

莫桑比克楠普拉省喀祖祖地区砂金成因及其对岩金指示意义*

曾勇杰¹, 王翠芝^{2**}, 宋英昕³, 刘峰¹, 潘刚¹, 许生武¹, 康涛¹, 李增胜³

(1 江苏省地质勘查技术院, 江苏南京 210049; 2 福州大学紫金矿业学院, 福建福州 350108;

3 山东省金属矿产成矿地质过程与资源利用重点实验室 山东地质科学研究院, 山东济南 250013)

摘要 莫桑比克楠普拉省喀祖祖地区多条河流均有工砂金开采活动。砂金分布在海拔 300~450 m 之间的石英砾石层, 底部岩石主要为中元古代片麻状杂岩体。研究区为准平原-丘陵地貌, 水动力条件受季节影响较大。砂金分布与河流不存在明显的耦合性, 暗示了原生金矿化可能较分散。同时, 研究区露头受第四纪覆盖严重, 物化探效果不显著, 砂金与重砂矿物组合因而成为重要的原生金找矿标志。结合双目镜观察及扫描电镜分析得出, 与砂金密切相关的重砂矿物包括黄铁矿、钛铁矿、锆石等。砂金颗粒多呈棱角状, 部分可观察到残留连生矿物, 整体暗示了近源堆积的特征。根据电子探针分析结果, 不同部位产出砂金成分相近, 表现为较高的金成色($w(\text{Au})$ 均高于 98%)及较低的微量元素(仅含少量 Fe、Cu), 暗示为同一构造背景下的产物。综上, 莫桑比克楠普拉省喀祖祖地区原生金矿化可能是与黑云斜长片麻岩(及其长英质脉体)相关的低硫型热液金矿化, 形成背景为泛非期造山运动。

关键词 地质学; 砂金成因; 指示意义; 莫桑比克; 楠普拉省喀祖祖地区

中图分类号: P618.51

文献标志码: A

Genesis of placer gold and its indicative significance for primary gold in Cazuzu Region, Nampula Province, Mozambique

ZENG YongJie¹, WANG CuiZhi², SONG YingXin³, LIU Feng¹, PAN Gang¹, XU ShengWu¹,

KANG Tao¹ and LI ZengSheng³

(1 Geological Exploration Technology Institute of Jiangsu Province, Nanjing 210049, Jiangsu, China; 2 College of Zijin Mining, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China; 3 Key Laboratory of Metallogenic-Geologic Processes and Comprehensive Utilization of Minerals Resources in Shandong Province, Shandong Institute of Geological Sciences, Jinan 250013, Shandong, China)

Abstract

Artificial placer gold mining in rivers is reported in the Cazuzu region, Nampula Province, northern Mozambique. The placer gold is observed in the quartz gravel layer at an altitude of 300~450 m. The lithology at the bottom is composed of Mesoproterozoic gneiss complex. The study area is a landform between peneplain and hill, in which hydrodynamic condition is subjected by the season. The placer gold is widely distributed, without an obvious continuous law with the rivers, suggesting scattered primary gold mineralization. Meanwhile, the outcrops are mostly covered by the quaternary sediments, leading to the poor effects of the geophysical and geochemical prospecting. Thus, the characteristics of placer gold and heavy minerals have become an important primary gold prospecting mark. Combined with binocular microscope observation and scanning electron microscopy analysis, it is

* 本文得到江苏省财政厅、江苏省国土资源厅地勘专项资金项目(编号:苏财建[2017]160号)的资助

第一作者简介 曾勇杰,男,1989年生,博士,地矿工程师,矿物学、岩石学、矿床学专业。Email:yojie163@163.com

** 通讯作者 王翠芝,女,1965年生,教授,从事矿床成矿规律及矿产开发利用研究。Email:wcuizhi@163.com

收稿日期 2020-12-08;改回日期 2021-04-22。孟秋熠编辑。

shown that heavy minerals are closely related to placer gold including pyrite, ilmenite, zircon and some other minerals. The angular morphology of gold particles and some residual contiguous minerals indicate near-source precipitation. Placer gold from different parts has similar composition, showing the characteristics of higher Au fineness ($w(\text{Au}) \geq 98\%$) and lower trace elements (only a small amount of Fe, Cu), suggesting uniform mineralization type in the study area. To sum up, the primary gold mineralization has a genetic connection with low-sulfur hydrothermal gold mineralization associated with biotite plagiogneiss and its felsic veins closely related to the Pan-African orogeny.

Keywords: geology, placer gold genesis, indicative significance, Cazuzu region in Nampula Province, Mozambique

砂金是原生金矿或矿化点在地壳抬升背景下到达浅表环境,受冰川、水系等表生作用进一步剥蚀沉淀而成(Falconer et al., 2009)。它们通常埋藏浅,开采成本低,并可能受风化作用而二次富集,选冶难度小,因而易于快速获得经济效益(陈丽萍等, 2009; 李军, 2018)。砂金各标型特征保留了原生金矿化成因相关信息,是指示未知区岩金勘探的重要标识之一。砂金矿床成因类型主要分为碎屑沉积和化学沉积,其厘定直接影响勘探的方法选择和方向(杨永强等, 1999)。碎屑砂金在成因上受化学作用较弱,多赋存于残坡积、冲洪积沉积层,保留较多原生金矿化点的特征(杨永强等, 1999)。砂金颗粒多呈棱角-次棱角状,粒度分选性差,部分附着原生黄铁矿(Long et al., 2011; Alam et al., 2018)。一些与原生金共生、伴生的重砂矿物在不同分选程度下的含量及比例被广泛应用于预测源区金矿化的成因类型及位置(韦少港等, 2015)。砂金颗粒的各形貌特征可半定量估算搬运距离,例如形态、矿物印模、连生矿物等(Townley et al., 2003),也用于指示原生金结晶深度(李胜荣等, 2008),是评价深部岩金成矿潜力的标志之一。虽然自然金在表生条件下溶解度较低,但地表的一些有机配位体、硫代硫酸盐及生物作用等可与金络合而溶解、再结晶,形成化学沉积砂金(Fairbrother et al., 2012; Silverstein et al., 2016; Reith et al., 2018; Dunn et al., 2019),常见针状、树枝状、薄膜状等(Dave et al., 2016),部分可见显著的化学“风化边”(边部相对核部富金)(Giusti et al., 1984; Dave et al., 2016; Erik et al., 2018)。自然金所在沉积物可观察到显著化学风化作用的痕迹,如大量红土沉积。由于化探异常与化学沉积金矿化套合较好,而广泛应用于该类砂金的勘探工作(胡金才等, 2013; Roqué Rosell et al., 2018)。

莫桑比克共和国位于非洲东南部,是中国落实

“一带一路”倡议的非洲国家之一,早在2016年被列为中非产能合作先行先试示范国家(安春英, 2017),拥有丰富的矿产资源,包括金、钛、煤、宝石等。境内原生金矿主要产于石英脉、石英碳酸盐脉、含铁石英岩等,发育在太古界和早元古界岩石中(Consortium, 2006)。多数金矿集区内的河流可见广泛的砂金产出,例如太特(Tete)、尼亚萨(Niassa)、里哥纳(Alto Ligonha)等地(黄建平等, 2005)。研究区位于楠普拉省南部喀祖祖地区,有较多人工开采砂金的活动。地貌上整体属于准平原-丘陵地带,水动力条件受降雨周期影响较大。区内第四纪覆盖层平均厚3 m,局部达数十米,物化探影响因素多且复杂,砂金异常因此成为重要的岩金找矿、潜力评价标志。

境外矿产资源的勘查和开发是现阶段中国调节矿产资源供需、瓶颈制约的重要突破口,也是经济全球化背景下参与全球资源配置的重大举措(陆婧等, 2019)。然而,境外矿产勘查常面临基础资料不全的困境,难以持续为本区及周边的勘查工作,乃至战略布局提供支持。本文总结了莫桑比克北部楠普拉省喀祖祖地区多年的矿产勘查工作,归纳报道了研究区基岩类型、构造及第四系地层特征。同时,利用扫描电镜显微分析及电子探针成分分析,揭示砂金形貌特征及重砂矿物组合,深入分析该区砂金成矿特征。综合砂金赋存沉积层组构及区域地质特征,本文旨在指明该区砂金形成演化过程,推测物源及岩金成矿潜力,为后期岩金勘探及投资提供依据。

