

裂变径迹定年刻度标准化的发展和未来*

赵云龙

(核工业北京地质研究院, 北京 100029)

瞿鹏济

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100080)

叙述了裂变径迹定年中系统刻度的问题和刻度标准化的必要性、国际裂变径迹定年标准化工作组关于裂变径迹定年标准化的要点、以及裂变径迹定年刻度标准化的未来。

关键词: 标准化 裂变径迹定年 年龄标准

裂变径迹测定地质年代已有将近30年的历史^[1], 这一技术已得到广泛的应用。例如, 在地质构造学中测定冷却和上升速度, 在地层学中标记地层年代, 在沉积盆地热历史研究以及考古学等研究中都起了很重要的作用^[2-7]。但时至今日这一技术仍然存在着一一些问题^[8], 以致使一些地质学家甚至不相信裂变径迹测定的年龄数据。因此, 近年来这一领域的科学家一致同意要进行方法刻度的标准化。

一、历史回顾及刻度标准化的必要性

裂变径迹法测定地质年代是通过测定样品中铀含量和它们的自发裂变径迹数目来测定地质年代, 即:

$$t = \lambda_D^{-1} \ln(1 + \lambda_D \phi \sigma I \rho_s / \lambda_f \rho_i) \quad (1)$$

式中, λ_D 为 ^{238}U 的总衰变常数, λ_f 为 ^{238}U 的自发裂变衰变常数; I 为 $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ 同位素比; σ 为 ^{235}U 热中子诱发裂变截面; ϕ 为热中子积分通量; ρ_s 为自发裂变径迹密度; ρ_i 为诱发裂变径迹密度; t 为地质年代。

* 国家自然科学基金资助项目

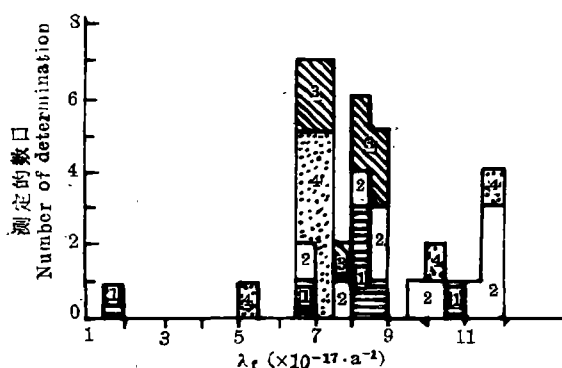


图1 ^{238}U 自发裂变常数 λ_f 值的分布

1. 直接测定 2. 放射化学或质谱分析 3. 裂变径迹年代与已知年龄(K Ar/Rb Sr)样品比较 4. 固体径迹探测器和核乳胶法

Fig. 1 Distribution of the values of the ^{238}U fission decay constant λ_f

1. Direct determination 2. Radiochemical or M. S. analysis 3. Comparison between F. T. and K Ar/Rb Sr ages dating of known ages samples 4. SSTD and Ph. Em.

自从 1964 年提出裂变径迹测定地质年代的方法以来,由于其方法较简单、实验费用较低、可以测定包括晶体和非晶体在内的各种样品、测定的年代范围宽(从几年到几十亿年)、使用的样品少(几个颗粒就可以测定)以及可以利用裂变径迹的退火特性来研究热历史和上升速度等优点,使这一技术发展很快。但是这一技术在发展和实际测定中遇到不少难题,这些问题主要有:

1. 年代计算公式(1)中必须用到 ^{238}U 的自发裂变常数 λ_t ,从图 1^[9]可以看到 λ_t 值差异很大,近年来使用较多的两个值是 $\sim 7.0 \times 10^{-17}/\text{a}$ 和 $\sim 8.5 \times 10^{-17}/\text{a}$,但也相差较大;

2. 由于每个实验室监测热中子积分通量所采用的方法之间存在着明显的差别及反应堆中子热化程度不同,使测定的中子通量产生很大的差异。虽然这期间提出了利用热中子积分通量与诱发铀标准玻璃径迹密度的线性关系来测定积分通量的办法,即 $\phi = B\rho_d$,Hurford^[10]历时 7 年得到的美国国家标准局 NBS SRM612 铀标准玻璃刻度系数 B_{612} (见图 2),其散度对平均值而言仍可达到 $\pm 20\%$;

