

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2025.01.002

富铀矿物 U-Pb 微区原位定年分析研究进展 ——基于 CiteSpace 的知识图谱可视化分析

贾芳云^{1,2}, 杨红梅^{1,3,4*}, 童喜润^{1,3}, 张遵遵^{1,3}, 邱啸飞^{1,3,4},
王磊^{1,3}, 杨文武^{1,3}, 卢山松^{1,3,4}

JIA Fang-Yun^{1,2}, YANG Hong-Mei^{1,3,4*}, TONG Xi-Run^{1,3}, ZHANG Zun-Zun^{1,3}, QIU Xiao-Fei^{1,3,4},
WANG Lei^{1,3}, YANG Wen-Wu^{1,3}, LU Shan-Song^{1,3,4}

1. 中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心), 湖北 武汉 430205; 2. 中国地质科学院研究生院,
北京 100037; 3. 中国地质调查局花岗岩成岩成矿地质研究中心, 湖北 武汉 430205; 4. 古生物与地质环境
演化湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430205

1. Wuhan Center, China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Central South China), Wuhan 430205, Hubei, China;
2. Graduate School, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. Research Center for Petrogenesis and
Mineralization of Granitoid Rocks, China Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China; 4. Hubei Key Laboratory of
Paleontology and Geological Environment Evolution, Wuhan 430205, Hubei, China

摘要: 富铀矿物 U-Pb 体系微区原位定年技术在地球系统科学和自然资源综合地质调查中具有广泛的应用。为全面梳理其研究进展, 探讨研究热点和发展趋势, 本文利用 CiteSpace 对 Web of Science 核心数据库(WOS)和维普数据库(VIP)中 1991—2024 年期间共 20469 篇相关文献进行可视化分析, 得到了相关知识图谱。结果表明, U-Pb 微区原位定年分析领域的发展可大致分为 3 个阶段: 起步阶段(1991—2001 年)、快速发展阶段(2002—2018 年)、稳定发展阶段(2019 年—), 主要取决于测试仪器、定年矿物拓展和数据处理软件三方面的进步。基于上述图谱分析, 对 U-Pb 微区原位定年分析方法及其应用研究进展进行了总结, 指出该领域前沿热点为不同矿物 U-Pb 定年的方法研发与应用拓展, 下一步研究方向主要有以下几点: (1)应用飞秒激光和缩小一次离子束等技术以提高测试仪器的灵敏度、分析精度和空间分辨率; (2)研发高效的 U-Pb 预扫描技术并深入研究 U 和 Pb 在矿物中的赋存状态, 完善低 U 矿物的微区原位分析方法; (3)研制不同组成不同年龄的标准物质, 或建立非基体匹配方法, 解决某些定年矿物标准样品稀缺的问题; (4)建立新矿物的 U-Pb 微区原位分析方法, 尤其是沉积岩和矿床中的矿物, 进一步拓展其应用领域; (5)研发基于 AI 的智能数据处理软件, 避免数据处理过程中的主观影响。

关键词: U-Pb; 微区原位分析; 富铀矿物; 研究进展; CiteSpace

中图分类号: P597+1

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2025)-01-0015-23

Jia F Y, Yang H M, Tong X R, Zhang Z Z, Qiu X F, Wang L, Yang W W and Lu S S. 2025.
**Research Progress on In-situ U-Pb Dating of Uranium-rich Minerals: A Visualization
Analysis of Knowledge Graphs Based on CiteSpace.** *South China Geology*, 41(1): 15–37.

收稿日期: 2025-02-15; 修回日期: 2025-02-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(42272229)和中国地质调查局项目(DD20240063)

第一作者: 贾芳云(2001—), 男, 硕士研究生, 地球化学专业, E-mail: 2827568894@qq.com

通讯作者: 杨红梅(1976—), 女, 正高级工程师, 硕士生导师, 从事同位素地质年代学与同位素地球化学研究, E-mail: 1603593120@qq.com

Abstract: The in-situ U-Pb dating of uranium-rich minerals has extensive applications in geoscience and integrated geological surveys of natural resources. To comprehensively review its research progress and explore the research hotspots and development trends, this study utilized CiteSpace to conduct a visualization analysis of 20,469 related articles from the Web of Science Core Collection (WOS) and the VIP Database from 1991 to 2024, generating relevant knowledge graphs. The results indicate that the development of in-situ U-Pb dating can be broadly divided into three stages: the initial stage (1991—2001), the rapid development stage (2002—2018), and the stable development stage (2019—present). This progress has primarily been driven by advancements in three key areas: analytical instruments, the expansion of dating minerals, and data processing software. Based on the above visualization analysis, this paper summarizes the research progress in in-situ U-Pb dating methods and their applications. It highlights that the current research frontier focuses on the method development and application expansion of U-Pb dating utilization for various minerals. The future research directions include the following: (1) Applying femtosecond laser and reducing the primary ion beam size to enhance the sensitivity, accuracy and spatial resolution of instruments; (2) Developing efficient U-Pb pre-scanning techniques and further investigating the occurrence states of U and Pb in minerals to improve in-situ dating methods of low U minerals; (3) Developing reference materials with diverse compositions and ages, or establishing non-matrix-matched methods to address the scarcity of reference materials for certain dating minerals; (4) Establishing in-situ U-Pb dating methods for new minerals, especially those in sedimentary rocks and ore deposits, and expanding their application fields further; (5) Building AI-based intelligent data processing software to eliminate subjective influences in data processing.

Key words: U-Pb; in-situ dating; uranium-rich minerals; research progress; CiteSpace

U-Pb 体系同位素定年法是解决地球科学时空问题最常用的年代学手段之一,在岩石学、矿床学、大地构造学和古生物地层学等诸多分支学科中都有应用(Li Q et al., 2014; 应元灿等, 2024; Ferreira et al., 2025; Khan et al., 2025)。随着测试仪器空间分辨率和分析精度的逐步提高、富铀矿物 U-Pb 定年分析方法的不断研发和国内外同位素地球化学实验室的相继建立, U-Pb 微区原位分析方法取得了长足发展,不仅推动了岩石成因、成矿机制和地壳演化等传统地质问题的深入研究,而且为探索地外天体奠定了坚实基础(Bhanot et al., 2024; Huang L Y et al., 2024)。

然而,因地质学研究具有大范围大样本和长周期的特性,研究者多局限于某一地区或某一研究方向,已有文献多专注于解决单一地质问题(Liu F L et al., 2004; Wu F Y et al., 2005; Zhao G C et al., 2010),或主要围绕 U-Pb 微区原位分析领域内某一定年矿物(Chew and Spikings, 2021)、某一仪器(Lin J et al., 2023)、某一应用方向(Smye et al., 2018)进行综述,未从宏观角度系统总结该领域的研究现状、前沿热点和发展趋势。

知识图谱可显示学科知识的发展进程与结构关系,是文献研究的一种新方式。绘制知识图谱的软件主要包括 CiteSpace、VOSviewer 和 R-Bibliometrix,其中 CiteSpace 不仅可以对研究机构、作者和关键词进行可视化分析,还能对 WOS 样本中的参考文献进行被引分析,已成功运用于矿床地质、海洋地质、岩溶地质和地质灾害等多个地学领域(郭永丽等, 2020; 刘娅楠等, 2021; 贺炬翔等, 2023; 张铎等, 2024)。

因此,本文利用 CiteSpace 对 Web of Science 核心数据库和维普数据库 1991—2024 年期间 U-Pb 微区原位定年分析的相关文献进行可视化分析,并绘制知识图谱,分析该领域的研究现状,探究其前沿热点和未来发展趋势,以期为该领域后续研究提供参考。

1 文献样本与可视化分析

1.1 文献样本

用于知识图谱可视化分析的英文文献数据样本选自 Web of Science 核心数据库,中文文献数

据样本选自维普数据库,文献发表时间为 1991—2024 年,经搜索和除重处理,共获得 20469 篇文献样本,具体统计情况见表 1。

1.2 可视化分析

CiteSpace 是一款基于 Java 应用程序,以不同节点(机构、作者、关键词和参考文献等)识别文献并将计算结果可视化的文献计量学软件,有助于研究者快速了解研究领域现状、前沿热点和发展趋势,是目前绘制知识图谱的主流软件之一(陈悦等, 2009)。将除重后的文本导入软件 CiteSpace

5.7.R5, 设置时间区间与切片宽度,选择不同节点进行统计分析,即可得到对应知识图谱。这些图谱具有以下基本特征:(1)节点和对应标签的大小表征样本中该节点出现的频次,即节点与对应标签越大,出现频次越高;(2)节点的紫色外圈表征给定样本中该节点与其他节点的关联程度,即节点紫色外圈越亮,影响力越大;(3)节点的颜色变化指示该节点在某段时间内相关文献的连续变化,常呈现年轮状;(4)两个节点之间连线的颜色指示两者同时出现的记录的平均年份。

表 1 文献样本统计表
Table 1 Statistical of Literature samples

数据库	Web of Science核心数据库(WOS)	维普数据库(VIP)
搜索项目	Topic	任意字段
搜索字段	字段1: U-Pb 字段2: LA-ICP-MS OR LA-MC-ICP-MS OR SHRIMP OR Cameca OR in-situ OR EPMA	字段1: "U-Pb" + "铀-铅" 字段2: "LA-ICP-MS" + "LA-MC-ICP-MS" + "SHRIMP" + "CAMECA" + "EPMA" + "in-situ analysis" + "微区原位分析"
限制条件	时间段1991—2024年 文章类型为Article和Review	时间段1991—2023年 文章类型为文献和综述 学科限定为天文地球
搜索结果	12661条	8507条(含英文版)
除重结果	12614条	7855条(剔除英文版)

U-Pb 微区原位定年分析相关文献的时间跨度较大(1991—2024 年),庞大的数据量可较完整地展示该领域主要研究方向的发展脉络和重要节点,但也会掩盖近年来新的研究热点。同时, CiteSpace 的被引分析功能可快速锁定该领域发展过程中的重要文献,尤其是一些较少以关键词形式出现的基础理论或方法。因此,本文基于 1991—2024 年期间的文献进行可视化分析和被引分析,阐述该领域研究现状和推动发展的重要进展,并以近 5 年(2020—2024 年)文献为样本进行前沿热点分析,探讨下一步研究方向。

2 发文量与被引分析

按照 U-Pb 微区原位分析领域年度发文量,将 Web of Science 核心数据库与维普数据库共 20469 篇文献(表 1)绘制成发文量年度变化图(图 1)。整体来看,中英文文献发文量均表现出由缓慢发展到飞速增长的变化规律,拐点发生在 2002 年。

不同的是,中文文献发文量在 2018 年达到最大值后持续下降,而英文文献发文量下降推迟至 2021 年且下降趋势逐步减弱至稳定。由此,该领域的发展可大致分为 3 个阶段:起步阶段(1991—2001 年)、快速发展阶段(2002—2018 年)、稳定发展阶段(2019 年—)。

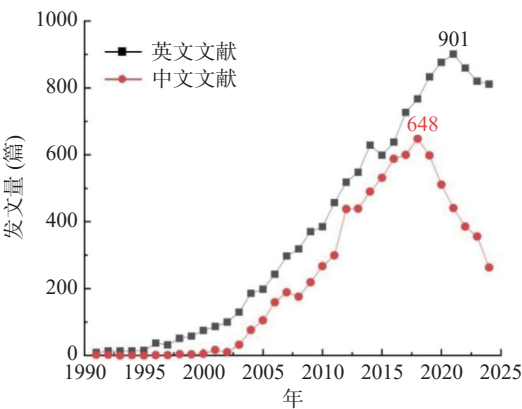


图 1 1991—2024 年 U-Pb 微区原位分析领域
发文量年度变化图

Fig. 1 Annual variation chart of publication volume in the field
of in-situ U-Pb dating from 1991 to 2024

在上述 20469 篇文献中,被引数前十的文献(表 2)包括分析技术和应用两方面,但大多与分析测试技术有关,包括标准样品、方法改进、数据处理软件,其中被引数最高的三篇文献均涉及数据处理软件,表明分析测试技术进步大大推动了地质应用的发展。

表 2 被引数前十的文献
Table 2 Top ten most cited references

被引数	作者	DOI	主要内容
332	Liu Y S et al.(2010a)	10.1093/petrology/egp082	ICPData Cal
310	Vermesch(2018)	10.1016/j.gsf.2018.04.00	IsoplotR
272	Ludwig(2012)	10.12691/JGG-5-3-3	Isoplot
182	Zhai M G and Santosh.(2011)	10.1016/j.gr.2011.02.005	华北克拉通相关综述
174	Liu Y S et al.(2008)	10.1016/j.chemgeo.2008.08.004	主微量元素分析(常与U-Pb分析共同使用)
159	Wu F Y et al.(2006)	10.1016/j.chemgeo.2006.05.003	斜锆石U-Pb年代学与锆石标准Hf同位素
151	Black et al.(2003)	10.1016/S0009-2541(03)00165-7	锆石标样TEMORA 1
151	Liu Y S et al.(2010b)	10.1007/s11434-010-3052-4	锆石U-Pb定年方法改进
144	Zhao G C and Zhai M G (2013)	10.1016/j.gr.2012.08.016	华北克拉通相关综述
136	Whitney and Evans(2010)	10.2138/am.2010.3371	矿物名称缩写汇总(常用于岩矿鉴定等U-Pb分析的前期准备工作)