1 研究区概况

1.1 区域地质特征

楠普拉群(Nampula Block)是莫桑比克北部最大的地壳块体,为研究区的结晶基底(图1a、b),由4个中元古代正、副片麻岩杂岩体构成(Macey et al.,

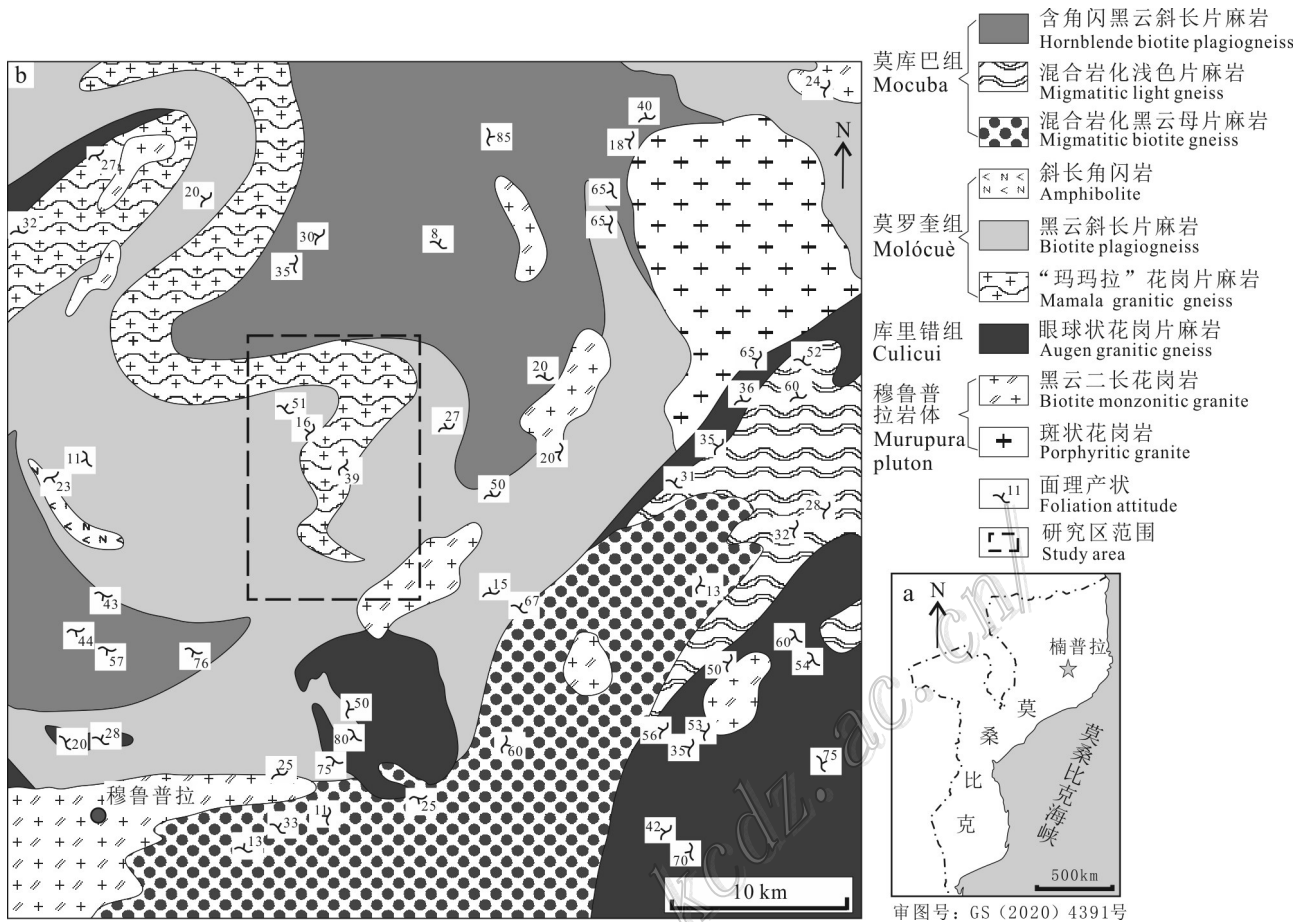


图1 莫桑比克北部楠普拉省喀祖祖区域地质图

a. 楠普拉省地理位置图, 星星标记为研究区位置; b. 研究区区域地质特征图

Fig. 1 Regional geological sketch map of the Cazuzu region, Nampula Province, northern Mozambique

a. Geographical map of Nampula Province, with star marking the location of the study area; b. Regional geological feature map of the study area

2010), 分别为莫库巴组(Mocuba)、莫罗奎组(Molócuè)、库里错组(Culicui)、拉帕莱组(Rapale), 区内主要出露前3者。莫库巴组为本区最古老岩石, 经历强烈混合岩化, 发育样式复杂的条带状构造, 部分可见含同变形的角闪岩透镜体。岩石类型主要为含角闪黑云斜长片麻岩、浅色片麻岩及黑云斜长片麻岩, 含有大量无根的、同变形的长英质脉体。区内广泛出露莫罗奎组岩石, 岩性包括斜长角闪岩、黑云斜长片麻岩及各类副片麻岩。“玛玛拉(Mamala)”花岗片麻岩是该岩层的重要组成部分之一, 普遍发育磁铁矿, 多呈球形集合体且定向排列。莫罗奎组岩石发育多种尺寸的石英脉和长英质脉, 表现为小角度斜切或与片麻理同变形。库里错组主要岩石为眼球状花岗片麻岩, 发育钾长石“眼球”, 长轴平行片麻理方向。岩浆活动以泛非期

(元古宙晚期至早古生代)中酸性岩浆侵入活动及广泛伟晶岩化作用为特征, 在区内东部及南部发育串珠状黑云二长花岗岩, 东部斑状花岗岩出露面积约为100 km²。

区内构造运动导致了复杂的岩石变形样式, 可大致分为3期: 早期构造作用(D₁)在莫库巴组岩石中, 发育无根的、同构造线的勾状小褶皱, 伴随着广泛的高级变质作用; 中期构造作用(D₂)广泛发育在楠普拉群内多种岩石中, 形成大量等斜褶皱、混合条带及片柱状矿物的定向排列, 包括定向的矿物巨晶(例如长石眼球)及挤压岩石碎片; 晚期变形(D₃)与纳玛玛剪切带(Namama Shear Zone)有关, 核心地带位于研究区西南方向约100 km, 表现为剪切带两侧发育不同强度的糜棱岩化, 对本区影响较小, 岩石露头中难以识别该变形的痕迹

(Consortium, 2006)。

1.2 地貌及第四纪沉积物

莫桑比克地貌以高原、山地为主,约占全国面积3/5,其余为平原。地势从西北至东南大致分为4级台阶:①多山地带,平均海拔>1200 m,全国最高点宾加山(Monte Binga)海拔为2436 m,形成于泛非造山运动,在石炭纪—二叠纪被强烈侵蚀改造,是非洲大陆准平原化的响应;②高原地带的海拔约为500~1200 m,形成于早白垩世侵蚀作用,与东非大裂谷事件同期;③丘陵地带的海拔约为200~500 m,以低山丘陵和各种流水地貌为主,阿特拉斯(Atlas)造陆运动的结果,典型特征表现在赞比西峡谷及其支流;④沿海平原带,平均海拔<200 m,为非洲较大的平原之一(Consortium, 2006)。

研究区海拔约400~1000 m,属于准平原-丘陵地貌,西部沉积层厚度明显大于南部。整体发育北西走向高原带,南北两侧以低矮丘陵为主,划分为缓坡平台、洼地和斜坡。缓坡平台为夷平面过程的主要产物,沉积物以含黏土长石、石英砂砾为主,多呈红褐色。洼地的主要沉积物为灰白色-黄白色含黏土石英砾石,厚约5~10 m。斜坡受季节性降水影响,而多发育冲沟和河流,对河床表现出显著的侧蚀和下切,是区内基岩的主要出露部位。

典型剖面第四纪沉积层由浅到深通常为砂质黏土层、黏土质砂层、石英砾石层和风化基岩(图2)。砾石成分与底部岩石矿物组合对应,部分伟晶岩出露部位可见大颗粒长石、云母碎片等。沟谷及河流两侧的沉积层中可见铁质黏粒胶膜,附着、充填于沉积物骨架颗粒的空隙、裂隙中,为流胶状、泉华状、似鲕状的黏土矿物集合体,是地表水下渗、干湿交替沉积的结果(安芷生等, 1978)。铁质黏粒胶膜颜色受铁含量的影响,常见土状光泽的浅黄棕色至红褐色,根据成熟程度可分为松散、半固结及固结铁质胶膜,且厚度不均匀,约为0.5~3 m,最厚可达5 m。暴露地表的部位受阳光作用呈蜡状光泽,形成铁锰氧化物矿物膜(Lu et al., 2019)。

