

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.01.006

利比里亚金矿成矿地质背景与资源潜力

陈冲¹, 陈开旭^{1*}, 严永祥¹, 张继纯¹, 徐景银², 郑国权²CHEN Chong¹, CHEN Kaixu^{1*}, YAN Yongxiang¹, ZHANG Jichun¹, XU Jingyin², ZHENG Guoquan²

1. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430205;

2. 湖北省地质局地球物理勘探大队, 湖北 武汉 430056

1. Wuhan Center, China Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China;

2. Geophysical Exploration Brigade of Hubei Geological Bureau, Wuhan 430056, Hubei, China

摘要: 西非地区比里姆(Birimian)岩系经历了伊本尼(Eburnean)造山运动, 成为全球金矿商业投资的主要含矿岩系之一, 该岩系在利比里亚覆盖约 36% 国土面积。通过对西非尤其是利比里亚地质背景分析, 初步建立了利比里亚区域地质构造格架, 梳理出比里姆岩系中 33 处重要意义的岩金矿点, 其分布与比里姆绿岩带、区域剪切构造带密切相关。综合全国 266 处金矿化点及密切相关的 Au、Ag、Hg、Cu 元素异常, 在利比里亚划定了比-克波、杜格贝、塞斯托斯、鲍特洛-祖亚-皮菲吉、邦-托托-宁巴、杜贝、朱亚松、托迪 8 个金成矿带, 显示出良好的成矿潜力, 并对不同开发程度下矿化前景区进一步找矿方面提出了初步建议。

关键词: 马恩-莱奥地盾; 利比里亚; 金矿; 成矿地质背景; 资源潜力; 矿产勘查工程

中图分类号: P618.51 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2022)01-0072-13

Chen C, Chen K X, Yan Y X, Zhang J C, Xu J Y, Zheng G Q. Geological background and resource potential of gold mineralization in Liberia. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(1): 72-84

Abstract: In the West African, the Birimian series covering about 36% of Liberia underwent the complex Eburnean orogenic movement, and belongs to one of the main Au-bearing rocks on which the global gold diggers invest. Based on the analysis of the geological background in the West Africa and especially Liberia, a new division of geological units in Liberia was established, and 33 important gold occurrences in the Birimian series were sorted out. The distribution of these gold occurrences is closely related to the metamorphosed volcano-sedimentary rocks (greenstone) of Birimian series and regional shear zone. Based on the comprehensive analysis of the 266 gold mineralized occurrences and geochemical anomalies of Au, Ag, Hg and Cu, eight favorable gold metallogenic belts were delineated in Liberia, namely Bea-Kpo, Dugbe, Cestos, Bantle-Zua-Pifgi, Bong-Toto-Nimba, Dube, Juazhon and Todi. These gold metallogenic belts show a good potential for gold mineralization, and some suggestions were put forward for the prospecting of some gold prospects.

Key words: Man-Leo Shield; Liberia; gold ore; metallogenic geological background; resource potential; mineral exploration engineering

相对于加拿大、澳大利亚、南非等金矿开发热点地区, 西非地区富含金矿的比里姆岩系大部分地区勘探程度很低。该岩系从撒哈拉沙漠边缘一直

延伸至大西洋海岸, 分布面积约 $90 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。随着黄金价格大涨及南部非洲金矿产业萎缩, 西非正迅速成为全球金矿开发的目标区域。利比里亚作为

收稿日期: 2021-01-05; 修订日期: 2021-11-02

资助项目: 商务部援外技术合作项目《援利比里亚矿产资源调查项目》(编号: IGGEF2015042)

作者简介: 陈冲(1987-), 男, 工程师, 从事矿产普查与勘探、成矿规律与成矿预测研究。E-mail: cchen80s@163.com

* 通信作者: 陈开旭(1965-), 男, 研究员, 从事矿床学、地球化学及区域成矿学等方面的科研及勘查工作。E-mail: 178372237@qq.com

西非凯内-马恩域(Kénéma-Man Domain)巨型铁矿成矿区的组成部分^[1],已经勘探发现宁巴(Nimba)、普图(Putu)、邦矿(Bong)、西部矿脉(Western Cluster)、卧龙吉西(Wologizi)等多个超大型 BIF 型铁矿^[2]。但相对于西非其他国家,利比里亚金矿成矿地质研究程度较低,特别是东部地区广泛分布的比里姆岩系金矿缺乏系统的现代化勘查和详细的研究资料^[3],资源潜力缺乏系统评价。近年,专注于西非地区金矿商业勘查的矿业公司在比里姆岩系中勘探取得很大进展^[4],尤其是加拿大阿韦索罗资源公司(Avesoro Resources Inc)在利比里亚东部大角山州发现新自由(New Liberty)大型金矿(探明和控制资源量 36.09 t,2018 年)^[5],英国蜂鸟资源有限公司(Hummingbird Resources Plc)在西部锡诺州发现杜格贝(Dugbe)超大型金矿(控制和推断资源量 130.63 t,2019 年)^[6],表明在利比里亚广泛分布的比里姆岩系同样存在巨大的找矿潜力,因此对利比里亚金矿开展成矿地质背景、成矿特征、资源潜力等方面的研究具有重要的理论意义和现实意义。本文在总结西非地区矿产地质研究资料的基础上,建立利比里亚地质构造演化格架,梳理近年矿业公司在利比里亚发现的 33 处岩金矿点,结合典型金矿床地质特征、金矿化点及 Au、Ag、Hg、Cu 等元素异常,划定金矿有利成矿带,进行资源潜力分析,为中国矿业公司在利比里亚开展金矿投资提供参考。

1 成矿地质背景

1.1 马恩-莱奥地盾地质特征

西非地区构造位置属于西非克拉通(WAC),分布面积约 $450 \times 10^4 \text{ km}^2$,主要由北部、南部太古宙—古元古代基底地盾,北端、中部、东南部及西部沿海新元古代—新生代沉积盆地,以及面积较小的构造窗组成^[1]。西非克拉通北部片麻岩地盾被称为雷圭巴特地盾(Reguibat Shield),但南部片麻岩地盾有许多不同的名称,包括 Leo Shield^[7-8],Leo Uplift^[9],Guinea Rise^[10-11],Leo Rise^[12-14],Man Shield^[15-17],Man Rise^[18],Man Craton^[19],Leo-Man Rise^[20-22]和 Leo-Man Shield^[23-25],本文采用最新名称马恩-莱奥地盾(Man-Leo Shield)。马恩-莱奥地盾西起几内亚、塞拉利昂、利比里亚,东至加纳、布基纳法索、尼日尔,露头延伸逾 1500 km,面积约 $105 \times 10^4 \text{ km}^2$,大致沿萨桑德拉(Sassandra)-特鲁山(Mount Trou)断

裂分为东西 2 个部分,西部为主要发育太古宙 TTG (英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩)片麻岩的凯内-马恩域(Kénéma-Man Domain),东部为发育古元古代比里姆岩系的鲍莱-莫西域(Baoulé-Mossi Domain)(图 1)^[26]。

凯内-马恩域主要由太古宙混合岩化 TTG 片麻岩、花岗岩及绿岩带组成^[27-28]。基于野外填图、年代学及地球化学研究资料^[29-34],凯内-马恩域地质构造演化如下:①始太古代—古太古代拉斑玄武岩在石榴子石残留下部分熔融形成古太古代陆核 TTG 片麻岩(3.5 Ga)^[13, 27, 35-36];②可能来自古老地壳重熔的中太古代片麻岩(3.2~2.8 Ga),即利昂(Leonian)火山-沉积旋回,可能存在 3.3~3.1 Ga 和 3.0~2.9 Ga 两个幕次^[18, 27, 36-38];③绿岩带形成时期(2.9~2.8 Ga),以苏拉山(Sula Mountains)、尼米尼山(Nimini Hills)等绿岩带为代表,发生角闪岩相—麻粒岩相变质,包含 BIF 建造,同时也是金矿的重要围岩;④晚期花岗岩形成时期(约 2.8 Ga),即利比里亚(Liberian)花岗-混合岩旋回,呈巨大(椭圆)圆形裸露地表或较小花岗岩类侵入表壳岩的边缘,含有继承锆石,可能是古老 TTG 片麻岩深部地壳熔融的产物^[13, 27]。

鲍莱-莫西域主要发育由古元古代变火山-沉积岩带和花岗岩组成的比里姆岩系,该岩系显示新生地壳特征^[20, 39-41]。鲍莱-莫西域东西部演化存在 50 Ma 的时差^[42],具有类似多岛弧盆系统的演化历史^[25]。基于野外调查、地球化学和同位素研究^[23, 25, 43-46],鲍莱-莫西域地质构造演化如下:①2.35~2.25 Ga,拉张构造环境微陆核边缘形成变火山沉积岩,被称为表壳岩,发育以宁巴(Nimba)、西芒杜(Simandou)等为代表的 BIF 型铁矿^[33, 47-48];②2.25~2.15 Ga,岛弧环境挤压—拉张环境火山-岩浆活动,形成赛夫维群(Sefwi Group)、科马纳群(Komana Group)等变火山岩带和钠质花岗岩^[49-50],代表地壳增厚成熟时长英质岩浆活动增加^[51],末期在区域西部边缘形成向东倾的俯冲带^[23];③伊本尼造山运动期间(2.15~2.06 Ga),与凯内-马恩域发生碰撞,经历了伸展—挤压构造体制转换,伴随强烈挤压剪切、区域变质、岩浆活动等复杂过程,形成世界级的金矿富集区^[52-55],金矿主要沿北—北东向广泛发育的剪切绿岩带分布^[56],如加纳西南部阿散蒂、赛夫维金矿带^[57]。

