

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2023.08.010

坦桑尼亚维多利亚湖金矿田典型金矿床成矿特征与矿床成因

彭俊, 白德胜*, 祁东, 梁永安, 楚明春

PENG Jun, BAI Desheng*, QI Dong, LIANG Yong'an, CHU Mingchun

河南省地质矿产勘查开发局第二地质矿产调查院, 河南 郑州 450001

No.2 Institute of Geological and Mineral Resources Survey of Henan, Zhengzhou 450001, He'nan, China

摘要:坦桑尼亚维多利亚湖金矿田经历了复杂的构造变形、岩浆活动和成矿作用演化,形成了丰富的金矿产资源。通过对其中的典型金矿床地质特征、成矿流体来源和成矿时代等方面研究,探讨了矿床成因和金的沉淀机制。金矿床主要赋存在绿岩带地层单元中,含矿构造主要为与绿岩带走向大致相同的韧-脆性剪切带。金矿石中 H_2O-CO_2 型流体包裹体均一温度范围主要集中于 $300\sim 400^\circ C$,盐度范围集中于 $14\%\sim 22\%$,成矿流体属中-高温、高盐度流体;成矿流体来源主要为岩浆水,在成矿过程中部分变质热液也参与其中。金矿床成矿时代为 $2710\sim 2620$ Ma,即为新太古代;矿床类型为受剪切带控制的中-高温热液金矿床。上述研究进展对非洲绿岩带内的金矿找矿勘查工作具有指导意义。

关键词:绿岩带金矿;矿床成因;维多利亚湖金矿田;坦桑尼亚

中图分类号:P618.51 文献标志码:A 文章编号:1671-2552(2023)08-1377-13

Peng J, Bai D S, Qi D, Liang Y A, Chu M C. Metallogenic characteristics and genesis of typical gold deposits in Victoria Lake gold field in Tanzania. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(8): 1377-1389

Abstract: The Victoria Lake gold field has experienced complex structural deformation, magmatic activity and mineralization evolution, forming rich gold resources. Based on the study of geological features of typical gold deposits, source of ore-forming fluid and ore-forming age of the Victoria Lake gold field in Tanzania, this paper explores the genesis of the deposit and the gold precipitation mechanism. The gold deposits are mainly hosted in the stratigraphic units of the greenstone belt, and the ore bearing structures are mainly ductile-brittle shear zones with roughly the same strike as the greenstone belt. The homogenization temperature range of H_2O-CO_2 fluid inclusions in gold ores is mainly $300\sim 400^\circ C$, and the salinity range is $14\%\sim 22\%$. The ore-forming fluid belongs to medium-high temperature and high salinity fluid; The source of ore-forming fluid is mainly magmatic water, and part of metamorphic hydrothermal fluid also participates in the ore-forming process. The mineralization age of the Lake Victoria gold deposit in Tanzania is $2700\sim 2620$ Ma, which is Archean; The deposit type is a medium-high temperature hydrothermal gold deposit controlled by shear belt. The above research progress is of certain theoretical guiding significance for the prospecting and exploration of gold deposits in the greenstone belt of Africa.

Key words: greenstone belt gold deposits; genesis of the deposit; Victoria Lake gold field; Tanzania

维多利亚湖金矿田横跨坦桑尼亚西北部、肯尼亚西部和乌干达东北部,环维多利亚湖分布,其绝大部分处于坦桑尼亚境内,面积约 $10\times 10^4 km^2$,是非洲重要的金矿产地和勘探区域。维多利亚湖金矿

收稿日期:2022-09-30;修订日期:2023-02-23

资助项目:河南省财政地质勘查项目《坦桑尼亚维多利亚湖绿岩带金矿床成矿规律研究及资源潜力评价》(编号:豫地矿[2021]8号)

作者简介:彭俊(1983-),男,硕士,高级工程师,从事矿产普查与勘探工作。E-mail:251962751@qq.com

*通信作者:白德胜(1968-),男,教授级高级工程师,从事矿产勘查及成矿规律研究。E-mail:365574619@qq.com

田早期的采矿历史始于德属东非殖民时代,1909年7月第一个商业金矿投产,至坦桑尼亚独立前(1961年),共生产了约120 t黄金。2000年以来,随着坦桑尼亚矿业法的颁布实施和黄金价格的上涨,加拿大、澳大利亚、英国、南非等国的矿业公司大量涌入,盖塔(Geita)、布里扬胡鲁(Bulyanhulu)、北马拉(North Mara)、布兹瓦吉(Buzwagi)、高等普莱德(Golden Pride)等一批大型、特大型现代化矿山相继投产,使维多利亚湖金矿田成为非洲重要的黄金产地和金成矿研究的热点地区(Chamberlain, 2003; Vos et al., 2009; Many, 2017; Van et al., 2017)。

坦桑尼亚维多利亚湖金矿田经历了复杂的构造变形-岩浆活动-成矿作用演化,形成了丰富的金矿资源,金矿床(点)星罗棋布;金矿床(点)主要与低级变质作用花岗-绿岩带有关,产于与同造山构造同期或稍晚的剪切带中(崔小军等, 2014; 2015; 姜高珍等, 2015)。Bath(1990)、Borg et al.(1999)对维多利亚湖金矿田绿岩带空间分布特征、矿化类型和赋矿建造进行了研究,认为该区域的主要金矿化类型为构造蚀变岩型和含金石英脉型。但总体上,以往的研究主要集中在成矿类型的归纳和总结上,对成矿地质特征仍缺乏系统的认识,其矿床成因有待进一步深化总结。本文通过对维多利亚湖金矿田典型金矿床的地质特征、成矿流体来源和成矿时代进行研究,探讨了矿床成因和金的沉淀机制,为在非洲绿岩带内的金矿找矿勘查工作提供了理论支撑。

1 区域地质背景

1.1 地层

维多利亚湖金矿田位于太古宙坦桑尼亚克拉通北部,区内地层大致可以划分为3个年代地层单元(彭俊等, 2018)。^①多多马系(Dodoma System),主要为克拉通基底,由位于盆地北、东和南部的片麻岩、混合岩等组成。多多马系的地层时代可能与尼安萨系相同或略早,经历了多期变质变形作用,最晚的变质作用Rb-Sr法年龄为 2500 ± 100 Ma和 2580 ± 60 Ma。^②尼安萨系(Nyanzian System),主要为绿岩带内层状变火山岩和变沉积岩,其下部为辉长岩、玄武岩等基性火山岩,中上部为长英质火山碎屑岩、条带状铁建造、流纹岩等,区域变质作用一般达到绿片岩相,是维多利亚湖金矿田的赋矿地层

单元(图1)。^③卡维龙多系(Kavirongian System),仅在绿岩带局部出露,其不整合上覆于尼安萨系之上,岩性主要为石英岩、沉积岩等,地层中火山岩的锆石U-Pb年龄为 2667 ± 8 Ma。

1.2 构造

坦桑尼亚太古宙克拉通内沉积盆地经过挤压、推覆作用及地壳升降和板块拉伸作用,形成5个呈断续弧状或不规则带状展布的绿岩带(曲欢, 2014; 孙宏伟等, 2015),分别为穆索马-马拉(Musoma-Mara)绿岩带、乞力马非哈(Kilimafedha)绿岩带、苏库马兰德(Sukumaland)绿岩带、恩泽加(Nzega)绿岩带、伊兰巴-塞肯克(Iramba-Sekenke)绿岩带,受多次变形事件影响,绿岩带内褶皱、韧性剪切带和脆性断裂构造十分发育。绿岩带地层褶皱可分为3期变形,第一期变形为褶皱轴平行于层理的等轴褶皱;第二期变形为褶皱轴近垂直于层理的同心褶皱、等斜褶皱;第三期变形为褶皱轴近平行层理的宽缓褶皱。区域控矿构造主要为近东西向、北西向和北东向3组剪切构造带(图1),具体到每个绿岩带内部,其控矿构造与容矿构造走向与绿岩带走向基本一致。受多期变形作用影响,形成复杂强烈的应变区,伴随大量的不同规模的剪切裂隙、断裂,为成矿流体运移和矿体定位提供了有利条件(张超等, 2022)。

