



移动阅读

曹熔, 张姝婧, 兰中伍, 2023. 火山灰锆石 U-Pb 定年在沉积岩定年上的应用[J]. 沉积与特提斯地质, 43(2): 464-474. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.04001](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.04001)

Cao R, Zhang S J, Lan Z W, 2023. Application of zircon U-Pb dating of volcanic ash to dating of sedimentary rock[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 43(2): 464-474. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.04001](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.04001)

## 火山灰锆石 U-Pb 定年在沉积岩定年上的应用

曹 熔<sup>1,2</sup>, 张姝婧<sup>3</sup>, 兰中伍<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029; 2. 中国科学院大学, 地球与行星科学学院, 101408; 3. Department of Geology, Trinity College, Dublin 999015, Ireland)

**摘要:** 本文系统总结了沉积岩定年的意义和常用的定年手段, 详细介绍了火山灰锆石 U-Pb 定年在沉积岩定年上的应用。从火山事件层的分布、火山灰夹层的识别、火山灰锆石的区分、应用实例等方面对前人的研究进行概述, 旨在为科研工作者运用火山灰锆石 U-Pb 定年提供借鉴经验。与传统的成岩矿物 K-Ar/Ar-Ar 和 Rb-Sr 定年技术相比, 火山灰锆石 U-Pb 定年在沉积岩定年上具有显著的优势。火山灰夹层具有广泛性和等时性, 且锆石 U-Pb 同位素体系不容易受到扰动, 因此火山灰锆石 U-Pb 定年是高精度沉积岩定年的首选方案。沉积岩定年涉及到野外观察、样品采集、室内岩相学观察及地质年代学分析和年龄解释等多个环节。在这些环节中, 识别火山灰夹层是最关键的一点, 也是一大难点。这需要明确火山灰夹层的岩石类型并了解火山事件沉积层的分布, 在此基础上通过野外观察和室内研究进一步判别, 这样可以更加准确地识别出火山灰夹层。此外, 火山灰锆石定年需要区分火山灰锆石、碎屑锆石、继承/捕获锆石, 可以通过矿物形态学和矿物化学特征来加以区分。

**关键词:** 火山灰; 锆石; U-Pb 年龄; 沉积岩定年

中图分类号: P533

文献标识码: A

## Application of zircon U-Pb dating of volcanic ash to dating of sedimentary rock

Cao Rong<sup>1,2</sup>, Zhang Shujing<sup>3</sup>, Lan Zhongwu<sup>1\*</sup>

(1. State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China; 3. Department of Geology, Trinity College, Dublin 999015, Ireland)

**Abstract:** This paper has summarized the significance of dating of sedimentary rock, and introduced the application of volcanic ash zircon U-Pb dating method to dating of sedimentary rocks. Specifically, it has summarized previous studies on the distribution of volcanic event layers, identification of volcanic interlayers, differentiation of volcanic tuff zircons and application examples so as to provide experience for geoscientists in the application of volcanic zircon U-Pb dating. Compared to traditional K-Ar/Ar-Ar and Rb-Sr dating techniques for diagenetic minerals, volcanic ash zircon U-Pb dating has a significant advantage in dating of sedimentary rocks. Volcanic ash interlayer is widespread and isochronous, and zircon U-Pb isotopic system is robust and not easily disturbed. Therefore, volcanic ash zircon U-Pb dating is the first choice for high precision dating of sedimentary rocks. Dating of sedimentary rocks involves field observation, sample collection, indoor petrographic observation, geochronological analysis and age interpretation. Of

收稿日期: 2023-01-29; 改回日期: 2023-03-29; 责任编辑: 曹华文; 科学编辑: 崔晓庄

作者简介: 曹熔(1999—), 女, 硕士研究生, 专业为地球化学, 研究方向为沉积岩定年。E-mail: [cr2210982897@163.com](mailto:cr2210982897@163.com)

通讯作者: 兰中伍(1981—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事前寒武纪年代地层学研究。E-mail: [lzw1981@126.com](mailto:lzw1981@126.com)

资助项目: 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室开放课题(SKL-Z202001)

these, identification of volcanic ash interlayer is the most important despite difficulty. It is necessary to clarify different types of volcanic interlayer and understand the distribution of sedimentary layers of volcanic events. Based on this, field observations and indoor study can be used to further distinguish volcanic interlayers and identify them accurately. In addition, dating of volcanic tuff zircons requires the distinction between volcanic ash zircons, detrital zircons, inherited zircons and xenocrystal zircons, which can be distinguished by mineral morphology and mineral chemistry.

**Key words:** volcanic tuff; zircon; U-Pb age; dating of sedimentary rocks

## 0 引言

沉积岩广泛出露在地球表面,由松散的碎屑物如砾石、砂、粘土、灰泥和有机质等沉积、固结而成,内部蕴含了丰富的地质信息,生物信息和环境信息,精准的年龄限定有助于反演地质历史时期地球各个圈层的变化和因果关系。同位素年代学在沉积岩定年上的应用可分为两大类,一类是直接测年,即用沉积岩全岩或者某些单矿物中的放射性同位素体系进行定年,如碎屑锆石 U-Pb 定年(Tucker et al., 2013; 李怀坤等, 2007)、自生磷钇矿/独居石 U-Pb 定年(Mcnaughton et al., 1999; Lan et al., 2013; Lan et al., 2014a)、碳酸盐岩 U-Pb 或 Pb-Pb 定年(Rasbury and Cole, 2009; Montano et al., 2021; Jahn and Cuvellier, 1994),自生伊利石 K-Ar 定年(张彦等, 2007; 吴劲薇等, 2001),自生海绿石 Ar-Ar 定年(Taylor and Curtis, 1995; Godet et al., 2011),磷酸岩 Lu-Hf (Barfod et al., 2003)和 Pb-Pb 定年(Chen et al., 2004)、黑色页岩 Re-Os 定年(Yang et al., 2021)等。另一类是间接定年,即采用火成岩、变质岩或火山灰夹层中放射性同位素体系所测得的年龄来限定沉积岩的年龄(Rasmussen, 2005)。在直接测年中,碎屑锆石只能限定沉积岩的最大沉积年龄,在没有放射性成因 Pb 丢失的前提下,其中最年轻一组碎屑锆石的年龄大于地层的理论沉积年龄(Rasmussen, 2005)。自生磷钇矿/独居石个体小(通常小于 $<15\ \mu\text{m}$ ),在光学显微镜下很难观察定位,必须借助扫描电子显微镜(SEM)在背散射光(BSE)模式下辅助能谱分析(EDS)寻找定位(Lan et al., 2014a; Zhang et al., 2022)。碳酸盐岩 U-Pb、自生伊利石 K/Ar-Ar、自生海绿石 K/Ar-Ar、黑色页岩 Re-Os、碳酸盐岩 U-Pb 同位素体系封闭温度低,容易受到后期成岩作用、热液作用和变质作用的影响而造成年龄上的不确定(杨競红等, 2005; Rasmussen, 2005; Chen et al., 2004; Lan et al., 2022, 2023)。另外,沉积岩中经常混入碎屑成因的独居

石和伊利石,对自生独居石和伊利石定年会产生干扰。在间接测年中,火成岩、变质岩只能限定沉积岩的最大或者最小沉积年龄。

相比之下,地层中夹层火山灰和上下地层近乎同时沉积,因为大规模火山喷发产生的火山灰能够在短时间内迅速沉降,进入沉积层序,形成一系列同时沉积的火山灰夹层,具有等时性和广泛性(陈宣谕等, 2014; Rasmussen, 2005; 刘嘉麒, 2018)。因此,火山灰的沉积时间可用来限定地层的沉积时间,采用火山灰夹层定年能够准确测出沉积地层的绝对年龄。火山灰定年原理与火山灰年代学原理大同小异,不同的是火山灰定年的研究对象是深时火山灰,即第四纪以前的火山灰,常以火山凝灰岩或凝灰质沉积岩的形式出现。

