

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.01.007

西非金矿床类型及时空分布规律

姜军胜, 胡鹏*, 张海坤, 程湘, 王建雄, 向文帅

JIANG Junsheng, HU Peng*, ZHANG Haikun, CHENG Xiang, WANG Jianxiong,
XIANG Wenshuai

中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430205

Wuhan Center, China Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China

摘要:西非素有“黄金海岸”之称,近年西非金矿勘查和产量不断突破新高,已超过南非成为非洲最重要的产金区。通过系统总结西非156个有储量数据的金矿山信息发现,西非已发现金矿储量全球占比超7%,未来可能成为全球金矿开采与供应的重要一极。成因类型上以造山型金矿为主,且成矿流体具有富水含碳为特征。砾岩型金矿次之,独居特色,其他类型矿床数量较少。西非金矿时间分布上具有广泛分布、高度集中的特点。古元古代埃布尼造山运动(2.2~2.0 Ga)对金矿的形成具有绝对控制作用,其他时期金矿数量相对较少。西非金矿空间分布广泛,且具有明显的丛聚性分布特征,集中分布于西非克拉通内的莱奥地盾区,其他地区零星出露。根据西非金矿成矿地质背景与空间分布规律,划分了23个IV成矿带。上述研究不仅有助于深入了解西非金矿成矿地质条件及矿床分布规律,也对该区下步的找矿勘查部署具有一定的指示意义,更可能为该区金矿理论研究提供启示。

关键词:金矿;矿床成因类型;成矿规律;西非;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)01-0085-14

Jiang J S, Hu P, Zhang H K, Cheng X, Wang J X, Xiang W S. Genetic types of gold deposits in Western Africa and their temporal and spatial distribution. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(1): 85-98

Abstract: West Africa is known as the "Gold Coast". In recent years, the gold in West Africa prospecting exploration and production has continuously broken new highs, and it has surpassed South Africa to become the most important gold-producing region in Africa. In order to understand the geological conditions and their temporal and spatial distribution of gold deposits in West Africa, this paper systematically sorts out and summarizes 156 gold deposits in West Africa. A comprehensive study found that West Africa has discovered gold reserves accounting for more than 7% of the world, and will become an important pole of global gold mining and supply in the future. In terms of genetic type, the gold orogenic type deposit is the main type in West Africa, and its ore-forming fluid is characterized by the enrichments of water and carbon. The conglomerate type gold deposit is the second important genetic type, which is an unique type in West Africa. The gold deposits in West Africa are widely distributed and highly concentrated in time. The Eburnean Orogeny (2.2 ~ 2.0 Ga) in Paleoproterozoic has an absolute control on the formation of gold deposits in West Africa, and relatively few gold deposits formed in other periods. The gold deposits in West Africa are widely distributed in space and have obvious cluster distribution characteristics, which are concentrated in the Leo shield area within the West Africa Craton. Whereas, the other areas are sporadically exposed. According to the geological background and spatial distribution of gold deposits in West Africa, 23 IV metallogenic belts are firstly divided in this area. The above research is not only helpful to understand the metallogenic geological conditions and distribution rules of gold deposits in West Africa, but also could supply some indication on the next prospecting and exploration deployment, and also may provide some enlightenment for the theoretical research of gold deposits in this area.

Key words: gold deposit; genetic type of ore deposit; metallogenic regularity; West Africa; mineral exploration engineering

收稿日期:2021-01-05;修订日期:2021-12-10

资助项目:中国地质调查局项目《几内亚-科特迪瓦莱奥地盾铁锰铝资源调查》(编号:DD20201153)和《北部非洲大型铜金资源基地评价》(编号:DD20190443)

作者简介:姜军胜(1991-),男,博士,工程师,从事地质矿产及矿床地球化学研究工作。E-mail:850044300@qq.com

*通信作者:胡鹏(1984-),男,硕士,高级工程师,从事境外地质矿产调查与研究工作。E-mail:157521303@qq.com

西非地区蕴含大量的矿产资源,尤以金、铁、铝土矿、金刚石等最著名^[1-6]。其中,金矿作为经济属性最强的战略矿种,在全球矿业市场交易中占据份额最大;而西非各国为了发展矿业经济,也把金矿作为吸引外资投资的重要手段。历史上,西非为东部的阿拉伯国家贡献了大量的金矿,是全球重要的产金地之一。近年,伴随一系列超大型全球级金矿床在西非的发现^[7],国际矿业公司纷纷投资西非金矿。根据标普 2021 年 1 月份公布的勘查数据,西非所有勘探活动中,70% 以上为金矿;由于目前南非开发程度很高^[7],全球金矿巨头纷纷将目光移向西非黄金海岸。2017 年以来,西非金产量之和已分别超过南非和西澳 Yilgarn 克拉通的金产量^[7]。因此,西非未来必将成为全球金矿投资的热点区域。

西非金矿作为全球最大的金成矿省之一,也是全球最大的古元古代金矿产出区,蕴含超过 10 000 t 的金矿资源量^[8]。西非金矿分布范围跨越整个克拉通及其西部边缘的泛非活动带,空间上主体以西非克拉通的莱奥地盾最发育,涉及加纳、马里、布基纳法索、几内亚、科特迪瓦等国家。金矿床呈丛聚性集中分布的特征,著名的矿床有加纳奥布阿西 (Obuasi)、马里萨迪奥拉 (Sadiola)、加纳阿哈福 (Ahafo)、布基纳法索马纳 (Mana)、几内亚锡吉里 (锡吉里)、科特迪瓦同戈 (Tongon) 等金矿床。本文在总结西非金矿成矿地质背景及地质特征的基础上,初步总结了该区金矿资源时空分布规律,为该区的进一步地质找矿工作和投资选区提供重要依据。

1 区域地质背景

西非金矿主体位于非洲西北部地区。大地构造上跨越西非克拉通及其边部的泛非活动带 (图 1)。特殊的地质构造演化历史造就了其具有全球独一无二的地质景观^[10]。

西非克拉通主要包括南部的马恩-莱奥地盾和北部的雷圭巴特地盾及中部小面积出露的凯涅巴、卡伊斯构造窗等老地层,围绕雷圭巴特和马恩-莱奥地盾还分布了 3 个新元古代-新生代沉积盆地,呈不整合覆盖于古老克拉通之上,包括雷圭巴特地盾北部的廷杜夫古生代盆地、中部陶德尼新元古代-古生代盆地及东南部的沃尔特新元古代-古生代盆地。其中,①马恩-莱奥地盾,西部主要为太古宙马恩地盾,主要由花岗岩、混合岩、片麻岩等组成的基底及

上覆绿岩和变质沉积岩组成的表壳岩类构成。东部为古元古代的莱奥地盾,主要发育一套比里姆岩系的变火山-沉积岩系列,其中形成于 2.3~2.0 Ga 的比里姆绿岩带代表了幼年期增生地体系列,为重要的含金、锰岩层。古元古代末期 (约 2.1 Ga) 发生了埃布尼 (Eburnean) 运动^[11-12],是形成造山型金矿的重要动力。②雷圭巴特地盾与马恩-莱奥地盾相似,太古宙的混合岩、片麻岩、含铁石英岩建造等主要分布在其西部,中东部主要为古元古代-中元古代的火山-沉积变质岩石^[13-14]。③凯涅巴和卡伊构造窗出露于陶德尼盆地西南部边缘,主要发育大面积古元古代变火山沉积岩及少量的深成岩体^[15]。④陶德尼盆地位于西非克拉通的中心部位,出露一套新元古代-古生代早期的沉积物。⑤廷杜夫盆地是在志留纪之后形成的一个非常大的盆地,主要出露寒武系-石炭系。⑥沃尔特盆地是缓倾斜的向斜盆地,最古老的沉积物出露于盆地边缘,年轻的沉积物主要位于盆地中央。此外,西非克拉通西部边缘发育罗克列德 (Rokelide) 和毛里塔尼亚构造剪切带 (Mauritanides)^[16],其中,罗克列德剪切带自利比里亚中部向北一直延伸至毛里塔尼亚境内,随后与北部的毛里塔尼亚剪切带相连,两者主要为一套新元古代泛非期的火山-沉积岩组合,部分金矿产于其中。

2 西非金矿资源分布特征

据美国地质调查局 (USGS) “Mineral Commodity Summaries 2020” 官方数据披露,全球金矿储量可达 50 000 t,集中分布于澳大利亚 (20.0%)、俄罗斯 (10.6%)、南非 (6.4%)、美国 (6.0%)、印度尼西亚 (5.2%) 和中国 (4.0%)。近年,由于黄金的避险功能,地缘政治冲突、局部战争等突发事件导致金价的短期波动。因此,未来一段时间内,市场对金矿需求仍保持旺盛。

2.1 矿产地分布及资源占比

根据标普 (SNL) 2021 年最新数据,并对比美国地质调查局 2020 年全球矿产资源储量报告和西非各国地矿部门公布的数据,发现三者差别不大。因此,关于西非克拉通金矿的数据资料采用 SNL 公布的结果。目前,西非克拉通已发现的金矿床 (点) 达 722 余处 (表 1),分布于西非 9 个国家,其中加纳、马里、布基纳法索、科特迪瓦、几内亚、塞内加尔等

