

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.610>



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

任军平¹, 王杰^{1*}, 张东红², Dokowe, A.P.³, Chikambwe, E.M.³,
左立波¹, 许康康¹, 刘晓阳¹, 贺福清¹

1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170

2. 中国有色矿业集团有限公司中色非洲矿业有限公司, 赞比亚基特韦 P.O.Box 22592

3. 赞比亚地质调查局, 赞比亚卢萨卡 P.O.Box 50135

摘要: 锆石和磷灰石裂变径迹年代学对揭示构造热事件的形成及演化过程具有重要的研究意义。利用锆石和磷灰石裂变径迹测试及热史模拟探讨了卢弗里安弧构造带自泛非构造运动以来的构造热演化过程。谦比希铜矿床和恩昌加铜(钴)矿床位于卢弗里安弧铜—钴成矿带中的赞比亚境内。对采自该两个矿床中的 5 件新鲜岩石样品进行挑选, 获得了 5 件锆石和 4 件磷灰石样品。首次获得了卢弗里安弧构造带中的裂变径迹年龄, 5 件锆石样品的年龄分别为 265 ± 22 Ma、 230 ± 10 Ma、 228 ± 9 Ma、 225 ± 9 Ma 和 221 ± 10 Ma, 4 件磷灰石样品的年龄分别为 145 ± 10 Ma、 133 ± 10 Ma、 130 ± 10 Ma 和 92 ± 9 Ma, 径迹长度介于 $(11.4 \pm 2.4) \sim (11.8 \pm 2.4) \mu\text{m}$ 。从热历史模拟结果可看出, 从 $300 \sim 260$ Ma, 古地温持续降低至 90°C 左右; 随后, 缓慢降低至现今的地表温度。对比卢弗里安弧构造带、赞比西构造带和达马拉构造带中的年龄数据, 研究表明非洲中南部地区二叠纪—白垩纪的构造活动是一个区域性的构造活动事件。

关键词: 裂变径迹年代学; 锆石和磷灰石; 谦比希铜矿床; 恩昌加铜(钴)矿床; 卢弗里安弧; 赞比亚; 石油地质; 构造。

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2018)06-1850-11

收稿日期: 2018-01-28

Reactivation of Lufilian Arc in Zambia: Zircon and Apatite Fission Track Chronology

Ren Junping¹, Wang Jie^{1*}, Zhang Donghong², Dokowe, A.P.³, Chikambwe, E.M.³, Zuo Libo¹,
Xu Kangkang¹, Liu Xiaoyang¹, He Fuqing¹

1. Tianjin Institutes of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Tianjin 300170, China

2. NFC Africa Mining Plc, P.O.Box 22592 Kitwe, Zambia

3. Geological Survey Department of Zambia, P.O.Box 50135 Lusaka, Zambia

Abstract: The fission track chronology of zircon and apatite are always used to reveal tectonic activities and evolutions. Based on zircon and apatite fission track analyses and thermal evolution history, in this paper, it discusses the tectonic thermal evolution process of Lufilian arc since the Pan-African tectonic movement. The Chambishi copper and the Nchanga copper and cobalt deposits occur in the Zambian Copper belt of the Lufilian arc. Five fresh rock samples were taken from these two deposits, from which 5 zircon samples and 4 apatite samples were obtained. For the first time we obtained the fission track ages in Lufilian arc. The results are as follow: the ages from the 5 zircon analysis are 265 ± 22 Ma, 230 ± 10 Ma, 228 ± 9 Ma, 225 ± 9 Ma and 221 ± 10 Ma respectively and those of the 4 apatite samples are 145 ± 10 Ma, 133 ± 10 Ma, 130 ± 10 Ma and 92 ± 9 Ma respectively and the length is between $11.4 \pm 2.4 \mu\text{m}$ and $11.8 \pm 2.4 \mu\text{m}$. According to the modeling results of ecological thermal evolution histo-

基金项目: 中国地质调查局项目(Nos.1212011220910, 121201006000150014); 商务部技术援助外项目(Nos.[2012]558, [2015]352)。

作者简介: 任军平(1980—), 男, 高级工程师, 从事地质矿产勘查与研究工作。ORCID: 0000-0001-6985-2373. E-mail: rjp2333@126.com

*** 通讯作者:** 王杰, ORCID: 0000-0001-7739-3138. E-mail: wangjie513046@163.com

引用格式: 任军平, 王杰, 张东红, 等, 2018. 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—1860.

ry, from 300 Ma to 260 Ma the paleo-geotemperature continued to decrease to about 90 °C and it subsequently slowed down to the present surface temperature. Comparing the ages of the Lufilian belt with the Zambezi and Damara belts, it is believed that the Permian-Jurassic tectonic activities were regional tectonic reactive events in the Central and Southern Africa.

Key words: fission track chronology; zircon and apatite; Chambishi copper deposit; Nchanga copper and cobalt deposit; Lufilian arc; Zambia; petroleum geology; tectonic.

谦比希铜矿床和恩昌加铜(钴)矿床位于赞比亚—刚果(金)边境地区,属于卢弗里安弧(Lufilian arc)铜—钴成矿带.该成矿带东西延伸近 700 km,南北宽超过 150 km (Kampunzu *et al.*,2005),带内矿床众多,许多矿床都经历了不同程度的氧化和剥蚀作用(Chartrand and Brown,1984;Batumike *et al.*,2006;Cailteux *et al.*,2007;任军平等,2013).该地区的矿床主要为同沉积型砂页岩型矿床,其受地层控制,钴矿主要是与铜矿伴生,且品位不高.据统计,带内已知矿床含有约 1.4 亿 t 铜和 600 万 t 钴的金属量,矿石平均品位分别为 2.9%和 0.12% (Milesi *et al.*,2006).卢弗里安弧地区是众多矿业公司关注的地区.在赞比亚境内的铜—钴成矿带长为 220~250 km,代表性矿床包括谦比希(Chambishi)、恩昌

加(Nchanga)、孔科拉(Konkola)及坎桑希(Kansanshi)等铜(钴)矿床(图 1).卢弗里安弧铜—钴成矿带内铜矿资源仅次于南美洲安第斯山脉(智利、秘鲁和阿根廷)和北美洲美国西南部—墨西哥两个铜矿带,其伴生钴资源量居世界第一(周应华和江少卿,2010).

