</sup>, HUO Jinjing<sup>4</sup>, SUN Guochao<sup>4,\*</sup>

(1. Xi'an Center of China Geological Survey / Northwest China Center for Geoscience Innovation, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 3. Centre for Orogenic Belt Geology, Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 4. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China)

**Abstract:** Ultramafic rocks, as a major component of mantle rocks, hold significant importance for understand-

收稿日期: 2024-11-05; 修回日期: 2025-01-08; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划一般项目(面上)(2025JC-YBMS-263), 中国地质调查局项目“新疆北部及邻区高纯石英成矿资源地质调查”(DD202508810)联合资助。

作者简介: 李艳广(1984-), 男, 高级工程师, 长期从事地质年代学研究。E-mail: liyanguangok@126.com。

\* 通讯作者: 孙国超(1989-), 男, 特任副研究员, 长期从事岩石地球化学研究。E-mail: sgc@ustc.edu.cn。

ing the Earth's internal structure and dynamic processes. Due to the silicon undersaturation in ultramafic magmas, crystallization of zircon is challenging; instead, apatite, a common accessory mineral in ultramafic rocks, has emerged as a crucial target for geochronological studies owing to its unique crystallochemical characteristics. With advancements in in-situ microanalysis techniques, the U-Pb dating method for apatite has experienced marked improvements, significantly enhancing both precision and reliability. However, conducting in-situ apatite dating analyses on thin sections of ultramafic rocks still presents several challenges, such as the correction of common lead, genetic analysis of the minerals, and contamination control during the preparation of rock thin sections. This paper reviews the current state of geochronological research on ultramafic rocks, summarizes advancements in in-situ dating techniques and apatite U-Pb dating methodologies, discusses the prospects for the application of apatite U-Pb dating in the in-situ dating of ultramafic rocks, and outlines future research directions.

**Keywords:** apatite; ultramafic rocks; in-situ U-Pb dating; thin section scale

地球深部过程和演化历史一直是地球科学领域研究的热点。作为地幔岩石的主要组分,超基性岩为我们提供一扇窥探地球内部结构和动力学过程的窗口(Wyllie et al., 1969; Hamlyn et al., 1980)。这些地幔岩石不仅在理解地幔物质组成、岩浆形成过程以及壳幔相互作用等方面具有重要的科学价值,而且与多种金属矿床的形成密切相关(Moody et al., 1976; 李献华等, 2004)。因此,准确测定超基性岩的形成时代具有至关重要的意义。超基性岩浆因硅元素不饱和而难以结晶锆石。然而,在这类岩石中,通常可以观察到有磷灰石存在,因此可以凭借其独特的 U-Pb 同位素体系,作为地质年代学研究的宝贵载体。此外,磷灰石除了可用于年代学研究外,还能揭示超基性岩的冷却历史、物质来源和变质过程的关键信息(杨岳衡等, 2008, 2009; Chew et al., 2015),为与超基性岩相关的地球深部过程和成矿作用研究提供更为精确的示踪信息。

随着科学技术的不断进步,磷灰石 U-Pb 定年技术得到了显著的发展。从早期的同位素稀释-热电离质谱法(ID-TIMS)(Oosthuyzen et al., 1973)到现代的二次离子探针技术(SIMS)(Li et al., 2012)和激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)技术(周红英等, 2012)。这些技术的进步极大地提高了定年的精度和可靠性。然而,在薄片尺度上进行超基性岩原位磷灰石定年分析仍然面临着一些挑战,如普通铅的校正问题、矿物的成因分析以及岩石薄片制备过程中的污染控制等(李艳广等, 2023)。笔者旨在综述超基性岩定年研究现状,以及岩石原位定年技术和磷灰石 U-Pb 定年技术的研究进展,并探讨磷灰石 U-Pb 定年技术

在超基性岩原位定年中的应用前景,希望能够为未来的研究提供新的方向。

## 1 超基性岩定年研究现状

超基性岩是研究地球深部过程和演化方面的重要载体,主要是由富含镁、铁元素的深部地幔物质组成(Wyllie et al., 1969; Hamlyn et al., 1980)。这些岩石中含有大量的橄榄石、辉石和角闪石等硅酸盐矿物,具有低硅、高镁、高铁的特点(Hirschmann et al., 1996)。由于超基性岩源自地幔深部,它们更好地记录地球内部结构和演化过程等重要信息(Kamenetsky et al., 2002; Herzberg et al., 2007; Li et al., 2014; Larsen et al., 2018; Thomas et al., 2020)。此外,超基性岩具有巨大的成矿潜力,通常与铂族元素矿床、金矿床和钻石矿床等相关(Barnes et al., 2004)。超基性岩中含有丰富的铁、镍、铬、钴等金属元素,这些元素在岩浆结晶分异过程中会富集在硫化物矿物中,可形成铜镍硫化物矿床(Moody et al., 1976; 李献华等, 2004; Liu et al., 2020)。总的来说,超基性岩形成和演化存在复杂性,涉及多个过程,其年代学信息是研究地球深部过程、示踪地幔组成演化和揭示成矿作用的重要基础。

目前,准确测定超基性岩的年龄还存在困难。超基性岩中硅元素不饱和,岩浆中无法结晶出常用的定年矿物——锆石( $\text{ZrSiO}_4$ ),岩浆中的 Zr 元素通常赋存在斜锆石晶体中。尽管斜锆石 U-Pb 同位素组成的测定可以确定超基性岩石的结晶年龄(Heaman et al., 2000; Li et al., 2020),但斜锆石在岩石样品中的数量也很低,采用常规的技术手段很难分选出来。采用特殊

的方法也许可以从某些岩石(基性、超基性岩)中分选出足够量的斜锆石颗粒用于定年分析(Söderlund et al., 2002; Guo et al., 2022),但是由于斜锆石常以细小的包裹体或矿物蚀变残余晶核存在于其他晶体内部(李艳广等, 2015),使得分选出的矿物可能不是纯净的斜锆石颗粒,若非仔细甄别,将直接影响分析结果。

