

## 石英裂变径迹蚀刻条件的对比实验研究

刘春茹<sup>1,2</sup>, 刘秀明<sup>1\*</sup>, 王世杰<sup>1</sup>, 张峰<sup>1</sup>

(1. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 通过 40% 的 HF 溶液、KOH 饱和溶液和 19 mol/L 的 NaOH 溶液这三种常用方法对大、小颗粒石英进行裂变径迹蚀刻实验的对比发现, 用环氧树脂固定的小颗粒石英样品, 不宜用 KOH 饱和溶液 (150 °C) 和 19 mol/L 的 NaOH 溶液 (沸点, 约 120 °C) 作为裂变径迹的蚀刻剂, 宜用 40% 的 HF 溶液; 三种方法均适宜于大颗粒石英, 但不同的蚀刻方法蚀刻效率不同, 40% 的 HF 溶液 (29 °C) 的蚀刻效率最高, 且操作简单、安全性高。40% 的 HF 溶液最佳蚀刻时间为: 温度在 4 °C 左右 (冬季) 时为 40 min, 温度在 29 °C 左右 (夏季) 时为 30 min, 可在全年室内常温条件下操作。

**关键词:** 石英; 裂变径迹; 蚀刻条件; 对比实验

中图分类号: P599

文献标识码: A

文章编号: 0379 - 1726(2007)03 - 0323 - 05

## Contrastive research of different etchants about fission track dating of quartz

LIU Chun-ru<sup>1,2</sup>, LIU Xiu-ming<sup>1\*</sup>, WANG Shi-jie<sup>1</sup> and ZHANG Feng<sup>1</sup>

1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** Etching the fission track of big and small quartz grains with three ways: 40% HF, saturation KOH and 19 mol/L NaOH, we find that 40% HF is more suitable to etching small quartz grains pegged by epoxy than saturation KOH and 19 mol/L NaOH. The three can be ways of etching big quartz grains, but the efficiencies of them are different. 40% HF (29 °C) has the higher efficiency and easy operation and security. The optimal time of 40% HF etching takes 40 min in winter (about 4 °C) and 30 min in summer (about 29 °C).

**Key words:** quartz; fission track; etching condition; contrast experiment

## 0 引言

石英具有物理化学性能稳定、在自然界中易保存、退火温度较高 (1000 °C)<sup>[1-5]</sup> 等优点, 所以, 石英颗粒中通常蕴含着其他矿物所不能保存的年代学信息。虽然石英裂变径迹方法测年具有铀含量较低、测年范围相对较窄, 总体上石英裂变径迹测年的应用相对较少等缺点, 但随着测年方法及测年对象需求的日益增长, 被用于解决地质体年代学应用实例越来越多<sup>[6-12]</sup>。正是由于石英裂变径迹方法测年的应用面相对较小, 人们对石英裂变径迹蚀刻条件的实验研究相对薄弱。虽然长期以来石英的裂

变径迹蚀刻方法已有多种, 其较为常用的主要有三种: 40% HF 溶液、KOH 饱和溶液和 19 mol/L 的 NaOH 溶液 (表 1)<sup>[13-17]</sup>, 但是缺乏对这些方法优缺点的对比评价。为此, 本文拟对当前三种主要的石英裂变径迹蚀刻条件进行对比实验研究, 对各种蚀

表 1 目前较为常用的石英裂变径迹蚀刻条件  
Table 1 Accustomed etching conditions of quartz at present

试剂	浓度	温度	时间	参考文献
HF	40%	25	15 min	[5]
HF	48%	23	24 h	[14, 16]
KOH	饱和溶液	150	3 h	[13, 16]
KOH	15 mol/L	125	12 h	[17]
NaOH	19 mol/L	B. P. (沸点)	100 min	[15]

收稿日期 (Received): 2006 - 12 - 19; 改回日期 (Revised): 2007 - 03 - 19; 接受日期 (Accepted): 2007 - 04 - 12

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (2006CB403200); 国家自然科学基金 (40371012)

作者简介: 刘春茹 (1980 -), 女, 博士研究生, 环境地球化学专业。

\* 通讯作者 (Corresponding author): LIU Xiu-ming, E-mail: liuxiuming@vip.skleg.ac.cn, Tel: +86-851-5891338

