

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2023.08.003

西非铁矿资源特征及成矿规律

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(中南地质科技创新中心), 湖北 武汉 430205

Wuhan Center, China Geological Survey(Central South China Innovation Center for Geosciences), Wuhan 430205, Hubei, China

摘要:近年来,伴随着西非铁矿找矿工作的不断突破,其资源潜力再次得到国际矿业巨头的关注。中国是全球最大的铁矿资源消费国,研究西非铁矿的资源特征及成矿规律,对于深入了解西非铁矿资源潜力及未来与中国的资源合作部署具有重要意义。系统总结西非铁矿成矿地质背景及资源禀赋特征,梳理西非 10 个主要产铁国的 91 处铁矿山信息,将西非铁矿成因类型分为 BIF(条带状铁建造)型、矽卡岩型、岩浆型、红土型、鲕状矿石型。根据铁矿产出的地质背景和空间位置,划分了 20 个 IV 级成矿区带。在此基础上,总结了西非铁矿的时空分布规律:西非铁矿空间上分布广泛,但具有明显的丛聚性分布特征,且不同成因类型的铁矿分布也有所不同。BIF 型铁矿主要产于古老地盾区;红土型铁矿多伴生 BIF 存在,与热带气候密切相关;矽卡岩型铁矿主要分布于泛非活动带与沉积盆地的边界位置;岩浆型铁矿主要赋存在分异性良好、以辉长岩为主的基性岩体中;鲕状型铁矿主要产于中—新生代盆地中。

关键词:铁矿;资源特征;成矿规律;西非

中图分类号:P618.31 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2023)08-1276-15

Jiang J S, Hu P, Zhang H K, Cheng X, Wang J X, Xiang W S. The iron ore resource feature and metallogenic regularity in western Africa. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(8): 1276-1290

Abstract: In recent years, with the continuous breakthrough in the iron ore prospecting work of western Africa, its resource potential has once again attracted the attention of international mining giants. China is the world's largest consumer of iron ore resources. Thus, the resource characteristics and mineralization regularity of western Africa iron ore are summarized, which could help understand the iron ore resources potential of western Africa and provide basis for the future collaborative deployment of resources. This paper systematically summarizes the iron ore metallogenic geological background and resource endowment characteristics in western Africa. Based on the information of 91 iron ore deposits in 10 major iron-producing countries of western Africa, we classified the genetic types of iron ore in western Africa into BIF (Banded Iron Formations) type, skarn type, magmatic type, laterite type, oolitic ore type. According to the tectonic units of iron ore, 20 metallogenic zones have been divided in western Africa. On this basis, we summarized the spatial distribution regularity and temporal distribution characteristics of iron ore in western Africa. The iron ore deposits in western Africa are widely distributed in space, but they have obvious cluster distribution characteristics. The distribution of different genetic types of iron ore deposits are also different. The BIF type iron ore deposits are mainly produced in the ancient shield area. The laterite iron ore deposits are associated with BIF, which are closely related to tropical climate. The skarn type iron ore deposits are mainly distributed in the boundary of the Pan-African active belt and sedimentary basin. The magmatic type iron ore deposits mainly occur in the gabbro with good differentiation. The oolitic iron ore deposits are mainly developed in the Meso-Cenozoic basins.

Key words: iron ore; resource feature; metallogenic regularity; western Africa

收稿日期:2020-12-31; **修订日期:**2021-09-16

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:DD20221802)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,高级工程师,从事境外地质矿产调查与研究工作。E-mail:850044300@qq.com

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

铁在地球中分布广泛,占地壳含量的4.75%,仅次于氧、硅、铝,位居第四。通常情况下,铁与少量的碳制成合金—钢铁,钢铁号称工业的粮食,其强度高,机械性能好,在社会中应用广泛,是不可或缺的基础工业品。然而,由于国内铁矿石资源品质较差,矿石开采成本较高,中国铁矿石主要依赖进口。过去5年,中国的铁矿石进口量不断攀升,从2015年的 9.4×10^8 t增加到2020年的 11.7×10^8 t。短期看,中国铁矿石进口将继续维持高位,中国仍将是全球铁矿石市场的最大买主。但是,由于铁矿石供给主要由淡水河谷、力拓、必和必拓等大型矿业巨头垄断,导致中国钢企在铁矿石价格谈判中丧失话语权。然而,全球铁矿资源相当丰富,具有分布集中、差异产出的特征。全球铁矿主要集中在澳大利亚、俄罗斯、巴西、中国、玻利维亚等国家。以上国家的铁矿储量约占全球总量的69.84%。此外,几内亚、印度、乌克兰、塞拉利昂等国的储量也较丰富。20世纪50年代,非洲大陆几乎没有成型的大型铁矿山,铁矿主要来自淡水河谷、力拓、必和必拓矿业公司的巴西、澳大利亚矿山。为打破这种长期的垄断格局,重新塑造全球铁矿市场的新局面,特别是满足新兴经济体对铁矿的需要,越来越多的国家瞄准了西非铁矿资源。

西非通常指非洲西北部地区,东起乍得湖,西邻大西洋,南濒几内亚湾,北为撒哈拉沙漠。其独特的地理位置和特殊的地质构造演化,使得西非地区铁矿资源在全球占据一席之地。近年来,西非各国内战不再频繁,政治逐渐趋于稳定,矿业投资的热潮逐渐展开。落后的生产力导致西非各国地质勘查程度极低,非传统的铁矿生产国积极勘查开发铁矿资源,因此该地区逐渐成为全球铁矿巨头争相关注的焦点地区。越来越多的证据表明,西非地区未来有可能成为全球铁矿供应的重要来源(刘益康等,2012;张继纯等,2019)。截至目前,西非地区已有多个铁矿项目,较著名的有几内亚西芒杜(Simandou)、塞拉利昂唐克里里(Tonkolili)、利比里亚邦(Bong)、毛里塔尼亚盖勒卜斯(Guelb el Aouj)等铁矿。本文在总结西非铁矿成矿地质背景及成矿地质特征的基础上,初步总结了该区铁矿资源时空分布规律,为后期的地质找矿工作和投资选区提供依据。

1 区域地质背景

西非地处非洲大陆西北部地区,跨越了西非克

拉通、环西非克拉通泛非活动带、环大西洋凹陷盆地等构造单元(图1)。自太古宙以来,经历了一系列的地质构造演化,形成了全球独有的地质景观(高坪仙,1992;Thiéblemont et al.,2001;Milési et al.,2004;Markwitz et al.,2015;胡鹏等,2022)。

西非克拉通作为全球保存最完整的克拉通之一,其东侧毗邻泛非造山带,西侧和南侧濒临海西期的造山活动带及大西洋沿岸的凹陷盆地,北部则靠近阿特拉斯造山带。区内主要发育大面积的太古宙和古—中元古代地层。中元古代(约1.7 Ga)之后,克拉通边缘经受了泛非期和加里东期—海西期热事件改造,使不同时代的盆地沉积物覆盖在早期地层之上,导致前寒武纪岩石地层出露较少。西非克拉通结晶基底广泛出露地表,以发育太古宙、古—中元古代(3.5~1.7 Ga)岩石为主,主体分布于北部的雷圭巴特地盾、南部的马恩—莱奥地盾及中部的凯涅巴和卡伊斯构造窗内。此外,雷圭巴特和马恩—莱奥地盾周缘还分布3个新元古代—新生代沉积盆地,包括雷圭巴特地盾北部的廷杜夫古生代盆地、中部的陶德尼新元古代—古生代盆地及东南部的沃尔特新元古代沉积盆地,分布面积约占整个克拉通的1/2。①雷圭巴特地盾主体由太古宙、古—中元古代岩石构成(Ba et al.,1982)。其中,太古宙岩石地层主要分布于西部,以混合岩、片麻岩、含铁石英岩建造为主。古—中元古代岩石地层则主要分布于中部和东部地区,岩石以火山—沉积变质岩为主。②马恩地盾主体位于西非克拉通西南部,主要由太古宙利昂期(Leonian)(3.5~2.9 Ga)和利比里亚期(Liberean)(2.9~2.5 Ga)岩石组成,基底主要包括花岗岩、混合岩、片麻岩等,表壳岩则由绿岩和变质沉积岩组成,条带状含铁建造为表壳岩系中的特征岩相之一(Egal et al.,2002;Thiéblemont et al.,2004;Rollinson et al.,2016)。③莱奥地盾整个区域被古元古代比里姆(Birimian)岩系覆盖。古元古代末期(约2.0 Ga)发生了埃布尼(Eburnean)运动,使比里姆岩系发生了剧烈褶皱(Block et al.,2016;Grenholm et al.,2019)。上覆的塔克瓦(Tarkwaian)岩石具有磨拉石堆积的特征。④陶德尼盆地位于西非克拉通的中心部位,出露了一套新元古代—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,主要出露地层为寒武系—石炭系。⑥沃尔特盆地是缓倾斜