赞比亚铜矿开采活动可追溯到约公元 7 世纪,1924 年以前的殖民统治时期英国人控制的矿业公司管理着赞比亚的铜矿生产,1902 年在赞比亚卢安夏地区发现了铜矿化,1910 年当地居民发现了一块含铜矿石,1923 年在铜带省钦戈拉地区发现了恩昌加铜(钴)矿床中的 River Lode 铜矿体.恩昌加铜(钴)矿床地下开采始于 1939 年,1955 年转为露天开采.此后,该矿床一直采用露天和井下联合开采方式.目前,

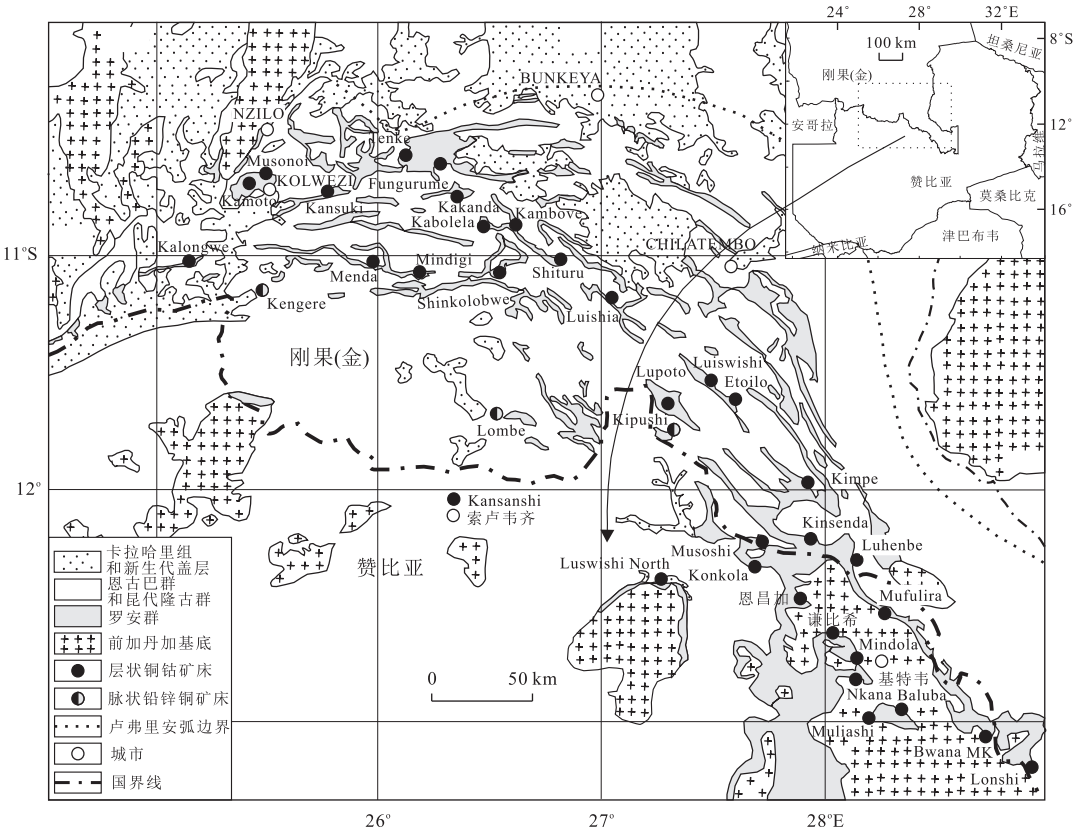


图 1 卢弗里安弧地区地质图及重要矿床位置

Fig.1 Geological map of the Lufilian arc and major ore deposits

据 Muchez *et al.* (2010)修改

恩昌加铜(钴)矿床隶属于孔科拉铜矿(Konkola copper mine)公司,其位于赞比亚铜带省钦戈拉市附近(地理坐标:27°52′56″E,12°30′55″S),曾经是世界上最大的生产矿山之一,现在仍然是全球最大的露天矿床之一.该矿床地表长度约为 4 km,宽约为 2 km,向地下延伸大于 430 m.地下原矿品位约为 3.7%,每年能产出矿石约为 280×10^4 t,品位超过 3%的铜矿石含铜金属量约为 9×10^4 t.恩昌加铜(钴)矿床含有 3 个含矿层位,总共 14 个矿体.

谦比希铜矿位于赞比亚铜带省基特韦附近(地理坐标:28°00′E,12°40′S).它是中国政府批准在境外开发的第一个有色金属矿山,是中非合作的标志性项目.中国有色矿业集团有限公司自 1998 年收购赞比亚谦比希铜矿并成立中色非洲矿业有限公司以来,已在赞比亚成功进行矿业开发近 20 年,取得了很好的效果.目前,该矿床包括主矿体、西矿体和东南矿体,矿石品位为 2%~4%,其中该矿床的东南矿体是未来开发的主要方向.

在卢弗里安弧铜—钴成矿带中,前人(Kampunzu *et al.*, 2005; 张东红等, 2013; Ren *et al.*, 2017)的研究多集中在矿床研究方面,而对于卢弗里安弧构造带在泛非构造运动以后是否有新活动未做过相关研究,冈瓦纳古陆块的裂解是否影响到该地区也值得进一步思考.锆石和磷灰石裂变径迹方法能够敏锐的记录构造活动事件.其中,锆石裂变径迹的封闭温度为 300~180 °C (Yamada *et al.*, 1995),磷灰石裂变径迹的封闭温度为 110 ± 10 °C,退火带温度为 60~120 °C (Gleadow *et al.*, 1986; 袁万明等, 2007).

1 区域地质

由 Garlick 提出的卢弗里安弧铜—钴成矿带也

称加丹加带或中非铜—钴成矿带(图 1),其是泛非构造运动的结果(任军平等, 2013).Eglinger *et al.* (2016)对赞比亚境内该带中内带的变质作用与构造演化特征进行了研究.

研究区域内的岩石单元主要包括前加丹加基底、加丹加超群及卡拉哈里(Kalahari)组.加丹加超群不整合覆盖于基底之上,以形成于新元古代的沉积岩为主,厚 5~10 km,属于裂谷盆地深海相至边缘台地沉积相.加丹加超群自下至上包括罗安(Roan)群、恩古巴(Nguba)群和孔德龙古(Kundelungu)群 3 个单元,铜(钴)矿主要位于罗安群中.

Armstrong *et al.* (1999)利用锆石 SHRIMP U-Pb 方法获得恩昌加矿床基底附近穹隆中花岗岩的年龄为 877 ± 10 Ma,认为罗安群底部的长石砂岩的碎屑锆石年龄有~880 Ma 和 1 800~2 000 Ma 两组.Key *et al.* (2001)利用锆石 SHRIMP U-Pb 方法获得罗安群中安山质玄武岩年龄约为 765 Ma,孔德龙古组中的斑状玄武岩年龄约为 735 Ma.Selley *et al.* (2005)通过对孔科拉(Konkola)矿床内黄铜矿的 Re-Os 同位素年龄研究获得该矿床的成矿年龄为 816 ± 62 Ma.Rainaud *et al.* (2005)对于罗安群中锆石 U-Pb 年龄数据研究表明罗安群同生沉积层状铜钴矿的形成年龄介于 880~735 Ma.Torrealday *et al.* (2000)利用 K-Ar、Rb-Sr 和 U-Pb 等多种测年方法认为赞比亚坎萨希(Kansanshi)地区的变质作用高峰期大约发生在 700 Ma.任军平等(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.

