

doi: 10.12029/gc20210107

程湘, 胡鹏, 张海坤, 姜军胜. 2021. 锰矿主要类型、分布特点及开发现状[J]. 中国地质, 48(1):102–119.

Cheng Xiang, Hu Peng, Zhang Haikun, Jiang Junsheng. 2021. The main types, distribution and current development of manganese ore deposits[J]. Geology in China, 48(1):102–119(in Chinese with English abstract).

锰矿主要类型、分布特点及开发现状

程湘, 胡鹏, 张海坤, 姜军胜

(中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430205)

摘要: 锰的用途非常广泛, 世界上 90%~95% 的锰应用于冶金工业, 其余应用于电池工业、陶瓷工业、化学工业等。根据成矿作用过程中的含矿岩系特征, 将世界锰矿划分为海相沉积型、火山(热液)–沉积型、变质型、热液型和表生型 5 类, 以海相沉积型、变质型和表生型为主。截至 2019 年, 世界锰的储量达 8.12 亿 t, 但分布极不均匀, 主要集中在南非、巴西、乌克兰、澳大利亚、加蓬、中国、印度、加纳等国, 而优质锰矿石主要分布在南非、澳大利亚、加蓬、加纳。时间上, 将锰的成矿作用分为 7 期, 其中元古宙和新生代是主要的成矿期。空间上, 锰矿床主要分布在南非德兰士瓦群、乌克兰尼科波尔盆地、澳大利亚格鲁特岛和皮尔巴拉克拉通、中国泛扬子区、西非克拉通等。目前, 锰的生产主要集中在南非的卡拉哈里和波斯特马斯堡锰矿田、澳大利亚的格鲁特岛、加蓬的莫安达锰矿、加纳的恩苏塔锰矿等地。

关键词: 锰矿; 类型; 分布; 开发

中图分类号: P618.32 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2021)01-0102-18

The main types, distribution and current development of manganese ore deposits

CHENG Xiang, HU Peng, ZHANG Haikun, JIANG Junsheng

(Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, China)

Abstract: Manganese is widely used, 90%~95% of the world's manganese is used in the metallurgical industry, the rest in the battery industry, ceramic industry, chemical industry and so on. According to the characteristics of ore-bearing rocks in the process of mineralization, the world manganese deposits are divided into five types, including marine sedimentary type, volcanic (hydrothermal)–sedimentary type, metamorphic type, hydrothermal type and supergene type, with marine sedimentary type, metamorphic type and supergene type as the main ones. By the end of 2019, the worldwide manganese reserves had reached up to 812 million tons, but their distribution is extremely uneven, mainly concentrated in South Africa, Brazil, Ukraine, Australia, Gabon, China, India, Ghana and so on, while the high quality manganese ores are mainly distributed in South Africa, Australia, Gabon and Ghana. The mineralization epoch of manganese can be divided into 7 periods, of which Proterozoic and Cenozoic are of great importance. Manganese deposits are spatially concentrated in the Transvaal Supergroup of South Africa, the Nikopol ore Basin in Ukraine, the Groote Eylandt and Pilbara Craton of Australia, the Pan–Yangtze area of China, the West African Craton. At present, manganese ore production is mainly concentrated in Kalahari and Postmasburg ore fields in South Africa, Groote Island in Australia,

收稿日期: 2020-09-08; 改回日期: 2020-12-16

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20201153)资助。

作者简介: 程湘, 男, 1987 年生, 硕士, 工程师, 主要从事境外地质调查工作; E-mail: 535645537@qq.com。

Moanda mine in Gabon and Nsuta mine in Ghana.

Key words: manganese; type; distribution; development

About the first author: CHENG Xiang, male, born in 1987, master, engineer, mainly engaged in oversea geological survey; E-mail: 535645537@qq.com.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No. DD20201153).

1 引言

锰的用途非常广泛,主要应用于冶金工业,作为脱氧剂、脱硫剂及制造锰系合金,是钢中除铁外用量最大的元素(严旺生等,2009;洪世琨,2011;付勇等,2014)。另外,在电池工业、陶瓷工业、化学工业等领域锰的作用也非常重要。据美国地质调查局(USGS)2020年的统计,世界锰的储量总计8.12亿t,但分布很不均匀,主要集中在南非、巴西、乌克兰、澳大利亚等国,中国锰储量约5400万t,排在世界第6位。

与国外锰矿相比,中国锰矿资源表现出“小、贫、杂、细”的特点。锰矿床规模小,大型矿床仅10处,且以贫矿为主。矿石组分复杂,粒度细,高磷和铁,有用矿物与脉石紧密交生,开采和选冶条件差(洪世琨,2011;付勇等,2014;邓文兵等,2019)。但同时中国也是锰矿资源的消费大国,进入21世纪后,中国工业发展势头强劲,尤其是冶金行业发展迅速,对锰矿资源需求旺盛,国内找矿压力日益增大(Du et al., 2013;邓文兵等,2019)。综上,中国锰矿资源的特征导致国内锰矿产量远远跟不上消费的需求,每年需从国外进口大量富锰矿石。

中国锰矿的研究比较系统,但成矿类型和成矿时代与国外差别很大,且国外锰矿的研究多局限在单个锰矿点,对锰矿成因类型的划分还存在争议,时空分布规律也不明朗。笔者在前人研究的基础上,对世界锰矿的类型、时空分布特征以及主要国家锰矿资源的开发现状进行了总结,以供参考。

2 世界锰矿资源的主要类型

关于锰矿成因的划分原则和方案,迄今为止学术界未有一个统一的认识。中国锰矿成因类型的划分相对较为成熟(严旺生等,2009;付勇等,2014;谢进,2017;丛源等,2018;臧忠江等,2019;邓文兵

等,2019),本次根据成矿作用过程中的含矿岩系特征,并结合前人研究成果,将世界锰矿床划分为海相沉积型、火山(热液)-沉积型、变质型、热液型和表生型5类(表1),所占比例分别为40%、9%、50%、1%,表生型锰矿列入其原生矿床统计。显然,世界锰矿床以海相沉积型和变质型为主,二者储量约占世界锰总储量的90%,火山(热液)-沉积型锰矿虽有一定的矿床数量,但储量相对较小。在大洋底部也蕴藏着丰富的锰结核资源,但受开采技术和设备的限制,并不能大规模开发利用。中国的锰成矿类型以海相沉积型为主,变质型矿床较少,与全球差别较大(付勇等,2014;丛源等,2018;邓文兵等,2019)。

2.1 海相沉积型锰矿床

该类矿床一般形成于古陆边缘浅海地带,主要成矿时代为前寒武纪和白垩纪。矿体多呈层状、透镜状,由滨海向海盆深处,通常出现碎屑岩-碳酸盐岩的变化序列,因此该类矿床常与碎屑岩和碳酸盐岩共生。根据矿床产出具体的环境,可进一步细分为陆源碎屑-黏土建造型、碳酸盐岩型和黑色岩系型3个亚类。全球具有重要工业价值的锰矿床绝大部分形成于海相环境中,例如乌克兰的尼科波尔和大托克马克锰矿床、澳大利亚的格鲁特艾兰锰矿床等,矿石储量达上亿t(Roy, 2006;臧忠江等,2019)。中国最大的两个锰矿——贵州—松桃锰矿床和广西下雷锰矿床也属于此种类型。

2.2 火山(热液)-沉积型锰矿床

该类矿床锰质来源于海底酸性及基性火山喷发作用,通过在火山活动中心附近的海盆中沉积形成,其中富矿形成于火山喷发间歇期火山活动中心附近的海盆环境,可进一步细分为绿岩-硅质岩型和斑岩-硅质岩型两个亚类。矿体多呈层状、似层状、透镜状和脉状,赋存在火山-沉积岩系中,与硅质岩、火山熔岩、凝灰岩、碧玉岩等共生。矿石矿物成分复杂,包括锰的氧化物、碳酸盐、含水硅酸盐等

表 1 世界锰矿床成因分类(据谢进,2017修改)

Table 1 The genetic types of manganese deposits in the world (modified from Xie Jin, 2017)

分类	储量占比	亚类	含矿岩系	主要成矿时代
海相沉积型	40%	陆源碎屑-黏土建造型	陆源碎屑岩,主要为砂岩、泥岩共生	古近纪、白垩纪
		碳酸盐岩型	碳酸盐岩,主要为灰岩、白云岩	白垩纪、三叠纪、二叠纪、石炭纪、寒武纪
		黑色岩系型	以泥质岩类为主,与黑色页岩、黏土岩、砂岩共生	前寒武纪、奥陶纪和三叠纪
火山(热液)-沉积型	9%	绿岩-硅质岩型	火山沉积岩系,与基性火山岩或碧玉岩、硅质页岩及碳酸盐岩共生	古近纪、二叠-石炭纪、前寒武纪
		斑岩-硅质岩型	火山沉积岩系,与酸性火山岩相关	前寒武纪、石炭纪、白垩纪、泥盆纪
变质型	50%	锰榴石英岩型	绿片岩-角闪岩相变质岩系,与锰榴石英岩、石英岩、千枚岩、碳酸盐岩及变火山岩共生	前寒武纪为主
		BIF 型	绿片岩系,与含铁建造、白云岩、页岩共生	前寒武纪、早古生代
热液型	1%	接触交代型	受接触带控制,与碳酸盐岩共生	主要与海西期火山活动相关
		裂隙充填型	受断裂带控制,与碳酸盐岩共生	
表生型	列入原生矿统计	锰帽型	原生锰矿的氧化带	新生代
		堆积型	残堆积层或红土层	
		淋滤型	在含锰岩层或原生锰矿附近的构造有利部位富集	

(张九龄,1982)。该类矿床规模小、品位低,其 Mn/Fe 比值在 0.1~10,而以此与海相沉积型锰矿区分。成矿时代以前寒武纪、石炭纪和古近纪为主,典型矿床如美国奥林匹克半岛锰矿床、摩洛哥 Anti-Atlas 锰矿床、伊朗 Cheshmeh-Frezi 锰矿床(Maghfour et al., 2017)、俄罗斯 Magnitogorsk 锰矿床(Brusnitsyn et al., 2012)等。

2.3 变质型锰矿床

变质型锰矿床的工业价值仅次于沉积型,大多数产于前寒武纪古老地盾中。矿床的形成与含锰的硅酸盐岩石(锰榴石英岩和铁英岩)、碳酸盐岩石(叠层状灰岩、白云岩和铁英岩)有关,可进一步细分为锰榴石英岩型和 BIF 型两个亚类。锰榴石英岩型锰矿床指含锰的硅酸盐-碳酸盐岩或含锰碳酸盐岩受变质作用而形成的锰矿床,原生矿品位一般不高,但经过表生风化作用可形成价值较大的氧化锰富矿,例如南美圭亚那地盾南缘的塞拉多纳维奥锰矿。BIF 型锰矿床指与条带状含铁层在空间上密切共生,并且为同期沉积变质的锰矿床,该类型锰矿在巴西、南非、澳大利亚、津巴布韦、加拿大、印度等国最为常见(Ghosh et al., 2015),代表性矿床有巴西

