

# 数据不协调时独居石 EPMA CHIME 定年计算方法的改进\*

王勤燕<sup>1</sup> 陈能松<sup>1</sup> 潘元明<sup>2</sup>

WANG QinYan<sup>1</sup>, CHEN NengSong<sup>1</sup> and PAN YuanMing<sup>2</sup>

1. 中国地质大学地球科学学院, 武汉 430074

2. Department of Geological Sciences, University of Saskatchewan, Saskatoon, SK., S7N 5E2, Canada

1. China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2006-07-25 收稿, 2007-01-29 改回.

**Wang QY, Chen NS and Pan YM. 2007. Improved algorithm for analyzing discordant data from EPMA CHIME dating of monazite. Acta Petrologica Sinica, 23(4):855–860**

**Abstract** A common problem in EPMA (electron probe microanalysis) CHIME (chemical Th-U-total Pb isochron method) dating of monazite is discordant Th-U-Pb data. As two age domains can mix in probing plane or intersect in probing depth, and monazite can lose Pb by alteration or recrystallization, the Th-U-Pb system EPMA data may result in discordant. EPMA CHIME dates of monazite are between the minimum of  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  ages and  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  ages, and the maximum of  $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$  ages, while Th and U equal zero respectively. In view of brief analysis, ages of monazite calculated from convention isochronal methods possessed larger error. This article proposes a new algorithm for systematically evaluating EPMA Th-U-Pb data of monazite. This algorithm takes analytical errors into account and eliminates discordant data points on the basis of “excess”  $\text{UO}_2$ . Advantage of this algorithm over previously published methods is demonstrated by improved results for several sets of monazite Th-U-Pb data in the literature.

**Key words** Monazite, EPMA CHIME dating, Discordant data, New algorithm.

**摘要** Th-U-Pb 系统数据不协调是独居石电子探针化学定年 (EPMA CHIME Dating) 中一种很常见的问题。独居石矿物产生数据不协调的主要原因包括: 1) 蚀变或重结晶造成的铅丢失; 2) 不同年龄域在空间上的重叠或者存在于很小颗粒上的小年龄域。独居石 EPMA 年龄必大于 U 等于 0 时的极端情况给出的值, 即当 U 为 0 时, EPMA CHIME 年龄给出的是  $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$  年龄, 这是测量区域内最老年龄的下限。当 Th 为 0 时, EPMA CHIME 年龄值介于  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  和  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  年龄值之间, 这是 EPMA 法所能得到的最老年龄的上限。分析表明, 当独居石 EPMA 数据出现不协调时, 传统等时线方法计算的年龄值误差较大。本文提出了一种处理数据不协调情况下的优化算法。该算法考虑了测量误差, 并根据剩余铀的总量剔出大的离散数据。利用已公开的数据进行算法对比的结果表明, 本文提出的优化算法计算结果可靠。

**关键词** 独居石; EPMA CHIME 定年; 数据不协调; 年龄算法

**中图分类号** P597.3

## 1 引言

利用电子探针 (EPMA) 测定独居石等副矿物中 Th、U、Pb 的含量而进行化学定年的方法 (CHIME: Chemical Th-U-Total Pb Isochron Method), 简称 EPMA CHIME Dating, 最早由日本 Nagoya 大学的 Kazuhiro Suzuki 和 Mamoru Adachi 于 90 年代初提出 (Suzuki and Adachi, 1991a, 1994, 1998), 后经 Montel

et al. (1996, 2000)、Cocherie et al. (1998, 2001, 2005)、Williams et al. (1999, 2002, 2006) 及 Pyle (2005) 等一批地质学家不断完善, 并得到广泛应用。该方法以其高空间分辨率 (可小于  $5\mu\text{m}$ )、对样品无破坏性、成本低等特点, 以及定年精度达 (5~15) Ma (Cocherie and Albarède, 2001), 满足前新生代岩石学和地球化学研究的要求, 可有效区分造山带变质期和岩浆作用阶段 (陈能松等, 2003; 刘树文等, 2004), 在原

\* 国家自然科学基金项目 No. 40272030, NSERC (Canada); 教育部博士学科点基金项目 No. 20050491506; 中国地质大学“地质过程与矿产资源国家重点实验室”开放课题 No. GPMR0510.

