



同位素年令计算手册

原子能出版社

56.67073
272

同位素年龄计算手册

李俊华 编著
夏德兴

26519/12

原



社

内 容 简 介

本手册编入了目前同位素年龄测定中三种主要方法(铀-钍-铅法、钾-氩法和铷-锶法)的年龄计算表,以及单阶段演化模式铅同位素组成和模式铅年龄计算表。所用参数尽量采用国内外最新资料。各表前均附有简要说明。

本手册为同位素地质工作者常用的工具书,可供从事同位素地质学、地质年代学、地球化学、宇宙化学及有关核子演化方面的科研生产人员使用,也可供高等院校有关专业师生参考。

同位素年龄计算手册

李俊华 夏德兴 编著

原子能出版社出版

北京印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经销

☆

开本787×1092 $\frac{1}{16}$ ·印张5 $\frac{1}{4}$ ·字数123千字

1978年12月北京第一版·1978年12月北京第一次印刷

印数001—11500·定价,0.95元

统一书号,15175·136

前 言

随着地质科研和生产的发展,同位素地质年代学研究已成为地质学中的一重要课题。近十多年来,我国有关部门先后建立了许多同位素年龄测定实验室,年龄数据的计算和应用也大为扩展。为了减轻同位素年龄测定工作中大量繁琐的计算,提高效率,通常可采用同位素年龄计算表。然而以往套用国外的一些计算表,由于采用的衰变常数和某些测定值已有变化,目前已不适用。编者根据目前国内外较为通用的资料,尽量选用最新的数据,特别是1976年8月在澳大利亚悉尼召开的25届国际地质会议讨论推荐的衰变常数,编制了本《同位素年龄计算手册》,以适应目前同位素年龄计算方面的需要。

本手册主要包括铀-钍-铅法同位素年龄计算表、钾-氩法同位素年龄计算表、铷-锶法同位素年龄计算表,以及单阶段演化模式铅同位素组成及模式铅年龄计算表。各种计算表之前都有简要说明,阐述了计算表的编制依据,采用常数来源、内容说明及计算实例等。表内数据力求详尽,准确度高,使用方便,可满足当前同位素地质年龄计算方面的需要。

铀-钍-铅法同位素年龄计算表取材于美国地质调查所斯蒂夫等1972年10月编制的《铅同位素年龄计算表》。该表采用了目前国际上最新测定的衰变常数,计算精度高。钾-氩法和铷-锶法同位素年龄计算表均采用目前较为通用的常数值,借电子数字计算机计算编制,其精度亦足以适用。为了提供铀-钍-铅法年龄计算中的普通铅校正资料及满足与此有关的模式铅年龄计算,采用最新的常数编制了单阶段演化模式铅同位素组成及模式铅年龄计算表。由于模式铅演化的起始时间及 μ 值尚未很好确定,所以关于单阶段演化的模式还存在某些问题,这里列出的三个表仅供在普通铅校正和计算铅矿物年龄时参考使用。

编者期望本手册对从事同位素年龄测定工作有关的人员有所帮助。希望在研究工作中使用本手册时能进一步完善它。由于水平所限,不妥之处请批评指正。

李俊华

夏德兴

1978年5月

目 录

一、铀-钍-铅法同位素年龄计算表说明	(1)
铀-钍-铅法同位素年龄计算表	(9)
二、钾-氩法同位素年龄计算表说明	(40)
钾-氩法同位素年龄计算表	(42)
三、铷-锶法同位素年龄计算表说明	(55)
铷-锶法同位素年龄计算表	(58)
四、单阶段演化模式铅同位素组成及模式铅年龄计算表说明	(71)
单阶段演化模式铅同位素组成及模式铅年龄计算表	(73)
表1 单阶段演化模式铅同位素组成	(74)
表2 单阶段演化模式铅年龄计算表	(75)
表3 单阶段演化模式铅同位素组成及模式铅年龄计算表	(78)

一、铀-钍-铅法同位素年龄计算表说明

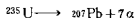
引 言

铀-钍-铅法同位素年龄计算一般说来比较容易。然而自从本世纪三十年代第一批铀-钍-铅年龄数据发表以来,虽然有不少学者做过一些努力,但无论在理论上还是在计算年龄的方法上都或多或少存在某些模糊认识。例如苏联学者H. E. 斯塔里克(1961)在《核子地质年代学》中对子体产物与母体原子比值的计算中就存在明显的错误。美国地质调查所L. R. 斯蒂夫等人(1959)的《铅同位素年龄计算表》^[1]第一次完成了比较正确的计算程序,并给出了令人满意的计算表资料。

我们在编制该计算表时,主要参考了斯蒂夫等1959年出版的《铅同位素年龄计算表》的说明。同时,采用了斯蒂夫等1972年出版的《铅同位素年龄计算表》。该表的精度令人满意,对于用现代分析精度来了解不同地质过程所引起的年龄上的差异也是适用的。本表包括1—6000百万年的年龄计算值,对同位素年龄图解及地球演化的某些推理计算都是有用的。

§ 1 计算年龄采用的公式和参数

铀-钍-铅法同位素年龄计算基于下列放射性衰变关系:



母体原子核衰变的数量 dN 与这段时间 dt 成正比,并与当时存在的母体原子核数量成正比,所以可以写出下列微分方程式:

$$-dN = \lambda N dt,$$

负号表示母体原子核随时间减少。解此微分方程,便得到年龄计算的基本公式:

$$\frac{N_d}{N_p} = e^{\lambda t} - 1 \quad (1)$$

式中 λ ——衰变常数;

t ——时间(年龄);

