

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.01.003

赞比亚东北部陇都地区首次发现中元古代辉长岩： 哥伦比亚超大陆裂解在班韦乌卢地块的响应

古阿雷¹,任军平^{1*},王杰¹,左立波¹,孙宏伟¹,许康康¹,陈靖²EZEKIAH Chikambwe³,EVARISTO Kasumba³GU Alei¹,REN Junping^{1*},WANG Jie¹,ZUO Libo¹,SUN Hongwei¹,XU Kangkang¹,
CHEN Jing²,EZEKIAH Chikambwe³,EVARISTO Kasumba³

1.中国地质调查局天津地质调查中心,天津 300170;

2.中信建设有限责任公司,北京 100027;

3.赞比亚地质调查局,赞比亚 卢萨卡 POX.50135

1.Tianjin Center, China Geological Survey (CGS), Tianjin 300170, China;

2.CITIC Construction Co., Ltd., Beijing 100027, China;

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

摘要:赞比亚东北部陇都地区位于班韦乌卢地块中东部,区内首次发现中元古代基性岩浆侵入事件,对于了解班韦乌卢地块中元古代构造演化历史及哥伦比亚超大陆的重建具有重要意义。针对研究区的辉长岩进行了系统的岩相学、LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学和锆石 Hf 同位素研究。结果表明,辉长岩锆石中 17 粒具有他形板柱状,内部结构呈条带状、面状等特征,Th/U 值较高(0.13~1.58),显示基性岩浆锆石属性,²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄加权平均值为 1544±17 Ma,代表了辉长岩的侵入结晶年龄,即中元古代。辉长岩主量元素 SiO₂ 含量介于 49.99%~50.18% 之间,MgO 含量(2.69%~2.78%) 和 Mg[#] 值(24.88~25.70) 较低,TFeO(14.47%~14.62%) 和 TiO₂ 含量(2.68%~2.76%) 较高,属于高钛板内拉斑玄武岩系列岩石;微量元素特征显示:轻、重稀土元素分馏明显((La/Yb)_N=8.53~9.57),具弱的负 Eu 异常(0.82~0.86),大离子亲石元素(LILE) Rb、Ba、Pb 等相对富集,Sr 相对亏损,高场强元素(HFSE)Nb、Ta、Ti 等相对亏损,具有大陆溢流玄武岩(CFB)亲缘性;锆石 Hf 同位素结果显示,辉长岩的原始岩浆起源于中元古代早期亏损地幔源区,形成于板内伸展拉张环境,结合全球构造演化历史,认为班韦乌卢地块应是古—中元古代哥伦比亚超大陆的组成部分,研究区中元古代辉长岩的形成可能与哥伦比亚超大陆的裂解有关。

关键词:中元古代辉长岩;哥伦比亚超大陆裂解;班韦乌卢地块;陇都地区;赞比亚东北部;地质调查工程

中图分类号:P534.3;P588.12⁺4 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2022)01-0034-14

Gu A L, Ren J P, Wang J, Zuo L B, Sun H W, Xu K K, Cheng T S, Chen J, Ezekiah C, Evaristo K. The first discovery of Mesoproterozoic gabbro in Nondo area, Northeastern Zambia: Response of the Bangweulu Block to the Columbia supercontinent breakup. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(1): 34-47

Abstract: The Nondo area is located in the middle east of Bangweulu Block, northeastern Zambia. A Mesoproterozoic mafic magma intrusion event was first discovered in the Nondo area, which is of great significance for the understanding of the evolution of the

收稿日期:2021-05-13;修订日期:2021-09-26

资助项目:商务部技术援外项目《援赞比亚东北地区航空物探和地质地球化学综合填图》(编号:[2015]352)和中国地质调查局项目《莫桑比克-坦桑尼亚钽铌资源调查》(编号:DD20201150)、《南部非洲国际合作地质调查》(编号:DD20221801)

作者简介:古阿雷(1990-),男,博士,高级工程师,从事地质矿产勘查与研究工作。E-mail:244470672@qq.com

*通信作者:任军平(1980-),男,硕士,正高级工程师,从事地质矿产勘查与研究工作。E-mail:rjp2333@126.com

Proterozoic structure in Bangweulu Block and the reconstruction of Columbia supercontinent. The systematic studies of petrology, LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb geochronology, petrogeochemistry and Lu-Hf isotopes were conducted on the gabbro pluton developed in this area. Seventeen zircons from the gabbro show irregular and plate columnar in shape, with zonal and planar structure, and have high Th/U ratios (0.13~1.58), indicating a mafic magma origin. Zircon U-Pb dating yields an average weighted age of 1544 ± 17 Ma, which represents the forming age of gabbro. The pluton is geochemically characterized by low contents of SiO_2 (49.99%~50.18%), MgO (2.69%~2.78%) and $\text{Mg}^\#$ (24.88~25.70) contents and high contents of TFeO (14.47%~14.62%) and TiO_2 (2.68%~2.76%), and belongs to high Ti intraplate tholeiitic series. Its trace elements are characterized by enrichment of large ion lithophile elements (LILEs, e.g., Rb, Ba, and Pb), depletion of Sr and high field strength elements (HFSEs, e.g., Nb, Ta, and Ti), obvious fractionation of light and heavy rare earth elements with $(\text{La}/\text{Yb})_N = 8.53 \sim 9.57$ and weak Eu negative anomaly ($\delta\text{Eu} = 0.82 \sim 0.86$), showing affinity with continental flood basalts (CFB). The zircon Hf isotope results show that the original magma of gabbro was originated from the early Mesoproterozoic depleted mantle and formed in the intraplate extensional environment. Combined with the global tectonic evolution history, it is suggested that the Bangweulu Block should be a part of Paleo-Mesoproterozoic Columbia supercontinent, and the formation of Mesoproterozoic gabbro pluton in the area is probably related to the break-up of the Columbia supercontinent.

Key words: Mesoproterozoic gabbro; Columbia supercontinent breakup; Bangweulu Block; Nondo area; northeastern Zambia; geological survey engineering

对全球前寒武纪造山带及裂谷带的研究表明,在罗迪尼亚(Rodinia)超大陆之前,曾存在一个古—中元古代的超大陆, Rogers 等^[1]将其命名为哥伦比亚(Columbia)超大陆,是 1.9~1.5 Ga 由莱纳(Nena)、乌尔(Ur)和大西洋(Atlantic)3 个大陆块体群,通过逐步汇聚而形成的一个超级大陆;1.6~1.4 Ga,哥伦比亚超大陆边缘和内部发生裂解作用,并在 1.0 Ga 左右,又重新汇聚形成罗迪尼亚超大陆。自哥伦比亚超大陆的概念提出以来,古—中元古代哥伦比亚超大陆的存在被大部分学者认可^[1-11]。尽管如此,对于 Columbia 超大陆的形成时间、超大陆的原始格局、早期拉伸裂解启动的时限等^[9]问题还存在不同认识。例如,对于 Columbia 超大陆的裂解时限方面, Rogers 等认为裂解作用发生在 1.6~1.4 Ga^[1]; Zhao 等^[3]认为裂解作用开始于 1.6 Ga,结束于 1.3~1.2 Ga;赵太平等^[12]通过对比全球大规模发育的沉积裂陷盆地和非造山岩浆活动,认为哥伦比亚超大陆于 1.78 Ga 左右开始发生陆内裂解等。

班韦乌卢地块(Bangweulu Block)位于赞比亚东北部,毗邻坦桑尼亚和刚果(金),是一个古老的克拉通单元,出露面积约 150 000 km²。在地质历史演化过程中,班韦乌卢地块长期受到其东北部古元古代乌本迪构造带、西北部中元古代基巴拉构造带、东南部中元古代伊鲁米德构造带及西南部新元古代卢弗里安构造带的影响(图 1-b)。前

人研究表明,古元古代,巴西圣弗朗西斯科克拉通(São Francisco Craton)与刚果克拉通(Congo Craton)通过 Trans-Amazonian(南美)和 Eburnian(非洲)造山作用结合成统一的克拉通大陆,成为古—中元古代哥伦比亚超大陆的一部分,并认为巴西圣弗朗西斯科克拉通与刚果克拉通在 2.05 Ga~130 Ma 期间,非洲与南美分离之前属于一个整体^[13-15]。尽管班韦乌卢地块被认为属于哥伦比亚超大陆内圣弗朗西斯科-刚果克拉通的一部分^[1, 5-7, 16-18](图 1-a),但是缺乏可靠的古地磁、地质年代学等方面的证据。

基性岩基或大规模岩墙群是判断伸展环境或裂谷环境的重要标志^[19]。近期笔者对班韦乌卢地块中东部陇都地区进行了区域地质调查,发现工作区内存在多处基性-超基性岩墙(脉),可能是哥伦比亚超大陆裂解事件在地块中的记录。前人报道班韦乌卢地块中的构造-岩浆活动主要集中在古元古代^[18-23],本次利用高精度 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年技术对研究区的基性岩进行了年代学研究,首次发现该区存在中元古代辉长岩侵入事件。在此基础上,对该期辉长岩开展了详细的岩相学、主量和微量元素及同位素地球化学研究,以揭示该期岩浆作用的形成背景。同时,本次研究对于了解班韦乌卢地块中元古代构造演化历史,探讨哥伦比亚超大陆在非洲的裂解时限具有重要意义。