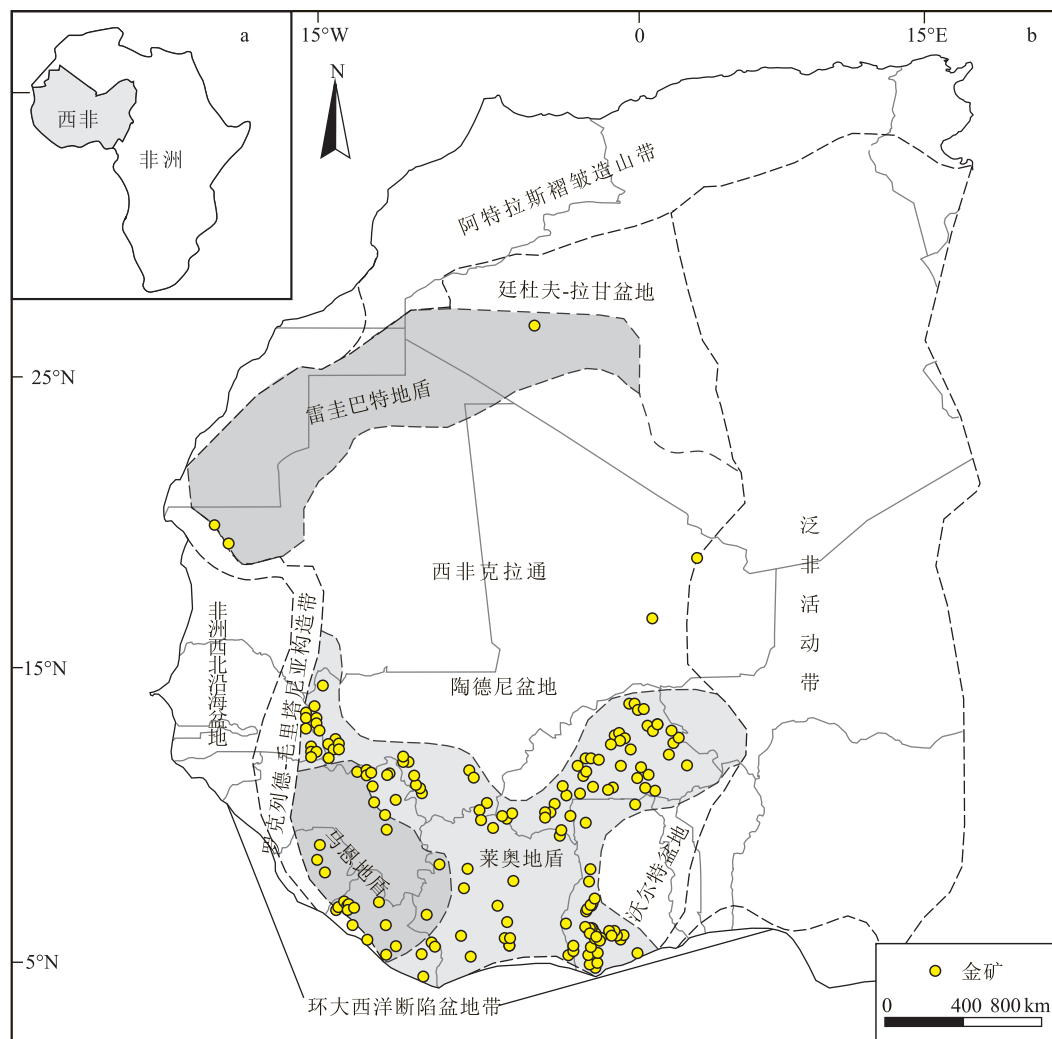
图 1 西非大地构造简图^[9]

Fig. 1 Tectonic map of West Africa

国的金矿床(点)数量和储量占绝对优势;就大地构造而言,以西非克拉通莱奥地盾和凯涅巴地区为主。按照已经探明的金矿储量分析,西非克拉通金矿储量可达 3573.6 t,全球(全球储量数据按照美国地质调查局公布的 50 000 t)占比 7.1%;在金矿储量全球排名前 15 个国家中,加纳(13 位)、马里(14 位)及布基纳法索(15 位)位居其中。就资源量而言,西非克拉通的金矿资源量(含储量)可达 10 607.6 t,全球(全球金矿资源量按照 SNL 数据的 139 000 t)占比 7.6%。然而,相比全球其他地区,西非地区的勘探程度极低,未来该数据还有极大的增长空间。

2.2 金矿资源特征

(1) 矿床类型多样,主体比较突出

西非金矿类型主要包括造山型、砾岩型、砂卡

岩型、斑岩型、IOCG 型等^[17]。其中,造山型金矿占绝对优势,其次是砾岩型,其他类型零星发育。尽管西非金矿类型较多,找矿地质条件较优越,但至今还未发现乌兹别克斯坦的穆龙套型^[18],美国的霍姆斯塔克和卡林型^[19],加拿大的霍姆洛型^[20]及日本与巴布亚新几内亚的火山岩型^[21]等超大型的金矿类型。

(2) 资源分布广泛,储量相对集中

西非金矿分布十分广泛,几乎每个国家都有金矿发育。目前,已探明的储量可达 3573.6 t,资源量为 10 606.1 t。但是,从金矿分布集中程度讲,以加纳、马里、布基纳法索三国最集中(图 2-a),已发现的矿床数目达 485 个(SNL 2021 数据),占西非总金矿床数目的 67.1%。同样,3 个产金国无论是探明的储量(2652 t),还是资源量(7910.5 t),在西非都

占据主要地位(储量占 74.2%,资源量占 74.6%)。其他重要产金国,如塞内加尔和毛里塔尼亚两国探明的金矿储量分别为 226.5 t 和 217.4 t,在西非也占据重要地位。值得注意的是,科特迪瓦和几内亚探明的金矿储量虽然一般(217.4 t 和 172.8 t),但是,近年随着金矿床(点)的数目逐渐增多(科特迪瓦 76 个;几内亚 45 个),资源量达 1462.4 t,成为国际矿业巨头纷纷关注的热点地方。

(3) 大型、超大型矿床数量较少,品位不等

由于西非整体勘探程度极低,西非大型、超大型矿床数量共计 43 个(金矿规模标准按照《矿产资源储量规模划分标准》(国土资发[2000]133 号)),占已发现矿床数量(723 个)的 5.95%;但是相比已发现矿床且有储量的矿床(62 个),其占比较高,可达 67.8%。著名的超大型矿床包括加纳阿哈福(Ahafo,储量约 300 t,资源量达 475.9 t)和马里鲁卢

金矿(Loulo,储量 245.8 t,资源量 403.7 t)等。西非金矿品位介于 0.5~12.2 g/t 之间,多数品位为 1.0~3.0 g/t(图 2-b)。

3 西非金矿主要成因类型

金矿的分类方案一直是研究的热点和难点,主要是由于金矿具有特殊的地质地球化学特征且在各类地质体中均有分布。根据不同的成矿大地构造环境和成矿作用^[22]、成矿温度、成矿物质来源^[23]、矿体形态特征、含矿建造^[24]、构造环境^[25]等因素,金矿的分类方法也不同。随着研究的不断深入,金矿的分类方式逐渐丰富,但没有统一的分类方案。既有基于形成构造背景的造山型金矿^[26~30],也有基于矿床成因的斑岩型^[31]、浅成低温热液型^[32]及矽卡岩型金矿^[33],还包括卡林型^[19]、砾岩型^[34]、砂岩型^[35]、IOCG 型^[36]、侵入岩型^[37]、红土型等。

表 1 西非金矿资源特征
Table 1 The characteristics of gold resources in West Africa

国家	加纳	马里	布基纳法索	塞内加尔	科特迪瓦	几内亚	塞拉利昂	毛里塔尼亚	利比里亚
储量/t	1303	728.8	620.6	226.5	217.4	172.8	37.6	217.4	49.5
资源量/t	3885	1735	2290.5	404	853	609.4	245.6	344	239.6
矿床数量/个	158	142	184	36	76	45	23	23	35
大型(>20 t)	12	7	11	4	3	3	1	1	1
超大型(>100 t)	4	4	1	0	1	0	0	1	0
品位变化/(g·t ⁻¹)	0.9~9.1	0.8~4.4	0.8~12.2	1.3~5.7	0.9~2.6	0.5~3.1	1.6~4.4	0.6~1.9	1.5~2.6

