

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

任军平^{1,2}, 王杰^{1,2*}, 古阿雷^{1,2}, 左立波^{1,2}, 孙宏伟^{1,2}, 许康康^{1,2}, 吴兴源^{1,2},
Alphet Phaskani Dokowe³, Ezekiah Chikambwe³

(1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170; 2. 中国地质调查局华北地质科技创新中心, 天津 300170;
3. 赞比亚地质调查局, 赞比亚卢萨卡 P.O.Box.50135)

摘要: 本文采用 LA-MC-ICP-MS 方法获得班韦乌卢地块卡萨马北部正长花岗岩中锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄加权平均值为 $2\,011 \pm 20\text{ Ma}$ ($N=17$, $\text{MSWD}=3.9$), 表明班韦乌卢地块基底中正长花岗岩主要形成于古元古代且可能与古元古代乌本迪构造带的活动有关。岩石中锆石 Lu-Hf 同位素的 T_{DM2} 年龄变化范围为 $3\,018 \sim 2\,184\text{ Ma}$, 明显大于锆石的形成年龄; 具有不均一的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 ($-7.1 \sim 6.6$) 显示形成正长花岗岩的原始岩浆具有壳幔混合的特点, 可能为新太古代-古元古代地壳与幔源混染物质。

关键词: 正长花岗岩; 锆石 U-Pb 年龄; Lu-Hf 同位素; 班韦乌卢地块; 赞比亚东北部

中图分类号: P588.1; P597.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-4135(2019)03-0161-06

赞比亚东北部班韦乌卢地块 (Bangweulu Block) 的形成时代和地球动力学演化长期备受关注^[1-10]。通过本次获得卡萨马北部正长花岗岩成岩年龄 $2\,011 \pm 20\text{ Ma}$ 的成果, 结合曼萨附近的花岗岩类及火山岩 (全岩 Rb-Sr 等时线年龄分别为 $1\,833 \pm 18\text{ Ma}$ 和 $1\,812 \pm 22\text{ Ma}$)^[11]、伊鲁米德构造带 (锆石 U-Pb SHRIMP 年龄为 $1\,879 \pm 13 \sim 1\,856 \pm 4\text{ Ma}$)^[12] 和卢弗里安构造带 (碎屑锆石 U-Pb SHRIMP 年龄为 $2\,000 \sim 1\,800\text{ Ma}$)^[13-14] 中锆石年龄数据, 揭示了班韦乌卢地块的基底主要形成于古元古代。

1 区域地质背景

班韦乌卢地块包括结晶基底和沉积盖层。

结晶基底主要包括花岗岩类、片岩带、火山岩和其它侵入体^[15]。花岗岩类是班韦乌卢地块结晶基底的主要组成部分, 由于受后期构造作用的影响花岗岩类局部发生不同程度的浅变质作用或矿物蚀变, 主要岩性包括石英闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩、黑云母花岗岩、二云母花岗岩、斑状花岗岩和正长花岗岩等。其中, 前人获得的花岗岩年龄为 $1.87 \sim$

1.96 Ga 及模式年龄为 $2.3 \sim 3.6\text{ Ga}$ ^[16-17] (图 1)。三个主要片岩带北西-南东或近东西向分布于班韦乌卢地块东部, 其间被 $50 \sim 60\text{ km}$ 宽的花岗岩体隔开。其中, 北部的曼布韦片岩带全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 $1\,869 \pm 40\text{ Ma}$ ^[11]。火山岩主要分布于班韦乌卢地块北部和西部地区, 主要为集块岩、角砾岩和细粒凝灰岩, 夹有凝灰熔岩。火山岩具有高钾钙碱性化学特征^[15], 曼萨地区的变质火山岩全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 $1\,816 \pm 22\text{ Ma}$ ^[11]。其它侵入体主要分布于班韦乌卢地块北部及东北部, 主要包括辉长岩、闪长岩和英云闪长岩。

