doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.01.005

南部非洲锰矿成矿规律与资源潜力

孙宏伟[1,2],任军平[2*],王杰[2],吴兴源[2],唐文龙[2],古阿雷[2],左立波[2]
SUN Hongwei[1,2], REN Junping[2*], WANG Jie[2], WU Xingyuan[2], TANG Wenlong[2], GU Alei[2], ZUO Libo[2]

1.中国地质大学(北京)地球科学与资源学院,北京 100083;
2.中国地质调查局天津地质调查中心,天津 300170
1.*School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing* 100083, *China;*
2.*Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin* 300170, *China*

摘要:锰作为一种重要的金属矿产,广泛应用于各种工业领域。世界锰矿资源总量丰富,但分布极不均衡,主要分布在南非、乌克兰、巴西、澳大利亚等国。中国锰矿资源具有总量大、平均品位低、开采难度大等特点,为满足国内需求,中国每年需从海外进口大量锰矿。南部非洲地区锰矿资源丰富,主要有海相沉积变质型、海相沉积型、热液型及表生型锰矿 4 种成矿类型。其中,海相沉积变质型和海相沉积型最重要,依据含矿岩系特征又进一步将其划分为 BIF 岩系型锰矿、黑色页岩系型锰矿及硅-泥-灰岩系型锰矿。南部非洲原生锰矿成矿时代主要集中在 2.2~2.0 Ga,与 Eburnean 造山运动时代耦合;空间上主要分布在古陆块边缘,成矿背景以弧后盆地及边缘盆地为主。南部非洲地区锰矿成矿地质条件优越,且总体找矿勘查程度较低,资源潜力巨大。

关键词:锰矿;时空分布;成矿规律;资源潜力;南部非洲;矿产勘查工程
中图分类号:P618.32 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2022)01-0060-12

Sun H W, Ren J P, Wang J, Wu X Y, Tang W L, Gu A L, Zuo L B. Metallogenic regularity and resource potential of manganese deposits in southern Africa. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(1):60-71

Abstract: As an important metal, manganese is widely used in various industrial fields. The total amount of manganese resources in the world is abundant, but its distribution is extremely uneven, mainly distributed in South Africa, Ukraine, Brazil, Australia and other countries. Manganese resources in China are characterized by large tonnage, low tenor, and difficulty in mining. In order to meet domestic demand, China needs to import a large amount of manganese ore from overseas every year. Southern Africa is rich in manganese resources, mainly consisting of four metallogenic types, namely marine sedimentary metamorphic type, marine sedimentary type, hydrothermal type and supergene type. Among them, the marine sedimentary metamorphic type and marine sedimentary type are the most important, and they are further divided into BIF rocks-hosted Mn deposit, black shale-hosted Mn deposit and silicon-mud-limestone-hosted Mn deposits based on the ore-bearing rocks. The metallogenic epoch of primary manganese deposits is mainly concentrated in 2.2~2.0 Ga, which is coupled with Eburnean orogeny. Spatially, it is mainly distributed on the edge of ancient landmass, and the metallogenic background is mainly back-arc basin and marginal basin. The current southern Africa is a typical case with favorable metallogenic geological conditions, overall low level of prospecting and exploration, and huge potential of manganese resources.

Key words: manganese; spatial and temporal distribution; metallogenic regularity; resource potential; southern Africa; mineral exploration engineering

收稿日期:2021-04-26;**修订日期:**2021-09-10
资助项目:商务部技术援外项目《援赞比亚东北地区航空物探与地质地球化学填图项目》(编号:[2015]352)和中国地质调查局项目《莫桑比克钽锆钛资源调查》(编号:DD20201150)
作者简介:孙宏伟(1986-),男,硕士,工程师,从事境外地质矿产勘查研究工作。E-mail:shwcub@163.com
*通信作者:任军平(1980-),男,硕士,正高级工程师,从事地质矿产勘查与研究工作。E-mail:rjp2333@126.com

锰在地壳中大量存在,平均含量约为 0.1%,在重金属中仅次于铁,居第 2 位[1]。锰矿是工业生产中重要的基础性大宗原料矿产之一,广泛应用于冶金工业、化学工业、国防工业等国民经济的各个领域[1−2],是中国国民经济建设的重要战略物资。近年,随着中国冶金行业及电池工业的迅速发展,中国已连续多年成为全球最大的锰矿进口国,寻找高品级的富锰矿及保障中国锰资源安全,已经成为亟待解决的问题。

南部非洲地区(赤道以南的非洲)锰矿资源丰富,盛产高品位富锰矿,是中国海外锰矿资源的主要来源地,但其成矿特征与中国锰矿成矿特征差异较大,且目前对南部非洲地区锰矿成矿类型、成矿时代等仍存在一定争议[3−8]。因此,本文对南部非洲锰矿床地质特征、成矿时代及模式等进行了系统的分析总结,以期提高对该地区锰矿地质特征及成矿规律的认识,为中国地勘单位在该区开展锰矿勘查提供基础地质资料与技术支持。

1　全球锰矿资源时空分布特征

世界锰矿矿床类型主要包括沉积型、变质沉积型、火山沉积型、热液型、风化型及海底结核−结壳型,其资源特点是总量较丰富,但分布不均匀[9−10]。统计数据显示[11],2020 年全球陆地锰矿金属储量为 8.1×10^8 t,其中南非、乌克兰、巴西和澳大利亚 4 个国家的锰矿储量占全球锰矿总储量的 75%以上。此外,大洋底部还以现代锰结核的方式蕴藏了约 3×10^8 t 锰资源,但由于技术原因暂未大量开采[12]。中国锰矿资源虽然储量较丰富(约 5400×10^4 t),但分布不均,且具有贫矿多富矿少、矿床规模以中小型为主、杂质多、提纯难、多伴生、难开采等特点[2, 13−14]。

空间上,全球锰矿资源几乎分布于所有大陆,但不同国别分布极其不均(图 1)。时间上,锰矿石的形成存在于各个地质时期,但不同时期锰的富集强度也不同,元古宙是全球最重要的锰成矿期,与这一时期相关的锰矿资源占已知的 70% 以上。Kuleshov 等[5−6]根据不同时期形成的锰矿储量与资源量,将全球锰矿成矿期划分为 7 个主要的阶段:古元古代、中元古代、新元古代、早古生代、晚古生代、中生代、早—中新生代(图 2)。

2　南部非洲锰资源概况

非洲锰矿资源丰富,主要集中在南部非洲和西部非洲地区,尤以前者最著名。南非是世界上锰矿储量最多的国家,其高品位锰矿占全球高品位锰矿总量的 80%以上。2019 年,南非锰矿(金属)的储量为 2.3×10^8 t,占全球总储量的 30.26%,居世界第 1 位[11]。南非锰矿床分布广泛,主要集中在北开普省 Kalahari−Postmasburg 铁锰成矿带[15−16];加蓬是非洲第二大锰矿资源国,以盛产富锰矿石(锰含量 50%~60%)和电池级锰矿石闻名于世。2019 年,加蓬探明锰(金属)储量共计 6500×10^4 t,占世界总量的 8.55%[11]。加蓬锰矿资源分布较集中,主要在其东南部的 Moanda 地区,原生矿石的成矿时代为古元古代[7]。此外,纳米比亚、刚果(金)、赞比亚、莫桑比克等国也均有高品位锰矿产出。

3　南部非洲锰矿类型

对于南部非洲锰矿的类型,目前尚无被大家认同的划分原则和划分方案,本文参考前人对中国锰矿成矿类型的划分[17−18],以锰矿成矿作用和含锰建造类型为主要划分要素,将南部非洲锰矿划分为海相沉积受变质型、海相沉积型、热液型及表生型 4 种成矿类型,其中部分原生矿床也含有次生锰氧化物,但由于矿床内可见明显的原生成矿作用而未划分到表生型矿床中。本次主要介绍原生型锰矿(表 1)。