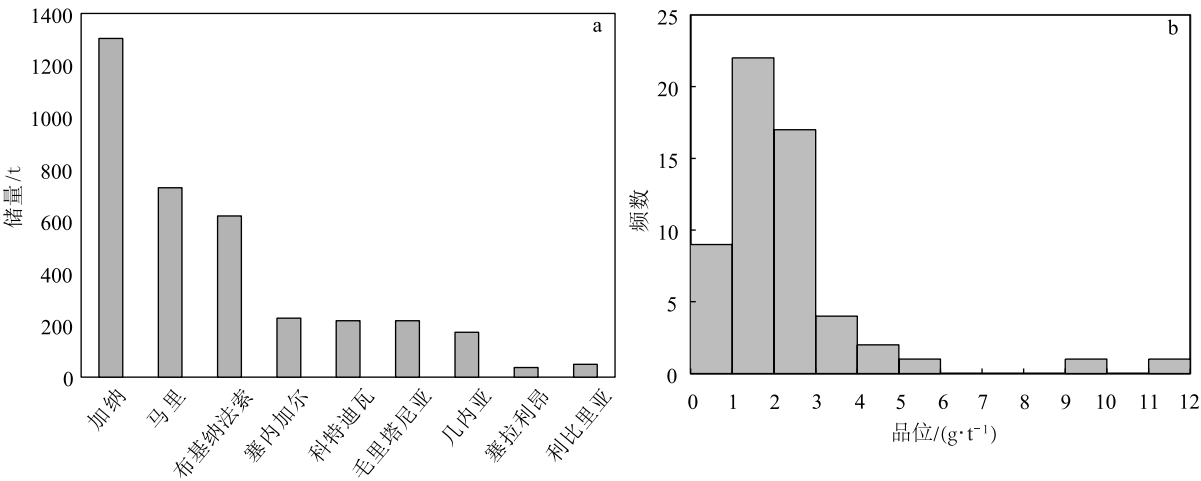


图 2 西非产金国资源储量分布情况(a)和金矿石品位直方图(b)

Fig. 2 The resource and reserves of the main gold producing countries(a) and the histogram of gold grade(b) in West Africa

3.1 金矿主要类型

西非地区主要的金矿类型为造山型(数量占整个西非金矿类型的 80% 以上)、砾岩型、砂卡岩型、IOCG 型、侵入岩(斑岩)型和冲积型。西非出现了一些类侵入岩型金矿,主要为埃布尼造山运动期间大量花岗质岩石在陆内火山弧背景下形成,如马里的 Morila 矿床^[37]。通常情况下,侵入岩或斑岩型金矿的岩浆系统多具还原性质,研究表明西非侵入岩型金矿的岩浆系统并非如此,因此 Goldfarb 等^[17]认为其应该属于造山型金矿,只是成矿流体具有岩浆流体来源的特征。而 Mignot 等^[38]对早期认为是斑岩型矿床的 Gaoua 铜金矿床开展了系统的岩相学和矿物学研究,认为其是造山型金矿叠加斑岩型铜矿。因此,本文将其列入造山型金矿来讨论。

3.1.1 造山型金矿

造山型金矿主要指形成于汇聚板块边缘的变质地体内,时空分布及成因上与增生造山或碰撞造山作用密切相关,且通常受到韧-脆性断裂控制的脉型或浸染型金矿床。该类型矿床贡献了全球超过 1/3 的金矿储量,是全球金矿勘查的重要类型^[30]。尽管在物质来源、流体演化等方面存在一定争论,但是普遍认为造山型金矿具有以下特征:①主体形成于增生造山的板内环境,在俯冲增生带、活动大陆边缘、弧后盆地、克拉通边缘造山带等构造环境内也均有发现^[39-41]。②成矿时代一般略滞后于造山作用峰期变质阶段(或近于同时)^[42-44]。③矿体受构造控制作用明显,呈似层状、脉状产出,多产于脆-韧性断裂的石英脉或蚀变岩中,如剪切带张性或压性衔接部位及剪切带派生的次级构造裂隙、断裂弯曲转折端、褶皱转折端和层间滑脱带,或花岗质侵入体与其他岩性的接触部位等,矿石矿物以贫硫化物(黄铁矿、磁黄铁矿、毒砂等)为特征。④造山型金矿一般产于低变质绿片岩相中,蚀变矿物以云母、石英、绿泥石、黄铁矿和碳酸盐为主;部分产于深成的角闪岩相-麻粒岩相中,蚀变矿物为石榴子石-黑云母-角闪石-黄铁矿-磁黄铁矿等^[45]。⑤成矿流体以变质流体为主,少量为地幔流体、岩浆热液流体、大气降水等。流体具有中低盐度($\leq 6\%$)、富水含碳等特征($\text{CO}_2 + \text{CH}_4$ 含量为 $5.0\% \sim 30\%$);矿化剂硫可能来自深源岩浆或围岩地层^[46-48]。⑥成矿模式可分为地壳连续成矿模式和变质脱硫体成矿模式,金沉淀机制可能为相分离或

者围岩的硫化作用^[49-51]。⑦在化学元素组合方面,金矿床多具有 Au-As-Te-Sb-Hg 强烈富集的特征,成矿元素在垂直方向上显示,浅成为 Hg、Hg-Sb 富集,中成为 Au-Sb-As-Te 富集的特征^[52-54]。

在西非克拉通内,造山型金矿为最主要类型,其金属资源量超过了 10 000 t,主体分布于古元古代莱奥地盾内,以形成于 2.3~2.0 Ga 的比里姆岩系绿岩带中最发育,代表了幼年期增生地体系列。其主要分布于加纳、布基纳法索、马里、塞内加尔、科特迪瓦、几内亚等国家。多数造山型金矿在埃布尼造山期形成,但加纳、布基纳法索和马里的许多造山型金矿形成于埃布尼造山运动之前的 Tangaan 构造运动时期。然而马恩地盾绿岩带内,仅在利比里亚(如利比里亚 New Liberty 和 Ndablama 金矿)发现了金矿床,规模和数量较东部相邻的莱奥地盾世界级金矿集区小。但是不排除马恩太古宙绿岩带具有形成造山型金矿的可能,此处造山型金矿的形成可能与利比里亚 2900~2600 Ma 的造山运动有关^[55]。由于雷圭巴特地盾中大面积的绿岩带被覆盖,因而该区的造山型金矿出露较少。然而,该地盾中新发现的塔斯特造山型金矿佐证了该区具有发现造山型金矿的潜力,热液锆石显示该矿床形成于 2839 ± 36 Ma^[56]。此外,在西非克拉通边缘的泛非活动带(毛里塔尼亚带和达荷美带)中也发育少量的造山型金矿。

3.1.2 砾岩型金矿

砾岩型金矿主要赋存于古沉积盆地的砾岩、相关的粗碎屑岩层序中,均产在与基底岩系或下伏地层不整合面之上,属湖盆边缘河流入口处河流相冲积扇或三角洲沉积相。其主要形成于山间盆地、山前盆地、断陷盆地等构造环境,受同期构造运动控制。砾岩型金矿的物源主要为古老的含金基底岩系或地层,后期经历长期风化剥蚀物质再堆积,也可能经历了长期或多次的流体改造作用形成。砾岩型金矿是重要的金矿类型,在全球黄金开采史上有着举足轻重的地位,目前砾岩型金矿以南非兰德型金铀矿为代表^[25-26],是全球各类金矿中储量和产量最大的矿床。此外,在西非克拉通内,砾岩型金矿也是一种重要的矿床类型,其规模和数量仅次于造山型金矿,尤以加纳为代表。加纳的砾岩型金矿主要产于塔克瓦群 Banket 岩系中,其主要由石英岩、砾岩及变砾岩等构成,在科特迪瓦属于 Kinkene

序列,Banket 砾岩成分主要为石英、赤铁矿、磁铁矿等。目前,Banket 岩系中被开采利用的主要是富赤铁矿砾岩,其形成于 2107~2102 Ma^[57],典型矿床如加纳塔克瓦金矿(约 292 t)和 Iduapriem 金矿(约 187 t)及布基纳法索尤噶金矿(约 54 t)。

3.1.3 其他类型金矿

相较上述 2 种类型矿床,矽卡岩型、IOCG 型及冲积砂型金矿数量较少。其中,科特迪瓦伊蒂(ITy)金矿作为矽卡岩型金矿的代表^[58],位于科特迪瓦西北部地区。矿体自上而下可分为:红土层、风化层及原生的矽卡岩矿体。原生的金矿脉主要赋存于古元古代花岗质岩石(花岗闪长岩和英云闪长岩,U-Pb 年龄为 2104 Ma^[59])和比里姆群下层灰岩之间的矽卡岩接触带,金矿主要与黄铜矿、斑铜矿等共生,品位较低。目前开采的金矿主要集中于红土层和风化层中的高品位金矿。IOCG 型矿床,主要分布于毛里塔尼亚北部 Akjoujt 地区,以 Guelb Moghrein 矿床为例。该矿床隶属于罗克列德-毛里塔尼亚构造带,空间上位于逆冲推覆构造带下盘,矿床展布严格受矿区发育的大型剪切带控制。矿石矿物主要有磁铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、石墨、砷黄铁矿、钴铁矿、铀矿、铋金银矿物等。Meyer 等^[60]对与矿共生的 2 期独居石和磷钇矿开展了高精度 U-Pb 定年,认为 IOCG 矿体主要由新太古代(2492±9 Ma)和中元古代(1742±12 Ma)热液活化绿岩地体中的成矿物质形成。此外,还受到中生代(约 300 Ma)冈瓦纳大陆的聚合碰撞期热液活动的影响。西非的冲积型金矿广泛存在,主要分布于河流的砾石层中,以小矿点形式产出,当地居民可手工淘砂金。冲积型金矿的成矿物质源区是原生金矿化^[8]。