2 样品采集及岩石学特征

通过对谦比希西矿体和恩昌加矿体的详细观察,笔者共采集 5 件新鲜岩石样品,其详细的采样位

表 1 样品采样位置
Table 1 Location of samples

样品编号	经纬度	岩石类型	主要矿物组合	采样位置	对应地层单元
QJ2	28°1′59″E 12°39′5″S	变质粉砂岩	石英、黑云母、白云母、绿帘石和方解石	谦比希西矿体	罗安群
QJ3	28°1′59″E 12°39′5″S	变质长石石英砂岩	石英、钾长石、黑云母、绿泥石和方解石	谦比希西矿体	罗安群
EJ1	27°52′15″E 12°30′36″S	变质砂岩	石英和长石,少量白云母	恩昌加矿体	罗安群
EJ2	27°52′15″E 12°30′36″S	变质砂岩	石英和长石,少量黑云母、白云母、绿泥石、阳起石和粘土矿物	恩昌加矿体	罗安群
EJ3	27°52′15″E 12°30′36″S	变质砂岩	石英、钾长石、黑云母、白云母、方解石和绿泥石	恩昌加矿体	罗安群

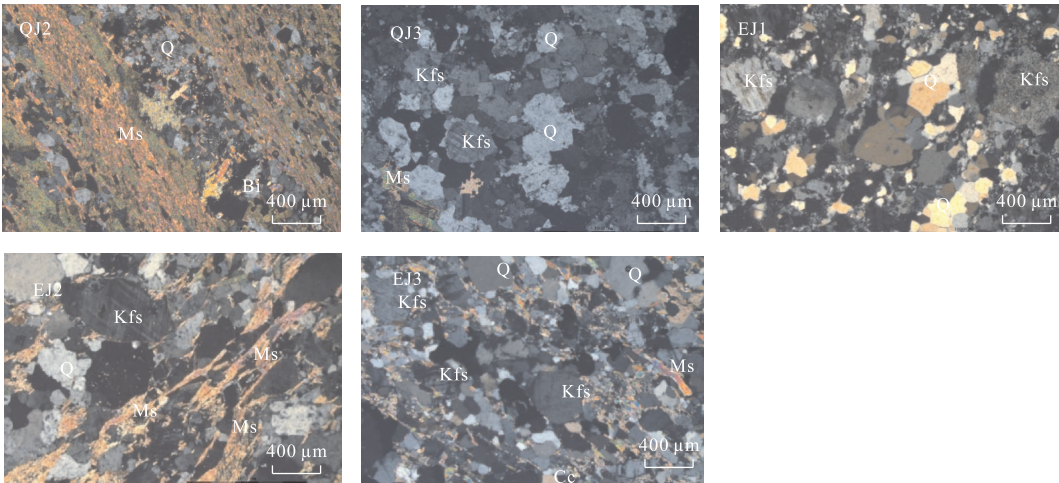


图 2 样品的镜下特征

Fig.2 Microphotographs of the dating samples

QJ2.变质粉砂岩;QJ3.变质长石石英砂岩;EJ1.变质砂岩;EJ2.变质砂岩;EJ3.变质砂岩;Kfs.钾长石;Q.石英;Ms.白云母;Bi.黑云母;Cc.方解石

置、岩石类型及地理坐标见表 1,岩矿鉴定特征见图 2.

3 年代学特征

从谦比希铜矿床中变质粉砂岩(QJ2)和变质长石石英砂岩(QJ3)样品中获得的锆石样品分别命名为 QJ2-1 和 QJ3-1,获得的磷灰石样品分别命名为 QJ2-2 和 QJ3-2.从恩昌加铜(钴)矿床中变质砂岩(EJ1)、变质砂岩(EJ2)和变质砂岩(EJ3)样品中获得的锆石样品分别命名为 EJ1-1、EJ2-1 和 EJ3-1,获得的磷灰石样品分别命名为 EJ2-2 和 EJ3-2.

3.1 锆石裂变径迹测年

3.1.1 样品预处理及测试方法 新鲜的岩石样品首先经过粉碎和自然晾干.随后,利用电磁选、重液选和介电选等方法,对初步筛选的矿物颗粒进行锆

石单矿物提纯,分离出锆石单矿物.接着用聚全氟乙丙烯树脂片将锆石颗粒固定并制作成光薄片,进行研磨抛光.锆石颗粒在 210 ℃ 下,使用 KOH + NaOH 的高温熔融物蚀刻 20~35 h,揭示其自发形成的裂变径迹(赵文菊等,2013).通过 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($<4\times10^{-9}$)作为外探测器盖在光薄片上,让其紧密接触颗粒内表面,与 CN2 标准铀玻璃一并放入反应堆中接受热中子照射.在反应堆辐照后,使用 40% HF 在 25 ℃ 下蚀刻白云母外探测器 20 min,揭示其诱发裂变径迹,并应用相同方法观测统计其诱发裂变径迹密度.在识别裂变径迹时应特别注意,选择平行 c 轴的柱面来测定其水平封闭径迹长度、自发裂变径迹密度和诱发裂变径迹密度(Yamada *et al.*, 1995).在实验操作过程中²⁵²Cf辐照样品的多少影

表 2 锆石裂变径迹分析结果

Table 2 Zircon fission track analytical results

样品编号	锆石颗粒数	$\rho_s(10^5/cm^2)(N_s)$	$\rho_i(10^5/cm^2)(N_i)$	$\rho_d(10^5/cm^2)(N_d)$	$P(\chi^2)(\%)$	中心年龄 $t(Ma)(\pm 1\sigma)$
QJ2-1	5	217.023 (960)	50.865 (225)	14.006 (8 055)	25.9	265±22
QJ3-1	30	118.602 (7 170)	33.099 (2 001)	14.375 (8 055)	85.0	230±10
EJ1-1	26	120.552 (5 937)	36.225 (1 784)	14.867 (8 055)	40.1	221±10
EJ2-1	35	122.312 (8 789)	36.837 (2 647)	15.359 (8 055)	36.1	228±9
EJ3-1	33	130.325 (7 251)	40.997 (2 281)	15.851 (8 055)	53.8	225±9

注: ρ_s 为自发径迹密度, ρ_i 为诱发径迹密度, ρ_d 为标准径迹密度, N_s 为自发径迹数, N_i 为诱发径迹数, N_d 为标准径迹数.

