

doi: 10.12029/gc20180502

赵宏军, 陈秀法, 何学洲, 张新元, 张潮, 王靛靛, 陈玉明, 陈喜峰, 卢民杰, 周尚国, 黄费新, 姚春彦, 杨言辰. 2018. 全球铁矿床主要成因类型特征与重要分布区带研究[J]. 中国地质, 45(5): 890–919.

Zhao Hongjun, Chen Xiufa, He Xuezhou, Zhang Xinyuan, Zhang Chao, Wang Liangliang, Chen Yuming, Chen Xifeng, Lu Minjie, Zhou Shangguo, Huang Feixin, Yao Chunyan, Yang Yanchen. 2018. A study of genetic type characteristics and important distribution zones of global iron deposits[J]. Geology in China, 45(5): 890–919(in Chinese with English abstract).

全球铁矿床主要成因类型特征与重要分布区带研究

赵宏军¹ 陈秀法¹ 何学洲¹ 张新元¹ 张潮¹ 王靛靛¹ 陈玉明¹ 陈喜峰¹

卢民杰² 周尚国³ 黄费新³ 姚春彦⁴ 杨言辰⁵

(1. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037; 2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 3. 中国冶金地质总局矿产资源研究院, 北京 101300; 4. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016; 5. 吉林大学地球科学学院, 吉林 长春 130061)

摘要: 中国是全球铁矿石第一消费大国, 每年进口铁矿石量已超过 9 亿 t, 进口量超过全球铁矿石贸易量的 60%, 对全球铁矿主要类型特征及重要分布区带总结和潜力分析研究具有重要的理论和现实意义。本文总结了全球铁矿资源的禀赋特征, 将全球铁矿床分为 BIF 相关型、沉积型、火山成因型、岩浆型、接触交代–热液型(矽卡岩型)5 种成因类型, 重点总结分析了 BIF 相关型和火山成因型铁矿地质特征、成因和找矿标志等。根据铁矿床产出的大地构造单元、地层层序、含矿建造特征及矿床类型、成矿时代等综合因素, 在全球主要大地构造单元中共圈出 33 个铁矿分布区, 47 个铁矿重要分布区带, 并对各重要分布区带的资源潜力进行了探讨。

关键词: 全球铁矿; 成因类型; 矿床特征; 铁矿分布区带; 资源潜力

中图分类号: P617; P618.31 文献标志码: A 文章编号: 1000–3657(2018) 05–0890–30

A study of genetic type characteristics and important distribution zones of global iron deposits

ZHAO Hongjun¹, CHEN Xiufa¹, HE Xuezhou¹, ZHANG Xinyuan¹, ZHANG Chao¹,
WANG Liangliang¹, CHEN Yuming¹, CHEN Xifeng¹, LU Minjie², ZHOU Shangguo³,
HUANG Feixin³, YAO Chunyan⁴, YANG Yanchen⁵

(1. Development and Research Center of China Geological Survey, Beijing 100037, China; 2. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. Institute of Mineral Resources Research, China Metallurgical Geology Bureau, Beijing 101300, China; 4. Nanjing Center of China Geological Survey, Nanjing 210016, China; 5. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, Jilin, China)

收稿日期: 2018–03–20; 改回日期: 2018–08–15

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(121201004000150009、1212011220912、DD20160118)及国家国际科技合作专项项目(2011DFA22460)等资助。

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。

Abstract: China is the world's largest consumer of iron ore. The annual import of iron ore has exceeded 900 million tons, and its imports exceed 60% of the global iron ore trade volume. The summarization and potential analysis of global iron ore type characteristics and important distribution zones are of important theoretical and practical significance. This paper sums up the endowment characteristics of global iron ore resources. The authors divide global iron deposits into five genetic types: BIF-related, sedimentary, volcanic, magmatic, and contact-hydrothermal (skarn) deposits, with the emphasis placed on the analysis of geological characteristics of BIF-related and volcanic iron ore deposits as well as genesis and prospecting indicators. According to the comprehensive factors such as tectonic units, stratigraphic sequence, ore-bearing structure characteristics, deposit types and metallogenic ages of iron ore deposits, a total of 33 iron ore distribution areas and 47 important distribution belts of iron ore deposits are delineated in the major geotectonic units of the world. In addition, the resource potential of each important distribution belt is discussed.

Key words: global iron ore deposits; genetic type; deposit characteristics; iron ore distribution belt; resource potential

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

Fund support: Supported by China Geological Survey Project (No.121201004000150009, 1212011220912, DD20160118), International Scientific and Technological Cooperation Project (No. 2011DFA22460).

1 引言

钢铁工业是国民经济的重要基础产业,是一个国家经济发展水平、综合国力的重要标志。从1996年中国粗钢年产量突破1亿t,成为全球粗钢第一生产大国以来,中国钢铁产量快速上涨,目前年产量已超过8亿t,占全球年总产量的一半以上。作为钢铁工业原料——铁矿石的需求更是迅猛飙升,除每年消耗国内原矿铁矿石(平均含铁品位30%左右(中国产业信息,2015))超过12亿t外,每年进口铁矿石(平均含铁品位>62.5%)超过9亿t,进口量超

过全球铁矿石贸易量的60%,铁矿石来源地遍布除南极洲外的6大洲,超过25个国家(中国海关数据,2017),中国铁矿石对外依存度一直在70%左右(图1)(据中国钢铁工业协会副会长王立群在“2016冶金矿产品国际会议”讲话:2015年中国铁矿石对外依存度达到84%,2016年上半年达到85.2%)。

中国钢铁工业的健康发展已离不开铁矿石资源的全球配置,本文在收集整理前人研究的基础上,对全球铁矿床BIF相关型、火山成因型、岩浆型、接触交代-热液型(矽卡岩型)、沉积型5种成因类型地质特征、成因和找矿标志等进行了分析整理,

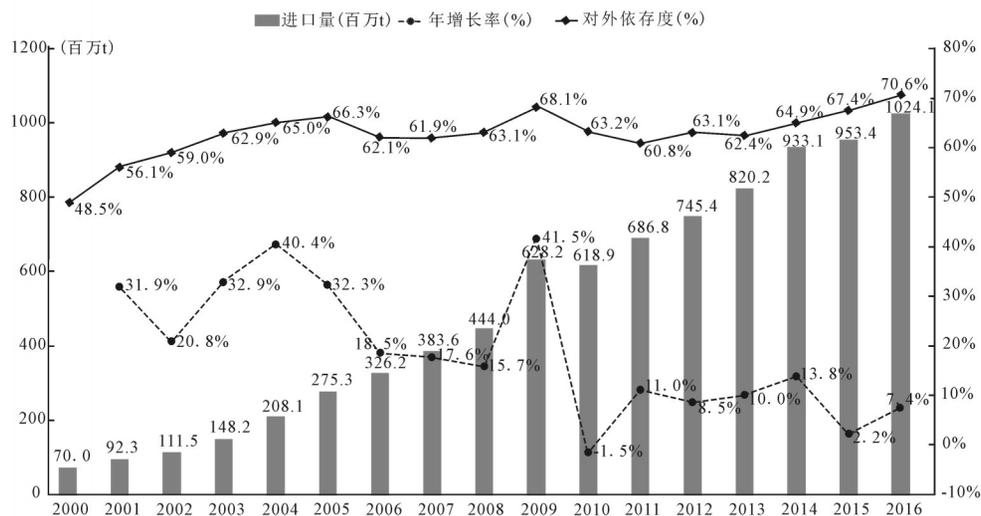


图1 2000年以来我国进口铁矿石增长率及对外依存度

Fig.1 Growth rate and foreign dependence of China's imported iron ore since 2000

并在全球圈出47个铁矿重要分布区带,对各重要分布区带的资源潜力进行了探讨,为研究铁矿的学者和中国矿业企业“走出去”勘查开发铁矿资源提供基础信息。

2 全球铁矿资源禀赋特征

2.1 全球铁矿资源丰富且分布广泛

全球七大洲都有铁矿资源发现,而且大洋中也蕴藏着丰富的铁锰结核(据估算全球大洋中铁锰结核总量在30000亿t以上,含铁约13%(费学锦等,1994)),仅陆地查明的铁矿石储量就有1900亿t(USGS,2015)。根据相关国家资料及参照SNL(提供全球矿业信息和服务的数据平台)全球铁矿统计,全球铁矿资源量达到8180亿t(表1)。

2.2 全球铁矿资源分布不均衡

从表1可以看出,全球铁矿资源分布极不均衡,位列前10位的国家依次是澳大利亚、加拿大、俄罗斯、巴西、中国、玻利维亚、几内亚、印度、乌克兰和智利,这10个国家铁矿资源量就达到6650亿t,占全球资源总量的81.3%,其中澳大利亚以1462亿t位居首位,约占全球总资源量的17.88%;加拿大以1303亿t位居第二,俄罗斯以980亿t位居第三,巴西以927亿t排名第四,而很多国家和地区铁矿资源又相对缺乏。

2.3 全球铁矿资源规模及质量差异较大

2.3.1 全球铁矿床规模差异大,以大型、超大型为主

尽管铁矿资源在全球广泛分布,资源量也巨大,但铁矿又以相对集中出现为特点,规模以大型、超大型为主(中国2002年发布的地质矿产行业标准DZ/T 02002002对铁矿床规模的规定:贫铁矿($TFe < 30\%$) > 1 亿t为大型矿,富铁矿($TFe \geq 50\%$) > 0.5 亿t为大型矿,而世界地质编图委员会(CCGM)在编制《1:500万南美洲矿产图》时,铁矿规模大型为 > 1 亿t,巨型(世界级) ≥ 10 亿t(Zappettini et al. 2005),文中所说的大型是指规模 > 1 亿t,超大型为 ≥ 10 亿t)。