3.2 典型矿床——奥布阿西(Obuasi)造山型金矿

选择西非具有代表性的奥布阿西造山型金矿进行矿床地质特征及成矿作用研究。奥布阿西金矿储量+资源量为 965.9 t,在全球所有已发现的金矿中排名第 27,在非洲所有已发现的金矿中排名第 8(前 7 名均在南非),是西非金矿的杰出代表。奥布阿西金矿位于西非加纳中部 kumas 盆地内,大地构造隶属于西非克拉通莱奥地盾。其开采历史悠久,自 15 世纪便有手工开采,目前为非洲盎格鲁资源公司持有且正在开采中。矿区内发育 3 个主要矿段,矿化类型为含金硫化物型和自然金型 2 种,关于其成矿模型目前存在 2 种争论,但均表现出与埃布

尼造山运动密切相关,为典型的造山型金矿。

3.2.1 矿区地质特征

奥布阿西金矿位于 Kumasi 群(2157~2125 Ma)火山-沉积盆地与阿散蒂绿岩带的接触带部位(图 3)。Kumasi 群主要由炭质千枚岩、杂砂岩、板岩、砂屑岩、火山-沉积岩等组成。由于受变质作用的影响,多数矿体赋存于 Kumasi 群变沉积岩中。矿区东部紧邻阿散蒂绿岩带,其成分与赛夫维(Sefvi)群火山岩相似,主要为一套镁铁质火山及火山碎屑岩(2187~2158 Ma)。区内发育少量侵入岩,主要为花岗岩及辉绿岩脉,其中花岗岩作为赋矿岩体出现,辉绿岩脉则与矿化无关,穿插矿体。奥布阿西金矿位于阿散蒂(Ashanti)和 Akropong 逆冲断层交界处,空间展布上与南西—北东向的阿散蒂断裂密切相关。由于后期受到多期次构造运动的影响,矿区内发育了大量的紧闭褶皱、劈理等构造^[61]。

矿区内发育 3 个主要的矿段:产于 Binsere 剪切带中的 Anyankyerem 矿段、产于 Gyabunsu 剪切带中的 Sibi 矿段及产于主剪切带中的 Obuasi 矿段。矿体在空间上主要呈北东—南西向展布,与区域主要的构造格局展布一致,倾向北西。该矿床沿走向可达 8 km,深度可达 1.6 km(下部仍在勘探)。矿体主要赋存于富含石墨的走滑剪切带中的 F3_{Ob}褶皱转折端或富含石墨的走滑剪切带与 S3_{Ob}劈理面的交界处,少量赋存于富含石墨的走滑剪切带次级断裂中或变火山岩与千枚岩的层间接触带。矿区内主要存在 2 种类型矿化:①含金硫化物型。硫化物主要包括毒砂、黄铁矿、磁黄铁矿,呈浸染状赋存于变质沉积岩中。其中,含金硫化物以毒砂为主(60%~95%),金主要赋存于毒砂的晶格内或裂隙之间。②自然金类型。金主要赋存于石英脉中,石英脉宽度可达 4 m,整体倾向西,与含石墨的剪切带界线分明。石英脉中除石英外,还存在少量铁白云石和围岩碎块。在石英微裂隙中,白云母、石墨、方铅矿、黄铜矿、闪锌矿等常与自然金伴生。奥布阿西金矿平均品位较高,其中 Anyankyerem 和 Sibi 矿段平均品位分别为 2.4 g/t 和 3.9 g/t,奥布阿西矿段品位较高,平均品位达 5.3 g/t^[61]。

3.2.2 成矿作用

奥布阿西金矿主要存在 2 种金矿成矿模型:①第一种模型主要基于矿物学、矿石组构等特征,强调了硫化物矿石早于石英脉型矿石形成^[62],这 2 种矿石主

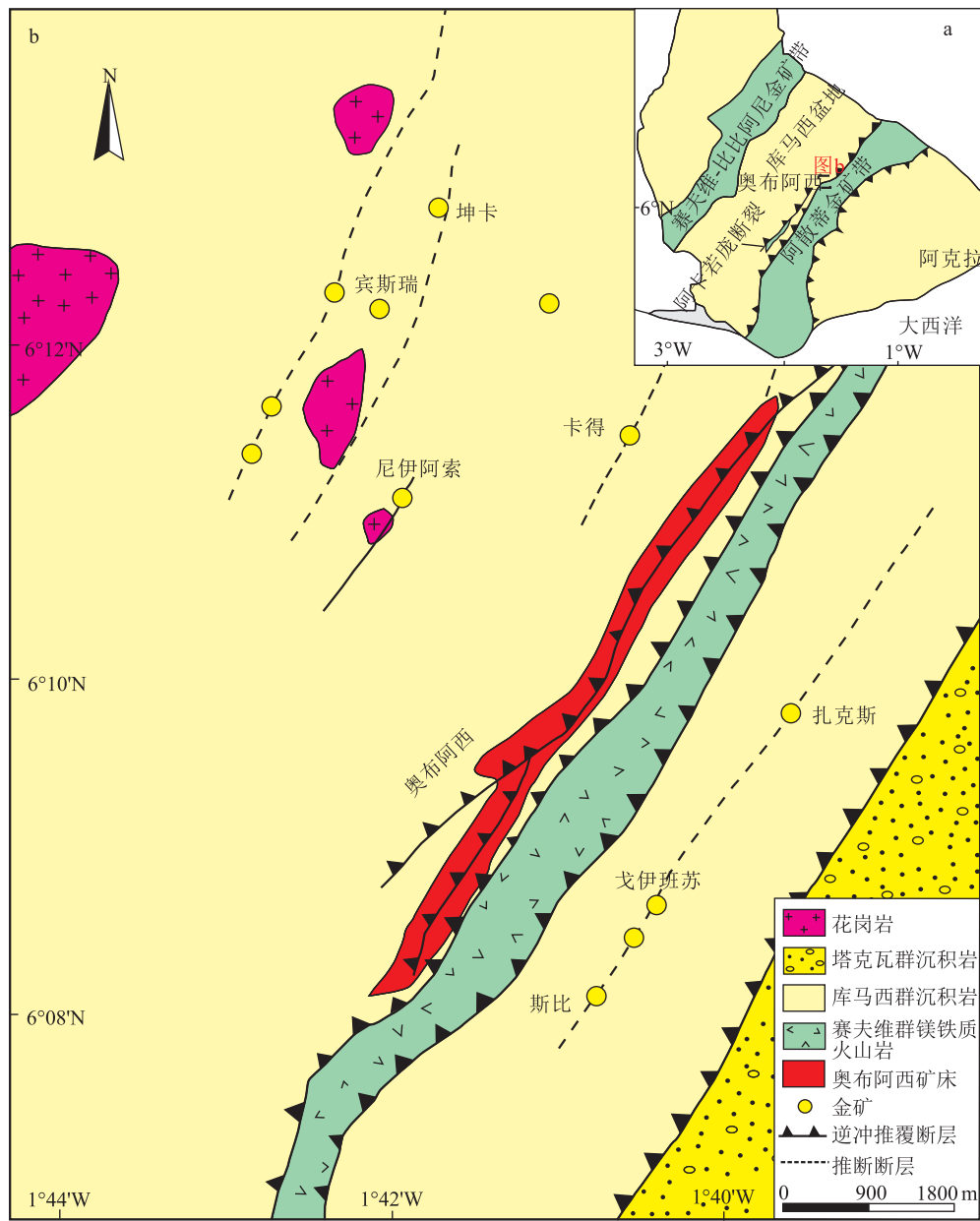


图 3 奥布阿西金矿地质简图(据参考文献[61]修改)
Fig. 3 Geological map of the Obuassi gold deposit

要是在从韧性变形体系到脆性变形体系的转变过程中逐渐形成。②第二种模型认为晚阶段左行走滑作用控制了金矿的形成^[63]。Fougrouse 等^[22]结合系统的野外构造填图及毒砂矿物压力影等变形特征,认为早期为含金硫化物的形成阶段,受到北东—南西方向的挤压作用控制;其后,北北东—南南西向的挤压作用使毒砂发生进一步变形,自然金从中萃取,在石英脉中沉淀下来。以上研究证实至少存在 2 期成矿作用。此外,热液金红石年龄表明早期金

矿形成于 2098 ± 7 Ma,代表了埃布尼造山作用走滑挤压阶段,也佐证了奥布阿西金矿属于典型的造山型金矿。

4 西非金矿时空分布规律

4.1 时间分布规律

西非金矿形成时间具有广泛分布、高度集中的特点,且不同类型的矿床时间分布上具有不同的特征,归根结底与其形成的地质背景有密切关系。

(1)中太古代利比里亚造山运动(2.9~2.8 Ga)相关的金成矿作用

西非克拉通太古宙早期,主要形成了一套典型的结晶基底片麻岩系列和上覆不整合接触的表壳岩(主体为变火山岩和沉积岩系列)。在2.9~2.8 Ga,西非地区发生了利比里亚(Liberean)造山运动,此次造山热事件的发生,使表壳岩序列发生了变形和变质作用及基底岩浆活化事件,形成了一套绿岩带建造,变质程度为低绿片相—角闪岩相^[10]。此次造山运动形成的绿岩带中,除发育大量的BIF型铁矿外,还形成一系列的造山型金矿,主体产于马恩地盾和雷圭巴特地盾西部^[8]。此外,在雷圭巴特地盾周边还形成少量与构造热液事件密切相关的IOCG型矿床^[60]。