超基性岩中还可以生长出磷灰石,但磷灰石 U-Pb 同位素体系的封闭温度通常不高(封闭温度约为 350~550 °C)(Chew et al., 2015),因此磷灰石可能记录了超基性岩浆经历的岩浆结晶分异和/或流体活动,这需要结合矿物成因进行年龄数据的解释。例如,Amelin 等(1999)对加拿大 Labrador 地区的 Voisey's Bay 橄长岩侵入体开展年代学研究,发现磷灰石的 U-Pb 同位素年龄比斜锆石年轻 30 Ma,认为磷灰石 U-Pb 体系被后期霞石正长岩的侵入所重置,或者记录了区域冷却后体系的封闭,亦或反应了后期流体活动,这需要结合磷灰石矿物成因进行解释。因此,从超基性岩中分选出单矿物并进行定年分析,可能很难对超基性岩的形成和演化进行约束。笔者将综述矿物原位定年技术和磷灰石 U-Pb 定年技术的最新进展,探讨它们在超基性岩研究中的应用前景。

## 2 岩石原位定年技术

常规的磷灰石定年工作是将定年目标矿物从岩石中分选出来,然后采用整体分析方法(CA-TIMS)或者微区分析手段(SIMS、LA-ICP-MS)进行年代学分析。磷灰石是超基性岩中较常见的矿物,可能形成于岩石形成和演化的不同阶段,并且容易受到后期蚀变影响,因此对磷灰石年龄的地质意义进行合理解释需要结合该矿物颗粒的成因。在实际操作中,确定一个分选出的定年矿物的成因往往并不容易。因为这需要对该矿物在岩石中的产出状态、生成顺序、矿物共生关系等进行详细观察和分析才能最终确定。有些岩石还可能存在多期次流体活动和变质作用,确定一个矿物的成因可能还需要结合多种岩石学和矿物学证据,这对于分选出的矿物颗粒是无法实现的。因此,无法准确判断分选出的定年矿物是岩浆成因还是变质成因,是继承晶还是从围岩捕获的矿物?目前,无法排除由于矿物分选过程中混样导致矿物来自其他样品的可能性。这些都为磷灰石定年结果的解释提供了不确定性。

Wolfgang Müller(2003)强调矿物年龄必须与其他地质参数,如压力、温度、矿物成分和结构相结合,以量化地质过程,如造山、断层、变质或岩浆活动。Tomkins 等(2005)采用 SHRIMP 技术在变砂岩薄片中的锆石上和分选出的锆石上分别进行定年分析,认为后者得出的年龄地质意义不明,原因在于缺乏矿物成因约束。Monteleone 等(2007)认为采用分选出的锆石进行定年分析来约束多期或高度变质变形的变质岩的演化历史存在争议,因为锆石生长可能发生在进变质、峰期和退变质过程中。

研究人员渐渐意识到,进行精细的矿物 U-Pb 定年研究需要在岩石薄片上进行,并结合该矿物的成因进行分析才可靠。Whitehouse 等(2003)将岩石学分析和 SIMS 分析相结合,对西班牙南部 Betic Cordillera 地区的泥质麻粒岩薄片中的石榴石和锆石进行研究,限定了不同成因锆石 U-Pb 定年结果的地质意义。Simonetti 等(2006)使用 LA-MC-ICP-MS 技术,以高空间分辨率(5~40 μm)对岩石学薄片中的副矿物(锆石、独居石和榍石)进行年龄测定,分析结果与通过 ID-TIMS 测定的年龄一致。Monteleone 等(2007)对来自 Fergusson 和 Goodenough 岛屿的 5 个退变质榴辉岩样本,在岩石薄片上对锆石进行离子探针 U-Pb 年龄分析,证明这两个岛屿的榴辉岩形成于晚中新世—上新世(8~2 Ma)。Zong 等(2010)采用 LA-ICP-MS 技术对苏鲁地区中国大陆科学钻探工程主孔中退变质榴辉岩薄片上的锆石进行了原位定年,为超高压变质作用过程提供了精细制约。Chamberlain 等(2010)采用 SIMS 开发了一种新的原位 U-Pb 方法,用于测定尺寸小至 3 μm 的微小斜锆石晶体,该方法利用 X 射线面扫描和背散射电子成像技术来定位岩石薄片中的目标颗粒。随后,在 CAMECA IMS 1270 上进行 SIMS 分析,该方法的年龄精度范围从古元古宙岩石的 0.1% 到寒武纪岩石的 3%~7% 不等。该方法非常适合对极微小矿物晶体进行测年,比如外星岩石和珍贵的地球样本。最近, Li 等(2023)应用 LA-ICP-MS 技术对中国东部宣城地区桥马山矿床石英脉岩石薄片中的白钨矿进行了 U-Pb 定年分析,并通过与共生石榴子石和磷灰石的年代测定对白钨矿定年结果进行了交叉验证。

由于磷灰石矿物成因的多样性(Chew et al., 2015; Chen et al., 2022),如果在岩石切片上直接进行 U-Pb 定年分析,并结合岩石显微图像分析出的矿物成因,