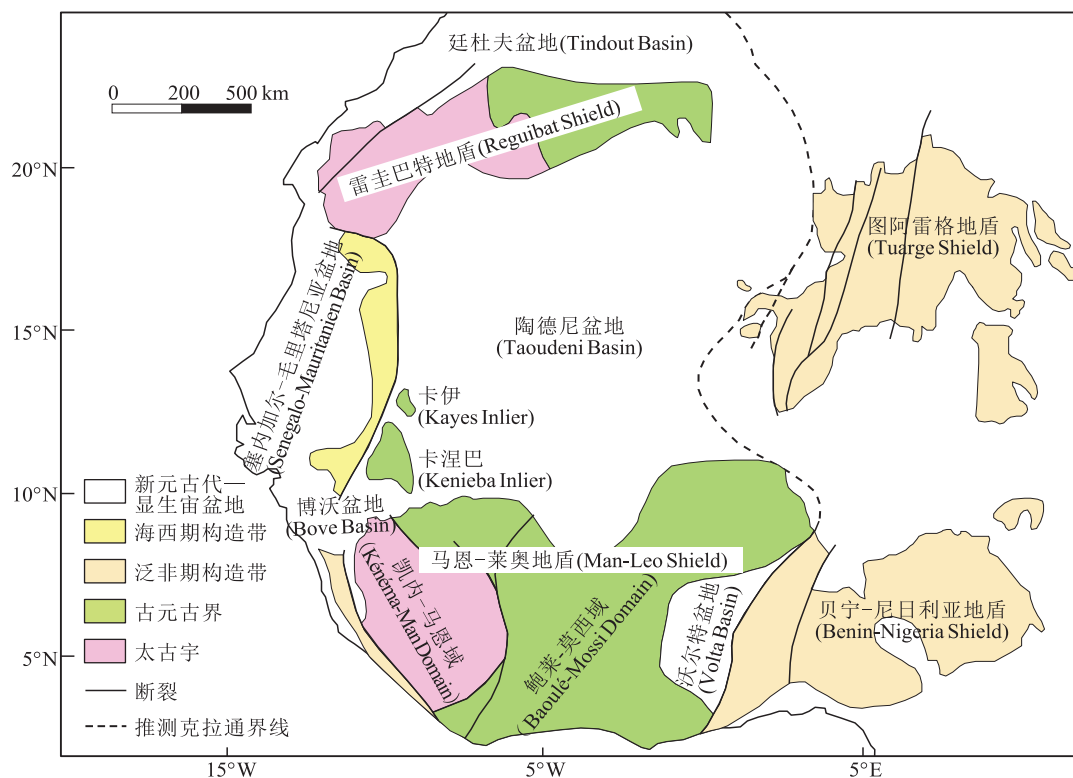


图 1 西非前寒武纪主要地盾简图(据参考文献[26]修改)

Fig. 1 Simplified geological map of the main Precambrian shields in West Africa

1.2 利比里亚成矿地质背景

利比里亚位于马恩-莱奥地盾西南部,横跨太古宙凯内-马恩域和古元古代鲍莱-莫西域(图1、图2)。太古宙基底片麻岩(3.2~2.8 Ga)主要分布于利比里亚西部,岩石类型主要包括花岗片麻岩、浅色片麻岩、花岗闪长-闪长片麻岩、混合岩及晚期花岗岩,上覆的变火山-沉积岩特征虽然与塞拉利昂苏拉山表壳岩类似^[28],但形成年龄为2.35~2.25 Ga^[33, 47-48],应属于比里姆岩系,变质程度以绿片岩相为主,部分达到角闪岩相。古元古代比里姆岩系是从科特迪瓦境内沿北东-南西向区域性构造线方向延伸覆盖利比里亚东部地区,岩石类型主要包括浅色片麻岩、石英闪长岩、花岗闪长-闪长片麻岩,上覆相当数量的变火山-沉积岩,但是研究程度很低。

利比里亚西部太古宙和东部古元古代岩石之间边界以前被认为是北东向杜贝(Dube)剪切带^[15]、朱亚松(Juazhon)剪切带^[29]或塞斯托斯(Cestos)剪切带^[58]。对西非的区域地质调查和年代学研究发现,伊本尼造山运动导致边界附近太古宙

地层发生广泛变形和强烈重熔^[17-18, 29, 33, 59]。几内亚东部发现太古宙与古元古代TTG混合过渡带^[14, 33],利比里亚塞斯托斯剪切带向东北方向延伸的图莱普勒(Toulepleu)-伊体(Ity)地区的太古宙岩层发生明显改造和重熔,发育大量花岗片麻岩^[17-18],结合最新利比里亚北侧塔佩塔-绥德鲁地质调查研究资料,太古宙与古元古代之间复杂混合过渡带位于塞斯托斯剪切带东侧至朱亚松剪切带之间100 km范围内,其内有广泛的褶皱、断裂和花岗质岩体侵入(图2)。

利比里亚中西沿海狭长地带属于泛非期罗克列德造山带的一部分,与北东侧马恩-莱奥地盾基底大致以托迪(Todi)剪切带为界,主要由受造山运动影响的基底片麻岩及变沉积岩组成,年龄约为550 Ma。罗克列德造山带实际上是侵入岩、变质岩发育的缝合带,代表新元古代-早寒武世洋盆闭合及冈瓦纳大陆拼合^[60-61]。中生代侏罗纪(200~170 Ma)冈瓦纳超大陆裂解,大西洋裂开初始阶段,马恩-莱奥地盾从南美圭亚那地盾分离,在利比里亚境内形成强烈的基性-超基性岩侵入,广泛发育辉绿岩、