1.3 岩浆岩

坦桑尼亚维多利亚湖绿岩带本身就是不同期次岩浆活动的产物。在中太古代晚期和新太古代早期的间歇式酸性火山喷发-深源镁铁质火山喷发,为形成环维多利亚湖地区大面积的花岗-绿岩地体形成提供了物源基础。绿岩盆地形成后,随着大规模花岗岩浆侵入,使绿岩层序地层单元受到挤压、破坏,呈带状、岛弧状分布。元古宙是维多利亚湖绿岩带形成后的又一次岩浆活动期,主要为中基性岩浆沿北东向、近南北向断裂带侵入,形成中基性岩脉、岩墙(彭俊等, 2017; 王建光等, 2017; 胡鹏等, 2022)。

2 维多利亚湖金矿田典型金矿床

坦桑尼亚北部维多利亚湖地区金矿床分布广泛,绝大多数金矿床(点)赋存在太古宙低级变质作用绿岩带中,产于与同造山作用同期或稍晚的剪切带中(图1)。下文对一些具有代表性的典型金矿床

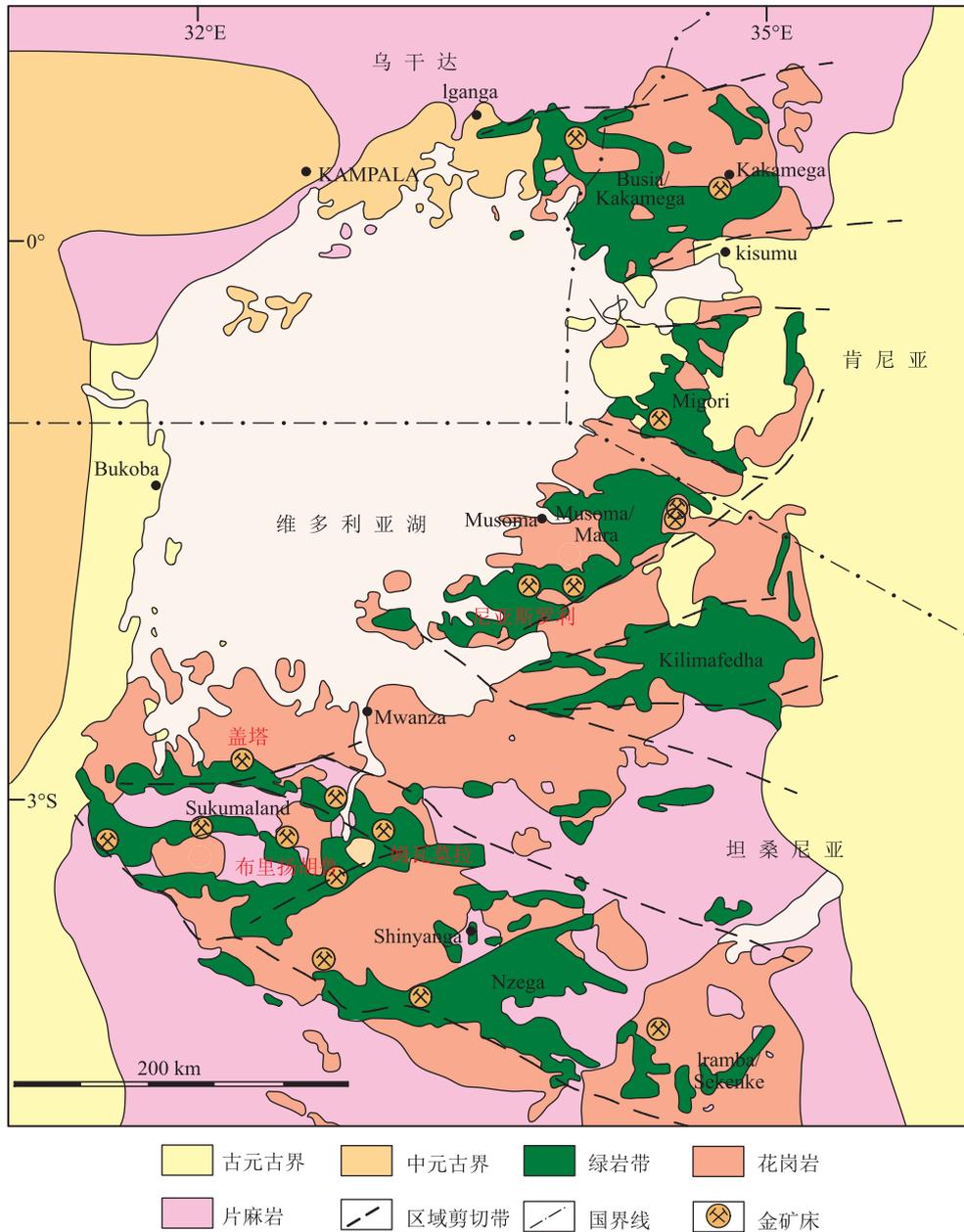


图 1 维多利亚湖金矿田绿岩带及主要金矿床分布图(据 Van et al.,2017 修改)
 Fig. 1 Distribution of greenstone belt and main gold deposits in Victoria Lake gold field

进行讨论。

2.1 盖塔金矿床

坦桑尼亚西北部的盖塔矿山是东非地区历史悠久的金矿山,位于盖塔成矿带中部,包含 6 个大型条带状铁建造型金矿床,分别为 Geita Hill、Nyankanga、Lone Cone、Matandani、Kukuluma 及 Star and Comet。其中 Nyankanga 金矿床资源量最大,该矿床于 1995 年被 Ashanti 金田公司发现,沿北东向

近 3 km 长的矿化剪切带分布,金资源量 220 t,平均品位 5.8 g/t。

Nyankanga 金矿区出露地层主要为闪长岩和条带状铁建造,局部夹薄层状变质长英质凝灰岩、页岩、粉砂岩。Nyankanga 剪切带是区内的主控矿构造,长约 3 km,宽 10~100 m,其延伸方向与绿岩带走向基本吻合,呈北东东向(图 2);另外还有少量近南北向和北西向剪切带,为成矿后期构造。金矿体

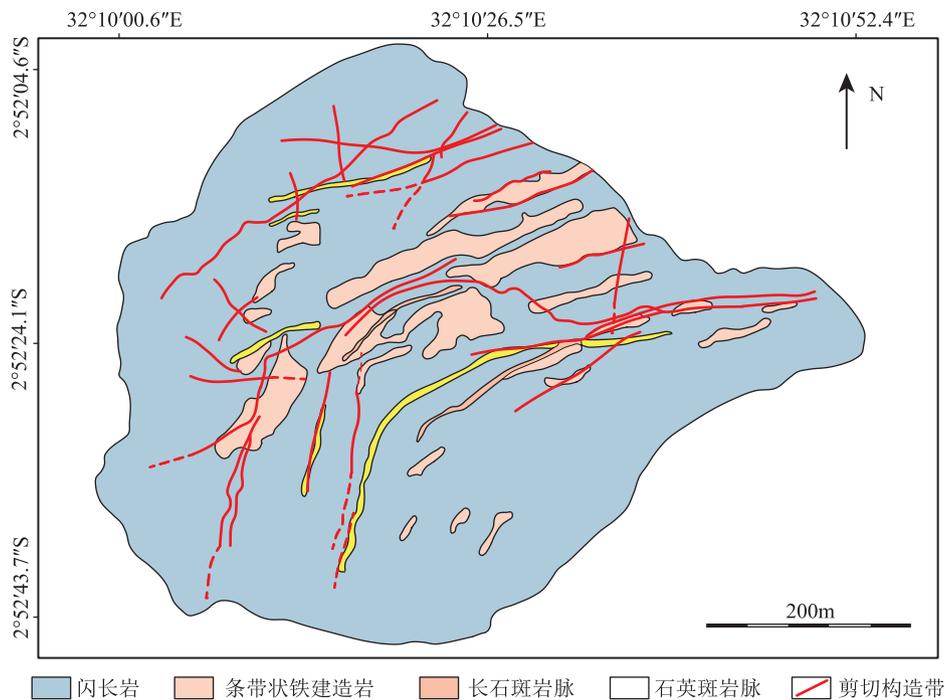


图2 Nyankanga 金矿床地质图

Fig. 2 Geological map of Nyankanga gold deposit

基本位于 Nyankanga 剪切带下部与条带状铁建造岩接触带附近的角砾岩带中,长约 2.3 km,宽 2~40 m,总体走向北东东,倾向北西,局部受岩体侵入作用影响,走向呈近南北向,倾向西,倾角 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$, Au 品位集中在 $0.5\sim 8\text{ g/t}$,最高可达 125 g/t 。金矿体总体呈脉状分布,沿走向具有分支复合、波状延伸特征,沿倾向具有上陡下缓、上厚下薄特征。构造带内闪长岩角砾岩带和条带状铁建造角砾岩带均有金矿化,但条带状铁建造角砾岩带金矿化作用强烈, Au 品位更高。