N_d ——子体产物的原子数;

N_p ——放射性母体现在的原子数。

对于铀系、钍系和钍系,则(1)式分别为:

$$\frac{N_{206}}{N_{238}} = e^{\lambda_{238} t} - 1 \quad (2)$$

$$\frac{N_{207}}{N_{235}} = e^{\lambda_{235} t} - 1 \quad (3)$$

$$\frac{N_{208}}{N_{232}} = e^{\lambda_{232} t} - 1 \quad (4)$$

而且, 由(2)和(3)式还可以得到下面的年龄方程式:

$$\frac{N_{207}}{N_{206}} = \frac{e^{\lambda_{235} t} - 1}{K(e^{\lambda_{232} t} - 1)} \quad (5)$$

上述公式中, N_{206} , N_{207} 和 N_{208} 分别为放射成因的 ^{206}Pb , ^{207}Pb 和 ^{208}Pb 的原子数; λ_{235} , λ_{232} 和 λ_{232} 分别为 ^{238}U , ^{235}U 和 ^{232}Th 的衰变常数; N_{238} , N_{235} 和 N_{232} 分别为 ^{238}U , ^{235}U 和 ^{232}Th 所观测的原子数; K 是 ^{238}U 与 ^{235}U 的现代原子比值。

该年龄计算表采用了精确测定的半衰期和衰变常数。 ^{238}U 和 ^{235}U 的半衰期分别为 $T_{238} = (4.4683 \pm 0.0024) \times 10^9$ 年, $T_{235} = (0.70381 \pm 0.0048) \times 10^9$ 年(贾菲等, 1971)^[2]。 ^{232}Th 的半衰期 $T_{232} = (14.01 \pm 0.07) \times 10^9$ 年(L.J. 勒鲁和 L.L. 格伦丁, 1963)^[13]。 ^{238}U 与 ^{235}U 的现代原子比值 $K = 137.88 \pm 0.14$ 。不同作者在年龄计算中, 采用的物理常数列于表 1。

表 1 不同作者对年龄计算采用的物理常数

核素	本文*	斯蒂夫等(1950)	卡尔普等(1954)	威克曼(1939)
^{238}U	$T = (4.4683 \pm 0.0024) \times 10^9$ 年 $\lambda = 0.155125 \times 10^{-9} \text{年}^{-1}$	$T = (4.51 \pm 0.01) \times 10^9$ 年 $\lambda = 0.15369 \times 10^{-9} \text{年}^{-1}$	$T = (4.49 \pm 0.01) \times 10^9$ 年 $\lambda = 0.1541 \times 10^{-9} \text{年}^{-1}$	$T = 4.56 \times 10^9$ 年 $\lambda = 0.152 \times 10^{-9} \text{年}^{-1}$
^{235}U	$T = (0.70381 \pm 0.00048) \times 10^9$ 年 $\lambda = 0.984850 \times 10^{-9} \text{年}^{-1}$	$T = (0.713 \pm 0.016) \times 10^9$ 年 $\lambda = 0.97216 \times 10^{-9} \text{年}^{-1}$	$T = (0.713 \pm 0.016) \times 10^9$ 年 $\lambda = 0.9722 \times 10^{-9} \text{年}^{-1}$	$T = 0.714 \times 10^9$ 年 $\lambda = 0.972 \times 10^{-9} \text{年}^{-1}$
^{232}Th	$T = (14.01 \pm 0.07) \times 10^9$ 年 $\lambda = 0.049475 \times 10^{-9} \text{年}^{-1}$	$T = (14.2 \pm 0.7) \times 10^9$ 年 $\lambda = 0.048813 \times 10^{-9} \text{年}^{-1}$	$T = (13.9 \pm 0.2) \times 10^9$ 年 $\lambda = 0.04967 \times 10^{-9} \text{年}^{-1}$	$T = 13.9 \times 10^9$ 年 $\lambda = 0.0499 \times 10^{-9} \text{年}^{-1}$
原子 ^{238}U / 比值 ^{235}U	137.88 ± 0.14	137.7 ± 0.32	137.7 ± 0.5	139.0 ± 1.0

* 根据美国地质调查所(1972年10月)的数据。

本表包括从 1—6000 百万年所计算的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$, $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ 的原子比值。表中的原子比值以六位有效数字表示, 这对现代物理测量和分析方法以及对某些理论计算已足够精确。对应于某一比值的年龄 t 及其误差可以从表中直接读出。如果查不到所需要的准确比值, 则可用一次近似直接内插法而求得。表中年龄 t 的误差是根据所用参数的“负误差”而计算出来的, 这个误差实际上也包括了所用参数的“正误差”所引起的年龄 t 的误差范围。

表 2 列举了几个不同年龄 t 在计算中由于所用物理常数的误差而产生的年龄误差范围。

表 2 计算中的物理常数误差产生的 t 值误差

方 法	不同年龄 t 的计算误差 (10^6 年)					
	100	500	1500	2500	4500	6000
$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	0.1	0.3	0.8	1.4	2.4	3.2
$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	0.1	0.3	1.0	1.7	3.1	4.1
$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2.8	2.9	3.2	3.7	4.8	5.8
$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	0.5	2.5	7.5	12.5	22.5	30.0*

从表中可以看出,用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 比值产生的误差比用其余三组要小。但所有四组比值产生的误差范围较1959年斯蒂夫等人编制的《铅同位素年龄计算表》要小得多。

