# 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

左立波<sup>1)</sup>,任军平<sup>1)</sup>,邱亮<sup>2)</sup>,王杰<sup>1)</sup>,古阿雷<sup>1)</sup>,孙宏伟<sup>1)</sup>,许康康<sup>1)</sup>, Alphet Phaskani DOKOWE<sup>3)</sup>,Abraham MUKANGWA<sup>3)</sup>,Daniel MALUNGA<sup>3)</sup>,

Chisamba MWANSA<sup>3)</sup> ,Peter CHIPUMBU<sup>3)</sup>

1) 中国地质调查局天津地质调查中心,天津,300170,中国;

2) 中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室,北京,100083,中国;

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

内容提要:赞比亚伊索卡东部位于伊鲁米德带上,伊鲁米德带是一个北东走向的褶皱俯冲带,位于赞比亚中东 部,南部以新元古代赞比西带为界,北东至赞比亚-坦桑尼亚-马拉维边境,并以北西向古元古代乌本迪带为界。锆 石 U-Pb 测年结果表明,黑云母二长片麻岩、二云母石榴斜长片麻岩、含石榴黑云母钾长片麻岩和含石榴黑云母斜 长片麻岩的岩浆侵位年龄为 1949±18 Ma~2025±15 Ma,形成于古元古代。岩石地球化学分析结果表明,伊索卡 东部片麻岩岩浆为过铝质高钾钙碱性一钾玄系列;稀土配分模式明显呈右倾型,富含轻稀土,贫重稀土,铕和铈表 现为极微弱的负异常;微量元素原始地幔标准化蛛网图显示,富集 Rb、K、La、Pb、Nd、Sm 等元素,亏损 Ba、Nb、Ta、 Ce、Sr、P、Ti 等元素。根据伊鲁米德带的构造演化阶段,可以判断伊索卡东部片麻岩形成于乌萨加兰期。

关键词:伊鲁米德带;锆石 U-Pb 测年;地球化学特征;岩石成因;赞比亚

赞比亚伊索卡东部位于伊鲁米德带上,伊鲁米 德带是一个北东走向的褶皱俯冲带,位于赞比亚中 东部,南部以新元古代赞比西带为界,北东至赞比 亚-坦桑尼亚-马拉维边境,并以北西向古元古代乌 本迪带为界(Daly,1986;Theunissen et al.,1996; Klerkx et al.,1998)。伊鲁米德带首次由 Ackermann(1936,1950,1960)、Ackermann et al. (1960)和Forster(1965)描述。伊鲁米德带包括变 质基底和变质沉积岩序列,也保存了完好的的古元 古代火山岩序列,在中元古代晚期伊鲁米德造山运 动期间(约1.02 Ga)被大量高钾花岗岩侵入。研究 表明伊鲁米德带基底形成时间为2.05~1.93 Ga (Rainaud et al.,2003,2005;De Waele,2005);在 1.66~1.55 Ga 期间被 Lukamfwa 岩套侵入(De Waele,2005;De Waele et al.,2006a);最终在 1.02 Ga 的伊鲁米德事件中发生强烈地变形(De Waele, 2005;De Waele et al.,2006a)。伊鲁米德事件本身伴随着广泛地高钾花岗岩侵入,时间在 1.05~1.00Ga之间;以及少量 0.95 Ga(De Waele,2005)的构造后期碱性岩浆作用。伊鲁米德带的变形序列由变质石英砂岩和泥质岩组成,在西南部被称为Kanona 群,在北东部被称为 Manshya River 群(De Waele et al.,2002)。Xu Kangkang et al.(2018)对班韦乌卢地块和伊鲁米德带区域地质及构造演化特征进行了研究;Xing Shi et al.(2018)对非洲中南部伊鲁米德构造带演化及成矿作用进行了探讨;本文

引用本文: 左立波,任军平,邱亮,王杰,古阿雷,孙宏伟,许康康,Alphet Phaskani DOKOWE, Abraham MUKANGWA, Daniel MALUNGA, Chisamba MWANSA, Peter CHIPUMBU. 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. 地质学报,95(4):1144~1158, doi: 10.19762/j. cnki. dizhixuebao. 2021037. Zuo Libo, Ren Junping, Qiu Liang, Wang Jie, Gu Alei, Sun Hongwei, Xu Kangkang, Alphet Phaskani Dokowe, Abraham Mukangwa, Daniel Malunga, Chisamba Mwansa, Peter Chipumbu. 2021. Zircon U-Pb geochronology, geochemical characteristics and petrogenesis of the gneisses in the eastern Isoka, Zambia. Acta Geologica Sinica,95(4):1144~1158.

注:本文为商务部援外项目"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);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);莫桑比克-坦桑尼亚钽锆钛资 源调查(DD20201150)资助的成果。

收稿日期:2020-08-02;改回日期:2020-10-02;网络发表日期:2020-12-08;责任编辑:黄敏。

作者简介: 左立波, 男, 1983年生, 硕士, 工程师, 主要从事南部非洲地质矿产勘查与研究工作; Email: libozuo@qq. com。通讯作者: 任军 平, 男, 1980年生, 高级工程师, 主要从事地质矿产勘查与研究工作; Email: rjp2333@126. com。

通过采集伊鲁米德带基底片麻岩并进行锆石 U-Pb 测年和全岩地球化学分析,探讨了基底片麻岩的形 成时代及岩石成因。

## 1 地质背景

根据赞比亚地质调查局 1994 年编制的地质图, 伊索卡地区出露的岩石主要包括伊鲁米德带基底、 穆瓦超群 Manshya River 群和 Nkombwa Hill 碳酸 岩(C),见图 1。

基底包括 Mpwashi 混合片麻岩(B)和 Luwalizi 花岗片麻岩(Z)。Mpwashi 混合片麻岩出露面积较 大,由条带状黑云母-石榴子石石英长石片麻岩,紫 苏辉石片麻岩,似片麻状花岗岩组成;部分地区出现 的混合片麻岩主要是在花岗岩体周边发现的混合岩 化。Luwalizi花岗片麻岩沿着Luwalizi河大面积出 露,位于 Mpwashi片麻岩的南部。二者存在一定联 系,Luwalizi花岗片麻岩中存在着明显的 Mpwash 片麻岩捕虏体,这一点,再加上大量存在的长石斑 晶,证明Luwalizi花岗片麻岩侵入到了 Mpwashi 混 合片麻岩中。它最明显的特征是排成线状的长石斑 晶,这些长石一般是微斜长石,通常发生变晶作用, 它们和排列整齐的黑云母共同形成叶理状构造。晶 型整体为它形变晶,虽然东部一些大的长石斑晶变 为半自形晶。在区域上看,早期的花岗质岩体多为 花岗闪长岩,但是存在大量长石斑晶的地方多为花 岗岩。最原始的花岗结构被目前的碎裂构造所破 坏,这似乎是两期事件形成的,但也可能是同一起构 造事件引起。从区域上看,面理呈东北东向,尽管局



图 1 赞比亚伊索卡东部地质简图及采样位置

Fig. 1 Sampling locations and geological map of eastern Isoka, Zambia

部可能被变形强烈的北东向变形带所覆盖。这些区域的初糜棱岩和糜棱岩表现受到强烈的剪切作用, 这些岩石中存在着强烈的 LS 型构造迹象,因此东 北东向面理可能在更强烈的北东向构造开始前就已 经完成,或者更早。Manshya River 群被归入穆瓦 超群,在工区出露的 Manshya River 群为一套变质 石英砂岩、粉砂岩、泥质岩和凝灰岩组合。

## 2 样品及其岩相学特征

从伊索卡东部采集了 4 件片麻岩样品(MJ10、 MJ11、MJ12 和 MJ13), MJ10 和 MJ13 位于 Luwalizi 花岗片麻岩出露区, MJ11 和 MJ12 位于 Mpwashi 混合片麻岩出露区,具体采样位置见图 1。

#### 2.1 黑云母二长片麻岩(MJ10)

样品 MJ10 镜下鉴定结果为黑云母二长片麻岩 (图 2a,2b),岩石具细鳞片状粒状变晶结构,片麻状 构造。主要由钾长石、斜长石、石英、黑云母组成;副 矿物见不透明金属矿物及锆石。岩石局部受动力变 质作用影响,发育轻微糜棱岩化。钾长石主要为微 斜长石,呈半自形一他形板状,粒径 0.20~ 1.00mm,最大者约 2.20mm;整体发育格子双晶明 显,且具较强粘土化及绢云母化;另外个别微斜长石 晶内包含有小颗粒石英及黑云母碎片,形成包含变 晶结构。另外钾长石边缘分布诸多细鳞片状黑云母 或微晶石英,构成显微文象变晶结构。斜长石呈半 自形一他形板状,粒径 0.24~0.96mm,最大者约 1.75mm,发育细聚片双晶明显,且个别晶体弯曲变 形明显,晶内发育较强绢云母化及粘土化。石英划 分为两部分,一部分为粒径≤0.08mm,多分布于长 石周围;另外一部分呈粒状集合体展布,单颗粒粒径 介于 0.22~0.52mm 之间,石英整体发育平行消光 及波状消光。黑云母多呈细鳞片状集合体,粒径介 于 0.06~0.35mm,发育浅褐一深褐色极强多色性, 整体干涉色鲜艳,集合体周围出露有副矿物锆石;黑 云母整体呈现断续定向排列。