表1 全球铁矿资源量统计

Table 1 Global iron ore resource statistics

国家	资源量/亿t	占比/%	资料来源
澳大利亚	1462.38	17.88	SNL
加拿大	1303.00	15.93	SNL
俄罗斯	980.00	11.98	SNL 与国家公布
巴西	927.00	11.33	SNL
中国	636.83	7.79	国家公布
玻利维亚	402.9	4.93	SNL
几内亚	308.00	3.77	SNL 与国家公布
印度	252.50	3.09	SNL 与国家公布
乌克兰	207.86	2.54	SNL
智利	169.70	2.07	SNL
塞拉利昂	158.60	1.94	SNL 与国家公布
利比里亚	151.50	1.85	SNL 与国家公布
民主刚果	150.60	1.84	SNL 与国家公布
委内瑞拉	146.57	1.79	国家公布
哈萨克斯坦	132.32	1.62	SNL
毛里坦尼亚	91.70	1.12	SNL
秘鲁	75.90	0.93	SNL
朝鲜	70.00	0.86	相关报道
美国	63.93	0.78	SNL
南非	62.0	0.76	SNL
其他国家	427.09	5.22	SNL 与国家公布
合计	8180.38		

目前全球已统计的1833个铁矿床中,大型、超大型铁矿床有348个,约占总数的19%,而大型、超大型铁矿床资源量却占到铁资源总量的79.4%,规模大于10亿t的铁矿数为137个,约占总数的7.4%,其占铁资源总量的68.8%。表2列出了澳大利亚、巴西、俄罗斯、加拿大、中国等国发现的大型、超大型铁矿床数及资源量,从中可以看出,虽然中国铁矿资源量排名位于全球前列,但大型、超大型

表2 全球及重要铁矿资源国家大型、超大型铁矿床统计

Table 2 Statistics of large and giant iron deposits in the world and important iron ore resources countries

全球铁矿		澳大利亚		巴西		俄罗斯		加拿大		中国		其他国家			
矿床 个数	资源量 /亿t	大型、超大型	大型、超大型												
		个数	资源量 /亿t	个数	资源量 /亿t										
1833	8180	348	6494	83	1196	68	919	30	375	35	1157	10	273	122	2574

铁矿床数量却不多,以中小型矿床为主,与澳大利亚、巴西、俄罗斯和加拿大等国相去甚远。

2.3.2 全球铁矿石品质差异较大,巴西、澳大利亚、南非、印度等国品质优异

全球开采的铁矿石品位差距也较大(图2),南非、印度、澳大利亚、俄罗斯等国铁矿石平均品位都在55%以上,加拿大、中国、乌克兰和美国铁矿石平均品位只有30%多,中国仅为31.3%,低于全球铁矿石平均含量(48.3%)17个百分点。

巴西、澳大利亚、南非、印度等国生产的铁矿石多为赤铁矿,不仅铁品位较高,大于55%(多为高于60%的富矿),而且矿石中有害杂质较少,可直接入高炉,矿石烧结、冶炼性能都比较好。同时,这些国家大型、超大型铁矿数量也较多,生产的铁矿石品质也比较稳定。而中国铁矿山多以中小型为主,大型、超大型矿山少,贫矿多,富矿少,而且矿石成分复杂,伴(共)生组分多,对高炉冶炼有害杂质也多(李莎, 2017)。此外,中国的铁矿石又多为含铁品位较低的磁铁矿石,需提纯烧结制球后才能入炉,生产成本相对较高。

2.4 全球铁矿类型较多且BIF相关型是最重要类型

按照铁矿成因划分的BIF相关型、火山成因型、岩浆型、接触交代-热液型和沉积型5大类中,以BIF相关型铁矿床最为重要。在全球铁矿资源中,60%~70%为BIF相关型铁矿床,而与其有关的富铁矿储量约占全球富铁矿总量的70%以上(邱瑞照等, 2012),占全球铁矿产量的90%以上(Isley, 1995)。全球铁矿资源量排名靠前的国家,也是该类型铁矿分布较多的国家。BIF相关型铁矿床的特点是规模大,以大型、超大型为主,分布相对集中,

常构成几十亿到数百亿t铁矿资源量的巨型矿床。

火山成因型的铁矿床也很重要,约占全球铁矿资源量的10%,该类型铁矿共生有铜、金、稀土等多种组分可以综合利用;岩浆型铁矿中除铁可利用外,钛、钒也是主要利用的组分,另外还伴生有磷、铬、镍、铜、铂族元素、铀等组分可综合利用;接触交代-热液型铁矿共伴生有铜、铅、锌、钨、锡、钼、钴、金等组分可以综合利用。

3 全球铁矿床成因类型及主要特征

如上所述,本文总结前人铁矿成因类型划分方案,将全球铁矿床划分为5种主要成因类型,即BIF相关型(包括苏必利尔湖型和阿尔戈马型)、沉积型(浅海相沉积型和陆相沉积型)、火山成因型(海相火山岩型和陆相火山岩型)、岩浆型(岩浆晚期分异型和岩浆晚期贯入型)、接触交代-热液型(接触交代型和热液型)。风化淋滤型铁矿床及部分残坡积铁矿床(主要是澳大利亚一些河道型及碎屑型铁矿)由于其富矿多是由BIF相关型铁矿经表生作用的风化淋滤而成,因此也归入BIF相关型铁矿,而不单独分类。红土型、残坡积铁矿床因规模较小,归入沉积型之中。

鉴于文章篇幅有限,且BIF相关型和火山成因型两种铁矿类型在全球资源总量占80%以上,而其他类型铁矿占比相对较少,因此,本文仅对BIF相关型和火山成因型铁矿进行介绍。

3.1 BIF相关型铁矿床

BIF相关型铁矿床也称为含铁硅质岩建造的沉积铁矿床、含铁石英岩型铁矿床。此种含铁建造多为条带状(banded iron formation, BIF),形成于包括南

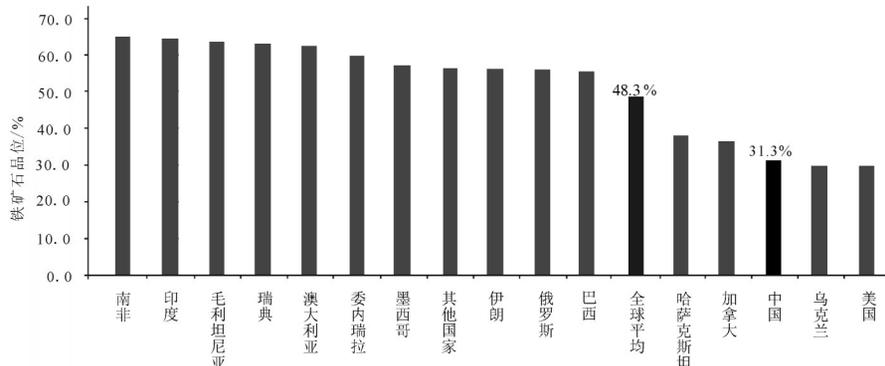


图2 全球主要铁矿石生产国家铁矿石平均品位情况(USGS, 2015; 李莎, 2017)

Fig.2 Average grade of iron ore in the world's major iron ore production countries (modified after USGS, 2015; Lisha, 2017)

美、北美、格陵兰、非洲、澳大利亚、俄罗斯、中国、印度等地的陆块内(Gross, 1980, 1983; Trendall, 2009; Bekker et al., 2010),其主要矿物组成是铁氧化物(磁铁矿和赤铁矿)和石英,硅铁呈交替的条带状出现。该建造是早期地壳的重要组成部分,是地球演化特定阶段的产物,之所以说其是地球演化特定阶段产物是因为这种条带状铁建造仅在前寒武纪的地层中广泛分布,起始于3.8 Ga,集中于2.8~1.8 Ga,在1.8 Ga之后,突然缺失,一直到0.8~0.6 Ga,因雪球事件而重现(Huston and Logan, 2004),而寒武纪之后,此种含铁建造就再也没有出现过。

条带状含铁建造(BIF)一词是 Van Hise 等(1911)在研究美国的 Superior 地区时最早提出,之后,一些地区或国家对 BIF 的称呼有所变化,如巴西称之为铁英岩,印度称之为条带状赤铁石英岩,南非称之为铁矿石,澳大利亚称为碧玉铁质岩。James (1954)第一次正式对 BIF 定义,用“条带状含铁建造”作为通称,这是一种薄层状的化学沉积物,含有15%或者更多的沉积成因的铁,可含或不含燧石层。1983年 Trendall 重新对 BIF 进行定义,剔除了对铁的最低含量(15%)的限制,换成有异常高含量的铁。

目前,普遍认为 BIF 应具备以下最基本的特点:①化学组成上,全铁含量应在15%以上,且前寒武纪条带状含铁建造普遍具有较低的 $Al_2O_3 + TiO_2$ 含量,例如南非 Pongola BIF 该值平均仅为0.32%(Alexander et al., 2008),暗示 BIF 沉积过程陆源碎屑物质加入量较少(Pecoits et al., 2009; Basta et al., 2011; Dai Yanpei et al., 2014, 2016; Lan Tingguang et al., 2014a);②矿物组成上,最主要的矿物是磁铁矿和赤铁矿,其次是细晶或隐晶状石英,少量碳酸盐和硅酸盐矿物等;③结构构造上,组成 BIF 的矿物组分大部分呈细粒状,而主要的矿物(石英和铁氧化物)在中—微观尺度上常呈铁硅交替的条带状(薄层)出现。单个薄层的厚度一般为几毫米至几厘米,偶尔可达数十厘米。富含二氧化硅的薄层条带常含有一定量的金属矿物,也可以由纯的二氧化硅组成。富含金属矿物的薄层常含相当数量的二氧化硅,也可由100%的金属矿物组成。

3.1.1 条带状铁矿床的全球分布

据统计,全球铁矿储量的60%~70%为 BIF 相关型,而与其有关的富铁矿约占全球富铁矿总量的

70%以上。BIF 相关型铁矿床主要分布在澳大利亚、巴西、俄罗斯、乌克兰、加拿大、中国、印度、美国、南非、几内亚、利比里亚、委内瑞拉、玻利维亚等国。

BIF 相关型铁矿床在全球各大洲均有分布,主要产在陆间裂谷、大陆裂谷及活动陆缘的裂陷区等(沈承珩等,1995)。如大洋洲的澳大利亚的哈默斯利铁矿区,南美洲的巴西卡拉加斯和“铁四角”铁矿区、巴西和玻利维亚交界的穆通—乌鲁库姆、委内瑞拉的玻利瓦尔铁矿区,北美洲的加拿大的拉布拉多铁矿区、美国的苏必利尔湖铁矿区,欧洲的俄罗斯库尔斯克铁矿区、乌克兰克里沃罗格铁矿区、白俄罗斯—波罗的海地盾铁矿区,亚洲的印度比哈尔邦—奥里萨邦、中央邦及卡纳塔克邦铁矿区、中国的鞍本—冀东铁矿区,非洲的南非赛申—德兰士瓦铁矿区、西非(利比里亚和几内亚)的宁巴山—西芒杜铁矿区,靠近北极的格陵兰岛伊苏亚铁矿区,南极洲的查尔王子山铁矿区等(图3)。