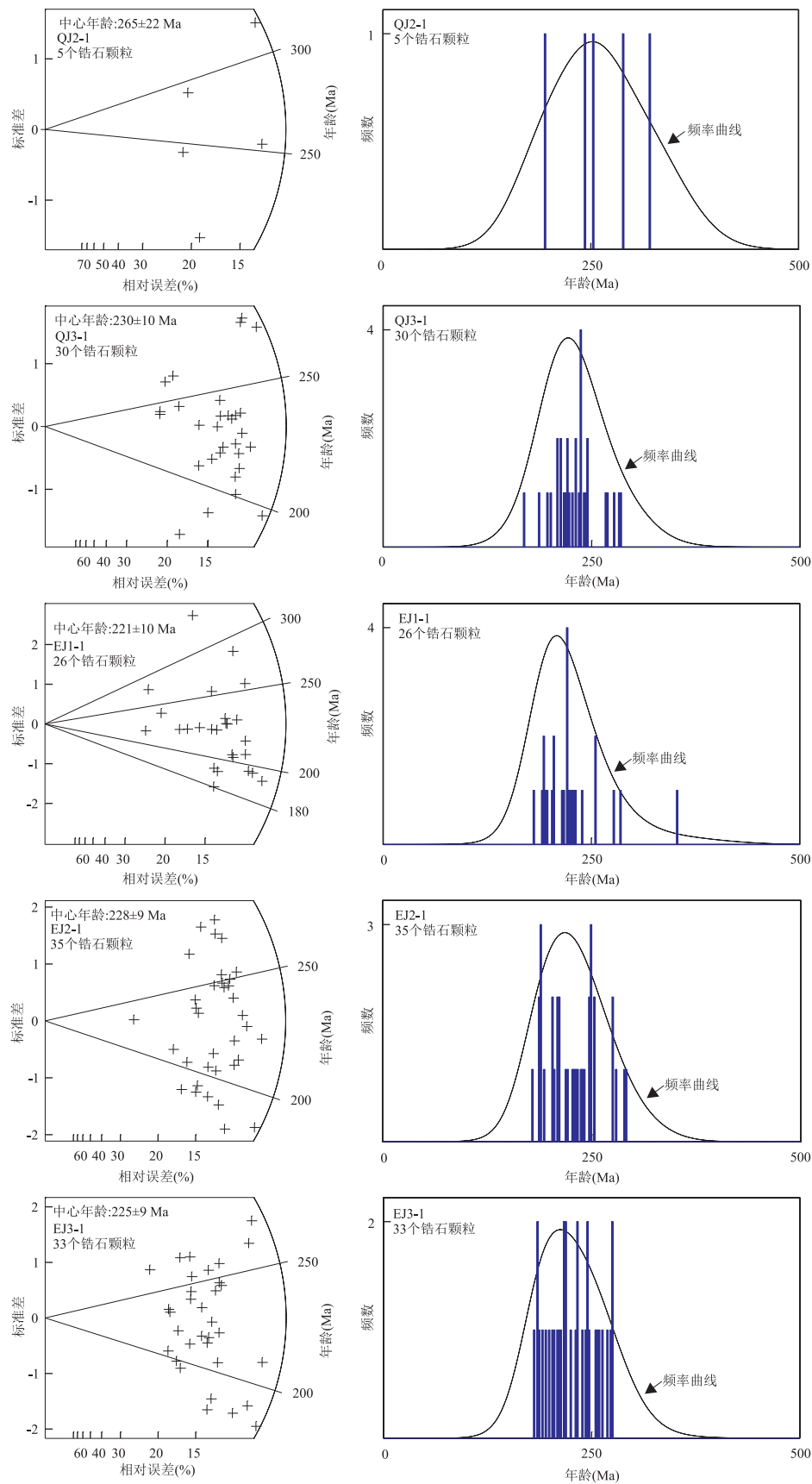


图 3 锆石样品裂变径迹单颗粒年龄雷达图、直方图及其年龄频率曲线

Fig.3 Radial plots and histograms and frequency curves of zircon single grain fission track ages

表 3 磷灰石裂变径迹分析结果

Table 3 Apatite fission track analytical results

样品编号	磷灰石颗粒数	$\rho_s(10^5/cm^2)$ (N_s)	$\rho_i(10^5/cm^2)$ (N_i)	$\rho_d(10^5/cm^2)$ (N_d)	$P(\chi^2)(\%)$	中心年龄 t (Ma)($\pm 1\sigma$)	径迹长度 $L(\mu m)$ (N)
QJ2-2	35	1.283 (353)	2.880 (792)	14.640 (6 788)	84.7	133 $\pm$ 10	11.7 $\pm$ 2.5 (99)
QJ3-2	30	3.573 (842)	7.423 (1 749)	14.849 (6 788)	2.6	145 $\pm$ 10	11.8 $\pm$ 2.4 (111)
EJ2-2	34	3.244 (966)	7.936 (2 363)	15.163 (6 788)	0	130 $\pm$ 10	11.4 $\pm$ 2.4 (104)
EJ3-2	35	2.621 (455)	7.569 (1 314)	13.178 (6 788)	0	92 $\pm$ 9	11.5 $\pm$ 2.0 (95)

注: ρ_s 为自发径迹密度, ρ_i 为诱发径迹密度, ρ_d 为标准径迹密度, N_s 为自发径迹数, N_i 为诱发径迹数, N_d 为标准径迹数, N 为径迹长度数.

