

安洁, 吴林, 任荣等. 2024. 综合定年标准样品研制——以青藏高原伦坡拉盆地丁青湖组凝灰岩为例. 岩石学报, 40(08): 2306-2320, doi: 10.18654/1000-0569/2024.08.02

# 综合定年标准样品研制 ——以青藏高原伦坡拉盆地丁青湖组凝灰岩为例\*

安洁<sup>1,2,3</sup> 吴林<sup>1,2,3\*\*</sup> 任荣<sup>4</sup> 刘博<sup>5</sup> 张志勇<sup>1,2,3</sup> 王楠<sup>6</sup> 王非<sup>1,2,3</sup> 郑波<sup>7</sup>  
AN Jie<sup>1,2,3</sup>, WU Lin<sup>1,2,3\*\*</sup>, REN Rong<sup>4</sup>, LIU Bo<sup>5</sup>, ZHANG ZhiYong<sup>1,2,3</sup>, WANG Nan<sup>6</sup>, WANG Fei<sup>1,2,3</sup> and ZHENG Bo<sup>7</sup>

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 岩石圈演化与环境演变全国重点实验室, 北京 100029
  2. 中国科学院地球科学研究院, 北京 100029
  3. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049
  4. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083
  5. 东北大学深部金属矿山安全开采教育部重点实验室, 东北大学资源与土木工程学院, 沈阳 110819
  6. 中国科学院地球化学研究所, 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081
  7. 西南石油大学地球科学与技术学院, 成都 610500
1. State Key Laboratory of Lithospheric and Environmental Coevolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China
2. Innovation Academy for Earth Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China
3. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
4. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China
5. Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, College of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China
6. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China
7. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

2023-08-08 收稿, 2024-04-12 改回.

An J, Wu L, Ren R, Liu B, Zhang ZY, Wang N, Wang F and Zheng B. 2024. Development of reference material for multiple methods: A case study on tuff from Dingqinghu Formation in Lunpola Basin, Tibetan Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 40(8): 2306-2320, doi: 10.18654/1000-0569/2024.08.02

**Abstract** At present, there are only a few reference standards used in (U-Th)/He and fission track geochronology such as Durango apatite in Mexico, FCT zircon in the United States and MK-1 apatite in Myanmar, and most of them are standards for single dating method. Three independent thermochronological methods are used to predict the same eruption age by apatite and zircon. Whether the tuff is suitable for single or combined fission track, (U-Th)/He and apatite U-Pb dating age reference standards is evaluated by observing age reproducibility and dispersion. In this paper, the tuff of Dingqinghu Formation in Lunpola Basin of Tibetan Plateau is selected as research samples, and the apatite and zircon are selected for cross-calibration between multi-geochronological methods. The Lunpola (LPL) apatite yields a weighted average (U-Th)/He age of  $24.4 \pm 0.3$  Ma (1 $\sigma$ ) with MSWD of 4.25. While 21 LPL zircon single crystals get a weighted average age of  $19.2 \pm 0.5$  Ma (1 $\sigma$ ) with MSWD of 2.5. The fission track age of LPL apatite is  $22.8 \pm 0.8$  Ma, while the U-Pb age of LPL apatite is  $16.3 \pm 13.9$  Ma with MSWD of 0.29. After comparing LPL apatite with Durango and MK-

\* 本文受中国石油天然气股份有限公司勘探开发研究院开放课题(2022-KFKT-36)、国家自然科学基金面上基金项目(42372252)和青年基金项目(42102131、41503055)联合资助。

第一作者简介: 安洁, 女, 2000年生, 硕士生, 地球化学专业, E-mail: anjie221@mail.iggcas.ac.cn

\*\* 通讯作者: 吴林, 男, 1984年生, 博士, 高级工程师, 从事同位素年代学和热年代学在地质领域的应用研究, E-mail: wulin08@mail.iggcas.ac.cn

1 apatite, we infer that there are two populations of apatite crystals. Therefore, it is not suitable for LPL apatite to be used as a (U-Th)/He reference standard. After comparing LPL zircon with FCT and Penglai zircons, we conclude that LPL zircon has good age results with high accuracy and precision, and low age dispersion, and can be used as a potential (U-Th)/He reference standard.

**Key words** Reference standard; Apatite; Zircon; (U-Th)/He dating; Fission track dating

**摘要** 现今已有的(U-Th)/He、裂变径迹标准样品数量较少,仅有墨西哥的 Durango 磷灰石、美国的 FCT 锆石和缅甸的 MK-1 磷灰石,且多数是针对单定年方法的标样。为了研究青藏高原伦坡拉(LPL)盆地丁青湖组的凝灰岩能否成为多定年方法的标样,我们在凝灰岩中挑选合适的磷灰石和锆石颗粒进行多重年代学定年分析,获得了多个定年结果,并对其相互验证。其中,LPL 磷灰石(U-Th)/He 年龄为  $24.4 \pm 0.3 \text{ Ma}$  (1s),加权平均方差(MSWD)为 4.25;LPL 的锆石(U-Th)/He 年龄为  $19.2 \pm 0.5 \text{ Ma}$  (1s),其 MSWD 为 2.5;LPL 磷灰石裂变径迹年龄为  $22.8 \pm 0.8 \text{ Ma}$ ,LPL 磷灰石 U-Pb 年龄为  $16.3 \pm 13.9 \text{ Ma}$ ,MSWD 为 0.29。将 LPL 磷灰石与 Durango 磷灰石、MK-1 磷灰石对比后认为 LPL 磷灰石有两种来源,所以不适合作为(U-Th)/He 年龄标样。将 LPL 锆石与 FCT 锆石、蓬莱锆石做比较后,可以看出 LPL 锆石年龄结果较好,精确度和准确度较高且年龄分散性较弱,是一个潜在的(U-Th)/He 年龄标样。

**关键词** 标样;磷灰石;锆石;(U-Th)/He 定年;裂变径迹定年

**中图分类号** P588.21; P597.3

(U-Th)/He 定年和裂变径迹热年代学定年由于独特的封闭温度区间(Wolf *et al.*, 1996)而发展为研究地壳浅部地质过程的重要手段,可以为岩石近地表温度( $T$ )-时间( $t$ )历史提供定量约束(Fitzgerald *et al.*, 2006)。标准样品在实验中会影响未知样年龄的准确度,所以标样的品质是低温热年代学实验结果能否可信的重要影响因素。

Durango 磷灰石是国际上广泛使用的磷灰石(U-Th)/He 定年的标准样品。优点是粒度较大,其缺点是不同的颗粒之间有着远大于分析误差的年龄分散性(McDowell *et al.*, 2005; 吴林等,2016)。FCT 锆石是美国科罗拉多州西南部的圣胡安山脉中心火山群中拉加里塔火山口喷出后快速冷却结晶的产物,前人对其进行了多重年代学研究,包括磷灰石和锆石(U-Th)/He(Dobson *et al.*, 2008)、U-Pb(Schmitz and Bowring, 2001)、楣石(U-Th)/He 以及黑云母和长石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (Dazé *et al.*, 2003)。FCT 锆石作为(U-Th)/He 测年标样,年龄分散度达到约 10%(王英等,2019)。蓬莱锆石采自于海南岛北部新近系碱性玄武岩中发育的巨型锆石,蓬莱锆石样品主要作为锆石(U-Th)/He 标样,优点为数量较多、粒度较大、弱分区、有着一致的(U-Th)/He 年龄,缺点是不同巨晶之间年龄差异较大(Li *et al.*, 2017; Yu *et al.*, 2020)。MK-1 磷灰石采自于缅甸 Mogok 变质带,作为(U-Th)/He 测年法的标样(Wu *et al.*, 2019, 2021)。

国内外对于低温年代学标准样品的研究较少,而且存在一定的局限性。因此,寻找新的标准样品具有重要的意义。作者选择伦坡拉盆地鄂加卒剖面丁青湖组凝灰岩作为研究样品,探讨其成为低温热年代学标准样品的可能性。由于凝灰岩经历了非常快速的冷却过程,其内部矿物的(U-Th)/He、裂变径迹和 U-Pb 实验获得的表观年龄就可以近似代表其喷出地表的年龄。因此,选择凝灰岩作为研究对象,采用三种独立的热年代学方法来对其磷灰石和锆石的冷却年龄进行约束,将得到误差范围内相同的喷出年龄;而通过观察这些年龄的重现性和分散性,可以进一步判断该凝灰岩中的

磷灰石、锆石是否适用于单一或组合的裂变径迹和(U-Th)/He、U-Pb 定年的年龄标准样品。

样品破碎和磷灰石颗粒挑选等工作在中国科学院地质与地球物理研究所岩矿制样与分析实验室完成。样品的室内实验分析包括磷灰石(U-Th)/He、锆石(U-Th)/He 在中国科学院地质与地球物理研究所氩氦与铀钍氦年代学实验室完成,样品的磷灰石裂变径迹和磷灰石 U-Pb 定年分析在快科赛默科技有限公司完成。

## 1 地质背景和采样位置

伦坡拉盆地位于青藏高原中部,唐古拉山的南侧,主要为新生代陆相裂谷盆地。该盆地位于拉萨地体和羌塘地体之间东西延伸的班公湖-怒江缝合带的南缘。盆地南北两侧分别以达玉山和长山为界,西部与尼玛盆地相连(图 1a)。随着班公湖-怒江缝合带的右旋走滑,相应的右旋扭曲在该区产生了 NNE-SSW 拉应力,划分了变形区,形成了伦坡拉盆地。现今盆地由南部冲断带、中部拗陷带和北部褶皱冲断带三个构造单元组成,形成了盆地范围内的向斜构造。主要的盆地变形表现为一系列平行于盆地北缘和南缘的左旋扭折断层和褶皱(图 1b, c)。这表明变形要发生在盆地沉积后,由局部拉张向挤压的转变在区域应力场上是由右旋走滑向后左旋的转变(He *et al.*, 2012)。

丁青湖组是伦坡拉盆地中平行不整合覆于牛堡组杂色泥岩之上的一套深湖相及河流相紫红色、灰绿色碎屑岩(泥页岩、凝灰岩),局部夹油页岩、泥灰岩。该组主要分布于东南缘扎加藏布车布里一带,近东西向展布,厚度为 564m。岩性以杂色页岩、泥岩为主,另有少量绿色、灰色至深灰色粉砂岩、岩屑砂岩、岩屑石英砂岩及钙质砂岩,并夹有一些浅灰色细砂岩和凝灰岩层。其岩石组合属于深水湖相碎屑岩沉积。并且在该组的钙质粉砂岩中含有油页岩,与伦坡拉盆地一带的油页岩断续相连(图 1d)。丁青湖组中含有丰富的鱼类和