刻条件进行优缺点评价,找寻最佳蚀刻条件,为今后石英裂变径迹测年方法的应用奠定基础。

## 1 样品的采集和制备

实验样品主要采自黔北遵义地区官坝石灰土剖面、黔东铜仁地区大兴碳酸盐岩红色风化壳剖面,各剖面的具体情况详见文献[18]。这两个剖面土层中的石英颗粒较小,一般小于0.5 mm,所选石英均为晶体石英,可见棱面及锥角。之所以选择这两个剖面,是因为它们是碳酸盐岩风化壳石英裂变径迹测年的研究剖面。不过,由于以上两个剖面的晶体石英颗粒较小,难以开展同石英颗粒不同蚀刻条件的对比,我们选择产于黔南寻甸地区的大颗粒石英晶体作为实验补充材料。

小颗粒石英样品的制备:将土壤样品用水浸泡、过筛(200目),并将样品表面洗涤干净,烘干。从烘干的晶体石英颗粒中随机挑选10~15颗左右放于模具中,将环氧树脂和三乙醇胺按一定比例混合均匀后,慢慢倒入模具中,静置24 h,再放入烘箱(80℃左右)24 h后取出。将制好的环氧树脂体打磨、抛光,备用。大颗粒石英晶体样品的制备:平行于晶体的生长轴将石英颗粒切片(图1),切片厚度约1 mm,然后将切片打磨、抛光,备用。

将所制样品分别用当前较为常用的蚀刻条件蚀

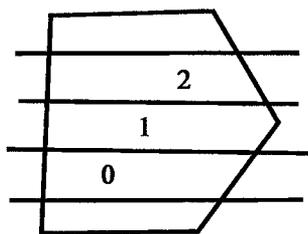


图1 大石英颗粒切片示意图

Fig. 1 Sliceable sketch map of a big quartz grain

刻,即40%的HF溶液、KOH饱和溶液和19 mol/L的NaOH溶液进行蚀刻,通过不同的蚀刻时间考察径迹的蚀刻情况,具体蚀刻条件见表2。其中,40%的HF溶液蚀刻条件对比了冬、夏季室内温度情况下的异同特征。

石英的自发径迹均利用德国生产的LABOVAL生物显微镜,在油浸放大100×10倍下进行测量和统计。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 小颗粒石英

从图2-I可以看出,用40%的HF溶液作为小颗粒石英裂变径迹的蚀刻剂时,蚀刻温度对径迹长度的揭露有较大影响。随蚀刻时间的延长,温度对径迹长度的影响越来越明显。温度在29℃左右(夏季)时,35 min时径迹可达到最长,18 μm;当时间增加至40 min时,径迹长度随时间增加不发生变化。温度在4℃左右(冬季)时,径迹长度也随时间增加而变长,但变化幅度小,当时间增加至40 min时,径迹长度为12 μm,再延长蚀刻时间,径迹长度不发生变化。

用KOH饱和溶液(150℃)作为蚀刻剂时(图2-I),样品的裂变径迹长度有随时间的增加而增加的趋势,但当蚀刻时间增加到90 min(每30 min观测一次)时,小颗粒石英变成暗黄色,不能用于镜下径迹观察。当用19 mol/L的NaOH溶液(沸点,约120℃)作为蚀刻剂时(图2-I),小颗粒石英样品的实验现象与用KOH饱和溶液(150℃)作为小颗粒石英样品蚀刻剂时的现象相似,径迹的长度也有随时间增加而增加的趋势,但当蚀刻时间增加到30 min时(每10 min观测一次),小颗粒石英变成暗黄色,同样不能用于镜下径迹观察。