第一作者简介: 王勤燕, 女, 1963 年生, 副教授, 在读博士, 从事岩石矿物学和微束分析技术在变质年代学应用研究, E-mail: qinyanw@cug.edu.cn

地原位微区化学定年方面体现出独特的优势(周剑雄等, 2002; 张文兰等, 2003; 王勤燕等, 2005), 成为近十年来定年方法的新宠。该方法的应用现状和主要研究进展体现在《American Mineralogist》2005年卷90的专栏上。

EPMA 定年测量的是矿物的化学成分含量而非同位素本身, 因而有三个基本假设前提: 1) 没有普通铅存在; 2) 系统封闭, 即无铅的丢失; 3) 分析区域均匀。满足这三个假设时, 放射性铅的同位素组成可以表示成下面的三个方程:

$$\begin{aligned} {}^{208}\text{Pb} &= {}^{232}\text{Th}(e^{\lambda^{232}t} - 1) \\ {}^{206}\text{Pb} &= {}^{238}\text{U}(e^{\lambda^{238}t} - 1) \\ {}^{207}\text{Pb} &= {}^{235}\text{U}(e^{\lambda^{235}t} - 1) \end{aligned} \quad (1)$$

所以, 封闭体系中矿物的总铅含量代表 Th-U 衰变所形成的放射性成因铅, 即:

$$\begin{aligned} \text{Pb} &= {}^{232}\text{Th}(e^{\lambda^{232}t} - 1) + {}^{238}\text{U}(e^{\lambda^{238}t} - 1) \\ &+ {}^{235}\text{U}(e^{\lambda^{235}t} - 1) \end{aligned} \quad (2)$$

假定同位素数据是协调的 (concordant), 即由上述同位素系统得到的年龄值相同, 利用正常现今铀比值  ${}^{235}\text{U}/{}^{238}\text{U} = 1/137.88$ , EMPA 法定年的公式为:

$$\begin{aligned} \text{Pb} &= {}^{232}\text{Th}(e^{\lambda^{232}t} - 1) + 0.9928\text{U}(e^{\lambda^{238}t} - 1) \\ &+ 0.0072\text{U}(e^{\lambda^{235}t} - 1) \end{aligned} \quad (3)$$

根据 EPMA 分析数据计算年龄的方法至少可以归纳出 5 种: 1) 基于等时线原理的经典算法 (Suzuki and Adachi, 1991b); 2) 混合模拟算法 (Sambridge and Compston, 1994); 3) 基于 Wendt (Wendt, 1984) 算法的三维拟合方法 (Rhede *et al.*, 1996; Cocherie and Albarede, 2001; Kuiper, 2005); 4) Montel *et al.* (1996) 提出的平均视年龄方法; 5) 背景模拟方法 (Geisler, 1999)。这些方法均是假定计算所涉及的测量数据是协调一致的, 即完全满足各算法前提。其中 Geisler (1999) 的背景模拟方法是目前应用最广的一种化学年龄算法。

但是, 有时实际样品测量的微区成分及结构是相当复杂的, 年龄域的区别不易识别。正如同位素年龄数据有时并不协调一样, 电子探针定年的测量数据同样也会出现不协调现象。Kuiper (2005) 指出, 对于独居石矿物产生数据不协调的主要原因包括: 1) 蚀变或重结晶造成的铅丢失; 2) 不同年龄域在空间上的重叠或者存在于很小颗粒上的小年龄域。对于数据不协调, 方程 (2) 中的三个年龄不相等, 而仍然按方程 (3) 计算出的 EPMA 年龄代表什么年龄呢? 由方程 (3) 可知, 右端三项都大于或等于零 (因为  $t \geq 0$ ), 因此独居石 EPMA 年龄必大于 U 等于 0 时的极端情况给出的值, 即当 U 为 0 时, EPMA 年龄给出的是  ${}^{208}\text{Pb}/{}^{232}\text{Th}$  年龄, 这是测量区域内最老铅年龄的下限, 即可能年龄的最小值。当 Th 为 0 时, 由方程 (3) 计算得到的年龄值介于  ${}^{206}\text{Pb}/{}^{238}\text{U}$  和  ${}^{207}\text{Pb}/{}^{235}\text{U}$  年龄之间, 这是 EPMA 法所能得到的最老铅年龄的上限, 即可能年龄的最大值。明确 EPMA 年龄的区间是合理选择算法的前提, 如果算法前提在一定程度上无法明确判别时, 数据

