

# 赞比亚东北部班韦乌卢地块泛非期以来构造演化的裂变径迹约束

任军平<sup>1)</sup>, 王杰<sup>1)</sup>, 古阿雷<sup>1)</sup>, 孙宏伟<sup>1)</sup>, 左立波<sup>1)</sup>, 贺福清<sup>1)</sup>, CHIPILAUKA Mukofu<sup>2)</sup>,  
ALPHET PHASKANI Dokowe<sup>2)</sup>, EZEKIAH Chikambwe<sup>2)</sup>, EVARISTO Kasumba<sup>2)</sup>

1) 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津, 300170, 中国;

2) 赞比亚地质调查局, 卢萨卡, P. O. Box 50135, 赞比亚

**内容提要:**本文利用锆石和磷灰石裂变径迹方法探讨了班韦乌卢地块泛非期以来的主要构造演化时间。为研究班韦乌卢地块的构造活动, 本文从班韦乌卢地块中部卡帕图地区的沉积盖层姆波罗科索群的姆巴拉组、萨马组和卡布韦卢马组中采集多件新鲜的岩石样品, 并获得5件锆石和2件磷灰石样品裂变径迹分析结果。5件锆石裂变径迹年龄介于 $575 \pm 35 \sim 380 \pm 22$  Ma之间, 其峰值年龄组为600~572 Ma和420~390 Ma。2件磷灰石裂变径迹年龄介于 $59 \pm 6 \sim 27 \pm 4$  Ma之间, 其峰值年龄组为99~80 Ma和19~11 Ma。它们的峰值年龄组分别对应的主要时代为新元古代的埃迪卡拉纪、早泥盆世、晚白垩世和中新世。对比区域上已有的年龄数据可知, 南部非洲地区新元古代的埃迪卡拉纪、早泥盆世和晚白垩世的构造活动是一个区域性的构造事件, 仅中新世(19~11 Ma)的构造活动在区域上的表现尚不明确。综合前人成果资料, 自泛非构造运动以来, 班韦乌卢地块至少经历600~572 Ma、488~441 Ma、420~390 Ma、375~293 Ma、99~80 Ma及19~11 Ma六个构造事件。班韦乌卢地块泛非期以来的构造演化研究程度很低, 此次研究成果可为今后在该地区的深入研究提供重要参考。

**关键词:** 裂变径迹年代学; 锆石和磷灰石; 卡帕图地区; 班韦乌卢地块; 赞比亚东北部

赞比亚东北部卡帕图地区位于班韦乌卢地块(Bangweulu Block)中部, 以基底和沉积盖层所组成的班韦乌卢地块长期受到其东北部的古元古代乌本迪构造带、东南部的中元古代伊鲁米德构造带、西南部泛非期卢弗里安构造带及西北部的中元古代基巴拉构造带的综合影响。本研究小组曾对赞比亚东北部班韦乌卢地块的地球动力学演化和矿产资源研究现状等资料进行了较为系统的整理(Ren Junping et al., 2013, 2016, 2017a, 2017b, 2018, 2019a, 2019b, 2019c; Xing Shi et al., 2018; Sun Hongwei et al., 2019; Zuo Libo et al., 2020)。其中, 前人资料多集中在早期的野外描述及推测方面(Unrug, 1984), 分析数据非常少(Andrews-Speed, 1986, 1989; De

Waele et al., 2006)。Ren Junping et al. (2018a)对赞比亚东北部班韦乌卢地块中卡萨马—陇都地区沉积岩锆石的裂变径迹年龄进行了分析。裂变径迹技术研究在地质热事件定年和地质体热演化历史等方面优势明显(Wang Ke et al., 2018)。锆石和磷灰石裂变径迹方法能敏锐地记录构造活动事件。其中, 锆石裂变径迹的封闭温度为 $300 \sim 180$  °C(Yamada et al., 1995), 磷灰石裂变径迹的封闭温度为 $110 \pm 10$  °C, 退火带温度为 $60 \sim 120$  °C(Gleadow et al., 1986)。鉴于此, 本文选取卡帕图地区姆波罗科索群采集新鲜的岩石样品, 利用裂变径迹方法探讨该地区岩石所记录的地质热事件, 进一步了解整个班韦乌卢地块自泛非构造运动以来的主要构

注: 本文为商务部技术援外项目([2015]352和[2012]558), 中国地质调查局项目(编号DD20201150, DD20201148, DD20190439和1212011220910)及国家自然科学基金项目(42003041)资助的成果。

收稿日期: 2020-06-26; 改回日期: 2020-11-08; 网络发表日期: 2020-11-17; 责任编辑: 黄敏。

作者简介: 任军平, 男, 1980年生, 高级工程师, 主要从事地质矿产勘查与研究工作; Email: rjp2333@126.com。通讯作者: 王杰, 男, 1964年生, 教授级高级工程师, 从事地质矿产勘查工作。Email: wangjie513046@163.com。

**引用本文:** 任军平, 王杰, 古阿雷, 孙宏伟, 左立波, 贺福清, Chipilauka Mukofu, Alphet Phaskani Dokowe, Ezekiah Chikambwe, Evaristo Kasumba. 2021. 赞比亚东北部班韦乌卢地块泛非期以来构造演化的裂变径迹约束. 地质学报, 95(4): 1072~1081, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2021018.

Ren Junping, Wang Jie, Gu Alei, Sun Hongwei, Zuo Libo, He Fuqing, Chipilauka Mukofu, Alphet Phaskani Dokowe, Ezekiah Chikambwe, Evaristo Kasumba. 2021. Constraints of fission track dating after the Pan-African tectonic evolution of the Bangweulu Block, northeastern Zambia. Acta Geologica Sinica, 95(4): 1072~1081.

造演化时间。

1 区域地质背景

研究区前期仅完成 1 : 1 000 000 地质图,在中赞地学合作项目的支持下首次完成研究区 1 : 100 000 地质填图工作,将图中的穆瓦超群划分为姆波罗科索群姆巴拉组一段、萨马组和卡布韦卢马组(图 1)。

姆巴拉组不整合覆盖于花岗岩类基底之上,在姆波罗科索盆地北部最厚可达 2700m,而盆地西南部厚度则明显变薄约为 300m(Unrug,1984)。岩性包括以紫红色和紫灰色为主的巨砾岩、砾岩、含砾石英砂岩、中细粒石英砂岩以及粉砂岩,其中均可见与沉积层理基本一致的灰黑色赤铁矿细条带。萨马组

不整合覆盖于姆巴拉组一段之上,沉积厚度在盆地北部最厚可达 600m,西南部较薄约 20m(Thieme et al.,1981)。岩性主要由熔结凝灰岩、晶屑凝灰岩、玻璃质凝灰岩、凝灰岩硅化形成的燧石和凝灰质砂岩及泥岩组成,受沉积环境影响,该组岩石颜色包括紫色、红色、浅灰、绿色、黑色及白色等。卡布韦卢马组主要分布在研究区西北部,厚度可达 1500m(Thieme et al.,1981),岩性以白色和粉红色粗一中粒巨厚层—厚层状石英砂岩及红色或浅灰色泥岩为主。