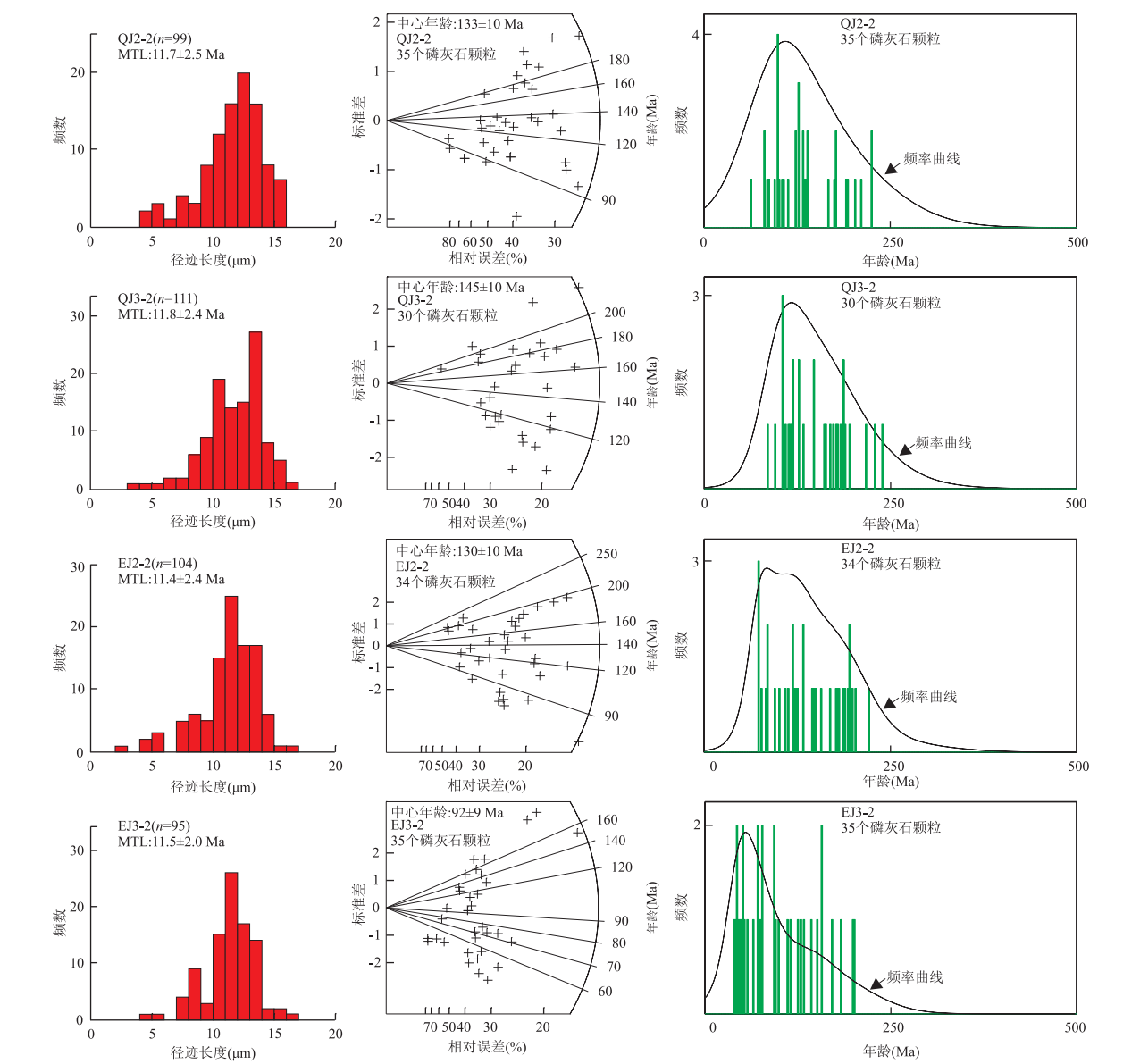


图 4 磷灰石样品裂变径迹长度直方图、单颗粒年龄雷达图、直方图及其年龄频率曲线

Fig.4 Confined track length histograms radial plots and histograms and frequency curves of apatite single grain fission track ages

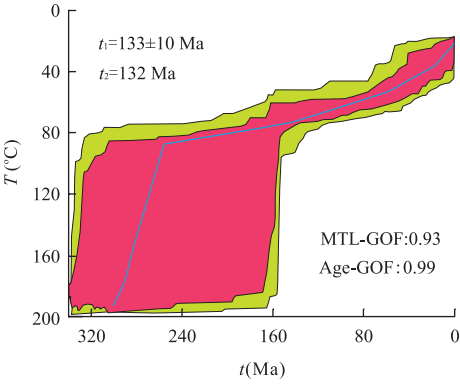


图 5 QJ2-2 样品热历史模拟结果

Fig.5 Modeling results of ecological thermal evolution history
 t_1 .实测年龄; t_2 .模拟年龄;MTL-GOF.径迹长度拟合参数;Age-GOF.年龄拟合参数

响着观测到的水平封闭径迹数量 (Donelick and Miller, 1991).

3.1.2 测试结果 谦比希铜矿床的 QJ2-1 和 QJ3-1 锆石样品及恩昌加铜(钴)矿床的 EJ1-1、EJ2-1 和 EJ3-1 锆石样品测试结果见表 2 和图 3, 裂变径迹年龄主要分布范围为 (265 ± 22) Ma (中二叠世) $\sim$ (221 ± 10) Ma (晚三叠世).

借助 Galbraith (1981) 的 $P(\chi^2)$ 统计对样品中各单颗粒年龄进行分析, 当 $P(\chi^2) > 5\%$ 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, 总体计算组合年龄. 经过 $P(\chi^2)$ 检验, QJ2-1、QJ3-1、EJ1-1、EJ2-1 和 EJ3-1 样品 $P(\chi^2) > 5\%$, 单颗粒年龄直方图 (图 3) 为较为典型的单峰式分布, 说明属于同一年龄组, 各样品裂变径迹年龄都是相应构造热事件的反映.

3.2 磷灰石裂变径迹测年

3.2.1 样品预处理及测试方法 新鲜的岩石样品首先经过粉碎和自然晾干. 随后, 利用电磁选、重液选和介电选等方法, 对磷灰石矿物进行单矿物提纯, 分离出磷灰石单矿物. 接着用环氧树脂将磷灰石颗粒固定并制作成光薄片, 进行研磨抛光. 磷灰石在恒温 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 的 6.6% HNO_3 溶液中蚀刻 30 s 揭示其自发径迹, 通过 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 ($< 4 \times 10^{-9}$) 作为外探测器盖在光薄片上, 让其紧密接触颗粒内表面, 与 CN2 标准铀玻璃一并放入反应堆中接受热中子照射. 在反应堆辐照后, 使用 40% HF 在 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 下蚀刻白云母外探测器 20 min , 揭示其诱发裂变径迹, 并应用相同方法观测统计其诱发裂变径迹密度. 在识别裂变径迹时同样应特别注意, 选择平行 c 轴的柱

面测定其自发径迹密度和诱发径迹密度以及水平封闭径迹长度 (Gleadow *et al.*, 1986), 根据 Green (1986) 开发的测定程序进行测定. 采用 Zeta 常数校准法 (Hurford and Green, 1982) 和标准裂变径迹年龄方程计算裂变径迹年龄值.

3.2.2 测试结果 谦比希铜矿床的 QJ2-2 和 QJ3-2 磷灰石样品及恩昌加铜(钴)矿床的 EJ2-2 和 EJ3-2 磷灰石样品测试结果见表 3 和图 4, 磷灰石裂变径迹年龄主要分布范围为 (145 ± 10) Ma (晚侏罗世) $\sim$ (92 ± 9) Ma (晚白垩世).

借助 Galbraith (1981) 的 $P(\chi^2)$ 统计对样品中各单颗粒年龄进行分析, 经过 $P(\chi^2)$ 检验, QJ2-2 样品 $P(\chi^2) > 5\%$, 单颗粒年龄直方图为典型的单峰式分布, 说明属于同一年龄组, 样品裂变径迹年龄是相应构造热事件的反映. 利用 HeFTy 软件对 QJ2-2 样品进行热历史模拟 (图 5), 获得了最佳的热历史路径 (图 5 中蓝色实线), 中间红色区域代表反演模拟的较好拟合区, 边缘绿色区域代表可接受区. 从图 5 中可以看出研究区构造演化较为简单, 从 300 Ma 到 260 Ma , 古地温持续降低至 $90\text{ }^\circ\text{C}$ 左右. 随后, 缓慢降低至现今的地表温度. QJ3-2、EJ2-2 和 EJ3-2 样品 $P(\chi^2) < 5\%$, 则表示各单颗粒年龄分布范围较宽, 可能有多个整体, 成因复杂.