(2)古元古代埃布尼造山运动(2.2~2.0Ga)相关的金成矿作用

古元古代,在莱奥地盾区,莱奥地盾广泛发育了一套与埃布尼造山运动(2.2~2.0 Ga)密切相关的比里姆群火山—沉积岩系列、代表前陆盆地的塔克瓦群砂砾岩及伴随的大量花岗质岩浆作用。其中,比里姆岩系中的绿岩带是造山型金矿的重要含矿层位,加纳、马里、布基纳法索等西非主要产金国的金矿多数与此有关^[8]。由于埃布尼造山运动过程中形成大量花岗岩系列,与周边比里姆岩中的碳酸盐地层发生接触交代作用,形成一系列的矽卡岩型金矿^[58]。此外,还发育少量与侵入体(斑岩)相关的金矿,但随着研究的深入,更多学者^[17, 38]将其归为造山型金矿。而在塔克瓦群砂砾岩中,发育砾岩型金矿,其物质来源可能与底部的基底岩石有关。

(3)与中—新生代风化淋滤和沉积作用相关的金成矿作用

中新生代以来,西非广大地区受温暖潮湿气候的影响,原来的含金基岩发生风化作用。在原地受雨水冲刷作用影响,形成冲积型砂金矿。该类型金矿广泛分布于河流及低洼地区,规模较小,以民采为主。

4.2 空间分布规律

西非金矿空间分布广泛,具有明显的丛聚性分布特征,主要集中分布于西非克拉通内的莱奥地盾区,其他地区零星出露。按照成矿地质条件、空间展布特征等因素,将西非金矿划分成23个主要的IV级成矿亚带(图4)。

(1)凯古杜金矿亚带(IV-1):该带主要位于凯古杜构造窗,主体位于塞内加尔和马里接壤位置,区内发育大面积的比里姆变质火山岩,后期的侵入岩穿插其中,岩性主要包括发生变质的玄武岩、安山岩、英安岩,少量流纹岩及伴生的火山沉积岩系列,该带内发育2条明显的北北东向走滑剪切构造,控制了金矿的产出^[15]。矿床类型以造山型金矿为主,著名的矿床为马里的超大型萨迪奥拉(Sadiola)金矿(241 t)、塞内加尔的萨博达拉(Sabodala)金矿(146 t)、马萨瓦(Massawa)金矿(113 t)等。

(2)凯涅巴金矿亚带(IV-2):该带同样横跨了马里和塞内加尔,位于凯古杜带东侧,均属于凯古杜—凯内马构造窗,该带岩性发生了变化,以沉积岩(灰岩、白云质大理岩、砂岩、片岩和泥灰岩)及中酸性岩浆岩系列为主,由于存在近南北向的走滑断裂,发生了一定的变质作用^[15],矿床类型以造山型为主,伴有少量的矽卡岩型。著名的矿床有马里的鲁卢(Luolo)金矿(404 t)、费科拉(Fekola)金矿(221 t)等。

(3)锡吉里金矿亚带(IV-3):该带主体位于几内亚东北部,靠近马里位置,发育大量的古元古代比里姆群绿岩带,矿床类型以造山型金矿为主,伴有少量的砂矿。典型矿床包括锡吉里(Siguiri)金矿(291 t)、列法(Lefa)金矿(135 t)、特瑞克(Tirik)金矿(61.6 t)。

(4)科巴达(Kobada)—卡纳拉(Kalana)金矿亚带(IV-4):该带位于马里西南部,与几内亚接壤。由于受后期埃布尼造山运动(Eburnean)(2.0~1.8 Ga)的影响,发育大量的比里姆岩系及伴随的花岗岩,呈狭长条带状展布,发育一套浅变质的绿片岩相组合,金矿勘探大都集中于古元古代比里姆绿片岩相变质的火山沉积岩建造(绿岩带)中。金矿床类型以造山型、冲积砂矿型等为主,典型矿床包括卡纳拉(Kalana)金矿(109.5 t)、科巴达(Kobada)金矿(72.5 t)、科迪尔郎(Kodieran)金矿(52.4 t)等。

(5)莫里拉(Morila)—萨亚玛(Syama)金矿亚带(IV-5):该带位于马里东南部,与布基纳法索、科特迪瓦接壤,发育大面积的古元古代比里姆群变质火山—沉积岩,以发育典型的绿岩带为特征。目前,该带发育的矿床类型以造山型、冲积砂型金矿为主,典型矿床包括萨亚玛(Syama)金矿(257 t)、塔巴卡日拉(Tabakarole)金矿(18.5 t)、法土(Fatou)金矿

(19 t)和莫里拉(Morila)金矿(6.8 t)。

(6)瓦格尼翁(Wahgnion)-塞积拉(Seguela)金矿亚带(Ⅳ-6):该带主要位于科特迪瓦北部地区,跨越了布基纳法索西南部地区。区域上受埃布尼造山运动作用的影响,发育一系列北北东向构造,以及大面积的比里姆岩群变火山沉积岩及伴生花岗岩。主要发育造山型和矽卡岩型金矿。典型的矿床有瓦格尼翁(Wahgnion)金矿(81.2 t)、唐格(Tangon)金矿(77.8 t)、塞积拉(Seguela)金矿(32.3 t)等。

(7)博利(Bouly)-多罗波(Doropo)金矿亚带(Ⅳ-7):该带主体位于布基纳法索中西部,呈近北东向展布,向南跨越了科特迪瓦部分地区,向东跨越了加纳部分地区,分布面积较大。区内主要出露大面积的古元古代比里姆群变火山-沉积岩建造(绿岩带)及伴生的侵入岩,发育多条近北东向的走滑断裂。矿床类型以造山型为主,与古元古代埃布尼造山运动期后的走滑伸展密切相关,另见少量矽卡岩型、冲积砂矿型金矿。该带发育多处超大型金矿,是近年西非除加纳外的另一个找矿热点区域,著名的矿床有布基纳法索的宏德(Houde)金矿(153 t)、马纳(Mana)金矿(152.6 t)、博利(Bouly)金矿(148.1 t)、加瓦(Gaoua)金矿(105.3 t)、科特迪瓦的多罗波(Doropo)金矿(108.2 t)和巴蒂Batie west金矿(101.2 t),以及加纳的乌阿-劳拉(Wa-Lawra)金矿(86.1 t)等。

(8)伊纳塔(Inata)-塔帕口(Taparko)金矿亚带(Ⅳ-8):该带位于布基纳法索东北部,区域构造线主要呈北北西向展布,为埃布尼造山运动期形成的一系列走滑伸展构造,发育大量的古元古代比里姆岩系及花岗岩,矿床类型以造山型为主,次为矽卡岩型。典型的矿床包括埃萨卡纳(Essakane)金矿(171.4 t)、伊纳塔金矿(137.2 t)和塔帕口金矿(34.9 t)。

(9)科瑞(kouri)-可阿卡(Kiaka)金矿亚带(Ⅳ-9):该带位于布基纳法索东北部,呈近北东向展布,与区域构造线展布方向一致。以发育古元古代比里姆岩群为主,伴随大量的花岗岩侵入。矿床类型以造山型金矿为主,次为矽卡岩型、冲积砂矿型。典型矿床如可阿卡金矿(195.3 t)、波姆波(Bombore)金矿(191.7 t)和科瑞金矿(43.5 t)。

(10)南迪尼(Namdini)-邦沟(Boungou)金矿

亚带(Ⅳ-10):该带跨越了布基纳法索南部和加纳东北部地区,主要为同一构造线控制,沿区域构造线发育一系列古元古代比里姆群变火山沉积岩系列,另外大量的花岗岩穿插其中。矿床类型以造山型金矿为主,与埃布尼造山运动密切相关。次要类型为矽卡岩型。著名的矿床有南迪尼(Namdini)金矿(217.4 t)、邦沟(Boungou)金矿(56.8 t)和尤噶(Youga)金矿(50.1 t)。

(11)博乐(Bole)-布亿(Bui)金矿亚带(Ⅳ-11):该带主要位于加纳中部地区,区域发育近南北向的走滑断裂,其控制了古元古代比里姆群变火山沉积岩和少量花岗岩,矿床主要产于比里姆绿岩带内,显示了与埃布尼造山运动密切相关。矿床以造山型金矿为主,区内发现的矿床规模较小,主要有廷噶(Tinga)金矿(7.3 t)、博乐(Bole)金矿(5 t)、布亿(Bui)金矿(4.4 t)等。

(12)赛夫维金矿亚带(Ⅳ-12):该带主要位于加纳西部,向西南一直延伸到科特迪瓦阿菲玛地区,主要呈北北东向展布,与区域构造线展布方向一致。矿床主要产于比里姆变火山沉积岩及花岗岩内或矽卡岩带内,矿床类型以造山型金矿为主,次为矽卡岩型、砾岩型、冲积砂矿型金矿床。作为加纳最主要的金矿带之一,该带矿床数量较多,规模较大,如阿哈弗(Ahafo)金矿(475.9 t)、阿散口(Asanko)金矿(120.1 t)、比比阿尼(Bibiani)金矿(77.8 t)、阿菲玛(Afema)金矿(61.9 t)等。

