

doi: 10.12029/gc20220106

赵宏军, 张伟波, 陈秀法, 何学洲, 张潮, 陈超, 于永善, 郑喻林. 2022. 非洲锰矿床成因类型、地质特征及表生富集作用[J]. 中国地质, 49(1): 81–102.

Zhao Hongjun, Zhang Weibo, Chen Xiufa, He Xuezhou, Zhang Chao, Chen Chao, Yu Yongshan, Zheng Yulin. 2022. Genetic types, geological characteristics and genetic mechanism of manganese deposits in Africa [J]. *Geology in China*, 49(1): 81–102(in Chinese with English abstract).

非洲锰矿床成因类型、地质特征及表生富集作用

赵宏军^{1,2}, 张伟波¹, 陈秀法¹, 何学洲¹, 张潮¹, 陈超³, 于永善⁴, 郑喻林⁵

(1. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037; 2. 中融新大矿产资源有限公司, 山东 青岛 266000; 3. 河北地质大学, 河北 石家庄 050031; 4. 中国煤炭地质总局广西煤炭地质局, 广西 南宁 530200; 5. 中国地质科学院矿产资源研究所/自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037)

摘要:【研究目的】非洲锰矿资源丰富, 储量 3.1 亿 t、资源量 6.6 亿 t 排名在世界上均列第一, 加强非洲锰矿床的研究和认识对推动锰矿找矿工作具有重要的指导意义。【研究方法】通过对重要成矿带典型矿床的解剖总结了非洲锰矿床的成因类型、地质特征。【研究结果】非洲锰矿成因类型主要有前寒武系条带状铁建造(BIF)型、海相沉积型、陆相(三角洲湖相)沉积型、与岩浆作用有关的热液型锰矿床等, 其中以前寒武系条带状铁建造(BIF)型和海相沉积型最为重要。【结论】非洲锰矿资源具有矿床规模大(以大型、超大型为主)、品位高(30%~50%)、分布相对集中的总体特征; 锰矿床的成矿时代较早, 以前寒武纪为主; 多数锰矿床都遭受 2.0 Ga 的不整合侵蚀及新生代表生氧化两期风化淋滤作用改造。

关键词: 锰矿床; 成因类型; 地质特征; 成因机制; 地质调查工程; 非洲

创新点: 非洲锰矿成因类型以前寒武系条带状铁建造(BIF)型和海相沉积型最为重要; 规模大、品位高的锰矿床多数遭受 2.0 Ga 的不整合侵蚀及新生代表生氧化两期风化淋滤作用改造。

中图分类号: P618.32 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2022)01-0081-22

Genetic types, geological characteristics and genetic mechanism of manganese deposits in Africa

ZHAO Hongjun^{1,2}, ZHANG Weibo¹, CHEN Xiufa¹, HE Xuezhou¹, ZHANG Chao¹, CHEN Chao³, YU Yongshan⁴, ZHENG Yulin⁵

(1. Development and Research Center of China Geological Survey, 100037, Beijing, China; 2. Zhongrong Xinda Mineral Resources Co., Ltd., Qingdao 266000, Shandong, China; 3. Hebei GEO University, Shijiazhuang, 050031, Hebei, China; 4. Guangxi Bureau of Coal Geology, China National Administration of Coal Geology, Nanning 530200, Guangxi, China; 5. MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: This paper is the result of mineral exploration engineering.

[Objective] Manganese ore resources abundant in Africa, where the 310 Mt reserves and 660 Mt resources rank first in the world.

收稿日期: 2021-02-03; 改回日期: 2021-06-20

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20190455、DD20211404)资助。

作者简介: 赵宏军, 男, 1969 年生, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事境外成矿区带和黑色金属资源潜力研究;

E-mail: zhaohongjun2008@126.com。

Enhance research and awareness of manganese deposits in Africa, It has important guiding significance for promoting the prospecting of manganese ore in my country. [Methods] Through the dissection of typical deposits in important metallogenic belts, the genetic types and geological characteristics of manganese deposits in Africa are summarized. [Results] Manganese ore types in Africa are diverse, such as Precambrian banded iron formation (BIF) type, marine sedimentary type, continental (delta-lacustrine) sedimentary type, magmatic hydrothermal type etc., Among them, the Precambrian banded iron formation (BIF) type and marine sedimentary type are the most important. [Conclusions] Manganese deposits are characterized by large deposits (mainly large and super large), high grade (30%–50%), and relatively concentrated distribution. The manganese-forming age of manganese deposits is earlier, mainly in the Precambrian; Most manganese deposits suffer eluviation weathering supergene processes from 2.0 Ga unconformity erosion and Cenozoic.

Key words: manganese deposits; genetic types; geological characteristics; genetic mechanism; geological survey engineering; Africa

Highlights: The Precambrian banded iron formation (BIF) type and marine sedimentary type are the most important in Africa; Large-scale, high-grade manganese deposits suffer eluviation weathering supergene processes from 2.0 Ga unconformity erosion and Cenozoic.

About the first author: ZHAO Hongjun, male, born in 1969, professor, mainly engages in the offshore metallogenic belt and ferrous metal resources potential research; E-mail: zhaohongjun2008@126.com.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No. DD20190455, No. DD20211404).

1 引 言

世界上锰产量的95%应用于冶金钢铁工业,作为脱氧剂、脱硫剂及制造锰系合金(阴江宁和肖克炎, 2014; 丛源等, 2018), 有“无锰不成钢”之称, 是一种不可或缺的重要矿产资源。

尽管中国锰矿资源较丰富, 但与国外锰矿相比, 不仅矿床规模较小(多数为 < 200 万 t 中小型矿)、锰矿石以贫矿为主(贫锰矿石资源量占全国的93.6%), 富锰矿石(氧化锰矿石含锰 > 30%、碳酸锰矿石含锰 > 25%) 仅占 6.4%, 且矿石物质组分复杂, 多为高磷、高铁的锰矿石, 粒度细、硅质成分较高, 影响选冶效果(付勇等, 2014; 丛源等, 2018)。目前, 中国是世界锰矿消费第一大国, 对外依存度超过 80%(陈甲斌等, 2020)。非洲拥有全球已知的陆地锰矿探明储量的 70% 以上, 年产量占全球总产量的 40% 以上(Nicolas et al., 2016)。研究非洲锰矿床的成因类型、地质特征, 对推动中国锰矿找矿工作具有重要的指导意义。

2 非洲锰矿资源分布及禀赋特征

2.1 资源分布

据不完全统计, 截止 2019 年底全球锰矿探明储量 4.3 亿 t, 资源量为 9.6 亿 t, 其中非洲锰矿储量约 3.1 亿 t, 占全球 71.5%, 资源量 6.6 亿 t, 占全球 68.5%

(表 1), 是全球锰矿探明储量和资源量最大的洲。

非洲锰矿主要分布在南非、加蓬、加纳三国, 其中南非锰矿储量 2.3 亿 t, 占全球 54.3%, 资源量为 4.0 亿 t, 占全球 41.5%, 是世界上锰矿资源最丰富的国家; 加蓬是非洲第二大锰资源国, 其锰矿储量 0.6 亿 t, 占全球 14.1%, 资源量为 1.2 亿 t, 占全球 12.9%; 加纳为非洲第三大锰资源国, 其锰矿储量 0.1 亿 t, 占全球 3.1%, 资源量为 0.4 亿 t, 占全球 4.4%。此外, 摩洛哥、马里、刚果(金)、布基纳法索、莫桑比克、纳米比亚、埃及、利比里亚等国也有锰矿床(点)分布(图 1, 表 1)。从矿床规模看, 非洲大型及以上锰矿有 22 个、中型 30 个、小型及资源量不明的有 113 个, 其中南非大型及以上有 12 个, 占非洲大型锰矿床总数的 54.5%, 而加蓬、加纳、马里大型锰矿床数量分别为 3 个、2 个、2 个, 其他国家多以中小型锰矿为主(表 1, 图 1)。

2.2 资源禀赋特征

非洲锰矿资源具有形成时代早、分布较为集中、矿床规模大、矿石品位高等特点。

2.2.1 锰矿床形成时代以前寒武纪为主

非洲锰矿床成锰时代较早, 以前寒武纪为主, 且集中出现于 2.2~2.0 Ga。南非的卡拉哈里(Kalahari)锰矿田形成时代约 2.2 Ga (Cairncross and Beukes, 2013; Nicolas et al., 2016), 波斯特马斯堡(Postmasburg)锰矿田形成于 2.15~2.64 Ga

表 1 非洲主要锰矿资源国锰矿石资源量/储量和锰矿床(点)统计表

国家	2019年储量/万t	2019年资源量/万t	2019年资源量 占世界比例	矿床(点)数量/个			
				大型及以上	中型	小型及矿点	合计
南非	23156	39760	41.5	12	12	16	40
加蓬	6018	12404	12.9	3	1	6	10
加纳	1310	4200	4.4	2	3	10	15
马里	-	2500	2.6	2	-	4	6
刚果(金)	-	2300	2.4	1	-	-	1
布基纳法索	-	1190	1.2	1	2	-	3
摩洛哥	-	1000	1.0	1	2	8	11
莫桑比克	-	1000	1.0	-	1	4	5
纳米比亚	-	723	0.8	-	2	2	4
埃及	-	275	0.3	-	-	5	5
多哥	54	119	0.1	-	-	1	1
利比里亚	-	150	0.2	-	-	3	3
博兹瓦纳	-	26	-	-	2	8	10
非洲其他国家	-	-	-	-	5	46	51
非洲地区合计	30538	65647	68.5	22	30	113	165
世界	42680	95820					

注:储量和资源量数据美国地质调查局 Mineral Commodity Summaries 2020 和 S&P Global Market Intelligence 矿产地质数据库 (2020) 综合整理。表中“-”代表暂无数据;中国锰矿床规模划分标准:大型>2000 万 t, 中型 2000~200 万 t, 小型<200 万 t。

(Holland and Beukes, 1990; 常洪伦等, 2014a,b), 洛音克(Rooinnekke)锰矿床形成时代约 2.4 Ga(Beukes and Gutzmer, 2008), 纳米比亚奥特松森杜(Otjosondu)锰矿床形成与 0.74 Ga 全球雪球事件相关(Hoffman and Schrag, 2000), 加蓬的弗朗西斯维利亚(Francevillian)锰矿床形成于 2.3~2.0 Ga(Weber, 1973), 西非比利姆(Birimian)岩系中的锰矿床(加纳的恩苏塔(Nsuta)、科特迪瓦的莫克塔/大拉胡(Mokta/Grand Lahou)、马里的安松戈(Ansongo)及布基纳法索的坦宝(Tambão))的形成与 2.2~1.9 Ga 埃本(Eburnian)造山运动有关(Baratoux et al., 2011), 刚果(金)的基森格(Kisenge)锰矿床形成于 2.1~2.2 Ga(Feybesse et al., 1998; Bekker et al., 2003)。

2.2.2 锰矿床分布相对集中

据不完全统计,非洲发现的锰矿床(点)165处,主要集中在南非北开普省格里夸兰(Griqualand)西部地区的卡拉哈里(Kalahari)一波斯特马斯堡(Postmasburg)锰矿田及姆普马兰加省西部、加蓬东南部高原区及西非加纳南部的恩苏塔(Nsuta)、科特迪瓦海岸附近的莫克塔/大拉胡(Mokta/Grand Lahou)、布基纳法索北部的坦宝

(Tambão)、摩洛哥的苏斯(Souss)盆地东部的伊米尼(Imini)一塔斯德雷姆特(Tasdremt)地区,其他地区仅有零星分布。

2.2.3 锰矿床规模大,常形成矿田或成矿带

在非洲已发现的锰矿床中,大型及以上规模的占总数的 13.3%,而资源量占比超过 90%,矿床以大型、超大型(>1 亿 t)为主,且相对聚集,常形成大的矿田或成矿带。如著名的南非卡拉哈里(Kalahari)锰矿田由主卡拉哈里(Kalahari)、阿文图尔(Avontuur)、伦斯特(Leinster)、兰登(Langdon)和霍塔泽尔(Hotazel)等多个超大型锰矿床组成;波斯特马斯堡(Postmasburg)锰矿田也由 Bishop、Paling 等多个大型矿床构成;加蓬东南部的莫安达(Moanda)、Franceville、Okondja 和 Lastoursville 等锰矿床构成锰矿带。

2.2.4 锰矿石品位较高

非洲锰矿床或含锰岩系大多都遭受表生风化、淋滤堆积等次生富集作用改造,使含锰约 30%的原生锰矿石(或更低的富锰岩系)品位大幅提高到 40%~60%,矿体往往产于地表浅层部位,易于开采。矿石矿物主要由硬锰矿、隐钾锰矿、水锰矿、褐锰矿、黑锰矿、斜方水锰矿、六方锰矿和软锰矿组成