BIF 相关型铁矿床的特点是规模大、分布集中,常构成几十亿 t 到几百亿 t 铁矿储量的巨型矿床,是全球主要富铁矿类型;且矿石成分简单、易采易选,是目前全球铁矿石开采的最主要矿床类型。随着铁矿石的不断消耗及含铁石英岩贫矿石利用技术的提高,该类型铁矿床将是勘查和开发的重要目标,其经济价值会变得越来越重要。

国内外矿床学家对条带状含铁建造形成时代的认识,在区域地质对比和同位素测年等研究基础上不断深入,图4是 Trendall (2002) 及 Klein (2005) 绘制的全球条带状铁建造形成时代及铁丰度关系示意图,该图展示了前寒武纪条带状铁建造在时间上的分布趋势,从图中也可看出:目前发现前寒武纪条带状铁建造最早出现在3.8 Ga,是位于格陵兰岛西侧的伊苏亚(Isua)铁建造(Rosiere et al., 1996);之后从3.5~1.8 Ga连续出现,并于2.7~1.9 Ga期间最为集中(Huston and Logan, 2004),铁建造的形成达到了最高峰(就含铁量而言),其中在中太古代(3.5~3.0 Ga)主要形成的铁建造有津巴布韦、南非、乌克兰、委内瑞拉、巴西、西澳等;在新太古代(3.0~2.5 Ga)(沈承珩等,1995)形成的铁建造包括加拿大米契皮克坦地区、澳大利亚伊尔岗地块、巴西的 Novalima 和卡拉加斯、中国的鞍本及冀东地区等;而古元古代(2.5~1.9 Ga)主要形成的铁建造有美国

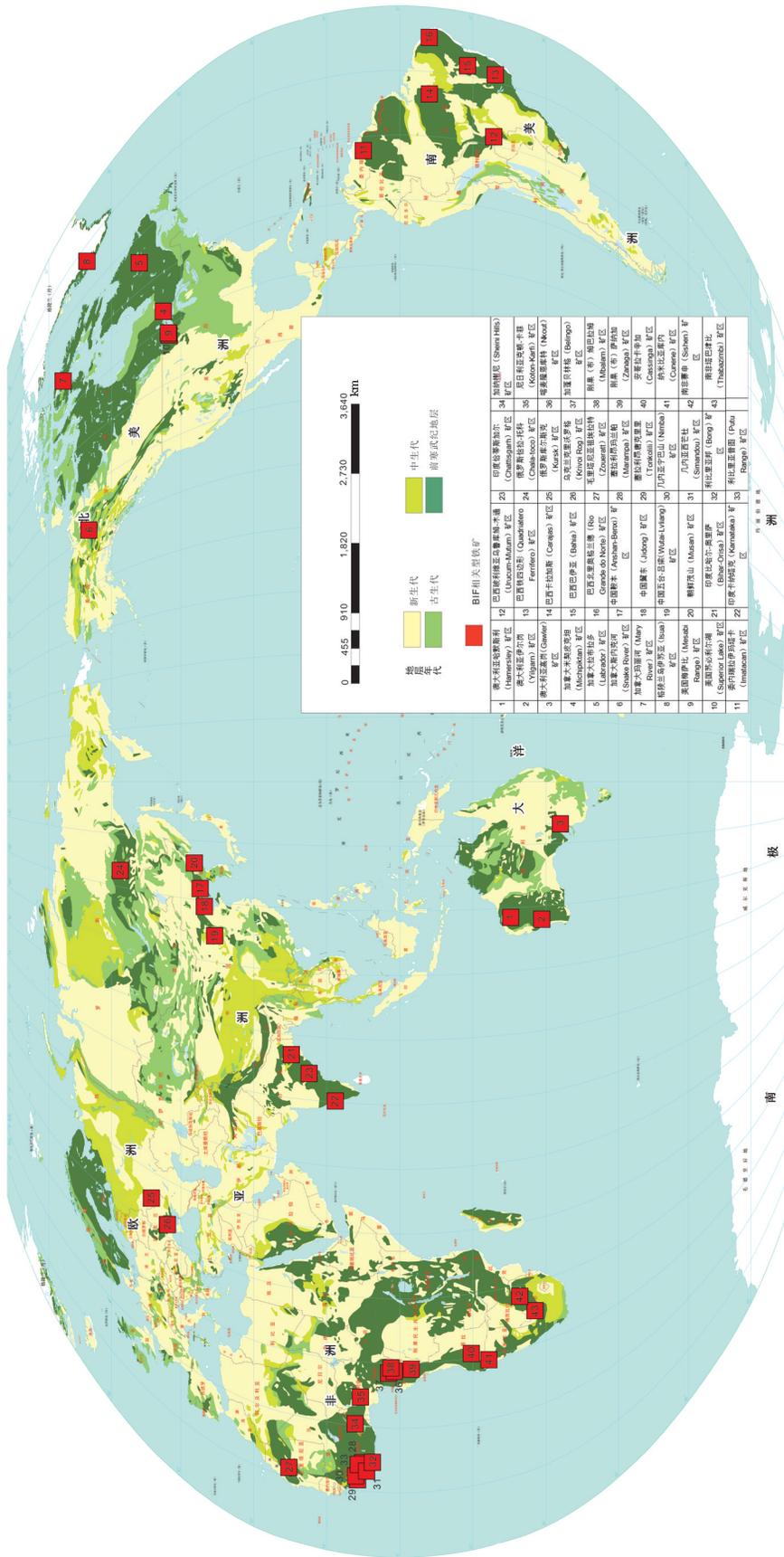


图3 BIF相关型铁矿床分布图
Fig.3 BIF-related iron deposit distribution map

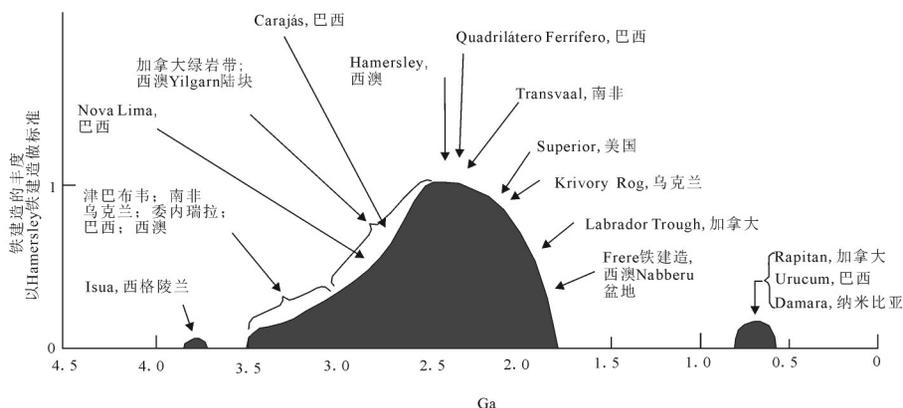


图4 铁建造的时间与发育程度(丰度)关系示意图,包括一些重要的铁建造及其产地(据 Trendall, 2002 和 Klein, 2005 修改)
Fig.4 Schematic diagram showing the relationship between the formation time of IF and its development degree (abundance), including some significant IF and major IF regions (modified after Trendall 2002 and Klein, 2005)

的苏比利尔湖地区、加拿大的拉布拉多裂陷区、乌克兰的克里沃罗格盆地区、俄罗斯的库尔斯克磁异常区、巴西的铁四角地区、澳大利亚的哈默斯利和南非的德兰士瓦等;在约 1.8 Ga 之后,近 1.0 Ga 铁建造明显缺失,一直到新元古代末期(0.8~0.6 Ga),因雪球事件而重现,形成的含铁建造有加拿大的 Rapitan、巴西和玻利维亚交界的乌鲁库姆—穆通及纳米比亚的 Damara 等铁建造,而寒武纪之后,此种含铁建造就再也没有出现过。

3.1.2 条带状含铁建造的分类

前寒武纪条带状铁建造作为地球早期特定地质历史演化阶段的产物,其沉积环境也具有特殊性。目前普遍认为形成大型条带状铁建造需要满足三个条件:①大型海底热液供给系统,是铁建造形成的物质基础;②发育宽广的大陆架,为铁建造沉积提供有利场所;③存在成层海洋,蕴含大量 Fe^{2+} 的海水能够从海底热液系统运移至沉积中心,这是铁建造形成的必要条件(铁在海水中的存在形式、运移与沉淀方式)。

Gross (1965) 根据条带状铁建造规模、岩性组合及沉积环境与火山活动的关系将其划分为苏必利尔型(Superior)和阿尔戈马型(Algoma)两种基本类型。

阿尔戈马型条带状含铁建造一般发育在太古宙古俯冲板块一侧洋壳深盆,沿火山弧、扩张脊、地堑等分布(图5),规模相对较小(也许由于保存的关系),与火山碎屑岩相伴生,并靠近浊积岩组合,与海底火山、热液活动关系密切 (James et al., 1982;

Huston et al., 2004)。常形成杂砂岩、浊积岩、厚的菱铁矿层、碳酸盐、铁硅酸盐及铁硫化物与火山岩互层,含铁建造厚度为几米到数百米,沿走向可延伸数千米。

苏必利尔型条带状含铁建造主要发育在古一中元古代活动性古克拉通边缘的陆架盆地或陆台盆地中(图5),与陆架型沉积物有关,常见有石英岩、长石砂岩、黑色页岩与细碎屑—碳酸盐岩、铁硅