#### 2.2 二云母石榴斜长片麻岩(MJ11)

样品 MJ11镜下鉴定结果为二云母石榴斜长片 麻岩(图 2c,2d),岩石具斑状变晶结构,片麻状构 造。变斑晶主要由石榴子石组成;基质为连续不等 粒粒状变晶结构,由石英、斜长石、钾长石、黑云母及 白云母组成;副矿物见不透明金属矿物及锆石。岩 石整体发育强烈绢云母化。变斑晶:石榴子石呈他 形粒状,无光性异常,粒径介于 0.36~1.80mm 之 间,最大者约 2.50mm,晶内裂纹发育普遍,且沿裂 隙充填有大量后期蚀变产物绢云母。基质:石英呈 他形粒状,粒径介于 0.22~0.90mm 之间,整体发 育平行消光,且局部颗粒间隙充填有大量雏晶云母 集合体。钾长石他形板状,粒径 0.20~0.56mm,个 别隐约格子双晶发育,且具较强粘土化及绢云母化。 斜长石呈他形板状,粒径 0.24~0.87mm,发育细聚 片双晶明显,大部分均已绢云母化及粘土化完全,部 分蚀变产物绢云母经重结晶作用及变质作用向白云 母过渡。黑云母呈半自形鳞片状,粒径约 0.14~ 0.38mm,发育浅褐一深褐色极强多色性,整体干涉 色鲜艳。白云母呈自形一半自形片状,粒径 0.18~ 0.48mm,发育鲜艳干涉色;局部白云母呈放射状及 鳞片状集合体展布,该部分均为绢云母过渡而来。

### 2.3 含石榴黑云母钾长片麻岩(MJ12)

样品 MJ12 镜下鉴定结果为含石榴黑云母钾长 片麻岩(图 2e,2f),岩石具细鳞片状粒状变晶结构, 片麻状构造。主要由钾长石、斜长石、石英、黑云母 组成,另外有特征变质矿物石榴子石出露;副矿物见 不透明金属矿物及锆石。岩石局部受动力变质作用 影响,发育轻微糜棱岩化。初步推断原岩可能为砂 岩类。石榴子石呈他形粒状,无光性异常,粒径介于 0.24~0.68mm之间,晶内裂纹及凹坑发育普遍,沿 凹坑部位充填有大量后期蚀变产物雏晶黑云母。钾 长石主要为微斜长石和条纹长石,呈他形板状,粒径 0.22~0.75mm,最大者约1.20mm;整体发育格子 双晶及条纹结构明显,且具较强粘土化。斜长石呈 他形板状,粒径 0.20~0.68mm,发育细聚片双晶明 显,且个别晶体弯曲变形明显,晶内发育较强粘土 化。石英呈他形粒状,粒径介于 0.12~0.42mm 之 间,整体发育平行消光;另外有少量微晶石英(粒径 <0.10mm)多环绕石榴子石边缘分布。黑云母多 呈雏晶集合体展布,粒径均<0.10mm,发育浅褐-深褐色极强多色性,黑云母均为原岩内填隙物经变 质作用转变而来。

#### 2.4 含石榴黑云母斜长片麻岩(MJ13)

样品 MJ13 镜下鉴定结果为含石榴黑云母斜长 片麻岩(图 2g,2h),岩石具细鳞片状粒状变晶结构, 片麻状构造。主要由钾长石、斜长石、石英、黑云母 及微量白云母组成,另外出露有少量石榴子石;副矿 物见不透明金属矿物及锆石。岩石整体受动力变质 作用影响,发育中等糜棱岩化。钾长石主要为微斜 长石,呈他形板状,粒径 0.20~0.94mm,最大者约 3.60mm;整体发育格子双晶明显,且具较强粘土化 及绢云母化。斜长石呈半自形一他形板状,粒径



图 2 赞比亚伊索卡东部片麻岩手标本(a—MJ10;c—MJ11; e—MJ12;g—MJ13)和镜下照片 (b—MJ10; d—MJ11; f—MJ12; h—MJ13;正交偏光) Fig. 2 Hand samples(a—MJ10; c—MJ11; e—MJ12;g-MJ13)and micrographs (b—MJ10; d—MJ11; f—MJ12; h—MJ13; cross-polarized light)of the gneisses in the eastern Isoka, Zambia Q—石英; PI—斜长石; Bt—黑云母; Mc—微斜长石;Ms—白云母; Grt—石榴子石;Ser—绢云母; Q—quartz;PI—plagioclase; Bt—biotite; Mc—microcline;Ms—muscovite;Grt—garnet;Ser—sericite 0.20~1.78mm,最大者约4.25mm,发育细聚片双 晶明显,且个别晶体弯曲变形明显,晶内发育较强绢 云母化及粘土化。另外斜长石边缘分布诸多细鳞片 状黑云母及微晶石英,构成显微文象变晶结构。石 英划分为两部分,一部分为粒径≪0.05mm的雏晶, 多分布于长石周围,该部分为硅质后期重结晶产物; 另外一部分呈粒状集合体形成的条带状或透镜状展 布,单颗粒粒径介于 0.14~0.46mm 之间,石英整 体发育平行消光及波状消光。黑云母多呈细鳞片状 集合体展布,粒径约 0.10~0.46mm,单晶最大者约 0.78mm,发育浅褐-深褐色极强多色性,部分干涉 色被自身颜色所替代,整体定向排列明显。石榴子 石呈他形粒状,粒径约 0.22~0.84mm,无光性特 征,晶内裂纹发育,沿裂隙充填有蚀变产物绢云母。 白云母呈自形片状,粒径 0.25~0.32mm,发育干涉 色鲜艳,分布于黑云母周围。

## 3 分析方法

#### 3.1 全岩分析

片麻岩样品主、微量和稀土元素分析均在中国 地质调查局天津地质调查中心实验室测试完成,主 量元素采用 X 射线荧光光谱法(XRF)测试,分析精 度优于 3%,FeO 采用湿化学法分析。微量元素和 稀土元素使用 ICP-MS 测试,分析精度和准确度高 于 5%。

#### 3.2 锆石 U-Pb 测年

锆石分选在河北省廊坊宇能实验室进行,首先 用常规方法进行粉碎,然后采用电磁分选、重液分选 和人工挑选,最后在双目镜下选出锆石。将挑选出 的纯净锆石浇铸在环氧树脂靶上。根据 CL 图像确 定锆石颗粒的位置、显微结构和要分析的靶区位置, 避开裂纹与包裹体。在中国地质调查局天津地质调 查中心实验室使用激光烧蚀多接收器等离子体质谱 仪完成锆石 U-Pb 同位素分析,分析所用的 LA-MC-ICP-MS 由 New Wave 的 193nm 激光剥蚀系统 和 Thermo Fisher 的 Neptune 多接收等离子体质谱 仪组成。本次分析的激光剥蚀斑径为 35μm,剥蚀 深度约为 20μm,频率为 8Hz,能量为 5mJ。分析时 采用 GJ1 作为年龄外标, NIST610 作为元素含量外 标。使用中国地质大学(武汉)刘勇胜教授开发的 ICPMSDataCal 程序(Liu Yongsheng et al., 2010) 和 Isoplot (Ludwig, 2003) 程序进行数据处理,使 用<sup>208</sup> Pb 校正法对普通铅进行校正(Anderson, 2002)。

## 4 分析结果

#### 4.1 LA-MC-ICP MS 锆石 U-Pb 同位素

采用 LA-MC-ICP MS 方法测得的 4 件片麻岩 样品(MJ10~MJ13)的 U-Pb 同位素结果见表 1、图 3 和图 4。

MJ10 样品锆石晶形较好,以长柱状自形晶为 主,锆石短轴方向粒径在 50~200 $\mu$ m 之间为主,长 短轴之比在 1.5~4 之间。阴极发光图像显示大 部分锆石发育典型的岩浆振荡环带,同时可见窄 的暗色变质增生边。32 个具有典型振荡环带岩浆 锆石分析点给出的<sup>207</sup> Pb/<sup>206</sup> Pb 年龄在 1989~ 3417 Ma。由于该样品大部分显示明显的铅丢失, 谐和性较差,因此本文取该样品的上交年龄 1949 ±18 Ma(MSWD=0.26)作为该样品的岩浆侵位 年龄。

