

DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.06007

任军平,古阿雷,王杰,孙宏伟,左立波,孙凯,许康康,Chipilauka Mukofu, Evaristo Kasumba, DANIEL Malunga, 杜明龙,邢仕,刘子江,张津瑞,董津蒙,2022. 赞比亚班韦乌卢变质克拉通东北部姆巴拉组碎屑锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征. 沉积与特提斯地质,42(4):585-597. DOI: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.06007.

REN J P, GU A L, WANG J, SUN H W, ZUO L B, SUN K, XU K K, Chipilauka Mukofu, Evaristo Kasumba, DANIEL Malunga, DU M L, XING S, LIU Z J, ZHANG J R, DONG J M, 2022. Detrital zircon U-Pb ages and Hf isotopic characteristics of the Mbala Formation in the northeast Bangweulu Metacraton, Zambia. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 42(4):585-597. DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.06007.

赞比亚班韦乌卢变质克拉通东北部姆巴拉组 碎屑锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征

任军平¹, 古阿雷¹, 王杰¹, 孙宏伟¹, 左立波¹, 孙凯¹, 许康康¹,
CHIPILAUKA Mukofu², EVARISTO Kasumba², DANIEL Malunga²,
杜明龙³, 邢仕³, 刘子江³, 张津瑞¹, 董津蒙¹

(1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170; 2. 赞比亚地质调查局, 赞比亚 卢萨卡 P. O. Box 50135; 3. 河北省地矿局第五地质大队, 河北 唐山 063000)

摘要:班韦乌卢变质克拉通活动时间和地壳增长问题一直是地质学家关注的焦点。本文通过对班韦乌卢地块中卡帕图地区姆巴罗科索群姆巴拉组石英砂岩进行了碎屑锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素研究,结合变质克拉通已有成果获得认识如下:(1)姆巴拉组的形成时间可能介于(1833 ± 22 Ma) ~ (1712 ± 22 Ma)之间,属于古元古代。(2)姆巴拉组具有丰富的物质来源,其中 2728 ~ 2602 Ma(峰值为 2650 Ma)的物质可能来源于坦桑尼亚克拉通中的花岗岩类、粗面安山岩及流纹岩等岩石。2246 ~ 1833 Ma(峰值为 1880 Ma)的物质主要来源于班韦乌卢地块中花岗岩类、石英闪长岩及火山岩类等岩石。(3)班韦乌卢变质克拉通的活动时间包括中太古代、新太古代、古元古代和中元古代四个时期,其中古元古代(1870 Ma)为活动的高峰期,涉及范围广泛,可能与哥伦比亚超大陆的演化密切相关。(4)班韦乌卢变质克拉通沉积岩的源区地壳增生除来自古老地壳的再循环物质外,还存在新生地壳的物质。同时,地壳在古太古代—古元古代均实现了增长,其中凯诺兰超大陆聚合时期(2550 Ma)增长最快。在古元古代之前的地壳主增长期与坦桑尼亚克拉通及全球大陆地壳主增长期基本一致。

关键词:班韦乌卢变质克拉通;伊鲁米德构造带;卢弗里安构造带;碎屑锆石;古元古代;赞比亚

中图分类号:P597.3;P588.3

文献标识码:A

Detrital zircon U-Pb ages and Hf isotopic characteristics of the Mbala Formation in the northeast Bangweulu Metacraton, Zambia

REN Junping¹, GU Alei¹, WANG Jie¹, SUN Hongwei¹, ZUO Libo¹, SUN Kai¹,
XU Kangkang¹, CHIPILAUKA Mukofu², EVARISTO Kasumba², DANIEL Malunga²,
DU Minglong³, XING Shi³, LIU Zijiang³, ZHANG Jinrui¹, DONG Jimeng¹

(1. Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 2. Geological Survey Department of Zambia, P. O. Box. 50135 Lusaka, Zambia; 3. No. 5 Geological Team, Bureau of Geologic Exploration and

收稿日期:2021-10-29; 改回日期:2022-02-18 责任编辑:郭秀梅 科学编辑:崔晓庄

作者简介:任军平(1980—),男,正高级工程师,主要从事地质矿产勘查与研究。E-mail:rjp2333@126.com

资助项目:国家重点研发计划课题(2021YFC2901804)、商务部技术援外项目([2015]352和[2012]558)及中国地质调查局项目(DD20221801,DD20201150和DD20190439)

Mineral Development of Hebei Province, Tangshan 063000, China)

Abstract: The activity time and crustal growth of Bangweulu Metacraton have always been the focus of geologists. This paper studied the detrital zircon U-Pb ages and Hf isotopic characteristics of quartz sandstone from the Mbala Formation in Kapatu area. Based on the previous results of Bangweulu Metacraton, the paper has obtained the following understanding: (1) The Mbala Formation might formed between (1833 ± 22 Ma) and (1712 ± 22 Ma), belonging to the Paleoproterozoic. (2) The Mbala Formation is rich in material sources, among which the material of 2728 ~ 2602 Ma (peak age is 2650 Ma) may be derived from granitoids, trachyandesite, rhyolite and other rocks in Tanzania Craton. The material of 2246 ~ 1833 Ma (peak age is 1880 Ma) is mainly derived from granitoids, quartz diorite, volcanic rocks and other rocks in the Bangweulu Block. (3) The activity time of the Bangweulu Metacraton includes Middle Archean, Neoarchean, Paleoproterozoic and Mesoproterozoic. The Paleoproterozoic (1870 Ma) was the peak of the activity, which may be closely related to the evolution of the Columbia Supercontinent. (4) In addition to the recycled materials from the ancient crust, the crust accretion in the source area of the Bangweulu Metacraton sedimentary rocks also contains new crust materials. The crust has achieved growth from Paleoproterozoic to Paleoproterozoic, with the fastest growth in Kenorland Supercontinent convergence (Neoarchean 2550 Ma). Before Paleoproterozoic, the main growth period of the Bangweulu Metacraton is basically the same as the Tanzania Craton and the global continental crust.

Key words: Bangweulu Metacraton; Irumide belt; Lufilian belt; detrital zircon; Paleoproterozoic; Zambia

克拉通是前寒武纪长期稳定的构造单元,其稳定性归就于存在一个厚大的岩石圈地幔(Black and Liégeois, 1993)。同时,克拉通可能参与大陆碰撞,并部分重新活化形成大陆残片,其进一步演化可形成流变学、地质年代学和同位素特征相似的“变质克拉通”(Abdelsalam et al., 2002)。太古宙和元古宙是大陆地壳形成的重要时期,了解该时期大陆地壳的演化史将为探究大陆地壳起源、巨量生长与稳定以及全球性板块构造作用的启动和建立等诸多重大科学问题提供有效线索(Condie, 1998; 第五春荣, 2021)。

班韦乌卢变质克拉通(Bangweulu Metacraton)的概念首次由De Waele et al. (2006a)提出,但其活动时间和地壳增长未系统阐述,他依据基底花岗片麻岩等(元古宙地壳残片)同位素和岩石地球化学成果圈定了太古宙班韦乌卢变质克拉通范围,主要包括班韦乌卢地块(Bangweulu Block)、伊鲁米德(Irumide)构造带和卢费里安(Lufilian)构造带区域,涉及赞比亚北部、坦桑尼亚西南部和刚果(金)东南部地区(图1)。

沉积岩的碎屑锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素数据能够收集较大面积不同类型岩石的信息,其中碎屑锆石 U-Pb 年龄可以推测地层的最大沉积年龄及源区岩石特征, Hf 同位素可以有效探讨克拉通的活动时间和地壳增长问题(万渝生等, 2015; Li et al.,

2013)。本文利用姆巴拉(Mbala)组中砂岩的碎屑锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素数据,结合班韦乌卢变质克拉通中 Armstrong et al. (2005)、Master et al. (2005)、De Waele et al. (2007)、任军平等(2019a)、孙宏伟等(2021)、邢仕等(2021)和杜明龙等(2021)等碎屑锆石数据,系统总结姆巴拉组的最大沉积年龄和源区岩石特征,进一步探讨班韦乌卢变质克拉通的活动时间和地壳增长问题。

1 地质背景

班韦乌卢变质克拉通主要包括班韦乌卢地块、伊鲁米德构造带和卢费里安构造带三部分(De Waele et al., 2006a)。

1.1 班韦乌卢地块

Drysdall et al. (1972)首次提出“班韦乌卢地块”的概念并做了较系统地总结, Kröner (1977)称其为赞比亚克拉通(Zambian Craton),研究的焦点是班韦乌卢地块是否存在太古宙基底。Andersen and Unrug (1984)对班韦乌卢地块的构造演化进行了较为详细的研究。Unrug (1984)对赞比亚东北部元古代姆波罗科索群(Mporokoso Group)地层及其沉积序列进行了研究,同时将阿伯康(Abercorn)砂岩定义为姆波罗科索群下卡萨马组的一部分。Andrews-Speed (1986, 1989)详细研究了班韦乌卢地块中含金地层及其基底特征(Ren et al., 2021),认