表2 不同样品及其蚀刻条件  
Table 2 Samples and etching conditions

样品	蚀刻剂	浓度	温度	备注
GBT1	HF	40%	夏季常温 29℃	1. 样品采自官坝剖面,深度 40 cm,石英颗粒晶形较完整; 2. 室温操作
XDQ2 下面	HF	40%	夏季常温 29℃	1. 样品采自贵州寻甸; 2. 室温操作
GBT2	HF	40%	冬季常温 4℃	1. 样品采自官坝剖面,深度 35 cm,石英颗粒晶形较完整; 2. 于冰箱冷藏室中操作
GBT3	KOH	饱和溶液	150℃	1. 样品采自官坝剖面,深度 30 cm,石英颗粒晶形较完整; 2. 马弗炉加热
XDQ1 上面	KOH	饱和溶液	150℃	1. 样品采自贵州寻甸; 2. 马弗炉加热
DXT1	NaOH	19 mol/L	B. P. (沸点)	1. 样品采自大兴剖面,深度 240 cm,石英颗粒晶形较完整; 2. 电炉加热
XDQ0 上面	NaOH	19 mol/L	B. P. (沸点)	1. 样品采自贵州寻甸; 2. 电炉加热

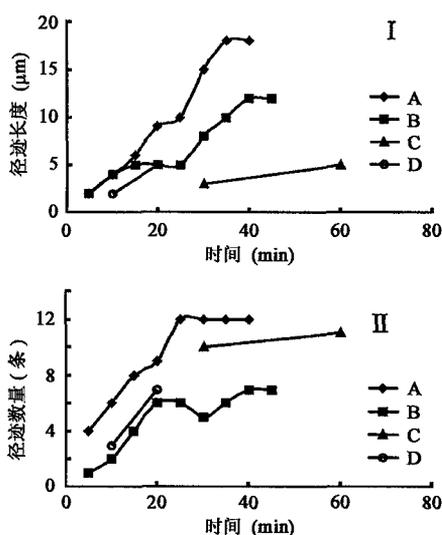


图 2 不同蚀刻剂在小颗粒石英样品上蚀刻出的径迹长度、径迹数量与时间关系图

Fig. 2 Relationship of both track length and the track quantity with time about small quartz grains for different etchants

I: 不同蚀刻剂在蚀刻小颗粒石英样品时径迹长度与时间关系图;  
II: 不同蚀刻剂在蚀刻小颗粒石英样品时径迹数量与时间关系图。  
A: 40% HF 溶液, 温度 29 °C 左右(夏季), 实验样品 GBT1;  
B: 40% HF 溶液, 温度 4 °C 左右(冬季), 实验样品 GBT2;  
C: KOH 饱和溶液(150 °C), 实验样品 GBT3;  
D: 19 mol/L 的 NaOH 溶液(沸点, 约 120 °C), 实验样品 DXT1。

从图 2-II 我们可以看出, 使用不同的蚀刻剂, 径迹数量都随时间的延长而增加。40% 的 HF 溶液, 29 °C 左右, 蚀刻 25 min 后, 径迹数量不再发生变化; 在 4 °C 左右, 蚀刻 40 min 后, 径迹数量不再发生变化。用 KOH 饱和溶液(150 °C)、19 mol/L 的 NaOH 溶液(沸点, 约 120 °C) 作为蚀刻剂时, 由于石英颗粒变黄, 无法继续镜下观测, 所以不知道什么时间能使径迹数量达到最大。至于各样品稳定的径迹数不一致, 是由于径迹数量与样品的 U 含量及年龄有关, 所以不同样品的径迹数量是不一样的。

## 2.2 大颗粒石英

我们将采自寻甸地区的一颗大颗粒晶体石英(晶轴长约 2 cm) 切割出 3 块, 用于不同蚀刻剂的蚀刻条件对比研究。XDQ0、XDQ1、XDQ2 为同一样品石英颗粒, 径迹特征相似, 可以进行不同蚀刻剂下的蚀刻径迹长度对比。从图 3-I 可以看出, 在三种蚀刻剂作用下, 石英颗粒的裂变径迹长度都随时间的增加而变长, 但变化幅度各不相同。用 40% 的 HF 溶液, 在 29 °C 左右蚀刻 30 min 后, 径迹长度达到最大, 为 15 μm; 再继续蚀刻径迹不发生变化。用 150 °C KOH 饱和溶液蚀刻 140 min 时, 径迹长度达到最大,