MJ11 样品锆石晶形较好,以长柱状自形晶为 主,锆石短轴方向粒径在 50~150μm 之间为主,长 短轴之比在 1.5~3 之间,部分锆石机械破碎或发育 有裂隙,少量锆石呈不规则状。阴极发光图像显示 大部分锆石发育典型的岩浆振荡环带,同时可见窄 的暗色变质增生边。24 个具有典型振荡环带岩浆 锆石分析点给出的<sup>207</sup> Pb/<sup>206</sup> Pb 年龄在 1938~ 3127Ma,其中 20 个分析点给出的加权平均年龄为 1989±13 Ma (MSWD=1.9),代表该样品岩石岩 浆侵位年龄。

MJ12 样品锆石晶形较好,以长柱状自形晶为 主,部分锆石机械破碎或发育有裂隙,少量锆石呈不 规则状。锆石短轴方向粒径在 50~200μm 之间为 主,长短轴之比在 1.5~3 之间。阴极发光图像显示 大部分锆石发育典型的岩浆振荡环带,部分锆石内 核呈亮色,向外变暗,并发育有窄的暗色变质增生 边。32 个具有典型振荡环带岩浆锆石分析点给出 的<sup>207</sup> Pb/<sup>206</sup> Pb 年龄在 1954~2595Ma,其中 27 个分 析点给出的加权平均年龄为 2025±15 Ma (MSWD =2.3),代表该样品岩石岩浆侵位年龄。

MJ13 样品锆石晶形较好,以长柱状自形晶为 主,部分锆石机械破碎或发育有裂隙,少量锆石呈不 规则状。锆石短轴方向粒径在 50~300μm 之间为 主,长短轴之比在 1.5~4 之间。阴极发光图像显示 大部分锆石发育典型的岩浆振荡环带,部分锆石内 核呈亮色,向外变暗,并发育有窄的暗色变质增生 边。32 个具有典型振荡环带岩浆锆石分析点给出 的<sup>207</sup> Pb/<sup>206</sup> Pb 年龄在 1927~2114 Ma,其中 31 个分

#### 表 1 赞比亚伊索卡东部片麻岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年分析结果

#### Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results of the gneiss in the eastern Isoka, Zambia

$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	$\begin{array}{c c} 207  \text{Pb/} \\ 206  \text{Pb} \end{array} & 1\sigma \\ \hline \\ 2635 & 19 \\ 2411 & 20 \\ 1961 & 20 \\ 2234 & 20 \\ \end{array}$
MJ10     照云母二长片麻岩       Sam. 1     235     786     148     0.19     0.2572     0.0030     6.3148     0.0869     0.1781     0.0021     1475     17     2021     28       Sam. 2     208     600     285     0.47     0.3101     0.0035     6.6630     0.0901     0.1559     0.0018     1741     20     2068     28	206 Pb         16           2635         19           2411         20           1961         20           2234         20
MJ10         黑云母二长片麻岩           Sam. 1         235         786         148         0.19         0.2572         0.0030         6.3148         0.0869         0.1781         0.0021         1475         17         2021         28           Sam. 2         208         600         285         0.47         0.3101         0.0035         6.6630         0.0901         0.1559         0.0018         1741         20         2068         28	2635         19           2411         20           1961         20           2234         20
Sam. 1         235         786         148         0. 19         0. 2572         0. 0030         6. 3148         0. 0869         0. 1781         0. 0021         1475         17         2021         28           Sam. 2         208         600         285         0. 47         0. 3101         0. 0035         6. 6630         0. 0901         0. 1559         0. 0018         1741         20         2068         28	2635         19           2411         20           1961         20           2234         20
Sam. 2         208         600         285         0.47         0.3101         0.0035         6.6630         0.0901         0.1559         0.0018         1741         20         2068         28	2411         20           1961         20           2234         20
	196120223420
Sam. 3 97 226 241 1.06 0.3573 0.0039 5.9269 0.0815 0.1203 0.0014 1969 21 1965 27	2234 20
Sam. 4 176 646 560 0. 87 0. 2307 0. 0024 4. 4706 0. 0592 0. 1405 0. 0016 1338 14 1726 23	
Sam. 5 157 455 172 0.38 0.3233 0.0036 5.4080 0.0760 0.1213 0.0014 1806 20 1886 27	1975 20
Sam. 6 271 862 366 0. 42 0. 2806 0. 0034 6. 2847 0. 0867 0. 1625 0. 0019 1594 19 2016 28	2481 20
Sam. 7 196 614 151 0. 25 0. 3123 0. 0034 5. 2613 0. 0728 0. 1222 0. 0014 1752 19 1863 26	1989 20
Sam. 8 156 514 218 0. 42 0. 2848 0. 0035 4. 9210 0. 0756 0. 1253 0. 0014 1615 20 1806 28	2033 20
Sam. 9 134 437 214 0.49 0.3024 0.0032 5.1200 0.0706 0.1228 0.0014 1703 18 1839 25	1997 21
Sam. 10 164 423 431 1.02 0.3496 0.0036 6.8141 0.0979 0.1414 0.0017 1933 20 2088 30	2244 21
Sam. 11 83 210 179 0. 85 0. 3547 0. 0050 6. 5221 0. 1005 0. 1333 0. 0016 1957 28 2049 32	2143 21
Sam. 12 121 622 1708 2. 74 0. 1566 0. 0020 4. 1931 0. 0598 0. 1942 0. 0024 938 12 1673 24	2778 20
Sam. 13 398 1078 283 0. 26 0. 3587 0. 0041 5. 9035 0. 0858 0. 1194 0. 0014 1976 22 1962 29	1947 21
Sam. 14 61 198 326 1. 64 0. 2225 0. 0038 6. 5835 0. 1025 0. 2146 0. 0031 1295 22 2057 32	2940 24
Sam. 15 262 788 218 0. 28 0. 2781 0. 0034 6. 6779 0. 1063 0. 1742 0. 0022 1582 19 2070 33	2598 21
Sam. 16 143 470 88 0. 19 0. 2934 0. 0032 5. 0071 0. 0734 0. 1238 0. 0015 1659 18 1821 27	2011 22
Sam. 17 265 1084 1018 0. 94 0. 2003 0. 0022 4. 2463 0. 0588 0. 1538 0. 0019 1177 13 1683 23	2388 21
Sam. 18 224 1089 934 0. 86 0. 1901 0. 0029 3. 5511 0. 0614 0. 1355 0. 0016 1122 17 1539 27	2171 21
Sam. 19 180 522 267 0. 51 0. 3150 0. 0033 5. 2938 0. 0734 0. 1219 0. 0014 1765 19 1868 26	1984 21
Sam. 20 429 1435 798 0.56 0.2145 0.0025 6.9338 0.0935 0.2344 0.0029 1253 15 2103 28	3082 20
Sam. 21 192 539 273 0. 51 0. 3252 0. 0035 5. 4161 0. 0749 0. 1208 0. 0014 1815 19 1887 26	1968 21
Sam. 22 189 570 370 0. 65 0. 2572 0. 0032 6. 8513 0. 0962 0. 1932 0. 0024 1476 18 2092 29	2769 20
Sam. 23 189 430 671 1.56 0.3896 0.0038 7.9347 0.1042 0.1477 0.0017 2121 21 2224 29	2319 20
Sam. 24 237 681 429 0. 63 0. 3040 0. 0043 5. 9095 0. 0848 0. 1410 0. 0018 1711 24 1963 28	2240 21
Sam. 25 186 507 671 1. 32 0. 3215 0. 0039 5. 8814 0. 0894 0. 1327 0. 0015 1797 22 1959 30	2134 20
Sam. 26 121 397 245 0. 62 0. 2760 0. 0030 4. 8278 0. 0659 0. 1269 0. 0015 1571 17 1790 24	2055 20
Sam. 27 190 936 3780 4.04 0.1211 0.0018 4.8407 0.0694 0.2899 0.0046 737 11 1792 26	3417 24
Sam. 28 888 5846 2488 0. 43 0. 1411 0. 0045 2. 3808 0. 0867 0. 1223 0. 0015 851 27 1237 45	1991 21
Sam. 29 222 552 224 0. 41 0. 3733 0. 0040 8. 4929 0. 1168 0. 1650 0. 0019 2045 22 2285 31	2508 19
Sam. 30 81 215 81 0. 37 0. 3462 0. 0038 6. 3560 0. 0842 0. 1332 0. 0016 1916 21 2026 27	2140 21
Sam. 31 198 716 145 0. 20 0. 2526 0. 0027 4. 9337 0. 0672 0. 1417 0. 0017 1452 15 1808 25	2248 20
Sam. 32 459 3651 485 0.13 0.1163 0.0022 2.1653 0.0461 0.1350 0.0016 709 13 1170 25	2164 20
MJ11 二云母石榴斜长片麻岩	
Sam. 1 269 789 32 0.04 0.3486 0.0041 5.7260 0.0827 0.1191 0.0014 1928 22 1935 28	1943 20
Sam. 2 118 342 43 0.13 0.3457 0.0038 5.7067 0.0793 0.1197 0.0014 1914 21 1932 27	1952 20
Sam. 3 49 133 39 0. 30 0. 3453 0. 0037 5. 9862 0. 0826 0. 1257 0. 0014 1912 21 1974 27	2039 20
Sam. 4 119 339 53 0.16 0.3481 0.0035 5.7251 0.0759 0.1193 0.0014 1925 20 1935 26	1946 20
Sam. 5 77 203 121 0. 60 0. 3445 0. 0034 5. 8297 0. 0774 0. 1227 0. 0014 1908 19 1951 26	1996 21
Sam. 6 122 360 11 0.03 0.3484 0.0035 5.7044 0.0754 0.1188 0.0014 1927 19 1932 26	1938 20
Sam. 7 97 283 31 0.11 0.3467 0.0034 5.7761 0.0765 0.1208 0.0014 1919 19 1943 26	1968 21
Sam. 8 126 272 81 0.30 0.4257 0.0043 10.4985 0.1566 0.1789 0.0022 2286 23 2480 37	2642 20
Sam. 9 165 274 154 0. 56 0. 4866 0. 0059 16. 1736 0. 2548 0. 2411 0. 0028 2556 31 2887 45	3127 18
Sam. 10 93 225 196 0. 87 0. 3457 0. 0042 5. 8509 0. 0883 0. 1227 0. 0014 1914 23 1954 30	1997 20
Sam. 11   145   399   116   0. 29   0. 3457   0. 0040   5. 8823   0. 0861   0. 1234   0. 0014   1914   22   1959   29	2006 20
Sam. 12 73 195 86 0. 44 0. 3446 0. 0039 5. 8819 0. 0871 0. 1238 0. 0014 1909 22 1959 29	2012 21
Sam. 13 79 195 166 0. 85 0. 3452 0. 0038 5. 8351 0. 0809 0. 1226 0. 0014 1912 21 1952 27	1994 20
Sam. 14 83 235 46 0. 20 0. 3458 0. 0035 5. 8348 0. 0772 0. 1224 0. 0014 1914 19 1952 26	1991 20
Sam. 15   120   335   81   0. 24   0. 3459   0. 0037   5. 8595   0. 0817   0. 1229   0. 0014   1915   20   1955   27	1998 21
Sam. 16 65 165 115 0. 70 0. 3459 0. 0038 5. 9138 0. 0829 0. 1240 0. 0014 1915 21 1963 28	2015 21
Sam. 17 111 317 47 0. 15 0. 3457 0. 0037 5. 9602 0. 0823 0. 1251 0. 0014 1914 20 1970 27	2030 20
Sam. 18         102         294         49         0. 17         0. 3438         0. 0034         5. 7700         0. 0756         0. 1217         0. 0014         1905         19         1942         25	1982 20