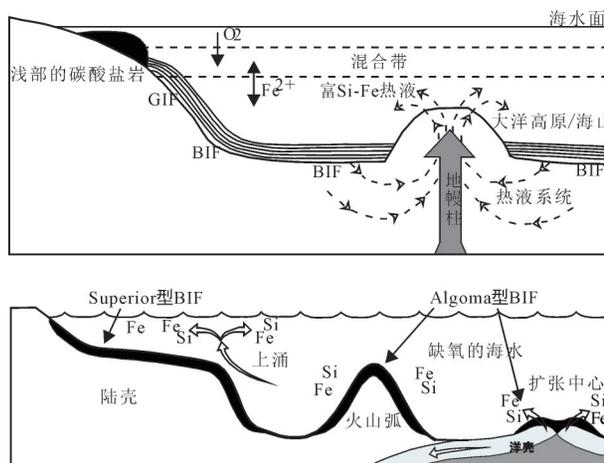


图5 BIF 沉积环境示意图(据 Wang et al., 2009 和 Bekker et al., 2010 修改)

地幔柱成因的科马提岩与海底热液相互作用析出 Si 和 Fe 交替沉淀形成了铁建造

Fig.5 Sketch map of sedimentary environment of BIF and GIF (modified after Wang et al., 2009 and Bekker et al., 2010)

The interaction between the seafloor hydrothermal fluids and komatiites generated by mantle plumes released silica and iron, which precipitated alternately to form iron formation

酸盐等铁质沉积互层,有时也含有凝灰岩和一些火山岩,这些火山物质可能是深大断裂或破裂带等热液喷发活动、火山作用的产物。该类型含铁建造岩层厚度较稳定,由数十米到数百米,有时可达上千米,延伸可达数百千米(James et al., 1982),一般在横向和纵向上的沉积规模都大于阿尔戈马型。

就全球而言,苏必利尔型铁建造的受变质沉积铁矿的规模及经济价值,比阿尔戈马型铁矿重要,但阿尔戈马型铁建造在地理分布和数量上比苏必利尔型要广泛。

苏必利尔型条带状含铁建造主要分布在美国苏必利尔湖区、加拿大魁北克—拉布拉多地块、澳大利亚西北部的哈默斯利铁矿区、印度奥里萨邦和比哈尔邦、乌克兰的克里沃罗格、俄罗斯的库尔斯克和巴西的“铁四角”地区等(沈承珩等, 1995)。

阿尔戈马型条带状含铁建造主要分布在加拿大的米契皮克坦(Michipicotan)地区、安大略省的雷德湖、布鲁斯湖等、美国的朱红(Vermilion)铁矿区、巴西的卡拉加斯铁矿区及澳大利亚的伊尔岗地块的铁矿区等(沈承珩等, 1995)。

中国辽宁鞍山—本溪及冀东地区的条带状铁建造属于阿尔戈马型,而山西吕梁地区的铁建造则属于苏必利尔型(李厚民等, 2012)。

国外地质学家从条带状铁建造的分布时代、原岩类型、沉积环境、矿石特征及变质变形特点等方面对两类铁建造地质特征对比见表3。

然而,要准确区分这两类铁建造还是比较困难的,在进行归类时,不能仅凭某一方面的特点就进行判断,必须考虑多方面因素,特别是对某些由于

变质程度较高和后期构造变形强烈的铁建造,更要从多期构造分割和叠置、原岩恢复及构造环境判别等诸多因素加以分析研究,才能做出准确判断。

3.1.3 BIF 相关型铁矿床地质特征

前寒武纪条带状铁建造这种地球演化发展阶段在特定岩石圈、水圈和大气圈条件下形成的地质体,一般来说是BIF相关型铁矿床的“矿胎”,其后期在遭受不同程度的区域变质作用后才形成铁矿床(施俊法等, 2010)。

以下简单介绍全球主要BIF相关型铁矿床(区)的地质特征(表4)。

(1) 澳大利亚哈默斯利铁矿区

位于皮尔巴拉地块南部的哈默斯利裂陷区,铁矿基本分布在哈默斯利裂陷区及其周边的哈默斯利群多层条带状铁建造中。该裂陷东西长500 km,南北宽50~200 km,面积约为7.8万 km²(图6)(姚春彦等, 2014)。这里蕴藏了近400亿t的铁矿储量,约占澳大利亚铁矿资源总量的75%,已发现的大型、超大型铁矿数十个,是世界巨型铁矿区之一。其形成时代属元古宙,铁矿主要赋存于古元古界哈默斯利群条带状硅铁建造中,含矿层厚达2559 m。近地表遭受风化淋滤作用,形成赤铁矿—针铁矿矿石,下部为原生的条带状磁铁矿矿石。

目前,哈默斯利铁矿区铁矿按照产出部位和形成方式分为3种类型(江思宏等, 2013),即一是赋存在条带状含铁建造中的层状铁矿床;二是产在古河道中的河道型铁矿床;三是主要由条带状含铁建造中的层状铁矿床受侵蚀崩塌或冲积形成的碎屑型铁矿床,规模一般较小。其中,以层状铁矿床规模

表3 两种BIF矿床地质特征对比(王长乐等, 2012)

Table 3 Comparison of geological features between two types of BIF abroad (after Wang et al., 2012)

对比项目	阿尔戈马型 (Algoma)	苏必利尔型 (Superior)
分布时代	中—新太古宙为主, 2.7~2.8 Ga为高峰期	古元古宙为主, 2.4~2.5 Ga及1.8~1.9 Ga为高峰期
含铁岩系的原岩建造类型	与超基性、基性火山岩—火山沉积岩关系紧密;铁矿主要发育于基性火山岩与酸性火山岩或火山岩与碎屑岩之间	与碎屑岩—碳酸盐岩关系紧密;铁矿主要分布于沉积碎屑岩与碳酸盐岩之间
沉积构造环境	岛弧、弧后盆地或扩张大洋中脊附近	被动大陆边缘, 大陆架浅海环境, 克拉通内部盆地
沉积相	主要为氧化物相、碳酸盐相	主要为氧化物相, 可见原生的赤铁矿相
矿石特征	主要为条带状磁铁矿, 矿石品位较低, 矿体厚度小	主要为条带状和块状赤铁矿—磁铁矿;矿石品位高, 矿体厚度大
变质变形	变质程度较深, 一般为绿片岩—角闪岩相, 变形较强, 混合岩化较弱	变质程度浅, 一般为绿片岩相, 变形弱, 混合岩化不明显
富矿情况	存在风化壳型富矿, 规模较大	存在风化壳型富矿, 规模巨大
典型地区	美国Vermilion 铁矿, 加拿大Michipicoten 铁矿等	美国—加拿大 Superior 湖地区、澳大利亚 Hamersley地区等

表4 全球重要铁矿床(区)地质特征
Table 4 Geological characteristics of important iron deposits (regions) in the world

序号	矿床(区)名称	类型	大地构造背景	地层	构造	岩浆岩	矿体特征	矿石矿物	规模/品位	参考文献
1	加拿大拉布拉多裂陷区	BIF 相关型	矿床产于北美地台, 拉布拉多裂陷区(裂谷盆地), 含铁建造为元古宙大陆棚岩群的一部分	由石英岩、白云岩、板岩、燧石角砾岩和含铁建造组成	受北美哈德森造山运动(1.82~1.77 Ga)影响, 裂陷沉积地层因受东面应力的挤压而出现一系列褶皱和断裂, 且自西向东存在不同程度的构造变形特征	裂陷带西部出露少量凝灰岩和火山岩, 地槽演化早期有辉长岩、玄武岩和超基性岩等侵入	拉布拉多裂陷区北起魁北克省东北部的昂加瓦湾的西部向朴列皮南面呈弓形延伸, 长达1600 km, 整体为北西-南东向展布的弧形岩带。条带状铁建造中圈出铁矿体多于45个, 高品位的富铁矿(大于50%)多赋存于裂陷区中南部的诺布湖群的苏克曼组, 矿体呈层状、透镜状产出, 矿体厚度不一, 从几十米到几百米, 整体为北西-南东向延伸, 长度从几百米到数千米不等, 产状与地层基本一致	赤铁矿、磁铁矿、针铁矿等	206 亿 t / 多以低品位 (TFE 33% 左右) 的磁铁矿矿床为主, 高品位 (TFE 品位 > 50%) 的赤铁矿约 2 亿 t	王永春等, 2015; 沈承珩等, 1995; 冶金部情报标准研究所, 1976
2	苏必利尔湖铁矿区	BIF 相关型	位于加拿大大陆块南缘	条带状含铁建造主要赋存在中寒武统巨厚的沉积岩系和基性到酸性的火山岩系中	地层记录显示具有稳定的陆块环境向裂陷环境的过渡和大陆边缘环境两种构造特点	火山岩不发育, 与沉积岩互层的基性到酸性的火山岩年龄为 1.95 Ga	铁矿体产于古元古代安尼米基裂陷区内的条带状含铁建造中, 主要分布在美国明尼苏达州和威斯康星州北部的戈吉比克山脉、密执安州和威斯康星州北部的戈吉比克山脉, 与密执安州的马蒙特和梅诺米尼山脉, 与其他类型铁矿形态相近, 以层状、似层状为主, 以低品位 (TFE 33% 左右) 的磁铁矿矿床为主, 富铁矿较少, 矿体产状与地层基本一致	磁铁矿、赤铁矿	162 亿 t 含铁 25%-45%	沈承珩等, 1995; 冶金部情报标准研究所, 1976
3	利比里亚西芒杜—宁巴山铁矿区	BIF 相关型	位于西非太古界马恩—莱奥地盾	主要由片岩、千枚岩、页岩、石英岩和铁英岩等组成	由铁英岩组成的山岭, 受向斜褶皱控制	火山岩不发育	从形态上看, 宁巴山铁矿呈一巨大的马蹄形, 开口朝向东北, 马蹄形东南翼山岭即为宁巴山, 全长 45 km; 西芒杜铁矿距宁巴山铁矿 100 km, 位于西芒杜山脉北段, 长 55.7 km, 呈北东向展布, 矿区延伸 115 km, 有大小矿体数十个, 单个矿体沿走向出露长 400~3250 m, 宽 100~500 m, 沿倾向延深约数百米	针铁矿、赤铁矿、假象赤铁矿等	45 亿 t 铁平均品位为 50%-65%	沈承珩等, 1995;
4	南非德兰士瓦铁矿区	BIF 相关型	位于南部非洲卡普瓦尔裂陷区	底部为河流相沉积, 由玄武岩、碎屑岩和黏土岩组成; 中部条带状含铁硅质岩; 上部为白云岩、燧石岩及含铁建造组成	主要受褶皱构造控制	火山岩不发育	由多个铁矿体组成, 铁矿体多由层状铁建造次生赤铁矿化破碎而成, 呈角砾状。富铁矿体常出现在条带状铁建造下面 70~100 m, 呈平板状, 厚度在 20~50 m 不等, 富铁矿体的形成与风化淋滤作用关系密切	赤铁矿、磁铁矿等	60 亿 t 多为高品位 (TFE 品位 > 50%) 的赤铁矿	廖航, 2015; 沈承珩等, 1995; 冶金部情报标准研究所, 1976
5	委内瑞拉伊玛塔卡铁矿成矿区带	BIF 相关型	处于委内瑞拉陆块的北西边缘	赋存在伊玛塔卡杂岩体角闪岩和麻粒岩带	受走向 NE 80° 和 NE 20° 两个向斜褶皱构造控制	角闪岩、辉长岩侵入岩发育, 且与含铁建造关系密切	铁矿体位于委内瑞拉玻利瓦尔州, 沿奥里诺科河南岸东西向展布, 含铁建造 (BIF) 赋存在伊玛塔卡杂岩体角闪岩和麻粒岩带 (古太古代) 内, 大部分露头表现为薄层、连续的纹层状矿床, 具有典型化学沉积的特征。高品位铁矿床的形成一般都经历了断层、褶皱构造及后期表生风化淋滤作用	赤铁矿、磁铁矿、针铁矿	146 亿 t / 多为高品位 (TFE 品位 > 50%) 的赤铁矿	赵宏军等, 2017; SNL 数据库; 姚春彦等, 2014