区内矿石类型为含金-黄铁矿-蚀变岩型及含金-石英-黄铁矿型,矿石主要结构为裂隙充填结构、半自形-他形粒状结构,构造主要为块状构造、细脉浸染状构造。矿石中矿石矿物主要为黄铁矿、磁黄铁矿、毒砂、自然金等,局部有黄铜矿、方铅矿和闪锌矿,脉石矿物主要为石英、绿泥石、绿帘石、白云石、方解石、黑云母、阳起石等。自然金一般呈他形粒状、片状,粒径多在 $0.01\sim 0.07\text{ mm}$ 之间,主要呈粒间金和裂隙金嵌布。矿区内热液蚀变沿 Nyankanga 剪切构造带分布,且蚀变分带特征明显,其中硅化、黄铁矿化与金矿化作用关系密切。

根据矿脉相互穿插关系及矿物组成和共生特

征,该金矿床的成矿作用大致可划分为 4 个成矿阶段。①黄铁矿-石英阶段(I):石英脉主要由粗粒石英组成,分布在绿泥石化、绢云母化蚀变岩中,局部可见少量粗晶黄铁矿。②石英-黄铁矿阶段(II):出现较多的黄铁矿和磁黄铁矿为特征,黄铁矿主要沿石英或蚀变岩裂隙呈细脉状、浸染状产出。③石英-多金属硫化物阶段(III):为主要成矿阶段,在 Nyankanga 剪切带下部与条带状铁建造岩接触带附近的角砾岩带中形成绿泥石+石英+黄铁矿+磁黄铁矿+毒砂蚀变组合,自然金主要产于岩石裂隙或黄铁矿、毒砂等硫化物的晶隙中。④碳酸盐化阶段(IV):局部形成沿裂隙充填的方解石细脉。

2.2 布里扬胡鲁金矿床

布里扬胡鲁金矿床是坦桑尼亚最大的金矿床,赋存于太古宙卡哈马成矿带内弧,金资源量达到 542 t ,平均品位 10.50 g/t ;伴生铜金属量 $18.9\times 10^4\text{ t}$,平均品位 0.67% 。该矿床由非洲巴里克公司运营,占 84% 股份,坦桑尼亚政府占 16% 股份。

该金矿床位于卡哈马成矿带内弧带北端,区内出露绿岩带长英质火山岩和镁铁质火山岩,局部有页岩产出(图 3)。岩性单元变质程度为绿片岩相,地层走向北北西,倾向北东,呈单斜地层产出。

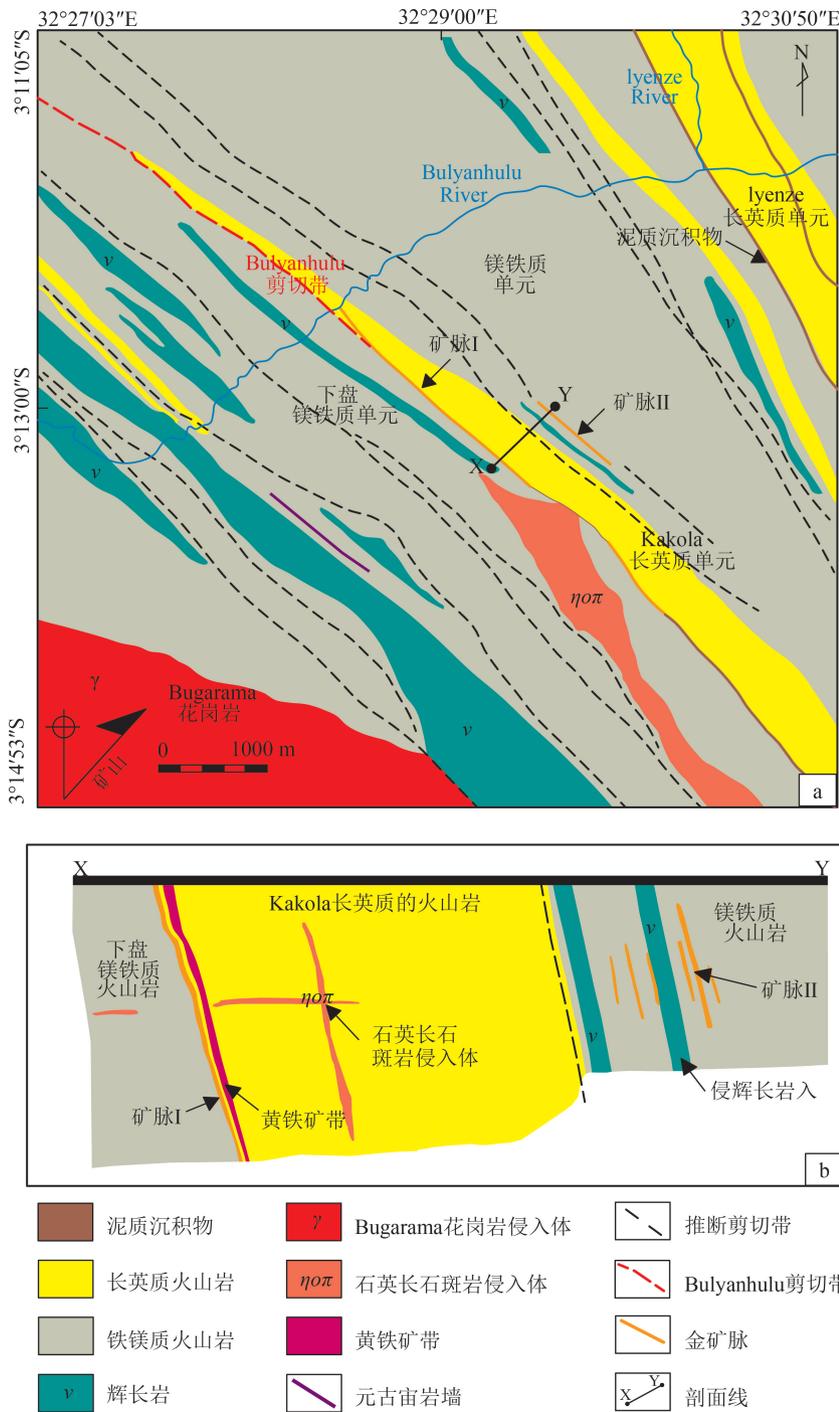


图 3 布里扬胡鲁金矿床地质图(a)及剖面(b)

Fig. 3 Geological map(a) and vein profile(b) of Bulyanhulu gold deposit

Bulyanhulu 剪切带是区内主要的控矿构造,控制主矿体的空间展布形态。布里扬胡鲁金矿床类型为受剪切带控制的脉型金矿床,矿体由一系列沿剪切构造带走向充填的含金石英脉组成,单个金矿体的厚度从数厘米到几米不等。主矿体为 I 号矿脉,受

Bulyanhulu 剪切带控制,金矿体赋存在长英质火山岩和镁铁质火山岩接触部位的剪切构造带内,长约 4 km,宽 1~10 m,走向 310°,倾向北东,倾角 80°~85°,陡倾产出。

区内矿石类型主要为含金石英脉。矿石中矿石矿物主要为自然金、黄铁矿、黄铜矿,次要为磁黄铁矿、镍黄铁矿、闪锌矿、方铅矿等;脉石矿物主要为石英、长石、绢云母、方解石、绿泥石等。金矿物以自然金为主,有少量金矿物在银金矿中有不同程度的富集,一般与黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿等矿物组合共生。矿化剪切带的典型蚀变分带以碳酸盐化和绢云母化为特征,虽然石英以矿脉形式出现,但强烈蚀变围岩中硅化并不强烈。