Minas Gerais 锰矿床(Kuleshov, 2011)、澳大利亚皮尔巴拉锰矿床、南非 Kalahari 锰矿床和 Lomoteng 铁锰矿床等。

2.4 热液型锰矿床

该类矿床锰储量占世界锰总储量的 1%左右,可分为接触交代型和裂隙充填型两个亚类。矿床的形成与海西期火山作用相关,可能是由含锰灰岩(锰含量 2%~4%)经扩散的热热水溶液淋滤、富集充填而形成。矿体规模小,呈脉状或网脉状,典型矿床有美国富兰克林锰矿床、河北相广锰银矿床等(骆华宝,2002;丛源等,2018)。

2.5 表生型锰矿床

表生型锰矿床可进一步细分为锰帽型、堆积型、淋滤型 3 个亚类。该类型锰矿床就其矿床储量规模看,西非、南美和印度最著名。矿床具有埋藏浅、易开采的特点,如加蓬的莫安达锰矿床、中国广西东平锰矿床、刚果 Kisenge 锰矿床、澳大利亚 Rippon Hill 和 Woodie Woodie 锰矿床等(Kuleshov, 2011)。也有部分矿床包含两种或多种锰成矿类型,如印度 Anmod-Bisgod 地区锰矿床,不仅包括新太古代的变质锰矿床,还包含了新生代的风化型锰

矿床(Sethumadhav et al., 2010)。

3 世界锰矿资源的分布及特征

3.1 地理分布

全球锰矿资源丰富,据美国地质调查局2020年统计,世界锰的储量8.12亿t,分布广泛又相对集中(表2,图1),超过95%的世界锰矿总资源量集中在14个国家,分别为南非、巴西、乌克兰、澳大利亚、加蓬、中国、印度、加纳、哈萨克斯坦、墨西哥、玻

利维亚、格鲁吉亚、保加利亚、俄罗斯(臧忠江等, 2019),全球大型锰矿床也集中分布在这些国家(表3,图2)。储量排名第一的国家是南非,锰矿储量2.6亿t,占全球总储量的32.02%。排名第二的是巴西,锰矿储量1.4亿t,占全球总储量的17.24%,其锰矿主要用于出口。排名第三的是乌克兰,锰矿储量为1.4亿t,但其品位不高,约70%都是中低品位。澳大利亚锰矿资源丰富,储量约1亿t,居世界第四位,同时品位也很高,优质锰矿石出口全世界。排名第五的是加蓬,目前在加蓬探明的锰储量6100万t,占

表2 2019年世界主要锰矿国锰矿储量
Table 2 The world's major manganese ore reserves in 2019

国别	矿石含锰量/%	储量/万t	全球占比/%
世界总计		81200	100.00
南非	30~50	26000	32.02
巴西	27~48	14000	17.24
乌克兰	18~22	14000	17.24
澳大利亚	42~48	10000	12.32
加蓬	50	6100	7.51
中国	15~30	5400	6.65
印度	25~50	3400	4.19
加纳	-	1300	1.60
哈萨克斯坦	-	500	0.62
墨西哥	25	500	0.62

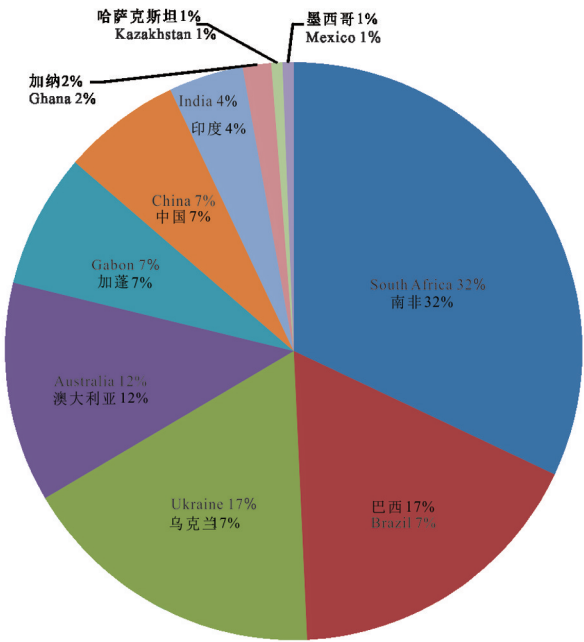


图1 世界主要锰矿国锰储量占比
Fig.1 The proportion of manganese reserves of the countries rich in manganese

表3 世界大型锰矿床分布情况

Table 3 The distribution of large-sized manganese deposits in the world

矿山	品位/%	资源量/百万t	国家	规模
Nchwaning/Gloria	40.774	731	南非	大型
Tshipi Borwa	36.49	432	南非	大型
Artillery Peak	-	281	美国	大型
Moanda	45.4	269	加蓬	大型
Butcherbird	-	263	澳大利亚	大型
Hotazel	40.086	235	南非	大型
Zhaimem	16.54	222	哈萨克斯坦	大型
Avontuur	40.15	162	南非	大型
Chiatura	20	160	格鲁吉亚	大型
Groote Eylandt	42.925	156	澳大利亚	大型
Maggie Canyon	-	154	美国	大型
Woodstock	-	135	加拿大	大型
Nsuta	27.9	113	加纳	大型
Bangombe	-	99	加蓬	大型
Kongoni	-	85	南非	大型
Daxin	19.1	64	中国	大型
Oakover	NA	64	美国	大型
Lomoteng	34	51	南非	大型
Woodie Woodie	30.2	49	澳大利亚	大型
Franceville	-	43	加蓬	大型
Matthews Ridge	14.2	38	圭亚那	大型
Chvaletice	-	27	捷克	大型
Bembele	32.32	25	加蓬	大型
Los Pumas	-	24	智利	大型
Changgou	20.34	21	中国	大型
Nicholas Downs	-	20	澳大利亚	大型
Otjozondou	-	17	纳米比亚	大型
Emang	-	17	南非	大型
Otjozondou	-	15	纳米比亚	大型
South Woodie Woodie	-	14	澳大利亚	大型
Nayega	14	14	多哥	大型
Azul	26.8	13	巴西	大型

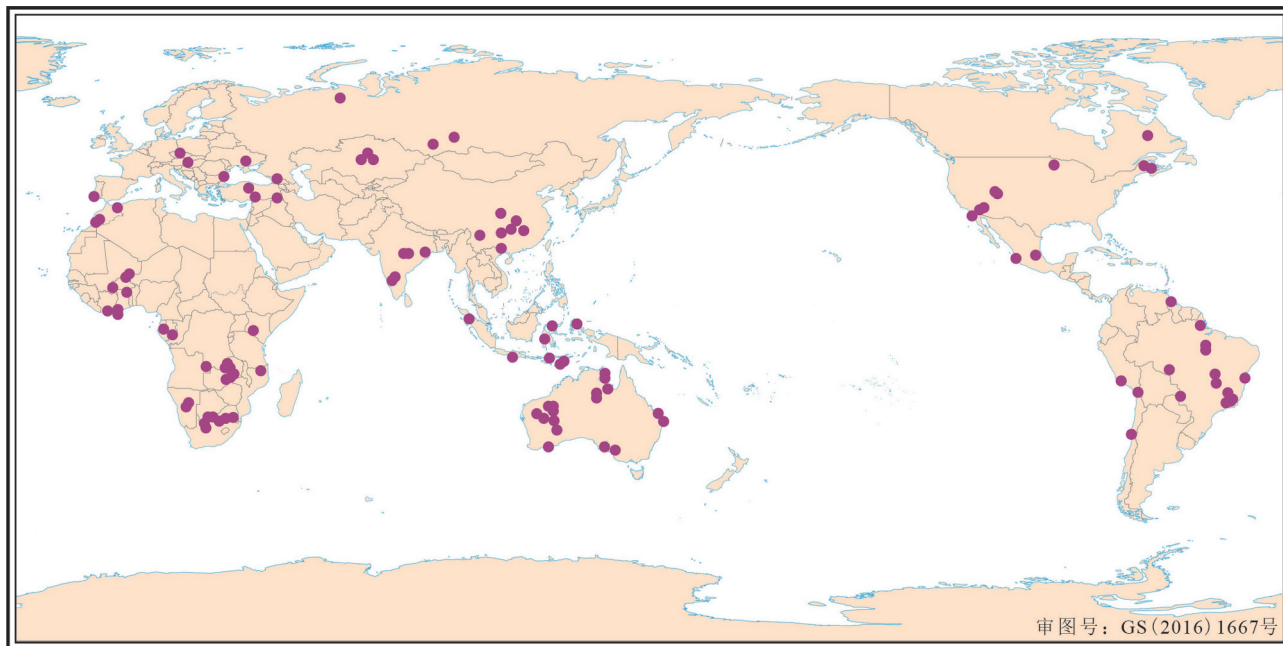


图2 全球主要锰矿床分布示意图
Fig.2 Distribution map of major manganese deposits in the world

全球总储量的7.51%,锰矿石平均品位约50%。中国现已查明的锰矿储量5400万t,占全球总储量的6.65%,居世界第六位,但矿石品位差,富锰矿仅占6%,全国锰矿石的平均品位仅21%,可用锰矿资源只占保有资源总量的40%左右,长期依赖进口。此外印度、哈萨克斯坦、墨西哥以及西非的加纳、科特迪瓦等国锰矿资源也较为丰富,但是储量大、品位高的锰矿床主要分布在南非、澳大利亚、巴西及加蓬。

3.2 时代分布

在地质历史的各个时代均发现有锰矿床,但具有“一老一新”的鲜明特点。其中元古宙地层发现的锰资源量占全球总量的66.91%,新生代地层中的锰资源量占全球总量的27.5%。Kuleshov(2011)在前人研究基础上将锰的成矿作用划分为7期,分别为古元古代成矿期、中元古代成矿期、新元古代成矿期、早古生代成矿期、晚古生代成矿期、中生代成矿期和新生代成矿期(图3)。

古元古代(2500~1600 Ma)是地球历史上重要的锰成矿期,地球上许多有经济价值的锰矿床是在此时期形成。锰矿的类型以沉积型为主,主要分布在南美和非洲各地,它们在成矿背景上较为类似,如南非的Kalahari锰矿、加纳的Nsuta锰矿、刚果的Kisenge-

Kamata锰矿等(Roy, 2006; De Putter et al., 2018),其中以南非Kalahari锰矿最为典型,它几乎包含了世界50%左右的锰资源(Laznika, 1992; Beukes et al., 1995; Gutzmer and Beukes, 1995)。澳大利亚的皮尔巴拉锰成矿省于此时期也形成了众多高品位的锰矿床,以Rippon Hill和Woodie Woodie锰矿为代表。BIF型锰矿床是该时期形成的另外一种重要锰矿床,以澳大利亚、巴西、印度、中国最为典型,锰和铁同时富集,富锰岩石主要分布在表层风化壳中,如西澳的Marra Gamba BIF型锰矿床。

中元古代(1600~1000 Ma)是另一个重要的锰成矿期,但这一时期形成的锰矿规模相对较小。矿床类型BIF型锰矿为主,以巴西最为典型,原始的锰含量非常低,但经过风化作用之后锰含量可达30%~48%。中国于这一时期也形成了大量锰矿床,以辽宁瓦房子为代表,成矿类型包括沉积型、变质型和表生型3种,以沉积型为主。西非的一些国家(加纳、布基纳法索等)在该时期则形成火山沉积型锰矿。