注:被引数仅代表该文献在研究样本中的被引用次数,不代表实际被引用次数

3 U-Pb 微区原位分析方法研究现状

关键词是表达论文内容特征的词汇,以关键词为切入点可迅速了解领域内研究者的主要研究方向和内容。因此,选择 g-index 为样本标准(一种综合考虑文献数量与样本百分比的常用方法),设置 k=5,时间区间为 1991—2024 年,切片宽度为 1 年,将 U-Pb 微区原位分析领域内的主要关键词绘制成关键词知识图谱(图 2)。如图 2 所示,锆石 U-Pb 微区原位分析是该领域的主要研究内容,涉及到的方法主要包括离子探针质谱法(SIMS)和激光剥蚀-电感耦合等离子体质谱法(LA-ICP-MS)两种;其它富铀副矿物也具有一定的频次,如独居石、磷灰石等。由此可见,测试仪器和定年矿物是该领域发展的两个重要因素。此外,被引数最高的三篇文献均与数据处理软件有关,这也是促进该领域发展的重要成果。

3.1 测试仪器

如图 2 所示,SHRIMP 和 LA-ICP-MS 两个关键词的出现频次较高,因此,绘制二者频次年度变化图(图 3)。通过对比发现,SHRIMP 最早于 1996 年出现,并在 2002 年后使用频次迅速增加,表

明 U-Pb 微区原位分析领域早期的发展(图 1)主要依托于 SHRIMP;LA-ICP-MS 于 2005 年出现,之后的使用频次逐渐增多,2012 年超过 SHRIMP,并在 2018 年前后逐渐稳定(图 3a)或下降(图 3b),表明 U-Pb 微区原位分析领域后期的发展(图 1)主要依托于 LA-ICP-MS。整体来看,测试仪器的发展趋势(图 3)与发文量曲线(图 1)几乎一致,表明测试仪器是促进分析技术与应用发展的重要因素之一。

3.1.1 离子探针质谱仪

SHRIMP 是离子探针质谱仪(Secondary Ion Mass Spectrometry,即 SIMS)中的一种,其进行 U-Pb 同位素分析最早可追溯至上世纪八十年代,Compston et al.(1984)使用 SHRIMP 成功获得月球角砾岩中锆石 U-Pb 年龄,自此成为富铀矿物 U-Pb 微区原位分析的主流仪器之一。之后,为了提高准确度和空间分辨率先后设计出多种 SIMS,其中 CAMECA IMS 与 CAMECA NanoSIMS 两种型号仪器得到了同位素年代学研究者的更多关注与使用。

SHRIMP 的主要构成包括空心阴极双等离子体源、圆柱形 85 mm 静电场、静电四极透镜和一个均匀 72.5 mm 磁场,Compston et al.(1984)详细

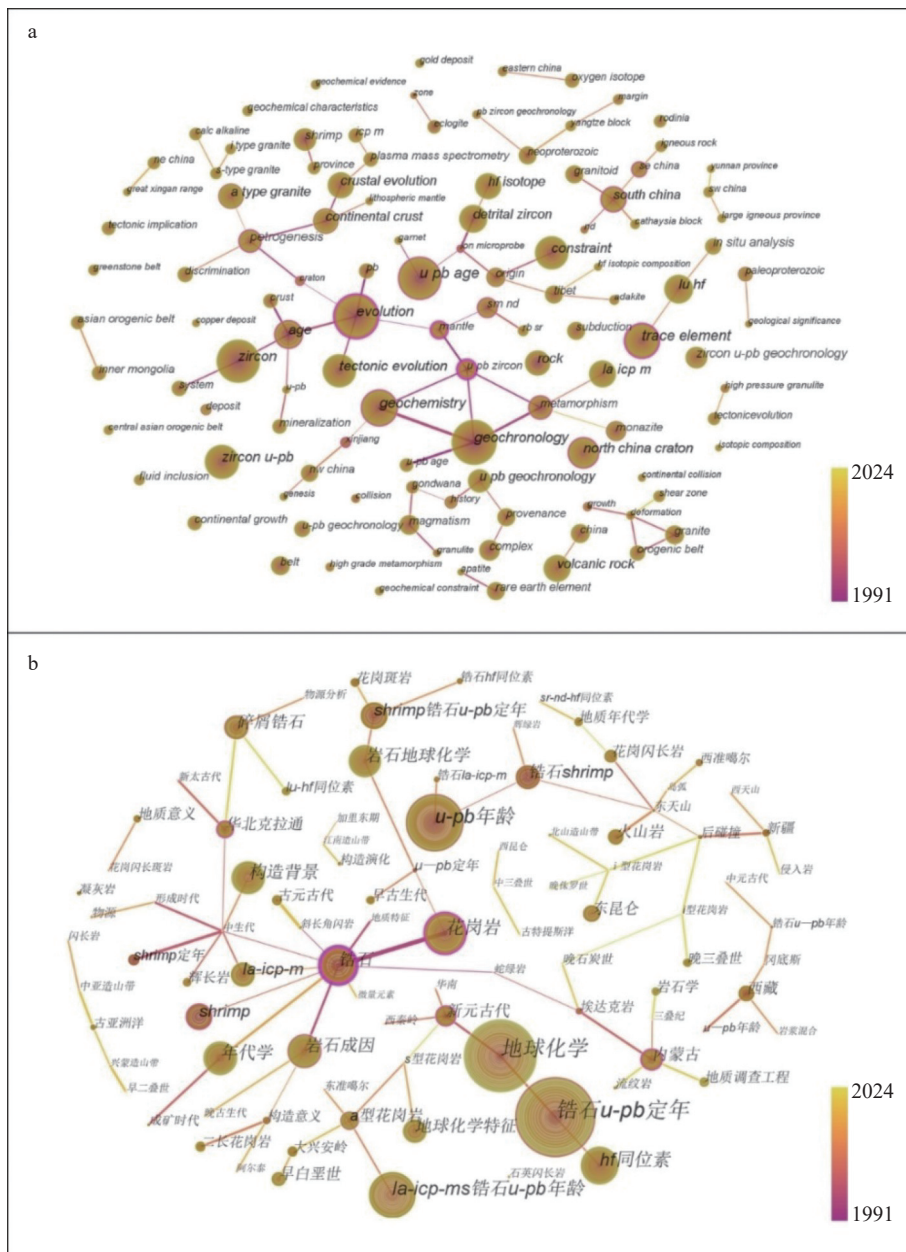


图 2 1991—2024 年关键词知识图谱

Fig. 2 Knowledge graph of keywords from 1991 to 2024

a. 英文文献; b. 中文文献

描述了该仪器的分析方法,目前仍满足 U-Pb 年代学测试需求。我国于 2002 年引进了第一台 SHRIMP,安置在中国地质科学院北京离子探针中心,大大促进了我国在该领域的发展(图 3b)。值得注意的是,SHRIMP 锆石 U-Pb 定年法一度是 U-Pb 年代学中最重要方法之一,SHRIMP 也相应成为 SIMS 的代表性仪器(图 2)。但由于 SHRIMP 实验成本较高以及新型 SIMS 的出现,如 CAMECA IMS 与 CAMECA NanoSIMS,其使

用频次于 2015 年之后有所下降(图 3)。

CAMECA IMS 与 SHRIMP 同属于大型二次离子质谱仪, 较大的磁场半径使其拥有较高的灵敏度和分辨率 (Liu Y et al., 2011)。Liu Y S et al. (2010a) 开发了一种氧驱技术, 可使斜锆石二次 Pb^{+} 离子产率提高 7 倍, 自此成为该仪器的常规操作步骤。该仪器的另一显著优势是能对剥蚀坑中心产生的离子进行空间选择性采样, 从而有效提高空间分辨率 (Schmitt et al., 2010)。与 SHRIMP

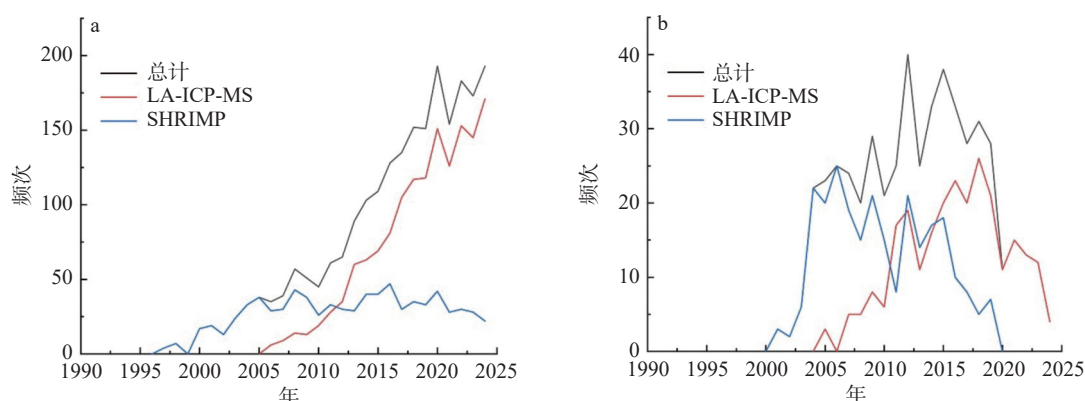


图3 1991—2024年测试仪器频次年度变化图

Fig. 3 Frequency annual variation chart of instruments from 1991 to 2024

a. 英文文献; b. 中文文献

相比, CAMECA IMS 更关注小点分析, 最高空间分辨率达到 $2 \sim 3 \mu\text{m}$, 同时保持 $1\% \sim 2\%$ 的高精度, 已成功应用于月球纯橄岩样品中磷灰石 U-Pb 定年分析 (Liu Y et al., 2020; Bhanot et al., 2024)。

CAMECA NanoSIMS 更倾向于高横向分辨率的应用, 其同轴设计极大地提高了空间分辨率, 氧离子束尺寸可缩小至 200 nm , 铯离子束尺寸可缩小至 50 nm (Yang W et al., 2015)。该仪器的优势在于独特的图像分析模式, 该模式下可同时获得锆石中微量元素分布、U-Pb 和 Pb-Pb 年龄。Hu S et al. (2016) 基于 CAMECA NanoSIMS 建立了锆石 U-Pb 图像定年法, 可计算图像中选定区域的 U-Pb 年龄, 克服了传统斑点模式分析中的 U-Pb 质量分馏效应。另外, Yang M et al. (2022) 提出采用 $^{16}\text{O}_2^-$ 作为离子源能显著提高定年精度, 尤其是地外低 Pb 样品, 如 Hao J L et al. (2024) 使用该仪器对六个来自 CE-5 玄武岩碎片的富 Zr 矿物颗粒成功进行了亚微米 Pb-Pb 定年。

CAMECA IMS 和 CAMECA NanoSIMS 在仪器灵敏度和空间分辨率两方面都具有较大优势, 目前多应用于地外样品检测, 所以出现频次并不高 (图 2)。相比之下, LA-ICP-MS 方法成本更低、速度更快且年龄精度满足大部分研究需求, 已成为更常用的测试仪器 (图 2、图 3)。

3.1.2 激光剥蚀-电感耦合等离子体质谱仪

相对于 SHRIMP, 使用激光剥蚀-电感耦合等离子体质谱仪 (Laser Ablation Ion Coupled Plasma Mass Spectrometry, 即 LA-ICP-MS) 进行 U-Pb 同

位素分析相对较晚, Fryer et al. (1993) 首次将其应用于锆石, 但在 2005 年之后才得到迅速发展 (图 3), 表明 LA-ICP-MS 自 2005 年之后逐步成熟, 并成为 U-Pb 微区原位分析的主流仪器之一。该仪器主要由激光剥蚀装置、电感耦合等离子体源和质谱仪三部分组成, 分别具有剥蚀取样、等离子体气溶胶颗粒和离子检测的功能。其仪器组成比较灵活, 改进仪器配置可有效提升仪器性能, 如 LA-MC-ICP-MS、LA-HR-ICP-MS、LA-SS-ICP-MS 等。尽管 LA-ICP-MS 开发出了多种型号, 但对 U-Pb 微区原位分析而言, 主要影响因素始终是分馏效应、空间分辨率和灵敏度。

分馏效应主要由 U 和 Pb 在样品剥蚀气化、气溶胶传输和 ICP 源内电离等过程中的差异性引起, 可通过降低激光脉冲宽度、降低激光频率、添加辅助气和浅层取样等方法降低其影响。当下主流的 ArF 准分子纳秒激光器脉冲宽度 ($10\text{--}30 \text{ ns}$) 较大, 会产生明显热效应并导致较强的元素和同位素分馏。相比之下, 飞秒激光脉冲宽度仅为 $100\text{--}500 \text{ fs}$, 热效应小 (严爽等, 2023)。降低激光频率可显著降低分馏程度, 但会导致信号不稳定从而降低分析精度, 目前已研发出了挡板式、旋风式、乌贼式、波式、线式等多种信号平滑装置来稳定仪器信号 (Hu Z C et al., 2012, 2015)。在激光剥蚀之前加入水蒸汽也可有效降低分馏效应, 这对以 NIST 610 为外标的 U-Pb 定年方法意义重大 (Luo T et al., 2018b)。此外, Corbett et al. (2020) 尝试了浅层 ($0.56 \pm 0.02 \mu\text{m}$) 取样, 在单个样品位置施加

多个 1 Hz 脉冲,显著降低了元素和同位素分馏程度。

提高 LA-ICP-MS 分析空间分辨率的两种主流方法是缩小激光尺寸和降低激光频率。其中,高度聚集的激光会降低 U 和 Pb 的离子计数,从而降低实测同位素比值精度。随着剥蚀坑深度的增加,连续的激光脉冲会引入与时间相关的同位素分异,因此降低激光频率一定程度上减弱了同位素分馏,使该技术更受青睐(Iwano et al., 2021)。Cottle et al.(2009)首次将 1 Hz 激光应用于天然锆石表面,结果表明该方法可减少样品破坏并提高空间分辨率(35 μm)。Iwano et al.(2021)使用 1 Hz 飞秒激光实现了锆石微区原位定年,将空间分辨率提升至 10 μm 。