就可能出现不协调影响。基于这方面, 本文试图从算法的角度讨论当数据出现不协调时, 如何进行合理的 EPMA 定年计算, 提出一种新的电子探针化学定年优化算法, 并利用已公开的样品数据, 给出了本文提出的算法计算结果与其它算法进行对比的实例。

## 2 计算方法

### 2.1 等时线经典算法 (Suzuki 和 Adachi 1991b)

当元素成分用氧化物百分重量给出时, 方程 (3) 可以修改为:

$$\begin{aligned} \frac{\text{PbO}}{W_{\text{Pb}}} &= \frac{\text{ThO}_2}{W_{\text{Th}}}(e^{\lambda^{232}t} - 1) \\ &+ \frac{\text{UO}_2}{W_{\text{U}}}\left[\frac{e^{\lambda^{235}t} + 137.88e^{\lambda^{238}t}}{138.88} - 1\right] \end{aligned} \quad (4)$$

式中 PbO, ThO<sub>2</sub>, UO<sub>2</sub> 分别表示对应氧化物的百分重量; W<sub>Pb</sub>, W<sub>Th</sub>, W<sub>U</sub> 分别表示对应氧化物的分子量, 且 W<sub>Pb</sub> = 224, W<sub>Th</sub> = 264, W<sub>U</sub> = 270; λ 为衰减常数, 且

$$\lambda_{232} = 4.9475 \times 10^{-11}/y,$$

$$\lambda_{235} = 9.8485 \times 10^{-10}/y,$$

$$\lambda_{238} = 1.55125 \times 10^{-10}/y。$$

实际计算中, 采用下面的公式:

$$x = \frac{a + b + c}{a + b(c_1 e^{-a_1} + c_2 e^{-b_1})} \quad (5)$$

$$t_a = \ln x / \lambda_{232} \quad (6)$$

式中  $a = \frac{\text{ThO}_2}{W_{\text{Th}}}$ ,  $b = \frac{\text{UO}_2}{W_{\text{U}}}$ ,  $c = \frac{\text{PbO}}{W_{\text{Pb}}}$ ,  $c_1 = \frac{1}{138.88}$ ,  $c_2 = \frac{137.88}{138.88}$ ;

由于数据的不协调,  $t_a$  一般不等于实际年龄, 因而称为视年龄 (apparent age)。独居石 Th-Pb 系统占支配地位, 可以根据视时间  $t_a$  由下式将 ThO<sub>2</sub> 和 UO<sub>2</sub> 换算成 ThO<sub>2</sub><sup>\*</sup>:

$$\text{ThO}_2^* = \text{ThO}_2 + \frac{bW_{\text{Th}}}{e^{\lambda^{232}t_a} - 1}(c_1 e^{\lambda^{232}t_a} + c_2 e^{\lambda^{238}t_a}) \quad (7)$$

在体系封闭、分析矿物同源及假定含有相同数量的初始 Pb 的条件下, ThO<sub>2</sub><sup>\*</sup> 与 PbO 之间满足线性关系:

$$\text{PbO} = m\text{ThO}_2^* + q \quad (8)$$

式中  $m$  为斜率,  $q$  为截距。若已知上式中的  $m$ , 可以由下式计算修正后的年龄:

$$t = \lambda_{232}^{-1} \ln(1 + mW_{\text{Th}}/W_{\text{Pb}}) \quad (9)$$

由于视年龄比实际年龄一般大很多, 因此由方程 (7) 换算得到的 ThO<sub>2</sub><sup>\*</sup> 的量不足, 必须根据方程 (9) 得到的修正年龄重新换算, 然后再进行直线拟合, 得到第二个修正年龄。如此迭代下去, 直到满足预先给定的停止迭代准则。

### 2.2 等时线算法因铅丢失而引起的误差分析

不失一般性, 若设  $q = 0$ , 拟合直线过原点, 这时上述算法为过固定点的 York 算法 (Geisler, T., 1999)。若设铅丢失的比例为  $\alpha$ , 则由方程 (8) 和 (9) 可知, 该方法计算得到的年龄