												续表 :					
	含量	<b> </b>	-6)		同位素比值								年龄	(Ma)			
样晶号	Pb	U	Th	Th/U	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	1σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	1σ	
Sam. 19	73	197	94	0.47	0.3460	0.0034	5.7896	0.0878	0.1214	0.0016	1916	19	1945	29	1976	23	
Sam. 20	112	319	49	0.15	0.3456	0.0044	5.8991	0.0928	0.1238	0.0014	1914	24	1961	31	2011	20	
Sam. 21	79	223	44	0.20	0.3462	0.0034	5.8529	0.0765	0.1226	0.0014	1917	19	1954	26	1995	20	
Sam. 22	89	224	167	0.75	0.3485	0.0037	5.8768	0.0813	0.1223	0.0014	1928	21	1958	27	1990	20	
Sam. 23	75	182	50	0.27	0.3935	0.0043	7.2229	0.1000	0.1331	0.0015	2139	23	2139	30	2140	20	
Sam. 24	167	345	213	0.62	0.4209	0.0044	9.4375	0.1280	0.1626	0.0019	2265	24	2381	32	2483	20	
MJ12							含石柞	留黑云母银	甲长片麻岩	1							
Sam. 1	167	143	760	5.32	0.2051	0.0024	3.7487	0.0619	0.1326	0.0019	1203	14	1582	26	2132	25	
Sam. 2	47	83	114	1.37	0.3496	0.0039	5.8824	0.0980	0.1220	0.0017	1933	21	1959	33	1986	26	
Sam. 3	82	281	154	0.55	0.3633	0.0040	6.3458	0.1027	0.1267	0.0018	1998	22	2025	33	2053	25	
Sam. 4	101	87	263	3.04	0.3621	0.0039	6.2827	0.1004	0.1258	0.0018	1992	22	2016	32	2041	25	
Sam. 5	46	73	108	1.47	0.3609	0.0040	6.3413	0.1067	0.1274	0.0018	1986	22	2024	34	2063	25	
Sam. 6	62	117	141	1.21	0.3611	0.0041	6.2171	0.1030	0.1249	0.0018	1987	23	2007	33	2027	25	
Sam. 7	52	75	127	1.70	0.3561	0.0042	6.2483	0.1140	0.1273	0.0019	1964	23	2011	37	2061	26	
Sam. 8	55	123	125	1.01	0.3590	0.0039	5.9999	0.0979	0.1212	0.0017	1978	22	1976	32	1974	26	
Sam. 9	63	66	162	2.45	0.3605	0.0041	6.1036	0.1006	0.1228	0.0017	1985	22	1991	33	1997	25	
Sam. 10	179	437	381	0.87	0.3643	0.0041	6.3771	0.1055	0.1269	0.0018	2003	23	2029	34	2056	25	
Sam. 11	112	223	271	1.21	0.3484	0.0038	5.7904	0.0928	0.1205	0.0017	1927	21	1945	31	1964	25	
Sam. 12	131	105	348	3.33	0.3556	0.0038	5.8770	0.0936	0.1199	0.0017	1961	21	1958	31	1954	25	
Sam. 13	103	56	297	5.29	0.3384	0.0036	5.6646	0.0903	0.1214	0.0017	1879	20	1926	31	1977	25	
Sam. 14	35	41	92	2.22	0.3461	0.0038	5.9351	0.0970	0.1244	0.0018	1916	21	1966	32	2020	25	
Sam. 15	47	67	127	1.89	0.3294	0.0036	5.4631	0.0888	0.1203	0.0017	1835	20	1895	31	1960	26	
Sam. 16	88	102	218	2.13	0.3612	0.0039	6.4360	0.1047	0.1292	0.0018	1988	22	2037	33	2087	25	
Sam. 17	110	127	268	2.10	0.3719	0.0043	6.5339	0.1087	0.1274	0.0018	2038	23	2050	34	2063	25	
Sam. 18	76	76	202	2.65	0.3466	0.0039	5.9411	0.0969	0.1243	0.0018	1918	21	1967	32	2019	25	
Sam. 19	93	161	161	1.00	0.4378	0.0048	10.4944	0.1700	0.1738	0.0025	2341	26	2479	40	2595	24	
Sam. 20	77	48	210	4.42	0.3541	0.0040	6.0236	0.0996	0.1234	0.0017	1954	22	1979	33	2006	25	
Sam. 21	116	137	302	2.20	0.3438	0.0037	5.9326	0.0954	0.1252	0.0018	1905	21	1966	32	2031	25	
Sam. 22	61	74	159	2.15	0.3420	0.0037	6.0109	0.0977	0.1275	0.0018	1897	21	1977	32	2063	25	
Sam. 23	81	95	223	2.34	0.3317	0.0036	5.6402	0.0917	0.1233	0.0018	1847	20	1922	31	2005	25	
Sam. 24	83	120	206	1.72	0.3508	0.0038	6.2360	0.1027	0.1289	0.0019	1939	21	2010	33	2083	26	
Sam. 25	74	152	188	1.23	0.3309	0.0036	5.6410	0.0921	0.1236	0.0018	1843	20	1922	31	2009	26	
Sam. 26	53	40	146	3.63	0.3432	0.0038	5.9430	0.0969	0.1256	0.0018	1902	21	1968	32	2037	25	
Sam. 27	249	258	638	2.47	0.3555	0.0039	6.5200	0.1050	0.1330	0.0019	1961	21	2049	33	2138	25	
Sam. 28	82	46	209	4.54	0.3704	0.0042	7.2027	0.1166	0.1410	0.0020	2031	23	2137	35	2240	25	
Sam. 29	54	140	5.00	0.85	0.3451	0.0038	6.0458	0.0981	0.1271	0.0018	1911	21	1982	32	2058	25 25	
Sam. 30	175 64	192	203	1.33	0.3028	0.0033	0.4034 6.4190	0.0874	0.1300	0.0018	1705	19	1893	30	2100	20	
Sam. 31	04 E0	72	100	2.01	0.3712	0.0041	6 2806	0.1040	0.1254	0.0018	2035	22	2035	24	2030	20	
	00	15	147	2.01	0.3090	0.0043	0.3090 今工#	0.1002 刻曜三日4	0.1230	4.	2025	23	2031	34	2037	20	
	42	107	82	0.76	0.3472	0.0035	5 8714	日示ム 4月	件 L / / / / / / イ 0 1997	1 0 0014	1921	19	1957	26	1995	21	
Sam 2	213	589	173	0.70	0.3483	0.0033	5 8017	0.07880	0.1227 0.1227	0.0014	1921	24	1960	20	1995	20	
Sam 3	63	162	107	0.66	0.3490	0.0036	5 7997	0.0784	0.1205	0.0014	1927	20	1946	26	1964	20	
Sam 4	100	253	177	0.70	0.3515	0.0035	5 8369	0.0769	0.1200	0.0014	1942	19	1952	26	1963	20	
Sam 5	146	369	276	0.75	0.3530	0.0035	5 8591	0.0764	0.1204	0.0014	1942	10	1955	26	1962	20	
Sam. 6	142	374	163	0.44	0.3500	0.0035	5. 9126	0.0778	0. 1225	0.0014	1935	19	1963	26	1993	20	
Sam. 7	370	1043	193	0.18	0.3493	0.0035	5. 8591	0.0776	0.1217	0.0014	1931	19	1955	26	1981	20	
Sam. 8	104	302	28	0.09	0.3492	0.0034	5. 7507	0.0764	0.1194	0.0014	1931	19	1939	26	1948	21	
Sam. 9	88	235	109	0.46	0.3513	0.0034	5.8177	0.0763	0.1201	0.0014	1941	19	1949	26	1958	21	
Sam. 10	220	519	285	0.55	0.3875	0.0038	7.0098	0.0914	0.1312	0.0015	2111	21	2113	28	2114	20	
Sam. 11	4.9	132	63	0.48	0.3480	0.0035	5.7708	0.0771	0.1203	0.0014	1925	19	1942	26	1960	21	
Sam. 12	505	1420	327	0.23	0.3460	0.0035	5.7898	0.0780	0.1214	0.0014	1915	20	1945	26	1976	20	
Sam. 13	45	111	91	0.82	0.3476	0.0034	5.8017	0.0767	0.1211	0.0014	1923	19	1947	26	1972	21	
	1	1	1	1	1		1	1		1							