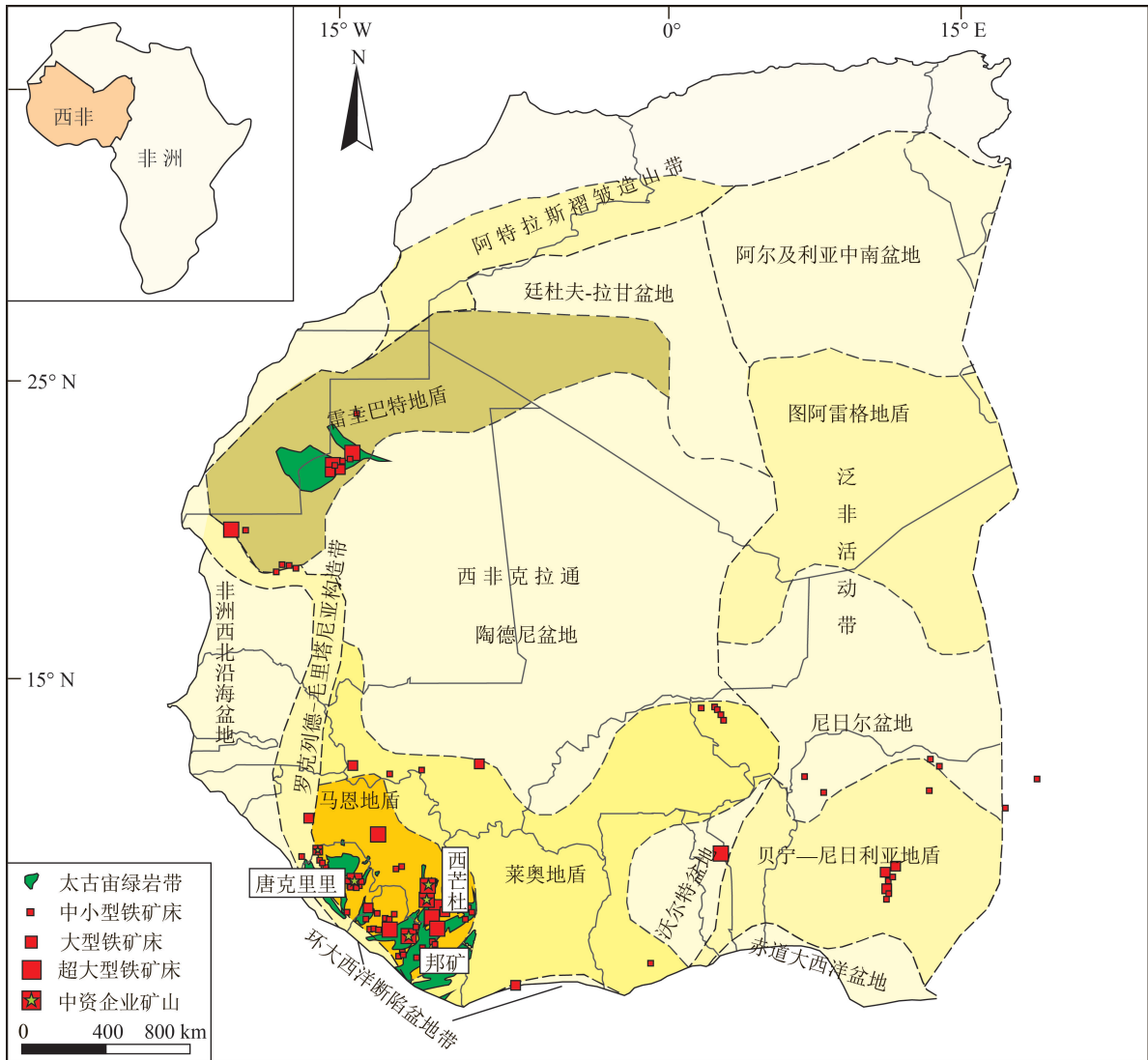


图1 西非构造简要图(据 Markwitz et al., 2015 修改)

Fig. 1 Tectonic map of western Africa

的向斜盆地,其中最古老的沉积物出露在盆地边缘,年轻的沉积物主要位于盆地中央(Jessell et al., 2015)。

环西非克拉通泛非活动带是西非克拉通边缘在新元古代(650~450 Ma)泛非造山期发生的构造岩浆热事件的产物。主要包括:①泛非活动带在西非克拉通西部,主要包括罗克列德(Rokelide)和毛里塔尼亚构造剪切带(Mauritanides)2个部分(Ponsard et al., 1998; Villeneuve et al., 2015),罗克列德剪切带自利比里亚中部向北一直延伸到毛里塔尼亚,然后与北部的毛里塔尼亚剪切带相连接,两者主要为一套火山沉积岩组合。②泛非活动带东

部也发育达美荷剪切带,由地表的沉积地层和新元古代—显生宙早期火山岩组成。③泛非活动带在西非克拉通东部还包括贝宁—尼日利亚地盾、尼日尔盆地、图阿雷格地盾等。贝宁—尼日利亚地盾主要分布在尼日尔、贝宁、尼日利亚和喀麦隆西部地区,包括贝宁褶皱带、冲断带和尼日利亚高级片麻岩序列。图阿雷格地盾主要包括中部和东部一系列麻粒岩和活化的古元古代伊布尼岩石序列组成的基底岩石,以及西部新元古代火山沉积岩序列及相应的钙碱性岩浆活动。尼日尔盆地主要指夹在贝宁—尼日利亚地盾和图阿雷格地盾之间的中生代沉积盆地,西部边缘发育泛非期的花岗岩类。

环大西洋凹陷盆地,主要是指晚三叠世,摩洛哥阿特拉斯山脉西部发生大陆张裂,向南延伸形成的典型的塞内加尔盆地、比里盆地、利比里亚盆地、象牙海岸盆地、达荷美盆地等边缘或发散(大西洋型)盆地。

2 西非铁矿资源特征

为进一步总结西非铁矿资源的分布和区域成矿潜力特征,本文系统梳理了西非 10 个主要产铁矿国家的 91 处矿山资料,发现西非铁矿主要集中在毛里塔尼亚、几内亚、塞拉利昂、利比里亚等国,总资源量达 649.48×10^8 t。伴随着勘探的逐渐深入,相信资源量未来还有很大的增长空间。其中,最引人注目的是几内亚,铁矿石资源量可达 199.47×10^8 t,占据西非铁矿总量的 30.7%。结合前人资料(Milési et al., 2004; Markwitz et al., 2015)及以上数据,总结西非铁矿特征如下。

(1)分布广泛,集中产出。西非铁矿主要呈现出局部相对集中、分布差异性较大的特征。其中,几内亚、塞拉利昂、利比里亚和毛里塔尼亚 4 个国家铁矿最丰富,分布高度密集,而其他国家零星产出(图 2-a)。

(2)类型较多,特色突出。目前,西非已发现的铁矿成因类型相对丰富,BIF 型、红土型矿床、岩浆型、矽卡岩型均有发育。其中,BIF 型及其伴生的红土型矿床占据 90% 以上,且大多数为大型—超大型的铁矿床。其次为岩浆型,主要为与基性—超基性岩相关的铁镍钒钛等矿床。矽卡岩型矿床主要呈小型或矿点发育。

(3)规模和品位变化范围较大。西非铁矿众多,矿床规模大小不等。其中,已有资源量的中大型矿床(大于 1×10^8 t)共计 28 个,占总矿床数量的

30.8%;超大型矿床(大于 10×10^8 t)共计 14 个,占总矿床数量的 15.4%(图 2-b)。在全球排前 50 名的铁矿山中,西非共有 6 个,其中资源量超过 50×10^8 t 的有 2 个,包括塞拉利昂的唐克里里铁矿(127.66×10^8 t),全球铁矿资源量排名第 8 位;几内亚的卡利亚铁矿(57.12×10^8 t),全球铁矿资源量排名第 24 位(S&P Capital, 2021)。西非铁矿品位变化范围大,介于 25.9%~70%之间,主要有 2 个集中分布区间,高品位区间 56%~70%,中低品位区间 25.9%~36%,平均品位为 42.0%,略低于全球铁矿的平均品位(48.3%),但是明显高于中国的铁矿品位(30%~35%;图 2-c)。其中,最高品位的铁矿山为尼日利亚的兰巴(Lamba)和吉丹布祖(Gidan Buzu)铁矿,平均品位均为 70%,但储量仅 0.60×10^8 t 和 0.65×10^8 t;最低品位的铁矿山为几内亚福雷卡里亚铁矿,品位仅 25.9%。另外,由于勘查程度较低及信息不对称,西非许多矿山的品位仍不可知。

(4)矿石成分简单,采选相对方便。目前,大多数西非铁矿多采用传统露天开采模式。尽管西非多数铁矿资源的品位变化较大,但是矿石矿物多以磁铁矿+赤铁矿为主,少量为由于后期热液作用而形成的镜铁矿。目前多数矿山以磁选为主。整体来说,采选矿相对简单,成本较低。

3 西非铁矿类型

目前,多数学者认为,铁矿的成因类型包括以下 6 种:BIF 型、岩浆型、火山成因型、沉积型、接触交代—热液型及红土型铁矿床(程裕淇等, 1976;李厚民等, 2012)。其中,西非铁矿多以 BIF 型(部分顶部伴生红土型铁矿)为主,如几内亚西芒杜铁矿、塞拉利昂唐克里里及利比里亚邦矿等,该类型矿床主要产于太古宙表壳岩的绿岩带内,矿床数量占比

表 1 西非铁矿资源特征

Table 1 The characteristics of iron ore resources in western Africa

国家	几内亚	塞拉利昂	利比里亚	毛利塔利亚	尼日利亚	科特迪瓦	其他国家
储量/资源量/ 10^8 t	199.47	153.43	151.31	91.68	20.45	11.50	20.61
矿床数量	15	10	21	16	16	5	8
大型(> 1×10^8 t)	7	4	4	5	3	2	3
超大型(> 10×10^8 t)	3	2	4	3	0	1	1
品位/%	25.9~65.5	28.2~32	31.3~40.5	31.9~60	31.3~40.5	36.3~40	33.8