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  同位素体系定年是火山灰夹层定年常用的方法之一,用于定年的矿物一定要富含钾,如钾长石、黑云母、角闪石等(Hess and Lippolt, 1986; Sarna-Wojcicki et al., 2000; Aziz et al., 2008),分析方法主要有阶段加热法和真空击碎法。然而,由于定年的矿物对变质作用较为敏感,经常出现 Ar 丢失而导致年龄偏年轻,或者因过剩 Ar 的引入而导致年龄偏老,无法得到准确年龄。

锆石的物理、化学性质稳定,U 含量高,普通 Pb 含量低,U, Th, Pb 扩散速率慢,封闭温度高达 $900^\circ\text{C}$ (Lee et al., 1997)。与钾长石、黑云母、角闪石等热稳定性差的矿物相比,锆石 U-Pb 同位素体系不容易受到后期扰动,能够提供精准的 U-Pb 同位素年龄,这使得火山灰锆石 U-Pb 定年成为高精度沉积岩定年的首选方案(Schmitz and Bowring, 2001; Rasmussen, 2005)。然而,火山灰的识别和火山灰锆石的区分是火山灰锆石 U-Pb 定年的难点也是关键点。本文重点介绍火山灰的野外产出特征、岩相学和地球化学特征,以及不同类型的锆石(火山灰锆石、继承锆石和碎屑锆石)在形态学、地球化学和年龄上的区别。同时,我们选取了两个研究实例来详细阐述火山灰锆石 U-Pb 定年在沉积岩定

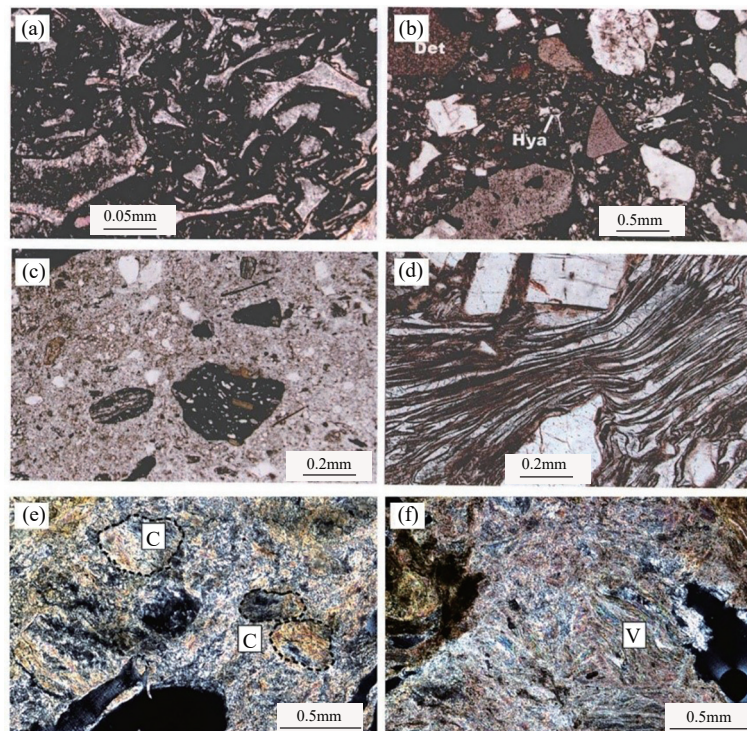
年上的应用,旨在为科研工作者运用火山灰锆石 U-Pb 定年时提供借鉴经验。

## 1 火山灰的识别

在地质历史时期,火山活动频繁发生,其喷发产物火山灰广泛分布(Courtillot and Renne, 2003; 杨经绥等, 2009; Ernst, 2014)。因此,火山灰在沉积岩定年方面得到了广泛应用。然而,火山灰在野外不易识别。这是因为火山灰经过成岩作用形成火山凝灰岩和凝灰质沉积岩,容易和泥岩、页岩等细粒碎屑沉积岩混淆。另外,火山灰不稳定、沉降后容易发生蚀变,形成高岭石、伊利石、蒙脱石等粘土矿物(冯宝华, 1992)。在酸性或弱酸性环境中倾向于形成以高岭石为主的粘土岩,在弱碱性介质中倾向于形成以伊利石或蒙脱石为主的粘土岩(Spears, 2012; 桑树勋, 1999; 冯宝华, 2005)。为此,本文详细统计了典型火山凝灰岩和凝灰质沉积岩夹层,它们具有独特的野外产出特征、岩相学和地

球化学特征,可用于对比和判别其他地区可能存在的火山凝灰岩或者凝灰质沉积岩夹层。(附表 1-5\* )。

火山凝灰岩或凝灰质沉积岩野外产出表现为岩性均一,厚度薄,单层或多层出现,没有韵律性,一般不发育层理,与上下地层呈突变接触,颜色与上下地层有明显差异,代表颜色有白色、黄色、灰色和绿色(Lan et al., 2015; Perez Loinaze et al., 2013)。据笔者野外观察,火山凝灰岩比粘土岩更加细腻光滑,颜色更加鲜艳,可以通过上下地层的颜色、光滑程度和致密程度对比加以区分。凝灰质粉砂岩比上下地层的粉砂岩硬度更低,结构更松散。室内显微镜观察可发现火山凝灰岩中含有岩屑、晶屑和玻屑,棱角分明,没有明显的磨蚀边缘,具有火山成因独特的结构(常丽华等, 2009; Liu et al., 2015)(图 1)。岩屑多为刚性,有些是塑性-半塑性的。晶屑主要有长石、石英和云母,呈不规则棱角状,部分有熔蚀现象和淬火裂纹(Pigage et al.,



a: 玻屑形态; b: 流纹质岩屑晶屑火山凝灰岩, Det 为岩屑, Hya 为玻屑; c: 安山质晶屑岩屑火山凝灰岩; d: 流纹质晶屑熔结火山凝灰岩; e-f: 未知源区火山凝灰岩, C 为晶屑, V 为玻屑。

图 1 典型火山凝灰岩显微图像 (a-d 引自常丽华等, 2009; e-f 引自 Liu et al., 2015)

Fig. 1 Microscopic images of typical tuffs showing its mineral composition (a-d from Chang et al., 2009; e-f from Liu et al., 2015).

\*数据资料联系编辑部或者登录本刊网站获取。



2012; Zhu et al., 2009; Qin et al., 2021), 标志性成因矿物有高温石英、透长石和锆石等(Schmitz and Bowring, 2001; Phillips et al., 2022)。玻屑形态多样, 塑性-半塑性, 呈现鸡骨状、浮岩状或者撕裂状等形态(于炳松等, 2012)。常见的构造有似流纹构造、斑杂构造、火山泥球构造和层理构造(Lan et al., 2015)。

本文统计了各种类型火山凝灰岩的主量元素和微量元素数据(附表 1-2\*), 并做出了 TAS( $\text{SiO}_2$ - $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ )分类图(图 2), 微量元素蛛网图和稀土元素配分模式图(图 3)。统计表明, 火山凝灰岩主要成分为  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$ (附表 1\*), U、Th 含量高, Sr 亏损(附表 2\*, 图 3a), 轻稀土元素富集和 Eu 负异常(附表 2\*, 图 3b)。根据地球化学组成的差异, 火山凝灰岩可进一步划分为超基性火山凝灰岩、基性火山凝灰岩和中-酸性火山凝灰岩(图 2)。中-酸性火山凝灰岩  $\text{SiO}_2$  和  $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$  含量相对较高,  $\text{SiO}_2$  含量通常大于 60%,  $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$  含量通常大于 3%。基性火山凝灰岩的铁族元素(V, Cr)含量比中酸性火山凝灰岩的含量高, 而 Ba 的含量却很低(附表 2\*)。基性火山凝灰岩的 V, Cr 和 Ba 含量分别为  $489\times 10^{-6}\sim 661\times 10^{-6}$ ,  $301\times 10^{-6}\sim 441\times 10^{-6}$ ,

$22.1\times 10^{-6}\sim 26.1\times 10^{-6}$ , 中酸性火山凝灰岩的 V, Cr 和 Ba 含量分别为  $6.85\times 10^{-6}\sim 69.6\times 10^{-6}$ ,  $3.61\times 10^{-6}\sim 30.5\times 10^{-6}$ ,  $242\times 10^{-6}\sim 983\times 10^{-6}$ 。

