

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.01.011

几内亚优势金属矿产地质特征、成矿作用及开发现状

张海坤, 胡鹏*, 程湘, 姜军胜, 刘江涛, 向鹏

ZHANG Haikun, HU Peng*, CHENG Xiang, JIANG Junsheng, LIU Jiangtao, XIANG Peng

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:几内亚大地构造位置处于西非克拉通南部, 主要受 Libérien、Eburnéen 及泛非三次大的造山运动影响, 主要的地质单元包括东部太古宙—古元古代马莱地盾、西部古生代博法(Bove)盆地和西南部泛非期 Rokelide 造山带。在广泛调研文献的基础上, 着重介绍了几内亚铝土矿、铁、金等矿产资源的开发现状。结合区域地质背景和典型矿床分析, 剖析了这 3 种优势金属矿产的成矿作用, 认为几内亚超大规模的铝土矿资源是地质历史时期区域构造、成矿母岩、气候、地形地貌、水文地质等多种因素耦合作用的结果。几内亚拥有世界上规模最大的未开发 BIF 型铁矿资源, 主要分布在几内亚东南部宁巴山和西芒杜 2 条绿岩带上, BIF 型铁矿经历了太古宙至今漫长的沉积—变质/变形—风化富集作用。几内亚金矿以造山型金矿为主, 形成于 Eburnean 造山运动晚期(2102~2085 Ma), 主要分布在北部锡几里盆地内, 具有明显的构造和岩性控矿特征。

关键词:几内亚; 优势金属矿产; 铝土矿; 金矿; 铁矿; 西非克拉通; 矿产勘查工程

中图分类号:P618.51;P618.31;P618.45 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2022)01-0141-13

Zhang H K, Hu P, Cheng X, Jiang J S, Liu J T, Xiang P. Geology, mineralization and development of principal metal mineral resources in Guinea. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(1): 141-153

Abstract: Guinea is tectonically located in the southern part of the Western Africa Craton and was dominated by three tectonic events, including Libérien, Eburnéen and Pan-African event. Geologically, Guinea consisted of eastern Archean-Paleoproterozoic Man-Leo Shield, western Paleozoic Bove Basin and southwestern Rokelide Orogen. Based on the widely reviewing of former studies, this paper especially presented the development situation bauxite, iron, and gold resources and, combined with the knowledge on the geological background and classical deposits, provided an insight into their mineralization. It was suggested that the super-scaled bauxite resources in Guinea is formed from the overlapping of several key factors, including regional tectonics, parent rock, climate, topography and hydrogeology. Guinea hosts the largest untapped iron mineral resources which is mainly distributed in the Nimba and Simandou greenstone belts in its southeast, and formed by long sedimentary-metamorphic/deformation-weathering process since Archean. Gold in Guinea is dominated by orogenic type and formed in late Eburnean orogenic event (2102~2085 Ma). Gold deposits are mainly distributed in Siguiri Basin and controlled by structure and lithology.

Key words: Guinea; predominant metal resources; bauxite; gold; iron ore; Western Africa Craton; mineral exploration engineering

几内亚(Guinea)位于西非西岸, 北邻几内亚比绍、塞内加尔和马里, 东与科特迪瓦、南与塞拉利昂和利比里亚接壤, 西濒大西洋。该国国土面积约 $25 \times 10^4 \text{ km}^2$, 拥有的丰富的铝土矿、金、铁等矿产资

源, 有“地质奇迹”之称^[1-2]。据几内亚国家统计局 2018 年发布的矿业统计报告, 几内亚拥有的铝土矿资源量约 $400 \times 10^8 \text{ t}$, 约占全球总资源量的 30%, 居世界第一位; 铁矿石资源量约 $199 \times 10^8 \text{ t}$, 居世界第 7

收稿日期: 2021-05-12; 修订日期: 2021-08-26

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)

作者简介: 张海坤(1987-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事境外地质调查与研究。E-mail: 328543434@qq.com

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

位;金矿也较丰富,资源量达 637.4 t。几内亚整体上勘探程度较高,矿业发达,美铝(Alcoa)、力拓(Rio Tinto)、盎格鲁阿善提(AngloGold Ashanti)等国际矿业巨头均在该国有矿业项目。为进一步吸引国际资本、激活矿业市场,该国于 2013 年推出新版《矿业法》,并于 2014 年加入采掘业透明度倡议国际组织,矿业投资环境进一步改善。S&P Global Market Intelligence 2020 年钻孔统计数据显示,最近几年几内亚境内钻探活动逐年升温,正迎来新一轮矿产勘探开发的热潮。

对中国而言,几内亚是重要的战略矿产资源,尤其是铝土矿供应基地。国家统计局数据显示,2018 年中国国内铝土矿产量约 7000×10^4 t,消费量则达到 1.7×10^8 t,铝土矿进口依存度达到 59%,而几内亚已经成为中国最大的铝土矿来源国。据中国海关统计,2019 年中国铝土矿进口总量约 1×10^8 t,其中几内亚供应约 4440×10^4 t,对保障中国铝土矿资源安全的战略意义不言而喻。企业层面,中国矿企在几内亚拥有多个重量级矿业项目,在该国具有一定影响力,代表性企业有魏桥创业集团、中国铝业公司等。其中,魏桥创业集团于 2015 年牵头组成的企业联合体“赢联盟”拥有几内亚最大的矿业项目——博凯铝土矿项目,并新获西芒杜大型铁矿的 2 处矿权,助推几内亚成为世界第一大铝土矿出口国和中国第一大铝土矿供应国,已成为几内亚的明星企业^[3]。由此可见,中国与几内亚在矿业领域优势互补,深度融合,已经形成紧密的矿业命运共同体。鉴于此,本文通过收集梳理前人资料,对几内亚铝土矿、铁、金等优势金属矿产的地质特征和成矿作用进行系统分析总结,以期为中国矿企在几内亚的矿业勘查投资活动提供理论依据。

1 地质背景

几内亚大地构造位置处于西非克拉通南部、马莱地盾西部。总体看,几内亚主要由 3 个地质单元组成,分别为东部太古宙—古元古代马莱地盾、西部古生代博法(Bove)盆地和西南部泛非期 Rokelide 造山带(图 1)。

几内亚东部马莱地盾由太古宙 Kenema—Man 域和古元古代 Baoule—Mossi 域组成,二者以

Sassandra 断层为界。太古宙 Kenema—Man 域自北向南横跨几内亚南部、塞拉利昂、利比里亚大部分地区 and 科特迪瓦西部,最早形成于 $3.6 \sim 3.5$ Ga^[4-6],并经历马莱(Leonian) ($3.2 \sim 3.0$ Ga)^[4-5] 和利比里亚(Liberian) ($2.9 \sim 2.8$ Ga)^[6-8] 两大造山期,主要由基性至长英质高级片麻岩和混合岩组成,发育由构造作用卷入的、与 BIF 型铁矿有关的绿岩带,并有花岗质岩石侵入。古元古代 Baoule—Mossi 域覆盖区域广阔,包括几内亚东北部、南部马里、尼日尔西部、利比里亚东南部、科特迪瓦、加纳西部及布基纳法索大部分地区,主要发育花岗岩岩基、火山弧系列和变质沉积岩带^[9],与太古宙基底呈构造接触关系或不整合覆盖于太古宙基底之上。该域形成于 Eburnean 造山期 ($2.27 \sim 2.05$ Ga),并经历了同造山变形和花岗岩侵入作用,代表了一次重要的陆壳形成事件^[9-12]。有学者将该域岩石组成进一步划分为下部盆地岩石建造和上部火山岩带。盆地岩石建造从下至上依次为:①基性火山岩和拉斑玄武质深成岩;②浊积岩、复理石沉积建造,发育火山岩夹层;③碳酸盐沉积建造^[10, 13-14]。火山岩带由双峰式火山岩、多期次岩浆侵入杂岩体和河流三角洲相沉积岩组成。在空间上,火山岩带与沉积盆地相间分布^[13-14]。Lompo^[15]认为,侵入岩和相关的喷出岩形成于 $2.25 \sim 2.10$ Ga,而沉积岩形成于 $2.18 \sim 2.05$ Ga。总体上,古元古代 Birimian 岩石系列代表了 Eburnean 造山期增生至太古宙基底的岛弧及弧前、弧后盆地^[10],是几内亚造山型金矿产出的主要层位。Sassandra 断层位于西非克拉通南部,呈南北向,宽约 100 km,长约 1000 km,发育糜棱岩,具有走滑或逆断层性质^[16],是太古宙和古元古代基底的界线,同时也是几内亚东北部锡吉里(Siguiri)盆地的南部边界^[17]。该断层系代表 1 条周期性活动的逆冲带,沿这条逆冲带,东部的古元古代 Birimian 岩石系列逆冲至西部的太古宙 Kenema—Man 基底之上^[18-19]。几内亚西部古生代博法盆地发育新元古代基底,上覆古生代海相沉积岩和基性火山岩,其中的富铝沉积岩及粒玄岩、玄武质凝灰岩、玄武岩、粗玄岩等是几内亚铝土矿的主要原岩,地表普遍发育铁帽。