注:数据来源为 S&P Capital, 2021 及本次统计

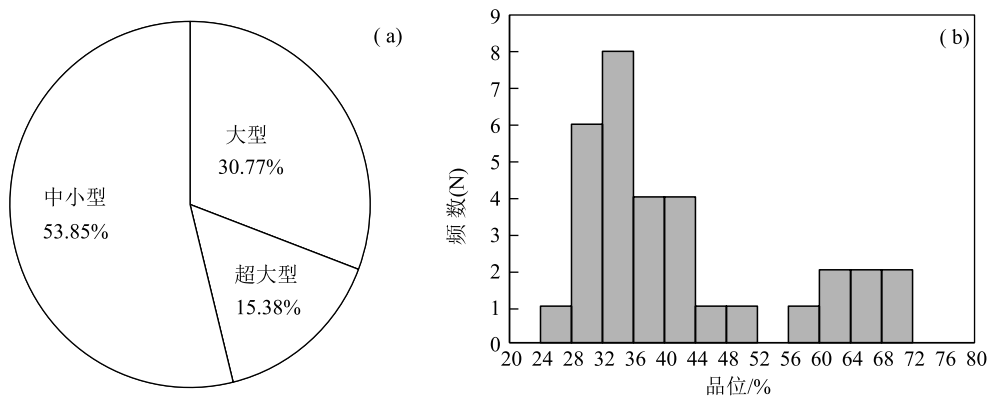


图2 西非铁矿床规模占比(a)和铁矿石品位直方图(b)

Fig. 2 The proportion of iron deposit scale(a) and the histogram of iron ore grade(b) in western Africa

超过 90% (Berge et al., 1974; Herrington et al., 2008; Mansaray et al., 2013; 董少波等, 2016)。此外, 还存在红土型(几内亚科纳里克)、与基性-超基性岩体有关的岩浆型(周久龙等, 2013)、接触交代型(矽卡岩型)(赵一鸣, 1990)及沉积型(鲕状型)(Imrana et al., 2017)铁矿床, 相对 BIF 型及红土型铁矿床而言, 其他 3 种类型铁矿床规模一般较小。

3.1 BIF 型铁矿床

3.1.1 矿床基本特征

BIF 型铁矿指赋存于前寒武纪沉积岩的条带状含铁建造(Banded iron formation, 简称 BIF)经历了不同程度的变质作用后, 形成的具有工业价值的铁矿床。BIF 主要由石英和铁氧化物构成的黑白相间、具条带状特征的含铁硅质岩石, 除石英、磁铁矿、赤铁矿外, 还包括少量的铁硫化物(黄铁矿、磁黄铁矿)、富铁硅酸盐(黑硬绿泥石、铁闪石等)、富铁碳酸盐(铁白云石、菱铁矿等)等(沈宝丰, 2019; 杨崇科等, 2022)。由于后期变质作用的影响, BIF 通常具有从绿片岩相到麻粒岩相不同变质程度的特征。BIF 型铁矿储量占全球总储量的 80% 以上, 是全球铁矿石的最主要来源, 具有十分重要的经济意义。

BIF 型铁矿主要分为 2 种类型: 阿尔戈马型和苏必利尔型(李厚民等, 2012; 张招崇等, 2021)。阿尔戈马型, 以太古宙克拉通基底最发育, 主要形成于深海环境, 与洋中脊扩张等海底火山热液活动密切相关(Huston et al., 2004), 矿床主要发育在基性火山岩与酸性火山岩或者沉积岩过渡部位(所谓的绿岩带部分)。苏必利尔型铁矿主要产于古-中元

古代(姚培慧, 1993), 形成于靠近大陆边缘的大陆架、陆台等浅海环境, 以及陆内克拉通沉积盆地环境, 由深大断裂活动等触发含铁物质随着洋流上升进而沉淀形成, 与火山活动不密切, 更多的产于成熟的陆相沉积物(细碎屑岩-碳酸盐岩)。本文的西非 BIF 型铁矿, 多数成因上表现为苏必利尔型: ①西非 BIF 型铁矿主要赋存于新太古代-古元古代地盾, 与变质的火山-沉积地层有关, 尤其是绿岩带。该绿岩带主要是一套发生变质的基性火山-沉积岩, BIF 的变质程度自绿片岩相-麻粒岩相均有发育。②西非铁矿多产于稳定克拉通内部, 经过后期构造运动后在有利的环境中沉积下来, 形成了最初的结晶基底。③西非铁矿大多数以磁铁矿为主, 矿石品位属于中低品位(30%~45%), 与大多数苏必利尔型铁矿的矿石矿物组成及含量较一致。④西非铁矿的变质程度较深, 绿片岩相-麻粒岩相均有。

3.1.2 典型矿床

(1) 利比里亚邦矿

邦州铁矿作为西非典型的 BIF 型铁矿代表, 在西非铁矿中占有举足轻重的地位。邦矿位于利比里亚邦州的西南地区, 距首都蒙罗维亚直线距离约 78 km, 有铁路直达, 交通相对便利。自 1953 年被美国人通过航磁发现之后, 经过陆续的勘探, 该矿床目前总资源量达 41×10^8 t, 矿石平均品位为 35.8% (中国地质调查局武汉地质调查中心, 2011)。

矿区出露地层主要为前寒武纪沉积变质岩, 自下而上分为 2 个组成部分, 下部为太古宙结晶基底, 上部为沉积盖层, 两者呈不整合接触。结晶基底岩石主要为黑云片麻岩、混合片麻岩、花岗片麻岩等,

广泛出露于矿区各个角落。上部沉积盖层为铁矿的主要赋矿层位,岩性包括角闪黑云母石英岩、铁英岩、石英黑云母片岩、角闪黑云母片岩等。矿区内褶皱构造最发育,邦山复向斜作为矿区内的主要褶皱构造,主体呈近东西向,长约 30 km,宽 400~480 m,控制了矿体的空间展布;断层仅在亚维 I 区东段出现。区内岩浆活动不发育,仅见少量变粒玄岩和伟晶岩脉出露。区内变质作用较强,绿片岩相—麻粒岩相均有出现。

矿区内主要发育 5 个矿体:邦矿体、北部矿体、南部 1 号矿体、南部 2 号矿体与南部 3 号矿体(图 3)。其中,主矿体为邦矿体,其余矿体规模较小,为次要矿体。邦矿体产于邦山复向斜内,其形态和展布严格受邦山复向斜的控制,呈不规则的条带状,矿体较连续,延伸长度可达 35 km。邦矿体在西部主要呈近东西向展布,向邦峰矿段和嘎玛矿段逐渐变为北北东向,整个邦矿体近似直立。矿石矿物主要为磁铁矿和赤铁矿,次为假象赤铁矿和镜铁矿。脉石矿物主要为石英、微斜长石、黑云母、斜长石等。

王忠等(2013)研究表明,邦矿中的铁质很可能来源于太古宙海底岩浆活动,岩浆活动加热引起深部富铁溶液向浅部运移,并在有利的环境中沉积下来形成最初的结晶基底(包括含铁石英建造)。Liberian 造山运动之后,由于形成了稳定的地体,区内开始发生漫长的风化剥蚀作用,铁质以胶体的形式经较长距离搬运至近海沉积下来,并产生初步富集。后期由于不断的构造地质演化作用,含铁建造不断经历高温高压变质作用,含铁矿物进一步富集,最终形成有工业意义的铁矿。

(2) 塞拉利昂唐克里里铁矿

唐克里里铁矿位于塞拉利昂中东部苏拉山区,距离该国佩佩尔港口约 220 km,位置优越。该矿山最早为非洲矿业公司拥有。其后,山东钢铁集团出资收购中国铁路物资总公司参股唐克里里铁矿 15% 的股权,并于 2015 年收购非洲矿业公司剩余唐克里里铁矿 75% 的股权,成为第一大股东(其余 10% 为塞拉利昂政府所有)。2019 年 6 月 4 日,塞拉利昂新政府总统比奥叫停中国山钢唐克里里、美国马兰帕铁矿等大型铁矿。2020 年,在中国驻塞拉