3.1　海相沉积受变质型

该类型是南部非洲地区最主要的锰矿床之一,以含铁石英岩(BIF 型)的出现为主要标志层。

BIF 岩系型锰矿型:含矿岩系以条带状硅质−铁质岩和碳酸盐岩类为主,主要与燧石条带、铁质泥岩、硅质岩、白云岩及灰岩共生。成矿时代以古元古代为主,少量为新元古代。锰矿是在陆缘盆地或弧后盆地环境下沉积形成的,海底水下隆起有利于锰的富集成矿。锰质来源于古陆风化物及海底中基性火山喷发活动。矿床规模以大、中型居多,是南部非洲地区最重要的锰矿类型,代表性矿床为南非 Kalahari 锰矿、Postmasburg 锰矿、Rooinekke 锰矿及纳米比亚 Otjosondu 锰矿。

3.2　海相沉积型

该类型是南部非洲地区最主要的锰矿床之一,根据含锰岩系特征进一步划分为 2 个亚类。

(1)黑色页岩系型锰矿床

含矿岩系主要为黑色含炭质页岩、粘土岩、碳酸盐岩及少量硅质岩。矿石类型以碳酸锰为主,但

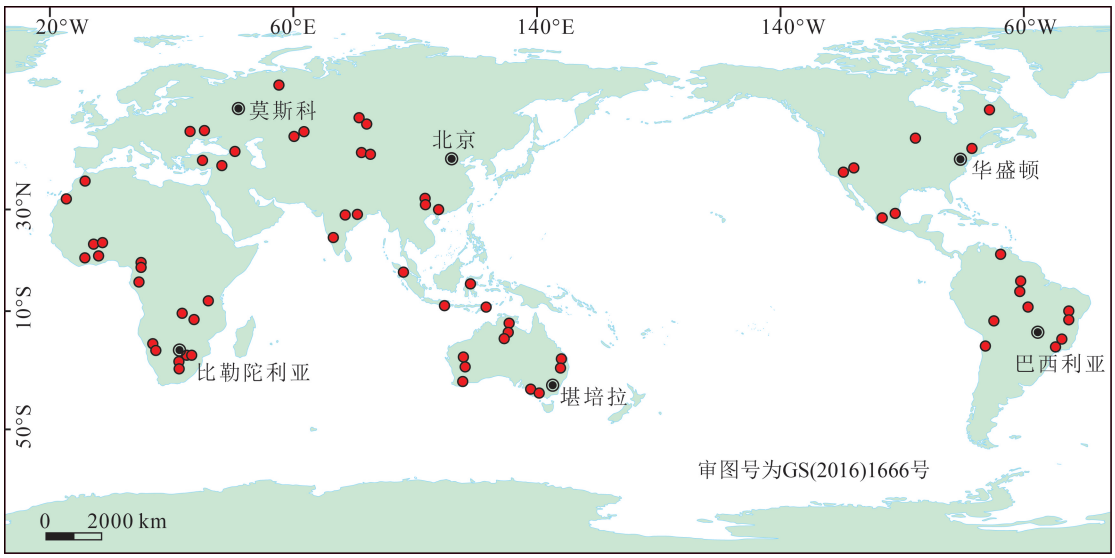

图 1 全球主要锰矿山概略分布图(据参考文献[2,15]修改)

Fig. 1 Distribution map of main manganese deposits in the world

多含氧化物,是南部非洲重要的锰矿类型之一。此类矿床多分布在弧后盆地或断陷盆地,属近海浅水半封闭的海湾或滞流盆地。典型矿床如加蓬 Francevillian 锰矿、Moanda 锰矿及刚果(金) Kisenge 锰矿。

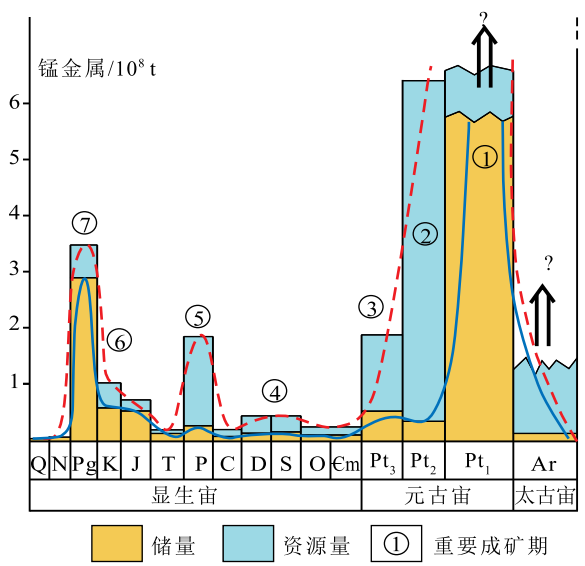

图 2 全球锰矿重要成矿期(据参考文献[5-6]修改)

Fig. 2 Important metallogenic period of manganese deposits around the world

Q—第四纪;N—新近纪;Pg—古近纪;K—白垩纪;J—侏罗纪;T—三叠纪;P—二叠纪;C—石炭纪;D—泥盆纪;S—志留纪;O—奥陶纪;€m—寒武纪;Pt_3—新元古代;Pt_2—中元古代;Pt_1—古元古代;Ar—太古宙

(2)硅-泥-灰岩系型锰矿

含矿岩系以硅质岩、灰岩和硅质灰岩为主,属三角洲相沉积。典型矿床如南非 Tolwe 锰矿,该矿床保存的原生胶体、鲕粒及核形石,为其最显著的特征。

3.3 热液型

此类矿床较少,规模也较小。该类矿床可能是由含锰灰岩受岩浆作用,经扩散的热水溶液淋滤、富集充填而成的网脉状、脉状小矿体。典型矿床如赞比亚 Mkushi 锰矿、Mansa 锰矿。

3.4 表生型

此类矿床锰矿品位较高,是各种原生锰矿床或含锰岩系在湿热气候、有利构造、岩性、丘陵地貌等条件下,经风化、淋滤、富集而形成。南非 Kalahari、Postmasburg,加蓬 Moanda 等多个锰矿床均有表生型锰矿存在,加蓬 Moanda 锰矿甚至以开采表生型矿石为主。

4 典型矿床分析

4.1 南非 Kalahari 锰矿集区

Kalahari 锰矿集区位于南非北开普(Northern Cape)省 Kuruman 西北约 60 km 处,是世界上最大的变质海相沉积成因型锰矿床[3,31-32]。锰矿体赋存在 Hotazel 组中,主要有 3 层锰矿体,被铁质沉积单元分隔开。Hotazel 组底部覆盖在 2.22 Ga 之前形成的