1 地质背景及样品描述

班韦乌卢地块包括基底和沉积盖层,其中基底主要包括片岩带、变质火山岩、花岗岩类和其他侵入体^[20]。前人报道的年代学数据显示,班韦乌卢地块结晶基底部分的形成时代主要集中在古元古代 2.0~1.8 Ga^[21-25]。沉积盖层从下至上依次为古元古代姆波罗科索群(Mporokoso)、中元古代卡萨马群(Kasama)、新元古代加丹加超群中的 Luitikila 地层^[26]和卢阿普拉(Luapula)地层,以及新生代河流相和湖泊沉积物。其中,直接覆盖在基底之上的古元古代姆波罗科索群与上覆的中元古代卡萨马群均呈不整合接触。研究区位于班韦乌卢地块中东部,区内地势总体较平坦,海拔约 1400 m,出露的基底主要为花岗岩类和少量变质岩,野外露头差,出露范围较小,多呈单岩体出现,与上覆沉积盖层的接触界线很难识别,多为推测界线。其中,花岗岩类主体岩性为花岗闪长岩、二长花岗岩、黑云母花岗岩、似斑状花岗岩等,局部具较弱的变形特征。通过 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究,获得研究区基底中大量花岗岩类岩石的年龄介于 2030~1913 Ma 之间,属于古元古代,与前人研究结果一致^[27-28]。上覆沉积盖层主要包括姆巴拉组一段、姆巴拉组二段和下卡萨马组一段(图 1-c)。姆巴拉组一段主体岩性为紫红色-浅紫红色砾岩、砂质砾岩、砾质砂岩和含砾石英砂岩,砾石砾径一般为 0.2~2 cm,少数达 5~15 cm;姆巴拉组二段主体岩性为灰白色、浅粉色含砾长石石英砂岩、长石石英砂岩和石英砂岩,碎屑矿物粒径介于 0.2~2 mm 之间,主要成分为石英(一般大于 90%)和长石;下卡萨马组一段主体岩性为浅紫红色页岩,呈薄层状,粉砂泥质结构,层状构造,岩石致密细腻,具贝壳状断口,发育页理和水平层理,见少量绢云母,含量约 10%。前人研究表明,卡萨马群的形成时代可能晚于 1434±14 Ma,其主要物质来源于早期沉积的姆波洛科索群沉积岩,形成于被动大陆边缘环境^[29]。

在研究区,除发育基底和沉积盖层外,本次还发现少量辉长岩墙(脉),产于古元古代基底或姆巴拉组粉砂岩中,由于区内地势平坦,露头出露较差,多沿河流两侧呈孤立的岩包状不连续出露,球形风化明显(图 2-a)。岩石风化面呈青灰色,新鲜面呈灰黑色-深灰色,其辉长结构,块状构造,岩体未发

生变形。主要矿物包括斜长石、辉石和少量石英,副矿物为榍石、金属矿物。斜长石:灰白色,表面混浊,板柱状,聚片双晶发育,局部可见钠黝帘石化与绢云母化,粒径为 0.5~2.5 mm,含量为 70%~75%。辉石:淡绿色、浅褐色,呈半自形填充在自形的板柱状斜长石间形成辉长结构,粒径为 0.5~2 mm,部分蚀变形成角闪石与绿泥石,含量为 20%~25%。石英:无色,他形粒状,粒径为 0.5~1.5 mm,含量约 5%。本次选取新鲜的辉长岩进行全岩元素分析、锆石 U-Pb 和 Hf 同位素测试。采样位置如图 1-c 所示,其中,U-Pb 锆石测年样品 1 件(D2208GS),主量和微量元素测试样品 4 件(D2208、D2208-1、D0040 和 D0040-1)。

2 测试方法

锆石测年样品经过粉碎、淘洗和重磁分选,再在双目镜下选取锆石。锆石分选由河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成,锆石制靶、阴极发光图像观察与照相在北京锆年领航科技有限公司完成。锆石原位 U-Pb 测年在中国地质调查局天津地质调查中心同位素实验室利用激光剥蚀多接收器电感耦合等离子体质谱仪(LA-MC-ICP-MS)完成,将美国 ESI 公司生产的 NEW WAVE 193 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,采用氦气为剥蚀物质的载气,激光束斑直径为 35 μm,剥蚀时间为 30 s,采用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐标准参考物质 NIST610,采用 GJ-1 为外部锆石年龄标准计算 U-Pb 同位素比值。在 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年的基础上,对部分锆石进行微区原位 Hf 同位素测定,锆石 Lu-Hf 同位素测定同样在天津地质调查中心同位素实验室的 LA-MC-ICP-MS 仪器上完成,具体仪器配置和分析流程见参考文献[30]。

本次在研究区辉长岩岩体不同位置采集了 4 件全岩地球化学分析样品,分别于中国地质调查局天津地质调查中心实验室(样品编号 D2208 和 D0040)和中国地质科学院国家地质实验测试中心(样品编号 D2208-1 和 D0040-1)完成分析。分析方法一致,首先用水将样品表面冲洗干净并晾干,机械破碎至 200 目,主量元素用 PW4400/40 型 X 射线荧光光谱仪(XRF)进行分析测试,FeO 采用氢氟酸-

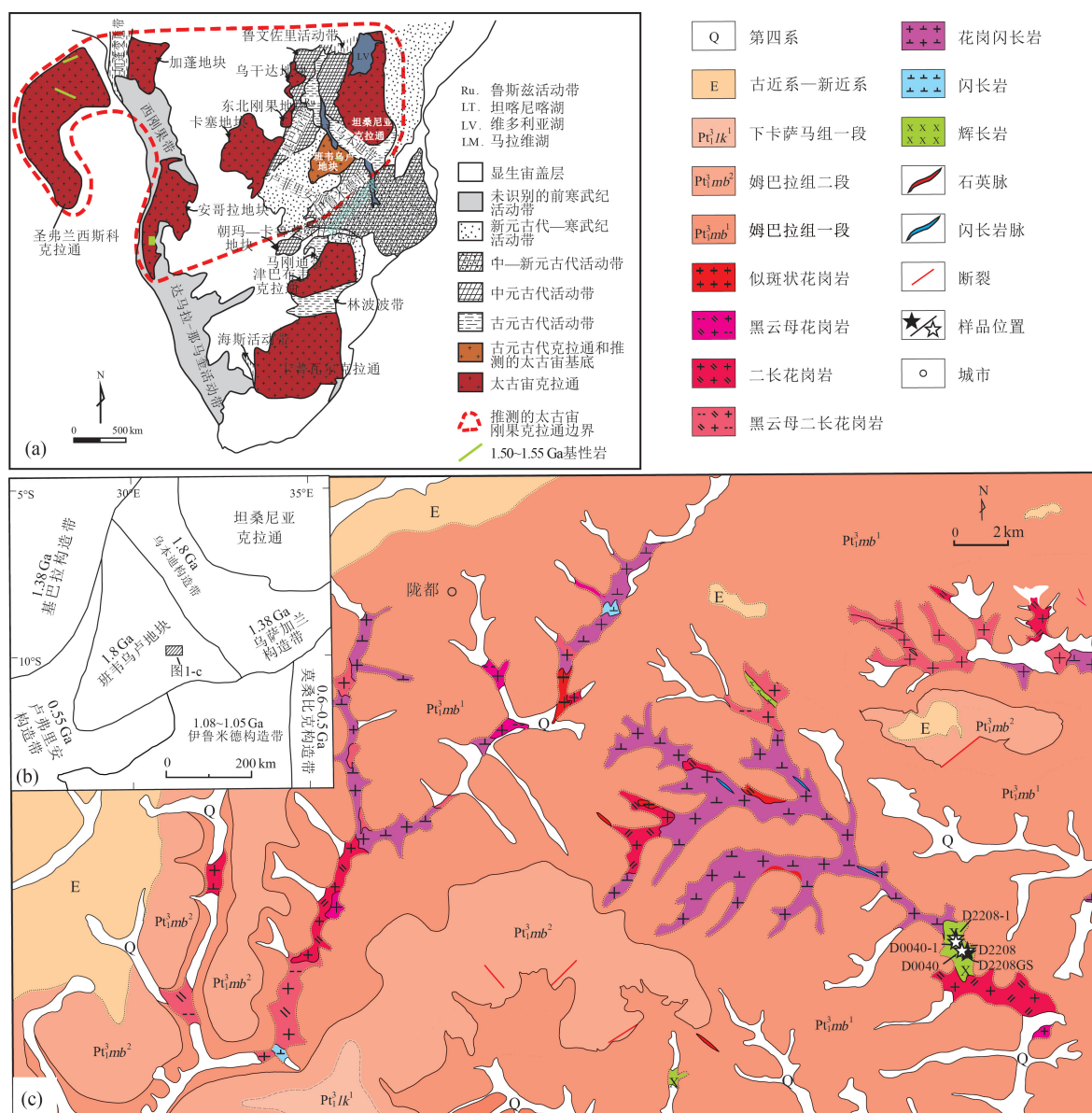


图1 撒哈拉以南非洲地质简图(a)^[14]、大地构造位置图(b)和陇都地区区域地质图(c)