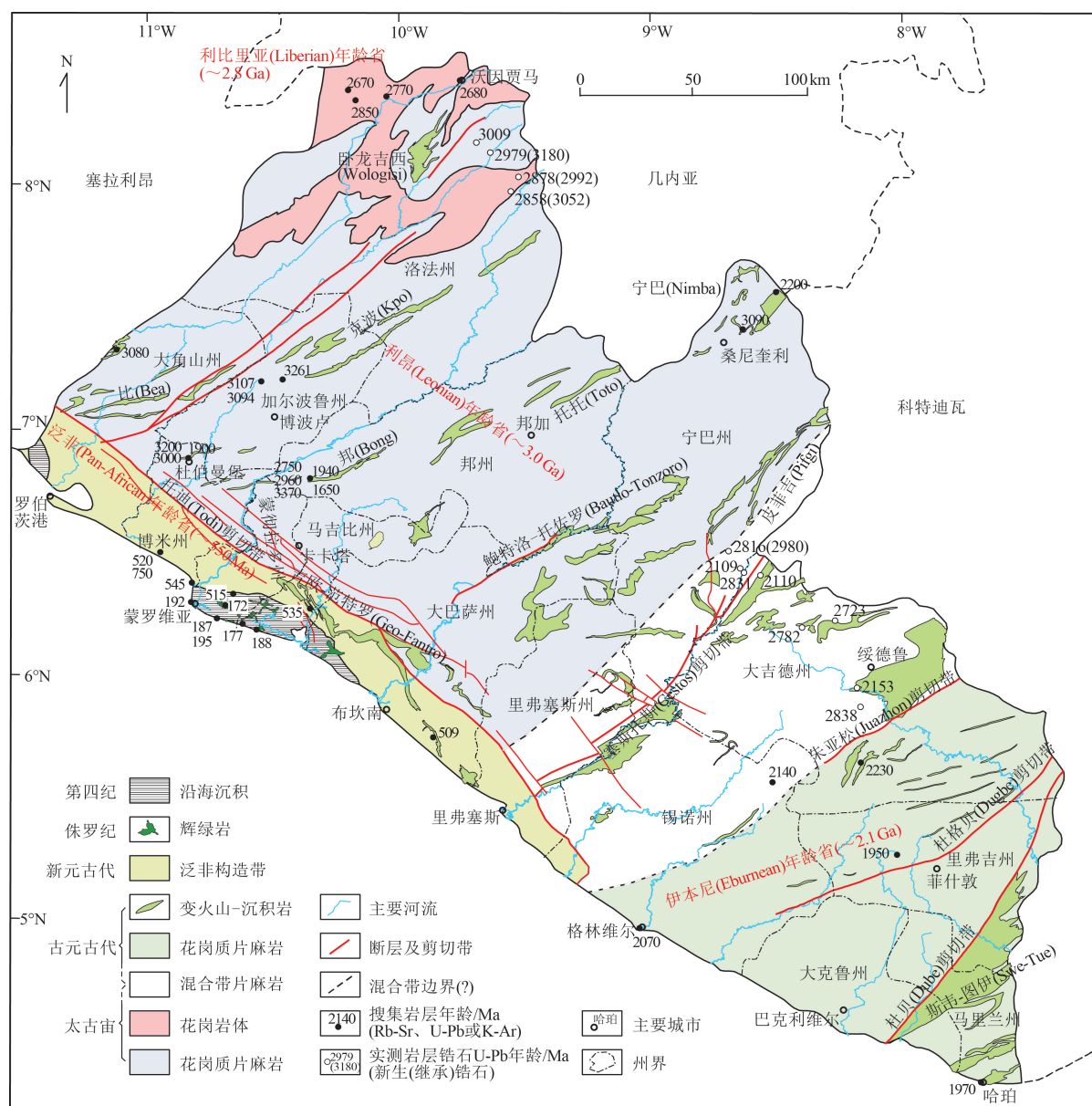


图 2 利比里亚新地质单元划分

Fig. 2 New division of geological units in Liberia

辉长岩、闪长岩脉、小型岩体等,构成壮观的 NW 向岩脉带,向两侧延伸至境外^[48, 62-63]。利比里亚西部可能存在 2 期金伯利岩筒及岩脉群,总体走向呈北东向^[9],其中韦苏阿 (Weasua) 金伯利岩群形成于新元古代,马诺戈杜瓦 (Mano Godua) 和库姆博 (Kumgbo) 岩群形成于侏罗纪晚期^[19]。在新生代,白垩纪的纹层状砂岩、长石砂岩、粉砂岩和砾岩出露于沿海地带的狭长区域内。

结合马恩-莱奥地盾构造演化历史,利比里亚地质构造演化总结为^[27, 37]:①古—中太古代利昂

(Leonian) 构造运动 (3.2~2.9 Ga) 导致在利比里亚东部形成大片花岗质片麻岩基底,区域片麻理为北东向;②新太古代利比里亚 (Liberian) 构造运动 (约 2.8 Ga) 导致北部片麻岩基底重熔,形成高钾花岗岩,区域构造趋势不明显;③古元古代早期 (约 2.3 Ga) 沿着早期基底裂谷或边缘发育火山沉积岩带,可能是受后期构造影响,呈北东向线状分布,发生绿片岩相—角闪岩相变质,常含 BIF 型铁矿,以宁巴、邦州铁矿等为代表;④利比里亚东部经历伊本尼碰撞造山运动 (约 2.1 Ga) 过程,伴随火山岩带形

成、盆地沉积、岩体侵入及广泛的绿片岩相区域变质,引起西侧接触的太古宙地层重熔^[18]。区内北东向塞斯托斯、朱亚松、杜格贝及杜贝剪切带均是区域性重要构造,与区内的金矿具有密切关系;⑤新元古代泛非期(约 550 Ma)罗克列德造山带导致中西部沿海地区发育一系列北西走向、南西倾伏的断裂带及相伴的糜棱岩带,组成托迪(Todi)剪切带;⑥侏罗纪(170~200 Ma),冈瓦纳大陆裂解,利比里亚境内形成大量北西向基性岩脉带,可能与板块后期运动、大陆褶曲造成基底缝合线活化有关,在侏罗纪晚期(140~153 Ma),利比里亚西部形成北东向含金刚石的金伯利岩群。

2 利比里亚金矿地质特征

2.1 金矿特征

目前金矿是利比里亚矿产勘查开采最活跃的矿种,金矿勘查开采主要是残坡积-冲积型次生砂矿和造山型原生岩金矿。利比里亚手工开采砂矿具有悠久的历史,20 世纪 40 年代砂金矿高峰期产量超过 0.93 t/a。据英国地质调查局不完全统计,1970—2018 年利比里亚估计已经生产 34.01 t 黄金,特别是自 2016 年新自由(New Liberty)、科科亚(Kokoya)岩金矿山投产以来,全国黄金年产量已经超过 7 t。利比里亚现有的矿权许可证集中分布于主要的区域剪切带和已知的砂金矿集中区域。

2007 年,美国地质调查局和利比里亚地质调查局联合编制了利比里亚矿产地质图^[58],其中金矿化点近 600 处,80%为砂金矿化点。2011 年,利比里亚重新编制了主要矿点分布图。本次选取金矿化点 266 处,其中岩金矿点 33 处、矿化点 69 处,开采的砂金矿点 164 处(图 3)。但关于金矿性质和成因的研究很少,几乎所有可用的信息都来自于公司勘查技术报告。

自更新世或更早时期以来,向深部强烈的风化作用与中低起伏地区的持续侵蚀,有利于利比里亚各地砂金矿的形成。利比里亚砂金矿点集中分布于绿岩带、区域剪切带附近,主要分布在 8 个砂金矿集中区,即比山砂金区、克波山砂金区、佐佐砂金区、托托山砂金区、塞斯托斯砂金区、普图山砂金区、杜格贝砂金区及斯韦-图伊山砂金区(图 3)。手工开采的砂金矿层厚度一般小于 2 m,且形状狭窄、不连续。残坡积型砂金矿一般赋存在山坡,与原生

金矿化带关系密切。冲积型砂金矿体一般沿水系分布,河流谷底地貌(谷底宽度、形态、汇入支流等)严格控制金矿形成与分布,砂金主要赋存在河漫滩的松散堆积物中,一般富集在堆积物中下部及近底板处,矿体底板坡降明显变化处,底板凹陷处,底板向上游倾斜地段更易富集^[64~65]。利比里亚地层长期处于风化剥蚀且无相伴的沉积盆地,不太可能找到适合现代机械化开采的大型砂金矿。但砂金矿床的广泛分布表明了岩金矿化的巨大潜力,并为靶区勘探提供了有用指示。

与西非鲍莱-莫西域造山型金矿类似,利比里亚岩金矿亦沿着比里姆岩系中的变火山-沉积岩(绿岩带)分布,呈绿片岩相-低角闪岩相变质。区域片理/片麻理一般走向为 50°~70°,倾向南东,倾角 40°~80°,但因构造影响,产状常陡倾或倒转。赋矿围岩岩性多样,包括基性-超基性片岩、流纹质片岩、石英黑云母片岩、花岗质岩体等。这些变沉积岩和火成岩岩性之间差异使矿体沉淀。矿化体主要受北东向区域性剪切带断裂构造控制,次级构造具体控制矿体分布,有利的构造包括构造交会点、褶皱枢纽和翼部、岩石能干性差异面(如剪切岩性差异面)、岩性接触、沉积组合的粒度变化和多期变形带。矿化带宽度通常为 10~30 m,走向连续延伸可达 3 km,倾向延伸可达数百米^[5,66]。矿化体形态以脉状为主^[67],但有时出现分支复合、膨大、羽状侧列等,形态变得复杂。矿化类型包括石英-硫化物(细、网)脉状、硫化物单脉状、硫化物浸染状及构造角砾状金矿。大多数金颗粒以游离态形式存在,一般沿着黄铁矿颗粒边缘的剪切裂隙生长,颗粒大小一般为 30 μm。金矿化通常与硫化物阶段(主要是黄铁矿、毒砂和磁黄铁矿)密切相关。矿化带存在热液蚀变,包括硅化、绢云母化、绿泥石化、电气石化等。在某些矿床中,蚀变组合可能包括金云母、滑石、磁铁矿、黄铁矿、电气石和透闪石。热液蚀变通常伴随着砷、铋、银、钨、镉、铜、铅和锌富集,可能受岩浆热液影响。

2.2 典型矿床

目前在利比里亚进行过系统勘查的岩金矿体有新自由(New Liberty)、恩达布拉马(Ndablama)、韦朱(Weaju)、科科亚(Kokoya)、杜格贝 F(Dugbe F)、图佐森(Tuzon)等,但由于商业资料限制,本文仅以新自由金矿为代表介绍矿体特征。