根据矿化脉的相互穿插关系和矿物共生组合,可将该金矿床成矿作用划分为 4 个成矿阶段。①黄铁矿-石英阶段(I):在石英脉中出现海绵状或结核状黄铁矿,不含金。②石英-黄铁矿阶段(II):在石英脉的边缘沉淀了黄铁矿,其中含有少量金。③石英-多金属硫化物阶段(III):穿插 II 期石英脉,硫化物组合以黄铁矿、磁黄铁矿和黄铜矿为主,伴生少量的闪锌矿、方铅矿、碲化物等。④碳酸盐化阶段(IV):在局部发育,主要为沿裂隙充填的方解石脉。

2.3 姆瓦莫拉金矿床

姆瓦莫拉金矿床位于卡哈马(Kahama)成矿带东部,东接马巴莱-布洪古基拉(Mabale-Buhungukira)成矿带(袁杨森等,2016)。该金矿床由河南省地矿局第二地质矿产调查

院勘探并开发,金资源量约 34 t,Au 平均品位 3.87 g/t。

该金矿床位于卡哈马成矿带外弧(图 4),矿区地表被沼泽性黑土和第四系松散残坡积物覆盖,其下伏为变质凝灰岩和条带状含铁建造(磁铁石英

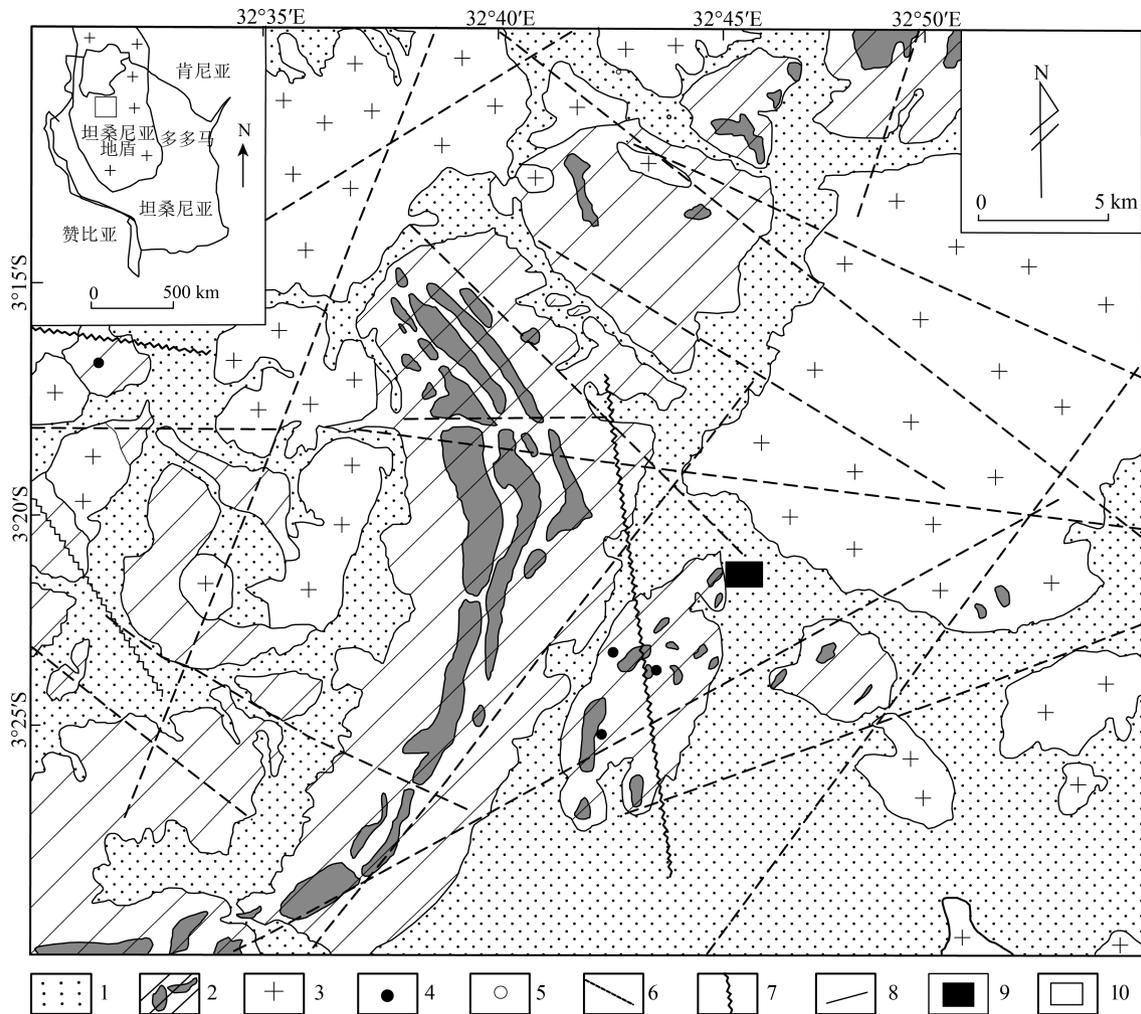


图4 姆瓦莫拉金矿区及外围地质简图(据李水平等,2016修改)

Fig. 4 Geological map of Mwamola gold mine area and surrounding areas

- 1—第四系及沼泽性黑土;2—绿岩带(以太古宇尼安萨群岩层为主,夹条带状含铁建造);3—花岗质岩石(时代不确定);
4—金矿床;5—金矿点;6—断层;7—剪切带;8—地质界线;9—姆瓦莫拉金矿;10—矿区区域位置

岩)。区内主要控矿构造为受倒转背斜控制的尼安萨群上、下段界面上的层间滑动剪切破碎带。金矿化蚀变带位于褶皱背斜的两翼,其形态、产状严格受层间破碎剪切带控制。M1-I 金矿体是区内的主矿体,其产状与M1 金矿化蚀变带(倒转背斜西翼)基本一致,总体走向 8° ,倾向 278° ,倾角 75° (白德胜等,2016;李水平等,2016)。矿体围岩主要为条带状磁铁石英岩、凝灰质砂岩和变质凝灰岩。

金矿体产于“条带状含铁建造岩层”和“酸性火山沉积岩层”2个能干性差异较大的岩层之间形成的层间剪切破碎带中,金矿体的形态、产状严格受该层间破碎剪切带控制,呈层状、似层状产出。主

要含矿岩性为条带状铁建造岩和硅化(石英)碎裂岩。金矿石中矿石矿物主要有黄铁矿、毒砂、磁黄铁矿、磁铁矿、黄铜矿等;脉石矿物主要有石英、长石、绢云母、绿泥石、碳酸盐岩矿物等。金主要以自然金形式赋存,以中细粒嵌布为主,粒径在 $0.01\sim 0.07\text{ mm}$ 之间;多为粒状,其次为片状、棒状和枝杈状;大部分为裸露和半裸露的自然金,分布在黄铁矿、磁铁矿矿物颗粒间的粒间金及分布在石英脉、黄铁矿裂隙间的裂隙金,少部分为包裹金,为硫化物及石英包裹。

该矿床内围岩蚀变较发育,具有明显的分带特征,多种热液蚀变叠加时,含金量明显提高,反之则

较低。剪切破碎带内条带状含铁建造岩层以石英+绿泥石+黄铁矿+毒砂+磁黄铁矿为主要蚀变矿物组合,而该剪切破碎带内的酸性火山沉积岩完全无金矿化显示。

根据矿脉相互穿插关系及矿物组成和共生特征,该金矿床的成矿作用大致可分为 4 个成矿阶段(杨东潮等,2013)。
 ①少硫化物-深灰色石英脉阶段(I):早期形成的石英因其中混杂有细小磁铁矿颗粒常呈深灰黑色,硫化物多呈稀缺浸染状分布于石英中,该阶段含 Au 品位低。
 ②自然金-石英-多金属硫化物(II)阶段:为主要成矿阶段,形成绿泥石+石英+黄铁矿+磁黄铁矿+毒砂蚀变组合,自然金主要产于在岩石裂隙或黄铁矿、毒砂等硫化物晶隙或包裹在磁铁矿、石英、硫化物等矿物晶体中。
 ③黄铁矿-烟灰色石英脉阶段(III):石英呈烟灰色细脉状沿张性裂隙充填或穿切主成矿阶段形成的硫化物细脉,常构成富矿部位。
 ④碳酸盐化阶段(IV):灰白色方解石、淡黄色细粒铁白云石和低温石英沿裂隙呈脉状分布。