几内亚西南部 Rokelide 造山带是 Guyanan 克拉通与西非克拉通泛非期碰撞的产物,主体位于塞

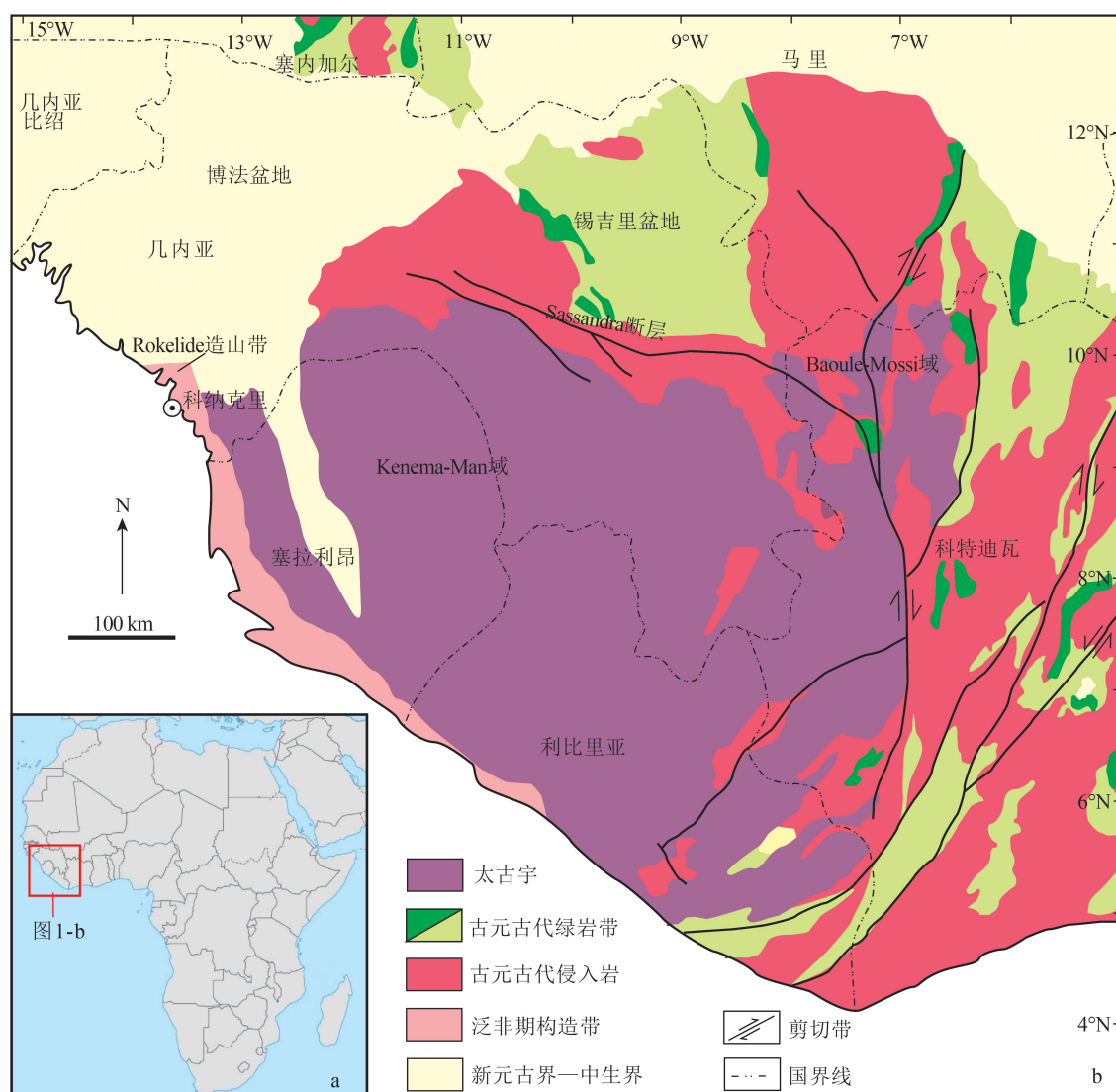


图 1 几内亚及周边地区地质简图(据参考文献[4]修改)

Fig. 1 Simplified geological map of Guinea and adjacent areas

拉利昂,自西向东发育 4 个岩石单元:①Forecariah 群,由片麻岩和云母片岩组成,发育同构造(589~570 Ma)和后构造花岗岩^[20];②Moussaya 群,由基底花岗岩类和片麻岩(2840 Ma)组成,上覆变质杂岩,并出露小规模、地表呈圆形的流纹岩和花岗岩体;③Taban 群,为陆相后造山磨拉石,由红色砂岩和砾岩组成;④Kolente 群,主要由页岩组成,发育玄武质-安山质火山岩,并包含一套厚层砂岩和若干层冰碛物^[19]。Rokolide 造山带北部被砾岩和粗粒砂岩覆盖,Villeneuve 等^[21]认为,该造山带与塞内加尔境内的 Bassarides 造山带在年龄、岩石组成等方面具有相似性,两者属于同一造山带。

2 优势金属矿产开发现状及典型矿床

几内亚优势金属矿产包括铝土矿、铁矿和金矿,空间分布较集中,其中铝土矿集中分布在西部博法盆地,铁矿主要分布在东南部西芒杜和宁巴山,金矿主要产出在东北部锡吉里盆地(图 2)。下文简述几内亚各优势金属矿种的开发现状,并选择代表性矿床进行介绍。

2.1 优势金属矿产开发现状

(1) 铝土矿

几内亚铝土矿为红土型,位于几内亚西部博法盆地,具有规模大、质量优、易开采的特点。近年,

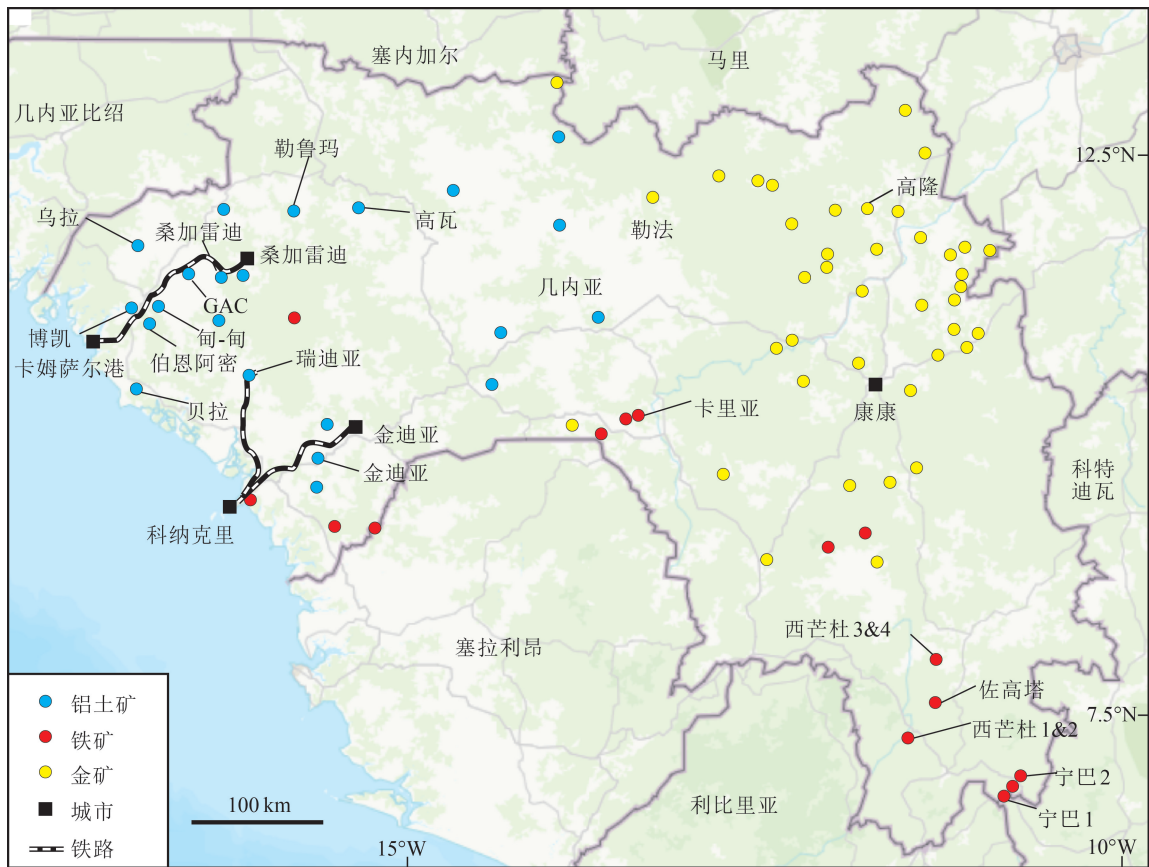


图2 几内亚主要矿产项目分布示意图(项目开发情况见表1)