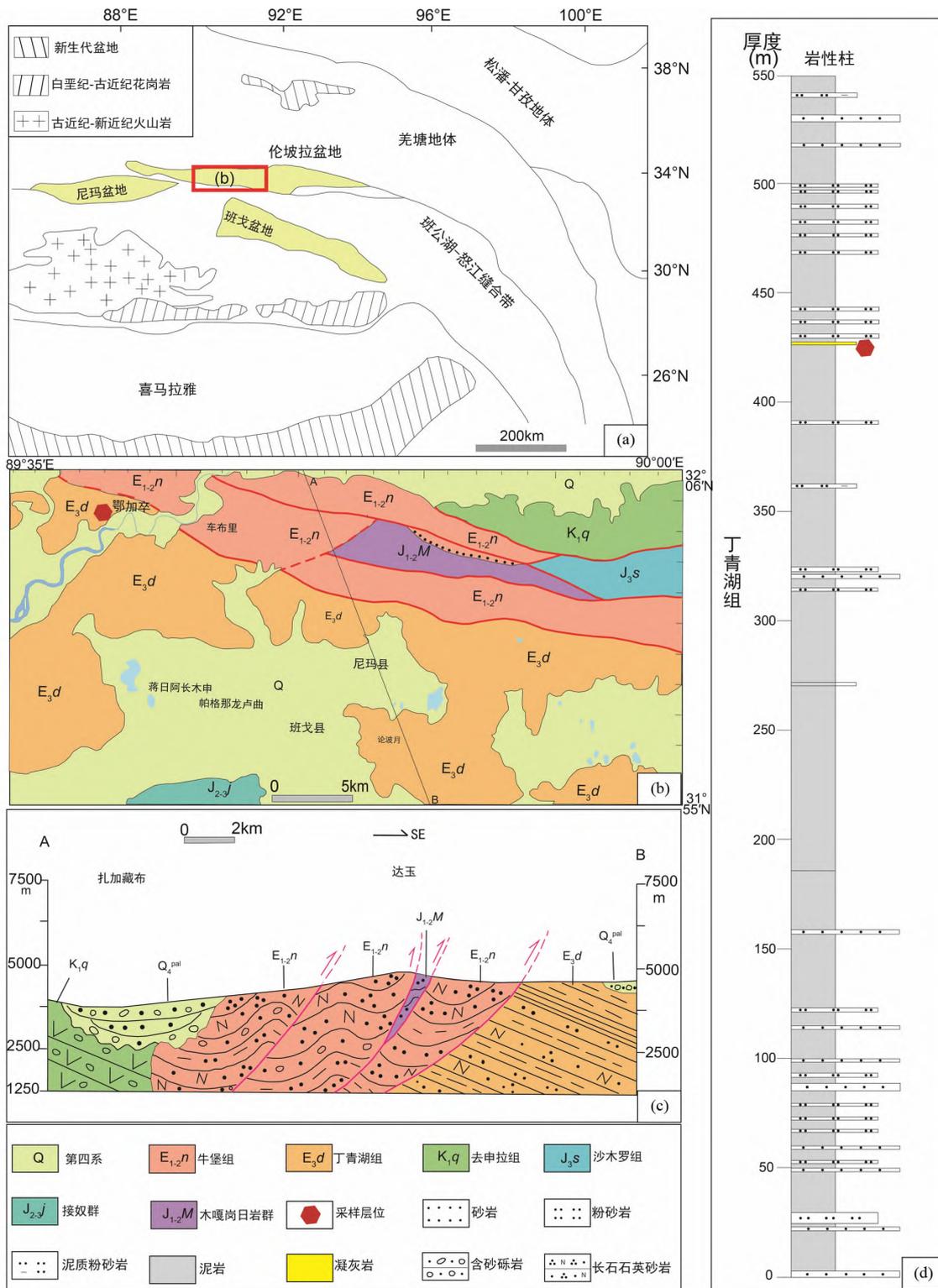


图1 伦坡拉盆地构造位置图及研究区地质图(据曾胜强等,2020;王永胜等,2012<sup>①</sup>修改)

(a) 伦坡拉盆地大地构造位置图; (b) 伦坡拉盆地西北部地质图; (c) A-B剖面图; (d) 丁青湖组地层柱状图

Fig. 1 The tectonic location of the Lunpola basin and geological map of the study area(modified after Zeng *et al.* , 2020)

(a) tectonic location map of Lunpola Basin; (b) geological map of the northwest Lunpola Basin; (c) Section A-B; (d) stratigraphic column map of Dingqinghu Formation

① 王永胜等. 2012. 1:25万昂达尔错幅区域地质调查报告

昆虫化石,如介形虫、腹足类、昆虫、鱼类和孢粉等(文一雄等,2016;曾胜强等,2020;王代春,2021)。

丁青湖组的鄂加卒剖面(32°04'40"N,89°37'10"E至32°04'10"N,89°36'50"E)位于伦坡拉盆地西北部那曲双湖县多玛四村,南部为扎加藏布河,处于北部逆冲推覆构造的前锋位置,出露了一套紫红、灰绿相间的细碎屑岩层。剖面主要由灰色、褐色砂岩、粉砂岩和灰色泥岩组成的多个沉积旋回,局部夹有灰白色凝灰岩(曾胜强等,2020)。本文样品是来自于丁青湖组鄂加卒剖面内上部的凝灰岩,其厚度约40cm,颜色为灰白色,表面风化比较严重。

## 2 研究方法

### 2.1 磷灰石(U-Th)/He定年

(U-Th)/He定年法是利用母体同位素随时间的衰变和子体同位素随时间的积累来测定矿物的形成时间。子体同位素 $^4\text{He}$ 是母体同位素 $^{238}\text{U}$ 、 $^{235}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 和 $^{147}\text{Sm}$ 经过一系列的放射性衰变积累的,衰变方程为:

$$^4\text{He} = 8^{238}\text{U}[\exp(\lambda_{238}t) - 1] + 7^{235}\text{U}[\exp(\lambda_{235}t) - 1] + 6^{232}\text{Th}[\exp(\lambda_{232}t) - 1] + ^{147}\text{Sm}[\exp(\lambda_{147}t) - 1]$$

其中 $^4\text{He}$ 、 $^{238}\text{U}$ 、 $^{235}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 、 $^{147}\text{Sm}$ 为现今矿物中对应同位素的原子数, $t$ 为累积时间,即矿物的形成年龄。各母体同位素的衰变常数是已知的, $^4\text{He}$ 、 $^{238}\text{U}$ 、 $^{235}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 的原子数通过质谱测试可以得到,通过计算就可以得到年龄 $t$ 。

根据晶型完整的自形颗粒、颗粒纯净、晶体垂直于 $c$ 轴方向大于60~70 $\mu\text{m}$ 三条原则在高倍(160倍)双目镜下初步挑出晶型较好的磷灰石颗粒。挑完每个颗粒之后还要对矿物晶体进行尺寸的测量,以便后期计算校正参数 $F_T$ (Wolf *et al.*, 1996)。

将测量好尺寸的磷灰石颗粒包到铂囊中,将整个囊放到激光器的25孔不锈钢样品盘中用波长970nm的红外激光加热去气。使用Alphachom MK II惰性气体质谱仪提取 $^4\text{He}$ ,激光大约900~1000 $^{\circ}\text{C}$ 加热10min,这段时间足以提取磷灰石颗粒中大于99.9%的 $^4\text{He}$ 。提取出的 $^4\text{He}$ 和已知体积的纯的 $^3\text{He}$ 混合后,经过两台SAES AP-10-N 锆铝泵纯化3min以除去 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 等活性气体,最后进入PrismaPlus OMG 220四级杆质谱测试。整个测试的过程都由基于LabView的自动化程序所控制(Evans *et al.*, 2005; 吴林等, 2016; Wu *et al.*, 2021)。通过检测已知含量的标准 $^4\text{He}$ 气体标定矿物中的 $^4\text{He}$ 含量并监测仪器稳定性,较低的仪器本底保证矿物中 $^4\text{He}$ 的分析精度(图2)。将测试完 $^4\text{He}$ 的磷灰石颗粒连同Pt囊一起从样品室中取出,放进小塑料瓶中一囊一管进行溶样。使用Thermo Fisher x-seris II 电感耦合等离子质谱(ICP-MS)测量U和Th同位素。本文中磷灰石(U-Th)/He实验中使用MK-1磷灰石作为标样(Wu *et al.*, 2019, 2021)。通过Gautheron *et al.* (2009)的程序进行 $\alpha$ 粒子射出效应校正(Farley *et al.*, 1996)。

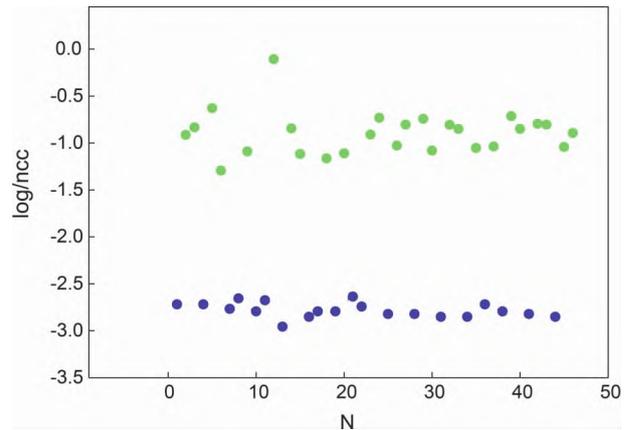


图2 仪器冷本底与磷灰石提取 $^4\text{He}$ 含量对比

蓝色圆形为本底结果,绿色为磷灰石结果

Fig. 2 Comparison of He content between cold blank and apatite extraction

Gray circles are background results and blue apatite results

### 2.2 锆石(U-Th)/He定年

锆石(U-Th)/He实验原理、样品的选择, $^4\text{He}$ 的提取同磷灰石(U-Th)/He实验相同。锆石和磷灰石的提取氦过程步骤相同(图3),但锆石颗粒与磷灰石物理化学性质不同,溶样过程较之更为复杂。将锆石颗粒连同包裹的铌囊转移到350 $\mu\text{L}$  Saville PFA小瓶中,加入浓氢氟酸和25 $\mu\text{L}$   $^{235}\text{U}$ - $^{230}\text{Th}$ 稀释剂( $15 \times 10^{-9}$   $^{235}\text{U}$ 和 $5 \times 10^{-9}$   $^{230}\text{Th}$ ),然后使用高压溶样釜(Parr pressure digestion vessel)进行消解。首先将溶样釜在烘箱中240 $^{\circ}\text{C}$ 加热48h,然后取出溶样小瓶在加热板上65 $^{\circ}\text{C}$ 蒸干氢氟酸;蒸干后的样品加入浓盐酸,使用溶样釜在烘箱中220 $^{\circ}\text{C}$ 加热24h,之后取出溶样小瓶在加热板上65 $^{\circ}\text{C}$ 蒸至剩余50~100 $\mu\text{L}$ 溶液;最后加入Milli-Q超纯水稀释至约350~400 $\mu\text{L}$ 。用同样的流程处理不含矿物颗粒的空白铌囊作为流程本底。所有溶液均在Thermo Fisher X系列II电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)上分析。年龄计算通过Helioplot软件完成(Vermeesch, 2010),并按照Gautheron *et al.* (2009)的程序进行 $\alpha$ 射出校正。使用蓬莱锆石(PL-1)作为标样来验证分析流程(Li *et al.*, 2017; Yu *et al.*, 2020)。

### 2.3 磷灰石裂变径迹定年

裂变径迹测年包括外探测器法(EDM)和激光剥蚀电感耦合等离子体质谱法(LA-ICP-MS),本次研究采用LA-ICP-MS方法,这种方法能够直接测定含U副矿物颗粒的 $^{238}\text{U}$ 含量,从而计算裂变径迹年龄。

将磷灰石颗粒镶嵌到环氧树脂中进行抛光,在5M  $\text{HNO}_3$ 、20 $^{\circ}\text{C}$ 、 $20 \pm 1\text{s}$ 的条件下对抛光后的磷灰石靶片进行蚀刻(Barbarand *et al.*, 2003)。在真空环境下对蚀刻的磷灰石样品靶进行镀金(约5~7nm厚度)来增强抛光表面的内部反射。利用蔡司Axio Imager M2m显微镜对抛光面平行于C

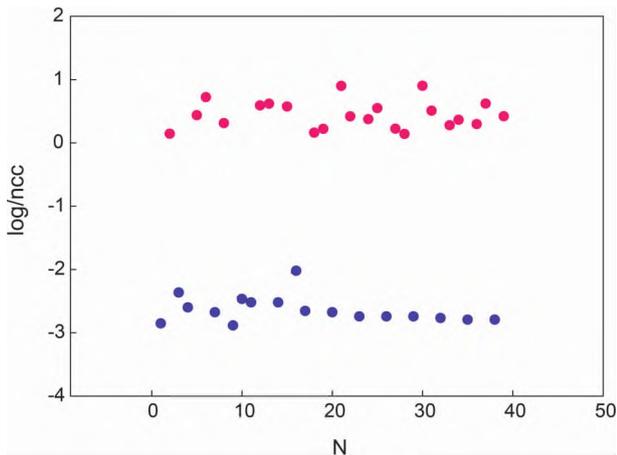


图3 冷本底与锆石提取 He 含量对比  
蓝色圆形为本底结果,红色圆形为锆石结果

Fig. 3 Comparison of He contents between zircon cold background and zircon extraction