2.4 尼亚斯罗利金矿床

尼亚斯罗利金矿床位于马拉-穆索马(Mara-Musoma)成矿带中西部,由河南省地矿局第二地质矿产调查院勘探并开发,金资源量约 10.85 t,Au 平均品位 6.62 g/t。

矿区出露地层较简单(图 5),主要为太古宇尼亚安萨系绿岩,岩性主要为变安山质凝灰岩,变质程度达绿片岩相。矿区内构造以韧-脆性剪切断裂构造为主,褶皱不发育。地层呈向南倾斜的单斜产出,地层倾角 65°~80°之间。矿区内断裂构造多成组成群产出,控制着主要金矿体的空间分布。规模较大的断裂构造主要有近东西向、北西向和北东向 3 组,其中近东西向断裂带是区内主要控矿、含矿断裂构造。

M1-I 金矿体是区内主矿体,走向近东西向,控制长度为 1080 m,平均品位 7.02 g/t,平均厚度为 1.88 m。矿体呈不规则脉状,局部无矿地段呈港湾状,矿体其他部分形态较完整,沿走向向两端有变

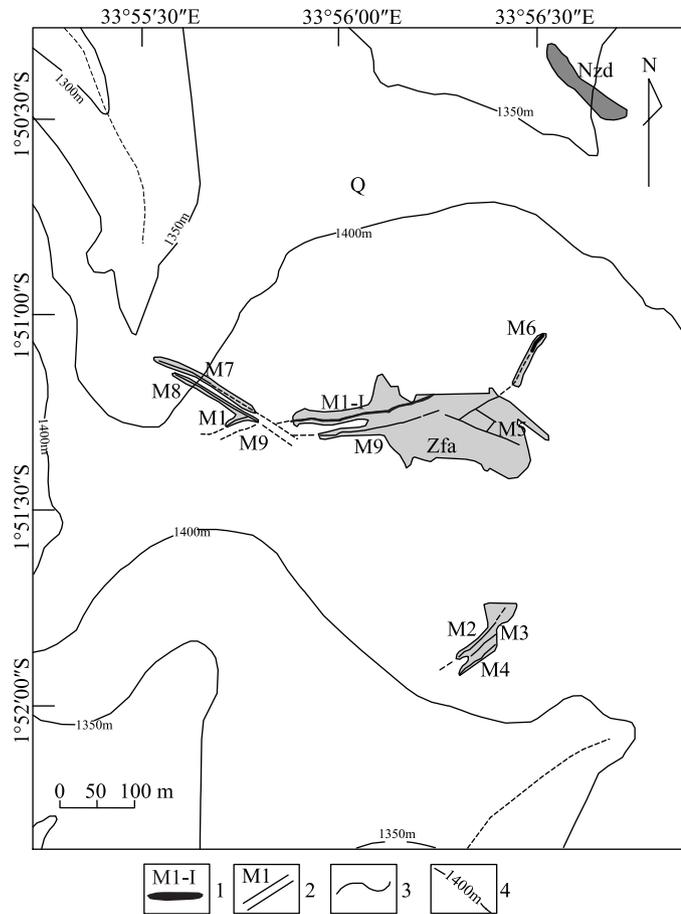


图 5 尼亚斯罗利金矿区地质简图

Fig. 5 Geological sketch map of the Nyasirori gold deposit
 Q—第四系;Zfa—变质凝灰岩;Nzd—辉绿岩;1—金矿体及编号;
 2—金矿化蚀变带及编号;3—地质界线;4—等高线

薄趋势。矿体沿走向有向西侧伏的趋势,沿倾向具有明显的上陡下缓的变化特点。

矿石类型较简单,主要为稠密浸染状黄铁绢英蚀变岩型金矿石和含金石英脉。矿石中矿石矿物主要为黄铁矿、毒砂、褐铁矿及少量的磁黄铁矿、黄铜矿、自然金,脉石矿物主要为石英、绢云母、绿泥石、碳酸盐矿物等。金矿物主要以自然金形式存在,以包裹金和粒间金形式赋存(各占 50%左右),粒径多在 0.010~0.037 mm 之间,主要为微细粒金。

根据矿脉相互穿插关系及蚀变矿物组合特征,该矿床的成矿作用可划分为 4 个成矿阶段。
 ①黄铁矿-石英阶段(I):硅质流体胶结碎裂岩块,形成硅质构造角砾岩,中粗粒黄铁矿呈细脉状在裂隙中充填,该阶段基本无金矿化。
 ②绢英岩化阶段(II):

成矿热液交代碎裂岩、角砾岩形成石英、绢云母等蚀变矿物集合体,部分自然金产于石英粒间裂隙或包裹于石英矿物晶体中。③石英-多金属硫化物阶段(Ⅲ):为主要成矿阶段,形成石英+黄铁矿+毒砂蚀变组合,自然金主要产于石英、黄铁矿、毒砂的粒间裂隙或包裹在石英、黄铁矿的矿物晶体中。④碳酸盐化阶段(Ⅳ):常见白云石、方解石等沿裂隙充填呈脉状产出,错断矿石早期组构。

3 矿床地球化学特征

3.1 流体包裹体

本次研究在姆瓦莫拉金矿床和尼亚斯罗利金矿床挑选了4件代表性较强的石英流体包裹体样品,其中姆瓦莫拉金矿床硅化蚀变岩的样品编号为L1和L5,尼亚斯罗利金矿床含金石英脉样品种号为C7和L8。测试工作由中国地质调查局天津地质调查中心实验室完成。

3.1.1 流体包裹体类型和特征

根据镜下观察,样品中石英内发育有大量的流体包裹体,主要为原生包裹体和假次生包裹体,多沿裂隙、成群或散乱分布,少量孤立产出;极少量为次生包裹体,主要分布于石英脉后期所产生的裂隙中。流体包裹体体积整体较小,一般为3~6 μm。流体包裹体类型以气液两相为主,在气相成分中除CO₂为主外,部分包裹体还含有少量CH₄,液相成分主要是H₂O(图6)。

3.1.2 均一温度与盐度

通过对流体包裹体进行显微测温研究,测得石英样品中的流体包裹体均一温度为181.7~413.4℃,范围较大。多数包裹体均一到液相,少数在完全均一前爆裂。均一温度直方图(图7)表明,流体包裹

体的均一温度峰值为160~180℃和300~400℃,主要集中于300~400℃,表明金矿床成矿流体属于中高温热液,同时多个均一温度峰值也表明研究区金矿床发生了多次热液活动。Chamberlain(2003)对布里扬胡鲁金矿床含金石英脉进行了流体包裹体均一温度测定,石英脉流体包裹体的均一温度介于170~401℃之间,主要集中在300~400℃,属于中—高温矿床。姆瓦莫拉金矿床Ⅱ阶段和Ⅲ阶段石英脉样品的流体包裹体均一温度分别为181.7~294.5℃和175.8~379.1℃,尼亚斯罗利金矿床Ⅱ阶段和Ⅲ阶段石英脉样品的流体包裹体均一温度分别为287.2~361.7℃和312.3~413.4℃,布里扬胡鲁金矿床Ⅱ阶段和Ⅲ阶段石英脉样品的流体包裹体均一温度分别为295~358℃和170~401℃,说明Ⅱ阶段的均一温度较Ⅲ阶段的略低。

盐度利用冰点温度与盐度换算公式来计算(邵洁涟等,1986;卢焕章等,2004),计算公式为:

$$S=0.00+1.78T_m-0.0442T_m^2+0.000557T_m^3$$

(0~23.3%的NaCl溶液) (1)

式中:S为盐度(%), T_m 为冰点降低的温度(℃)。

由实验数据可知,本次样品流体包裹体的冰点温度范围为-20.4~-8.9℃,根据公式(1)计算获得流体包裹体盐度介于12.73%~22.65%之间,主要集中于14%~22%,表明其成矿流体盐度值较高。其中,姆瓦莫拉金矿床Ⅱ阶段和Ⅲ阶段石英脉中流体包裹体盐度分别集中于12.73%~18.30%和14.15%~21.19%;尼亚斯罗利金矿床Ⅱ阶段和Ⅲ阶段石英脉的流体包裹体盐度分别集中于15.76%~20.60%和17.52%~22.65%,总体上Ⅱ阶段石英脉的流体包裹体盐度与Ⅲ阶段相差不大。而布里扬胡鲁金