区内水系受季节性降雨影响较大,分为北、中、南3个树枝状水系群。北部发育流向南东的常年性河流,支流多为片流,仅在雨季才有明显的流水。中部海拔较高,水系主要分布在东、西两端。西部水系在区内长度约2 km;东部水系长约4 km,支流延伸约1~2 km。南部发育3条近南北向河流,长约6 km,支流普遍不超过2 km。

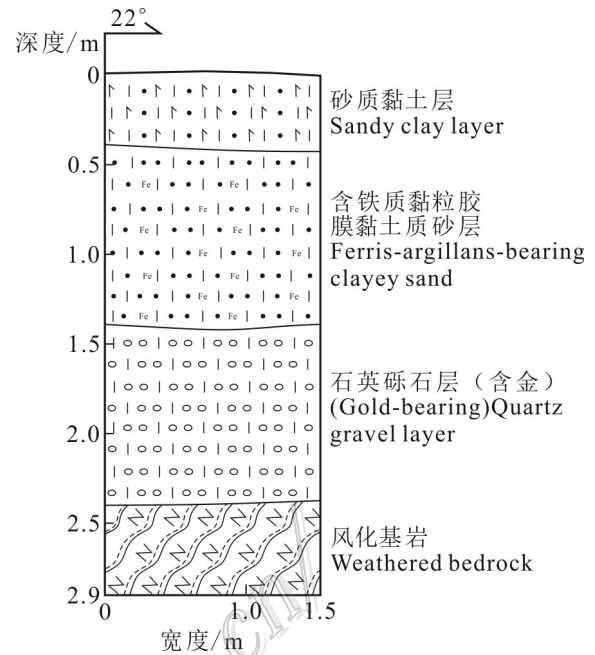


图2 研究区典型剖面素描图

Fig. 2 Representative sedimentary profile in the study area

2 采样及分析方法

本次研究共采集自然重砂沉积物样品73件,主要来自河谷两侧、河床底部及自然剖面。每个样品重量约60 kg。样品首先在河流中进行初步清洗、筛分,挑出砾石并冲掉大部分黏土。再用筛盘在均匀的水流中去除较轻的矿物,例如石英、长石、黑云母等,得到60~90 g的灰砂(马婉仙, 1990)。利用磁铁分选出其中的磁性矿物,在双目镜下对重砂矿物中的自然金进行挑选。为了更直观地表示研究区内砂金分布特征,根据样品中砂金颗粒的含量进行划分(图3):大量砂金者为颗粒10粒以上,共7件;5~9粒者为中等,共8件;1~4粒者为少量,共14件;另有44件样品未发现砂金。

手工筛选共获得砂金152粒,利用双目镜选取不同部位砂金颗粒进行实验分析。其形貌、成分及连生矿物的研究在山东省地质科学研究院国土资源部金矿成矿过程及资源利用重点实验室进行。砂金颗粒显微形貌特征研究采用ZEISS SUPRA55型场发射扫描电镜,配备了OXFORD INCA X-Max能谱仪。实验条件为加速电压20 kV,束流 1×10^{-9} A,束斑20 mm²。砂金颗粒原位成分分析在单矿物圆靶

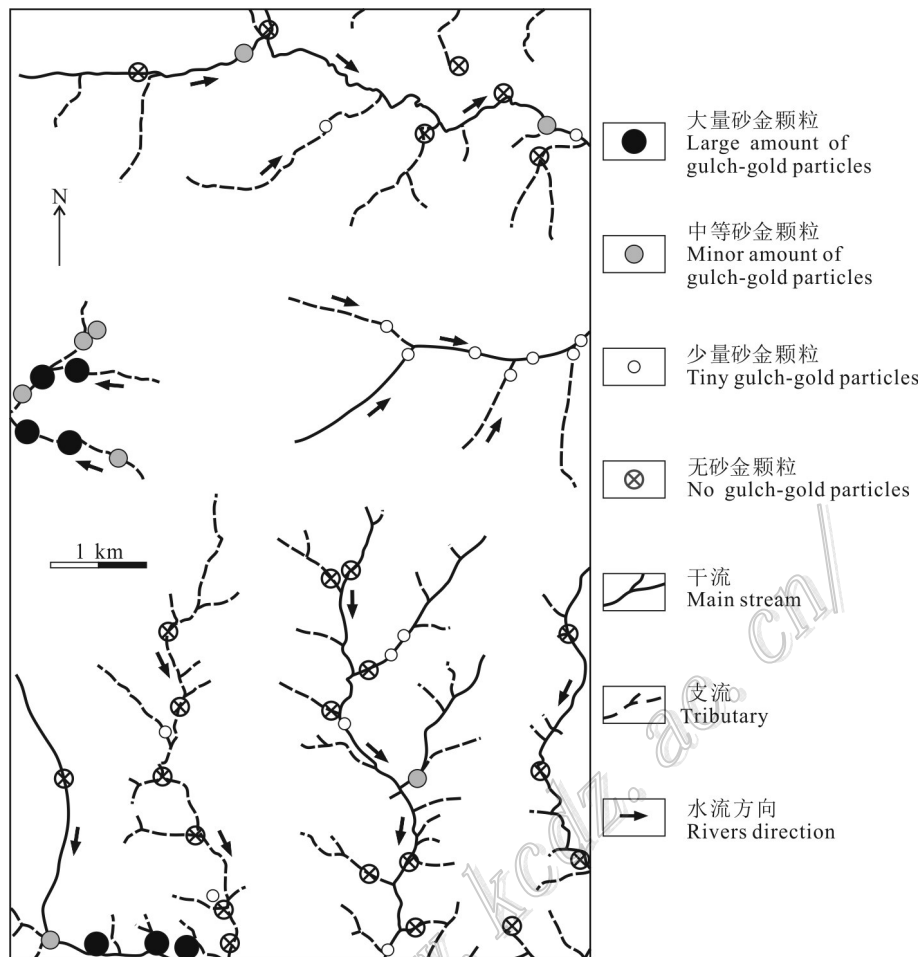


图3 研究区地貌、水系与砂金分布图

Fig. 3 Landforms, river system and placer gold distribution in the study area

样品中进行,采用电子探针分析得到。仪器型号为(JEOL)JXA-8230,波谱分析所用加速电压15 kV,电流 2×10^{-8} A,束斑直径1 μm 。所用标准样品均为加拿大Astimex系列标样。

3 分析结果

3.1 砂金产状分布

砂金异常发育的部位集中于海拔350~400 m河谷处,主要产在沟谷两侧及河床的石英砾石层,包括砂质砾石层及含黏土砂砾层,厚度变化较大。产金沉积层多呈黄白色,部分具有“多元结构”,砾石无明显定向排列,分选、磨圆较差。

研究区砂金分布明显不均匀,沿着水流方向明显不连续。北部砂金稀疏,仅4件中等及少量砂金异常。中部北西走向高原带两侧河流均见砂金产

出,西侧品位高且密集,东侧品位低,沿河流连续分布。南部多条南北向河流中的砂金产出明显较低,仅有7件见少量至中等砂金异常。而西南角近东西走向的干流产出大量砂金,4件样品有3件产出10粒以上砂金,1件中等含量。

3.2 重砂矿物组合

自然重砂矿物组合以基岩副矿物为主。除了自然金,主要重砂矿物包括磁铁矿、锆石、钛铁矿、独居石、石榴子石、电气石、金红石、黄铁矿等(表1)。其组合、比例及分布特征与基岩类型密切相关。例如,“玛玛拉”花岗片麻岩范围内产出的自然重砂以磁铁矿、锆石、磷灰石、钛铁矿、独居石为主。而黑云斜长片麻岩范围内另可见角闪石、绿帘石及金红石。浅色片麻岩内可见石榴石及少量夕线石。一些伟晶岩脉较发育的地区可见电气石、石榴石。重砂矿物形态上多表现为碎裂状,以对应矿物晶体为基础,多呈