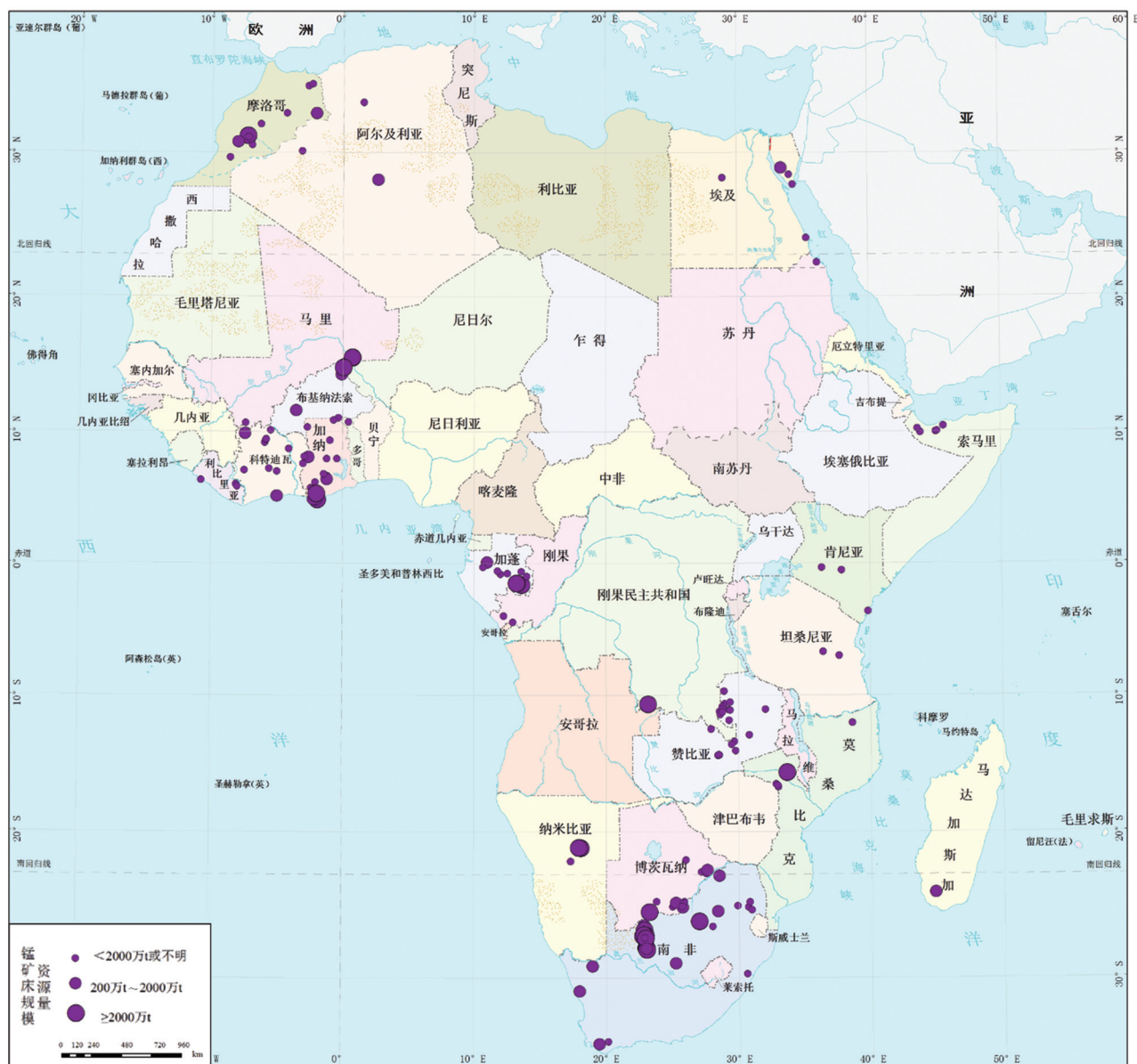


图1 非洲主要锰矿床分布图

Fig.1 Distribution map of main manganese deposits in Africa

(Varentsov, 1964; Swindell, 2015; Nicolas et al., 2016)。

3 非洲锰矿床类型及地质特征

关于锰矿床成因类型的划分,迄今尚未达成共识,但以锰矿床的成矿作用划分大类,再以反映锰矿形成条件和环境的岩石类型组合和含矿岩系特征划分亚类,这一划分原则被多数专家学者所认可(叶连俊等, 1994; 姚培慧等, 1995; Fan and Yang, 1999)。非洲拥有丰富的锰矿资源,对其成因类型

划分标准未见有系统研究, Nicolas et al. (2016) 指出,非洲锰矿床以海相沉积型为主,还有少量热液矿床,并根据赋矿围岩的特点对海相沉积型锰矿床划分出4种类型,即赋存在条带状铁建造(BIF)的锰矿床、赋存在黑色页岩中的锰矿床、赋存在岩溶中的锰矿床和鲕状砂岩中锰矿床。结合前人研究成果,笔者将非洲锰矿床划分为四大类,并对海相沉积型锰矿床依据含矿岩系的特征划分3个亚类(表2)。需要说明的是,非洲上述各类型锰矿床或含矿岩系在地质演化过程中,因多产于地史时期的湿热

气候地带,经受长期风化作用的高原地区,因此,都遭受到一期或多期表生风化淋滤(溶蚀)作用改造,在原生锰矿床或含锰岩系的浅部形成表生氧化富集带,深度由几米到近百米不等,品位较高,经济价值更大。在介绍相关类型时,对其表生风化(溶蚀)作用作为一项特征指标加以描述,因此并不单独划分表生锰矿床这一成因类型。

各类锰矿床的特征概述如下。

3.1 前寒武系条带状铁建造(BIF)型锰矿床

这是非洲最重要锰矿床类型,主要分布在南非和纳米比亚,以大型、超大型矿床为主,资源量约占非洲锰资源量的61%。该类型锰矿床主要特征有:(1)产出的大地构造背景多为克拉通边缘大陆架浅海环境或弧后盆地;(2)锰矿层与前寒武系含条带

状铁建造(BIF)的细碎屑-碳酸盐岩、镁铁质(长英质)火山-泥质-碳酸盐岩沉积岩系关系密切;(3)成矿时代多为元古宙,集中出现于2.2~2.0 Ga;(4)矿床规模较大,常构成大的矿田、矿带;(5)矿体呈层状、似层状、透镜状,与围岩整合产出,矿层厚度及品位呈规律性变化;(6)遭受表生风化淋滤(溶蚀)作用改造,原生锰矿床或含锰岩系形成表生氧化富集带,使矿石品位提高。该类矿床原生锰矿层呈层状,每层的顶部和底部都显示出与铁建造围岩的非常系统和周期性的渐变关系,在每个锰矿层中,都有一个从富含条带状铁建造逐渐过渡到含赤铁矿的泥屑岩,再到不含燧石条带,而含褐锰矿的泥屑岩的过程(Nicolas et al., 2016)。关于前寒武系条带状铁建造(BIF)地质特征及形成机制的相关研究,

表2 非洲锰矿床成因类型及其典型性矿床的规模和含锰层位

Table 2 The genetic types and their typical manganese deposits in the Mn-bearing strata of African

矿床类型	资源量占比	典型矿床	含锰层位/(形成时代)
前寒武系条带状铁建造(BIF)型锰矿床	61.0%	南非卡拉哈里(Kalahari)锰矿田	德兰士瓦(Transvaal)超群的波斯特马斯堡(Postmasburg)群霍塔泽尔(Hotazel)组含铁建造(约2.2 Ga)(Tsikos and Moore,1997;Nicolas et al.,2016)
		南非波斯特马斯堡(Postmasburg)锰矿田	德兰士瓦(Transvaal)超群 Ghaap 群 Campbellrand 亚群的白云岩和 Asbesheuwels 亚群的含铁建造(2.15~2.64 Ga)(Holland and Beukes, 1990)
		纳米比亚奥特松森杜(Otjosondu)锰矿床	达瓦拉(Damara)超群的Swakop群的Khomas亚群中的丘斯(Chuoss)组含铁建造(~0.74 Ga)(Hoffman and Schrag, 2000)
		南非洛音克(Rooinekke)矿床	德兰士瓦(Transvaal)超群 Ghaap 群的Koegas亚群的Rooinekke组含铁建造(~2.4 Ga)(Beukes and Gutzmer, 2008)
海相沉积型锰矿床	22.4%	刚果(金)的基森格-卡马塔(Kisenge-Kamata)锰矿床	碳酸锰原生矿体产于卢卡希(Lukoshi)杂岩体含锰石榴石的碳质千枚岩(2.1~2.2 Ga)(Feybesse et al., 1998; Bekker et al., 2003)
		加蓬的弗朗西斯维利亚(Francevillian)、莫安达(Moanda)锰矿床	弗朗西斯维利亚(Francevillian)超群的相对未变质和未变形的黑色炭质页岩(2.3~2.0 Ga)(Weber,1973)
		布基纳法索的坦博(Tambão)、加纳的恩苏塔(Nsuta)及马里的安松戈(Ansongo)锰矿床	锰矿床赋存在古元古界由火山岩、火山沉积岩和锰的化学沉积岩组成的比里姆(Birimian)超群地层(2.3~2.1 Ga)(Baratoux et al.,2011)
海相火山-沉积型锰矿床	12.0%	摩洛哥的伊米尼(Imini)锰矿床	矿体赋存在赛诺曼-土仑(Cenomanian-Turonian)阶白云岩(晚白垩世)(Gutzmer et al.,2006)
与岩浆作用有关的热液型锰矿床	2.1%	赞比亚的曼萨(Manza)地区、摩洛哥瓦尔扎扎特(Quarzazate)地区一些热液型锰矿床	锰矿体产于花岗岩体的裂隙及长英质火山岩(1.6 Ga元古代火山活动)(沈承珩等, 1995;任军平等, 2016)
陆相(三角洲湖相)沉积型锰矿床	1.0%	南非托利维(Tolwe)鲕状锰矿床	索特潘斯(Soutpansberg)群的威利斯波特(Wyllies Poort)组的含球状、鲕粒和核形石形锰的页岩、粉砂岩和石英岩层序(1.8~1.96 Ga古元古代)(Schaefer et al.,2001)

国内外学者多有研究(Trendall, 2002; Klein, 2005; Clout et al., 2005; Bekker et al., 2010; 王长乐等, 2012),在此不赘述。典型矿床有南非卡拉哈里(Kalahari)锰矿田、波斯特马斯堡(Postmasburg)锰矿田、洛音克(Rooinnekke)矿床、纳米比亚奥特松森杜(Otjosondu)锰矿床等(表3)。

3.2 海相沉积型锰矿床

海相沉积型锰矿床是非洲第二重要的锰矿床类型,该类型资源量约占非洲锰资源量的36%。该类型锰矿床主要特征有:(1)产出的大地构造背景为稳定克拉通内陆盆地或大陆边缘火山岛弧带;(2)锰矿床赋存在与缺氧盆地有关的海进岩系的碳酸盐岩、黏土岩和海绿石砂岩中或海相火山岩-沉积岩序;(3)成矿时代既有元古代,也有中生代;(4)矿床规模一般较大,矿体呈层状、似层状产出,矿石以碳酸盐和氧化物为主,表生蚀变后通常形成富矿石。

根据含矿岩系的特征,主要分为黑色岩系中碳酸锰矿床、海相火山-沉积型锰矿床和碳酸盐岩中锰矿床3个亚类,且以前两者最为重要。

(1)黑色岩系中碳酸锰矿床的含矿岩系以泥质岩类为主,其次是细碎屑岩-泥质岩,锰矿层主要与黑色页岩、千枚岩、泥岩共生。成矿时代多集中在古元古代(2.0~2.3 Ga),矿床规模以大、中型居多,锰矿床形成于克拉通边缘,紧邻弧后盆地(Nicolas et al., 2016)。典型矿床有刚果(金)的基森格-卡马塔(Kisenge-Kamata)锰矿床、加蓬的弗朗西斯维利亚(Francevillian)、莫安达(Moanda)锰矿床等(表3)。

(2)海相火山-沉积型锰矿床主要特征有:①产出的大地构造背景为活动大陆边缘火山岛弧带,矿床赋存部位一般与火山中心保持一定的距离,较富的矿体常远离火山活动中心,或在一期主要的火山作用之后,其物质来源主要是海底火山喷发活动的产物(沈承珩等, 1995);②在时空上与镁铁质(或长英质)火山岩或火山沉积岩序密切相关,为一套千枚岩及玄武质(长英质)火山岩组成的火山-沉积岩系(比里姆(Birimian)超群);③成矿时代为古元古代(2.3~2.1 Ga);④矿体呈透镜状,与围岩呈渐变关系,矿床规模多为中、小型,个别为大型矿床;⑤原生矿石以角砾状、脉状、层状和浸染状形式存在,原生锰矿物一般是锰铝榴石、菱锰矿和褐锰矿,有时也有蔷薇辉石。典型矿床有布基纳法索的坦博

(Tambão)、加纳的恩苏塔(Nsuta)及马里的安松戈(Ansongo)等锰矿床(表3)。

(3)碳酸盐岩中锰矿床的含矿岩系以碳酸盐岩为主,包括白云岩、粉砂质白云岩、白云质灰岩、泥质灰岩等。成矿时代为晚白垩世的赛诺曼-土仑期,矿床规模以中、小型居多。原生锰矿物以软锰矿、钙锰矿类矿物、锰铁矿和锂锰铁矿为主,代表性矿床是摩洛哥的伊米尼(Imini)锰矿床(表3)。

3.3 与岩浆作用有关的热液型锰矿床

此类矿床资源量仅占非洲锰资源总量的2.1%。该类矿床产出的地质背景多样,含矿围岩以流纹质-玄武质层状火山岩为主,而碳酸盐岩是更有利于热液交代矿床形成的围岩,并受构造裂隙控制明显,一般与侵入的酸性岩浆岩关系密切;赞比亚曼萨地区的锰矿床成矿时代为中元古代(1.6 Ga)(任军平等, 2016),而摩洛哥瓦尔扎扎特(Quarzazate)地区的热液型锰矿床形成于前寒武纪(沈承珩等, 1995);矿床规模一般都较小,矿体大多呈脉状产出;矿石矿物以氧化锰、碳酸锰、硅酸锰为主,锰也可充填在其他金属矿物的晶格内,氧化锰中常含有相当数量的铅、钡、锌、银等金属矿物;矿石构造以浸染状构造、针状构造、角砾状构造和脉状构造为主。典型矿床有摩洛哥的埃尔-博里(El-Borj)、提奥伊内(Tiouine)、布尔巴(Boulbab)及赞比亚曼萨地区的锰矿床(表3)。

3.4 陆相(三角洲湖相)沉积型锰矿床

此类矿床资源量仅占非洲锰资源总量的1%。其主要形成于河湖三角洲环境,含矿岩系为页岩、粉砂岩和石英岩,锰矿物多呈球状、鲕粒状和核形石状,成矿时代为古元古代1.8~1.96 Ga(Schaefer et al., 2001)。矿石主要由褐锰矿、赤铁矿和石英组成,还有少量的软锰矿、隐钾锰矿,矿床规模一般较小。典型矿床是南非的托利维(Tolwe)鲕状锰矿床(表3)。

4 典型矿床(田、带)地质特征

结合非洲锰矿床成因类型、地理位置、矿床规模(大型、超大型以上)及文献资料详细程度对南非、加蓬-刚果(金)、西非(加纳、布基纳法索等)及摩洛哥的锰矿床(田、带)的时空分布及地质特征进行综合研究。

表3 非洲重要锰矿床(矿田)主要地质特征
Table 3 The main geological characteristics of important manganese deposits (fields) in Africa