Fig. 1 Simplified geological map of Sub-Saharan Africa (a), tectonic map (b) and geological map of Nondo region (c)



图2 辉长岩野外产出特征(a)、手标本特征(b)和显微特征(c,正交偏光)

Fig. 2 Field photograph (a), hand specimen feature (b) and photomicrograph (c) of the grabbo

Pl—斜长石;Px—辉石

硫酸溶样、重铬酸钾滴定的容量法,分析精度优于 2%,稀土和微量元素测试时使用 X Series II 等离子体质谱仪(ICP-MS)分析,分析精度优于 5%。

3 分析结果

3.1 岩石地球化学特征

3.1.1 主量元素

陇都地区辉长岩样品分析结果见表 1。结果显示,样品烧失量较低,均不超过 2% (1.69% ~ 1.86%)。SiO₂ 含量介于 49.99%~50.18%之间;K₂O 为 2.31%~2.36%,Na₂O 为 2.68%~2.83%,Na₂O+K₂O 含量在 5.03%~5.16%之间,相对富钠(Na₂O/K₂O=1.14~1.23);TiO₂ 含量较高(2.68%~2.76%),明显高于岛弧型玄武岩(0.98%)和洋脊拉斑玄武岩(1.5%),介于洋岛拉斑玄武岩(2.63%)和板内碱性玄武岩之间(2.90%)^[31];MgO 含量和 Mg[#] 值较低,分别为 2.69%~2.78%和 24.88~25.70,Mg[#] 值远小于原始岩浆的值(Mg[#]=68~75)^[32],反映岩浆演化过程中经历了较强的结晶分异作用。在岩石分类图解(图 3)上,样品点落入碱性夏威夷与亚碱性玄武岩区的边界范围。

3.1.2 微量元素

陇都地区辉长岩稀土元素总量(ΣREE)较高,

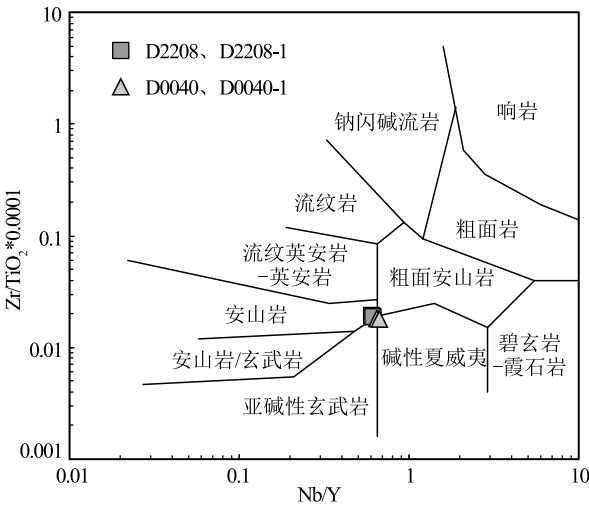


图 3 陇都地区辉长岩岩石分类图

Fig. 3 Lithological classification of the gabbro in the Nondo area

为 $366 \times 10^{-6} \sim 406 \times 10^{-6}$ 。LREE/HREE = 7.24 ~ 7.78, (La/Yb)_N = 8.53 ~ 9.57, 在球粒陨石标准化稀土元素配分曲线图上,轻、重稀土元素分馏明显,配分曲线呈右倾型,类似于洋岛玄武岩(OIB),不同于大洋中脊玄武岩(MORB)(图 4-a);(La/Sm)_N 值为 2.79~2.88,(Gd/Yb)_N 值为 2.15~2.26,轻、重稀土元素内部均发生较明显的分馏;δEu 值为 0.82~0.86,

表 1 陇都地区辉长岩主量、微量和稀土元素组成

Table 1 Whole-rock major and trace element composition of the gabbro from the Nondo area

样品号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	烧失量	总量	Na ₂ O/ K ₂ O+		A/NK	A/CNK	Mg [#]
														K ₂ O	Na ₂ O			
D2208	50.00	14.38	2.68	3.95	10.94	0.2	2.76	5.91	2.83	2.31	0.86	1.73	98.55	1.23	5.14	2.01	0.80	25.5
D2208-1	50.18	14.19	2.75	4.28	10.62	0.2	2.78	5.99	2.8	2.36	0.91	1.69	98.75	1.19	5.16	1.98	0.78	25.7
D0040	50.04	14.28	2.76	3.77	11.23	0.21	2.69	6.09	2.68	2.35	0.87	1.77	98.74	1.14	5.03	2.05	0.79	24.9
D0040-1	49.99	14.24	2.76	3.93	11.05	0.21	2.71	6.09	2.71	2.35	0.87	1.86	98.77	1.15	5.06	2.03	0.79	25.1
样品号	Cs	Ba	Hf	Ta	W	Th	U	Sn	Li	Be	V	Cr	Co	Ni	Rb	Sr	Zr	Nb
D2208	1.43	890	13.1	2.46	1.19	13.5	1.85	3.1	7.62	3.14	175	18	38.6	26.5	86.3	250	490	37.6
D2208-1	0.92	918	12.9	2.39	0.59	13.5	1.68	3.62	8.46	3.29	179	14.4	42.3	26.5	77.3	247	496	37.6
D0040	1.04	930	13.7	2.81	0.75	14.4	1.95	3.6	8.76	3.27	171	15.4	39.8	27.1	83.4	255	517	35.9
D0040-1	1.02	941	13.8	2.82	0.7	14.8	1.98	3.77	8.68	3.51	172	14.9	39.6	26.8	83.1	254	523	36.2
样品号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	(La/Yb) _N	δEu
D2208	70.1	141	18.7	77.6	15.8	4.16	14.9	2.23	12.2	2.29	6.3	0.88	5.54	0.85	59.1	372.55	8.53	0.82
D2208-1	68.2	144	17.4	74.5	15	4.14	14.2	1.99	11.8	2.18	5.87	0.84	5.29	0.79	58.2	366.20	8.69	0.86
D0040	72.5	151	19.4	80.3	16.1	4.3	14.5	2.36	12.5	2.28	6.29	0.86	5.45	0.83	58.1	388.67	8.97	0.84
D0040-1	76.5	159	20.3	82.8	16.7	4.49	15.1	2.38	12.8	2.37	6.47	0.9	5.39	0.84	59.1	406.04	9.57	0.85

注:TFE=0.8998×Fe₂O₃+FeO;Mg[#]=100×MgO/(MgO+TFE);主量元素含量单位为%,微量和稀土元素含量单位为 10⁻⁶

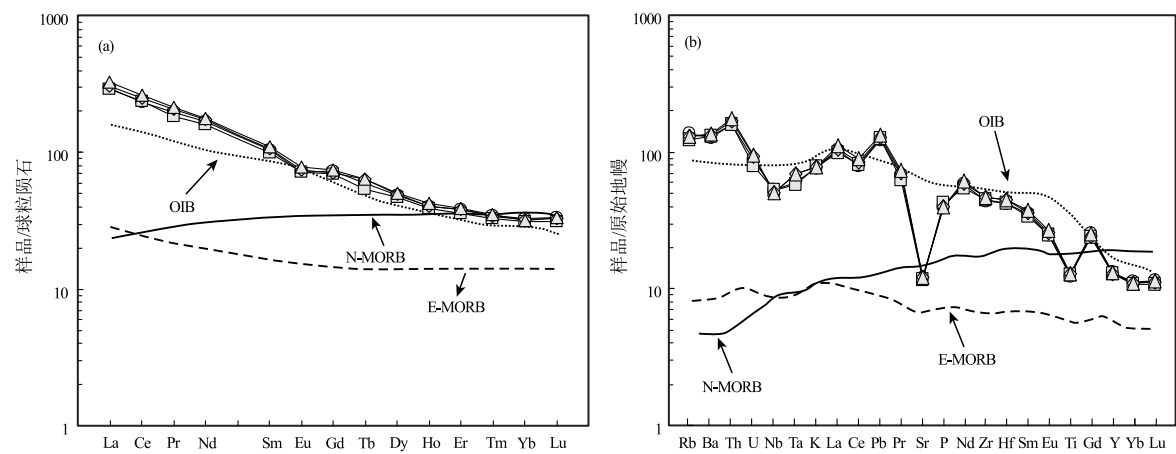


图 4 辉长岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式图 (a) 和原始地幔标准化微量元素蛛网图 (b)
(球粒陨石标准化值据参考文献[33];原始地幔标准化值据参考文献[34];OIB,E-MORB 和 N-MORB 数据据参考文献[35])

Fig. 4 Chondrite-normalized REE element patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams (b) of the gabbro
OIB—洋岛玄武岩;E-MORB—富集型洋中脊玄武岩;N-MORB—正常型洋中脊玄武岩

Eu 显示弱负异常。微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 4-b)显示,大离子亲石元素(LILE)Rb、Ba 相对富集,Sr 明显亏损,可能受后期蚀变作用的影响。高场强元素(HFSE)Nb、Ta、Ti 等相对亏损,与富集型(E-MORB)和正常型洋中脊玄武岩(N-MORB)具有明显区别,相对于洋岛玄武岩(OIB),