(13)阿散蒂金矿亚带(Ⅳ-13):作为加纳最著名的金矿带,金矿数量众多,规模巨大。该带主要呈北北东-北东向展布,与区域构造线方向一致。主要发育于与埃布尼造山运动密切相关的比里姆火山沉积岩及上覆不整合的塔克瓦群。塔克瓦群主要为一套以磨拉石建造为主的砂砾岩。该区矿床类型多样,但以造山型金矿为主,次为砾岩型金矿(塔克瓦砾岩型金矿),其他矽卡岩型、冲积砂矿型金矿也有发育,规模较小。著名的矿床有奥布阿西(Obuasi)金矿(965.9 t)、瓦萨(Wassa)金矿(348.8 t)、塔克瓦(Tarkwa)金矿(339.4 t)、伊杜阿普瑞姆(Iduapriem)金矿(192.2 t)、达芒(Damang)金矿(184.1 t)、阿克耶姆(Akyem)金矿(110.4 t)等。

(14)耀丽(Yaoure)-波尼克瑞(Bonikro)金矿亚带(Ⅳ-14):该带位于科特迪瓦中部地区,主要为古元古代比里姆岩和大量发育的花岗岩类,由于

受到埃布尼造山运动的影响,该带发育一系列的北东向构造。发育一系列与造山运动相关的金矿床,其次发育少量砂卡岩型金矿等。较著名的矿床包括耀丽(Yaoure)金矿(116.8 t)、波尼克瑞(Bonikro)金矿(37.3 t)、阿格保(Agbaou)金矿(17.3 t)等。

(15)阿布贾(Abujar)-图普(Topo)金矿亚带(IV-15):该带位于科特迪瓦西部,区域地层和主要构造线呈北东向展布,向西南方向一直延伸到利比里亚国家东部地区。主要发育一套比里姆群变质火山-沉积岩,其间有花岗岩侵入。此外,还出露太古宙高级片麻岩等。主要矿床类型为造山型,存在少量的冲积砂矿型金矿,为当地人手工开采的主要对象。典型矿床包括阿布贾金矿(近100 t)、图普金矿等。

(16)普图山(Puto Mount)-杜格贝(Dugbe)金矿亚带(IV-16):该带主要沿北东向展布,位于利比里亚东部地区,隶属莱奥地盾区。主要发育古元古代比里姆岩系中的变火山-沉积岩(绿岩带),由于受到埃布尼造山运动的影响,整体呈低绿片岩相-高角闪岩相变质。区内发育著名的杜贝(Dube)剪切带和朱亚松(Juazhon)剪切带,多数金矿产在两大剪切带周围。矿床类型以造山型金矿为主,次之可见大量的冲积砂矿型金矿,规模极小。典型矿床为杜格贝矿床,资源量达110 t。

(17)伊蒂(Ity)-赛斯托斯(Cestos)金矿亚带(IV-17):该带自科特迪瓦西部向西南一直延伸到利比里亚中北部地区,呈北东向展布。尽管大地构造隶属马恩地盾,但是区域以出露古元古代比里姆岩系为特征,且发育一条北东向的赛斯托斯(Cestos)剪切带,其为埃布尼造山过程中变形和重新活化作用的极限,代表了一种近乎直立的、地壳级别的大的构造带,具有与阿散蒂金矿相媲美的潜力,该带上发育了科巴蒙特(Koba Mnt)、伊尼斯(Innis)等金矿,向北东方向有伊蒂(Ity)金矿。矿床类型以造山型金矿为主,次为砂卡岩型、冲积砂矿型金矿。

(18)可可亚(Kokoya)金矿亚带(IV-18):该带主要位于利比里亚中部地区,大地构造隶属马恩地盾区,区域上发育太古宙浅色含黑云角闪花岗岩-石英闪长片麻岩、花岗片麻岩及上覆大量的变火山-沉积岩,构造以北东向剪切带和褶皱为主,矿床主要

产于太古宙绿岩带内,成矿物质来源可能与新太古代利比里亚构造热事件(约2800 Ma)中的花岗质岩浆作用相关。以造山型金矿为主,典型矿床为可可亚(Kokoya)金矿(15.5 t)。

(19)佐罗沃(Zolowo)-比山(Bea Mount)金矿亚带(IV-19):该带位于利比里亚西北部地区,发育大量的太古宙马恩地盾花岗-花岗闪长片麻岩、条带状铁建造、基性-超基性片岩带和热液蚀退变角闪岩等,向东延伸到几内亚西芒杜附近,与区域北东向构造线展布方向一致。矿床类型以造山型、冲积砂矿型金矿为主,典型矿床包括比山(Bea Mount)金矿(68.7 t)、恩达布拉马金矿(18.3 t)和韦朱金矿(5.6 t)。

(20)苏拉山-凯格瑞金矿亚带(IV-20):该带位于塞拉利昂中北部地区,出露太古宙马恩地盾的变质结晶基底及上覆第四系,其中结晶基底为中太古代混合花岗岩和新太古代早期碎屑岩变质岩和中基性岩浆岩、变质岩组成的一套绿岩带。区域以绿岩带内的造山型金矿为主,次为少量的冲积砂矿型金矿。典型矿床包括桑方(Sonfon)金矿(131.4 t)、堡马浑(Baomahun)金矿(86.5 t)等。

(21)塔斯阿斯特(Tasiast)-盖尔波莫格瑞恩(Guelb Moghrein)金矿亚带(IV-21):该带位于毛里塔尼亚西部地区,大地构造位于雷圭巴特地盾,临近毛里塔尼亚构造活动带,呈北西向展布。主要发育大面积的太古宙结晶片麻岩和上覆的变质沉积岩和镁铁质火山岩。矿床多产于属于太古宙绿岩带,矿床类型包括造山型、IOCG型。其中塔斯阿斯特金矿资源量为303.9 t,盖尔波莫格瑞恩金矿资源量为15.0 t。

(22)车嘎(Chegar)金矿亚带(IV-22):该带位于毛里塔尼亚南部地区,与塞内加尔接壤。区域上发育古元古代比里姆群变质火山-沉积岩、花岗岩及中生代沉积盆地内的砂岩、砾岩等。此外,由于受到泛非构造运动的改造,该区金矿绝大多数发生了一定的变质作用。矿床类型以造山型为主。典型矿床包括车嘎(Chegar)金矿、欧阿(Ouaoua)金矿等。

(23)曼丁勾山(Mandingo Hill)金矿亚带(IV-23):该带位于利比里亚沿海地区,主要呈北西西向展布,与泛非活动带-罗克列德-毛里塔尼亚构造带展布方向一致。区域发育一系列太古宙花岗片麻岩、

表 2 西非金矿成矿带划分及其特征
Table 2 Division of gold metallogenic belts in West Africa and their characteristics

成矿域 (Ⅰ级)	成矿省 (Ⅱ级)	成矿带 (Ⅲ级)	成矿亚带 (Ⅳ级)	矿床类型	代表性矿床
冈瓦纳	西非克拉通	莱奥地盾	凯古杜金矿亚带 (Ⅳ-1)	造山型	萨迪奥拉、萨博达拉、卡拉克纳、马萨瓦、迪巴金矿等
			凯涅巴金矿亚带 (Ⅳ-2)	造山型、砂卡岩型	鲁卢、塔巴科托、费科拉金矿
			锡吉里金矿亚带 (Ⅳ-3)	造山型、冲积砂矿型	列法、锡吉里、特瑞克金矿等
			科巴达-卡纳拉金矿亚带(Ⅳ-4)	造山型、冲积砂矿型	科巴达、卡纳拉、科迪尔郎金矿等
			莫里拉-萨亚玛金矿亚带(Ⅳ-5)	造山型、冲积砂矿型	莫里拉、萨亚玛金矿等
			瓦格尼翁-塞积拉金矿亚带(Ⅳ-6)	造山型、砂卡岩型	瓦格尼翁、塞积拉、唐格金矿等
			博利-多罗波金矿亚带 (Ⅳ-7)	造山型、砂卡岩型、冲积砂矿型	博利、马纳、宏德、加瓦、巴蒂、多罗波金矿等
			伊纳塔-塔帕口金矿亚带(Ⅳ-8)	造山型、砂卡岩型	伊纳塔、埃萨卡纳、塔帕口金矿等
			科瑞-可阿卡金矿亚带 (Ⅳ-9)	造山型、砂卡岩型、冲积砂矿型	科瑞、可阿卡、波姆波金矿等
			南迪尼-邦沟金矿亚带(Ⅳ-10)	造山型、砂卡岩型	南迪尼、尤噶、邦沟金矿等
			博乐-布亿金矿亚带(Ⅳ-11)	造山型金矿	博乐、廷噶、布亿金矿等
			赛夫维金矿亚带 (Ⅳ-12)	造山型、砂卡岩型、砾岩型、冲积砂矿型	阿哈弗、比比阿尼、阿散口、阿菲玛金矿等
			阿散蒂金矿亚带 (Ⅳ-13)	造山型、砂卡岩型、砾岩型、冲积砂矿型	奥布阿西、达芒、瓦萨、塔克瓦、伊杜阿普瑞姆、阿克耶姆金矿等
			耀丽-波尼克瑞金矿亚带(Ⅳ-14)	造山型、砂卡岩型	耀丽、波尼克瑞、阿格保金矿等
			阿布贾-图普金矿亚带(Ⅳ-15)	造山型、冲积砂矿型	阿布贾、图普金矿等
			普图山-杜格贝金矿亚带(Ⅳ-16)	造山型、冲积砂矿型	普图山、杜格贝金矿等
			伊蒂-赛斯托斯金矿亚带(Ⅳ-17)	造山型、砂卡岩型、冲积砂矿型	科巴蒙特、伊尼斯、伊蒂金矿
		马恩地盾	可可亚金矿亚带 (Ⅳ-18)	造山型	可可亚金矿
			佐罗沃-比山金矿亚带 (Ⅳ-19)	造山型、冲积砂矿型	比山、恩达布拉马、韦朱金矿等
			苏拉山-凯格瑞金矿亚带(Ⅳ-20)	造山型、冲积砂矿型	桑方、堡马浑金矿等
		雷圭巴特地盾	塔斯阿斯特-盖尔波莫格瑞恩金矿亚带(Ⅳ-21)	造山型、IOCG 型	塔斯阿斯特、盖尔波莫格瑞恩、提吉瑞特金矿等
	泛非活动带	罗克列德-毛里塔尼亚构造带	车嘎金矿亚带 (Ⅳ-22)	造山型	车嘎、欧阿金矿等
			曼丁勾山金矿带 (Ⅳ-23)	造山型、冲积砂矿型	金海岸、曼丁勾山金矿等