Gray circles are background results, and blue are zircon results

轴且径迹分布均匀的磷灰石颗粒拍照。利用 Track Works 软件分别在透射光和反射光下采集高分辨率数字图像,然后在 Fast Tracks 软件上对图像进行裂变径迹密度统计分析 (Gleadow *et al.*, 2015)。

磷灰石颗粒的铀含量是在北京快科赛默公司完成,使用安捷伦 8900 ICP-QQQ 和 ESI New Wave NWR 193<sup>UC</sup> (Two Vol2) 激光剥蚀系统。一级标样和二级标样分别为 NIST SRM 612 玻璃和 Mud Tank 磷灰石。激光剥蚀的条件分别为 25s 剥蚀时间;30 $\mu$ m 激光束斑;3J/cm<sup>2</sup> 能量;5Hz 频率 (Guo *et al.*, 2022)。铀含量的计算采用 Iolite 数据分析软件完成 (Paton *et al.*, 2011)。使用绝对校准计算单颗粒磷灰石裂变径迹年龄 ( $\xi = 2.001 \times 10^3$ )。磷灰石颗粒中间年龄的计算和成图采用 RadialPlotter 软件完成 (Vermeesch, 2009)。

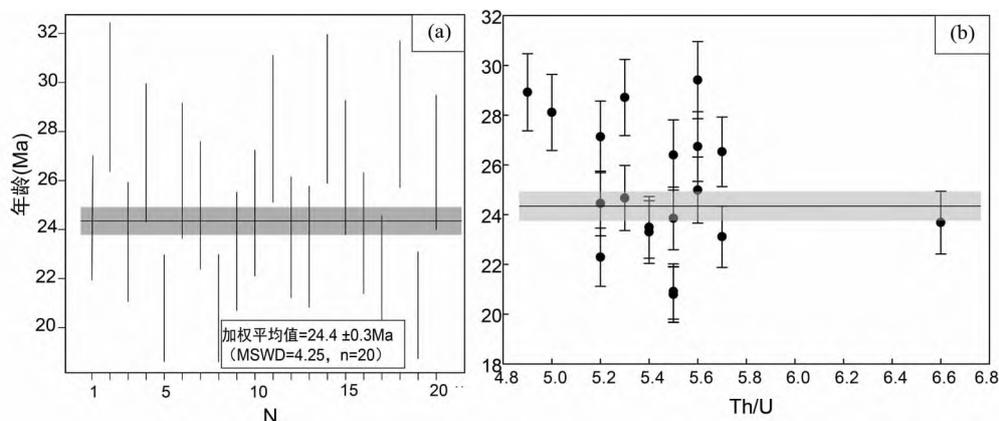


图4 伦坡拉盆地丁青湖组凝灰岩磷灰石 (U-Th)/He 年龄结果(a)及磷灰石 Th/U 与 (U-Th)/He 年龄结果对比(b)

Fig. 4 (U-Th)/He age results (a) of apatite from the Dingqinghu Formation of the Lunpola Basin and comparison of apatite Th/U and (U-Th)/He age (b)

## 2.4 磷灰石 U-Pb 定年

磷灰石 U-Pb 定年分析,在快科赛默科技有限公司完成,采用激光剥蚀等离子体质谱法 (LA-ICP-MS) 分析方法完成,一级标样和二级标样分别为 Madagascar 磷灰石和 McClure Mountain 磷灰石 (Schoene *et al.*, 2006; Thomson *et al.*, 2012)。由于磷灰石 U-Pb 标样都含有一定量的普通铅,且通常是可变的,因此在对孔下分馏和仪器漂移进行校正之前,需要对标样进行普通铅校正 (Xiang *et al.*, 2021)。因此,我们采用 Chew *et al.* (2014) 的 VizualAge\_UcomPbine 数据简化方案进行数据分析,该方案可以去除标样中存在的普通铅,采用 <sup>207</sup>Pb 校正的方法计算单颗粒磷灰石 U-Pb 年龄,单颗粒年龄误差大于 25% 将在最终解释中被排除掉。

## 3 年龄结果

### 3.1 磷灰石 (U-Th)/He 定年实验结果

本次挑选 33 个磷灰石颗粒,排除 13 个数据,伦坡拉样品 (LPL) 的 20 个磷灰石 (U-Th)/He 数据校正后年龄范围从  $20.8 \pm 1.1$  Ma (1SE) 到  $29.4 \pm 1.6$  Ma (1SE),加权平均年龄为  $24.4 \pm 0.3$  Ma (1SE),加权平均方差 MSWD 为 4.25。这些颗粒的 Th/U 比值范围为 4.9 ~ 6.6,平均比值为 5.5。eU 值变化范围为  $18.3 \times 10^{-6}$  ~  $62.1 \times 10^{-6}$  (图 4、表 1),eU 是由 U 含量加 0.235 倍的 Th 含量获得,指示 U 的有效含量,主要用于衡量 U 和 Th 两种放射性同位素衰变参数 (Flowers *et al.*, 2009)。

### 3.2 锆石 (U-Th)/He 定年实验结果

本次挑选 23 个晶形较好的锆石颗粒,获得 23 个年龄,排除 2 个数据。LPL 的 21 个锆石 (U-Th)/He 年龄校正后范围从  $16.1 \pm 1.0$  Ma (1SE) 到  $22.5 \pm 1.3$  Ma (1SE),加权平均年

表1 伦坡拉盆地丁青湖组凝灰岩磷灰石颗粒与锆石颗粒的(U-Th)/He 年龄结果  
Table 1 (U-Th)/He ages of apatite and zircon grains from the Dingqinghu Formation of the Lumpola Basin

测点号	<sup>238</sup> U (mol)	$\pm s$ (mol)	<sup>232</sup> Th (mol)	$\pm s$ (mol)	<sup>4</sup> He (mol)	$\pm s$ (mol)	Age (Ma)	$\pm s$ (Ma)	F <sub>T</sub>	Cor. Age (Ma)	$\pm s$ (Ma)	Th/U	eU (×10 <sup>-6</sup> )
LPL-A1	1.08E-13	2.45E-15	5.66E-13	9.01E-15	4.95E-15	6.26E-17	16.14	0.30	0.660	24.45	1.30	5.2	28.4
LPL-A2	1.12E-13	2.00E-15	6.29E-13	8.70E-15	5.97E-15	7.44E-17	18.06	0.30	0.614	29.41	1.55	5.6	49.3
LPL-A3	2.05E-13	4.02E-15	1.10E-12	1.48E-14	9.59E-15	1.19E-16	16.28	0.27	0.693	23.49	1.24	5.4	39.2
LPL-A4	4.28E-14	6.74E-16	2.20E-13	3.45E-15	2.02E-15	2.73E-17	16.74	0.29	0.617	27.13	1.44	5.2	18.3
LPL-A6	8.36E-14	1.62E-15	4.60E-13	8.52E-15	3.28E-15	4.10E-17	13.43	0.25	0.646	20.79	1.11	5.5	27.7
LPL-A8	6.87E-14	1.53E-15	3.75E-13	5.68E-15	3.14E-15	4.06E-17	15.76	0.29	0.597	26.40	1.41	5.5	34.8
LPL-A9	1.27E-13	2.43E-15	7.14E-13	1.24E-14	5.84E-15	7.41E-17	15.57	0.28	0.623	24.99	1.33	5.6	47.2
LPL-A13	8.38E-14	2.24E-15	4.59E-13	7.64E-15	3.4E-15	4.38E-17	12.87	0.26	0.619	20.79	1.12	5.5	38.2
LPL-A15	1.13E-13	2.40E-15	6.45E-13	1.10E-14	4.98E-15	6.32E-17	14.79	0.27	0.640	23.11	1.23	5.7	41.9
LPL-A16	1.59E-13	3.46E-15	8.45E-13	1.43E-14	7.56E-15	9.39E-17	16.63	0.30	0.674	24.67	1.31	5.3	32.0
LPL-A19	1.41E-13	4.11E-15	7.09E-13	1.22E-14	7.41E-15	1.04E-16	18.92	0.41	0.673	28.11	1.53	5.0	31.4
LPL-A22	1.19E-13	2.39E-15	7.78E-13	1.33E-14	5.75E-15	7.25E-17	14.99	0.27	0.633	23.68	1.26	6.6	45.4
LPL-A23	8.47E-14	1.84E-15	4.60E-13	1.10E-14	3.58E-15	4.57E-17	14.61	0.30	0.627	23.30	1.26	5.4	28.9
LPL-A24	6.90E-14	1.71E-15	3.39E-13	4.97E-15	3.70E-15	4.68E-17	19.55	0.37	0.676	28.92	1.55	4.9	18.8
LPL-A27	1.11E-13	2.23E-15	6.31E-13	9.39E-15	5.75E-15	7.17E-17	17.43	0.30	0.657	26.53	1.40	5.7	35.3
LPL-A28	1.46E-13	2.34E-15	8.09E-13	1.19E-14	6.54E-15	8.35E-17	15.29	0.26	0.641	23.85	1.26	5.5	48.3
LPL-A29	1.46E-13	2.39E-15	7.62E-13	1.03E-14	6.41E-15	8.12E-17	15.49	0.25	0.695	22.29	1.17	5.2	30.9
LPL-A31	1.09E-13	2.44E-15	5.79E-13	8.19E-15	5.21E-15	6.49E-17	16.71	0.30	0.582	28.71	1.53	5.3	62.1
LPL-A32	5.94E-14	9.31E-16	3.24E-13	5.15E-15	2.30E-15	3.06E-17	13.34	0.23	0.638	20.91	1.11	5.5	21.3
LPL-A33	1.73E-13	2.59E-15	9.68E-13	1.30E-14	9.40E-15	1.15E-16	18.45	0.29	0.690	26.74	1.40	5.6	35.0
LPL-Zr3	5.34E-12	1.89E-13	3.25E-12	9.23E-14	1.16E-13	1.38E-15	14.84	0.50	0.716	20.73	1.25	0.6	547.9
LPL-Zr4	1.22E-11	4.32E-13	8.95E-12	2.55E-13	2.22E-13	2.71E-15	12.12	0.40	0.751	16.14	0.97	0.7	983.3
LPL-Zr5	4.78E-12	1.69E-13	3.57E-12	1.05E-13	8.61E-14	1.03E-15	11.97	0.39	0.713	16.79	1.00	0.7	663.6
LPL-Zr6	6.22E-12	2.21E-13	3.97E-12	1.16E-13	1.35E-13	1.65E-15	14.73	0.49	0.772	19.08	1.15	0.6	419.7
LPL-Zr7	7.85E-12	2.78E-13	5.31E-12	1.51E-13	1.67E-13	1.98E-15	14.33	0.47	0.802	17.87	1.07	0.7	280.3
LPL-Zr8	8.64E-12	3.05E-13	4.62E-12	1.33E-13	1.72E-13	2.20E-15	13.80	0.47	0.774	17.83	1.08	0.5	575.0
LPL-Zr9	6.59E-12	2.34E-13	3.66E-12	1.07E-13	1.59E-13	1.88E-15	16.66	0.56	0.741	22.48	1.35	0.6	603.5
LPL-Zr11	2.33E-12	8.23E-14	2.97E-12	8.67E-14	6.03E-14	7.34E-16	15.57	0.48	0.699	22.27	1.31	1.3	387.6
LPL-Zr12	3.67E-12	1.30E-13	2.76E-12	7.89E-14	7.11E-14	8.79E-16	12.86	0.42	0.722	17.81	1.06	0.8	299.6
LPL-Zr14	4.88E-12	1.74E-13	3.64E-12	1.05E-13	1.14E-13	1.34E-15	15.52	0.51	0.741	20.94	1.25	0.7	496.1
LPL-Zr15	4.58E-12	1.62E-13	3.20E-12	9.24E-14	9.88E-14	1.20E-15	14.47	0.48	0.705	20.52	1.23	0.7	608.5
LPL-Zr16	6.63E-12	2.34E-13	5.05E-12	1.46E-13	1.54E-13	1.87E-15	15.39	0.50	0.746	20.63	1.23	0.8	491.8
LPL-Zr17	3.61E-12	1.28E-13	3.94E-12	1.13E-13	6.99E-14	8.41E-16	12.05	0.38	0.719	16.76	0.99	1.1	495.4
LPL-Zr18	2.92E-12	1.04E-13	2.14E-12	6.13E-14	5.91E-14	7.30E-16	13.48	0.45	0.720	18.72	1.13	0.7	274.9
LPL-Zr19	1.65E-11	5.81E-13	6.62E-12	1.90E-13	3.32E-13	4.00E-15	14.35	0.49	0.735	19.52	1.18	0.4	1474.6
LPL-Zr20	5.69E-12	2.05E-13	4.63E-12	1.32E-13	1.37E-13	1.68E-15	15.79	0.52	0.745	21.19	1.27	0.8	516.9
LPL-Zr21	3.63E-12	1.29E-13	2.76E-12	8.17E-14	7.89E-14	9.50E-16	14.40	0.47	0.753	19.12	1.14	0.8	293.4
LPL-Zr22	4.27E-12	1.51E-13	3.14E-12	8.92E-14	9.59E-14	1.17E-15	14.95	0.49	0.731	20.45	1.22	0.7	464.5
LPL-Zr23	3.81E-12	1.35E-13	3.09E-12	8.78E-14	8.15E-14	9.88E-16	14.03	0.46	0.723	19.41	1.16	0.8	411.4
LPL-Zr24	8.01E-12	2.86E-13	4.86E-12	1.40E-13	1.74E-13	2.14E-15	14.84	0.50	0.748	19.84	1.20	0.6	698.4
LPL-Zr25	4.75E-12	7.75E-14	4.51E-12	6.66E-14	1.11E-13	1.33E-15	14.93	0.27	0.715	20.88	1.11	0.9	574.8