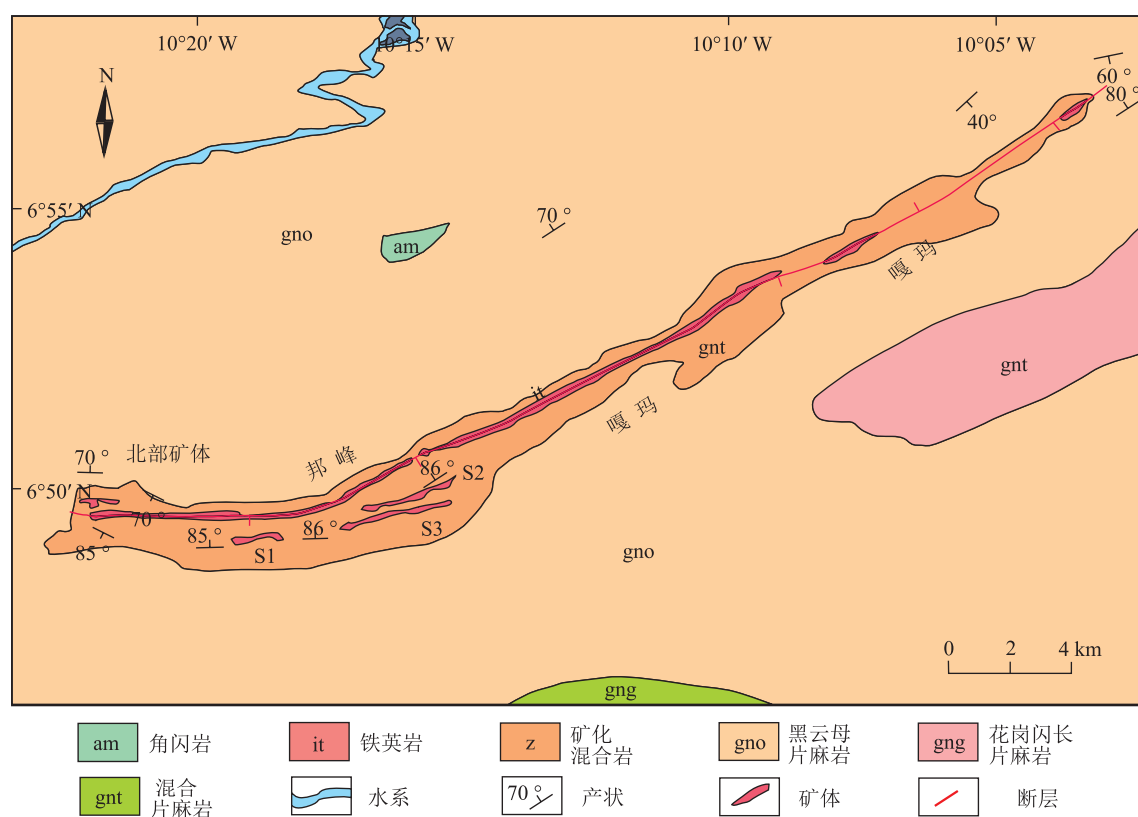


图 3 利比里亚邦矿矿区地质图

Fig. 3 Geological map of Bang mine area in Liberia

利昂大使馆的协调下,正式转给中国庆华集团。

唐克里里铁矿位于塞拉利昂太古宙苏拉山绿岩带内,大地构造隶属西非克拉通马恩地盾区。该克拉通自中生代以来被大西洋撕开,形成了现今的西非克拉通和南美北部的圭亚那地盾。区内自太古宙以来,经历了3次著名的造山运动:利昂(Leonean,约3.0 Ga)、利比里亚(Liberia,约2.7 Ga)和埃布尼(Eburian,约2.0 Ga)造山运动(Grenholm et al., 2014; 胡鹏等, 2022)。矿区内主要的含铁岩石类型为唐克里里组的角闪岩、凝灰岩和基性火山岩,岩石组成在垂直方向上(自下而上)分别为基性火山岩、凝灰岩、角闪岩。成因上,唐克里里铁矿主要为BIF型铁矿及上部少量的红土型铁矿,火山岩浆作用与铁成矿作用密切相关,属于典型的阿尔戈马型。

矿区内包括四大矿体:辛比利、马兰庞、南巴拉和卡萨弗尼(图4)。矿体自上而下为:顶部的硬化硬壳(红土)到底部风化BIF和原生BIF型铁矿。最顶部的红土型铁矿主要为表生的氧化铁富集而成,呈毯状,主要由磁铁矿发展为赤铁矿,再发展为针铁矿和褐铁矿。矿体下部为三芬(Sonfon)组角闪岩、角闪岩片岩、千叶岩和角闪岩,其形成与玄武岩熔岩流有关(Frikken et al., 2006)。唐克里里铁矿资源量达 127.6×10^8 t,矿石品位31.27%。其中,直运型赤铁矿(DSO) 1.3×10^8 t,平均品位58.1%;红土型矿石 11.2×10^8 t,品位40%;磁铁矿 115×10^8 t,平均品位30.1%,是目前全球最大的单体磁铁矿,且实行露天开采。但是,由于大部分都是红土型矿石和磁铁矿,品位较低,其中红土型矿石品位为40%,磁铁矿平均品位30.1%,需要选矿才能利用,选矿采用

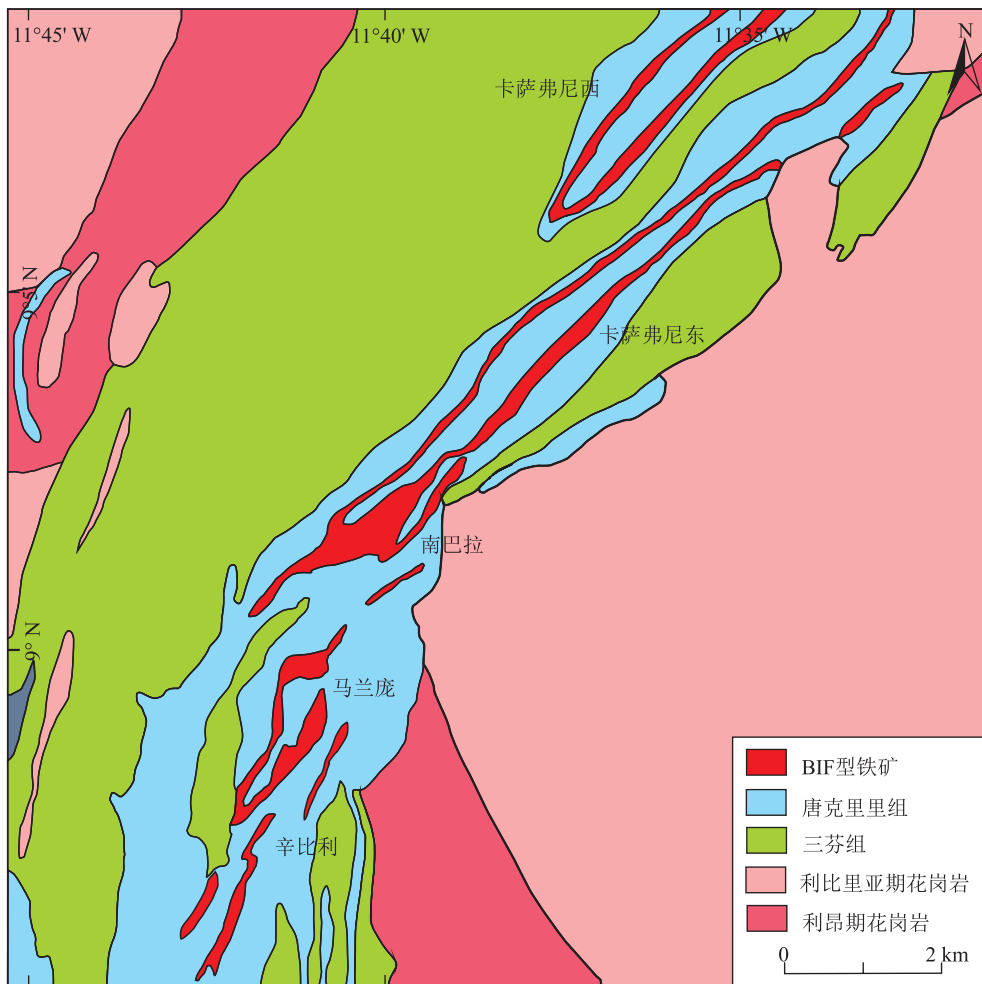


图4 塞拉利昂唐克里里矿区地质图(据 Mansaray et al., 2013 修改)

Fig. 4 Geological map of Tonkolili mine area in Sierra Leone

“洗矿分级-粗粒球磨-中矿再磨-磁选-重选-反浮选”工艺流程,技术难点在于三氧化二铝含量高,难磨难选,选别工艺流程复杂。

(3) 几内亚西芒杜铁矿

1997 年,力拓公司(Rio Tinto)的子公司辛费尔公司(Simfer S.A.)首次发现了几内亚西芒杜铁矿(Simandou)。该矿位于几内亚东南部,距离首都科纳克里约 650 km 处的西芒杜山脉,核心矿区面积 738 km²(图 5)。西芒杜铁矿可分为南、北 2 段;其中北段包括 1、2 号 2 个区块和 1 个规模较小的佐高塔铁矿(Zogota);南段包括 3、4 号 2 个区块(图 5)。西芒杜铁矿蕴藏着全球最丰富的未开采的铁矿石,这里被国际矿业界视为目前全球储量最大、品质最高的尚未开发的铁矿,一直以来是众多国际矿业巨头争夺的“大蛋糕”,引发了长达十几年的权属纠纷。目前,西芒杜铁矿北段 1、2 号区块为赢联盟所拥有,赢联盟占 85% 的股份,几内亚政府占 15% 的干股。西芒杜 3、4 号区块则为力拓与中铝共同开发,股权情况是力拓公司 45%,中铝公司 40%,几内亚政府 15%。

西芒杜铁矿大地构造隶属西非克拉通的马恩地盾。区域上发育大面积的太古宙马恩地盾古老岩石地层,根据岩性特征大体分为 2 类:基底片麻岩-混合岩类和变质表壳岩类。基底主要为以石英、长石、黑云母、角闪石为主的混合岩和片麻岩。变质表壳岩,条带状含铁建造是该岩系中的特征岩相之一,通常可见含磁铁矿石英岩、含氧化铁带的绿岩等,经淋滤富集后的铁可达 65%。其中,西芒杜矿区内发育大量的绿岩带,又称为西芒杜组,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的界线,而二者的内部层序难以辨识。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。西芒杜是世界级的大型优质露天赤铁矿,西芒杜 1、2 号矿山总资源量可达 36×10^8 t,西芒杜 3、4 号矿山总资源量可达 27.6×10^8 t,整体矿石品位为 66%~67%,矿山品质居全球前列,其特点是储量大、品质高、矿体集中、埋藏浅、易开采。目前制约其开采的主要因素是交通运输,

赢联盟于 2020 年开始着手西芒杜至科纳克里 650 km 的铁路建设,计划 2025 年竣工。

3.2 其他类型矿床

前已述及,相对于 BIF 型铁矿而言,其他矿床类型占比非常少。

矽卡岩型矿床:在西非,矽卡岩型铁矿主要集中在分布在莱奥地盾西北部的卡伊巴构造窗附近,如法拉梅(Faleme)铁矿(Schwartz et al., 2004)。相对 BIF 型铁矿,该类型矿床数量较少,规模一般较小。

岩浆型铁矿床:又称为钒钛磁铁矿,主要是由于其铁矿物中富含钒和钛。成因上主要与基性、超基性岩浆作用有关,矿体多产于基性杂岩体的裂隙或不同岩浆岩接触带附近。该类型矿床在西非主要分布于布基纳法索东北部的奥尔斯(Oursi)地区(Neybergh et al., 1980),矿床规模较小。