Fig. 2 Distribution of predominant mineral resource projects in Guinea (with development situation in Table 1)

几内亚铝土矿产量和出口量逐年提高,产量从 2015 年的 2100×10^4 t 增至 2020 年的 8800×10^4 t,出口量从 2015 年的 2000×10^4 t 增至 2020 年的 8200×10^4 t^①,成为世界铝土矿市场的重要一极(图 3)。2019 年底爆发并蔓延全球的新冠肺炎疫情并未影响几内亚的铝土矿开采,2020 年铝土矿产量同比增加约 25.7%。根据世界银行的最新排名,几内亚已成为全球第二大铝土矿生产国,仅次于澳大利亚,中国退居第三。几内亚铝土矿市场成熟度高,跨国矿业公司云集,包括美铝、几内亚铝土矿公司、俄铝、几内亚氧化铝公司/阿联酋环球铝业、中铝、阿鲁法矿业及其他几十家企业(表 1)。近年由中国魏桥创业集团和烟台港集团联合几内亚 UMS(法国在几内亚投资企业)、新加坡韦立国际集团组成的三国四方合资企业“赢联盟”,在几内亚竞争激烈的铝土矿市场异军突起。2020 年,“赢联盟”在几内亚共生产铝土矿约 3350×10^4 t,占几内亚铝土矿总产量的 38%

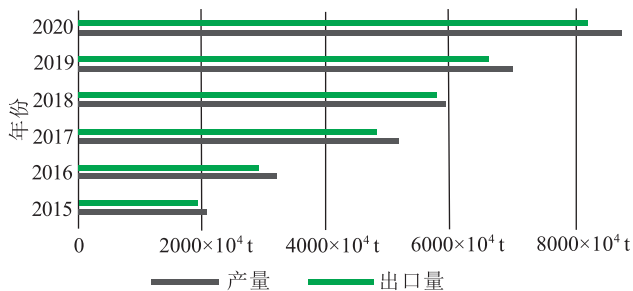
图3 几内亚近年铝土矿产量和出口量^①

Fig. 3 Production and exportation of bauxite from Guinea in recent years

(图 4),其中出口约 3270×10^4 t,占几内亚铝土矿总出口量的 40%,助推几内亚成为世界第一大铝土矿出口国和中国铝土矿第一大进口来源国^[3]。

(2) 铁矿

几内亚铁矿以 BIF 型为主,伴生红土型,主要分布在东南部,铁矿石资源量达 199×10^8 t,主要分布

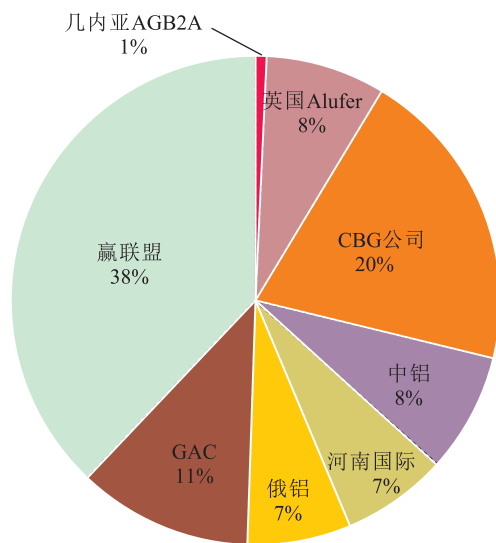
图 4 几内亚 2020 年各公司铝土矿产量占比^①

Fig. 4 Proportion of bauxite production of companies in Guinea

在西芒杜山脉 (Simandou) (86×10^8 t)、宁巴山脉 (Massif de Nimba) (43×10^8 t) 和科纳克里半岛 (Presqu'île de Kaloum) (70×10^8 t)。几内亚铁矿资源主要掌握在力拓集团、英国联合成长集团 (Consolidated Growth Hldgs Ltd)、美国高能勘探公司 (High Power Exploration) 等西方跨国公司手中^[22-23] (表 1)。中国矿企也在加紧布局几内亚铁矿项目,并取得重要进展。目前,中国铝业集团拥有西芒杜 3&4 区块约 39.9% 的权益,其余归力拓集团 (45.1%) 和几内亚政府 (15%);“赢联盟”拥有西芒杜 1&2 区块 85% 的权益,其余归几内亚政府。几内亚虽然拥有规模巨大的铁矿资源,但受政治环境、权属纠纷、基础设施等因素限制,至今未得到有效开发利用。在几内亚政府的积极推动下,该国铁矿开发正逐渐摆脱停滞不前的困境。2019 年 9 月,美国高能勘探公司与几内亚矿业和地质部签署宁巴铁矿的《矿业协议》,计划投资约 10 亿美元用于矿山及基础设施建设,全部完成后年产铁矿石可达 2000×10^4 t。2020 年下半年,“赢联盟”已启动西芒杜 1&2 区块的地质勘查工作,并同步进行铁路、港口等配套基础设施建设,计划 2025 年投入运营,预计年出口铁矿石达 8000×10^4 t。据力拓集团 2020 年度报告,该公司将于 2021 年上半年完成矿区内基础设施第一阶段的技术优化工作^②。另外,据几内

亚矿业和地质部 2020 年 5 月发布的《2020 年第一季度几内亚矿业统计报告》,英国 Niron Metals 矿业和印度 Ashapura 阿夏普拉矿业也已分别启动所属佐高塔 (Zogota) 铁矿和 Yomboyéli 铁矿的基础设施建设工作。可以预见,未来几年随着这些铁矿开发项目产能的释放,几内亚将成为全球铁矿石市场的重要参与方。

(3) 金矿

几内亚金矿可分为造山型和砂金矿 2 种,主要分布在锡吉里盆地地区,另外在马木和法拉纳间的飞塔坝、金迪亚东部的芒比亚 (Mambia)、博科 (Boko) 和塞拉—弗雷 (Sierra—Foré) 地区及恩泽雷科雷地区的加马—卡拉那—约姆 (Gama—Karana—Yomou) 一带也有金矿分布^[24]。金矿开发以小规模手工开采为主,且集中在锡吉里盆地的河流冲积层,原生金矿脉基本未开发^[23]。近 5 年来,几内亚工业化黄金产量较稳定,年产量均在 11 t 以上,2017 年达到峰值,产金约 16.7 t。几内亚矿业和地质部 2020 年矿业统计数据显示,几内亚 2020 年生产黄金约 83.7 t,其中小规模手工开采约 71.5 t,占比 85%,工业开采约 12.2 t,占比 15%。几内亚从事金矿工业开发的企业主要为南非盎格鲁阿善提公司和英国 Nord Gold 公司几内亚分公司 (la Société Minière de Dinguiraye; SMD),2020 年这两家公司分别产金 7.2 t 和 5.0 t^①,金矿逐渐成几内亚除铝土矿和铁矿外吸引外资的又一热门矿种。据几内亚矿业和地质部 2020 年发布的消息,英国 Hummingbird 矿业公司通过股权收购获得 Kouroussa 地区金矿项目,计划 2022 年底完成基础设施建设,投产出矿,设计年开采约 2.8 t 黄金。另外,摩洛哥 Managem 集团下属的子公司 la Société des Mines de Mandiana (SMM) 在几内亚 Mandiana 省 (la préfecture de Mandiana) 开采一处金矿,预计第一期基建 2021 年竣工,投资 1.75 亿美元,设计年开采黄金 2.8 t;2019 年 11 月英国 Sycamore 矿业公司与几内亚矿业和地质部签署框架协议,计划开采位于几内亚 Kouroussa 省的 Kiniéro 金矿。

2.2 典型矿床/田

(1) 巴拉亚 (Balaya) 铝土矿床

巴拉亚 (Balaya) 铝土矿位于博法盆地南部,矿化分布在相距约百米的南、北 2 个高地地表,海拔 450~520 m,中间以山谷相隔 (图 5)。矿区岩性自

表 1 几内亚优势金属矿产主要项目开发情况 ①②③ [22-23]
Table 1 Development overview of predominant mineral resource projects in Guinea