续表4

序号	矿床(区)名称	类型	大地构造背景	地层	构造	岩浆岩	矿体特征	矿矿物	规模/品位	参考文献
6	巴西米纳斯吉拉斯州“铁四角”及邻区铁成矿区带	BIF 相关型	处于弗朗西斯科陆块的南缘	铁矿体产于米纳斯吉拉斯超群,由石英岩、白云质条带状铁建造(铁英岩)和少量白云岩、页岩组成,是本地铁矿床最主要的赋矿层位	受早期泛亚马孙造山运动影响,形成NE-SW向的褶皱,之后又叠加了巴西利亚造山运动近NW-SE向的构造,形成大规模走滑、逆冲断裂及褶皱	受多期岩浆侵入作用的影响,新太古代早期岩浆以TTG岩系为特点,晚期以铁镁质—超铁镁质杂岩为特征,古元古代晚期又发育了大量的花岗岩质岩石	位于巴西东南部米纳斯吉拉斯州贝洛奥里藏特市南部,铁矿体受褶皱和断裂控制明显,总体沿北-西-南东向展布,表生风化淋滤作用对石英质铁英岩和白云质铁英岩铁质富集起决定作用,是高位铁矿床形成最重要的成矿作用	磁铁矿、赤铁矿、假象赤铁矿	586 亿 t / 多 为高位 (TFe 品位 > 50%) 的赤铁矿	赵宏军等, 2017; SNL 数据库; 郭维民等, 2013
7	巴西卡拉加斯铁成矿区带	BIF 相关型 (以苏必利尔型为主,还有阿尔戈马型)	处于中巴西西陆块东南边缘,其东邻托坎廷斯—巴西利亚褶皱带和马拉尼昂盆地,南部与奥马丽亚似花岗岩—绿岩地体相接	新太古代早期由混合花岗岩—片麻岩组成的兴谷杂岩是该区的结晶基底,新太古代晚期为火成岩—沉积岩序列的伊塔卡尤纳斯超群,有广泛的含铁建造	区内断裂构造发育,主体构造线方向为北西向,发育北东—北东东向断裂,褶皱构造比较简单,多呈向邻近陆台倒转的单向褶皱构造形式	受多期不同组分的岩浆的侵入作用影响,新太古代早期侵入岩以 TTG 岩系为特点,晚期侵入岩主要有花岗岩、长岩、云英闪长岩、超铁镁质等杂岩;古元古代侵入岩有超基性岩、碱性岩和伟晶岩,中酸性岩等	位于巴西中部帕拉州东南部,呈近南北向带状展布。铁矿床主要赋存在伊塔卡尤纳斯超群下部的帕拉群中部火山岩—火山沉积岩系中,矿体的展布受 NWW 向复向斜控制。高位铁矿体经历了风化、淋滤和去硅富集作用。矿体表面为受强烈风化淋滤(局部为冲、坡积)形成的铁角砾岩及峰窝状铁帽,矿物为赤铁矿、针铁矿等,下部为赤铁矿组成的红富矿石,多空洞,矿层厚度数十米至 200 m,再向下为由赤铁矿、石英(碧玉)毫米级互层组成,含少量磁铁矿的铁英岩层。本区还存在铁氧化物—金—铜矿床(IOCG),但并未按铁矿开发	赤铁矿、磁铁矿、假象赤铁矿	122 亿 t / 多 为高位 (TFe 品位 > 50%) 的赤铁矿	赵宏军等, 2017; SNL 数据库; 曾勇等, 2015; 姚春彦等, 2014
8	玻利维亚—巴西边界木通—乌鲁库姆成矿区带	BIF 相关型	处于中巴西西陆块西南部的巴拉圭褶皱带与 Chiquitos—Tucavaca 裂陷区结合部	铁矿主要赋存层位: 新元古代 Jacadigo 群的 Corrego das Pedras 组(粒状含铁建造)和 Banda Alta 组(条带状含铁建造)	受走向北东的向斜褶皱构造控制	火山岩不发育	位于玻利维亚的圣克鲁斯省与巴西西南马托格罗索省交界处,由含碧玉铁质岩和锰质页岩组成,厚约 300 m,含铁层为条带状氧化物相岩石,由极细粒赤铁矿的薄层与氧化硅的薄层组成	赤铁矿、磁铁矿、菱铁矿、针铁矿等,含锰	400 亿 t / 多 为高位 (TFe 品位 > 50%) 的赤铁矿	赵宏军等, 2017; SNL 数据库
9	乌克兰里沃罗格铁矿区	BIF 相关型	位于乌克兰南部,矿床产于乌克兰陆块中央狭长的复向斜褶皱带中	铁矿赋存在克里沃罗格群,岩石主要为长石石英岩、千枚岩、片岩、铁质石英岩、云母绿泥片岩及石英岩、变质砂岩、板岩夹大理石化灰岩等	受巨大的褶皱—断裂构造控制,褶皱翼部常被走向正断层或逆掩断层所切割	矿区北部被元古宙花岗岩侵入	克里沃罗格群中组共有 9 个含矿层(含铁石英岩),褶皱构造控制明显,矿体在向斜核部明显增大,富矿体多被认为是元古宙风化壳的产物,后经风化淋滤再富集而成	磁铁矿、赤铁矿、假象赤铁矿等	200 亿 t / 多 品位在 30%~45%,约有 17 亿 t 高位(TFe 品位 > 50%)的赤铁矿	冶金部情报标准研究所, 1975, 1976; 沈承珩等, 1995