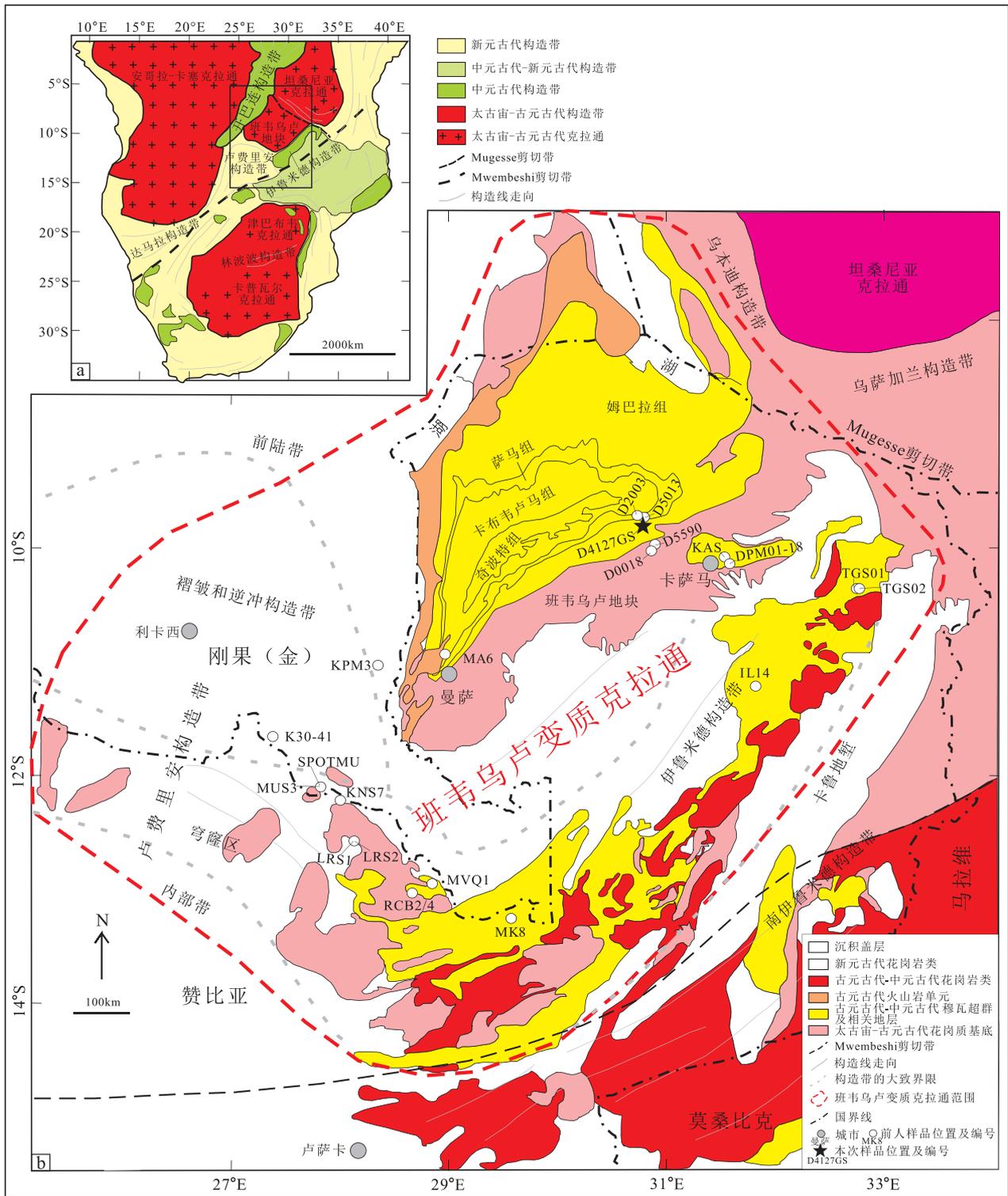


图1 南部非洲地区构造简图(a)和班韦乌卢变质克拉通地质图(b) (修改自 De Waele et al., 2006a)

Fig.1 Tectonic framework of southern Africa (a) and geological map of the Bangweulu Metacraton (b)

为基底岩石中不含金,金可能与坦桑尼亚克拉通中的绿岩带有关;NW-SE向展布的乌本迪构造带将班韦乌卢地块从太古宙坦桑尼亚克拉通中分离出来(2.93~2.53 Ga;Pinna et al., 1999),其碰撞造山的

时间为2.00~1.85 Ga(Lenoir et al., 1994;Boven et al., 1999)。De Waele et al. (2006a)认为班韦乌卢地块是从中非的刚果克拉通(Congo Craton)演化而来,并且与乌本迪构造带的演化密切相关。任军平

等(2018a)对卡萨马—陇都地区碎屑锆石裂变径迹年代学特征进行了研究。

在班韦乌卢地块中,基底包括片岩、片麻岩、酸性变质火山岩和花岗岩类,年龄特征见表1。其中,泥质片岩带出露于地块西部,与Mulungwizi片麻岩岩体的走向类似(Schandelmeier, 1981)。沉积盖层穆瓦超群(Muva Supergroup)不整合覆盖于基底之上,包括姆波罗科索群、卡萨马群/米托巴(Mitoba)河群、曼甘加(Manganga)河群和曼希亚(Manshya)河群(任军平等, 2016)。其中,Andersen and Unrug (1984)认为姆波罗科索群地层的沉积总厚度超过5 km,其从下至上依次包括姆巴拉(Mbala)组、萨马(Nsama)组、卡布韦卢马(Kabweluma)组和奇波特(Chibote)组。南非地球科学委员会(2009)编制的1:250万南部非洲发展共同体(SADC)国家地质图中,将班韦乌卢地块的基底划为新太古代,盖层划为古元古代。

1.2 伊鲁米德构造带

Ackermann(1950)首次提出并描述“伊鲁米德

构造带”,认为其属于一个古元古代地体,分布于赞比亚中东部地区,北东端可达乌本迪构造带,南西端可达乔马—卡洛莫(Choma-Kalomo)地块。该构造带的地质填图工作开始于上世纪60年代。

在伊鲁米德构造带中,基底包括片麻岩和花岗岩类,年龄特征见表2。姆库希(Mkushi)片麻岩杂岩体位于该带西南部,包括条带状黑云母片麻岩,眼球状片麻岩和斑状花岗质片麻岩,形成时代属于古元古代(Rainaud et al., 2005; De Waele et al., 2006b)。侵入姆库希片麻岩杂岩体和通过地质填图发现的花岗岩类锆石SHRIMP U-Pb年龄分别为1.65 Ga和1.05~1.02 Ga(De Waele et al., 2003b)。沉积盖层主要是穆瓦超群中的曼希亚河群,其与区域上的卢费里安、赞比西和莫桑比克等构造带中的沉积岩相比,曼希亚河群顶部缺乏碳酸盐岩的分布(Daly and Unrug, 1982),表明伊鲁米德构造带一直处于构造演化过程中,从未处于相对稳定的沉积阶段。另外,在前陆区域和构造带中部均显示出地壳缩短的特点(Daly et al., 1984; Mapani, 1992)。

表1 班韦乌卢地块岩浆岩年龄统计

Table 1 Summary of isotopic ages for the Bangweulu Block

样品编号	岩性	测试方法	年龄	数据来源
D8015	似斑状正长花岗岩	LA-MC-ICP MS 锆石 U-Pb	1959 ± 16 Ma	古阿雷等, 2021
D6095	似斑状正长花岗岩	LA-MC-ICP MS 锆石 U-Pb	2012 ± 11 Ma	
D8217	黑云母二长花岗岩	LA-MC-ICP MS 锆石 U-Pb	1970 ± 20 Ma	
D6367-2	黑云母花岗闪长岩	LA-MC-ICP MS 锆石 U-Pb	1991 ± 12 Ma	
D3016	黑云母花岗岩	LA-MC-ICP MS 锆石 U-Pb	1965 ± 8 Ma	
D6099	二长花岗岩	LA-MC-ICP MS 锆石 U-Pb	1934 ± 27 Ma	左立波等, 2020
D6106	正长花岗岩	LA-MC-ICP MS 锆石 U-Pb	1974 ± 9 Ma	
D1246	正长花岗岩	LA-MC-ICP MS 锆石 U-Pb	2011 ± 20 Ma	
DPM04-10	石英闪长岩	LA-MC-ICP MS 锆石 U-Pb	1964 ± 8 Ma	任军平等, 2019c
D4073	石英闪长岩	LA-MC-ICP MS 锆石 U-Pb	1913 ± 10 Ma	
MA1	花岗岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	1860 ± 13 Ma	De Waele and Fitzsimons, 2007
MA2	花岗岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	1862 ± 8 Ma	
MA3	火山岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	1868 ± 7 Ma	
MA5	火山岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	1862 ± 19 Ma	
MA9	花岗岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	1866 ± 9 Ma	
—	花岗岩	全岩 Rb-Sr	1838 ± 86 Ma	
—	花岗闪长岩	全岩 Rb-Sr	1869 ± 40 Ma	Andersen and Unrug, 1984
—	Luchewe 花岗岩	全岩 Rb-Sr	1824 ± 124 Ma	
—	火山岩类	全岩 Rb-Sr	1816 ± 22 Ma	
—	花岗岩类	全岩 Rb-Sr	1833 ± 18 Ma	