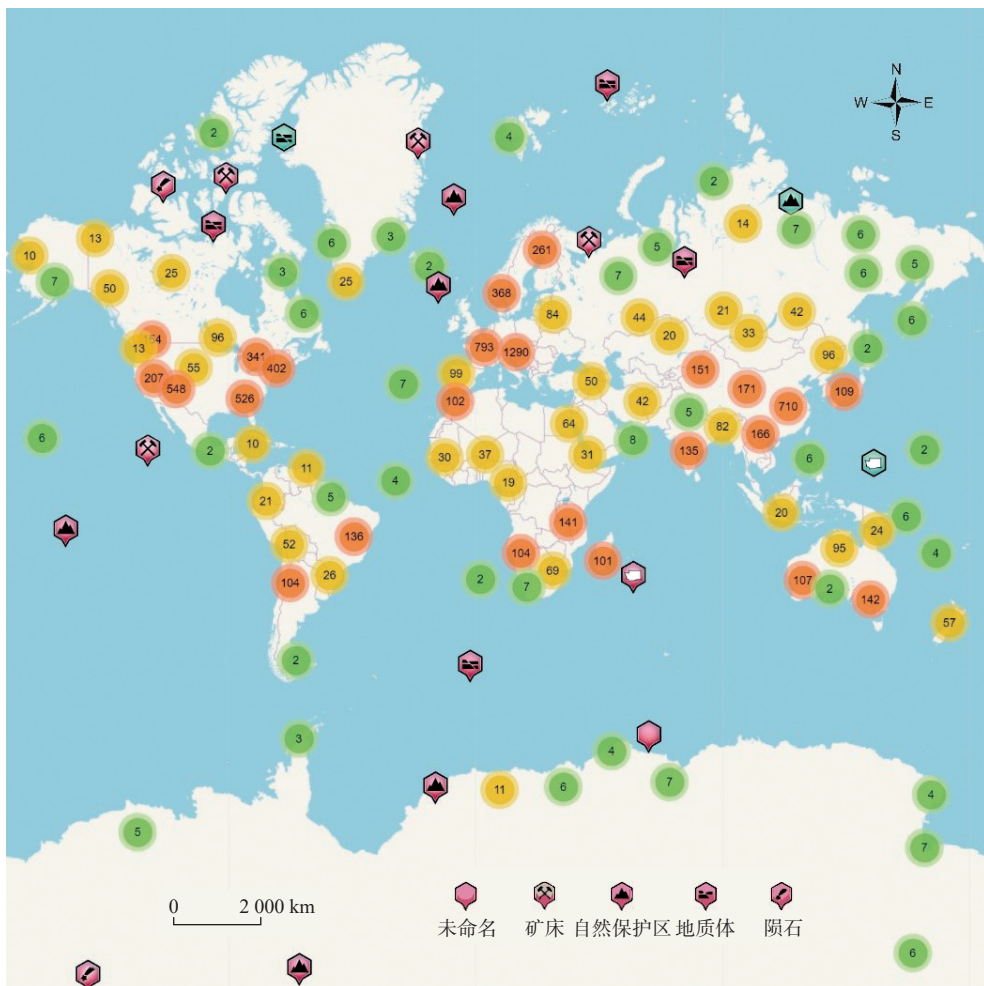
则得到的定年结果将更加可靠。Chen 等(2013)对加拿大 Oka 碳酸岩复合体开展研究,并首次尝试在碳酸岩薄片上对不同成因的磷灰石开展原位 U-Pb 定年研究,揭示了 Oka 碳酸岩复合体复杂的形成历史。笔者详细介绍磷灰石的矿物特性、地球化学属性及其 U-Pb 定年技术的研究进展。

### 3 磷灰石 U-Pb 定年技术

磷灰石,英文名为 Apatite,源于希腊语  $\alpha\pi\alpha\tau\acute{\alpha}\omega$ (音译为  $\alpha\pi\alpha\tau\acute{\alpha}\omega$ ),意思为“欺骗”,正如他所说的那样,“直到现在,它还误导着矿物学家对其进行准确鉴定”

(Patrick et al., 2015)。

磷灰石的化学式为  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$ ,是最常见的磷酸盐矿物,在地壳中几乎无处不在,是火成岩、变质岩和碎屑沉积岩中常见的副矿物(Chew et al., 2011; 高永宝等, 2024)(图 1)。由于硅酸盐熔体中  $\text{P}_2\text{O}_5$  的溶解度较低,且通常进入到造岩矿物晶格中的磷元素极其有限,这使得磷灰石成为火成岩中常见的富磷矿物(Piccoli et al., 2002)。此外,磷灰石还常常出现在不同变质等级的变质岩中(Spear et al., 2002)。O'Sullivan 等(2020a)采用在爱尔兰西部 Grampian-Taconic 弧增生期间沉积的碎屑磷灰石,探讨了位于劳伦古陆边缘的整个威尔逊旋回过程。



图中数字代表在该地报道过磷灰石数据的文献数量;由于缩放尺度所限,该区域可能包含多处矿床、地质体、自然保护区、陨石发现地等;数据来源: <https://zh.mindat.org/min-29229.html>

图1 截至目前公开报道的磷灰石在全球的分布示意图

Fig. 1 The global distribution of apatite as reported in publicly available literature to date

磷灰石是地球化学研究领域中唯一能够与锆石媲美的“全能型”矿物,磷灰石的晶格中可以囊括元

素周期表中几乎半数以上的元素。其中,磷灰石的 U-Pb 体系(封闭温度约为  $350\sim 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ )、Lu-Hf 体系(封

闭温度约为 680~750 °C) 和 U-Th-He 体系(封闭温度约为 50~80 °C) 可以用来定年, 研究地质体的冷却历史(Chew et al., 2015)。磷灰石的微量元素组成与其母体存在成因联系。此外, 由于 Rb 元素和 Sm 元素含量足够低, 使得 Sr 同位素和 Nd 同位素这两个强大的示踪剂可以有效地应用于磷灰石, 揭示宿主岩石的物质来源(杨岳衡等, 2008, 2009)。

磷灰石中的 U 元素含量普遍较低(大部分小于  $100 \times 10^{-6}$ ) (O'Sullivan et al., 2020b), 并且普遍存在大量的普通 Pb, 使得它并非 U-Pb 同位素定年的理想矿物。然而, 由于它在自然界的广泛存在性、多样的地球化学应用价值及其 U-Pb 同位素系统的温度敏感性(350~550 °C), 使磷灰石成为研究地球深部热历史的有力工具。Oosthuyzen 等(1973)首次对磷灰石进行了 U-Pb 定年研究, 采用的技术手段是早期的热电离质谱技术(TIMS)。他们对巴伯顿绿岩带中太古代岩石中的磷灰石开展研究, 得到了谐和一致的 U-Pb 年龄数据。然而, 后续的磷灰石 U-Pb 定年研究表明, 受其晶格中普通 Pb 的影响, 磷灰石往往呈现出强烈不谐和的 U-Pb 年龄。尽管普通 Pb 可以被校正(Williams, 1998), 但对于具有很高普通 Pb 的样品, 校正过程会导致年龄的不确定性增大, 并且如果所使用的初始 Pb 组成不合适的话, 也可能得到不准确的年龄。磷灰石中普遍存在的普通 Pb 也为其微区 U-Pb 定年造成了困扰。例如, 二次离子质谱(SIMS)或激光剥蚀-电感耦合等离子体质谱法(LA-ICP-MS)。相较于热电离质谱法(TIMS), 微区方法所获得的  $^{204}\text{Pb}$  信号非常微弱, 并且存在同质异位素的干扰, 导致很难采用可靠的  $^{204}\text{Pb}$  法(Williams, 1998)进行普通 Pb 校正。Xiang 等(2021)采用配有碰撞池的三重四级杆型等离子体质谱仪, 通过引入氦气来去除  $^{204}\text{Hg}$  对  $^{204}\text{Pb}$  的同质异位素干扰, 使得采用  $^{204}\text{Pb}$  法对测试结果进行普通 Pb 成为可能。