续表4

序号	矿床(区)名称	类型	大地构造背景	地层	构造	岩浆岩	矿体特征	矿石矿物	规模/品位	参考文献
10	俄罗斯库尔斯克铁矿	BIF 相关型	产于俄罗斯欧洲陆块中部的沃罗涅什结晶地壳的西部,受一系列南东走向的古元古代裂谷拗陷槽控制	铁矿赋存在古元古代库尔斯克群的变质麻岩、变质细晶岩、变质砂岩、石英岩及石英云母片岩夹数百米至2~2.5 km的铁质石英岩夹云母片岩中	位于库尔斯克—沃洛涅什陆槽斜上,受东欧陆块发育时期陆块内形成的裂陷区及挤压褶皱的控制	岩浆活动主要发生在太古宙裂谷拗陷期,火山岩主要为拉斑玄武岩和橄辉岩,其次是橄辉岩质、辉石岩质的科马提岩及科马提玄武岩;最后以安山岩、英安岩结钠质流纹岩浆旋回	矿体位于库尔斯克和别尔哥罗德州,铁矿体赋存在古元古代库尔斯克群中部的含铁石英岩内,由数十个大型铁矿组成。在平面上矿床产手轴向西—东南向延伸的复向斜带内,向斜两翼陡倾(倾角为65°~85°),受北东—南西方向挤压作用影响,褶皱呈脊状、大牙状和其他形状	磁铁矿、赤铁矿、假象赤铁矿、水赤铁矿、菱铁矿和菱铁矿	260 亿 t/Fe 品位在 32%~45%,约 170 亿 t 高品位(TFe 品位 > 50%)的赤铁矿	冶金部情报研究所, 1975, 1976; 沈承珩等, 1995
11	印度比哈尔—奥里萨邦铁矿	BIF 相关型	位于印度地壳的北部,恒河以南地区的沙德波拉褶皱带	该区含铁沉积变质岩系,称为铁矿群,其中部为 305 m 厚的条带状赤铁矿石英岩,下部由片岩和凝灰岩组成,上部为云母片岩、角闪片岩及少量条带状赤铁矿石英岩组成	受北东—南西走向的褶皱带控制	火山岩不发育	由多个矿体组成,铁矿层赋存于太古宇达瓦尔系上部的铁矿层中,该层由条带状赤铁矿、磁铁矿、菱铁矿、赤铁矿、菱铁矿等,含锰 27 亿 t/含铁品位 > 60% 以上	赤铁矿、磁铁矿、菱铁矿等,含锰	冶金部情报研究所, 1975, 1976; Deb M., 2014	
12	中国鞍山铁矿	BIF 相关型	位于华北陆块北东部,大地构造位置属于中朝准地台胶辽台隆与华北断拗的交接处	岩性主要为斜长角闪岩、黑云变粒岩、片麻岩夹磁铁矿石英岩,局部夹大理岩及绿泥片岩、绢云绿泥片岩、绿泥石英片岩、千枚岩、夹巨厚层条带状磁铁矿石英岩等	区内褶皱、断裂构造发育,变形、变质作用强烈	岩浆岩较为发育,主要为太古宙深成岩—片麻岩类,元古宙花岗岩、基性侵入岩、中生代中酸性岩以及少量的碱性岩浆岩	区内矿体众多,矿体形态各异,有的平缓,延深几千米至千米以上	赤铁矿、磁铁矿	180 亿 t/Fe 含量一般在 25%~40%,平均 30% 左右	李延河等, 2014; 李厚民等, 2012, 2014; 王恩德等, 2012; 刘明军, 2013
13	澳大利亚哈默斯利铁矿	BIF 相关型	位于澳大利亚西部皮尔巴拉地壳南缘,由于陆块裂解,在其南部被大陆边缘地区形成了由巨厚的基性和酸性火山岩、沉积岩组成的盆地地层	主要岩性为: 变质玄武岩、变质沉积岩、条带状铁建造和长英质火山岩、基性、超基性岩床、角闪岩、花岗岩等	铁矿分为北、中、南 3 个近平行的方向为北西西向或近东西褶皱构造; 断裂构造在盆地边缘较强烈,而盆地内部则较弱,褶皱构造对铁质富集起重要作用	岩浆活动强烈,早期有太古宙的花岗岩侵入,主要由石英、长英质、花岗岩、二长花岗岩组成; 古元古代末期又出现一次较大规模的花岗岩体的侵入作用	铁矿层产于古元古界哈默斯利群条带状铁建造中,存在 3 种类型铁矿,一是赋存于条带状铁建造中的层状铁矿床; 二是产于古河道中的河道型铁矿床; 三是主要由条带状铁建造中的层状铁矿床受侵蚀崩塌或冲刷形成的碎屑型铁矿床,规模都较小。其中,以层状铁矿床规模最大,也是目前开采的最主要的铁矿类型,其次是河道型铁矿床	赤铁矿、针铁矿、角砾状赤铁矿、豆状褐铁矿等	400 亿 t/高品位(TFe 品位 > 50%)的赤铁矿	江思宏等, 2013; 吕立娜等, 2013; 姚春彦等, 2014; Warren et al., 2009; Webb, 2008
14	哈萨克斯坦的图尔盖铁矿	火山成因型 (海相)	位于乌拉尔和哈萨克斯坦褶皱区之间的图尔盖凹陷盆地	早石炭世火山沉积岩层,由安山玢岩、凝灰岩、凝灰角砾岩、石英岩和砂岩互层组成,次火山岩体	近南北向的深大断裂起重要的控制作用,而近东西向断裂切割矿带	主要为闪长岩和闪长斑岩,还含有斜长花岗岩和辉绿岩等岩体	铁矿产生在秋明—库斯塔奈向斜带内,铁矿床主要受近南北向区域断裂构造和火山机构控制,矿体呈层状、似层状、与围岩在走向、倾向上整合	磁铁矿、赤铁矿和含少量硫化物等	142 亿 t/平均含铁 40.6%	沈承珩等, 1995

续表4

序号	矿床(区)名称	类型	大地构造背景	地层	构造	岩浆岩	矿体特征	矿石矿物	规模/品位	参考文献
15	中国宁芜铁矿区	火山成因型(陆相)	位于扬子陆块的中生代裂陷带内	由三叠系和下、中侏罗统砂页岩、灰岩及侏罗—白垩纪的火山岩—次火山岩建造	褶皱、断裂构造发育,深大断裂对火山机构和矿体定位有明显控制作用	中生代岩浆活动强烈,中性—碱性岩类多次喷发,区内中性—中偏酸性的闪长玢岩类与铁矿“密切成矿”	矿床受火山机构中心、两组断裂交汇、岩体凹凸部位等构造控制显著,且成群、呈带状展布,蚀变带明显。矿体呈层状、似层状、脉状、筒状、筒状及浸染状等	磁铁矿、假象赤铁矿	19.5 亿 t/铁品位在 24%~43%	徐志刚, 2014; 宁芜项目组编写小组, 1978
16	秘鲁马尔科纳铁矿区	火山成因型	位于太平洋板块向南美板块俯冲带的海岸科迪勒拉带	古生代海相沉积岩(粉砂岩、灰岩、白云岩)及中生代的海陆交互沉积岩—火山碎屑岩(安山岩、凝灰岩、凝灰质杂砂岩、大理岩、页状、片状泥灰岩)建造	区内断裂构造发育,深大断裂方向与安第斯山脉走向一致,矿体主要受北东、北东东向断裂控制	岩浆活动强烈,火山岩主要为侏罗纪喷发的基性—中酸性—中酸性火山岩,岩石类型为玄武岩、玄武安山岩、英安岩、安山岩和英安斑岩	矿体赋存在古生代海相沉积岩及中生代的海陆交互沉积岩—火山碎屑岩建造中,铁矿沿断裂或层间断裂侵入,呈层状和似层状产出,与围岩整合接触。单个矿体走向延长最大可达 2000~2700 m,厚约 00~300 m,倾向延伸长度为 200~1000 m	磁铁矿为主,其次金、属硫化物,表生风化可形成赤铁矿、假象磁铁矿	22.5 亿 t/铁品位在 45%~65%	赵宏军等, 2017
17	瑞典基鲁纳铁矿区	火山成因型	位于波罗的海陆块西部诺尔兰边缘带东侧北东向的线性褶皱带中	前寒武纪不同变质程度的中、酸性而局部富钠或含钠较高的老火山岩、火山沉积岩和沉积岩地层	褶皱强烈,变质作用从绿片岩相到角闪岩相	中、酸性火山岩发育,主要有角斑岩、石英角斑岩、正长斑岩及凝灰质岩;富钠火山岩主要为长英质岩等	矿体赋存在前寒武纪角闪岩系(富钠的碱性火山岩)中,绝对年龄 1.68~2.14 Ga,矿体上盘为角斑岩,由多层熔岩、凝灰岩、集块岩互层构成,矿体下盘为正长斑岩。矿床为南北延伸的层状矿体,向东倾	磷灰石磁(赤)铁矿	35 亿 t/铁平均品位 64%	沈承珩等, 1995; 王丰翔等, 2013
18	南非布什维尔德铁矿区	岩浆型	位于南非非卡普瓦尔陆块裂陷带谷边缘	主要由镁铁—超镁铁岩、花岗岩、花斑岩组成布什维尔德杂岩体位于德兰士瓦系比勒托利亚群的火山—沉积岩系中	受深大断裂控制明显	长英质岩石(Lebowa 花岗岩套)和 Rashedo 花岗岩套)、铁铁超镁铁岩、玻安岩等杂岩	铁矿床产于布什维尔德杂岩体的西南部和东部,盆地边缘的铁质层和超铁质层侵入的层状岩序中共有 26 层磁铁矿层	磁铁矿、钒铁磁铁矿	22 亿 t/铁品位在 55.8%~57.5%	沈承珩等, 1995; 吕林素等, 2011
19	俄罗斯巴卡铁矿区	接触交代型	位于前乌拉尔边缘拗陷褶皱区	地层为元古宙沉积变质岩,主要由碳酸盐类(白云岩、灰岩、泥质灰岩等)、泥质千枚岩、片岩和砂岩等互层组成	褶皱构造发育,向西南倾斜的巴卡尔向斜是区内主要构造单元	矿体发育有花岗岩类深成岩体及辉长岩、花岗岩侵入体	铁矿体赋存在元古宙沉积变质岩系的碳酸盐类岩石中,矿体周边常存在交代白云岩带,共有 200 多个矿体,呈似层状、透镜状、脉状、脉状等。菱铁矿矿体是灰岩—白云岩在岩浆热液作用下被含铁碳酸盐交代而成	菱铁矿、褐铁矿、水赤铁矿	10.5 亿 t/铁平均品位 30.6%	沈承珩等, 1995
20	法国洛林铁矿区	沉积型	位于侏罗纪巨大向斜盆地内	中侏罗统下部的阿林砂岩及上阿林灰岩	总体为向斜盆地	火山、岩浆活动不发育	矿体赋存在砂岩和灰岩之间,共有 2 层矿体,可利用的有 4 层,每层厚 30~50 m,最厚可达 60 m,矿体呈层状,扁豆状,矿石以鲕粒状为特点,含磷较高	针铁矿、褐铁矿、菱铁矿	77 亿 t/铁平均品位 33.3%	沈承珩等, 1995

最大,也是目前开采的最主要的铁矿类型,其次是河道型铁矿床。

哈默斯利铁矿区条带状铁建造主要由石英和弱磁性的假象赤铁矿(可能由磁铁矿变化而来)组成,含少量碳酸盐矿物和黑硬绿泥石。矿石呈条带状或层纹状至薄层状,由假象赤铁矿和石英相间组成,由于构造作用而呈复杂的小挠曲,即使在风化淋滤后的赤铁矿富矿石中,亦能见到条带状构造和小褶曲。矿区矿石矿物主要为赤铁矿,赤铁矿的形态有微板状赤铁矿、假象赤铁矿和针铁矿3种类型,矿石铁品位一般在60%以上,含磷在0.04%~0.09%,为优质的高炉原料(Taylor et al., 2010)。

(2)巴西“铁四角”铁矿区

铁四角矿区位于巴西东南部米纳斯吉拉斯州贝洛奥里藏特(Belo Horizonte)市南部,面积约15000 km²。因其在平面上大致呈四边形,且赋存有丰富的高品位铁矿石,所以最早被Dorr(1969)称为“铁四角”。区内发现的铁矿床有数十个,资源量达250亿t,是巴西最大的铁矿区之一(图7)。

矿区位于南美圣弗朗西斯科陆块的南缘,受古元古代和新元古代一早古生代多次造山运动的影响,各类断裂、褶皱构造发育(Spier et al., 2007; Rosiere et al., 2008)。