沉积盖层从下至上依次为古元古代穆瓦超群的姆波罗科索 (Mporokoso) 群, 中元古代卡萨马 (Kasama) 群, 新元古代加丹加超群中的 Luitikila 地层和卢阿普拉 (Luapula) 地层, 新生代河流相和湖泊沉积物^[1]。其中, 姆波罗科索群包括姆巴拉组、萨马组、卡布韦卢马组和奇波特组。

2 样品采集及描述

正长花岗岩 (D1246) 在野外出露面积较小, 且露头较差, 未见与其他岩性的直接接触界线。岩石风

收稿日期: 2019-09-01

资助项目: 中国地质调查局项目“非洲中南部重要矿床地质背景、成矿作用和找矿潜力研究 (1212011220910)”；商务部技术援外项目“援赞比亚北部省卡萨马地区区域地质与地球化学调查 ([2012]558)”；“援赞比亚东北地区航空物探和地质地球化学综合填图 ([2015]352)”

作者简介: 任军平 (1980-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事地质矿产勘查与研究, E-mail: rjp2333@126.com; *通讯作者: 王杰 (1964-), 男, 教高, 从事地质矿产勘查工作, E-mail: wangjie513046@163.com。

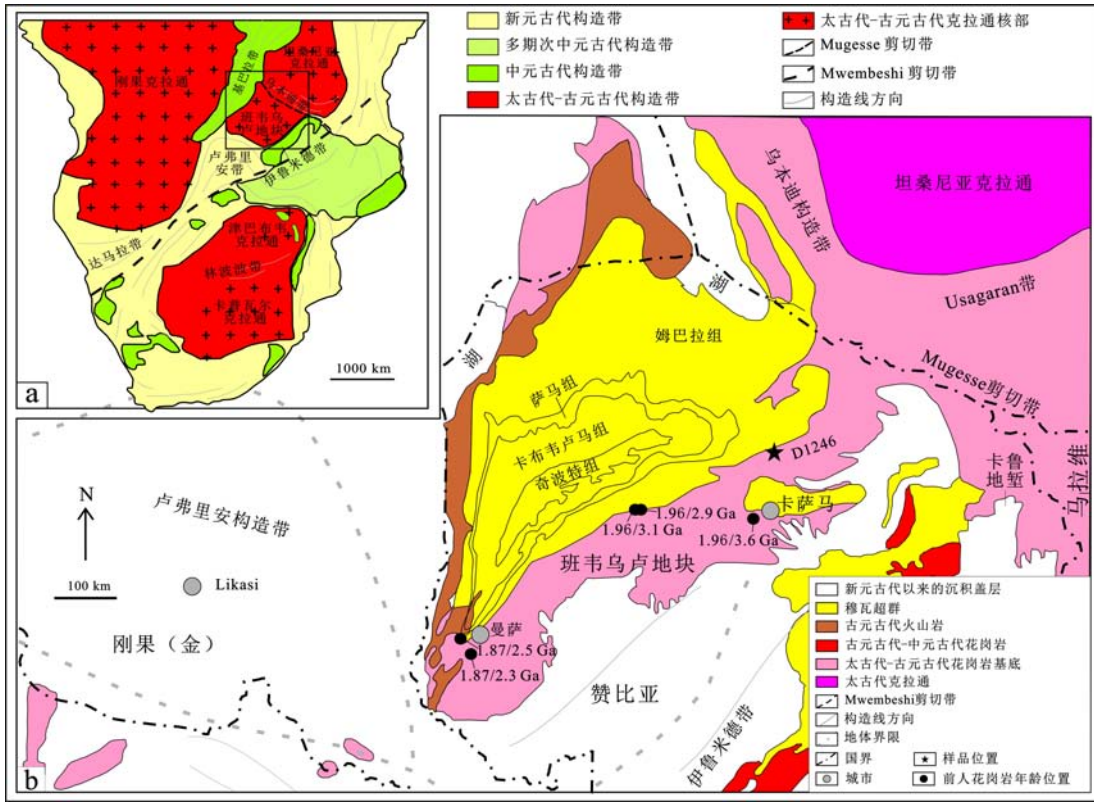


图1 研究区大地构造位置(a,据参考文献[16]修改)及地质图(b)

Fig.1 Tectonic map (a, modified from [16]) and geological map for study area(b)