红土型铁矿:独特的地理位置和特殊的气候演变,使西非铁矿在中新生代表层形成了富铁风化壳。这主要是由于中新生代以来,西非处于炎热潮湿的热带雨林气候,克拉通及其边缘地壳稳定,地表剥蚀速率较慢,许多低品位铁矿床在原地进一步发生化学风化作用,经过风化淋滤作用,原来的贫铁矿进一步富集。红土型表壳内发育磁铁矿、赤铁矿、针铁矿、硅质、三水铝石等矿物组合(元春华等, 2017)。在西非,几内亚卡鲁姆矿床已经达到工业利用的价值,但大多数富铁红土壳还未被工业利用。

鲕状型铁矿床:作为沉积型铁矿床的一种类型,鲕状型铁矿床在全球均有分布,尤以北半球居多。目前发现的矿床主要是形成于陶德尼盆地马里西部的巴芬(Bafing)铁矿、尼日尔西部的特密特(Termit)铁矿、贝宁坎迪盆地的马迪卡拉(Madekali)铁矿、科特迪瓦莱奥地盾靠近大西洋沿海的莫纳格噶(Monogaga)铁矿,以及尼日利亚 Bida 盆地的口通卡瑞夫(Koton-Karfi)铁矿等。就成矿时代而言,既有中生代白垩纪,也有新生代渐新世等(Imrana et al., 2017)。

4 成矿规律初探

4.1 空间分布规律

由于西非整体地质工作程度较低,发现的铁矿床数量有限(胡鹏等, 2021;任军平等, 2021),因此,本文统计西非已有的铁矿床,结合它们的空间产出位置,初步总结西非铁矿的空间分布规律。西非铁

矿空间上分布广泛,但具有明显的丛聚性分布特征,且不同成因类型的铁矿分布也有所不同。数量最多、规模最大的 BIF 型铁矿,主要产于古老地盾区;红土型铁矿多伴生 BIF 存在,与热带气候密切相关;矽卡岩型铁矿主要分布于泛非活动带与沉积盆地的边界位置;岩浆型铁矿主要赋存在分异性良好、以辉长岩为主的基性岩体中;鲕状型铁矿主要产于中—新生代盆地中。西非铁矿隶属冈瓦纳成矿域,跨越了西非克拉通和泛非活动带 2 个成矿省。涉及马恩地盾、雷圭巴特地盾、莱奥地盾、陶德尼盆地、罗克列德—毛里塔尼亚构造带、尼日尔盆地、贝宁—尼日利亚地盾 8 个Ⅲ级成矿带(图 6)。

4.1.1 马恩地盾

就铁矿床数量和规模而言,西非克拉通南部马恩地盾最突出,包括几内亚、利比里亚、塞拉利昂、科特迪瓦等国家。马恩地盾已有铁矿床数量约占西非铁矿的 58.2%,但总资源量占西非铁矿的 83.7%,矿床类型以 BIF 型铁矿为主,规模以大型—超大型为主,该成矿带又可以进一步划分为 8 个铁矿带。

(1) 卡里亚(Kalia)—凯鲁阿内(Keroune)铁矿带(Ⅳ-1),位于几内亚南部法拉纳和达博拉区,总体呈北西向展布,与区域构造线方向一致。矿床类型 BIF 及伴生的红土型铁矿为主(华磊等,2017)。

(2) 唐克里里铁矿带(Ⅳ-2),位于塞拉利昂中西部的苏拉山—坎格瑞丘陵多金属成矿带内,是塞拉利昂铁矿发育最集中区,受新元古代泛非造山运动的影响,该带整体展布方向为北北东向。矿床类型以 BIF 及伴生的红土型铁矿为主(中色地科矿产勘查股份有限公司,2013;董少波等,2016a,b;曾瑞垠等,2016)。

(3) 巴格拉山铁矿带(Ⅳ-3),位于塞拉利昂东部与利比里亚接壤部位,属塞法杜—凯内马金刚石及多金属成矿带,空间展布为北北东向,铁矿成因类型主要为 BIF 型(Goodenough et al.,2018)。

(4) 西部集群(Western Cluster)—沃洛吉西山(Wologisi Range)铁矿带(Ⅳ-4)位于利比里亚西部山区,其整体展布为近北东向,矿床类型以 BIF 型为主,主要产于太古宙西部集群绿岩带中。

(5) 邦山铁矿带(Ⅳ-5),位于利比里亚中部地区,主要沿北东向的邦山分布,发育邦矿、格巴姆嘎(Gbamga)等矿床,成因类型以 BIF 型铁矿为主。

(6) 波波克里克(Bobo Creek)铁矿带(Ⅳ-6),在空间上呈近北东向展布,发育波波克里克(Bobo Creek)、特培塔(Tepeta)等中大型铁矿,以 BIF 型铁矿为主。

(7) 宁巴—西芒杜铁矿带(Ⅳ-7),跨越了利比里亚和几内亚,在空间上近南北向展布,发育宁巴、利比里亚矿业、西芒杜等世界级的超大型铁矿,矿石品位高,成因类型以 BIF 为主,在上部伴生少量红土型矿床。

(8) 普图(Putu)—鎬山(Mount Gao)铁矿带(Ⅳ-8),自利比里亚普图矿山向北东向延伸一直到科特迪瓦鎬山矿床,与区域的构造线延伸方向一致。多数矿床均产于太古宙绿岩带中,矿床规模较大,以 BIF 型矿床为主。此外,在科特迪瓦马恩地盾与莱奥地盾边界缝合带中,发育少量与基性—超基性岩相关的钒钛磁铁矿床。

4.1.2 雷圭巴特地盾

雷圭巴特地盾位于西非克拉通西北部,跨越了毛里塔尼亚和西撒哈拉。其中,雷圭巴特地盾西部以发育太古宙地层为主,与马恩太古宙地盾相似。目前,在毛里塔尼亚发现了一批世界级的超大型铁矿,由此奠定了其在西非铁矿中的地位。按照铁矿的空间分布特征可划分为:①盖勒卜斯(Guelb el Aouj)—布米毛里塔尼亚(Bumi Mauritania)铁矿带(Ⅳ-9),位于毛里塔尼亚西北部的提里斯宰穆尔省,呈北北东展布,矿床规模较大,总资源量达 53×10^8 t,成因以 BIF 型铁矿为主。②莱布赛尼亚(Lebtheinia)—塔玛勾特(Tamagot)铁矿带(Ⅳ-10),位于毛里塔尼亚西南部,呈北西向展布,且向西到西撒哈拉地区也有延伸,成因类型以 BIF 型为主。

4.1.3 莱奥地盾

莱奥地盾位于西非克拉通南部,以发育绿岩带金矿著名,相比而言,铁矿发育较少。根据铁矿的空间分布特征,可进一步划分为:①法拉梅(Faleme)铁矿带(Ⅳ-11),位于塞内加尔东南部的凯古杜—卡涅巴构造窗内,发育大量的古元古代比里姆超群。该带存在 1 处大型前寒武纪矽卡岩型铁矿床——法拉梅铁矿,矿床的形成与古元古代闪长质岩浆岩上侵接触交代比里姆超群碳酸盐地层有关。②提伊地阿(Tin Edia)—勾巴(Gouba)铁矿带(Ⅳ-12),位于布基纳法索东北部乌尔西地区,周围发育多个古元古代钒钛磁铁矿床,规模不大,长度为几米到几

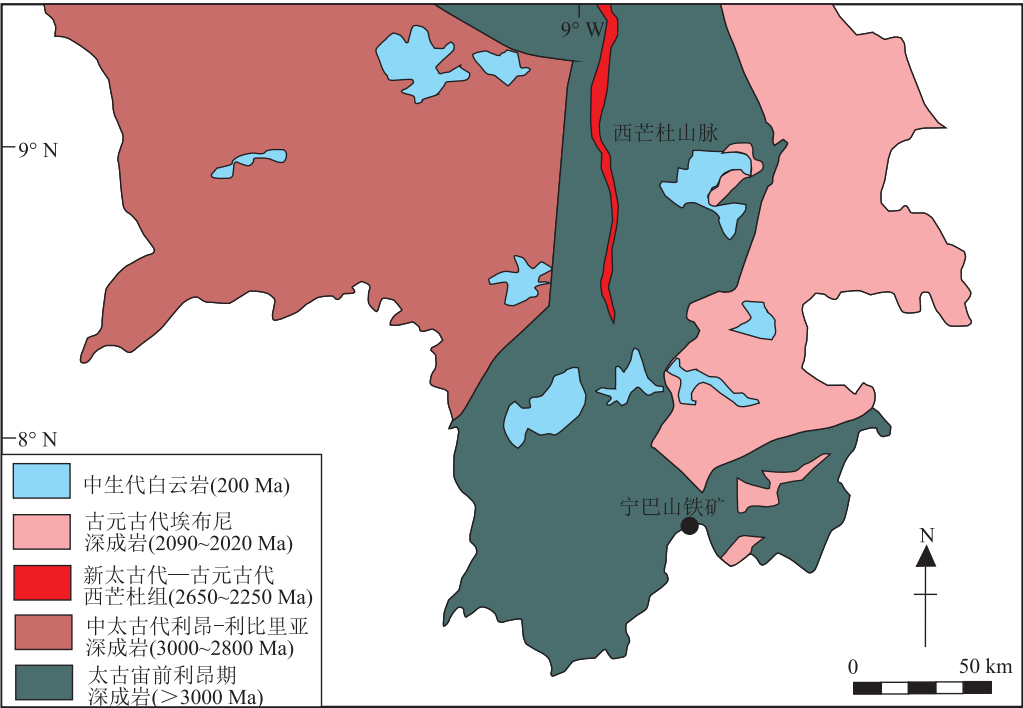


图 5 几内亚西芒杜区域地质简图(据 Herrington et al.,2008 修改)
Fig. 5 Geological map of Simandou area in Guinea