绝对偏差  $\Delta t$  为:

$$\begin{aligned}\Delta t &= \frac{1}{\lambda_{232}} \{ \ln(1 + a_0 m) - \ln[1 + (1 - \alpha) a_0 m] \} \\ &= \frac{1}{\lambda_{232}} \ln \frac{1 + a_0 m}{1 + (1 - \alpha) a_0 m}\end{aligned}\quad (10)$$

式中  $a_0 = W_{\text{Th}}/W_{\text{Pb}} \approx 1.17857$ 。根据方程(10)可以做出铅丢失比例与年龄绝对偏差之间的关系曲线。而相对偏差在一阶精度上(小于1%)与铅丢失比例相等,即铅丢失10%,计算得到的年龄相对偏差也约为10%。所以在有铅丢失情况下,若采用强制过原点的直线拟合算法,误差很大。

### 2.3 基于飞点剔除和考虑总剩余铀的停止迭代准则的新算法

若得到同一个年龄域的测试点  $n$  个,定年的计算步骤如下:

1) 由方程(6)计算视时间  $t_a(i)$ ,  $i=1,2,\dots,n$ ;

2) 由方程(7)计算  $\text{ThO}_2^*(i)$ ,  $i=1,2,\dots,n$ ;

3) 由方程(8)进行直线拟合,求出最优斜率  $m$ ;

4) 计算每个点对  $(\text{PbO}, \text{ThO}_2^*)$  到直线方程(8)的距离  $d_i$ , 求出序列  $d_i (i=1,2,\dots,n)$  的方差  $\sigma$ , 如果  $(d_i - \bar{d}) > n\sigma$  ( $\bar{d}$  为序列  $d_i$  的均值,一般地  $1 \leq n \leq 3$ ), 剔除该点数据;

5) 由方程(9)计算修正后的时间  $t_1$ ;

6) 计算均方加权偏差 (mean square weighted deviate, MSWD) 度量直线拟合的好坏:

$$\text{MSWD} = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n \frac{[(\text{PbO})_i - m(\text{ThO}_2^*)_i - q]^2}{y_i + m^2 x_i}$$

Asami (Asami *et al.*, 2002) 定义式中的  $y_i$  和  $x_i$  为对应数据点  $(\text{PbO}, \text{ThO})$  的方差,由电子探针进行多次测量的结果给出。一个替代的方法是用标准差的平方代替,这时 MSWD 与  $\chi^2$  统计度量等效 (Press *et al.*, 1992),  $(n-2)$  为此问题中数据的自由度;

7) 根据修正后的时间  $t_1$  和  $\text{ThO}_2^*$  分别代替方程(4)中的  $t$  和  $\text{ThO}_2$ , 可以计算每个样点的剩余氧化铀  $\text{UO}_2^*(i)$  ( $i=1,2,\dots,n$ )。若有某个  $i_k$  点  $\text{UO}_2^*(i_k)$  小于零,则令其等于零。若剩余氧化铀的总量小于原氧化铀总量的某个预先给定的阈值如1%,则停止迭代,输出当前的年龄值和 MSWD, 否则转到8);

8) 若当前迭代得到的年龄值与前一次修正年龄的相对偏差小于某个预先设定的阈值如0.1%,则迭代停止,输出当前的年龄值和 MSWD, 否则进入下一次迭代,转到2)。

从上述计算过程可以看到,有两个可以使计算停止的准则: 剩余铀的总量的多少和前后两次迭代年龄的相对偏差。

从理论上,当体系封闭,无初始铅,无铅丢失,分析矿物同源(年龄域均匀),且测量误差可忽略不计时,第一次直线拟合后就可以得到精确的实际年龄值,此时所有的  $\text{UO}_2$  都转换成  $\text{ThO}_2^*$ , 直线过原点。但是由于上述前提条件并不同时满足,即数据存在不协调,此时前人有两种算法 (Geisler T, 1999) 可供选择:

1) York-I 和 York-II 算法 (York, D., 1969): 不要求直线过原点,以直线的最佳拟合程度作为停止迭代的准则,此时会出现参与计算的部分样点氧化铀转换成氧化钍的量不足或过头(剩余铀出现负值);