尽管如此, 由于微区方法在空间分辨以及经济和效率方面的巨大优势, 越来越多的研究者仍然采用微区技术(LA-ICP-MS 或 SIMS)进行磷灰石 U-Pb 定年。通常采用  $^{207}\text{Pb}$  校正法, 或者将定年结果投在 Tera-Wasserburg 谐和图上, 锚定或不锚定初始 Pb 比值对普通 Pb 进行校正, 拟合一条不一致直线, 采用直线与 Tera-Wasserburg 谐和线的下交点作为磷灰石的结晶年龄。Li 等(2012)采用 SIMS 技术, 优化了磷灰石 U-Pb 定年方法, 可以精确分析低 U ( $< 3 \times 10^{-6}$ ) 和高普通

Pb ( $> 50\%$ ) 的磷灰石 U-Pb 年龄。周红英等(2012)利用 LA-MC-ICP-MS 建立了磷灰石微区原位 U-Pb 同位素定年方法, 给出了这一新方法的分析流程, 报道了利用这一新方法对 5 个磷灰石样品的分析结果, 并应用 ID-TIMS 对定年结果进行了验证。许雅雯等(2015)通过实验研究, 探索了采用 LA-ICP-MS 直接测定岩石薄片中的磷灰石 U-Pb 同位素年龄的流程。李琳琳(2019)以华北克拉通广泛发育的元古宙基性岩墙群为研究对象, 探讨岩石中共生的斜锆石、锆石和磷灰石的结晶规律和 U-Pb 同位素特征, 指出斜锆石常被锆石交代, 后者往往具有复杂的来源, 可能为岩浆成因或外来流体带入, 他们采用 LA-ICP-MS 技术进行磷灰石 U-Pb 分析, 获得的 Tera-Wasserburg 下交点年龄与共生的斜锆石年龄在误差范围内一致。周红英等(2020)采用 LA-MC-ICP-MS 技术, 对中国华北地区燕辽裂陷槽中下伏于长城群常州沟组的新太古代片麻岩中的麻粒岩包体的磷灰石进行 U-Pb 年龄测定, 确定了长城群的底界年龄。Chew 等(2021)采用 LA-MC-ICP-MS 技术, 提出了一种适用于磷灰石年龄深度剖面分析的测试方法, 并强调其需要与岩石学特征和微量元素信息相结合才能挖掘出有地质意义的信息。赵令浩等(2022)利用 LA-ICP-MS 技术对马达加斯加的磷灰石样品 MAD2 进行 U-Pb 定年分析, 探讨了其 U-Pb 同位素均一性及用作磷灰石标准样品的可行性。岩石韧性变形和变质作用的时间和过程也可以通过磷灰石年代学加以记录, Margaret 等(2022)对法国 Pyrenees 地区 St. Barthélémy 地体中出露的韧性剪切带里的磷灰石进行了矿物结构、LA-ICP-MS U-Pb 定年和元素地球化学分析, 探讨磷灰石如何记录岩石的变形和变质作用。钟福军等(2023)以中国湘东南地区鹿井矿田中的辉绿岩为研究对象, 通过对岩石中的磷灰石进行 LA-ICP-MS U-Pb 年代学分析, 限定了辉绿岩的形成年龄为约 200 Ma。Li 等(2023)采用 LA-ICP-MS 技术, 在石英脉岩石薄片上对原位磷灰石 U-Pb 定年技术进行了探索。Lan 等(2023)利用 LA-ICP-MS 技术对热液磷灰石进行 U-Pb 测年, 将藏南马扎拉金锑矿床的形成时间约束在约 35 Ma。

碎屑磷灰石年代学谱系在进行陆块溯源研究中具有“指纹识别”的独特作用, 可以半定量地判断不同地层的亲疏关系, 逐渐成为沉积岩物质溯源研究的一种重要手段, 甚至比碎屑锆石更有优势, 这是因为有的碎屑源区岩石中并没有锆石(O'Sullivan et al.,

2016, 2020a; Chew et al., 2020)。例如, 超基性岩、碱性岩等。然而, 由于碎屑矿物源区往往较为复杂, 定年测点不具有统一的初始铅 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 值, 也无法根据所有测点在谐和图中的分布估计大致年龄, 从而不具备采用 $^{207}\text{Pb}$ 法、 $^{208}\text{Pb}$ 法和 T-W 做图法进行普通铅扣除的前提。Chew 等(2011)介绍了一种独特的迭代校正法, 该方法的基本原理是结合 Stacey-Kramers 双阶段地球铅元素演化模型和 Terra-Wasserburg 谐和曲线, 采用迭代法无限逼近真实年龄。李艳广等(2023)对该迭代法进行了探讨, 并给出了计算过程。

磷灰石原位微区 U-Pb 定年还面临着另一个巨大挑战, 即优质的磷灰石标样非常匮乏, 亟待开发新标样。目前, 常用的磷灰石标样存在各种各样的问题。例如, Durango(Mcdowell et al., 2005)地区磷灰石样品虽然晶体巨大、纯净, 但年龄太小( $\sim 32\text{ Ma}$ ), 积累的放射成因铅太低; MAD(Thomson et al., 2012)和 McClure(Schoene et al., 2006)地区磷灰石样品中 U 元素的含量太低(约  $20 \times 10^{-6}$ ); Otter Lake(Barfod et al., 2005)地区磷灰石样品的晶体不纯净, 存在很多包裹体。