3. 由于各实验室和每个人具体实验程序之间存在差异,如蚀刻程度、晶体选择、照射时探测器与晶体接触、观察径迹所使用的显微镜条件等都会造成结果的不一致。

在这一技术发展过程中,为了在测定地质年代中避开 ^{238}U 自发裂变常数 λ_t 和绝对测定中子积分通量的困难,提出对年龄标准的 ZETA 刻度法^[10],即:

$$\zeta = [\exp(\lambda_D t_{\text{std}}) - 1] / \lambda_D (\rho_s / \rho_i)_{\text{std}} \rho_d \quad (2)$$

$$t = \lambda_D^{-1} \ln[1 + \lambda_D \zeta (\rho_s / \rho_i) \rho_d] \quad (3)$$

实际上 $\zeta = \phi \rho I / \rho_d \lambda_t$ 。虽然各个实验室想了不少办法,但各实验室之间并没有解决差异问题,

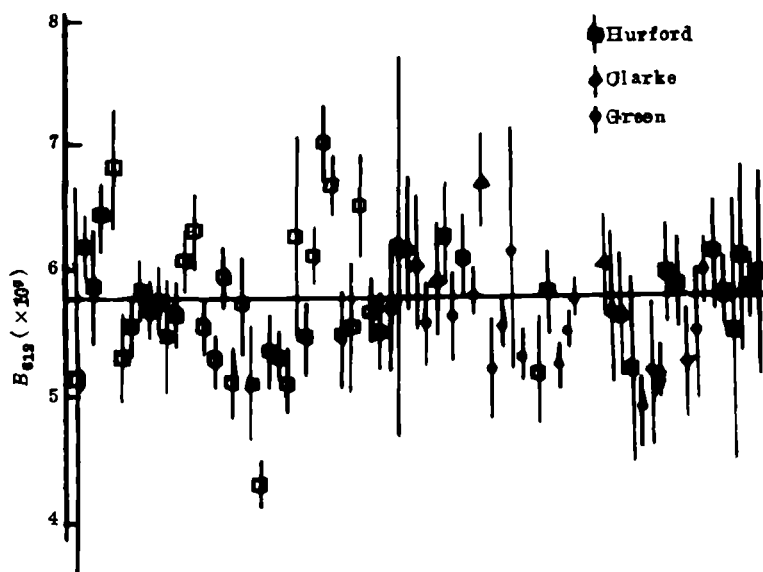


图 2 Hurford 等测定的 B_{612} 值

数据从左至右为 1975—1982 年,误差杆为 2σ ,水平实线代表平均值

Fig. 2 The B_{612} values collected over a seven-year period

1975—1982(left to right), Error bars are 2σ , solid horizontal line represents the mean

致使在1984年Troy裂变径迹测定地质年代学术讨论会上各实验室报出的同一个样品的年龄数据散度很大^[11]。在1988年,裂变径迹测定年代学术讨论会上,各实验室报出的同一样品的年龄数据仍然不尽一致^[12],例如,88-1锆石样品(年龄值 $11.6 \pm 0.4\text{Ma}$)的9个分析测定得到的年龄范围是从9.2到12.7Ma,相当于年龄值的79%到109%;88-3磷灰石样品(年龄值 $127 \pm 5\text{Ma}$)的21个分析测定得到的年龄范围从91.6到130.6Ma,相当于年龄值的72%到103%。这些事实说明确实需要统一刻度,并建立公共的刻度基线。

为了解决这一问题,1986年国际地质年代委员会向世界从事裂变径迹测定年代和对这一技术感兴趣的人发出了277份意见征询表,有80人做了全面的回答,可以说对同一问题的回答差距都很大,有的甚至是截然相反,但有一点是共同的,那就是80个人都希望对裂变径迹测定地质年代方法进行刻度标准化。1986年国际地质年代委员会根据上述情况成立了以Hurford为主持人的国际裂变径迹测定地质年代刻度标准化工作组^[13],工作组的其他九位成员是Gleadow (Melbourne), Kohn (Beer Sheva), Miller (Troy), Naeser (Denver), Nagpaul (Faridabad), Suzuki (Tokyo), Van den Haute (Ghent), Wagner (Heideberg)和赵云龙(北京),由这个工作组来统一和标准化这一技术。