化面呈浅红色,新鲜面呈肉红色,球状风化。采集样品的地理坐标:E31°03'59",S9°30'06"(图1)。

正长花岗岩具中粒花岗结构,块状构造。主要由石英(30%~35%)、钾长石(45%~50%)、斜长石(20%±),少量黑云母和白云母组成(图2)。副矿物为磷灰石和少量金属矿物。石英为它形粒状,波状消光,粒径为1~3 mm;钾长石为柱状,粒径为2~4 mm;斜长石为柱状,聚片双晶发育,弱高岭土化、绢云母化,粒径为1~4 mm;黑云母和白云母呈片状,片径为0.1~0.5 mm。

3 分析方法

3.1 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素

锆石单矿物分选由河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成。首先将新鲜的原岩样品破碎全部通过筛网,淘洗粉末后得到重砂部分,再采用电磁分选、重液分选等手段,获得纯度较高的锆石单矿物样品。随后,从中挑选出锆石颗粒制作成环氧树脂靶,打磨和抛光样品靶使得大多数锆石颗粒的中心出露。根据锆石颗粒的可见光和CL图像(图3),避开

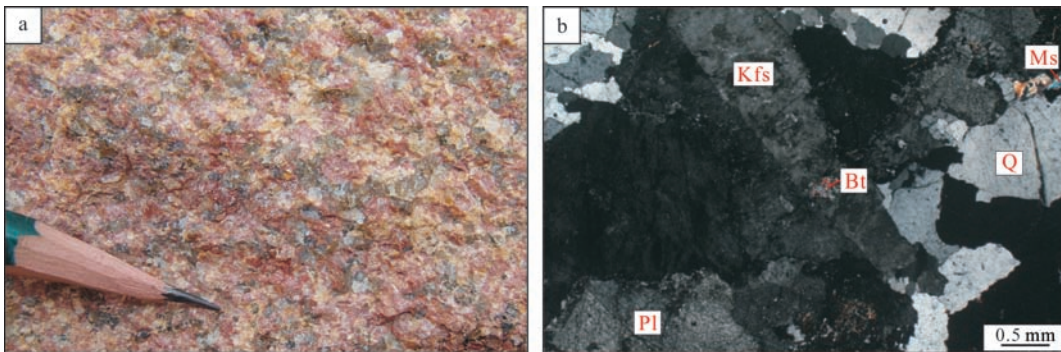


图2 样品野外及显微镜下照片

Fig.2 Field and microscope photograph of the sample
Q. 石英;Kfs. 钾长石;Pl. 斜长石;Bt. 黑云母;Ms. 白云母

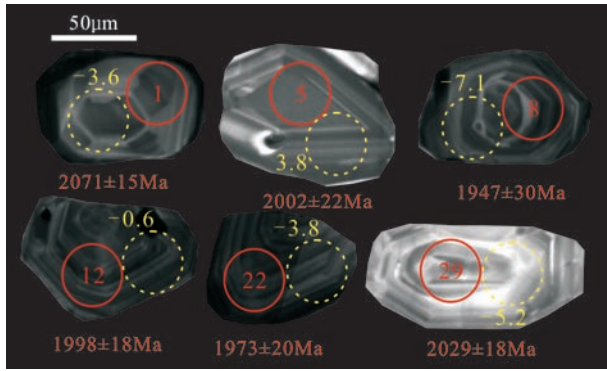


图3 正长花岗岩样品锆石阴极发光(CL)图像、²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb年龄及ε_{Hf}(t)值

Fig.3 CL images, U-Pb isotopic ages and ε_{Hf}(t) values of zircons

晶体中的裂纹、包裹体及不同结晶世代的区域,选取合适的测点位置。其中,正长花岗岩样品的锆石呈自形椭圆状-短柱状,长宽比为1/1~1/2,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,具体参数见参考文献^[18]。其中,本次锆石年龄测试用的激光束斑直径为35 μm,剥蚀深度约为20 μm。采用中国地质大学刘勇胜博士研发的ICP MS-DataCal程序^[19]和Isoplot程序^[20]进行数据处理,并采用²⁰⁸Pb校正法对普通铅进行校正^[21]。利用SRM610玻璃标样作为外标计算锆石样品的U、Pb和Th含量。