## 2 火山凝灰岩中锆石类型的区分

火山凝灰岩中的锆石定年需要正确区分火山灰锆石、继承/捕获锆石和碎屑锆石。火山灰在喷发时常携带继承/捕获锆石, 并在沉积时混入碎屑锆石, 必须要和火山灰锆石区分开来, 因为只有火山灰锆石才是火山喷发时形成的岩浆结晶锆石, 其年龄最接近沉积岩的沉积年龄。火山灰锆石通常呈现自形结晶、颗粒细小、环带明显等特点, 通常小于  $100\ \mu\text{m}$ (见图 4a)。碎屑锆石来源广泛, 可能来自岩浆岩、变质岩和再循环的沉积岩(王亚东等, 2022; 李长民, 2009; 邓奇等, 2023)。不管哪种来源的碎屑锆石, 通常都经过了一定距离的搬运和磨蚀, 呈现出磨圆状、次磨圆状或次棱角状的外部形态, 在年龄谱上显示较老的年龄(见图 4b)。磨蚀程度高的碎屑锆石, 颗粒通常细小, 通常小于  $100\ \mu\text{m}$ ; 磨蚀程度不高的碎屑锆石, 颗粒通常较大, 通常大于  $100\ \mu\text{m}$ 。继承锆石是指源区岩石部分熔融形成岩浆过程中残留的锆石, 年龄较老、颗粒普遍较大

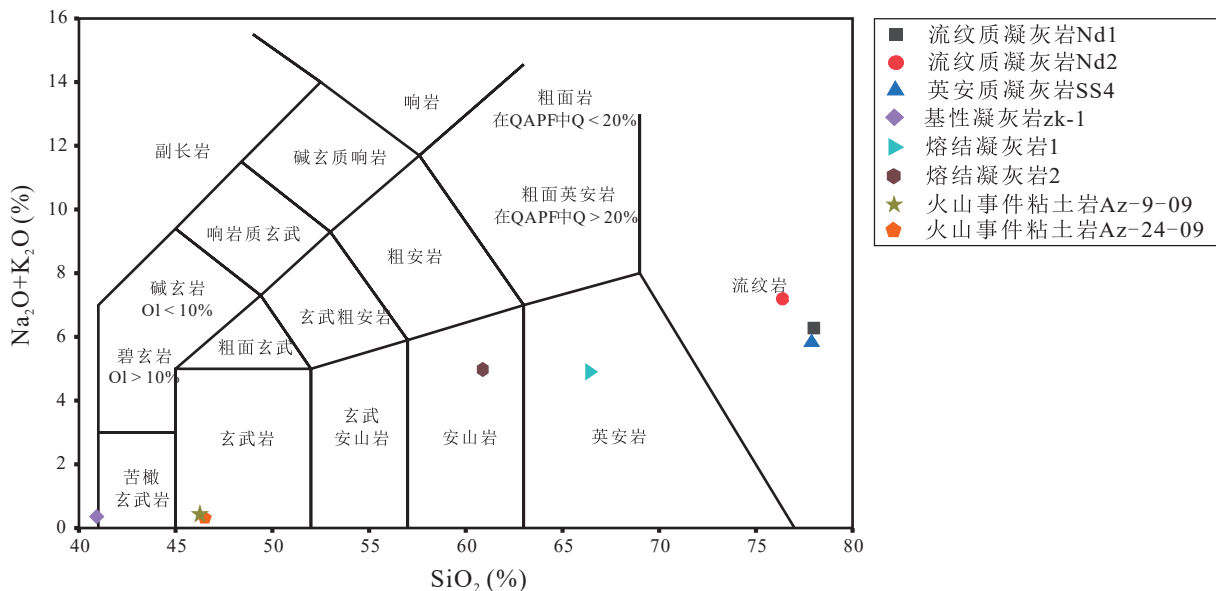
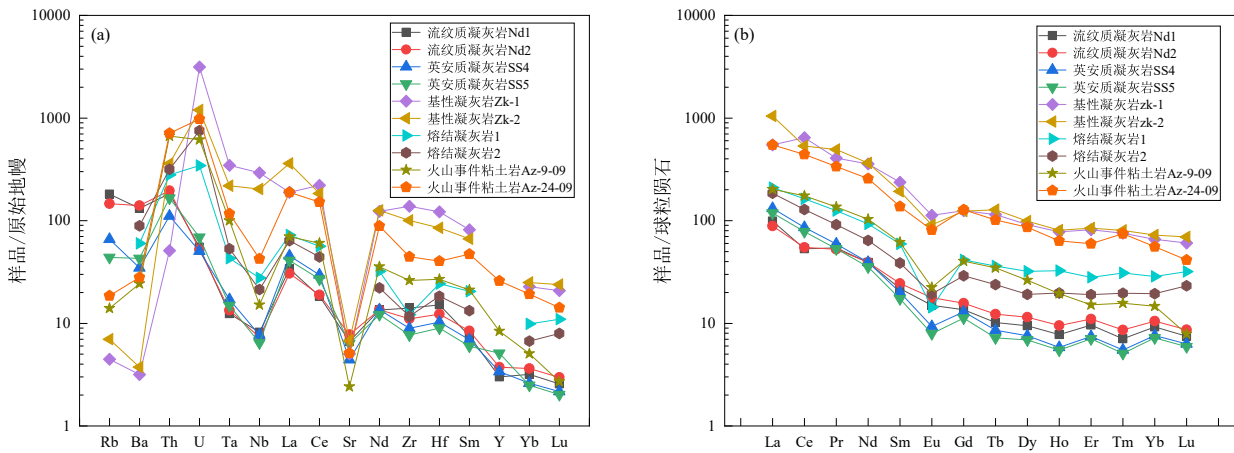


图 2 不同类型火山凝灰岩 TAS 分类图(数据引自王剑等, 2008; 田和明等, 2014; 许峰等, 2019; Arbuzov et al., 2016)。英安质凝灰岩 SS4 和 SS5 (SS5 的  $\text{SiO}_2$  含量大于 80% 而未在图中显示) 在本图上投图区域为流纹质凝灰岩, 在王剑等(2008)文献里被划分为英安质凝灰岩。

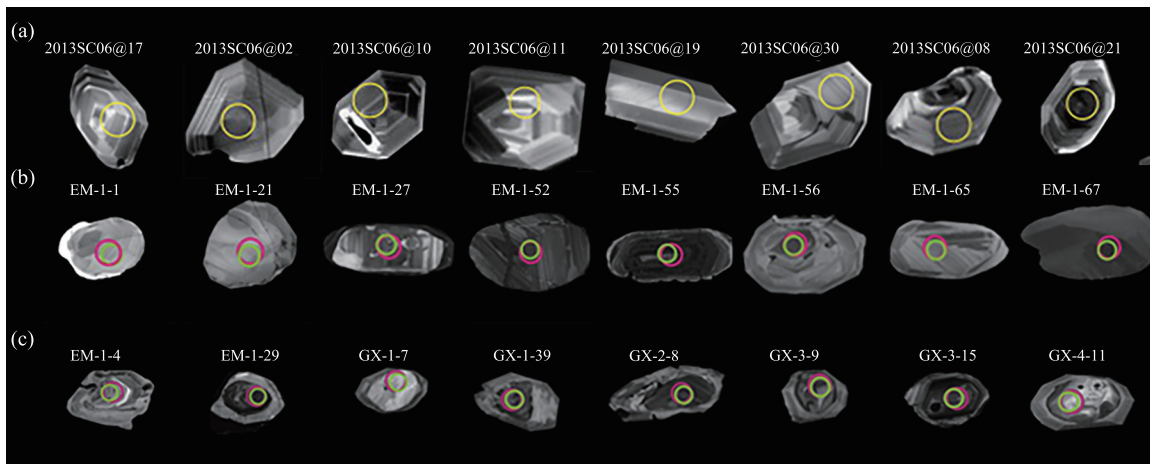
Fig. 2 TAS classification diagram for different types of tuff (Data from Wang et al., 2008; Tian et al., 2014; Xu et al., 2019; Arbuzov et al., 2016). Dacite tuff SS4 and SS5 (SS5 has  $\text{SiO}_2$  content greater than 80% and is not shown in the figure) are plotted to the region of rhyolite, whereas it was classified as dacite tuff in Wang et al. (2008).