样品亏损 Nb、Ta,富集 Pb、Th。

3.2 锆石 U-Pb 年代学

样品 D2208GS(位置:南纬 9°42'51"、东经 31°26'4")的分析数据见表 2,由于本次所测样品的锆石年龄均大于 1.0 Ga,其结果采用²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄计算。根据锆石阴极发光图像和测试数据,可以分为 3 组(图 5、图 6)。

表 2 陇都地区辉长岩(D2208GS)LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 测年数据

Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb data of the gabbro(sample D2208GS) in the Nondo area

编号	元素含量/10 ⁻⁶		Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
	Th	U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
1	715	1407	0.51	0.0923	0.0056	3.6376	0.3816	0.2672	0.0055	1473	116	1558	84	1527	28
2	1540	2934	0.53	0.0920	0.0017	3.4023	0.0724	0.2691	0.0011	1533	36	1505	17	1536	5
3	538	1086	0.50	0.0969	0.0040	3.6889	0.1609	0.2762	0.0028	1565	77	1569	35	1572	14
4	2221	2399	0.93	0.0956	0.0046	3.7530	0.3165	0.2716	0.0084	1540	90	1583	68	1549	42
5	711	1294	0.55	0.0946	0.0039	3.6100	0.1435	0.2778	0.0028	1521	79	1552	32	1580	14
6	647	853	0.76	0.1175	0.0036	5.8321	0.2248	0.3594	0.0074	1920	56	1951	33	1979	35
9	1525	1410	1.08	0.0964	0.0035	3.5184	0.2242	0.2577	0.0073	1555	69	1531	50	1478	37
10	1829	1827	1.00	0.0952	0.0031	3.4574	0.1075	0.2638	0.0021	1531	29	1518	25	1509	11
11	1664	1576	1.06	0.0980	0.0039	3.8067	0.1808	0.2794	0.0035	1587	68	1594	38	1589	18
12	625	606	1.03	0.1142	0.0013	5.2183	0.0664	0.3315	0.0027	1933	21	1856	11	1846	13
13	160	233	0.69	0.1254	0.0029	6.4519	0.1772	0.3728	0.0040	2035	41	2039	24	2043	19
16	1830	2656	0.69	0.0936	0.0046	3.6013	0.3362	0.2666	0.0108	1500	93	1550	74	1523	55
17	1369	2164	0.63	0.0976	0.0024	3.5412	0.1734	0.2558	0.0047	1589	46	1536	39	1468	24
18	2092	2597	0.81	0.0958	0.0025	3.7139	0.1259	0.2817	0.0021	1543	50	1574	27	1600	11
19	1397	886	1.58	0.0969	0.0015	3.2307	0.0649	0.2417	0.0016	1565	29	1465	16	1395	8
20	1181	2876	0.41	0.0945	0.0032	3.4486	0.2862	0.2444	0.0082	1520	65	1516	65	1409	42
21	1546	1428	1.08	0.1988	0.0025	14.9144	0.5665	0.5452	0.0203	2816	20	2810	36	2805	85
22	181	1411	0.13	0.0958	0.0019	3.5145	0.1477	0.2631	0.0050	1544	37	1530	33	1505	25
26	447	838	0.53	0.0947	0.0019	3.5205	0.1402	0.2586	0.0032	1524	36	1532	31	1483	16
27	1680	2626	0.64	0.0934	0.0009	3.4049	0.0521	0.2644	0.0017	1495	22	1506	12	1512	9
29	719	1745	0.41	0.0965	0.0008	3.5826	0.0350	0.2698	0.0019	1567	15	1546	8	1540	10

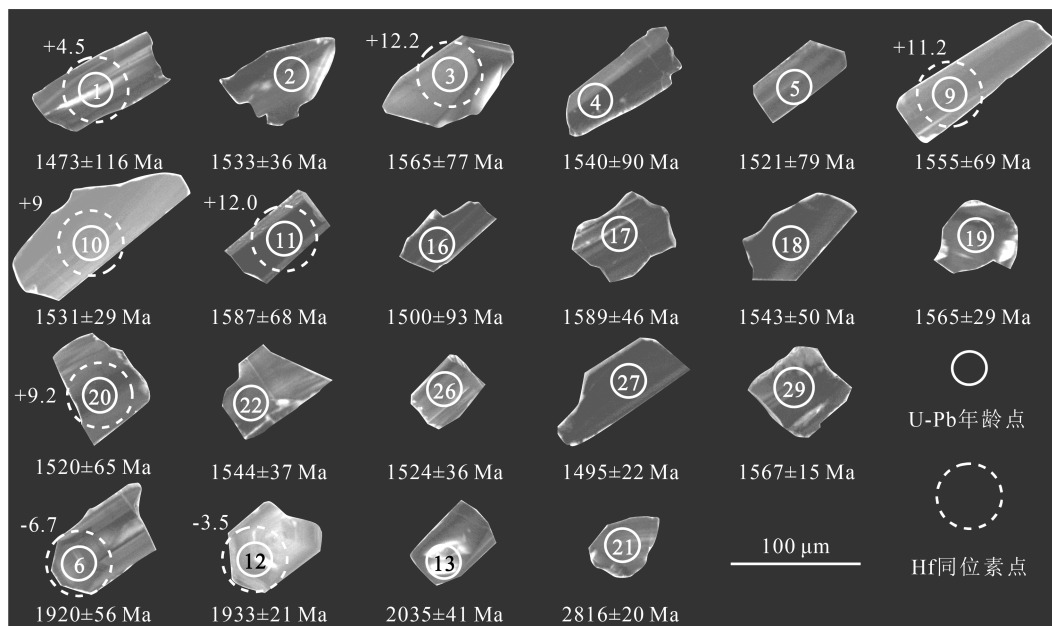


图5 陇都辉长岩锆石阴极发光 (CL) 图像及分析点位

Fig. 5 CL images and analysis positions for the zircons from the Nondo gabbro

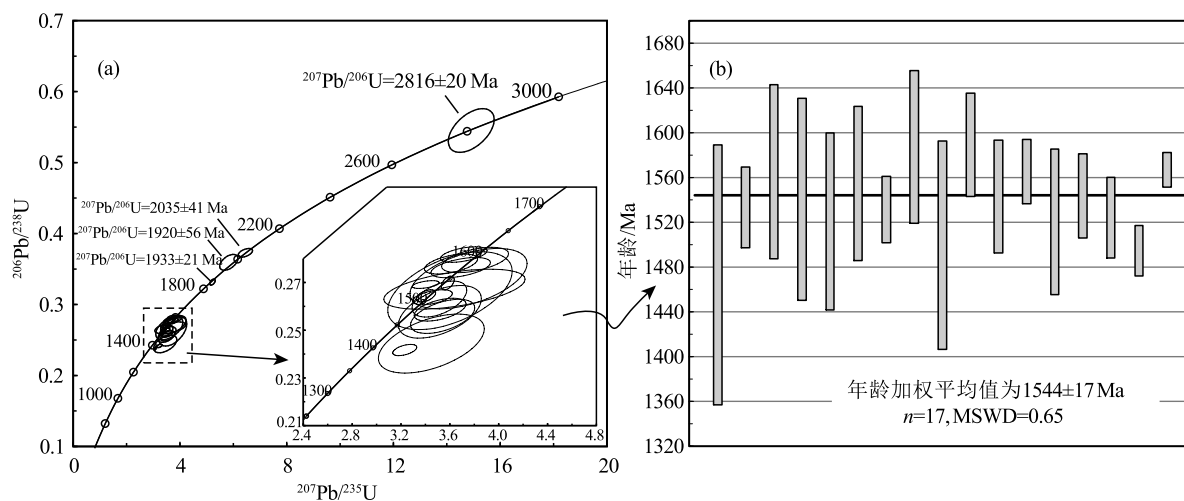


图6 陇都辉长岩锆石 U-Pb 年龄图

Fig. 6 Zircon U-Pb age diagram for the Nondo gabbro

第一组: 锆石呈柱状、锥柱状结构, 粒径为 70~130 μm , 长宽比 1:1~3:1, 锆石具有较高的 Th、U 含量 ($\text{Th} = 463 \times 10^{-6} \sim 3449 \times 10^{-6}$, $\text{U} = 1994 \times 10^{-6} \sim 5040 \times 10^{-6}$), 阴极发光强度较弱, 内部结构均匀, 呈条带状, 所测定 17 粒锆石的 Th/U 值为 0.13~1.58 (>0.1), 属典型基性岩浆成因锆石^[36]。单颗粒锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄介于 1473~1589 Ma 之间, 年龄加权平均值为 1544 ± 17 Ma ($\text{MSWD} = 0.65$, $n =$

17), 代表了辉长岩的结晶年龄。

第二组: 锆石呈短柱状, 粒径为 70~110 μm , 隐约可见成分环带结构, Th 含量为 $463 \times 10^{-6} \sim 3449 \times 10^{-6}$, U 含量为 $1994 \times 10^{-6} \sim 5040 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.69~1.03, 与典型岩浆成因锆石一致^[37]。 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄在 $1920 \pm 56 \sim 2035 \pm 41$ Ma 之间, 为捕获的古元古代岩浆锆石。