2) York-b 算法: 此时强迫拟合直线过原点,将直线的最佳拟合程度作为停止迭代的准则,往往导致计算得到的年龄超过前言中提及的上下限,即计算年龄无实际意义。

前已述及,独居石 Th-U-Pb 系统中,EPMA 年龄下限为 U 等于0时计算得到的年龄,因此当测试年龄域均匀时,当计算年龄等于  $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$  年龄时,所有测试点的 U 值理论上均等于零,因此在保持每个样点剩余铀大于或等于零的前提下,总剩余铀接近于零时将不得不强行停止迭代。另外,对于个别来自不同年龄域上的数据,往往表现为大的离散性,即飞点,按照上述算法可以很方便地剔除该类数据。因此,本文提出的算法是处理数据不协调情况下的一种可选的合理算法。

## 3 计算实例

作者采用考虑自变量和因变量均存在误差的直线拟合程序 (Press *et al.*, 1992, p660-664), 根据上一节给出的算法流程编制了相应的计算程序。下面给出两个算例。

### 3.1 美国新墨西哥州 Elk Mountain 独居石年龄算例

该样品曾作为 EPMA 实验室定年精度对比之用,在多所大学进行过分析和计算,并且做过 ID-TIMS  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  (Jercinovic and Williams, 2005) 和 ICPMS 定年。表1列出 Alabama 大学的 EPMA 数据。表2为该样品  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄、ICPMS 年龄、Alabama 大学 Bersch 教授公布的计算年龄,根据 York-I、York-II 和 York-b 算法(强迫拟合直线过原点)得到的年龄及本文提出方法计算得到的年龄。从图1可以看到,数据存在一定的不协调, York-I 得到的年龄值不可信 (MSWD = 77), York-II 给出的年龄误差限太大,本文算法假定所有数据的测量误差为1%,其结果介于 York-II 和 York-b 年龄之间,误差限较小,且最接近  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  和 ICPMS 年龄。

表1 Elk Mountain 独居石 EPMA 数据

Table 1 EPMA data of monazite from Elk Mountain, New Mexico, USA

点号	Th	U	Pb
1	10.38	0.2443	0.721
2	10.34	0.2525	0.743
3	10.28	0.2268	0.7098
4	9.94	0.1176	0.653
5	10.5	0.2582	0.7248
6	10.46	0.2414	0.7119
7	10.47	0.2582	0.7092
8	10.53	0.2567	0.7136
9	10.32	0.2513	0.7063
10	10.12	0.187	0.6481
11	10.39	0.2536	0.734
12	10.27	0.2427	0.7015
13	10.12	0.2078	0.6773
14	10.46	0.2568	0.7002

表 2 Elk Mountain 独居石 ICPMS 年龄及各种算法年龄结果对比

Table 2 Comparison of Age from ICPMS and Ages Calculated from Different Algorithms for Monazite from Elk Mountain, New Mexico, USA

计算/分析方法或年龄来源	年龄值 (Ma)	MSWD	
Activation 实验室 ICPMS	1379	/	
M. Bersch	1398	/	
本文算法	1380 ± 19	0.62	
Alabama 大学分析数据	York-I	1691 ± 310	77
	York-II	1412 ± 239	0.62
	York-b	1374 ± 24	8.79