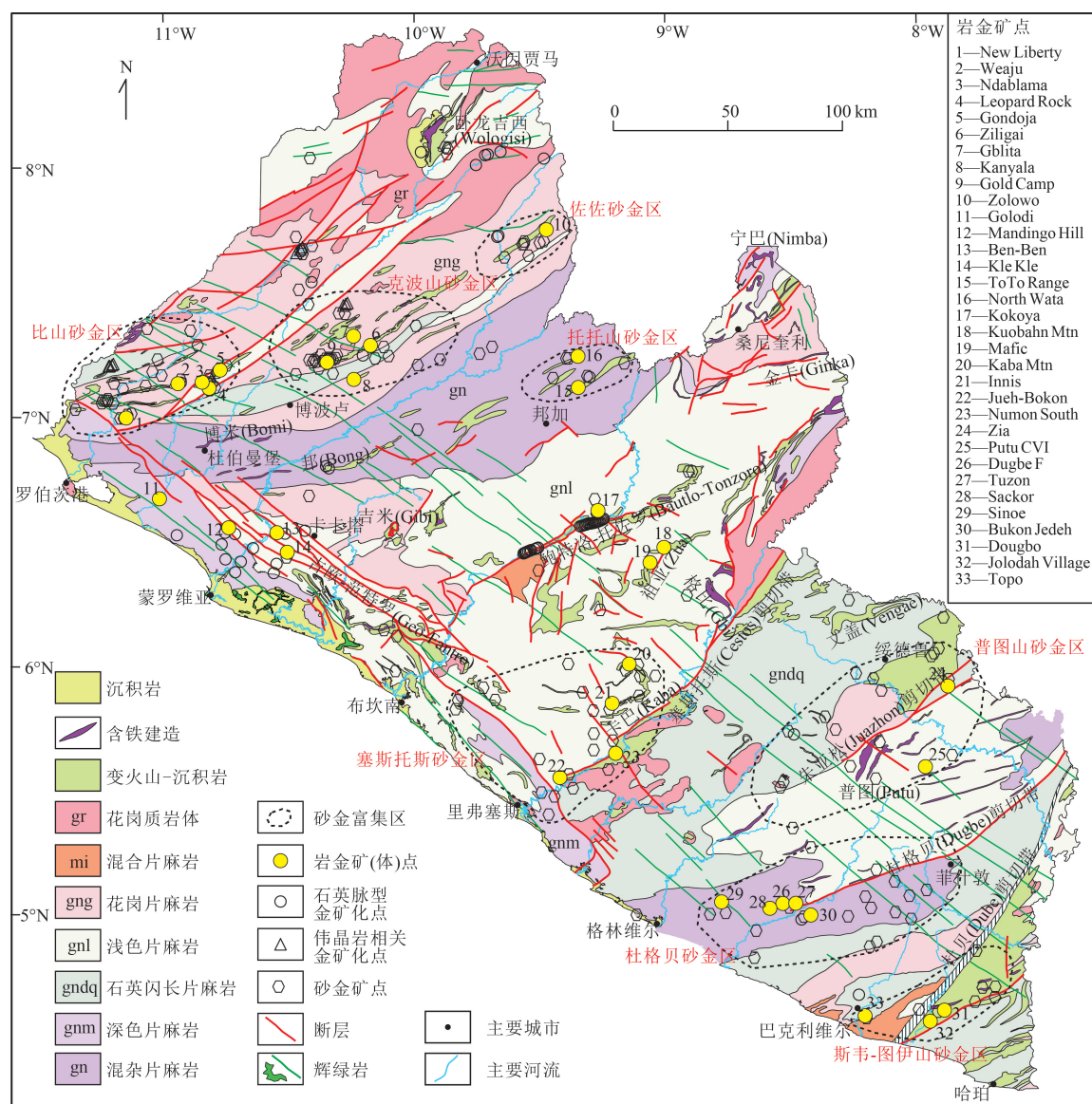


图 3 利比里亚矿产地质图(据参考文献[58]修改)

Fig. 3 Geological map of mineral resources in Liberia

新自由金矿位于利比里亚西南部的大角山州,属于绿岩带内的造山型金矿,矿体赋存在太古代花岗质混合片麻岩围绕的约 100 m 宽的镁铁—超镁铁质残留硅化绿岩带,受剪切构造带控制,走向 $97^{\circ} \sim 105^{\circ}$, 向南陡倾。该矿为加拿大阿韦索资源公司所有,开采始于 2015 年。2018 年 12 月,矿体估算资源量为 44.02 t,其中探明和控制的资源量为 36.09 t,品位为 3.35 g/t;推断资源量 7.93 t,品位 2.99 g/t。矿体证实和可信储量为 29.70 t,品位 3.10 g/t^[5]。

矿区内主要发育 3 种岩层单元,中部为透闪石—绿泥石—阳起石—滑石±富磁铁矿超镁铁质片岩,

两侧为花岗质混合片麻岩和同—晚期侵入的花岗岩类。其中超镁铁质片岩为赋矿围岩,一般含有石英及绿泥石、角闪石、滑石等基性矿物,是区域内典型的绿岩带岩石。花岗质混合片麻岩为片理化含角闪石浅色片麻岩,与(超)镁铁质赋矿围岩接触过渡带为粗粒石榴子石—金云母±阳起石片麻岩。同—晚期非均质云英岩化—伟晶岩化花岗岩类沿着岩层走向或横切裂隙、断层、次级剪切带等多种形式侵入(超)镁铁质片岩(图 4)。

矿区向南陡倾的绿岩带处于高韧性剪切应变带。应变带产状 $287^{\circ} \angle 72^{\circ}$, 为含金流体运移进入

赋矿围岩的通道。剪切的绿岩带内一级小褶皱(3~5 cm)非常发育,但靠近金矿化的区域,剪切强度增加而无法识别褶皱。由于风化层覆盖及花岗侵入体改造,区内地表很难发现断层,但确认存在南部上盘片麻岩向北逆冲断层。

绿岩内矿化带宽度达 10~15 m,沿走向连续延伸 2 km,下倾数百米。金矿化发育在剪切蚀变部位。矿化带明显硅化,可见金云母化、绿泥石化及磁铁矿褪色蚀变。矿化带硫化物含量 0.1%~1%,主要是磁黄铁矿、毒砂和辉砷镍矿,以及少量黄铁矿、黄铜矿和镍黄铁矿,其中磁黄铁矿为交代磁铁矿产物。矿化带内磁铁矿被交代蚀变,硅化、金云母化与游离金矿化关系密切。钻孔岩心多元素地球化学分析结果表明,金矿化强度与 As、S、Ni 和 W 元素关系密切,Mg、Na、K、Pb 和 Ba 元素高值出现在矿化边缘。

前人对杜格贝金矿控矿构造也进行了深入研究^[68],构造期次包括:①平行于层理的 S1 渗透性片理渐变变形(D2),形成贯穿区域的南北向紧闭褶皱(F2);同时地壳增厚导致同构造部分熔融和花岗质岩床侵入;②区域 D2 碰撞构造形式转变为横断体制(D3),杜格贝剪切带左行运动,形成近垂直的糜棱岩组构(S3),并平行于区域尺度的东西向开阔褶皱(F3);③晚期褶皱 F3 与早期褶皱 F2 叠加形成穹丘、盆地组合,及大量未出露的交叉横切的剪切带(D4);④与隆升有关的晚期脆性构造在杜格贝地区不甚发育。杜格贝地区浸染型金矿化与杜格贝剪切带附近的 F2-F3 穹丘状褶皱干涉构造有关,高品位矿化往往与 F2 和 F3 背斜枢纽交点重合,在 2 期次褶皱的枢纽和翼部均发育席状矿体(图 5)。D3 构造圈闭金矿化表明,D2 到 D3 构造体制转变对杜格贝剪切带区域内的流体流动有强烈的影响。穹丘构造和相关的背斜枢纽和翼部的渗透性差异导致流体沿渗透通道流动,促进了金沉淀。

3 金矿资源潜力浅析

3.1 成矿带划分及特征

利比里亚广泛分布的比里姆绿岩带经历了伊本尼(约 2100 Ma)造山运动,地壳尺度的构造体制转换促使区域含金流体沿着区内北东向陡倾剪切带运移,并在剪切体系内的弯曲、拉张交叉口、接触带等有利容矿构造空间形成金矿。区域性隆升、风

化剥蚀、冲刷淋滤等导致形成聚集性的残坡积-冲积型砂金矿。通过对覆盖全国大部分面积的 1:100 万水系沉积物地球化学 Au、Ag、Hg、Cu 等数据进行反复剔除 $X(\text{平均值})+2S(\text{标准偏差})$,确定背景值 0.44 ng/g,异常下限 0.73 ng/g,圈定 8 处金异常区^①。综合利比里亚绿岩带、剪切带、开采砂金点、岩金矿(化)点及地球化学元素异常分布,笔者在利比里亚境内划定 8 个金矿成矿带(图 6)。这些成矿带主要沿区域性剪切带分布,常发育条带状绿岩带,可见 Au、Ag 等元素异常及大量金矿点,具体特征见表 1。

3.2 下一步找矿投资建议

由于金矿受构造、岩性、蚀变等多因素控制,空间分布极不均匀,加上道路交通、植被覆盖、风化剥蚀等外部因素影响及矿产资源法规、当地社区等人文因素限制,导致在利比里亚开展金矿投资同样存在较大风险。为有效降低利比里亚金矿投资风险,笔者针对不同的矿化信息与开发状态下找矿投资提出以下建议。

(1)目前已发现金矿体,如新自由、恩达布拉马、科科亚、杜格贝等金矿,周围成矿地质背景良好,一般具有很好的矿化特征,再次发现金矿概率比较高,如杜格贝金矿东南约 5 km 处 Bukon Jedeh 矿点钻探发现富集于花岗岩体侵入接触带的高品位金矿化;杜格贝金矿西部约 20 km 处 Sinoc 矿点发现侵入(石榴子石)黑云母片岩中的石英长石云母伟晶岩带引起硫化物矿化。但矿体及周围大片区域往往已经被矿业公司登记长达 25 a 的 A 类采矿权,因此针对这些区域建议通过参股或购买方式获得采矿权,进行开采或进一步勘查投资,此类矿业投资风险较小,但成本较高。