3.2 锆石Lu-Hf同位素

原位微区锆石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。采用单点剥蚀,激光束斑直径为35 μm,剥蚀深度约为20 μm。具体分析方法见参考文献^[22]。

4 分析结果

4.1 LA-MC-ICP-MS 锆石U-Pb同位素

采用LA-MC-ICP-MS方法测得正长花岗岩样品的U-Pb同位素结果见表1、图3和图4。样品的同位素分析数据大部分落在谐和线上,少量偏离谐和线。从图4可见,该样品可能受后期构造作用的影响。17个有效点的Th/U比值为0.06~0.93,²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb年龄加权平均值为2 011 ± 20 Ma(N=17,MSWD=3.9)。

4.2 锆石Lu-Hf同位素

在U-Pb同位素测试的基础上,对正长花岗岩中的锆石进行了Lu-Hf同位素测试,测试结果见表2和图5。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。

对正长花岗岩中锆石进行Lu-Hf同位素测试,获得12个有效测点。结果显示12颗锆石的¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf值为0.000 8~0.003 0,¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf值为0.281 364~0.281 768,(¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_i值为0.281 319~0.281 715。ε_{Hf}(t)值为-7.1~6.6,平均值为-2.2。其中,9个负值对应的T_{DM2}年龄变化范围为3 018~2 612 Ma,3个正值对应的T_{DM1}年龄变化范围为2 384~2 107 Ma。T_{DM1}年龄变

表1 正长花岗岩LA-MC-ICP-MS 锆石U-Pb同位素测试结果

Tab.1 LA-MC-ICP-MS U-Pb isotopic results of zircons

测试点号	含量/10 ⁻⁶			Th/U	同位素比值						同位素年龄 / Ma					
	Pb	U	Th		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ
1	28	65	36	0.55	0.376 3	0.002 6	6.642 7	0.178 0	0.128 0	0.001 1	2 059	14	2 065	55	2 071	15
4	72	179	85	0.47	0.361 0	0.002 5	6.077 0	0.170 9	0.122 1	0.001 5	1 987	14	1 987	56	1 987	22
5	54	133	52	0.39	0.365 5	0.002 5	6.202 9	0.184 9	0.123 1	0.001 5	2 008	14	2 005	60	2 002	22
6	68	147	112	0.76	0.375 8	0.003 2	6.351 7	0.172 8	0.122 6	0.001 3	2 056	17	2 026	55	1 994	18
7	50	114	71	0.62	0.364 1	0.003 0	6.244 5	0.175 7	0.124 4	0.001 4	2 001	17	2 011	57	2 020	20
8	60	131	74	0.56	0.387 7	0.002 9	6.382 6	0.192 5	0.119 4	0.002 0	2 112	16	2 030	61	1 947	30
10	89	226	181	0.80	0.348 6	0.002 6	5.721 1	0.167 9	0.119 0	0.001 8	1 928	14	1 935	57	1 942	27
11	20	48	24	0.50	0.377 0	0.002 8	6.729 2	0.183 2	0.129 5	0.001 3	2 062	15	2 076	57	2 091	18
12	57	137	73	0.53	0.368 2	0.002 9	6.237 2	0.168 3	0.122 8	0.001 2	2 021	16	2 010	54	1 998	18
14	33	74	33	0.45	0.390 6	0.002 8	7.072 2	0.228 5	0.131 3	0.002 2	2 126	15	2 121	69	2 116	29
17	30	62	47	0.76	0.376 1	0.002 6	6.426 0	0.176 9	0.123 9	0.001 4	2 058	14	2 036	56	2 013	19
18	52	103	51	0.49	0.394 7	0.002 8	7.093 4	0.198 7	0.130 3	0.001 7	2 145	15	2 123	59	2 103	23
19	55	136	9	0.06	0.385 0	0.002 8	6.722 3	0.242 4	0.126 6	0.003 4	2 100	15	2 076	75	2 052	47
20	26	53	28	0.53	0.360 1	0.005 0	6.113 4	0.197 1	0.123 1	0.001 4	1 983	27	1 992	64	2 002	20
22	63	121	33	0.27	0.354 1	0.003 8	5.914 2	0.163 8	0.121 1	0.001 4	1 954	21	1 963	54	1 973	20
23	54	107	38	0.35	0.379 1	0.002 9	6.606 9	0.295 6	0.126 4	0.003 4	2 072	16	2 060	92	2 048	48
24	61	120	98	0.82	0.370 1	0.002 9	6.222 7	0.171 3	0.121 9	0.001 2	2 030	16	2 008	55	1 985	18
25	55	117	80	0.69	0.355 3	0.003 8	6.016 4	0.166 9	0.122 8	0.001 4	1 960	21	1 978	55	1 998	20
28	107	239	179	0.75	0.357 9	0.002 4	5.923 2	0.162 3	0.120 0	0.001 2	1 972	13	1 965	54	1 957	17
29	71	139	129	0.93	0.383 8	0.003 6	6.617 9	0.181 2	0.125 0	0.001 2	2 094	19	2 062	56	2 029	18