2 样品采集及分析方法

2.1 样品采集及预处理

通过对卡帕图地区地质特征的详细观察,笔者

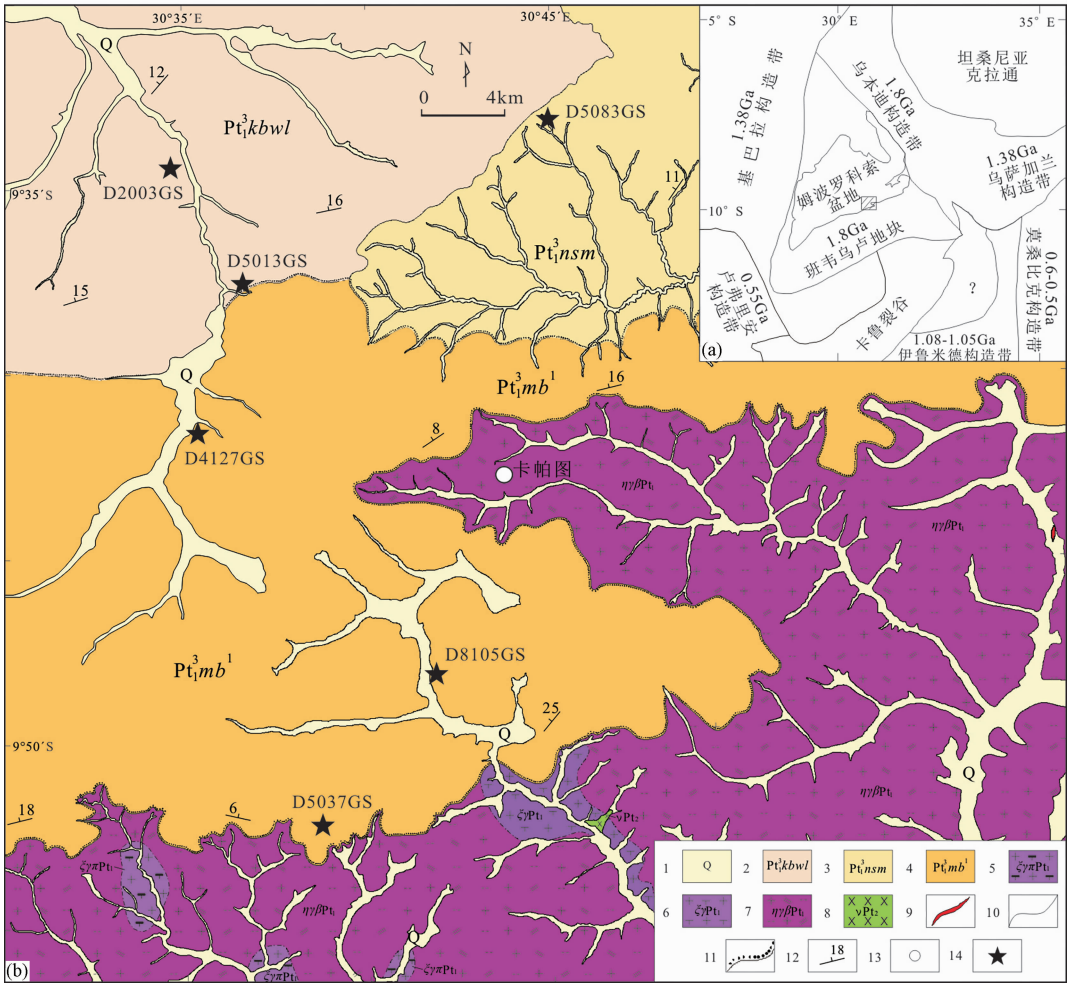


图 1 赞比亚班韦乌卢地块大地构造位置图(a,底图参考 De Waele et al.,2006)及卡帕图地区地质图(b)

Fig.1 Tectonic map of Bangweulu Block (a, after De Waele et al., 2006) and geological map of Kapatu area (b), Zambia

1—第四系;2—卡布韦卢马组;3—萨马组;4—姆巴拉组一段;5—似斑状正长花岗岩;6—正长花岗岩;7—黑云母二长花岗岩;8—辉长岩;9—石英脉;10—整合界线;11—不整合界线;12—层理及产状;13—城镇;14—采样位置

1—Quaternary;2—Kabweluma Formation;3—Nsama Formation;4—first member of Mbala Formation;5—porphyritic syenogranite;6—syenogranite;7—biotite monzogranite;8—gabbro;9—quartz vein;10—integrated geological boundary;11—unconformity geological boundary;12—attitude of stratum;13—town;14—sample location

表 1 赞比亚卡帕图地区样品采样位置

Table 1 Samples location of Kapatu area in Zambia

| 样品编号    | 经纬度                  | 岩石类型         | 主要矿物组合         | 对应地层单元 |
|---------|----------------------|--------------|----------------|--------|
| D2003GS | 30°34'40"E,9°34'24"S | 浅粉色中细粒石英砂岩   | 石英、硅质岩屑、绢云母    | 卡布韦卢马组 |
| D5013GS | 30°36'46"E,9°37'43"S | 浅紫红色细粒长石石英砂岩 | 长石、石英、绢云母      | 卡布韦卢马组 |
| D5083GS | 30°44'57"E,9°33'8"S  | 黄白色玻屑凝灰岩     | 玻屑、火山灰         | 萨马组    |
| D4127GS | 30°35'9"E,9°41'33"S  | 灰白色中细粒石英砂岩   | 石英、硅质岩屑、绢云母    | 姆巴拉组一段 |
| D8105GS | 30°41'39"E,9°48'7"S  | 灰白色中粒石英砂岩    | 石英、长石、硅质岩屑、绢云母 | 姆巴拉组一段 |
| D5037GS | 30°38'42"E,9°52'11"S | 紫红色砂质砾岩      | 石英、硅质岩屑        | 姆巴拉组一段 |

共获得 6 件新鲜岩石样品,其详细的采样位置(见图 1)、地理坐标及岩石类型见表 1。

锆石和磷灰石分选由廊坊市宇能岩石矿物分选技术服务有限公司完成。室内对野外采集的新鲜岩石样品处理如下:①对岩石样品进行粉碎和自然晾干;②利用电磁选、重液选及介电选等方法,对晾干后的锆石和磷灰石样品进行单矿物提纯,分别分离出锆石和磷灰石单矿物;③用聚全氟乙丙烯树脂片和环氧树脂片分别将锆石和磷灰石颗粒固定并制作成光薄片,进行研磨抛光。处理后的光薄片在常温条件下放置备用。

2.2 分析方法

裂变径迹测年由北京泽康恩科技有限公司完成。

锆石裂变径迹测年的具体分析方法如下:①在 210℃下,使用 KOH+NaOH 的高温熔融物对锆石颗粒蚀刻 20~35 h,揭示其自发形成的裂变径迹(Zhao Wenju et al.,2013);②通过专用设备 100 倍干物镜观测统计自发裂变径迹密度,随后将低铀白云母片(铀含量 $<4\times10^{-9}$ )作为外探测器盖在光薄片上,并使其紧密接触颗粒表面,与 CN2 标准铀玻璃一并放入反应堆中接受热中子照射;③在 25℃下,使用 40% HF 蚀刻白云母外探测器 20 min,揭示其诱发裂变径迹,并采用相同方法观测统计其诱发裂变径迹密度。识别裂变径迹时选择平行于 c 轴的柱面来测定其水平封闭径迹长度。在实验操作过