二、关于裂变径迹测定地质年代刻度标准化^[14]

国际裂变径迹测定地质年代标准化工作组经过一年的通讯讨论和1988年在Besancon开会讨论,提出了工作组的推荐意见,经出席第六届国际裂变径迹测定地质年代学术讨论会的代表讨论和修改后,该会议以65票赞成、2票反对通过了这个建议。这个建议的要点是:

1. 年龄标准

年龄标准是整个裂变径迹测定年代系统刻度的基础,这些标准的年龄是已知的,或是可以确信是能够推导出的。现推荐的年龄标准是:

	联系人 Contact
磷灰石 Apatite	C. W. Naeser
鱼谷凝灰岩 Fish Canyon Tuff	F. Mc Dowell
Durango	
锆石 Zircon	
鱼谷凝灰岩 Fish Canyon Tuff	C. W. Naeser
Buluk Member 凝灰岩	A. J. Hurford
Buluk member Tuff (FTBM)	
Tardree 流纹岩 Tardree Rhyolite	A. J. Hurford
楣石 Sphene	
Mount Dromedary 正辉英闪长岩	A. J. Gleadow
Mount Dromedary Banatite	

对于磷灰石、锆石、楣石或玻璃的每一类样品建立或检验系统刻度,最少要进行五个分析数据的测定,每次测定均需分别制样,五个分析中必须包括多于一个年龄标准,至少三次不同的照射通量。表1和表2中分别列出了对于ZETA和绝对测定进行系统刻度所必须做的内容。

表 1 ZETA 法锆石年龄标准系统刻度的样本表

Table1 Specimen table of zircon age standard analyses for system calibration by the ZETA approach

标 准 Standard	矿物和晶体数 Mineral and number of crystals	自 发 Spontaneous		诱 发 Induced		$P(\chi^2)$ (%)	$\rho_s/\rho_i \pm 1\sigma$	剂量玻璃 Glass dosimeter		$\xi \pm 1\sigma$
		ρ_s	(N_s)	ρ_i	(N_i)			ρ_d	(N_d)	
鱼谷凝灰岩 Fish Canyon Tuff	锆石 Zircon	8	36.56 (859)	62.82 (1476)	75	—	—	612	2.829 (843)	338 ± 20
鱼谷凝灰岩 Fish Canyon Tuff	锆石 Zircon	6	46.14 (601)	33.86 (441)	55	—	—	612	1.198 (2134)	341 ± 24
流纹岩 Tardree Rhyolite	锆石 Zircon	10	57.05 (1044)	74.43 (1301)	<2	0.795 ± 0.0321	612	4.207 (2154)	353 ± 18	
凝灰岩 Buluk Tuff	锆石 Zircon	10	10.56 (1025)	11.93 (1158)	63	—	—	612	1.113 (5122)	329 ± 15
凝灰岩 Buluk Tuff	锆石 Zircon	10	11.91 (858)	13.75 (990)	85	—	—	612	1.062 (2448)	353 ± 18
平均锆石 Mean zircon ξ : 343 ± 5										