表 1　南部非洲原生锰矿类型及典型矿床特征

Table 1　Primary manganese ore types and typical ore deposits in southern Africa

矿床类型		典型矿床	国家	含矿建造	原生矿床成矿时代	次生矿床成矿时代	矿石矿物	构造背景	资源量/品位	参考文献
海相沉积受变质型	BIF 岩系型	Kalahari	南非	BIF、碳酸盐岩	2.2 Ga	42 Ma、25 Ma、10.5 Ma	黑锰矿、方铁锰矿、褐锰矿、软锰矿及硬锰矿	弧后盆地	120 Mt (30%~45%)	[3,19]
		Rooinekke			2.4 Ga	–	褐铁矿、锰铁矿、菱锰矿、软锰矿及硬锰矿	陆缘盆地	1.5 Mt (27%~35%)	[4,20]
		Postmasburg			2.5~2.6 Ga	2.0 Ga	褐锰矿、软锰矿、硬锰矿及钾锰矿	弧后盆地	10~30 Mt (32%~59%)	[5-6,21]
		Otjosondu	纳米比亚	BIF、碳酸盐岩	0.74 Ga	–	褐锰矿、锰铁矿及硬锰矿	陆缘盆地	20~50 Mt (33%~47%)	[22]
海相沉积型	黑色页岩系型	Francevillian	加蓬	炭质页岩、碳酸盐岩等	2.0~2.3 Ga	–	钾锰矿、硬锰矿及软锰矿	弧后盆地	20~48 Mt (40%~48%)	[7,23]
		Moanda			2.2~2.16 Ga	44.5~49 Ma	菱锰矿、硬锰矿、钾锰矿及软锰矿	弧后盆地	20 Mt (30%~55%)	[7,23]
		Kisenge	刚果(金)		2.2~2.1 Ga	25 Ma、10 Ma、3.6 Ma、2.6 Ma	菱锰矿、钾锰矿及软锰矿	断陷盆地	20 Mt (40%~55%)	[8,24]
	硅-泥-灰岩系型	Tolwe	南非	硅质岩、泥岩及碳酸盐岩	1.96~1.8 Ga	–	褐锰矿、软锰矿及钾锰矿	台地三角洲	10~15 Mt (30%~41%)	[25-27]
热液型		Mkuxi	赞比亚	石英岩、云母片岩等	>1.8 Ga	–	硬锰矿、软锰矿及黑锰矿	陆缘盆地	资源量不详 (45%~65%)	[28]
		Mansa			>1.6 Ga	–	硬锰矿、软锰矿及黑锰矿	陆缘盆地	资源量不详 (40%~55%)	[29-30]

Ongeluk 组基性熔岩之上(图 3),顶部被 Mooidraai 组白云岩覆盖,三者共同组成 Transvaal 超群[19]。Transvaal 超群顶部则被 Elim 群 Mapedi 组红层不整合覆盖。Hotazel 组沉积物形成时代为 2.2~2.3 Ga[3],因此,Kalahari 锰矿的成矿时代也被认为是 2.2~2.3 Ga。

Hotazel 组内 3 个锰矿体与含铁岩体构成了 3 个沉积旋回,自下而上均由条带状富燧石的含铁建造过渡为赤铁矿化泥质岩,最终以褐锰矿化泥质岩结束单一旋回(图 3)。底部的锰矿体经济价值最高,锰资源量最大,南部最厚处可达 45 m,向北逐渐减薄至 5~8 m[33]。顶部的锰矿层厚度变化较大,大部分仅为 2 m 左右,且品位较低,经济性较差。中部的矿体经济价值最低,矿体厚度多小于 1 m[34]。

矿区存在 3 种主要的锰矿类型[34]:Mamatwan 型低品位原生沉积矿(MnO 含量 30%~38.5%),矿石矿物以褐锰矿和菱锰矿为主,矿体多呈透镜体状;高品位的 Wessels 型锰矿(MnO 含量 42%~60%),矿石矿物主要为黑锰矿、方铁锰矿及褐锰矿,极少见碳酸盐型锰矿物;高品位的次生氧化物(MnO 含量 40%~42%),主要为钾锰矿。Mamatwan 型锰矿石为 Kalahari 锰矿主要的锰矿资源,而高品位的 Wessels 型锰矿资源量仅占总体的 3% 左右,其分布

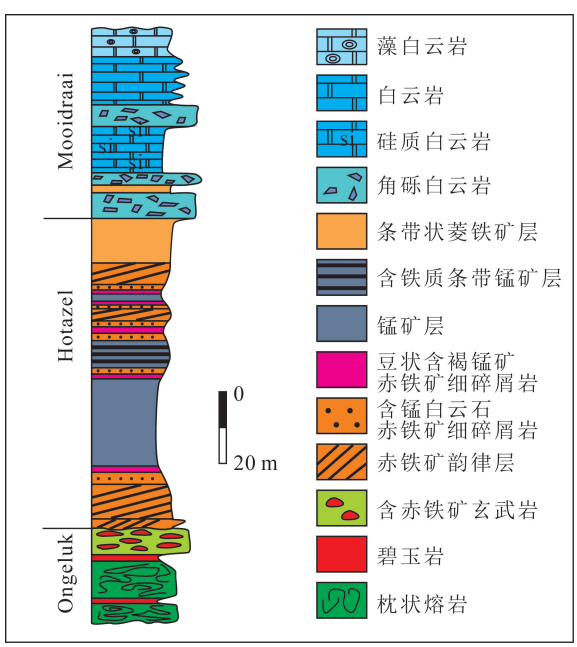

图 3 Kalahari 锰矿岩性柱状图(据参考文献[32]修改)

Fig. 3 Lithology of Kalahari manganese deposit

与南北向的正断层密切相关[3, 34-35]。高品位的表生氧化型锰矿最少,占总体的 1% 左右,形成于 25~10 Ma及 5 Ma[31]。Kalahari 锰矿田构造较发育,主要包括低角度的断裂及褶皱[3, 36]。

目前认为 Kalahari 锰矿为变沉积型锰矿床,但对其成因模式仍存在争论,最典型的包括上升流模型和海侵-海退模型[20, 34-35, 37]。笔者认为,该矿床的成因模型与上升流模型更相似,且多种迹象表明 Kalahari 锰矿田具有多期海底热液喷气特征,并伴随着热液蚀变,即海底喷气活动携带大量铁锰等成矿物质和酸性、还原性气体,为形成厚大层状铁锰矿提供了物质基础,而洋流活动使深海富锰铁水体上升至海盆陆架富氧区域,导致氧化沉积成矿。由于 Mn^{2+}溶解度较高,因此锰矿层更靠近富氧区(图 4)。之后在逆冲推覆过程中衍生一系列的次级逆冲断层,导致 Transvaal 超群在空间上的重复出现,形成现有的浅部逆冲推覆矿体特征[38-40]。

4.2 纳米比亚 Otjosondu 锰矿

纳米比亚 Otjosondu 锰矿床位于首都温得和克(Windhoek)东北部 150 km,大地构造属于新元古代 Damara 构造带东部边缘。自 20 世纪 50 年代至今,已产出超过 55×10^4 t 的高品位(48% MnO)锰矿石[22]。矿区内褶皱发育,角闪岩相变质活动明显。矿体呈层状或似层状产出,赋存在 Damara 超群 Chuos 组,该沉积序列多发育 Sturtian 时期(740 Ma)冰碛物[41],因此推测其锰矿成矿时代为 740 Ma。矿区内包括 2 条 4~7 m 厚的锰矿体,中间被 30 m 厚的含铁石英岩(BIF)分隔开[22]。矿石矿物主要为褐锰矿和锰铁矿,锰金属含量 33%~47%,Mn/Fe 值为 2.2~14.8[22]。脉石矿物主要为石英、斜长石、石榴子石等[42]。

矿区及周边较老的石英砂岩及基底岩石不含锰,无法提供足够的锰物质来源[22],因此推测锰来源于海水。Bühn 等[22]综合矿区地质特征提出了其成矿模式:海底断裂及火山活动导致富铁锰水体的形成,但由于冰期海水氧含量低,铁锰并未沉积成矿(图 5-a);随着间冰期冰盖逐渐融化,海平面上升(陆源补给急剧减少),前期冰盖下贫氧停滞深海区中溶解的铁和锰借助增强的海洋环流上升到陆架区,并在富氧水体中沉积成矿(图 5-b)。由于其较高的溶解度和对游离氧的需求,锰矿层比铁矿层更靠近海岸沉积。而锰矿体中含铁建造的出现可能