表 3 t 值范围和间隔

范 围 (年)	间 隔 (年)
$1 \times 10^6 - 500 \times 10^6$	1×10^6
$500 \times 10^6 - 1500 \times 10^6$	2×10^6
$1500 \times 10^6 - 2500 \times 10^6$	5×10^6
$2500 \times 10^6 - 4500 \times 10^6$	10×10^6
$4500 \times 10^6 - 6000 \times 10^6$	15×10^6

表 3 列出了计算表中年龄值 t 的范围和间隔。虽然四组比值所计算的年龄误差不同,但为了能在相同的 t 值下得到对应的各原子比值,四组年龄表采用了相同的 t 值间隔。一般说来,年龄表中选择的 t 值间隔是比较小的,对于准确的分析方法所产生的年龄计算误差一般都是适用的。

§ 2 计 算 方 法

(一) N_d/N_p 比值

为适应计算机的程序排列,斯蒂夫等应用了年龄方程式的通式:

$$\frac{N_d}{N_p} = R = e^{\lambda_{ij}t} - 1 \quad (6)$$

式中 $i=1, 2, 3$;

$j=1, 2, 3$ 。

计算时采用的衰变常数及其极限值 λ_{ij} 列于表 4。用不完全级数计算可以使 $e^{\lambda_{ij}}$ 的最大误差小于 5×10^{-5} 。

表 4 衰变常数 λ_{ij} (10^{-9}年^{-1})

核 素	λ	$\lambda + \text{误差}$	$\lambda - \text{误差}$
^{238}U	$\lambda_{11} = 0.155125$	$\lambda_{12} = 0.155042$	$\lambda_{13} = 0.155206$
^{235}U	$\lambda_{21} = 0.984850$	$\lambda_{22} = 0.984179$	$\lambda_{23} = 0.985522$
^{232}Th	$\lambda_{31} = 0.049475$	$\lambda_{32} = 0.0492262$	$\lambda_{33} = 0.0497236$

根据图 1 所示的曲线图解法可以简化由于衰变常数不准确引起的年龄误差的计算。根据几何原理,从图 1 得到:

式中 t_2 ——对应于 λ 正误差的年龄;

t_3 ——对应于 λ 负误差的年龄。

$$\text{因此:} \quad e^{\lambda_{11}t_1} - 1 = e^{\lambda_{12}t_2} - 1 \quad (7a)$$

$$e^{\lambda_{11}t_1} - 1 = e^{\lambda_{13}t_3} - 1 \quad (7b)$$

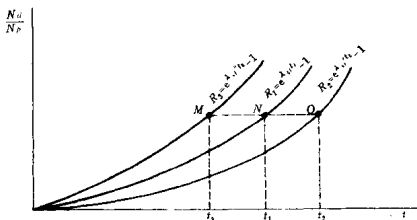


图 1 表示衰变常数正负误差的 N_d/N_p-t 曲线

对 (7a) 和 (7b) 式化简后取对数得:

$$\lambda_1 t_1 = \lambda_2 t_2 \quad (8a)$$

$$\lambda_1 t_1 = \lambda_3 t_3 \quad (8b)$$

从图 1 可以证明 $MN = t_1 - t_3$, $MO = t_2 - t_1$, 因此可以用 MN 和 NO 表示年龄误差, 则可得:

$$MN = t_1 \left(1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right) \quad (9a)$$

$$NO = t_1 \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_3} - 1 \right) \quad (9b)$$

今后如果有可能采用新的更为准确的衰变常数值, 而利用本年龄计算表只要经过简单的修正便可得到正确的年龄值。例如: ^{232}Tl 的半衰期由 $(1.401 \pm 0.007) \times 10^{10}$ 年变为 $(1.412 \pm 0.002) \times 10^{10}$ 年, 则新的年龄值 t'_1 应为:

$$t'_1 = \frac{1.412}{1.401} t_1$$

依此类推, t'_2 和 t'_3 应为:

$$t'_2 = \frac{1.414}{1.401} t_1, \quad t'_3 = \frac{1.410}{1.401} t_1.$$

如果 N_{208}/N_{232} 的实验测定比值为 0.050719, 对应的年龄 t_1 (N_{208}/N_{232} 表) 为 1000×10^6 年, 则采用新的半衰期得到的年龄 t'_1 、 t'_2 、 t'_3 分别为 1008×10^6 年、 1009×10^6 年和 1006×10^6 年。因此, 即使在以后的文献中确定了更新的半衰期值, 这个表仍然可以使用。

(二) N_{207}/N_{206} 比值

用下列方程式来计算 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄:

$$\frac{N_{207}}{N_{206}} = R = \frac{e^{\lambda_1 t} - 1}{K_1 (e^{\lambda_2 t} - 1)} \quad (10)$$

用来计算的 $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ 的原子比值 $K = 137.88 \pm 0.14$, 以 $K_1 = 137.88$, $K_2 = 138.02$ 和 $K_3 = 137.74$ 分别表示 $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ 原子比值及其上限和下限。

如上面介绍过的 N_d/N_p 比值那样, 因衰变常数不准产生的年龄误差的计算问题, 对于计算机来说已经大大简化了。用类似的曲线法如图 2 所示, 可以得到:

$$R = \frac{e^{\lambda_1 t_1} - 1}{K_1 (e^{\lambda_1 t_1} - 1)} = \frac{e^{\lambda_2 t_2} - 1}{K_2 (e^{\lambda_2 t_2} - 1)} \quad (11a)$$

$$R = \frac{e^{\lambda_1 t_1} - 1}{K_1 (e^{\lambda_1 t_1} - 1)} = \frac{e^{\lambda_3 t_3} - 1}{K_3 (e^{\lambda_3 t_3} - 1)} \quad (11b)$$