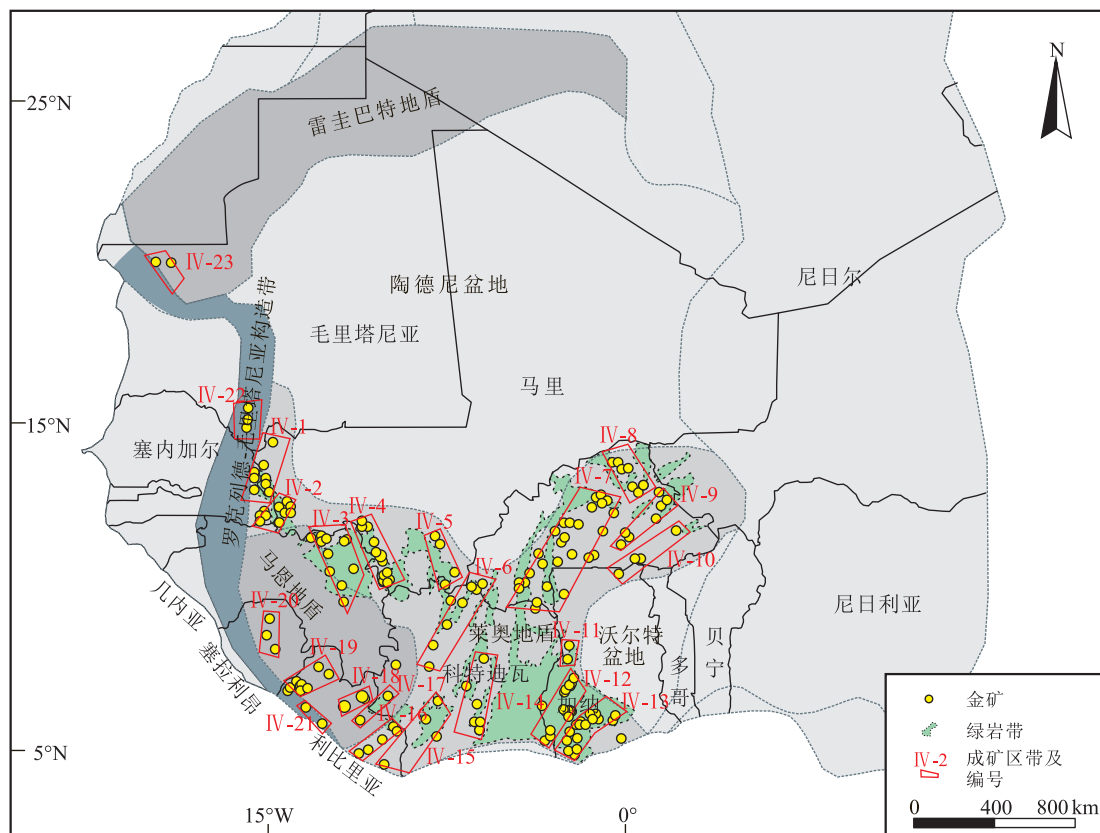


图4 西非金矿成矿带划分

Fig. 4 Division of gold metallogenic belt in West Africa

花岗-石英闪长片麻岩、绿岩带,以及晚期基性侵入岩等。目前由于研究程度较低,矿床是太古宙形成亦或是新元古代泛非期形成尚无定论^[8-9]。矿床类型以造山型为主,次为冲积砂矿型金矿,如金海岸(Gold Coast)金矿(44.5 t)、曼丁勾山(Mandingo Hill)等。

5 结 论

(1)西非金矿资源成矿地质条件优越,集中分布于加纳、马里、布基纳法索、科特迪瓦等国家,金矿资源量全球占比超过7%,储量和品位变化较大,但勘探程度较低。

(2)西非金矿成因类型可分为造山型(含与侵入体相关的金矿)、砾岩型、砂卡岩型、冲积砂矿型和IOCG型;以造山型金矿占绝对优势地位,规模巨大。冲积砂矿型金矿数量较多,但是规模很小。而砂卡岩型和IOCG型数量和规模相对有限。砾岩型金矿近年来找矿取得突破,未来值得关注。

(3)时间上,西非金矿主体形成于元古代埃布尼造山期(2.2~2.0 Ga),部分金矿形成于中太古代利比里亚造山期(2.9~2.8 Ga),中生代主要形成冲积砂矿型金矿。

(4)空间上,西非金矿广泛产出但十分集中,多数矿床产于西非克拉通莱奥地盾,少量产于马恩地盾和雷圭巴特地盾及克拉通西部的罗克列德-毛里塔尼亚构造带。按照空间分布特征,进一步划分了23个IV级成矿亚带。

致谢:感谢武汉地质调查中心境外室同事在本文写作过程中给予指导和帮助,感谢审稿专家提出的宝贵修改意见。

参考文献

- [1] 江思宏,张莉莉,刘翼飞,等.非洲大陆金矿分布特征与勘查建议[J].黄金科学技术,2020,28(4): 465-478.
- [2] 任军平,胡鹏,王杰,等.非洲矿业发展概况[J].地质学报,2021,95(4): 945-961.
- [3] 张广纯,杨兵,秦秀峰,等.马里金矿特征、成矿规律及找矿远景分