a: 不同类别火山凝灰岩微量元素蛛网图; b: 不同类别火山凝灰岩稀土元素配分模式

图3 不同类别火山凝灰岩微量元素蛛网图和稀土元素配分模式 (原始地幔数据引自 Sun and McDonough, 1989; 其它数据引自王剑等, 2008, 田和明等, 2014, 许峰等, 2019, Arbuzov et al., 2016)

Fig. 3 Spider diagram of trace elements and distribution patterns of rare earth elements of different types of volcanic tuff (Primitive mantle from Sun and McDonough, 1989; data from Wang et al., 2008, Tian et al., 2014, Xu et al., 2019, Arbuzov et al., 2016)



a: 火山灰锆石的形态特征, 黄色圆圈为 SIMS U-Pb 定年束斑, 大小为 20 μm; b: 碎屑锆石的形态特征; c: 继承锆石的形态特征。b 和 c 中绿色圆圈为 30 μm 的 LA-ICP-MS U-Pb 定年束斑, 粉色圆圈为 35 μm 的 Hf 同位素分析束斑。

图4 火山灰锆石、碎屑锆石和继承锆石的形态特征 (a 据 Lan et al., 2014b 修改; b 据 Li et al., 2021 修改; c 据 Li et al., 2021 修改)

Fig. 4 Morphological characteristics of volcanic tuff zircon, detrital zircon and inherited zircon (a modified from Lan et al., 2014b; b modified from Li et al., 2021; c modified from Li et al., 2021)

(100 μm~200 μm), 自形程度较高, 常以继承核出现, 在花岗质岩石中较为常见(见图 4c)。捕获锆石是指岩浆在就位或喷发过程中将围岩熔化捕获到岩浆中的锆石, 具有不同于喷发岩浆锆石的地球化学特征, 而与围岩中锆石地球化学相一致。例如, 郭锋等(2007)通过对延吉地区古新世埃达克岩研究发现大部分岩浆成因锆石具有高 Y、HREE 和强

烈的 Eu 负异常的地球化学特征, 说明它们不是寄主岩浆分离结晶的产物, 也不是寄主岩浆中残留的继承锆石, 而是和寄主岩浆无成因联系的捕获锆石, 这种锆石在玄武质岩石中比较常见。

不同岩石类型中锆石的磨圆度和大小都有其各自的特征, 因此可以作为判别火山凝灰岩或者火山灰物质的依据。本文统计了火山凝灰岩、凝灰

质粉砂岩/泥岩和粉砂岩/泥岩中锆石的磨圆度和锆石的大小来建立火山凝灰岩和火山灰物质的判别图解(数据参见附表 3-5<sup>\*</sup>)。从锆石磨圆度来看,火山凝灰岩中的锆石大多是棱角状的,自型程度高,粉砂岩/泥岩中的锆石大多是次棱角状/次磨圆状-圆状的,磨圆程度较高,而凝灰质粉砂岩/泥岩介于二者之间(图 5)。从锆石大小来看,火山凝灰岩中的锆石大小集中在 75~200  $\mu\text{m}$  之间(部分锆石超过 300  $\mu\text{m}$ ),凝灰质粉砂岩/泥岩与粉砂岩/泥岩

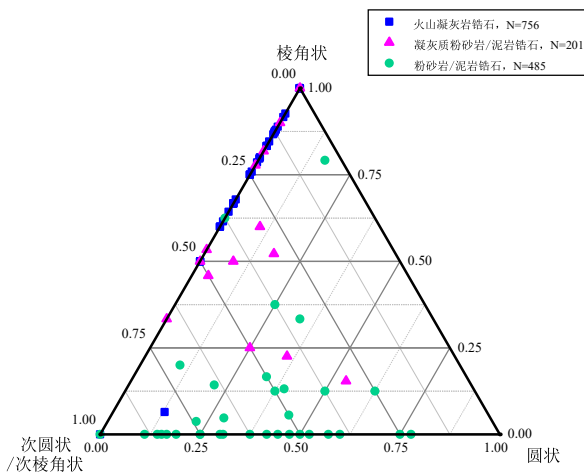
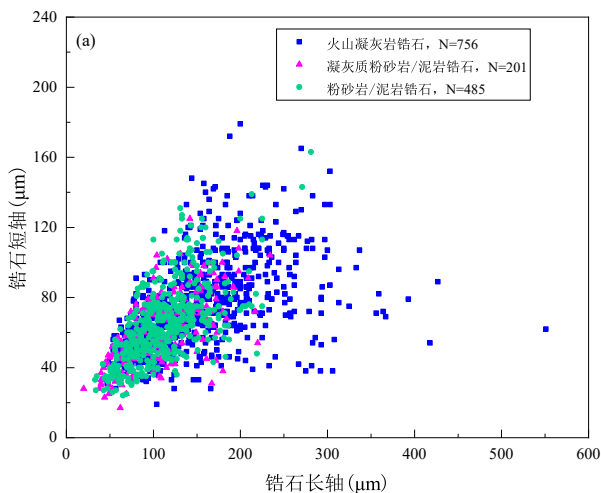


图 5 不同岩性里锆石磨圆度三角统计图(数据来源参见附表 3-5<sup>\*</sup>)

Fig. 5 Triangular plot showing the roundness of zircons in different types of rocks (See Table 3 in supplementary materials for data sources)



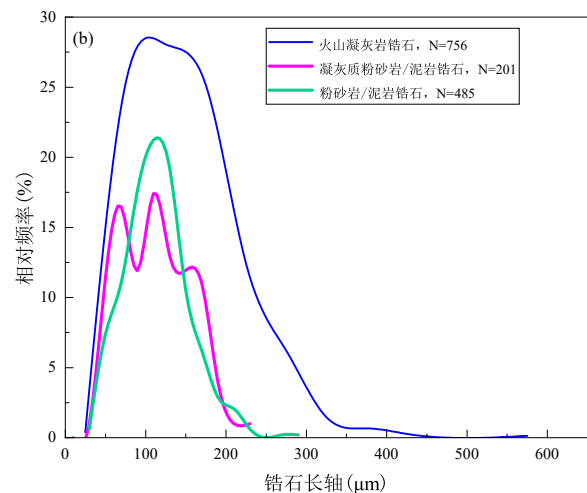
的锆石大小相近,集中分布在 70~175  $\mu\text{m}$  之间。对于颗粒较大的锆石(粒径>150  $\mu\text{m}$ ),通常为碎屑锆石或者继承锆石,经过缓慢冷却结晶形成(图 6)。统计结果说明火山凝灰岩在沉积过程中或多或少会有陆源碎屑的混入。另外,前人可能把一些细粒碎屑沉积岩比如泥岩和粉砂质泥岩等误当成了火山凝灰岩。这些案例告诉我们在利用火山凝灰岩夹层限定地层时代时,一定要避开那些颗粒大、磨圆度高的锆石,尽量挑选那些自型、细小的锆石,只有这些锆石的年龄才最接近地层的理论沉积时代。

### 3 应用实例

应用火山凝灰岩成功限定沉积岩沉积时代的案例很多(附表 3-5<sup>\*</sup>),火山凝灰岩夹层在前寒武纪和显生宙砾岩、砂岩、粉砂岩、泥岩、页岩和磷块岩里都有出现。下面只列举两个印度和华南地区前寒武纪地层中火山凝灰岩灰定年研究实例。

#### 3.1 印度中部 Vindhyan 地区 Chorhat 砂岩火山凝灰岩锆石定年

印度中部 Chorhat 砂岩(Vindhyan 群下部)中的一种特殊层面沉积构造,被解释为三胚层动物活动留下的洞穴。因为岩石的年龄可能老于 1000 Ma,这些沉积构造被认为是最老的后生动物的化石证据。然而,这些沉积构造是否为生物成因以及围岩年龄能否有这么老一直存在争议。前人的定



a: 不同岩性里锆石长、短轴大小散点图; b: 不同岩性里锆石长轴大小频率分布统计图

图 6 不同岩性里锆石长、短轴大小散点图和长轴大小频率分布统计图(数据来源参见附表 3-5<sup>\*</sup>)