新元古代时期(1000~550 Ma)形成的锰矿类型多样,但锰含量较低,且多与铁相关。同中元古代类似,经过后期风化作用之后,锰再次富集。例

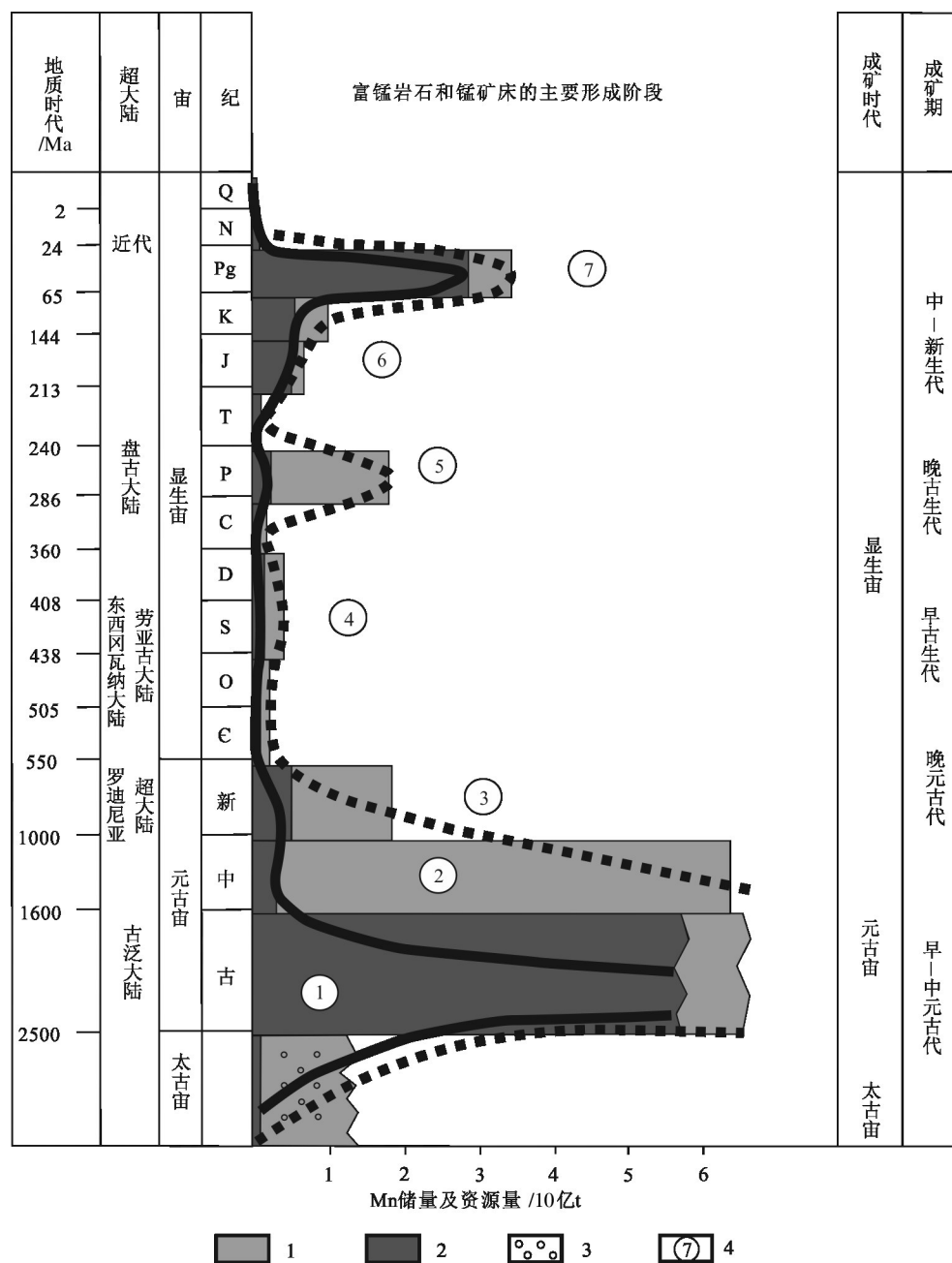


图3 地球不同历史时期锰的储量和资源量分布情况(据 Kuleshov, 2011 修改)

1—储量;2—资源量;3—太古宙含锰岩石;4—主要成矿阶段

Fig.3 Distribution of manganese reserves and resources in different historical periods of the earth (modified from Kuleshov, 2011)

1-Reserves; 2-Resources; 3-Archen manganiferous rocks; 4-Major Mn metallogenic phases

如巴西的 Morro do Urucum BIF 型锰矿,它是世界上最大的铁锰矿之一,大约含 360 亿 t 的铁(品位 50%~67%)和 6.08 亿 t 的锰(品位 25%~49%),形成于 600~800 Ma(Klein and Ladeira, 2004),近年的研究表明其形成还与微生物的活动有关(Biondi and Lopez, 2017)。中国于此段时间形成的锰矿床

以华南地区南华纪大塘坡式锰矿和扬子北缘震旦纪陡山沱期锰矿为代表(邓文兵等,2019)。

早古生代(C—D)成矿期主要形成一些小型锰矿,分布在俄罗斯、巴西、中国、哈萨克斯坦、加拿大等地。锰的富集主要与火山沉积作用相关,锰主要来源于海底热液,通过热水沉积作用而成矿。

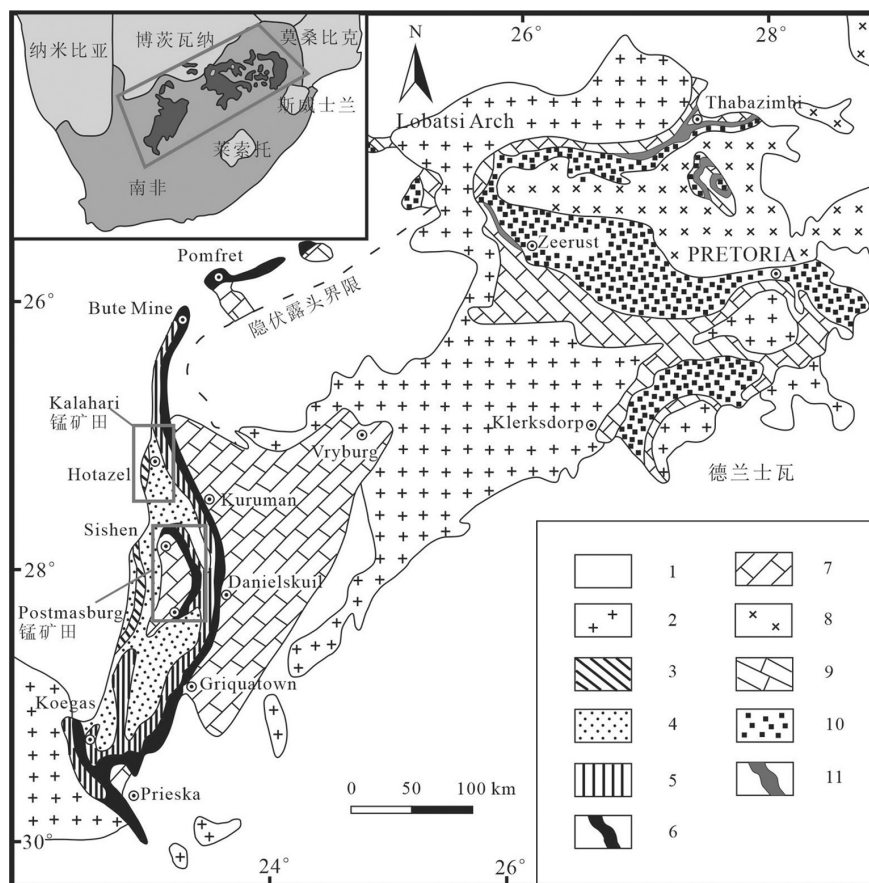


图4 南非德兰士瓦群地质简图及主要锰矿床(据 Pickard, 2003 和 Moore et al., 2012 修改)

1—盖层;2—基底;3—Griqualand BIF带;4—Griqualand群;5—Griquatown碧玉岩组;6—Kuruman BIF带;7—Campbellrand白云岩;8—Bushveld杂岩体;9—Malmani白云岩;10—Pretoria群;11—Penge BIF带

Fig.4 Simplified geological map of the Transvaal supergroup showing distribution of manganese deposits (modified from Pickard, 2003 and Moore et al., 2012)

1—Cover rocks; 2—Basement rocks; 3—Griqualand BIF; 4—Griqualand Group; 5—Griquatown jasper; 6—Kuruman BIF; 7—Campbellrand dolomite; 8—Bushveld complex; 9—Malmani dolomite; 10—Pretoria Group; 11—Penge BIF

晚古生代(C—P)成矿期主要形成一些规模大而品位低的锰矿。产于北乌拉尔一带 Pai-Khoi-Novaya Zemlya 盆地中的锰矿便是其中一个典型的例子,其形成与黑色页岩相关,潜在资源量可达数十亿 t(Sharkov, 2000)。中国于此时期形成的锰矿床主要分布在扬子地区中部、东南缘和西南缘。

中生代(T—K)的锰矿在澳大利亚、智利、墨西哥、摩洛哥、俄罗斯、中国以及欧洲均有发现,锰矿类型以沉积型锰矿为主。另外此时期也形成了一些热液沉积型锰矿,例如在美国加利福尼亚州深水泥岩与燧石中发现了400多个小型锰矿。中国云南省发现了此时期形成的生物成因锰矿(Du et al., 2013)。

新生代成矿期主要以东特提斯上的成矿作用为标志,典型矿床如举世闻名的乌克兰 Nikopol 和

Bol'she-Tokmak 大型锰矿以及格鲁吉亚 Chiatara 和 Kvirily 大型锰矿床等,总资源量超过 20 亿 t(Kuleshov, 2011)。

近代形成的锰矿在洋底及大陆湖盆等均有分布(Nayak et al., 2011; Salama et al., 2012),据统计,太平洋、印度洋、大西洋分布大量锰结核,约包含 25 亿 t 的锰。

中国的锰成矿时代主要集中在中元古代晚期—新元古代和晚古生代—早中生代(付勇等, 2014; 丛源等, 2018; 邓文兵等, 2019; 徐仕琪等, 2019),与世界主成锰期差别较大。