表1 自然重砂矿物形态及物性特征

Table 1 Morphology and physical properties of natural heavy minerals

序号	矿物种类	形态特征
1	磁铁矿	黑色,半自形棱角次棱角块状、次棱角块状,不透明,金属光泽,粒径0.01~0.1 mm
2	锆石	黄粉色为主、玫瑰色次之,半自形柱状及断柱状主,透明,金刚光泽,表面光滑,断口有弱溶磨痕迹,粒径0.01~0.05 mm
3	磷灰石	无色,滚圆次-滚圆粒状,透明-半透明,玻璃光泽-毛玻璃光泽,粒径0.02~0.10 mm
4	钛铁矿	黑色,次棱角块状、次滚圆扁粒状,不透明,金属光泽,粒径0.02~0.3 mm
5	独居石	黄色,次棱角扁粒状、板柱状,透明-半透明,油脂光泽,粒径0.02~0.60 mm
6	角闪石	绿色、黑绿色,棱角-次棱角柱状,半透明,玻璃光泽,粒径0.02~0.30 mm
7	绿帘石	黄绿色,棱角-次棱角粒状,半透明,玻璃光泽,粒径0.02~0.30 mm
8	石榴子石	粉色、黄红色,棱角-次棱角粒状,透明,玻璃光泽,粒径0.02~0.45 mm
9	电气石	茶褐色、灰蓝色,自形-半自形柱状及断柱状、棱角-次棱角块状,透明,玻璃光泽,高硬度,粒径0.05~0.20 mm
10	金红石	黑红色、棕红色,半自形次滚圆柱粒状、次棱角块状,半透明,油脂光泽,粒径0.02~0.2 mm
11	黄铁矿	浅铜黄色,半自形粒状,不透明,金属光泽,粒径0.02~0.25 mm

棱角状及次棱角状,无明显的粒度和成分分选。

矿区西部产出次圆状砂金的沉积层中,自然重砂类型无明显的规律性。而南部产出次棱角状砂金的沉积层中,自然重砂多见黄铁矿、钛铁矿、锆石(图4)。

3.3 砂金形貌及连生矿物

研究区内砂金颗粒呈亮金黄色,具强金属光泽,

形态多样,包括近立方体、鳞片状、棱角粒状、圆状等;粒度集中在0.2~1.0 mm,少量为0.02~0.20 mm,极少数达数毫米,整体分选性较差(图5a、b)。

西部和南部集中区产出砂金颗粒的形貌存在差异。西部砂金颗粒的磨圆度较好,呈近球形,粒径较小,通常不见矿物印模及连生矿物,部分可见黏土矿物,暗示了较强表生作用的影响。南部砂金颗粒呈

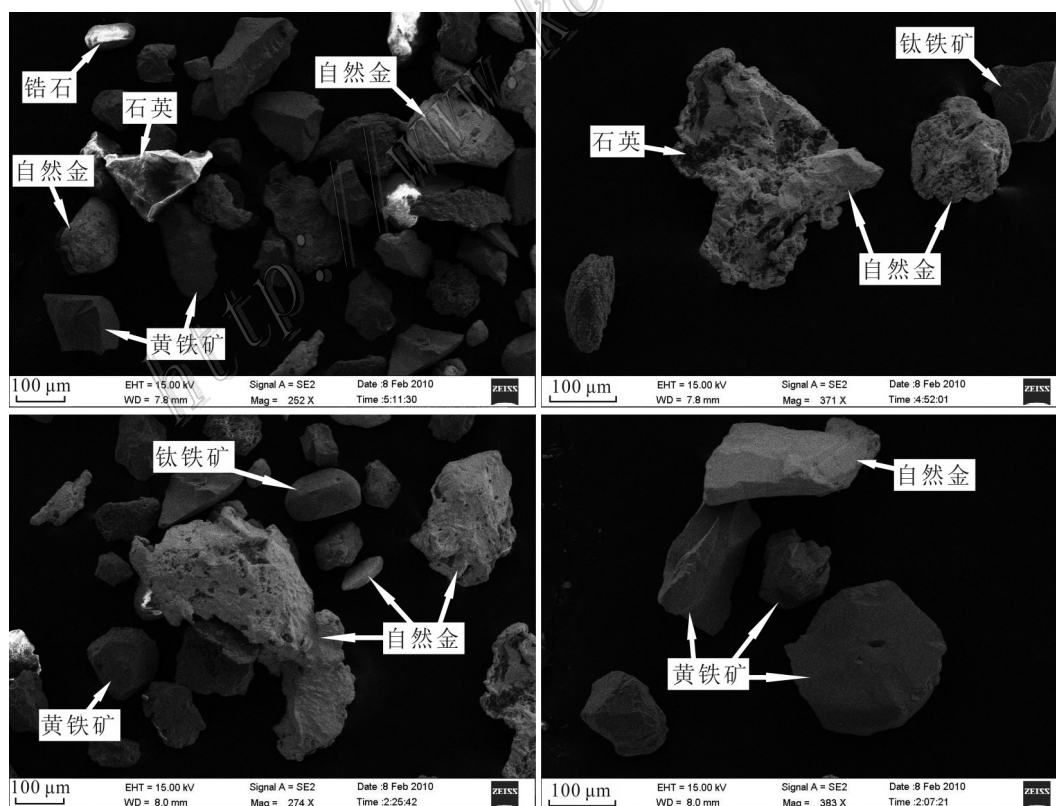


图4 金颗粒及伴生(共生)重砂矿物扫描电镜特征

Fig. 4 Scanning electron microscopic characteristics of gold grains and associated heavy minerals

自形-半自形粒状,少量近立方体晶形,表面可识别出较多连生矿物,以石英居多,亦可见黑云母、黄铜矿、钛铁矿,局部发现矿物印模(图6a~f)。

3.4 砂金成分

研究区砂金成分分析结果见表2。研究区整体砂金表现出相似的成分特征,均为较高的Au含量及较低的微量元素。西部砂金 $w(\text{Au})$ 均值为98.85%,范围为99.95%~96.37%。而南部砂金 $w(\text{Au})$ 均值较高,为99.15%,范围为99.97%~97.59%。多数微量元素的含量均低于检出限,仅Fe和Cu显示一定的成分变化。西部砂金 $w(\text{Fe})$ 均值为0.05%,范围为0.1%~0.01%,而南部砂金 $w(\text{Fe})$ 略低,均值为0.03%,范围为0.05%~0.02%。2个区域产出的砂金颗粒均有较高的铜含量,其中,北区砂金 $w(\text{Cu})$ 平均为0.14%,范围为0.35%~0.02%,南区砂金 $w(\text{Cu})$ 较低,均值为0.08%,范围为0.15%~0.02%。

背散射图像下,砂金颗粒截面成分均匀,可认为其内部不发育特征性的结构(如环带、风化边等),与光学显微镜观察的结果一致(不同金成色自然金颗粒可表现出颜色和折射率的差异)。同一颗粒中不同部位的探针数据也表现出相似的主微量成分特征。

4 讨论

4.1 砂金形成过程

砂金开采难度小,可在短时间内获得经济效益,

同时,可以作为判定是否追加后续投资的重要依据。对其形成过程的深入分析,是评价原生金成矿潜力的前提(杨永强等,1999; Chapman et al., 2016)。本区砂金集中于海拔350~400 m的准平原-丘陵地带,其原始地貌形成于阿特拉斯(Atlas)造陆运动(Consortium, 2006),地壳在该时期被抬升接受剥蚀,是砂金开始形成的时期。研究区气候类型属于非洲热带草原气候,全年雨、旱两季分明。旱季基本无降雨、湿度小,较大的昼夜温差(8~10°C)促进岩石的机械破碎,大量裂隙的形成使浅表岩石的孔隙度增加(夏邦栋,1995)。雨季最大降雨量超过500~1000 mm,但研究区整体地势均匀平缓,不形成明显的水流优势方向,而表现为广泛的片流。前期增加的岩石孔隙度,使水体的下渗能力明显增强,局部低洼地区形成季节性河流。整体沉积层长期处于湿胀干缩状态,促使孔隙度进一步增大,继而相互连通形成裂隙通道网(戴军等,1995)。也就是说,矿区水动力强度因地形及季节而明显不均匀,整体表现为较弱的横向搬运能力,而以下渗作用为主。