序号	矿床名称	成因类型	大地构造背景	矿床地质特征	表生锰矿物	表生蚀变期	主要经济矿石类型	参考文献
1	南非卡拉哈里锰矿田 (Kalahari Manganese Field (KMF))		卡普瓦尔克拉通边缘的弧后盆地	矿田呈南北走向,长约35 km,宽5-10 km,矿体赋存在 Transvaal 超群的 Postmasburg 群的 Hotazel 组含铁建造 (BIF) (约2.2 Ga) 内,由上、中、下三层与含铁层互层的锰矿层组成,下层矿最厚可达45 m,中、上层矿一般较薄,仅几米厚,局部厚达32 m,主要包括卡拉哈里 (Kalahari)、阿文图尔 (Avontuur)、伦斯特 (Lenster)、兰登 (Langdon)、霍格泽尔 (Hotazel) 和马尔马特万 (Mamatwan) 等矿床。原生沉积的锰矿石品位较低,含锰30%-38.5%, Mn/Fe=8.5-10.1,由白云石胶结的细晶褐铁矿组成;受表生富集作用改造的高品位锰矿石,含锰40%-60%, Mn/Fe=4.1,主要由黑褐矿、方铁锰矿、褐锰矿、隐钾锰矿和次生粗粒褐锰矿等组成	主要为粗粒重结晶次生褐锰矿,其次是黑褐矿-褐锰矿、隐钾锰矿和次生褐锰矿	前 Mapeedi 期 (约2 Ga); 新生代约42 Ma、25 Ma 和 10.5 Ma)	氧化矿石、碳酸盐型矿石和氧化矿石的混合矿	Gutzmer and Beukes,1995; Gutzmer and Beukes,1996a; Tsikos and Moore,1997; Nicolas et al.,2016
2	南非波斯特马斯堡锰矿田 (Postmasburg)	前寒武系条带状铁建造 (BIF) 型	卡普瓦尔克拉通边缘隆起的碳酸盐台地	矿田延伸长达50-60 km,可分为东、西两个锰矿带,矿体赋存在 Transvaal 超群 Campbellrand 亚群的白云岩和 Ashesheuvels 亚群的含铁建造 (2.15-2.64 Ga) 中,主要锰矿床有 Glesam、Lobathla 和 Bishop 等。受古岩溶及表生风化作用改造,还形成高品位的岩溶堆积型褐铁矿或局部形成磁铁矿。东矿带为细粒硅质褐铁矿,由褐锰矿和少量的方铁锰矿、赤铁矿、石英等组成,含锰32%-55%, Mn/Fe=1.5-21.8; 西矿带为铁-锰矿石,由细粒褐锰矿、方铁锰矿和赤铁矿组成,还含有受热液蚀变而成的粗粒褐锰矿,含锰46%-59%, Mn/Fe=7.1-65	主要为隐钾锰矿、软锰矿、硬锰矿、赤铁矿	初始喀斯特岩溶期 (2.0 Ga)	东矿带为含铁硅质褐铁矿; 西矿带为褐铁矿	Gutzmer and Beukes,1996b; Holland and Beukes,1990; 常洪化等,2014a,b; Nicolas et al.,2016
3	南非洛普克锰矿床 (Roomekke)		卡普瓦尔克拉通盆地边缘	矿体赋存于 Transvaal 超群的 Ghaap 群的 Kooeges 亚群 Rooimekke 组含铁建造 (约2.4 Ga) 中,主要由两个含铁锰矿层组成,每层锰矿厚约1 m,平均含 Mn 35%, Fe 25%-27%, 矿石由褐铁矿、褐锰矿、黑褐矿和赤铁矿组成。矿床受古风化面的影响形成较厚的红层,表生风化作用主要形成硬锰矿和软锰矿	硬锰矿、软锰矿	新生代	含铁质氧化矿石	Beukes and Gutzmer,2008; Cairncross and Beukes,2013; Nicolas et al.,2016
4	纳米比亚奥斯特松森杜锰矿床 (Oyosundu)		陆缘盆地边缘?	矿体赋存于 Damara 超群的 Swakop 群的 Khomas 亚群中的 Chaus 组含铁建造,该建造与 Sturtian 全球雪球事件相关 (~0.74 Ga)。矿床由两层4-7 m 厚的沉积褐锰矿层组成,两层锰矿中间为30-40 m 厚的条带状铁矿层。有三种锰矿石类型,即块状褐锰矿 (主要由褐锰矿组成)、条带状褐锰矿和含长石的褐锰矿,块状褐锰矿由褐锰矿、赤铁矿和褐铁矿组成,是矿区主要矿石类型,锰品位为33%-47%,锰铁比为2.2-14.8	褐氧化物	新生代	氧化矿石	Bühnet et al.,1992; Klein and Beukes,1993; Hoffman and Schrag,2000; Nicolas et al.,2016
5	加蓬弗朗西斯维尔锰矿床 (Francivilian)	海相沉积型黑色岩系碳酸盐锰矿床	刚果克拉通西北侧弧后盆地?	矿体赋存于 Francivilian 超群的相对未变质和变形的 Bangombe 组黑色页岩 (2.0-2.3 Ga) 内,矿床以规模大和埋藏浅为特点,锰氧化物含量高 (51%)。表生风化作用将锰含量从黑色页岩中的15%提高到45%	隐钾锰矿、软锰矿、恩苏塔矿	新生代	氧化矿石	Swindell, 2015; Nicolas et al.,2016; Thierry et al.,2018
6	加蓬莫安达锰矿床 (Moanda)			矿体赋存于 Francivilian 超群的相对未变质和变形的 Bangombe 组黑色页岩 (2.0-2.3 Ga) 内,矿体厚约为9-17 m,主要由硬锰矿、水锰矿、斜方水锰矿、六方水锰矿和软锰矿组成	软锰矿、隐钾锰矿	新生代	氧化矿石	Swindell, 2015; Nicolas et al.,2016

续表3

序 号	矿床名称	成因类型	大地构造背景	矿床地质特征	表生锰矿物	表生蚀变期	主要经济矿石类型	参考文献
7	刚果(金)基森格卡马塔锰矿床(Kisenge-Kamata)		刚果克拉通南缘的弧后盆地?	矿体赋存在 Lukoshi 变质沉积岩 (2.1~2.2 Ga) 内, 在碳质千枚岩地层中由四个透镜状组成, 厚约 40 m 的原生碳酸锰矿石 (含 Mn 28%~30%, Mn/Fe=40~41) 受表生风化作用形成高品位位的氧化锰矿石 (含 Mn 40%~55%, Mn/Fe=14~26)	隐钾锰矿、软锰矿	约 25 Ma, 10 Ma, 3.6 Ma 和 2.6Ma	氧化矿石	Doyen, 1973; Feybesse et al., 1998; Nicolas et al., 2016; Thierry et al., 2018
8	加纳恩苏塔锰矿床(Nauta)			矿体赋存在 Birimian 超群的一套绿帘角闪岩 (2.2~2.16 Ga) 内, 矿体呈透镜状, 与围岩呈渐变关系。原生碳酸锰矿体厚 30~40 m, 其与细粒状黑色碳质页岩互层 (含 Mn 28%~30%), 上部的表生氧化锰矿体厚度最大可达 70 m, 矿石品位通常较高, 含 Mn 可达 45%~50%, Mn/Fe 比为 14~2, 主要由硬锰矿、软锰矿、隐钾锰矿和六方锰矿等矿物组成	硬锰矿、隐钾锰矿、软锰矿、六方锰矿	44.5~49 Ma	氧化矿和磷酸盐型矿石	Nyame et al., 1998; Mücke et al., 1999; Nyame, 1998, 2001; Baratoux et al., 2011; Nicolas et al., 2016
9	马里的安松戈锰矿床(Ansongo)	海相火山-沉积型	西非克拉通边缘, 含有镁铁质和长英质岩石的弧后盆地	矿体赋存在 Birimian 超群一套由变质火山岩、凝灰岩和化学沉积岩组成的火山-沉积岩 (2.2~2.16 Ga) 内, 矿体沿北西-南东方向延伸可达 6.5 km, 宽为 200 m。锰矿化发生在石英岩系列的底部 (碳酸盐层是与石英岩-粉砂岩层互层产出), 并已变质为石英岩。上部表生氧化锰矿体被含锰腐殖土的硬壳所覆盖。	锰氧化物	44.5~49 Ma	氧化矿和磷酸盐型矿石	Caby et al., 2008; Baratoux et al., 2011; Nicolas et al., 2016; Kim and Asimie, 2016
10	布基纳法索坦博锰矿床(Tambao)			矿体赋存在 Birimian 超群的一套含绿帘角闪岩-沉积岩 (2.2~2.16 Ga) 内, 岩石变质程度为绿帘角闪岩相, 局部达角闪岩相。矿床由南、北两条矿体组成, 北部矿体长 1550 m, 宽 350 m, 南部矿体长 850 m, 宽 200 m。原生低品位的碳酸盐型含锰矿石为菱锰矿和硬锰矿白云石, 表生风化作用形成高品位位的氧化锰矿石, 主要矿石矿物有硬锰矿、软锰矿、六方锰矿、水锰矿、隐钾锰矿、黑锰矿等	硬锰矿、软锰矿、六方锰矿、水锰矿、隐钾锰矿、黑锰矿	44.5~49 Ma	氧化矿和磷酸盐型矿石	Baratoux et al., 2011; Tshibahadzic and Hein, 2013; Kim and Asimie, 2016; Nicolas et al., 2016
11	摩洛哥伊米尼锰矿床(Imini)	海相沉积型碳酸盐岩锰矿床	隆起的大陆边缘碳酸盐台地	矿体赋存于中白垩统海相碳酸盐岩地层 (碎屑白云岩) (85~97 Ma) 内, 锰矿带沿 SWW-NNE 向展布, 长 25 km, 宽 400~1000 m, 由三层层状锰矿组成, 下部两层是高位位的以软锰矿、钙锰矿、硬锰矿和锰铁矿为主的矿石, 上层矿体品位较低, 以硬锰矿为主。矿体遭受岩溶作用, 在溶蚀堆形成角砾状、脉状、网脉状和碎屑状锰矿石, 含 Mn 30%~47%, Mn/Fe 比为 20~330, 还含有较高的 Pb、Ba	软锰矿、硬锰矿、钙锰矿、锰铁矿和锰铁	森诺阶喀斯特岩溶作用	氧化矿石	Rhalimi et al., 1997; Gutzmer et al., 2006; Nicolas et al., 2016; Mohammed, 2016; ekeninck et al., 2016
12	南非托利维锰矿床(Tolwe)	陆相(三角洲相)沉积型	内陆河湖三角洲	矿体赋存在古元古界 Soutpansberg 群的 Wyllies Poort 组页岩、粉砂岩和石英岩 (1.8~1.96 Ga) 内, 为一套三角洲沉积层序。矿体由五个横向上连续的锰矿层和锰石英岩层组成, 每层厚度约为 1~2 m, 矿石由球粒状、鲕状和结核状褐铁矿、赤铁矿和石英等矿物组成, 还有少量软锰矿、隐钾锰矿。矿石含 Mn 30%~41%, Mn/Fe 比为 6~10, SiO ₂ 含量约为 18%~20%	软锰矿、隐钾锰矿	新生代	氧化矿石	Schaefer et al., 2001; Gutzmer et al., 2002; Nicolas et al., 2016
13	赞比亚曼萨(Manza)锰矿床	与岩浆作用有关的热液型	赞比亚班书乌卢地坎的基巴拉构造活动带	矿体赋存于古元古代火山活动时期形成的花岗岩和长英质岩体 (约 1.6 Ga) 内, 矿体主要受近南北向区域构造构造控制, 近垂直产出, 呈透镜状, 宽 0.5~3.5 m, 最长可达 1 km。地表矿体的形式上部多见鲕状、豆粒状铁锰矿结核或铁锰矿, 在裂隙中锰矿物以锰氧化物、硬锰矿和软锰矿的形式存在, 矿石含 Mn 48%~50%, 含铁 5%~15%。矿石结构主要为它形胶结结构, 构造以浸染状、针状、角砾状和脉状构造为主。	锰氧化物、硬锰矿和软锰矿	新生代	氧化矿和磷酸盐型矿石	任军平等, 2016

4.1 南非卡拉哈里—波斯特马斯堡(Kalahari-Postmasburg)锰矿田

南非卡拉哈里—波斯特马斯堡(Kalahari-Postmasburg)是世界上最大的锰矿田,占全球资源的70%以上,全球锰矿石储量的25%(Cannon et al., 2017),位于南非北开普省。这是一条南北走向,长达150 km的锰矿带,从南部的波斯特马斯堡(Postmasburg)到北部的卡拉哈里(Kalahari),面积约2331 km²,其中南段称为波斯特马斯堡矿田,北段的库鲁曼(Kuruman)地区称为卡拉哈里矿田,两矿田相隔约45 km(图2)。

4.1.1 卡拉哈里(Kalahari)锰矿田

卡拉哈里锰矿田位于南非北开普省库鲁曼(Kuruman)西北约60 km处,矿田东西宽15 km,南北长35 km,由主卡拉哈里(Kalahari)、阿文图尔(Avontuur)、伦斯特(Leinster)、兰登(Langdon)和霍塔泽尔(Hotazel)等锰矿床组成(图2)。

锰矿体赋存在新太古界—古元古界德兰士瓦(Transvaal)超群上部的波斯特马斯堡(Postmasburg)群的霍塔泽尔(Hotazel)组含铁建造(BIF)内(Tsikos and Moore, 1998; Cairncross and Beukes, 2013),由上、中、下三层与含铁层呈互层的锰矿层组成,下层矿最厚可达45 m,中、上层矿一般较薄,仅几米厚,局部可厚达32 m(图2)。

卡拉哈里矿田的锰矿层也称为锰质泥屑岩,为灰—暗灰色,微晶,条带状、细纹层状构造。层纹由近平行的、粉色、白色、红色碳酸盐薄层和小透镜体构成,条带由褐色、白色、卵形碳酸盐结核呈条带状排列而显示出来。

霍塔泽尔(Hotazel)组的三层锰矿产于三个岩相沉积旋回中,在每层的顶部和底部都显示出与铁建造围岩的非常系统和周期性的渐变关系(Gutzmer and Beukes, 1996a; Tsikos and Moore, 1997)。在每一旋回内,中心部分为富褐锰矿(含Mn 50%~58%)的锰质泥屑岩,含白色的锰方解石砾屑(直径2~5 mm),碳酸盐总含量较低;由中心带向上、下渐变为富碳酸盐的锰质泥屑岩,其中褐锰矿较少(38%~46%),含大量褐色、黑锰矿—锰方解石小砾屑(直径<2 mm),最后渐变成含相当数量(>8%)赤铁矿的褐锰矿—锰白云石泥屑岩,再渐变成锰铁矿、赤铁矿泥屑岩。各沉积旋回构成了原生沉

积特征和早期成岩特征的组合体,前者以锰质泥屑岩为代表,后者以碳酸盐岩砾屑、层纹、透镜体为代表。锰矿层内微晶褐锰矿、锰白云石、锰方解石、黑锰矿等矿物的含量在垂向上具有韵律性变化,并与岩相变化相对应,而沿走向较稳定。