1	1	5	1

															续表	1
	含量	<b>≧</b> (×10	-6)			同位素比值								年龄(Ma)		
样品号	Pb	U	Th	Th/U	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	1σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	1σ
Sam. 14	313	874	244	0.28	0.3473	0.0034	5.7503	0.0748	0.1201	0.0014	1922	19	1939	25	1957	20
Sam. 15	483	1390	200	0.14	0.3462	0.0034	5.7461	0.0756	0.1204	0.0014	1917	19	1938	26	1962	21
Sam. 16	164	486	27	0.06	0.3437	0.0033	5.6697	0.0747	0.1196	0.0014	1905	18	1927	25	1951	21
Sam. 17	299	858	116	0.14	0.3473	0.0037	5.7517	0.0805	0.1201	0.0014	1922	21	1939	27	1958	21
Sam. 18	147	385	236	0.61	0.3481	0.0034	5.6668	0.0754	0.1181	0.0014	1925	19	1926	26	1927	21
Sam. 19	131	355	151	0.42	0.3456	0.0034	5.8767	0.0792	0.1233	0.0015	1913	19	1958	26	2005	21
Sam. 20	252	677	334	0.49	0.3475	0.0034	5.7045	0.0782	0.1191	0.0014	1923	19	1932	26	1942	22
Sam. 21	552	1573	320	0.20	0.3477	0.0034	5.6986	0.0793	0.1189	0.0015	1923	19	1931	27	1939	22
Sam. 22	196	556	112	0.20	0.3476	0.0034	5.7381	0.0829	0.1197	0.0015	1923	19	1937	28	1952	23
Sam. 23	307	864	236	0.27	0.3499	0.0040	5.7299	0.0900	0.1188	0.0016	1934	22	1936	30	1938	24
Sam. 24	204	581	161	0.28	0.3471	0.0038	5.6672	0.0894	0.1184	0.0016	1921	21	1926	30	1933	24
Sam. 25	94	241	201	0.83	0.3452	0.0046	5.7738	0.1028	0.1213	0.0016	1912	26	1942	35	1975	23
Sam. 26	466	1326	288	0.22	0.3494	0.0040	5.6946	0.0859	0.1182	0.0015	1932	22	1931	29	1929	22
Sam. 27	83	222	141	0.64	0.3463	0.0038	5.7765	0.0846	0.1210	0.0015	1917	21	1943	28	1971	22
Sam. 28	505	1441	278	0.19	0.3486	0.0039	5.7611	0.0841	0.1199	0.0014	1928	22	1941	28	1954	21
Sam. 29	177	492	178	0.36	0.3474	0.0035	5.8568	0.0794	0.1223	0.0014	1922	19	1955	26	1990	21
Sam. 30	148	413	146	0.35	0.3479	0.0034	5.7016	0.0752	0.1189	0.0014	1924	19	1932	25	1939	21
Sam. 31	157	453	47	0.10	0.3509	0.0036	5.7439	0.0769	0.1187	0.0014	1939	20	1938	26	1937	21
Sam. 32	81	233	41	0.18	0.3474	0.0035	5.6873	0.0759	0.1187	0.0014	1922	19	1929	26	1937	21
	М	J10											100	μm	-	



图 3 赞比亚伊索卡东部片麻岩锆石 CL 图像



析点给出的加权平均年龄为 1961 ± 7 Ma (MSWD=1.0),代表该样品岩石岩浆侵位年龄。

#### 4.2 地球化学特征

本文选取了4件片麻岩样品开展了常量、微量 及稀土元素地球化学分析,分析结果见表2。

#### 4.2.1 常量元素

常量元素分析结果(表 2)显示,研究区片麻岩 SiO<sub>2</sub>含量变化范围较大,在 59.78%~74.53%之 间;Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量在 13.16%~19.63%之间;Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+ FeO 含量在 1.66%~8.48%之间;Na<sub>2</sub>O 含量在



图 4 赞比亚伊索卡东部片麻岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 谐和图 Fig. 4 LA-ICP-MS zircon U-Pb concordia diagrams of gneisses in the eastern Isoka, Zambia

1.16%~3.14%之间;K2O含量在2.62%~6.07% 之间;除1个样品外,  $K_2$  O/Na<sub>2</sub> O 比值均大于1; MgO 含量在 0.19% ~ 2.96% 之间,其 Mg<sup>#</sup> 值  $[Mg^{#} = Mg/(Mg + Fe_{tot})]$ 介于 0.18~0.39 之间。 岩石具有极低的 CaO(0.12%~3.9%), MnO (0.023%~0.13%),  $P_2 O_5$  (0.062%~0.51%)及 TiO<sub>2</sub>(0.28%~1.27%)含量,它们均与SiO<sub>2</sub>含量具 有很好的负相关性(图 5),表明岩浆可能经历了分 异结晶作用。在火山岩全碱一二氧化硅(TAS)图 解(图 6a)及火山岩  $Zr/TiO_2$ -SiO<sub>2</sub>判别图解上(图 6b),赞比亚伊索卡东部片麻岩样品落入安山岩(2 件)、英安岩(1件)和流纹岩(1件)区域内,岩石主体 为中酸性岩组合;铝饱和系数 A/CNK 为 1.10~ 2.51, 铝指数 A/NK 为 1.12~3.05, 属过铝质岩石 (图 7a);在 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 图解(图 7b)中,样品落入高 钾钙碱性区域和钾玄岩(橄榄粗玄岩)区域。综合以 上分析,伊索卡东部片麻岩岩浆为过铝质高钾钙碱 性一钾玄系列。