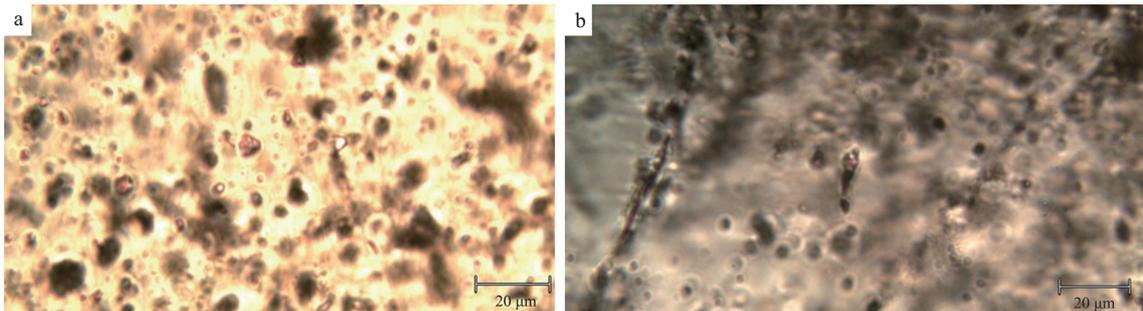


图6 流体包裹体显微照片

Fig. 6 Micrograph of fluid inclusion

a—原生包裹体(姆瓦莫拉金矿L+V两相);b—沿矿物裂隙产出的包裹体(尼亚斯罗利金矿L+V两相)

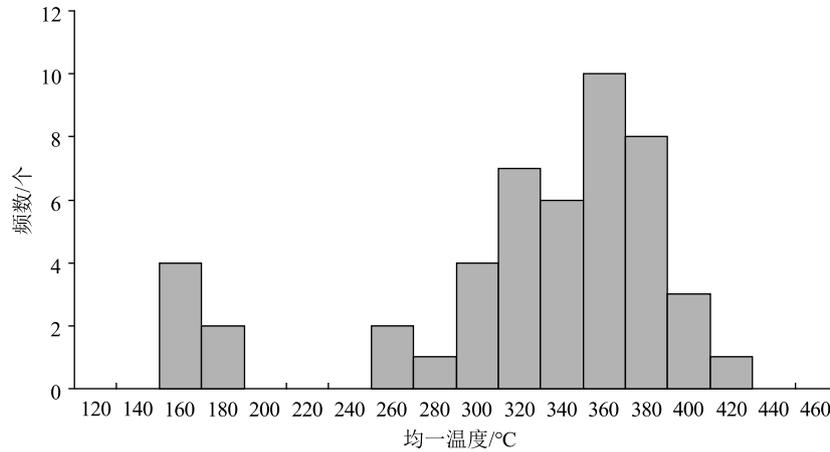


图 7 样品均一温度直方图

Fig. 7 Histogram of homogenization temperature in sample

矿床Ⅱ阶段和Ⅲ阶段石英脉的流体包裹体盐度分别介于 11.70%~16.90% 和 18.63%~23.05% 之间(表 1), 与本次研究结果基本一致。

3.2 稳定同位素

3.2.1 氢氧同位素

本次研究在姆瓦莫拉金矿床和尼亚斯罗利金矿床中共采集 10 件样品, 通过石英包裹体氢-氧同位素测试分析研究金矿床的成矿流体性质和来源。测试工作在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。测试分析结果见表 2。

根据所测样品的均一温度值, 按照 Taylor (1974) 提出的石英-水体系氧同位素平衡经验公式: $10^3 \ln \alpha = 3.38 \times 10^6 / T^2 - 3.40$ (舒斌等, 2006), 计算得到姆瓦莫拉金矿床成矿流体水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值介于 8.3‰~11.3‰ 之间, δD 值介于 -82‰~-55.3‰ 之

间; 尼亚斯罗利金矿床成矿流体水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值介于 8.5‰~10.1‰ 之间, δD 值介于 -78.6‰~-56.7‰ 之间; 布里扬胡鲁金矿床成矿流体水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值介于 7.2‰~8.6‰ 之间, δD 值介于 -79‰~-49‰ 之间(表 2), 投影点大多位于岩浆水区域, 个别投影点位于变质水区域(图 8), 表明成矿流体来源主要为岩浆水, 在成矿过程中少量变质热液也参与其中。

3.2.2 硫同位素

坦桑尼亚维多利亚湖绿岩带金矿床金属硫化物主要有黄铁矿和毒砂, 为热液成矿作用形成, 多呈细脉状或浸染状分布。本次在姆瓦莫拉金矿床和尼亚斯罗利金矿床内共采集 10 件金矿石样品, 对其中的毒砂和黄铁矿进行了硫同位素测试分析(表 3)。测试工作在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。

表 1 维多利亚湖绿岩带典型金矿床 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 型包裹体特征参数Table 1 Characteristic parameters of $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ type inclusions of typical gold deposits in the Lake Victoria greenstone belt

样品编号	寄主矿物	类别	均一温度/°C	冰点/°C	盐度/%	阶段	金矿床	数据来源
L1	硅化蚀变岩	L+V	181.7~294.5	-14.6~-8.9	12.73~18.30	Ⅱ	姆瓦莫拉	本次测试
L5	硅化蚀变岩	L+V	175.8~379.1	-18.3~-10.2	14.15~21.19	Ⅲ		
C7	含金石英脉	L+V	287.2~361.7	-17.5~-11.8	15.76~20.60	Ⅱ	尼亚斯罗利	本次测试
L8	含金石英脉	L+V	312.3~413.4	-20.4~-13.7	17.52~22.65	Ⅲ		
Buly-79-1	含金石英脉	L+V	295~358	-13~-8	11.70~16.90	Ⅱ	布里扬胡鲁	Chamberlain, 2003
Buly-79-2	含金石英脉	L+V	170~401	-21~-15	18.63~23.05	Ⅲ		

表2 维多利亚湖绿岩带典型金矿床氢-氧同位素组成测定结果

Table 2 Determination results of H-O isotopic composition of typical gold deposits in the Lake Victoria greenstone belt

样品号	产出岩性	流体水 $\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	流体水 $\delta\text{D}/\text{‰}$	阶段	金矿床	数据来源
L1	黄铁矿化硅化蚀变岩	9.7	-68.2			
L2	黄铁矿化硅化蚀变岩	9.6	-82	II		
L3	黄铁矿化硅化蚀变岩	8.3	-66.7		姆瓦莫拉	本次测试
L4	黄铁矿化硅化蚀变岩	8.9	-73.1			
L5	黄铁矿化硅化蚀变岩	11.3	-61.7	III		
T6	黄铁矿化硅化蚀变岩	10.1	-55.3			
L7	含金石英脉	9.4	-78.6	II	尼亚斯罗利	本次测试
T11	含金石英脉	8.5	-56.7			
L8	含金石英脉	10.1	-64.3	III		
C7	含金石英脉	9.7	-63.2			
	含金石英脉	7.2	-79	II	布里扬胡鲁	Chamberlain, 2003
	含金石英脉	7.9	-69			
	含金石英脉	8.6	-70	III		
	含金石英脉	8.3	-49			

表3和图9分析结果显示,本次研究的蚀变岩型金矿石样品硫同位素值介于 -0.4‰ ~ 1.9‰ 之间,平均为 1.13‰ ,极差小,离散度小,频数统计直方图呈塔式分布,样品显示没有明显的同位素分馏,硫化物基本上是同位素平衡条件下产生的。说明2个金矿床的硫源是单一地幔来源,其在成矿过程中未发生混染。