程中<sup>252</sup>Cf 辐照样品的数量影响着观测到的水平封闭径迹数量(Donelick et al.,1991)。本次裂变径迹测试的 Zeta 参数值为  $88.2\pm2.9$ 。

磷灰石裂变径迹测年的具体分析方法首先是在恒温 25℃的 6.6% HNO<sub>3</sub> 溶液中蚀刻 30 s 揭示其自发形成的裂变径迹;随后的步骤与锆石裂变径迹测年的具体分析方法中的②和③相同。本次裂变径迹测试的 Zeta 参数值为  $391\pm17.8$ 。

3 结果

从卡帕图地区采集的灰白色中细粒石英砂岩(D4127GS)样品中获得的锆石和磷灰石样品分别编号为 D4127-1GS 和 D4127-2GS,从其余岩石样品中获得的锆石或磷灰石样品分析样品编号沿用其样品编号。

3.1 锆石裂变径迹测年

5 件锆石样品的裂变径迹分析结果列于表 2。参数  $P(\chi^2)$  是用来评价所测试的单颗粒年龄是否属于同一组年龄的概率,Galbraith(1981)认为  $P(\chi^2)>5\%$  时,各单颗粒的年龄差别属于统计误差范围之内,具单一年龄,可总体计算组合年龄; $P(\chi^2)<5\%$  时,各单颗粒年龄分布范围较宽,基于泊松变异的常规分析无效,裂变径迹年龄实质上是权重平均年龄,其可能是多期构造演化的叠加。

由表 2 可见,5 件样品的裂变径迹年龄介于 575±35~380±22 Ma 之间,年龄跨度较大,且他们的

表 2 赞比亚卡帕图地区锆石样品裂变径迹分析结果

Table 2 Results of fission track analysis for zircon samples, Kapatu area, Zambia

| 样品编号      | 锆石颗粒数 | 自发裂变                           |       | 诱发裂变                           |       | 标准铀玻璃                          |       | $P(\chi^2)(\%)$ | 中心年龄 $\pm1\sigma(\text{Ma})$ |
|-----------|-------|--------------------------------|-------|--------------------------------|-------|--------------------------------|-------|-----------------|------------------------------|
|           |       | $10^{-5}\rho_s/\text{cm}^{-2}$ | $N_s$ | $10^{-5}\rho_i/\text{cm}^{-2}$ | $N_i$ | $10^{-5}\rho_d/\text{cm}^{-2}$ | $N_d$ |                 |                              |
| D2003GS   | 5     | 172.57                         | 933   | 15.907                         | 86    | 9.917                          | 6770  | 79.4            | 458±54                       |
| D5013GS   | 28    | 214.307                        | 5393  | 19.79                          | 498   | 8.205                          | 6770  | 99.8            | 380±22                       |
| D4127-1GS | 31    | 191.094                        | 5842  | 17.271                         | 528   | 8.564                          | 6770  | 99.8            | 405±23                       |
| D8105GS   | 28    | 195.121                        | 4891  | 15.878                         | 398   | 8.207                          | 6770  | 99.9            | 430±27                       |
| D5037GS   | 22    | 151.749                        | 4132  | 15.792                         | 430   | 14.193                         | 6770  | 99.2            | 575±35                       |

注: $N_s$ 为自发径迹数量; $N_i$ 为诱发径迹数量; $N_d$ 为标准铀玻璃的外探测器白云母记录的径迹数量; $\rho_s$ 、 $\rho_i$ 、 $\rho_d$ 分别为与  $N_s$ 、 $N_i$  和  $N_d$  相对应的径迹密度; $P(\chi^2)$  为  $\chi^2$  检验值。

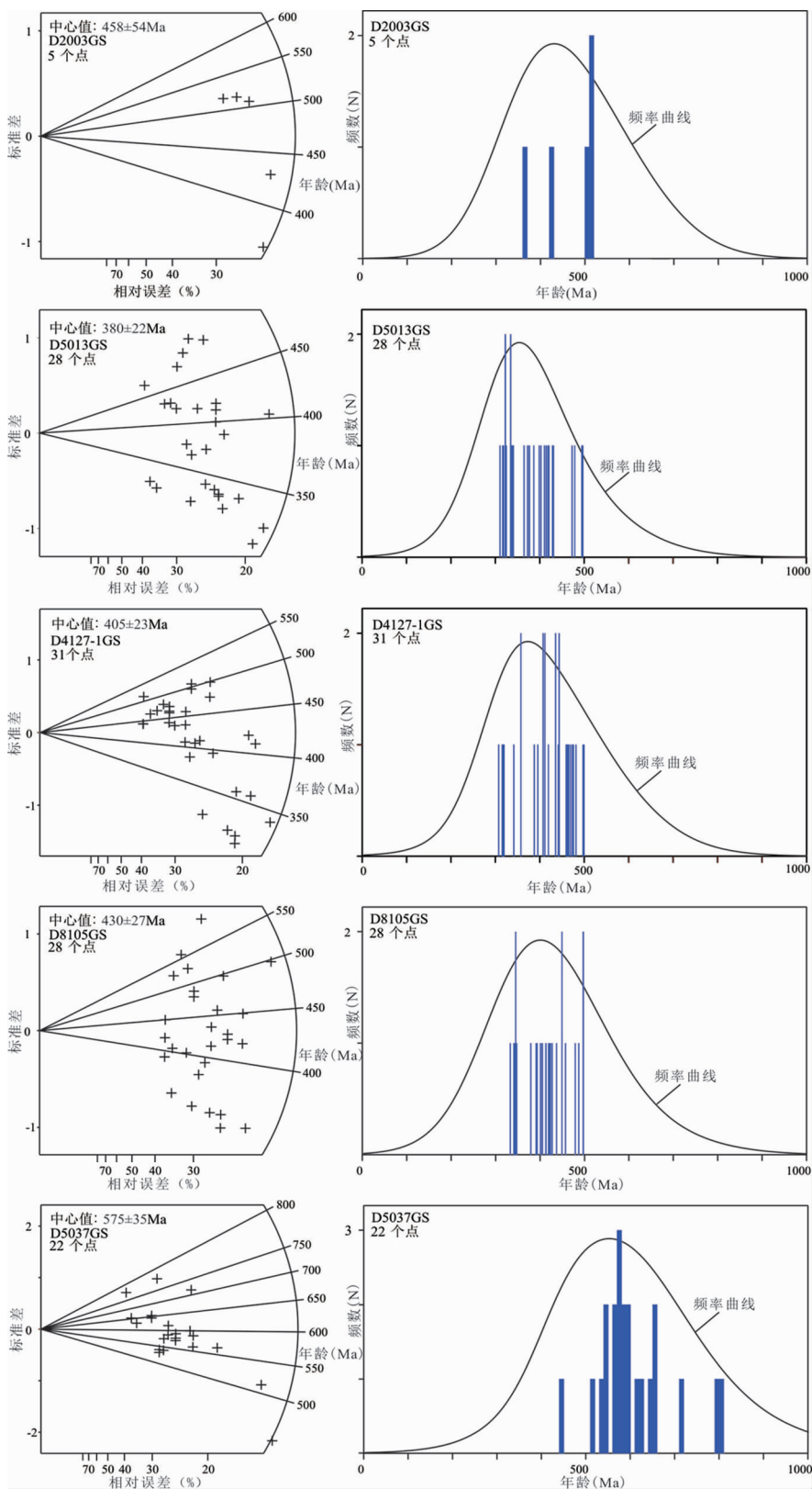


图 2 赞比亚卡帕图地区锆石单颗粒裂变径迹年龄雷达图、直方图和频率曲线

Fig. 2 Radial plot and histogram and frequency curve of zircon single grain fission track age, Kapatu area, Zambia