“铁四角”地区铁矿均产于米纳斯吉拉斯超群中部伊塔比拉群下部的卡维组铁英岩中,根据铁英岩中矿物成分、变质程度不同又将其划分为石英铁英岩、白云质铁英岩和角闪质铁英岩3种类型(郭维民等, 2013)。石英铁英岩分布最为广泛,主要由互层的石英和赤铁矿组成,石英多由燧石重结晶而成;白云质铁英岩也呈细条带状,由互层的红—白碳酸盐岩和灰黑色赤铁矿组成,主要矿物为白云石、赤铁矿和少量石英、方解石、滑石、绿泥石等;角闪质铁英岩分布局限,露头以大量的针铁矿和假象角闪石、绿泥石为特征。

矿区铁品位>62%的铁矿石为高品位矿石,TF_e为30%~60%称为低品位矿石,高品位矿石依物理特性划分为硬矿石和软矿石。高品位硬矿石的外观特征变化较大,从块状、条带状到片状,块状矿石致密,而条带状矿石多发育孔洞,矿石呈灰色—蓝色,由赤铁矿、假象赤铁矿、假象磁铁矿和少量镜铁矿组成。硬铁矿体形态受条带状铁建造和构造控

制明显,呈不规则状产于褶皱核部,或以透镜状呈层状分布;软矿石多出于硬矿石的外围,呈残余条带状、角砾状或粉状,由高品位赤铁矿形成软的、多孔、易碎矿体,该类型矿体多由白云质铁英岩中碳酸盐矿物的风化淋滤作用形成(郭维民等, 2013; 赵宏军等, 2017)。

(3)俄罗斯库尔斯克铁矿区

位于东欧陆块中南部,沃洛涅什结晶基底地块的西部,受一系列南东走向的古元古代裂谷拗陷槽控制。面积约15万km²,包括别尔哥罗德、库尔斯克—奥尔洛夫、旧奥斯科尔和新奥斯科尔、腊祖缅铁矿区等数十个大型—超大型铁矿床(图8)。已查明铁矿石储量556亿t,铁品位为32%~62%,其中富铁矿储量390亿t,含铁品位为54%~62%(沈承珩等, 1995; 冶金部情报标准研究所, 1975)。

铁矿体赋存在古元古代库尔斯克群中部的含铁石英岩内,铁矿石分为两种,一种是铁品位为32%~38%的贫铁矿石,其中的铁是以磁铁矿和赤铁矿形式存在的;另一种是铁品位为53%~62%的富矿石,是原生铁质石英岩在遭受风化淋滤作用后残积产物,一般呈面型和线型分布,面型富矿分布广,呈层状、钟状,产在含铁石英岩的顶部,沿走向呈带状,储量规模大;线型富矿分布有限,呈陡倾层状和楔形矿体,规模较小;主要由假象赤铁矿、镜铁矿、水赤铁矿和菱铁矿组成(冶金部情报标准研究所, 1975)。

矿体受褶皱构造控制明显,NW-SE向复向斜不仅控制铁矿体的空间展布,还控制矿体的形态。而区域变形、变质作用对铁质活化、迁移和再富集起积极作用。

3.1.4 前寒武纪条带状铁建造中富铁矿床特征与成因

3.1.4.1 地质特征

(1)构造背景

条带状含铁建造形成的富铁矿床共同特点是都经受了多次地质构造事件,形成了复杂的褶皱系和断裂系,这些褶皱和断裂控制着铁矿体的分布。

巴西卡拉加斯地区为一褶皱系,轴面倾向NWW,倾角平缓到中等,褶皱系为数条与轴面近于平行的走滑断层所切割。SEE-NWW向的脆性-韧性卡拉加斯剪切带和辛津托剪切带与东西向褶皱的轴面近于平行(Cordani et al., 2000),巨型的Serra Norte

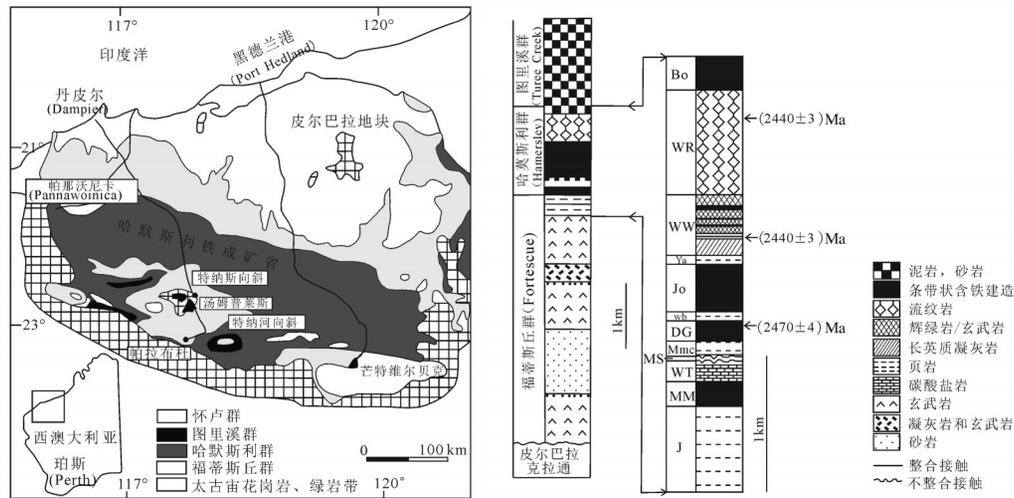


图6 澳大利亚哈默斯利盆地铁矿区地质略图(Taylor et al., 2001)及哈默斯利群地层柱状图及SHRIMP年龄(Barley et al., 1997)

Bo—布尔吉达组(Boolgeeda); WR—温佳拉组(Woongarra Rhyolite); WW—威利—沃利组(Weeli Wolli); Ya—彦地克吉纳段(Yandicoogina); Jo—乔费尔段(Joffre); Wb—维尔贝克段(Whaleback); DG—谷峡谷段(Dales Gorge); Mmc—姆克雷斯组(Mount Mcrae); MS—希尔维亚山组(Mount Sylvania); WT—威特努姆组(Wittenoom); MM—马拉曼巴组(Marra Mamba); J—纪日纳赫组(Jeerinah)

Fig.6 Sketch geological map of the major iron orebodies in the Hamersley iron province (after Taylor et al., 2001) and stratigraphic columnar section of the Hamersley iron province and available SHRIMP ages (after Barley et al., 1997)

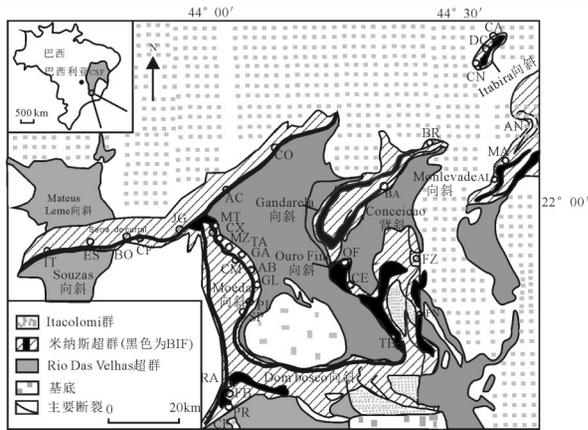


图7 巴西铁四角地区地质简图(据赵宏军等, 2017)

Fig.7 Simplified geological map of the Quadrilatero Ferrifero (after Zhao Hongjun et al., 2017)

AB—Aboboras; AC—Aguas Claras; AG—Alegria; AL—Aqua Limpa; AN—Andrade; BA—Bau; BO—Bocaina; CA—Cau; CF—Corregodo Feijao; BR—Brucutu; CM—Capitaodo Mato; CE—Capanema; CN—Conceicao; CO—Corregodo Meio; CP—Casade Pedra; CX—Capao Xavier; DC—Dois Corregos; ES—Esperanca; B—Fabrica; GL—Galinheiro; FN—Fabrica Nova; FZ—Fazendao; IT—Itatiaiuçu; JG—Jangada; MA—Morro Agudo; MT—Mutuca; MZ—Mar Azul; OF—Ouro Fino; PI—Pico; PR—Pires; RA—Retiro Das Almas; SP—Sapocado; TA—Tamandua; TB—Timbopeba

矿床就发育在延伸10 km长的背斜枢纽带中, Serra Sul矿床发育在延伸数百到上千米的一些次级褶皱中。

巴西铁四角地区的区域构造是两个变形事件叠加的结果(郭维民等, 2013; 赵宏军等, 2017), 第一个事件是泛亚马逊造山作用, 使区域发生褶皱和片麻岩穹丘上升; 第二次事件是巴西利亚造山作用, 形成西延的逆冲断层带。全区分为两个构造域, 一个是东部高应变域, 具有宽阔的剪切带和区域逆冲, 西部为低应变域, 为一大向斜。致密块状或条带状矿石受泛亚马逊造山作用期间发育的褶皱和断层控制, 而产在剪切带中的片状矿石受穿切早期构造的构造所控制。

在西澳大利亚哈默斯利地区, 经历了4次褶皱事件和3次张性事件, 其中有3次为重要的褶皱事件(施俊法等, 2010), 形成一系列褶皱带和断层系。高品位的赤铁矿矿化保存在地堑构造中, 同时还存在有向SW和NEE倾斜的两组断层, 矿化优先沿NEE倾斜的正断层产出。

(2) 围岩蚀变和交代作用

近年来的研究表明, 条带状铁建造中的高品位赤铁矿矿床普遍发生了强烈的交代、淋滤作用, 原始的燧石和碳酸盐岩条带在深成热液或盆地热卤水

作用下为赤铁矿和针铁矿所交代,或富含磁铁矿的条带被氧化成假象赤铁矿和(或)被次生赤铁矿所取代(施俊法等, 2010)。这种交代、淋滤作用使矿石中铁品位大大提高,形成了高品位富矿石。交代、淋滤过程中,围岩也发生了蚀变,出现了绿泥石化、滑石化、赤铁矿化。

在澳大利亚哈默斯利矿区,侵入的粒玄岩岩墙和高品位赤铁矿矿石附近是页岩出现了强烈绿泥

石-赤铁矿-滑石蚀变。交代作用和控矿构造相伴随,蚀变岩石中Mg、Fe含量增高, Si、Ca、Na、K亏损(施俊法等, 2010)。最强烈的铁富集和(或)硅亏损出现在矿石中或靠近矿石的岩墙里,而镁富集及Ca、Na、K亏损不仅出现在矿石中,而且向外延伸至少200 m。