砂金集中于第四系沉积层底部的石英砾石层,砾石成分以石英、长石为主,分选、磨圆度明显较差,与下部岩石广泛发育石英脉、长英质脉或伟晶岩脉密切相关。重砂矿物种类与基岩副矿物组合相吻合,整体暗示了该沉积层的近源堆积成因。沉积层中的砂金形态上多呈棱角状-次棱角状,且分选差,可能与石英砾石的剥蚀搬运同期形成。部分磨圆度

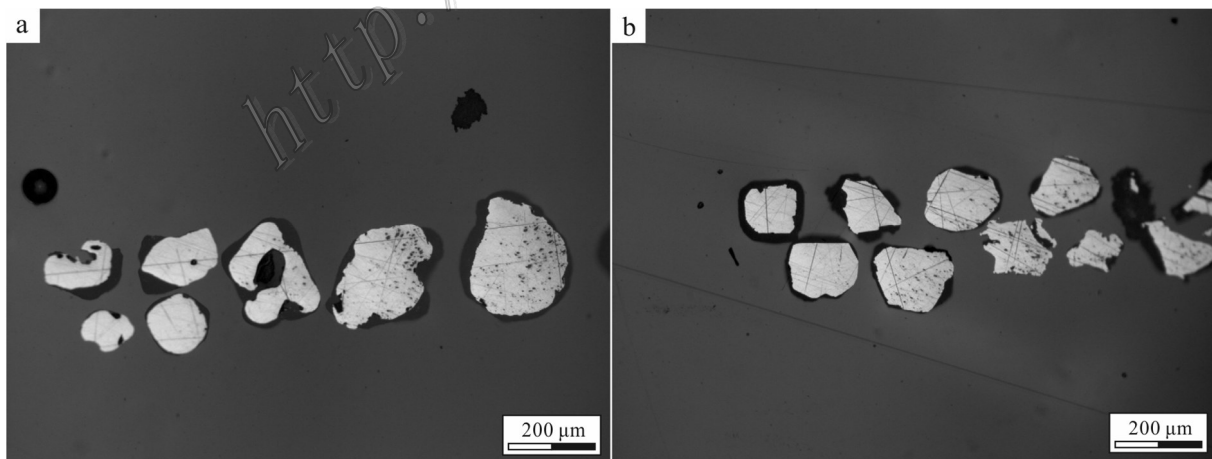


图5 砂金颗粒矿相显微镜形貌特征

a. 西部砂金; b. 南部砂金

Fig. 5 Morphological characteristics of gold particles under metallographic microscope

a. Western placer gold; b. Southern placer gold

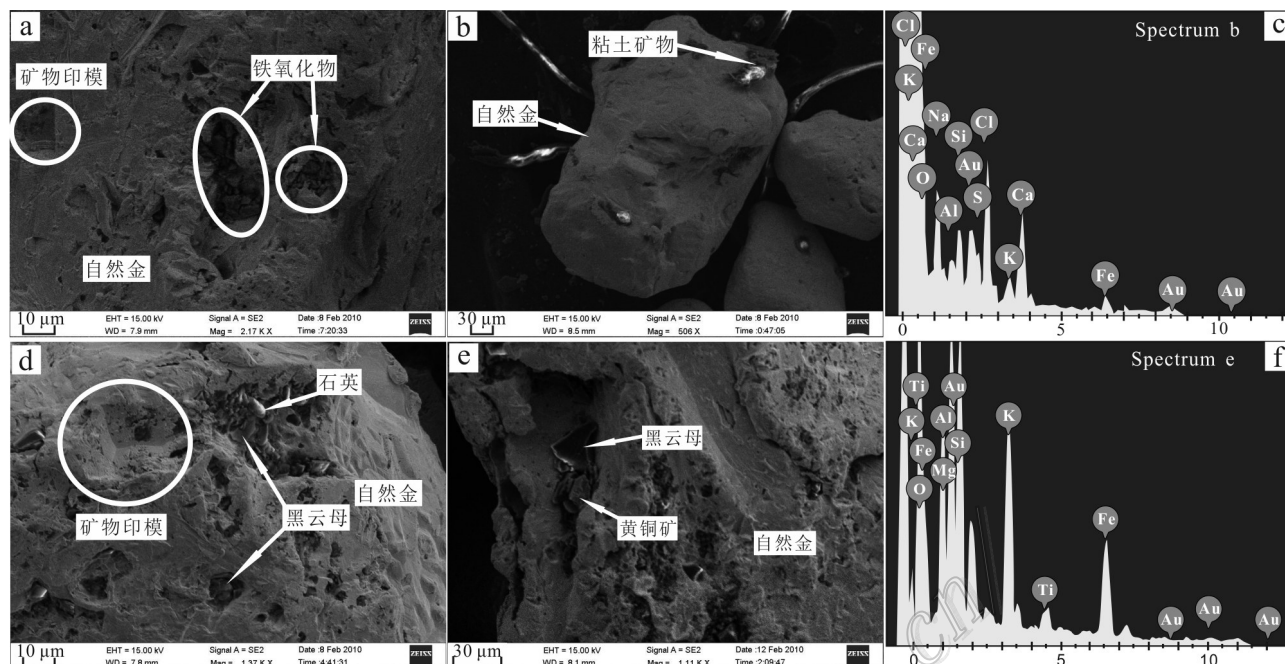


图6 砂金显微形貌及相关能谱特征

a. 砂金表面凹陷处见铁氧化物,并可见矿物印模;b. 砂金表面连生黏土矿物;c. 图b中黏土矿物能谱特征图(主要元素种类包括K、Na、Ca、Al、Si等);d. 砂金表面连生黑云母、石英,并可见矿物印模;e. 砂金表面连生黑云母、黄铜矿;f. 图e中黑云母能谱特征图(主要元素种类包括K、Mg、Ca、Ti、Fe、Si等)

Fig. 6 Micromorphological characteristics of placer gold particles and related EDS

a. Iron oxides and mineral impressions on the surface of gold particle; b. Continuous clay minerals on the surface of gold particle; c. Energy spectrum characteristic diagram of clay minerals in Fig. b, including K, Na, Ca, Al, Si etc.; d. Biotite, quartz and mineral impressions on the surface of gold particle; e. Biotite, chalcopyrite on the surface of gold particle; f. Energy spectrum characteristic diagram of biotite in Fig. e, including K, Mg, Ca, Ti, Fe, Si etc.

较好的砂金可能因局部强降雨形成的水流携带所致。由于搬运距离较短,砂金颗粒表面仍可观察到黑云母、石英、黄铜矿等连生矿物以及矿物印模(Townley et al., 2003)。

区内植被覆盖广泛,其腐败过程会产生腐殖质酸,基底岩石不发育碳酸盐岩以中和酸质。这些有机酸对Fe、Mn等金属有较强的活化能力(张海洋等, 1997)。由于黑云母、角闪石、钛铁矿物等在酸性条件下的风化溶解,铁、锰等金属大量析出,并被近同时形成的黏土吸附,干湿交替的环境下逐渐形成铁质黏粒胶膜(安芷生等, 1978; 王秀丽等, 2014; 赵景波等, 2017)。部分砂金颗粒表面可见黏土矿物及铁氧化物,说明铁质黏粒胶膜的形成稍晚于砂金沉积,这种铁质黏粒胶膜的形成可极大降低土壤的渗透性(Goldberg and Glaubig, 1987),继而阻止后期水流淋滤下渗,影响底部砂金。因此,砂金颗粒的形貌及成分基本保留了源区及沉积过程的特征。基于此,砂

金较广的分布范围暗示了原生金矿化范围较广。整体上,南部产出砂金棱角状形态较西部发育,并较多观察到残余连生矿物,可认为其金源区较近,推测存在较大的岩金勘探潜力。

4.2 指示岩金成因

砂金成因类型的厘定是原生金勘探及潜力评价的重要依据(肖克炎, 2008; Chapman et al., 2016)。重砂矿物及连生矿物是识别原生金成因类型的重要依据。例如低硫热液型金矿的主要重砂矿物包括自然金、黄铁矿、黄铜矿、毒砂等;斑岩型金矿的重砂矿物多数可见白钨矿等(董国臣等, 2014; 韦少港等, 2015; Kazhenkina et al., 2016)。另外,金银矿物(包括自然金、金银矿、银金矿和自然银)的成分是识别成矿系统的常用标志,包括低硫型、高硫型、斑岩型、含铁石英岩型等(Chapman et al., 2016; Alam et al., 2018; Nikiforova et al., 2018)。斑岩型铜金成矿体系产出的金矿物成色较高,且具有较高的Cu含量