#### 4 岩石原位磷灰石 U-Pb 定年技术前景分析

磷灰石在超基性岩原位定年中的应用前景方面展现了多个令人期待的发展趋势。对经历复杂演化过程的超基性岩中多种成因的磷灰石等进行综合定年, 可提高数据的可信度和解释的全面性与准确性, 这种综合定年的趋势有望在未来超基性岩定年研究中变得更为普遍, 为刻画超基性岩浆结晶分异和流体活动时间轨迹提供更好的解决方案。对岩石薄片中的磷灰石矿物进行原位定年能够结合矿物的成因信息, 有助于更准确地解释定年结果, 避免成因不明确所带来的不确定性。这种更精细的成因分析方法有望成为未来超基性岩定年研究的重要发展方向, 为研究人员提供更可靠的定年数据和解释框架。尽管前人的研究成果为超基性岩原位磷灰石 U-Pb 定年工作奠定了坚实的基础, 但仍存在一些关键问题需要解决。

(1) 采用微区 U-Pb 定年技术在岩石切片上进行原位地质年代学研究的论文罕有发表(Whitehouse et al. 2003; Simonetti et al., 2006; Monteleone et al. 2007; Chamberlain et al. 2010; Zong et al. 2010; Li et al., 2023)。

经过多次尝试, 笔者认为这可能主要是由于在岩石薄片的磨制过程中往往存在现代普通铅污染, 这极大影响了原地原位矿物 U-Pb 定年的精准度, 并将对测试结果中普通铅的扣除带来很大困难, 往往导致测试失败。尽管采用激光大斑束对样品进行预剥蚀可以减少这类普通铅污染的影响, 但是对于结构复杂的矿物, 剥蚀后的样品表面和预先摄取的阴极发光(CL)或者背散射(BSE)图像可能会出现巨大差异, 进而影响测试效果。因此, 制备无铅污染的岩石薄片是实验成功与否的前提。笔者建议采用以下全流程无铅污染的岩石薄片制备方法: ①岩石样品的准备: 首先要超声清洗岩石样品, 并在样品准备过程中避免使用含铅的物质。例如, 使用低铅含量的胶水或纯度高的环氧树脂将样品固定在玻璃片上。②研磨和打磨: 在研磨和打磨过程中, 避免使用含铅的研磨材料。③清洗和处理: 在磨制完成后, 要对岩石光片和探针片进行清洗和处理, 清洗时可以使用低铅含量的溶液和清洗布。总之, 全流程无铅污染的岩石薄片磨制方法需要注意选择低铅含量的材料和物质, 严格控制每个步骤的质量, 并使用低铅含量的清洗剂、胶水、树脂和溶液。这样可以确保磨制出的样品符合分析要求, 对实验结果的准确性和可靠性提供保障。

(2) 超基性岩中磷灰石属于副矿物, 数量稀少, 并且对于经历过变质改造的超基性岩中, 可能存在两类磷灰石, 即岩浆成因和变质成因磷灰石。如何准确定位和识别超基性岩石片中的磷灰石也是实验的关键所在。笔者建议在使用普通光学和扫描电镜进行岩石学和矿物学观察的基础上, 利用矿物自动定量分析系统(Tescan 公司的 TIMA™、FEI 公司的 MAPS™或 Bruker 公司的 AMICS™)对岩石薄片进行面扫描全谱成像, 利用矿物自动定量分析系统的矿物搜索和定位功能筛选出适合定年的矿物, 并进行背散射图像(BSE)和阴极发光图像(CL)拍摄, 查明磷灰石在矿石中的含量、成分、粒度、形态、共生矿物和相互关系等特征参数, 重点对定年矿物磷灰石的含量、产出状态、生成顺序、矿物共生关系和粒径等进行详细观测, 确定定年矿物的位置、大小及成因, 为下一步原位年代学测试提供详细的矿物学基础。

(3) 激光剥蚀过程中产生的元素“Downhole”分馏效应是 LA-ICP-MS 分析结果不确定度的最主要来源。由于不同矿物元素组成和晶体结构的差异, 其在激光剥蚀过程中表现的元素分馏行为也有所不同, 比

如斜锆石的元素分馏效应要比锆石显著 10 倍以上(李艳广等, 2015), 而有的定年矿物(比如榍石)不同的颗粒则存在“正常分馏”“反向分馏”和“无分馏”等不规则现象(靳梦琪等, 2020), 如果不对其进行评价并校正, 将无法得到正确的定年结果。因此, 有必要对磷灰石矿物在激光剥蚀过程中产生的元素“Downhole”分馏效应, 进行精细观察、定量评价, 采用多种数据处理方法对元素分馏和质量歧视进行校正, 进行效果比对, 探索适合于岩石薄片原位磷灰石 U-Pb 定年的实验条件和数据处理方式。

(4) 在磷灰石矿物结晶时, 难免混入初始普通铅, 尤其是当矿物晶格中存在与  $\text{Pb}^{4+}$  离子半径接近的键位时(Williams, 1998)。若不对这些非放射成因铅进行准确扣除, 将无法得到准确的矿物年龄。传统的普通铅扣除方法有  $^{204}\text{Pb}$  法、 $^{207}\text{Pb}$  法、 $^{208}\text{Pb}$  法、T-W 投图法等(Spencer et al., 2016)。其中, 由于  $^{204}\text{Hg}$  的干扰,  $^{204}\text{Pb}$  法不适用于本项目所采用的 LA-ICP-MS 技术。而  $^{207}\text{Pb}$  法、 $^{208}\text{Pb}$  法和 T-W 投图法均需要对矿物年龄进行预估, 进而根据 Stacey-Kramers 双阶段地球铅演化模型得到矿物结晶时的初始普通铅比值, 才能进行后续校正计算。然而, 由于在岩石薄片上进行原位矿物定年分析的测试点不会很多, 很难在 T-W 图中呈线性展布, 进而无法估计矿物大致年龄, 使得上述  $^{207}\text{Pb}$  法、 $^{208}\text{Pb}$  法、T-W 投图法等普通铅扣除法可能均不适用。Chew 等(2011)针对碎屑磷灰石开发了一种迭代校正法, 该方法是否适用于岩石薄片原位矿物定年也有待进一步研究。因此, 如何有效地进行普通铅校正同样是超基性岩岩石薄片原位矿物定年测试能否成功的关键。