(2)位于成矿带内具有良好成矿地质特征的区域,区内已经开展了地质、地球化学或地球物理调查,发现明显矿化显示,具有良好的找矿前景,主要包括:①类似于比山金矿区成矿地质背景,克波山金矿区剪切绿岩带已发现多个金矿点,其中 Gblita 矿点中 8 件石英捡块样品品位为 5.9~16300 g/t^[70];佐佐金矿区 Zolowo 矿点剪切绿岩带中 4 件石英捡块样品品位为 8.8~30.7 g/t^②;②托托金矿区 Toto Range 矿点 4 件剪切镁铁质片岩捡块样品品位为 1.60~33.14 g/t,与土壤地球化学对应的 4 km×2 km 范围中梯单极 IP 调查结果表明,至少存在 2 个平行构造

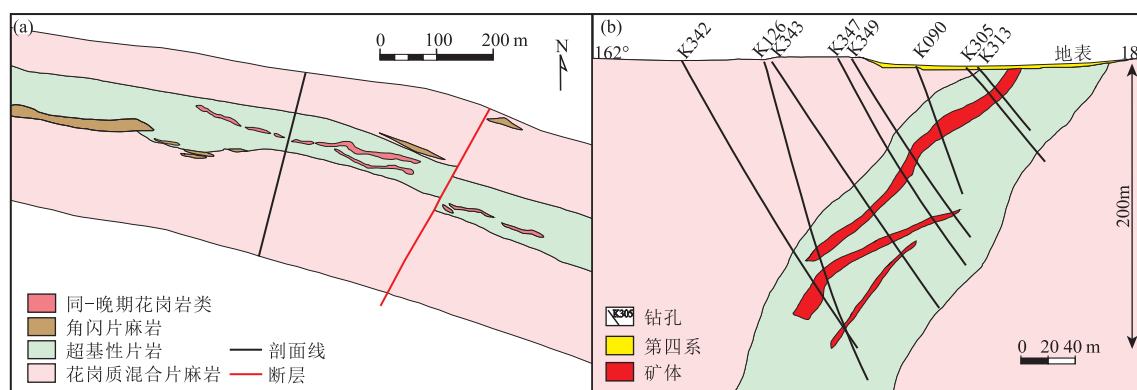


图 4 New Liberty 金矿平面地质图(a)和矿体剖面图(b)(据参考文献[5]修改)

Fig. 4 Geological plane(a) and cross section(b) of the New Liberty gold mine

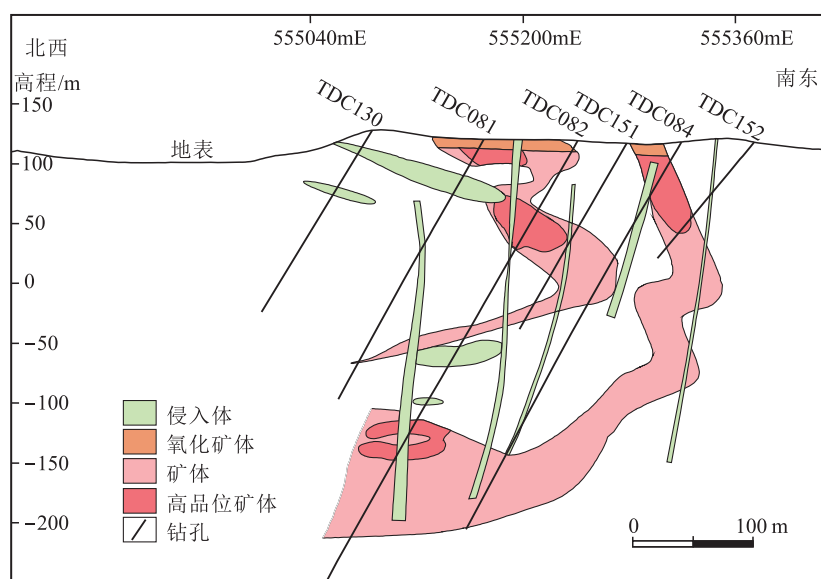


图 5 Dugbe 金矿区 Tuzon 矿体 7700 mN 剖面

Fig. 5 The 7700 mN cross section of the Dugbe gold mine

带。北部 14 km 处的 North Wata 矿点 2.4 km × 1.2 km 范围中梯单极 IP 调查显示高极化率带且东部具有深源特征^[70]; ③斯韦-图伊山金矿区 Jolodah Village 矿点附近长达 1 km 的开采砂金带和十几米深的大采坑, 3 件石英捡块样品品位为 118.5~270 g/t^[70]。北东 7 km 处的 Dougbo 矿点发现长 2.5 km、宽 700 m 的连续土壤地球化学异常带, 具有 4 个 Au 元素浓集中心(品位为 0.25~10.4 g/t)^③; ④普图山金矿区 Putu CVI 矿点北西向分布 5 个大规模砂金采点, 长 6 km、宽 250 m 土壤异常带及 5 km 的梯度 IP 高极化率带耦合, 表明有良好找矿潜力^[70]; ⑤卡巴山金矿区 Numon South 矿点矿化走向延伸超过 1 km, 宽逾 170 m, 捡块样品品位为 1.86 g/t 和 3.55 g/t^[71]。

北部 40 km 处的 Kaba Mtn 矿点含硫化物石英脉捡块样品品位为 11.85 g/t; ⑥Kuobahn 矿点圈定土壤金异常带, 附近有过多淘金热, 山体南侧发生过 2 次矿井坍塌事件, 其东南 10 km 处 Mafic 矿点出现高品位^[70]; ⑦咖啡山金矿区 Ben-Ben 矿点原位捡块样品品位为 255 g/t。西部 20 km 处的 Mandingo Hill 矿点施工的 12 个浅钻(964 m)中 11 个见矿, 最宽矿体 22 m, 品位 7.00 g/t^[70]。但这些区域一般已经被矿业公司登记了独占性 5 年勘探许可证(首期 3 年, 可延续 2 年), 因此针对这些区域建议通过购买或参股方式获得勘探许可证, 进行商业系统勘查, 很有可能实现重大找矿突破, 但此类矿业投资仍具有一定风险。