注:“—”代表未查找到样品编号。

表 2 伊鲁米德构造带岩浆岩年龄统计

Table 2 Summary of isotopic ages for the Irumide Belt

样品编号	岩性	测试方法	年龄	数据来源
MJ10	二长片麻岩	LA-MC-ICP MS 锆石 U-Pb	1949 ± 18 Ma	左立波等, 2021
MJ11	斜长片麻岩	LA-MC-ICP MS 锆石 U-Pb	1989 ± 13 Ma	
MJ12	钾长片麻岩	LA-MC-ICP MS 锆石 U-Pb	2025 ± 15 Ma	
MJ13	斜长片麻岩	LA-MC-ICP MS 锆石 U-Pb	1961 ± 7 Ma	
MK3	片麻岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	2047 ± 14 Ma	De Waele et al., 2009
MK5	片麻岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	2038 ± 14 Ma	
CC10	片麻岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	1952 ± 6 Ma	
KN1	片麻岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	2041 ± 10 Ma	
ISK2	花岗片麻岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	1927 ± 10 Ma	
ISK1	花岗片麻岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	1942 ± 6 Ma	
MGn	片麻岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	2049 ± 6 Ma	Rainaud et al., 2005

1.3 卢弗里安构造带

Garlick 首次提出“卢弗里安构造带”(任军平等, 2013), 其形成于罗迪尼亚超大陆裂解, 以及新元古代晚期至显生宙早期的碰撞、变形和变质作用时期。De Swardt et al. (1965) 对卢弗里安构造带的研究实施了开拓性工作, 后期许多地质工作者也开展了大量的研究工作(Cosi et al., 1992; Cailteux et al., 2005; Mc Gowan et al., 2006; Kampunzu et al., 2009; Muchez et al., 2010; Ren et al., 2017, 2020; 任军平等, 2013, 2017a, 2017b, 2018b, 2021a; 许康康

等, 2021)。

在卢弗里安构造带中, 基底主要包括古元古代的片岩、片麻岩和花岗岩类, 年龄特征见表 3。除少量来源于新太古代的花岗片麻岩信息外(SHRIMP 锆石 U-Pb 为 2738 ± 24 Ma; De Waele et al., 2009), 其他各类岩石年龄主要介于(2058 ± 7 Ma) ~ (1853 ± 58 Ma) 之间(Key et al., 2001; Ren et al., 2017)。从目前数据看, 恩昌加(Nchanga)花岗岩是基底中最年轻的侵入岩(SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 883 ± 10 Ma; Armstrong et al., 2005), 其以不整合形式被

表 3 卢弗里安构造带中岩浆岩年龄统计

Table 3 Summary of isotopic ages for the Lufilian Belt

样品编号	岩性	测试方法	年龄	数据来源
TWPd174	花岗岩	LA-MC-ICP MS 锆石 U-Pb	2009 ± 10 Ma	刘晓阳等, 2017
TWZK17-7-01	花岗岩	LA-MC-ICP MS 锆石 U-Pb	1983 ± 10 Ma	
kj001	碳酸盐蚀变岩	LA-MC-ICP MS 锆石 U-Pb	1966 ± 12 Ma	Ren et al., 2017
kj002	黑云母绿泥石片岩	LA-MC-ICP MS 锆石 U-Pb	1853 ± 58 Ma	
KMP1	花岗片麻岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	2738 ± 24 Ma	De Waele et al., 2009
LUFMUF	片岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	1968 ± 6 Ma	Rainaud et al., 2005
KNS1	变质粗面安山岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	1874 ± 8 Ma	
BN53/1	变质粗面安山岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	1980 ± 7 Ma	
CT169/1256	变质火山片麻岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	1964 ± 12 Ma	
MPG	花岗岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	1994 ± 7 Ma	
NN75/1	花岗岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	1983 ± 5 Ma	
Z220-1	片麻岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	1874 ± 9 Ma	John et al., 2004
Z241-1	片麻岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	1884 ± 10 Ma	
E7	片岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	1873 ± 8 Ma	De Waele et al., 2006a
D4	花岗岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	1934 ± 6 Ma	Key et al., 2001
			1940 ± 3 Ma	
3DA150	斑状花岗岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	2058 ± 7 Ma	

新元古代加丹加(Katanga)超群覆盖(Cailteux et al., 1994)。沉积盖层主要为加丹加超群, Cailteux and De Putter(2019)在基于前人对该带地层大量研究的基础上(Kampunzu and Cailteux, 1999; Key et al., 2001; Wendorff, 2005; Master et al., 2005; Cailteux et al., 2005, 2007),对加丹加超群的地层层序重新进行了梳理,将其中的罗安群从下至上分为穆索诺伊亚群(R1)、矿比亚群(R2)、丰谷鲁梅亚群(R3)和穆瓦夏亚群(R4);恩古巴群从下至上分为姆瓦尔(Mwale)“大砾石层”(Ng-1)、蒙贝(Muombe)亚群(Ng-2)和本凯亚(Bunkeya)亚群(Ng-3);昆德隆古群由下至上分为金达姆(Kyandamu)“小砾石层”(Ku-1)、贡贝拉(Gombela)亚群(Ku-2)和恩格尔(Ngule)亚群(Ku-3)。

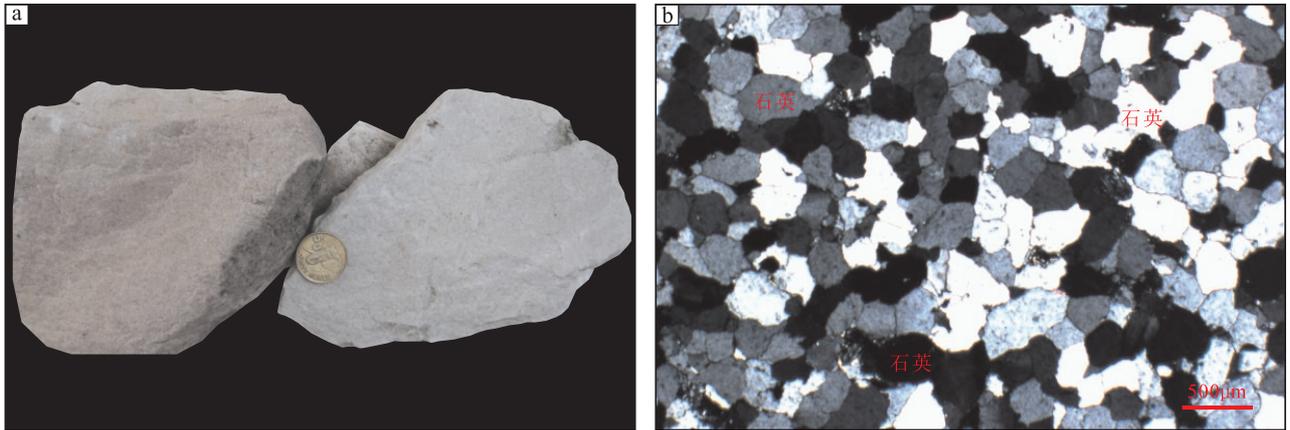


图2 石英砂岩(D4127GS)的手标本(a)和显微特征(b)

Fig. 2 Hand specimens (a) and micrograph (b) of quartz sandstone (D4127GS)

2.2 锆石挑选及样品制备

锆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,制靶、阴极发光图像(CL)照相由北京锆年领航科技有限公司完成,锆石透射光及反射光照相与观察工作在中国地质调查局天津地质调查中心实验室进行。首先,室内对野外采集的岩石样品进行粉碎和自然晾干,利用电磁选及重液选等方法,对晾干后的样品进行单矿物提纯,分离出锆石单矿物。其次,手工挑选锆石颗粒粘帖到不含U、Pb和Th的环氧树脂靶中,打磨和抛光样品靶使得锆石颗粒的中心出露。在分析锆石的U/Pb含量之前,在双目显微镜下确定了锆石颗粒的位置、显微结构和靶区。本次研究共挑选石英砂岩中104颗锆石进行U-Pb同位素测年,并对其中77颗碎屑锆石进行了Lu-Hf同位素测试研究。