表2 研究区内砂金电子探针分析数据表(w(B)/%)

Table. 2 The EPMA data of placer gold in the study area (w(B)/%)

序号	点号	Fe	Cu	Zn	S	Pb	Hg	As	Au	Ag	总和
1	W-1-1	-	0.09	-	-	-	-	-	99.36	0.43	99.88
2	W-1-2	0.04	0.1	0.06	-	-	-	-	99.38	0.48	100.06
3	W-1-3	-	0.1	-	-	-	-	-	99.25	0.37	99.72
4	W-2-1	-	0.04	-	-	-	-	0.01	99.72	0.27	100.04
5	W-2-2	-	0.2	-	-	-	0.04	-	99.72	0.29	100.25
6	W-2-3	0.06	-	0.12	0.03	-	-	-	99.38	0.19	99.78
7	W-3-1	-	0.05	0.02	0.01	-	-	-	98.52	0.57	99.17
8	W-3-2	0.04	0.15	-	0.02	-	-	-	98.68	0.59	99.48
9	W-3-3	-	0.04	0.09	-	-	-	-	98.56	0.54	99.23
10	W-4-1	0.07	0.34	0.02	0.01	-	0.11	-	99.44	0.04	100.03
11	W-4-2	0.1	0.21	-	0.03	-	-	-	99.46	0.04	99.84
12	W-4-3	-	0.35	0.02	0.04	-	-	-	98.6	0.03	99.04
13	W-5-1	-	0.04	0.03	-	-	-	-	99.6	0.33	100
14	W-5-2	0.07	-	-	-	-	-	-	98.31	0.25	98.63
15	W-5-3	-	0.19	-	0.01	-	-	-	98.83	0.7	99.73
16	W-6-1	-	0.14	0.01	-	-	-	-	99.36	0.1	99.61
17	W-6-2	0.03	0.23	0.05	0.02	-	-	-	98.96	0.09	99.38
18	W-6-3	0.05	0.22	-	0.02	-	-	-	99.42	0.02	99.73
19	W-7-1	-	0.07	0.06	0.04	-	-	-	97.36	3.01	100.54
20	W-7-2	0.02	0.13	0.05	-	-	-	-	96.37	2.95	99.52
21	W-8-1	0.01	0.11	0.15	0.01	-	-	0.05	97.93	0.96	99.22
22	W-8-2	-	0.02	0.18	-	-	-	0.01	99.95	0.38	100.54
23	S-1-1	-	0.03	0.14	0.03	-	-	0.02	98.99	0.77	99.98
24	S-1-2	0.02	-	-	-	-	-	-	98.37	0.76	99.15
25	S-2-1	0.02	0.02	-	-	-	-	-	99.96	0.77	100.77
26	S-2-2	0.02	0.14	-	0.01	-	-	0.02	99.17	0.8	100.16
27	S-3-1	-	0.03	-	-	-	-	-	98.92	0.34	99.29
28	S-3-2	0.05	0.04	-	0.01	-	-	0.01	99.97	0.32	100.4
29	S-3-3	-	-	0.06	0.02	-	0.06	-	99.71	0.28	100.13
30	S-4-1	-	0.11	-	0.03	-	0.02	-	98.54	0.82	99.52
31	S-4-2	0.02	0.03	0.06	-	-	-	-	99.03	0.88	100.02
32	S-4-3	-	0.04	0.09	0.02	-	-	0.02	99.62	0.75	100.54
33	S-5-1	-	0.14	0.03	-	-	0.03	-	99.24	0.68	100.12
34	S-5-2	0.03	0.1	-	-	-	-	0.03	99.88	0.38	100.42
35	S-5-3	-	0.13	-	-	-	-	-	99.12	0.3	99.55
36	S-6-1	-	0.11	-	-	-	-	-	99.68	0.38	100.17
37	S-6-2	0.02	-	0.05	-	-	-	-	98.89	1.35	100.31
38	S-6-3	0.05	0.02	0.13	-	-	-	-	99.01	1.24	100.45
39	S-7-1	-	0.02	-	-	-	-	-	98.43	0.39	98.84
40	S-7-2	-	0.15	-	0.02	-	-	0.02	99.74	0.36	100.29
41	S-7-3	0.02	0.08	0.08	0.02	-	-	-	97.59	0.35	98.14

注：“-”表示该成分低于探针检出限。

(≥4%)(Outridge et al., 1998)。尽管本区砂金有一定的Cu含量(平均0.11%),但某些低硫型热液石英脉金矿中的银金矿也可含较高的Cu(Kazhenkina et

al., 2016)。而区内穆鲁普拉斑状花岗岩与砂金的分布无明显的相关性,且蚀变不发育,因而可排除斑岩型金成矿的可能性。另外,区域地质特征表明,研究

区内明显不发育含铁石英岩及碳酸盐岩,排除含铁石英岩型及砂卡岩型金成矿。与砂金关系密切的重砂矿物主要有黄铁矿、钛铁矿、锆石等,部分砂金颗粒表面连生黄铜矿、黑云母、石英等原生矿物,说明原生金矿与硫化物存在密切的成因联系,暗示了低硫型热液金矿化的特征。砂金分布广泛,但成分相似(图7a、b),暗示了可能来自相同成因的原生金矿体,是同一构造运动下的产物。

近源沉积砂金集中区的基底岩石主要为莫罗奎组,推测即为原生金的主要赋存围岩。该组岩石含有密集的石英脉、长英质脉及伟晶岩脉,产状为平行或小角度斜切 D_2 变形的片麻理,说明 D_2 变形可能是部分熔融或流体大量形成的主导因素(Consortium, 2006)。笔者认为 D_2 变形同期构造运动触发了广泛的重熔及流体活动,导致岩石中强烈不相容的金因分异而富集。因此,成矿作用可能与泛非期造山作用同期。区内岩石未发现 D_3 变形的痕迹,即原生金形成之后较少受到后期构造运动的再改造。

综合砂金及区域地质特征对其深部岩金成矿潜力的评价是科研、生产相结合的关键步骤。根据区域地质特征,莫罗奎组发育斜长角闪岩,反映出了深源物质可能参与了成岩过程,而深源流体是金成矿的关键因素(Goldfarb et al., 2014; Li et al., 2014; Zhu et al., 2015),暗示了该区具备合适的金成矿条件。同时,一些砂金颗粒较高的Cu含量可能暗示了

原生金矿化与基性、超基性岩石(包括相关变质、蚀变地质体)密切相关(Petrovsky et al., 2012),进一步说明区内较好的金成矿潜力。另外,银金矿物的主量元素也是指示成矿潜力的重要依据。Au与Ag同为IB族,单质晶体类型均为面心结构,可形成完全类质同象(李胜荣等, 2008),通常用金成色 $[Au/(Ag+Au) \times 1000\%]$ 描述,其影响因素包括流体成分、结晶温度、压力等(Gammons et al., 1995; 刘伟等, 2007)。热液成因银金矿物的金成色离散度较大,反映不同成矿阶段流体性质变化的影响(Nikiforova et al., 2018; Zeng et al., 2020),通常成矿早阶段及矿体浅部金成色较高(李胜荣等, 2001; 李成禄等, 2011)。本区砂金成分表现出较高的金成色,可能来自原生金矿的浅部,暗示了原生金矿尚未被完全抬升剥蚀,仍存在一定的找矿潜力。

5 结论

莫桑比克楠普拉省喀祖祖地区第四纪沉积层较厚。砂金分布广泛,具有一定的开发前景,同时也是该区岩金勘探及成矿潜力评价的参考标志之一。综合区域地质、砂金形貌及成分特征,本文得到结论如下:

(1) 赋金沉积层集中分布在海拔300~450 m之间的石英砾石层,砂金颗粒细小,分选性较差,形态多样,部分表面残留原生矿物及印模。重砂矿物组

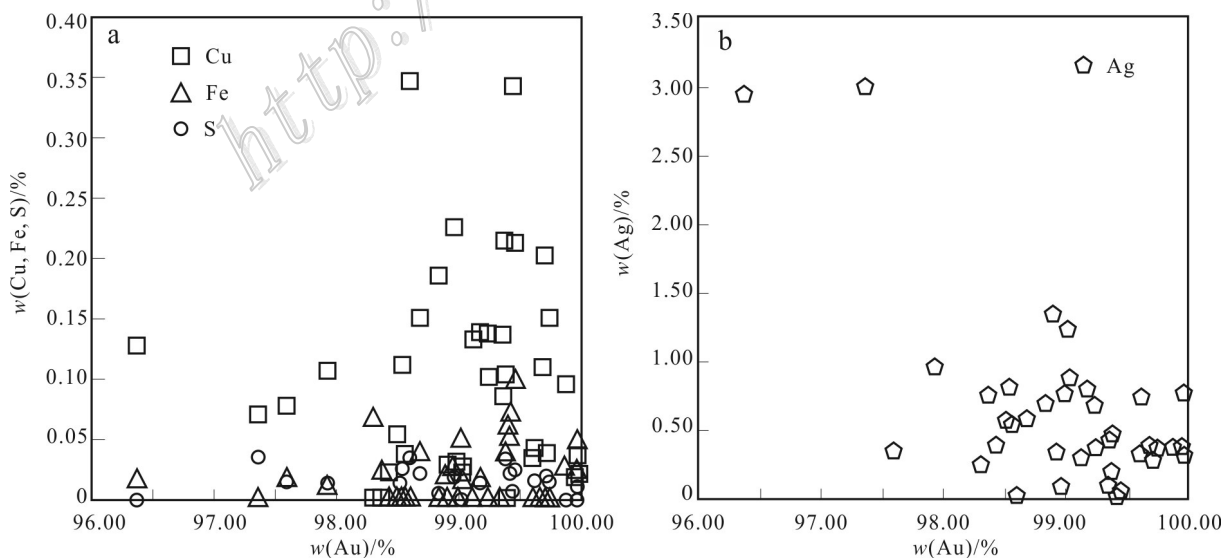


图7 砂金微量元素(a)及Ag(b)与Au关系图

Fig. 7 The relationships of trace elements (a), Ag (b) and Au for placer gold

合与深部基岩的副矿物组合吻合,整体暗示了砂金为近源碎屑沉积,其分布广泛,暗示了区域金矿化范围大。

(2) 不同部位砂金成分相近,表现为较高的金成色及一定量的Cu,暗示为同一构造背景下的产物。根据砂金连生矿物及密切相关的重砂矿物组合,本区原生金矿化可能是与莫罗奎组(及其中长英质脉体)相关的低硫型热液金矿化,形成背景为泛非期造山运动。

致谢 对审稿人提出的宝贵建议,在此致以真挚的感谢!

References

- An C Y. 2017. Production capacity cooperation between China and Mozambique from the perspective of "One Belt One Road"[M]. Portuguese-speaking countries development report. 110-123 (in Chinese).
- An Z S and Wei L Y. 1978. Deposited iron clay film and its significance[J]. Chinese Science Bulletin, 8: 22-25(in Chinese with English abstract).
- Alam M, Li S R, Santosh M and Yuan M W. 2018. Morphology and chemistry of placer gold in the Bagrote and Dainter streams, northern Pakistan: Implications for provenance and exploration[J]. Geological Journal, 54:1672-1687.
- Chapman R J and Mortensen J K. 2016. Characterization of gold mineralization in the northern Cariboo gold district, British Columbia, Canada, through integration of compositional studies of lode and detrital gold with historical placer production: A template for evaluation of orogenic gold[J]. Econ. Geol., 111(6): 1321-1345.
- Chen L P, Wang W, Jiang Y and Sun C Q. 2009. Difficulties and suggestions facing my country's overseas mineral resources exploration and development investment[J]. Land and Resources Information, 7: 34-41(in Chinese with English abstract).
- Consortium G, 2006. Map explanation volume 2: Geology and mineral resources of Mozambique[M]. National Directorate of Geology, Republic of Mozambique (DNG). 1-350.
- Petrovsky D V, Silaev V I, Zharkov V A and Petrovsky V A. 2012. Native gold and companion minerals in the Cenozoic sediments of the Ural foredeep[J]. Geology of Ore Deposits, 54(6): 474-486.
- Dai J and Voiko B. 1995. The micromorphological characteristics of the red clay reticulated layer of the Quaternary[J]. Journal of South China Agricultural University, 16(4): 50-53(in Chinese with English abstract).
- Dave C and Kat L. 2016. Gold nugget morphology and geochemical environments of nugget formation, southern New Zealand[J]. Ore Geology Reviews, 79: 301-315.
- Dong G C, Li J C, Wen H, Fen J Z, Wang J S and Zhang X. 2014. Distribution characteristics and significance of natural heavy sands in China[J]. Geological Bulletin of China, 33(12): 1861-1868(in Chinese with English abstract).
- Dunn S C, Heyden B P, Rozendaal A and Taljaard R. 2019. Secondary gold mineralization in the Amani placer gold deposit, Tanzania[J]. Ore Geology Reviews, 107: 87-107.
- Erik M, Paul O, Frank R, Maria R, Jeff Y and Robert A. 2018. Biological and geochemical development of placer gold deposits at rich hill, Arizona, USA[J]. Minerals, 8(2): 56.
- Fairbrother L, Brugger J, Shapter J, Laird J S, Southam G and Reith F. 2012. Supergene gold transformation: Biogenic secondary and nano-particulate gold from arid Australia[J]. Chemical Geology, 320-321: 17-31.
- Falconer D and Craw D. 2009. Supergene gold mobility: A textural and geochemical study from gold placers in southern New Zealand[J]. Econ. Geol., 14: 77-93.
- Gammons C H and Williams-Jones A E. 1995. Hydrothermal geochemistry of electrum: Thermodynamic constraints[J]. Econ. Geol., 90: 420-432.
- Giusti L and Smith D G W. 1984. An electron microprobe study of some Alberta placer gold[J]. Mineralogy and Petrology, 33(3): 187-202.
- Goldberg S and Glaubig R A. 1987. Effect of saturating cation pH and aluminum and iron oxide on the flocculation of kaolinite and montmorillonite[J]. Clays and Clay Miner, 35(3): 220-227.
- Goldfarb R J and Santosh M. 2014. The dilemma of the Jiaodong gold deposits: Are they unique[J]? Geoscience Frontiers, 5(2): 139-153.
- Hu J C, Zhi Z Q and Zhu Y P. 2013. Geological characteristics and genetic analysis of laterite-type gold mineralization in Paben gold deposit, Laos[J]. Contr Geol Miner Resour Res, 28(3): 462-467(in Chinese with English abstract).
- Huang J P, Ye S Q and Xia M F. 2005. Types and geological characteristics of gold deposits in Mozambique[J]. Journal of Geology, 29 (1): 24-27(in Chinese with English abstract).
- Kazhenkina A G and Nikiforova Z S. 2016. Types of primary sources of placer gold of the East Siberian Platform (Lena-Viluy Interfluvium)[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, (44): 1-4.
- LeFort D, Hanley J and Guillong M. 2001. Subepithermal Au-Pd mineralization associated with an alkalic porphyry Cu-Au deposit, Mount Milligan, Quesnel terrane, British Columbia, Canada[J]. Econ. Geol., 106: 781-808.
- Li S R and Santosh M. 2014. Metallogeny and craton destruction: Records from the North China Craton[J]. Ore Geology Reviews, 56: 376-414.
- Li J. 2018. Discussion on the problems and countermeasures of my country's overseas mineral exploration[J]. Resource Information and Engineering, 33(4): 61-62(in Chinese with English abstract).
- Li C L, Li S R, Luo J Y, Zhang J Q and Song J Y. 2011. Study on the characteristics of gold minerals in Yixingzhai gold deposit, Fan-