- (1) 用外探测器法分析, 做为测量的径迹密度, 单位 10^5 径迹/cm²; 在括号中的(N)是数的径迹数; $2\pi/4\pi$ 几何校正因子 = 0.5
- (2) $P(\chi^2)$ 是自由度为 ν 得到 χ^2 值的概率, $\nu =$ 晶体数 - 1; 计算年龄和误差使用平均 ρ_s/ρ_i 比值, 这里 $P(\chi^2) < 5\%$
- (3) 使用的独立年龄: 鱼谷凝灰岩 = 27.8 ± 0.7 Ma, Tardree 流纹岩 = 58.7 ± 1.1 Ma, Buluk 凝灰岩 = 16.2 ± 0.2 Ma^[10,15]
- (4) 来自独立年龄的误差包括在每个 ξ 值的误差中; 平均 ξ 和它的误差是根据单个 ξ 值的误差加权计算的
- (1) Analyses by external detector method; track densities (ρ) are as measured and are (10^5 tr cm⁻²); numbers of tracks counted (N) shown in brackets; $2\pi/4\pi$ geometry correction factor = 0.5
- (2) $P(\chi^2)$ is probability of obtaining $\chi^2 =$ value for ν degrees of freedom where $\nu =$ (number of crystals - 1); mean ρ_s/ρ_i ratio used to calculate age and uncertainty where $P(\chi^2) < 5\%$
- (3) Independent ages used are: Fish Canyon Tuff = 27.8 ± 0.7 Ma, Tardree Rhyolite = 58.7 ± 1.1 Ma, Buluk Tuff = 16.2 ± 0.2 Ma^[10,15]
- (4) An uncertainty component from independent age is included in the error on each ξ -value; mean ξ and its error weighted according to uncertainties on individual ξ -values

表 2 绝对法磷灰石年龄标准系统刻度的样本表

Table2 Specimen table of apatite age standard analyses for system calibration by the absolute approach

标 准 Standard	矿物和晶体数 Mineral and number of crystals	自发 Spontaneous		诱发 Induced		$\bar{s}'$ (%)	中子积分通量 Neutron fluence $\pm 1\sigma$	年龄(Ma) Age $\pm 1\sigma$
		ρ_s	(N_s)	ρ_i	(N_i)			
鱼谷凝灰岩 Fish Canyon Tuff	磷灰石 Apatite	100/100	1.832 (402)	2.531 (556)	3.1	(a)	7.70 ± 0.31	27.7 ± 2.1
鱼谷凝灰岩 Fish Canyon Tuff	磷灰石 Apatite	200/200	1.560 (685)	2.010 (883)	2.7	(b)	7.81 ± 0.27	28.1 ± 2.1
鱼谷凝灰岩 Fish Canyon Tuff	磷灰石 Apatite	150/175	1.625 (618)	2.956 (1125)	4.2	(a)	6.69 ± 0.30	25.8 ± 1.8
鱼谷凝灰岩 Fish Canyon Tuff	磷灰石 Apatite	150/175	1.625 (618)	2.956 (1125)	4.2	(b)	6.58 ± 0.37	25.3 ± 1.9
Durango	磷灰石 Apatite	120/175	1.321 (626)	2.732 (1295)	3.8	(a)	9.65 ± 0.47	26.3 ± 1.9
	磷灰石 Apatite	120/175	1.321 (626)	2.732 (1295)	3.8	(b)	10.05 ± 0.60	27.4 ± 2.2
Durango	磷灰石 Apatite	150/150	1.542 (627)	3.214 (1306)	2.7	(a)	13.3 ± 0.5	31.9 ± 2.0
	磷灰石 Apatite	150/150	1.542 (627)	3.214 (1306)	2.7	(b)	12.9 ± 0.4	31.0 ± 1.8

- (1) ρ 是作为测量的径迹密度, 单位是 10^5 径迹/cm²; 括号中(N)表示记录的径迹数
- (2) 磷灰石分析采用总体法, 每个分析均在不同的照射下进行
- (3) 积分通量 (a) Φ_{Co} 和 (b) Φ_{Au} , 其单位均为 10^{14} n/cm²; 计算年龄使用 $\lambda_f = 8.46 \times 10^{-17} \text{a}^{-1}$; $\lambda_D = 1.55125 \times 10^{-10} \text{a}^{-1}$; $^{235}\sigma = 580.2 \times 10^{-24} \text{cm}^2$; $I = 7.252 \times 10^{-3}$
- (4) $\bar{s}'$ = 平均诱发径迹计数的相对标准偏差^[16], 也可以用自发和诱发径迹计数两者标准偏差代替, 年龄误差包括中子积分通量的误差
- (5) 鱼谷凝灰岩独立年龄 = 27.8 ± 0.7 Ma^[10], Durango = 31.4 ± 0.5 Ma^[16]
- (1) Track densities (ρ) are as measured and are (10^5 Track · cm⁻²); numbers of tracks counted (N) shown in brackets
- (2) Apatite analysis by population method, each in a different irradiation
- (3) Fluences are (a) Φ_{Co} and (b) Φ_{Au} , each (10^{14} n · cm⁻²); ages calculated with $\lambda_f = 8.46 \cdot 10^{-17} \text{a}^{-1}$; $\lambda_D = 1.55125 \cdot 10^{-10} \text{a}^{-1}$; $^{235}\sigma = 580.2 \cdot 10^{-24} \text{cm}^2$; $I = 7.252 \cdot 10^{-3}$
- (4) $\bar{s}'$ = relative standard error of mean induced track count^[16] (Alternatively the standard deviation of both fossil and induced track counts might be given) Error on ages also includes a component from the uncertainty on the neutron fluence
- (5) Independent ages of Fish Canyon Tuff = 27.8 ± 0.7 Ma, of Durango = 31.4 ± 0.5 Ma