#### 4.2.2 稀土及其它微量元素

伊索卡东部片麻岩稀土总量  $\Sigma REE = 186.9 \times 10^{-6} \sim 505.68 \times 10^{-6}$ ,  $\Sigma LREE = 160.62 \times 10^{-6} \sim 457.13 \times 10^{-6}$ ,  $\Sigma HREE = 24.78 \times 10^{-6} \sim 48.55 \times 10^{-6}$ ,  $LREE/HREE = 6.11 \sim 10.41$ ,  $(La/Yb)_N = 8.66 \sim 18.90$ ,  $(La/Sm)_N = 2.68 \sim 4.74$ 。稀土配分 模式(图 8a)明显呈右倾型,富含轻稀土,贫重稀土;  $\delta Eu = 0.50 \sim 0.91$ , 平均值为 0.70, 表现为极微弱的句角异常;  $\delta Ce = 0.55 \sim 0.96$ , 平均值为 0.83, 表现为极微弱的铈异常。伊索卡东部片麻岩微量元素 原始地幔标准化蛛网图(图 8b)显示,富集 Rb、K、La、Pb、Nd、Sm 等元素,亏损 Ba、Nb、Ta、Ce、Sr、P、Ti等元素。

## 5 讨论

#### 5.1 伊索卡东部片麻岩的形成时代

长期以来,由于缺少精确的锆石 U-Pb 及 Rb-Sr 年龄,伊鲁米德带内发生的岩浆作用及变质事件时

表 2 赞比亚伊索卡东部片麻岩主量、微量元素和稀土元素数据(主量元素:%;稀土和微量元素:×10<sup>-6</sup>) Table 2 Major, trace and rare earth elements compositions of the gneisses in the eastern Isoka, Zambia (major elements:%; REE and trace elements:×10<sup>-6</sup>)

样品	SiO <sub>2</sub>	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	FeO	CaO	MgO	$K_2O$	$Na_2O$	${\rm TiO}_2$	$P_2O_5$	MnO	灼失	Pb
MJ10	74.53	13.16	1.54	0.12	0.12	0.19	6.07	3.14	0.28	0.08	0.023	0.74	38.2
MJ11	59.78	19.63	1.86	6.62	0.75	2.96	4.19	1.16	0.92	0.062	0.12	1.22	22.0
MJ12	66.75	16.41	2.76	3.60	0.57	1.76	5.03	1.2	0.74	0.078	0.097	0.62	33.5
MJ13	60.77	16.44	2.04	5.88	3.90	1.94	2.62	3.03	1.27	0.51	0.13	0.80	21.2
样品	Cr	Ni	Co	Li	Rb	Cs	W	Mo	Sr	Ba	V	Sc	Nb
MJ10	9.41	3.95	2.63	1.94	209	0.50	0.70	0.40	45.2	407	17.0	3.45	20.6
MJ11	137	71.3	25.0	21.2	143	1.48	0.041	0.40	146	1110	120	26.1	13.6
MJ12	85.4	34.6	15.2	24.8	136	2.01	0.081	0.46	121	674	89.4	19.0	12.1
MJ13	30.6	16.7	17.1	23.7	88.6	0.56	0.24	0.52	199	1180	112	25.6	18.8
样品	Ta	Zr	Hf	Be	Ga	Sn	Se	U	Th	La	Ce	Pr	Nd
MI10	1 10		1 10	1 50	1 4 1	0.14	0.005		01.0	4.0.5	150	22.2	110
101)10	1.43	127	4.42	1.58	14.1	Z. 44	0.065	3.08	31.2	127	152	33.3	113
MJ11	1.43 0.74	127 189	4.42 5.78	1.58 1.85	14.1 25.0	2.44 0.41	0.065 0.18	3.08 1.18	31.2 16.5	63.6	152 121	33.3 13.6	49.4
MJ11 MJ12	1.43 0.74 0.84	127 189 221	4.42 5.78 6.58	1.58 1.85 2.71	14. 1 25. 0 20. 5	2.44 0.41 1.33	0.065 0.18 0.066	3.08 1.18 1.11	31.2 16.5 17.5	127 63.6 51.7	152 121 101	33.3 13.6 11.5	49.4 42.3
MJ11 MJ12 MJ13	1.43 0.74 0.84 0.78	127 189 221 342	4.42 5.78 6.58 9.22	1.58 1.85 2.71 1.10	14. 1 25. 0 20. 5 22. 4	2.44 0.41 1.33 0.80	0.065 0.18 0.066 0.10	3.08 1.18 1.11 0.50	31.2 16.5 17.5 2.05	127 63.6 51.7 34.3	152 121 101 66.8	33.3 13.6 11.5 9.58	49.4 42.3 39.5
MJ10 MJ11 MJ12 MJ13 样品	1. 43 0. 74 0. 84 0. 78 Sm	127 189 221 342 Eu	4. 42 5. 78 6. 58 9. 22 Gd	1. 58 1. 85 2. 71 1. 10 Tb	14. 1 25. 0 20. 5 22. 4 Dy	2. 44 0. 41 1. 33 0. 80 Ho	0.065 0.18 0.066 0.10 Er	3.08 1.18 1.11 0.50 Tm	31. 2 16. 5 17. 5 2. 05 Yb	127 63.6 51.7 34.3 Lu	152 121 101 66. 8 Y	33.3 13.6 11.5 9.58	49.4 42.3 39.5
MJ10 MJ11 MJ12 MJ13 样品 MJ10	1. 43 0. 74 0. 84 0. 78 Sm 22. 4	127 189 221 342 Eu 3. 43	4. 42 5. 78 6. 58 9. 22 Gd 18. 9	1. 58 1. 85 2. 71 1. 10 Tb 2. 79	14. 1 25. 0 20. 5 22. 4 Dy 12. 9	2. 44 0. 41 1. 33 0. 80 Ho 2. 27	0.065 0.18 0.066 0.10 Er 5.75	3. 08 1. 18 1. 11 0. 50 Tm 0. 78	31. 2 16. 5 17. 5 2. 05 Yb 4. 53	127 63.6 51.7 34.3 Lu 0.63	152 121 101 66.8 Y 63.9	33.3 13.6 11.5 9.58	49.4 42.3 39.5
MJ10 MJ11 MJ12 MJ13 样品 MJ10 MJ11	1. 43 0. 74 0. 84 0. 78 Sm 22. 4 8. 44	127 189 221 342 Eu 3. 43 1. 97	4.42 5.78 6.58 9.22 Gd 18.9 7.73	1. 58 1. 85 2. 71 1. 10 Tb 2. 79 1. 19	14. 1 25. 0 20. 5 22. 4 Dy 12. 9 6. 44	2. 44 0. 41 1. 33 0. 80 Ho 2. 27 1. 29	0. 065 0. 18 0. 066 0. 10 Er 5. 75 3. 59	3.08 1.18 1.11 0.50 Tm 0.78 0.54	31. 2 16. 5 17. 5 2. 05 Yb 4. 53 3. 47	127 63.6 51.7 34.3 Lu 0.63 0.53	152 121 101 66.8 Y 63.9 32.9	33.3 13.6 11.5 9.58	49. 4 42. 3 39. 5
MJ10 MJ11 MJ12 MJ13 样品 MJ10 MJ11 MJ12	1. 43 0. 74 0. 84 0. 78 Sm 22. 4 8. 44 7. 59	127 189 221 342 Eu 3. 43 1. 97 1. 65	4.42 5.78 6.58 9.22 Gd 18.9 7.73 7.04	1. 58 1. 85 2. 71 1. 10 Tb 2. 79 1. 19 1. 15	14. 1 25. 0 20. 5 22. 4 Dy 12. 9 6. 44 6. 56	2. 44 0. 41 1. 33 0. 80 Ho 2. 27 1. 29 1. 39	0.065 0.18 0.066 0.10 Er 5.75 3.59 3.94	3.08 1.18 1.11 0.50 Tm 0.78 0.54 0.60	31. 2 16. 5 17. 5 2. 05 Yb 4. 53 3. 47 3. 75	127 63. 6 51. 7 34. 3 Lu 0. 63 0. 53 0. 57	152 121 101 66.8 <u>Y</u> 63.9 32.9 36.2	33. 3 13. 6 11. 5 9. 58	49. 4 42. 3 39. 5

间不确定。De Waele 等学者通过对伊鲁米德带基 底的研究结果表明,在伊鲁米德带北东部,基底年 龄在 1961±1~1927±10 Ma 之间(Vrana et al., 2004; De Waele, 2005); 在伊鲁米德带南西部, 基 底年龄在 2050± 9 ~1952±6 Ma 之间(De Waele et al., 2002; Rainaud et al., 2002, 2003; De Waele, 2005)。本次采集的4件片麻岩样品位于伊鲁米 德带北东部。片麻岩中锆石大部分锆石呈长柱状 自形晶为主,且大部分发育很规则的振荡生长环 带,具典型岩浆锆石特征。因此,对片麻岩中锆石 所进行的 LA-ICP-MS U-Pb 定年分析结果应代表 了岩浆的结晶年龄。伊索卡东部地区片麻岩中4 组锆石谐和年龄值分别为 1949±18 Ma (MSWD) =0.26,  $1989 \pm 13$  Ma (MSWD=1.9),  $2025 \pm 15$ Ma (MSWD = 2.3) 和 1961  $\pm$  7 Ma (MSWD = 1.0),这表明岩浆的结晶侵位年龄为古元古代。 Ren Junping et al. (2019a, 2019b)和 Zuo Libo et al. (2020)对班韦乌卢地块基底中的石英闪长岩、正长 花岗岩、黑云母花岗岩、二长花岗岩等测年,年龄结 果为1900~2000Ma左右,与伊鲁米德带基底年龄 相同。