$P(\chi^2)$ 均大于 5%，表明 5 件样品中单颗粒的年龄差别属于统计误差范围之内即为单一构造事件的影

响。5 件样品的单颗粒裂变径迹年龄的雷达图、直方图和频率曲线如图 2。

对 5 件样品中所有锆石裂变径迹年龄及单颗粒年龄进行分析统计,参考中心年龄的误差值(约 30 Ma)绘制年龄总分布直方图(图 3)。由图 3 可见,该地区 5 件锆石样品裂变径迹年龄总体的峰值年龄组为 420~390 Ma,并且 D2003GS、D5013GS、D4127-1GS 和 D8105GS 样品年龄分布较宽,代表该地区晚期的区域构造活动事件,而 D5037GS 样品年龄分布也较宽,峰值年龄组为 600~572 Ma,主要代表该地区早期的区域构造活动事件。

3.2 磷灰石裂变径迹测年

2 件磷灰石样品的裂变径迹分析结果列于表 3。由表 3 可见,2 件样品的裂变径迹年龄介于  $59 \pm 6 \sim 27 \pm 4$  Ma 之间,它们的  $P(\chi^2)$  均为 0 即小于 5%,且各单颗粒年龄分布范围较宽,其可能代表了多期构造事件。因此,使用 Binomfit 软件(Mark, 1996)对 D5083GS 样品的裂变径迹年龄进行分组,可分解为 69 Ma 和 15 Ma 两组年龄;对 D4127-2GS 样品的裂变径迹年龄进行分组,可分解为 69 Ma 和

13 Ma 两组年龄(图 4)。2 件样品的裂变径迹长度直方图、单颗粒裂变径迹年龄的雷达图、直方图和频率曲线如图 5。

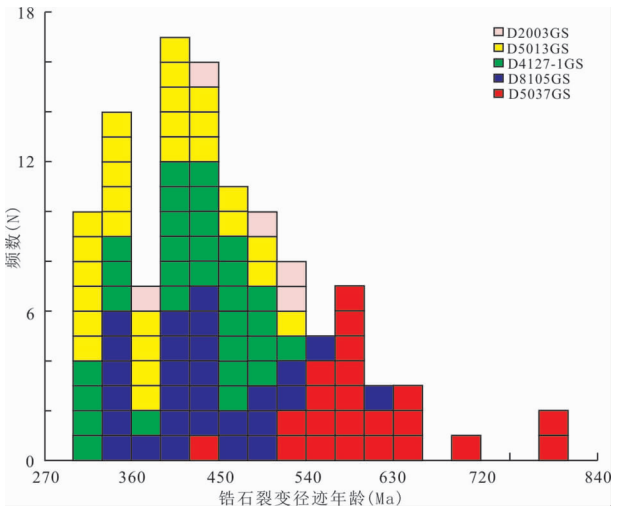


图 3 赞比亚卡帕图地区锆石裂变径迹年龄总分布直方图  
Fig. 3 Histogram of zircon fission track ages for all samples, Kapatu area, Zambia

表 3 赞比亚卡帕图地区磷灰石裂变径迹分析结果

Table 3 Apatite fission track analytical results, Kapatu area, Zambia

| 样品编号      | 磷灰石颗粒数 | 自发裂变                           |       | 诱发裂变                           |       | 标准铀玻璃                          |       | $P(\chi^2)$<br>(%) | 中心年龄<br>$\pm 1\sigma$ (Ma) | 径迹长度<br>$L(\mu\text{m})(N)$ |
|-----------|--------|--------------------------------|-------|--------------------------------|-------|--------------------------------|-------|--------------------|----------------------------|-----------------------------|
|           |        | $10^{-5}\rho_s/\text{cm}^{-2}$ | $N_s$ | $10^{-5}\rho_t/\text{cm}^{-2}$ | $N_t$ | $10^{-5}\rho_d/\text{cm}^{-2}$ | $N_d$ |                    |                            |                             |
| D5083GS   | 35     | 5.389                          | 508   | 15.318                         | 1444  | 8.241                          | 5949  | 0                  | $59 \pm 6$                 | $13.2 \pm 1.9(113)$         |
| D4127-2GS | 35     | 1.811                          | 178   | 14.73                          | 1448  | 9.459                          | 5949  | 0                  | $27 \pm 4$                 | $12.3 \pm 2.1(59)$          |

注:  $\rho_s$  为自发径迹密度;  $\rho_t$  为诱发径迹密度;  $\rho_d$  为标准径迹密度;  $N_s$  为自发径迹数量;  $N_t$  为诱发径迹数量;  $N_d$  为标准径迹数量;  $N$  为径迹长度数量。

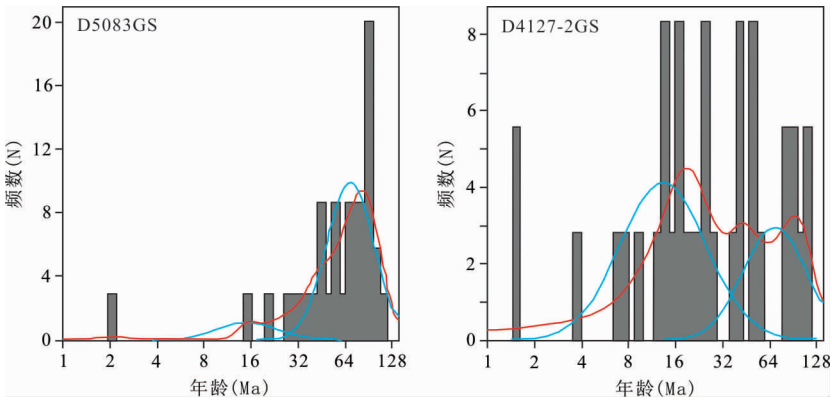


图 4 赞比亚卡帕图地区 D5083GS 和 D4127-2GS 样品单颗粒年龄分布直方图  
Fig. 4 Histogram of single grain age for D5083GS and D4127-2GS samples, Kapatu area, Zambia

对所有磷灰石裂变径迹年龄及单颗粒年龄进行分析统计,参考中心年龄的误差值(10 Ma)绘制年龄总分布直方图(图 6)。由图 6 可见,该地区 2 件磷灰石样品裂变径迹年龄总体的峰值年龄组为  $99 \sim 80$  Ma 和  $19 \sim 11$  Ma,并且 2 件样品年龄分布均