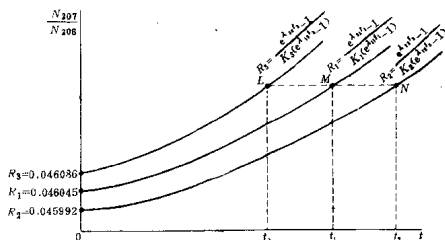


图 2 表示正负允许误差的 $N_{207}/N_{206}-t$ 曲线

但是, 根据方程式 (11a, b) 不能直接求出 t_2 和 t_3 的解, 而只能用迭代法求解。

在特殊情况下, $t_1 = t_2 = t_3 = 0$, 比值 R 是不定数。但可以求出 R 的十分准确的近似值。当 $t_1, t_2, t_3 \rightarrow 0$ 时, 可求得比值的极限是 $R_1 = 0.046045$, $R_2 = 0.045992$, $R_3 = 0.046086$ 。因此, 现代形成的放射成因铅的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 比值应为 0.046, 这一数值很接近实际测定值。

§ 3 样品的年龄计算

为了说明样品年龄计算的全部过程, 这里举一个具体的实例。假设一个品质铀矿的化学分析结果是: $\text{U}=43.646\%$, $\text{Th}=5.176\%$, 重量法分析 $\text{Pb}=7.487\%$ 。品质铀矿及其伴生方铅矿的铅同位素组成见表 5。

表 5 品质铀矿及其伴生的方铅矿中铅同位素分析值

矿 物	结 果 项 目	铅同位素组成 (原子百分含量)			
		^{204}Pb	^{206}Pb	^{207}Pb	^{208}Pb
品 质 铀 矿		0.1957	81.178	8.642	9.984
方 铅 矿		1.436	23.306	23.277	51.981

为了得到准确的年龄, 计算中所用铅的原子量必须用被测样品中的铅同位素组成计算出来的物理原子量, 而不能用普通铅的物理原子量。样品铅的物理原子量为铅的四个同位

素原子百分含量分别乘以各同位素的原子质量所得之和。因此,不同样品中铅的原子量一般也不同。A.H.Wapstra 和 N.B.Gove (1971)^[4]提供的铅的四个同位素的原子质量(取其六位有效数字)为:

$$^{204}\text{Pb} = 203.973,$$

$$^{206}\text{Pb} = 205.974,$$

$$^{207}\text{Pb} = 206.976,$$

$$^{208}\text{Pb} = 207.977.$$

从而计算出晶质铀矿中铅的原子量 $M_{\text{Pb样}} = 206.26$ 。如果样品中铅含量是用重量法测定的,则不需校正。但如果铅含量是比色法测定的,则必须用 $M_{\text{Pb样}}$ 来校正铅的百分含量*。

$$\text{Pb}\% = \text{Pb}\%_{\text{测}} \cdot \frac{M_{\text{Pb样}}}{M_{\text{Pb标}}} \quad (12)$$

式中 Pb%——样品中铅的真正重量百分含量;

Pb%_测——实验中比色法测定的铅的重量百分含量;

$M_{\text{Pb标}}$ ——实验室所用标准铅的物理原子量;

$M_{\text{Pb样}}$ ——样品铅的物理原子量。

从表 5 可知,晶质铀矿中的铅含有 0.1957% 的 ^{204}Pb 。因为在铅的四个稳定同位素中 ^{204}Pb 没有放射成因来源,所以晶质铀矿中 ^{204}Pb 的存在标志着在矿物形成时有与铀一起沉淀的铅(一般称普通铅或外来铅)的混入,这种铅与晶质铀矿中铀和钍的放射性衰变无关。所以在进行年龄计算之前必须校正晶质铀矿中混入的普通铅。

(一) 普通铅的校正

普通铅的校正是铀-钍-铅法同位素年龄测定中非常重要的环节。往往由于对普通铅校正不合理而引起年龄计算误差,这主要是因为矿物结晶时混入的普通铅的同位素组成不容易准确获得所致。一般常用普通铅单阶段演化的铅同位素组成及用同期同成因的非放射性矿物(例如方铅矿,某些造岩矿物)的铅同位素组成进行校正。

在我们所举的例子中,假设与晶质铀矿伴生的方铅矿的同位素组成(表 5)就是晶质铀矿在结晶时混入的普通铅的同位素组成,则可用下述方法进行普通铅的校正:

1. 以 ^{204}Pb 作为普通铅存在的“指标”,将晶质铀矿中的 ^{204}Pb (0.1957) 除以方铅矿中的 ^{204}Pb (1.436) 得一系数:

$$\frac{0.1957}{1.436} = 0.13628;$$

2. 以伴生方铅矿中铅同位素的原子百分数分别乘以这个系数,则分别得到晶质铀矿中混入的 ^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb 和 ^{208}Pb 的原子百分数,即:

$$^{204}\text{Pb} = 1.436 \times 0.13628 = 0.1957,$$

$$^{206}\text{Pb} = 23.306 \times 0.13628 = 3.176,$$

$$^{207}\text{Pb} = 23.277 \times 0.13628 = 3.172,$$

$$^{208}\text{Pb} = 51.981 \times 0.13628 = 7.084;$$

* 斯考夫等 1959 年所编《铅同位素年龄计算表》说明书中,铅含量校正采用的公式为: $\text{Pb}\% = \text{Pb}\%_{\text{测}} \cdot \frac{M_{\text{Pb标}}}{M_{\text{Pb样}}}$, 该公式可能有点。——编著者注