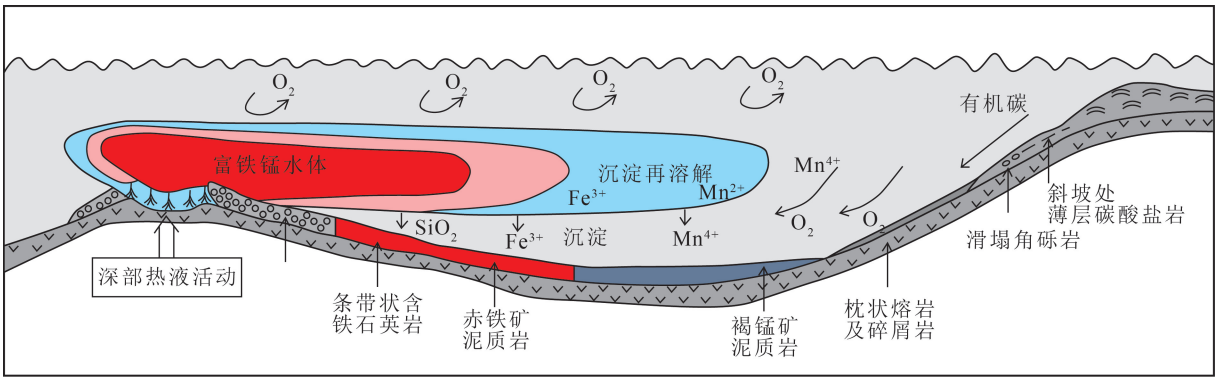

图 4　Kalahari 锰矿成矿模式图(据参考文献[20]修改)

Fig. 4　Genetic model of the Kalahari manganese deposit

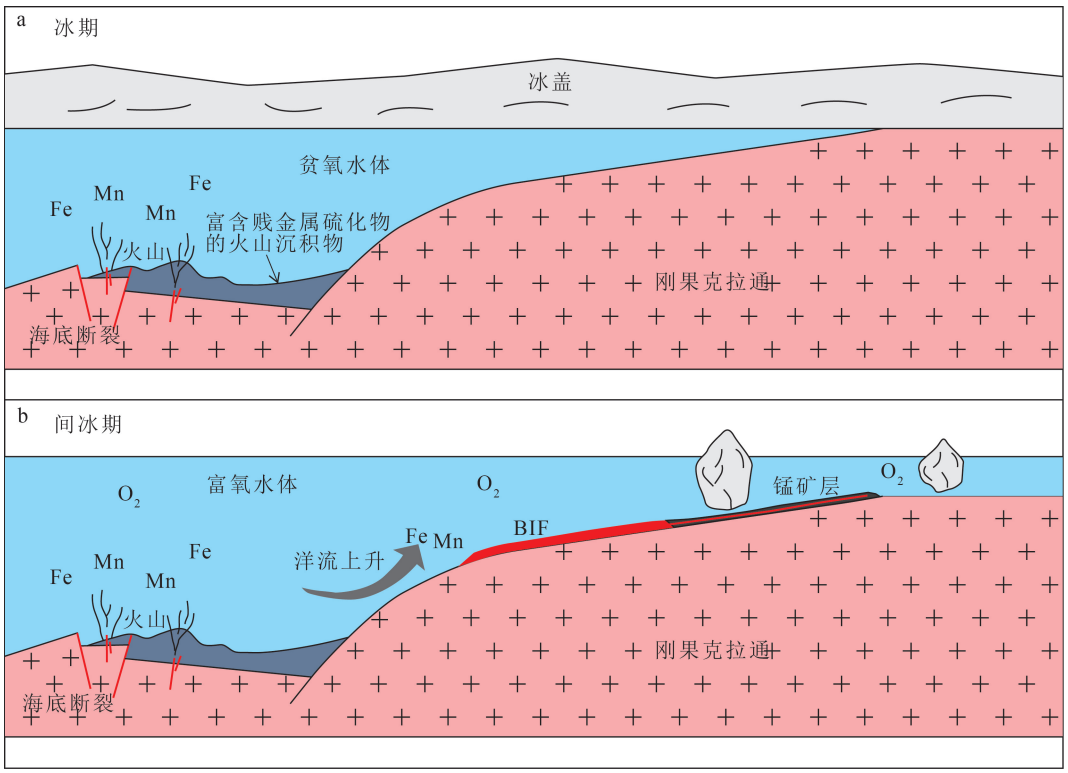

图 5　纳米比亚 Otjosondu 锰矿成因模式图(据参考文献[22]修改)

Fig. 5　Genetic model of the Otjosondu manganese deposit in Namibia

代表了中间一次海侵事件。

4.3　刚果(金)Kisenge 锰矿

Kisenge 锰矿床位于刚果(金)Kolwezi 市以西 250 km[28]。大地构造上该地区属于刚果克拉通南部的 Kasai 地块[24]。在 Kisenge 地区,赋存大量次生氧化物型锰矿石及原生碳酸盐岩型锰矿石的地层被统称为“Kisenge 沉积序列”,分布在多个东西向展布的低矮山丘上,该套地层不整合于基底变质杂岩之上[43−44]。

Kisenge 锰矿床已产出超过 740×10^4 t 矿石,锰金属总储量估计为 670×10^4 t,其中包括原生矿 130×10^4 t 和表生矿 540×10^4 t,并伴生一定的镍、锌等贱金属资源[44]。矿区原生含矿层厚约 5 m,矿石 MnO 含量为 9%~59%,平均含量为 42% ,表生氧化物矿层厚约 40 m,矿石 MnO 含量为 3%~68%,平均含量为 37%[8]。

矿石类型主要包括 2 种:①原生碳酸盐岩型矿石,含锰矿物主要为菱锰矿及富锰石榴子石(锰铝榴石),前者主要赋存在深灰色厚层-块状碳酸盐岩及钙质页岩中,后者则主要赋存在灰色含锰铝榴石炭质页岩中,前者覆盖在后者之上,层内见多期次的构造活动,方解石脉及石英细脉十分发育。②表生氧化物矿石中含锰矿物以钾锰矿和软锰矿为主[8]。

Kisenge 锰矿床原生锰矿成矿时代目前还没有直接的年龄数据。Kisenge 沉积序列的年龄下限为 2.0 Ga[45-46],年龄上限为 1853±89 Ma[47],并据此推测 Kisenge 锰矿床原生含锰矿物的形成时代主要集中在 2.0~1.8 Ga。次生钾锰矿 $^{40}Ar-^{39}Ar$ 测年显示,其氧化锰主要形成于 10.5~2.6 Ma[8]。

矿床地球化学表明,锰矿形成时沉积环境以海相为主,海水为原生锰矿的主要物源[24]。在此基础上,De Putter 等[24]综合多种因素提出了 Kisenge 地区原生锰矿的成矿模式,认为该地堑大部分时间属于陆内盆地,由陆源提供贫锰水和沉积物。但后期垂直构造运动使盆地内与海洋隔离的屏障降低,导致富锰海水侵入盆地,而不同性质水体的混合使盆地内氧化还原环境迅速改变,导致锰和相关金属在盆地内快速沉积。之后差异沉降导致盆内水体与大洋交换再次受到限制,盆地水体锰含量逐渐降低,从而结束锰的沉淀(图 6),但盆内锰铝榴石的最终出现可能与后期盆地内及其周缘的构造热液活动有关。由此推测,Kisenge 地区原生锰矿属于海相沉积型锰矿。

4.4 南非 Tolwe 锰矿

Tolwe 锰矿,位于南非 Limpopo 省 Tolwe 南 15 km,矿体呈豆荚状,赋存在古元古代(1.8~1.95 Ga) Soutpansberg 群 Roodeberg 组红层中[25],是目前已知最古老的豆荚状锰矿[26-27]。