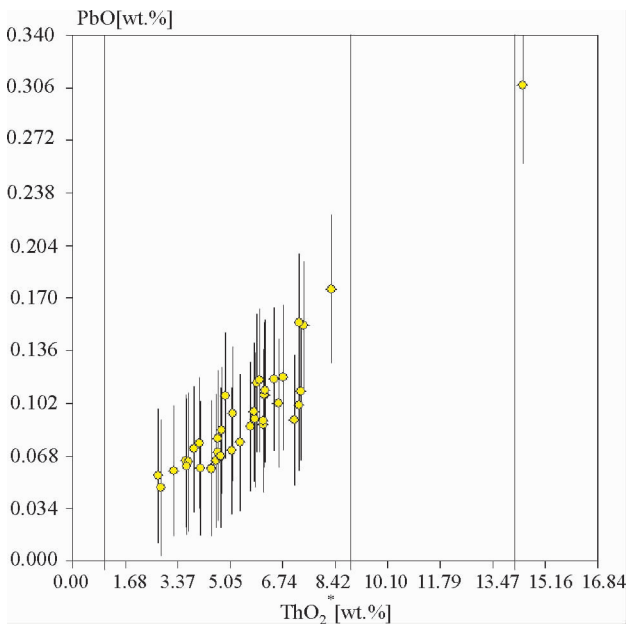


图 1 Elk Mountain 独居石 EPMA 数据散点图

Fig. 1 Scatter Plot of EPMA Data of Monazite from Elk Mountain, New Mexico, USA

### 3.2 巴西 Cambaizinho 和 Passo Feio 杂岩中独居石年龄算例

为了验证给出了实际测量误差的分析数据的效果,选取文献(Tickyj Hugo *et al.*, 2004)中所给出的来自巴西 Cambaizinho 和 Passo Feio 杂岩独居石样品的 EPMA 分析数据,经换算的氧化物数据散点图示于图 2 和图 3,由图 2 和图 3 可见,数据呈现明显不协调。本文算法得到的结果与文献(Tickyj Hugo, *et al.*, 2004) 利用考虑了测量误差的经典等时线方法得到的结果及其给出的其它定年方法得到的结果列于表 3。由表 3 可见,本文算法给出的结果误差限和可信度均优于考虑了测量误差的经典等时线方法。

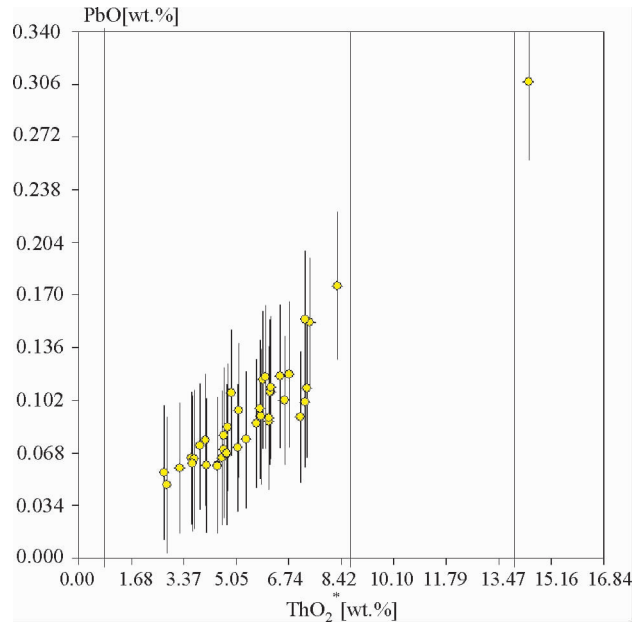


图 2 巴西 Cambaizinho 杂岩独居石样品 EPMA 分析数据带误差棒散点图

Fig. 2 Scatter Plot of EPMA Data with Error Bar for Monazite from Cambaizinho Complex, Brazil.

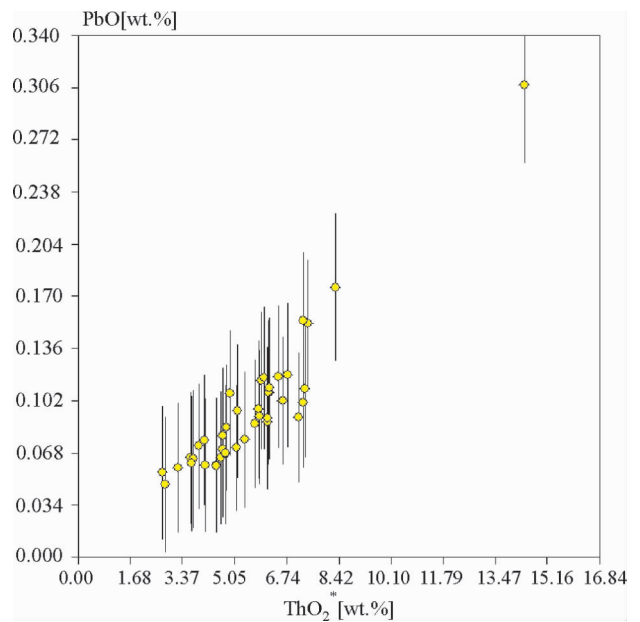


图 3 巴西 Passo Feio 杂岩独居石样品 EPMA 分析数据带误差棒散点图

Fig. 3 Scatter Plot of EPMA Data with Error Bar for Monazite from Passo Feio Complex, Brazil.