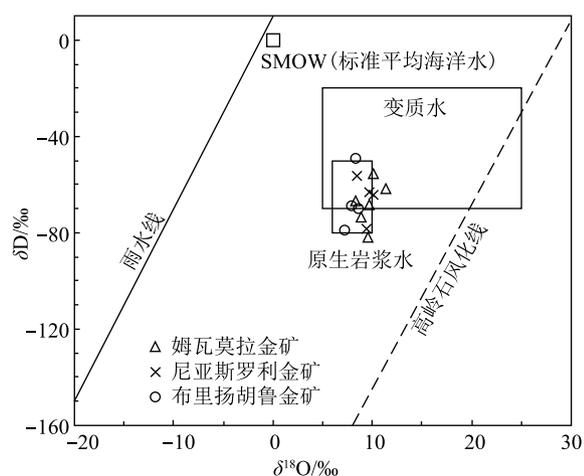


图8 维多利亚湖绿岩带典型金矿床流体包裹体水氢、氧同位素组成图

Fig. 8 Hydrogen and oxygen isotopic composition of water in fluid inclusions in the typical gold deposits of Lake Victoria greenstone belt

而布里扬胡鲁金矿床石英脉型金矿石的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 2.3‰ ~ 4.5‰ ,矿石中硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值偏离地幔源或下部地壳的 $\delta^{34}\text{S}=0$ 值,趋向中等偏高的正值,且偏离不大。显示该矿床成矿热液中的硫主要来自地幔或地壳深部的岩浆热液。

4 矿床成因探讨

4.1 成矿时代

Borg et al. (1999) 在 Geita Hill 和 Nyankanga 金矿中测得闪长岩脉的年龄分别为 2698 ± 14 Ma 和 2699 ± 9 Ma; 测得侵入 BIF 地层和闪长岩脉的煌斑岩(第二期)的年龄为 2644 ± 3 Ma。龚鹏辉等(2015)综合前人研究成果认为,盖塔金矿床的成矿时代为 $2680 \sim 2644$ Ma。郭景会等(2021)结合区内金矿体与闪长岩脉的穿插关系,认为该金矿的成矿作用应发生在闪长岩脉侵入之后,且早于区域内晚造山期高钾花岗岩的侵位时间($2660 \sim 2620$ Ma),即盖塔金矿床的成矿时代为 $2699 \sim 2620$ Ma。

Chamberlain (2003) 通过锆石 U-Pb conventional 法对布里扬胡鲁金矿床中不同岩石进行同位素年龄测定,结果显示,该矿床中的石英长石斑岩脉和花岗岩类年龄,分别为 2710 ± 20 Ma 和 2646 ± 14 Ma。可以看出,布里扬胡鲁金矿床中金的形成时间主要

表 3 维多利亚湖绿岩带典型金矿床硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 组成测定结果Table 3 Sulfide $\delta^{34}\text{S}$ composition determination results of typical gold deposits in the Lake Victoria greenstone belt

样品号	岩性	测试矿物	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$	金矿床	数据来源
T1	黄铁矿化毒砂化蚀变岩	毒砂	0.7		
T2	黄铁矿化毒砂化蚀变岩	毒砂	1.4		
T3	黄铁矿化硅化蚀变岩	黄铁矿	-0.4		
T4	黄铁矿化毒砂化蚀变岩	毒砂	1.5	姆瓦莫拉	本次测试
T5	黄铁矿化毒砂化蚀变岩	毒砂	0.7		
L6	黄铁矿化毒砂化蚀变岩	毒砂	1.4		
T8	黄铁矿化硅化碎裂蚀变岩	黄铁矿	1.2		
T9	黄铁矿化硅化碎裂蚀变岩	黄铁矿	1.9		
T10	黄铁矿化硅化碎裂蚀变岩	黄铁矿	1.2	尼亚斯罗利	本次测试
L11	黄铁矿化硅化碎裂蚀变岩	黄铁矿	1.7		
	含金石英脉	黄铁矿	2.3~4.5	布里扬胡鲁	Chamberlain, 2003

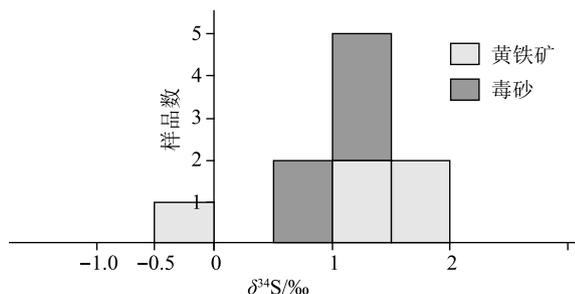
在 2710~2650 Ma 之间,即为新太古代(Walraven et al., 1994; 祁东等, 2021)。

综上所述,坦桑尼亚维多利亚湖绿岩带金矿床的成矿时代主要在 2710~2620 Ma 之间,即新太古代。

4.2 成矿机理

4.2.1 成矿流体特征及来源

流体包裹体特征可作为识别不同成因热液金矿的标志特征(杨永飞等, 2019; 贾宏翔等, 2022)。坦桑尼亚维多利亚湖金矿田 3 个典型的金矿床流体包裹体成分类似,表明它们可能由同一成矿流体组成,多为原生和假次生包裹体类型,以气液两相为主,在气相成分中以 CO_2 为主,部分包裹体还含有少量 CH_4 ,液相成分主要为 H_2O 。通常认为,岩浆蒸汽中含有较多的 CO_2 ,维多利亚湖金矿田典型金矿床包裹体的气相成分与之相似。此外,

图 9 维多利亚湖绿岩带典型金矿床硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 直方图Fig. 9 Sulfide $\delta^{34}\text{S}$ histogram of typical gold deposits in the Lake Victoria greenstone belt

CH_4 的存在表明成矿流体具有还原环境的特征。因此,维多利亚湖金矿田成矿流体具有岩浆成因的特点(李晶等, 2016)。

包裹体均一温度主要集中于 300~400℃,表明金矿床成矿流体属于中高温热液,同时多个均一温度峰值也表明研究区金矿床曾发生了多次热液活动; CO_2 型包裹体中 H_2O 相的盐度介于 12.73%~22.65%之间,表明其成矿流体盐度较高。高温、高盐度的流体特征表明,维多利亚湖金矿田成矿流体具有岩浆热液流体的温度和盐度特征。

坦桑尼亚维多利亚湖金矿田 3 个典型的金矿床流体水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值和 δD 值分别为 7.2‰~11.3‰和 -82‰~-49‰,在 $\delta^{18}\text{O}$ - δD 关系图中大多数位于岩浆水区(图 8),个别值位于变质水区,说明流体水的氢、氧同位素组成反映的流体来源主要为岩浆流体,在成矿过程中有少量的变质流体参与其中。

在坦桑尼亚维多利亚湖金矿田中硫通常仅存在于黄铁矿、毒砂等硫化物中,表明矿床形成于相对还原的环境条件下;硫主要以 HS^- 和 S^{2-} 的形式存在,因此硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值能够代表成矿流体中硫的 $\delta^{34}\text{S}$ 值(贾宏翔等, 2022)。维多利亚湖金矿田 3 个金矿床的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 -0.4‰~4.5‰,极差小,离散度小,集中在 $\pm 0\text{‰}$ 附近,表明它们具有相同的硫同位素来源。一般来说,金属硫化物的同位素组成接近零,意味着硫为岩浆成因(Ohmoto, 1979)。

4.2.2 金的沉淀机制

目前认为,金矿床中金的沉淀机制常见的有成

矿流体相分离、温度压力骤降、流体混合、流体与围岩的相互反应、硫化作用、酸化作用等,大量金的沉淀富集与成矿流体的物理化学条件的变化有关(赵凯等,2018)。维多利亚湖金矿田成矿流体中发育大量岩浆成因的富 CO_2 包裹体,通常与 CO_2 - H_2O 型包裹体共生; CO_2 - H_2O 型包裹体相对较高的均一温度和 CO_2 相气相分数变化较大的特征通常与流体的不混溶作用有关。流体的不混溶导致初始的 CO_2 - H_2O 流体发生相分离,形成了密度较高的富 CO_2 包裹体,代表了金矿化时期的原始流体(Chi et al.,2006)。在成矿流体中,金通常以络合物形式迁移,通过 CO_2 - H_2O 的不混溶,可以破坏成矿流体的相平衡,导致流体中含金络合物发生分解并促使金的沉淀。