第三组: 锆石呈他形粒状, 粒径为 50 μm , 边部

隐约可见环带结构, Th 含量为 1546×10^{-6} , U 含量为 1428×10^{-6} , Th/U 值为 1.08, 具有岩浆锆石属性。其 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 2816 Ma, 可能为捕获的太古宙岩浆锆石。

3.3 Hf 同位素特征

在 U-Pb 定年的基础上, 对辉长岩中的锆石进行 Lu-Hf 同位素分析, 获得 9 个有效数据(表 3), 包括 7 颗中元古代和 2 颗古元古代锆石的 Lu-Hf 同位素数据。结果显示, 除锆石样品 D2208-12 的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值大于 0.002 外, 其余均小于 0.002, 表明锆石在形成后基本没有明显的放射性成因 Hf 的积累, 所测样品的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值基本代表了其形成时体系的 Hf 同位素组成^[38]。中元古代锆石的 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$ 和 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分别在 0.281975 ~ 0.282132 和 4.5 ~ 12.2 之间, 在年龄- $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图(图 7)上, 样品点落于亏损地幔附近或亏损地幔和球粒陨石之间; 计算得到锆石单阶段亏损地幔 Hf 模式年龄 T_{DM1} 为 1538 ~ 1757 Ma, 接近锆石结晶年龄, 表明锆石母岩浆可能直接来源于亏损地幔; 古元古代锆石的 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$ 和 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分别在 0.281373 ~ 0.281455 和 -6.7 ~ -3.5 之间, 与待发表的古元古代基底的 Hf 同位素特征一致, 进一步表明古元古代的捕获锆石可能来源于研究区的基底部分。

4 讨 论

4.1 形成时代

野外地质特征表明, 陇都辉长岩沿河谷发育, 围岩为古元古代基底或姆波洛科索群姆巴拉组, 中元古代卡萨马群卡萨马组中未见该期辉长岩出露。前人在对研究区卡萨马组薄层砂岩夹层碎屑锆石测年中, 获得的最小岩浆成因碎屑锆石年龄为 1540 Ma,

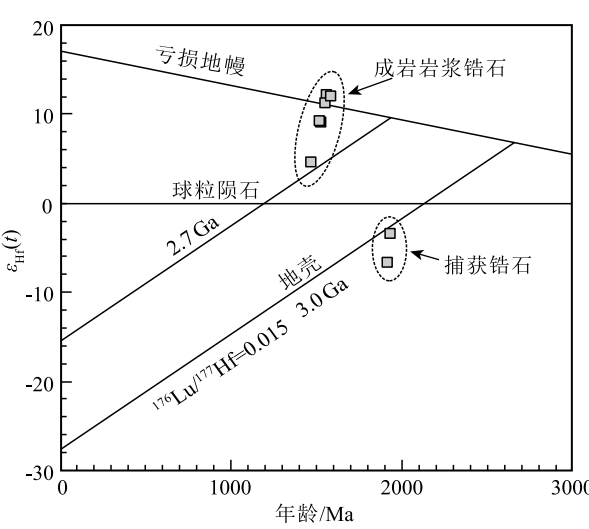


图 7 陇都辉长岩锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 与年龄图解

Fig. 7 Plot of $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ vs age of zircons from the Nondo gabbro

单颗粒锆石的 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$ 值为 0.281448, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -12.6, T_{DM1} 值为 2474 Ma, T_{DM2} 值为 3041 Ma^[29]; 笔者获得姆巴拉组一段凝灰岩的年龄为 1875 Ma (未发表), 说明辉长岩的年龄介于 1540 ~ 1875 Ma 之间。本次年代学研究表明, 辉长岩中的第一组锆石呈他形板柱状, 内部结构呈条带状、面状(图 5), Th/U 值在 0.13 ~ 1.58 之间(平均值 0.71), 与基性岩浆结晶的锆石类似, 因此其 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 (1544 ± 17 Ma) 代表了辉长岩的结晶时代, 表明赞比亚陇都地区存在中元古代基性岩浆事件, 与野外地质事实一致。该年龄与巴西圣弗兰西斯科克拉通基性岩墙 (1506.7 ~ 1501 Ma) 及西非刚果克拉通安哥拉地区辉绿岩岩体 (1502 ± 4 Ma) 的形成时代一致^[5-6]。结合研究区卡萨马组砂岩夹层的碎屑岩锆石年龄和 Hf 同位素特征, 笔者认为, 研

表 3 陇都地区辉长岩 (D2208GS) 锆石 Hf 同位素测试结果

Table 3 Hf isotopic compositions of the gabbro (Sample D2208GS) in the Nondo area

编号	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2 σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	T_{DM1}/Ma	T_{DM2}/Ma	$f_{\text{Lu/Hf}}$
01	1473	0.0220	0.0008	0.281996	0.000073	0.281975	-27.4	4.5	1757	1928	-0.96
03	1565	0.0242	0.0009	0.282158	0.000114	0.282132	-21.7	12.2	1538	1522	-0.97
06	1920	0.0401	0.0012	0.281418	0.000089	0.281373	-47.9	-6.7	2580	2963	-0.96
09	1555	0.0399	0.0013	0.282150	0.000125	0.282111	-22.0	11.2	1567	1575	-0.96
10	1531	0.0519	0.0016	0.282111	0.000163	0.282063	-23.4	9.0	1636	1696	-0.95
11	1587	0.0228	0.0007	0.282133	0.000050	0.282112	-22.6	12.0	1565	1552	-0.98
12	1933	0.0665	0.0022	0.281536	0.000063	0.281455	-43.7	-3.5	2481	2777	-0.93
20	1520	0.0239	0.0008	0.282099	0.000062	0.282077	-23.8	9.2	1615	1673	-0.98

究区中元古代辉长岩并非孤立的岩浆事件,可能存在同时期的酸性岩浆活动。

此外,本次测年过程中,获得多颗捕获的具有岩浆锆石属性的年龄值,包括第二组年龄:介于 $1920 \pm 56 \sim 2035 \pm 41$ Ma 之间,与区域大量发育的古元古代中酸性侵入岩相呼应^[27];第三组年龄:2816 Ma,显示了太古宙古老残留锆石的年龄信息,这一结果也得到近年研究成果的验证,如研究区古元古代花岗岩中存在大量 $2606 \sim 2841$ Ma 的捕获锆石年龄信息^[27]。结合本次获得的锆石年龄信息表明,班韦乌卢地块可能存在太古宙的结晶基底。

4.2 岩石成因

4.2.1 蚀变作用对元素的影响

通过野外和镜下观察显示,岩石组分辉石部分蚀变形成角闪石与绿泥石,斜长石表面局部也可见钠黝帘石化与绢云母化。地球化学分析显示较高的烧失量特征 ($LOI = 1.69\% \sim 1.73\%$),表明其后期可能遭受了一定程度的蚀变作用。通常情况下,K、Ca、Na 等活性组分容易受后期蚀变作用的影响,高场强元素(Nb、Ta、Zr、Hf 等)、HREE 等非活性元素不受后期热液蚀变改造作用的影响。因此,本文多采用非活性元素进行岩石分类、源区特征、构造环境等方面的讨论。

4.2.2 分离结晶与地壳混染

岩石地球化学数据显示,陇都地区中元古代辉长岩主量元素 SiO_2 含量介于 $50.0\% \sim 50.2\%$ 之间, MgO 含量 ($2.76\% \sim 2.78\%$) 和 $Mg^\#$ 值 ($25.5 \sim 25.7$) 较低, $TFeO$ (14.5%) 和 TiO_2 含量 ($2.68\% \sim 2.75\%$) 较高,属于高钛拉斑玄武岩系列岩石。此外,样品具有极高的 $TFeO$ 和 TiO_2 含量,可能在岩浆演化过程中,发生了含有铁钛化合物的堆晶作用。 $Mg^\#$ 值和固结指数 (SI) 常可作为岩浆结晶分异的粗略指标,未分异初始岩浆的 $Mg^\#$ 值一般介于 $60 \sim 71$ 之间^[39],大多数原生玄武岩的固结指数 $SI \geq 40$,岩浆在发生结晶分异时,一般由富镁向贫镁方向演化,残余熔浆的固结指数会迅速降低^[40]。研究区辉长岩 $Mg^\#$ 值 ($25.5 \sim 25.7$) 和固结指数均较低 ($12.1 \sim 12.2$),而且其具有较低的 Cr、Co、Ni 含量 ($Cr = 14.4 \times 10^{-6} \sim 18 \times 10^{-6}$, $Co = 38.6 \times 10^{-6} \sim 42.3 \times 10^{-6}$, $Ni = 26.5 \times 10^{-6}$) (表 1)。以上特征表明,它们不是原生岩浆,而可能是原生岩浆经历了较强的结晶分异作用的残余岩浆。Eu、Sr 及 Ti 的负异常,指示岩浆在演