提高 LA-ICP-MS 灵敏度主要通过改变载气(如 He)和添加辅助气体(如 O_2 、 N_2 、 H_2 和有机气体)来实现(Lin J et al., 2023)。对于 U-Pb 微区原位分析而言,常用的辅助气为 H_2 和 N_2 。与常用的载气 Ar 相比,He 具有较强的导热性和较低的粘度,这可能导致热能更快地从剥蚀点扩散出去,从而更快地结束凝聚,减小气溶胶颗粒从而提高灵敏度(Luo T et al., 2018a)。当 He 为载气时,将 4~9 mL/min H_2 混入载气中,可将 U、Th、Pb 等 47 种元素的灵敏度提高 2~4 倍(Guillong and Heinrich, 2007)。Hu Z C et al.(2008)将 5~10 mL/min N_2 加入 LA-ICP-MS 中,发现 U、Th、Pb 等 65 种元素的灵敏度提高了 2~3 倍。此外,飞秒激光剥蚀产生的气溶胶颗粒小(0.1~0.2 μm),传输速率更快,电离程度更高,也能提升仪器灵敏度(严爽等, 2023)。

综上所述, SIMS 和 LA-ICP-MS 在仪器结构、灵敏度和空间分辨率等多方面存在差异。相比之下, SIMS 年龄精度和空间分辨率更高,而 LA-ICP-MS 分析时间更短、成本更低,在实际应用中选择哪种仪器,则需综合考虑样品尺寸、U 含量和普通铅组成等多方面因素。

除上述两种质谱法之外,电子探针 X 射线显微分析仪(Electron Probe X-ray Micro-Analyzer, EPMA)也被成功应用于高 U 含量的铀矿和独居石定年分析,但要求矿物结晶时没有普通铅且结

晶后 U-Pb 体系保持封闭(唐傲等, 2017; Westin et al., 2021)。相比于质谱法, EPMA 法分析精度和灵敏度低一个数量级,年龄不确定度通常在 $\pm(20 \sim 50)$ Ma 之间,因此,该方法不适合对小于 100 Ma 的岩石进行定年(Biju-Sekhar et al., 2003)。

3.2 U-Pb 定年矿物

定年矿物的拓展是促进 U-Pb 微区原位分析领域发展的另一重要因素。绘制 1991—2024 年间英文文献中富铀矿物频次年度变化图,如图 4 所示。显然,锆石是 U-Pb 微区原位分析领域最主要的分析矿物(图 4a),其发展趋势与文献数量(图 1)、仪器频次(图 3a)几乎一致,尤其是 Liu Y S et al.(2010b)报道了 U-Pb 年龄与微量元素同时测定的分析方法,大大促进了该领域的快速发展(表 2),相关分析方法进展已有系统性总结(李献华等, 2015)。然而,在 SiO_2 不饱和或高 U 岩浆岩中,适宜定年的锆石较少,而且在变质岩、沉积岩和热液成因岩石中,锆石 U-Pb 年龄往往只能提供有限的年代学约束。因此,拓展富铀副矿物的 U-Pb 微区原位分析方法成为一种趋势,如榍石(Sun J F et al., 2012)、独居石(崔玉荣等, 2012)、磷灰石(周红英等, 2012)和石榴子石(Gaspar et al., 2008)等矿物的分析方法逐步建立并得到一定应用,相关文献累计达数百篇(Gaschnig, 2019; Stifeeva et al., 2020; Du S J et al., 2024; 梅清风等, 2024)(图 4a)。如图 4b 所示,近几年,褐帘石、碳酸盐矿物、锡石、金红石和白钨矿的相关分析方法逐渐受到研究者的关注。相对于发展了十年以上的分析方法,这几种新兴定年矿物的微区原位分析方法尚存在一些困难和不足,因此,本文仅对这几种新兴定年矿物分析方法进展进行评述。

3.2.1 褐帘石

褐帘石($\text{CaREEAl}_2\text{Fe}^{2+}\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$)是火成岩、变质岩和热液矿床中常见的副矿物。U、Th 等元素可以类质同象的形式进入褐帘石矿物晶格,其 U-Pb 体系封闭温度为 650 ± 25 $^\circ\text{C}$,是 U-Pb 定年的理想矿物(Spear and Parrish, 1996)。

Gregory et al.(2007)最早建立了 SHRIMP 和 LA-ICP-MS 褐帘石 U-Pb 微区原位分析方法,并指出前者适用于粒度较小、同位素复杂或普通铅

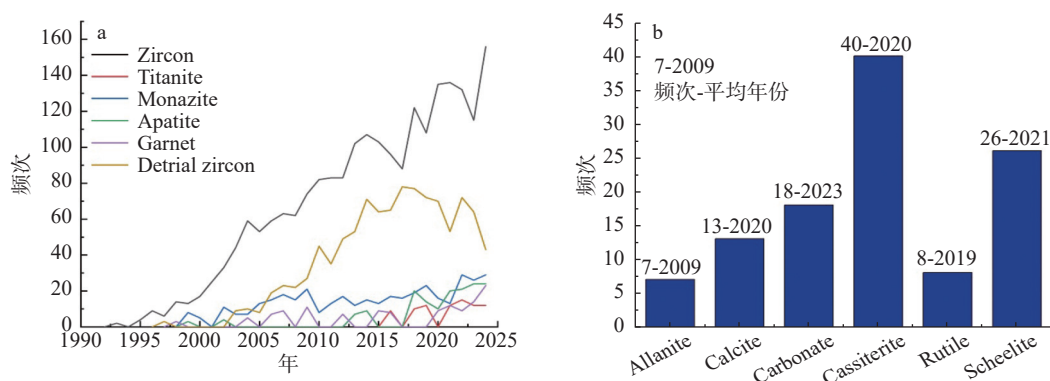


图 4 1991—2024 年英文文献中富铀矿物频次年度变化图

Fig. 4 Frequency annual variation chart of uranium-rich minerals in articles from WOS from 1991 to 2024

a. 常用矿物; b. 新兴矿物. Zircon-锆石; Titanite-榍石; Monazite-独居石; Apatite-磷灰石; Garnet-石榴子石; Detrital zircon-碎屑锆石; Allantite-褐帘石; Calcite-方解石; Carbonate-碳酸盐; Cassiterite-锡石; Rutile-金红石; Scheelite-白钨矿

含量较高的样品,后者适用于火成岩或混合岩中的样品。另外,多位学者指出褐帘石与锆石之间并不存在显著的基体效应(Zhang H X et al., 2022; Burnham et al., 2023),尽管如此,仍需开发基体匹配的褐帘石标准样品以消除基体效应。

褐帘石 U-Pb 微区原位分析方法仍存在普通铅校正的难题(Kim et al., 2009; Liao X et al., 2020)。褐帘石中普通铅含量变化较大(5%~90%以上),其校正程序复杂,是限制褐帘石年代学发展的主要因素(图 4b 中使用较少且平均年份最早)。如郭海浩等(2014)使用 ^{232}Th - ^{206}Pb - ^{208}Pb / ^{206}Pb 等时线法、Tera-Wasserburg 回归年龄分析法以及 ^{204}Pb 、 ^{207}Pb 校正法才得到准确年龄。

3.2.2 碳酸盐矿物

以方解石(CaCO_3)为主的碳酸盐矿物是沉积岩尤其是碳酸盐岩中常见的矿物,可出现在地表各种环境中。Pb 易替代 Ca 或 Mg 进入其晶格而 U 难以进入,同时碳酸盐晶格在高温下难以保持 U-Pb 体系的封闭性,可见碳酸盐并不是一种理想的 U-Pb 定年矿物(张亮亮等, 2022)。然而,由于碳酸盐在浅层构造(Nuriel et al., 2019)、油气储藏(邓宾等, 2023)和含碳酸盐地层(Alkmim et al., 2025)等中低温领域具有广阔的应用前景,仍有诸多学者对碳酸盐矿物 U-Pb 微区原位分析技术开展深入研究。

自从 Li Q et al.(2014)首次使用 LA-MC-ICP-MS 成功获得菊石化石中的方解石胶结物 U-Pb 年龄以来,以碳酸盐为 U-Pb 定年矿物的研究

相继展开,在此基础上不断改进其微区原位分析方法。目前普遍认为,采用 Jet+X 锥并添加 N_2 可有效提高仪器灵敏度,对低 U 碳酸盐标准样品($\sim 0.03 \times 10^{-6}$)也可取得与同位素稀释热电离质谱法(ID-TIMS)一致的年龄(Wu S T et al., 2022; 谢博航等, 2023)。

然而,目前关于碳酸盐矿物的 U-Pb 微区原位分析技术尚不完善,特别是其具有低 U 高 Pb 且分布不均的特征,给野外采样和室内选点工作造成极大困扰。为了解决这一难题,有学者(张亮亮等, 2022)总结了显微观察、LA-ICP-MS 预扫描和 LA-ICP-MS Mapping 成像等方法,其中结合网格法的 Mapping 成像技术有助于提高选点效率,降低实验成本。此外,碳酸盐矿物在基体效应、束斑大小、标准样品和 U-Pb 分馏校正等方面也有文献发表,但受限于碳酸盐矿物 U-Pb 分析的低成功率,进展有限(Guillong et al., 2020; Elisha et al., 2021; Lu X S et al., 2023)。

3.2.3 锡石

锡石(SnO_2)常见于砂矿或与花岗岩相关的矿床中,也是伟晶岩中常见的副矿物。其晶体结构允许 U 以类质同象的形式替代 Sn,并具有较强的抗蚀变能力和较高的 U-Pb 封闭温度(860 °C),很早就受到了年代学研究者的关注(Gulson and Jones, 1992)。

Yuan S D et al.(2011)最早使用 LA-MC-ICP-MS 对锡石标准样品 AY-4 进行 U-Pb 微区原位分析,获得了与同位素稀释热电离质谱法(ID-

TIMS)一致的年龄。该方法具有分析速度快、空间分辨率高和样品用量少等优点,已成为研究锡成矿年代学的主流方法。Carr et al.(2017)最早使用 SHRIMP 对锡石进行微区原位分析,获得了与 ID-TIMS 一致的年龄,随后 Nambaje et al.(2021)通过关闭一次质量过滤器和增大离子束尺寸,实现了低 U($<1\times 10^{-6}$)锡石的 U-Pb 定年。

目前,制约锡石 U-Pb 微区原位分析方法发展的主要难题是普通铅校正和标准样品的缺乏。锡石 ^{207}Pb 校正法多采用等时线法或 Tera-Wasserburg 图解法,具体取决于样品的数量、年龄、普通铅含量及组成;部分学者根据锡石 Th/U 较小(<0.01)的特点,提出以 ^{208}Pb 为常数来校正普通铅,可获得与 ^{207}Pb 校正一致的年龄(Neymark et al., 2018; Yang M et al., 2022)。锡石标准样品极少,AY-4 是唯一应用广泛的标准样品,建立非基体匹配方法是应对标准样品稀少的有效手段,如锆石、NIST 玻璃和金红石(Yuan S D et al., 2011; Neymark et al., 2018; 陈靖等, 2021)。

3.2.4 金红石

金红石(TiO_2)是火成岩和变质岩中常见的副矿物,也是沉积岩中最稳定的碎屑重矿物之一。其矿物成分简单、结构稳定、不易受后期地质作用的影响,U 可以类质同象的形式替代 Ti,是 U-Pb 定年的理想矿物(Zack et al., 2004)。由于 U-Pb 体系封闭温度较低($420\sim 380\text{ }^\circ\text{C}$),其主要应用于中低温热年代史研究(Zack et al., 2011)。

Storey et al.(2007)首先对榍石中的金红石包裹体进行了 U-Pb 微区原位分析,认为金红石可作为一种有力的计时器。然而,金红石中较低的 U 含量限制了其实际应用。因此, Xia X P et al.(2013)使用 LA-MC-ICP-MS 对金红石标样 R10 等开展了 U-Pb 微区原位测试,实现了对低 U 金红石($\sim 1\times 10^{-6}$)的高精度测试。另一方面, Li Q L et al.(2011)最早建立了金红石 SIMS 微区原位分析方法,随后 Schmitt and Zack(2012)提出 O_2^+ 离子源结合氧驱技术可提高空间分辨率至 $35\text{ }\mu\text{m}$ 。

金红石 U-Pb 微区原位分析方法对低 U 高 Pb 的样品仍存在一定难度。另外,小颗粒金红石的微区原位分析存在空间分辨率不足的问题,如

应元灿等(2024)对庙垭 Nb-REE 矿中的金红石样品进行测试时发现多数剥蚀信号为混合信号,有效信号仅 24 个。

3.2.5 白钨矿

白钨矿(CaWO_4)是花岗岩中常见的钨酸盐矿物,具有低 U 高 Pb 的特征,其 U-Pb 封闭温度为 $480\sim 510\text{ }^\circ\text{C}$,结晶后易受后期热液活动的影响,限制了白钨矿 U-Pb 定年技术的应用(Wintzer et al., 2022)。

Wintzer et al.(2016)最早使用 LA-ICP-MS 开展白钨矿 U-Pb 微区原位分析,该方法外标为 NIST 玻璃,存在明显的基体效应。之后, Tang Y W et al.(2022)发现白钨矿与黑钨矿之间没有明显的基体效应,提出了两种以黑钨矿为外标的 U-Pb 同位素分馏校正方法。

白钨矿 U-Pb 微区原位分析方法的主要难题是标准样品的缺乏。现有研究表明,白钨矿与锆石、NIST 玻璃之间存在明显基体效应,急需开发基体匹配的标准样品(杨明等, 2021; Tang Y W et al., 2022)。