- 析[J].矿产勘查,2014,5(2):389-395.
- [4] 王海燕,夏强.西非利比里亚绿岩型金矿成因及特点[J].地球,2013,000(7):149-149.
- [5] Goldfarb R J, Groves D I, Gardoll S. Orogenic gold and geologic time: A global synthesis[J]. *Ore Geology Reviews*, 2001, 18: 1-75.
- [6] Yao Y, Murphy P J, Robb L J. Fluid characteristics of granitoid-hosted gold deposits in the Birimian Terrane of Ghana: A fluid inclusion microthermometric and Raman spectroscopic study [J]. *Economic Geology*, 2001, 96: 161-1643.
- [7] 徐慧.西非——正成为新的金矿勘查投资热点[J].资源环境与工程,2019,33(3):445-446.
- [8] Goldfarb R J, Andre-Mayer A S, Jowitt S M, et al. West Africa: The World's Premier Paleoproterozoic Gold Province [J]. *Economic Geology*, 2015, 112: 123-143.
- [9] Markwitz V, Hein K, Jessell M W, et al. Metallogenic portfolio of the West Africa craton[J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 78: 558-563.
- [10] Milési J P, Feybesse J L, Pinna P, et al. Geological map of Africa 1:10 000 000 [C]//SIGAfric Project: 20th Conference of African Geology, BRGM, Orléans, France, 2004.
- [11] John T, Klemm R, Hirdes W, et al. The metamorphic evolution of the Paleoproterozoic (Birimian) volcanic Ashanti belt (Ghana, West Africa) [J]. *Precambrian Research*, 1999, 98: 11-30.
- [12] Feybesse J L, Billa M, Guerrot, C. The Palaeoproterozoic Ghanaian province: Geodynamic model and ore controls, including regional stress modelling[J]. *Precambrian Research*, 2006, 149: 149-196.
- [13] Gärtner A, Villeneuve M, Linnemann U, et al. An exotic terrane of Laurussian affinity in the Mauritanides and Souttoudides (Moroccan Sahara) [J]. *Gondwana Research*, 2013, 24: 687-699.
- [14] Key R M, Loughlin S C, Horstwood M S A, et al. Two Mesoarchaean terranes in the Reguibat shield of NW Mauritania [M]. Special Publication of the Geological Society, London, 2008: 33-52.
- [15] Hirdes W, Davis D W. U-Pb geochronology of Paleoproterozoic rocks in the southern part of the Kedougou-Kéniéba inlier, Senegal, West Africa: Evidence for diachronous accretionary development of the Eburnean province[J]. *Precambrian Research*, 2002, 118: 83-99.
- [16] Ponsard J F, Roussel J, Villeneuve M. The Pan-African orogenic belt of southern Mauritanides and northern Rokelides (southern Senegal and Guinea, West Africa): gravity evidence for a collisional suture[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 1988, 7: 463-472.
- [17] Goldfarb R J, André-Mayer A S, Jowitt S M, et al. West Africa: The World's premier Paleoproterozoic gold province [J]. *Economic Geology*, 2017, 112: 123-143.
- [18] Kempe U, Graupner T, Seltmann R, Boorder H D, Dolgoplova A. The Muruntau gold deposit (Uzbekistan) - A unique ancient hydrothermal system in the southern Tien Shan [J]. *Geoscience Frontiers*, 2016, 7(3): 495-528.
- [19] 欧阳玉飞,刘继顺,周余国,等.卡林型金矿研究的若干问题探讨[J].地质找矿论丛,2011,26(2):151-156.
- [20] 孙书山.中国金矿资源特点及勘查对策[J].中国地质,1991,(2):7-10.
- [21] Izawa E, Urashima Y, Ibaraki K, Suzuki R, et al. The Hishikari gold deposit: high-grade epithermal veins in Quaternary volcanics of southern Kyushu, Japan [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1990, 36(1/3): 1-56.
- [22] Boyle R W. Gold: History and genesis of deposits [M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1987: 1-25.
- [23] 郑明华.中国金矿床类型的初步划分[J].成都地质学院学报,1983,1: 27-41.
- [24] Tatch J H. Gold deposit: origin, evolution, and present characteristics: an analysis of the present gold deposits in terms of the geometrical, mechanical, thermal, and chemical aspects of the Earth's behavior during the past 4.6 billion years [M]. Sudbury, Mass: Tatch Associates, 1975: 1-34.
- [25] 葛良胜,邓军,杨立强,等.中国金矿床:基于成矿时空的分类探讨[J].地质找矿论丛,2009,24(2):91-100.
- [26] 王杰,任军平,许康康,等.南非主要金矿集区研究现状及存在问题[J].地质论评,2014,60(4):1-12.
- [27] 柳永刚,杨玉平,李建军,等.西秦岭造山带天子坪金矿床成矿时代及成因[J].地质通报,2020,39(8):1212-1220.
- [28] 任军平,王杰,刘晓阳,等.坦桑尼亚 Nzega 绿岩带 Golden Pride 金矿床研究进展[J].地质调查与研究,2013,36(1):47-53.
- [29] 黄晋荣,陈志方,姜宇.山西右玉金矿床地质成因认识及找矿方向[J].地质调查与研究,2019,42(3):185-193,201.
- [30] 王杰亭,谢建平,卢邦飞,等.老挝爬奔金矿金矿化及其围岩蚀变过程元素迁移[J].地质调查与研究,2018,41(2):108-112,133.
- [31] Li W B, Qiao X Y, Zhang F H, et al. Tourmaline as a potential mineral for exploring porphyry deposits: a case study of the Bilihe gold deposit in Inner Mongolia, China [J]. *Mineralium Deposita*, 2022, 57: 61-82.
- [32] 张顺洋,王海滨,王淦,等.印度尼西亚 Cikotok 矿区帕瑟埃拉金矿成因及成矿潜力[J].地质与资源,2021,30(2):136-142.
- [33] 王建,谢桂青,姚磊,等.鄂东南鸡笼山砂卡岩型金矿床花岗闪长斑岩的成因:地球化学和锆石 U-Pb 年代学约束[J].矿床地质,2014,33(1):137-152.
- [34] Milesi J P, Ledru P, Ankrah P, et al. The metallogenic relationship between Birimian and Tarkwaian gold deposits in Ghana [J]. *Mineralium Deposita*, 1991, 26: 228-238.
- [35] 齐金忠,李莉,郭晓东.大兴安岭北部砂宝斯蚀变砂岩型金矿地质特征[J].矿床地质,2000,(2):116-125.
- [36] Campos L D, Oliveira C G, Ganade C E, et al. Metallogenesis of the Rhyacian Lavra Velha gold-rich IOCG deposit in the São Francisco Craton, Brazil [J]. *Ore Geology Reviews*, 2021, 134: 104-148.
- [37] McFarlane C R M, Mavrogenes J, Lentz D, et al. Geology and intrusion-related affinity of the Morila Gold Mine, Southeast Mali [J]. *Economic Geology*, 2011, 106: 727-750.
- [38] Mignot E L, Siebenaller L, Beziat D, et al. The Paleoproterozoic copper-gold deposits of the Gaoua District, Burkina Faso: superposition of orogenic gold on a porphyry copper occurrence? [J]. *Economic Geology*, 2017, 112: 99-122.
- [39] Wyman D A. Archean shoshonitic lamprophyres associated with superior Province gold deposits: distribution, tectonic setting, noble

- metal Abundances, and significance for gold mineralization[J]. *Economic Geology Monographs*, 1989, 6: 661–667.
- [40] 邓军, 杨立强, 王长明. 三江特提斯复合造山与成矿作用研究进展[J]. *岩石学报*, 2011, 27(9): 2501–2509.
- [41] 陈衍景, Pirajno F, 赖勇, 等. 胶东矿集区大规模成矿时间和构造环境[J]. *岩石学报*, 2004, 20(4): 907–922.
- [42] Groves D I. The crustal continuum model for Late-Archaean Lode-gold deposits of the Yilgarn Block, Western Australia[J]. *Mineralium Deposita*, 1993, 28(6): 366–374.
- [43] Goldfarb R J, Groves D I. Orogenic Gold: Common or evolving fluid and metal sources through time[J]. *Lithos*, 2015, 233: 2–26.
- [44] Groves D I, Santosh M, Goldfarb R J, et al. Structural geometry of orogenic gold deposits: Implications for exploration of world-class and giant deposits[J]. *Geoscience Frontiers*, 2018, 9(4): 1163–1177.
- [45] Phillips G N, Powell R. Formation of gold deposits: A metamorphic devolatilization model[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2010, 28(6): 689–718.
- [46] Fu B, Toubert J L R. From granulite fluids to quartz-carbonate megashear zones: The Gold Rush[J]. *Geoscience Frontiers*, 2014, 5(5): 747–758.
- [47] Deng J, Yang L Q, Gao B F, et al. Fluid evolution and metallogenic dynamics during tectonic regime transition: Example from the Jiapigou Gold Belt in Northeast China[J]. *Resource Geology*, 2009, 59(2): 140–152.
- [48] Deng J, Liu X F, Wang Q F. Origin of the Jiaodong-type Xinli gold deposit, Jiaodong Peninsula, China: Constraints from Fluid Inclusion and C-D-O-S-Sr isotope compositions[J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 65: 674–686.
- [49] Goldfarb R J, Baker T, Dube B, et al. Distribution, Character, and Genesis of Gold Deposits in Metamorphic Belts[C]//Hedenquist J W, Thompson J F H, Goldfarb J. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*. Society of Economic Geologists, Littleton, Colorado, USA, 2005: 407–450.
- [50] Goldfarb R J, Snee L W, Pickthorn W J. Orogenesis, high-T thermal events, and gold vein formation within metamorphic rocks of the Alaskan Cordillera[J]. *Mineralogical Magazine*, 1993, 57(3): 375–394.
- [51] 陈衍景. 造山型矿床、成矿模式及找矿潜力[J]. *中国地质*, 2006, 33(6): 1181–1196.
- [52] 范宏瑞, 谢奕汉, 翟明国, 等. 豫陕小秦岭脉状金矿床三期流体运移成矿作用[J]. *岩石学报*, 2003, 19(2): 260–266.
- [53] 周军, 祁世军. 造山带金矿研究现状与存在的问题[J]. *地球科学与环境学报*, 2004, 26(2): 16–23.
- [54] 刘馨, 闫建明, 吴少魁, 等. 豫西祁雨沟 189 号斑岩型金矿床围岩蚀变和黄铁矿微量元素特征及其对成矿过程的约束[J]. *地质通报*, 2021, 40(9): 1530–1546.
- [55] Anhaeusser C R. Archaean greenstone belts and associated granitic rocks—A review[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2014, 100: 684–732.
- [56] Heron K, Jessell M, Benn K, et al. The Tasiast Deposit, Mauritania[J]. *Ore Geology Reviews*, 2016, 78: 564–572.
- [57] Bossière G, Bonkougou I, Peucat J, et al. Origin and age of Paleoproterozoic conglomerates and sandstones of the Tarkwaian Group in Burkina Faso, West Africa[J]. *Precambrian Research*, 1996, 80(3/4): 153–172.
- [58] 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.
- [59] 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: 177–199.
- [60] Meyer F M, Kolb J, Sakellaris G A, et al. New ages from the Mauritanides Belt: recognition of Archean IOCG mineralization at Guelb Moghrein, Mauritania[J]. *Terra Nova*, 2006, 18: 345–352.
- [61] Fougereuse D, Micklethwaite S, Ulrich S, et al. Evidence for two stages of mineralization in West Africa's largest gold deposit: Obuasi, Ghana[J]. *Economic Geology*, 2017, 112: 3–32.
- [62] Oberthür T, Vetter U, Schmidt Mumm A, et al. The Ashanti gold mine at Obuasi, Ghana: Mineralogical, geochemical, stable isotope and fluid inclusion studies on the metallogenesis of the deposit [J]. *Geologisches Jahrbuch D*, 1994, 100: 31–129.
- [63] Allibone A H, McCuaig T C, Harris D, et al. Structural controls on gold mineralization at the Ashanti gold deposit, Obuasi, Ghana [M]. *Society of Economic Geologists Special Publication*, 2002, 9: 29–33.