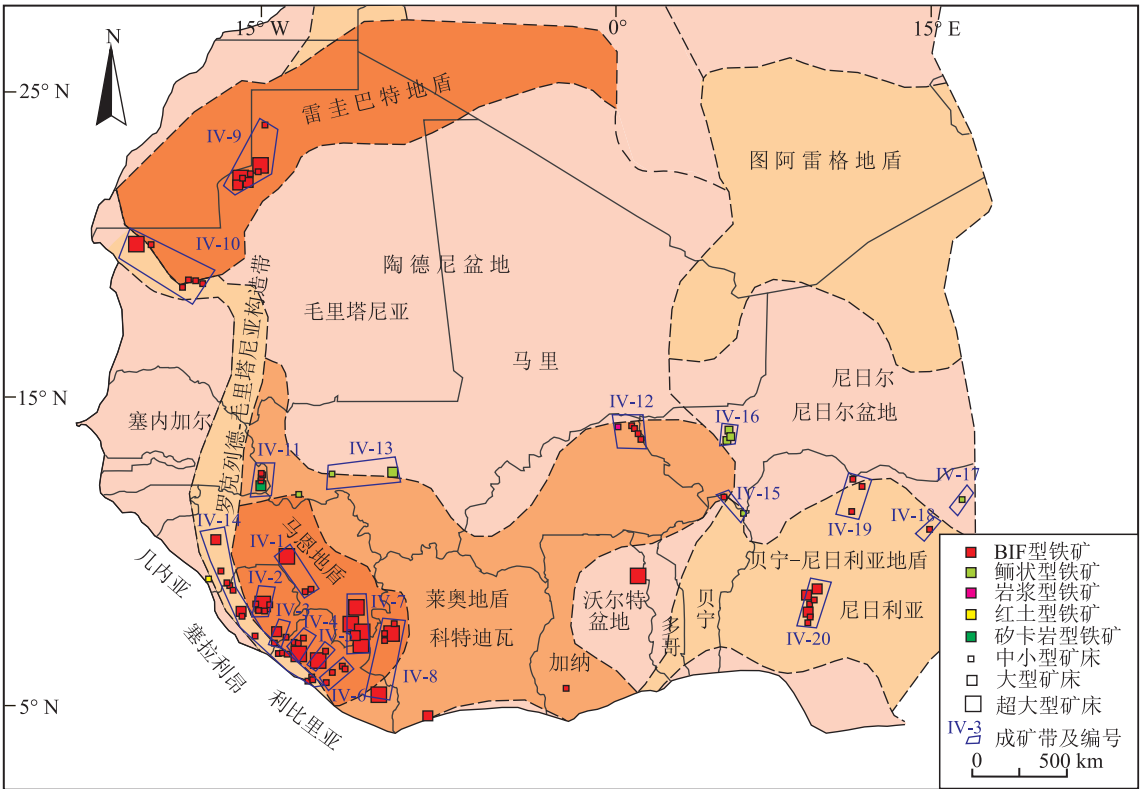


图 6 西非铁矿成矿带划分图
Fig. 6 Division of iron metallogenic belt in western Africa

百米。此外,在科特迪瓦圣佩德罗港口附近,发育大型的莫纳格噶(Monogaga)铁矿(1×10^8 t),主要形成于中新世—上新世,矿床类型为鲕状型;而在加纳西部的古元古代比里姆超群的绿岩带,还发育典型的BIF型矿床——欧庞曼斯(Opon Mansi)铁矿。

4.1.4 陶德尼盆地

目前陶德尼盆地发现的铁矿主要集中在马里西部,以提恩法拉(Tienfala)-巴芬(Bafing)铁矿带(IV-13)为特征,类型以中—新生代鲕状型(沉积型)铁矿为主,最大的是Bal铁矿床,储量约为 1.46×10^8 t,矿石品位为50%。

4.1.5 罗克列德-毛里塔尼亚构造带

该构造带主要沿西非克拉通西部边缘呈狭长条带状分布,自几内亚南部福雷卡里亚向南经过塞拉利昂一直延伸到利比里亚布坎南地区,长约700 km,发育大量的铁矿,尤以福雷卡里亚(Forecariah)-马兰帕-布坎南铁矿带(IV-14)著名(Kali et al., 2016)。这些铁矿在空间上呈近北西向展布,主要产于太古宙绿岩带内,由于受到泛非构造运动影响,铁矿进一步富集,而中新生代受风化剥蚀等作用影响,形成了当今的表生红土型铁矿、底部BIF型铁矿。

4.1.6 达荷美剪切带

达荷美剪切带位于西非克拉通东部,作为西非克拉通与泛非活动带的分界线,是泛非作用下构造剪切作用的产物。目前,在该带仅发现了位于加纳北部的舍尼山附近的舍尼山(Sheini Hills)铁矿,矿床赋存于前寒武纪Buem含铁建造中,为典型的BIF型矿床,资源量达 13.2×10^8 t,矿石矿物以赤铁矿+磁铁矿,矿石品位为33.8%(Delali et al., 2014)。

4.1.7 尼日尔盆地

尼日尔盆地主体位于尼日尔国家,少量跨越了贝宁、尼日利亚、马里等地区,以发育中新生代沉积物为主。盆地内发育少量的沉积型鲕状铁矿床,可分为:①洛木宝(Loumbou-Loumbou)-马迪卡拉(Madekali)铁矿带(IV-15),主体位于贝宁东北部坎迪盆地,矿床主要产于渐新世大陆终端组的铁质砂岩内。②特密特(Termit)-克楼(Kollo)铁矿带(IV-16),位于尼日尔西部的新生代沉积盆地内,包括Ader-Doutchi、Termit、Agadem-Massifs、Kollo等矿床。③吉甸布祖(Gidan Buzu)铁矿带(IV-17),位于尼日利亚东北部地区,区域上出露大面积的新

生代盆地沉积物,发育许多小型铁矿点。

4.1.8 贝宁-尼日利亚地盾

主要分布在贝宁、尼日利亚和喀麦隆西部地区,根据已有矿床的空间分布特征,可进一步分为:①兰巴(Lamba)铁矿带(IV-18),主要产于尼日利亚地盾区,以发育典型的BIF型铁矿为主,代表性矿床为兰巴铁矿,此外还发育众多小型的铁矿点。②贾如瓦(Jaruwa)-吉甸加加(Gidan Jaja)铁矿带(IV-19),位于尼日利亚西北部,矿床主要产于古元古代地盾区,成因以BIF型铁矿为主。③伊塔克佩(Itakpe)-口通卡瑞夫(Koton-Karfi)铁矿带(IV-20),位于尼日利亚中部,矿床主要赋存于新元古代地层,中生代沉积盆地也有少量产出,成因类型以BIF型、鲕状型为主。

4.2 时间分布规律

西非铁矿从太古宙到新生代均有分布,但是,不同时代铁矿的数量、规模及类型明显不同。与空间分布规律特征相似,时间分布规律也具有分布广泛、高度集中的特征,且各类型矿床与不同时代的地质构造背景有密切的成因联系(Villeneuve et al., 1994)。

4.2.1 与新太古代—古元古代构造岩浆事件相关的铁成矿作用

太古宙,西非地区发生了Liberean(2.9~2.8 Ga)造山运动,大量来自地幔的富铁质岩浆喷发至海底,由于缺氧导致铁以二价形式溶解在海水中。2.5 Ga左右,全球大氧化事件使得铁被氧化成三价铁而沉淀于海底,形成了条带状含铁建造,后经过区域变质作用,形成西非太古宙地盾区广泛存在的BIF型铁矿床。该类型矿床主体产于马恩地盾和雷圭巴特地盾,矿床数量多、规模大,矿石矿物以磁铁矿为主。由于BIF矿床在新生代或多或少地受到雨林气候风化淋滤作用的影响(Hagemann et al., 2008),其表层可能伴有红土型铁矿。

在莱奥地盾区,广泛发育一套古元古代比里姆岩(2.3~2.0 Ga)。比里姆岩系中的绿岩带不仅是重要的含金层位,也是BIF型铁矿的含矿层位,如加纳西部的欧庞曼斯(Opon Mansi)铁矿。在2.19~1.8 Ga,西非莱奥地盾区发生了著名的埃布尼造山运动,使太古宙基底岩石、古元古代片岩带和卷入其中的同构造期岩基花岗岩再活化,上升侵位到早期比里姆岩系碳酸盐地层中,形成了矽卡岩型铁矿床,

表 2 西非铁矿主要成矿带划分及其特征
Table 2 Division and characteristics of main metallogenic belts of iron deposits in western Africa