- zhi, Shanxi[J]. *Geology of China*, 38(1):119-128(in Chinese with English abstract).
- Li S R, Deng J, Hou Z Q, Xiao R, Yuan W M, Fen X L, Zhao Z D, Shen J F and Zhou S. 2001. Regional faults and denudation degree of gold deposits in the Gangdese Zone, Tibet: Enlightenment from the Ag/Au ratio[J]. *Science in China: Earth Science*, (B12): 104-108(in Chinese with English abstract).
- Li S R, Xu H, Shen J F and Li G W. 2008. Crystallography and mineralogy[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-346 (in Chinese).
- Long D G F, Ulrich T and Kamber B S. 2011. Laterally extensive modified placer gold deposits in the paleoproterozoic mississagi formation, clement and pardo townships, Ontario[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 48: 779-792.
- Lu A H, Li Y, Ding H R, Xu X M, Li Y Z, Ren G P, Liang J, Liu Y W, Hong H, Chen N, Chu S Q, Liu F F, Wang H R, Ding C, Wang C Q, Lai Y, Liu J, Dick Jr, Liu K H and Hochella Michael F. 2019. Photoelectric conversion on Earth's surface via widespread Fe- and Mn-mineral coatings[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(20): 9741-9746.
- Lu J, Dong S C, Wang L J and Jin X. 2019. Design and implementation of "overseas mineral resources exploration and development information service platform"[J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 38(3): 222-226(in Chinese with English abstract).
- Ma W X. 1990. Heavy sand measurement and analysis[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-142 (in Chinese).
- Macey P H, Thomas R J, Grantham G H, Ingram B A, Jacobs J, Armstrong R A, Roberts M P, Bingen B, Hollick L and Kock G S. 2010. Mesoproterozoic geology of the nampula block, northern Mozambique: Tracing fragments of Mesoproterozoic crust in the heart of Gondwana[J]. *Precambrian Research*, 182(1): 124-148.
- Moles N R, Chapman R J and Warner R B. 2013. The significance of copper concentrations in natural gold alloy for reconnaissance exploration and understanding gold-depositing hydrothermal systems[J]. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 13 (2): 115-130.
- Nikiforova Z S, Gerasimov B B, Glushkova E G and Kazhenkina A G. 2018. Indicative features of placer gold for the prediction of the formation types of gold deposits (East of the Siberian Platform) [J]. *Russian Geology and Geophysics*, 59 (10): 1318-1329 (in Russian with English abstract).
- Outridge P M, Doherty W and Gregoire D C. 1998. Determination of trace elemental signatures in placer gold by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry as a potential aid for gold exploration[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 60: 229-240.
- Reith F, Rea M A D, Sawley P, Zammit C M, Nolze G, Reith T, Rantanen K and Bissett A. 2018. Biogeochemical cycling of gold: Transforming gold particles from arctic Finland[J]. *Chemical Geology*, 483: 511-529.
- Roqué Rosell J, Portillo Serra J, Aiglsperger T, Plana-Ruiz S, Trifonov T and Antonio Proenza J. 2018. Au crystal growth on natural occurring Au-Ag aggregate elucidated by means of precession electron diffraction (PED)[J]. *Journal of Crystal Growth*, 483: 228-235.
- Silverstein J, Krekeler M and Rakovan J. 2016. Morphologic evidence of in-situ gold deposition in lateritic placer deposits from Guyana Shield of Venezuela[J]. *Microscopy and Microanalysis*, 22(sup.): 2014-2015.
- Townley B K, Gerard Hérail, Victor MaksaeV, Carlos Palacios, Philippe de Parseval, Fabían Sepulveda, Rodrigo Orellana, Pablo Rivas and Cesar Ulloa. 2003. Gold grain morphology and composition as an exploration tool: Application to gold exploration in covered areas[J]. *Geochemistry Exploration Environment Analysis*, 3(1): 29-38.
- Wang X L, Zhang F R, Wang S, Wu H and Yang L F. 2014. Discussion on the characteristics of red clay in Beijing area and its soil formation process and system classification[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 51(2): 238-246(in Chinese with English abstract).
- Wei S G, Dong G C, Mo X X, Hui M L, Jia L Q, Nie F, Zhang X, Bo H J and Ren L. 2015. Anomalies of natural heavy sands in gold deposits in northeast China and their prospecting indications[J]. *Resources and Industry*, 17(2):41-52(in Chinese with English abstract).
- Xia B D. 1995. General geology[M]. Beijing: Geological Publishing House. 134-145 (in Chinese).
- Xiao K Y. 2008. Based on GIS technology, comprehensive information of copper polymetallic deposits in Simao-Jinghong area, mineralization prediction[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(5): 648-654(in Chinese with English abstract).
- Yang Y Q and WANG J L. 1999. Comprehensive information prospecting model for placer gold deposits in Aletai area[J]. *Gold*, 4: 5-7 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Y J, Li L, Li S R, Santosh M and Alam M. 2020. The geochemistry of Au-Ag minerals and base-metal sulphides as indicators for gold precipitation: Case study of the Shihu gold deposit, Central North China Craton[J]. *Geological Journal*, 55(8): 5764-5778.
- Zhang H Y, Wang Y R and Mei H J. 1997. Experimental study on the leaching of iron and copper by organic acids at low temperature[J]. *Mineral Deposits*, 16(1): 87-92(in Chinese with English abstract).
- Zhao J B, Ma Y D, Luo X Q, Shao T J and Liu R. 2017. Research on paleo-moisture index and water environment in S₄ paleosol profile in Xi'an area[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(3): 678-689(in Chinese with English abstract).
- Zhu R X, Fan H R, Li J W, Meng Q R, Li S R and Zeng Q D. 2015. De-cratonic gold deposits[J]. *Science China-Earth Sciences*, 58(9): 1523-1537.

附中文参考文献

- 安春英. 2017. “一带一路”视角下的中国与莫桑比克产能合作[M]. 葡语国家发展报告. 110-123.

- 安芷生, 魏兰英. 1978. 淀积铁质黏粒胶膜及其成因意义[J]. 科学通报, 8: 22-25.
- 陈丽萍, 王威, 姜雅, 孙春强. 2009. 我国境外矿产资源勘查开发投资面临的困境及建议[J]. 国土资源情报, (7): 34-41.
- 戴军, Voiko B. 1995. 第四纪红色黏土网纹层的微形态特征[J]. 华南农业大学学报, 16(4): 50-53.
- 董国臣, 李景朝, 文辉, 冯济舟, 王季顺, 张雄. 2014. 中国自然重砂分布特征及其意义[J]. 地质通报, 33(12): 1861-1868.
- 胡金才, 智铎强, 祝永平. 2013. 老挝爬奔金矿床红土型金矿化地质特征及成因分析[J]. 地质找矿论丛, 28(3): 462-467.
- 黄建平, 叶水泉, 夏明飞. 2005. 莫桑比克金矿类型及地质特征[J]. 地质学刊, 29(1): 24-27.
- 李军. 2018. 我国境外矿产勘查面临的问题与对策探讨[J]. 资源信息与工程, 33(4): 61-62.
- 李成禄, 李胜荣, 罗军燕, 张聚全, 宋继叶. 2011. 山西繁峙义兴寨金矿床金矿物特征研究[J]. 中国地质, 38(1): 119-128.
- 李胜荣, 邓军, 侯增谦, 肖润, 袁万明, 冯效良, 赵志丹, 申俊峰, 周肃. 2001. 西藏冈底斯带区域性断裂与金矿床剥蚀程度: Ag/Au比值的启示[J]. 中国科学: 地球科学, 31(B12): 104-108.
- 李胜荣, 许虹, 申俊峰, 李国武. 2008. 结晶学与矿物学[M]. 北京: 地质出版社. 1-346.
- 陆婧, 董少春, 王丽娟, 金鑫. 2019. “境外矿产资源勘查开发信息服务平台”的设计与实现[J]. 实验室研究与探索, 38(3): 222-226.
- 马婉仙. 1990. 重砂测量与分析[M]. 北京: 地质出版社. 1-142.
- 王秀丽, 张凤荣, 王数, 吴昊, 杨黎芳. 2014. 北京地区红色黏土特性及成土过程和系统分类探讨[J]. 土壤学报, 51(2): 238-246.
- 韦少港, 董国臣, 莫宣学, 董美玲, 贾丽琼, 聂飞, 张翔, 薄海军, 任龙. 2015. 东北地区金矿自然重砂异常及其找矿指示意义[J]. 资源与产业, 17(2): 41-52.
- 夏邦栋. 1995. 普通地质学[M]. 北京: 地质出版社. 134-145.
- 肖克炎. 2008. 基于GIS技术下思茅-景洪地区铜多金属矿综合信息成矿预测[J]. 地质学报, 82(5): 648-654.
- 杨永强, 王晋雷. 1999. 阿勒泰地区砂金矿床综合信息找矿模型[J]. 黄金, 4: 5-7.
- 张海洋, 王玉荣, 梅厚钧. 1997. 低温条件下有机酸对铁、铜的淋滤实验研究[J]. 矿床地质, 16(1): 87-92.
- 赵景波, 马延东, 罗小庆, 邵天杰, 刘瑞. 2017. 西安地区S₄古土壤剖面中古水分指标与水环境研究[J]. 地质学报, 91(3): 678-689.

<http://www.kcdz.ac.cn/>