为 15 μm; 若蚀刻时间继续增加到 220 min 时, 径迹的长度没有明显变化, 与 Sandhu *et al.*<sup>[17]</sup> 温度控制在 125 °C 所获得的实验结果基本一致, 只是获得稳定径迹长度的时间更短, 表明更高温度下蚀刻速度更快。用 19 mol/L 的 NaOH 溶液在约 120 °C 进行多次的反复蚀刻, 由于频繁的温差变化以及溶液沸腾对样品的震动, 当时间增加到 60 min 时(每 10 min 观测一次) 石英颗粒产生炸裂。炸裂时在石英颗粒表面产生较多的裂纹, 故无法继续进行镜下的径迹观察。这种情况与 McCorkell<sup>[15]</sup> 蚀刻时间为 100 min 的实验结果是不一致的。

从径迹数量来看(图 3-II), 30 min 时, 40% 的 HF 溶液蚀刻出 14 条径迹, 时间再增加, 径迹数量不发生变化。KOH 饱和溶液 150 °C 下蚀刻出的径迹数量随时间变化不大, 20~200 min 之内径迹数量始终在 7~9 条之间波动, 与 Sandhu *et al.*<sup>[17]</sup> 温度控制在 125 °C 所获得的径迹数逐渐增大直至稳定的实验结果不相一致。一般来说, 时间也是径迹蚀刻的重要因素, 本次实验的时间明显少于 Sandhu *et al.*<sup>[17]</sup> 的时间, 可能是径迹数一直稳定的原因。但是, 本次实验的径迹长度的正常规律变化及 14 μm 的稳定径迹长度均说明这种条件下的蚀刻是有效的、时间也是充足的。用 19 mol/L 的 NaOH 溶液在约 120 °C

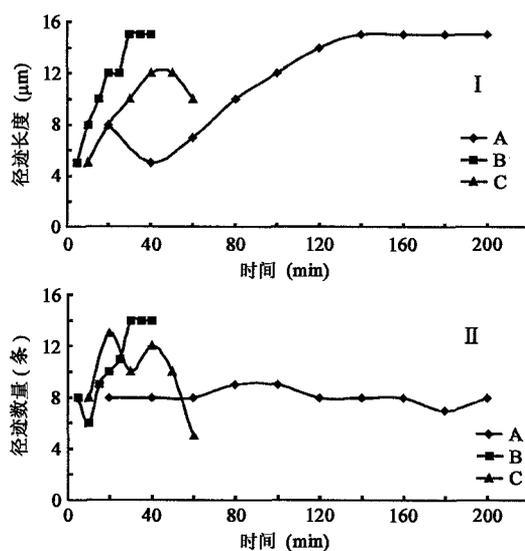


图 3 不同蚀刻剂在大颗粒石英样品上蚀刻出的径迹长度、径迹数量与时间关系图

Fig. 3 Relationship of both track length and the track quantity with time about big quartz grains for different etchants

I: 不同蚀刻剂在大颗粒石英样品上蚀刻出的径迹长度和时间关系图;  
II: 不同蚀刻剂在大颗粒石英样品上蚀刻出的径迹数量和时间关系图。  
A: KOH 饱和溶液(150 °C), 实验样品 XDQ1;  
B: 40% HF 溶液, 温度 29 °C 左右(夏季), 实验样品 XDQ2;  
C: 19 mol/L 的 NaOH 溶液(沸点, 约 120 °C), 实验样品 XDQ0。