3. 然后从晶质铀矿中铅的各个同位素测定值(原子百分数)中分别扣除混入的普通铅的各个同位素的量, 则得放射成因各铅同位素的原子百分含量(如表6所示)。

表 6 晶质铀矿中的普通铅校正

	^{206}Pb	^{207}Pb	^{208}Pb	^{209}Pb
晶质铀矿中铅同位素组成(%)	0.1957	81.178	8.642	9.984
普通铅同位素含量(%)	0.1957	3.176	3.172	7.064
放射成因铅同位素含量(%)	0.0000	78.002	5.470	2.900

这里还应指出实验本底污染铅的影响。如果采用的扣除普通铅的同位素组成与实验室所用试剂铅的同位素组成差别甚大, 则还必须利用试剂铅的同位素组成进行试剂铅混入的校正; 如果差别不大, 则试剂铅的校正不必单独进行。

(二) $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄计算

首先, 用总铅的重量百分数(化学单位)乘以校正后的放射成因 ^{206}Pb 的百分数, 再除以总铀重量百分数(化学单位)与 ^{238}U 原子丰度*的乘积, 即 7.487×78.002 除以 43.646×99.274 , 然后必须用铀的物理原子量** $M_{\text{U}} = 238.028$ 除以样品铅的原子量 $M_{\text{Pb样}} = 206.26$, 即:

$$\frac{M_{\text{U}}}{M_{\text{Pb样}}} = \frac{238.028}{206.26} = 1.1540,$$

将重量比化为原子比。因为阿伏伽德罗常数在分子和分母中同时出现, 互相抵消, 而不影响 $N_{\text{a}}/N_{\text{p}}$ 比值。因此, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 法的年龄计算为:

$$\begin{aligned} N_{206}/N_{238} &= \frac{\text{Pb}\% \times [206]}{\text{U}\% \times 99.274} \times \frac{M_{\text{U}}}{M_{\text{Pb样}}} \\ &= \frac{7.487 \times 78.002}{43.646 \times 99.274} \times 1.1540 = 0.155528, \end{aligned}$$

查 N_{206}/N_{238} 表得 $(932 \pm 0.5) \times 10^6$ 年。

(三) $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄计算

与 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄计算方法相同, 以总铅的化学重量百分数乘以校正后的放射成因 ^{207}Pb 的原子百分数, 再除以总铀的化学重量百分数与 ^{235}U 原子丰度*的乘积, 就得到 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 重量比值, 用换算系数1.1540将重量比化为原子比。因此 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄计算为:

$$\begin{aligned} N_{207}/N_{235} &= \frac{\text{Pb}\% \times [207]}{\text{U}\% \times 0.720} \times \frac{M_{\text{U}}}{M_{\text{Pb样}}} = \frac{7.487 \times 5.470}{43.646 \times 0.720} \times 1.1540 \\ &= 1.503918, \end{aligned}$$

查 N_{207}/N_{235} 表得 $(932 \pm 0.6) \times 10^6$ 年。

* 据佩斯等(1959)采用的铀同位素丰度值, 利用本文采用的 ^{238}U 与 ^{235}U 的原子比值, 我们计算得 ^{238}U 的原子丰度为99.274, ^{235}U 的原子丰度为0.720。

** 根据A. H. Wapstra等提供的铀同位素质量数并采用本文铀同位素的丰度值计算而得。

(四) $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄计算

因为在计算 N_{207}/N_{206} 比值中, 其他量互相抵消, 所以 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄可以直接从扣除普通铅以后的放射成因铅同位素 ^{207}Pb 与 ^{206}Pb 的原子丰度相比而求得。因此 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄计算为:

$$N_{207}/N_{206} = \frac{[207]}{[206]} = \frac{5.470}{78.002} = 0.07013,$$

查 N_{207}/N_{206} 表得 $(932 \pm 3) \times 10^6$ 年。

(五) $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ 年龄计算

用总铅的化学重量百分数乘以放射成因 ^{208}Pb 的原子百分数, 再除以钍的化学重量百分数与 ^{232}Th 的原子丰度(100)的乘积, 就得到 $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ 的重量比值, 这个比值再用如下系数化为原子比值:

$$\frac{M_{\text{Th}}}{M_{\text{Pb样}}} = \frac{232.038}{206.26} = 1.1250,$$

因此, $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ 年龄计算为:

$$\begin{aligned} N_{208}/N_{232} &= \frac{\text{Pb}\% \times [208]}{\text{Th}\% \times 100} \times \frac{M_{\text{Th}}}{M_{\text{Pb样}}} \\ &= \frac{7.487 \times 2.900}{5.176 \times 100} \times 1.1250 \\ &= 0.047192, \end{aligned}$$

查 N_{208}/N_{232} 表得 $(932 \pm 4.7) \times 10^6$ 年。

参 考 文 献

- [1] L.R.Stieff et al., Tables for the calculation of lead isotope ages, Geological survey professional paper* 334-A (1959).
- [2] A.H.Jaffey et al., Precision measurement of half-lives and specific activities of ^{235}U and ^{238}U , Physical Rev., C, 4, P. 1889 (1971).
- [3] L.J.Leroux and L.L.Glendenin, Half-life of thorium-232, Proc. of Natl. Conf. on Nuclear Energy in Pretoria, April (1963).
- [4] A.H.Wapstra and N.B.Gove, "The 1971 Atomic Mass Evaluation", Nuclear Data Tables, Vol. 9, No. 4-5, (1971).