维多利亚湖金矿田金矿床的形成与太古宙花岗-绿岩地体的岩浆活动和构造变形有关,金矿体主要受与绿岩带长轴方向一致的剪切构造带控制。深部富 CO_2 的岩浆流体,在向控矿剪切构造带运移的过程中,结合了少量区域变质作用形成的变质流体,活化、萃取了大量成矿物质,由于剪切裂隙系统是低温、低压、低化学位的开放体系,初始 CO_2 - H_2O 流体溶解度降低, CO_2 和水溶液不混溶作用,导致相分离,产生大量的富 CO_2 流体和水(赵凯等,2018),同时绢云母化、绿泥石化、硅化等热液蚀变作用逐渐消耗流体中的水,剪切作用驱动富 Si 的成矿流体向剪切裂隙运移过程中 CO_2 浓度相对增加,流体氧逸度相对升高,酸碱度相对降低,载金络合物失稳,造成金的大量沉淀,从而富集成金矿脉(体)。

5 结 论

(1)坦桑尼亚维多利亚湖金矿田成矿流体包裹体主要由富 CO_2 包裹体、 CO_2 - H_2O 包裹体组成。流体包裹体均一温度范围主要集中于 $300\sim 400^\circ\text{C}$,盐度范围集中于 $14\%\sim 22\%$,成矿流体总体上具有富 CO_2 、中高温、高盐特征。

(2)维多利亚湖金矿田 3 个典型金矿床成矿流体水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值和 δD 值分别为 $7.2\text{‰}\sim 11.3\text{‰}$ 和 $-82\text{‰}\sim -49\text{‰}$,说明来源主要为岩浆流体,在成矿过程中有少量的变质流体参与; $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-0.4\text{‰}\sim 4.5\text{‰}$,表明它们具有相同的硫同位素来源,其硫可能来源于岩浆流体。

(3)成矿流体中 CO_2 - H_2O 型包裹体较高的均

一温度和 CO_2 相气相分数变化较大的特征表明,初始的 CO_2 - H_2O 型流体发生了不混溶作用,成矿流体的相分离是维多利亚湖金矿田金的主要沉淀机制。

参考文献

- Bath. Provisional geological map of Lake Victoria Gold Fields, Tanzania 1 : 500 000(with explanatory notes)[J].Ore Geology Reviews,1990, B: 59-72.
- Borg G, Krogh T. Isotopic age data of single zircons from the Archean Sukumaland Greenstone Belt, Tanzania [J]. Journal of American Earth Sciences, 1999, 29: 301-312.
- Chamberlain C. M. Geology and genesis of the Buluyanhulu gold deposit, Sukumaland greenstone belt, Tanzania [D]. London: Imperial College Doctor's Degree Thesis, 2003.
- Chi G X, Dube B. Formation of the Campbell-Red Lake gold deposit by H_2O poor, CO_2 dominated fluids [J]. Mineralium Deposita, 2006, 40 (6): 726-741.
- Manya S. Characterization of geochemical alteration halo associated with gold mineralization at the Buzwagi mine, northern Tanzania [J]. Journal of African Earth Sciences, 2017, 129: 136-145.
- Ohmoto H, Rye R. O. Isotopes of sulfur and carbon [J]. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits, 1979, 25(4): 509-567.
- Taylor H P J. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition [J]. Economic Geology, 1974, 69: 843-883.
- Van R M R, Sanislav I V, Dirks P H G M, et al. Alteration paragenesis and the timing of mineralised quartz veins at the world-class Geita Hill gold deposit, Geita Greenstone Belt, Tanzania [J]. Ore Geology Reviews, 2017, 91: 765-779.
- Vos I M A, Bierlein F P, Standing J S, et al. The geology and mineralisation at the Golden Pride gold deposit, Nzega Greenstone Belt, Tanzania [J]. Miner Deposita, 2009, 44: 751-764.
- Walraven F, Pape J G, Borg G. Implications of Pb-isotopic compositions at the Geita gold deposit, Sukumaland Greenstone Belt, Tanzania [J]. Journal of African Earth Sciences, 1994, 18(2): 111-121.
- 白德胜, 杨怀辉, 刘正好, 等. 坦桑尼亚太古宙绿岩带型 BIF 金矿地质-地球化学特征——以马黑加金矿床为例 [J]. 地质找矿论丛, 2016, 31(1): 63-70.
- 崔小军, 王建光, 彭俊, 等. 坦桑尼亚维多利亚湖东部绿岩带金矿床地质特征及成因浅析 [J]. 地质与勘探, 2014, 50(4): 789-794.
- 崔小军, 彭俊, 李水平, 等. 坦桑尼亚绿岩带构造蚀变岩型金矿床找矿方法 [J]. 物探与化探, 2015, 4(39): 722-727.
- 龚鹏辉, 刘晓阳, 王杰, 等. 坦桑尼亚盖塔(Geita)绿岩带型金矿床地质特征 [J]. 地质找矿论丛, 2015, 30(1): 93-97.
- 郭景会, 白德胜, 张超, 等. 坦桑尼亚克拉通古代绿岩带造山型金矿床地质特征及成因 [J]. 世界地质, 2021, 12(4): 816-829.
- 胡鹏, 任军平, 向鹏, 等. 非洲大陆构造单元划分 [J]. 地质通报, 2022, 41 (1): 1-18.
- 贾宏翔, 陈仁义, 薛建玲, 等. 辽宁白云金矿流体包裹体研究: 对流体演

- 化及成矿机制的指示[J].地质通报,2022,41(11): 2065-2080.
- 姜高珍,李以科,王安建,等.坦桑尼亚苏库玛兰德绿岩带金矿地质特征及找矿思路[J].地质与勘探,2015,51(6): 1193-1200.
- 李晶,许英霞,申萍,等.哈图金矿带成矿流体组分、硫同位素分析及矿床成因[J].地质与勘探,2016,52(2): 199-208.
- 李水平,袁杨森,司建涛,等.坦桑尼亚姆瓦莫拉金矿综合找矿模式[J].中国地质,2016,43(4): 1409-1419.
- 卢焕章,范宏瑞,倪培,等.流体包裹体[M].北京:科学出版社,2004: 1-487.
- 祁东,张冬霞,柴丽洁,等.坦桑尼亚北部维多利亚湖地区构造特征及金矿成矿时代讨论[J].资源环境与工程,2021,35(3): 335-339.
- 曲欢.坦桑尼亚伊昆古金矿区成矿地质条件和地球化学找矿预测研究[D].成都理工大学硕士学位论文,2014.
- 彭俊,司建涛,梁永安,等.坦桑尼亚马拉省尼亚斯罗利金矿区地质、物化探特征及找矿方向[J].黄金,2017,38(6): 18-23.
- 彭俊,袁杨森,司建涛,等.坦桑尼亚维多利亚湖绿岩带变质火山岩地球化学特征及成岩机制[J].矿产勘查,2018,9(3): 485-494.
- 邵洁涟,梅建明.浙江火山岩区金矿床的矿物包裹体标型特征研究及其成因与找矿意义[J].矿物岩石,1986,(3): 103-111.
- 舒斌,王平安,董法先,等.海南西南部抱伦金矿床流体包裹体及稳定同位素特征[J].地质通报,2006,25(7): 880-893.
- 孙宏伟,刘晓阳,唐文龙,等.坦桑尼亚主要成矿区带的划分及成矿特征[J].地质找矿论丛,2015,30(增刊): 18-26.
- 王建光,彭俊,袁杨森,等.坦桑尼亚马拉-穆索马绿岩带金矿地质特征及成矿规律浅析[J].地质与勘探,2017,53(2): 406-412.
- 杨东潮,白德胜,曹琼.坦桑尼亚太古宙绿岩带中 BIF 型金矿床的勘查标志——以 Maheiga 金矿床为例[J].黄金科学技术,2013,21(4): 1-8.
- 杨永飞,刘书生,聂飞,等.四川木里梭罗沟金矿床流体包裹体研究及矿床成因[J].矿床地质,2019,38(2): 261-276.
- 袁杨森,张雷,陈璐璐,等.坦桑尼亚马嘿嘎金矿床地质特征和找矿方法研究[J].矿产勘查,2016,7(5): 844-854.
- 张超,白德胜,彭俊,等.坦桑尼亚盖塔地区 Nyankanga 金矿床地质特征及成矿模式[J].矿产勘查,2022,13(6): 475-479.
- 赵凯,姚华舟,王建雄,等.厄立特里亚 Koka 金矿床成矿流体特征及其地质意义[J].矿床地质,2018,37(6): 1337-1348.