3.2.6 其他矿物

除上述副矿物之外,磷钇矿(Liu Z C et al., 2011)和斜锆石(Li Q L et al., 2010b)也是常用的 U-Pb 定年矿物,铌钽铁矿(Che X D et al., 2019)、铀矿(Luo J C et al., 2015)、黑钨矿(Li W S et al., 2021)和氟碳铈矿(赵芝等, 2024)常用于测定对应矿床的成矿年龄。另外,石英(Liu E T et al., 2024)、符山石(Stifeeva et al., 2024)、赤铁矿(Zhou H Y et al., 2017)和钛磁铁矿(Tang Y W et al., 2024)等新的 U-Pb 定年矿物分析方法正在探索之中。

综上所述,这几种新兴定年矿物的 U-Pb 微区原位分析方法尚不成熟,其主要难题来自于以下三方面:U 含量低且分布不均、普通铅校正和标准样品的缺乏。解决上述难题,不仅要开展大量实验,还需开发高效的数据处理软件,这一点对普通铅校正尤为重要。

3.3 数据处理软件

质谱仪输出的原始数据是各分析核素的离子流强度之比,需使用数据处理软件进行多项校正并绘制出相关图解才能解读样品所记录的地质信

息。数据处理软件根据其功能大致分为两类：一类是分馏校正软件，主要包括 Glitter、ICPData Cal 和 Iolite；另一类是绘图软件，主要包括 Isoplot 和 IsoplotR(表 2)。近年来，新的软件也不断地被开发出来，如 Iso-Compass、Buster 和 Isoclock 等(李艳广等, 2015; Zhang W et al., 2020; Liu G Q et al., 2023)。

分馏校正软件采用的校正原理有所不同，Glitter 和 ICPData Cal 采用的是均值法，Iolite 采用的是指数法，Buster 采用的是截距法(李艳广等, 2015)。在实际应用中，要根据不同的元素同位素分馏行为选择合适的校正软件。绘图软件 Isoplot 和 IsoplotR 的区别在于，前者属于 Excel 的插件，对 Excel 版本有特定要求；后者支持线上线下多种模式，操作界面更简单且处于持续更新状态(Ludwig, 2012; Vermeesch, 2018)。

新开发的软件更关注传统 U-Pb 数据之外的处理功能。其中，Iso-Compass 开发了处理大量 LA-MC-ICP-MS 数据时灵活的公式编辑功能(Zhang W et al., 2020)；Buster 建立了适配斜锆石的 U-Pb 分馏校正程序(李艳广等, 2015)；Isoclock 专注于从标准样品中扣除普通铅，可同时扣除 ^{206}Pb 、 ^{207}Pb 和 ^{208}Pb 中的普通铅，从而可以进行 U-Pb 和 Th-Pb 年龄的计算(Liu G Q et al., 2023)。

综上所述，相关数据处理软件已日益成熟。然而，软件操作过程仍存在较大的主观性，限制了研究者对于已发表数据的深入研究及不同科研团队之间的数据比对与交流合作。尽管 Horstwood et al.(2016)提出了建立统一数据处理流程的建议，但受限于实际应用中种类较多的 U-Pb 定年矿物和变化范围极大的 U-Pb 数据而未能实现。近年来，随着大数据与 AI 技术的迅猛发展，特别是 AI 与软件开发相结合，研发基于 AI 的智能数据处理软件或将成功解决上述难题。

4 U-Pb 微区原位分析应用研究现状

测试仪器、定年矿物和数据处理软件等研究促进了 U-Pb 微区原位分析方法的迅速发展，从而有效推动了 U-Pb 定年技术在地球系统科学和自然资源综合地质调查中的应用。从应用角度看，

图 2 中频次较高的关键词有 A type granite 等岩石类关键词、tectonic evolution 和 continental crust 等地壳演化类关键词、mineralization 和 deposit 等矿床类关键词。由此可见，U-Pb 微区原位分析方法的应用主要集中于岩石学、地壳演化和矿床学。

4.1 岩石学

岩石学是地质学基础学科之一，尤其是岩浆岩和变质岩涉及到地球动力学和前寒武纪地质等传统科学问题，如被引频次(表 2)较高的 2 篇文献(Zhai M G and Santosh, 2011; Zhao G C and Zhai M G, 2013)都是关于岩石学方面的应用。因此，绘制岩石学相关高频关键词频次年度变化图，如图 5 所示。显然，U-Pb 微区原位分析技术主要应用于以 volcanic rock 和 granite 为代表的中酸性岩浆岩，较少应用于变质岩与沉积岩(图 5)，且各关键词发展趋势与发文量曲线(图 1)几乎一致，表明 U-Pb 定年技术在岩石学中的应用是促进该领域取得快速发展的重要因素之一。

4.1.1 岩浆岩

根据 SiO_2 含量进行划分，硅酸质岩浆岩分为超基性岩、基性岩、中性岩和酸性岩，其中锆石在中酸性岩中广泛存在，已有大量文献发表(Zhai M G and Santosh, 2011; Zhao G C and Zhai M G, 2013)，在此不作赘述。如图 2 所示，碳酸岩和伟晶岩也具有较高频次。因此，这里主要介绍 U-Pb 微区原位分析方法在超基性岩、基性岩、碳酸岩和伟晶岩四类岩浆岩中的应用。

超基性岩是指 SiO_2 含量 $<45\%$ 的一类硅酸不饱和火成岩，主要包括橄榄石辉石系列岩石和金伯利岩两类，锆石含量较低。前者 U-Pb 定年矿物包括锆石(Chen W et al., 2024)、斜锆石(Wang Y Y et al., 2020)和榍石(Li W T et al., 2024)；后者 U-Pb 定年矿物包括钙钛矿(Lehmann et al., 2010)、金红石和榍石(Agashev et al., 2016)。如 Schmitt et al.(2019)以金刚石中的金红石包裹体为测试对象，得到了与金伯利岩一致的年龄。然而，适合超基性岩 U-Pb 定年的矿物并不常见，常需要几十上百公斤样品才能挑出足够的单矿物，成功率较低且成本较高。

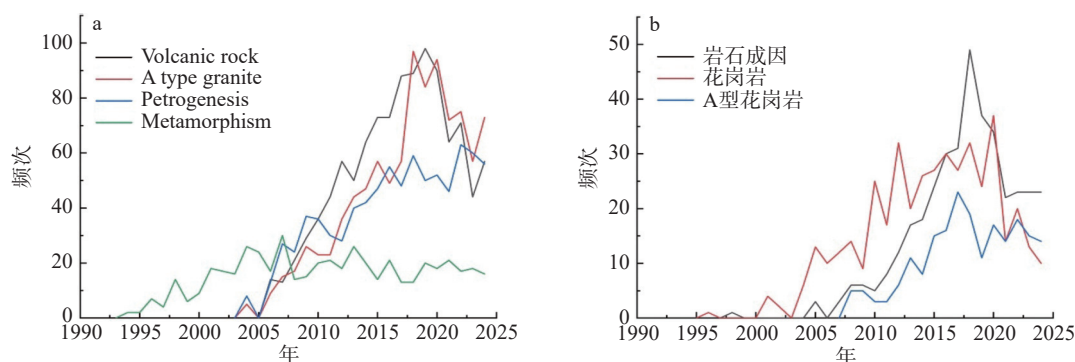


图 5 1991—2024 年文献中岩石学高频关键词频次年度变化图

Fig. 5 Frequency annual variation chart of Petrology high-frequency keywords from 1991 to 2024

a. 英文文献; b. 中文文献. Volcanic rock-火山岩; A type granite-A 型花岗岩; Petrogenesis-岩石成因; Metamorphism-变质作用

基性岩是指 SiO_2 含量在 45% ~ 53% 之间的一类火成岩,按产状分为侵入岩和喷出岩两类,锆石含量也较低。侵入岩包括辉长岩、辉绿岩、斜长岩和苏长岩,其 U-Pb 定年矿物包括锆石 (Akhtar et al., 2024) 和磷灰石 (Amraei et al., 2024)。喷出岩主要为玄武岩,其 U-Pb 定年矿物有斜锆石 (Huang L Y et al., 2024) 和榍石,如 Du S J et al. (2024) 对峨眉山大火成岩省中一类特殊的含榍石的玄武岩进行了 U-Pb 同位素分析,得到了与前人一致的火山喷发年龄。

碳酸岩是指碳酸盐矿物含量 > 50% 的一类岩浆岩,由于其常与碱性岩共生形成杂岩体,两者的年代学研究往往同时进行。碳酸岩碱性岩杂岩体的 U-Pb 定年矿物较多,包括锆石、榍石 (McLeish et al., 2020)、磷灰石 (Khan et al., 2025) 和斜锆石 (Rodionov et al., 2009)。此外,还有一类碱性岩与硅酸岩有关,可通过锆石 (万渝生等, 2004)、石榴子石 (Stifeeva et al., 2020) 和黑钨矿 (Dessouky et al., 2024) 来确定其成岩时代。

伟晶岩是由结晶粗大的矿物晶体组成的一类岩浆岩,可形成多种含 U 副矿物。由于高 U 含量下强烈的放射性衰变会破坏锆石 U-Pb 体系的封闭性,其它含 U 副矿物,如铌钽矿物、独居石、锡石和榍石等,更适合对伟晶岩开展年代学研究 (蒋少涌等, 2024)。如 Zhou M Z et al. (2023) 结合伟晶岩中独居石的 U-Pb 年龄和微量元素数据,阐明了伟晶岩与相邻花岗岩的成因联系。

4.1.2 变质岩

富铀矿物 U-Pb 微区原位分析不仅能获得变

质岩成岩年龄,其微量元素还可用来计算变质温度,能有效揭示其成岩过程的 P-T-t 轨迹。因此,这里主要介绍定年矿物 U-Pb 年代学与微量元素温度计的组合应用。

锆石不仅是常用的 U-Pb 定年矿物,其 Ti 元素含量还可用来计算结晶温度,如 Hiess et al. (2008) 使用锆石 Ti 温度计得到西格陵兰岛南部高压麻粒岩和变质英云闪长岩的结晶温度分别为 679 ± 11 °C 和 683 ± 32 °C。金红石和榍石中 Zr 的元素含量也可用来计算结晶温度 (Hayden and Watson, 2007; Hayden et al., 2008)。另外,榍石中 Ca 和 Si 是主要造岩元素,在变质过程中能对环境组分的变化保留有效的记录,如 Moser et al. (2022) 报道了巴西东南部 Brasilia 造山带 Pouso Alegre 杂岩中角闪岩相变质正长岩的原位榍石 U-Pb 年龄和微量元素数据,对该杂岩在新元古代造山过程中的 P-T-t 轨迹进行了约束。

此外,当变质岩中存在多种定年矿物时,根据不同 U-Pb 体系封闭温度的副矿物年龄之间的逻辑关系能推断变质作用的温度。如梅清风等 (2024) 对 Acasta 片麻杂岩中的锆石、榍石和磷灰石进行 U-Pb 微区原位定年分析,证明了 Wopmay 造山作用的峰期温度超过了磷灰石的 U-Pb 封闭温度,接近或者超过榍石的 U-Pb 封闭温度。

4.1.3 沉积岩

U-Pb 微区原位分析方法在沉积岩中的应用较少,主要是由于定年矿物的匮乏 (图 4、5)。目前通过 U-Pb 定年矿物确定沉积岩年龄的方法包

括碎屑矿物定年和碳酸盐矿物定年,其中碎屑锆石是限定沉积岩年龄最主要的定年矿物(图 2、4)。另外,火山碎屑岩中的定年矿物多来自岩浆岩,在此不作赘述。

碎屑矿物定年是获得碎屑沉积岩沉积年龄的主要方法之一,如碎屑锆石、碎屑金红石和碎屑磷灰石等(Gaschnig, 2019; Fairey, 2024)。例如, Gaschnig et al.(2019)对美国新英格兰 Merrimack 河沙中的碎屑独居石和碎屑金红石进行了 U-Pb 原位分析,分别得到了泥盆纪和二叠纪的沉积年龄。然而,碎屑矿物的年龄往往具有多解性,需结合 Hf-O 同位素和微量元素才能进行较好的解读,并不是一种简单高效的办法。

碳酸盐矿物 U-Pb 定年可约束碳酸盐岩沉积过程,并能够指示其成岩后的重结晶作用。如 Li Q et al.(2014)从英国 Toarcian 最上层 Bifrons 带两种菊石的方解石胶结物中分别获得了 164.9 ± 5.3 Ma 和 166.7 ± 4.8 Ma 的沉积年龄。然而,方解石的多源性、易改造性和低 U 特征限制了其实际应用。此外,该方法的分析对象还包括鱼牙、化石等生物材料(贺湘锋等, 2024),是获得深海粘土和古生物相关地层年龄的重要载体。

综上所述,富铀矿物 U-Pb 微区原位分析方法已广泛应用于岩浆岩、沉积岩和变质岩。其中,定年矿物的拓展,如斜锆石、榍石、方解石等,为研究超基性岩、基性岩、碳酸岩、伟晶岩、变质岩、碎屑岩和碳酸盐岩成岩过程提供了有力的年代学工具;结合其 U-Pb 年龄与微量元素信息,能有效还原变质岩热年代史。

4.2 地壳演化

从 evolution 和 tectonic evolution 等高影响力关键词(图 2)可以看出,地壳演化是 U-Pb 微区原位定年技术应用的另一重要研究方向。因此,绘制地壳演化相关高频关键词频次年度变化图,如图 6 所示。其中, evolution、tectonic evolution 和 continental crust 出现时间均较早, North China craton 和 South China 较晚;而中文文献中相关关键词较少,且相关研究开展较晚(图 6)。其中,我国学者多围绕华北克拉通开展地壳演化研究(Zhai M G and Santosh, 2011; Zhao G C and Zhai