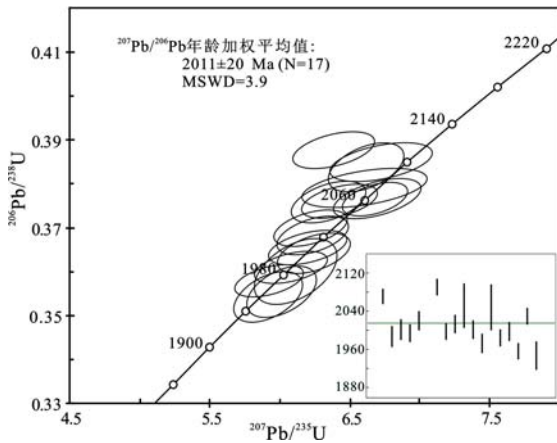


图4 正长花岗岩锆石U-Pb谐和图

Fig.4 Zircon U-Pb dating concordia diagram

化范围为2 677~2 107 Ma,平均值为2 451 Ma。T_{DM2}年龄变化范围为3 018~2 184 Ma,平均值为2 724 Ma,明显大于锆石的形成年龄。在锆石年龄-ε_{Hf}(t)图解中,样品的数据投点整体位于球粒陨石演化线两侧,说明原始岩浆的不均一性,锆石的原始岩浆可能为新太古代-古元古代地壳与幔源混染物质。

5 地质意义

利用LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 方法获得卡萨马北部正长花岗岩体的成岩年龄为 2 011 ± 20 Ma (N=17,MSWD=3.9),再次验证班韦乌卢地块形成于古元古代。结合区域地质资料,正长花岗岩体的形成

表2 正长花岗岩LA-MC-ICP-MS 锆石 Lu-Hf 同位素测试结果

Tab.2 Data of LA-MC-ICP-MS zircons Lu-Hf dating

测试点号	锆石 ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb 年龄 / Ma	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	(¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf) _i	ε _{Hf} (0)	ε _{Hf} (t)	T _{DM1} / Ma	T _{DM2} / Ma	f _{Lu/Hf}
01	2 071	0.037 6	0.000 9	0.281 399	0.000 026	0.281 363	-48.5	-3.6	2 584	2 889	-0.97
04	1 987	0.087 0	0.002 0	0.281 548	0.000 023	0.281 476	-43.3	-4.4	2 453	2 778	-0.94
05	2 002	0.068 0	0.002 1	0.281 694	0.000 028	0.281 616	-38.1	3.8	2 248	2 382	-0.94
06	1 994	0.054 5	0.001 4	0.281 535	0.000 031	0.281 481	-43.7	-1.2	2 431	2 681	-0.96
07	2 020	0.122 4	0.002 7	0.281 424	0.000 030	0.281 319	-47.7	-6.3	2 677	3 018	-0.92
08	1 947	0.033 8	0.000 9	0.281 375	0.000 027	0.281 344	-49.4	-7.1	2 612	3 010	-0.97
10	1 942	0.079 2	0.001 9	0.281 506	0.000 037	0.281 433	-44.8	-3.7	2 506	2 809	-0.94
12	1 998	0.074 7	0.001 9	0.281 510	0.000 024	0.281 436	-44.6	-0.6	2 495	2 719	-0.94
22	1 973	0.125 1	0.003 0	0.281 696	0.000 046	0.281 600	-38.1	-3.8	2 303	2 612	-0.91
23	2 048	0.044 9	0.001 2	0.281 480	0.000 032	0.281 437	-45.7	-6.0	2 493	2 866	-0.96
24	1 985	0.044 1	0.001 4	0.281 567	0.000 039	0.281 513	-42.6	1.3	2 384	2 575	-0.96
25	1 998	0.062 9	0.001 4	0.281 768	0.000 033	0.281 715	-35.5	6.6	2 107	2 184	-0.96
29	2 029	0.031 0	0.000 8	0.281 364	0.000 031	0.281 333	-49.8	-5.2	2 625	2 970	-0.98