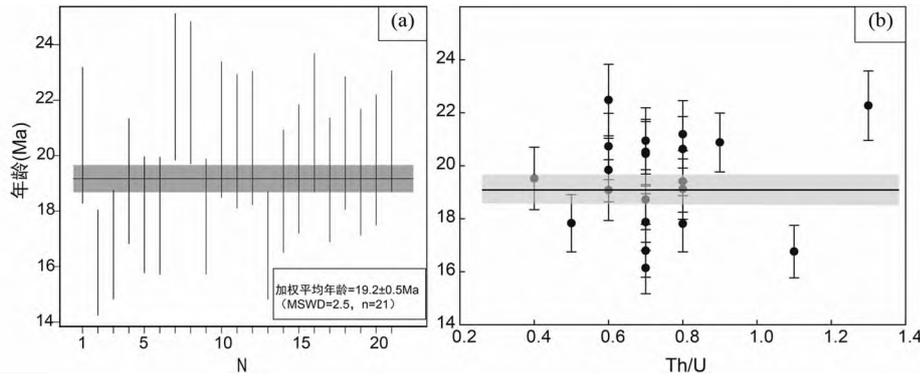


图5 伦坡拉盆地丁青湖组凝灰岩锆石(U-Th)/He 年龄结果(a)及锆石 Th/U 与 (U-Th)/He 年龄结果对比(b)

Fig. 5 (U-Th)/He age of zircon from the Dingqinghu Formation of the Lunpola Basin (a) and comparison of zircon Th/U and (U-Th)/He age (b)

龄为  $19.2 \pm 0.5$  Ma (1SE), MSWD 为 2.5。这些颗粒的 Th/U 比值范围为 0.4 ~ 1.3, 平均比值为 0.7。eU 值变化范围为  $274.9 \times 10^{-6} \sim 1474.6 \times 10^{-6}$  (图 5、表 1)。

### 3.3 磷灰石裂变径迹和 U-Pb 定年分析结果

在磷灰石裂变径迹定年实验中,用 400 个颗粒制靶,在抛光蚀刻后,挑选其中颗粒较大、自形、没有裂隙和包体、径迹数量较多的 68 个颗粒,并在颗粒上圈点。最终年龄去掉 9 个颗粒的年龄,用 59 个年龄投图获得下图,加权平均年龄为  $30.3 \pm 1.4$  Ma,整体的分散度为 31.22% (图 6、表 2),年龄可以划分为两个年龄组来讨论,分别为  $22.8 \pm 0.8$  Ma 和  $39.9 \pm 1.4$  Ma,由磷灰石和锆石 (U-Th)/He 年龄结果来推断,  $22.8 \pm 0.8$  Ma 这一年龄组分应该为凝灰岩冷却结晶年龄,而  $39.9 \pm 1.4$  Ma 这一年龄组分可能是源区的冷却年龄。

### 3.4 磷灰石 U-Pb 定年实验结果

本次磷灰石 U-Pb 定年分析与磷灰石裂变径迹分析同时进行,68 个 U-Pb 分析的颗粒与裂变径迹分析选择的颗粒相同,去除一个明显异常的数据之后 (图 7、表 3), Tera-Wasserburg 谐和图下交点年龄为  $16.3 \pm 13.9$  Ma (MSWD = 0.073, n = 67)。

## 4 讨论

### 4.1 年龄准确度讨论

实验分析得到锆石 (U-Th)/He 加权平均年龄为  $19.2 \pm 0.5$  Ma,磷灰石 (U-Th)/He 加权平均年龄为  $24.4 \pm 0.3$  Ma,磷灰石裂变径迹年龄为  $22.8 \pm 0.8$  Ma,磷灰石 U-Pb 年龄为  $16.3 \pm 13.9$  Ma,与前人研究所获得的丁青湖组凝灰岩年龄 (文一雄等,2016; Mao *et al.*, 2019; 曾胜强等,2020) 一致。

根据不同矿物在不同的年代学体系的封闭温度高低可知,通常同一岩石样品的磷灰石 U-Pb 年龄 > 锆石 (U-Th)/

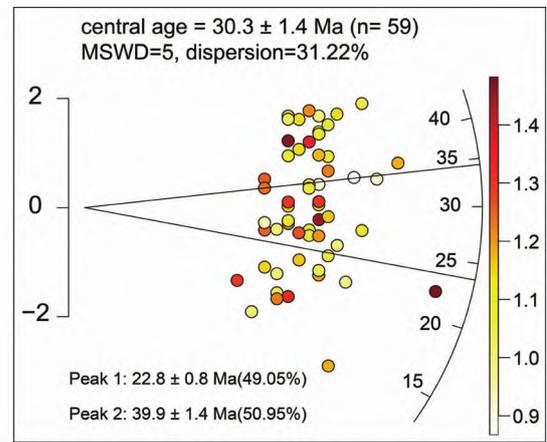


图6 伦坡拉盆地丁青湖组凝灰岩磷灰石裂变径迹年龄结果

Fig. 6 Fission track age results of apatite from the Dingqinghu Formation of the Lunpola Basin

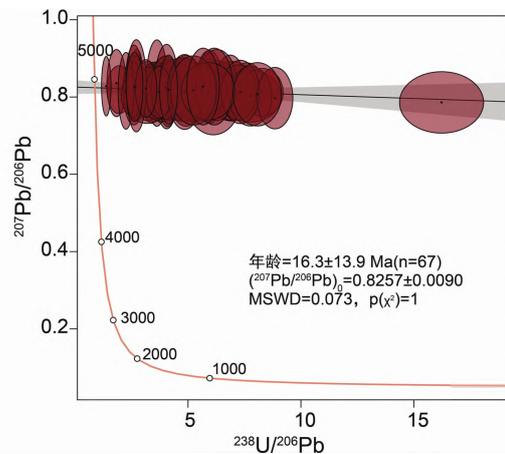


图7 伦坡拉盆地丁青湖组磷灰石 U-Pb 年龄结果

Fig. 7 U-Pb age results of apatite from the Dingqinghu Formation of the Lunpola Basin

表2 伦坡拉盆地丁青湖组凝灰岩磷灰石颗粒裂变径迹年龄结果

Table 2 Fission track age results of apatite particle from the Dingqinghu Formation of the Lunpola Basin

测点号	$N_s$	Area ( $10^{-5} \cdot \text{cm}^2$ )	$\rho_s (10^5 \cdot \text{cm}^{-2})$	$^{238}\text{U} (\times 10^{-6})$	$1\sigma$	D par ( $\mu\text{m}$ )	AFT-Age (Ma)	$1\sigma$
LPL 01	22	6.976	3.153	17.60	0.88	1.18	35.75	7.83
LPL 02	9	4.087	2.202	25.50	1.28	1.31	17.26	5.82
LPL 03	11	6.505	1.691	12.80	0.64	1.12	26.38	8.06
LPL 04	9	7.092	1.269	8.40	0.42	1.16	30.16	10.17
LPL 05	11	3.265	3.369	26.30	1.32	1.09	25.58	7.82
LPL 06	8	4.669	1.713	20.00	1.00	1.04	17.12	6.11
LPL 08	17	7.499	2.267	16.80	0.84	1.11	26.95	6.67
LPL 10	11	4.659	2.361	10.90	0.55	1.32	43.20	13.20
LPL 11	12	5.973	2.009	13.21	0.66	1.11	30.36	8.90
LPL 12	10	2.351	4.253	16.90	0.85	1.14	50.17	16.06
LPL 15	7	3.275	2.137	16.70	0.84	1.24	25.56	9.74
LPL 17	12	6.558	1.830	7.46	0.37	1.00	48.91	14.33
LPL 18	12	7.893	1.520	6.75	0.34	1.05	44.91	13.16
LPL 19	5	3.982	1.256	15.30	0.77	1.29	16.41	7.38
LPL 21	6	4.880	1.229	18.00	0.90	1.01	13.65	5.61
LPL 22	10	3.460	2.890	13.70	0.69	1.14	42.08	13.47
LPL 23	14	4.847	2.889	23.30	1.17	1.00	24.77	6.73
LPL 24	12	4.405	2.724	19.40	0.97	1.43	28.04	8.21
LPL 25	9	3.200	2.810	10.64	0.53	1.16	52.65	17.75
LPL 28	10	5.491	1.821	14.10	0.71	1.26	25.79	8.26
LPL 29	9	2.773	3.245	15.72	0.79	1.10	41.18	13.88
LPL 30	15	12.20	1.230	11.77	0.59	0.99	20.88	5.49
LPL 31	13	6.154	2.112	10.82	0.54	1.13	38.94	10.98
LPL 32	7	2.727	2.567	26.00	1.30	1.15	19.73	7.52
LPL 33	13	4.344	2.993	16.53	0.83	1.22	36.13	10.18
LPL 34	13	6.412	2.027	14.18	0.71	1.16	28.54	8.04
LPL 35	12	2.637	4.551	22.90	1.15	1.17	39.65	11.62
LPL 36	13	7.529	1.727	14.80	0.74	1.06	23.31	6.57
LPL 37	8	6.693	1.195	12.30	0.62	1.01	19.41	6.93
LPL 38	11	5.435	2.024	7.84	0.39	1.21	51.46	15.73
LPL 40	9	3.469	2.595	10.02	0.50	1.03	51.62	17.40
LPL 41	7	4.981	1.405	10.42	0.52	0.95	26.93	10.27
LPL 42	12	6.675	1.798	10.60	0.53	0.93	33.86	9.92
LPL 43	9	3.665	2.456	18.10	0.91	1.22	27.10	9.13
LPL 44	8	4.398	1.819	14.00	0.70	1.01	25.95	9.27
LPL 45	13	5.125	2.537	11.03	0.55	1.07	45.87	12.93
LPL 46	17	5.481	3.102	12.90	0.65	1.05	47.94	11.87
LPL 47	9	2.703	3.330	14.70	0.74	1.45	45.17	15.23
LPL 48	9	5.325	1.690	10.90	0.55	1.29	30.95	10.43
LPL 49	12	7.234	1.659	12.90	0.65	1.20	25.69	7.53
LPL 50	14	5.423	2.581	10.80	0.54	1.14	47.65	12.96
LPL 52	7	2.264	3.091	16.90	0.85	1.25	36.50	13.92
LPL 53	11	2.564	4.291	25.20	1.26	1.10	33.99	10.39
LPL 54	11	4.067	2.705	16.20	0.81	1.09	33.33	10.19
LPL 55	12	5.385	2.228	14.40	0.72	1.29	30.89	9.05
LPL 57	12	4.821	2.489	23.90	1.20	1.19	20.81	6.10
LPL 58	28	5.178	5.407	48.80	2.44	1.46	22.14	4.33
LPL 59	13	6.973	1.864	28.20	1.41	1.18	13.21	3.72
LPL 60	19	6.446	2.947	17.40	0.87	0.93	33.81	7.94
LPL 61	10	4.657	2.147	19.50	0.98	1.16	22.00	7.04
LPL 62	16	5.523	2.897	16.80	0.84	0.89	34.42	8.77
LPL 63	10	3.965	2.522	7.61	0.38	1.28	65.98	21.12
LPL 64	9	3.878	2.321	16.80	0.84	1.10	27.59	9.30
LPL 65	7	4.489	1.559	9.08	0.45	1.23	34.27	13.07
LPL 66	8	7.931	1.009	12.24	0.61	1.22	16.48	5.88
LPL 67	12	4.357	2.754	25.80	1.29	1.04	21.33	6.25
LPL 68	12	7.228	1.660	7.46	0.37	1.11	44.38	13.00