M G, 2013)。总体来看,这些关键词主要与构造演化和克拉通有关,如被引频次较高的 2 篇文献(Zhai M G and Santosh, 2011; Zhao G C and Zhai M G, 2013)都是华北克拉通的相关应用(表 2)。另外,年轻的地壳运动,如秦岭、特提斯洋、中亚造山带等关键词在图 2b 中也有一定频次。因此,这里主要介绍近几年 U-Pb 微区原位分析技术在构造演化、克拉通演化和年轻的地壳运动三个方面的应用。

构造演化首先关注的是地壳生长,在相关研究中,锆石是唯一被用来进行 U-Pb 同位素分析的矿物,而且往往还会进行 Lu-Hf 微区原位分析。结合 Tang M et al.(2021)提出的一种根据 Eu 异常分选变异性重构地壳厚度的方法和微量元素数据,可从样品中同时获得 U-Pb 年龄、地壳厚度和物质来源信息(ϵ_{Hf}),从而对地壳生长进行定量描述。现有研究认为,地壳先后经历了新太古代早期的主生长期和 2.5 ~ 2.4 Ga、2.2 ~ 2.0 Ga 两次小的生长期,随后地幔柱与板块运动主导了地壳演化(Hu Y et al., 2023)。

图 2 中频次较高的克拉通包括华北克拉通和扬子克拉通(图 2、图 6)。华北克拉通演化研究的重点是其形成过程,目前普遍认为:~1.95 Ga 前鄂尔多斯地块与阴山地块碰撞形成孔兹岩带,~1.9 Ga 前龙岗地块与南林地块碰撞形成胶辽冀带,~1.85 Ga 前东西地块碰撞形成跨华北造山带,自此形成了华北克拉通的基本格局(Zhai M G and Santosh, 2011; Zhao G C and Zhai M G, 2013),相关学者对华北克拉通多处 A 型花岗岩中的锆石进行微区原位分析,得到了与前人一致的 U-Pb 年龄(Zou L et al., 2024; 王金芳等, 2024)。另外,华北克拉通与秦岭造山带、中亚造山带等年轻的地壳运动存在紧密的联系,也是其演化研究中的重要方向(Ying Y C et al., 2024)。同时,近期有学者(邱啸飞等, 2024)利用锆石 U-Pb 微区定年技术在大别山木子店地区发现了一套距今约 3.6 ~ 3.9 Ga 的花岗片麻岩、斜长角闪岩组合。其中,3.9 Ga 花岗片麻岩是目前欧亚大陆已发现的最古老岩石,结合其源区研究,为扬子克拉通的形成演化提供了新的证据。

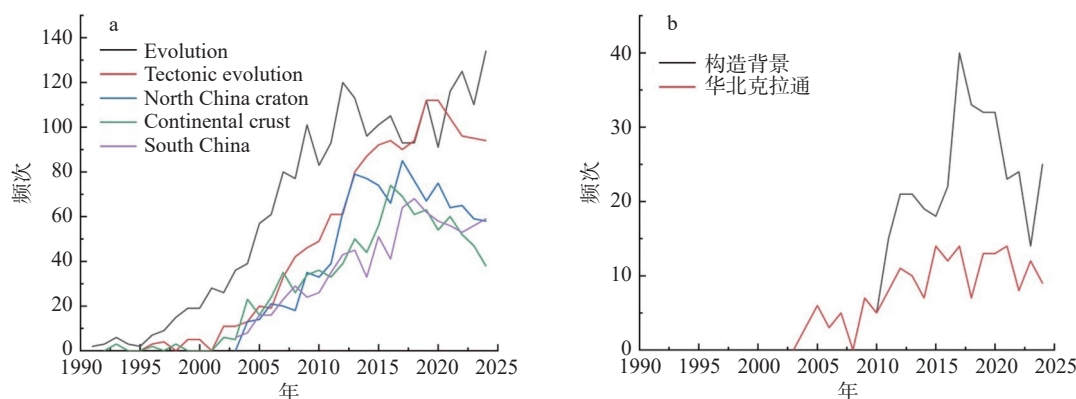


图 6 1991—2024 年文献中地壳演化相关高频关键词频次年度变化图

Fig. 6 Frequency annual variation chart of high-frequency keywords related to crustal evolution from 1991 to 2024

a. 英文文献; b. 中文文献. Evolution-演化; Tectonic evolution-构造演化; North China craton-华北克拉通;
Continent crust-大陆地壳; South China-华南

在年轻的地壳活动中,独居石、榍石、金红石和石榴子石等矿物也可提供有意义的地质年龄,已成功应用于 Gondwana 超大陆聚合 (Ferreira et al., 2025)、俯冲带 (Zhang W X et al., 2025) 和碰撞造山带 (Zhou K et al., 2024) 等研究方向。

4.3 矿床学

与其他学科不同,矿床学研究更复杂,其关键词涉及岩石、构造、矿石、矿床类型等多个层面,高频关键词仅 mineralization 和 deposit,如图 7 所示。与图 5、6 不同,矿床学关键词虽也表现出由缓慢到迅速的发展趋势,但其拐点在 2015 年,与发文量曲线 (图 1) 和测试仪器发展趋势 (图 3) 均不一致,推测与新兴定年矿物,特别是一些矿石矿物 (白钨矿、锡石等) 的 U-Pb 定年方法发展 (平均年份在 2020 年前后) (图 4b) 有关。

这些定年矿物可分为两类:一类是矿石矿物,如白钨矿、黑钨矿和锡石,其 U-Pb 年龄代表成矿年龄;另一类是脉石矿物,如锆石、榍石、独居石、金红石和磷灰石,能约束成矿时代并反映后期热液活动事件。此外,对于岩体即矿体的矿床,其成矿年龄与成岩年龄一致,在此不作赘述。

白钨矿、黑钨矿和锡石 U-Pb 微区原位分析方法主要应用于钨锡多金属矿床,已成功运用于川口钨矿 (Li W S et al., 2021)、朱溪钨矿 (Zhao Q Q et al., 2023)、南阳天钨矿 (Zhao X Y et al., 2024) 和大义山藤山坳锡矿 (Zhang Z Z et al., 2021)。铌

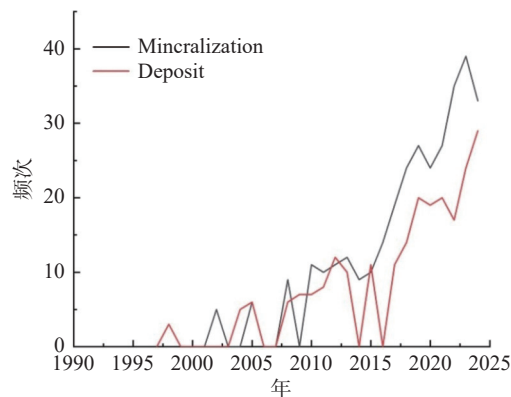


图 7 1991—2024 年度文献中 mineralization 和 deposit 频次年度变化图

Fig. 7 Frequency annual variation chart of mineralization and deposit from 1991 to 2024

钽矿物 (Che X D et al., 2019)、氟碳铈矿 (赵芝等, 2024) 和铀矿 (Luo J C et al., 2015) 的 U-Pb 年龄分别代表铌钽矿、稀土矿和铀矿成矿年龄。此外,金红石等热液矿物可富集矿种元素至矿石品位,其年龄也可代表成矿年龄 (应元灿等, 2024)。

锆石、榍石、独居石、金红石和磷灰石作为脉石矿物时,其 U-Pb 年龄可约束成矿时代。同时,这些矿物的微量元素信息可指示矿种元素的活化、迁移、转化和沉淀机制,为还原成矿过程提供地球化学证据。如 Zhang Y et al. (2023) 选取泰山群山草峪组 BIF 型铁矿围岩中的碎屑锆石和花岗岩中的岩浆锆石进行 U-Pb 分析,限定其沉积年龄在 ~2.50 Ga。然而,由于后期热液活动的扰动,定

年矿物往往难以保持 U-Pb 体系封闭,导致各矿物的 U-Pb 年龄不一致。

方解石和白云石是油气资源的定年矿物,结合 U-Pb 年龄和流体包裹体分析可约束成岩作用和油气成藏时间(邓宾等, 2023)。另外,与之相关的矿床还有砂岩型铀矿(Yang D G et al., 2024)和汞矿(Ge X et al., 2024),矿石中方解石结核的 U-Pb 年龄可指示其成矿年龄。

综上所述,多种 U-Pb 定年矿物同时使用,并结合其他同位素体系(如 Lu-Hf)和微量元素数据的研究方法已成为应用研究中的主流手段。然而,在碎屑沉积岩和部分矿床的年代学研究中,仍无法获得直接的成岩或成矿年龄。同时,由于后期地质作用的干扰,不同定年矿物的 U-Pb 年龄可能会不一致。若要解决上述问题,不仅要开发新的 U-Pb 定年矿物,还要对定年矿物的成因和来源进行精准约束。

5 前沿热点分析

关键词突现是指短时间内关键词频次显著增加的现象,通过关键词突现分析可以帮助研究者迅速了解前沿热点。因此,以图 2 为基础,保持默认设置不变,绘制关键词突现知识图谱,如图 8 所

示。按时间顺序排列,前 21 位英文关键词在 2010 年前后突现强度骤减,不再受到较大的关注,新突现的关键词 fluid inclusion、trace element composition 和 LA-ICP-MS 均出现于 2020 年之后;中文关键词的突现起始时间要晚,持续时间更短,但新突现的关键词数量更多且主要出现于 2020 年之后(图 8)。因此,为了更精准地把握前沿热点,调整时间区间为 2020—2024,切片宽度为 1 年,提高 k 值至 20,将 U-Pb 微区原位分析领域内的主要关键词绘制成近 5 年关键词知识图谱(图 9)。

与图 2 相比,近 5 年领域内相关文献明显更关注 U-Pb 定年矿物的拓展,apatite、monazite、titanite 和 garnet 等关键词的出现,表明这些定年矿物的微区原位分析方法已成功建立并取得了一定成果(图 4、图 9)。同时,中文文献中也相应地出现了锡石和石榴子石(图 9b)。从应用角度来看,英文文献中 craton、block、region 和 orogen 等区域性研究的关键词出现频率(节点相对大小)有所上升(图 9a),与图 8b 所展示的北山造山带、中亚造山带等表现一致;中文文献中花岗岩、岩石成因等基础性研究的关键词仍占有很大的比例(图 9b)。另外,mineralization 和 deposit 等矿床类关键词出现频率也有所上升(图 9a)。