主卡拉哈里矿床中主要存在3种矿石类型(Gutzmer and Beukes, 1996a):

(1)马马德万(Mamatwan)型:含锰30%~38.5%的低品位原生沉积矿石,由锰白云石胶结的微晶—细晶褐锰矿组成,并含有锰白云石和锰方解石晶体,构成矿田的储量主体部分。

(2)韦塞尔斯(Wessels)型:含锰42%~60%的高品位矿石,为贫碳酸盐型锰矿石,主要由黑锰矿、方铁锰矿、褐锰矿和次生粗粒褐锰矿等组成,主要产于受断层影响的构造变形带附近,数量少,仅占总储量的3%。该类型矿石在韦塞尔斯(Wessels)、恩奇瓦宁(Nchwaning)矿床、兰登(Langdon)和霍塔泽尔(Hotazel)矿床都有发现。

(3)高品位表生富集锰矿石:含锰40%~42%,不含碳酸锰,主要由锰的氧化物隐钾锰矿组成,仅占总储量的1%,是马马德万(Mamatwan)型低品位矿石中的碳酸锰氧化为锰氧化物而成,沿主卡拉哈里矿体东缘发育。表生蚀变Ar—Ar定年表明,其遭受3次强烈风化作用,分别发生在约42 Ma前、25~10 Ma及约5 Ma前(Gutzmer et al., 2012; Cairncross and Beukes, 2013)。

4.1.2 波斯特马斯堡(Postmasburg)锰矿田

波斯特马斯堡锰矿田位于南非北开普省西北部,卡拉哈里—波斯特马斯堡锰矿带的南段,其北起赛申(Sishen),南至波斯特马斯堡(Postmasburg),纵向延伸50~60 km,东西宽约30 km,主要的锰矿床有Gloucester、Lohatlha、Bishop等(图2,图3)。

波斯特马斯堡是南非仅次于卡拉哈里的第二大锰矿田,其形成与该区前寒武纪马尔曼(Maremane)穹隆有关,锰矿体赋存于德兰士瓦(Transvaal)超群加普(Ghaap)群坎贝尔格兰德(Campbellrand)亚群的白云岩和阿斯比休维尔(Asbesheuwels)亚群的含铁建造中(2.15~2.64 Ga)(Holland and Beukes, 1990; 常洪伦等, 2014a,b)。围绕马尔曼(Maremane)穹隆,波斯特马斯堡锰矿田发育东矿带、西矿带及混合带(图3),其形成的地质背

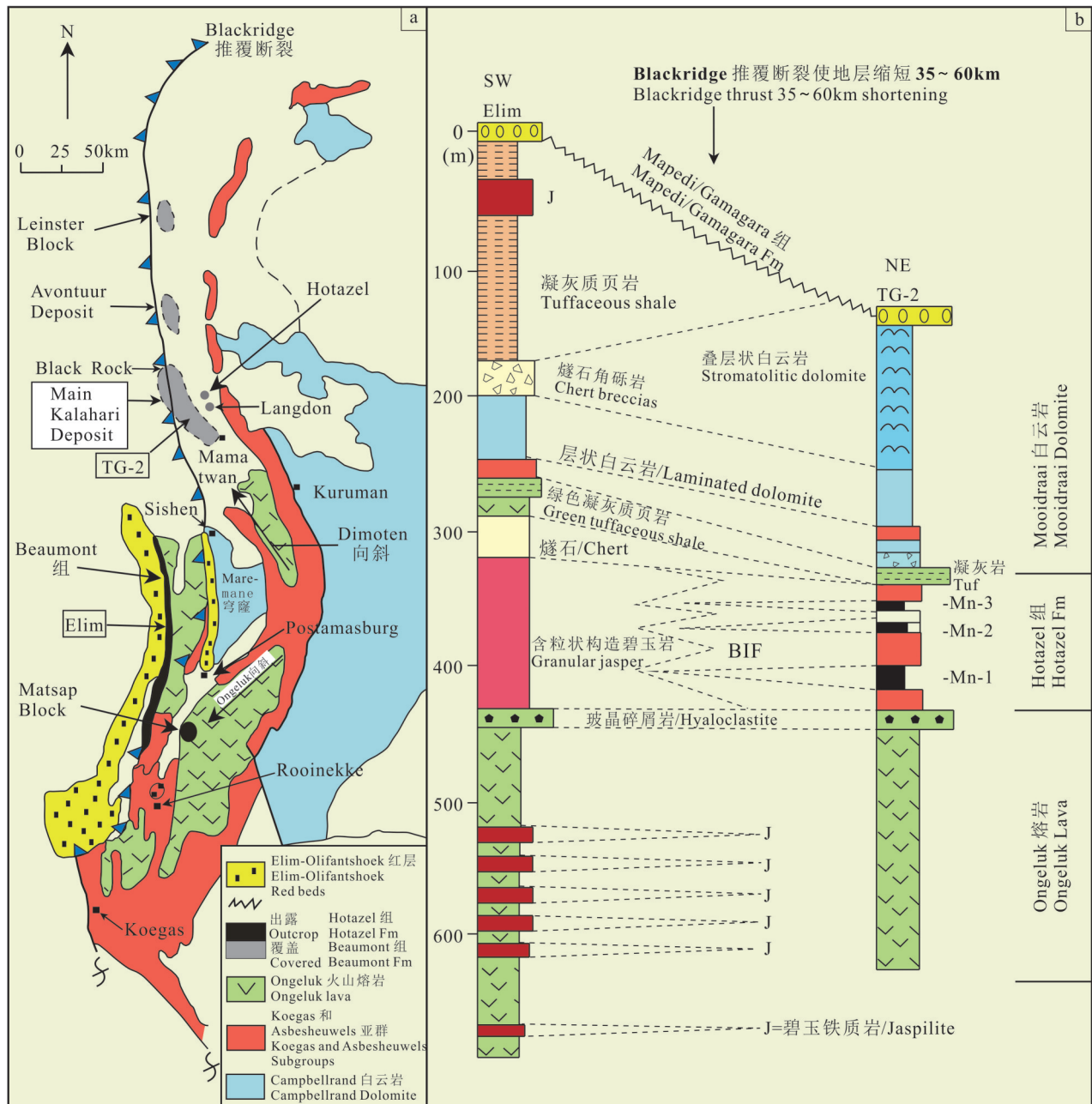


图2 南非西格里夸兰(Griqualand)德兰士瓦超群区域地质图(a, 显示了卡拉哈里锰矿田(KMF)和黑山(Black Ridge)逆冲断裂的分布)以及卡拉哈里锰矿田(KMF)横向剖面示意图(b) (据 Cairncross and Beukes, 2013)

Fig.2 Regional map of the Transvaal supergroup in Griqualand west showing the distribution of the Kalahari manganese field and Black Ridge thrust fault (a) and schematic diagram indicating lateral of the Kalahari manganese field (b) (after Cairncross and Beukes, 2013)

景有较大差异:东矿带呈向东凸出的弧形,形成较早,以发育 Wolhaarkop 燧石角砾岩的多层锰矿体为特征,矿体赋存在燧石角砾岩和下伏的坎贝尔兰德(Campbellrand)亚群白云岩接触部位,优质锰矿石与硅质角砾岩共生,较大的矿体常出现在白云岩的古溶洞中,矿体不连续,规模也较小;西矿带呈南

北向展布,形成较晚,以富铁的锰质建造为特征,锰矿体赋存在含铁页岩及下伏白云岩接触带中,矿体稳定、连续,规模也较大;混合带则兼具二者的特征,形成时间也介于二者之间(常洪伦等, 2014a,b);由于受岩溶作用影响,波斯特马斯堡锰矿田的矿体以非常不规则且不连续的几何形状为特征

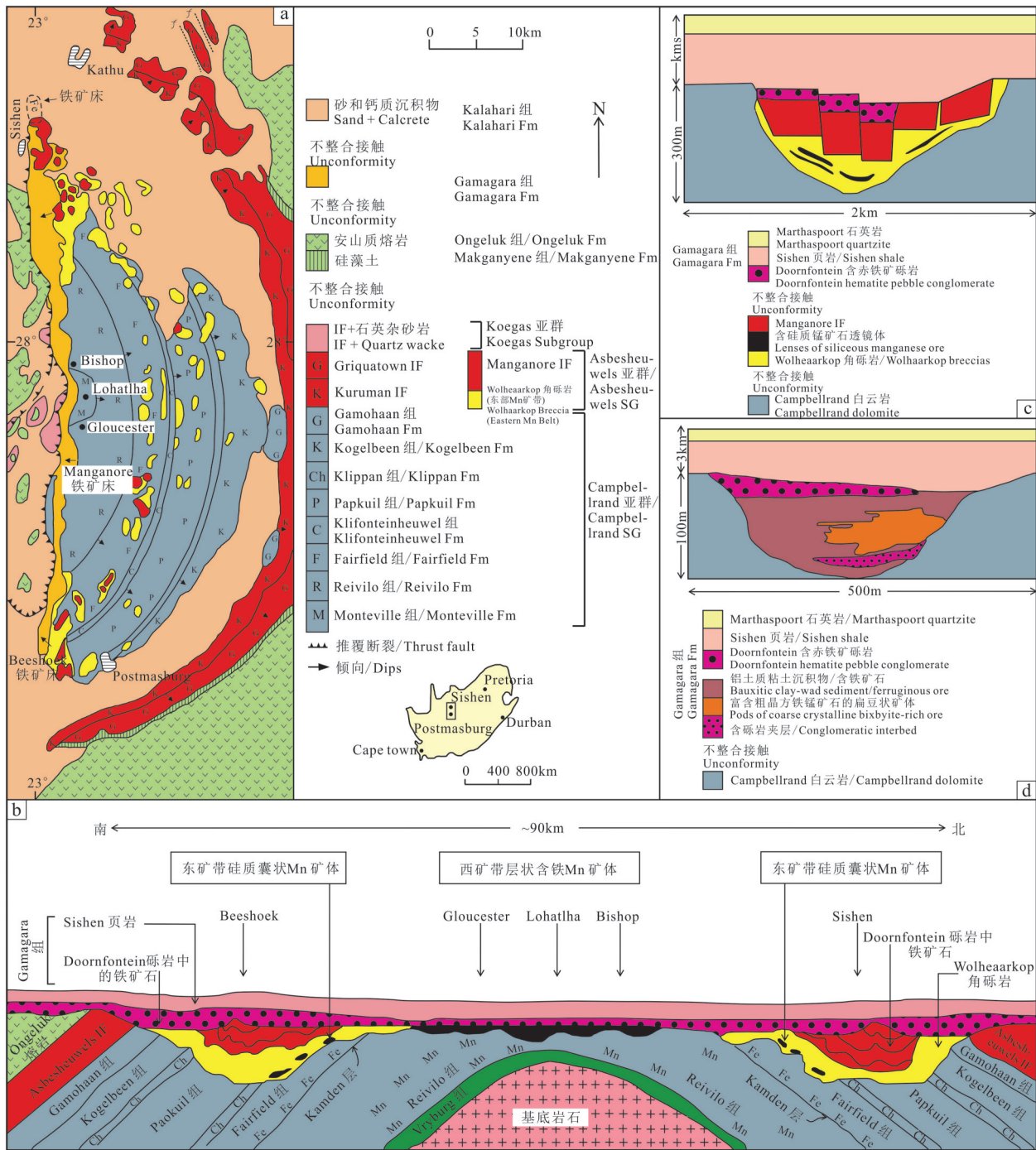


图3 马尔曼(Maremane)穹隆地质图(a)、N-S向横剖面示意图(b)、东部矿带(Manganore地区)的喀斯特(岩溶)地区锰矿床(c)及西部矿带(Lohattha地区)的喀斯特(岩溶)矿床(d)

在图d中请注意,在约2.0 Ga Gamagara/Mapedi红层底部为不整合接触,Sishen型高品位BIF赤铁矿铁矿床覆盖了东部矿带的锰矿床(据Gutzmer and Beukes, 1996b; Cairncross et al., 1997)

Fig.3 Geological map of the Maremane dome(a), schematic N-S cross section(b), Karst-hosted Postmasburg manganese deposits along the Eastern Belt (Manganore area) (c), and Western Belt (Lohattha area) (d)

Note in (d) that Sishen-type high-grade BIF-hosted hematite iron deposits overlie the manganese deposits of the Eastern Belt below the unconformity at the base of the ~2.0 Ga Gamagara/Mapedi red bed succession (modified from Gutzmer and Beukes, 1996b; Cairncross et al., 1997)

(Gutzmer and Beukes, 1996b)。

波斯特马斯堡锰矿田主要存在两种类型的锰矿石:一种称为硅质锰矿石,发育在东矿带的燧石和二氧化硅的溶洞塌陷角砾岩(Wolhaarkop角砾岩)中(图3a、b)(Gutzmer and Beukes, 1996b),主要矿石矿物有褐锰矿、锂硬锰矿、硬锰矿及黑锰矿等,矿石品位较高,一般锰含量>40%,硅含量约8%,磷含量仅为0.02%,脉石矿物主要为硅质矿物;另一种称为锰铁矿石,以透镜状、层状发育于西矿带不整合侵蚀面的上方,该不整合面将Gamagara组(约2.0 Ga)红层与下伏的新太古界坎贝尔格兰德(Campbellrand)亚群白云岩分隔开来(图3a、b)(Gutzmer and Beukes, 1996b),主要矿石矿物是方铁锰矿,其次是褐锰矿、锰尖晶石、黑锰矿、软锰矿、锂硬锰矿及灰铁锰矿,矿石品位较低,一般锰含量为30%左右。西、东两矿带都以发育表生隐钾锰矿和钡硬锰矿矿物为代表(Gutzmer and Beukes, 1996b),且在马尔曼(Maremane)穹隆的北部和南部边缘汇聚在一起。

4.2 加蓬弗朗西斯维利亚(Francevillian)锰矿带

加蓬弗朗西斯维利亚(Francevillian)锰矿带是除南非外非洲最重要的锰矿带,锰矿床主要位于Bangombe(40 km²)和Okouma(13 km²)两个高原的顶部,统称为莫安达(Moanda)锰矿区,拥有世界上最大的单体锰矿床,其资源量超过5.0亿t(Swindell, 2015)。其他一些高原,如Bafoula、Massengo、Yeye、Franceville和Okondja等也有锰矿床分布(图4),仅是规模相对较小、品位较低(Gauthier-Lafaye and Weber, 2003);高原区锰矿床剖面(图4b,图5)之间是一致的(Nicolas et al., 2016)。莫安达(Moanda)锰矿区矿床具有规模大和埋藏浅的特点,锰氧化物含量高,平均锰含量51%,矿山可露天开采。