蚀刻大颗粒石英时,最多 13 条径迹,径迹数量在 20 min 时波动较大,且 40 min 后径迹数量减少,这应该与石英颗粒的炸裂有关。

### 3 数据分析

#### 3.1 40% 的 HF 溶液的蚀刻时间

用 40% 的 HF 溶液作为石英颗粒样品的蚀刻剂时,环境温度与蚀刻效果(径迹长度和径迹数量)呈正相关关系。环境温度较高(29 ℃左右,夏季常温),则短时间内(30 min 左右)会使径迹的长度和数量达到最佳状态;环境温度较低时(4 ℃左右,冬季常温),需要较长时间(40 min)才能使径迹的长度和数量达到最佳状态。所以,不同的环境温度对测量结果有一定的影响。因此,在不同季节都可以进行无温控蚀刻,只需要把握好蚀刻时间。但需要注意,由于 HF 的强腐蚀性,通常蚀刻时间不宜过长,本次实验所反映出的最佳蚀刻时间为:温度在 4 ℃左右(冬季)时为 40 min;温度在 29 ℃左右(夏季)时为 30 min。若时间过长,则会导致颗粒表面模糊且径迹长度、宽度增大,可能会产生径迹相连的现象,尤其是径迹密度较大的样品更容易加大统计误差。与前人的实验结果相比,本次实验的蚀刻时间较为适中:48% 的 HF 溶液在 23 ℃情况下需要蚀刻 24 h<sup>[14, 16]</sup>,时间上明显长于本次实验,更高浓度的蚀刻剂所需时间理应更短;而刘顺生等<sup>[5]</sup>认为同蚀刻剂浓度的条件下(25 ℃),需要蚀刻 15 min,短于本次实验中温度为 29 ℃的蚀刻时间。这可能是不同石英的生长结构和微化学组成的不同所造成的,本次实验中大、小颗粒石英的蚀刻结果(29 ℃)中的径迹长度和蚀刻时间均存在一定的差异性:径迹长度相差约 3 μm,径迹数稳定时的蚀刻时间相差约 5 min。单颗粒石英不同晶面蚀刻实验也说明存在较为明显的各向异性(虽然所获得的年龄值基本一致)<sup>[17]</sup>,因此,不同成因的石英存在着一定的蚀刻时间差也应是正常的。

#### 3.2 三种蚀刻方法的对比

用 KOH 饱和溶液(150 ℃)和 19 mol/L 的 NaOH 溶液(沸点,约 120 ℃)作为小颗粒石英样品的蚀刻剂时,长时间蚀刻会使环氧树脂腐蚀导致石英颗粒变成暗黄色,不能用于镜下观察。因此,我们主要对大颗粒石英的实验结果进行对比。

从图 3- I 可以看出,三种蚀刻剂蚀刻出的径迹长度相差不大,但蚀刻出的径迹数量有明显的不同。由于三个实验样品为同一单晶石英同一晶面,取样位置较近(图 1),观测面积大(约 1 mm<sup>2</sup>),而且观测面 QXD1 上面与 QXD2 下面为同一面,是同一石英颗粒的同一部位;QXD0 上面与 QXD1 上面、QXD2 下面相差距离约 1 mm。虽然晶体的不同部位由于 U 含量的差异,会产生一定的自发径迹数的差异性,但同一晶体、同一晶面且均很少含杂质的情况下,如此大的差异性很难想像是 U 含量分布不同所造成的,且三个部分应是同一时间、相同条件下形成的。所以基本上可以认为三个样品是同一石英颗粒的同一部位,具有相同的 U 含量。若这种假设成立,那么可以明显地反映出三种蚀刻方法的蚀刻效率,即 40% 的 HF 溶液(29 ℃) > 19 mol/L 的 NaOH 溶液(沸点,约 120 ℃) > KOH 饱和溶液(150 ℃)。若假设不成立,那么 40% 的 HF 溶液(29 ℃)与 KOH 饱和溶液(150 ℃)在大石英颗粒上的蚀刻效率还是可以比较的,因为 QXD1 上面与 QXD2 下面为同一石英颗粒的同一部位,U 含量相同。40% 的 HF 溶液(29 ℃)在 QXD2 下面蚀刻出 14 条径迹,而 KOH 饱和溶液(150 ℃)在 QXD1 上面仅蚀刻出 9 条径迹,这种明显的差别说明 40% 的 HF 溶液(29 ℃)的蚀刻效率确实大于 KOH 饱和溶液(150 ℃)的蚀刻效率。

也就是说,在进行年代学研究时采用外探测器法(较为常用),三种蚀刻方法将产生很大的年龄差距。因此,可以粗略地认为三种蚀刻方法中 40% 的 HF 溶液(29 ℃)能更大地揭示真实的信息,同时也暗示不同蚀刻方法用外探测器法所获得的年龄值是无法进行对比的。当然,若自发径迹和诱发径迹均在矿物上进行蚀刻统计,那么不同蚀刻方法的蚀刻效率的差异将被掩盖或可以忽略,因为同一方法对矿物上的自发径迹、诱发径迹的蚀刻效率是一致的,所以不同蚀刻方法所得出的年龄值也是基本一致的。