Fig. 6 a: Scatter plot showing the length and width and frequency plot showing length of zircons in different types of rocks (See Table 3 in supplementary materials for data sources)



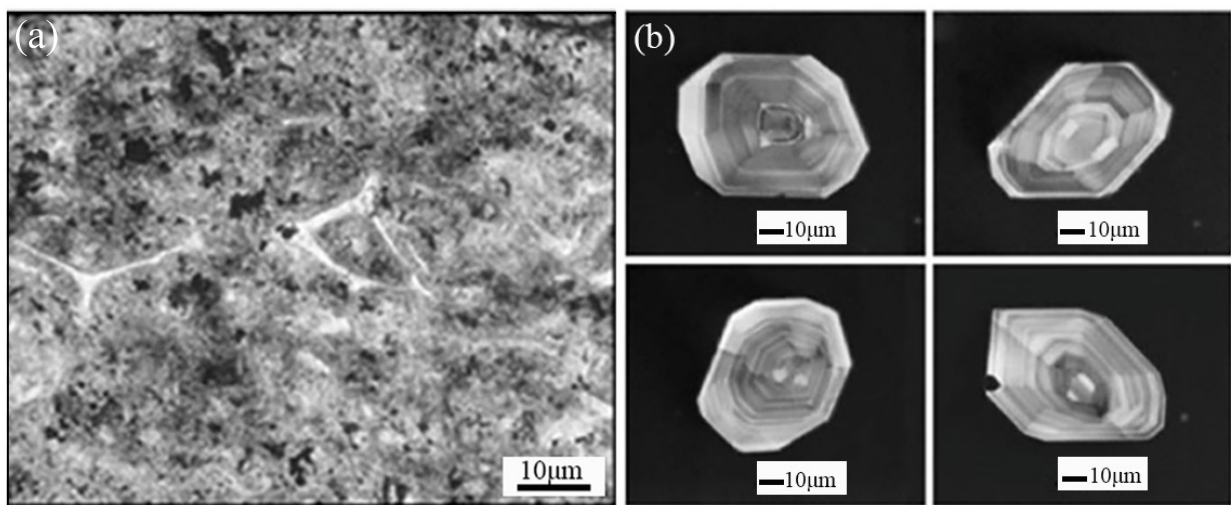
年工作主要基于富钾矿物的 K-Ar 和 Rb-Sr 定年以及磷灰石裂变径迹年龄, 尽管有争议的证据表明这些岩石可能只有 540 Ma。为了准确限定这套沉积岩的沉积时代, Rasmussen et al. (2002) 从 Chorhat 砂岩上覆的 Rampur 页岩顶部的火山凝灰岩夹层 (厚 1~1.5 m) 中采集了两个火山凝灰岩样品 (RP/5/AUG 和 RP/4/AUG), 从下伏 Porcellanite 组顶部采集了单个火山凝灰岩样品 (9/CH/PR/2000), 以此来限定 Chorhat 砂岩的年龄。

样品中出现典型的玻屑和三联点结构, 为火山凝灰岩的典型岩相学标志 (图 7a)。从样品中分离出来的锆石自形, 细小, 有明显的环带特征, 说明为典型的火山灰锆石 (图 7b)。用 SHRIMP II 仪器进行年龄分析, RP/5/AUG 中 26 颗锆石的年龄除 1 颗以外均一致, 得出的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄为  $1602 \pm 10$  Ma (95% 置信度, MSWD=0.64)。对 RP/4/AUG 中 17 颗锆石进行分析, 得到  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄为  $1593 \pm 12$  Ma (95% 置信度, MSWD = 0.69, 一颗年龄较老的他形锆石被解释为捕获锆石。综合来看, Rampur 页岩的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄为  $1599 \pm 8$  Ma (95% 置信度, MSWD = 0.68)。9/CH/PR/2000 锆石年龄分析形成单一群体, 剔除三个不一致年龄后其  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄为  $1628 \pm 8$  Ma (95% 置信度, MSWD = 1.06)。因此 Rasmussen et al. (2002) 认为 Chorhat 砂岩沉积于  $1628 \pm 12$  Ma 和  $1599 \pm 8$  Ma 之间。此外, Ray

et al. (2002) 用锆石 U-Pb 定年测定了 Porcellanite 组火山凝灰岩年龄为  $1632 \pm 14$  Ma。Sarangi et al. (2004) 用碳酸盐岩 Pb-Pb 定年测得了 Chorhat 砂岩上覆地层 Rohtas 组年龄为  $1599 \pm 48$  Ma。这些结果验证了 Rasmussen et al. (2002) 年龄的可靠性, 说明 Chorhat 砂岩内出现的洞穴年龄可能为 1.6 Ga, 即复杂后生动物早在 1.6 Ga 年前就可能已经演化分异了, 早于寒武纪生命大爆发约 1 亿年, 为多细胞真核生物演化提供了可靠的年龄证据。

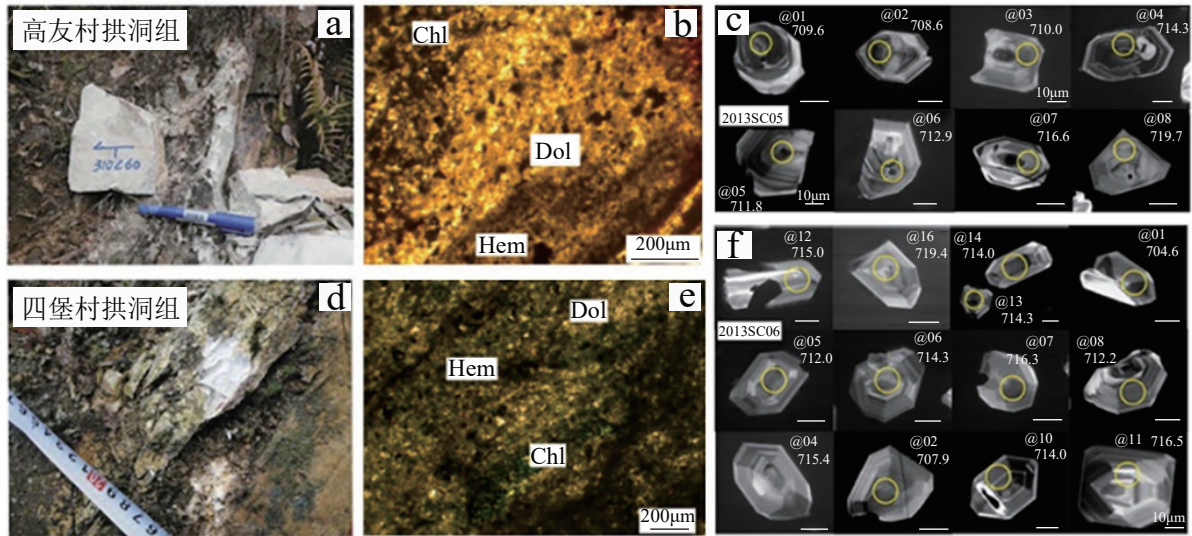
### 3.2 华南板溪群拱洞组凝灰质沉积岩锆石定年

新元古代冰川事件对大气圈、生物圈和水圈产生了重大影响, 是地球演化过程中一个重要里程碑。成冰纪的“Sturtian”冰川作用可能持续了约 5000 万年, 但这些冰川作用的精准发生时间和同时性一直存在争议。为了解决这些争议, Lan et al. (2014b) 从我国华南长安组下伏地层拱洞组上部找到了两层凝灰质粉砂岩样品 (2013SC05 和 2013SC06), 分别采自三江县高友村和罗城县四堡村剖面。这两个样品的手标本呈现灰白色、轻微变质 (图 8a, d), 发生了碳酸盐岩和绿泥石蚀变 (图 8b, e)。两个样品以黏土矿物和微晶白云石为主, 有少量黄铁矿/赤铁矿。通过锆石 Cameca IMS 1280 U-Pb 定年, 从样品 2013SC05 和 2013SC06 中得到的最年轻一组锆石 SIMS U-Pb 年龄分别为  $716.1 \pm 3.4$  Ma (图 9a) 和  $715.9 \pm 2.8$  Ma (图 9b), 锆石具有



a: Rampur 页岩中火山凝灰岩岩相学显微图像; b: Rampur 页岩和 Porcellanite 组内锆石阴极发光图像  
图 7 印度中部 Vindhyan 盆地火山凝灰岩显微图像和锆石阴极发光图像 (引自 Rasmussen et al., 2002)