#### 5.2 岩石成因

Johnson et al. (2007)认为伊鲁米德带内岩浆 岩为陆内地壳性质,南伊鲁米德带内岩浆岩为与洋 壳俯冲有关的大陆弧性质;De Waele et al. (2003, 2006a,2006b)通过研究发现伊鲁米德带岩浆岩主要 为地壳组分,缺乏地幔组分;Xu Kangkang et al. (2018)通过研究总结前人资料,认为活动大陆边缘 之下的地幔岩浆未能穿透伊鲁米德带岩石圈,但作 为热源导致太古宙地壳多期次熔融形成了伊鲁米德 带元古宙地质体。

Tembo et al. (2002)对伊鲁米德带少量花岗岩 类全岩进行了分析,发现所有花岗岩类具有大致相 似的常量和微量元素配分模式,显示了以地壳为主 的特征;微量元素模式显示 Nb、Ti、P和 Sr 的负异 常,以及高 HFSE 含量,表明所有岩浆的形成都有 显著的地壳来源,推测这是一个下伏的古元古代岩 浆弧。

根据本次采集的伊鲁米德带基底片麻岩全岩数据,MJ11二氧化硅含量为59.78%,铁镁含量最高, 代表了形成片麻岩的初始岩浆为安山质。在IAA-OIA-MORA 判别图解上(图9),4件样品均落入岛 弧安山岩环境,说明岩石形成于岛弧环境。

#### 5.3 构造意义

De Waele et al. (2006b)根据岩浆岩锆石年龄 数据,将伊鲁米德带内岩浆岩划分为9期,并运用 板块构造理论,将伊鲁米德带的构造演化分为8个 阶段。这8个阶段分别为:①前乌萨加兰期:处于被 动边缘环境(2100 Ma),来自南部具有活动边缘的 未知大陆靠近;②乌萨加兰期:发生汇聚-变质克拉





通化(2050~1950 Ma),具有榴辉岩的乌萨加兰带 形成并发生碰撞,随后高级变质作用和大量深熔作 用后,紧随穆瓦超群沉积;③乌本迪期:主要变质克 拉通再活化(1880 Ma),再次汇聚形成的右旋挤压 转换和横向增生作用形成乌本迪带和班韦乌卢地块 大面积的再活化;④后乌本迪期:处于沉寂状态 (1880~1650 Ma),班韦乌卢地块和南部边缘拉伸、 下沉并伴随穆瓦超群沉积;⑤Lukamfwa期:少量变 质克拉通再活化(1650~1550 Ma),远端碰撞作用 导致地壳构造远场再活化及伊鲁米德带内少量地壳 为主花岗岩类的侵位;⑥伊鲁米德1期:处于被动边 缘环境(1080~1050 Ma),沿着未知克拉通边缘的 向南俯冲作用和岩浆弧作用形成南伊鲁米德带,该 时期伊鲁米德带内无岩浆作用记录;⑦伊鲁米德2 期:发生汇聚-变质克拉通化(1050~1000 Ma),南部 俯冲作用之后的碰撞作用导致伊鲁米德带边缘大规 模的再活化作用及沿汇聚边缘弧岩浆作用,该事件 仅影响伊鲁米德带边缘;⑧后伊鲁米德期(950~850



图 6 赞比亚伊索卡东部片麻岩 TAS 图解(a)及 Zr/TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>判别图解(b)(底图据 Winchester et al.,1977) Fig. 6 TAS diagram (a) and Zr/TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> diagram (b) of gneisses in the eastern Isoka, Zambia (after Winchester et al.,1977)



图 7 赞比亚伊索卡东部片麻岩 A/CNK-A/NK 图解(a,底图据 Maniar et al.,1989)和 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 图解(b,底图据 Rickwood,1989) Fig. 7 A/CNK-A/NK diagram (a,after Maniar et al.,1989)and SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O diagram (b, after Rickwood,1989) of gneisses in the eastern Isoka, Zambia



图 8 赞比亚伊索卡东部片麻岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b) (标准化值据 Sun et al. 1989)

Fig. 8 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized trace elements distribution patterns of the gneisses (normalization values after Sun et al., 1989)in the eastern Isoka, Zambia



图 9 赞比亚伊索卡东部片麻岩 IAA-OIA-MORA 判别图解(底图据 Liu Xinyu et al.,2019) Fig. 9 IAA-OIA-MORA diagram of gneisses in the eastern Isoka, Zambia(after Liu Xinyu et al., 2019)

Ma),碰撞之后,后造山作用减弱,出现 A 型花岗岩 类和基性岩脉的侵入,在 880 Ma 双峰式火山作用 为主的裂谷作用导致碰撞大陆分离,南伊鲁米德带 就位现在位置。本次所获得的 4 件片麻岩锆石 U-Pb 年龄范围为 1949±18~2025±15 Ma,可以判断 伊索卡东部片麻岩形成于乌萨加兰期。

#### 6 结论

1156

(1)伊索卡东部地区片麻岩中4组锆石谐和年 龄值分别为1949±18 Ma(MSWD=0.26)、1989±
13 Ma(MSWD=1.9)、2025±15 Ma(MSWD=
2.3)和1961±7 Ma(MSWD=1.0),这表明岩浆的结晶侵位年龄为古元古代;

(2)伊索卡东部片麻岩岩浆为过铝质高钾钙碱 性一钾玄系列;稀土配分模式明显呈右倾型,富含轻 稀土,贫重稀土,铕和铈表现为极微弱的负异常;微 量元素原始地幔标准化蛛网图显示,富集 Rb、K、 La、Pb、Nd、Sm 等元素,亏损 Ba、Nb、Ta、Ce、Sr、P、 Ti 等元素。

(3)根据伊鲁米德带的构造演化阶段,可以判断 伊索卡东部片麻岩形成于乌萨加兰期。

#### References

- Ackermann E H. 1936. Das problem der Mkushi-Gneise am NWrandder Rhodesischen masse. Geologische Rundschau, 27: 81 ~87.
- Ackermann E H. 1950. Ein neuer faltengurtel in Nordrhodesien undseine tectonische stellung im Afrikanishen grundgebirge.

Geologische Rundschau, 38:24~39.

- Ackermann E H. 1960. Strukturen im untergrund eines intrakratonischen doppelorogens (Irumiden Nordrhodesien). Geologische Rundschau, 50:538~553.
- Ackermann E H, Forster A. 1960. Grundzuge der stratigraphie undstruktur des Irumide Orogen. In: 21st International Geological Congress, 182~192.
- AndersenT. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report <sup>204</sup>Pb. Chemical Geology, 192(1-2):59~79.
- Forster A. 1965. Der kristallin sockel im ostlichen Nordrhodesien undsein verband mit anderen baueinheitenzentralund Ostafrikas. Geotektonische Forschungen, 20(I-II), 115.
- Daly M C. 1986. The Tectonic and Thermal Evolution of the Irumide Belt, Zambia. PhD Thesis, University of Leeds, 326.
- De Waele B, Mapani B. 2002. Geology and correlation of the central Irumide belt. Journal of African Earth Sciences, 35(3):385 ~397.
- De Waele B, Wingate M T D, Mapani B, Fitzsimonsl C W. 2003. Untying the Kibaran knot: a reassessment of Mesoproterozoic correlations in southern Africa based on SHRIMP U-Pb data from the Irumide belt. Geology, 31(6):509~512.
- De Waele B. 2005. The Proterozoic geological history of the Irumide belt, Zambia. Ph. D. Thesis. Curtin University of Technology, Perth, 468.
- DeWaele B, Kampunzu A B, Mapani B S E. 2006a. The Mesoproterozoic Irumide belt of Zambia. Journal of African Earth Sciences, 46(1):36~70.
- De Waele B, Jean-Paul Liégeois, Nemchin A A, et al. 2006b. Isotopic and geochemical evidence of proterozoic episodic crustal reworking within the irumide belt of south-central Africa, the southern metacratonic boundary of an Archaean Bangweulu Craton. Precambrian Research, 148(3-4):225~256.
- Winchester J A, Floyd P A. 1976. Geochemical magma type discrimination: application to altered and metamorphosed basic igneous rock. Earth Planet Sci Lett, 28(3):459~469.
- Johnson S P, De Waele B, Evans D. 2007. Geochronology of the Zambezi Supracrustal Sequence, Southern Zambia: A Record of Neoproterozoic Divergent Processes along the Southern Margin of the Congo Craton. Journal of Geology, 115(3):355~374.
- Klerkx J, Theunissen K, Delvaux D. 1998. Persistent fault controlled basin formation since the Proterozoic along the western branch of the East African Rift. Journal of African

Earth Sciences, 26:347~361.