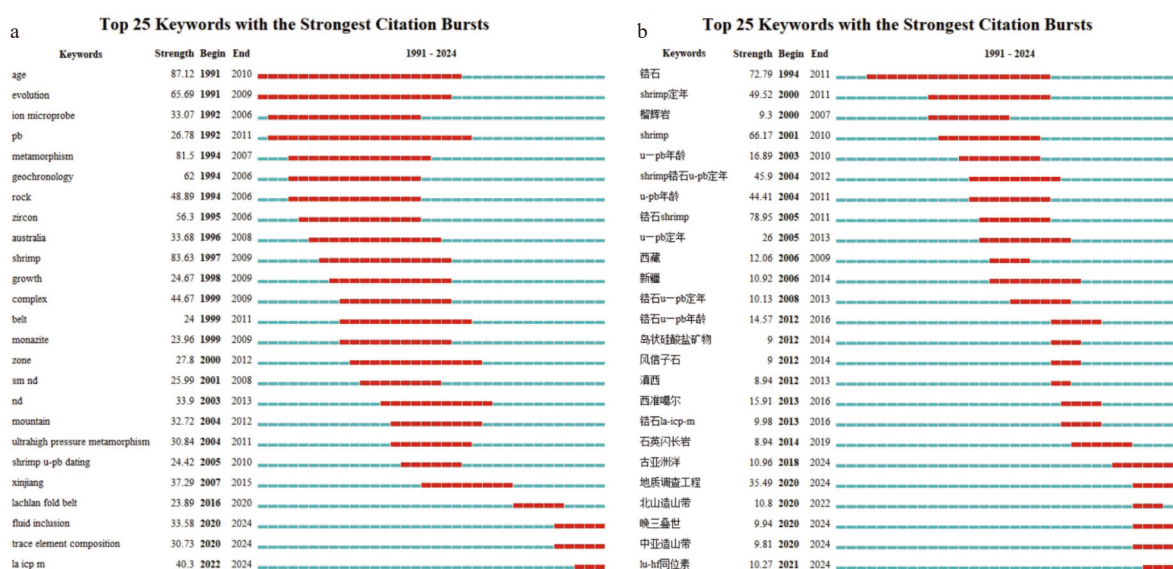


图 8 1991—2024 年文献中关键词突现知识图谱

Fig. 8 Burstness knowledge graph of keywords from 1991 to 2024

a. 英文文献; b. 中文文献

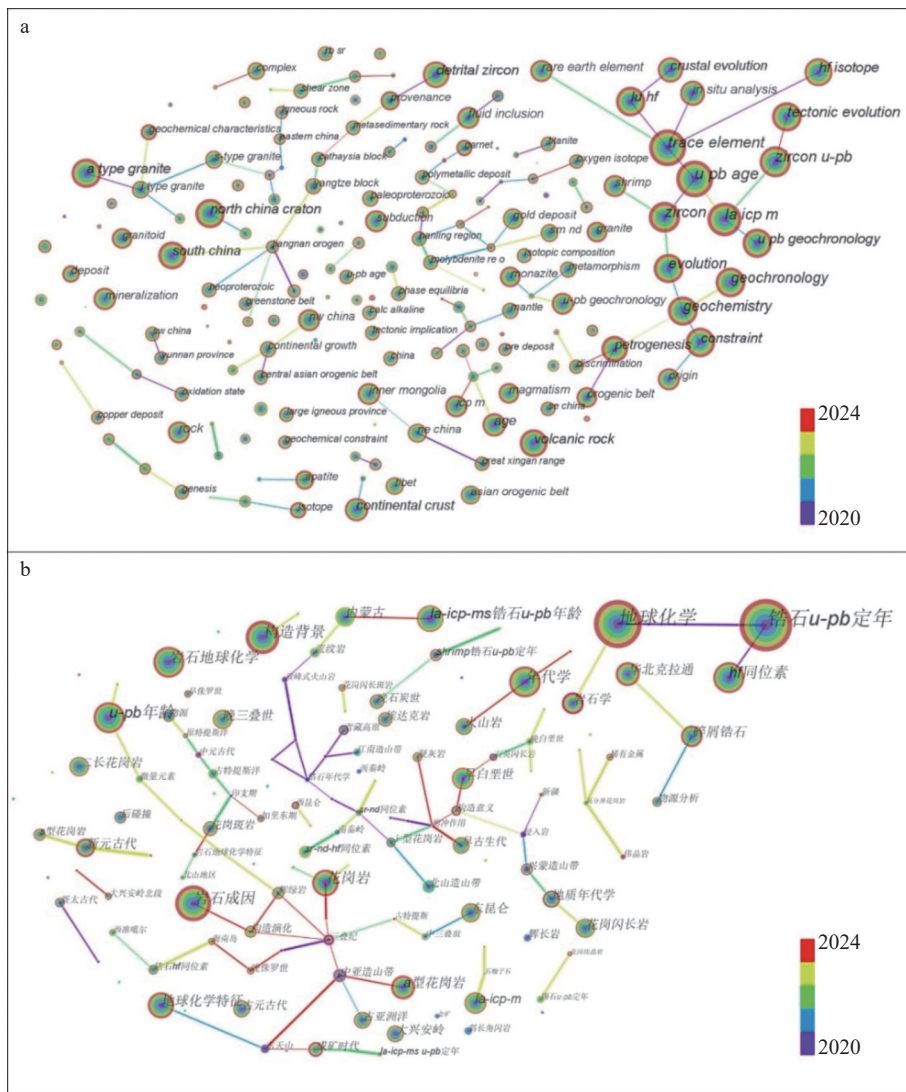


图9 近5年(2020—2024年)关键词知识图谱

Fig. 9 Knowledge graph of keywords from 2020 to 2024

a. 英文文献; b. 中文文献

6 总结与展望

使用 CiteSpace 对 1991—2024 年间 U-Pb 微区原位分析领域内的中英文文献进行了被引分析、可视化分析和前沿热点分析。结果表明,该领域的发展主要取决于测试仪器、定年矿物拓展和数据处理软件三方面的进步。近五年来,主要着重于富铀副矿物 U-Pb 微区原位分析方法的完善及其拓展应用,如楣石、磷灰石等,弥补了岩石学、地壳演化和矿床学等领域的部分年代学空白,形成了 U-Pb 定年矿物、Lu-Hf 同位素和微量元素数据等组合应用的趋势,并推动了 craton、block、

region 和 orogen 等相关的区域性研究。

结合该领域研究现状和发展趋势,本文提出下一步主要研究方向:

- (1)提高测试仪器的灵敏度、分析精度和空间分辨率,应用飞秒激光和缩小一次离子束等技术或将成为仪器分析改进的重要方向。
- (2)研发高效的 U-Pb 预扫描技术,并深入研究 U 和 Pb 在定年矿物中的赋存状态,完善低 U 矿物的微区原位分析方法,结合网格法的 Mapping 成像技术将有效提高富铀副矿物 U-Pb 定年成功率。
- (3)研制不同组成、不同年龄的标准物质,或建立非基体匹配方法,可能是解决某些定年矿物

标准样品稀缺的有效手段。

(4)建立新矿物的 U-Pb 微区原位分析方法,尤其是碎屑沉积岩与矿床中的矿物,进一步拓展其应用领域。

(5)研发基于 AI 的智能数据处理软件,避免数据处理过程中的主观影响。

参考文献:

- 陈靖,侯可军,王倩,袁顺达,陈岳龙.2021.非基体匹配分馏校正的 LA-ICP-MS 锡石微区 U-Pb 定年方法研究[J].岩石学报,37(3):943-955.
- 陈悦,侯剑华,梁永霞.2009.CiteSpace II:科学文献中新趋势与新动态的识别与可视化[J].情报学报,28(3):401-421.
- 崔玉荣,周红英,耿建珍,李怀坤,李惠民.2012.LA-MC-ICP-MS 独居石微区原位 U-Pb 同位素年龄测定[J].地球学报,33(6):865-876.
- 邓宾,吴绢,李文正,鲁鹏达,田腾振,姜华,杨荣军,王恒,刘树根.2023.烃类包裹体赋存碳酸盐矿物 U-Pb 定年及其在油气成藏期次研究中的应用——以川中震旦系灯影组为例[J].天然气地球科学,34(11):1877-1898.
- 郭海浩,肖益林,谷湘平,黄建,侯振辉,刘海洋.2014.广东新丰稀土花岗岩中褐帘石 LA-ICP-MS 的 U-Th-Pb 定年研究[J].地质学报,88(6):1025-1037.
- 郭永丽,章程,吴庆,全洗强.2020.基于文献计量学分析岩溶水文地质学研究热点[J].中国岩溶,39(6):817-828.
- 贺炬翔,张前龙,许娅婷,刘永强,王维曦,周永章,虞鹏鹏.2023.钦杭成矿带研究进展——基于 CiteSpace 社区发现结果分析[J].地质论评,69(5):1919-1927.
- 贺湘锋,刘建兴,毕东杰,高建华,石学法.2024.深海黏土定年研究进展[J].海洋地质与第四纪地质,44(2):183-198.
- 蒋少涌,张浩翔,刘思祺,李雯恬,尹燕梁,车玉滢,苏慧敏.2024.伟晶岩中不同副矿物 U-Pb 同位素定年和示踪的问题与应用[J].地质学报,98(5):1573-1599.
- 李献华,柳小明,刘勇胜,苏犁,孙卫东,Huang HuiQing,Yi Keewook.2015.LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年的准确度:多实验室对比分析[J].中国科学:地球科学,45(9):1294-1303.
- 李艳广,汪双双,刘民武,孟恩,魏小燕,赵慧博,靳梦琪.2015.斜锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年方法及应用[J].地质学报,89(12):2400-2418.
- 刘娅楠,刘森,贾超,胡邦奇,宋维宇,杨帆.2021.基于文献计

量学的深远海地质研究分析与展望[J].海洋地质前沿,37(12):88-95.

梅清风,杨进辉,孙金凤,李秋立,吴石头,凌潇潇,彭澎,王浩.2024. Acasta 片麻杂岩多期次热事件:来自锆石、榍石和磷灰石的原位微区年代学证据[J].中国科学:地球科学,54(3):693-707.

邱啸飞,彭练红,孔令耀,邓新,王达,陈伟雄,吴年文,童喜润,田洋,牛志军.2024.北大别构造带始太古代片麻岩的发现[J].地球科学,49(11):3960-3970.

唐傲,李光来,苏晔,郭国林,韦星林,刘朕语,陈光旭.2017.赣中紫云山花岗岩晶质铀矿的电子探针 U-Th-Pb 化学定年[J].地球科学,42(3):378-388.

万渝生,罗照华,李莉.2004.3.8 Ma:青藏高原年轻碱性玄武岩锆石离子探针 U-Pb 年龄测定[J].地球化学,33(5):442-446.

王金芳,宋宇桐,李康硕,陆泽芊,刘辰雨,李英杰,陈公正.2024.冀北古元古代东瓦窑杂岩体的发现及其对华北克拉通伸展事件的制约[J].地质通报,43(1):46-60.

谢博航,吴石头,杨岳衡,王浩,赵子福,黄超,谢烈文.2023.LA-MC-ICP-MS 方解石 U-Pb 定年技术[J].岩石学报,39(1):236-248.

严爽,高振丽,杨武斌,屈潘,李宁波.2023.飞秒激光-电感耦合等离子体质谱联用系统及固体地球科学应用[J].地球化学,52(4):531-546.

杨明,王浩,吴石头,杨岳衡.2021.钨矿床地球化学研究进展:以黑钨矿 U-Pb、Sm-Nd、Lu-Hf 同位素年代学与微量元素为例[J].高校地质学报,27(3):249-263.

应元灿,陈唯,柳加俊,杨帆,蒋少涌.2024.湖北庙垭碱性杂岩体中钨成矿作用:来自金红石矿物学和年代学的制约[J].高校地质学报,30(3):345-361.

张铎,冯东梅,王来贵,夏郡.2024.中外地质灾害风险评价研究文献综述[J].防灾减灾学报,40(1):85-94.

张亮亮,朱弟成,谢锦程,王青,鲁瑶,徐若炎,齐宁远.2022.碳酸盐矿物激光原位 U-Pb 定年:进展与展望[J].矿物岩石地球化学通报,41(6):1120-1134.

赵芝,王登红,王伟,刘善宝,吕秉廷,何斌,班西雨.2024.四川大陆槽稀土矿床粗粒氟碳铈矿的发现及对找矿的指示意义[J].矿床地质,43(6):1380-1389.

周红英,耿建珍,崔玉荣,李怀坤,李惠民.2012.磷灰石微区原位 LA-MC-ICP-MS U-Pb 同位素定年[J].地球学报,33(6):857-864.

Agashev A M, Orihashi Y, Pokhilenko N P, Serov I V, Tolstov A V, Nakai S. 2016. Age of Mirny field kimber-

- lites (Siberia) and application of rutile and titanite for U-Pb dating of kimberlite emplacement by LA-ICP-MS[J]. *Geochemical Journal*, 50: 431-438.
- Akhtar S, Santosh M, Gao P, Yang C X, Saikia A. 2024. Geochemistry and zircon U-Pb geochronology of diabase, gabbros, anorthosites and ultramafic rocks from the South Andaman Island ophiolite suite on the South-Eastern margin of the Indian plate[J]. *Lithos*, 482-483: 107711.
- Alkmim F F, Lana C C, Silva M A L, Dias-Filho D C, Mendonça K R N, Zambonato E E, De Carvalho B R B M. 2025. U-Pb ages of pre- to post-salt carbonates, Santos and Campos basins, SE Brazil: Implications for the evolution of the South Atlantic[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 171: 107192.
- Amraei S, Yazdi M, Qiu L, Wu C Z, Chen L, Moine B, Ghasemi Siani M, Zhang Q H, Rajabpour S. 2024. Apatite U-Pb geochronology and whole rock, Sr-Nd-Pb isotopic geochemistry of XV mafic - ultramafic intrusion, Bafq, Central Iran: Implications for petrogenesis and tectonic setting[J]. *Island Arc*, 33: e12514.
- Bhanot K K, Downes H, Rider - Stokes B G, Jennings, E S, Anand M, Snape J F, Whitehouse M J. 2024. A reappraisal of the petrogenesis of Apollo 17 lunar dunites 72415 - 72417: Relics of the deep lunar mantle? [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 59: 3129-3149.
- Biju-Sekhar S, Yokoyama K, Pandit M K, Okudaira T, Yoshida M, Santosh M. 2003. Late Paleoproterozoic magmatism in Delhi Fold Belt, NW India and its implication: evidence from EPMA chemical ages of zircons[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 22: 189-207.
- Black L P, Kamo S L, Allen C M, Aleinikoff J N, Davis D W, Korsch R J, Foudoulis C. 2003. TEMORA 1: a new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology[J]. *Chemical Geology*, 200: 155-170.
- Burnham A D, Chandler R, Amelin Y, Mavrogenes J. 2023. Allanite geochronology in the Mount Isa Inlier [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2291514.
- Carr P A, Norman M D, Bennett V C. 2017. Assessment of crystallographic orientation effects on secondary ion mass spectrometry (SIMS) analysis of cassiterite[J]. *Chemical Geology*, 467: 122-133.
- Che X D, Wang R C, Wu F Y, Zhu Z Y, Zhang W L, Hu H, Xie L, Lu J J, Zhang D. 2019. Episodic Nb-Ta mineralisation in South China: Constraints from in situ LA-ICP-MS columbite-tantalite U-Pb dating[J]. *Ore Geology Reviews*, 105: 71-85.
- Chen W, Chen L M, Yu S Y, Li D P, Kang J, Huang H L, Wu S K, Wang Z A. 2024. Geochemical and Sr-Nd isotopic implications for the petrogenesis of the late Silurian Shitoukengde mafic-ultramafic intrusion in the East Kunlun Orogen, NW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 173: 106264.
- Chew D M, Spikings R A. 2021. Apatite U-Pb Thermochronology: A Review[J]. *Minerals*, 11: 1095.
- Compston W, Williams I S, Meyer C. 1984. U - Pb geochronology of zircons from lunar breccia 73217 using a sensitive high mass - resolution ion microprobe[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89: B525-B534.
- Corbett E P, Simonetti A, Shaw P, Corcoran L, Crowley Q G, Hoare B C. 2020. Shallow sampling by multi-shot laser ablation and its application within U-Pb zircon geochronology[J]. *Chemical Geology*, 544: 119568.
- Cottle J M, Horstwood M SA, Parrish R R. 2009. A new approach to single shot laser ablation analysis and its application to in situ Pb/U geochronology[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 24: 1355.
- Dessouky O K, Li H, Ali H H, Dardier A M, Ali K A, Pirajno F, Saleh G M, Omran A A, Hassan I S, Luo Z, Hassan M M. 2024. Ediacaran anorogenic alkaline magmatism and wolframite mineralization linked to mantle plume activity in the north Arabian-Nubian Shield (Egypt)[J]. *Geochemistry*, 84: 126119.
- Du S J, Ling K Y, Luo C G, Li Y, Wen H J. 2024. Origins of titanite in the Emeishan basalts: Implications for niobium enrichment in the upper Permian Xuanwei Formation, eastern Yunnan-western Guizhou region, Southwest China[J]. *Lithos*, 476-477: 107607.
- Elisha B, Nuriel P, Kylander-Clark A, Weinberger R. 2021. Towards in situ U-Pb dating of dolomite[J]. *Geochronology*, 3: 337-349.
- Fairey B J, Kerrison A, Meere P A, Mulchrone K F, Zieger-Hofmann M, Gärtner A, Sonntag B L, Linnemann U,