成矿域 (I 级)	成矿省 (II 级)	成矿带 (III 级)	成矿带 (IV 级)	代表性矿床	矿床 类型	主要特征
冈瓦纳 西非克 拉通 马恩地盾			卡里亚 (Kalia) - 凯鲁阿内 (Keroune) 铁矿带 (IV - 1)	卡 里 亚 (Kalia) 、 凯 鲁 阿 内 (Keroune) 、 法拉纳 (Faranah) 铁矿	BIF 型、 红土型	位于几内亚南部,矿床主要赋存于元古代绿岩带内,规模较大,总资源 量达 58×10^8 t, 矿石矿物包括磁铁矿、镜铁矿、赤铁矿等,矿石品位 30.4%
			唐克里里铁矿带 (IV - 2)	唐 克 里 里 (Tonkolili) 、 戈 帕 法 亚 (Gpafaya) 、 马 伦 坡 (Malumpo) 、 索 库亚 (Sokoya) 铁矿	BIF 型、 红土型	位于塞拉利昂中西部苏拉山-坎格瑞丘陵多金属成矿带内,矿床主要赋 存于太古宙绿岩带内,规模不等,赋矿岩石为条带状磁铁矿石英岩,总资源 量超过 128×10^8 t, 矿石矿物以磁铁矿、镜铁矿和赤铁矿为主,矿石品位 30.7%~52.2%
			巴格拉山铁矿带 (IV - 3)	巴 格 拉 山 (Bagla hill) 、 马 洛 河 铁 矿	BIF 型	位于塞拉利昂东部与利比里亚接壤部位,属塞法杜-凯内马金刚石及多 金属成矿带,矿床赋存于新太古代含铁石英岩中,规模一般,矿石矿物以 磁铁矿为主
			西部集群 (Western Cluster) - 沃 洛 吉 西 山 (Wologisi Range) 铁矿带 (IV - 4)	西 部 集 群 (Western Cluster) 、 波 普 鲁 (Bopulu) 、 沃 洛 吉 西 山 (Wologisi Range) 铁矿	BIF 型	位于利比里亚西部地区,矿床多产于太古宙西部集群,规模较大,总资源 量可达 39×10^8 t, 矿石矿物以镜铁矿、赤铁矿和磁铁矿为主,矿石品位为 31% 左右
			邦山铁矿带 (IV - 5)	邦 矿 、 格 巴 姆 嘎 (Gbamga) 铁矿	BIF 型	成矿带沿着利比里亚邦山分布,矿床主要产于太古宙绿岩带内,赋矿岩 石为含铁石英岩,规模大,矿石矿物以磁铁矿为主,矿石品位较低 (35% 左右)
			波波克里克 (Bobo Creek) 铁矿带 (IV - 6)	波 波 克 里 克 (Bobo Creek) 、 特 培 塔 (Tepeta) 铁矿	BIF 型	成矿带主体呈北东向展布,矿床主要赋存于太古宙绿岩带内,以发育中 大型矿床为主,矿石以赤铁矿和磁铁矿为主
			宁巴山-西芒杜铁矿带 (IV - 7)	利 比 里 亚 矿 业 、 宁 巴 、 西 芒 杜 、 佐 戈 塔 (Zogota) 铁矿	BIF 型、 红土型	成矿带跨越了利比里亚和几内亚,近似南北向展布,矿床产于太古宙绿 岩带内,规模巨大,总资源量超过 100×10^8 t, 矿石矿物以赤铁矿和磁铁矿 为主,矿石品位为 30%~65.5%
			普图 (Putu) - 镅山 (Mount Gao) 铁矿带 (IV - 8)	普 图 (Putu) 、 镅 山 (Mount Gao) 、 克 勒豪耶 (Mt Klahoyo) 、 塞格耶山 (Mt Segaye) 铁矿	BIF 型	成矿带跨越了利比里亚和科特迪瓦,整体呈北北东向展布,与区域构造 线方向一致。矿床主要赋存于太古宙绿岩带内,规模变化不等,总资源 量可达 55×10^8 t, 矿石矿物以易选的磁铁矿为主,矿石品位 34%~40%
			盖勒卜斯 (Guelb el Aouj) - 波 米 里 塔 尼 亚 (Bumi Mauritania) 铁矿带 (IV - 9)	盖 勒 卜 斯 (Guelb el Aouj) 、 布 米 里 塔 尼 亚 矿 (Bumi Mauritania) 、 阿斯卡 夫 (Askaf) 铁矿	BIF 型	地处毛里塔尼亚北部太古宙雷圭巴特地盾铁英岩中,矿床规模较大,该 带总资源量可达 53×10^8 t, 矿石矿物主要为磁铁矿,少量以赤铁矿为主, 矿石品位 35.7%~60%

续表 2

成矿域 (Ⅰ级)	成矿省 (Ⅱ级)	成矿带 (Ⅲ级)	成矿带 (Ⅳ级)	代表性矿床	矿床 类型	主要特征
冈瓦纳	西非克拉通	雷圭巴特地盾	莱布赛尼亚(Lebheina)-塔玛勾特(Tamagot)铁矿带(Ⅳ-10)	莱布赛尼亚布铁矿(Lebheina)、塔玛勾特(Tamagot)铁矿、卡欧特(Kaout)铁矿	BIF 型	地处毛里塔尼亚西南部因希里省附近,主要赋存于太古宙雷圭巴特地盾的铁英岩中,规模不等,总资源量约 42×10^8 t,矿石矿物主要为磁铁矿,矿石品位 $31.9\%\sim 35.6\%$
			法拉梅(Faleme)铁矿带(Ⅳ-11)	法拉梅(Faleme)铁矿	磁卡岩型	位于塞内加尔东南部,主要产于西非古元古代比里姆超群内,法拉梅矿床由 9 个主要矿体和 19 个次要矿体组成。2 个外磁卡岩矿体含铁 42%,有 3.2×10^8 t 磁铁矿储量;内磁卡岩带中有 7 个表生富矿体, 3.1×10^8 t 储量,含铁 59%。研究认为是与微闪长岩体有关的接触交代成矿
			提伊地阿(Tin Edia)-勾巴(Gouba)铁矿带(Ⅳ-12)	提伊地阿(Tin Edia)矿、勾巴(Gouba)铁矿	岩浆型	主要产于布基纳法索东北部乌尔西地区、古元古代含磁铁矿辉长岩中,规模较小,长度为几米到几百米,矿石矿物包括含钽的磁铁矿、黄铜矿、赤铁矿、镜铁矿等
			提恩法拉(Tienfala)-巴芬(Bafing)铁矿带(Ⅳ-13)	提恩法拉(Tienfala)、巴芬(Bafing)、巴欧(Bal)铁矿	鲕状型	铁矿资源主要分布在马里西部,矿床多产于中新世代沉积盆地,铁矿床规模较小,品位较低,其中巴欧(Bal)铁矿床储量约 1.46×10^8 t,矿石品位为 50%
	冈瓦纳	罗克列德-毛里塔尼亚构造带	福雷卡里亚(Forcariah)-罗兰(Rokel)、斯尔若姆可(Sieromco)、马兰帕(Marampa)、莫法可瑞克(Mofe Creek)、布坎南(Buchanan)铁矿	福雷卡里亚(Forcariah)、罗兰(Rokel)、斯尔若姆可(Sieromco)、马兰帕(Marampa)、莫法可瑞克(Mofe Creek)、布坎南(Buchanan)铁矿	BIF 型、红土型	成矿带主体沿罗克列德造山带展布,走向为北北西向,自几内亚南部经塞拉利昂,终止于利比里亚。该带上的铁矿主体形成于太古宙绿岩带内,由于新元古代泛非运动的影响,进一步富集,中新世代由于风化剥蚀等作用,形成表生红土型铁矿、底部 BIF 型铁矿。总资源量达 20×10^8 t,以赤铁矿、磁铁矿为主,矿石品位 $25\%\sim 35\%$
			洛木宝(Loumbou)-马迪卡拉(Madekali)铁矿带(Ⅳ-15)	洛木宝(Loumbou)、马迪卡拉(Madekali)铁矿	鲕状型	成矿带主体位于贝宁东北部坎迪盆地,矿床主要产于渐新世大陆终端组的铁质砂岩内,矿床规模一般,总资源量可达 5×10^8 t,平均品位为 56.7%
			阿德尔多特密特(Termite)-克楼(Kollo)铁矿带(Ⅳ-16)	阿德尔多特密特(Ader-Doutchi)、特密特(Termite)、阿加德姆马斯福斯(Agadem-Massif)、克楼(Kollo)、多加凯纳(Dougal Kaina)铁矿	鲕状型	位于尼日尔西部,主要为新生代沉积型鲕状铁矿。其中, Ader-Doutchi 的鲕状铁矿矿石品位 $40\%\sim 50\%$,特密特(Termite)和阿加德姆马斯福斯(Agadem-Massif)铁矿储量为 8×10^8 t,矿床厚度 1~5 m,品位为 $34.7\%\sim 55.4\%$ 。克楼(Kollo)和多加凯纳(Dougal Kaina)铁矿储量为 12×10^8 t,品位为 $46\%\sim 53\%$
			吉甸布祖(Gidan Buzu)铁矿带(Ⅳ-17)	吉甸布祖(Gidan Buzu)铁矿	鲕状型	位于尼日利亚东北部,该区以新生代盆地沉积物和鲕状型铁矿为主,较著名的铁矿为吉甸布祖(Gidan Buzu)铁矿
	泛非活动带	贝宁-尼日利亚地盾	兰巴(Lamba)铁矿带(Ⅳ-18)	兰巴(Lamba)铁矿、贾如瓦(Jaruwa)、吉甸加加(Gidan Jaja)铁矿产(Ⅳ-19)	BIF 型	位于尼日利亚东北部,底部发育贝宁-尼日利亚地盾,上覆为新生代盆地沉积物,主要发育 BIF 型铁矿
			贾如瓦(Jaruwa)-吉甸加加(Gidan Jaja)铁矿带(Ⅳ-19)	贾如瓦(Jaruwa)、吉甸加加(Gidan Jaja)、吉亚扎(Gyaza)铁矿	BIF 型	位于尼日利亚西北部地区,总体呈近东西向展布,与尼日利亚地盾主体构造展布一致,区内主要发育 BIF 型铁矿,规模一般,矿石矿物以赤铁矿、磁铁矿为主,品位为 46%
			伊塔克佩(Itakpe)-口通卡瑞夫(Koton-Karfi)铁矿带(Ⅳ-18)	伊塔克佩(Itakpe)、阿加巴努克(Ajanokoko)、可通卡瑞夫(Koton-Karfi)、阿巴贾(Agbaja)铁矿	BIF 型、鲕状型	位于尼日利亚中部科吉州及周围,出露新元古代贝宁-尼日利亚地盾火山-沉积岩及中生代尼日尔盆地沉积地层,矿床类型既有 BIF 型,又有鲕状型铁矿,总资源量达 18×10^8 t,矿石矿物以磁铁矿、赤铁矿为主,品位 $35.7\%\sim 41.3\%$