铀-钍-铅法同位素年龄计算表

表 中 所 用 参 数 (λ 单位为 10^{-9}年^{-1})

	λ	$\lambda + \text{误差}$	$\lambda - \text{误差}$
^{238}U	0.155125	0.155042	0.155209
^{235}U	0.984850	0.984179	0.985522
^{232}Th	0.049473	0.0492292	0.0497236

上述参数来自下列半衰期 (T 单位为 10^9年)

	T	$T + \text{误差}$	$T - \text{误差}$
^{238}U	4.4683	4.4707	4.4659
^{235}U	0.70381	0.70429	0.70353
^{232}Th	11.01	14.08	13.94

$$^{238}\text{U} / ^{235}\text{U} = 137.88 \pm 0.14$$

年 龄 值 及 误 差 (10%年)

1-50

年 龄	N_{200}/N_{235}		N_{207}/N_{235}		N_{207}/N_{208}		N_{208}/N_{235}	
	比 值	年龄误差	比 值	年龄误差	比 值	年龄误差	比 值	年龄误差
1	0.000155	0.0	0.000985	0.0	0.046065	2.8	0.000045	0.3
2	0.000310	0.0	0.001972	0.0	0.046084	2.8	0.000099	0.0
3	0.000465	0.0	0.002959	0.0	0.046103	2.8	0.000148	0.0
4	0.000621	0.0	0.003947	0.0	0.046122	2.8	0.000198	0.0
5	0.000776	0.0	0.004936	0.0	0.046141	2.8	0.000247	0.0
6	0.000931	0.0	0.005927	0.0	0.046160	2.8	0.000297	0.0
7	0.001086	0.0	0.006918	0.0	0.046179	2.8	0.000346	0.0
8	0.001242	0.0	0.007910	0.0	0.046199	2.8	0.000396	0.0
9	0.001397	0.0	0.008903	0.0	0.046218	2.8	0.000445	0.0
10	0.001552	0.0	0.009897	0.0	0.046237	2.8	0.000495	0.0
11	0.001708	0.0	0.010892	0.0	0.046256	2.8	0.000544	0.1
12	0.001863	0.0	0.011888	0.0	0.046276	2.8	0.000594	0.1
13	0.002019	0.0	0.012885	0.0	0.046295	2.8	0.000643	0.1
14	0.002174	0.0	0.013883	0.0	0.046314	2.8	0.000693	0.1
15	0.002330	0.0	0.014882	0.0	0.046333	2.8	0.000742	0.1
16	0.002485	0.0	0.015882	0.0	0.046353	2.8	0.000792	0.1
17	0.002641	0.0	0.016883	0.0	0.046372	2.8	0.000841	0.1
18	0.002796	0.0	0.017885	0.0	0.046391	2.8	0.000891	0.1
19	0.002952	0.0	0.018888	0.0	0.046411	2.8	0.000940	0.1
20	0.003107	0.0	0.019892	0.0	0.046430	2.8	0.000990	0.1
21	0.003263	0.0	0.020897	0.0	0.046449	2.8	0.001040	0.1
22	0.003419	0.0	0.021903	0.0	0.046469	2.8	0.001089	0.1
23	0.003574	0.0	0.022910	0.0	0.046488	2.8	0.001139	0.1
24	0.003730	0.0	0.023918	0.0	0.046507	2.8	0.001188	0.1
25	0.003886	0.0	0.024927	0.0	0.046527	2.8	0.001238	0.1
26	0.004041	0.0	0.025937	0.0	0.046546	2.8	0.001287	0.1
27	0.004197	0.0	0.026948	0.0	0.046565	2.8	0.001337	0.1
28	0.004353	0.0	0.027960	0.0	0.046585	2.8	0.001386	0.1
29	0.004509	0.0	0.028972	0.0	0.046604	2.8	0.001436	0.1
30	0.004665	0.0	0.029986	0.0	0.046624	2.8	0.001485	0.1
31	0.004820	0.0	0.031001	0.0	0.046643	2.8	0.001535	0.2
32	0.004976	0.0	0.032017	0.0	0.046663	2.8	0.001584	0.2
33	0.005132	0.0	0.033034	0.0	0.046682	2.8	0.001634	0.2
34	0.005288	0.0	0.034052	0.0	0.046702	2.8	0.001684	0.2
35	0.005444	0.0	0.035071	0.0	0.046721	2.8	0.001733	0.2
36	0.005600	0.0	0.036091	0.0	0.046741	2.8	0.001783	0.2
37	0.005756	0.0	0.037112	0.0	0.046760	2.8	0.001832	0.2
38	0.005912	0.0	0.038133	0.0	0.046780	2.8	0.001882	0.2
39	0.006068	0.0	0.039156	0.0	0.046799	2.8	0.001931	0.2
40	0.006224	0.0	0.040180	0.0	0.046819	2.8	0.001981	0.2
41	0.006380	0.0	0.041205	0.0	0.046838	2.8	0.002031	0.2
42	0.006537	0.0	0.042231	0.0	0.046858	2.8	0.002080	0.2
43	0.006693	0.0	0.043258	0.0	0.046878	2.8	0.002130	0.2
44	0.006849	0.0	0.044286	0.0	0.046897	2.8	0.002179	0.2
45	0.007005	0.0	0.045315	0.0	0.046917	2.8	0.002229	0.2
46	0.007161	0.0	0.046345	0.0	0.046937	2.8	0.002278	0.2
47	0.007318	0.0	0.047376	0.0	0.046956	2.8	0.002328	0.2
48	0.007474	0.0	0.048408	0.0	0.046975	2.8	0.002378	0.2
49	0.007630	0.0	0.049441	0.0	0.046995	2.8	0.002427	0.2
50	0.007786	0.0	0.050475	0.0	0.047015	2.8	0.002477	0.2