## 5 结语与展望

超基性岩因其独特的化学成分和矿物组成, 在研究地球深部结构和演化方面扮演着重要角色。然而, 这类岩石的定年研究通常较为困难, 因为它们缺少像锆石这样常用的定年矿物。尽管如此, 通过利用斜锆石和磷灰石进行 U-Pb 同位素定年, 笔者仍然可以对它们进行有效的年代测定。超基性岩中的磷灰石可能记录了岩石的岩浆活动和蚀变过程, 对岩石中多种成因的磷灰石进行定年可以用来刻画超基性岩的形成和演化过程。然而, 确定单矿物的成因通常较为困难。因此, 进行磷灰石 U-Pb 同位素定年研究时, 最好

在超基性岩的岩石薄片上进行, 以便更准确地解释年龄数据。

通过对磷灰石 U-Pb 定年技术的研究进展进行系统的梳理, 笔者认为随着科学技术的不断进步, 这两种矿物的定年技术及其在地球科学领域的应用已经取得了显著成果。磷灰石则因其在地球化学领域的“全能”特性, 为研究地球深部热历史提供了有力的工具。未来, 磷灰石 U-Pb 定年技术的应用前景广阔。随着原位定年技术的不断完善, 如激光取样或电子/离子微束诱导技术和各类质谱分析技术的发展, 磷灰石的定年精度和可靠性将进一步提升。多成因矿物联合定年的趋势将为刻画岩浆经历的岩浆结晶分异和流体活动时间轨迹提供更全面的解决方案。此外, 岩石薄片原位定年技术的发展将使得矿物的定年分析更加精细, 从而提高定年结果的准确性和解释的可靠性。

笔者对磷灰石 U-Pb 定年技术在超基性岩原位定年中的应用前景充满希望, 随着技术的不断进步和问题的逐步解决, 期待能够为地球深部过程和成矿作用研究提供更为精确的时间框架, 进而推动地球科学领域的进一步发展。然而, 这仍需要解决一系列关键的技术问题。例如, 如何减少岩石薄片制备过程中的现代铅污染? 如何准确识别和定位超基性岩石片中的磷灰石? 如何评估和校正激光剥蚀过程中的元素分馏效应? 如何有效地进行普通铅校正? 这些问题的解决将需要地质学家、地球化学家和分析仪器专家的努力, 通过跨学科的合作, 不断优化实验方法和数据处理技术。

## 参考文献(References):

- 高永宝, 陈康, 王亮, 等. 阿尔金西段库木塔什萤石矿床成因: 磷灰石 U-Pb 年龄、原位 Sr-Nd 同位素、地球化学约束[J]. 西北地质, 2024, 57(4): 1-20.
- GAO Yongbao, CHEN Kang, WANG Liang, et al. Genesis of Kumutashi Fluorite Deposit in the West Altyn-Tagh Orogen, NW China: Constraints from Apatite In-Situ U-Pb Dating, Sr-Nd Isotope and Chemistry[J]. *Northwestern Geology*, 2024, 57(4): 1-20.
- 靳梦琪, 李艳广, 王鹏, 等. 榍石 LA-ICP-MS U-Pb 定年中元素分馏的影响及校正研究[J]. 岩矿测试, 2020, 39(2): 274-284.
- JIN Mengqi, LI Yanguang, WANG Peng, et al. Element fractionation and correction method for U-Pb dating of titanite by laser