弗朗西斯维利亚锰矿带的矿体赋存于基本未发生变质和变形作用的弗朗西斯维利亚(Francevillian)超群的班戈姆贝(Bangombe)组的泥质黑色页岩(2.3~2.0 Ga)中,该页岩覆盖在刚果克拉通西北部的太古宙结晶基底之上(Weber, 1973)。含锰岩系厚约300 m,其中碳酸盐岩层厚70 m,岩系底部为含铀的长石砾岩,含锰碳酸盐岩向东过渡为薄层低品位铁矿层,两者呈互层产出,

锰矿层为铁建造和黑色页岩之间的边缘相,而Bangombe高原区缺失铁建造(Nicolas et al., 2016)。

弗朗西斯维利亚锰矿带锰矿层分层及其主要特征如下(沈承珩等, 1995; Swindell, 2015):

(1)底层致密矿石,厚0.2~0.5 m。为含菱锰矿页岩层,在与页岩接触处有厚2~5 cm的软锰矿层,底部还有数毫米厚的水锰矿、软锰矿条带,其上为厚层状矿石,成分多为非晶质的氢氧化物及水锰矿、斜方水锰矿、黝锰矿及六方锰矿。整体看,致密矿石与页岩呈整合产出,但有时软锰矿常明显地切割页岩层理,局部地段形成富矿体。页岩有时完全被水锰矿交代,后又转化为软锰矿。

(2)板状矿石层,厚3~9 m,平均厚5 m。板状矿石层具层状构造,近水平产出,也含致密块状和碎屑状软锰矿层,在底部页岩中形成富矿囊。矿层内常含有氧化锰胶结的薄层砂岩及含铁红色页岩夹层。主要矿石矿物为非晶质或隐晶质的锰氢氧化物、黝锰矿、锂硬锰矿、六方锰矿和隐钾锰矿。

(3)过渡层,厚0.5~1 m。一般不具层状构造,由板状矿石碎块、结核状隐钾锰矿胶结的豆状矿石与砂岩、铁或锰结壳的碎块组成。

(4)豆状矿石层,厚5~26 m。由近圆球状,直径2~10 cm的豆状矿石及赭石色土状针铁矿和三水铝石组成。豆粒的核心常为矿石碎屑,其外由三水铝矿、针铁矿和锂硬锰矿交替沉积,构成同心层状构造,含锰15%,暂不具工业价值。

(5)砂质黏土层,厚0.1~0.5 m。其表层锰质已被淋失,仍含一些豆状锰矿石。

4.3 西非比利姆岩系(Birimian)锰矿带

西非是非洲另一重要锰资源聚集区,主要分布在加纳南部的恩苏塔(Nsuta)、布基纳法索北部的坦宝(Tambão)和其西南部的基尔(Kiere)、科特迪瓦海岸带附近的莫克塔/大拉胡(Mokta/Grand Lahou)和马里的安松戈(Ansongo)等地,因其在西非分布较广泛,且均赋存于古元古界的比利姆(Birimian)超群地层内,因此将其称为比利姆(Birimian)岩系锰矿带。

比利姆(Birimian)岩系沿西非太古宙的曼(Man)克拉通边缘展布,是一NW-SE走向遭受构造破坏的以火山-沉积岩为主的造山带,并伴有大量的同构造到构造后花岗岩的侵入(图6)。该套岩

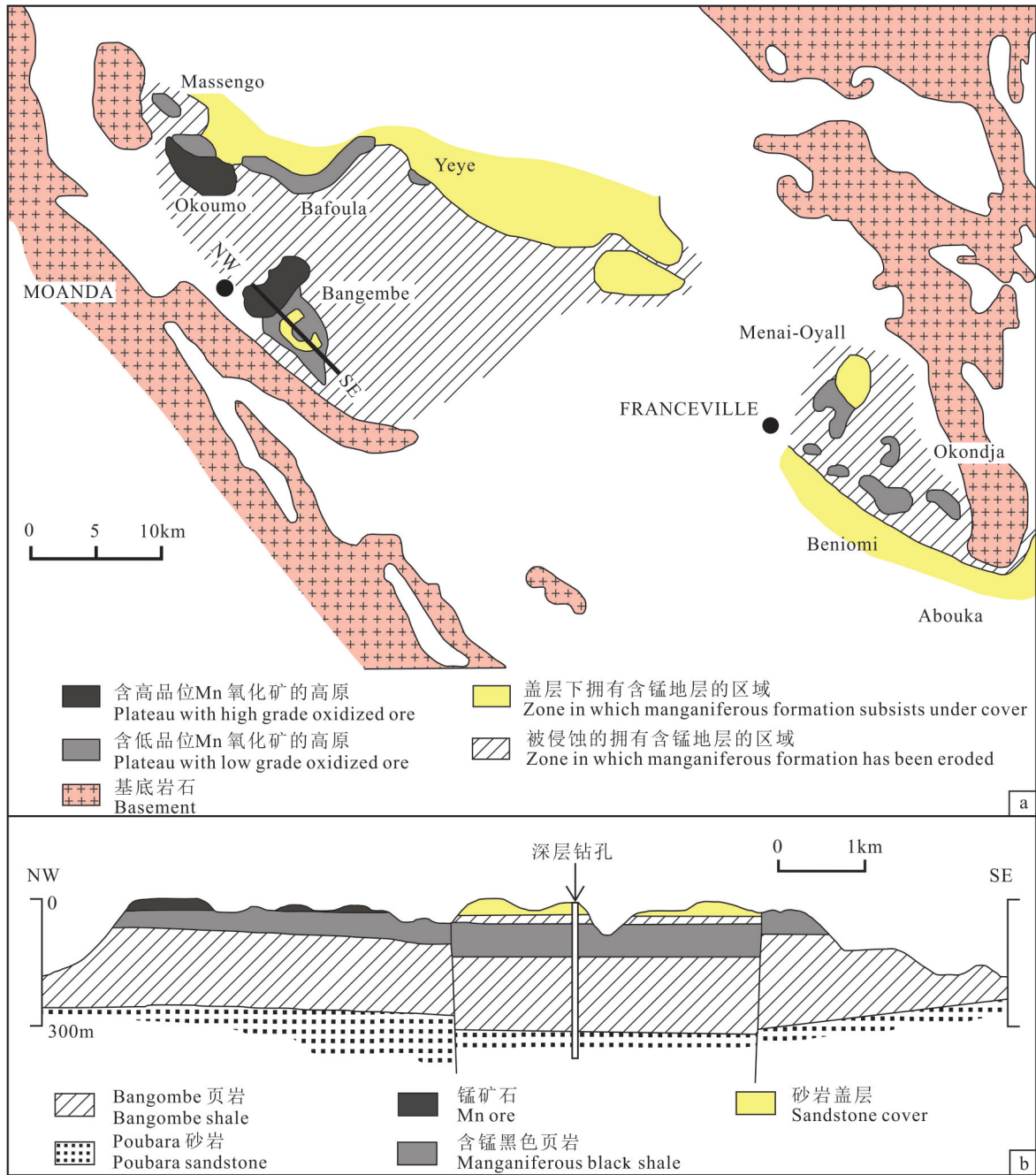


图4 加蓬 Francevillien 锰矿区地质简图(a)和莫安达(Moanda)附近的 Bangombe 高原的横剖面(b)(据 Nicolas et al.,2016)
 Fig.4 Simplified geological map of the Francevillien succession in Gabon(a) and cross section of the Bangombe plateau near Moanda (b) (after Nicolas et al.,2016)

系变质程度为低绿片岩相或高绿片岩相,角闪岩相常限于花岗岩侵入体的某些剪切带或接触变质带内(Baratoux et al.,2011)。岩系内的火山岩主要有以镁铁质为主的(双峰式火山岩和钙碱性熔岩和火山产物)和以长英质为主的(主要是长英质火山岩和一些中性火山岩)两种(图6),两者均含有少量的

泥质岩、燧石和锰矿层。

该火山岩带被认为是一系列的古岛弧,在埃本(Eburnian)期造山运动时增生到曼(Man)克拉通上的(Baratoux et al., 2011)。地层学和放射性年龄数据表明,在2.2~2.17 Ga的埃本(Eburnian)造山运动发展的早期阶段,以镁铁质火山作用占主,在2.17~

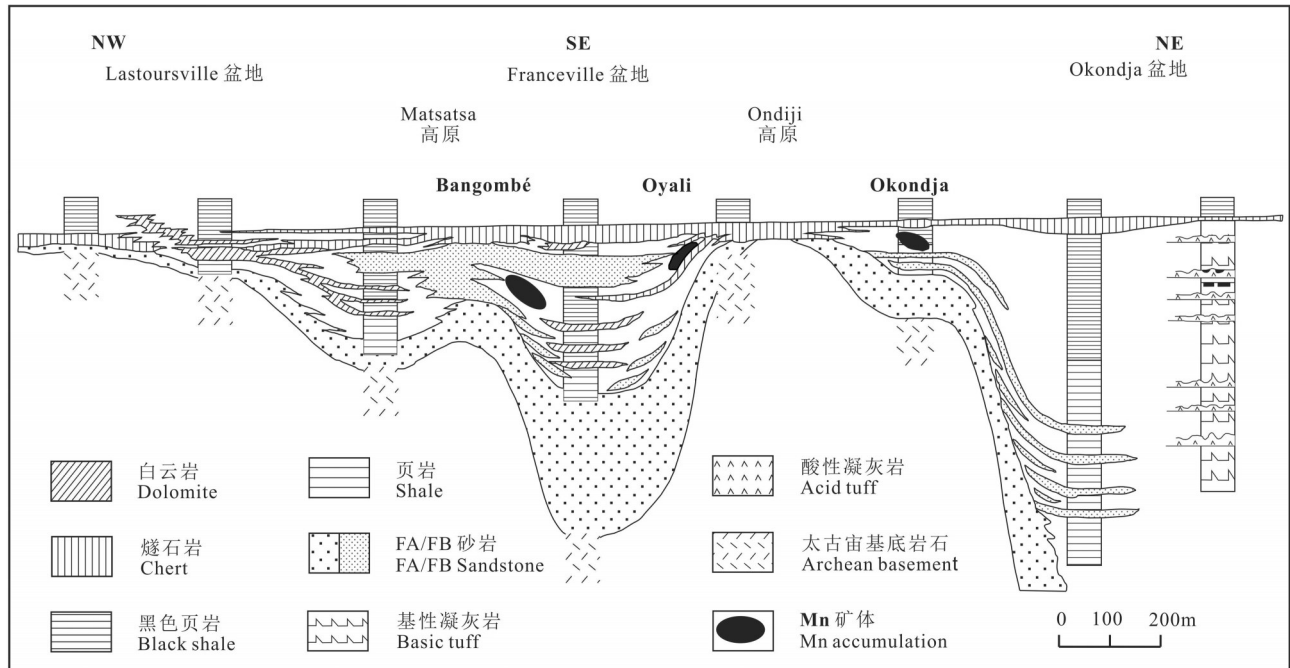


图5 加蓬Francevillian次级盆地古地理剖面示意图和锰矿床位置图(据Gauthier-Lafaye and Weber, 2003)

Fig.5 Schematic diagram of the palaeogeographic section of the Francevillian sub-basin and the location of the manganese deposit in Gabon (after Gauthier-Lafaye and Weber, 2003)

2.16 Ga,则以长英质火山活动为主,而在2.16~2.12 Ga,有类复理石硅质碎屑浊积岩沉积,在2.12~2.10 Ga,区域发生隆升,并遭受剥蚀,在2.0~1.9 Ga,形成了由北向东北走向的平移断层(图6)(Baratoux et al., 2011)。

Baratoux et al.(2011)认为,比利姆(Birimian)岩系锰矿带的矿床是在两种不同环境下形成的:加纳的恩苏塔(Nsuta)附近的锰矿床的形成与上覆的镁铁质火山岩带、过渡带及以沉积岩为主的岩带有关(图7);而科特迪瓦和布基纳法索的锰矿床,如莫克塔/大拉胡(Mokta/Grand Lahou)、基尔(Kiere)和坦宝(Tambão)等矿床的形成则与长英质火山岩带有关。因此,其认为该地区至少存在两个主要的锰成矿期,但也不排除是在一个更大的盆地中同时形成的可能性,只是盆地后期遭受构造破坏。

该成矿带锰矿床上部的表生氧化锰矿石都是由原生碳酸锰(主要是菱锰矿)氧化而成,其中原生碳酸锰矿石中锰含量为20%~30%(图7)。表生氧化锰矿体厚度最大可达70 m,常形成正地形山脊(Swindell, 2015),矿石品位高,含Mn 45%~50%,质地从松散状、葡萄状、块状到层状和脉状,通常由

Mn氧化物矿物组成,如硬锰矿、软锰矿、隐钾锰矿和六方锰矿。在石英锰榴岩之上发育的锰矿体含有褐锰矿(Swindell, 2015)。表生氧化锰矿体常被豆状锰矿石和锰铁红层覆盖,且往往被冲积型含锰砾石和碎块所包围,使得氧化物盖层常呈蘑菇形(图7)。细碎屑矿石(球状团块和小球团是局部风化和剥蚀的结果)总是沿着山坡两侧呈冲击裙发育(图7)。表生盖层氧化锰矿体规模一般都较小(很少>10~20 Mt),Mn/Fe比高。

恩苏塔(Nsuta)地区含锰地层分布广泛,主要沿区域西部边缘展布,NE-SW走向,长逾300 km,矿体呈陡倾的向斜构造。碳酸锰矿体厚30~40 m(Mücke et al.,1999),与细粒黑色炭质页岩互层,从深灰色炭质微晶碳酸盐到中灰色的细晶碳酸锰,具层状、块状构造(Nyame et al.,2003)。主要的矿石矿物是菱锰矿,还含有锰白云石(钙镁菱锰矿)。在多数矿床中,微晶质矿石占主导地位,而这种矿石在遭受热液蚀变时,常形成大量脉状或粒(粗粒)状粉红色菱锰矿矿石,此类矿石通常比细粒沉积型矿石品位高(Nyame, 1998; Nyame et al., 2003; Tetteh, 2010)。