- Kuiper K F, Ennis M, Mark C, Cogné N, Chew D. 2024. Sedimentary provenance of the Upper Devonian Old Red Sandstone of southern Ireland: an integrated multiproxy detrital geochronology study[J]. *Journal of the Geological Society*, 181: jgs2023-110.
- Ferreira A, Stevens G, Dantas E L, Fuck R A, Dos Santos T J S. 2025. Crustal thickening, exhumation and metamorphic cooling of Neoproterozoic eclogites in NE Brazil: Timescale for the assembly of West Gondwana[J]. *Gondwana Research*, 138: 70-88.
- Fryer B J, Jackson S E, Longerich H P. 1993. The application of laser ablation microprobe-inductively coupled plasma-mass spectrometry (LAM-ICP-MS) to in situ (U)-Pb geochronology [J]. *Chemical Geology* 109: 1-8.
- Gaschnig R M. 2019. Benefits of a multiproxy approach to detrital mineral provenance analysis: An example from the Merrimack River, New England, USA [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20: 1557-1573.
- Gaspar M, Knaack C, Meinert L D, Moretti R. 2008. REE in skarn systems: A LA-ICP-MS study of garnets from the Crown Jewel gold deposit[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72: 185-205.
- Ge X, Li S P, Zhu Y P, Cen W P, Li B, Feng Y X, Zhu G Y, Shen C B. 2024. Genetic relationship between petroleum evolution and mercury mineralization: Insights from calcite U-Pb dating, geochemical characterization, and solid bitumen TEM analysis[J]. *Chemical Geology*, 662: 122217.
- Gregory C J, Rubatto D, Allen C M, Williams I S, Hermann J, Ireland T. 2007. Allanite micro-geochronology: A LA-ICP-MS and SHRIMP U-Th-Pb study[J]. *Chemical Geology*, 245: 162-182.
- Guillong M, Heinrich C A. 2007. Sensitivity enhancement in laser ablation ICP-MS using small amounts of hydrogen in the carrier gas[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 22: 1488-1494.
- Guillong M, Wotzlav J F, Looser N, Laurent O. 2020. Evaluating the reliability of U-Pb laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS) carbonate geochronology: matrix issues and a potential calcite validation reference material[J]. *Geochronology*, 2: 155-167.
- Gulson B L, Jones M T. 1992. Cassiterite: Potential for direct dating of mineral deposits and a precise age for the Bushveld Complex granites[J]. *Geology*, 20: 355.
- Hao J L, Yang W, He H C, Zhang D, Hu S, Tian H C, Li R Y, Lin Y T. 2024. Submicron spatial resolution Pb-Pb dating for the formation age of Chang'e-5 basalt Cassiterite: Potential for direct dating of mineral deposits and a precise age for the Bushveld Complex granites [J]. *Lithos*, 468-469: 107495.
- Hayden L A, Watson E B. 2007. Rutile saturation in hydrous siliceous melts and its bearing on Ti-thermometry of quartz and zircon[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 258: 561-568.
- Hayden L A, Watson E B, Wark D A. 2008. A thermobarometer for sphene (titanite)[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 155: 529-540.
- Hiess J, Nutman A P, Bennett V C, Holden P. 2008. Ti-in-zircon thermometry applied to contrasting Archean metamorphic and igneous systems[J]. *Chemical Geology*, 247: 323-338.
- Horstwood M S A, Košler J, Gehrels G, Jackson S E, McLean N M, Paton C, Pearson N J, Sircombe K, Sylvester P, Vermeesch P, Bowring J F, Condon D J, Schoene B. 2016. Community - derived standards for LA-ICP-MS U - (Th -)Pb geochronology -uncertainty propagation, age interpretation and data reporting[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 40: 311-332.
- Hu S, Lin Y T, Yang W, Wang W, Zhang J C, Hao J L, Xing W F. 2016. NanoSIMS imaging method of zircon U-Pb dating[J]. *Science China: Earth Sciences*, 59: 2155-2164.
- Hu Y, Zhang R Y, Zhang C L, Bai H F. 2023. Tracking the formation and evolution of the Ordos Block basement, North China Craton: U-Pb age and Lu-Hf isotope record of detrital zircons from the early Mesoproterozoic sandstones[J]. *Precambrian Research*, 397: 107171.
- Hu Z C, Gao S, Liu Y S, Hu S H, Chen H H, Yuan H L. 2008. Signal enhancement in laser ablation ICP-MS by addition of nitrogen in the central channel gas[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 23: 1093.
- Hu Z C, Liu Y S, Gao S, Xiao S Q, Zhao L S, Günther D, Li M, Zhang W, Zong K Q. 2012. A "wire" signal smoothing device for laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry analysis[J]. *Spectrochimica Acta Part*

- B: Atomic Spectroscopy, 78: 50-57.
- Hu Z C, Zhang W, Liu Y S, Gao S, Li M, Zong K Q, Chen H H, Hu S H. 2015. "Wave" signal-smoothing and mercury-removing device for laser ablation quadrupole and multiple collector ICPMS analysis: Application to lead isotope analysis[J]. *Analytical Chemistry*, 87: 1152-1157.
- Huang L Y, Xu Y C, Qin L, Liu Y, Gu L X, Tian H C, Hao J L, Zhang F, Du W, Yang J, Hui H J, Yang W, Lin Y T, Zou Y L. 2024. Petrography, Crystallography, and Geochronology of Baddeleyite With Two Morphologies in a Chang'e - 5 Lunar Basalt[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 129: e2023JE007955.
- Iwano H, Hirata T, Hosoi J, Sakai H, Orihashi Y, Danhara T. 2021. Single-pulse laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry U-Pb dating of thin zircon rims: An application to metamorphic rocks from Mount Everest, eastern Nepal[J]. *Chemical Geology*, 559: 119903.
- Khan A, Ullah Z, Li H, Faisal S, Rahim Y. 2025. Apatite texture, trace elements and Sr Nd isotope geochemistry of the Koga carbonatite-alkaline complex, NW Pakistan: Implications for petrogenesis and mantle source[J]. *Chemical Geology*, 676: 122611.
- Kim Y, Cheong C S, Lee Y, Williams I S. 2009. SHRIMP allanite U-Th-Pb dating of bimodal Triassic metamorphism of Neoproterozoic tonalitic gneisses, Daeijak Island, central Korea[J]. *Geosciences Journal*, 13: 305-315.
- Lehmann B, Burgess R, Frei D, Belyatsky B, Mainkar D, Rao N V C, Heaman L M. 2010. Diamondiferous kimberlites in central India synchronous with Deccan flood basalts[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 290: 142-149.
- Li Q, Parrish R R, Horstwood M S A, McArthur J M. 2014. U-Pb dating of cements in Mesozoic ammonites[J]. *Chemical Geology*, 376: 76-83.
- Li Q L, Li X H, Liu Y, Tang G Q, Yang J H, Zhu W G. 2010a. Precise U-Pb and Pb-Pb dating of Phanerozoic baddeleyite by SIMS with oxygen flooding technique[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 25: 1107.
- Li Q L, Li X H, Liu Y, Tang G Q, Yang J H, Zhu W G. 2010b. Precise U-Pb and Pb-Pb dating of Phanerozoic baddeleyite by SIMS with oxygen flooding technique[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 25: 1107-1113.
- Li Q L, Lin W, Su W, Li X H, Shi Y H, Liu Y, Tang G Q. 2011. SIMS U-Pb rutile age of low-temperature eclogites from southwestern Chinese Tianshan, NW China[J]. *Lithos*, 122: 76-86.
- Li W S, Ni P, Pan J Y, Fan M S, Chen L L, Zhang D, Wu X W, Gao Y. 2021. Constraints on the timing and genetic link of scheelite- and wolframite-bearing quartz veins in the chuankou W ore field, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 133: 104122.
- Li W T, Jiang S Y, Su, H M, Cao X N, Zhang H, Cui P L. 2024. Occurrence and enrichment of cobalt and nickel in the Yindongshan ultramafic-mafic intrusion-hosted iron deposit, western Hubei Province, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 172: 106213.
- Liao X, Li Q L, Whitehouse M J, Yang Y H, Liu Y. 2020. Allanite U-Th-Pb geochronology by ion microprobe[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 35: 489-497.
- Lin J, Yang A, Lin R, Mao J, Hu Z C, Liu Y S. 2023. Review on in situ Isotopic Analysis by LA-MC-ICP-MS[J]. *Journal of Earth Science*, 34: 1663-1691.
- Liu E T, Zhao J X, Pan S Q, Yan D T, Wang H. 2024. In-situ U-Pb dating of quartz: A preliminary study[J]. *Journal of Earth Science*, 35: 726-728.
- Liu F L, Xu Z Q, Liou J G, Song B. 2004. SHRIMP U-Pb ages of ultrahigh - pressure and retrograde metamorphism of gneisses, south - western Sulu terrane, eastern China[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 22: 315-326.
- Liu G Q, Zhao K D, Ulrich T, Chen W, Zhang D, Li Q, Zhao H D, Zhang R Q, Xia F. 2023. Isoclock: a free and novel routine for common Pb correction in U-Th-Pb data reduction of LA-ICP-MS analysis[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 38: 2007-2018.
- Liu Y, Li X H, Li Q L, Tang G Q. 2020. Breakthrough of 2 - to 3 - μm scale U-Pb zircon dating using Cameca IMS - 1280HR SIMS[J]. *Surface and Interface Analysis*, 52: 214-223.
- Liu Y, Li X H, Li Q L, Tang G Q, Yin Q Z. 2011. Precise U-Pb zircon dating at a scale of <5 micron by the CAMECA 1280 SIMS using a Gaussian illumination

- probe[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 26: 845.
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, Gao C G, Zong K Q, Wang D B. 2010a. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths [J]. *Journal of Petrology* 51: 537-571.
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, Günther D, Xu J, Gao C G, Chen H H. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 257: 34-43.
- Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, Gao C G, Gao S, Xu J, Chen H H. 2010b. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. *Chinese Science Bulletin*, 55: 1535-1546.
- Liu Z C, Wu F Y, Guo C L, Zhao Z F, Yang J H, Sun J F. 2011. In situ U-Pb dating of xenotime by laser ablation (LA)-ICP-MS[J]. *Chinese Science Bulletin*, 56: 2948-2956.
- Lu X S, Gui L L, Chen W Y, Liu S B, Wu S T, Fan J J, Liu Q, Sun J, Zhang L L, Xiao Y, Yang W X, Cao R Z. 2023. Improvement of in situ LA-ICP-MS U-Pb dating method for carbonate minerals and its application in petroleum geology[J]. *Science China: Earth Sciences*, 66: 2914-2929.
- Ludwig K R. 2012. User's manual for Isoplot 3.75: a geochronological toolkit for Microsoft Excel[J]. *Berkeley Geochronology Center Special Publication*, 5: 1-75.
- Luo J C, Hu R Z, Fayek M, Li C S, Bi X W, Abdu Y, Chen Y W. 2015. In-situ SIMS uraninite U-Pb dating and genesis of the Xianshi granite-hosted uranium deposit, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 65: 968-978.
- Luo T, Hu Z C, Zhang W, Günther D, Liu Y S, Zong K Q, Hu S H. 2018a. Reassessment of the influence of carrier gases He and Ar on signal intensities in 193 nm excimer LA-ICP-MS analysis[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 33: 1655-1663.
- Luo T, Hu Z C, Zhang W, Liu Y S, Zong K Q, Zhou L, Zhang J F, Hu S H. 2018b. Water vapor-assisted "universal" nonmatrix-matched analytical method for the in situ U-Pb dating of zircon, monazite, titanite, and xenotime by laser ablation-Inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. *Analytical Chemistry*, 90: 9016-9024.
- McLeish D F, Johnston S, Friedman R, Mortensen J. 2020. Stratigraphy and U-Pb zircon-titanite geochronology of the Aley Carbonatite Complex, Northeastern British Columbia: Evidence for Antler-Aged Orogenesis in the foreland belt of the Canadian Cordillera[J]. *Geoscience Canada*, 47: 171-186.
- Moser A C, Hacker B R, Gehrels G E, Seward G G E, Kylander-Clark A R C, Garber J M. 2022. Linking titanite U-Pb dates to coupled deformation and dissolution-reprecipitation[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 177: 42.
- Nambaje C, Williams I S, Sajeew K. 2021. SHRIMP U-Pb dating of cassiterite: Insights into the timing of Rwandan tin mineralisation and associated tectonic processes[J]. *Ore Geology Reviews*, 135: 104185.
- Neymark L A, Holm-Denoma C S, Moscati R J. 2018. In situ LA-ICPMS U-Pb dating of cassiterite without a known-age matrix-matched reference material: Examples from worldwide tin deposits spanning the Proterozoic to the Tertiary[J]. *Chemical Geology*, 483: 410-425.
- Nuriel P, Craddock J, Kylander-Clark A R C, Uysal I T, Karabacak V, Dirik R K, Hacker B R, Weinberger R. 2019. Reactivation history of the North Anatolian fault zone based on calcite age-strain analyses[J]. *Geology*, 47: 465-469.
- Rodionov N V, Belyatsky B V, Antonov A V, Presnyakov S L, Sergeev S A. 2009. Baddeleyite U-Pb SHRIMP II age determination as a tool for carbonatite massifs dating[J]. *Doklady Earth Sciences*, 428: 1166-1170.
- Schmitt A K, Chamberlain K R, Swapp S M, Harrison T M. 2010. In situ U-Pb dating of micro-baddeleyite by secondary ion mass spectrometry[J]. *Chemical Geology*, 269: 386-395.
- Schmitt A K, Zack T. 2012. High-sensitivity U-Pb rutile dating by secondary ion mass spectrometry (SIMS) with an O_2^+ primary beam[J]. *Chemical Geology*, 332-333: 65-73.
- Schmitt A K, Zack T, Kooijman E, Logvinova A M, Sobolev N V. 2019. U-Pb ages of rare rutile inclusions in diamond indicate entrapment synchronous with kimberlite formation [J]. *Lithos*, 350-351: 105251.