2. 对反应堆最低技术指标要求

裂变径迹测定地质年代的样品必须在热化十分好的反应堆照射装置内照射,热化不好的照射装置中有较高的快中子和超热中子份额,这会引引起足够量的 ^{232}Th 和 ^{238}U 裂变,对测定造成干扰,建议使用的最低允许辐比是:对金要 ≥ 3 ;对铜要 ≥ 48 ;对钴要 ≥ 24 。每次照射中子通量梯度要进行测定并加以校正,需要给出中子积分通量的误差。所有未知样品照射都要与刻度照射时保持条件一致。

3. 年龄测定

裂变径迹测定地质年龄的方法,工作组推荐以下二种:

(1)总体法(包括扣除法和再次抛光法) ZETA法和绝对法都可以使用。中子通量测定采用直接Au和Co活化监测器法,要求校正超热中子贡献和自吸收效应后,两者的实验误差在 $\pm 5\%$ 以内符合。中子通量测定的误差或标准铀玻璃径迹误差都要传递到年龄计算的误差中去。

(2)单颗粒法(如外探测器法和再蚀刻法) 这些方法对于不同的几何条件和不同的记录特性、蚀刻和计数效率等都要进行校正,对这种情况只推荐ZETA法。

用ZETA法测定年代,按照公式(2)、(3)计算。用标准铀玻璃测定中子积分通量,其方法是测定玻璃本身的诱发裂变径迹密度或测定外探测器中的径迹密度。 ζ 值对一定的标准玻璃、每种矿物、每个工作者的个人和特定的实验条件,包括反应堆和显微镜情况是特定的。合适的剂量玻璃有NBS SRM612和614,Corning玻璃CN-1、CN-2、CN-5和CN-6,以及老的天然玻璃等。

4. 数据报告形式

裂变径迹测定年代必须采用推荐的方法,对于ZETA法系统刻度的例子如表1所示,对于绝对法系统刻度的例子如表2所示,虽然这两个表中的数据均是虚构的,但其本身说明各项数据内容是必须包括的。

对推荐的两种方法,样品数据的报告形式如表3和表4所示。

表3 用ZETA刻度法未知样品数据报告样本表

Table 3 Specimen table for presentation of sample data using ZETA calibration approach

样 品 Sample	矿物和晶体数 Mineral and number of crystals	自 发 Spontaneous		诱 发 Induced		$P(\chi^2)$ (%) or $\bar{s}'$ (%)	$\rho_s/\rho_i \pm 1\sigma$	剂量器 Dosimeter		年龄(Ma) Age $\pm 1\sigma$
		ρ_s	(N_s)	ρ_i	(N_i)			ρ_d	(N_d)	
样品 A Sample A	锆石 20 Zircon	70.86	(1466)	42.05	(870)	58	—	3.203	(3835)	30.2 $\pm$ 1.4
样品 B Sample B	磷灰石 250/200 Apatite	2.655	(378)	18.75	(2667)	5	—	5.008	(5950)	24.0 $\pm$ 2.4
样品 C Sample C	锆石 20 Zircon	86.52	(2033)	52.99	(1245)	<2	1.671 $\pm$ 0.053	3.227	(3835)	30.1 $\pm$ 1.1