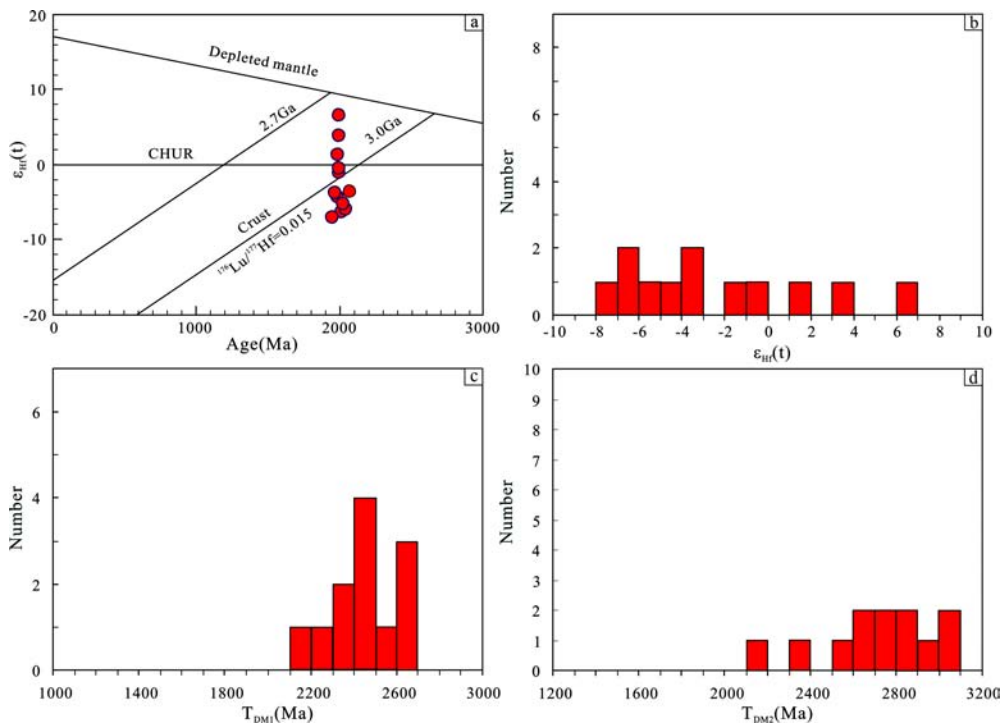


图5 锆石 Lu-Hf 同位素特征

Fig.5 Lu-Hf isotopic composition of the zircons

a. 锆石 Age(Ma)-ε_{Hf}(t)图解;b. 锆石 ε_{Hf}(t)值的频率柱状分布图;c,d. 分别为第一阶段和第二阶段 Hf 模式年龄柱状分布图