- Smye A J, Marsh J H, Vermeesch P, Garber J M, Stockli D F. 2018. Applications and limitations of U-Pb thermochronology to middle and lower crustal thermal histories[J]. *Chemical Geology*, 494: 1-18.
- Spear F S, Parrish R R. 1996. Petrology and Cooling Rates of the Valhalla Complex, British Columbia, Canada[J]. *Journal of Petrology*, 37: 733-765.
- Stifeeva M V, Panikorsvskii T L, Larin A M, Salnikova E B, Kotov A B, Bortnikov V V. 2024. Vesuvianite, a New U-Pb Geochronometer Mineral for Dating Ore Deposits[J]. *Doklady Earth Sciences*, 518: 1694-1699.
- Stifeeva M V, Salnikova E B, Arzamastsev A A, Kotov A B, Grozdev V Y. 2020. Calcic Garnets as a Source of Information on the Age of Ultramafic Alkaline Intrusions in the Kola Magmatic Province[J]. *Petrology*, 28: 62-72.
- Storey C D, Smith M P, Jeffries T E. 2007. In situ LA-ICP-MS U-Pb dating of metavolcanics of Norrbotten, Sweden: Records of extended geological histories in complex titanite grains[J]. *Chemical Geology*, 240: 163-181.
- Sun J F, Yang J H, Wu F Y, Xie L W, Yang Y H, Liu Z C, Li X H. 2012. In situ U-Pb dating of titanite by LA-ICPMS[J]. *Chinese Science Bulletin*, 57: 2506-2516.
- Tang M, Ji W Q, Chu X, Wu A B, Chen C. 2021. Reconstructing crustal thickness evolution from europium anomalies in detrital zircons[J]. *Geology*, 49: 76-80.
- Tang Y W, Han J J, Lan T G, Gao J F, Liu L, Xiao C H, Yang J H. 2022. Two reliable calibration methods for accurate in situ U-Pb dating of scheelite[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 37: 358-368.
- Tang Y W, Liu N, Gao J F, Han J J, Bai Z J, Lan T G. 2024. Titanomagnetite, a new potential geochronometer for in situ U-Pb dating[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 39: 3017-3024.
- Vermeesch P. 2018. IsoplotR: A free and open toolbox for geochronology[J]. *Geoscience Frontiers*, 9: 1479-1493.
- Wang Y Y, Zeng L S, Zhao L H, Gao L E, Gao J H, Hu Z P, Wang H T, Li G X, Di Y L, Shen Y, Xu Q. 2020. Baddeleyite and zircon U-Pb ages of the ultramafic rocks in Chigu Tso area, Southeastern Tibet and their constraints on the timing of Comei Large Igneous Province[J]. *China Geology*, 3: 1-7.
- Westin A, Campos Neto M C, Hollanda M H B M, Salazar-Mora C A, Queiroga G N, Frugis G L, De Castro M P. 2021. The fast exhumation pattern of a Neoproterozoic nappe system built during West Gondwana amalgamation: Insights from thermochronology[J]. *Precambrian Research*, 355: 106115.
- Whitney D L, Evans B W. 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals[J]. *American Mineralogist*, 95: 185-187.
- Wintzer N, Gilerman V, Schmitz M. 2016. Eocene U/Pb scheelite LA-ICP-MS dates of stibnite-scheelite mineralization in the Yellow pine Au-Sb-W mining area, Central Idaho, USA [A]. Presented at the GSA annual meeting, Denver.
- Wintzer N E, Schmitz M D, Gilerman V S, Vervoort J D. 2022. U-Pb scheelite ages of tungsten and antimony mineralization in the Stibnite-Yellow Pine district, central Idaho [J]. *Economic Geology*, <https://doi.org/10.5382/econgeo.4953>.
- Wu F Y, Yang Y H, Xie L W, Yang J H, Xu P. 2006. HF isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology[J]. *Chemical Geology*, 234: 105-126.
- Wu F Y, Zhao G C, Wilde S A, Sun D Y. 2005. Nd isotopic constraints on crustal formation in the North China Craton[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24: 523-545.
- Wu S T, Yang Y H, Roberts N M W, Yang M, Wang H, Lan Z W, Xie B H, Li T Y, Xu L, Huang C, Xie L W, Yang J H, Wu F Y. 2022. In situ calcite U-Pb geochronology by high-sensitivity single-collector LA-SF-ICP-MS [J]. *Science China: Earth Sciences* 65: 1146-1160.
- Xia X P, Ren Z Y, Wei G J, Zhang L, Sun M, Wang Y J. 2013. In situ rutile U-Pb dating by laser ablation-MC-ICPMS[J]. *Geochemical Journal*, 47: 459-468.
- Yang D G, Nie F J, Xia F, Zhang L L, Tang Y W, Yan Z B, Yang Z F, Wang F M. 2024. In situ U-Pb dating of dolomite: Reliable ages for sandstone-hosted uranium deposits in the southern Songliao Basin, NE China [J]. *Ore Geology Reviews*, 174: 106331.
- Yang M, Romer R L, Yang Y H, Wu S T, Wang H, Tu J R, Zhou H Y, Xie L W, Huang C, Xu L, Yang J H, Wu F Y. 2022. U-Pb isotopic dating of cassiterite: Development of reference materials and in situ applications by LA-

- SF-ICP-MS[J]. *Chemical Geology*, 593: 120754.
- Yang W, Hu S, Zhang J C, Hao J L, Lin Y T. 2015. NanoSIMS analytical technique and its applications in earth sciences[J]. *Science China: Earth Sciences*, 58: 1758-1767.
- Yang Y N, He M H, Zhang Y Q, Xu Y G. 2022. Pb/Pb And U/Pb dating by NanoSIMS with The radio-frequency ion source using $^{16}\text{O}_2^-$ as the primary species[J]. *Atomic Spectroscopy*, 43(3): 223-229.
- Ying Y C, Chen W, Wu Y B, Jiang S Y. 2024. Microtexture, geochemistry and geochronology of monazite and zircon from the Jialu deposit in the Lesser Qinling: Implications for multi-stage magmatic and metamorphic events in the southern margin of the North China Craton[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 260: 105971.
- Yuan S D, Peng J T, Hao S, Li H M, Geng J Z, Zhang DL. 2011. In situ LA-MC-ICP-MS and ID-TIMS U-Pb geochronology of cassiterite in the giant Furong tin deposit, Hunan Province, South China: New constraints on the timing of tin-polymetallic mineralization[J]. *Ore Geology Reviews*, 43: 235-242.
- Zack T, Stockli D F, Luvizotto G L, Barth M G, Belousova E, Wolfe M R, Hinton R W. 2011. In situ U-Pb rutile dating by LA-ICP-MS: ^{208}Pb correction and prospects for geological applications[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 162: 515-530.
- Zack T, Von Eynatten H, Kronz A. 2004. Rutile geochemistry and its potential use in quantitative provenance studies[J]. *Sedimentary Geology*, 171: 37-58.
- Zhai M G, Santosh M. 2011. The early Precambrian odyssey of the North China Craton: A synoptic overview[J]. *Gondwana Research*, 20: 6-25.
- Zhang H X, Jiang S Y, Yuan F, Liu S Q. 2022. LA-(MC)-ICP-MS U-Th-Pb dating and Nd isotopes of allanite in NYF pegmatite from lesser qingling orogenic belt, central China[J]. *Ore Geology Reviews*, 145: 104893.
- Zhang W, Hu Z C, Liu Y S. 2020. Iso-Compass: new free-ware software for isotopic data reduction of LA-MC-ICP-MS[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 35: 10871096.
- Zhang W X, Zhang X, Zhou G Y, Li L, Chang H, Wu Y B. 2025. Recycling of subducted continent slab in an accretionary orogen: Insight from the Liangwan potassic granitoids in the Tongbai orogen, Central China[J]. *Lithos*, 492-493: 107868.
- Zhang Y, Yu X F, Hu Y M, Sun Y Q, Tian J X, Li X W, Li D P, Geng K, Liu Q, Wei P F. 2023. Geochemistry, U-Pb zircon geochronology, and Fe isotopes of the Shanzhuang banded iron formation in the North China Craton: Implications for genesis and depositional environment[J]. *Ore Geology Reviews*, 159: 105541.
- Zhang Z Z, Ning Y Y, Lu Y Y, Cao J Y, Fu J M, Zhao Z, Guo J, Ma L Y, Qin Z W, Li J F. 2021. Geological characteristics and metallogenic age of Tengshan'ao Sn deposit in Dayishan of South Hunan and its prospecting significance[J]. *Solid Earth Sciences*, 6: 37-49.
- Zhao G C, Wilde S A, Guo J H, Cawood P A, Sun M, Li X P. 2010. Single zircon grains record two Paleoproterozoic collisional events in the North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 177: 266-276.
- Zhao G C, Zhai M G. 2013. Lithotectonic elements of Precambrian basement in the North China Craton: Review and tectonic implications [J]. *Gondwana Research*, 23: 1207-1240.
- Zhao Q Q, Zhai D G, Hong J X, Mathur R, Wang H, Zhang H, Ouyang Y P, Liu J J. 2023. Scheelite U-Pb geochronology and trace element geochemistry fingerprint W mineralization in the giant Zhuxi W deposit, South China[J]. *American Mineralogist*, 108: 1781-1793.
- Zhao X Y, Deng M G, Li W C, Tang Y W, Zhang D C, Han S K, Song W B, Zhang Q G, Xu J W. 2024. In situ U-Pb dating of garnet, vesuvianite, and scheelite from the Nanyangtian tungsten deposit reveals an Early Cretaceous W mineralization event in Southeast Yunnan, China[J]. *Gondwana Research*, 133: 72-90.
- Zhou H Y, Sun X M, Wu Z W, Liao J L, Fu Y, Li D F, Hollings P, Liu Y, Lin H, Lin Z Y. 2017. Hematite U-Pb geochronometer: insights from monazite and hematite integrated chronology of the Yaoan gold deposit, southwest China[J]. *Economic Geology*, 112: 2023-2039.
- Zhou K, Ma H Z, Chen Y X, Wang F Y, Zhao Z F. 2024. Titanite geochemistry traces extreme differentiation of granitic magma in the collisional orogen[J]. *Lithos*, 468-469: 107515.

Zhou M Z, Zhang R Q, Hanchar J M, Xu Z Q, Lu J J, Hu H, Che X D, Zheng B H, Li G W. 2023. Unravelling the genetic relationship between pegmatites and granites in the Jiajika Li-Be polymetallic district, Songpan-Ganze Orogenic Belt, Southwestern China: Insights from monazite U-Pb geochronology and trace element geochemistry[J]. Ore Geology Reviews, 163: 105774.

Zou L, Guo J H, Zhang L F, Huang G Y, Jiao S J, Tian Z H, Liu P H. 2024. Metamorphic evolution of high-pressure and ultrahigh-temperature granulites from the Alxa Block, North China Craton: Implications for the collision and exhumation of Paleoproterozoic orogenic belts[J]. Geological Society of America Bulletin, 136: 3103-3120.

《华南地质》投稿约定

1. 所投稿件在收稿 2 个月内可得到文章是否被录用的通知,在此期间作者不得再投他刊。

2. 所投稿件如不符合本刊上述要求者,编辑部将退回稿件,作者进行修改后再行评审。本刊录用的稿件将存档保存,未录用稿件不再退还,请作者自留底稿。

3. 本刊为纸质印刷版、光盘版出版、网络出版模式,凡刊用的稿件,将同时编入《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》、《万方数据知识服务平台》及《中文科技期刊数据库》。本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文,该社著作权使用费与本刊稿酬一并支付。本刊为北京万方数据股份有限公司入选期刊,由万方数据电子出版社网络出版,并通过《万方数据知识服务平台》及其相关数据库系统提供信息服务,其作者或相关权利人

的著作权使用费由本刊负责连同稿费一并给付。如有异议,请在来稿时注明,本刊将作适当处理。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我刊上述声明。

4. 稿件文责自负,编辑部对拟定稿件有权作技术性和文字上的修改。实质性内容修改需征得作者同意。

5. 来稿一经发表,赠送 2 本样刊。

欢迎作者通过采编系统投稿。

通讯地址: 湖北省武汉市东湖新技术开发区光谷大道 69 号武汉地质调查中心《华南地质》编辑部

邮政编码: 430205

联系电话: 027-59988030; 027-59988031

E-mail: whzxhndz@mail.cgs.gov.cn

网址: <http://hndz.whcgs.cn/ch/index.aspx>