注: $N_s$  为自发裂变径迹总数量; $\rho_s$  为自发裂变径迹密度

表3 伦坡拉盆地丁青湖组凝灰岩磷灰石颗粒的U-Pb年龄结果

Table 3 U-Pb age of apatite particles from the Dingqinghu Formation of the Lumpola Basin

测点号	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2s	$^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$	2s	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2s	Age $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ (Ma)	2s	Age $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ (Ma)	2s
LPL 01	19.2	1.6	6.12	0.52	0.799	0.039	1042	87	3021	76
LPL 02	15.3	0.8	7.59	0.33	0.819	0.028	819	36	2827	51
LPL 03	31.5	3.0	3.99	0.33	0.819	0.033	1560	120	3486	96
LPL 04	42.2	1.8	2.73	0.12	0.837	0.035	2037	82	3812	43
LPL 05	15.4	1.2	7.76	0.54	0.802	0.027	835	55	2802	70
LPL 06	20.6	1.7	5.97	0.49	0.823	0.027	1064	82	3096	85
LPL 07	17.1	1.3	6.93	0.46	0.815	0.031	891	57	2911	63
LPL 08	24.2	1.4	4.92	0.31	0.814	0.029	1246	74	3250	58
LPL 09	69.8	7.8	1.95	0.22	0.819	0.025	3040	280	4240	110
LPL 10	33.0	2.0	3.64	0.23	0.820	0.025	1633	90	3554	59
LPL 11	25.0	0.8	4.63	0.17	0.828	0.030	1275	42	3301	31
LPL 12	24.5	1.9	4.90	0.36	0.816	0.026	1273	87	3262	77
LPL 13	38.0	2.7	3.23	0.26	0.815	0.031	1880	130	3679	74
LPL 14	32.4	2.1	3.62	0.19	0.836	0.045	1601	77	3545	63
LPL 15	27.0	3.6	4.89	0.48	0.813	0.031	1360	140	3290	110
LPL 16	68.8	5.5	1.83	0.17	0.836	0.035	3000	200	4270	84
LPL 17	43.7	2.1	2.62	0.14	0.809	0.025	2120	110	3847	46
LPL 18	47.1	2.1	2.44	0.11	0.806	0.022	2254	86	3918	44
LPL 19	22.3	0.9	5.16	0.25	0.816	0.030	1164	53	3185	41
LPL 21	19.5	0.9	5.94	0.25	0.826	0.038	1022	38	3055	43
LPL 22	28.7	1.9	4.05	0.21	0.827	0.044	1438	66	3430	69
LPL 23	16.9	0.7	6.87	0.28	0.824	0.034	888	32	2915	41
LPL 24	18.8	1.1	6.28	0.36	0.831	0.037	978	50	3032	53
LPL 25	32.6	1.7	3.55	0.18	0.82	0.027	1620	65	3549	49
LPL 26	45.5	3.4	2.60	0.19	0.817	0.036	2160	110	3856	86
LPL 27	86.5	5.1	1.38	0.085	0.828	0.031	3590	170	4512	60
LPL 28	25.6	1.4	4.48	0.28	0.814	0.030	1330	77	3335	54
LPL 29	21.6	1.1	5.31	0.23	0.810	0.030	1126	44	3158	50
LPL 30	27.0	1.4	4.24	0.22	0.805	0.026	1397	63	3361	55
LPL 31	34.4	2.0	3.39	0.18	0.809	0.031	1714	86	3599	54
LPL 32	13.9	0.6	8.29	0.37	0.812	0.025	755	31	2730	41
LPL 33	21.0	1.0	5.32	0.24	0.811	0.027	1133	49	3132	46
LPL 34	24.1	0.9	4.83	0.17	0.830	0.029	1226	41	3263	37
LPL 35	15.7	0.7	7.24	0.31	0.811	0.029	848	34	2854	40
LPL 36	23.1	1.1	5.03	0.27	0.824	0.030	1201	61	3218	47
LPL 37	29.6	1.6	4.04	0.22	0.828	0.026	1482	70	3451	55
LPL 38	43.0	2.0	2.73	0.12	0.824	0.034	2057	80	3828	45
LPL 39	45.3	2.7	2.61	0.15	0.840	0.038	2100	100	3875	57
LPL 40	33.2	1.4	3.45	0.13	0.814	0.027	1659	57	3581	40
LPL 41	33.8	1.2	3.43	0.12	0.814	0.028	1675	55	3595	35
LPL 42	36.0	3.1	3.57	0.32	0.816	0.030	1760	140	3614	88
LPL 43	23.0	1.9	5.51	0.49	0.816	0.026	1188	92	3163	87
LPL 44	24.0	1.3	4.92	0.28	0.822	0.030	1244	64	3254	54
LPL 45	30.4	1.4	3.80	0.16	0.808	0.030	1532	60	3483	46
LPL 46	27.8	1.5	4.10	0.17	0.810	0.035	1430	60	3389	53
LPL 47	28.4	3.1	4.75	0.52	0.819	0.033	1440	150	3360	110
LPL 48	46.3	5.9	3.18	0.46	0.804	0.029	2200	240	3780	140
LPL 49	29.9	2.0	4.01	0.26	0.824	0.033	1484	81	3455	63
LPL 50	31.5	1.9	3.71	0.23	0.812	0.027	1578	82	3517	65
LPL 51	45.1	1.9	2.60	0.12	0.819	0.029	2156	85	3883	40
LPL 52	20.1	0.9	5.71	0.25	0.813	0.030	1065	43	3083	42
LPL 53	14.4	0.6	7.77	0.38	0.802	0.031	802	38	2779	44

续表 3

Continued Table 3

测点号	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2s	$^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$	2s	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2s	Age $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ (Ma)	2s	Age $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ (Ma)	2s
LPL 54	24.4	1.8	4.91	0.31	0.816	0.037	1259	71	3246	70
LPL 55	24.1	1.7	4.85	0.31	0.813	0.039	1262	84	3235	70
LPL 56	52.9	4.1	2.25	0.14	0.816	0.040	2440	130	4021	74
LPL 57	15.6	0.7	7.32	0.34	0.813	0.033	850	36	2838	42
LPL 58	6.9	0.3	16.23	0.76	0.786	0.032	394	19	2089	45
LPL 59	12.6	0.5	8.85	0.32	0.797	0.032	703	23	2648	36
LPL 60	18.8	1.1	6.16	0.33	0.827	0.040	989	49	3015	57
LPL 61	21.2	1.7	5.89	0.48	0.815	0.030	1116	88	3099	76
LPL 62	22.5	1.4	5.24	0.41	0.817	0.036	1217	94	3192	61
LPL 63	42.8	2.9	2.71	0.18	0.829	0.048	2090	120	3836	77
LPL 64	20.5	1.0	5.67	0.29	0.827	0.040	1086	52	3107	50
LPL 65	38.3	2.3	3.14	0.19	0.822	0.030	1877	98	3694	62
LPL 66	27.7	1.1	4.14	0.16	0.819	0.036	1417	49	3396	41
LPL 67	14.1	0.7	8.07	0.43	0.807	0.033	773	36	2740	46
LPL 68	44.4	2.4	2.63	0.15	0.826	0.036	2120	100	3862	53

He 年龄 > 磷灰石裂变径迹年龄 > 磷灰石 (U-Th)/He 年龄。对于火山岩样品,随着岩浆喷出快速冷却结晶,不同年代学体系封闭温度应该一致。但是在本文中年龄结果顺序却是磷灰石 (U-Th)/He 定年 > 磷灰石裂变径迹定年 > 锆石 (U-Th)/He 定年 > 磷灰石 U-Pb 定年,顺序变得混乱。对此现象,作者认为可能是由于火山灰中原本磷灰石和锆石含量都较少,从火山漂浮到达降落点,降落点当时的岩性为基性、超基性岩石,内部含有磷灰石却少有锆石,在火山灰降落成岩过程中,有来自周围岩石的磷灰石加入,却少有锆石加入,造成如今的年龄结果。对此猜想有一定的佐证,在实验选样过程中,火山灰中的磷灰石含量远远高于锆石;现如今采样点的岩性柱(图 1d)中岩性多为泥岩、粉砂岩、砂岩等(王代春, 2021),而基性、超基性岩的抗风化能力低于酸性岩(刘德成和王卫东, 2023),也认为采样点附近原岩可能为锆石含量极少的基性、超基性岩。

单颗粒年龄会被很多因素影响,例如,富 U 和富 Th 包裹体、流体包裹体、晶体大小的影响、 $\alpha$  粒子射出校正、U 和 Th 不均匀分布、 $\alpha$  粒子的外植入、以及当样品缓慢冷却或停留在 He 部分保留区时,由于扩散引起的晶体内 He 浓度分布的改变以及 $^{147}\text{Sm}$ 生成的  $\alpha$  粒子等,这些原因都会造成年龄的分散(Fitzgerald *et al.*, 2006),下面分别讨论这些影响因素。

#### 4.1.1 样品质量和富 U、Th 包裹体

在 (U-Th)/He 定年和年龄重现性的研究中,一个重要的影响因素是富 U 和 Th 包裹体的存在。在未被发现的情况下,富 U 和富 Th 包裹体的存在通常会导致年龄偏老。例如在磷灰石颗粒中有锆石包裹体的存在,用激光加热磷灰石颗粒获得 $^4\text{He}$  时,锆石同样会释放 $^4\text{He}$ ,在对磷灰石进行溶样过程中,因锆石和磷灰石溶样所使用的酸种类不同,锆石包裹体未能溶解,这导致 $^4\text{He}$  含量比正常值大,而 U、Th 含量与正常值相近,最终数据结果会偏大。所以在一个样品的多个单