矿区内矿石资源量为 1000×10^4~1500×10^4 t,品位 30%~40%[25-26]。含矿地层厚达 100 m。Rooderberg 组存在 5 个富锰层,单个锰矿层厚 1~2 m[27]。矿石矿物主要由褐锰矿及少量软锰矿和钾锰矿组成,脉石矿物主要由石英及少量玉髓组成。

该矿床最显著的特征为锰多被包裹在圆形的石英颗粒中,且矿体内可见原生鲕粒及核形石特征[27]。Schaefer 等[26]据此认为其形成与微生物密切相关,并推测锰的沉积发生在高能的浅水环境中。富锰层之下主要为一套河流相进积型沉积物,而含锰层之上表现为一套退积型三角洲相沉积物,故含锰层被认为形成于三角洲平原的海侵期间(图 7-a)。携带大量锰质的地表径流输入到 Palapye 盆地,在盆地边缘形成富锰水体,海侵期间水体环境的突变导致锰矿物沉淀(图 7-b),并在微生物的作用下形成含锰层[26-27]。

4.5 赞比亚 Mkushi 锰矿床

赞比亚 Mkushi 地区分布大量锰矿床(点),锰含量在 45%~65%之间,但规模有限,目前仍未发现大型锰矿床。已知矿体主要以脉状(图 8-a、b)及不规则脉状(图 8-c、d)产出,赋矿围岩主要为古元古代 Muva 超群(大于 1.8 Ga)底部的石英岩、云母片岩等[28-29, 48-53]。矿体受构造控制明显,多分布在构造裂隙或断裂破碎带内,矿石矿物主要为硬锰矿、软锰矿、黑锰矿等[54-56]。目前对于 Mkushi 地区原生锰矿床成因及成矿时代的研究十分有限,综合其赋矿地层形成时代、矿体形态特征等因素,笔者推测其原生锰矿主要形成于古元古代(大于 1.8 Ga),并受到构造裂隙控制,属于热液型锰矿。构造热液淋滤富锰地层或基岩之后,在构造裂隙或层理面沉淀富集,形成网脉状、脉状锰矿体。

5 大型锰矿成矿条件及资源潜力

5.1 大型锰矿成矿条件

尽管全球锰矿资源分布范围及品位极不均衡,其成矿也是多重因素耦合的结果,但仍具有一定的规律性。因此,分析其成矿条件,尤其是大型—超大型锰矿的成矿条件,能为今后的锰矿勘查起到积极作用。通过整理前人研究发现[2, 5-6, 13, 57],大型锰矿床的形成可能主要受控于 5 个因素。

(1)特定构造背景

主要产于稳定地块边缘、陆内盆地及弧后盆地。以上构造背景的核心是长期处于拉张环境下,形成了稳定的拉张构造盆地,既可接受来自陆源及海源的大量锰质,又可由断裂系统将深部的锰质带入洋盆,为锰矿的形成提供大量物源,同时裂谷盆地内的大量热液活动也为锰矿的多期次富集提供了动力来源。南非 Kalahari 锰矿[34]、加蓬 Moanda 锰矿[58]、刚果(金) Kisenge 锰矿[28]及中国西南地区的锰矿均与此相关[59]。

(2)古环境的突变

受全球性或区域性地质事件影响,古海洋环境

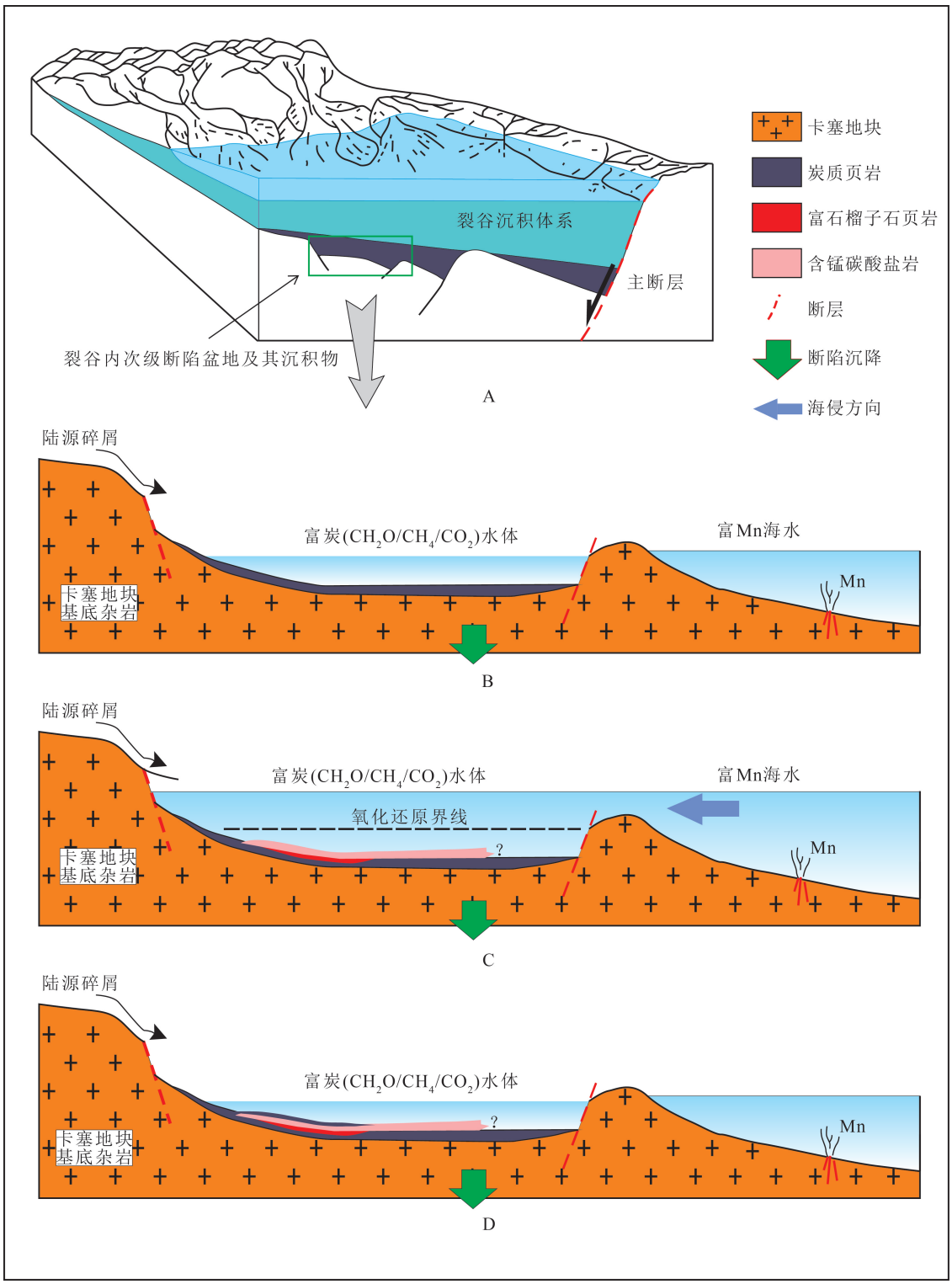

图 6　Kisenge 地区锰矿成因模式图(据参考文献[24]修改)

Fig. 6　Genetic model of manganese deposits in the Kisenge area

发生巨变。例如南非 Kalahari 锰矿的形成与大面积海底火山喷发活动有关[34, 60]；刚果(金) Kisenge 锰矿与断裂构造活动有关[24]；纳米比亚 Otjosondu 锰矿的出现则与 Sturtian 冰期事件有关[58]；中国南方湘黔渝地区的大塘坡式锰矿与冰期事件有关等[13]。这些地质作用或是为洋盆提供大量的锰质