(1) ρ 是作为测量的径迹密度,单位是 10^5 径迹/ cm^2 ,括号中表示记录的径迹数

(2) 磷灰石分析用总体法;锆石分析是用外探测器法,用的几何校正因子为0.5

(3) 磷灰石年龄计算使用SRM612剂量玻璃,其 $\zeta=339$;锆石年龄计算使用CN-1剂量玻璃,其 ζ 为112^[10]

(4) $P(\chi^2)$ 是自由度为 ν 得到 χ^2 值的概率, ν =晶体数-1,计算年龄和误差使用平均 ρ_s/ρ_i 比值,这里 $P(\chi^2)<5\%$

(5) 磷灰石用总体法分析, ($\bar{s}'$)表示平均径迹计数的相对标准偏差

(1) Track densities (ρ) are as measured and are (10^5tr cm^{-2}); numbers of tracks counted (N) shown in brackets

(2) Apatite analysis by population method, zircon analyses by external detector method using 0.5 for the $2\pi/4\pi$ geometry correction factor

(3) Apatite age calculated using dosimeter glass SRM 612 and ζ 612=339; zircon ages calculated using dosimeter glass CN-1 and ζ CN 1=112^[10]

(4) $P(\chi^2)$ is probability of obtaining χ^2 value for ν degrees of freedom (where ν =number of crystals-1); mean ρ_s/ρ_i ratio used to calculate age and uncertainty where $P(\chi^2)<5\%$

(5) For apatite population method analyses, relative standard error of mean track count ($\bar{s}'$) is shown

表 4 用绝对刻度法未知样品数据报告样本表

Table 4 Specimen table for presentation of sample data using an absolute calibration approach

样 品 Sample	矿物和晶体数 Mineral and number of crystals	自发 Spontaneous		诱 发 Induced		$\bar{s}$ (%)		积分中子通量 Neutron fluence $\pm 1\sigma$	年龄 (Ma) Age $\pm 1\sigma$
		ρ_s	(N_s)	ρ_i	(N_i)				
样品 A Sample A	磷灰石 Apatite 100/100	6.00	(1149)	10.7	(1.375)	3.5	(a) (b)	3.41 $\pm$ 0.18 3.24 $\pm$ 0.26	94.4 $\pm$ 6.3 89.7 $\pm$ 8.0
样品 B Sample B	磷灰石 Apatite 85/80	2.46	(127)	9.64	(498)	4.4	(a) (b)	6.02 $\pm$ 0.32 6.26 $\pm$ 0.29	76.0 $\pm$ 8.6 78.9 $\pm$ 8.7
样品 C Sample C	磷灰石 Apatite 75/100	0.632	(901)	2.433	(3468)	2.4	(a) (b)	4.34 $\pm$ 0.33 4.25 $\pm$ 0.25	55.8 $\pm$ 4.7 54.7 $\pm$ 3.7
样品 D Sample D	磷灰石 Apatite 120/150	0.403	(43)	10.6	(1133)	3.2	(a) (b)	4.13 $\pm$ 0.17 3.97 $\pm$ 0.20	7.8 $\pm$ 1.2 7.5 $\pm$ 1.2
样品 E Sample E	磷灰石 Apatite 250/250	1.317	(352)	8.137	(2175)	3.6	(a) (b)	3.40 $\pm$ 0.24 3.16 $\pm$ 0.21	27.3 $\pm$ 2.4 25.4 $\pm$ 2.6

(1) ρ 是作为测量的径迹密度,单位是 10^5 径迹/ cm^2 ,括号中(N)表示记录的径迹数

(2) 所有分析均采用总体法

(3) 积分通量(a) Φ_{Co} 和(b) Φ_{Au} ,其单位均为 10^{15} 中子/ cm^2 ,计算年龄使用 $\lambda_f = 8.46 \times 10^{-17} \text{a}^{-1}$, $\lambda_D = 1.55125 \times 10^{-10} \text{a}^{-1}$, $^{235}\sigma = 580.2 \times 10^{-24} \text{cm}^2$, $I = 7.2527 \times 10^{-3}$,使用的这个 λ_f 和测定中子剂量方法和磷灰石的年龄与建立鱼谷凝灰岩和 Durango 年龄标准一致