2 分析方法

2.1 样品采集及描述

采集样品为卡帕图(Kapatu)地区姆巴拉组一段上部的石英砂岩(D4127GS,图1),经纬度坐标为:30°35'9"E,9°41'33"S,样品重量约3 kg。姆巴拉组地层野外露头较少,主要沿着一个小沟谷出露,地表多以风化的岩屑为主(任军平等,2021b)。手标本及其显微镜下的特征分别见图2a和b。石英砂岩样品的原始颜色为灰白色,风化色为浅紫色,颗粒呈次棱角状—次圆状,中等粒度(0.15~0.45 mm),砂状结构,块状构造。石英砂岩主要由石英(93%)、硅质(燧石或变石英岩)碎屑(2%)、硅质或少量泥质胶结物(4%)和绢云母(1%)组成。

2.3 LA-MC-ICP MS 锆石 U-Pb 同位素

根据可见光和CL图像(图3),选取锆石颗粒测点的合适位置,以避开晶体中的裂纹、包裹体及不同结晶世代区域。其中,石英砂岩样品的锆石多为椭圆状—圆状,反映它们具有搬运磨蚀的特征。粒径为80 μm~130 μm,长宽比为1:1~2:1,大部分锆石重结晶或增生边不明显,振荡环带发育,具有酸性岩浆锆石的特征。锆石U-Pb同位素分析在中国地质调查局天津地质调查中心实验室用激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪(LA-MC-ICP MS)完成,将美国ESI公司生产的NEW WAVE193 nm FX ArF准分子激光器与Thermo Fisher公司生产的Neptune多接收器电感耦合等离子体质谱仪联用,采用氦气作为剥蚀物质的载气,激光束斑直径为35 μm,剥蚀时间为30 s,剥蚀深度约为20 μm,具体

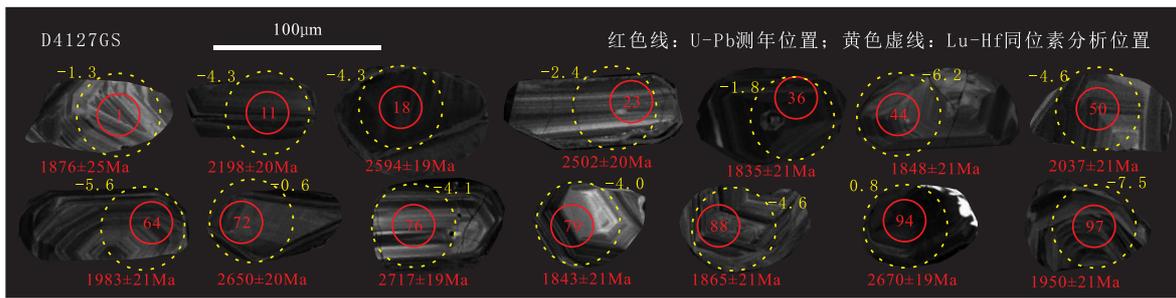


图3 石英砂岩(D4127GS)样品锆石阴极发光(CL)图像、测点编号及 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄

Fig. 3 CL image, point numbers and U-Pb isotopic ages of zircons from the quartz sandstone (D4127GS)

参数见 Geng et al. (2017)。采用中国地质大学刘勇胜博士研发的 ICPMS Data Cal 程序 (Liu et al., 2010) 和 Ludwig 的 Isoplot 程序进行数据处理。同时,利用 SRM610 玻璃标样作为外标计算锆石样品的 U、Pb 和 Th 含量。

2.4 锆石 Lu-Hf 同位素

锆石原位微区 Lu-Hf 同位素测试由中国地质调查局天津地质调查中心实验室利用激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪 (LA-MC-ICP MS) 完成。测试位置与锆石 U-Pb 同位素位置相同,采用单点剥蚀,激光束斑直径为 51 μm ,剥蚀深度约为 20 μm 。测试过程中用 GJ-1 和 91500 标准锆石做标样,并通过指数方法进行同质异位数干扰校正,标样的测定结果与标准值在误差范围内一致。具体分析见文献耿建珍等(2011)。

3 分析结果

3.1 LA-MC-ICP MS 碎屑锆石 U-Pb 同位素

利用 LA-MC-ICP MS 锆石 U-Pb 分析方法对来

源于石英砂岩 (D4127GS) 的碎屑锆石进行测试。分析结果见图 4 和附表 1^①,标注 U-Pb 和 Lu-Hf 同位素分析结果的典型的碎屑锆石 CL 图像见图 3。共分析了 104 个锆石颗粒,获得了其 U-Pb 同位素组成,其中 88 个锆石颗粒的年龄值一致性在 97% ~ 100% 之间。88 个年龄数据分布范围为 (2728 \pm 22 Ma) ~ (1833 \pm 22 Ma), 其中一个年龄组区间为 2728 ~ 2602 Ma (峰值为 2650 Ma), 另一个年龄组区间为 2246 ~ 1833 Ma (峰值为 1880 Ma)。除测试点 41、42 和 84 以外,锆石 Th/U 比值主要介于 0.10 ~ 1.66 之间,显示岩浆锆石属性 (Hoskin and Black, 2000)。19 个测年数据可能来源于同一岩浆岩,其上交点年龄是 1985 \pm 17 Ma。测试点 18 的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 2594 \pm 19 Ma (谐和度为 91%), Th/U 比值为 0.37。测试点 23 的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 2502 \pm 20 Ma (谐和度为 94%), Th/U 比值为 0.89。

3.2 碎屑锆石 Lu-Hf 同位素

在 U-Pb 同位素测试的基础上,对石英砂岩 (D4127GS) 中的锆石进行了 Lu-Hf 同位素测试,测

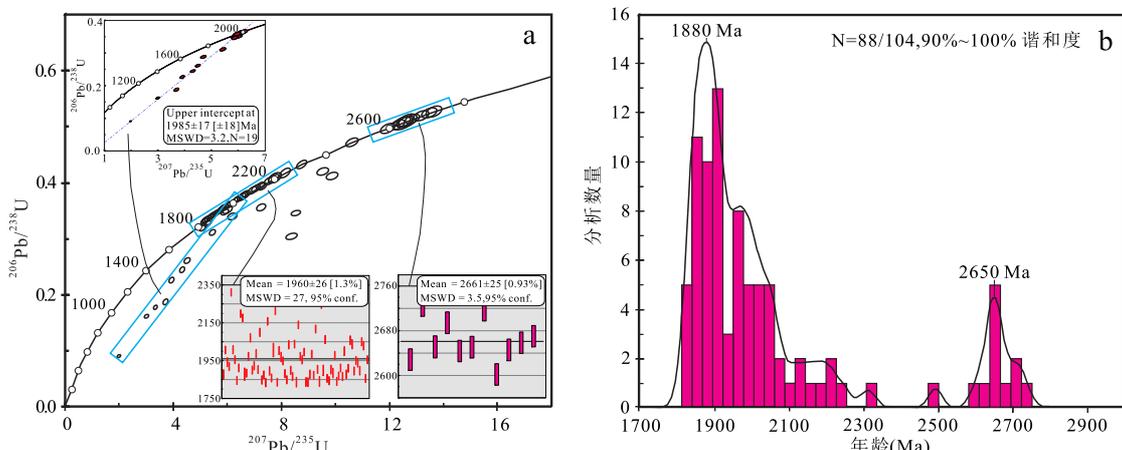


图4 石英砂岩(D4127GS)锆石 U-Pb 谐和图(a)及直方图(b)

Fig. 4 LA-MC-ICP MS U-Pb concordia diagrams (a) and histogram (b) of detrital zircons from quartz sandstone (D4127GS)