较宽,可能分别代表了该地区两期区域构造活动事件。

4 讨论

5 件锆石裂变径迹年龄介于  $575 \pm 35 \sim 380 \pm 22$

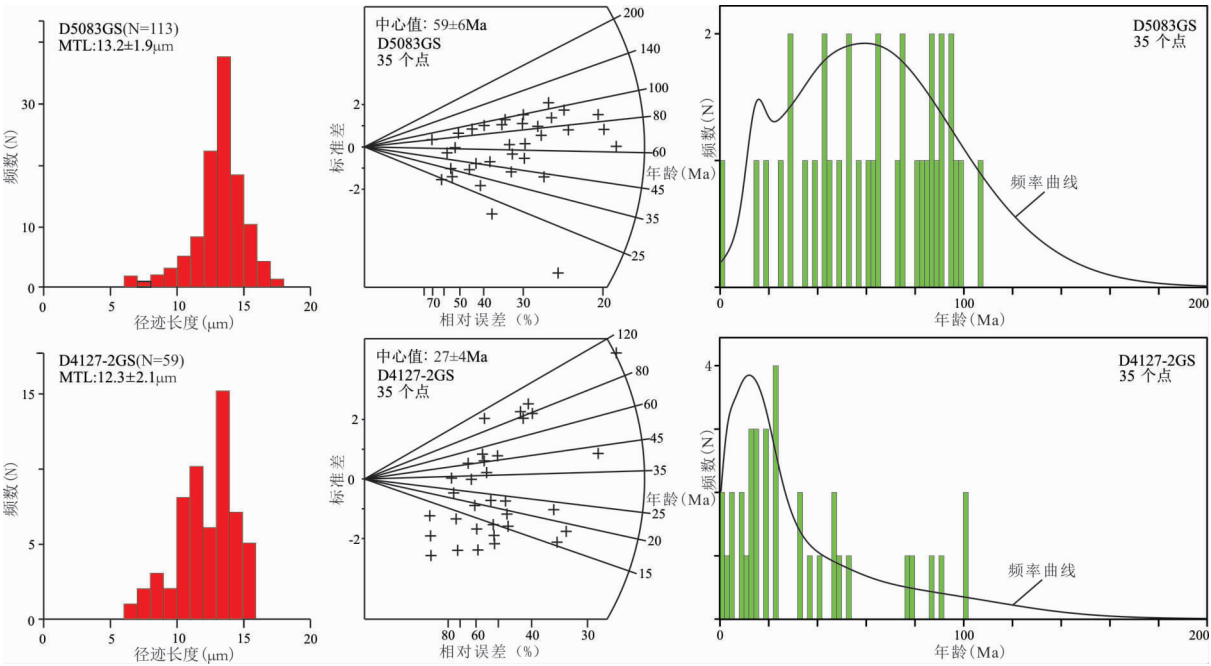


图 5 赞比亚卡帕图地区磷灰石样品裂变径迹长度直方图、单颗粒年龄雷达图、直方图及其年龄频率曲线

Fig. 5 Confined track length histogram, radial plot and histogram and frequency curve of apatite single grain fission track age, Kapatu area, Zambia

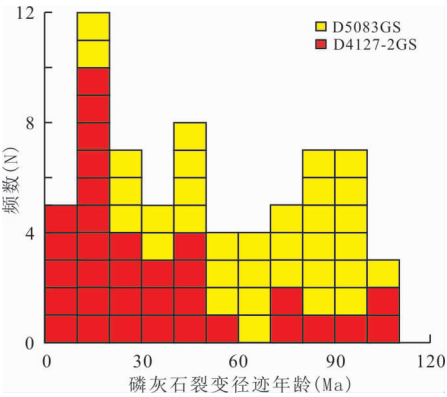


图 6 赞比亚卡帕图地区磷灰石裂变径迹年龄总分布直方图  
Fig. 6 Histogram of apatite fission track ages for all samples, Kapatu area, Zambia

Ma 之间,其峰值年龄组为 600~572 Ma(新元古代的埃迪卡拉纪)和 420~390 Ma(早泥盆世)。2 件磷灰石裂变径迹年龄介于 59±6~27±4 Ma 之间,其峰值年龄组为 99~80 Ma(晚白垩世)和 19~11 Ma(中新世)。

笔者查阅南部非洲地区大量资料,前人已获得该时期较多的研究成果(Castaing, 1991; Smith et al., 1994; Eby et al., 1995; Goscombe et al., 2000; Raab et al., 2002; Luft et al., 2005; Gernon et al., 2009; Phillips et al., 2009; Brown et al., 2014; Fernandes et al., 2015; Ren Junping et al., 2018a,

2018b; Ning Junfu et al., 2018),表明本次锆石和磷灰石裂变径迹研究数据的准确性。Ren Junping et al. (2018a)获得赞比亚东北部卡萨马—陇都地区沉积岩中 4 件锆石样品的裂变径迹年龄变化在 482±42~351±32 Ma 之间,两个年龄组分别为 488~441 Ma 和 375~293 Ma。Ren Junping et al. (2013)认为卢弗里安弧构造带主要包括 765~735 Ma 和 510~500 Ma 两个活动阶段,且 Ren Junping et al. (2018b)获得卢弗里安弧地区 4 件磷灰石裂变径迹年龄为 145±10~92±9 Ma。马拉维湖地区在 500~400 Ma 形成了大量花岗岩(Castaing, 1991)。Eby et al. (1995)利用马拉维南部奇尔瓦碱性火山岩省(Chilwa Alkaline Province)侵入岩中的锆石和磷灰石裂变径迹方法获得 137.4±24.9~98.0±13.1 Ma 的年龄,同时还利用磷灰石裂变径迹方法获得 94.0±14.8~82.9±8.0 Ma 的年龄。Goscombe et al. (2000)利用 4 件变质碎屑岩中的磷灰石裂变径迹方法获得 226±31~67±24 Ma 的年龄,同时发现在莫桑比克构造带和赞比西构造带中存在 490~440 Ma 的伟晶岩和花岗岩。Fernandes et al. (2015)利用莫桑比克太特省卡鲁 Moatize-Minjova 盆地内 4 件碎屑岩中的磷灰石裂变径迹方法获得 146.1±11.2~84.0±7.8 Ma 的年龄。津巴布韦克拉通西部奥拉帕(Orapa)金伯利岩约 93 Ma 侵入侏

罗纪玄武岩中(Gernon et al.,2009)。Smith et al. (1994)利用 Rb-Sr(云母)和 SHRIMP U-Pb(钙钛矿)方法获得卡普瓦尔克拉通西南部大量金伯利岩的年龄为 170~74 Ma。Raab et al. (2002)利用纳米比亚达马拉构造带内 66 件各类样品中的磷灰石裂变径迹方法获得  $547 \pm 95 \sim 61 \pm 5$  Ma 的年龄。同时,Brown et al. (2014)获得大量达马拉构造带内变质沉积岩和花岗岩中磷灰石裂变径迹年龄为 450~70 Ma。Luft et al. (2005)利用纳米比亚卡奥构造带和沃尔维斯(Walvis)盆地内 9 件各类样品中磷灰石裂变径迹方法获得  $296.7 \pm 26.1 \sim 46.9 \pm 3.8$  Ma 的年龄。Phillips et al. (2009)利用<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 方法获得纳米比亚碎屑钻石中 50 件榴辉岩和橄榄岩单斜辉石包体的年龄为  $1441 \pm 700 \sim 62 \pm 30$  Ma,其中 80%的包体年龄小于 300 Ma。以上的研究成果均标注于图 7(根据 Haest et al.,2011 修改)中。