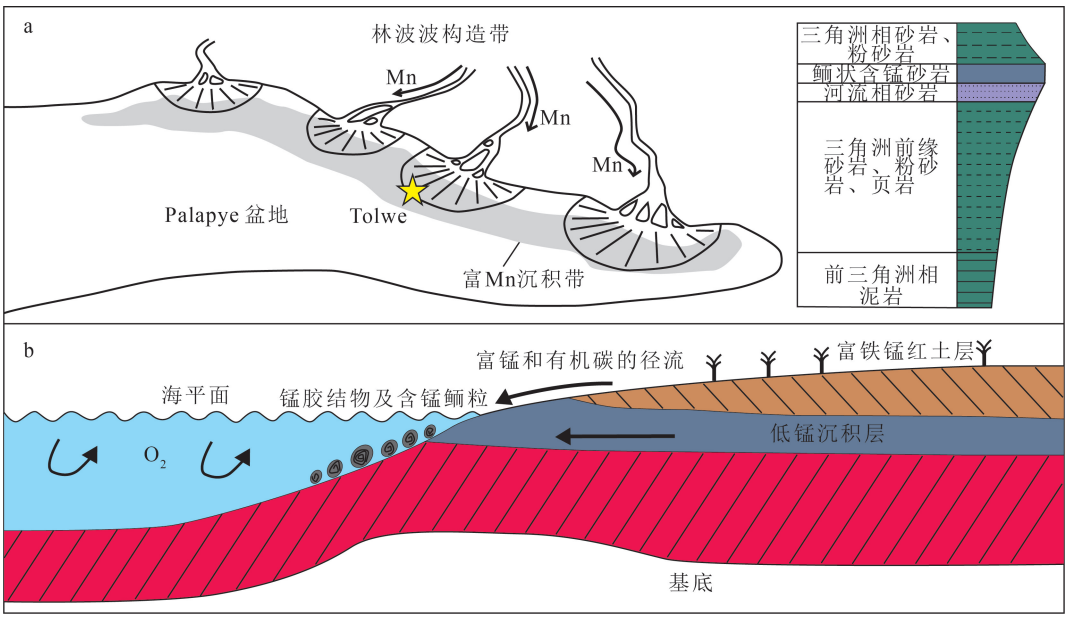

图7 南非 Tolwe 锰矿成矿环境及成因模式图(据参考文献[27]修改)

Fig. 7 Metallogenic environment and genetic model of the Tolwe manganese deposit in South Africa

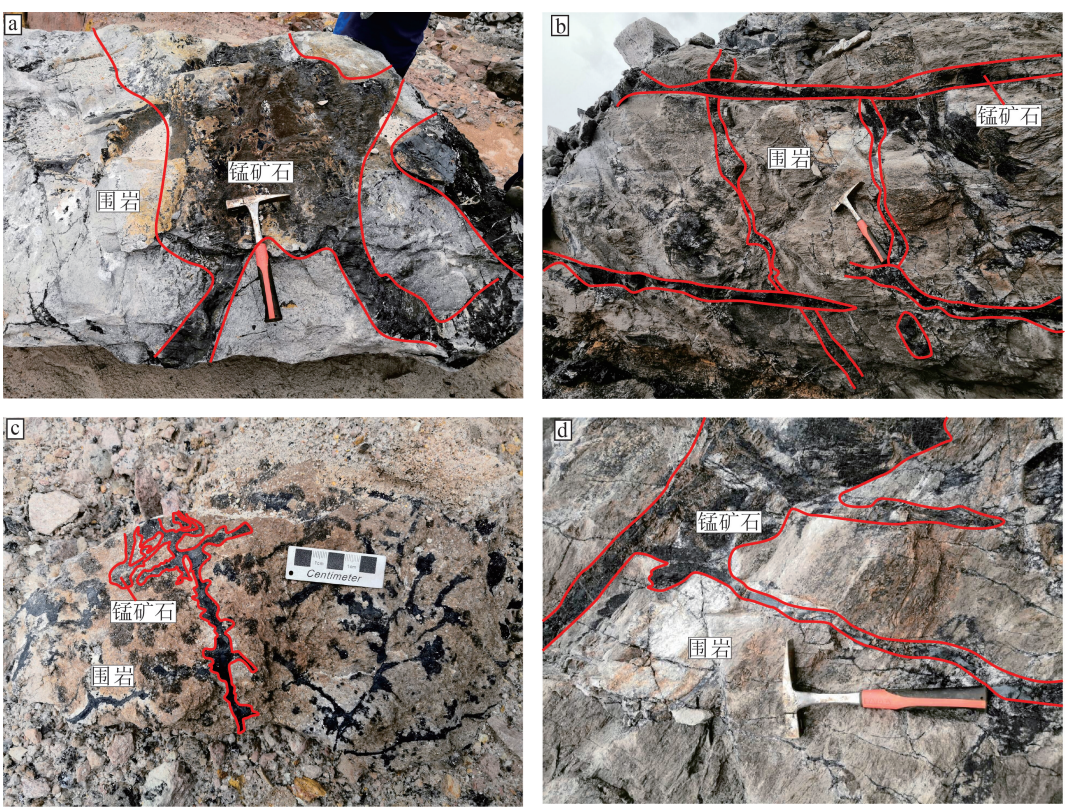

图8 姆库希地区锰矿典型锰矿石特征

Fig. 8 Typical characteristics of manganese ores in the Mkushi area

来源(火山活动),或是改变古海洋的格架(构造活动),或是形成有氧表层海水和缺氧底层海水的分层海水(冰期与间冰期),最终出现有利于锰矿沉积的环境。

(3)微生物活动

促进锰的活化和聚集。锰是一种亲生物的元素,不同生物在其成矿过程中起了重要的作用,是 Mn 价态转变的重要因素。微生物活动直接或间接改变氧化还原环境,在 Mn 元素的溶解、迁移、沉淀和富集过程中发挥重要作用[61-62]。南非、澳大利亚的多个大型锰矿床均有明显的生物作用显示[58, 62]。

(4)成岩作用

是锰质活化、富集的重要时期。大型锰矿床都以海相沉积型为主,原始的沉积作用是形成富锰矿的基本条件,而后续成岩作用中的物理化学条件等多种因素控制锰矿的最终形成[58]。例如,南部非洲多个大型锰矿的形成均与成岩期密切相关[34, 60]。

(5)表生作用

是锰矿富集的重要途径。虽然不是所有大型锰矿都经历了表生作用,但其暴露风化、搬运再沉积的过程能够使原生锰矿中的杂质及有害物质脱离矿层,产生品质较高的工业锰矿。例如,加蓬 Moanda 锰矿和加纳 Nsuta 锰矿,其产出的高品位电池级锰矿均为表生作用的再次富集所致[56];中国广西、福建等地的锰矿亦是此成因[2, 57]。

5.2　资源潜力

南部非洲地区锰矿以海相沉积受变质型和海相沉积型为主,成矿时代主要集中在 2.2~2.0 Ga,该时期是非洲 Eburnean 造山运动的主要阶段,此后哥伦比亚超大陆形成[63-64]。正是这些构造融合的早期阶段形成了大量弧后盆地,为锰矿的沉积提供了有利的构造背景,而全球富氧事件(2.35 Ga)为贫氧期积聚的富锰水体沉淀富集提供了催化剂[4]。Kaapvaal 克拉通西缘的弧后盆地沉积形成了 Kalahari 锰矿,刚果克拉通南缘的弧后盆地以 Kisenge 锰矿为代表,而西侧以 Moanda 等为代表(图 9)。