4 讨论

国内外对 (碎屑) 锆石 U-Pb 测年方法研究较多 (Armstrong *et al.*, 1999; Torrealday *et al.*, 2000; 王键等, 2016; 孔令耀等, 2017), 但卢弗里安弧构造带地区未进行过裂变径迹的相关分析. 本文通过对谦比希铜矿床和恩昌加铜(钴)矿床中 5 件锆石和 4 件磷灰石样品分析, 笔者首次获得了该地区的裂变径迹年龄 (图 6) 分别为 (265 ± 22) Ma (中二叠世) $\sim$ (221 ± 10) Ma (晚三叠世) 和 (145 ± 10) Ma (晚侏罗世) $\sim$ (92 ± 9) Ma (晚白垩世), 但是该时期的构造活动对于铜—钴成矿带的影响尚不清楚.

在中南部非洲地区, 笔者查阅到与本次测试数据同期的大量年代学资料. 在马拉维南部奇尔瓦碱性火成岩省 (Chilwa Alkaline Province) 地区的侵入岩中, Eby *et al.* (1995) 利用锆石和磷灰石裂变径迹方法获得介于 $(137.4 \pm 24.9) \sim (98.0 \pm 13.1)$ Ma 的年龄, 同时利用磷灰石裂变径迹方法获得 $(94.0 \pm 14.8) \sim (82.9 \pm 8.0)$ Ma 的年龄 (图 6). Goscombe *et al.* (2000) 利用磷灰石裂变径迹方法获得 4 个样

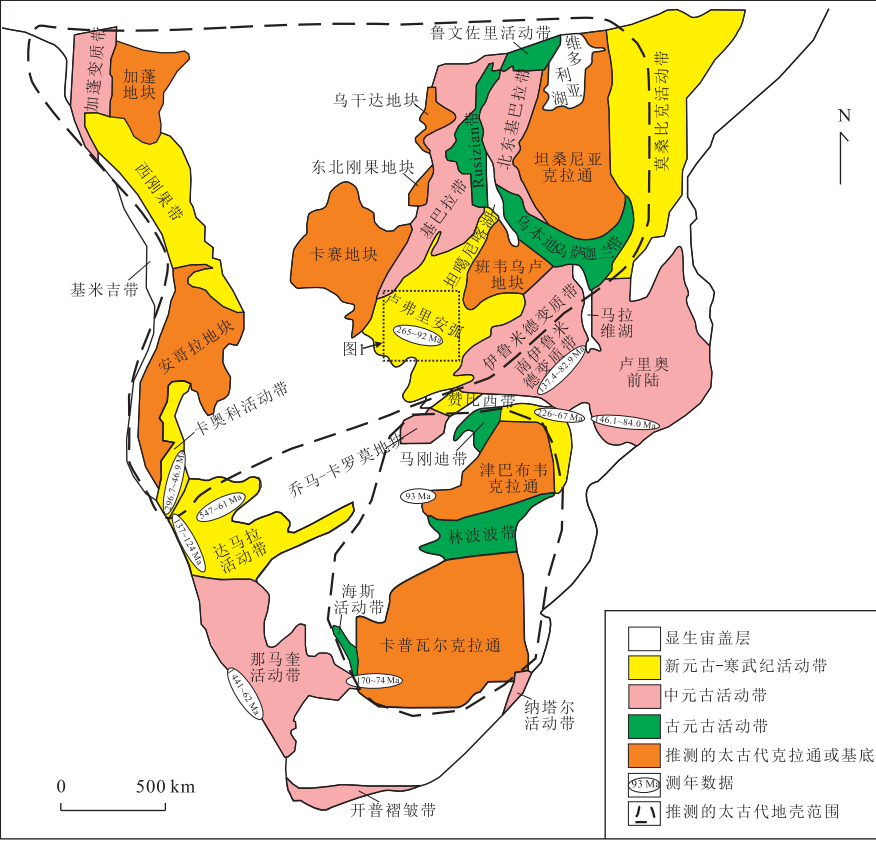


图 6 中南部非洲前寒武纪地质构造简图

Fig.6 Precambrian tectonic sketch map in central-southern Africa

据 Haest and Muchez(2011)修改

品的年龄介于 $(226 \pm 31) \sim (67 \pm 24)$ Ma(图 6),该组年龄类似于赞比西带 Chewore Inliers 地区利用磷灰石裂变径迹方法获得 141 ± 43 Ma 的年龄.Fernandes *et al.* (2015)利用磷灰石裂变径迹方法获得莫桑比克太特省卡鲁 Moatize-Minjova 盆地 4 个样品的年龄介于 $(146.1 \pm 11.2) \sim (84.0 \pm 7.8)$ Ma(图 6).津巴布韦克拉通西部著名的奥拉帕金伯利岩约在 93 Ma 侵入到侏罗纪玄武岩中(Gernon *et al.*, 2009;图 6).Smith *et al.* (1994)利用 Rb-Sr(云母)和 U-Pb(钙钛矿)方法获得卡普瓦尔克拉通西南部南非境内许多金伯利岩的年龄介于 170~74 Ma(图 6).Raab *et al.* (2002) 利用磷灰石裂变径迹方法获得纳米比亚达马拉构造带中 66 个样品年龄数据介于 $(547 \pm 95) \sim (61 \pm 5)$ Ma (图 6).Luft *et al.* (2005) 利用磷灰石裂变径迹方法获得纳米比亚卡奥构造带和沃尔维斯(Walvis)盆地中 9 个样品年龄数据介于 $(296.7 \pm 26.1) \sim (46.9 \pm 3.8)$ Ma(图 6).在早白垩世 132 ± 1 Ma 时期,Paraná-Etendeka 溢流玄武岩缓慢喷发前或同时期伴随有大陆裂谷的形成(Renne *et al.*, 1992; Milner *et al.*, 1995; Stewart

et al., 1996). 约有 20 个早白垩世碱性侵入体 ($137 \sim 124$ Ma) 沿着中生代半地堑构造出露,并形成达马拉火成岩省(Watkins *et al.*, 1994; Milner *et al.*, 1995). Phillips and Harris (2009) 利用 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 方法获得纳米比亚碎屑钻石中 50 个榴辉岩和橄榄岩单斜辉石包体年龄介于 $1441 \pm 700 \sim 62 \pm 30$ Ma,80%的包体年龄小于 300 Ma,说明其原岩形成于后德维卡(Dwyka)时期(图 6).在南非和肯尼亚,类似的磷灰石裂变径迹方法研究主要用来记录冷却事件,并且与大陆尺度的裂谷开启、闭合及缝合带有关的构造再活化有关,其再活化年龄多集中在 140~120 Ma 范围内(Foster and Gleadow, 1992).

通过以上资料分析,在非洲中南部地区二叠纪—白垩纪的构造活动是一个大范围的构造活动事件,卢弗里安弧构造带中二叠世—晚三叠世的构造活动可能预示了侏罗纪冈瓦纳古陆块的解体事件(Veevers, 2004; 陈廷愚, 2005),并且在非洲南部地区晚白垩世形成的含金刚石的金伯利岩也可能与该时期的构造活动有关.