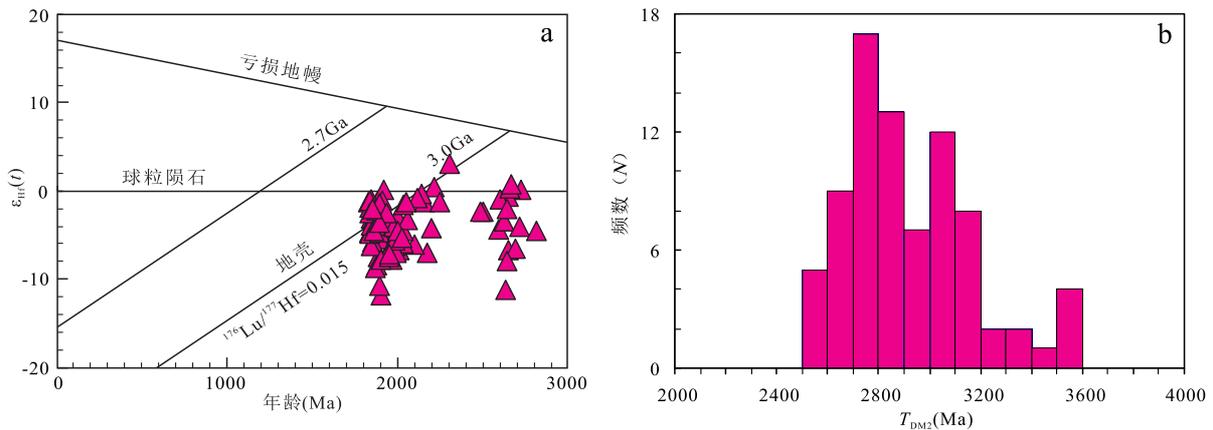
a. 锆石年龄与 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图解; b. 二阶段 Hf 模式年龄直方图

图 5 石英砂岩 (D4127GS) 碎屑锆石 Lu-Hf 同位素组成

Fig. 5 Lutetium-Hf isotopic composition of detrital zircons from quartz sandstone (D4127GS)

试结果见图 3、图 5 和附表 2^①。锆石 Lu-Hf 同位素的点编号与锆石 U-Pb 同位素的点编号一致。分析结果显示 77 颗锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.0004 ~ 0.0020, 显示出放射成因 Hf 含量非常低, 可以忽略。 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.280922 ~ 0.281632, 可能代表了初始 Hf 同位素组成 (Amelin et al., 1999)。在锆石年龄 - $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图解 (图 5a) 中, 数据投点整体位于球粒陨石演化线下侧, 表明以除来自古老地壳的再循环物质外, 还存在少量新生地壳的物质来源。66 颗古元古代碎屑锆石的 ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$)_i 值为 0.281126 ~ 0.281583, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -11.8 ~ +3.0, t_{DM2} 年龄变化范围为 3260 ~ 2543 Ma (图 5b); 11 颗太古宙碎屑锆石的 ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$)_i 值为 0.281126 ~ 0.281583, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -7.9 ~ +0.8, t_{DM2} 年龄变化范围为 3587 ~ 3083 Ma (图 5b), 明显大于锆石的形成年龄。

4 讨论

4.1 沉积年龄

碎屑锆石年龄谱中最小 U-Pb 年龄可以代表其原岩沉积时间下限 (陆松年等, 2006; Yang et al., 2013)。De Waele et al. (2006a) 获得曼萨地区卡布韦卢马组的最大沉积时限为 1824 ± 19 Ma。邢仕等 (2021) 获得卡帕图西部卡布韦卢马组的最大沉积时限为 1712 ± 22 Ma。孙宏伟等 (2021) 获得卡萨马西部变质表壳岩的最大沉积时限为 1522 ± 23 Ma。任军平等 (2019a) 通过研究卡萨马群的碎屑锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征, 认为卡萨马群的形成时间可能晚于 1434 ± 14 Ma。杜明龙等 (2021) 获得伊

索卡南部 Kachinga 4 件长石石英砂岩的最大沉积时限为 1331 ± 26 Ma。根据班韦乌卢变质克拉通中地层沉积序列, 本次工作获得卡帕图地区姆巴拉组一段上部的石英砂岩 (D4127GS) 中最小的碎屑锆石年龄为 1833 ± 22 Ma (点号 27), 其地层沉积时间可能介于 (1833 ± 22 Ma) ~ (1712 ± 22 Ma) 之间, 属于古元古代。

4.2 物源分析

本次利用 LA-MC-ICP MS 锆石 U-Pb 分析方法获得卡帕图地区姆巴拉组石英砂岩 (D4127GS) 的碎屑锆石 2728 ~ 2602 Ma (峰值为 2650 Ma) 和 2246 ~ 1833 Ma (峰值为 1880 Ma) 两个重要年龄区间。从目前资料来看, 2728 ~ 2602 Ma (峰值为 2650 Ma) 的年龄区间在班韦乌卢地块中还是首次较大数量的发现, 前人仅在班韦乌卢地块南部与卢费里安构造带东部交界的 Kapiri Mposhi 地区报道了花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 2727 ± 36 Ma (De Waele et al., 2005), 表明班韦乌卢地块内部新太古代岩浆活动相对较弱。Andrews-Speed (1986, 1989) 认为姆巴拉组的沉积物可能来源于坦桑尼亚克拉通的绿岩带。De Waele et al. (2006a) 认为班韦乌卢地块是从中非的刚果克拉通演化而来, 坦桑尼亚克拉通又是距离班韦乌卢地块最近的刚果克拉通的重要组成部分。Sanislav et al. (2014) 认为坦桑尼亚克拉通中与绿岩带有关的最重要的地壳生长时间约为 2700 Ma, 其主要与花岗岩、花岗闪长岩、粗面安山岩、流纹岩等岩石有关。2246 ~ 1833 Ma (峰值为 1880 Ma) 的年龄区间在班韦乌卢地块中报道较多 (Andersen and Unrug, 1984; De Waele and Fitzsimons, 2007; 任军平

等,2019a,b,c;左立波等,2020;古阿雷等,2021;表1),主要来源于似斑状正长花岗岩、正长花岗岩、黑云母花岗岩、二长花岗岩、黑云母二长花岗岩、黑云母花岗岩闪长岩、石英闪长岩及火山岩类等。

4.3 变质克拉通活动时间

在班韦卢变质克拉通中,本次研究利用 LA-MC-ICP MS 锆石 U-Pb 测试方法获得卡帕图地区姆巴拉组石英砂岩(D4127GS)的年龄数据,其中88个锆石年龄数据分布范围为2728~1833 Ma。比亚诺(Biano)群中(KPM3)红色粉砂岩和基普希(Kipushi)矿床(K30—41,151~207 m)钻孔中巨砾岩碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 年龄分别为1977~1689 Ma 和1945~1846 Ma (Master et al., 2005)。上覆于恩昌加花岗岩的下罗安组(lower Roan)砂岩(LRS2)和长石砂岩(LRS1)碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 年龄分别为2018~1699 Ma 和1995~1676 Ma (Armstrong et al., 2005)。从穆索希(Musoshi)(SPOTMU 和 MUS3)、孔科拉(Konkola)(KNS7)及谦比希(Chambishi)盆地(RCB2/4)的下罗安组中获得四件长石砂岩碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 年龄分别为2081~1570 Ma、2066~1883 Ma、1996~1694 Ma 和2062~1813 Ma (Master et al., 2005)。从下卡萨马(Kasama)组二段中获得紫红色粉砂岩(DPM01-18)碎屑锆石 LA-MC-ICP MS U-Pb 年龄为2783~1540 Ma,主要集中于1993~1849 Ma(任军平等,2019a)。从卡诺纳(Kanona)群底部的砾岩(MK8)、姆波罗科索群卡布韦卢马组的石英砂岩(MA6)、曼希亚河群石英砂岩(IL14)及卡萨马群石英砂岩(KAS)中获得碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 年龄分别为2057~1953 Ma、2710~1805 Ma、3011~1860 Ma 及2593~1434 Ma (De Waele and Fitzsimons, 2007)。从穆富利拉(Mufulira)南部地区穆瓦超群石英砂岩(MVQ1)中获得碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为3180~1941 Ma (Rainaud et al., 2003)。孙宏伟等(2021)获得卡萨马西部变质粉砂岩(D0018)中碎屑锆石 LA-MC-ICP MS U-Pb 年龄为2244~1902 Ma,总体呈现1980 Ma 一个明显的主峰值年龄和2044~1954 Ma、2244~2059 Ma 及1943~1902 Ma 三个年龄组;变质粉砂岩(D5590)中碎屑锆石 LA-MC-ICP MS U-Pb 年龄为3034~1522 Ma,总体呈现2000 Ma 一个峰值年龄和2490~2060 Ma、2036~1958 Ma、1942~1887 Ma、1865~1817 Ma 以及1641~1522 Ma 五个年龄组,此外获得两个太古宙的碎屑锆石年龄分别为2671

±20 Ma 和3034±19 Ma。邢仕等(2021)获得卡布韦卢马组石英砂岩(D2003)中碎屑锆石 LA-MC-ICP MS U-Pb 年龄为(2228±20 Ma)~(1742±22 Ma),呈现两个明显的年龄峰值分别为2050 Ma 和1850 Ma;长石石英砂岩(D5013)中碎屑锆石 LA-MC-ICP MS U-Pb 年龄为(2087±23 Ma)~(1712±22 Ma),年龄峰值为1780 Ma。杜明龙等(2021)获得伊索卡南部2件长石砂岩碎屑锆石 LA-MC-ICP MS U-Pb 年龄,其中TGS01中碎屑锆石年龄为(2144±23 Ma)~(1331±26 Ma),主要年龄分布于1950~1700 Ma 之间;TGS02中碎屑锆石年龄为(2677±21 Ma)~(1488±27 Ma),主要年龄分布于1950~1750 Ma。