晶年龄的情况下,明显的异常值的存在也可能表明包裹体的存在。

本论文实验中挑选的颗粒均是自形四边形或六边形颗粒,岩石类型为凝灰岩,其中磷灰石和锆石颗粒尺寸较小,在光学显微镜下无法观察到其中的微包裹体。如果富 U、Th 的包裹体较大,那么在双目镜下挑选颗粒时,就会规避这些含有富 U、Th 的包裹体。但是如果包裹体较小,在双目镜下无法观察到,只能用 CL 和 BSE 才能观察到,这在实验中是无法避开的。本次工作虽对 (U-Th)/He 年龄进行了多次分析,但仍不具有重现性,所以最终数据是可能会因为富 U、Th 微包裹体的存在而受到影响。

#### 4.1.2 流体包裹体

流体包裹体是来自地幔或地壳源的岩浆或变质流体的已知来源,可能具有显著的放射性成因 $^4\text{He}$  组分。对于磷灰石或锆石等富含 U、Th 的矿物,可能需要高密度的包裹体或流体中较高的 He 含量才能影响 (U-Th)/He 年龄,当年龄很年轻时不受影响。包裹体中的 $^4\text{He}$  被认为是引入的,由此产生的磷灰石 (U-Th)/He 年龄将是异常老的。几项研究将异常老 (U-Th)/He 年龄归因于流体包裹体中过量 $^4\text{He}$  的存在。

但是在本次实验过程中,首先在碎样阶段按照多次多粒径进行破碎,将不同种类矿物颗粒完全分开,在双目镜下挑选颗粒时,已经避开选择有包裹体的磷灰石和锆石颗粒,所以认为实验颗粒有流体包裹体不是导致单晶年龄变化的原因。

#### 4.1.3 $\alpha$ 射出校正和 U、Th 分带

磷灰石和锆石中由 U 和 Th 放射性同位素产生的  $\alpha$  粒子会有一个初始的动能 (8MeV),需要大概运动  $20\mu\text{m}$  才能停止。那么,颗粒边缘约为  $20\mu\text{m}$  的 U、Th 生成的  $\alpha$  粒子就会从颗粒射出,导致颗粒最终提取的 $^4\text{He}$  较少, $20\mu\text{m}$  也被称为停止距离(图 8;Farley *et al.*, 1996)。

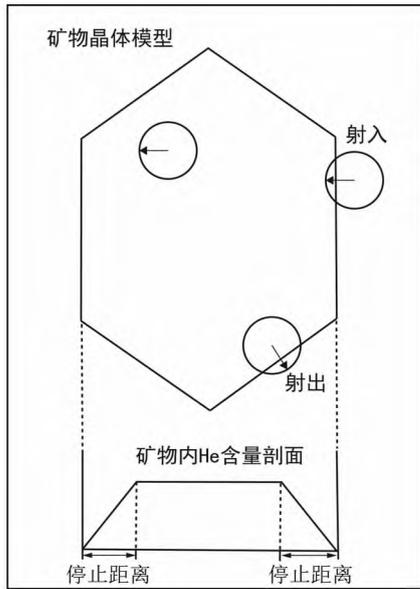


图8 α粒子的射出和射入效应(据常远等,2010)  
Fig.8 The ejection and entry effects of alpha particles (after Chang *et al.*, 2010)

α粒子射出效应的校正的最终目的就是计算出产生停止在晶体内部的α粒子的这部分母体核素占总的U、Th含量的百分比(记为 $F_T$ )。经过 $^4\text{He}$ 、 $^{238}\text{U}$ 、 $^{235}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 的原子数计算出的原始年龄( $t_{\text{raw}}$ )必须经过因子 $1/F_T$ 通过下面的公式校正得到正确的年龄( $t_{\text{corr}}$ ):

$$t_{\text{corr}} = t_{\text{raw}} (1/F_T) \quad (\text{Farley and Stockli, 2002})$$

如果待测的矿物周围有富含U、Th的矿物,那么矿物晶体中的U、Th衰变产生的 $^4\text{He}$ 可能会射入到待测的矿物内,导致最终得到的年龄偏老(图9)。但是矿物颗粒在岩石中如何分布,在本次实验中是无法了解的,即使了解颗粒在岩石中三维附近有高U、Th颗粒,也是很难将周围有高U、Th颗粒的待测颗粒排除。所以这个假设造成的误差实验是无法避免的。

当磷灰石和锆石颗粒边缘U、Th含量高、中心含量低时,较多的 $^4\text{He}$ 被射出, $F_T$ 变小,但仍然以U、Th分布均匀来计算 $F_T$ ,会导致计算的 $^4\text{He}$ 变小,最终年龄变年轻。当晶体颗粒中心U、Th含量较高,边缘含量较低时,会导致校正的 $^4\text{He}$ 变多,年龄变老。

#### 4.1.4 颗粒尺寸

在相同的冷却速率下(如 $10^\circ\text{C}/\text{Myr}$ ),宽度为 $60\mu\text{m}$ 的晶体的封闭温度约为 $70^\circ\text{C}$ ,而宽度为 $80\mu\text{m}$ 的晶粒的封闭温度约为 $73^\circ\text{C}$ 。在本次实验中磷灰石颗粒的宽度在 $61\sim 96\mu\text{m}$ ,锆石颗粒的宽度在 $60\sim 91\mu\text{m}$ (图10、图11)。所以在不同颗粒因为尺寸不同,会造成封闭温度不同,造成本身开始留存子体同位素的时间不同,最终实验年龄分散性会变大。

颗粒尺寸不仅会造成封闭温度不同,还会造成 $F_T$ 误差较大。因为停止距离约为 $20\mu\text{m}$ ,实验中 $90\mu\text{m}$ 的颗粒的 $F_T$ 普遍大于 $60\mu\text{m}$ 的颗粒,即 $60\mu\text{m}$ 颗粒有大量He没有留存在颗粒中,只是通过模型模拟估算最初生成的He含量。这样实验也会因颗粒太小, $F_T$ 有很大的误差,最终导致年龄不

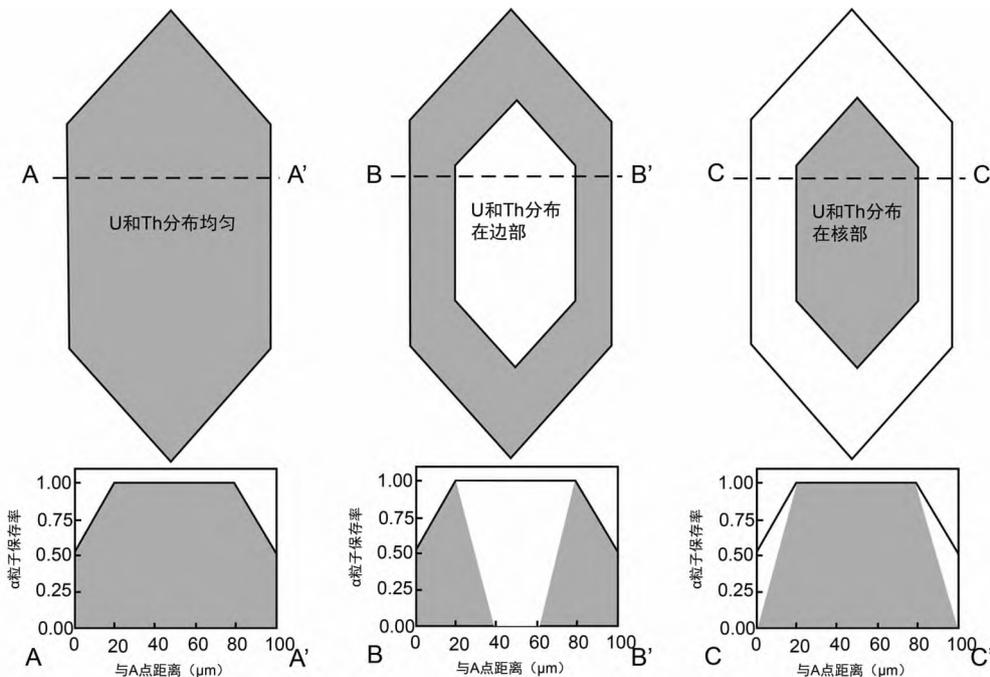


图9 磷灰石与锆石中U、Th分布不均时α粒子保存率示意图(据Fitzgerald *et al.*, 2006)  
Fig.9 Schematic diagram of α particle retention rate in apatite and zircon with uneven distribution of U and Th (after Fitzgerald *et al.*, 2006)

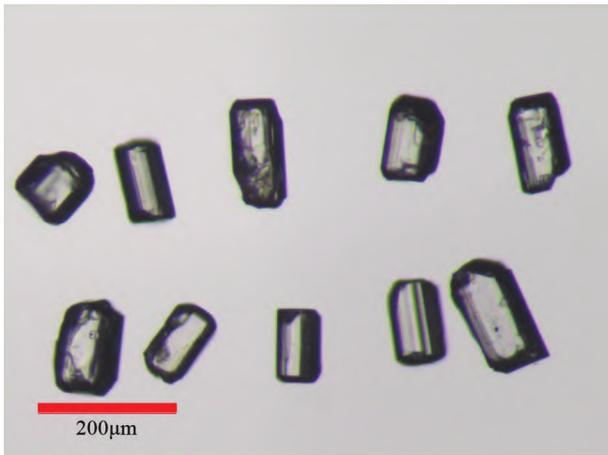


图 10 伦坡拉盆地丁青湖组凝灰岩磷灰石宽度与长度测量部分结果

Fig. 10 Width and length measurement section results of apatite from the Dingqinghu Formation of the Lunpola Basin

正确。

#### 4.1.5 $^{147}\text{Sm}$ 的贡献

$^{147}\text{Sm}$  也会放射生成  $\alpha$  粒子,但是在实验中只测量 U、Th 并没有计算 Sm 含量,也会对最终年龄有一定的影响。但由于由  $^{147}\text{Sm}$  产生的  $^4\text{He}$  很少,其对年龄的贡献仅在矿物中的 U 含量少于  $5 \times 10^{-6}$  时才会大于 5%,所以对在最终年龄的影响还是较小的。

#### 4.2 LPL 磷灰石作为 (U-Th)/He 定年参考材料的潜力及其有效性

潜在的地质年代学标样最重要的要求是其结构和成分是否具有的一致性。使用 LA-ICP-MS 进行的 U 和 Th 测量没有发现母体同位素存在明显的空间变化,且在进行裂变径迹分析时,径迹数量和统计和径迹密度观测表明,磷灰石颗粒

内部 U 含量较均匀。径迹的开口基本上平行于 c 轴,但是我们本次试验中的磷灰石颗粒径迹数量较少,基本存在 5 ~ 20 条径迹,因为径迹数量较少,在激光圈点时,激光点位置的选择会造成不一样的结果 (Hendriks and Redfield, 2005),这也表明 LPL 磷灰石不适合作为裂变径迹定年的标样。

$^4\text{He}$  的分布也是一个重要的指标,一个好的 He 定年标样 (U-Th)/He 的 U 和 Th 的均匀分布可能会受到  $^4\text{He}$  异质性的影响。然而,在论文中磷灰石和锆石 (U-Th)/He 实验, LPL 磷灰石的  $^4\text{He}$  浓度均为  $32.3 \pm 2.1 \text{ nmol} \cdot \text{g}^{-1}$ 。论文中磷灰石 U-Pb 年龄结果误差较大,推断是受到普通铅的影响,所以 LPL 磷灰石不能作为 U-Pb 定年标样。