如塞内加尔东部莱奥地盾凯古杜-卡涅巴构造窗内的法拉梅砂卡岩型铁矿床。此外,在布基纳法索东北部的乌尔西地区,古元古代辉长岩中发育典型的钒钛磁铁矿矿床(岩浆型铁矿)。相对 BIF 型铁矿,上述 2 种类型矿床数量发育较少。

4.2.2 与新元古代泛非活动相关的铁成矿作用

新元古代(650~450 Ma),西非克拉通周缘发生了广泛的造山运动。此次造山运动是对克拉通基底岩石的进一步活化。在西非克拉通西部的罗克列德造山带,产于太古宙绿岩中的 BIF 型铁矿再次活化,铁矿质发生进一步富集。沿罗克列德造山带分布了大量的超大型铁矿床,如塞拉利昂的马尔帕铁矿;泛非期达美荷构造剪切带的 Buem 地层中也发育了一套含铁建造,形成了规模较大的 BIF 型铁矿,如舍尼山(Sheini Hills)铁矿。在尼日利亚地盾中,也发育了新元古代泛非期活化古老基底进而富集成矿的 BIF 型铁矿。

4.2.3 与中—新生代风化淋滤和沉积作用相关的铁成矿作用

中新生代以来,在尼日尔盆地、陶德尼盆地及大西洋沿岸盆地,发育了少量的鲕状型及红土型铁矿。中新生代西非温暖潮湿的气候,使得原来的含铁基岩发生了风化作用。当气候稳定、剥蚀速率较慢时,在原地风化形成红土型铁帽;剥蚀强烈,加上雨水冲刷淋滤,含铁有用组分以胶体溶液的形式迁移到沉积盆地,沉积形成鲕状型铁矿(Adefila et al., 2013)。

5 结 论

(1)西非铁矿资源成矿地质条件优越,矿床类型较多,矿石储量和品位变化较大,矿石组分简单,易于采选。

(2)西非铁矿床可分为沉积变质型(BIF)、矽卡岩型、岩浆型、鲕状型和红土型 5 种成因类型。BIF 型铁矿数量最多,规模巨大,且上部往往有少量的红土型伴生;矽卡岩型和岩浆型分布较少,集中分布于莱奥地盾;鲕状铁矿石型矿床主要产于沉积盆地。

(3)空间上,西非铁矿具有分布广泛、相对集中的特征,多数矿床产于西非马恩地盾和雷圭巴特地盾西部地区,少量产于罗克列德带的部分地区,其他地区零星出露。

(4)时间上,西非 BIF 型铁矿主体形成于新太

古代—古元古代(2.5~2.0 Ga),部分 BIF 型铁矿于新元古代泛非期(660~550 Ma)得到进一步富集成矿,岩浆型和矽卡岩型铁矿主要形成于古元古代,鲕状型和红土型铁矿主要形成于中新生代。

参考文献

- Adefila I, Adekeye J I D, Bamigboye O S. Mineralogy and geochemistry of Okofi oolitic iron ore deposit, Central Nigeria: Implication for beneficiation[J]. Journal of Mining and Geology, 2013, 49(2): 111-120.
- Ba G A. Contribution a l'etude Geologique et Mineralogique du Giesmentd' Akjoujt, Mauritanie[D]. These de Geologie, Univ. Orleans, 1982: 21-46.
- Berge J W. Geology, geochemistry and origin of the Nimba itabirite and associated rocks, Nimba County, Liberia[J]. Economic Geology, 1974, 69: 80-92.
- 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.
- Cope I L, Wikinson J J, Boyce A 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.
- Delali D. Hydrothermal alteration interpretation of Landsat and Aster data for iron ore detection in the Sheini Area, North Eastern Ghana[D]. University of Ghana, Legon, 2014: 5-64.
- 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]. Precambrian Research, 2002, 117(1): 57-84.
- Frikken P. Marampa and Tonkolili projects, geology and structural mapping[R]. Sierra Leone Diamond Company, 2006: 11-25.
- Goodenough K M, Jones D, Ford J, et al. Geological mapping of Sierra Leone: baseline assessment and next steps[R]. British Geological Survey, 2018: 1-15.
- 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.
- Grenholm M. The Birimian event in the Baoulé Mossi domain (West African Craton)-regional and global context[M]. Lund University, 2014: 65-162.
- Hagemann S, Rosière C A, Gutzmer J, et al. Banded iron formation-related high-grade iron ore[M]. Littleton: Society of Economic Geologists, 2008: 24-26.
- Huston D L, Logan G A. Barite, BIFs and bugs: Evidence for the evolution of the Earth's early hydrosphere[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2004, 220: 41-55.
- Imrana A, Haruna Dr I V. Geology, mineralogy and geochemistry of Koton Karfe Oolitic iron ore deposit, Bida Basin, Kogi State, Nigeria[J]. International Journal of Scientific & Technology Research, 2017, 6(8):

- 415–426.
- Jessell M W, Boamah K, Duodu J A, et al. Geophysical evidence for a major paleochannel within the obosum Group of the Volta Basin, Northern Region, Ghana [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2015, 112: 586–596.
- Mansaray L R, Liu L, Zhou J, et al. Alteration mineral mapping for iron prospecting using ETM + data, Tonkolili iron field, northern Sierra Leone [C]. *Proc. of SPIE*, 2013, 892102: 1–8.
- Markwitz V, Hein K, Jessell M W, et al. Metallogenic portfolio of the West Africa craton [J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 78: 558–563.
- Milési J P, Feybesse J L, Pinna P, et al. Geological map of Africa 1: 10000000 [C] // SIGAfric Project: 20th Conference of African Geology, BRGM, Orléans, France, 2004.
- Neybergh H, Laduron D, Martin H, et al. The Vanadiferous magnetite deposits of the Oursi region, Upper – Volta [J]. *Economic Geology*, 1980, 75: 1042–1052.
- 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.
- Rollinson H. Archaean crustal evolution in West Africa: A new synthesis of the Archaean geology in Sierra Leone, Liberia, Guinea and Ivory Coast [J]. *Precambrian Research*, 2016, 281: 1–12.
- S&P Capital. The iron data of western Africa [DB]. <https://www.capitaliq.spglobal.cn/web/client?auth=inherit&override=1&ignoreidmcontext=1#dashboard/metalsAndMining>. 2021: 1–23.
- Schwartz M O, Melcher F. The Faleme Iron District, Senegal [J]. *Economic Geology*, 2004, 99: 917–939.
- 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 (3/4): 179–194.
- 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.
- 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.
- Villeneuve M, Cornée J J. Structure, evolution and palaeogeography of the West Africa craton and bordering belts during the Neoproterozoic [J]. *Precambrian Research*, 1994, 69, 307–326.
- 程裕淇, 赵一鸣, 陆松年. 我国几组主要铁矿类型 [J]. *地质科技*, 1976, (2): 8–29.
- 董少波, 马林霄. 塞拉利昂北方省 SOKOYA 铁矿地质特征及成因 [J]. *现代矿业*, 2016a, (2): 86–89.
- 董少波, 曾瑞垠, 朱江建, 等. 塞拉利昂北方省 Gpafaya 铁矿地质特征及成因浅析 [J]. *矿产勘查*, 2016b, 7(4): 683–690.
- 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.
- 胡鹏, 姜军胜, 张海坤, 等. 西非克拉通优势金属矿产地质特征、成矿作用及开发现状 [J]. *华南地质*, 2022, 38(4): 614–625.
- 胡鹏, 任军平, 向鹏, 等. 非洲大陆构造单元划分 [J]. *地质通报*, 2022, 41 (1): 1–18.
- 胡鹏, 曾国平, 刘江涛, 等. 西非铁矿资源现状及潜力分析 [J]. *地质学报*, 2021, 95(4): 1306–1319.
- 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.
- 李厚民, 王登红, 李立兴, 等. 中国铁矿成矿规律及重点矿集区资源潜力分析 [J]. *中国地质*, 2012, 39(3): 559–580.
- 刘益康, 杨建珍. 西非铁矿带——影响全球铁矿市场格局的热点地区 [C] // 中国地质学会科技情报专业委员会学术研讨会, 2012: 1–3.
- 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.
- 沈宝丰. 中国 BIF 型铁矿床地质特征和资源远景 [J]. *地质学报*, 2019, 86(9): 1376–1395.
- 王忠, 李建领. 浅析利比里亚 BIF 型铁矿成因 [J]. *内蒙古科技与经济*, 2013, 23: 38–40.
- 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]. *地质通报*, 2022, 41(7): 1258–1268.
- 姚培慧. 中国铁矿志 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993: 25–69.
- 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: 23–56.
- 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.
- 张招崇, 李厚民, 李建威, 等. 我国铁矿成矿背景与富铁矿成矿机制 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2021, 51(6): 827–852.
- 赵一鸣, 林文蔚, 毕承思. 中国矽卡岩矿床 [M]. 北京: 地质出版社, 1990: 14–26.
- 曾瑞垠, 詹勇, 王柘. 非洲塞拉利昂 Sokoya 铁矿地质特征及找矿标志 [J]. *云南地质*, 2016, 35(3): 381–387.
- 中国地质调查局武汉地质调查中心. 利比里亚共和国邦矿铁矿特许经营区周边地质测量报告 [R]. 2011: 10–25.
- 中色地科矿产勘查股份有限公司. 塞拉利昂北方省 GPAFAYA 矿区铁矿普查报告 [R]. 2013: 8–24.
- 周久龙, 罗照华, 潘颖, 等. 岩浆型铁矿床中脉状铁矿体的成因: 以承德黑山铁矿床为例 [J]. *岩石学报*, 2013, 29(10): 3555–3566.