从蚀刻工作效率来看,40% 的 HF 溶液(4 ℃、29 ℃)方法获得稳定的径迹数仅需 30 ~ 40 min,且全年都可以在室内常温下进行,易操作、易掌握、安全性高;而 19 mol/L 的 NaOH 溶液(沸点,约 120 ℃)、KOH 饱和溶液(150 ℃)这两种方法,蚀刻时间相对较长,且都需要精确地控制温度,操作也相对复杂,安全性低,尤其是 19 mol/L 的 NaOH 溶液(沸点,约 120 ℃)在蚀刻过程中会由于溶液沸腾使石英晶体

震动导致样品产生轻微的炸裂现象,这也是该方法在蚀刻过程中出现径迹数波动的主要原因。

## 4 结 论

由于石英颗粒裂变径迹的长度和数量与晶格、铀含量、年龄等因素有关,所以不同地区的石英颗粒样品的裂变径迹蚀刻条件也存在差别,但也有一些相似之处。通过以上实验分析结果,可得出以下几点结论。

(1) 用环氧树脂作为固定小颗粒石英晶体的样品,不宜用 KOH 饱和溶液 (150 ℃) 和 19 mol/L 的 NaOH 溶液 (沸点,约 120 ℃) 作为裂变径迹的蚀刻剂,宜用 40% 的 HF 溶液。

(2) 三种方法均适宜于大颗粒石英,但不同的蚀刻方法蚀刻效率是不同的,40% 的 HF 溶液 (29 ℃) 的蚀刻效率最高,这暗示不同蚀刻方法用外探测器方法获得的年龄数据是无法对比的;40% 的 HF 溶液 (29 ℃) 的高蚀刻效率能最大程度地揭示真实信息,且操作简单、安全性高。

(3) 无论是环氧树脂固定的小颗粒石英,还是大颗粒石英均可用 40% 的 HF 溶液作为蚀刻剂,且全年均可在室内常温进行操作,最佳蚀刻时间为:温度在 4 ℃ 左右 (冬季) 时为 40 min; 温度在 29 ℃ 左右 (夏季) 时为 30 min。