对比南部非洲地区已获得的年龄数据,笔者发现在该地区新元古代的埃迪卡拉纪、早泥盆世和晚白垩世的构造活动是一个大范围的构造活动事件。在班韦乌卢地块中 600~572 Ma(新元古代的埃迪卡拉纪)、420~390 Ma(早泥盆世)及 99~80 Ma(晚

白垩世)的构造活动分别与泛非构造运动、海西期构造运动及南部非洲地区晚白垩世形成的含金刚石的金伯利岩的时间相吻合。但是,目前 19~11 Ma(中新世)的构造活动在区域上的表现尚不明确,可能与东非大裂谷西分支的演化有关(Twesigye et al., 2015)。综合 Ren Junping et al. (2018a)数据,笔者认为自泛非构造运动以来,班韦乌卢地块至少经历 600~572 Ma、488~441 Ma、420~390 Ma、375~293 Ma、99~80 Ma 及 19~11 Ma 六个构造事件。

### 5 结论

(1) 获得了赞比亚东北部卡帕图地区 5 件锆石裂变径迹年龄介于  $575 \pm 35 \sim 380 \pm 22$  Ma 之间,其峰值年龄组为 600~572 Ma(新元古代的埃迪卡拉纪)和 420~390 Ma(早泥盆世)。2 件磷灰石裂变径迹年龄介于  $59 \pm 6 \sim 27 \pm 4$  Ma 之间,其峰值年龄组为 99~80 Ma(晚白垩世)和 19~11 Ma(中新世)。

(2) 通过与邻区卢弗里安弧构造带、达马拉构造带、赞比西构造带及津巴布韦克拉通等地区已有的年龄数据对比可知,南部非洲地区新元古代的埃迪

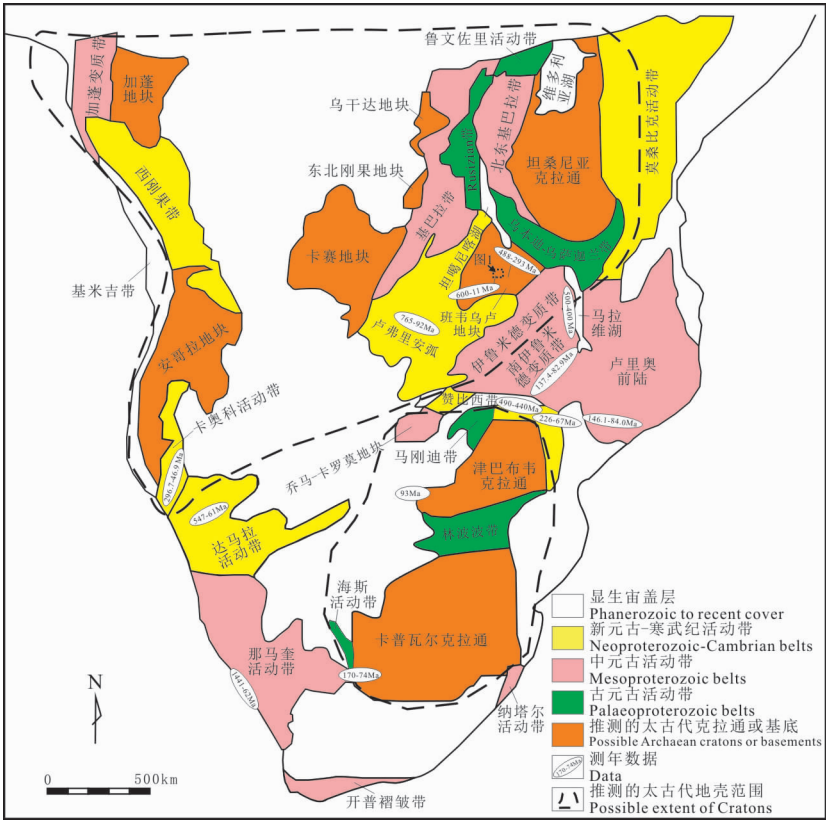


图 7 南部非洲前寒武纪地质构造简图(底图参考 Haest et al.,2011)  
Fig. 7 Precambrian tectonic sketch map in southern Africa(after Haest et al.,2011)

卡拉纪、早泥盆世和晚白垩世的构造活动是一个区域性的构造事件,并且其分别与泛非构造运动、海西期构造运动及南部非洲地区晚白垩世形成的含金刚石的金伯利岩的时间相吻合。但是,目前 19~11 Ma(中新世)的构造活动在区域上的表现尚不明确,可能与东非大裂谷西分支的演化有关。

(3)综合赞比亚东北部班韦乌卢地块卡萨马—陇都地区沉积岩中 4 件锆石样品的两个裂变径迹年龄组 488~441 Ma 和 375~293 Ma 数据(Ren Junping et al., 2018a),笔者认为自泛非构造运动以来,班韦乌卢地块至少经历 600~572 Ma、488~441 Ma、420~390 Ma、375~293 Ma、99~80 Ma 及 19~11 Ma 六个构造事件。