- Liu Xinyu, Zhang Qi, Zhang Chengli. 2019. The establishment of oceanic andesites tectonic environment discrimination diagrams with big data method. Geological Bulletin of China, 38(12): 1963~1970(in Chinese with English abstract).
- Liu Yongsheng, Gao Shan, Hu Zhaochu, 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. Journal of Petrology, 51(1-2):537~571.
- Ludwig K R. 2003. User's manual for Isoplot/Ex, version 3. 70:A geochronological toolkit for microsoft excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 4:1~76.
- Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. Geological society of America bulletin,  $101(5):635 \sim 643$ .
- Rainaud C L, Armstrong R A, Master S, Robb L J, Mumba PACC. 2002. Contributions to the geology and mineralisation of the central African Copperbelt: I. Nature and geochronology of the pre-Katangan basement. In: Namibia, G. S. O. (Ed.), 11th IAGOD Quadrennial Symposium and Geocongress. Geological Survey of Namibia. Windhoek, Namibia, 5.
- Rainaud C, Master S, Armstrong R A, Robb L J. 2003. A cryptic Mesoarchaean terrane in the basement to the central African Copperbelt. Journal of the Geological Society of London, 160: 11~14.
- Rainaud C, Master S, Armstrong R A, Robb L J. 2005. Geochronology and nature of the Palaeoproterozoic basement in the Central African Copperbelt (Zambia and the Democratic Republic of Congo), with regional implications. Journal of African Earth Sciences, 42:1~31.
- Ren Junping, Wang Jie, Zuo Libo, Gu Alei, Sun Hongwei, Xu Kangkang, ChipilaukaMukofu, Alphet Phaskani Dokowe, Ezekiah Chikambwe, Chishimba Canisius, Daniel Malunga. 2019a. Zircon U-Pb geochronology, Lu-Hf isotopic compositions and geochemical Characteristics of the quartz diorites from western Kasama in northern Zambia. Acta Geologica Sinica, 93(11):2832~2846(in Chinese with English abstract).
- Ren Junping, Wang Jie, Gu Alei, Zuo Libo, Sun Hongwei, Xu Kangkang, Wu Xingyuan, Alphet Phaskani Dokowe, Ezekiah Chikambwe. 2019b. Zircon U-Pb geochronology and Lu-Hf isotopic composition of syenogranite, northeastern Zambia. Geological Surveyand Research, 42(3):161~165(in Chinese with English abstract).
- Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements. Lithos, 22(4):  $247 \sim 263$ .
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. Geological Society, London, Special Publications, 42 (1):313~345.
- Tembo F, De Waele B, Nkemba S. 2002. Syn-to post-orogenic

granitoid magmatism in the Irumide Belt of Zambia: geochemical evidence. Afr. Geol. Rev. 9(1):  $1 \sim 17$ .

- The unissen K, Klerkx J, Melnikov A, Mruma A. 1996. Mechanisms of inheritance of rift faulting in the western branch of the East African Rift, Tanzania. Tectonics, 15(4); 776  $\sim$ 790.
- Vrana S, Kachlik V, Kroener A, et al. 2004. Ubendian basement and its late Mesoproterozoic and early Neoproterozoic structural and metamorphic overprint in northeastern Zambia. Journal of African Earth Sciences, 38(1):1~21.
- Winchester J A, Floyd P A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. Chemical Geology, 20;325~343.
- Xing Shi, Zhang Jinda, Ren Junping, Gu Alei, Du Minglong, Ji Shanqing. 2018. Discussion on thecharacteristics and mineralization of the Irumide belt in the mid-southern Africa. Geological Survey and Research, 41 (03): 18 ~ 26 + 45 (in Chinese with English abstract).
- Xu Kangkang, Liu Xiaoyang, Xie Wei, et al. 2018. The Regional Geology and Tectonic Evolution of the Bangweulu Block and Irumide Belt in Zambia. Geology And Exploration, 54(1):69~ 81(in Chinese with English abstract).
- Zuo Libo, Ren Junping, Wang Jie, Gu Alei, Sun Hongwei, Xu Kangkang, Alphet Phaskani Dokowe, Ezekiah Chikambwe. 2020. Geochemical characteristics, zircon U-Pb ages and Lu-Hf isotopiccomposition of granites in Bangweulu Block, Zambia. Geological Surveyand Research, 43(01): 30 ~ 41 (in Chinese with English abstract).

#### 参考文献

- 刘欣雨,张旗,张成立. 2019. 基于大数据方法建立大洋安山岩构 造环境判别图. 地质通报, 38(12):1963~1970.
- 任 军 平, 王 杰, 左 立 波, 古 阿 雷, 孙 宏 伟, 许 康 康, ChipilaukaMukofu, Alphet Phaskani Dokowe, Ezekiah Chikambwe, Chishimba Canisius, Daniel Malunga. 2019a. 赞 比亚北部省卡萨马西部石英闪长岩锆石 U-Pb 和 Lu-Hf 同位素 及地球化学特征. 地质学报, 93(11):2832~2846.
- 任军平,王杰,古阿雷,左立波,孙宏伟,许康康,吴兴源,Alphet Phaskani Dokowe, Ezekiah Chikambwe. 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. 地质调查 与研究,42(3):161~165.
- 邢仕,张金达,任军平,古阿雷,杜明龙,纪山青.2018.非洲中南 部伊鲁米德构造带演化及成矿作用探讨.地质调查与研究,41 (03):18~26+45.
- 许康康,刘晓阳,谢薇,王杰,左立波.2018. 班韦卢地块和伊鲁米 德带区域地质及构造演化特征. 地质与勘探,54(1):69~81.
- 左立波,任军平,王杰,古阿雷,孙宏伟,许康康,Alphet Phaskani Dokowe, Ezekiah Chikambwe. 2020. 赞比亚班韦乌卢地块花岗 岩地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄及 Lu-Hf 同位素组成. 地质调 查与研究,43(01);30~41.

## Zircon U-Pb geochronology, geochemical characteristics and petrogenesis of the gneisses in the eastern Isoka, Zambia

ZUO Libo<sup>1)</sup>, REN Junping<sup>\*1)</sup>, QIU Liang<sup>2)</sup>, WANG Jie<sup>1)</sup>, GU Alei<sup>1)</sup>,

SUN Hongwei<sup>1)</sup>, XU Kangkang<sup>1)</sup>, Alphet Phaskani DOKOWE<sup>3)</sup>,

Abraham MUKANGWA<sup>3)</sup>, Daniel MALUNGA<sup>3)</sup>, Chisamba MWANSA<sup>3)</sup>, Peter CHIPUMBU<sup>3)</sup>

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

2) State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences (Beijing),

Beijing, 100083, China; 3) Geological Survey Department, Lusaka, P.O. Box. 50135, Zambia

\* Corresponding author:rjp2333@126.com

#### Abstract

The eastern Isoka is located in the Irumide Belt. The Irumide Belt is a northeast-trending fold and thrust belt that stretches from central Zambia, where it is truncated by the Neoproterozoic Zambezi belt, to the Zambia-Tanzania-Malawi border in the northeastwhere it terminates against northwest trending Paleoproterozoic Ubendian Belt. Zircon U-Pb dating results show that the magmatic emplacement ages of biotite monzogneiss, two-mica garnet plagioclase gneiss, garnet bearing biotite K-feldspar gneiss and garnet biotite plagiogneiss range from  $1949\pm18$  Ma to  $2025\pm15$  Ma, indicating that theywere formed in the Paleoproterozoic. The geochemical analysis results show that the gneiss magma in the eastern Isoka belongs to peraluminous high-k calc alkaline-shoshonitic series; the REE distribution pattern is obviously right dipping, rich in LREE and poor in HREE; Eu and Ce show extremely weak negative anomalies; the primitive mantle-normalized trace elements distribution patterns of the gneisses shows that the magma is enriched in Rb, K, La, Pb, Nd, Sm, and depleted in Ba, Nb, Ta, Ce, Sr, P, Ti and other elements. Based on the tectonic evolution of the Irumide Belt, it can be concluded that the gneisses in the eastern Isoka were formed in the Usagaran Epoch.

Key words: the Irumide Belt; Zircon U-Pb dating; geochemical characteristics; petrogenesis; Zambia