(4) $\bar{s}$ = 平均诱发径迹计数的相对标准偏差^[16],也可以用自发和诱发径迹计数两者标准偏差代替,年龄误差包括中子积分通量的误差

(1) Track densities (ρ) are as measured and are ($10^{15} \text{tr cm}^{-2}$); numbers of tracks counted (N) shown in brackets

(2) All analyses by population method

(3) Fluences are (a) Φ_{Co} and (b) Φ_{Au} , each ($10^{15} \text{n} \cdot \text{cm}^{-2}$); ages calculated with $\lambda_f = 8.46 \cdot 10^{-17} \text{a}^{-1}$, $\lambda_D = 1.55125 \cdot 10^{-10} \text{a}^{-1}$, $^{235}\sigma = 580.2 \cdot 10^{-24} \text{cm}^2$, $I = 7.2527 \cdot 10^{-3}$. Using this value for λ_f and the procedure of neutron dosimetry, apatite ages in agreement with independent ages have been found for the Fish Canyon and Durango age standards

(4) $\bar{s}$ = relative standard error of mean induced track count^[16] (Alternatively the standard deviation of both fossil and induced track counts might be gives.) Error on ages also includes a component from the uncertainty on the neutron fluence

在实际工作中,某些工作者已发表过系统刻度的文章,其后测定样品的文章只需引证过去的文章就被认可。

在测定样品中报告计数的离散情况很重要,如外探测器法的 χ^2 -检验,它可以察觉径迹计数中泊松分布变化带来的附加误差。对总体法要报告诱发径迹计数的相对标准偏差。上述建议已得到裂变径迹委员会、国际地质年代委员会、裂变径迹工作者、裂变径迹测定地质年代数据的使用者、裂变径迹测定年代文章的评审者和杂志编辑的赞同。

三、裂变径迹测定年代刻度标准化的发展

国际裂变径迹测定地质年代刻度标准化工作组在收集整理世界各国裂变径迹测定地质年代的数据资料,又加上工作组成员本身的研究工作,经过近二年的时间,提出的建议显然也不是很理想的,它是建立在相同标准年龄矿物的重复分析上,而且测定的标准年龄的矿物种类也很有限。因此裂变径迹测定年代刻度标准化的任务仍然十分迫切和艰巨,如需进一步准确地探求 ^{238}U 的自发裂变常数 λ_f ,对不同人在十分复杂的个人因素条件下如何准确测定绝对中子积

分通量、确定显微镜观察条件和其他计数因素等也需探索并使之标准化。这些内容都为今后裂变径迹测定地质年代标准化提出了明确的任务,解决这些问题不但要花费大量的时间,而且也需要全世界各实验室的密切合作。这些问题解决与否也是关系到这一技术的生命力问题。

近年来,该领域的著名科学家都致力于解决这些问题,如英国的 Hurford、美国的 Miller 和 Naeser、比利时的 Van den Haute、澳大利亚的 Gleadow 等。我国的科技工作者也在该领域做了大量工作,由本文作者提出的《裂变径迹测定地质年代标准化刻度的研究》课题已得到国家自然科学基金的资助,并与各国有关实验室保持密切的联系。首先在国内按国际裂变径迹测定年代工作组的建议进行了标准化刻度,已取得很大进展。如提出的用裂变产物法测定绝对中子通量与 ^{235}U 反应有效裂变截面的乘积,准确刻度了UG-5铀标准玻璃(如表5所示)^[17]。在不同超热中子成分的情况下,裂变产物法得到的UG-5铀标准玻璃的刻度常数 b 在误差范围内是常数,这种方法直接测量照射的积分中子通量与 ^{235}U 反应的效应,避免了积分中子通量测量中由于中子能谱和中子温度变化带来的影响。