国际上的低温热年代学实验室目前有几种广泛使用的磷灰石标准样品。本文主要将 LPL 磷灰石的年龄结果与 MK-1 (Wu *et al.*, 2021)、Durango 磷灰石 (吴林等, 2016) 和林贝格 (Limberg t3 tuff) 磷灰石 (Kraml *et al.*, 2006) 作对比来比较上述标样与 LPL 的年龄重现性。20 个 LPL 磷灰石颗粒的加权平均年龄为  $24.4 \pm 0.3 \text{ Ma}$ , MSWD 为 4.25。21 个 MK-1 磷灰石颗粒的加权平均年龄为  $17.9 \pm 0.2 \text{ Ma}$ , MSWD 为 0.089; 20 个 Durango 磷灰石样品的平均年龄为  $31.1 \pm 0.2 \text{ Ma}$ , MSWD 为 4.62。林贝格 t3 凝灰岩磷灰石的平均值为  $17.2 \pm 0.2 \text{ Ma}$ , MSWD 为 1.76 (图 12)。LPL 磷灰石年龄结果重现性较差,年龄太过分散,不能作为磷灰石 (U-Th)/He 定年标样。

#### 4.3 LPL 锆石作为 (U-Th)/He 定年标准样品的潜力及其有效性

结构和成分的均匀性是样品能否成为潜在 (U-Th)/He 标准样品的重要要求。在中国科学院地质与地球物理研究所电子探针与扫描电镜实验室获得锆石 CL 图像,其中锆石颗粒形状自形,环带呈同心振荡带,结果表明锆石颗粒的同质性明显 (图 11)。(U-Th)/He 测年法得到的 Th/U 比值在 0.4 ~ 1.3,平均比值为 0.7,呈高斯分布,结合上述结构和

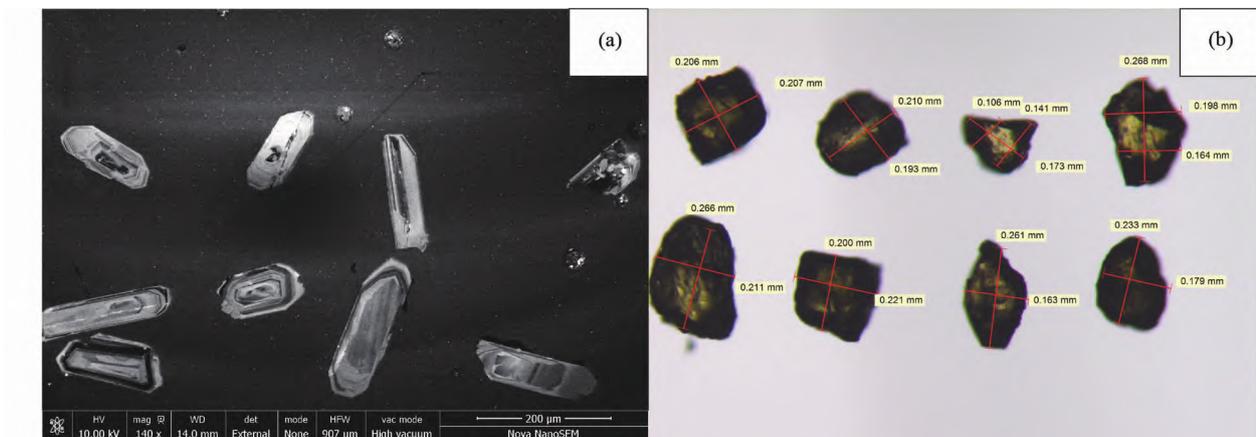


图 11 伦坡拉盆地丁青湖组凝灰岩锆石 (a) 与 FCT 锆石颗粒 (b) 尺寸对比

Fig. 11 Size comparison between zircon from the Dingqinghu Formation of the Lunpola Basin (a) and FCT zircon particle (b)

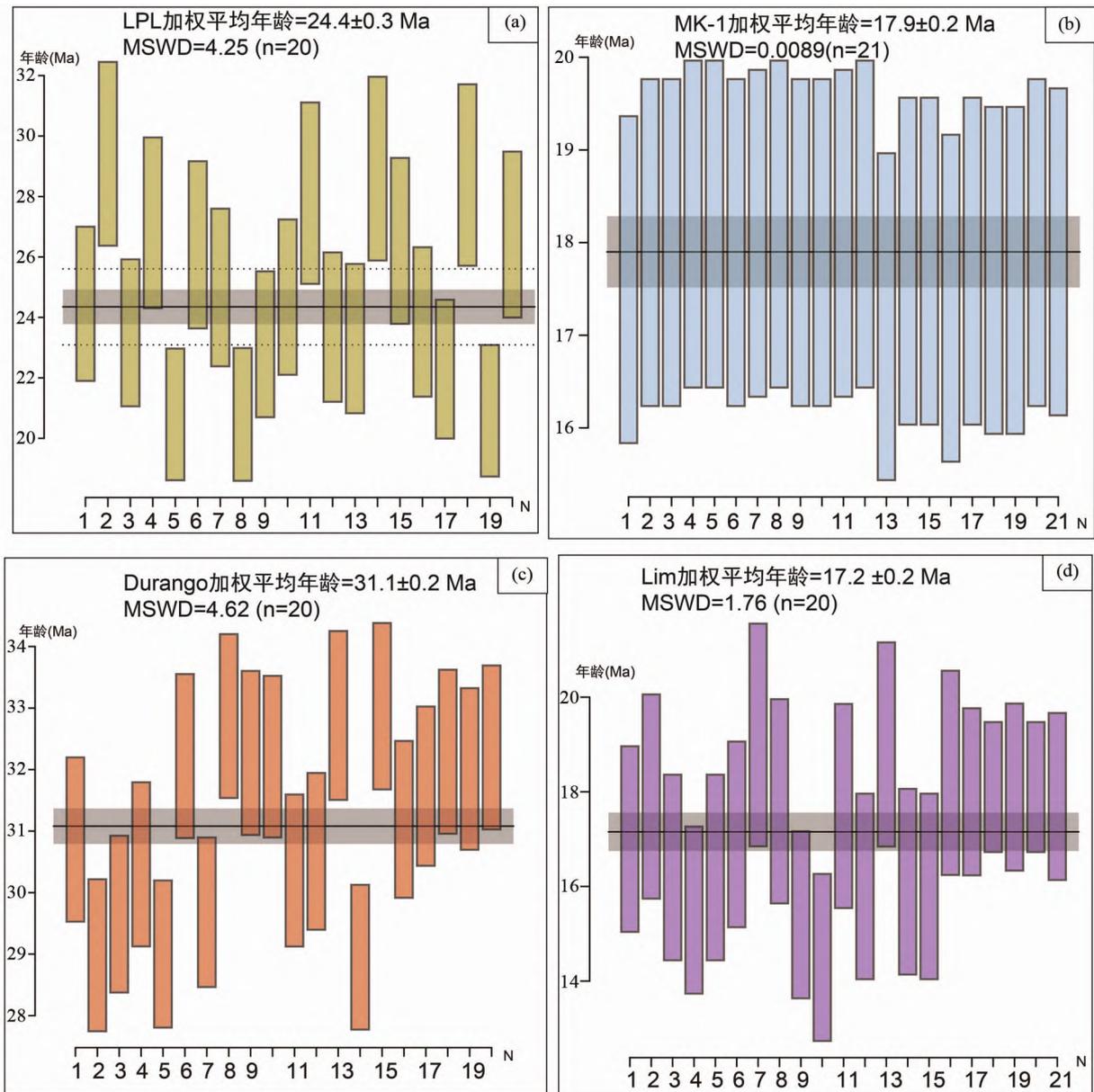


图 12 伦坡拉盆地丁青湖组凝灰岩 (LPL) 磷灰石 (a) 与 MK-1 磷灰石 (b)、Durango 磷灰石 (c)、林贝格磷灰石 (d) 年龄对比  
Fig. 12 Age comparison of apatite from the Dingqinghu Formation of the Lunpola Basin (a) with MK-1 apatite (b), Durango apatite (c) and Limberg apatite (d)

化学结果, LPL 锆石是可作为 (U-Th)/He 定年的均质标准样品。将 LPL 锆石与蓬莱锆石 (Yu *et al.*, 2020) 和 FCT 锆石 (王英等, 2019) 作对比, 来进一步判别其成为标样的可能性。

因为蓬莱锆石是将巨晶破碎, 然后一个巨晶破碎的碎片作为一个样品进行实验, 所以蓬莱锆石颗粒较大。因为 LPL 锆石颗粒较小, 所以实验样品并不是像 PL 锆石那样的巨晶碎片, 而是完整的锆石颗粒。PL 锆石颗粒较大, 不需要进行  $\alpha$  射出校正, 所以误差较小, 其 BSE 和 CL 图像显示其 U 和 Th 分布均匀, 具有较低的 U 和  $^4\text{He}$  含量, 一般作为年轻的、低 U 含量的锆石 (U-Th)/He 定年的标准样品 (Li *et al.*, 2017;

Yu *et al.*, 2020)。LPL 锆石的 CL 图中可以看出有微弱的 U、Th 分带。蓬莱锆石选自于碱性玄武岩中富含巨晶, LPL 锆石是选自凝灰岩。因为 LPL 锆石和 PL 锆石是快速喷发, 所以在封闭温度内停留时间较短, 年龄结果误差小, 并且岩石中颗粒与颗粒之间年龄相差较小, 可以作为标样的颗粒数量较大, 并且可以通过颗粒的年龄获得岩石喷发的年龄, 拥有地质意义。

Fish Canyon 凝灰岩锆石具有良好的 U-Pb 数据、(U-Th)/He 数据、同位素组成和晶体结构特征, (U-Th)/He 实验加权平均年龄为  $28.2 \pm 0.3$  Ma, MSWD 为 2.8 (图 13)。FCT

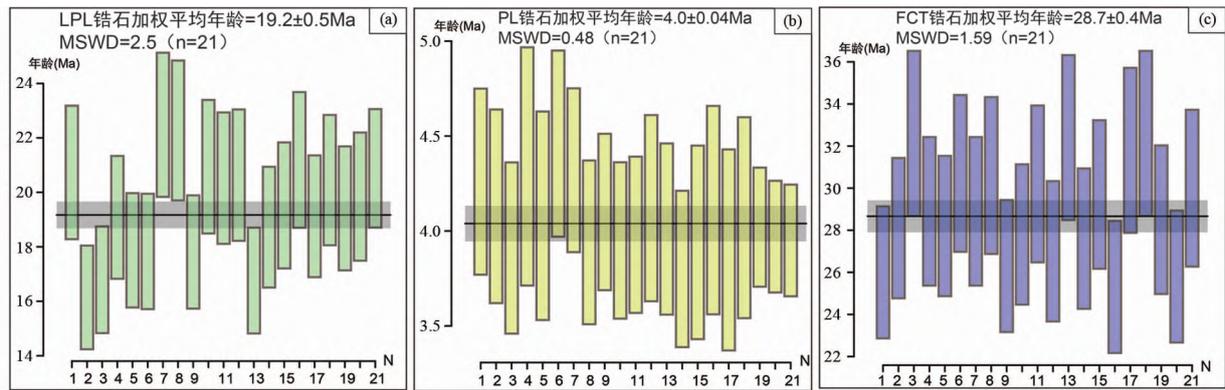


图 13 伦坡拉盆地丁青湖组凝灰岩锆石(a)与 PL 锆石(b)、FCT 锆石(c)年龄对比

Fig. 13 Age comparison of zircon from the Dingqinghu Formation of the Lunpola Basin (a) with PL zircons (b) and FCT zircons (c)

锆石的误差较大,其 Th/U 比值和年龄的变化范围超出了分析不确定度。这些限制了 FCT 锆石作为 (U-Th)/He 定年标准样品的使用 (Li *et al.*, 2017)。FCT 锆石颗粒宽度比 LPL 锆石要大 (图 11),但是 LPL 颗粒的自形程度要高于 FCT 锆石。FCT 锆石通过 CL 图和 BSE 图像可以观察到明显的 U 和 Th 分带以及碱长石、磷灰石和石英包裹体;LPL 锆石中包裹体较少,U、Th 分带弱。