表 1 利比里亚金矿带主要特征

Table 1 Main features of the gold belts in Liberia

序号	名称	地质背景	控矿因素	矿化蚀变	典型矿体/矿点
1	比-克波成矿带	花岗-花岗闪长片麻岩、条带状铁建造、基性-超基性片岩带和热液退蚀角闪岩	①比山-克波山剪切绿岩带,走向北东 $44^{\circ} \sim 82^{\circ}$,倾向北西,倾角大于 65° ,与几内亚东南部西芒杜绿岩带相连 ②剪切构造作用,发育脆-韧性条带状糜棱岩及同-后构造期花岗岩 ③Au 高背景区,发育 Au-1 异常(面积 1128 km^2 ,峰值 220 ng/g ,衬度 8.33,与 Ag、Cu 等异常套合)和 Au-2 异常(面积 452 km^2 ,峰值 2.19 ng/g ,衬度 3.36),大量金矿点,大致集中在比山、克波山及佐佐 3 个金矿富集区	脉状石英-硫化物、浸染状硫化物及构造角砾状矿化 硅化、绿泥石化、绢云母化、滑石化、金云母化、透闪石化等蚀变	大型新自由金矿,中型恩达布拉马金矿、韦朱金矿
2	杜格贝成矿带	岩性较复杂,西南段为含石墨石榴子石黑云斜长片麻岩,局部石英黑云母片岩;北东段为含表壳岩的角闪黑云花岗-石英闪长片麻岩	①北东向区域性杜格贝剪切带,经历了挤压、走滑、剪切等多期构造活动,形成了 2 期叠加褶皱、糜棱岩化带及同-晚期花岗闪长岩 ②Au 高背景区,发育 Au-8 异常中段(面积 2529 km^2 ,峰值 2.66 ng/g ,衬度 3.12,与 Ag、Hg、Cu 等异常套合较好);杜格贝金矿富集区发育大量金矿点	浸染状硫化物和脉状石英-硫化物矿化,广泛分布黄铁矿、毒砂及少量黄铜矿 硅化、绢云母化、绿泥石化等蚀变	超大型杜格贝金矿(控制+推断资源量 130.63 t)
3	塞斯托斯成矿带	古元古代鲍莱-莫西域与太古宙凯内-马恩域碰撞造山形成的复杂混合过渡带	①北东向区域性塞斯托斯剪切带,与科特迪瓦西南部图莱普勒-伊体剪切带相连 ②北东向大量的绿岩带、广泛的多期褶皱、剪切断裂和花岗闪长岩 ③西南段发育 Au-7 异常(面积 602 km^2 ,峰值 1.28 ng/g ,衬度 2.73,与 Ag 异常套合)和卡巴山金矿区,该金矿区分布大量民采金矿点;北东段绿岩带西缘发育走滑糜棱岩化带,可见民采砂金点	脉状石英-硫化物及浸染状硫化物矿化,发育毒砂、黄铁矿等硫化物	伊体金矿 ^[69] Numon South、Kaba Mtn、Innis 等矿点
4	鲍特洛-祖亚-皮菲吉成矿带	浅色含黑云角闪花岗-石英闪长片麻岩,北东角为含紫苏辉石-透辉石-角闪石暗色片麻岩,上覆大量的绿岩带	①北东向鲍特洛-托佐罗-皮菲吉绿岩带 ②以北东向剪切带和褶皱为主,其次为近南北向右行、北西向左行断裂等多期构造活动 ③中南部发育 Au-5 异常(面积 243 km^2 ,峰值 1.16 ng/g ,衬度 2.64)和鲍特洛-托佐罗金矿区;北东段发育 Au-6 异常(面积 418 km^2 ,峰值 1.14 ng/g ,衬度 2.59)	以石英脉型金矿化为主; 硅化、绿泥石化、碳酸盐化等蚀变	中型科科亚金矿(资源量 12.75 t); Kuobahn 矿点
5	邦-托托-宁巴成矿带	条带状黑云花岗岩片麻岩和含角闪石花岗闪长-闪长片麻岩,上覆断续分布的绿岩带	①邦-托托-宁巴绿岩带,走向北东,倾向西,倾角 $50^{\circ} \sim 70^{\circ}$ ②北东向剪切和褶皱构造发育 ③Au 高背景区,其中北东角发育 Au-3 异常(面积 263 km^2 ,峰值 1.22 ng/g ,衬度 2.77,与 Cu 异常套合);中北段发育托托山金矿富集区和 Ag、Cu 等异常	石英-硫化物脉状和硫化物浸染状矿化 赤铁矿化、碳酸盐化、绢云母化、绿泥石化等蚀变	Toto Range、North Wata 等矿点
6	杜贝成矿带	浅色片麻岩和石英闪长片麻岩,以及上覆相当数量变火山-沉积岩	①区域性杜贝剪切带北东向(约 50°),宽约 300 m ,横切区内北东东走向的片理、片麻理构造,为左行脆韧性剪切带 ②发育大量变火山-沉积岩 ③Au 高背景区,发育 Au-8 异常南段(面积 1473 km^2 ,峰值 2.30 ng/g ,衬度 2.75,与 Ag、Hg、Cu 等异常套合较好)和斯韦-图伊山金矿富集区	脉状石英-硫化物及浸染状硫化物矿化,硫化物主要为黄铁矿和毒砂; 硅化、绿泥石化、绢云母化、碳酸盐化等蚀变	Jolodah Village、Dougbo 等矿点
7	朱亚松成矿带	角闪黑云花岗岩-石英闪长片麻岩及绿岩带	①北东向区域性朱亚松剪切带 ②Au 高背景区,北东段下部发育 Au-8 异常北段(面积 1263 km^2 ,峰值 380.42 ng/g ,衬度 17.17,与 Ag 异常套合)和普图山金矿富集区;西南段发育 Ag、Hg、Cu 等异常且套合较好	浸染状硫化物矿化	Putu CVI、Zia 等矿点

续表 1

序号	名称	地质背景	控矿因素	矿化蚀变	典型矿体/矿点
8	托迪成矿带	紫苏辉石-透辉石-角闪石花岗岩片麻岩、花岗-石英闪长片麻岩、吉欧-范特罗 (Geo-Fantro) 绿岩带及晚期基性侵入岩	①北西向区域性托迪剪切带走向约 320°, 南西倾斜 40°~60°, 弱—中等糜棱岩构造及交叉剪切节理发育 ②Au 高背景区, 西北段含 Au-4 异常 (面积 414 km ² , 峰值 2.65 ng/g, 衬度 3.24, 与 Ag、Hg、Cu 等异常套合较好) 和咖啡山金矿富集区; 东南段发育民采砂金矿点	石英脉型、角砾状石英网脉型矿化; 碳酸盐化、绿泥石化、硅化、赤铁矿化蚀变	Golodi、Ben - Ben、Mandingo Hill、Kle - Kle 等矿点

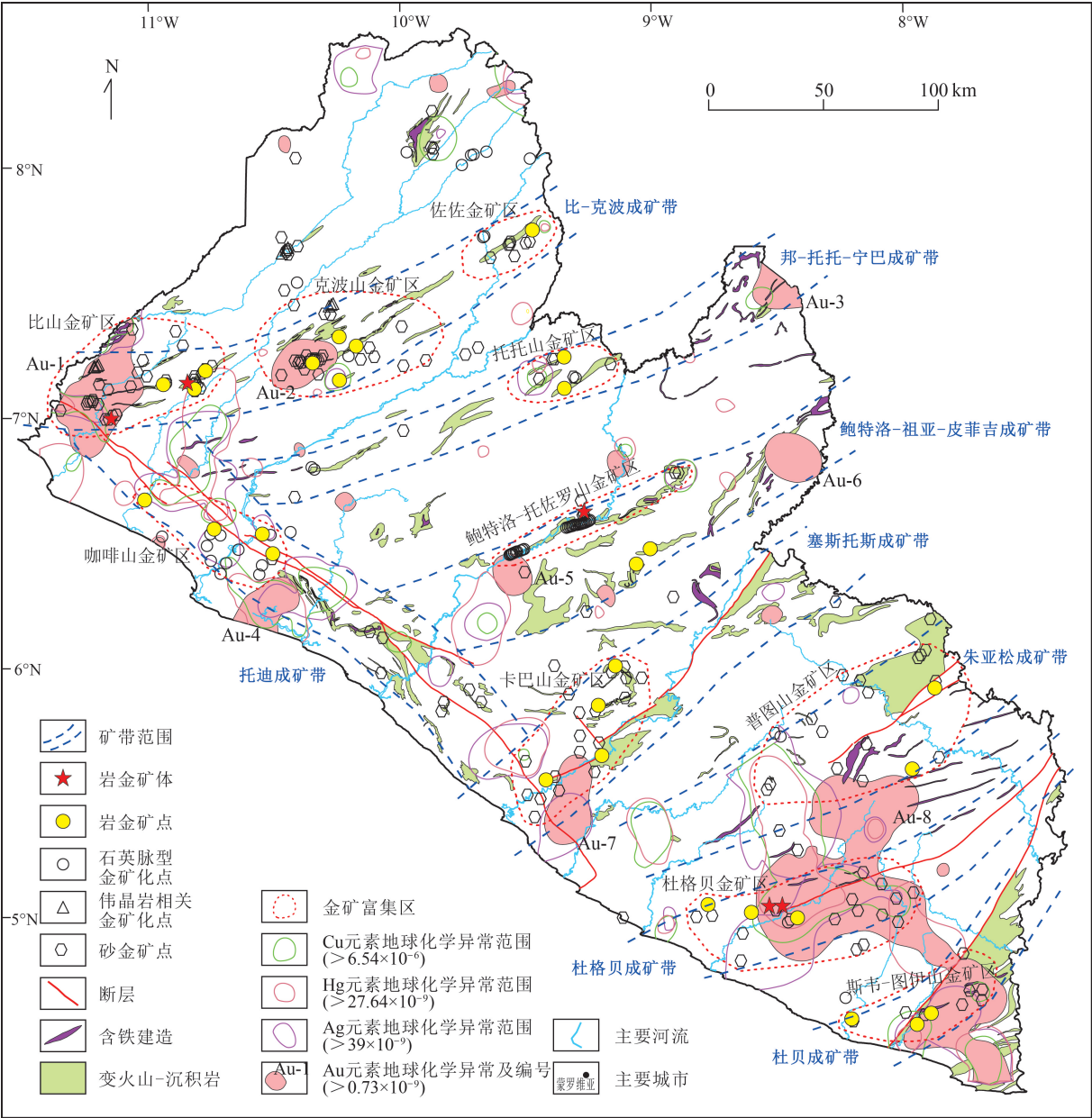


图 6 利比里亚成矿带划分
Fig. 6 Metallogenic belts of Liberia

(3) 位于成矿带内具有较好成矿地质背景的地区, 因为尚未进行地质矿产调查或者民采活动有限, 目前尚未发现明显矿化, 但仍有较好的找矿前景, 如克波山金矿区北东侧绿岩带、邦-托托-宁巴成矿带西南段绿岩带、鲍特洛-托佐罗山金矿区北东部绿岩带、斯韦-图伊山金矿区北东侧绿岩带等。这些区域尚未被登记, 建议通过登记概查或勘探许可证, 循序渐进进行勘查投资, 此类矿业投资成本相对较少, 周期较长, 具有一定概率发现金矿体。

(4) 未开发的冲积型砂矿是许多小矿业公司优先目标。绿岩建造被认为是砂金矿的主要来源^[72-73], 与冲积砂金矿有关的这类远景区位于与卧龙吉西、宁巴、普图、吉欧-范特罗等绿岩山脉相连的河流、谷盆等负地貌, 是冲积型砂金矿勘探开采的有利目标区域。