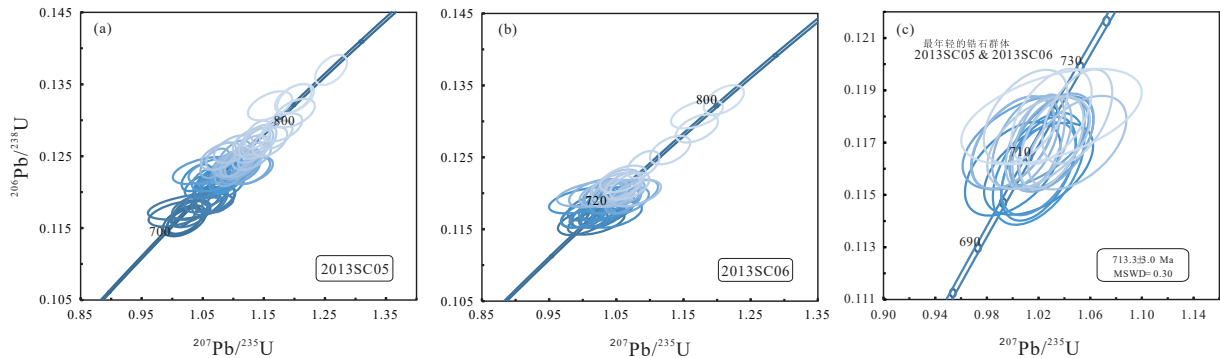
Fig. 7 Microscopic images and zircon cathodoluminescence (CL) images of volcanic tuff from Vindhyan basin, Central India (from Rasmussen et al., 2002)



a: 高友村拱洞组顶部凝灰质粉砂岩样品 2013SC05 野外照片; b: 样品 2013SC05 显微图像, Chl 为绿泥石, Dol 为白云石, Hem 为赤铁矿; c: 样品 2013SC05 锆石阴极发光图像; d: 四堡村拱洞组顶部凝灰质粉砂岩样品 2013SC06 野外照片; e: 样品 2013SC06 显微图像, Chl 为绿泥石, Dol 为白云石, Hem 为赤铁矿; f: 样品 2013SC06 锆石阴极发光图像。c 和 f 中比例尺为 20  $\mu\text{m}$ 。

图 8 华南板溪群拱洞组凝灰质沉积岩样品野外照片, 显微图像和锆石阴极发光图像 (据 Lan et al., 2014b 修改)

Fig. 8 Field photographs, microscopic images and zircon cathodoluminescence images of tuffaceous sedimentary rock samples from the Gongdong Formation, Banxi Group, South China (modified from Lan et al., 2014b)



a: 样品 2013SC05 的 SIMS U-Pb 年龄谱和图; b: 样品 2013SC06 的 SIMS U-Pb 年龄谱和图; c: 样品 2013SC05 和样品 2013SC06 中最年轻一组锆石的 SIMS U-Pb 年龄谱和图

图 9 样品 2013SC05, 样品 2013SC06 和两者中最年轻锆石群体的 SIMS U-Pb 年龄谱和图 (数据引自 Lan et al., 2014b)

Fig. 9 SIMS U-Pb Concordia diagram of Sample 2013SC05, Sample 2013SC06, and the youngest zircon population of the two (data from Lan et al., 2014b)

自形、细小的形态特征, 阴极发光(CL)显示明显振荡环带的特征(图 8c, f), 为火山凝灰岩典型的形态特征, 其年龄被解释为代表了采样层位的沉积年龄。年龄峰值 ca. 729 Ma, ca. 740 Ma 和 ca. 754 Ma 代表碎屑锆石年龄或者继承锆石年龄, 从锆石形态上来看, 锆石自型程度较高, 磨圆程度较低, 可能指示了近距离搬运和沉积(Lan et al., 2014b)。把样品

2013SC05 和 2013SC06 中最年轻一组锆石放在一起, 可以得到一个  $715.8 \pm 2.5$  Ma 的 SIMS U-Pb 加权平均年龄(图 9c)。经过对这些 SIMS U-Pb 做进一步 TIMS U-Pb 定年分析, 把采样层位的年龄限定在了  $720.2 \pm 1.4$  Ma(图 10), 考虑到采样层位和拉伸系-成冰系边界还有一段距离, 通过蒙特卡洛模拟计算把长安组起始沉积时代限定在了  $717.6 \pm$



1.7 Ma, 从而把 Sturtian 冰期在华南板块的启动时间限定在了 ca. 717 Ma (Lan et al., 2020)。该年龄和 Laurentia 板块及 Arabia-Nubia 板块内 Sturtian 冰期的启动时间相一致, 因此证明了 Sturtian 冰期全球发生的快速性和同时性(Lan et al., 2020)。

#### 4 结论

火山凝灰岩锆石 U-Pb 定年是相对传统、可靠的定年方案。锆石 U-Pb 同位素封闭温度较高 (>700°C), 不容易受到后期地质作用的扰动。从野外产出来看, 火山凝灰岩或凝灰质沉积岩常呈现黄色、灰色、白色和绿色, 和上下围岩地层有明显的区别。从显微镜下观察来看, 新鲜未蚀变的火山凝灰岩具有典型的玻屑、晶屑和岩屑, 其中玻屑呈现典型针状、新月状或者鸡骨架状, 火山凝灰岩蚀变后玻屑会转变成细小的石英。从地球化学特征看, 火山凝灰岩主要成分为  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 微量元素中 U、Th 含量较高, Sr 同位素亏损, 轻稀土元素富集, 出现 Eu 负异常, 基性火山凝灰岩、中性火山凝灰岩和酸性火山凝灰岩具有不同的碱性元素含量。另外, 基性火山凝灰岩的铁族元素(V, Cr)含量略高于中酸性火山凝灰岩, Ba 的含量相对较低。

火山凝灰岩中锆石多表现为自型、细小、环带结构明显, 为典型的火山灰锆石, 在火山喷发时形成。从锆石磨圆度来看, 火山凝灰岩锆石磨圆度低, 粉砂岩/泥岩锆石磨圆度较高, 凝灰质粉砂岩/泥岩介于二者之间。然而, 从统计锆石大小的结果来看与理论略有不符, 原因可能是统计的火山凝灰岩中混入了陆源碎屑锆石, 也可能是前人把细粒碎屑沉积岩当成了火山凝灰岩。建议科研工作者以后从事火山凝灰岩定年工作时, 最好从野外观察和室内岩相学以及阴极发光照相等多方面综合分析, 以保证火山凝灰岩定年的准确性和通用性。

#### References

Arbuzov S I, Mezhibor A M, Spears D A, et al., 2016. Nature of tonsteins in the Azeisk deposit of the Irkutsk Coal Basin (Siberia, Russia) [J]. *International Journal of Coal Geology*, 153: 99–111.

Aziz H A, Di Stefano A, Foresi L M, et al., 2008. Integrated stratigraphy and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  chronology of early Middle Miocene sediments from DSDP Leg 42A, Site 372 (Western Mediterranean) [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 257 (1–2): 123–138.

Barfod G H, Otero O, Albarède F, 2003. Phosphate Lu–Hf geochronology [J]. *Chemical Geology*, 200 (3–4): 241–253.

Chang L H, Cao L, GaO F H, 2009. *Igneous rock Identification Manual* [M]. Beijing: Geological Publishing House.