- ablation-inductively coupled plasms-mass spectrometry[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2020, 39(2): 274–284.
- 李琳琳. 斜锆石、锆石和磷灰石 U-Pb 年代学在华北克拉通基性岩墙研究中的应用[D]. 北京: 中国地质科学院, 2019.
- LI Linlin. Application of U-Pb geochronology of baddeleyite, zircon, and apatite in the study of mafic dykes in the North China Craton[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2019.
- 李献华, 苏犁, 宋彪, 等. 金川超镁铁侵入岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. *科学通报*, 2004, 49(4): 401–402.
- LI Xianhua, SU Li, SONG Biao, et al. SHRIMP U-Pb zircon age of the Jinchuan ultramafic intrusion and its geological significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(4): 401–402.
- 李艳广, 靳梦琪, 汪双双, 等. LA-ICP-MS U-Pb 定年技术相关问题探讨[J]. *西北地质*, 2023, 56(4): 274–282.
- LI Yanguang, JIN Mengqi, WANG Shuangshuang, et al. Exploration of Issues Related to the LA-ICP-MS U-Pb Dating Technique[J]. [J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(4): 274–282.
- 李艳广, 汪双双, 刘民武, 等. 斜锆石 LA-ICP-MS 定年方法及应用[J]. *地质学报*, 2015, 89(12): 2400–2418.
- LI Yanguang, WANG Shuangshuang, LIU Minwu, et al. U-Pb Dating Study of Baddeleyite by LA-ICP-MS: Technique and Application[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(12): 2400–2418.
- 许雅雯, 王家松, 郭虎, 等. U-Pb 同位素测年新方法-激光烧蚀等离子体质谱法直接测定探针片中锆石和磷灰石年龄[J]. *地质调查与研究*, 2015, 38(1): 67–76.
- XU Yawen, WANG Jiasong, GUO Hu, et al. A new method of u-pb isotopic dating: in polished thin section u-pb dating of zircon, apatite using laser ablation-MC-ICP-MS[J]. *Geological Survey and Research*, 2015, 38(1): 67–76.
- 杨岳衡, 孙金凤, 谢烈文, 等. 地质样品 Nd 同位素激光原位等离子体质谱 (LA-MC-ICPMS) 测定[J]. *科学通报*, 2008, 53(5): 568–576.
- YANG Yueheng, SUN Jinfeng, XIE Liewen, et al. In-situ Nd isotopic measurement of natural geological samples by LA-MC-ICP-MS[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(5): 568–576.
- 杨岳衡, 吴福元, 谢烈文, 等. 地质样品 Sr 同位素激光原位等离子体质谱 (LA-MC-ICP-MS) 测定[J]. *岩石学报*, 2009, 25(12): 3431–3441.
- YANG Yueheng, WU Fuyuan, XIE Liewen, et al. In-situ Sr isotopic measurement of natural geological samples by LA-MC-ICP-MS[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(12): 3431–3441.
- 赵令浩, 詹秀春, 曾令森, 等. 磷灰石 LA-ICP-MS U-Pb 定年直接校准方法研究[J]. *岩矿测试*, 2022, 41(5): 744–753.
- ZHAO Linghao, ZHAN Xiuchun, ZENG Lingsen, et al. Direct Calibration Method for LA-HR-ICP-MS Apatite U-Pb Dating[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2022, 41(5): 744–753.
- 钟福军, 夏菲, 王玲, 等. 诸广中部鹿井矿田辉绿岩磷灰石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其与铀成矿关系[J]. *地质学报*, 2023, 97(8): 2593–2608.
- ZHONG Fujun, XIA Fei, WANG Ling, et al. Geochronology and geochemistry of dolerite in the Lujing uranium ore field of central Zhuguangshan complex, and its relationship with uranium mineralization[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2023, 97(8): 2593–2608.
- 周红英, 耿建珍, 崔玉荣, 等. 磷灰石微区原位 LA-MC-ICP-MS U-Pb 同位素定年[J]. *地球学报*, 2012, 33(6): 857–864.
- ZHOU Hongying, GENG Jianzhen, CUI Yurong, et al. In Situ U-Pb Dating of Apatite Using LA-MC-ICP-MS[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2012, 33(6): 857–864.
- 周红英, 李怀坤, 张健, 等. 新太古代花岗片麻岩中麻粒岩包体磷灰石 U-Pb 定年对燕辽裂陷槽中元古代长城群底界年龄的制约[J]. *地质调查与研究*, 2020, 43(2): 81–88.
- ZHOU Hongying, LI Huaikun, ZHANG Jian, et al. U-Pb dating of apatite from the granulite xenoliths in the Neoarchaean granitic gneiss: constraints on the base age of the Mesoproterozoic Changchengian Group in the Yanliao Aulacogen, northern North China Craton[J]. *Geological Survey and Research*, 2020, 43(2): 81–88.
- Amelin Y, Li C, Naldrett A J. Geochronology of the Voisey's Bay intrusion, Labrador, Canada, by precise U-Pb dating of coexisting baddeleyite, zircon, and apatite[J]. *Lithos*, 1999, 47(1-2): 33–51.
- Barfod G H, Krogstad E J, Frei R, et al. Lu-Hf and PbSL geochronology of apatites from Proterozoic terranes: a first look at Lu-Hf isotopic closure in metamorphic apatite[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2005, 69: 1847–1859.
- Barnes S J, Maier W D, Ashwal L D. Platinum-group element distribution in the Main Zone and Upper Zone of the Bushveld Complex, South Africa[J]. *Chemical Geology*, 2004, 208(1-4): 293–317.
- Chamberlain K R, Schmitt A K, Swapp S M, et al. In situ U-Pb SIMS (IN-SIMS) micro-baddeleyite dating of mafic rocks: method with examples[J]. *Precambrian Research*, 2010, 183(3): 379–387.
- Chen H, Sun X, Li D, et al. In situ apatite U-Pb dating for the ophiolite-hosted Nianzha orogenic gold deposit, Southern Tibet[J]. *Ore Geology Reviews*, 2022, 144: 104811.
- Chen W, Simonetti A. In-situ determination of major and trace elements in calcite and apatite, and U-Pb ages of apatite from the Oka carbonatite complex: Insights into a complex crystallization history[J]. *Chemical Geology*, 2013, 353: 151–172.
- Chew D M, O'Sullivan G, Caracciolo L, et al. Sourcing the sand: Accessory mineral fertility, analytical and other biases in detrital U-Pb provenance analysis[J]. *Earth Science Reviews*, 2020, 202, 103093.