5 结论

(1)首次获得卢弗里安弧构造带中锆石和磷灰石的裂变径迹年龄分别介于(265 ± 22) Ma(中二叠世)~(221 ± 10) Ma(晚三叠世)和(145 ± 10) Ma(晚侏罗世)~(92 ± 9) Ma(晚白垩世)。

(2)对比卢弗里安弧构造带、赞比亚构造带和达马拉构造带中的年龄数据,认为非洲中南部地区二叠纪—白垩纪的构造活动是一个区域性的构造活动事件,并且可能预示了侏罗纪冈瓦纳古陆块的解体事件。

致谢:野外考察得到了赞比亚矿山安全局高级督查 Khunga Yotam 先生等和孔科拉铜矿安全部经理 Felix Sikaonga 先生等的大力支持。锆石和磷灰石挑选由河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成,岩矿鉴定由中国地质调查局天津地质调查中心实验测试室完成,裂变径迹测年由北京泽康恩科技有限公司完成,成文过程中得到南非大学环境科学系赵宝金教授及中国地质大学(北京)袁万明教授的帮助,在此表示真诚的感谢。

References

- Armstrong, R. A., Robb, L. J., Masters, S., et al., 1999. New U-Pb Age Constraints on the Katangan Sequence, Central African Copperbelt. *Journal of African Earth Sciences*, 28(4): 6—7.
- Batumike, M. J., Kampunzu, A. B., Cailteux, J. H., 2006. Petrology and Geochemistry of the Neoproterozoic Nguba and Kundelungu Groups, Katangan Supergroup, Southeast Congo: Implications for Provenance, Paleoweathering and Geotectonic Setting. *Journal of African Earth Sciences*, 44(1): 97—115. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2005.11.007>
- Cailteux, J. L. H., Kampunzu, A. B., Lerouge, C., 2007. The Neoproterozoic Mwashya-Kansuki Sedimentary Rock Succession in the Central African Copperbelt, Its Cu-Co Mineralization, and Regional Correlations. *Gondwana Research*, 11(3): 414—431. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2006.04.016>
- Chartrand, F. M., Brown, A. C., 1984. Preliminary Comparison of Diagenetic Stratiform Copper Mineralization from Redstone, NW Territories, Canada, and Kamoto, Shaban Copperbelt, Zaire. *Journal of the Geological Society*, 141(2): 291—297. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.141.2.0291>
- Chen, T. Y., 2005. The Expansion of the Rotating Earth and the Breakup of Gondwanaland. *Acta Geoscientica Sinica*, 26(3): 195—202 (in Chinese with English abstract).
- Donelick, R. A., Miller, D. S., 1991. Enhanced Tint Fission Track Densities in Low Spontaneous Track Density Apatites Using ^{252}Cf -Derived Fission Fragment Tracks: A Model and Experimental Observations. *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation, Part D, Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, 18(3): 301—307. [https://doi.org/10.1016/1359-0189\(91\)90022-a](https://doi.org/10.1016/1359-0189(91)90022-a)
- Eby, G. N., Roden-Tice, M., Krueger, H. L., et al., 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. [https://doi.org/10.1016/0899-5362\(95\)00054-w](https://doi.org/10.1016/0899-5362(95)00054-w)
- Eglinger, A., Vanderhaeghe, O., André-Mayer, A. S., et al., 2016. Tectono-Metamorphic Evolution of the Internal Zone of the Pan-African Lufilian Orogenic Belt (Zambia): Implications for Crustal Reworking and Syn-Orogenic Uranium Mineralizations. *Lithos*, 240—243: 167—188. <https://doi.org/10.13039/501100004794>
- Fernandes, P., Cogné, N., Chew, D. M., et al., 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. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.09.009>
- Foster, D. A., Gleadow, A. J. W., 1992. The Morphotectonic Evolution of Rift-Margin Mountains in Central Kenya: Constraints from Apatite Fission-Track Thermochronology. *Earth and Planetary Science Letters*, 113(1—2): 157—171. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(92\)90217-j](https://doi.org/10.1016/0012-821x(92)90217-j)
- Galbraith, R. F., 1981. On Statistical Models for Fission Track Counts: Reply. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 13(6): 485—488. <https://doi.org/10.1007/bf01034500>
- Gernon, T. M., Fontana, G., Field, M., et al., 2009. Pyroclastic Flow Deposits from a Kimberlite Eruption: The Orapa South Crater, Botswana. *Lithos*, 112: 566—578. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.04.016>
- Gleadow, A. J. W., Duddy, I. R., Green, P. F., et al., 1986. Confined Fission Track Lengths in Apatite: A Diagnostic Tool for Thermal History Analysis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 94(4): 405—415. <https://doi.org/10.1007/bf00376334>
- 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.