上述所有碎屑锆石年龄数据见图6,从图中明显看出班韦卢变质克拉通的活动时间划分为中太古代、新太古代、古元古代和中元古代四个时期,其中古元古代为活动的高峰期。中太古代最大的年龄为3180 Ma,其活动峰值时间主要有两个,分别为3020 Ma 和2810 Ma,其中3020 Ma 的活动最为重要,主要分布于穆富利拉、卡萨马及姆皮卡地区。新太古代的活动峰值时间主要有两个,分别为2650 Ma 和2570 Ma,其中2650 Ma 的活动最为重要,主要分布于穆富利拉和卡帕图地区。古元古代的活动峰值时间主要有七个,分别为2490 Ma、2370 Ma、2190 Ma、2030 Ma、1970 Ma、1870 Ma 和1770 Ma,其中1870 Ma 的活动最为重要,主要分布于伊索卡、卡萨马、卡帕图、曼萨、恩昌加、谦比希、穆索希及姆皮卡等地区。中元古代最小的年龄为1331 Ma,其活动高峰期时间为1490 Ma,主要分布于伊索卡地区。由于坦桑尼亚克拉通中侵入体、火山岩及太古宙基底再活化的锆石 U-Pb 年龄主要峰值分别约为3030 Ma 和2670 Ma (Sanislav et al., 2014),因此班韦卢变质克拉通内中太古代和新太古代的活动可能与坦桑尼亚克拉通演化密切相关。古元古代时期班韦卢变质克拉活动强烈,其中最为重要的时间为古元古代的1870 Ma,该时间与全球范围内2.0~1.8 Ga 由碰撞造山所形成的哥伦比亚超大陆演化时间基本一致。中元古代的活动高峰期时间为1490 Ma,主要与伊鲁米德构造带的演化有关。

4.4 变质克拉通地壳增生

锆石的 Lu-Hf 同位素是探测地壳和地幔物质演化历史的一种非常灵敏的地球化学示踪剂(Blichert-Toft and Albarède, 1997)。铪(Hf)元素比铈(Lu)元

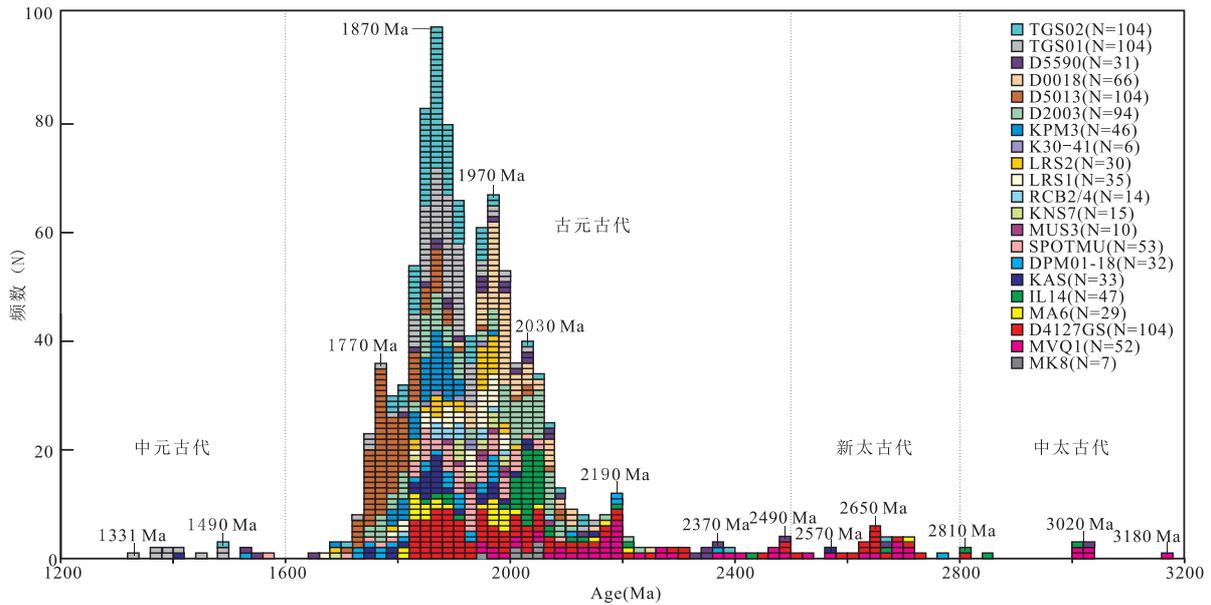


图6 班韦乌卢变质克拉通碎屑锆石 U-Pb 年龄特征 (Rainaud et al., 2003; Master et al., 2005; Armstrong et al., 2005; De Waele and Fitzsimons, 2007; 任军平等, 2019a; 孙宏伟等, 2021; 邢仕等, 2021; 杜明龙等, 2021)

Fig. 6 U-Pb zircon ages from the Bangweulu Metacraton

素在熔融过程中更易于熔融,所以地壳中的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值一般均低于地幔中的数值。显示正 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的岩浆岩通常被认为是来自亏损源区的部分熔融,而显示负 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的岩浆岩则被认为是来自古老地壳。鉴于多数的锆石来自地壳物质的再循环,所以使用锆石的二阶段模式年龄来进行探讨(吴福元等,2007)。

本次工作获得卡帕图地区姆巴拉组石英砂岩(D4127GS)77颗锆石Lu-Hf同位素数据,其显示 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化区间为 $-11.8 \sim +3.0$ 。77颗锆石的 t_{DM2} 年龄为3587~2543 Ma,平均值为2913 Ma。任军平等(2019a)获得卡萨马组粉砂岩(DPM01-18, N=22)中碎屑锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为0.281049~0.281618,其 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化区间为 $-12.8 \sim -1.6$ (图7a),对应的 t_{DM2} 年龄为3487~2406 Ma(图7b)。邢仕等(2021)获得卡布韦卢马组石英砂岩(D2003, N=83)中碎屑锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为0.281221~0.281754,其 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化区间为 $-8.6 \sim +5.1$ (图7a),对应的 t_{DM2} 年龄为3228~2250 Ma(图7b);同时获得长石石英砂岩(D5013, N=90)中碎屑锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为0.281408~0.281840,其 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化区间为 $-8.9 \sim +4.3$ (图7a),对应的 t_{DM2} 年龄为3034~2175 Ma(图7b)。孙宏伟等(2021)获得卡萨马西部花岗岩体中的变质粉砂岩捕掳体中碎屑锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为

0.281383~0.281808,其 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化区间为 $-6.3 \sim +7.4$ (图7a),对应的 t_{DM2} 年龄为2984~2150 Ma(图7b)。

综上所述,班韦乌卢变质克拉通的5件岩石样品中锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值由负到正变化范围较大(图7a),表明它们除来自古老地壳的再循环物质外,还存在新生地壳的物质。同时, t_{DM2} 年龄分布范围广(3587~2150 Ma),属于古太古代—古元古代,表明班韦乌卢变质克拉通的地壳在该时期均实现了增长,并且地壳增生事件主要形成于古元古代2150 Ma之前。 t_{DM2} 年龄的峰值分别为中太古代的2850 Ma和新太古代的2550 Ma(图7b),其中以新太古代的2550 Ma时期增长最快,这一重要的增生事件可能与凯诺兰(Kenorland)超大陆聚合过程有关(2.6~2.4 Ga; Pehrsson et al., 2013)。与班韦乌卢变质克拉通关系密切的坦桑尼亚克拉通的地壳主增长期为2.85~2.80 Ga、2.77~2.73 Ga、2.70~2.62 Ga三个时期,表明二者在古元古代之前的地壳主增长期基本一致,且与全球大陆地壳主增长期基本一致(Condie, 1998)。

5 结论

(1)卡帕图地区姆巴拉组沉积岩的形成时间可能介于 $(1833 \pm 22 \text{ Ma}) \sim (1712 \pm 22 \text{ Ma})$ 之间,属于古元古代,可能与乌本迪构造带的演化有关。