表5 裂变产物法刻度UG-5标准铀玻璃结果

Table 5 Results of dosimeter glass UG-5 calibration by fission products method

辐照位置 Place of irradiation	$^{235}\text{U}/\text{Cd}$	Φ_{Au} ($10^{15}\text{n}/\text{cm}^2$)	裂变产物法 $\sigma_{\text{R}}\Phi_{\text{R}}(10^{-6})$ Fission products method	$\rho_{\text{UG-5}}$ ($10^{15}\text{t}/\text{cm}^2$)	$b1(\times 10^{11})$ $\rho_{\text{UG-5}}/\sigma_{\text{R}}\Phi_{\text{Au}}$	$b2(\times 10^{11})$ $\rho_{\text{UG-5}}/\sigma_{\text{R}}\Phi_{\text{R}}$
A11	5.1	2.12 ± 0.11	1.05 ± 0.04	1.27	1.03 ± 0.06	1.21 ± 0.05
B11	13.3	2.00 ± 0.06	1.03 ± 0.04	1.26	1.09 ± 0.04	1.22 ± 0.05
C11	46.6	1.86 ± 0.09	1.023 ± 0.04	1.27	1.18 ± 0.06	1.24 ± 0.05
D11	71.4	1.54 ± 0.04	0.879 ± 0.04	1.09	1.22 ± 0.04	1.24 ± 0.05
E11	129.4	1.47 ± 0.04	0.847 ± 0.04	1.06	1.24 ± 0.04	1.25 ± 0.05

注: $\sigma_0=580.0 \times 10^{-24}\text{cm}^2$;数据误差均为 1σ ;UG-5剂量玻璃的铀含量是5ppm,天然丰度

Note: $\sigma_0=580.0 \times 10^{-24}\text{cm}^2$; The error is 1σ for each result; Uranium content of dosimeter glass UG-5 is 5ppm, natural abundance

在这项研究中对采用的铀标准玻璃、Au 和 Co 活化监测器和裂变产物法测定中子积分通量之间产生差异的原因已摸清,各方法之间已达到稳定的一致。此外,还发展了锆石蚀刻碱酸结合的新技术,得到了满意的效果^[18]。对于裂变径迹法测定地质年代的某些误差来源做了深入的探索并提出了消除的办法^[19]。

参 考 文 献

- [1] Fleischer P L, Price P B. *Geochim Cosmochim Acta*, 1964; 28:1705
- [2] 王庆隆等. 裂变径迹技术及其在地球化学中的应用. 北京: 科学出版社, 1984;
- [3] 刘顺生等. 裂变径迹年龄测定. 北京: 地质出版社, 1984;
- [4] Wagner G A. *Earth Planet Sci Lett*, 1968; 4:411
- [5] Naeser C W. *J. Geophys Res*, 1969; 74:705
- [6] Aandriessen P A M. *Nucl Track Radit Meas* 1990; 17:285
- [7] Kohn B P, Feinstein S Eyal M. *Nucl Track Radit Meas*, 1990; 17:381
- [8] Hurford A J. *Nucl Track Radit Meas*, 1986; 11:329
- [9] Bigazzi G. *Nucl Track Radit Meas*, 1981; 5:35
- [10] Hurford A J. *Isotope Geoscience*, 1983; 1:285
- [11] Miller D S, Duddy Ian R, Green Paul F et al. *Nucl Track*, 1985; 10:383
- [12] Miller D S, Eby N, Mc Corkell R et al. *Nucl Track Radit Meas*. 1990; 17:237
- [13] Hurford A J. *Chem Geology*, 1990; 80:171

- [14] Hurford A J. *Nucl Track Radit Meas*, 1990; 17:233
- [15] Hurford A J, Warkias R T. *Chem Geol*, 1987; 66:209
- [16] Green P F. *Chem Geol*, 1985; 58:1
- [17] 赵云龙. 科学通报, 1989; 34:1622
- [18] 翟鹏济, 赵云龙, 王世成. 科学通报, 1990, 35(21):1660
- [19] 翟鹏济, 赵云龙. 裂变径迹定年中某些误差来源分析, 科学通报, 在印刷中

Development and future of standardization of fission track dating calibration

Zhao Yunlong

(Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029)

Zhai Pengji

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing 100080)

Abstract

Described are problems of system calibration and necessity of standardization in fission track dating (FTD) calibration, main points of recommendation on standardization of FTD calibration by the Fission Track Working Group of the I. U. G. S. Subcommittee on Geochronology, and the future of standardization of FTD calibration.

Keywords: Standardization Fission track dating Age standards

(1990年12月18日收到)

(1992年2月21日修回)