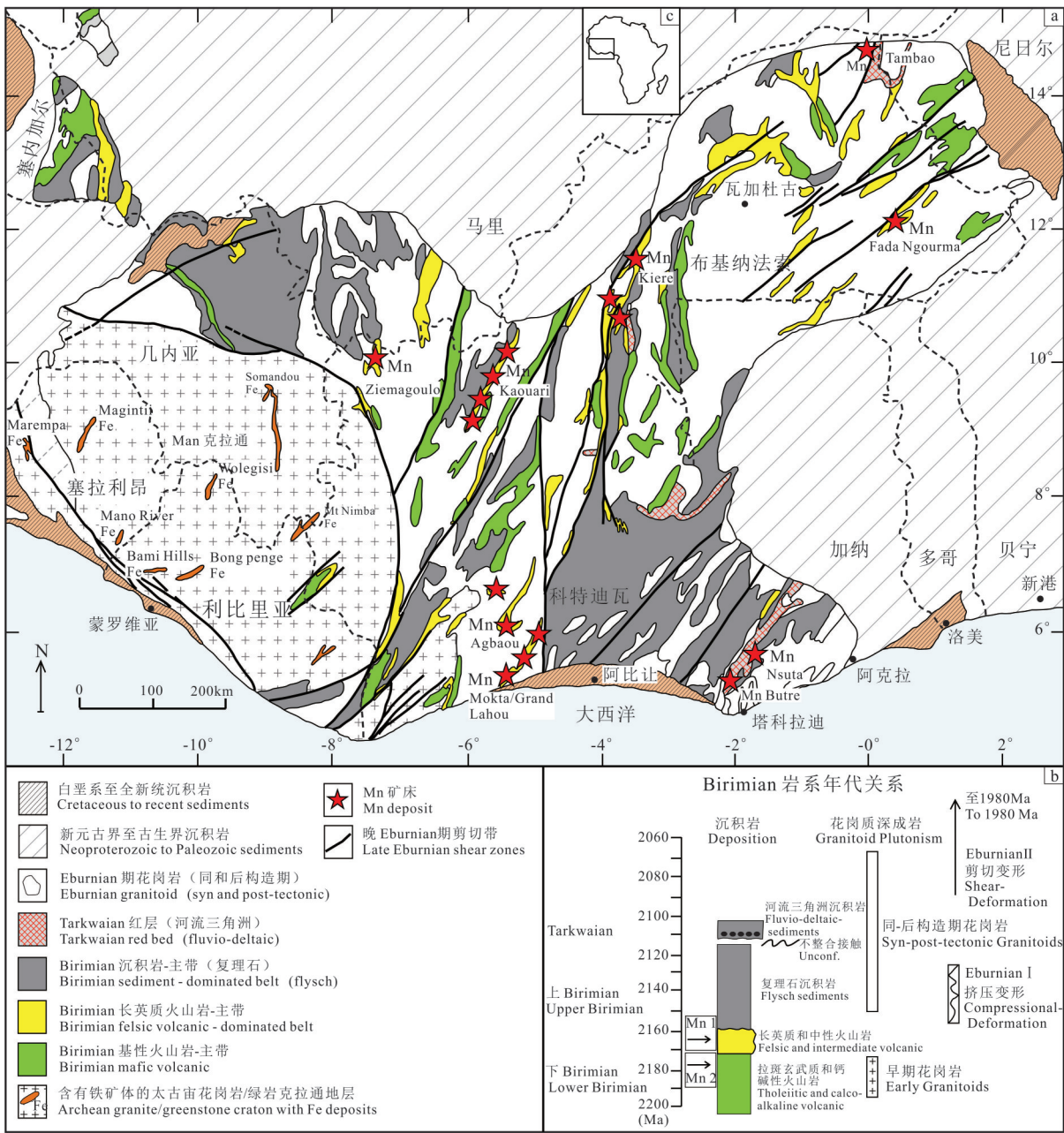


图6 西非比利姆(Birimian)岩系的简化地质图(据 Baratoux et al., 2011)

显示了以火山-沉积岩为主的造山带、曼(Man)克拉通和赋存在黑色页岩型的碳酸盐/石英锰榴岩锰矿床的位置

Fig.6 Simplified geological map of the Birimian succession in West Africa (after Baratoux et al., 2011)

showing major volcanic-and sediment-dominated orogenic belts, the Man Craton, tectono-sedimentary development of the succession and location of black shale-hosted carbonate/gondite manganese deposits

布基纳法索北部的坦宝(Tambão)矿床主要由一个陡倾斜的厚锰矿体组成,并被一花岗岩基岩分为三部分。上部表生氧化矿石由隐钾锰矿、软锰矿和六方锰矿组成;下部的原生矿由70%的菱锰矿(含少量的黑锰矿、褐锰矿和锰铁矿)和30%的蔷薇辉石和锰橄榄石组成,锰含量为36%~55%

(Swindell, 2015)。

4.4 摩洛哥伊米尼(Imini)锰矿带

摩洛哥是全球锰矿资源较为丰富的国家,也是全球重要的锰矿生产国,其锰矿资源集中分布在韦德伊米河两岸、瓦尔扎扎特(Quarzazate)镇西北的伊米尼(Imini)锰矿带上。该带位于摩洛哥中部的

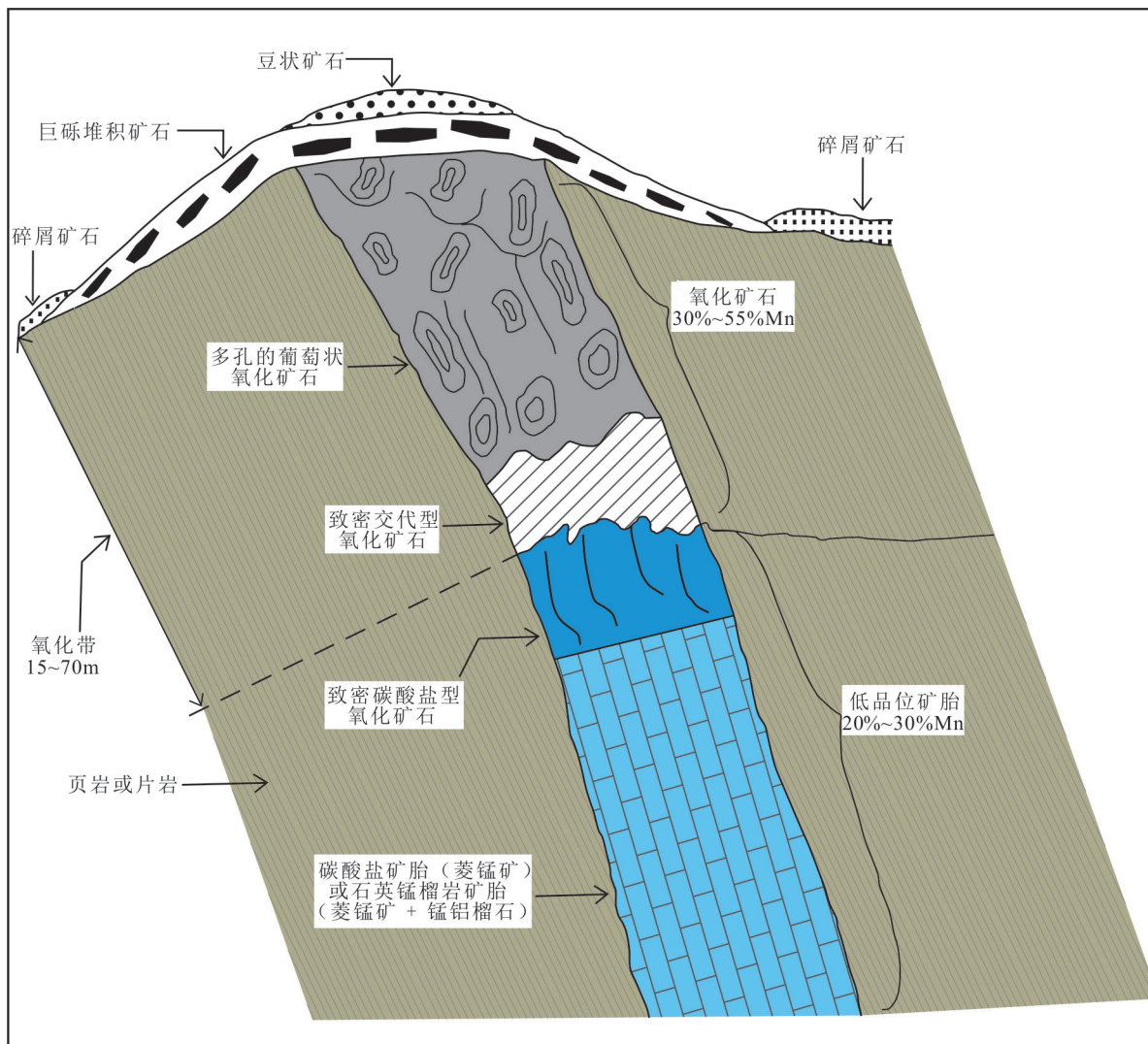


图7 西非Birimian岩系锰矿带典型的富含高品位表生氧化锰矿石的示意图(据Nicolas et al.,2016)

Fig.7 Schematic diagram of a typical supergene-enriched manganese oxide ore capping a carbonate or gondite black shale-hosted manganese bed of the Birimian in West Africa (after Nicolas et al.,2016)

高阿特拉斯(High Atlas)山脉以南,长约30 km,宽400~1000 m,沿NEE向展布,由Tazoult、Bou Tazoult、Boulgir、Lantenois、Tighermit、Timkit、Bou Aguioun及伊米尼(Imini)等锰矿床组成(图8)。

伊米尼(Imini)锰矿带位于瓦尔扎扎特(Quarzazate)前陆盆地的西部,处于北部的中—高阿特拉斯(Middle-High Atlas)山脉和南部的安迪—阿特拉斯(Anti-Atlas)山脉两个主要构造域之间的过渡带内(图8a),下中生界地层向北增厚并在安迪阿特拉斯(Anti-Atlas)上形成沉积楔(图8b; Zouhri et al.,2008),上三叠统红层沿N70~80°E方向展布(图8b中的紫色虚线)。锰矿体赋存在上白垩统的

森诺曼—土伦(Cenomanian-Turonian)阶浅海碳酸盐岩地层中(图8b、c; Thein, 1990; Gutzmer et al., 2006)。

伊米尼(Imini)锰矿床由三层锰矿体组成,每层厚度一般<0.5m,部分地段单层厚达1 m,矿床含有隐钾锰矿、锰钡矿、锰铅矿及拉锰矿、锂硬锰矿、羟黑锰矿等。而以软锰矿为主的高品位的锰矿有两层(锰含量为44.5%~59.0%),位于森诺曼—土伦阶碳酸盐岩层序的下部(图8c中的C1和C2),矿层是不连续的,多为微晶结构、块状构造,含砂岩—黏土岩夹层; C3层锰矿体位于白云石上方,矿层最厚的地段位于矿区北部,含有较多的钡硬锰矿,锰品位相对较低(图

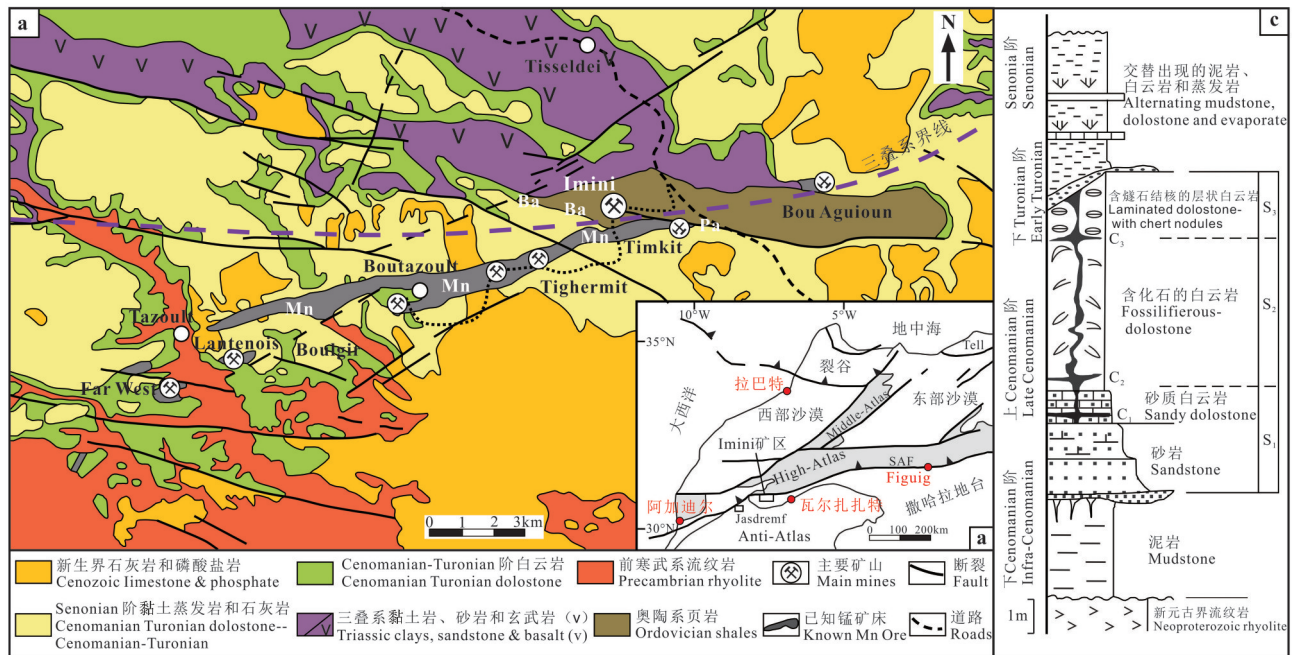


图8 摩洛哥伊米尼(Imini)锰矿带位置图(a)、伊米尼(Imini)锰矿带的简化地质图(b,显示了森诺曼—土伦阶白云岩中所含锰矿体的分布)及Lantenois锰矿床的地层柱状图(c,显示了三层Mn矿体(C1、C2、C3);三个沉积旋回系统(S1、S2、S3))(据 Mohammed, 2016)

Fig.8 Location of Imini district, south of South Atlas Front (SAF) (a), simplified geological map of Imini district showing distribution of Mn orebodies hosted in Cenomanian-Turonian dolostone (b) and detailed stratigraphic column of Lantenois deposit(c) showing three stratabound Mn levels (C1, C2, C3); Designation of three sedimentary systems (S1, S2, S3) (after Mohammed, 2016)