理想的锆石 (U-Th)/He 定年标样应产生可重现的 (U-Th)/He 年龄,矿物颗粒尺寸应较大,不含包裹体,U 和 Th 分布均匀,可以减少  $\alpha$  射出和扩散对 (U-Th)/He 年龄的影响,样品数量应较多,可供用户广泛使用。LPL 锆石颗粒自形,年龄重现性好 (图 13),因火山成因形成,所以凝灰岩在采样点分布较广,岩石中锆石颗粒丰富,U 和  $^4$ He 含量较少,锆石年龄小,包裹体较少,结构和化学成分均匀一致,分带弱而宽,综上,LPL 锆石可以成为潜在的 (U-Th)/He 标准样品。

## 5 结论

论文选择伦坡拉盆地丁青湖组凝灰岩作为研究样品,对其中的磷灰石、锆石进行年代学研究,得到结果为:LPL 的 21 个锆石颗粒 (U-Th)/He 加权平均年龄为  $19.2 \pm 0.5$  Ma (1s),加权平均方差 MSWD 为 2.5。LPL 磷灰石 (U-Th)/He 加权平均年龄为  $24.4 \pm 0.3$  Ma (1s),MSWD 为 4.25,磷灰石裂变径迹年龄为  $22.8 \pm 0.8$  Ma,LPL 磷灰石 U-Pb 年龄为  $16.3 \pm 13.9$  Ma,MSWD 为 0.29。

LPL 锆石的 (U-Th)/He 的年龄测定结果较为集中,重现性较好。由于锆石颗粒 (地幔捕虏体) 被岩浆迅速带出地表,且锆石 (U-Th)/He 体系封闭温度较低 ( $\sim 190^\circ\text{C}$ ),所以锆石 (U-Th)/He 年龄可作为火山喷发年龄的代表。由于伦坡拉锆石数量充足、晶体自形程度高、多呈弱分带、快速冷却、(U-Th)/He 年龄一致,我们认为伦坡拉锆石适合作为 (U-Th)/He 同位素年代学的锆石标准样品。

**致谢** 感谢中国科学院地质与地球物理研究所岩矿制样与分析实验室的郭倩老师在矿物分选过程中提供的帮助。审稿人和编辑对本文提出了宝贵的修改意见,在此表示衷心的感谢。

## References

- Barbarand J, Carter A, Wood I and Hurford T. 2003. Compositional and structural control of fission-track annealing in apatite. *Chemical Geology*, 198(1-2): 107-137
- Chang Y, Xu CH and Zhou ZY. 2010. (U-Th)/He dating method:  $\alpha$ -ejection influence and correction. *Advances in Earth Science*, 25(4): 418-427 (in Chinese with English abstract)
- Chew DM, Petrus JA and Kamber BS. 2014. U-Pb LA-ICPMS dating using accessory mineral standards with variable common Pb. *Chemical Geology*, 363: 185-199
- Dazé A, Lee JKW and Villeneuve M. 2003. An intercalibration study of the Fish Canyon sanidine and biotite  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  standards and some comments on the age of the Fish Canyon Tuff. *Chemical Geology*, 199(1-2): 111-127
- Dobson KJ, Stuart FM and Dempster TJ. 2008. U and Th zonation in Fish Canyon Tuff zircons: Implications for a zircon (U-Th)/He standard. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(19): 4745-4755
- Evans NJ, Byrne JP, Keegan JT and Dotter LE. 2005. Determination of uranium and thorium in zircon, apatite and fluorite: Application to laser (U-Th)/He thermochronology. *Journal of Analytical Chemistry*, 60(12): 1159-1165
- Farley KA, Wolf RA and Silver LT. 1996. The effects of long alpha-stopping distances on (U-Th)/He ages. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(21): 4223-4229
- Farley KA and Stockli DF. 2002. (U-Th)/He dating of phosphates: Apatite, monazite, and xenotime. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 48(1): 559-577
- Fitzgerald PG, Baldwin SL, Webb LE and O'Sullivan PB. 2006. Interpretation of (U-Th)/He single grain ages from slowly cooled crustal terranes: A case study from the Transantarctic Mountains of southern Victoria Land. *Chemical Geology*, 225(1-2): 91-120
- Flowers RM, Ketcham RA, Shuster DL and Farley KA. 2009. Apatite (U-Th)/He thermochronometry using a radiation damage accumulation and annealing model. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(8): 2347-2365
- Gautheron C, Tassan-Got L, Barbarand J and Pagel M. 2009. Effect of alpha-damage annealing on apatite (U-Th)/He thermochronology.

- Chemical Geology, 266(3–4): 157–170
- Gleadow A, Harrison M, Kohn B, Lugo-Zazueta R and Phillips D. 2015. The Fish Canyon Tuff: A new look at an old low-temperature thermochronology standard. *Earth and Planetary Science Letters*, 424: 95–108
- Guo C, Zhang ZY, Malusà MG, Chew D, Xiang DF, Wu L, Wang N and Xiao WJ. 2022. Late Cenozoic topographic growth of the South Tianshan Mountain Range: Insights from detrital apatite fission-track ages, northern Tarim Basin margin, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 234: 105277
- He HY, Sun JM, Li QL and Zhu RX. 2012. New age determination of the Cenozoic Lunpola basin, central Tibet. *Geological Magazine*, 149(1): 141–145
- Hendriks BWH and Redfield TF. 2005. Apatite fission track and (U-Th)/He data from Fennoscandia: An example of underestimation of fission track annealing in apatite. *Earth and Planetary Science Letters*, 236(1–2): 443–458
- Kraml M, Pik R, Rahn M, Selbekk R, Carignan J and Keller J. 2006. A new multi-mineral age reference material for  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ , (U-Th)/He and fission track dating methods: The Limberg t3 tuff. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 30(2): 73–86
- Li YJ, Zheng DW, Wu Y, Wang Y, He HY, Pang JZ, Wang YZ and Yu JX. 2017. A potential (U-Th)/He zircon reference material from Penglai zircon megacrysts. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 41(3): 359–365
- Liu DC and Wang WD. 2023. Weathering degree determination of volcanic rocks: A case study of Late Permian ultrabasic rocks and basic basalts in western Guizhou Province. *Geological Survey of China*, 10(6): 50–59 (in Chinese with English abstract)
- Mao ZQ, Meng QQ, Fang XM, Zhang T, Wu FL, Yang YB, Zhang WL, Zan JB and Tan MQ. 2019. Recognition of tuffs in the Middle-Upper Dingqinghu Fm., Lunpola Basin, central Tibetan Plateau: Constraints on stratigraphic age and implications for paleoclimate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 525: 44–56
- McDowell FW, McIntosh WC and Farley KA. 2005. A precise  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  reference age for the Durango apatite (U-Th)/He and fission-track dating standard. *Chemical Geology*, 214(3–4): 249–263
- Paton C, Hellstrom J, Paul B, Woodhead J and Hergt J. 2011. Iolite: Freeware for the visualisation and processing of mass spectrometric data. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 26(12): 2508–2518
- Schmitz MD and Bowring SA. 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. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(15): 2571–2587
- Schoene B, Crowley JL, Condon DJ, Schmitz MD and Bowring SA. 2006. Reassessing the uranium decay constants for geochronology using ID-TIMS U-Pb data. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(2): 426–445
- Thomson SN, Gehrels GE, Ruiz J and Buchwaldt R. 2012. Routine low-damage apatite U-Pb dating using laser ablation-multicollector-ICPMS. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13(2): Q0AA21
- Vermeesch P. 2009. RadialPlotter: A Java application for fission track, luminescence and other radial plots. *Radiation Measurements*, 44(4): 409–410
- Vermeesch P. 2010. HelioPlot, and the treatment of overdispersed (U-Th-Sm)/He data. *Chemical Geology*, 271(3–4): 108–111
- Wang DC. 2021. Detrital fission track thermochronology of Neogene in Lunpola Basin, Central Tibetan Plateau and its significance. Master Degree Thesis. Lanzhou: Lanzhou University (in Chinese with English abstract)
- Wang Y, Zheng DW, Li YJ and Wu Y. 2019. (U-Th)/He dating of international standard Fish Canyon Tuff zircon. *Seismology and Geology*, 41(5): 1302–1315 (in Chinese with English abstract)
- Wen YX, Ma PF, Ma C, Meng J, Li YL, Hu B and Liu ZR. 2016. Identifying the Dingqinghu tuff layer along well logs in the Cenozoic Lunpola Basin, Tibetan Plateau. *China Mining Magazine*, 25(6): 148–153 (in Chinese with English abstract)
- Wolf RA, Farley KA and Silver LT. 1996. Helium diffusion and low-temperature thermochronometry of apatite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(21): 4231–4240
- Wu L, Wang F, Shan JN, Zhang WB, Shi WB and Feng HL. 2016. (U-Th)/He dating of international standard of Durango apatite. *Acta Petrologica Sinica*, 32(6): 1891–1900 (in Chinese with English abstract)
- Wu L, Shi GH, Danišik M, Zhang ZY, Wang YZ and Wang F. 2019. MK-1 apatite: A new potential reference material for (U-Th)/He dating. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 43(2): 301–315
- Wu L, Wang F, Zhang ZY, Shi GH, Danišik M, He DF, Sun JB, Wang Y, Shen XM and Zaw T. 2021. Reappraisal of the applicability of MK-1 apatite as a reference standard for (U-Th)/He geochronology. *Chemical Geology*, 575: 120255
- Xiang DF, Zhang ZY, Zack T, Chew D, Yang YH, Wu L and Hognalm J. 2021. Apatite U-Pb dating with common Pb correction using LA-ICP-MS/MS. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 45(4): 621–642
- Yu S, Sun JB, Evans NJ, Danišik M, Wu L, Tian YT and Shen Z. 2020. Further evaluation of Penglai zircon megacrysts as a reference material for (U-Th)/He dating. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 44(4): 763–783
- Zeng SQ, Wang J, Chen WB, Fu XG, Sun W, Li JF and Liu JH. 2020. Zircon U-Pb age and stratigraphic significance of the newly discovered tuff layers in the Dingqinghu formation, West Lunpola Basin. *Acta Geologica Sinica*, 94(8): 2354–2366 (in Chinese with English abstract)

#### 附中文参考文献

- 常远, 许长海, 周祖翼. 2010. (U-Th)/He 测年技术:  $\alpha$  离子射出效应及其校正. *地球科学进展*, 25(4): 418–427
- 刘德成, 王卫东. 2023. 火山岩风化程度的厘定——以黔西晚二叠世超基性岩和基性玄武岩为例. *中国地质调查*, 10(6): 50–59
- 王代春. 2021. 伦坡拉盆地新近系碎屑裂变径迹热年代学及其指示意义. 硕士学位论文. 兰州: 兰州大学
- 王英, 郑德文, 李又娟, 武颖. 2019. 国际标样 Fish Canyon Tuff 锆石的 (U-Th)/He 年龄测定. *地震地质*, 41(5): 1302–1315
- 文一雄, 马鹏飞, 马超, 孟俊, 李亚林, 胡滨, 刘中绒. 2016. 青藏高原新生代伦坡拉盆地丁青湖组测井剖面凝灰岩标志层的识别. *中国矿业*, 25(6): 148–153
- 吴林, 王非, 单竞男, 张炜斌, 师文贝, 冯慧乐. 2016. 国际标样 Durango 磷灰石 (U-Th)/He 年龄测定. *岩石学报*, 32(6): 1981–1990
- 曾胜强, 王剑, 陈文彬, 付修根, 孙伟, 李金锋, 刘君豪. 2020. 伦坡拉盆地西部丁青湖组新发现凝灰岩锆石 U-Pb 年龄及其地层层学意义. *地质学报*, 94(8): 2354–2366