化过程中可能经历了一定程度地斜长石、金红石或钛铁矿的分离结晶作用,进一步证实了上述推论。

元素 Th、Nb、Ta 在蚀变及变质过程中较稳定,但容易受到地壳混染作用的影响,是地壳混染的重要指标。大陆地壳通常富集 Th,强烈亏损 Nb 和 Ta,在微量元素蛛网图上,辉长岩呈现 Th 正异常和 Nb、Ta 强烈负异常的配分模式,指示其很可能受到地壳物质的混染作用;结合辉长岩中含有较多来源于班韦乌卢地块基底和沉积盖层的捕获锆石,指示辉长岩在形成过程中,发生了较强烈的地壳混染。辉长岩的 La/Nb 值为 $1.81 \sim 1.86$,接近地壳 (2.2),而明显高于原始地幔 ($0.98 \sim 1.00$); Th/Ta 值为 $5.12 \sim 5.65$,介于原始地幔 (2.3) 和地壳 (一般大于 10) 之间。以上证据均表明,原生岩浆在上升过程中可能遭遇地壳物质的混染作用。

4.2.3 源区性质

TiO_2 的含量通常能指示岩石的源区性质^[41],一般由地壳岩石部分熔融产生的岩浆 TiO_2 含量很低 (平均仅 0.72%),来自软流圈岩浆的 TiO_2 含量在 1.27% 左右,而与深部地幔物质活动有关的岩浆 TiO_2 含量常大于 2.0% 。研究区辉长岩样品 TiO_2 含量较高 ($2.68\% \sim 2.76\%$),均大于 2.0% ,与夏威夷热点玄武岩一致,反映其岩浆起源深度较大。

辉长岩微量元素地球化学结果表明,其富集 Rb、Ba 等大离子亲石元素,相对亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素,明显不同于 E-MORB 和 N-MORB。极强的轻、重稀土元素分异,类似 OIB 的微量元素组成 (图 4-a);在原始地幔多元素蛛网图中,与典型 OIB 相比,样品亏损 Nb、Ta,富集 Pb、Th,显示大陆溢流玄武岩 (CFB) 的亲缘性 (图 4-b),可能受地幔柱活动影响的控制。

由于锆石 Lu-Hf 同位素体系具有较高的封闭温度,锆石 Hf 同位素比值不会随后期部分熔融或分离结晶而变化^[42],近年,Hf 同位素的源区示踪研究已经被广泛应用^[43]。对岩浆岩锆石 Hf 同位素的研究表明,通常具有较低 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 和 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值的岩石往往指示其源区为地壳或是经过地壳的强烈混染作用;而具有较高 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 及 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值的岩石直接来自地幔或由幔源物质分异的新生壳源物质的部分熔融^[44]。陇都辉长岩中元古代锆石的 $(^{176}Hf/^{177}Hf)_i$ 和 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值分别在 $0.281975 \sim 0.282132$ 和

4.5~12.2 之间,在年龄- $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图(图 7)上,样品点落于亏损地幔附近或亏损地幔和球粒陨石之间;计算得到锆石单阶段亏损地幔 Hf 模式年龄 T_{DM1} 为 1538~1757 Ma,接近锆石结晶年龄,表明锆石母岩浆可能直接来源于亏损地幔。此外, δ_{Nb} 值 [$\delta_{\text{Nb}} = 1.74 + \log(\text{Nb}/\text{Y}) - 1.92 \log(\text{Zr}/\text{Y})$] 常被用来判别岩浆源区性质,来自亏损地幔源区的岩石一般小于 0^[45]。本次通过计算获得研究区辉长岩的 δ_{Nb} 值为 -0.22~-0.24,小于 0,说明它们来自于亏损地幔源区,与 Hf 同位素数据显示的特征一致。

综上所述,笔者认为,研究区中元古代辉长岩原始岩浆来自于亏损地幔源区,为一套大陆板内形成的溢流玄武岩,在演化过程中发生了较强的结晶分异作用,且岩浆在上升过程中可能遭受地壳物质的混染作用。

4.3 构造意义

年代学研究表明,研究区中元古代辉长岩形成时代为 1544 ± 17 Ma,与巴西圣弗兰西斯科克拉通基性岩墙及西非刚果克拉通安哥拉地区辉绿岩岩体的形成时代一致,有力地支撑了前人认为的班韦乌卢地块属于哥伦比亚超大陆内圣弗朗西斯科-刚果克拉通的一部分的观点。Ernst 等^[6] 通过对比全球范围内各克拉通单元的中元古代板内岩浆岩活动事件,发现 1508~1502 Ma 和 1380 Ma 是对应哥伦比亚超大陆裂解的 2 次重要时间节点,而圣弗朗西斯科-刚果克拉通中,对哥伦比亚超大陆裂解响应

的事件包括:巴西圣弗朗西斯科克拉通中基性岩墙年龄为 1506.7~1501 Ma,安哥拉西南部辉绿岩岩体年龄为 1502 ± 4 Ma,基巴拉带中发育 1370~1380 Ma 双峰式侵入岩^[46]。Ernst 等^[19] 采用 U-Pb 同位素稀释热电离质谱法(ID-TIMS),获得横跨西伯利亚北部 700 km 的 Kuonamka 大火山岩省(LIP)内 7 件基性岩墙(基)的年龄加权平均值(1501 ± 3 Ma),与圣弗朗西斯科-刚果克拉通内基性岩墙(基)的时代一致(1503~1508 Ma),结合它们相似的地球化学特征,认为西伯利亚克拉通与圣弗朗西斯科-刚果克拉通在哥伦比亚超大陆存在时期或为一体,并可能存在大于 2000 km 的超大规模火山岩省事件;Baratoux 等^[47] 对西非克拉通南部长达 1000 km 的基性岩群开展了斜锆石 U-Pb 年代学研究,发现存在一期重要的中元古代早期基性岩浆事件(约 1525 Ma),并与邻区亚马逊克拉通圭亚那地盾发现的一期事件时代相近(1528 Ma),可能构成了一条重要的 LIP 条形码线。

陇都地区辉长岩代表的基性岩浆侵入事件反映,中元古代研究区整体可能为伸展拉张的环境。在构造环境判别图解 $2\text{Nb}-\text{Zr}/4-\text{Y}$ (图 8-a)中,样品点落入板内拉斑玄武岩区,在 $\text{Y}/15-\text{La}/10-\text{Nb}/8$ (图 8-b)图解中,样品点落入大陆玄武岩区,接近 CFB 区域。据此判断,班韦乌卢地块东北部陇都中元古代辉长岩形成于板内伸展拉张环境。而前期对研究区内卡萨马群的研究表明,区内中元古代卡

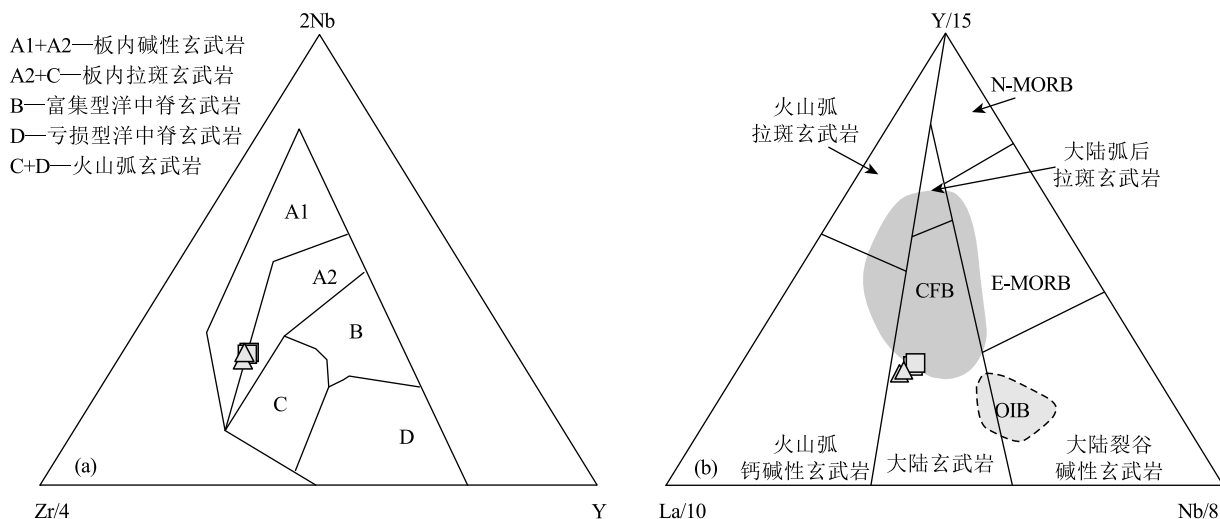


图 8 陇都辉长岩 $2\text{Nb}-\text{Zr}/4-\text{Y}$ (a)^[48] 和 $\text{Y}/15-\text{La}/10-\text{Nb}/8$ (b)^[49] 构造环境图解

Fig. 8 $2\text{Nb}-\text{Zr}/4-\text{Y}$ (a) and $\text{Y}/15-\text{La}/10-\text{Nb}/8$ (b) tectonic discrimination diagrams for the Nondo gabbro
OIB—洋岛玄武岩; E-MORB—富集型洋中脊玄武岩; N-MORB—正常型洋中脊玄武岩; CFB—大陆溢流玄武岩



图9 约1.5 Ga 哥伦比亚超大陆重建图(据参考文献[52]修改)