矿种	矿区名称	权益归属	储量(资源量) /10 ⁸ t	平均品位	发展阶段	2020 年产量 /10 ⁴ t
铝土矿	桑加雷迪	CBG 公司,由几内亚政府(49%)、力拓集团(23%)、美铝(14%)、澳大利亚氧化铝公司(9%)联合控股	74	46.5%	生产中	1650
	博法	中铝(85%)、几内亚政府(15%)	18	39.1%	生产中	699
	甸-甸	俄罗斯铝业(90%)、几内亚政府(10%)	6.9	—	生产中	307
	瑞迪亚	俄罗斯铝业(100%)	3.2	—	生产中	140
	贝拉	英国 Alufer 公司	1.5	44.4%	生产中	665
	金迪亚	俄罗斯铝业(100%)	0.7	—	生产中	290
	博凯	赢联盟(85%)、几内亚政府(15%)	6.2	>50%	生产中	3273
	GAC	几内亚铝业公司(100%)(为必和必拓、全球氧化铝国际有限公司和阿联酋迪拜铝业公司三方控股公司)	5.3	37.7%	生产中	1007
	勒鲁玛	澳大利亚 Lindian 资源(75%)、私人公司(25%)	9.0	45%	基础设施建设	
	高瓦	澳大利亚 Lindian 资源(75%)、几内亚铝土矿 PTY 公司(25%)	1.0	49.8%	勘查-可研	
	伯恩阿密	印度奋进矿业公司	1.9		基础设施建设	
	乌拉	澳大利亚 Lindian 资源(75%)、法国 Entreprise Generale(25%)	0.6	38.7%	可研	
铁矿	西芒杜 1&2 区块	赢联盟(85%)、几内亚政府(15%)	>36	65%	基础设施建设	
	西芒杜 3&4 区块	力拓(45.1%)、中铝(39.9%)、几内亚政府(15%)	28	65.5%	基础设施建设	
	宁巴 1	美国高能勘探公司(100%)	9.35	63.1%	勘查	
	宁巴 2	英国联合成长集团(100%)	2.05	57.8%	可研	
	卡里亚	—	57	30.4%	已完成可研	
	佐高塔	英国尼龙金属公司(100%)	—	—	基础设施建设	
金矿	高隆	南非盎格鲁阿善提公司	205.3 t	—	生产中	7.2 t
	勒法	英国 Nord Gold 公司	104.3 t	—	生产中	5 t

下而上依次为奥陶纪砂岩、志留纪泥岩和粉砂岩、风化壳。奥陶纪砂岩分布较广,岩性为发育交错或平行层理的细—粗粒砂岩。志留纪岩石为铝土矿原岩,因风化作用地表出露较少,仅见于局部地表铝土矿盖层剥蚀较深的地区。北部高地中部的岩心显示,志留纪岩石自下而上依次为未受风化影响的原岩、薄层高岭土化泥岩和粉砂岩,向上逐渐过渡为粘土型和红土型铝土矿(图 6-a、b)。地表铝土矿盖层厚 1~20 m,从铝土矿成因类型看,南部高地

铝土矿为堆积型,即由先存红土型铝土矿经各种机械搬运作用异地堆积形成,而北部高地铝土矿既有堆积型,又有红土型。北部高地红土型铝土矿保留有母岩的细层状构造,多孔、坚硬、棕色—红色,并发育因含铁形成的粉红色细条带,局部发育豆状铝土矿石(图 6-c)。与红土型铝土矿石相比,巴拉亚堆积型铝土矿石同样具有多孔、坚硬等特征,呈砾状或不规则状,颜色略有差别,为红色—浅粉色或浅红色—棕色(图 6-d)。根据岩屑形状,可分为角砾状

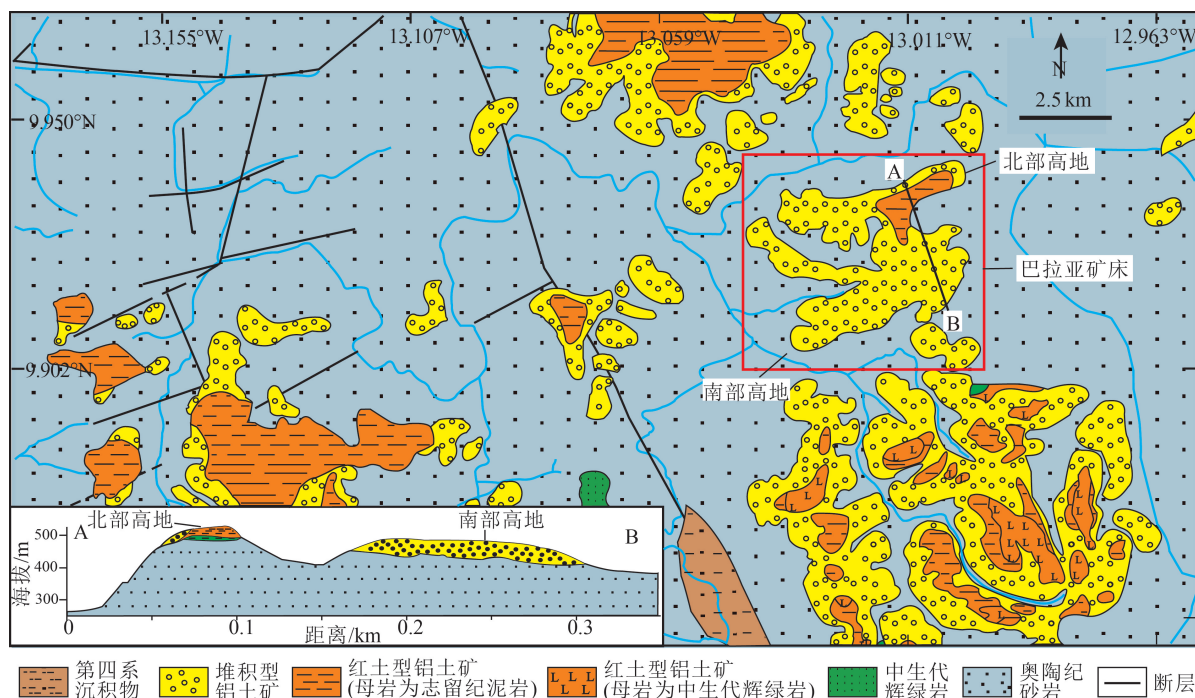


图 5 巴拉亚矿床区域地质简图(插图为剖面 AB)(据参考文献[25]修改)

Fig. 5 Simplified geological map of the Balaya deposit (with an attached profile AB)



图 6 巴拉亚矿床露头野外照片(据参考文献[25]修改)

Fig. 6 Outcrop of the Balaya deposit

a—露头剖面;b—高岭土化泥岩;c—豆状铝土矿石;
d—堆积型铝土矿石

和砾状-角砾状沉积型铝土矿。根据岩屑结构和构造,又可分为 2 种:一种岩屑继承了红土型铝土矿的结构构造,呈薄层状;另外一种呈胶状,形成致密的铝土矿和铁氧化物。从矿物组成看,红土型铝土矿和堆积型铝土矿基本一致,主要矿物为三水铝矿、针铁矿、氧化铝,包含少量锐钛矿、金红石、水铝石和高岭土。地球化学特征方面,巴拉亚铝土矿石主量元素含量差别较大,含 Al_2O_3 49.70% ~ 61.00%、 SiO_2 0.30% ~ 5.00%、 Fe_2O_3 1.60% ~ 19.00%、 TiO_2 1.71% ~ 3.70%、 Na_2O 、 K_2O 、 CaO 、 MgO 含量均小于 0.05%。微量元素中,Cr、Ga、Nb、Th、V、Zr、Y、La、Ce、Nd 等元素相对其他元素含量较高。微量元素及岩石结构、构造对比分析表明,巴拉亚堆积型铝土矿和红土型铝土矿成矿母岩一致,均为位于铝土矿之下的志留纪泥岩,其演化过程为泥岩→高岭土化→红土化→富三水铝石铝土矿^[25]。

(2) 皮德丰(Pic de Fon)铁矿床

皮德丰铁矿位于几内亚东南部、西芒杜铁矿带南部,沿西芒杜山南北延伸约 7.5 km,最高处海拔 1650 m,是典型的条带状铁矿建造(BIF)矿床^[26-27](图 7)。矿区地层自下而上依次为:①千枚岩-石英岩-燧石-BIF;厚 50~100 m,细粒,深绿色-棕色泥