综合南部非洲地区锰矿成矿条件及勘探开发条件分析,南部非洲锰矿勘查开发应重点关注南非北开普敦省的 Kalahari-Postmasburg 锰矿集区及 Limpopo 省中部、加蓬的 Haut-Ogooue 省和 Moyen-Ogooue 省、刚果(金)南部 Katanga 省 Kisenge-Kamata 地区、纳米比亚中北部地区、博茨瓦纳南部与南非毗邻区及赞比亚中部 Mansa-Mkushi-Kabwe 地区等。

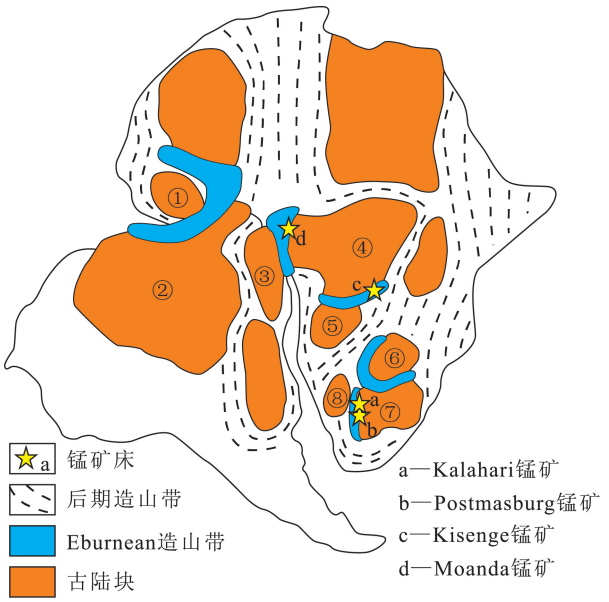

图 9　古元古代(2.2~2.0 Ga)南部非洲重要锰矿构造背景(据参考文献[65]修改)

Fig. 9　Tectonic setting of important Paleoproterozoic manganese deposits in southern Africa

①—West African 克拉通;②—Amazonian 克拉通;③—Sao Francisco 地块;④—Congo 克拉通;⑤—Angolan 地块;⑥—Zimbabwe 克拉通;⑦—Kaapvaal 克拉通;⑧—Rehoboth 地块

6　结　论

(1)南部非洲锰矿以海相沉积受变质型和海相沉积型为主,还包括热液型、表生型锰矿等。海相沉积受变质型主要以 BIF-碳酸盐岩为含矿岩系。海相沉积型以黑色炭质页岩-碳酸盐岩岩系和硅质岩-泥岩-碳酸盐岩岩系为主要含矿建造。热液型主要受岩浆活动及断裂构造影响。表生型是原生含锰岩系在湿热气候及有利构造、地貌等条件下多次富集而形成。

(2)南部非洲原生锰矿成矿时代主要集中在 2.2~2.0 Ga,与 Eburnean 造山运动耦合。空间上主要分布在克拉通边缘,成矿背景以弧后盆地及边缘盆地为主。

(3)南部非洲地区锰矿资源禀赋好,成矿地质条件优越,古元古代克拉通边缘及其附近为有利的找矿前景区。

致谢:在成文过程中,中国地质调查局天津地质调查中心贺福清工程师和中国地质调查局发展研究中心张伟波博士提供了支持,审稿专家提供了宝贵的意见,在此一并表示衷心的感谢。

参考文献

[1] 严旺生,高海亮.世界锰矿资源及锰矿业发展[J].中国锰业,2009,3:14-19.

[2] 丛源,董庆吉,肖克炎,等.中国锰矿资源特征及潜力预测[J].地学前缘,2018,25(3):118-137.

[3] Beukes N J, Burger A M, Gutzmer J. Fault-controlled hydrothermal alteration of Palaeoproterozoic manganese ore in Wessels mine, Kalahari manganese Field[J]. South African journal of geology, 1995, 98: 430-451.

[4] Beukes N J, Gutzmer J. Origin and paleoenvironmental significance of major iron formations at the Archaean-Paleo-proterozoic boundary[J]. Reviews in Economic Geology, 2008, 15: 5-47.

[5] Kuleshov V N. Manganese deposits: Communication 2 Major epochs and phases of manganese accumulation in the Earth's history[J]. Lithology and Mineral Resources, 2011, 46(6): 546.

[6] Kuleshov V N, Zhegallo E A, Shkol'nik E L. Evolution of manganese ore genesis in the Earth's geological history and the role of the biosphere[J]. Doklady Earth Sciences, 2011, 441(2): 1611-1615.

[7] Weber F. Genesis and supergene evolution of the Precambrian sedimentary manganese deposit at Moanda(Gabon)[J]. Genesis of Precambrian Iron and Manganese Deposits, 1973, 9: 307-322.

[8] De Putter T, Ruffet G, Yans J, et al. 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, 2015, 71: 350-362.

[9] 雷晓力,胡永达,杜轶伦,等.锰矿资源现状及开发利用思考[J].中国矿业,2015,24(S1):27-29.

[10] 孙宏伟,王杰,任军平,等.全球锰资源现状及对我国可持续发展建议[J].矿产保护与利用,2020,40(6):169-174.

[11] USGS. Mineral Commodity Summaries[EB/OL]. (2021-01-31)[2021-09-10]. https://minerals.usga.gov/minerals/pubs/commodity/manganese/mcs-2020-manganese.

[12] 王云山,李佐虎,李浩然.中国海底锰结核处理技术研究概况[J].中国锰业,2006,24(1):17-20.

[13] 付勇,徐志刚,裴浩翔,等.中国锰矿成矿规律初探[J].地质学报,2014,88(12):2192-2207.

[14] 刘陟娜,张新元,许虹,等.境外锰矿资源分布现状与中资企业勘查开发建议[J].中国矿业,2015,24(8):8-15.

[15] SNL: Commodity Profile-Price Chart[EB/OL]. (2020-09-30)[2021-06-10]. https://platform.Market intelligence.spglobal.com/web/client?auth=inherit#industry/top Producing Companies.

[16] Corather L A. Manganese(advance release). U.S. Geological Survey 2012 Minerals Yearbook[M]. U.S. Department of the Interior, 2014: 1-47.

[17] 叶连俊,范德廉,杨培基.中国锰矿床[M].北京:地质出版社,1994:80-552.

[18] 姚培慧,林镇泰,杜春林,等.中国锰矿志[M].北京:冶金工业出版社,1995.

[19] Kunzman M, Gutzmer J, Beukes N J, et al. Depositional environment and lithostratigraphy of the Paleoproterozoic Mooidraai Formation, Kalahari manganese field, South Africa[J]. South African Journal of Geology, 2014, 117: 173-192.

[20] Cairncross B, Beukes N J. The Kalahari manganese field[M]. Assore: Johannesburg, 2013: 1-384.

[21] Gutzmer J, Beukes N J. Karst-hosted fresh water Palaeoproterozoic manganese deposits, Postmasburg, South Africa[J]. Economic Geology, 1996, 91: 1435-1454.

[22] Bühn B, Stansistreet I G, Okrusch M. Lata Proterozic outer shelf manganese and iron deposits at Otjosondu(Namibia) related to the Damaran oceanic opening[J]. Economic Geology, 1992, 87: 1393-1411.

[23] Weber F. Evolution of lateritic manganese deposits[M]. Springer, Berlin Heidelberg, 1997: 97-124.

[24] De Putter T, Liégeois J P, Dewaele S, et al. Paleoproterozoic manganese and base metals deposits at Kisenge-Kamata(Katanga, DR Congo)[J]. Ore Geology Reviews, 2018, 96: 181-200.

[25] Cheney E S, Barton J M, Brandl G. Extent and age of the Soutpansberg sequences of southern Africa[J]. South African Journal of Geology, 1990, 93(4): 664-675.

[26] Schaefer M, Gutzmer J, Beukes N J. Late Paleoproterozoic Mn-rich oncoids: Earliest evidence for microbially mediated Mn precipitation[J]. Geology, 2001, 29(3): 835-838.