3.3 空间分布

世界锰矿主要分布在西非克拉通、中国泛扬子区、南非德兰士瓦群、澳大利亚格鲁特岛和皮尔巴

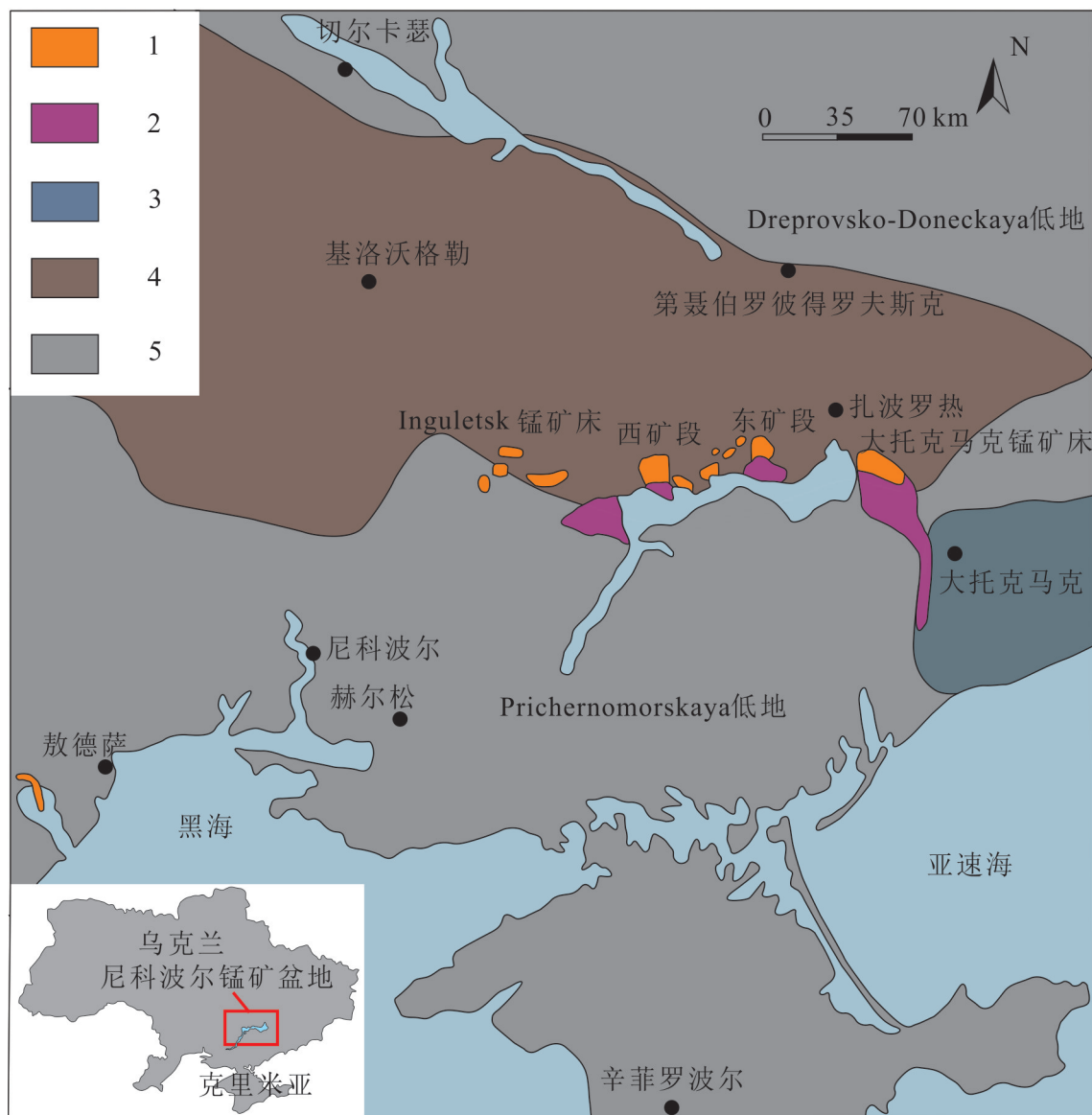


图5 尼科波尔锰矿盆地地质简图及主要锰矿床(据Kuleshov, 2003修改)

1—氧化锰矿石;2—碳酸锰矿石;3—亚速断块;4—乌克兰地盾;5—黑海沿岸低地

Fig.5 Simplified geological map of the Nikopol ore Basin showing distribution of manganese deposits (modified from Kuleshov, 2003)

1—Oxide ores; 2—Carbonate ores; 3—Azov massif; 4—Ukrainian shield; 5—Prichernomorskaya nizm

拉克拉通、乌克兰尼科波尔锰矿盆地、加蓬莫安达地区等。

3.3.1 南非德兰士瓦群

南非是世界上锰矿储量最大的国家,北开普省德兰士瓦群中发育举世闻名的波斯特马斯堡—卡拉哈里铁锰成矿带(常洪伦等,2014)。

卡拉哈里锰矿田位于该成矿带的北部,是世界上最大的陆生锰矿床,其蕴含的锰矿资源占世界优质锰矿的80%以上,平均品位42%,赋矿围岩为新太

古代—古元古代德兰士瓦群的Hotazel组泥质岩(图4)。矿体共分3层,锰矿资源主要赋存在最下层,厚度可达49 m。矿石类型有两种,一种是原生的低品位细粒富碳酸盐岩的Mamatwan型,分布在卡拉哈里矿田的南部,主要富锰矿物为褐锰矿、铁锰云石、黑锰矿等;另外一种是高品位粗粒富氧Wessels型,分布在卡拉哈里矿田的北部和西部,主要富锰矿物为褐锰矿、方铁锰矿、黑锰矿等。中元古代(~1048 Ma)Kheis造山运动过程中形成的高温流体造成卡

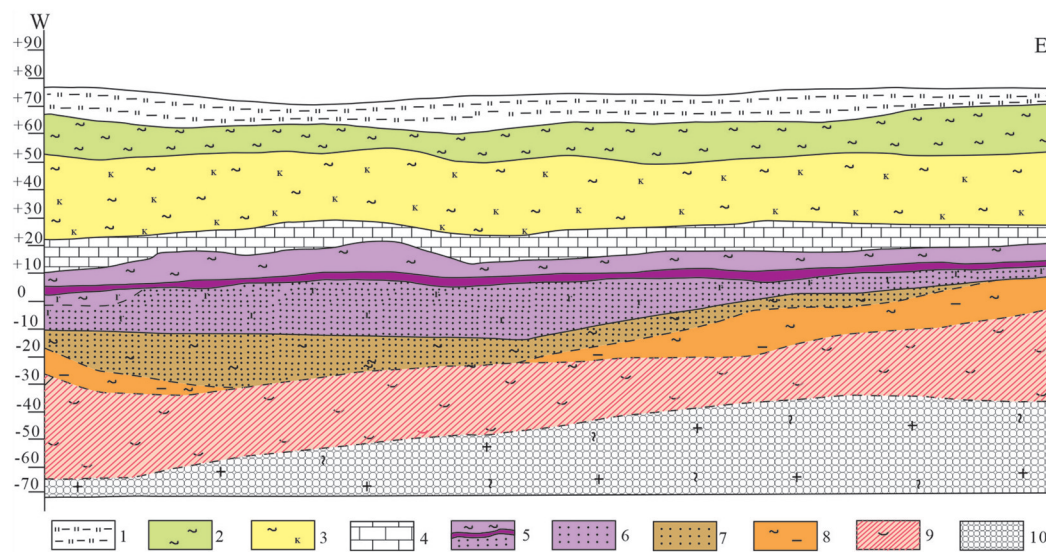


图6 尼科波尔锰矿横截面图(据 Ahmet et al.,2020 修改)

1—土壤;2—红棕色黏土;3—灰黑色黏土;4—灰岩;5—钙质黏土、石英砂、锰矿;6—石英—海绿石砂;7—黏土;8—炭质黏土和砂;9—风化壳;10—混合岩、斜长花岗岩

Fig.6 Geological cross section of the Nikopol manganese deposit(modified from Ahmet et al., 2020)

1—Loam; 2—Red-brown clay; 3—Dark-gray clay; 4—limestone; 5—Alcaeous clay, quartz sand and Mn ores; 6—Quartz-glaucanite sand; 7—Clay; 8—Carbonaceous clay and sand; 9—Weathering crust; 10—Migmatite and plagiogranite

拉哈里锰矿田西北部发生 Wessels 热液蚀变, 淋滤出 Si、Ca、Mg 等离子, 导致原来富碳酸盐岩的 Mamatwan 型锰矿向富氧 Wessels 型锰矿转化, 大大提升了矿石品位 (Chetty and Gutzmer, 2012; Gutzmer et al., 2012; Vafeas et al., 2019)。

博斯特马斯堡锰矿田位于该成矿带的南部, 北起 Sihen, 南至 Postmasburg, 长度超过 60 km, 东西宽度约 30 km, 包含东矿带、西矿带和混合带 3 条锰矿带, 是仅次于卡拉哈里锰矿田的全球第二大锰矿田, 已探明的锰金属量约 1500 万 t, 品位在 30% ~ 48%。博斯特马斯堡锰矿田发育在德兰士瓦群中 Maremane 背斜隆起之上, 是典型的沉积变质型锰矿床, 沉积序列的发育严格受白云岩基底的控制 (常洪伦等, 2014; Fairey et al., 2019)。白云岩中发育大量的溶坑, 控制着原生矿体的形态、规模, 主要富锰矿物为软锰矿、硬锰矿、水锰矿、褐锰矿等。

3.3.2 乌克兰尼科波尔锰矿盆地

乌克兰尼科波尔盆地是世界上又一个重要的锰成矿区域, 它位于黑海北东, 亚速海北西, 北部与乌克兰地盾毗邻, 东部为亚速断块 (图 5)。

该盆地主要由前寒武的结晶基底和白垩纪—第四纪的沉积盖层组成, 其中发育大量沉积型锰矿

床, 矿床的形成与渐新世黑海盆地浅海沉积作用相关。由于此时黑海盆地处于封闭环境, 其内部发育的锰矿床的特征相似。矿体呈层状或透镜状, 赋存在砂岩和黏土岩中 (图 6), 埋藏深度为 80 ~ 100 m, 东西延伸约 250 km, 厚度从几厘米到 4.5 m 不等, 平均 1.5 ~ 2.5 m, 锰储量超过 10 亿 t。矿石类型有氧化型、碳酸盐岩型和混合型 3 种, 其中氧化型锰矿石形成的时间较早, 被后期形成的碳酸盐岩脉石填充。氧化型锰矿石主要富锰矿物有水锰矿、软锰矿、硬锰矿等, 碳酸盐岩型锰矿石富锰矿物主要为锰方解石和菱锰矿。形成的矿床以尼科波尔 (Nikopol) 和大托克马克 (Bol'she-Tokmak) 大型锰矿为代表 (Kuleshov, 2003), 矿石中含大量不规则分布的细脉状、块状、透镜状碳酸盐岩, 氧化型锰矿石品位为 10% ~ 45%, 碳酸盐岩型锰矿石品位约 30%。近期的研究表明, 尼科波尔氧化型锰矿是在富氧的或者有氧的浅海环境快速形成, 而碳酸盐岩型锰矿则形成于深水环境, 大陆和深水热液共同提供锰源 (Ahmet et al., 2020)。