Fig. 9 Reconstruction of the Columbia supercontinent during ca.1.5 Ga

AM—亚马逊; AU—澳大利亚; BA—波罗地; CA—华夏; CO—刚果; EA—东南极洲; IN—印度; LA—劳伦; NC—华北; OB—欧龙布鲁克; SB—西伯利亚; SF—圣弗朗西斯科; TA—塔里木; WAF—西非; YZ—扬子

萨马群形成于被动大陆边缘伸展环境(小于 1434 ± 14 Ma)^[29]。以上表明,1544~1434 Ma,班韦乌卢地块为板内伸展环境,而这一时期恰恰与哥伦比亚超大陆的裂解时间相对应^[3]。此外,本次获得的辉长岩年龄与巴西圣弗朗西斯科克拉通基性岩墙(1506.7~1501 Ma)、刚果克拉通安哥拉地区辉绿岩岩体(1502 ± 4 Ma)、中国塔里木克拉通东北缘辉绿岩床(1551 ± 8 Ma)^[8]、劳伦古陆 Thelon 盆地 Kuungmi 组橄榄安粗岩(1540 ± 30 Ma)^[50]、西伯利亚克拉通北部 Kuonamka 岩墙(1503 ± 5 Ma)^[6]、波罗地大陆芬娜斯堪地盾(Fennoscandian shield)中部 Värmland 辉绿岩(1569 ± 3 Ma)^[51]等的形成时代相近(表4)。地球化学特征表明,以上基性岩均形成于板内伸展环境^[6-8]。上述证据表明,1.55~1.50 Ga,全球范围内可能存在一次重要的超大陆裂解事件(图9)。

综上所述,笔者认为,班韦乌卢地块应是古一中元古代哥伦比亚超大陆的组成部分,中元古代辉长岩侵入事件是班韦乌卢地块对哥伦比亚超大陆裂解的响应。

5 结 论

(1)赞比亚东北部陇都地区辉长岩锆石呈他形板柱状,内部结构呈条带状、面状,Th/U 值较高(0.13~1.58),显示基性岩浆锆石的属性,²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄加权平均值为 1544 ± 17 Ma,代表了辉长岩的侵位结晶年龄,即中元古代。

(2)地球化学特征显示,区内中元古代辉长岩具有低 Mg,高 Fe、Ti 等特征,属于板内拉斑玄武岩系列,大离子亲石元素 Rb、Ba、Pb 等相对富集、Sr 相对亏损,高场强元素 Nb、Ta、Ti 等相对亏损,显示大陆溢流玄武岩的亲缘性。结合锆石 Hf 同位素结果,表明辉长岩母岩浆起源于亏损地幔源区,且岩浆在上升过程中受到壳源物质的混染。

(3)中元古代辉长岩形成于板内伸展拉张环境,结合全球构造演化历史,认为班韦乌卢地块应是古一中元古代哥伦比亚超大陆的组成部分,区内中元古代辉长岩的形成可能与哥伦比亚超大陆的裂解有关。

表 4 1.55~1.50 Ga 全球代表性基性岩浆事件
Table 4 Representative mafic magmatic events in the world during 1.55~1.50 Ga

序号	岩性名称	产出状态	年龄/Ma	测试矿物	测年方法	产地	大地构造位置	参考文献
1	辉绿岩	岩床	1549-1551	锆石	SHRIMP;LA-MC-ICP-MS	中国库鲁克塔格地区	塔里木克拉通	[8,52]
2	辉长闪长岩	岩脉	1513-1531	锆石	LA-ICP-MS	中国川西通安镇	扬子克拉通西南缘	[9]
3	橄榄安粗岩	火山熔岩	1540±30	斜锆石	SIMS	加拿大北部 Thelon 盆地	劳伦古陆	[52]
4	辉绿岩、辉长岩 岩墙(基)群		1501±3	斜锆石	ID-TIMS	Kuonamka 大火山岩省	西伯利亚克拉通北部	[21]
5	辉绿岩	岩墙	1501±9.1	斜锆石	ID-TIMS	巴西 Chapada Diamantina	圣弗兰西斯科克拉通中部	[5]
6	辉绿岩	岩墙	1506.7±6.9	斜锆石	ID-TIMS	巴西 Curaçá	圣弗兰西斯科克拉通东北部	[5]
7	辉长岩	岩基	1514±22	锆石	-	圣弗兰西斯科盆地	圣弗兰西斯科克拉通	[19]
8	辉绿岩	岩基	1502±5	斜锆石	TIMS	安哥拉 Humpata	刚果克拉通	[6]
9	辉绿岩	岩墙	1519-1523	斜锆石	TIMS	布基纳法索中部	西非克拉通	[51]
10	辉绿岩	岩墙	1521±2	斜锆石	TIMS	加纳西北部	西非克拉通	[51]
11	辉绿岩	岩墙	1525±3	斜锆石	TIMS	布基纳法索南部	西非克拉通	[51]
12	辉绿岩	岩墙	1528±2	斜锆石	TIMS	圭亚那南部	亚马逊克拉通	[51]
13	辉长岩	岩基	1544±17	锆石	LA-MC-ICP-MS	赞比亚东北部	班韦乌卢地块	本文

致谢:感谢中国地质调查局天津地质调查中心王惠初和李怀坤研究员对本文提供的宝贵建议,感谢审稿专家提出的建设性意见。

参考文献

[1] Rogers J J W, Santosh M. Configuration of Columbia, a Mesoproterozoic supercontinent[J]. Gondwana Research, 2002, 5(1): 5-22.
[2] Zhao G C, Cawood P A, Wilde S A, et al. Review of global 2.1-1.8 Ga orogens: Implications for a Pre-Rodinia supercontinent[J]. Earth - Science Reviews, 2002, 59: 125-162.
[3] Zhao G C, Sun M, Wilde S A, et al. A Paleoproterozoic supercontinent: Assembly, growth and breakup [J]. Earth - Science Reviews, 2004, 67(1/2): 91-123.
[4] 陆松年, 杨春亮, 李怀坤, 等. 华北古大陆与哥伦比亚超大陆[J]. 地质前缘, 2002, 9(4): 225-233.
[5] Silveira E M, Söderlund U, Oliveira E P, et al. First precise U-Pb baddeleyite ages of 1500 Ma mafic dykes from the São Francisco Craton, Brazil, and tectonic implications[J]. Lithos, 2013, 174: 144-156.
[6] Ernst R E, Pereira E, Hamilton M A, et al. Mesoproterozoic intraplate magmatic 'barcode' record of the Angola Portion of the Congo

Craton: newly dated magmatic events at 1505 and 1110 Ma and implications for Nuna (Columbia) supercontinent reconstructions [J]. Precambrian Research, 2013, 230: 103-118.
[7] Meert J G, Santosh M. The Columbia supercontinent revisited [J]. Gondwana Research, 2017, 50: 67-83.
[8] 张健, 李怀坤, 张传林, 等. 塔里木克拉通东北缘 Columbia 超大陆裂解事件: 库鲁克塔格地区辉绿岩床的地球化学、锆石 U-Pb 年代学和 Hf-O 同位素证据[J]. 地质前缘, 2018, 25(6): 106-123.
[9] 耿元生, 旷红伟, 杜利林, 等. 从哥伦比亚超大陆裂解事件论古/中元古代的界限[J]. 岩石学报, 2019, 35(8): 2299-2324.
[10] 赵小明, 胡在龙, 裴毅俊, 等. 海南三亚中元古代变质砾岩的发现及其对 Columbia 超大陆裂解的指示[J]. 地质通报, 2021, 40(6): 880-888.
[11] 张恒, 高林志, 张传恒, 等. 扬子板块西南部古元古代岩浆及变质事件——兼论扬子板块对 Nuna 超大陆事件的响应[J]. 地质通报, 2019, 38(11): 1777-1789.
[12] 赵太平, 庞岚尹, 仇一凡, 等. 古/中元古代界线 1.8 Ga[J]. 岩石学报, 2019, 35(8): 2281-2298.
[13] Feybesse J L, Johan V, Triboulet C, et al. The West Central African Belt: A model of 2.5-2.0 Ga accretion and two-phase orogenic evolution[J]. Precambrian Research, 1998, 87: 161-216.