- [https://doi.org/10.1016/s0899-5362\(00\)00041-5](https://doi.org/10.1016/s0899-5362(00)00041-5)
- Green, P. F., 1986. On the Thermo-Tectonic Evolution of Northern England; Evidence from Fission Track Analysis. *Geological Magazine*, 123 (5): 493 — 506. <https://doi.org/10.1017/s0016756800035081>
- 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.
- Hurford, A. J., Green, P. F., 1982. A Users' Guide to Fission Track Dating Calibration. *Earth and Planetary Science Letters*, 59 (2): 343 — 354. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(82\)90136-4](https://doi.org/10.1016/0012-821x(82)90136-4)
- Kampanzu, A. B., Cailteux, J. L. H., Moine, B., et al., 2005. Geochemical Characterisation, Provenance, Source and Depositional Environment of “Roches Argilo-Talqueuses” (RAT) and Mines Subgroups Sedimentary Rocks in the Neoproterozoic Katangan Belt (Congo): Lithostratigraphic Implications. *Journal of African Earth Sciences*, 42(1—5): 119—133. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2005.08.003>
- Key, R. M., Liyungu, A. K., Njamu, F. M., et al., 2001. The Western Arm of the Lufilian Arc in NW Zambia and Its Potential for Copper Mineralization. *Journal of African Earth Sciences*, 33(3—4): 503—528. [https://doi.org/10.1016/s0899-5362\(01\)00098-7](https://doi.org/10.1016/s0899-5362(01)00098-7)
- Kong, L. Y., Mao, X. W., Chen, C., et al., 2017. Chronological Study on Detrital Zircons and Its Geological Significance from Mesoproterozoic Dagushi Group in the Dahongshan Area, North Margin of the Yangtze Block. *Earth Science*, 42 (4): 485—501 (in Chinese with English abstract).
- Luft, F. F., Luft Jr., J. L., Chemale Jr., F., et al., 2005. Post-Gondwana Break-up Record Constraints from Apatite Fission Track Thermochronology in NW Namibia. *Radiation Measurements*, 39 (6): 675—679. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2004.08.010>
- Milesi, J. P., Toteu, S. F., Deschamps, Y., et al., 2006. An Overview of the Geology and Major Ore Deposits of Central Africa: Explanatory Note for the 1:4 000 000 Map “Geology and Major Ore Deposits of Central Africa”. *Journal of African Earth Sciences*, 44 (4—5): 571—595. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2005.10.016>
- Milner, S. C., Le Roex, A. P., O'Connor, J. M., 1995. Age of Mesozoic Igneous Rocks in Northwestern Namibia, and Their Relationship to Continental Breakup. *Journal of the Geological Society*, 152 (1): 97—104. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.152.1.0097>
- Muchez, P., Brems, D., Clara, E., et al., 2010. Evolution of Cu-Co Mineralizing Fluids at Nkana Mine, Central African Copperbelt, Zambia. *Journal of African Earth Sciences*, 58 (3): 457—474. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2010.05.003>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.05.003>
- Raab, M. J., Brown, R. W., Gallagher, K., et al., 2002. Late Cretaceous Reactivation of Major Crustal Shear Zones in Northern Namibia: Constraints from Apatite Fission Track Analysis. *Tectonophysics*, 349 (1—4): 75—92. [https://doi.org/10.1016/s0040-1951\(02\)00047-1](https://doi.org/10.1016/s0040-1951(02)00047-1)
- Rinaud, C., Master, S., Armstrong, R. A., et al., 2005. Monazite U-Pb Dating and $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ Thermochronology of Metamorphic Events in the Central African Copperbelt during the Pan-African Lufilian Orogeny. *Journal of African Earth Sciences*, 42(1—5): 183—199. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2005.08.007>
- Ren, J. P., Wang, J., Liu, X. Y., et al., 2013. Research Progresses on the Cu-Co Deposits of Lufilian Area in the Mid-Southern Africa. *Geological Science and Technology Information*, 32(5): 135—145 (in Chinese with English abstract).
- Ren, J. P., Wang, J., Zuo, L. B., et al., 2017. 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. <https://doi.org/10.13039/501100004613>
- Renne, P. R., Ernesto, M., Pacca, I. G., et al., 1992. The Age of Parana Flood Volcanism, Rifting of Gondwanaland, and the Jurassic-Cretaceous Boundary. *Science*, 258 (5084): 975—979. <https://doi.org/10.1126/science.258.5084.975>
- Selley, D., Broughton, D., Scott, R., et al., 2005. A New Look at the Geology of the Zambia Copperbelt. *Society of Economic Geologists*, 100: 965—1000.
- Smith, C. B., Clark, T. C., Barton, E. S., et al., 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. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)90010-8](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)90010-8)
- Stewart, K., Turner, S., Kelley, S., et al., 1996. $^{3-40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ Geochronology in the Paraná Continental Flood Basalt Province. *Earth and Planetary Science Letters*, 143(1—4): 95—109. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(96\)00132-x](https://doi.org/10.1016/0012-821x(96)00132-x)
- Torrealdy, H. I., Hitzman, M. W., Stein, H. J., et al., 2000. Re-Os and U-Pb Dating of the Vein-Hosted Mineralization at the Kansanshi Copper Deposit, Northern Zambia. *Economic Geology*, 95 (5): 1165—1170. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.95.5.1165>

- Veevers, J. J., 2004. Gondwanaland from 650—500 Ma Assembly through 320 Ma Merger in Pangea to 185—100 Ma Break-up: Supercontinental Tectonics via Stratigraphy and Radiometric Dating. *Earth-Science Reviews*, 68(1—2): 1—132. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2004.05.002>
- Wang, J., Sun, F. Y., Li, B. L., et al., 2016. Age, Petrogenesis and Tectonic Implications of Permian Hornblendite in Tugurige, Urad Zhongqi, Inner Mongolia. *Earth Science*, 41(5): 792—808 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.067>
- Watkins, R. T., McDougall, I., Le Roex, A. P., 1994. K-Ar Ages of the Brandberg and Okenyenya Igneous Complexes, North-Western Namibia. *Geologische Rundschau*, 83(2): 348—356. <https://doi.org/10.1007/bf00210550>
- Yamada, R., Tagami, T., Nishimura, S., et al., 1995. Annealing Kinetics of Fission Tracks in Zircon: An Experimental Study. *Chemical Geology*, 122(1—4): 249—258. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(95\)00006-8](https://doi.org/10.1016/0009-2541(95)00006-8)
- Yuan, W. M., Bao, Z. K., Dong, J. Q., et al., 2007. Fission Track Thermochronology Application to Mineralization Ages of Hydrothermal Deposits in Kelang Basin, Northern Xinjiang, China. *World Sci-Tech R & D*, 29(2): 8—14 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, D. H., Xiao, B., Zhang, C., 2013. Geological Features and Exploration Prospects of the Sediment-Hosted Stratiform Copper-Cobalt Deposits in Zambia. *Geology and Exploration*, 49(3): 577—588 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, W. J., Yuan, W. M., Liu, H. T., et al., 2013. Apatite Fission Track Analysis on the Tectonic Activities and Palaeotopography in Southern Altai Region, Xinjiang, China. *Atomic Energy Science and Technology*, 47(8): 1458—1467 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Y. H., Jiang, S. Q., 2010. Situation of Copper-Cobalt Mine Development in Congo (DRC). *Geology and Exploration*, 46(3): 525—530 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈廷愚, 2005. 地球旋转膨胀与冈瓦纳古陆裂解. *地球学报*, 26(3): 195—202.
- 孔令耀, 毛新武, 陈超, 等, 2017. 扬子北缘大洪山地区中元古代打鼓石群碎屑锆石年代学及其地质意义. *地球科学*, 42(4): 485—501.
- 任军平, 王杰, 刘晓阳, 等, 2013. 非洲中南部卢弗里安弧 Cu-Co 矿床研究进展. *地质科技情报*, 32(5): 135—145.
- 王键, 孙丰月, 李碧乐, 等, 2016. 内蒙乌拉特中旗图古日格二叠纪角闪岩年龄、岩石成因及构造背景. *地球科学*, 41(5): 792—808. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.067>
- 袁万明, 保增宽, 董金泉, 等, 2007. 新疆阿尔泰克朗盆地热液成矿时代的裂变径迹分析. *世界科技研究与发展*, 29(2): 8—14.
- 张东红, 肖波, 张璨, 2013. 赞比亚沉积型铜(钴)矿地质及未来矿业展望. *地质与勘探*, 49(3): 577—588.
- 赵文菊, 袁万明, 刘海涛, 等, 2013. 从裂变径迹分析新疆阿尔泰南部地区构造活动与古地形的变化. *原子能科学技术*, 47(8): 1458—1467.
- 周应华, 江少卿, 2010. 刚果(金)铜钴矿业开发形势. *地质与勘探*, 46(3): 525—530.