3.3.3 澳大利亚格鲁特岛和皮尔巴拉克拉通

澳大利亚锰矿储量居世界第四位, 锰矿资源主要分布格鲁特岛和皮尔巴拉克拉通。

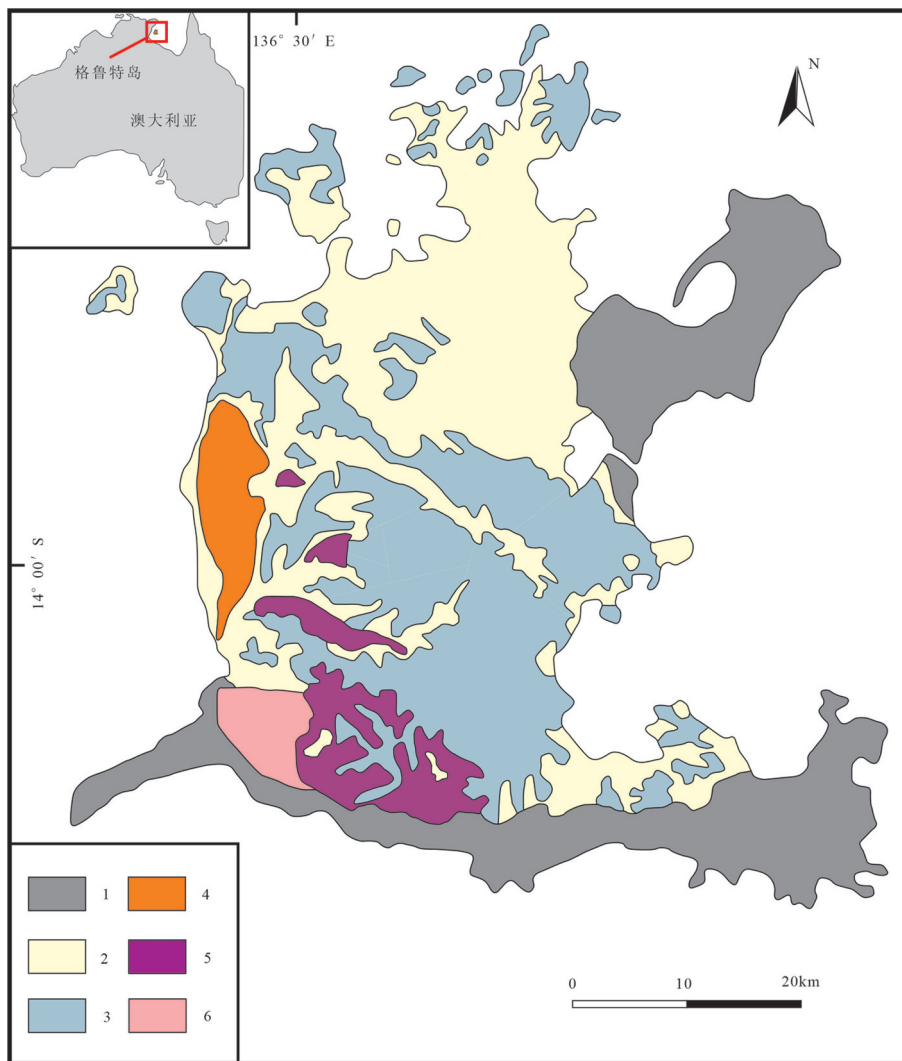


图7 澳大利亚格鲁特岛地质简图(据 Pracejus et al., 1988 修改)

1—沙丘;2—砂、黏土;3—砂岩;4—豆状 MnO₂;5—浸染状 MnO₂;6—含锰钙质粉砂岩

Fig.7 Simplified geological map of the Groote Eylandt (modified from Pracejus et al., 1988)

1—Sand dunes;2—Sand, clays;3—Sandstone;4—Podiform MnO₂;5—Disseminated MnO₂;6—Manganiferous calcareous siltstone

位于格鲁特岛上格鲁特艾兰锰矿是全球特大型高品位氧化锰矿床之一,储量占澳大利亚总储量80%左右。矿体长22 km、宽6 km,平均厚度约3 m,产状平缓,锰含量在40%~50%。该矿床为典型的海相沉积型锰矿床,长英质砂岩和石英岩构成了该矿床的基底,上部被下白垩统阿尔必阶砂岩和黏土覆盖(图7)。矿石赋存于早白垩世砂质黏土中,富锰矿物主要为隐钾锰矿、软锰矿、黑锰矿和硬锰矿等(Pracejus et al., 1988; Ostwald, 1988)。

皮尔巴拉克拉通是澳大利亚另外一个重要的锰成矿省,它由西皮尔巴拉地体和东皮尔巴拉地体组成,其中锰矿主要分布在东皮尔巴拉地体中。东

皮尔巴拉地体主要由太古宙岩石组成,包含大量变质变形的椭圆状花岗岩体,部分被新太古代—古元古代 Fortescue 群和 Hamersley 群不整合覆盖,四周分布着中元古代的 Maganese 群和一些新生代岩石(图8)。其中 Fortescue 群主要由陆源碎屑沉积岩组成,Hamersley 群主要由 Marra Mamba 含铁建造和 Carawine 白云岩组成。克拉通内发育大量北东向、北北东向走滑断裂,控制着区内的蚀变和矿化作用(Blake et al., 2011)。中元古代区内发生大规模热液活动,造成 Carawine 白云岩溶解和 Maganese 群的蚀变,形成了大量规模大、品位低的锰矿床,以 Woodie Woodie 锰矿床为代表,后期表生作用提高

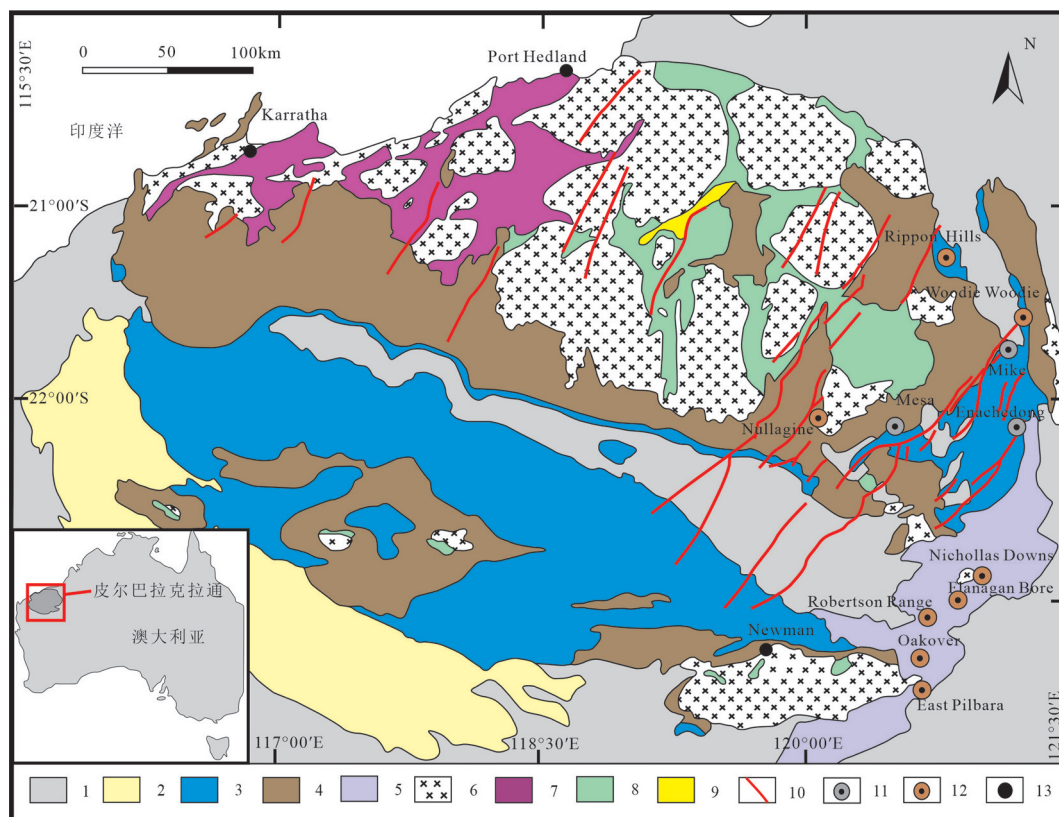


图8 皮尔巴拉克拉通地质简图及主要锰矿床分布(据 Blake et al., 2011 和 Sheppard et al., 2017 修改)

1—新生代盖层;2—Ashburton组;3—Hamersley群;4—Fortescue群;5—Maganese群;6—花岗岩;7—西皮尔巴拉地体;8—东皮尔巴拉地体;
9—Lalla Rookh盆地;10—断裂;11—BIF型锰矿床;12—表生型锰矿床;13—城市

Fig.8 Simplified geological map of Pilbara Craton showing distribution of manganese deposits
(modified from Blake et al., 2011 and Sheppard et al., 2017)

1—Cenozoic sedimentary covers; 2—Ashburton Formation; 3—Hamersley Group; 4—Fortescue Group; 5—Maganese Group; 6—Granite; 7—West Pilbara terrane; 8—East Pilbara terrane; 9—Lalla Rookh basin; 10—Fault; 11—BIF Mn deposit; 12—Supergene Mn deposit; 13—Town

了矿石品位,主要富锰矿物为软锰矿、褐锰矿和锰钾矿等(Sheppard et al., 2017)。

3.3.4 中国泛扬子区

位于中国华南和西南地区的扬子陆块经历了复杂的造山运动,发育多种类型的锰矿床。截止2019年,中国锰的储量超过5400万t,但占全国资源量85%以上的锰矿资源集中在华南地区,沿着扬子陆块及其周缘呈簇状分布(图9),对应着成矿(区)带的扬子陆块及周缘地区“扬子成锰省”(付勇等, 2014;陈毓川等, 2015;黎贵亮, 2018)。

广西、湖南、云南、贵州等省锰储量最大,其中排在前两位是广西和湖南,储量分别为2.15亿t和1.03亿t,占全国锰总储量的34.89%和22.7%(洪世琨, 2011;阴江宁等, 2014;丛源等, 2018)。成矿时代以新元古代、泥盆纪和二叠纪为主,成矿类型以

沉积型和表生型为主(Xiang et al., 2020)。扬子区湘黔贵地区主要分布新元古代南华纪大塘坡式锰矿,成矿类型为海相黑色页岩型,形成于大陆边缘盆地内,典型矿床有湖南花垣民乐锰矿床、湘潭锰矿床;扬子北缘主要分布震旦纪陡山沱期锰矿,成矿类型为黑色页岩型,形成于南秦岭海槽边缘带,代表性矿床为重庆高燕锰矿床;扬子区广西南部 and 湖南东南部地区主要产出晚泥盆世—早石炭世锰矿,成矿类型为海相沉积型和火山沉积型,形成于滇黔桂台盆地边缘,典型矿床有广西下雷锰矿床和湖南后江桥锰矿床;广西木圭锰矿床是扬子南缘典型的表生型锰矿床,温暖湿润的气候以及定向的季风活动为其提供动力基础(付勇等, 2014;邓文兵等, 2019)。

3.3.5 西非克拉通

西非克拉通主要由太古宙和古元古代的岩石

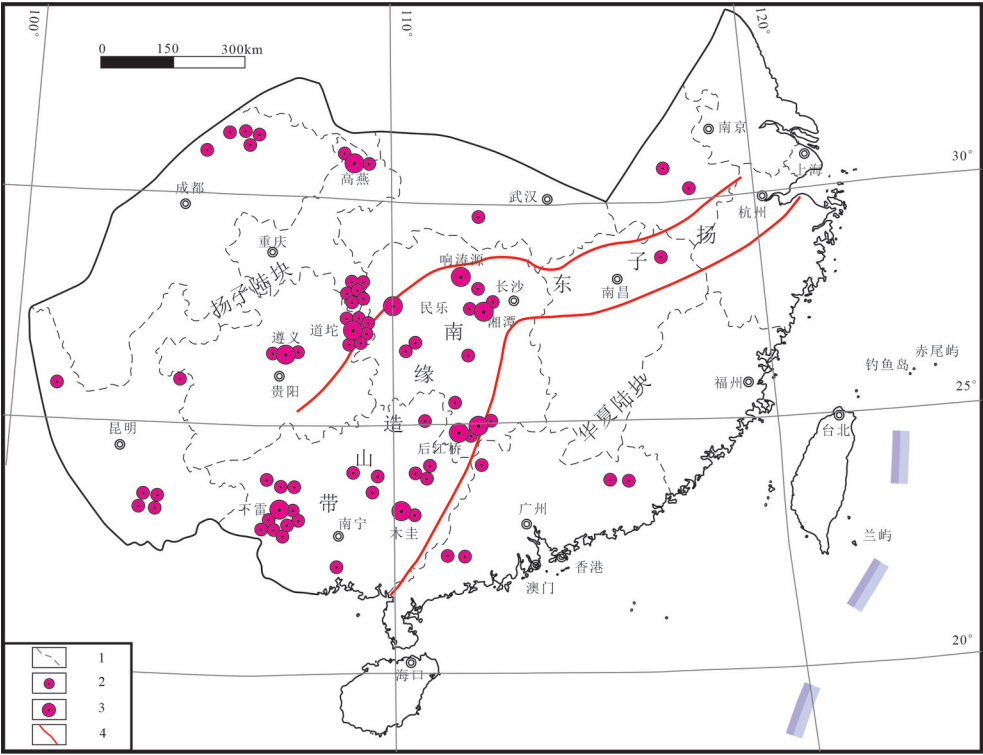


图9 中国华南地区大中型锰矿分布图(据 Xiang et al., 2020 和王剑等, 2012 修改)
1—省界; 2—中型锰矿; 3—大型锰矿; 4—构造边界