表3 巴西 Cambaizinho 和 Passo Feio 杂岩独居石年龄算法结果对比

Table 3 Comparison of Ages Calculated by Different Algorithms and Ages from Other Methods for Monazite from Cambaizinho and Passo Feio Complex, Brazil

独居石样品产地	方法	年龄	MSWD	其它方法得到的年龄
Cambaizinho 杂岩	考虑误差的等时线算法	643 ± 129Ma	0.66	661 ± 29Ma
	本文算法	645 ± 24Ma	0.41	
Passo Feio 杂岩	考虑误差的等时线算法	510 ± 68Ma	0.48	562 ± 8Ma
	本文算法	496 ± 20Ma	0.37	

## 4 结论

本文提出了一种基于 EPMA 分析数据出现不协调情况下的算法,该算法是对已有基于 York 直线拟合算法的改进,它提供了两种停止迭代的准则:1)保持每个测点剩余铀大于或等于零的前提下,总剩余铀接近于零时停止迭代;2)前后两次迭代的平均年龄相对偏差小于某一预先给定的阈值。直线拟合时考虑了测量误差。文中给出的两个算例表明,本算法计算结果可靠。

目前,从国内已发表的有关 EPMA CHIME 定年的数据来看,大部分是协调的,或已基本剔除了不协调的测试数据。应特别指出,强迫过零点的直线拟合算法或加权平均视年龄算法对于无铅丢失和无初始铅存在的情形是合适的。当无法确定这一条件是否满足时,采用本文的优化算法可以改善 York-I 和 York-II 算法的缺陷,如消除数据不协调情况下出现不合理年龄值的情形(2.3 节已述及)。

## References

Asami MJ, Suzuki K, Grew ES. 2002. Chemical Th-U-total Pb dating by electron microprobe analysis of monazite, Xenotime and zircon from the Archean Napier Complex, East Antarctica: Evidence for ultra-high-temperature metamorphism at 2400Ma. *Precambrian Research*, 114: 249–275

Chen NS, Sun M, Wang QY *et al.* 2003. Discussion on in situ geochronological techniques: high resolution geochronology of medium to high grade metamorphic terranes. *Geological Science and Technology Information*, 22(2): 1–5 (in Chinese with English abstract)

Cocherie A, Legendre O, Peucat J-J and Kouamelan AN. 1998. Geochronology of polygenetic monazites constrained by in situ electron microprobe Th-U-total Pb determination; implications for lead behaviour in monazite. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 62, 2475–2497

Cocherie A and Albarède F. 2001. An improved U-Th-Pb age calculation for electron microprobe dating of monazite. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 65, 4509–4522

Cocherie A, Mezeme EB, Legendre O and Fanning CM. 2005. Electron-microprobe dating as a tool for determining the closure of Th-U-Pb systems in migmatitic monazites. *Am. Mineral.*, 90, 607–618

Geisler T. 1999. ChemAge: a 32-bit Windows program for chemical age calculations and the graphical data presentation. *Beiheft zum European Journal of Mineralogy*, 11: 154

Jercinovic MJ, Williams ML. 2005. Analytical perils (and progress) in electron microprobe trace element analysis applied to geochronology: Background acquisition, interferences, and beam irradiation effects. *Am. Mineral.*, 90: 526–546

Kuiper YD. 2005. Isotopic age constraints from electron microprobe U-Th-Pb dates, using a three-dimensional concordia diagram. *Am. Mineral.*, 90: 586–591

Liu SW, Shu GM, Pan YM *et al.* 2004. Electron microprobe dating of monazite and metamorphic age of Wutai Group, Wutai Mountains. *Geological Journal of China Universities*, 10(3): 356–363 (in Chinese with English abstract)

Montel JM, Foret S, Veschambre M, Nicollet, and Provost A. 1996. Electron microprobe dating of monazite. *Chemical Geology*, 131: 37–53

Montel JM, Kornprobst J and Vielzeuf D. 2000. Preservation of old U-Th-Pb ages in shielded monazite: example from Beni Bousera Hercynian Kinzigites (Morocco). *Journal of Metamorphic Geology*, 18: 335–342

Press WH *et al.* 1992. *Numerical Recipes in FORTRAN: The Art of Scientific Computing*. The 2<sup>nd</sup> edition, Cambridge University Press, New York