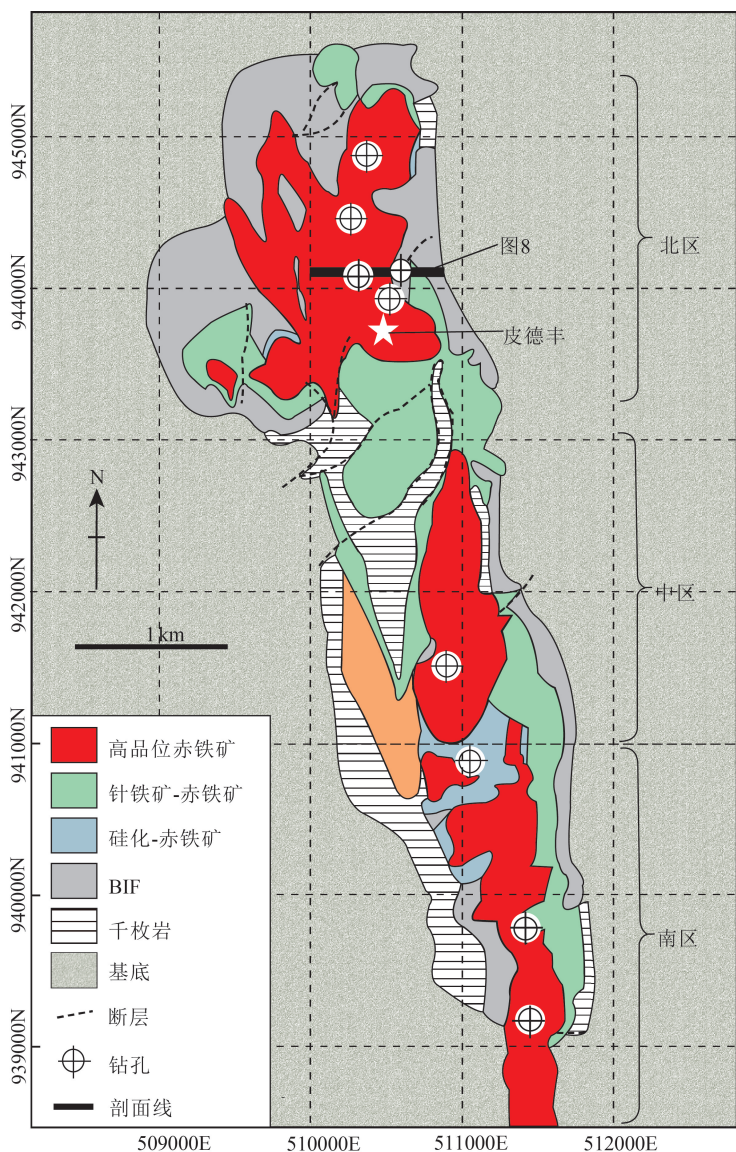


图7 皮德丰矿床地质简图(据参考文献[27]修改)

Fig. 7 Simplified map of the Pic de Fon deposit

质千枚岩,夹少量石英岩、BIF 及粗粒、深绿色石榴子石-石英-云母片岩,面理发育;②千枚岩:厚约 200 m,细粒浅绿色-棕色,局部发育变形的石英脉;③带状千枚岩-铁氧化物:厚 50~100 m,深棕色-红色,发育铁氧化物细带;④下部 BIF 层:千枚岩-针铁矿-石英 ($Al/Ti < 60$) 组成的棕色、灰色和白色薄层条带,颜色分界清晰,厚 0.1~3 cm;⑤中部 BIF 层:由赤铁矿和/或磁铁矿-石英 ($Al/Ti > 60$) 组成的较厚的灰色和白色条带,互相之间界线清晰,厚 0.6~5 cm;⑥上部 BIF 层:由赤铁矿和/或磁铁矿-石英 ($Al/Ti > 60$) 组成的灰色和白色薄层条带,厚

0.1~1 cm,条带之间界线不清晰。条带状含铁建造总体厚度不超过 250 m,发育若干厚度为几十厘米至几米不等的千枚岩层,接触带发育剪切变形,呈构造接触关系(图 8)。皮德丰铁矿东西两侧发育大量来自山脊的铁角砾岩,形成厚度达 40 m 的台地,主要由针铁矿±褐铁矿胶结的含铁建造角砾组成^[27]。

皮德丰铁矿包括北区、中区和南区 3 个高品位铁矿区,各区均发育一系列由左型剪切压扭作用形成的近直立开阔等斜褶皱。受褶皱控制,高品位矿石带具有穿层特征,一般厚 10~20 m,局部达 50 m,且表现出品位向下降低的趋势。大部分高品位铁矿石分布在中部和上部 BIF 层中,下分布 BIF 层分布在山脊两侧,为针铁矿和褐铁矿组成的铁质结壳层^[28]。高品位矿石分为 2 种,一种为分布相对广泛的板状矿石,具有互层特征,横向延伸可达数十米;另一种为分布较少且硬度较高的块状矿石,其中中等硬度的矿石分布较不规则,在各深度含矿层均有发育,褐铁矿含量高的矿石空间上普遍与断层和剪切构造有关。另外,在各 BIF 层之上,均发育一层针铁矿含量较高的风化壳,厚 0.5~1 m,较坚硬,普遍保留原岩的结构特征。风化壳之下发育 10~30 m 厚的多孔/裂隙层,局部孔隙/裂隙被粘土和褐铁矿充填。该层位的含铁矿物主要为赤铁矿,大部分保留有原生结构构造。

矿物组成方面,较新鲜的 BIF 建造中主要的铁氧化物包括磁铁矿、赤铁矿/假象赤铁矿,并含有重结晶微晶石英颗粒,其他硅酸盐矿物较少,未见碳酸盐矿物。微晶石英和颗粒较大的石英具有锯齿状结晶边界,石英脉普遍被粗粒(大于 100 μm) 石英充填,具有光滑或不明显的锯齿型结晶面^[27]。高品位矿石几乎完全由赤铁矿组成。

(3) 锡吉里(Siguiri)金矿田

锡吉里金矿田位于锡吉里(Siguiri)盆地北部,向南距几内亚康康省(Kankan)省会康康市约 150 km,面积约 1494.5 km^2 ,是世界级造山型金矿产区,已累计生产黄金超过 180 t^[19,29]。矿田内已发现 11 处矿床,规模较大的有 5 处,包括萨努丁迪(Sanu

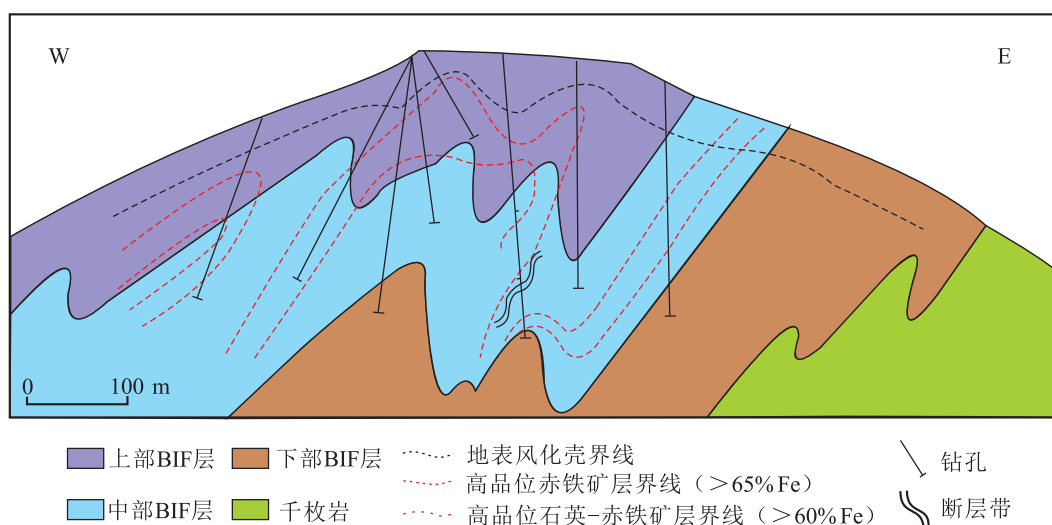


图 8 皮德丰矿床东西向剖面图(剖面位置见图 7, 据参考文献[27]修改)

Fig. 8 Simplified east-west cross section of the Pic de Fon deposit (its location marked in Fig. 7)