Fig.9 Distribution map of large to mid-sized manganese deposits in southern China (modified from Xiang et al., 2020 and Wang et al., 2012)

1—Province boundary; 2—Moderate-size Mn ores; 3—Large Mn ores; 4—Tectonic boundary

表 4 近 10 年世界主要锰矿生产国的锰产量(万 t)

Table 4 Manganese production of the major countries rich in manganese in the last ten years (ten thousand ton)

国别	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
澳大利亚	310	320	308	298	305	245	224	282	348	320
巴西	78	121	133	112	104	109	108	116	131	120
缅甸	30	23.4	11.5	15.7	9.8	2.8	11.7	—	20.7	21
中国	260	280	290	300	300	300	233	170	120	130
科特迪瓦	3.9	2.0	4.5	9.9	14.8	13.3	4.7	—	39.5	40
加蓬	142	186	165	197	186	202	162	219	233	240
加纳	42.6	48.4	41.4	53.3	41.8	41.6	55.3	81	136	140
印度	100	89.5	80	92	94.5	90	74.5	73.4	96.1	100
哈萨克斯坦	39	39	39	40.4	39	22.2	21.2	16.8	14	13
马来西亚	—	22.5	42.9	43	37.8	20.1	26.6	47.8	39	42
墨西哥	17.5	17.1	18.8	21.2	23.6	22	20.6	21.2	21	19
南非	290	340	360	430	520	590	530	540	580	550
乌克兰	54	33	41.6	30	42.2	41	42.5	73.5	51.7	54
其他国家	134	174	92	59.7	74	67.8	68.1	89.8	39.7	91
合计	1501.0	1695.9	1627.7	1702.2	1792.5	1766.8	1582.2	1730.5	1869.7	1880

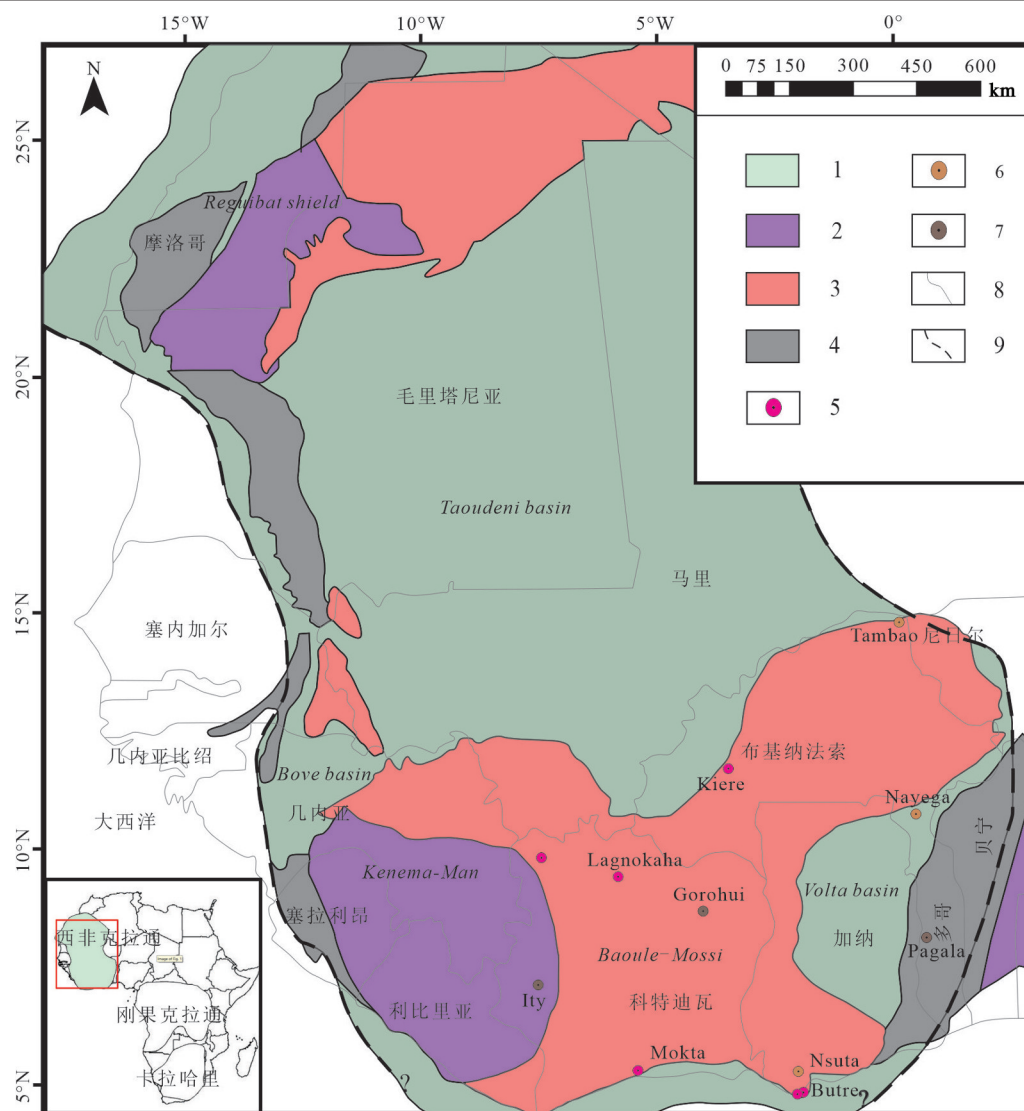


图10 西非克拉通地质简图及锰矿(据 Markwitz et al., 2016 修改)

1—西非克拉通;2—太古宙;3—古元古代;4—泛非活动带;5—沉积型锰矿;6—沉积型、表生型锰矿;7—BIF 型锰矿;8—国界;9—西非克拉通边界

Fig.10 The simplified geological map of the West African Craton showing distribution of manganese deposits (modified from Markwitz et al., 2016)

1—West African Craton; 2—Archean; 3—Paleoproterozoic; 4—Pan-African belts; 5—Sedimentary Mn deposit; 6—Sedimentary and supergene Mn deposit; 7—BIF Mn deposit; 8—National boundary; 9—Boundary of West African Craton

组成,大部分被后期年轻的岩层覆盖,但在北部和南部地区分别出露 Reguibat 地盾和 Leo-Man 地盾,二者被中元古代—古生代形成的 Taoudeni 盆地所分隔,周围分布一些泛非期(750~550 Ma)和海西期(~330 Ma)的造山带,西侧是中新代大西洋古裂谷构造形成的滨海盆地(Markwitz et al., 2016; Gunn et al., 2018)。Leo-Man 地盾分为两部分,西部(Kenema-Man 区域)由太古宙 TTG 片麻岩组成,

东部(Baoule-Mossi 区域)则由古元古代的沉积盆地和火山带(统称为 Birimian 群)组成(图10)。

西非克拉通上分布多个锰矿床,主要集中在 Baoule-Mossi 一带的古元古代 Birimian 群(2.3~2.1 Ga)中,在加纳、布基纳法索、科特迪瓦、马里和多哥等国均有发现(Hein and Tshibubudze, 2016; Markwitz et al., 2016; Gunn et al., 2018)。西非克拉通锰矿主要分3种类型,第一种是沉积型锰矿床,在

表5 中国2014—2018年度进口的锰资源量(万t)

Table 5 Imported manganese resources of China from 2014 to 2018 (ten thousand tons)

进口国	2014年度	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度
南非	579.4	633.0	759.2	893.6	1114.2
澳大利亚	516.3	429.8	407.4	407.0	522.2
加纳	105.9	53.7	154.9	203.4	350.9
加蓬	147.9	187.6	125.6	205.7	252.5
巴西	88.0	118.3	116.9	182.2	182.7
马来西亚	92.1	63.4	89.0	79.3	108.8
科特迪瓦	33.7	18.8	17.7	23.0	65.8
缅甸	22.3	5.2	26.9	10.5	47.1
世界总计	1630.8	1534.8	1759.3	2053.7	2702.4

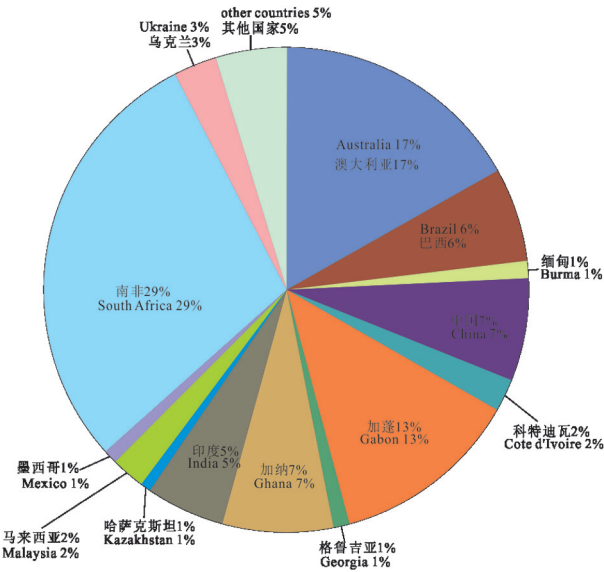


图11 2019年度世界主要锰矿生产国锰产量占比
Fig.11 Proportion of manganese production of the major countries rich in manganese in 2019

时空上与镁铁质中性火山岩和火山沉积序列相关;第二种是BIF型锰矿床,与条带状铁质建造相关;第三种是表生型锰矿床,经过后期风化、堆积等作用而形成,锰钾矿³⁹Ar-⁴⁰Ar年龄显示其成矿年龄为59~45 Ma(Beauvais et al., 2008)。相对于世界上其他锰矿来说,西非克拉通上的锰矿品位都比较高,在14.7%~52%,平均40%,且具有低成本露天开采等优势。

4 世界锰矿资源的开发现状

据美国地质调查局资料(2011—2020年)显示,世界锰的储量从2010年的6.3亿t上升到2019年的8.1亿t,锰的生产量从2010年的1501万t上升到

2019年的1880万t(表4)。
世界锰主要生产国有:南非、澳大利亚、加蓬、加纳、中国、巴西、印度、乌克兰、马来西亚、科特迪瓦等。其中南非、澳大利亚和加蓬是3个最主要的稳定生产国,2019年度此3国锰产量之和约占世界总产量的59%。加纳、中国、巴西锰产量也较高,分别占世界总产量的7%、7%和6%(图11)。近10年世界主要锰矿生产国锰产量变化(图12)显示:2015年之前,南非锰产量增长迅速,其他国家基本保持不变,2015年之后南非和澳大利亚锰产量相对稳定,加蓬、加纳和乌克兰等国稳定增长。