Chen D F, Dong W Q, Zhu B Q, et al., 2004. Pb–Pb ages of Neoproterozoic Doushantuo phosphorites in South China: constraints on early metazoan evolution and glaciation events [J]. *Precambrian Research*, 132 (1–2): 123–132.

Chen X Y, Xu Y G, Martin M, 2014. Tephrochronology: Principles and applications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30 (12): 3491–3500 (in Chinese with English abstract).

Courtillot V E, Renne P R, 2003. On the ages of flood basalt events [J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 335 (1): 113–140.

Deng Q, Cui X Z, Wang Z J, et al., 2023. Huashan Group Block: Constraints from the geochronology and geochemistry of the New understanding of the tectonic evolution of the northern margin of Yangtze [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 43 (1): 212–225 (in Chinese with English abstract).

Ernst R E, 2014. *Large Igneous Provinces* [M]. London: Cambridge University Press.

Feng B H, Dong R L, 1992. The study of volcanic event sedimentary claystone and its significance [J]. *Regional Geology of China*, 2: 149–155 (in Chinese with English abstract).

Feng B H, 2005. Sedimentology and gamma logging stratigraphy of volcanic event mudstone gangue [J]. *Well Logging Technology Information*, 18 (3): 22–24 (in Chinese with English abstract).

Godet A, Föllmi K B, Stille P, et al., 2011. Reconciling strontium-isotope and K–Ar ages with biostratigraphy: the case of the Urgonian platform, Early Cretaceous of the Jura Mountains, Western Switzerland [J]. *Swiss Journal of Geosciences*, 104 (1): 147–160.

Guo F, Fan W M, Li C W, et al., 2007. Zircon U–Pb age, U–Pb ages, Hf isotope and trace element compositions of captured zircons of the Paleocene adakites in the Yanji area, NE China: Implications for magmatic evolution of intermediate-felsic magmas [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (2): 413–422 (in Chinese with English abstract).

Hess J C, Lippolt H J, 1986.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages of tonstein and tuff sanidines: New calibration points for the improvement of the Upper Carboniferous time scale [J]. *Chemical Geology: Isotope Geoscience section*, 59 (2–3): 143–154.

Jahn B-M, Cuvellier H, 1994. Pb–Pb and U–Pb geochronology of carbonate rocks: an assessment [J]. *Chemical Geology*, 115 (1–2): 125–151.

Lan Z W, Li X-H, Zhu M, et al., 2015. Revisiting the Liantuo Formation in Yangtze Block, South China: SIMS U–Pb zircon age constraints and regional and global significance [J]. *Precambrian Research*, 263: 123–141.

Lan Z W, Chen Z Q, Li X H, et al., 2013. Hydrothermal origin of the Paleoproterozoic xenotime from the King Leopold Sandstone of the Kimberley Group, Kimberley, NW Australia: Implications for a ca

- 1.7 Ga far-field hydrothermal event[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 60 (4) : 497 – 508 .
- Lan Z W, Huyskens M H, Lu K, et al., 2020. Toward refining the onset age of Sturtian glaciation in South China[J]. *Precambrian Research*, 338: 105555 .
- Lan Z W, Li X H, Chen Z Q, et al., 2014a. Diagenetic xenotime age constraints on the Sanjiaotang Formation, Luoyu Group, southern margin of the North China Craton: Implications for regional stratigraphic correlation and early evolution of eukaryotes[J]. *Precambrian Research*, 251: 21 – 32 .
- Lan Z W, Li X H, Zhu M Y, et al., 2014b. A rapid and synchronous initiation of the wide spread Cryogenian glaciations[J]. *Precambrian Research*, 255: 401 – 411 .
- Lan Z W, Roberts N M W, Zhou Y, et al., 2022. Application of in situ U-Pb carbonate geochronology to Stenian-Tonian successions of North China[J]. *Precambrian Research*, 370: 106551 .
- Lan Z W, Wu S T, Wang F Y, et al., 2023. A ca. 290 Ma hydrothermal calcite in Cambrian dolostone[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 147: 106011 .
- Lee J K W, Williams I S, Ellis D J, 1997. Pb, U and Th diffusion in natural zircon[J]. *Nature*, 390 (6656) : 159 – 162 .
- Li C M, 2009. A Review on the Minerageny and Situ Microanalytical Dating Techniques of Zircons[J]. *Geological Survey and Research*, 32 (3) : 161 – 174 (in Chinese with English abstract).
- Li H K, Lu S N, Xiang Z Q, et al., 2007. SHRIMP U-Pb Geochronological research on detrital zircons from the Beidahe Complex-Group in the western segment of the North Qilian Mountains, Northwest China[J]. *Geological Review*, 53 (1) : 132 – 140 (in Chinese with English abstract).
- Li W J, Shi Z J, Yin G, et al., 2021. Origin and tectonic implications of the early Middle Triassic tuffs in the western Yangtze Craton: Insight into whole-rock geochemical and zircon U-Pb and Hf isotopic signatures[J]. *Gondwana Research*, 93: 142 – 161 .
- Liu J Q, Sun C Q, You H T, 2018. An overview of global tephrochronology[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 48 (1) : 1 – 29 (in Chinese with English abstract).
- Liu P J, Li X H, Chen S M, et al., 2015. New SIMS U-Pb zircon age and its constraint on the beginning of the Nantuo glaciation[J]. *Science Bulletin*, 60 (10) : 958 – 963 .
- Mcnaughton N J, Rasmussen B, Fletcher I R, 1999. SHRIMP uranium-lead dating of diagenetic xenotime in siliciclastic sedimentary rocks[J]. *Science*, 285 (5424) : 78 – 80 .
- Montano D, Gasparrini M, Gerdes A, et al., 2021. In-situ U-Pb dating of Ries Crater lacustrine carbonates (Miocene, South-West Germany) : Implications for continental carbonate chronostratigraphy[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 568: 117011 .
- Perez Loinaze V S, Vera E I, Passalia M G, et al., 2013. High-precision U-Pb zircon age from the Anfiteatro de Ticó Formation: Implications for the timing of the early angiosperm diversification in Patagonia[J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 48: 97 – 105 .
- Phillips D, Matchan E L, Dalton H, et al., 2022. Revised astronomically calibrated  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages for the Fish Canyon Tuff sanidine – Closing the interlaboratory gap[J]. *Chemical Geology*, 597: 120815 .
- Pigage L C, Crowley J L, Pyle L J, et al., 2012. U-Pb zircon age of an Ordovician tuff in southeast Yukon: implications for the age of the Cambrian-Ordovician boundary[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 49 (6) : 732 – 741 .
- Qin J, Zhong Y T, Zhu L D, et al., 2021. Temporal constraints on the Dalazi Biota from Luozigou Basin, northeast China[J]. *Cretaceous Research*, 128: 104977 .
- Rasbury E T, Cole J M, 2009. Directly dating geologic events: U-Pb dating of carbonates[J]. *Reviews of Geophysics*, 47 (3) .
- Rasmussen B, 2005. Radiometric dating of sedimentary rocks : the application of diagenetic xenotime geochronology[J]. *Earth-Science Reviews*, 68 (3-4) : 197 – 243 .
- Rasmussen B, Bose P K, Sarkar S, et al., 2002. 1.6 Ga U-Pb zircon age for the Chorhat Sandstone, lower Vindhyan, India: Possible implications for early evolution of animals[J]. *Geology*, 30 (2) : 103 – 106 .
- Ray J S, Martin M W, Veizer J N, et al., 2002. U-Pb zircon dating and Sr isotope systematics of the Vindhyan Supergroup, India[J]. *Geology*, 30 (2) : 131 – 134 .
- Sarangi S, Gopalan K, Kumar S, 2004. Pb-Pb age of earliest megascopic, eukaryotic alga bearing Rohtas Formation, Vindhyan Supergroup, India: implications for Precambrian atmospheric oxygen evolution[J]. *Precambrian Research*, 132 (1-2) : 107 – 121 .
- Sang S X, Liu H J, Jia Y L, 1999. Volcanic Event Strata and Correlation of Coals and Rocks of Taiyuan Formation in Central North China ——Sedimentary Study of Volcanic Event Strata and Their Distribution (I) [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 28 (1) : 46 – 49 (in Chinese with English abstract).
- Sarna-Wojcicki A M, Pringle M S, Wijbrans J, 2000. New  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age of the Bishop Tuff from multiple sites and sediment rate calibration for the Matuyama-Brunhes boundary[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105 (B9) : 21431 – 21443 .
- Schmitz M D, Bowring S A, 2001. U-Pb zircon and titanite systematics of the Fish Canyon Tuff: an assessment of high-precision U-Pb geochronology and its application to young volcanic rocks[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65 (15) : 2571 – 2587 .
- Spears D A, 2012. The origin of tonsteins, an overview, and links with seatearths, fireclays and fragmental clay rocks[J]. *International Journal of Coal Geology*, 94: 22 – 31 .
- Sun S S, Mcdonough W F, 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society of London Special Publications*, 42: 313 – 345 .