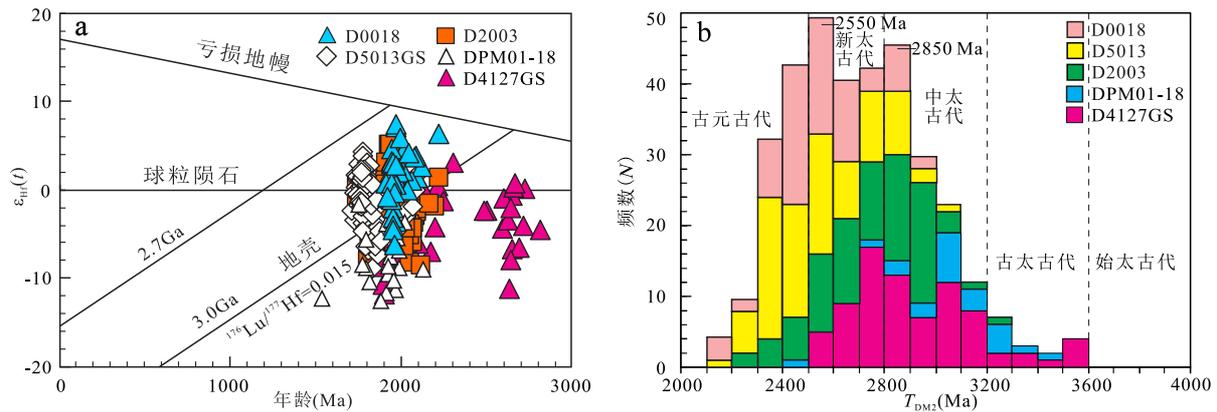
a. 锆石年龄与 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图解; b. 二阶段 Hf 模式年龄直方图

图7 班韦乌卢变质克拉通锆石 Hf 同位素特征(任军平等,2019a;邢仕等,2021;孙宏伟等,2021)

Fig. 7 Hf isotope composition from the Bangweulu Metacraton

(2) 卡帕图地区姆巴拉组具有丰富的物质来源,其中 2728 ~ 2602 Ma(峰值为 2650 Ma)的物质可能来源于坦桑尼亚克拉通中的花岗岩类、粗面安山岩和流纹岩等岩石。2246 ~ 1833 Ma(峰值为 1880 Ma)的物质主要来源于班韦乌卢地块中花岗岩岩类、石英闪长岩及火山岩类等岩石。

(3) 班韦乌卢变质克拉通的活动时间包括中太古代、新太古代、古元古代和中元古代四个时期,其中古元古代为活动的高峰期,1870 Ma 的活动最为重要。变质克拉通内中太古代和新太古代、古元古代及中元古代的强烈活动分别与坦桑尼亚克拉通、哥伦比亚超大陆及伊鲁米德构造带的演化密切相关。

(4) 班韦乌卢变质克拉通沉积岩的源区地壳增生除来自古老地壳的再循环物质外,还存在新生地壳的物质。同时,地壳在古太古代—古元古代均实现了增长,其中凯诺兰超大陆聚合时期(2550 Ma)增长最快。变质克拉通在古元古代之前的地壳主增长期与坦桑尼亚克拉通及全球大陆地壳主增长期基本一致。

致谢:在野外工作和室内研究过程中得到 ALPHET PHASKANI Dokowe、EZEKIAH Chikambwe、CHISHIMBA Canisius、ABRAHAM Mukangwa、张航、卢宜冠、何胜飞、彭丽娜及纪山青等同行的大力支持,在成文过程中匿名审稿专家、编辑老师和东华理工大学地球科学学院戴朝成副教授提供了宝贵的意见,碎屑锆石挑选由廊坊市宇能岩石矿物分选技术服务有限公司完成,碎屑锆石 U-Pb-Hf 同位素分析由中国地质调查局天津地质调查中心实验室完成,在此一并表示真诚的感谢!

注释:

①图与附表资料可发 E-mail 至编辑部问询或至期刊官网下载

参考文献 (References):

- Abdelsalam M, Liégeois J P, Stern R J, 2002. The Saharan metacraton [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 34(3-4):119-136.
- Ackermann E, 1950. Ein neuer Falteingürtel in Nordrhodesien und seine tektonische Stellung im afrikanischen Grundgebirge [J]. *Geologische Rundschau*, 38(1):24-39.
- Amelin Y, Lee D C, Halliday A N, et al., 1999. Nature of the Earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircons [J]. *Nature*, 399:252-255.
- Andersen L S, Unrug R, 1984. Geodynamic evolution of the Bangweulu Block, northern Zambia [J]. *Precambrian Research*, 25(1):187-212.
- Andrews-Speed C P, 1986. Gold-bearing fluvial and associated tidalmarine sediments of Proterozoic age in the Mporokoso Basin, northern Zambia [J]. *Sediment Geology*, 48(3-4):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 [J]. *Precambrian Research*, 44(1):1-17.
- Armstrong R A, Master S, Robb L J, 2005. Geochronology of the Nchanga Granite, and constraints on the maximum age of the Katanga Supergroup, Zambian Copper belt [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 42(1):32-40.
- Black R, Liégeois J P, 1993. Cratons, mobile belts, alkaline rocks and continental lithospheric mantle: the Pan-African testimony [J]. *Journal of the Geological Society of London*, 150(1):89-98.
- Blichert-Toft J, Albarède F, 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(1-2):243-258.
- Boven A, Theunissen K, Sklyarov E., et al., 1999. Timing of exhumation of a high-pressure mafic granulite terrane of the

- Paleoproterozoic Ubende belt (West Tanzania) [J]. *Precambrian Research*, 93(1):119–137.
- Cailteux J L H, Binda P L, Katekesha W M, et al., 1994. Lithostratigraphical correlation of the Neoproterozoic Roan Supergroup from Shaba(Zaire) and Zambia, in the Central African copper-cobalt metallogenic province[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 19(4):265–278.
- Cailteux J L H, De Putter T, 2019. The Neoproterozoic Katanga Supergroup (D. R. Congo): State-of-the-art and revisions of the lithostratigraphy, sedimentary basin and geodynamic evolution[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 150:522–531.
- Cailteux J L H, Kampunzu A B, Lerouge C, 2007. The Neoproterozoic Mwashva-Kansuki sedimentary rock succession in the central African Copperbelt, its Cu-Co mineralisation, and regional correlations[J]. *Gondwana Research*, 11(3):414–431.
- Cailteux J L H, Kampunzu A B, Lerouge C, et al., 2005. Genesis of sediment-hosted stratiform copper-cobalt deposits, central African copper belts[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 42(1/5):134–158.
- Condie K C, 1998. Episodic continental growth and supercontinents: a mantle avalanche connection? [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 163(1–4):97–108.
- Cosi M, De Bonis A, Gosso G, et al., 1992. Late Proterozoic thrust tectonics, high-pressure metamorphism and uranium mineralization in the Domes area, Lufilian Arc, northwestern Zambia [J]. *Precambrian Research*, 58(1–4):215–240.
- Daly M C, Chakraborty S K, Kasolo P., et al., 1984. The Lufilian arc and Irumide belt of Zambia; results of a geotraverse across their intersection[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2(4):311–318.
- Daly M C, Unrug R, 1982. The Muva Supergroup, Northern Zambia [J]. *Transactions of the Geological Society of Africa*, 85(3):155–165.
- De Swardt A M J, Garrard P, Simpson J G, 1965. Major zones of transcurrent dislocation and superposition of orogenic belts in parts of central Africa[J]. *Bulletin Geological Society of America*, 76(1):89–102.
- De Waele B, Johnson S P, Nkemba S, et al., 2005. High-temperature, low-pressure tectono-thermal evolution of the Irumide Belt, central, Southern Africa; Lithosphere delamination during arc-accretion[J]. *Frontier Research on Earth Evolution Report*, 2004(2):1–9.
- De Waele B, Fitzsimons I C W, 2007. The nature and timing of Palaeoproterozoic sedimentation at the southeastern margin of the Congo Craton; zircon U-Pb geochronology of plutonic, volcanic and clastic units in northern Zambia[J]. *Precambrian Research*, 159:95–116.
- De Waele B, Fitzsimons I C W, Wingate M T D, et al., 2009. The geochronological framework of the Irumide Belt: A prolonged crustal history along the margin of the Bangweulu Craton[J]. *American Journal of Science*, 309:132–187.
- De Waele B, Liégeois J P, Nemchin A A, et al., 2006a. 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 [J]. *Precambrian Research*, 148, 225–256.
- De Waele B, Kampunzu A B, Mapani B S E, et al., 2006b. The Mesoproterozoic Irumide belt of Zambia [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 46:36–70.
- De Waele B, Wingate M T D, Mapani B, et al., 2003b. Untying the Kibaran knot: a reassessment of Mesoproterozoic correlations in southern Africa based on SHRIMP U-Pb data from the Irumide belt [J]. *Geology*, 31(6):509–512.
- Drysdall A R, Johnson R L, Moore T A, et al., 1972. Outline of the geology of Zambia[J]. *Geol. Mijnbouw*, 51:265–276.
- Geng J Z, Qiu K F, Gou Z Y, et al., 2017. Tectonic regime switchover of Triassic Western Qinling Orogen: Constraints from LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology and Lu-Hf isotope of Dangchuan intrusive complex in Gansu, China[J]. *Geochemistry*, 77(4):637–651.
- Hoskin P W O, Black L P, 2000. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 18(4):423–439.
- John T, Schenk V, Mezger K, et al., 2004. Timing and PT Evolution of Whiteschist Metamorphism in the Lufilian Arc-Zambezi Belt Orogen (Zambia): Implications for the Assembly of Gondwana [J]. *The Journal of Geology*, 112(1):71–90.
- Kampunzu A B, Cailteux J L H, Kamona A F, et al., 2009. Sediment-hosted Zn-Pb-Cu deposits in the Central African Copperbelt [J]. *Ore Geology Reviews*, 35(3–4):263–297.
- Kampunzu A B, Cailteux J, 1999. Tectonic evolution of the Lufilian Arc (central African copper belt) during Neoproterozoic Pan African orogenesis[J]. *Gondwana Research*, 2(3):401–421.
- 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[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 33(3–4):503–528.
- Kröner A., 1977. The Precambrian geotectonic evolution of Africa: plate accretion versus plate destruction [J]. *Precambrian Research*, 4(2):163–213.
- Lenoir J L, Liégeois J P, Theunissen K, et al., 1994. The Palaeoproterozoic Ubendian shear belt in Tanzania: geochronology and structure [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 19:169–184.
- Li H K, Zhang C L, Yao C Y, et al., 2013. U-Pb zircon age and Hf isotope compositions of Mesoproterozoic sedimentary strata on the western margin of the Yangtze massif [J]. *Science China: Earth Sciences*, 56(4):628–639.
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al., 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths [J]. *Journal of Petrology*, 51(1–2):537–571.
- Mapani B S E, 1992. Stratigraphy and correlation of the Serenje and adjoining areas [J]. *Zambian Journal of Applied Earth Sciences*, 6(1):1–8.
- Master S, Rainaud C, Armstrong R A, et al., 2005. Provenance ages of the Neoproterozoic Katanga Supergroup (Central African Copperbelt), with implications for basin evolution [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 42(1):41–60.
- Mc Gowan R R, Roberts S, Boyce A J, 2006. Origin of the Nchanga copper-cobalt deposits of the Zambian Copperbelt [J]. *Mineralium Deposita*, 40(6–7):617–638.
- Muchez P, Brems D, Clara E, et al., 2010. Evolution of Cu-Co