Pyle JM, Spear FS, Wark DA, Daniel CG and Storm LC. 2005. Contributions to precision and accuracy of monazite microprobe ages. *Am. Mineral.*, 90: 547–577

Rhede D, Wendt I, Förster H-J. 1996. A three-dimensional method for calculating independent chemical U/Pb- and Th/Pb-ages of accessory minerals. *Chem. Geol.*, 130: 247–253

Sambridge MS, Compston W. 1994. Mixture modeling of multi-component data sets with application to ion-probe zircon ages. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 128: 373–390

Suzuki K, Adachi MJ. 1991a. Precambrian provenance and Silurian metamorphism of the Tsbonosawa paragneiss in the South Kitakami terrane, northeast Japan, as revealed by the chemical Th-U-total Pb isochron ages of monazite, zircon, and xenotime. *Geochemical Journal*, 25: 357–376

Suzuki K, Adachi MJ. 1991b. The chemical Th-U-total Pb isochron ages of zircon and monazite from the Gray granite of the Hida Terrane, Japan. *Journal of Earth Science Nagoya University*, 38: 11–37

Suzuki K, Adachi MJ and Kajizuka I. 1994. Electron microprobe observations of diffusion in metamorphosed detrital monazites. *Earth and Planetary Science Letters*, 128: 391–405

Suzuki K, Adachi MJ. 1998. Denudation history of the high T/P Ryoke metamorphic belt, southwest Japan: constraints from CHIME monazite ages of gneisses and granitoids. *J. Metamor. Geol.*, 16: 23–37

Tickj Hugo *et al.* 2004. Electron microprobe dating of monazite substantiates ages of major geological events in the southern Brazilian shield. *Journal of South American Earth Sciences*, 16: 699–713

Wang QY, Chen NS and Liu R. 2005. Site-Directed and In-situ Dating Microbeam Techniques and Crystal Chemistry Microanalysis for U-Th-Pb Bearing Accessory Minerals. *Geological Science and Technology Information*, 24(1): 7–13 (in Chinese with English abstract)

Wendt I. 1984. A three-dimensional U-Pb discordia plane to evaluate samples with common lead of unknown isotopic composition. *Isot. Geosci.*, 2: 1–12

Williams ML, Jercinovic MJ and Terry MP. 1999. Age mapping and dating of monazite on the electron microprobe; Deconvoluting multistage tectonic histories. *Geology*, 27: 1023–1026

Williams ML and Jercinovic MJ. 2002. Microprobe monazite geochronology: putting absolute time into microstructural analysis. *Journal of Structural Geology*, 24: 1013–1028

Williams ML, Jercinovic MJ, Goncalves P and Mahan K. 2006. Format and philosophy for collecting, compiling, and reporting microprobe monazite ages. *Chemical Geology*, 225: 1–15

- York D. 1969. Least squares fitting of a straight line with correlated errors. *Earth Planet. Sci. Lett.* 5: 320–324
- Zhang WL, Wang RC, Hua RM *et al.* 2003. Chemical Th-U-total Pb isochron dating of accessory minerals; Principle and Application to zircon from the Piaotang muscovite granite in the Xihuashan complex, South China. *Geological Review*, 49(3): 253–260 (in Chinese with English abstract)
- Zhou JX, Chen ZY, Rui ZY. 2003. Th-U-Pb chemical dating of monazite by electron probe. *Rock and Mineral Analysis*, 21(4): 241–245 (in Chinese with English abstract)

#### 附中文参考文献

- 陈能松, 孙敏, 王勤燕等. 2003. 原地原位定年技术工作思路探讨——

中深变质岩区精细变质年代学格架的建立. *地质科技情报*, 22(2): 1–5

- 刘树文, 舒桂明, 潘元明等. 2004. 电子探针独居石定年法及五台群的变质时代. *高校地质学报*, 10(3): 356–363
- 王勤燕, 陈能松, 刘嵘. 2005. U-Th-Pb 副矿物的原地原位测年微束分析方法比较与微区晶体化学研究. *地质科技情报*, 24(1): 7–13
- 张文兰, 王汝成, 华仁民等. 2003. 副矿物的电子探针化学定年方法原理及应用. *地质论评*, 49(3): 253–260
- 周剑雄, 陈振宇, 芮宗瑶. 2002. 独居石的电子探针钍-铀-铅化学测年. *岩矿测试*, 21(4): 241–245