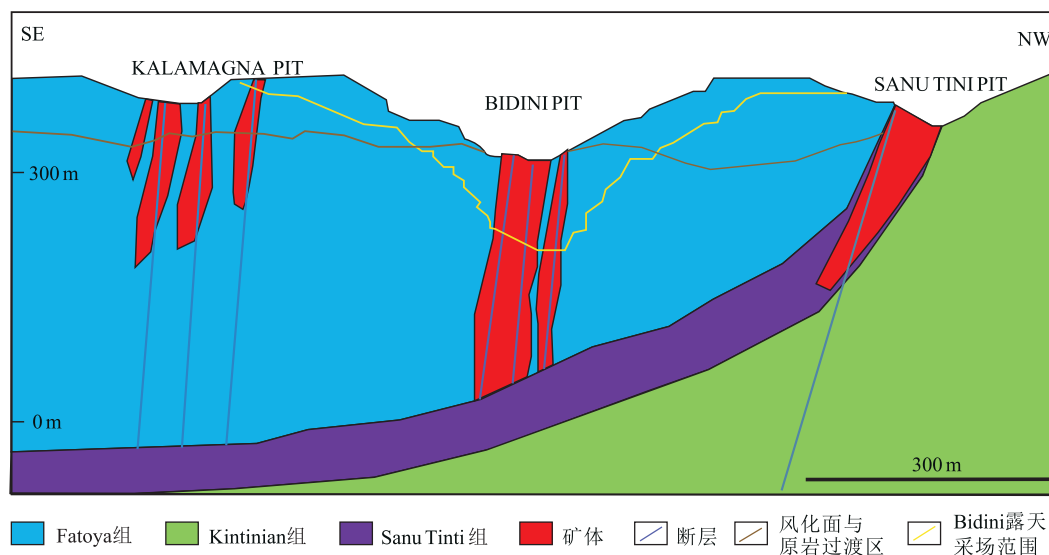


图 9 锡吉里金矿田剖面示意图

Fig. 9 Simplified cross section of the Siguiri gold field

Tinti)、比迪尼 (Bidini)、卡密 (Kami)、考斯瑟 (Kosise)、斯托考 PB1 (Sintroko PB1) (图 9)。该矿田 85% 的权益归南非盎格鲁阿善提公司, 其余归几内亚政府。据盎格鲁阿善提公司 2021 年 2 月发布的报告, 截至 2020 年底, 锡吉里金矿田矿石资源量达 264.2×10^6 t, 平均品位 0.97 g/t, 金属量 256.27 t^③。矿山 1998 年投入生产运营, 目前共有 4 个矿区, 1 区为主采区, 2020 年产金约 7.2 t, 1 区和 2 区外围仍在进行大量的勘探工作。

锡吉里金矿田大地构造位于古元古代 Baoulé—

Mossi 域西北部, 区内主要有 3 个地层单元, 自下而上依次为 Balato 组、Fatoya 组和 Kintinian 组。Balato 组由薄层的蚀变页岩、粉砂岩、硬砂岩组成。Fatoya 组由较厚层中—粗粒硬砂岩组成, 向上变为粉砂岩和页岩。Kintinian 组为块状暗绿色页岩, 夹几厘米厚的灰岩, 底部是一套具有碎屑支撑结构的砾岩层^[28]。区内构造—地层的走向在南部以近南北向为主, 在北部以北西—南东向为主。目前已识别出至少 3 期变形事件: 第一期为南北向挤压作用, 形成小型褶皱; 第二期为规模最大的变形事件, 北东东—

南西西向挤压作用导致区域性南北向构造格架;第三期为北东—南西向挤压作用,导致前期构造再次发生褶皱作用(安格鲁矿业公司 2020 年年报)。矿区内矿化类型包括原生脉型和次生风化型。原生脉型矿化主要发育在石英脉中,以北东走向为主,近直立。区内已识别出 2 种类型的原生矿化:第一种矿化发育钠长石化、碳酸盐化,形成碳酸盐—黄铁矿脉,载金矿物为黄铁矿;第二种矿化形成自然金,发育在北东东—南西西向石英脉中,脉体外围有碳酸盐镶边,并穿切石英—碳酸盐脉。

3 讨论

3.1 铝土矿成矿作用

几内亚拥有世界三分之一的铝土矿资源,其主要特征为:矿体主要分布在铁硅铝质风化壳的中上部,矿层单一,层位稳定;厚度 3~9 m,可露天开采,基本无需剥离非矿土;品位高,氧化铝含量 45%~60%,二氧化硅含量 1%~3.5%;属于在低温下易加工提炼的三水化合型矿物;矿产贮藏集中,一般一个矿点都在几百万吨至几十亿吨;分布呈阶梯形,西北博凯、桑加雷迪为最优质铝土矿矿区,品位高达 65%~69%。

几内亚超大规模的铝土矿是地质历史时期区域构造、成矿母岩、气候、地形地貌、水文地质等多种因素耦合作用的结果。

(1)区域构造:红土型铝土矿为表生成因,一般形成于稳定的大陆环境,如澳大利亚、巴西、印度等^[31~32]。几内亚所在的西非克拉通地区发育面积广阔的前寒武纪结晶基底(约 $450 \times 10^4 \text{ km}^2$),1700 Ma 前处于较稳定的状态,仅在克拉通边缘发育以泛非期为主的活动带,为铝土矿长期稳定堆积和保存提供了有利的构造环境。另外,北北东向主断层(断裂)和北西向展布的次级断层(断裂)大大改善了这一地区的地表渗流条件,加快了成矿母岩的风化过程。

(2)成矿母岩:作为红土型铝土矿成矿物质的来源,成矿母岩的性质直接决定着矿石质量和矿床规模。几内亚红土型铝土矿的成矿母岩主要为古生代基性火山岩,如粒玄岩、玄武质凝灰岩、玄武岩、粗玄岩等^[33]。在风化作用下,这些基性火山岩易形成大量裂隙,并随着大气降水淋滤作用的由强到弱,Si、Ca、Mg 等元素逐渐迁移,而表现出分层特征,从地表向下依次形成铁帽层、红土层、铁质粘土

层、粘土层、粉砂质粘土层,其中铁帽层和红土层三水铝石含量较高,含量分别可达 25.0%~58.0% 和 18.0%~40.0%。另外,已有的勘探实践表明,成矿母岩为基性岩浆岩的矿体较好,而成矿母岩为沉积岩的矿体较差^[34]。

(3)气候条件:气候条件尤其是高温和强降水量是形成大规模铝土矿的决定性因素之一。从世界范围看,红土型铝土矿主要分布在南、北纬 $0^\circ \sim 30^\circ$ 之间的热带与亚热带地区,如非洲西部、南美洲北部、印度、东南亚及澳大利亚北部和西南部^[35~36]。一般认为,年平均气温不低于 20°C 、年降雨量不小于 1500 mm 是最有利于红土型铝土矿形成的气候条件^[37]。几内亚地处赤道附近的低纬度(北纬 $10^\circ 30' \sim 11^\circ 15'$)地区,为热带雨林气候,终年高温多雨,年平均气温为 $24 \sim 32^\circ\text{C}$,年均降水量达 3000 mm。一般认为,较高的温度有利于成矿母岩发生风化,提高岩石渗透率和 SiO_2 的溶解度,而充沛的降雨量会促进淋滤作用,使 Si、Ca、Mg 等有害元素迁移出去^[38]。

(4)地形地貌与水文条件:地形地貌和水文条件直接影响红土化作用的强度,进而控制红土型铝土矿的质量和规模。前人研究表明,红土型铝土矿主要分布在坡度为 $3^\circ \sim 15^\circ$ 地势平缓的台地,并以 $5^\circ \sim 10^\circ$ 最佳^[39]。这种地势条件下,地表水、地下水下渗的径流速度适中,有利于对各种有害成分的淋滤和铁铝成分的积聚,最终形成规模大、品位高的红土型铝土矿床。而坡度过大,大气降水下渗减少,地下潜水径流较快,淋滤作用有限;坡度过小,受地表致密铁帽的影响,大气降水下渗和泄水条件受限,形成的铝土矿规模较小,质量较差。总体看,几内亚有经济价值的铝土矿床普遍位于地势较高、坡度适中的宽缓台地。

3.2 铁矿成矿作用

几内亚拥有世界上规模最大的未开发 BIF 型铁矿之一,是近年国际铁矿石市场关注的热点^[40~41]。几内亚 BIF 型铁矿主要分布在宁巴山和西芒杜 2 条绿岩带上。宁巴山绿岩带由变质火山岩和变质沉积岩组成,厚达 1400 m,长达 45 km,横跨几内亚东南部和利比里亚北部,其中几内亚境内长约 20 km^[42]。根据岩石组成的不同,宁巴山绿岩带可分为 2 个岩石单元,分别为下部由片麻岩、正角闪岩组成的耶科巴(Yekopa)群和上部的宁巴(Nimba)群。宁巴群是宁巴山绿岩带主要的赋矿层位,可进

一步分为下部的砾岩层、中部的火山岩变质成因角闪石片岩和上部的千枚岩、铁英岩、铁矿石等沉积建造。耶科巴 (Yekepa) 群和宁巴 (Nimba) 群的界线为一区域性不整合面, 该不整合面在西芒杜地区也有出现。宁巴山绿岩带在采的一个主矿体拥有 1.5×10^8 t 高品位铁矿石, 品位达 66%~68%, 厚 250~300 m, 长约 800 m, 深约 670 m。矿体的形成是铁英岩在变质作用过程中遭受蚀变发生富集的结果, 并可能受变质事件后大气降水的影响^[43]。