中国锰矿“小、贫、杂、细”的特点造成矿山开发及选冶成本相对较高,很难取得有效的经济利益,适宜露天开采的矿山仅占总量的6%(周柳霞, 2000; 张涇生等, 2006; 何辉, 2017; 邓文兵等, 2019)。近年来又处于矿业升级转型的关键时期,国家环保政策愈加严格,尤其自然保护区矿业权退出政策,使一大批产能退出,因此2015年之后中国锰矿生产量呈现“断崖式”下降,远跟不上冶金工业的发展,对外依存度不断攀升,成为全球锰矿的最大进口国(胡德文等, 2011; 丛源等, 2018; 邓文兵等, 2019)。2014—2018年度中国进口锰资源量见表5,主要进口地有南非、澳大利亚、加纳、加蓬、巴西、马来西亚、科特迪瓦、缅甸等。

2019年,南非仍是全球第一大锰生产国,锰矿的开发集中在北开普省卡拉哈里锰矿田、波斯特马斯堡锰矿田。它们是世界上最大的两个锰矿田,锰矿类型为沉积变质型,主要锰矿区包括Mamatwan矿、NChwaning矿、Wessels矿、Tshipi Borwa矿和Gloria矿等,其中Mamatwan锰矿储量最大,已探明

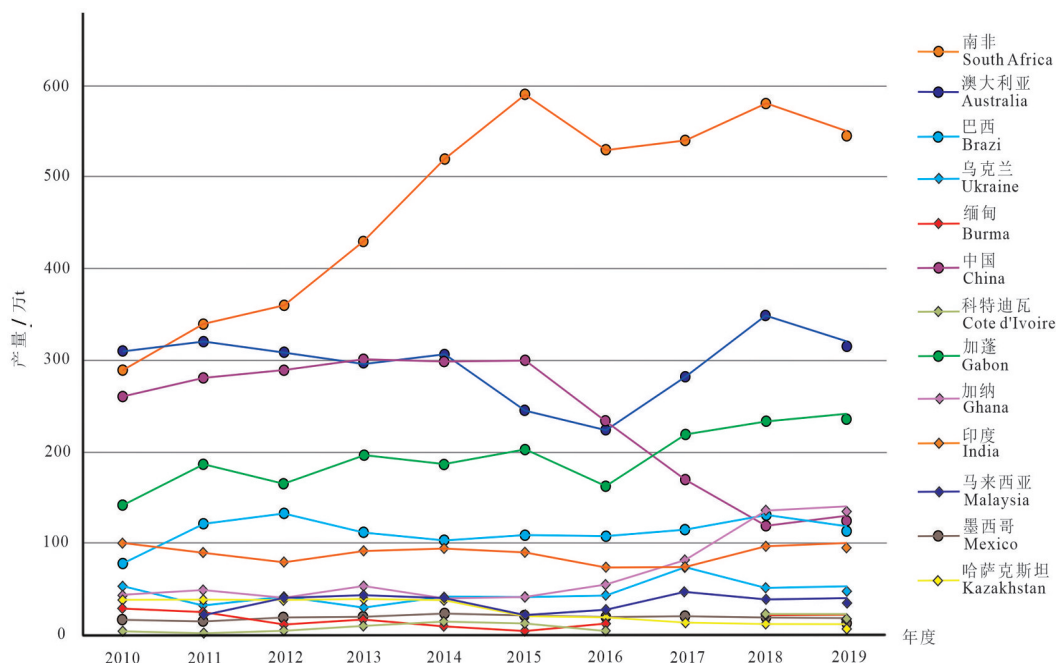


图 12 近 10 年世界主要锰矿生产国锰产量变化

Fig. 12 Manganese production changes of the major countries rich in manganese in the last ten years

总储量达 5.65 亿 t, 主要由萨曼科(Samancor)公司和联合锰矿公司(Assoman)控股; Tshipi Borwa 矿主要由 Jupiter 矿业控股, 2019 年度锰产量达 344.9 万 t。澳大利亚多年来也是世界主要锰生产国, 锰产量在 2010 年一度超过了南非, 由于 2015 和 2016 年度锰矿价格无限走跌, 造成锰矿减产, 自 2017 年锰矿价格回升后锰产量逐渐恢复正常, 是全球第二大锰生产国。2019 年度澳大利亚锰产量为 320 万 t, 锰的生产主要集中在格鲁特岛以及东皮尔巴拉的 Woodie Woodie 锰矿和 Rippon Hills 锰矿。其中格鲁特岛 Groote Eylandt 锰矿由必和必拓控股 60%, 英美公司控股 40%, 该矿是原生的氧化锰矿, 目前有 3 个大型露天采场, 且地理位置优越, 交通便利, 距澳大利亚本土东海岸 48 km, 有自然条件良好的港口。Woodie Woodie 锰矿由中国宁夏天元锰业有限公司控股, 也是典型的风化型锰矿床。加蓬是世界第三大锰生产国, 2019 年度锰产量为 240 万 t, 主要开采的锰矿床为 Moanda 锰矿, 产在古元古代 Francevillian 沉积盆地中, 由埃赫曼公司控股, 锰矿类型为表生型, 矿石储量约 2.69 亿 t, 品位约 45.4%。巴西锰矿生产长期保持稳定, 2019 年锰产量为 120 万 t, 主要集中在卡拉加斯锰矿、乌鲁库姆

锰矿和塞腊多纳维奥锰矿。其中卡拉加斯锰矿是巴西最大的锰矿山, 浅部为氧化锰矿, 深部为碳酸锰矿, 储量约 6000 万 t, 平均品位约 40%, 目前由亚马逊尼亚矿业公司管辖, 生产能力为 350 万 t/a, 采矿为地下开采; 乌鲁库姆锰矿床为氧化锰矿, 储量约 5900 万 t, 平均品位约 45.6%, 生产能力为 350 万 t/a, 采矿为地下开采; 塞腊多纳维奥锰矿床含氧化锰矿和原生锰两种矿石类型, 其中氧化锰矿石中 Mn 含量大于 40%, 原生锰矿含 Mn 量在 25%~31%, 矿石储量约 8000 万 t, 目前由依科米公司控股经营, 生产能力为 150 万 t/a, 矿山开采为露天开采。加纳锰矿储量不多, 但矿产品位较好, 锰含量在 42%~54%, 2019 年度锰产量约 140 万 t, 主要集中在 3 个地区: (1) 北部巴库和博尔加坦噶地区; (2) 北纬 8.6° 以北、西经 1.6° 以西的地区; (3) 西南部恩苏塔矿区, 其中恩苏塔锰矿区是加纳的重点锰矿区, 储量约 3009 万 t, 该矿山主要由中国宁夏天元锰业控股 (90%), 目前开采部分约 4.6 km², 矿层分布在离表土 30 m 以下的地区, 厚度达 220 余米。

5 结 论

(1) 根据锰成矿过程中形成的含矿岩系特征,

世界锰矿床可划分为海相沉积型、火山(热液)–沉积型、变质型、热液型和表生型5大类。

(2)地理上,世界锰矿集中在南非、巴西、乌克兰、澳大利亚、加蓬、中国、印度、加纳、哈萨克斯坦、墨西哥、玻利维亚、格鲁吉亚、保加利亚、俄罗斯等国。时间上,元古宙和新生代是世界锰矿形成的主要时代。空间上,世界锰矿主要分布在西非克拉通、中国泛扬子区、南非德兰士瓦群、澳大利亚格尔特岛和皮尔巴拉克拉通、乌克兰尼科波尔锰矿盆地等地。

(3)目前,南非、澳大利亚、加蓬、加纳等国为世界主要的产锰国,锰的生产主要集中在卡拉哈里和波斯特马斯堡锰矿田、格尔特岛、莫安达锰矿、恩苏塔锰矿等地。中国是世界上最大的锰进口国,每年从这些国家进口大量锰矿石。

致谢: 审稿专家和编辑老师对论文提出了宝贵的意见和建议,在此表示衷心的感谢!

References

- Ahmet S, Vasyi M Z, Bigne S. 2020. Major, trace and rare earth element (REE) geochemistry of the Oligocene stratiform manganese oxide–hydroxide deposits in the Nikopol, Ukraine[J]. *Ore Geology Reviews*, 126: 1–15.
- Beauvais A, Ruffet G, Hénocque O, Colin F. 2008. Chemical and physical erosion rhythms of the West African Cenozoic morphogenesis: The ^{39}Ar – ^{40}Ar dating of supergene K–Mn oxides[J]. *Journal of Geophysical Research*, 113: 1–15.
- Beukes N J, Burger A M, Gutzmer J. 1995. Fault controlled hydrothermal alteration of Paleoproterozoic manganese ore in Wessels mine, Kalahari manganese field[J]. *South Africa Journal of Geology*, 98(4): 430–451.
- Biondi J C, Lopez M. 2017. Urucum Neoproterozoic–Cambrian manganese deposits (MS, Brazil): Biogenic participation in the ore genesis, geology, geochemistry, and depositional environment[J]. *Ore Geology Reviews*, 91: 335–386.
- Blake T S, Rothery E, Muhling J R, Drake–Brockman J A P, Sprigg L C, Ho S E, Rasmussen B, Fletcher I R. 2011. Two episodes of regional–scale Precambrian hydrothermal alteration in the eastern Pilbara, western Australia[J]. *Precambrian Research*, 188(1/4): 73–103.
- Brusnitsyn A I, Zhukov I G. 2012. Manganese deposits of the Devonian magnitogorsk paleovolcanic belt (southern Urals, Russia)[J]. *Ore Geology Reviews*, 47: 42–58.
- Chang Honglun, Kong Fanhui, Song Xiaodong, Zhao Jin, Li Jianfeng, Du Jun, Wang Congyin. 2014. Dolostone controls in Postmasburg manganese field of South Africa[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 32(5): 832–839(in Chinese with English abstract).
- Chen Yuchuan, Wang Denghong, Xu Zhigang. 2015. Important Mineral and Regional Metallogenic Regularity in China[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Chetty D, Gutzmer J. 2012. REE redistribution during hydrothermal alteration of ores of the Kalahari manganese deposit[J]. *Ore Geology Reviews*, 47: 126–135.
- Cong Yuan, Dong Qingjie, Xiao Keyan, Chen Jianping, Gao Yongbao, Yin Jiangning. 2018. Characteristics and predicted potential of Mn resources in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 25(3): 118–137(in Chinese with English abstract).
- De Putter T, Liégeois J, Dewaele S, Cailteux J, Boyce A, Mees F. 2018. Paleoproterozoic manganese and base metals deposits at Kisenge–Kamata (Katanga D R. Congo)[J]. *Ore Geology Reviews*, 96: 181–200.
- Deng Wenbing, Zhang Yanwen, Kong Linghu, Shang Lei. 2019. Current status of manganese ore resources in China and selecting for national physical geological data of manganese ore deposits[J]. *China Mining Magazine*, 28(9): 175–182(in Chinese with English abstract).
- Du Q, Yi H, Hui B, Li S, Xia G, Yang W, Wu X. 2013. Recognition, genesis and evolution of manganese ore deposits in southeastern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 55: 99–109.
- Dzigbodi–Adjimah K. 2004. The mineralogy and petrography of the ferruginous manganese rocks at Mankwadzi, Ghana[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 38(3): 293–315.
- Fairey B J, Timmerman M J, Sudo M, Tsikos H. 2019. The role of hydrothermal activity in the formation of karst–hosted manganese deposits of the Postmasburg mn field, Northern Cape Province, South Africa[J]. *Minerals*, 9(7):408–436.
- Fu Yong, Xu Zhigang, Pei Haoxiang, Jiang Ran. 2004. Study on metallogenic regularity of manganese ore deposits in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(12):2192–2207(in Chinese with English abstract).
- Ghosh R, Chakraborty D, Halder M, Baidya T K. 2015. Manganese mineralization in Archean greenstone belt, Joda–Noamundi sector, Noamundi basin, east Indian shield[J]. *Ore Geology Reviews*, 70: 96–109.
- Gunn A G, Dorbor J K, Mankelov J M, Lusty P A J, Dedy E A, Shaw R A, Goodenough K M. 2018. A review of the mineral potential of Liberia[J]. *Ore Geology Reviews*, 101: 413–431.
- 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, Du Plooy A P, Beukes N J. 2012. Timing of supergene enrichment of low–grade sedimentary manganese ores in the Kalahari manganese field, South Africa[J]. *Ore Geology Reviews*, 47: 136–153.
- He Hui. 2017. A present situation of Mn–ore resources and its