## 参考文献 (References):

- [1] Fleischer R L, Price P B, Walker R M. Charged particle tracks: Tools for geochronology and meteorite studies[M]//Hamilton E I, Farquhar R M. Radiometric Dating for Geologists. New York: Wiley Interscience, 1968: 417 - 435.
- [2] Tricart J. The Landforms of the Humid Tropics, Forests, and Savannas[M]. London: Longman, 1972: 306p.
- [3] Krinsley D H, Doornkamp J C. Atlas of Quartz Sand Surface Textures[M]. New York: Cambridge University Press, 1973: 91p.
- [4] 方小敏,史正涛,沈明智. 试从兰州地区黄土石英砂表面特征探讨黄土物质来源、成因及环境变迁 [M] //施雅风,崔之久,李吉均. 中国东部第四纪冰川与环境. 北京: 科学出版社, 1991: 138 - 148.  
Fang Xiao-min, Shi Zheng-tao, Shen Ming-zhi. Preliminary discussion of material source, origin and environmental change of loess from the surface texture features of quartz sand of loesses in Lanzhou region, China[M]//Shi Ya-feng, Cui Zhi-jiu, Li Ji-jun. Quaternary Glacier and Environment in East China. Beijing: Science Press, 1991: 138 - 148 (in Chinese).
- [5] 刘顺生,张峰,胡瑞英,刘京发. 裂变径迹年龄测定——方法、技术和应用[M]. 北京: 地质出版社, 1985: 140p.  
Liu Shun-sheng, Zhang Feng, Hu Rui-ying, Liu Jing-fa. Dating of Fission Track — Method, Technique and Application[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1985: 140p (in Chinese).
- [6] 张峰,杨科佑. 裂变径迹研究黔西南微细浸染金矿的成矿时代 [J]. 自然科学进展, 1993, 3(3): 267 - 270.  
Zhang Feng, Yang Ke-you. A study on the metallogenetic epoch of fine disseminated gold deposit in southwest Guizhou using the fission track[J]. Progr Nat Sci, 1993, 3(3): 267 - 270 (in Chinese).
- [7] 胡瑞英,程景平,郭士伦,郝秀红. 裂变径迹法在金矿研究中的应用[J]. 地球化学, 1995, 24(2): 188 - 192.  
Hu Rui-ying, Cheng Jing-ping, Guo Shi-lun, Hao Xiu-hong. Application of fission track technique to study of gold deposits[J]. Geochimica, 1995, 24(2): 188 - 192 (in Chinese with English abstract).
- [8] 王世杰,刘秀明,张峰. 贵州碳酸盐岩红色风化壳次生石英的裂变径迹测年研究[J]. 地球化学, 2005, 34(1): 33 - 40.  
Wang Shi-jie, Liu Xiu-ming, Zhang Feng. Fission track dating of secondary quartz in red weathering crusts of carbonate rocks in Guizhou Province [J]. Geochimica, 2005, 34(1): 33 - 40 (in Chinese with English abstract).
- [9] Zheng Guodong, Takano B, Chen Huailu. Fission track ages of Mahanshan metamorphic rock group in Gansu Province, Northwest China [J]. J Radioanal Nucl Chem, 2002, 251(3): 375 - 380.
- [10] Liu Xiuming, Wang Shijie, Zhang Feng. Fission track dating of authigenic quartz in red weathering crusts of carbonate rocks in Guizhou Province [J]. Acta Geol Sinica, 2004, 78(5): 1136 - 1142.
- [11] 翟鹏济,张峰,赵云龙. 从裂变径迹分析探讨房山岩体地质热历史 [J]. 地球化学, 2003, 32(2): 188 - 192.  
Zhai Peng-ji, Zhang Feng, Zhao Yun-long. Thermal history of the Fangshan granodiorite intrusion, Beijing: Evidence from fission tracks of apatites and sphenes[J]. Geochimica, 2003, 32(2): 188 - 192 (in Chinese with English abstract).
- [12] 王勇生,朱光,陈文,宋传中,刘国生. 郯庐断裂带热年代学信息及其与大别造山带折返的关系 [J]. 地球化学, 2005, 34(3): 193 - 214.  
Wang Yong-sheng, Zhu Guang, Chen Wen, Song Chuan-zhong, Liu Guo-sheng. Thermochronologic information from the Tan-Lu fault zone and its relationship with the exhumation of the Dabie Mountains[J]. Geochimica, 2005, 34(3): 193 - 214 (in Chinese with English abstract).
- [13] Fleischer R L, Hart H R. Mechanical Erasure of Particle Tracks: A Tool for Lunar Microstratigraphic Chronology[J]. J Geophys Res, 1973, 78(23): 4841 - 4851.
- [14] Fleischer R L, Woods R T, Hart H R, Price P B, Short N W. Effect of shock on fission track dating of apatite and sphene crystals from the Hardhat and Sedan underground nuclear explosions[J]. J Geophys Res, 1974, 79(2): 339 - 342.
- [15] McCorkell R. Tables for fission track dating: A compilation of ages measured by fission track counting and of track etching and annealing conditions in different minerals (Geological Paper 74 - 1) [R]. Ottawa: Carleton University, 1974: 130p.
- [16] Maggiore C J. The Los Alamos nuclear microprobe with a superconducting solenoid final lens[J]. Nucl Instrum Meth, 1981, 191(1 - 3): 199 - 203.
- [17] Sandhu A S, Singh S, Virk H S. Anisotropic etching and annealing of fission tracks in quartz [J]. Mineral J, 1988, 14(1): 1 - 11.
- [18] 刘春茹,刘秀明,王世杰,姜立君. 贵州碳酸盐岩风化壳物源判别的新证据: 石英颗粒形态、表面结构特征 [J]. 矿物学报, 2007 (待刊).  
Liu Chun-ru, Liu Xiu-ming, Wang Shi-jie, Jiang Li-jun. The new evidence to distinguish the origin of the weathering crusts of carbonate rocks in Guizhou Province: The characteristic of the shape and the surface structure of quartz grains[J]. Acta Mineral Sinica, 2007 (in Press).