4 结 论

(1) 利比里亚位于马恩-莱奥地盾的西南部, 横跨凯内-马恩域和鲍莱-莫西域, 构造演化上经历了太古宙利昂、利比里亚构造演化和古元古代伊本尼造山运动, 具有复杂的构造演化历史。以前矿业投资侧重于 BIF 型铁矿勘查开发, 近年广泛分布的比里姆岩系造山型金矿勘查取得突破, 表明利比里亚同样具有良好的金矿成矿潜力。

(2) 综合利比里亚比里姆绿岩带、剪切带、开采砂金点、岩金矿(化)点和 1:100 万水系沉积物 Au、Ag、Hg、Cu 等元素地球化学异常, 在利比里亚全国划定了比-克波、杜格贝、塞斯托斯、鲍特洛-祖亚-皮菲吉、邦-托托-宁巴、杜贝、朱亚松、托迪 8 个金成矿带, 显示出良好的成矿潜力。

(3) 通过对成矿带内不同勘查开发程度下的金矿区找矿投资进行初步分析, 认为成矿带内具有良好矿化显示和找矿前景的区域建议通过购买或参股方式获得勘探许可证, 进行商业系统勘查, 很有可能会有重大找矿突破。

致谢: 文章引用了 Avesoro Resources Inc. Hummingbird Resources Plc. Amlib Holdings Plc. Liberty International Mineral Corp. Tawana Resources NL. Tietto Minerals Ltd. Auramin Ltd. MNG Gold Liberia Inc 等矿业公司勘探活动与测试分析资料, 未在参考文献中一一列出, 在此表示感谢。

参考文献

- [1] 张继纯, 严永祥, 王建雄, 等. 西非矿产资源的地质背景及重要成矿分区[J]. 华南地质与矿产, 2019, 35(1): 76-89.
- [2] Anderson K F E. Geometallurgical Evaluation of the Nkout (Cameroon) and Putu (Liberia) Iron Ore Deposits[D]. 德文郡埃克塞特市: University of Exeter, 2014.
- [3] Gunn A G, Dorbor J K, Mankelov J M, et al. A review of the mineral potential of Liberia[J]. Ore Geology Reviews, 2018, 101: 413-431.
- [4] M. Robertson L P. West African Goldfields[J]. Episodes, 2016, 2(39): 155-176.
- [5] Csglobal. New Liberty Gold Mine Mineral Resources and Mineral Reserves Update, Liberia[EB/OL]. (2019) [2020-10-10] <https://avesoro.com/technical-reports/>
- [6] Hummingbird Resources. Hummingbird Resources Annual Report and Accounts [EB/OL]. (2019) [2020-10-12] <https://www.hummingbirdresources.co.uk/>.
- [7] Clauer N, Caby R, Jeannette D, et al. Geochronology of sedimentary and metasedimentary Precambrian rocks of the West African craton[J]. Precambrian Research, 1982, 18(1): 53-71.
- [8] 高坪仙. 西非克拉通结晶基底构造分区概述[J]. 国外前寒武纪地质, 1992, (4): 23-25.
- [9] Haggerty S E. Kimberlites in western Liberia: An overview of the geological setting in a plate tectonic framework [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1982, 87(B13): 10811-10826.
- [10] 毛伦锦. 西非的金资源[J]. 国外铀金地质, 1989, (2): 1-6.
- [11] Foster R P, Piper D P. Archaean lode gold deposits in Africa: Crustal setting, metallogenesis and cratonization[J]. Ore Geology Reviews, 1993, 8(3): 303-347.
- [12] Boher M, Abouchami W, Michard A, et al. Crustal growth in West Africa at 2.1 Ga[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 1992, 97(B1): 345-369.
- [13] Denis T, Claude D, Alain C, et al. A 3.5 Ga granite-gneiss basement in Guinea: further evidence for early archaean accretion within the West African Craton[J]. Precambrian Research, 2001, 108(3): 179-194.
- [14] Egal E, Thiéblemont D, Lahondère D, et al. Late Eburnean granitization and tectonics along the western and northwestern margin of the Archean Kénéma-Man domain (Guinea, West African Craton)[J]. 2002, 117: 57-84.
- [15] Milési J, Ledru P, Feybesse J, et al. Early proterozoic ore deposits and tectonics of the Birimian orogenic belt, West Africa[J]. Precambrian Research, 1992, 58(1): 305-344.
- [16] Taylor W R, Tompkins L A, Haggerty S E. Comparative geochemistry of West African kimberlites: Evidence for a micaceous kimberlite endmember of sublithospheric origin[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1994, 58(19): 4017-4037.
- [17] Jean-Louis F, Jean-Pierre M. The Archaean/Proterozoic contact zone in West Africa: a mountain belt of décollement thrusting and folding on a continental margin related to 2.1 Ga convergence of Archaean cratons? [J]. Precambrian Research, 1994, 69: 199-227.

- [18] Kouamelan A N, Delor C, Peucat J J. Geochronological evidence for reworking of Archean terrains during the Early Proterozoic (2.1 Ga) in the western Cote d'Ivoire (Man Rise – West African Craton)[J]. *Precambrian Research*, 1997, 86(3): 177–199.
- [19] Skinner E M W, Apter D B, Morelli C, et al. Kimberlites of the Man craton, West Africa[J]. *Lithos*, 2004, 76(1): 233–259.
- [20] Parra-Avila L A, Belousova E, Fiorentini M L, et al. Crustal evolution of the Paleoproterozoic Birimian terranes of the Baoulé – Mossi domain, southern West African Craton: U–Pb and Hf–isotope studies of detrital zircons[J]. *Precambrian Research*, 2016, 274: 25–60.
- [21] Block S, Jessell M, Aillères L, et al. Lower crust exhumation during Paleoproterozoic (Eburnean) orogeny, NW Ghana, West African Craton: Interplay of coeval contractional deformation and extensional gravitational collapse[J]. *Precambrian Research*, 2016, 274: 82–109.
- [22] Parra-Avila L A, Belousova E, Fiorentini M L, et al. Zircon Hf and O–isotope constraints on the evolution of the Paleoproterozoic Baoulé – Mossi domain of the southern West African Craton[J]. *Precambrian Research*, 2018, 306: 174–188.
- [23] Grenholm M. The Birimian event in the Baoulé Mossi domain (West African Craton)—regional and global context[D]. Lund University Master Thesis, 2014.
- [24] Manighetti I, Michard A, Saddiqi O. The West African Craton and its margins. Foreword[J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 2018, 350(6): 233–235.
- [25] Grenholm M, Jessell M, Thébaud N. A geodynamic model for the Paleoproterozoic (ca. 2.27–1.96 Ga) Birimian Orogen of the southern West African Craton – Insights into an evolving accretionary – collisional orogenic system[J]. *Earth Science Reviews*, 2019, 192: 138–193.
- [26] Thiéblemont D. Geological Map of Africa—1 : 10 million scale[Z]. French Geological Survey, 2016.
- [27] Rollinson H. Archean crustal evolution in West Africa: A new synthesis of the Archean geology in Sierra Leone, Liberia, Guinea and Ivory Coast[J]. *Precambrian Research*, 2016, 281: 1–12.
- [28] Rollinson H R. Zonation of supracrustal relics in the Archean of Sierra Leone, Liberia, Guinea and Ivory Coast[J]. *Nature*, 1978, 272(5652): 440–442.
- [29] Hurley P M, Leo G W, Fairbairn R W W A. Liberian age province (about 2,700 m.y.) and adjacent provinces in Liberia and Sierra Leone[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1971, 12: 3483–3490.
- [30] Beckinsale R D, Gale N H, Pankhurst R J, et al. Discordant Rb–Sr and Pb–Pb whole rock isochron ages for the Archean basement of Sierra Leone[J]. *Precambrian Research*, 1980, 13(1): 63–76.
- [31] Beckinsale R D, Gale N H, Pankhurst R J, 等. 塞拉利昂太古宙基底中不一致的 Rb–Sr 和 Pb–Pb 全岩等时年龄的意义[J]. *国外前寒武纪地质*, 1982, (1): 67–76.
- [32] Williams H R. The Archean geology of Sierra Leone[J]. *Precambrian Research*, 1978, 6(3): 251–268.
- [33] Thiéblemont D, Goujou J C, Egal E, et al. Archean evolution of the Leo Rise and its Eburnean reworking[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2004, 39(3): 97–104.
- [34] Rollinson H R, Cliff R A. New Rb–Sr age determinations on the Archean basement of Eastern Sierra Leone [J]. *Precambrian Research*, 1982, 17(1): 63–72.
- [35] Rollinson H. Eclogite xenoliths in west African kimberlites as residues from Archean granitoid crust formation [J]. *Nature*, 1997, 389(6647): 173–176.
- [36] Barth M G, Rudnick R L, Carlson R W, et al. Re–Os and U–Pb geochronological constraints on the eclogite–tonalite connection in the Archean Man Shield, West Africa [J]. *Precambrian Research*, 2002, 118(3): 267–283.
- [37] Rollinson H. The geochemical evolution of Archean felsic gneisses in the West African Craton in Sierra Leone[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2018, 143: 28–39.
- [38] Kouamelan A N, Djro S C, Allialy M E, et al. The oldest rock of Ivory Coast[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2015, 103: 65–70.
- [39] Petersson A, Scherstén A, Kristinsdóttir B, et al. Birimian crustal growth in the West African Craton: U–Pb, O and Lu–Hf isotope constraints from detrital zircon in major rivers[J]. *Chemical Geology*, 2018, 479: 259–271.
- [40] Patrick A S, Solomon A, Ben X S, et al. Geochemical and Sr–Nd isotopic records of Paleoproterozoic metavolcanics and mafic intrusive rocks from the West African Craton: Evidence for petrogenesis and tectonic setting[J]. *Geological Journal*, 2018, 3(2): 725–741.
- [41] Block S, Baratoux L, Zeh A, et al. Paleoproterozoic juvenile crust formation and stabilisation in the south–eastern West African Craton (Ghana); New insights from U–Pb–Hf zircon data and geochemistry[J]. *Precambrian Research*, 2016, 287: 1–30.
- [42] Parra – Avila L A, Kemp A I S, Fiorentini M L, et al. The geochronological evolution of the Paleoproterozoic Baoulé – Mossi domain of the Southern West African Craton [J]. *Precambrian Research*, 2017, 300: 1–27.
- [43] Feybesse J, Billa M, Guerrot C, et al. The paleoproterozoic Ghanaian province: Geodynamic model and ore controls, including regional stress modeling[J]. *Precambrian Research*, 2006, 149(3): 149–196.
- [44] Baratoux L, Metelka V, Naba S, et al. Juvenile Paleoproterozoic crust evolution during the Eburnean orogeny (2.2–2.0 Ga), western Burkina Faso[J]. *Precambrian Research*, 2011, 191(1/2): 18–45.
- [45] Dabo M, Aifa T, Gassama I, et al. Thrust to transpression and transtension tectonics during the Paleoproterozoic evolution of the Birimian Greenstone Belt of Mako, Kédougou–Kéniéba Inlier, Eastern Senegal[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2018, 148: 14–29.
- [46] Petersson A, Scherstén A, Kemp A I S, et al. Zircon U–Pb–Hf evidence for subduction related crustal growth and reworking of Archean crust within the Palaeoproterozoic Birimian terrane, West African Craton, SE Ghana[J]. *Precambrian Research*, 2016, 275: 286–309.
- [47] Billa M, Feybesse J, Bronner G, et al. Banded ferruginous quartzite formations of the Nimba and Simandou ranges: tectonically stacked units on an Archean plutonic basement (Kenema–Man craton), during the Eburnean orogeny[J]. *Earth and Planetary Science*, 1999,