可能与古元古代乌本迪构造带的活动(2 050 ~ 1 840 Ma^[23])有关。岩石中锆石Hf同位素分析表明 T_{DM2} 年龄变化范围为3 018 ~ 2 184 Ma,平均值为2 724 Ma;具有不均一的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值(-7.1 ~ 6.6)显示形成正长花岗岩的原始岩浆具有壳幔混合的特点,可能为新太古代-古元古代地壳与幔源混染物质。附近的坦桑尼亚克拉通内锆石年龄显示其地壳生长主要包括2 850 ~ 2 800 Ma,2 770 ~ 2 730 Ma和2 700 ~ 2 620 Ma三个阶段^[24],这与正长花岗岩中锆石Hf同位素分析 T_{DM2} 年龄平均值2 724 Ma相似。因此,班韦乌卢地块可能是早期的坦桑尼亚克拉通的一部分。

参考文献:

- [1] Andersen L S, Unrug R. Geodynamic evolution of the Bangweulu Block, northern Zambia[J]. *Precambrian Research*, 1984, 25: 187-212.
- [2] De Waele B, Li é geois J-P, Nemchin A A, et al. 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*, 2006,148: 225-256.
- [3] 任军平,王杰,刘晓阳,等.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*, 2013, 32(5):142-152.
- [4] 任军平,左立波,许康康,等.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*, 2016, 4:979-996.
- [5] 任军平,王杰,古阿雷,等.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*, 2017a, 26(11): 139-144.
- [6] 任军平,王杰,刘晓阳,等.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)*, 2017b, 47(4):1083-1103.
- [7] 任军平,王杰,古阿雷,等.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*, 2018, 52(12): 2275-2282.
- [8] 任军平,王杰,左立波,等.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*, 2019. DOI: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2019148.
- [9] 任军平,王杰,孙宏伟,等.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*, 2019, 46(3): 575-586.
- [10] 邢仕,张金达,任军平,等.非洲中南部伊鲁米德构造带演化及成矿作用探讨[J]. *地质调查与研究*, 2018, 41(3): 176-184.
- [11] Brewer M S, Haslam H W, Darbyshire D P F, et al. Rb-Sr age determinations in the Bangweulu Block, Luapula Province, Zambia[R]. Institute of Geological Sciences, London, 1979, Report 79/5: 1-11.
- [12] De Waele B, Fitzsimons I C W. 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*, 2007,159: 95-116.
- [13] Master S, Rainaud C, Armstrong R A, et al. Provenance ages of the Neoproterozoic Katanga Supergroup (Central African Copperbelt), with implications for basin evolution[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2005,42(1): 41-60.
- [14] Armstrong R A, Master S, Robb L J. Geochronology of the Nchanga Granite, and constraints on the maximum age of the Katanga Supergroup, Zambian Copperbelt[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2005, 42(1): 32-40.
- [15] Unrug R. The Mid-Proterozoic Mporokoso Group of northern Zambia: stratigraphy, sedimentation and regional position[J]. *Precambrian Research*, 1984,24: 99-121.
- [16] De Waele B, Kampunzu A B, Mapani B S E, et al. The Mesoproterozoic Irumide belt of Zambia[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2006b, 46, 36-70.
- [17] Debruyne D, Wilderode J V, Balcaen L, et al. Geochemistry and isotopic evolution of the central African Domes, Bangweulu and Irumide regions: Evidence for cryptic Archean sources and a Paleoproterozoic continental arc[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2014,100:145-163.
- [18] Geng J Z, Qiu K F, Gou Z Y, et al. Tectonic regime switch over 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*, 2017,77: 637-651.
- [19] Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al. 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*, 2010,51(1-2): 537-571.
- [20] Ludwig K R. User's manual for Isoplot/Ex, version 3.70.A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003,4: 1-76.
- [21] Anderson T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ²⁰⁴Pb[J]. *Chemical Geology*, 2002,192(1/2): 59-79.
- [22] 耿建珍,李怀坤,张健,等.锆石Hf同位素组成的LA-MC-ICP-MS测定[J]. *地质通报*, 2011, 30:1508-1513.
- [23] Kazimoto E O, Schenk V, Appel P. Granulite-facies metamorphic events in the northwestern Ubendian Belt of Tanzania: Implications for the Neoproterozoic to Paleoproterozoic crustal evolution[J]. *Precambrian Research*, 2015, 256: 31-47.
- [24] Sanislav I V, Wormald R J, Dirks P H G M, et al. 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*, 2014, 242:187-204.