**致谢:**对廊坊市宇能岩石矿物分选技术服务有限公司、北京泽康恩科技有限公司在实验过程中的协助及中国地质大学(北京)袁万明教授在论文撰写中的帮助表示真诚的感谢。

## References

- Andrews-Speed C P. 1986. Gold-bearing fluvial and associated tidalmarine sediments of Proterozoic age in the Mporokoso Basin, northern Zambia. *Sedimentary Geology*, 48: 193~222.
- Andrews-Speed C P. 1989. The mid-Proterozoic Mporokoso basin, northern Zambia: Sequence stratigraphy, tectonic setting and potential for gold and uranium mineralisation. *Precambrian Research*, 44: 1~17.
- Brown R, Summerfield M, Gleadow A, Gallagher K. 2014. Intracontinental deformation in southern Africa during the Late Cretaceous. *Journal of African Earth Sciences*, 100: 20~41.
- Castaing C. 1991. Post-Pan-African tectonic evolution of south Malawi in relation to the Karroo and recent east African rift systems. *Tectonophysics*, 191: 55~73.
- De Waele B, Liégeois J-P, Nemchin A A, Tembo F. 2006. Isotopic and geochemical evidence of Proterozoic episodic crustal reworking within the Irumide belt of south-central Africa, the southern metacratonic boundary of an Archaean Bangweulu Craton. *Precambrian Research*, 148: 225~256.
- Donelick R A, Miller D S. 1991. Enhanced tint fission track densities in low spontaneous track density apatites using  $^{252}\text{Cf}$ -derived fission fragment tracks: A model and experimental observations. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, 18 (3): 301~307.
- Eby G N, Roden-Tice M, Krueger H L, Ewing W, Faxon E H, Woolley A R. 1995. Geochronology and cooling history of the northern part of the Chilwa Alkaline Province, Malawi. *Journal of African Earth Sciences*, 20(3-4): 275~288.
- Fernandes P, Cogné N, Chew D M, Rodrigues B, Jorge R C G S, Marques J, Jamal D, Vasconcelos L. 2015. The thermal history of the Karoo Moatize-Minjova Basin, Tete Province, Mozambique: An integrated vitrinite reflectance and apatite fission track thermochronology study. *Journal of African Earth Sciences*, 112: 55~72.
- Galbraith R F. 1981. On statistical models of fission track counts. *Mathematical Geosciences*, 13(6): 471~478.
- Gernon T M, Fontana G, Field M, Sparks S J, Brown R J, Mac Niocaill C. 2009. Pyroclastic flow deposits from a Kimberlite Eruption: The Orapa South Crater, Botswana. *Lithos*, 112: 566~578.
- Gleadow A J W, Duddy I R, Green P F, Lovering J F. 1986. Confined fissiontrack lengths in apatite: A diagnostic tool for thermal history analysis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 94(4): 405~415.
- Goscombe B, Armstrong R, Barton J M. 2000. Geology of the Chewore Inliers, Zimbabwe: Constraining the Mesoproterozoic to Palaeozoic evolution of the Zambezi Belt. *Journal of African Earth Sciences*, 30(3): 589~627.
- Haest M, Muchez P. 2011. Stratiform and vein-type deposits in the pan-african orogen in central and southern Africa: Evidence for Multiphase Mineralisation. *Geologica Belgica*, 14 (1-2): 23~44.
- Luft F F, Luft-Jr J L, Chemale-Jr F, Lelarge M L M V, Ávila J N. 2005. Post-Gondwana break-up record constraints from apatite fission track thermochronology in NW Namibia. *Radiation Measurements*, 39(6): 675~679.
- Mark T B. 1996. Probability density plot for fission-track grain-age samples. *Radiation Measurement*, 26(5): 663~676.
- Ning Fujun, Wang Jie, Ren Junping, Liu Xiaoyang, Zuo Libo, Gu Alei, He Shengfei, He Fuqing. 2018. Geodynamic evolution and mineral resources present research in Damara Belt, Namibia. *Geological Survey and Research*, 41(2): 113~120 (in Chinese with English abstract).
- Phillips D, Harris J W. 2009. Diamond provenance studies from  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of clinopyroxene inclusions: An example from the west coast of Namibia. *Lithos*, 112: 793~805.
- Raab M J, Brown R W, Gallagher K, Carter A, Weber K. 2002. Late Cretaceous reactivation of major crustal shear zones in northern Namibia: Constraints from apatite fission track analysis. *Tectonophysics*, 349(1-4): 75~92.
- Ren Junping, Wang Jie, Gu Alei, Zuo Libo, Sun Hongwei, He Fuqing, Wang Shaoyi, Mukofu C, Dokowe A P, Chikambwe E, Canisius C, Malunga D. 2018a. Detrital zircon fission track thermochronology in Kasama—Nondo, Northeastern Zambia. *Atomic Energy Science and Technology*, 52(12): 2275~2282 (in Chinese with English abstract).
- Ren Junping, Wang Jie, Gu Alei, Zuo Libo, Xu Kangkang, Sun Hongwei, Liu Xiaoyang, He Shengfei, He Fuqing. 2017. Research status and prospecting potential of mineral resources in Lufilian Arc, Zambia. *China Mining Magazine*, 26(11): 139~144 (in Chinese with English abstract).
- Ren Junping, Wang Jie, Liu Xiaoyang, He Shengfei, He Fuqing, Xu Kangkang. 2013. Research progresses on the Cu-Co deposits of Lufilian Area in the Mid-Southern Africa. *Geological Science and Technology Information*, 32(5): 142~152 (in Chinese with English abstract).
- Ren Junping, Wang Jie, Sun Hongwei, Feng Lin, Zuo Libo, Gu Alei, He Fuqing, Mukofu C, Dokowe A P, Chikambwe E, Canisius C, Malunga D. 2019a. Depositional environment of the Kasama Group, northeastern Zambia: Evidence from detrital zircon U-Pb-Hf isotopic compositions. *Geology in China*, 46(3): 575~586 (in Chinese with English abstract).
- Ren Junping, Wang Jie, Zhang Donghong, Dokowe A P, Chikambwe E M, Zuo Libo, Xu Kangkang, Liu Xiaoyang, He Fuqing. 2018b. Reactivation of Lufilian Arc in Zambia: Zircon and apatite fission track analyses. *Earth Science*, 43(6): 1 850~1 860 (in Chinese with English abstract).
- Ren Junping, Wang Jie, Zuo Libo, Liu Xiaoyang, Dai Chaocheng, Xu Kangkang, Li Guozhan, Geng Jianzhen, Xiao Zhibin, Sun Kai, He Fuqing, Gu Alei. 2017b. Zircon U-Pb and biotite  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology from the Anzan emerald deposit in Zambia. *Ore Geology Reviews*, 91: 612~619.
- Ren Junping, Zuo Libo, Xu Kangkang, Wang Jie, Liu Xiaoyang, He Shengfei, Liu Yu, He Fuqing. 2016. Geodynamic evolution and mineral resources present research in Bangweulu Block, northern Zambia. *Geological Review*, 62(4): 979~996 (in Chinese with English abstract).
- Ren Junping, Wang Jie, Zuo Libo, Gu Alei, Sun Hongwei, Xu Kangkang, Mukofu C, Dokowe A P, Chikambwe E, Canisius C,