- 329: 287–294.
- [48] Onstott T C, Dorbor J. ⁴⁰Ar/³⁹Ar and paleomagnetic results from Liberia and the Precambrian APW data base for the West African Shield[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 1987, 6(4): 537–552.
- [49] Tapsoba B, Lo C, Jahn B, et al. Chemical and Sr–Nd isotopic compositions and zircon U–Pb ages of the Birimian granitoids from NE Burkina Faso, West African Craton: Implications on the geodynamic setting and crustal evolution[J]. *Precambrian Research*, 2013, 224: 364–396.
- [50] Sakyi P A, Su B, Anum S, et al. New zircon U–Pb ages for erratic emplacement of 2213–2130 Ma Paleoproterozoic calc–alkaline I–type granitoid rocks in the Lawra Volcanic Belt of Northwestern Ghana, West Africa[J]. *Precambrian Research*, 2014: 149–168.
- [51] Gasquet D, Barbey P, Adou M, et al. Structure, Sr–Nd isotope geochemistry and zircon U–Pb geochronology of the granitoids of the Dabakala area (Cote d’Ivoire): evidence for a 2.3 Ga crustal growth event in the Palaeoproterozoic of West Africa? [J]. *Precambrian Research*, 2003, 127: 329–354.
- [52] John T, Klemd R, Hirdes W, et al. The metamorphic evolution of the Paleoproterozoic (Birimian) volcanic Ashanti belt (Ghana, West Africa)[J]. *Precambrian Research*, 1999, 98(1): 11–30.
- [53] Debat P, Nikiéma S, Mercier A, et al. A new metamorphic constraint for the Eburnean orogeny from Paleoproterozoic formations of the Man shield (Aribinda and Tampilga countries, Burkina Faso) [J]. *Precambrian Research*, 2003, 123(1): 47–65.
- [54] Goldfarb R J, André–Mayer A, Jowitt S M, et al. West Africa: The World’s Premier Paleoproterozoic Gold Province [J]. *Economic Geology*, 2017, 112(1): 123–143.
- [55] McFarlane H B, Ailleres L, Betts P, et al. Episodic collisional orogenesis and lower crust exhumation during the Palaeoproterozoic Eburnean Orogeny: Evidence from the Sefwi Greenstone Belt, West African Craton[J]. *Precambrian Research*, 2019, 325: 88–110.
- [56] Markwitz V, Hein K A A, Miller J. Compilation of West African mineral deposits: Spatial distribution and mineral endowment [J]. *Precambrian Research*, 2016, 274: 61–81.
- [57] 史宏江, 王翠彭, 赵意会. 加纳西南部阿曼弗如姆金矿床地质特征及成因分析[J]. *黄金*, 2018, 39(8): 28–31.
- [58] Wahl R R. Geologic, Geophysical, and Mineral Localities Map of Liberia—A Digital Compilation[Z]. U.S. Geological Survey, 2007.
- [59] Eglinger A, Thébaud N, Zeh A, et al. New insights into the crustal growth of the Paleoproterozoic margin of the Archean Kéména–Man domain, West African craton (Guinea): Implications for gold mineral system[J]. *Precambrian Research*, 2017, 292: 258–289.
- [60] Lytwyn J, Burke K, Culver S. The nature and location of the suture zone in the Rokelide orogen, Sierra Leone: Geochemical evidence[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2006, 46(5): 439–454.
- [61] De Waele B, Lacorde M, Vergara F, et al. New insights on proterozoic tectonics and sedimentation along the peri–Gondwanan West African margin based on zircon U–Pb SHRIMP geochronology [J]. *Precambrian Research*, 2015, 259: 156–175.
- [62] Dupuy C, Marsh J, Dostal J, et al. Asthenospheric and lithospheric sources for Mesozoic dolerites from Liberia (Africa): trace element and isotopic evidence[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1988, 87(1): 100–110.
- [63] Sebai A, Feraud G, Bertrand H, et al. ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating and geochemistry of tholeiitic magmatism related to the early opening of the Central Atlantic rift[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1991, 104(2): 455–472.
- [64] 徐少龙, 雷新喜. 利比里亚大巴萨州扎恩砂金矿床成因及找矿标志[J]. *科学家*, 2015(9): 64–65.
- [65] 牛智辉, 徐东华. 西非利比里亚大巴萨州地区砂金矿特征及找矿方向探讨[J]. *地球*, 2015, (z1): 33.
- [66] Hummingbird Resources. Hummingbird Resources Annual Report[EB/OL]. (2012) [2020–10–15] <https://www.hummingbirdresources.co.uk/>.
- [67] 王海燕, 夏强. 西非利比里亚绿岩型金矿成因及特点[J]. *地球*, 2013, (7): 149.
- [68] Langdon R G A J. Structural Controls on Gold Mineralisation along the Dugbe Shear Zone, Eastern Liberia [C]. 36 Annual Winter Meeting of the Mineral Deposits Studies Group. Leicester, 2013.
- [69] Béziat D, Siebenaller L, Salvi S, et al. A weathered skarn–type mineralization in Ivory Coast: The Ity gold deposit[J]. *Ore Geology Reviews*, 2016, 78: 724–730.
- [70] Whiteaker R J. Exploration Activities on the Mineral Concessions of Liberty International Mineral Corp[EB/OL]. (2007) [2020–10–20] https://www.libertymineral.com/projects/liberia/project_gblita/.
- [71] Geoff E. Delivering on Liberia’s Potential.[EB/OL]. (2012) [2020–10–10] <https://www.amlibgroup.com/2012>.
- [72] Gerard Buisson, Marc Leblanc, 周少平. 阿拉伯、马里、摩洛哥上元古界蛇绿岩建造地幔橄榄岩中的金[J]. *黄金科技动态*, 1989, (6): 10–13.
- [73] 孙建虎. 几内亚金矿地质特征及成矿条件分析[J]. *企业导报*, 2012, (6): 273–274.
- ①陈开旭, 孟庆敏, 王超, 等. 援利比里亚矿产资源调查技术合作项目 2019 年度报告. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 2019.
- ②Auramin. The technical Introduction of Zolowo Gold Project. 2019.
- ③Limited T M. Replacement Prospectus. 2017.