年 龄	N_{204}/N_{128}			N_{207}/N_{128}			N_{207}/N_{206}			N_{208}/N_{112}		
	比 值	年龄误差	比 值	年龄误差	比 值	年龄误差	比 值	年龄误差	比 值	年龄误差	比 值	年龄误差
51	0.007843	0.0	0.051510	0.0	0.047035	2.8	0.002526	0.3				
52	0.008699	0.0	0.052546	0.0	0.047055	2.8	0.002576	0.3				
53	0.008256	0.0	0.053583	0.0	0.047074	2.8	0.002626	0.3				
54	0.008412	0.0	0.054521	0.0	0.047094	2.8	0.002675	0.3				
55	0.008568	0.0	0.055561	0.0	0.047114	2.8	0.002725	0.3				
56	0.008725	0.0	0.056701	0.0	0.047134	2.8	0.002774	0.3				
57	0.008881	0.0	0.057742	0.0	0.047153	2.8	0.002824	0.3				
58	0.009038	0.0	0.058784	0.0	0.047173	2.8	0.002874	0.3				
59	0.009194	0.0	0.059827	0.0	0.047193	2.8	0.002923	0.3				
60	0.009351	0.0	0.060872	0.0	0.047213	2.8	0.002973	0.3				
61	0.009508	0.0	0.061917	0.0	0.047233	2.8	0.003023	0.3				
62	0.009664	0.0	0.062953	0.0	0.047252	2.8	0.003072	0.3				
63	0.009821	0.0	0.064011	0.0	0.047272	2.8	0.003122	0.3				
64	0.009977	0.0	0.065039	0.0	0.047292	2.8	0.003171	0.3				
65	0.010134	0.0	0.066109	0.0	0.047312	2.8	0.003221	0.3				
66	0.010291	0.0	0.067159	0.0	0.047332	2.8	0.003271	0.3				
67	0.010448	0.0	0.068211	0.0	0.047352	2.8	0.003320	0.3				
68	0.010604	0.0	0.069263	0.0	0.047372	2.8	0.003370	0.3				
69	0.010761	0.0	0.070317	0.0	0.047391	2.8	0.003420	0.3				
70	0.010918	0.0	0.071371	0.0	0.047411	2.8	0.003469	0.3				
71	0.011075	0.0	0.072427	0.0	0.047431	2.8	0.003519	0.4				
72	0.011232	0.0	0.073484	0.0	0.047451	2.8	0.003569	0.4				
73	0.011388	0.0	0.074541	0.0	0.047471	2.8	0.003618	0.4				
74	0.011545	0.0	0.075600	0.1	0.047491	2.8	0.003668	0.4				
75	0.011702	0.0	0.076660	0.1	0.047511	2.8	0.003718	0.4				
76	0.011859	0.0	0.077721	0.1	0.047531	2.8	0.003767	0.4				
77	0.012016	0.0	0.078783	0.1	0.047551	2.8	0.003817	0.4				
78	0.012173	0.0	0.079846	0.1	0.047571	2.8	0.003867	0.4				
79	0.012330	0.0	0.080910	0.1	0.047591	2.8	0.003916	0.4				
80	0.012487	0.0	0.081975	0.1	0.047611	2.8	0.003966	0.4				
81	0.012644	0.0	0.083041	0.1	0.047631	2.8	0.004016	0.4				
82	0.012801	0.0	0.084108	0.1	0.047651	2.8	0.004065	0.4				
83	0.012959	0.0	0.085175	0.1	0.047671	2.8	0.004115	0.4				
84	0.013116	0.0	0.086245	0.1	0.047692	2.8	0.004165	0.4				
85	0.013273	0.0	0.087315	0.1	0.047712	2.8	0.004214	0.4				
86	0.013430	0.0	0.088387	0.1	0.047732	2.8	0.004264	0.4				
87	0.013587	0.0	0.089459	0.1	0.047752	2.8	0.004314	0.4				
88	0.013745	0.0	0.090532	0.1	0.047772	2.8	0.004363	0.4				
89	0.013902	0.0	0.091608	0.1	0.047792	2.8	0.004413	0.4				
90	0.014059	0.0	0.092683	0.1	0.047812	2.8	0.004463	0.4				
91	0.014218	0.0	0.093759	0.1	0.047832	2.8	0.004512	0.5				
92	0.014374	0.0	0.094839	0.1	0.047853	2.8	0.004562	0.5				
93	0.014531	0.1	0.095917	0.1	0.047873	2.8	0.004612	0.5				
94	0.014689	0.1	0.096996	0.1	0.047893	2.8	0.004661	0.5				
95	0.014846	0.1	0.098077	0.1	0.047913	2.8	0.004711	0.5				
96	0.015003	0.1	0.099155	0.1	0.047934	2.8	0.004761	0.5				
97	0.015161	0.1	0.100245	0.1	0.047954	2.8	0.004811	0.5				
98	0.015318	0.1	0.101326	0.1	0.047974	2.8	0.004860	0.5				
99	0.015476	0.1	0.102412	0.1	0.047995	2.8	0.004910	0.5				
100	0.015632	0.1	0.103498	0.1	0.048015	2.8	0.004960	0.5				