- Chew D M, Spikings R A. Apatite U-Pb thermochronology: A review[J]. *Minerals*, 2021, 11(10): 1095.
- Chew D M, Spikings R A. Geochronology and thermochronology using apatite: time and temperature, lower crust to surface[J]. *Elements*, 2015, 11(3): 189–194.
- Chew D M, Sylvester P J, Tubrett M N. U–Pb and Th–Pb dating of apatite by LA-ICP-MS[J]. *Chemical Geology*, 2011, 280(1–2): 200–216.
- Guo Q, Li Q, Zhu Z, et al. An Acid-Based Method for Highly Effective Baddeleyite Separation from Gram-Sized Mafic Rocks[J]. *ACS Omega*, 2022, 7: 3634–3638.
- Hamlyn P R, Bonatti E. Petrology of mantle-derived ultramafics from the Owen Fracture Zone, northwest Indian Ocean: implications for the nature of the oceanic upper mantle[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1980, 48(1): 65–79.
- Heaman L M, LeCheminant A N. The application of U–Pb geochronology to mafic, ultramafic and alkaline rocks: An evaluation of three mineral standards[J]. *Chemical Geology*, 2000, 163(1–4): 43–62.
- Herzberg C, Asimow P D, Arndt N, et al. Temperatures in ambient mantle and plumes: Constraints from basalts, picrites, and komatiites[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2007, 8(2): 1–34.
- Hirschmann M M, Stolper E M. A possible role for garnet pyroxenite in the origin of the “garnet signature” in MORB[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1996, 124: 185–208.
- Kamenetsky V S, Crawford A J, Meffre S. Factors controlling chemistry of magmatic spinel: an empirical study of associated olivine, Cr-spinel and melt inclusions from primitive rocks[J]. *Journal of Petrology*, 2002, 42: 655–671.
- Lan Z, Zhang G, Cao R, et al. Apatite U-Pb geochronological and geochemical constraints on the Mazhala Au-Sb deposit in South Tibet, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2023, 158: 169–1368.
- Larsen R B, Grant T B, Sørensen B E, et al. Portrait of a giant deep-seated magmatic conduit system: The Seiland Igneous Province[J]. *Lithos*, 2018, 296: 600–622.
- Li C, Ripley E M, Maier W D. Olivine-hosted sulfide melt inclusions as an exploration tool for magmatic Ni-Cu-(PGE) deposits: a case study from Jinchuan deposit (China)[J]. *Economic Geology*, 2014, 109: 2079–2089.
- Li Q, Li X, Wu F, et al. In-situ SIMS U–Pb dating of Phanerozoic apatite with low U and high common Pb[J]. *Gondwana Research*, 2012, 21(4): 745–756.
- Li Y, Yuan F, Simon M J, et al. Combined garnet, scheelite and apatite U–Pb dating of mineralizing events in the Qiaomaishan Cu–W skarn deposit, eastern China[J]. *Geoscience Frontiers*, 2023, 14(1): 101459.
- Liu M, Su S, Yao Y, et al. Discovery and genesis of two types of olivines and its significance to metallogeny in Jinchuan magmatic copper-nickel (PGE) sulfide deposit[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 36(4): 1151–1170.
- Margaret L O, Drew A L, Daniel F S, et al. Deformation and metasomatism recorded by single-grain apatite petrochronology[J]. *Geology*, 2022, 50(6): 697–703.
- McDowell F W, McIntosh W C, Farley K A. A precise  $^{40}\text{Ar}$ – $^{39}\text{Ar}$  reference age for the Durango apatite (U–Th)/He and fission-track dating standard[J]. *Chemical Geology*, 2005, 214: 249–263.
- Monteleone B D, Baldwin S L, Webb L E, et al. Late Miocene–Pliocene eclogite facies metamorphism, D’Entrecasteaux Islands, SE Papua New Guinea[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2007, 25: 245–265.
- Moody J B. Serpentinization: a review[J]. *Lithos*, 1976, 9(2): 125–138.
- Oosthuyzen E J, Burger A J. The suitability of apatite as an age indicator by the uranium-lead isotope method[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1973, 18: 29–36.
- O’Sullivan G J, Chew D M, Kenny G, et al. The trace element composition of apatite and its application to detrital provenance studies[J]. *Earth-Science Reviews*, 2020b, 201: 103044.
- O’Sullivan G J, Chew D M, Samson S D. Detecting magma-poor orogens in the detrital record[J]. *Geology*, 2016, 44(10): 871–874.
- O’Sullivan G J, Chew D M. The clastic record of a Wilson Cycle: Evidence from detrital apatite petrochronology of the Grampian-Taconic fore-arc[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2020a, 552: 1116588.
- Patrick D. Roycroft, Martine Cuypers. The Etymology of The Mineral Name ‘Apatite’: A Clarification[J]. *Irish Journal of Earth Sciences*, 2015, 33: 71–75.
- Piccoli P M, Candela P A. Apatite in igneous systems[A]. In: Kohn M L, Rakovan J, Hughes J M (eds). *Phosphates, Geochemical, Geobiological and Materials Importance: Reviews in Mineralogy and Geochemistry*[M]. Mineralogical Society of America, Chantilly, VA, USA, 2002, 48: 255–292.
- Schoene B, Bowring S A. U–Pb systematics of the McClure Mountain syenite: thermochronological constraints on the age of the  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  standard McClure[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2006, 151: 615–630.
- Simonetti A, Heaman L M, Chacko T, et al. In situ petrographic thin section U–Pb dating of zircon, monazite, and titanite using laser ablation–MC–ICP–MS[J]. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2006, 253: 87–97.
- Söderlund U, Johansson L K H. A simple way to extract baddeleyite ( $\text{ZrO}_2$ )[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2002, 3: 1–7.
- Spear F S, Pyle J M. Apatite, monazite, and xenotime in metamorphic rocks[A]. In: Kohn M L, Rakovan J, Hughes J M (eds). *Phos-*

- phates, Geochemical, Geobiological and Materials Importance: Reviews in Mineralogy and Geochemistry[M]. Mineralogical Society of America, Chantilly, VA, USA, 2002, 48, 293–335.
- Spencer C J, Kirkland C L, Taylor R J M. Strategies towards statistically robust interpretations of in situ U-Pb zircon geochronology[J]. *Geoscience Frontiers*, 2016, 7(4): 581–589.
- Thomas B Grant, Rune B Larsen, Eric L Brown, et al. Mixing of heterogeneous, high-MgO, plume-derived magmas at the base of the crust in the Central Iapetus Magmatic Province (Ma 610–550): Origin of parental magmas to a global LIP event[J]. *Lithos*, 2020, 364–365, 105535.
- Thomson S N, Gehrels G E, Ruiz J, et al. Routine low-damage apatite U–Pb dating using laser ablation-multicollector-ICP-MS[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2012, 13: Q0AA21.
- Tomkins H S, Williams I S, Ellis D J. In situ U–Pb dating of zircon formed from retrograde garnet breakdown during decompression in Rogaland, SW Norway[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2005, 23: 201–215.
- Whitehouse M J, Platt J P. Dating high-grade metamorphism—constraints from rare-earth elements in zircon and garnet[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2003, 145: 61–74.
- Williams I S. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe[A]. In: McKibben M A, Shanks W C III, Ridley W I (Eds). *Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes*[M]. Reviews in Economic Geology, Society of Economic Geologists, Littleton, CO, USA, 1998, 7: 1–35.
- Xiang D, Zhang Z, Zack T, et al. Apatite U - Pb dating with common Pb correction using LA - ICP - MS/MS[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 2021, 45(4): 621–642.
- Wolfgang Müller. Strengthening the link between geochronology, textures and petrology[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 206(3–4): 237–251.
- Wyllie P J. The origin of ultramafic and ultrabasic rocks[J]. *Tectonophysics*, 1969, 7(5–6): 437–455.
- Zong K, Liu Y, Gao C, et al. In situ U–Pb dating and trace element analysis of zircons in thin sections of eclogite: Refining constraints on the ultrahigh-pressure metamorphism of the Sulu terrane, China[J]. *Chemical Geology*, 2010, 269(3–4): 237–251.