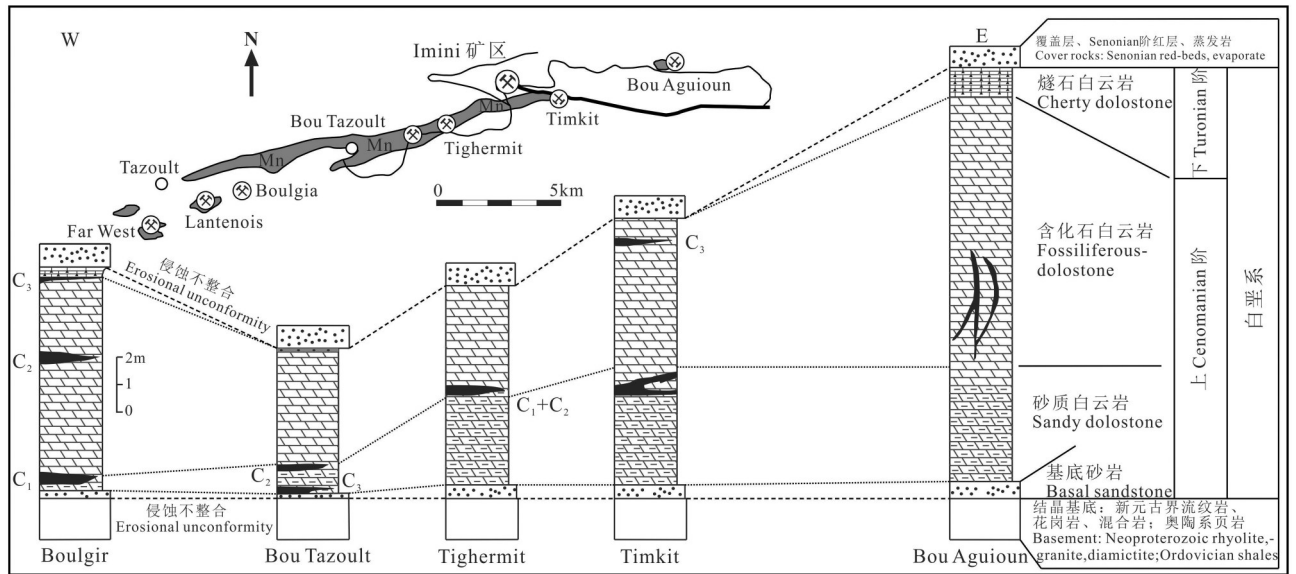


图9 伊米尼(Imini)锰矿带含矿地层柱状图 (据 Mohammed, 2016)

Fig.9 Stratigraphic columns from west to east across the district showing stratabound but not stratiform character of Mn orebodies; inset shows plan view of Mn belt and locations of mines (after Mohammed, 2016)

8c中的C3), 矿石呈脉状、网脉状。矿石中富含Pb(最高1%PbO)和Ba(最高6%BaO), Mn/Fe比值介于20~330之间(Gutzmer et al., 2006)。根据矿体的横向连续和层状特征认为锰矿化为同生沉积(Thein, 1990; Rhalmi et al., 1997)(图9)。

5 锰矿床的表生富集作用

从前面的描述与讨论中, 可以看出, 非洲主要的锰矿床: 摩洛哥伊米尼(Imini)是赋存在海相碳酸盐中、加蓬和刚果(金)的是赋存在海相黑色页岩中、西非比利姆岩系(Birimian)的是赋存在海相火山-沉积岩中、而赋存在BIF建造中的南非卡拉哈里-波斯特马斯堡锰矿床既可为海相沉积型, 也有属于海相火山-沉积型。总体看, 都属于沉积成因类型, 而对该类型锰矿床的成因机制和成矿模式的研究也都较系统、成熟, 本文将不再论述, 仅就非洲锰矿床成矿时代及重要的表生富集作用, 结合前人的认识进行初步探讨。

5.1 锰矿床成矿时代

从全球角度看, 非洲锰矿床形成时代较早(图10), 且集中出现在2.2~2.0 Ga(本文第2节), 都是在全球大氧化事件(GOE)(~2.35 Ga)之后形成的(图10)。太古宙和古元古代早期有大量的BIF铁建造

早于锰矿床形成。这是因为在溶液中, 锰比铁更易溶, 需要比水溶液中的二价Fe更高的氧含量才能将溶液中的二价Mn转化为不溶的三价或四价Mn-羟基氧化物, 与氢氧化铁沉淀形成铁锰建造(Beukes and Gutzmer, 2008)。而南非的洛音克(Rooinekke)锰矿床赋存的铁锰建造却是在大氧化(GOE)之前形成的(图10), Konhauser(2008)研究认为, 氧化还原条件对锰沉积具有重要意义, 而在大氧化(GOE)之前, 由于局部一些游离氧系统的存在, 可能是洛音克(Rooinekke)锰矿床Mn-羟基氧化物大量沉淀的重要因素。

关于非洲主要锰矿床如卡拉哈里-波斯特马斯堡(Kalahari-Postmasburg)锰矿田、加蓬弗朗西斯维尔利亚(Francevillian)锰矿带、西非比利姆岩系(Birimian)锰矿带及刚果(金)基森格(Kisenge)矿床的成矿时代都集中在2.2~2.0 Ga内, 临近哥伦比亚超大陆形成之前的主碰撞阶段, 非洲该时期的汇聚造山作用被称为埃本(Eburnian)造山作用(Meert, 2012)。正是在陆块聚合构造的早期阶段, 锰矿床沉积在西非的弧后盆地中, 沿曼(Man)克拉通东部边缘形成比利姆岩系(Birimian)锰矿床; 而在南部非洲的卡普瓦尔(Kaapvaal)克拉通的西部边缘沿弧后盆地形成卡拉哈里-波斯特马斯堡锰矿田; 在中

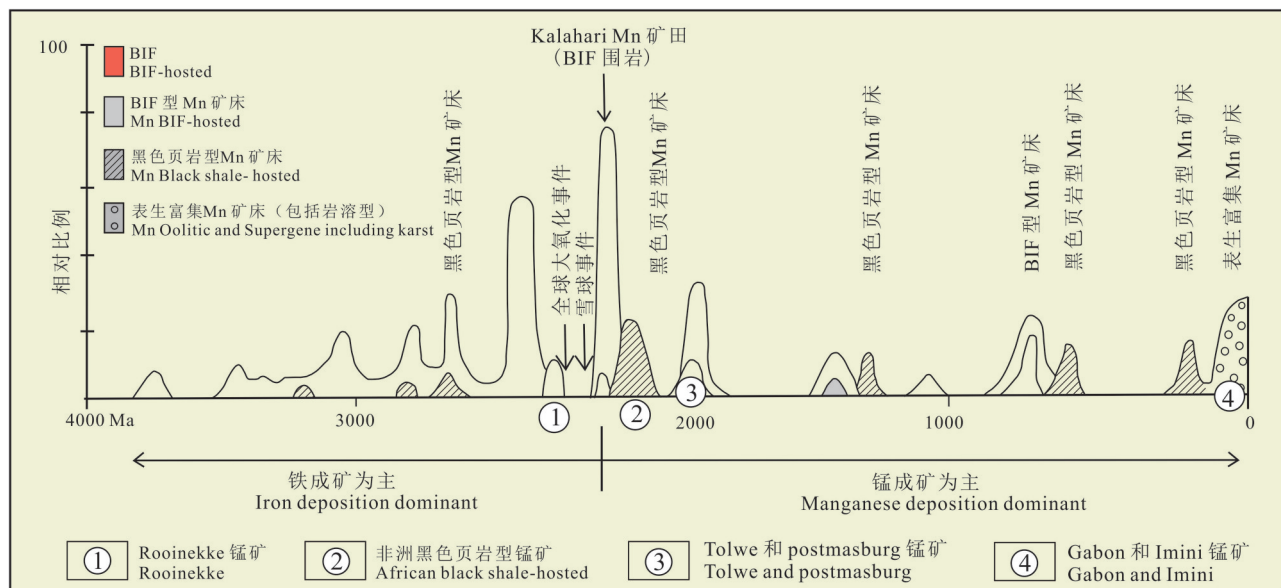


图10 非洲主要锰矿床与含铁建造形成时间分布示意图(据 Cairncross and Beukes,2013; Nicolas et al.,2016有修改)
Fig.10 Schematic indication of temporal distribution of major manganese deposits compared to that of iron formation (modified from Cairncross and Beukes,2013; Nicolas et al.,2016)

部非洲,沿刚果克拉通太古宇陆核南部边缘的弧后盆地形成基森格(Kisenge)锰矿床,在刚果克拉通西北边缘形成弗朗西斯维(Francevillian)锰矿带。

5.2 锰矿床的表生(岩溶)富集作用

发生表生(岩溶)富集成矿作用是非洲锰矿床一重要特点,多数锰矿床都遭受两期表生风化淋滤作用改造,即约2.0 Ga的前加玛加拉/马佩迪(Gamagara / Mapedi)不整合侵蚀期及新生代古近纪一新近纪的表生氧化期。正是这两期表生作用,使非洲多数锰矿床矿石锰含量提高,品位最高超过60%,矿床经济价值增大。

5.2.1 约2.0 Ga表生风化期

非洲新生代遭受表生风化作用的锰矿床基本都分布在靠近赤道,如加纳的恩苏塔、布基纳法索北部的坦宝(Tambão)、加蓬的莫安达等锰矿床,位于热带—亚热带的气候环境中,与具有深红土的古风化面密切相关。古地磁资料表明,在2.0 Ga形成的古侵蚀面时,卡普瓦尔(Kaapvaal)克拉通也是位于赤道附近(Evans et al., 2002),因此,沿古表生风化带既发育条带状铁建造(BIF)的高品位赤铁矿矿石,也发育高品位的锰氧化物矿石,如洛音克(Rooinnekke)锰矿,含碳酸锰岩层的铁建造,受该期风化作用影响,变成锰铁矿—赤铁矿锰矿(Cairncross and Beukes, 2013);在卡拉哈里,锰矿床的风化作用也出现在红土风化面中;而在波斯特马斯堡锰矿田,也发育与岩溶作用相关的锰矿床,溶蚀作用深入到富锰白云岩,可溶物质被淋滤,富锰的不溶物质沉积于白云岩的表面,或被搬运至溶坑的底部富集形成锰土,而当溶洞坍塌后,表面的红土落入锰土中与之混杂,形成锰质软泥,后被沉积序列覆盖压实成矿。受该期表生作用影响,一般在不整合面下方形成厚层、富含铁、锰的具有经济价值的红土风化壳(Cairncross and Beukes, 2013)。

5.2.2 新生代表生风化期

非洲新生代表生风化作用对先期形成的锰矿床(或含锰岩系)进行改造,在风化剖面发生原位氧化和水合作用,形成原位氧化矿石或溶解沉淀锰矿(红土锰矿)。该期风化剖面发育,在厚度较大的地区,矿石常有明显的分带现象。上部富含豆状、结核状矿石,锰含量较低,常与氢氧化铁、黏土共生,而在较深部带主要形成以氧化锰结核、结壳为主的

矿石。通常,再沉积的氧化锰矿石与其它风化产物相分离。在有良好排水条件时,高原上的表生矿石的锰将发生局部横向迁移。在风化条件下,由于Mn比Fe、Al等元素地球化学性质更活跃,因此当碱、碱土元素上升,Si部分从下部带释放时,Mn可迁移到较深部位。由于生成条件不尽相同,表生锰矿床的矿物组分也有变化。最常见的有水锰矿、软锰矿、隐钾锰矿、钠水锰矿、硬锰矿、六方锰矿等。

西非比利姆岩系(Birimian)锰矿床、刚果基森格(Kisenge)的碳酸锰矿床及南非卡拉哈里锰矿田受表生风化作用形成高品位的锰氧化物矿石(Gutzmer et al., 2012)。

综合学者研究认为:卡拉哈里锰矿田在新生代发生4次强烈的表生蚀变作用,分别是约42 Ma、25 Ma、10 Ma和5 Ma前(Gutzmer et al., 2012);刚果(金)的基森格(Kisenge)锰矿床,在25 Ma和10 Ma前也发生过表生蚀变作用,但以3.6 Ma和2.6 Ma两个阶段为主要(De Putter et al., 2015);西非比利姆岩系(Birimian)锰矿床在13 Ma前发生了最后一次普遍的氧化事件(Vasconcelos et al., 1994)。

6 结 论

(1)非洲锰矿资源丰富,类型多样,矿床规模大,分布相对集中。锰矿石的质量较好,以表生富集的高品位富矿为主,矿体多产于地表浅层部位,易于开采。矿石矿物主要由硬锰矿、隐钾锰矿、水锰矿、褐锰矿、黑锰矿、六方锰矿和软锰矿等组成。

(2)非洲锰矿床的类型主要为沉积型,具体划分为前寒武系条带状铁建造(BIF)型、海相沉积型、与岩浆作用有关的热液型及陆相(三角洲湖相)沉积型锰矿床,并以前两者最重要。

(3)非洲锰矿床成锰时代较早,以前寒武纪为主,且集中出现于2.2~2.0 Ga。多数锰矿床都遭受2.0 Ga的前加玛加拉/马佩迪(Gamagara / Mapedi)不整合侵蚀及新生代表生氧化两期风化淋滤作用改造。

(4)南非卡拉哈里—波斯特马斯堡锰矿田与加蓬的弗朗西斯维利亚、西非的比利姆及摩洛哥的伊米尼锰矿带是非洲最重要的锰矿田(带),研究认识这些锰矿床的成因类型、地质特征,对推动中国锰矿找矿工作具有重要的指导意义。