- investigation[J]. China's Manganese Industry, 35(1): 23–24(in Chinese with English abstract).
- Hein K A A, Tshibubudze A. 2016. Manganese deposits of the Oudalan province in the northeast of Burkina Faso, and Ansong Inlier in eastern Mali[J]. Ore Geology Reviews, 78: 645–651.
- Hong Shikun. 2011. Status of China Mn-ore in resources exploitation and the sustainable development[J]. China's Manganese Industry, 29(3): 13–16(in Chinese with English abstract).
- Hu Dewen, Feng Dandan. 2011. An analysis of the constraints on Chinese manganese industry[J]. China Mining Magazine, 20(6): 1–8(in Chinese with English abstract).
- Klein C, Ladeira E.A. 2004. Geochemistry and mineralogy of Neoproterozoic Banded Iron Formations and some selected, siliceous manganese formations from the Urucum district, Mato Grosso do Sul, Brazil[J]. Economic Geology, 99(6): 1233–1244.
- Kuleshov V N. 2003. Isotopic composition ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$) and origin of manganese carbonate ores from the early Oligocene deposits, the eastern paratethys[J]. Geochemistry, 63(4): 329–363.
- Kuleshov V N. 2011. Manganese deposits: communication 2. Major epochs and phases of manganese accumulation in the Earth's history[J]. Lithology and Mineral Resources, 46: 546–565.
- Laznika P.1992. Manganese deposits in the global lithogenetic system: Quantitative approach[J]. Ore Geology Reviews, 7(4): 279–356.
- Li Guiliang. 2018. Status quo of manganese ore in China[J]. China's Manganese Industry, 36(3): 5–7(in Chinese with English abstract).
- Luo Huabao. 2002. The direction of prospecting for high quality manganese ore resources in China[J]. Geology and Exploration, 38(4): 8–11(in Chinese with English abstract).
- Maghfouri S, Rastad E, Mousivand F, Choulet F, Ye L. 2017. Geological and geochemical constraints on the Cheshmeh–Frezi volcanogenic stratiform manganese deposit, southwest Sabzevar basin, Iran[J]. Ore Geology Reviews, 89: 96–113.
- Markwitz V, Hein K A A, Jessell M W, Miller J. 2016. Metallogenic portfolio of the West Africa craton[J]. Ore Geology Reviews, 78: 558–563.
- Markwitz V, Hein K A A, Miller J. 2016. Compilation of West African mineral deposits: Spatial distribution and mineral endowment[J]. Precambrian Research, 274: 61–81.
- Moore J M, Polteau S, Armstrong R A, Corfu F, Tsikos H. 2012. The age and correlation of the Postmasburg Group, southern Africa: Constraints from detrital zircon grains[J]. Journal of African Earth Sciences, 64: 9–19.
- Nayak B, Das S K, Bhattacharyya K K. 2011. Detrital and authigenic (?) baddeleyite (ZrO_2) in ferromanganese nodules of central Indian ocean basin[J]. Geoscience Frontiers, 2: 571–576.
- Ostwald J. 1988. Mineralogy of the Groote Eylandt manganese oxides: A review[J]. Ore Geology Reviews, 4(1): 3–45.
- Pickard A. 2003. SHRIMP U–Pb zircon ages for the Paleoproterozoic Kuruman Iron Formation, Northern Cape Province, South Africa: Evidence for simultaneous BIF deposition on Kaapvaal and Pilbara Cratons[J]. Precambrian Research, 125(3/4): 275–315.
- Pracejus B, Bolton B R, Frakes L A. 1988. Nature and development of supergene manganese deposits, Groote Eylandt, northern Territory, Australia[J]. Ore Geology Reviews, 4(1): 71–98.
- Roy S. 2006. Sedimentary manganese metallogenesis in response to the evolution of the earth system[J]. Earth Science Reviews, 77: 273–305.
- Salama W, Aref M E, Gaupp R. 2012. Mineralogical and geochemical investigations of the middle Eocene ironstones, El Bahariya Depression, western Desert, Egypt[J]. Gondwana Research, 22: 717–736.
- Sethumadhav M S, Gunnell Y, Ahmed M M, Chinnaiyah. 2010. Late Archean manganese mineralization and younger supergene manganese ores in the Anmod–Bisgod region, western Dharwar Craton, southern India: Geological characterization, palaeoenvironmental history, and geomorphological setting[J]. Ore Geology Reviews, 38: 70–89.
- Sharkov A A. 2000. Manganese raw mineral base of Russia and problem of its utilization[J]. Razved Okhr Nedr, 11: 15–19.
- Sheppard S, Krapez B, Zi J W, Rasmussen B, Fletcher I R. 2017. Young ores in old rocks: Proterozoic iron mineralisation in Mesoproterozoic Banded Iron Formation, northern Pilbara Craton, Australia[J]. Ore Geology Reviews, 89: 40–69.
- U.S.Geological Survey. 2011. Mineral Commodity Summaries [R].
- U.S.Geological Survey. 2012. Mineral Commodity Summaries [R].
- U.S.Geological Survey. 2013. Mineral Commodity Summaries [R].
- U.S.Geological Survey. 2014. Mineral Commodity Summaries [R].
- U.S.Geological Survey. 2015. Mineral Commodity Summaries [R].
- U.S.Geological Survey. 2016. Mineral Commodity Summaries [R].
- U.S.Geological Survey. 2017. Mineral Commodity Summaries [R].
- U.S.Geological Survey. 2018. Mineral Commodity Summaries [R].
- U.S.Geological Survey. 2019. Mineral Commodity Summaries [R].
- U.S.Geological Survey. 2020. Mineral Commodity Summaries [R].
- Vafeas N A, Blignaut L C, Viljoen K S. 2019. 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, 115: 103146.
- Wang Jian, Duan Taizhong, Xie Yuan, Wang Zhengjiang, Hao Ming, Liu Wei. 2012. The tectonic evolution and its oil and gas prospect of southeast margin of Yangtze Block[J]. Geological Bulletin of China, 31(11): 1739–1749(in Chinese with English abstract).
- Xiang J, Chen J, Bagas L, Li S, Wei H, Chen B. 2020. Southern China's manganese resource assessment: An overview of resource status, mineral system, and prediction model[J]. Ore Geology Reviews, 116: 103261.
- Xie Jin. 2017. Analysis on Investment Prospect of One Belt And One Road Manganese Ore Resources[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese).

- Xu Shiqi, Xue Chunji, Feng Jing, Feng Changrong. 2019. Study on metallogenic regularity of manganese deposits of Xinjiang[J]. Xiangjiang Geology, 37(2): 201–206(in Chinese with English abstract).
- Yan Wangsheng, Gao Hailiang. 2009. The resource of Mn ore and its development of Mn–Mining[J]. China's Manganese Industry, 27(3): 6–11(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): 1424–1436(in Chinese with English abstract).
- Zang Zhongjiang, Sui Yanhui. 2019. An analysis of the present situation and utilization of manganese ore resources in Russian Federation[J]. China's Manganese Industry, 37(4): 1–7(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jingsheng, Zhou Guanghua. 2006. A review of manganese ore resources in China and its processing technology progress[J]. China's Manganese Industry, 24(1): 1–5(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jiuling. 1982. Geological characteristics and prospecting direction for domestic and foreign manganese mine[J]. Geology and Prospecting, 18(2): 26–40(in Chinese).
- Zhou Liuxia. 2000. Mining conditions and problems about China's Mn mines and some proposals[J]. China Mining Magazine, 9(49): 51–54(in Chinese with English abstract).
- 徐洪伦, 孔繁辉, 宋晓东, 赵晋, 李建锋, 杜俊, 王聪颖. 2014. 南非 Postmasburg 锰矿田白云岩的控矿作用[J]. 沉积学报, 32(5):832–839.
- 陈毓川, 王登红, 徐志刚. 2015. 中国重要矿产和区域成矿规律[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.
- 邓文兵, 张彦文, 孔令湖, 尚磊. 2019. 中国锰矿资源现状与国家级锰矿床实物地质资料筛选[J]. 中国矿业, 28(9):175–182.
- 付勇, 徐志刚, 裴浩翔, 姜冉. 2014. 中国锰矿成矿规律初探[J]. 地质学报, 88(12): 2192–2207.
- 何辉. 2017. 锰矿资源现状与锰矿勘查研究[J]. 中国锰业, 35(1):23–24.
- 洪世琨. 2011. 我国锰矿资源开采现状与可持续发展的研究[J]. 中国锰业, 29(3):13–16.
- 胡德文, 冯丹丹. 2011. 我国锰矿产业问题分析[J]. 中国矿业, 20(6): 1–8.
- 黎贵亮. 2018. 中国锰矿山现状[J]. 中国锰业, 36(3):5–7.
- 骆华宝. 2002. 我国优质锰矿的勘查方向[J]. 地质与勘探, 38(4):8–11.
- 王剑, 段太忠, 谢渊, 汪正江, 郝明, 刘伟. 2012. 扬子地块东南缘大地构造演化及其油气地质意义[J]. 地质通报, 31(11):1739–1749.
- 谢进. 2017. 一带一路锰矿资源投资前景分析[D]. 北京:中国地质大学(北京).
- 徐仕琪, 薛春纪, 冯京, 冯昌荣. 2019. 新疆锰矿成矿规律研究[J]. 新疆地质, 37(2):201–206.
- 严旺生, 高海亮. 2009. 世界锰矿资源及锰矿业发展[J]. 中国锰业, 27(3):6–11.
- 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):1424–1436.
- 臧忠江, 隋延辉. 2019. 俄罗斯锰矿资源现状与利用情况[J]. 中国锰业, 37(4):1–7.
- 张泾生, 周光华. 2006. 我国锰矿资源及选矿进展评述[J]. 中国锰业, 24(1):1–5.
- 张九龄. 1982. 国内外锰矿主要类型地质特征及找矿方向[J]. 地质与勘探, 18(2):26–40.
- 周柳霞. 2000. 我国锰矿山的开采现状问题与建议[J]. 中国矿业, 9(49):51–54.

附中文参考文献