- Malunga D. 2019b. Zircon U-Pb geochronology, Lu-Hf isotopic compositions and geochemistry characteristics of the quartz diorites from western Kasama, northern Province, Zambia. *Acta Geologica Sinica*, 93(11):2832~2846(in Chinese with English abstract).
- Ren Junping, Wang Jie, Gu Alei, Zuo Libo, Sun Hongwei, Xu Kangkang, Wu Xingyuan, Dokowe A P, Chikambwe E. 2019c. Zircon U-Pb geochronology and Lu-Hf isotopic composition of syenogranite, northeastern Zambia. *Geological Survey and Research*, 42(3): 161~165 (in Chinese with English abstract).
- Smith C B, Clark T C, Barton E S, Bristow J W. 1994. Emplacement ages of Kimberlite Occurrences in the Prieska Region, southwest border of the Kaapvaal Craton, South Africa. *Chemical Geology*, 113(1-2):149~169.
- Sun Hongwei, Wang Jie, Ren Junping, Zuo Libo, Gu Alei. 2019. Sedimentary stratigraphic characteristics of the Mporokoso Basin in the north-eastern Zambia. *Geological Review*, 65(1): 232~245(in Chinese with English abstract).
- Thieme J G, Johnson R L. 1981. Geological map of the republic of Zambia 1 : 1000000. Geological Survey of Zambia, Lusaka.
- Twesigye C K. 2015. The impact of paleoclimate, geologic history, and human influence on the evolution of east African cichlids. *Quaternary International*, 369:67~77.
- Unrug R. 1984. The mid-Proterozoic Mporokoso Group of northern Zambia: stratigraphy, sedimentation and regional position. *Precambrian research*, 24(2): 99~121.
- Wang Ke, Yuan Wanming, Feng Xing, Hao Nana, Feng Yunlei, Zhang Aikui. 2018. Apatite fission track thermochronology and tectonic significance in Aikeng Area, east Kunlun Mountains. *Atomic Energy Science and Technology*, 52(1): 186~192(in Chinese with English abstract).
- Xing Shi, Zhang Jinda, Ren Junping, Gu Alei, Du Minglong, Ji Shanqing. 2018. Discussion on the characteristics and mineralization of the Irumide belt in the mid-southern Africa. *Geological Survey and Research*, 41(3): 176~184(in Chinese with English abstract).
- Yamada R, Tagami T, Nishimura S, Ito H. 1995. Annealing kinetics of fission tracks in zircon: an experimental study. *Chemical Geology*, 122(1-4): 249~258.
- Zuo Libo, Ren Junping, Wang Jie, Gu Alei, Sun Hongwei, Xu Kangkang. 2020. Geochemical characteristics, Zircon U-Pb ages and Lu-Hf isotopic composition of granites in Bangweulu Block, Zambia. *Geological Survey and Research*, 43(1): 30~41(in Chinese with English abstract).
- Zhao Wenju, Yuan Wanming, Liu Haitao, Song Gao. 2013. Apatite fission track analysis on tectonic activities and paleotopography in southern Altai Region, Xinjiang, China. *Atomic Energy Science and Technology*, 47(8):1 458~1 467 (in Chinese with English abstract).
- 宁福俊,王杰,任军平,刘晓阳,左立波,古阿雷,孙宏伟,何胜飞,贺福. 2018. 清纳米比亚达马拉构造带演化 and 成矿研究综述. *地质调查与研究*, 41(2): 113~120.
- 任军平,王杰,古阿雷,左立波,许康康,孙宏伟,刘晓阳,何胜飞,贺福清. 2017a. 赞比亚卢弗里安弧地区矿产资源研究现状及找矿潜力分析. *中国矿业*, 26(11):139~144.
- 任军平,王杰,古阿雷,左立波,孙宏伟,贺福清,王少轶, Mukofu C, Dokowe A P, Chikambwe E, Canisius C, Malunga D. 2018a. 赞比亚东北部卡萨马—陇都地区碎屑锆石裂变径迹年代学特征. *原子能科学技术*, 52(12): 2275~2282.
- 任军平,王杰,张东红,Dokowe A P, Chikambwe E M,左立波,许康康,刘晓阳,贺福清. 2018b. 赞比亚卢弗里安弧构造带再活化的证据:锆石和磷灰石裂变径迹年代学. *地球科学*, 43(6): 1850~1 860.
- 任军平,王杰,孙宏伟,冯琳,左立波,古阿雷,贺福清, Mukofu C, Dokowe A P, Chikambwe E, Canisius C, Malunga D. 2019a. 赞比亚东北部卡萨马群形成环境:碎屑锆石 U-Pb 年龄与 Hf 同位素的限定. *中国地质*, 46(3): 575~586.
- 任军平,王杰,左立波,古阿雷,孙宏伟,许康康,Mukofu C, Dokowe A P, Chikambwe E, Canisius C, Malunga D. 2019b. 赞比亚北部省卡萨马西部石英闪长岩锆石 U-Pb 和 Lu-Hf 同位素及地球化学特征. *地质学报*, 93(11):2832~2846.
- 任军平,王杰,古阿雷,左立波,孙宏伟,许康康,吴兴源,Dokowe A P,Chikambwe E. 2019c. 赞比亚东北部正长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄和 Lu-Hf 同位素特征. *地质调查与研究*, 42(3):161~165.
- 任军平,左立波,许康康,王杰,刘晓阳,何胜飞,刘宇,贺福清. 2016. 赞比亚北部班韦乌卢地块演化及矿产资源研究现状. *地质论评*, 62(4):979~996.
- 孙宏伟,王杰,任军平,左立波,古阿雷. 2019. 赞比亚东北部姆波洛科索盆地沉积地层特征. *地质论评*, 65(1):232~245.
- 王珂,袁万明,冯星,郝娜娜,冯云磊,张爱奎. 2018. 东昆伦埃坑地区磷灰石裂变径迹年代学及构造意义. *原子能科学技术*, 52(1):186~192.
- 邢仕,张金达,任军平,古阿雷,杜明龙,纪山青. 2018. 非洲中南部伊鲁米德构造带演化及成矿作用探讨. *地质调查与研究*, 41(3): 176~184.
- 左立波,任军平,王杰,古阿雷,孙宏伟,许康康. 2020. 赞比亚班韦乌卢地块花岗岩地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄及 Lu-Hf 同位素组成. *地质调查与研究*, 43(1): 30~41.
- 赵文菊,袁万明,刘海涛,宋高. 2013. 从裂变径迹分析新疆阿尔泰山南部地区构造活动与古地形的变化. *原子能科学技术*, 47(8): 1 458~1 467.

## Constraints of fission track dating after the Pan-African tectonic evolution of the Bangweulu Block, northeastern Zambia

REN Junping<sup>1)</sup>, WANG Jie<sup>\*1)</sup>, GU Alei<sup>1)</sup>, SUN Hongwei<sup>1)</sup>, ZUO Libo<sup>1)</sup>, HE Fuqing<sup>1)</sup>,  
CHIPILAUKA Mukofu<sup>2)</sup>, ALPHET PHASKANI Dokowe<sup>2)</sup>,  
EZEKIAH Chikambwe<sup>2)</sup>, EVARISTO Kasumba<sup>2)</sup>

1) *Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin, 300170, China;*

2) *Geological Survey Department of Zambia, Lusaka, P. O. Box 50135, Zambia*

*\* Corresponding author: wangjie513046@163.com*

### Abstract

The main tectonic evolution times of the Bangweulu Block since the Pan-African tectonic activities were studied in this paper using the zircon and apatite fission track methods. The Kapatu is located in the center part of the Bangweulu Block, northeastern Zambia. In order to study the tectonic activities of the Bangweulu Block, fresh rock samples from Mbala, Nsama and Kabweluma Formations of the Mporokoso Group were collected in Kapatu. The five zircon fission track ages are between  $575 \pm 35$  Ma and  $380 \pm 22$  Ma and the ages may be divided into two groups, i. e.  $600 \sim 572$  Ma and  $420 \sim 390$  Ma. The two apatite fission track ages are between  $59 \pm 6$  Ma and  $27 \pm 4$  Ma and the ages can be divided into two groups, i. e.  $99 \sim 80$  Ma and  $19 \sim 11$  Ma. All four ages groups which respectively correspond to the main periods of the Neoproterozoic Ediacaran, Lower Devonian, Late Cretaceous and Miocene. Compared with the ages from southern Africa, the tectonic activities of Neoproterozoic Ediacaran, Lower Devonian, Late Cretaceous involve a wide area and the tectonic activity during the Miocene ( $19 \sim 11$  Ma) is not yet clear. Since the Pan-African tectonic evolution, the Bangweulu Block at least has been affected in  $600 \sim 572$  Ma,  $488 \sim 441$  Ma,  $420 \sim 390$  Ma,  $375 \sim 293$  Ma,  $99 \sim 80$  Ma and  $19 \sim 11$  Ma. Since limited data after the Pan-African tectonic evolution of the Bangweulu Block are available, these results provide important information for future work.

**Key words:** fission track thermochronology; zircon and apatite; Kapatu; Bangweulu Block; Northeastern Zambia