西芒杜绿岩带位于宁巴山绿岩带以北约 100 km 处, 南北延伸达 115 km, 蕴含铁矿石资源量约 27.6×10^8 t (65.5% Fe, 力拓集团 2018 年报), 受多期塑性变形的影响, 普遍发育紧闭向斜和剪切背斜褶皱。西芒杜绿岩带由铁英岩和千枚岩组成, 下伏基底片岩和角闪岩。受强烈风化作用的影响, 仅在铁英岩和千枚岩之间存在明显界线, 而二者内部层序难以辨识。铁英岩的表生富集对该地区 BIF 型铁矿的形成具有重要作用^[40, 44], 高品位矿化一般位于山顶, 向下延伸可超过 400 m, 矿石矿物主要有赤铁矿、假象赤铁矿、针铁矿等。矿化带自上而下表现出明显的过渡特征, 依次为高品位矿石-较破碎的富集铁英岩-较破碎的未富集铁英岩-原生铁英岩。

根据产出的构造背景, 全球条带状含铁建造可分为 3 种类型, 分别为产于汇聚边缘的太古宙-元古宙 Algoma 型、产于被动陆缘的元古宙 Lake Superior 型和新元古代 (715~580 Ma) 冰川成因的 Rapitan 型^[40, 45]。总体看, 几内亚赋存 BIF 型铁矿的绿岩带发育含铁石英岩、燧石、页岩 (千枚岩) 和条带状含铁建造^[46], 为被动陆缘深水沉积的产物, 后期遭受多期变质和变形作用发生富集形成 BIF 型铁矿, 属于蚀变的 Lake Superior 型。前人对西芒杜绿岩带皮德丰矿床的研究表明, 几内亚 BIF 型铁矿的

形成先后经历了漫长的沉积-变质/变形-风化富集作用。太古宙-古元古代早期, 全球尚未发生大氧化事件 (Great Oxidation Event), 大气和海洋系统为缺氧状态, 几内亚东北部地区处于被动陆缘深水环境, 接收了大量还原性含铁沉积物, 经埋藏压实初步形成含铁建造。古元古代早中期, 在 Eburnéen 造山作用影响下, 这一地区遭受剪切和挤压变形及角闪岩相、绿片岩相变质作用, 伴随磁铁矿的结晶和增生及赤铁矿的形成。古元古代晚期, 在造山伸展垮塌或热事件驱动下, 形成热液循环系统, 伴随含铁矿物的活化、沉淀及硅的流失, 形成叶片状赤铁矿。新元古代, 受泛非运动影响, 发生构造活化和脆性形变, 在构造边界处形成针状赤铁矿^[47]。在此之后, 该地区发生区域性构造隆升, 在地表风化作用下, 发生硅的流失, 并形成大量针铁矿, 含铁建造进一步富集成矿 (图 10)。

3.3 金矿成矿作用

几内亚金矿以造山型金矿为主, 是西非克拉通大规模金成矿作用的一部分^[48]。总体具有以下特征: ①普遍存在热液蚀变现象, 主要有硅化、黄铁矿化、碳酸盐化等, 对金矿化具有指示意义; ②矿化伴随 Ag、Au、As、Bi、S (Sb)、Te、W 等元素的富集; ③存在多期热液活动, 导致多次金矿成矿作用; ④矿化主要发育在砂岩/硬砂岩等能干岩层中; ⑤矿脉走向较一致, 普遍为北东向, 表现出明显的构造控矿特征。

从成矿时代看, 西非克拉通造山型金矿普遍形成于 Eburnean 造山运动时期 (2160~2060 Ma), 并以该造山运动晚期形成的金矿数量最多、规模最大^[48-49]。Lebrun 等^[30]通过对几内亚锡吉里矿田内含矿沉积岩中碎屑锆石和后期火山角砾岩中岩浆锆石的年龄测定, 将含矿沉积岩的年龄限定为 2124~2089 Ma, 为 Eburnean 造山运动晚期盆地沉

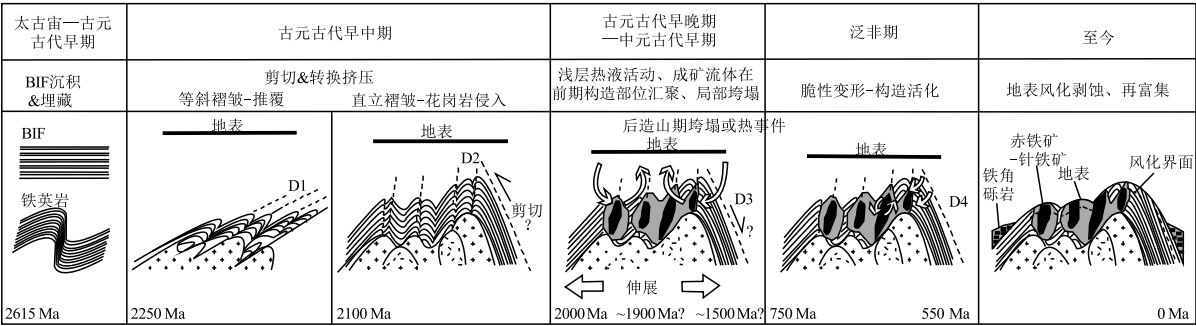


图 10 皮德丰矿床成矿模式图 (据参考文献 [27] 修改)
Fig. 10 Genetic model of the Pic de Fon deposit

积的产物。Lebrun 等^[30] 根据几内亚、马里、加纳等西非国家境内造山型金矿产出构造和年代学研究,提出西非克拉通存在两期金成矿作用,分别发生在 2102~2085 Ma(第一期)和 2085~2054 Ma(第二期),并认为几内亚造山型金矿形成于第一期。

从成矿空间看,几内亚造山型金矿明显受构造和岩性控制。虽然区域地层和构造走向有一定变化,但矿脉走向较一致,普遍为北东向。矿化一般发育在近直立的南北向推覆构造、北东—南西向右型剪切带、与第二期变形事件有关的北东东—南西西向左型断层中。这种构造控矿特征反映了盆地形成初期区域性基底构造对形成几内亚造山型金矿的重要作用^[30]。北西西—南东东向、南北向和北东—南西向断层控制了锡几里盆地的早期格架,不仅决定了沉积建造的厚度、形态,也是深源流体运移、汇聚的通道。除锡几里矿田外,锡几里盆地中其他规模较小的矿床,如 Léro Jean et Gobelé、Kalana 等也均位于断层交会部位。在赋矿层位上,虽然矿化在区内 3 个地层单元均有分布,但以 Fatoya 组最丰富,主要发育在砂岩/硬砂岩等能干性岩层中。这些能干性岩层为局部膨大、矿质沉淀、矿脉形成提供了有利空间^[50]。在一些矿床中,矿化集中分布在裂隙发育的较粗粒岩石单元中。

4 结 论

(1) 几内亚地质主要受 Libérien 造山运动、Eburnéen 造山作用及泛非运动 3 次大的构造运动影响,主要的地质单元包括东部太古宙—古元古代马莱地盾、西部古生代博法(Bove)盆地和西南部泛非期 Rokelide 造山带。

(2) 几内亚优势金属矿产包括铝土矿、铁矿和金矿,其中铝土矿开发程度较高,竞争激烈,美铝、力拓等矿业巨头云集,已成为国际铝土矿市场的重要一极;铁矿资源量大、质优,开发程度低,力拓、赢联盟等矿业公司正加快开发步伐,未来几年随着产能逐渐释放,有望改变世界铁矿石市场格局;金矿开发以小规模手工开采为主,工业化开采主要被南非 AngloGold Ashanti 公司和俄罗斯 Nord Gold 公司控制,金矿逐渐成为几内亚除铝土矿和铁矿外吸引外资的又一热门矿种。

(3) 几内亚铝土矿为红土型,位于几内亚西部博法盆地,具有规模大、质量优、易开采的特点,大规模的铝土矿是地质历史时期区域构造、成矿母

岩、气候、地形地貌、水文地质等多种因素耦合作用的结果。几内亚铁矿以 BIF 型为主,集中分布在宁巴山和西芒杜 2 条绿岩带上,为蚀变的 Lake Superior 型条带状含铁建造经漫长的沉积—变质/变形—风化作用富集成矿。几内亚原生金矿以造山型为主,集中分布在锡吉里盆地,成矿作用发生于 Eburnean 造山运动晚期,并明显受构造和岩性控制。