- [14] Janasi V A, Freitas V A, Heaman L H. The onset of flood basalt volcanism, Northern Paraná Basin, Brazil: A precise U - Pb baddeleyite/zircon age for a Chapecó -type dacite [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 302: 147-153.
- [15] Schannor M, Lana C, Fonseca M A. São Francisco -Congo Craton break-up delimited by U -Pb -Hf isotopes and trace -elements of zircon from metasediments of the Araçuaí Belt [J]. *Geoscience Frontiers*, 2019, 10(2): 611-628.
- [16] De Waele B, Johnson S P, Pisarevsky S A. Palaeoproterozoic to Neoproterozoic growth and evolution of the eastern Congo Craton: Its role in the Rodinia Puzzle [J]. *Precambrian Research*, 2008, 160 (1/2): 127-141.
- [17] Danderfer A, De Waele B, Pedreira A J, et al. New geochronological constraints on the geological evolution of Espinhaço Basin within the São Francisco Craton -Brazil [J]. *Precambrian Research*, 2009, 170: 116-128.
- [18] Salminen J M, Evans D A D, Trindade R I F, et al. Paleogeography of the Congo/São Francisco Craton at 1.5 Ga: Expanding the Core of Nuna Supercontinent [J]. *Precambrian Research*, 2016, 286: 195-212.
- [19] Ernst R E, Okrugin A V, Veselovskiy R V, et al. The 1501 Ma Kuonamka Large Igneous Province of northern Siberia: U - Pb geochronology, geochemistry, and links with coeval magmatism on other crustal blocks [J]. *Russian Geology and Geophysics*, 2016, 57 (5): 653-671.
- [20] Unrug, R. The mid - Proterozoic Mporokoso Group of northern Zambia: Stratigraphy, sedimentation and regional position [J]. *Precambrian Research*, 1984, 24(2): 99-121.
- [21] Brewer M S, Haslam H W, Darbyshire P F P, et al. Rb -Sr age determinations in the Bangweulu Block, Luapula Province, Zambia [M]. London: Institute of Geological Sciences, 1979: 1-100.
- [22] De Waele B, Liégeois 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.
- [23] 任军平, 王杰, 古阿雷, 等. 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*, 2019, 42(3): 161-186.
- [24] 许康康, 刘晓阳, 谢薇, 等. 班韦卢地块和伊鲁米德带区域地质及构造演化特征 [J]. *地质与勘探*, 2018, 54(1): 69-81.
- [25] 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.
- [26] 孙宏伟, 王杰, 任军平, 等. 中非卢非里安地区铀矿化特征与资源潜力分析 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2020, 50(6): 1660-1674.
- [27] 古阿雷, 王杰, 任军平, 等. 赞比亚北部卡帕图地区古元古代花岗岩成因: 岩石地球化学、锆石年代学及 Hf 同位素约束 [J]. *地质学报*, 2021, 95(4): 999-1018.
- [28] 古阿雷, 王杰, 任军平, 等. 赞比亚中部泛非期 Hook 岩基地质特征及成矿潜力分析 [J]. *地质调查与研究*, 2020, 43(1): 63-71.
- [29] 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.
- [30] 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(10): 1508-1513.
- [31] 张玉, 裴先治, 李瑞保, 等. 东昆仑东段阿拉思木辉长岩锆石 U - Pb 年代学、地球化学特征及洋盆闭合时限界定 [J]. *中国地质*, 2017, 44(3): 526-540.
- [32] Wilson M. *Igneous Petrogenesis: A Global tectonic approach* [M]. London: Unwin Hyman, 1989: 1-466.
- [33] Boynton W V. *Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies* [J]. *Rare Earth Element Geochemistry*, 1984: 63-114.
- [34] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications of mantle composition and processes [C]// Saunders A D, Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society of London, Special Publication, 1989, 42: 313-345.
- [35] Gu A L, Sun J G, Bai L A, et al. Petrogenesis and geodynamic significance of the Ganhe Formation lavas, eastern Great Xing'an Range, China: Evidence from geochemistry and geochronology [J]. *Island Arc*, 2016, 25(2): 87-110.
- [36] Vavra G, Schmid R, Gebauer D. Internal morphology, habit and U - Th - Pb microanalysis of amphibolite - to - granulite facies zircons: Geochronology of the Ivrea Zone (Southern Alps) [J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 1999, 134(4): 380-404.
- [37] Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2002, 143: 602-622.
- [38] Knudsen T L, Griffin W, Hartz E, et al. In - situ hafnium and lead isotope analyses of detrital zircons from the Devonian sedimentary basin of NE Greenland: A record of repeated crustal reworking [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2001, 141(1): 83-94.
- [39] Langmuir C H, Bender J F, Bence A E, et al. Petrogenesis of basalts from the Famous Area: Mid - Atlantic Ridge [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1977, 36(1): 133-156.
- [40] 赵磊, 吴泰然, 罗红玲. 内蒙古乌拉特中旗北七哥陶辉长岩 SHRIMP 锆石 U - Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 2011, 27(10): 3071-3082.
- [41] 朱弟成, 莫宣学, 王立全, 等. 新特提斯演化的热点与洋脊相互作用: 西藏南部晚侏罗世 - 早白垩世岩浆作用推论 [J]. *岩石学报*, 2008, 24(2): 225-237.
- [42] Scherer E E, Cameron K L, Blichert - Toft J. Lu - Hf garnet geochronology: Closure temperature relative to the Sm - Nd system and the effects of trace mineral inclusions [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(19): 3413-3432.
- [43] 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. Lu - Hf 同位素体系及其岩石学应用 [J]. *岩石学报*, 2007, 23(2): 185-220.
- [44] Peter D K, Roland M. Lu - Hf and Sm - Nd Isotope Systems in zircon [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2003, 53(1): 327-341.
- [45] Fitton J G, Saunders A D, Norry M J, et al. Thermal and chemical structure of the Iceland Plume [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1997, 153(3/4): 197-208.
- [46] Tack L, Wingate M T D, De Waele B, et al. The 1375 Ma Kibaran event in Central Africa: Prominent emplacement of bimodal magmatism under extensional regime [J]. *Precambrian Research*,

2010, 180: 63–84.

- [47] Baratoux L, Söderlund U, Ernst R E, et al. New U–Pb baddeleyite ages of mafic dyke swarms of the West African and Amazonian cratons: Implication for their configuration in supercontinents through time[C]//Srivastava R K, Ernst R E, Peng P. Dyke Swarms of the World: A Modern Perspective. Springer, Singapore, 2019: 263–314.
- [48] Meschede M A Method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb–Zr–Y diagram[J]. Chemical Geology, 1986, 56(3): 207–218.
- [49] Cabanis B, Lecolle M. Le Diagramme La/10–Y/15–Nb/8: Un Outil pour La Discrimination Des Series Volcaniques Et La Mise En Evidence Des Processus De Melange et/ou De Contamination

Crustale[J]. Comptes Rendus de l'Academie des Sciences: Serie II, 1989, 309: 2023–2029.

- [50] Chamberlain K R, Schmitt A K, Swapp S M, et al. In Situ U–Pb SIMS (IN–SIMS) micro–baddeleyite dating of mafic rocks: Method with examples[J]. Precambrian Research, 2010, 183(3): 379–387.
- [51] Söderlund U, Isachsen C E, Bylund G, et al. U–Pb baddeleyite ages and Hf, Nd isotope chemistry constraining repeated mafic magmatism in the Fennoscandian Shield from 1.6 to 0.9 Ga[J]. Contributions to Mineralogy & Petrology, 2005, 150(2): 174–194.
- [52] Paleo–Mesoproterozoic magmatism in the Tarim Craton, NW China: Implications for episodic extension to initial breakup of the Columbia supercontinent[J]. Precambrian Research, 2021, 363: 106337.

《地质通报》第 41 卷第 2~3 期要目预告

祁连山东北缘武威盆地新近系甘肃群地层划分	施炜等
基于多源遥感与物探数据的岩性分类方法	于长春等
覆盖区智能地质填图的探索与实践	
——以森林沼泽区为例	陈虹等
滦河口北部七里海地区中晚全新世沉积演化过程	李敏等
永定河冲积平原南部第四纪沉积速率及其意义	代鹏等
内蒙古大青山山前第四纪冲洪积扇填图实践与思考	杨劲松等
晚更新世以来哈素海钻孔地层记录及年代学研究	刘哲等
鄂尔多斯西南缘千河水系变迁与新构造运动	樊双虎等
银川盆地灵武地区古近纪–新近纪沉积岩地球化学特征及地质意义	潘进礼等
青藏高原东北缘烟筒山构造带二叠系红泉组沉积时代及物源示踪	寇琳琳等
武威盆地南缘断裂带晚第四纪活动特征及变形分析	卢海峰等
西南极南设得兰群岛地层对比与划分	韦利杰等
陆相火山岩区火山机构的解剖	
——以浙江新昌东茗复活破火山为例	褚平利等
东准格尔成矿带浅覆盖区地质填图效果	
——以杜热一带浅覆盖区基岩地质填图为例	孟贵祥等
赣东北樟树墩蛇绿构造混杂岩露头解剖及地质意义	朱清波等
航空重磁在齐河厚覆盖区圈定隐伏岩体的方法及效果	吴成平等
纵横波法在华北平原区浅层精细结构探测中的应用研究	王小江等
主–被动源地震面波勘探方法在岩溶区浅覆盖层探测中的应用研究	张伟等
基于井中超声波成像的岩溶特征高精度探测和评价研究	贾龙等
重力约束反演构建郯庐断裂带泗洪浅覆盖区隐伏基岩地质模型	李长波等
航空瞬变电磁法在巴林左旗地区圈定含水地层应用	张迪硕等
深岩溶地质结构可控源音频大地电磁法探测与数据反演解译策略	
——以桂林兴安县谢必湾村—上界富坪村段为例	刘永亮等
湘南中生代钨锡大规模成矿控制因素: 锆石年代学和微量元素的启示	李立兴等
宁夏清水河盆地中部晚更新世两套湖相地层的发现及其环境–构造意义	李明涛等
川东北宣汉黄金口一带中三叠统雷口坡组底界探讨	王富明等
松辽盆地西南部钱家店铀矿床富矿砂岩中烃类地球化学特征	赵龙等