- mineralizing fluids at Nkana Mine, Central African Copperbelt, Zambia[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 58:457-474.
- Pehrsson S J, Berman R G, Eglington B, et al., 2013. Two Neoproterozoic supercontinents revisited: The case for a Rae family of cratons[J]. *Precambrian Research*, 232:27-48.
- Pinna P, Cocherie A, Thieblemont D, et al., 1999. The Archaean evolution of the Tanzanian Craton(2.93 - 2.53 Ga)[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 28(4):62-63.
- Rainaud C, Master S, Armstrong R A, et al., 2003. A cryptic Mesoarchaean terrane in the basement to the central African Copperbelt[J]. *Journal of the Geological Society*, 160(1):11-14.
- Rainaud C, Master S, Armstrong R A, et al., 2005. Geochronology and nature of the Palaeoproterozoic basement in the Central African Copperbelt(Zambia and the Democratic Republic of Congo), with regional implications[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 42(1-5):1-31.
- Ren J P, Wang J, Gu A L, et al., 2022. Study on gold enrichment characteristics in Zambia: Based on 1:1000000 geochemical mapping[J]. *China Geology*, 5(1):60-70.
- 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[J]. *Ore Geology Reviews*, 91:612-619.
- Ren J P, Wang J, Zuo L, et al., 2020. Enrichment characteristics of Cu and Co displayed by low-density geochemical mapping in Zambia[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 219(2):106634, doi.org/10.1016/j.gexplo.2020.106634.
- Sanislav I V, Wormald R J, Dirks P H G M, et al., 2014. Zircon U-Pb ages and Lu-Hf isotope systematics from late-tectonic granites, Geita Greenstone Belt: Implications for crustal growth of the Tanzania Craton[J]. *Precambrian Research*, 242:187-204.
- Schandelmeier H, 1981. The Precambrian of NE-Zambia in relation to the dated Kate, Mambwe and Luchewe intrusives[J]. *Geologische Rundschau*, 70(3):956-971.
- Unrug R, 1984. The Mid-Proterozoic Mporokoso Group of northern Zambia: stratigraphy, sedimentation and regional position[J]. *Precambrian Research*, 24(2):99-121.
- Wendorff M, 2005. Evolution of Neoproterozoic-Lower Palaeozoic Lufilian arc, Central Africa: a new model based on syntectonic conglomerates[J]. *Journal of the Geological Society*, 162(1):5-8.
- Yang D B, Xu W L, Xu Y G, et al., 2013. Provenance of sediments from Mesozoic basins in western Shandong: Implications for the evolution of the North China Block[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 76(2):12-29.
- 第五春荣, 2021. 华北克拉通南部太古宙大陆地壳的生长和演化[J]. *岩石学报*, 37(2):317-340.
- 杜明龙, 纪山青, 任军平, 等, 2021. 赞比亚伊索卡南部 Kachinga 长石砂岩碎屑锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及地质意义[J]. *地质学报*, 95(4):1050-1071.
- 耿建珍, 李怀坤, 张健, 等, 2011. 锆石 Hf 同位素组成的 LA-MC-ICP-MS 测定[J]. *地质通报*, 30(10):1508-1513.
- 古阿雷, 王杰, 任军平, 等, 2021. 赞比亚北部卡帕图地区元古代花岗岩成因: 岩石地球化学、锆石年代学及 Hf 同位素约束[J]. *地质学报*, 95(4):999-1018.
- 刘晓阳, 王杰, 任军平, 等, 2017. 赞比亚谦比西铜矿花岗岩年龄及其指示意义[J]. *中国地质*, 44(4):755-765.
- 陆松年, 陈志宏, 相振群, 等, 2006. 秦岭岩群副变质岩碎屑锆石年龄谱及其地质意义探讨[J]. *地质前缘*, 13(6):303-310.
- 任军平, 胡鹏, 王杰, 等, 2021a. 非洲矿业发展概况[J]. *地质学报*, 95(4):945-961.
- 任军平, 王杰, 古阿雷, 等, 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[J]. *中国矿业*, 26(11):139-144.
- 任军平, 王杰, 古阿雷, 等, 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[J]. *原子能科学技术*, 52(12):2275-2282.
- 任军平, 王杰, 古阿雷, 等, 2019b. 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[J]. *地质调查与研究*, 42(3):161-165.
- 任军平, 王杰, 古阿雷, 等, 2021b. 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[J]. *地质学报*, 95(4):1072-1081.
- 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[J]. *地质科技情报*, 32(5):142-152.
- 任军平, 王杰, 刘晓阳, 等, 2017b. 非洲中南部铜多金属矿床研究现状及找矿潜力分析[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 47(4):1083-1103.
- 任军平, 王杰, 孙宏伟, 等, 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[J]. *中国地质*, 46(3):575-586.
- 任军平, 王杰, 张东红, 等, 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[J]. *地球科学*, 43(6):1850-1860.
- 任军平, 王杰, 左立波, 等, 2019c. 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[J]. *地质学报*, 93(11):2832-2846.
- 任军平, 左立波, 许康康, 等, 2016. 赞比亚北部班韦乌卢地块演化及矿产资源研究现状[J]. *地质论评*, 62(4):979-996.
- 孙宏伟, 王杰, 任军平, 等, 2021. 班韦乌卢地块中部变质壳岩碎屑锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素研究及其构造意义[J]. *地质学报*, 95(4):1245-1259.
- 万渝生, 董春艳, 颜颜强, 等, 2015. 华北克拉通太古宙研究若干进展[J]. *地球学报*, 36(6):685-700.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等, 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. *岩石学报*, 23(2):185-220.
- 邢仕, 纪山青, 王杰, 等, 2021. 赞比亚东北部卡布韦卢马组碎屑锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素特征[J]. *地质学报*, 95(4):1191-1211.
- 许康康, 孙凯, 何胜飞, 等, 2021. 赞比亚西北省 Solwezi 地区石榴云母片岩的碎屑锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *华北地质*, 44(3):1-3.
- 左立波, 任军平, 邱亮, 等, 2021. 赞比亚伊索卡东部片麻岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及岩石成因[J]. *地质学报*, 95(4):1144-1158.
- 左立波, 任军平, 王杰, 等, 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[J]. *地质调查与研究*, 43(1):30-41.