年 龄	N_{204}/N_{238}			N_{207}/N_{235}			N_{207}/N_{208}			N_{208}/N_{232}		
	比 值	年龄误差		比 值	年龄误差		比 值	年龄误差		比 值	年龄误差	
101	0.015791	0.1		0.104525	0.1		0.048035	2.8		0.005009	0.5	
102	0.015949	0.1		0.105674	0.1		0.049055	2.8		0.005059	0.5	
103	0.016106	0.1		0.106753	0.1		0.049976	2.8		0.005109	0.5	
104	0.016264	0.1		0.107854	0.1		0.048995	2.8		0.005159	0.5	
105	0.016421	0.1		0.108945	0.1		0.048116	2.8		0.005208	0.5	
106	0.016579	0.1		0.110038	0.1		0.048137	2.8		0.005258	0.5	
107	0.016737	0.1		0.111132	0.1		0.048157	2.8		0.005308	0.5	
108	0.016895	0.1		0.112225	0.1		0.048178	2.8		0.005358	0.5	
109	0.017052	0.1		0.113322	0.1		0.048198	2.8		0.005407	0.5	
110	0.017210	0.1		0.114419	0.1		0.048218	2.8		0.005457	0.5	
111	0.017368	0.1		0.115517	0.1		0.048239	2.8		0.005507	0.6	
112	0.017525	0.1		0.116617	0.1		0.048259	2.8		0.005557	0.6	
113	0.017684	0.1		0.117717	0.1		0.048280	2.8		0.005606	0.6	
114	0.017842	0.1		0.118818	0.1		0.048300	2.8		0.005656	0.6	
115	0.017999	0.1		0.119921	0.1		0.048321	2.8		0.005706	0.6	
116	0.018157	0.1		0.121024	0.1		0.048341	2.8		0.005756	0.6	
117	0.018315	0.1		0.122129	0.1		0.048362	2.8		0.005805	0.6	
118	0.018473	0.1		0.123234	0.1		0.048382	2.8		0.005855	0.6	
119	0.018631	0.1		0.124341	0.1		0.048403	2.8		0.005905	0.6	
120	0.018789	0.1		0.125449	0.1		0.048423	2.8		0.005955	0.6	
121	0.018947	0.1		0.126558	0.1		0.048444	2.8		0.006004	0.6	
122	0.019105	0.1		0.127668	0.1		0.048464	2.8		0.006054	0.6	
123	0.019264	0.1		0.128779	0.1		0.048485	2.8		0.006104	0.6	
124	0.019422	0.1		0.129891	0.1		0.048506	2.8		0.006154	0.6	
125	0.019580	0.1		0.131005	0.1		0.048526	2.8		0.006204	0.6	
126	0.019738	0.1		0.132119	0.1		0.048547	2.8		0.006254	0.6	
127	0.019896	0.1		0.133235	0.1		0.048567	2.8		0.006303	0.6	
128	0.020054	0.1		0.134351	0.1		0.048588	2.8		0.006353	0.6	
129	0.020213	0.1		0.135469	0.1		0.048609	2.8		0.006403	0.6	
130	0.020371	0.1		0.136588	0.1		0.048629	2.8		0.006452	0.6	
131	0.020529	0.1		0.137708	0.1		0.048650	2.8		0.006502	0.7	
132	0.020688	0.1		0.138829	0.1		0.048671	2.8		0.006552	0.7	
133	0.020846	0.1		0.139951	0.1		0.048691	2.8		0.006602	0.7	
134	0.021004	0.1		0.141074	0.1		0.048712	2.8		0.006652	0.7	
135	0.021163	0.1		0.142198	0.1		0.048733	2.8		0.006701	0.7	
136	0.021321	0.1		0.143324	0.1		0.048754	2.8		0.006751	0.7	
137	0.021480	0.1		0.144450	0.1		0.048774	2.8		0.006801	0.7	
138	0.021638	0.1		0.145578	0.1		0.048795	2.8		0.006851	0.7	
139	0.021797	0.1		0.146707	0.1		0.048816	2.8		0.006901	0.7	
140	0.021955	0.1		0.147837	0.1		0.048837	2.8		0.006951	0.7	
141	0.022114	0.1		0.148968	0.1		0.048858	2.8		0.007000	0.7	
142	0.022272	0.1		0.150100	0.1		0.048878	2.8		0.007050	0.7	
143	0.022431	0.1		0.151233	0.1		0.048899	2.8		0.007100	0.7	
144	0.022589	0.1		0.152367	0.1		0.048920	2.8		0.007150	0.7	
145	0.022748	0.1		0.153503	0.1		0.048941	2.8		0.007200	0.7	
146	0.022907	0.1		0.154639	0.1		0.048962	2.8		0.007250	0.7	
147	0.023065	0.1		0.155777	0.1		0.048983	2.8		0.007300	0.7	
148	0.023224	0.1		0.156916	0.1		0.049004	2.8		0.007349	0.7	
149	0.023383	0.1		0.158056	0.1		0.049024	2.8		0.007399	0.7	
150	0.023542	0.1		0.159197	0.1		0.049045	2.8		0.007449	0.7	