[27] Gutzmer J, Schaefer M, Beukes N J. Red beb-hosted oncolitic manganese ore of the Paleoproterozoic Soutpansberg Group, Bronkhorstfontein, south Africa[J]. Economic Geology, 2002, 97: 1023-1039.

[28] 孙宏伟,王杰,任军平,等.非洲中部加丹加—赞比亚地区锰矿床研究现状及找矿方向[J].矿产勘查,2021,12(2):390-400.

[29] Bekker A, Karhu J A, Eriksson K A, et al. A chemostratigraphy of Paleoproterozoic carbonate successions of the Wyoming craton: tectonic forcing or biogeochemical change?[J]. Precambrian Research, 2003, 120(3/4): 279-325.

[30] 赵璞.赞比亚曼萨地区锰矿地质特征及找矿潜力分析[J].矿业工程,2015,4:15-16.

[31] Gutzmer J, Du Plooy A P, Beukes N J. Timing of supergene enrichment of low-grade sedimentary manganese ores in the Kalahari manganese field, South Africa[J]. Ore Geology Reviews, 2012, 47: 136-153.

[32] Vafeasa N A, Blignauta L C, Viljoena K S. Arsenic-bearing manganese ore of the Mukulu enrichment in the Kalahari manganese field, South Africa: A new discrimination scheme for Kalahari manganese ore[J]. Ore Geology Reviews, 2019, 115: 103-146.

[33] Gutzmer J, Beukes N J. Effects of mass transfer, compaction and secondary porosity on hydrothermal upgrading of Paleoproterzoic sedimentary manganese ore in the Kalahari manganese field, South Africa[J]. Mineralium Deposita, 1997, 32: 250-256.

[34] Gutzmer J, Beukes N J. Mineral paragenesis of the Kalahari manganese field, South Africa[J]. Ore Geology Reviews, 1996, 11: 405-428.

[35] Gutzmer J, Beukes N J. Fault-controlled metasomatic alteration of Earl proterozoic sedimentary manganese ores in the Kalahari manganese field, South Africa[J]. Economic Geology, 1995, 90: 823-844.

[36] Beukes N J, Smit C A. New evidence for thrust faulting in Griqualand

west, South Africa: Implication for stratigraphy and the age of red beds[J]. Transactions of the Geological Society of South Africa, 1987, 90: 378−394.

[37] 常洪伦,孔繁辉,宋晓东,等.南非 Postmasburg 地区锰矿床地质特征及成因分析[J].地质论评,2014,60(3): 580−590.

[38] 李上森.卡拉哈里锰矿田的火山−喷气成因[J].国外前寒武纪地质,1996,1: 53−54.

[39] 常洪伦,李建峰,王江龙,等.南非 Postmasburg 锰矿田堆积型锰矿体地质特征及找矿方向[J].现代矿业,2016,5: 92−96.

[40] 廖凤初,周有希.南非 LOMOTENG 锰矿矿床地质特征及找矿方向探讨[J].国土资源导刊,2013,1: 64−66.

[41] Hoffman P F, Schrag D P. Snowball Earth[J]. Scientific American, 2000,282: 68−75.

[42] 廖芝华,张祖飞.纳米比亚奥乔宗蒂约巴地区铁锰矿地质特征[J].四川地质学报,2017,37(2): 214−217.

[43] Marchandise H.Le gisement et les minerais de manganèse de Kisenge (Congo belge)[J].Bull.Soc.Belge Géol.,1958,67: 187−211.

[44] Doyen L. The manganese ore deposit of Kisenge−Kamata (Western Katanga)[M].Springer, Berlin Heidelberg, 1973: 93−100.

[45] Delhal J, Liégeois J P.Le socle granito−gneissique du Shaba occidental (Zaïre): Pétrographie et géochronologie[J]. Annales de la Société géologique de Belgique, 1982, 91(1): 25−26.

[46] Delhal J, Deutsch S, Denoiseux B. A Sm/Nd isotopic study of heterogeneous granulites from the Archean Kasai−Lomami gabbro−norite and charnockite complex(Zaire, Africa)[J].Chemical Geology, 1986,57(1/2): 235−245.

[47] Ledent D, Lay C, Delhal J. Premières données sur l' âge absolu des formations anciennes du ' socle' du Kasai (Congo méridional)[J]. Bull.Soc.Belge Géol.,1962,71(2): 223−237.

[48] 左立波,任军平,王杰,等.赞比亚班韦乌卢地块花岗岩地球化学特征、锆石 U−Pb 年龄及 Lu−Hf 同位素组成[J].地质调查与研究,2020,43(1): 30−41.

[49] 任军平,王杰,古阿雷,等.赞比亚东北部正长花岗岩的锆石 U−Pb 年龄和 Lu−Hf 同位素特征[J].地质调查与研究,2019,42(3): 161−165.

[50] 孙宏伟,王杰,任军平,等.班韦乌卢地块中部变质表壳岩碎屑锆石 U−Pb 年代学、Hf 同位素研究及其构造意义[J].地质学报, 2021,95(4): 1245−1259.

[51] 孙宏伟,王杰,任军平,等.南部非洲花岗岩型与伟晶岩型钽矿床地质特征[J].地质论评,2021,67(1): 265−278.

[52] 孙宏伟,王杰,任军平,等.中非卢菲里安地区铀矿化特征与资源潜力分析[J].吉林大学学报(地球科学版),2020,50(6): 1660−1674.

[53] Sun H W, Ren J P, Wang J, et al. Age and geochemistry of the granitoid from the Lunte area, Northeastern Zambia: Implications for magmatism of the Columbia supercontinent[J]. China Geology, 2021, doi: 10.31035/cg2021048.

[54] 任军平,左立波,许康康,等.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 2016,62(4): 979−996.

[55] 古阿雷,王杰,任军平,等.赞比亚中部泛非期 Hook 岩基地质特征及成矿潜力分析[J].地质调查与研究,2020,43(1): 63−80.

[56] 孙宏伟,王杰,任军平,等.赞比亚东北部姆波洛科索盆地沉积地层特征[J].地质论评,2019,65(1): 232−245.

[57] 阴江宁,肖克炎.中国锰矿资源潜力分析及成矿预测[J].中国地质,2014,41(5): 1424−1437.

[58] Kuleshov V. Isotope Geochemistry: The origin and formation of manganese rocks and ores[M].London: British Library Cataloguing,2016.

[59] 涂光炽.我国南方几个特殊的热水沉积矿床[C]//中国矿床学——纪念谢家荣诞辰 90 周年文集.北京: 学术书刊出版社, 1989: 189−198.

[60] Frost K S, Master S, Viljoen R P, et al. The great mineral fields of Africa introduction[J]. Episodes Journal of International Geoscience, 2016,39(2): 285−318.

[61] Bandopadhay P C. Proterzoic microfossils from manganese orebody, India[J].Nature,1989,339: 376−378.

[62] Oswald J. The biogeochemical origin of the Groote Eylant manganese ore pisoliths and ooloths, northern Australia[J]. Ore Geology Reviews,1990,5: 469−490.

[63] Zhao G, Cawood P A, Wilde S A, et al. Review of global 2.1−1.8 Ga orogens: Implications for a pre−Rodinia supercontinent[J]. Earth−Science Reviews,2002,59: 125−162.

[64] Meert J G. What is in a name? the Columbia (Paleopangaea/Nuna) supercontinent[J].Gonwana Research,2012,21: 987−993.

[65] Reddy S M, Evans D A D. Palaeoproterozoic supercontinents and global evolution: correlations from core to atmosphere[J]. Geological Society of London, Special Publication,2009,323: 1−26.