致谢:三位匿名审稿专家提出的宝贵修改意见对于完善本文有重要帮助,特此感谢。

References

- Baratoux L, Metelka V, Naba S, Jessell M W, Grégoire M, Ganne J. 2011. Juvenile Paleoproterozoic crust evolution during the Eburnean orogeny (< 2.2–2.0 Ga), western Burkina Faso[J]. *Precambrian Research*, 191:18–45.
- Bekker A, Karhu J A, Eriksson K A, Kaufman A J. 2003. A Chemostratigraphy of Paleoproterozoic carbonate successions of the Wyoming Craton: Tectonic forcing or biogeochemical change?[J]. *Precambrian Research*, 120: 279–325.
- Bekker A, Slack J F, Planavsky N, Krapez B, Hofmann A, Konhäuser K O, Rouxel O J. 2010. Iron formation: The sedimentary product of a complex interplay among mantle, tectonic, oceanic, and biospheric processes[J]. *Economic Geology*, 105(3): 467–508.
- Beukes N J, Gutzmer J. 2008. Origin and paleoenvironmental significance of major iron formations at the Archaean–Paleoproterozoic boundary[J]. *Reviews in Economic Geology*, 15: 5–47.
- Bühn B, Stansistreet I G, Okrusch M. 1992. Late Proterozoic outer shelf manganese and iron deposits at Otjosondou (Namibia) related to the Damaran oceanic opening[J]. *Economic Geology*, 87:1393–1411.
- Caby R, Buscaill F, Dembe D, Diakite S, Sacko S, Bal M. 2008. Neoproterozoic garnet–glauconophanites and eclogites: New insights for subduction metamorphism of the Gourma fold and thrust belt (eastern Mali)[C]//Ennih N, Liegeois J P (eds.). *The Boundaries of the West African Craton*. Geological Society, London, Special Publications, 297:203–216.
- Cairncross B, Beukes N J. 2013. *The Kalahari Manganese Field*[M]. Assore, Johannesburg, Random House Struik, 1–384.
- Cairncross B, Beukes N J, Gutzmer J. 1997. *The Manganese Adventure: The South African Manganese Fields*[M]. Assore, Johannesburg, Associated Ore & Metal Corporation Limited, 1–236.
- Cannon W F, Kimball B E, Corathers L A. 2017. Manganese [C]//Schulz K J, De Young J H, Seal IRR, Bradley D C. *Critical mineral resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply*. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey Professional Paper, 1802–L, 1–40.
- Chang Honglun, Kong Fanhui, Song Xiaodong, Du Jun, Zhao Jin, Li Jianfeng, Wang Congying. 2014a. Geological characteristics and genesis analysis of deposits in Postmasburg area, South Africa[J]. *Geological Review*, 60(3): 580–590(in Chinese with English abstract).
- Chang Honglun, Kong Fanhui, Song Xiaodong, Du Jun, Zhao Jin, Li Jianfeng, Wang Congying. 2014b. Dolostone controls in Postmasburg manganese field, South Africa[J]. *Acta Sedimentology*, 32(5):832–839(in Chinese with English abstract).
- Chen Jiabin, Yu Lianghui. 2020. Comparative Analysis of Mineral Resources Situation in China, America and Europe[M]. Beijing, Geological Publishing House(in Chinese with English abstract).
- Clout J M F, Simonson B M. 2005. Precambrian iron formations and iron formation–hosted iron ore deposits[C]//Hedenquist J W, Thompson J F H, Goldfarb R J, Richards J P. *Economic Geology One Hundredth Anniversary Volume, 1905–2005*. Littleton: Economic Geology: 643–679.
- Cong Yuan, Dong Qingji, Xiao Keyan, Chen Jianping, Gao Yongbao, Yin Jiangning. 2018. Characteristics and predicted potential of Mn resources in China[J]. *Geoscience Frontier*, 25(3):118–137(in Chinese with English abstract).
- Dekoninck A, Bernard A, Barbarand J, Saint–Bezar B, Missenard Y, Lepretre R, Saddiqi O, Yans J. 2016. Detailed mineralogy and petrology of manganese oxyhydroxide deposits of the Imini district (Morocco)[J]. *Miner Deposita*, 51: 13–23.
- De Putter T, Ruffet G, Yans J, Mees F. 2015. The age of supergene manganese deposits in Katanga and its implications for the Neogene evolution of the African Great Lakes Region[J]. *Ore Geology Reviews*, 71:350–362.
- Doyen L. 1973. The manganese ore deposit of Kisenge–Kamata (Western Katanga), mineralogical and sedimentological aspects of the primary ore[J]. *Ores in Sediments*, 3:93–100.
- Fan D L, Yang P. 1999. Introduction to and classification of manganese deposits of China[J]. *Ore Geology Reviews*, 15:1–15.
- Feybesse J L, Johan V, Triboulet C, Guerrot C, Mayaga–Mikolo F, Bouchot V, N’ Dong J E. 1998. The West Central African belt: A model of 2.5–2.0 Ga accretion and two–phase orogenic evolution[J]. *Precambrian Research*, 87:161–216.
- Fu Yong, Xu Zhigang, Pei Haoxiang, Jiang Ran. 2014. Study on metallogenic regularity of manganese ore deposits in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(12): 2192–2207(in Chinese with English abstract).
- Gauthier–Lafaye F, Weber F. 2003. Natural nuclear fission reactors: Time constraints for occurrence, and their relation to uranium and manganese deposits and to the evolution of the atmosphere[J]. *Precambrian Research*, 120: 81–100.
- Gutzmer J, Beukes N J. 1995. Fault–controlled metasomatic alteration of Early Proterozoic sedimentary manganese ores in the Kalahari Manganese Field, South Africa[J]. *Economic Geology*, 90: 823–844.
- Gutzmer J, Beukes N J. 1996a. Mineral paragenesis of the Kalahari manganese field, South Africa[J]. *Ore Geology Reviews*, 11:405–428.
- Gutzmer J, Beukes N J. 1996b. Karst–hosted fresh water Palaeoproterozoic manganese deposits, Postmasburg, South Africa[J]. *Economic Geology*, 91:1435–1454.
- Gutzmer J, Beukes N J. 1998. Earliest laterites and possible evidence

- for terrestrial vegetation in the Early Proterozoic[J]. *Geology*, 26: 263–266.
- Gutzmer J, Beukes N J, Rhalmi M, Mukhopadhyay J. 2006. Cretaceous karstic cave–fill manganese–lead–barium deposits of Imini, Morocco[J]. *Economic Geology*, 101: 385–405.
- Gutzmer J, Du Plooy A P, Beukes N J. 2012. Timing of supergene enrichment of low–grade manganese ores in the Kalahari manganese field, South Africa[J]. *Ore Geology Reviews*, 47:136–153.
- Gutzmer J, Schaefer M O, Beukes N J. 2002. Red bed–hosted oncolitic manganese ore of the Paleoproterozoic Soutpansberg Group, Bronkhorstfontein, South Africa[J]. *Economic Geology*, 97: 1023–1039.
- Hoffman P F, Schrag D P. 2000. Snowball earth[J]. *Scientific American*, 282:68–75.
- Holland H D, Beukes N J. 1990. A paleoweathering profile from Griqualand West, South Africa: Evidence for a dramatic rise in atmospheric oxygen between 2.2 and 1.9 BYBP[J]. *American Journal of Science*, 290A:1–34.
- Kim A A H, Asinne T. 2016. Manganese deposits of the Oudalan province in the northeast of Burkina Faso, and Ansongo Inlier in eastern Mali[J]. *Ore Geology Reviews*, 78: 645–651.
- Klein C. 2005. Some Precambrian banded iron–formations(BIFs) from around the world: Their age, geologic setting, mineralogy, metamorphism, geochemistry, and origin[J]. *American Mineralogist*, 90(10):1473–1499.
- Klein C, Beukes N J. 1993. Sedimentology and geochemistry of glaciogenic Late Proterozoic Rapitan iron formation in Canada[J]. *Economic Geology*, 88: 542–565.
- Konhauser K O. 2008. Introduction to Geomicrobiology[M]. John Wiley & Sons, Blackwell Publishing, 1–425.
- Mohammed Bouabdellah. 2016. Mineral Deposits of North Africa[M]. Springer International Publishing Switzerland, 1–585.
- Mücke A, Dzighbodi–Adjimah K, Annor A. 1999. Mineralogy, petrography, geochemistry and genesis of the Paleoproterozoic Birimian manganese–formation of Nsuta/Ghana[J]. *Mineralium Deposita*, 34:297–311.
- Nicolas J B, Edward P W S, Herve Wabo. 2016. Manganese deposits of Africa[J]. *Episodes*, 39(2): 285–317.
- Nyame F K. 1998. Mineralogy, Geochemistry, and Genesis of the Nsuta Manganese Deposit[D]. Unpublished Ph.D dissertation, Okayama University, 1–213.
- Nyame F K. 2001. Petrological significance of manganese carbonate inclusions in spessartine garnet and relation to the stability of spessartine in metamorphosed manganese–rich rocks[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 141:733–746.
- Nyame F K, Kase K, Yamamoto M. 1998. Spessartine garnets in a manganiferous carbonate formation from Nsuta, Ghana[J]. *Resource Geology*, 48:13–22.
- Nyame F K, Beukes N J, Kase K, Yamamoto M. 2003. Compositional variations in manganese carbonate micronodules from the Lower Proterozoic Nsuta deposit, Ghana: Product of authigenic precipitation or post–formational diagenesis?[J]. *Sedimentary Geology*, 154:159–175.
- Ren Junping, Zuo Libo, Xu Kangkang, Wang Jie, Liu Xiaoyang, He Shengfei, Liu Yu, He Fuqing. 2016. Geodynamic evolution and mineral resources present research in Bangweulu Block, Northern Zambia[J]. *Geological Review*, 62(4): 979–996(in Chinese with English abstract).
- Rhalmi M, Pascal A, Lang J. 1997. Contrôle sédimentaire et diagénétique de la minéralisation manganésifère au cours du Crétacé Supérieur dans la région d’Imini (Haut–Atlas central, Maroc)[J]. *Comptes Rendus Académie Sciences* 323(2):213–220.
- Schaefer M O, Gutzmer J, Beukes N J. 2001. Late Paleoproterozoic Mn–rich oncoids: Earliest evidence for microbially mediated Mn precipitation[J]. *Geology*, 29:835–838.
- Shen Chengheng, Wang Shoulun, Chen Senhuang. 1995. The World's Ferrous Metal Mineral Resources[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Swindell E P W. 2015. Manganese Deposits of Africa – A short review[C]//Internal Report (unpublished). Swindell Consulting Geologist, Krugersdorp, South Africa, 1–94.
- Tetteh G M. 2010. Geology and mineralization of the Paleoproterozoic Nsuta manganese deposit in the Birimian of Ghana[D]. PhD thesis (unpublished), University of Ghana, Legon, 1–186.
- Thein J. 1990. Paleogeography and geochemistry of the "Cenomano–Turonian" formations in the manganese district of Imini (Morocco) and their relation to ore deposition[J]. *Ore Geology Reviews*, 5: 257–291.
- Thierry D P, Jean–Paul L, Stijn D, Jacques C, Adrian B, Floria M. 2018. Paleoproterozoic manganese and base metals deposits at Kisenge–Kamata (Katanga, D.R. Congo) [J]. *Ore Geology Reviews*, 96:558–563.
- Trendall A F. 2002. The significance of iron–formation in the Precambrian stratigraphic record[J]. *Special Publication International Association of Sedimentologists*, 33(1): 33–66.
- Tshibubudze A, Hein K A A. 2013. Structural setting of gold deposits in the Oudalan–Gorouol volcano–sedimentary belt east of the Markoye Shear Zone, West African craton[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 80:31–47.
- Tsikos H, Moore J M. 1997. Petrography and geochemistry of the Paleoproterozoic Hotazel iron–manganese formation, Kalahari manganese field, South Africa: Implications for Precambrian manganese metallogenesis[J]. *Economic Geology*, 92:87–97.
- Tsikos H, Moore J M. 1998. The Kalahari manganese field: An enigmatic association of iron and manganese[J]. *South African Journal of Geology*, 101: 287–290.
- Varentsov I M. 1964. Sedimentary Manganese Ores[M]. Elsevier

- Publishing Company, Elsevier, Amsterdam, 1-119.
- Vasconcelos P M, Renne P R, Brimhall G H, Becker T A. 1994. Direct dating of weathering phenomena by ^{40}Ar - ^{39}Ar and K-Ar analysis of supergene K-Mn oxides[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58: 1635-1665.
- Wang Changle, Zhang Lianchang, Liu Li, Dai Yanpei. 2012. Research progress of precambrian iron formations abroad and some problems deserving further discussion[J]. *Mineral Deposits*, 31(6): 1311-1325(in Chinese with English abstract).
- Weber F. 1973. Genesis and Supergene evolution of Precambrian sedimentary manganese deposit at Moanda (Gabon), UNESCO, Genesis of Precambrian Iron and Manganese deposits. Proceedings Kiev Symposium[J]. *Earth Sciences*, 9: 307-322.
- Yao Peihui, Lin Zhentai, Du Chunlin. 1995. China Manganese Ore Chronicle[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press(in Chinese with English abstract).
- Ye Lianjun, Fan Delian, Yang Peiji. 1994. Manganese Deposits in China[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese with English abstract).
- Yin Jiangning, Xiao Keyan. 2014. Resources potential analysis and metallogenic prospect of Mn resources in China[J]. *Geology in China*, 41(5): 1424-1437(in Chinese with English abstract).
- Zouhri S, Kchikach A, Saddiqi O, Haïmer F Z E, Baid-der L, Michard A. 2008. The Cretaceous-Tertiary Plateaus[C]// Michard A, Saddiqi O, Chalouan A, de Lamotte D F (eds.). *Continental Evolution: the Geology of Morocco*. Springer, Berlin-Heidelberg: 331-358.
- ### 附中文参考文献
- 常洪伦, 孔繁辉, 宋晓东, 杜俊, 赵晋, 李建锋, 王聪颖. 2014a. 南非 Postmasburg 地区锰矿床地质特征及成因分析[J]. *地质论评*, 60(3): 580-590.
- 常洪伦, 孔繁辉, 宋晓东, 赵晋, 李建锋, 杜俊, 王聪颖. 2014b. 南非 Postmasburg 锰矿田白云岩的控矿作用[J]. *沉积学报*, 32(5): 832-839.
- 陈甲斌, 余良晖. 2020. 中美欧矿产资源形势对比分析[M]. 北京: 地质出版社.
- 丛源, 董庆吉, 肖克炎, 陈建平, 高永宝, 阴江宁. 2018. 中国锰矿资源特征及潜力预测[J]. *地学前缘*, 25(3): 118-137.
- 付勇, 徐志刚, 裴浩翔, 江冉. 2014. 中国锰矿成矿规律初探[J]. *地质学报*, 88(12): 2192-2207.
- 任军平, 左立波, 许康康, 王杰, 刘晓阳, 何胜飞, 刘宇, 贺福清. 2016. 赞比亚北部班韦乌卢地块演化及矿产资源研究现状[J]. *地质论评*, 62(4): 979-996.
- 沈承珩, 王守伦, 陈森煌. 1995. 世界黑色金属矿产资源[M]. 北京: 地质出版社.
- 王长乐, 张连昌, 刘利, 代堰镭. 2012. 国外前寒武纪铁建造的研究进展与有待深入探讨的问题[J]. *矿床地质*, 31(6): 1311-1325.
- 姚培慧, 林镇泰, 杜春林. 1995. 中国锰矿志[M]. 北京: 冶金工业出版社.
- 阴江宁, 肖克炎. 2014. 中国锰矿资源潜力分析及成矿预测[J]. *中国地质*, 41(5): 424-437.
- 叶连俊, 范德廉, 杨培基. 1994. 中国锰矿床[M]. 北京, 地质出版社.