- Taylor K G, Curtis C D, 1995. Stability and facies association of early diagenetic mineral assemblages: An example from a Jurassic ironstone-mudstone succession, U. K[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 65 (2a) : 358 – 368 .
- Tian H M, Dai S F, Li D H, et al., 2014. Geochemical Features of the Late Permian Tuff in Nanchuan District, Chongqing, Southwestern China[J]. *Geological Review*, 60 (1) : 169 – 177 (in Chinese with English abstract).
- Tucker R T, Roberts E M, Hu Y, et al., 2013. Detrital zircon age constraints for the Winton Formation, Queensland: Contextualizing Australia's Late Cretaceous dinosaur faunas[J]. *Gondwana Research*, 24 (2) : 767 – 779 .
- Wang J, Fu X G, Chen W X, et al., 2008. Geochronology and regional geochemistry of volcanic rocks in Woluo Mountain area, Northern Qiangtang: implications for Late Triassic volcano-sedimentary events[J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 38 (1) : 33 – 43 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y D, Zhang T, Yuan S H, et al., 2022. Preliminary Study of Validity of Detrital Zircon U-Pb Dating: A case study of Jiuxi Basin, NE Tibetan Plateau[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 40 (1) : 106 – 118 (in Chinese with English abstract).
- Wu J W, Chen X M, Yang Z F, 2001. Diagenetic illite K-Ar age analysis and its significance[J]. *Geological Journal of China Universities*, 7 (4) : 444 – 448 (in Chinese with English abstract).
- Xu F, Zhu Z W, Li C C, et al., 2019. Characteristics and Geological Significance of Thick Ignimbrite Beds of Yanchang Formation (Chang 7 Section) in Southeastern Ordos Basin[J]. *Geoscience*, 33 (2) : 389 – 400 (in Chinese with English abstract).
- Yang C, Rooney Alan D, Condon Daniel J, et al., 2021. The tempo of Ediacaran evolution[J]. *Science Advances*, 7 (45) : 10 .
- Yang J S, Wu C L, Xia L Q, et al., 2009. A decade of progress and challenges for the future in igneous petrology[J]. *Geological Review*, 55 (3) : 406 – 419 (in Chinese with English abstract).
- Yang J H, Jiang S Y, Ling H F, et al., 2005. Re-Os isotope tracing and dating of black shales and oceanic anoxic events[J]. *Earth Science Frontiers*, 12 (2) : 143 – 150 (in Chinese with English abstract).
- Yu B S, Zhao Z D, Su S G, 2012. *Petrology (2nd edition)* [M]. Beijing: Geological Publishing House.
- Zhang S J, Cao R, Lan Z W, et al., 2022. SIMS Pb-Pb dating of phosphates in the Proterozoic strata of SE North China Craton: Constraints on eukaryote evolution[J]. *Precambrian Research*, 371: 106562 .
- Zhang Y, Chen K L, Liu X Y, 2007. Study on the K-Ar Dating of Diagenetic Illite in Sedimentary Rock Samples — Question and Discussion[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 26 (2) : 117 – 120 (in Chinese with English abstract).
- Zhu R X, Li X H, Hou X G, et al., 2009. SIMS U-Pb zircon age of a tuff layer in the Meishucun section, Yunnan, southwest China: Constraint on the age of the Precambrian-Cambrian boundary[J]. *Science In China Series D-Earth Sciences*, 52 (9) : 1385 – 1392 .
- ## 附中文参考文献
- 常丽华, 曹林, 高福红, 2009. 火成岩鉴定手册[M]. 北京: 地质出版社.
- 陈宣谕, 徐义刚, Martin M, 2014. 火山灰年代学: 原理与应用[J]. *岩石学报*, 30 (12) : 3491 – 3500.
- 邓奇, 崔晓庄, 汪正江, 等, 2023. 扬子陆块北缘构造演化新认识: 来自原花山群年代学和地球化学的制约[J]. *沉积与特提斯地质*, 43 (1) : 212 – 225.
- 冯宝华, 董茹丽, 1992. 火山事件沉积粘土岩的研究及其意义[J]. *中国区域地质*, 2: 149 – 155.
- 冯宝华, 2005. 火山事件泥岩夹砾的沉积学及其自然伽马测井地层学[J]. *测井技术信息*, 18 (3) : 22 – 24.
- 郭锋, 范蔚茗, 李超文, 等, 2007. 延吉地区古新世埃达克岩捕获锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素和微量元素地球化学对区域中酸性岩浆演化的指示[J]. *岩石学报*, 23 (2) : 413 – 422.
- 李长民, 2009. 锆石成因矿物学与锆石微区定年综述[J]. *地质调查与研究*, 32 (3) : 161 – 174.
- 李怀坤, 陆松年, 相振群, 等, 2007. 北祁连山西段北大河岩群碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究[J]. *地质论评*, 53 (1) : 132 – 140.
- 刘嘉麒, 孙春青, 游海涛, 2018. 全球火山灰年代学研究概述[J]. *中国科学 (地球科学)*, 48 (1) : 1 – 29.
- 桑树勋, 刘焕杰, 贾玉如, 1999. 华北中部太原组火山事件层与煤岩层对比——火山事件层的沉积学研究及展布规律 (I) [J]. *中国矿业大学学报*, 28 (1) : 46 – 49.
- 田和明, 代世峰, 李大华, 等, 2014. 重庆南川晚二叠世凝灰岩的元素地球化学特征[J]. *地质论评*, 60 (1) : 169 – 177.
- 王剑, 付修根, 陈文西, 等, 2008. 北羌塘沃若山地区火山岩年代学及区域地球化学对比——对晚三叠世火山-沉积事件的启示[J]. *中国科学 (D辑: 地球科学)*, 38 (1) : 33 – 43.
- 王亚东, 张涛, 袁四化, 等, 2022. 碎屑锆石 U-Pb 年龄有效性初探——以青藏高原东北缘酒西盆地为例[J]. *沉积学报*, 40 (1) : 106 – 118.
- 吴劲薇, 陈小明, 杨忠芳, 2001. 成岩伊利石 K-Ar 年龄分析及其意义[J]. *高校地质学报*, 7 (4) : 444 – 448.
- 许锋, 朱增伍, 李长春, 等, 2019. 鄂尔多斯盆地东南部延长组长 7 段厚层熔结凝灰岩特征及其地质意义[J]. *现代地质*, 33 (2) : 389 – 400.
- 杨经绥, 吴才来, 夏林圻, 等, 2009. 火成岩的 10 年研究进展和未来的挑战[J]. *地质论评*, 55 (3) : 406 – 419.
- 杨競红, 蒋少涌, 凌洪飞, 等, 2005. 黑色页岩与大洋缺氧事件的 Re-Os 同位素示踪与定年研究[J]. *地学前缘*, 12 (2) : 143 – 150.
- 于炳松, 赵志丹, 苏尚国, 2012. *岩石学 (第二版)* [M] 北京: 地质出版社.
- 张彦, 陈克龙, 刘新宇, 2007. 沉积岩中自生伊利石 K-Ar 定年研究——存在问题及原因讨论[J]. *岩矿测试*, 26 (2) : 117 – 120.