参考文献

- [1] 吴清和. 几内亚[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2015.
- [2] 王祝堂. 世界铝企业逐鹿几内亚掀起袖子开采铝土矿[J]. 轻金属, 2019, 11: 1-6.
- [3] 张海坤, 胡鹏, 姜军胜, 等. 铝土矿分布特点、主要类型与勘查开发现状[J]. 中国地质, 2021, 48(1): 68-81.
- [4] 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: 267-283.
- [5] Thiéblemont D, Delor C, Cocherie A, et al. A 3.5 Ga granite-gneiss basement in Guinea: further evidence for early Archean accretion within the West African Craton [J]. Precambrian Research, 2001, 108: 179-194.
- [6] 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: 97-104.
- [7] Cahen L, Snelling N J, Delhal J, et al. The Geochronology and Evolution of Africa [M]. Oxford: Clarendon Press, 1984.
- [8] Kouamélan A N, Delor C, Peucat J J. Geochronological evidence for reworking or Archean terrains during the Early Proterozoic (2.1 Ga) in the western Côte d'Ivoire (Man-Rise-West African Craton) [J]. Precambrian Research, 1997, 86: 177-199.
- [9] Hirdes W, Davis D W, Eisenlohr B N. Reassessment of Proterozoic granitoid ages in Ghana on the basis of U/Pb zircon and monazite dating [J]. Precambrian Research, 1992, 56(1/2): 89-96.
- [10] Ledru P, Pons J, Milesi J P, et al. Transcurrent tectonics and polycyclic evolution in the lower proterozoic of Senegal-Mali [J]. Precambrian Research, 1991, 50(3/4): 337-354.
- [11] Taylor P N, Moorbath S, Leube A, et al. Early Proterozoic crustal evolution in the Birimian of Ghana: constraints from geochronology and isotope geochemistry [J]. Precambrian Research, 1992, 56: 97-111.
- [12] Hirdes W, Davis D. U-Pb geochronology of paleoproterozoic rocks in the southern part of the Kedougou-Kenieba Inlier, Senegal, West Africa: evidence for diachronous accretionary development of the Eburnean province [J]. Precambrian Research, 2002, 118: 83-99.
- [13] Milési J P, Ledru P, Feybesse J L, et al. Early Proterozoic ore deposits and tectonics of the Birimian orogenic belt, West Africa [J]. Precambrian Research, 1992, 58: 305-344.
- [14] Feybesse J L, Milési J P. The Archean/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 Archean

- cratons? [J]. Precambrian Research, 1994, 69: 199–227.
- [15] Lompo M. Paleoproterozoic structural evolution of the Man–Leo shield (West Africa): Key structures for vertical and transcurrent tectonics [J]. Journal of African Earth Sciences, 2010, 58: 19–36.
- [16] Kouamelan A N, Delor C, Peucat J J. Geochronological evidence for reworking of Archaean terrains during the early Proterozoic (2.1 Ga) in the western Côte d’Ivoire (Man Rise–West African Craton) [J]. Precambrian Research, 1997, 86: 177–199.
- [17] Egal E, Thieblemont D, Lahondere D, et al. Late Eburnean granitization and tectonics along the western and northwestern margin of the Archean Kenema–Man domain (Guinea, West African Craton) [J]. Precambrian Research, 2002, 117: 57–84.
- [18] Cohen H A, Gibbs A K. Is the equatorial Atlantic discordant [J]. Precambrian Research, 1988, 42: 353–369.
- [19] Steyn J G. Structural geology and controls of gold mineralization in the Siguiri Mine, Guinea, West Africa [D]. University of Stellenbosch, 2012.
- [20] Dallmeyer R D, Caen–Vachette M, Villeneuve M. Emplacement age of post tectonic granites in southern Guinea (West Africa) and the peninsular Florida subsurface: implications for origin of southern Appalachians exotic terranes [J]. Geological Society of America Bulletin, 1987, 99: 87–93.
- [21] Villeneuve M, Bellon H, Corsini M, et al. New investigations in southwestern Guinea: consequences for the Rokelide belt (West Africa) [J]. International Journal of Earth Sciences, 2015, 104 (5): 1267–1275.
- [22] 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.
- [23] 华磊, 陈其慎, 邢佳韵, 等. 几内亚矿业开发形势及投资前景 [J]. 中国矿业, 2017, 26(11): 103–107.
- [24] 元春华, 刘大文, 连长云, 等. 几内亚地质矿产与矿业开发 [M]. 北京: 地质出版社, 2017.
- [25] Sidibe M, Yalcin M G. Petrography, mineralogy, geochemistry and genesis of the Balaya bauxite deposits in Kindia region, Maritime Guinea, West Africa [J]. Journal of African Earth Sciences, 2019, 149: 348–366.
- [26] Wright J B. Geology and Mineral Resources of West Africa [M]. London: George Allen & Unwin, 1985.
- [27] Herrington R J, Rarris C J, et al. Genesis of the Pic de Fon Iron Oxide Deposit, Simandou range, Republic of Guinea, West Africa [J]. Economic Geology, 2008, 15: 339–360.
- [28] Morris R C. A textural and mineralogical study of the relationship of iron ore to banded iron–formation in the Hamersley iron province of Western Australia [J]. Economic Geology, 1980, 75: 184–209.
- [29] Lebrun E, Miller J, Thébaud N, et al. Structural controls on an orogenic gold system: the world–class Siguiri gold district, Siguiri Basin, Guinea, West Africa [J]. Economic Geology, 2017, 112: 73–98.
- [30] Lebrun E, Thébaud N, Miller J, et al. Geochronology and lithostratigraphy of the Siguiri district: implications for gold mineralisation in the Siguiri Basin (Guinea, West Africa) [J]. Precambrian Research, 2016, 274: 136–16.
- [31] Gregory J R. Lateritization and bauxitization Events [J]. Economic Geology, 2010, 105: 655–667.
- [32] Bogatyrev B A, Zhukov V V, Tsekhovskiy Y G. Formation conditions and regularities of the distribution of large and superlarge bauxite deposits [J]. Lithology and Mineral Resources, 2009, 44: 135–151.
- [33] Zhang R L, Gong E P, Wang G K, et al. Mineralization Patterns and Conditions of Lateritic Gibbsite Bauxite in Guinea [J]. Advances in Geoscience, 2018, 1: 38–48.
- [34] 朱学忠, 李彬, 闫绍波. 红土型铝土矿赋矿岩系特征探讨 [J]. 西部探矿工程, 2015, 4: 103–105.
- [35] Retallack G J. Lateritization and Bauxitization Events [J]. Economic Geology, 2010, 105(3): 655–667.
- [36] 郑辉, 葛志超, 秦术凯, 等. 加纳阿瓦索红土型铝土矿床地球化学特征及成矿作用研究 [J]. 地质找矿论丛, 2017, 32(2): 334–339.
- [37] 李启津. 铝土矿成矿理论研究进展及三水型铝土矿找矿方向 [J]. 轻金属, 1989, 7: 1–3.
- [38] 孙朋飞, 江思宏, 薛春纪, 等. 西澳 Darling Range 地区铝土矿特征及成矿控制因素 [J]. 地质论评, 2016, 62(1): 171–186.
- [39] 凌坤跃, 朱笑青, 王中刚, 等. 中国南方红土型铝土矿的找矿远景与战略选择 [J]. 轻金属, 2013, 4: 7–12.
- [40] Hagemann S G, Angerer T, Duuring P, et al. BIF–hosted iron mineral system: a review [J]. Ore Geology Reviews, 2016, 76: 317–359.
- [41] Johnston L A. Steel pipe dreams: A China–Guinea and China–Africa lens on prospects for Simandou’s iron ore [J]. The Extractive Industries and Society, 2017, 4(2): 278–289.
- [42] Berge J W. Geology, Geochemistry and origin of the Nimba itabirite and associated rocks, Nimba County, Liberia [J]. Economic Geology, 1974, 69: 80–92.
- [43] 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.
- [44] Markwitz V, Hein K A, Miller J. Compilation of West African mineral deposits: Spatial distribution and mineral endowment [J]. Precambrian Research, 2016, 274: 61–81.
- [45] 杨崇科, 卢欣祥, 杨延伟, 等. 河南新蔡 BIF 铁矿床地球化学特征及矿床成因 [J/OL]. 地质通报, 2020. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4648.P.20200514.1501.002.html>.
- [46] Hagemann S, Rosière C A, Gutzmer J, et al. Banded Iron Formation–Related High–Grade Iron Ore [M]. Littleton: Society of Economic Geologists, 2008.
- [47] 孙宏伟, 王杰, 任军平, 等. 中非加丹加–赞比亚多金属成矿带成矿演化及找矿潜力分析 [J]. 地质科技情报, 2019, 38(1): 121–131.
- [48] 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.
- [49] 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(1): 123–143.
- [50] 李强峰, 丛培章, 聂凤军, 等. 芬兰北部金矿床产出环境、地质特征和成矿作用 [J]. 地质通报, 2015, 34(6): 1133–1145.
- ① 几内亚矿业和地质部. 矿业数据年报. 2020.
- ② 力拓集团. 年度战略报告. 2020.
- ③ 盎格鲁阿善提公司. 年度运营报告. 2020.