在巴西卡拉加斯N4E矿床,铁矿石下面的镁铁质火山岩为交代蚀变(绿泥石-碳酸盐-赤铁矿)所

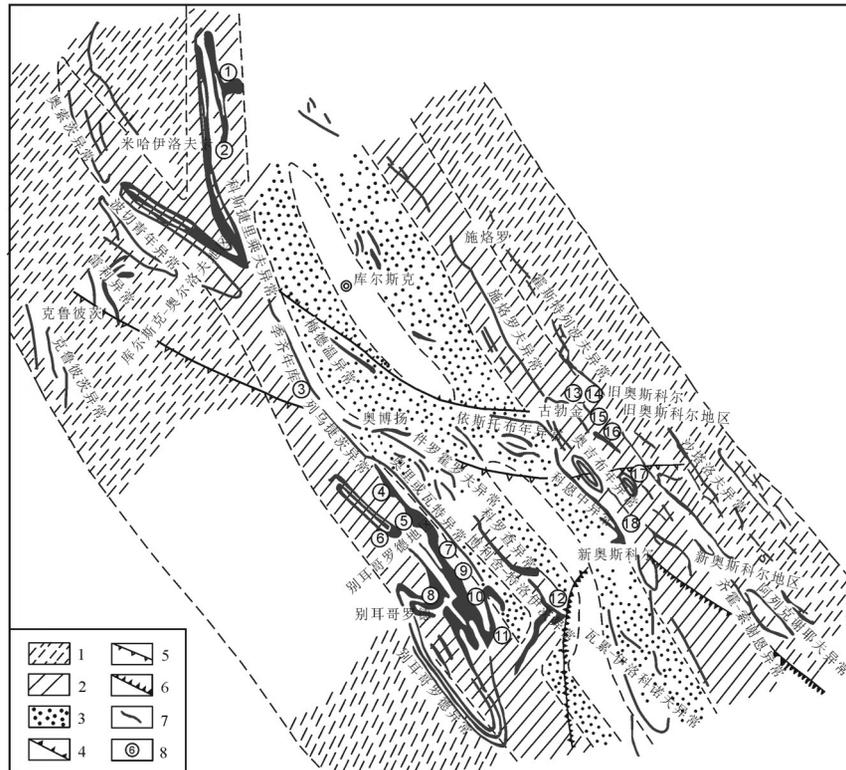


图8 库尔斯克磁异常区的磁异常和含铁石英岩系的岩相分带示意图(冶金部情报标准研究所, 1975)

1—含铁岩系的外尖灭亚带,由含铁石英岩和千枚岩互层组成(西部亚带在西南异常带内,东部亚带在东北异常带内),含铁石英岩主要由硅酸盐和磁铁矿组成,主要发育宽条带状构造,局部发育有薄条带状的铁云母—磁铁矿;2—中央亚带,其内产有两个很厚的含铁石英岩段,两者间为千枚状的片岩所隔开。含铁石英岩主要为赤铁矿和磁铁矿,具薄条带状构造;3—含铁岩系的内尖灭亚带,位于库尔斯克—科罗查复背斜的两翼附近。尖灭带内的含铁石英岩常呈微条带状和块状;4—泥盆纪地层分布的南界;5—维宪期地层分布的北界;6—多内昔期地层分布的界线;7—磁异常;8—富铁矿床。西南异常带:①—新雅尔廷矿床;②—米哈伊洛夫矿床;③—季齐年矿床;④—奥里霍瓦特矿床;⑤—马利诺夫矿床;⑥—雅克普列夫矿床;⑦—捷捷列温矿床;⑧—戈斯提舍夫矿床;⑨—别尔哥罗德矿床;⑩—霍赫洛沃—伊古缅矿床;⑪—梅里霍沃—舍别金矿床;⑫—博利舍特罗伊茨矿床;东北异常带:⑬—科罗布科夫矿床;⑭—列别丁矿床;⑮—斯托伊连矿床;⑯—萨尔提科夫矿床;⑰—波格罗梅茨矿床;⑱—切尔年矿床

Fig.8 Schematic map of magnetic anomalies in the Kursk magnetic anomaly zone and lithofacies zoning of the iron-bearing quartzite series (after Institute of Information Standards, Ministry of Metallurgy, 1975)

1—Outer tipping out of sub-belt of the iron-bearing rock series, composed of interbedded layers of iron-bearing quartzite and phyllite; 2—Central sub-band, which contains two very thick iron-bearing quartzite segments separated by thousands of schists; 3—Inner tipping of sub-belt of iron-bearing rock series, located near the two wings of the Kursk—Krocha complex anticline; 4—The southern boundary of the Devonian stratigraphic distribution; 5—The northern boundary of the stratigraphic distribution of the Victorian period; 6—The boundary of the stratigraphic distribution of the Done period; 7—Magnetic anomaly; 8—Rich iron deposit. Southwest Anomaly Belt: ①—New Yaltin deposit; ②—Mikhailov deposit; ③—Jiqinian deposit; ④—Orihowate deposit; ⑤—Malinov deposit; ⑥—Jacqueslev deposit; ⑦—Jiejie Liewen deposit; ⑧—Gostisev deposit; ⑨—Belgorod deposit; ⑩—Hochlovo—Igoumen deposit; ⑪—Merihuwo—Shebe gold deposit; ⑫—Bolischerotitz deposit; Northeast Anomaly Belt: ⑬—Korobkov deposit; ⑭—Lebidin deposit; ⑮—Stojlian deposit; ⑯—Saltikov deposit; ⑰—Pogremetz deposit; ⑱—Chelian deposit

改造,最初的火成矿物组合全部消失,从下往上由未蚀变岩石过渡为蚀变岩石,镁和铁逐渐增加,硅和钙减少,这种变化与绿泥石化和变形越来越强烈有关(姚春彦等, 2012)。矿床中的镁铁质岩墙也显示有类似蚀变,绿泥石化强烈(绿泥石占体积的90%),在与铁矿石的接触带上伴随有Mg-Fe的交代作用。

(3) 矿石类型

条带状铁建造富铁矿床的矿石主要有两类,一类是含铁56%~63%的假象赤铁矿-针铁矿石,这类矿石通常被认为是条带状铁建造表生淋滤和交代的产物,其特点是有大量含水铁氧化物、针铁矿含量(>50%)超过假象赤铁矿,并且具有保存较好的原生铁建造的层理,这类矿石主要出现在西澳大利亚,巴西卡拉加斯和铁四角地区,形成厚度不大(<30 m)的针铁矿-假象赤铁矿“硬帽”和针铁矿“铁角砾岩”(江思宏, 2013; 郭维民等, 2013; 姚春彦等, 2012)。另一类是含铁60%~68%的高品位赤铁矿石,它又可分为两个亚类,一亚类是赤铁矿矿石,另一亚类是微板状赤铁矿矿石。

赤铁矿石由残余的假象赤铁矿和(或)赤铁矿组成,它是由于铁建造中脉石矿物被淋滤,铁质矿物残留富集而形成。通常赤铁矿石中所含针铁矿不多(<15%),主要分布在巴西和南非。巴西铁四角矿区为脆性赤铁矿石,而南非锡兴矿区为硬块状赤铁矿石和纹层状赤铁矿石。

微板状赤铁矿石被认为是交代作用形成的(江思宏等, 2013),其特点是普遍存在有微板状赤铁矿,矿石硬度和空隙度多变,有时还含有假象赤铁矿,这类矿石分布广泛,如西澳大利亚哈默斯利、巴西卡拉加斯矿区及印度、南非矿区都产出这类矿石。

(4) 富铁矿矿体形态及其与铁建造关系

条带状含铁建造中的富铁矿床矿体形态多样,除层状、似层状外,还有透镜状、柱状和筒状。富矿石与铁建造的关系,既有过渡的,也有突变的,甚至还有超出铁建造范围的(施俊法等, 2010)。

巴西卡拉加斯矿区N4E矿床位于地表以下数百米,硬质赤铁矿和软质赤铁矿向下渐变为富含碳酸盐岩的铁建造。

西澳大利亚哈默斯利矿区的Mt Tom Price矿床,平均含Fe 65%的富铁矿石产于矿床最深部位,

其与条带状铁建造呈突变接触。

南非德巴齐姆比矿区,高品位的赤铁矿床都产生在铁建造底部,甚至还延伸到铁建造下数百米。

3.1.4.2 矿床成因和找矿标志

1) 矿床成因

由于众所周知的原因,国内外学者对前寒武纪条带状铁建造中富铁矿的成因问题的探讨一直争论不休,但由于该类型富铁矿的形成条件复杂,加之区域的局限性,至今尚未得出统一的认识。

该类型的富矿体在空间上与前寒武纪条带状铁建造的含铁石英岩关系密切。富矿的成矿作用主要表现在硅质从石英岩中被淋滤出来,铁质富集成含铁>55%的矿石。就铁的储量和矿化规模来说,该类矿床是其他类型矿床所无法比拟的。就这类富矿的形成,有以下几种假说,即“原生沉积说”、“变质热液说”和“风化淋滤说”等,现简述之。

(1)“原生沉积说”(King, 1989)认为:前寒武纪海洋中大量铁质的化学沉积可以形成大型富铁矿,铁质来源可能是陆源,也可能与海底火山活动有关。原生沉积的富铁矿的形成条件与一般铁建造中的沉积铁矿相似,其区别就在于有更丰富的铁质来源和更有利的沉积环境,铁质的来源主要取决于其所处的大地构造环境。原生沉积的富铁矿均产于铁建造中,与沉积层互层产出,多呈似层状、透镜状,在垂向上与沉积岩互层,并具有沉积旋回特点,原生沉积的富矿常保留有典型的纹层状构造,原生贫矿经后期的变形变质改造也可形成高品位、低杂质的优质富铁矿。

(2)“变质热液说”(Tyler et al., 1990; Powell et al., 1999; Dorr, 1969)认为富铁矿石是原生含铁建造经后期热液(变质)或受热的渗流水改造而形成的,富矿从赋存的部位和矿体形态特征上,多产在铁建造中,并与含铁建造具有相同的褶皱变形构造,其形态为似层状、板状或脉状。富矿与贫矿常常是直接接触,无明显分带特征。矿物多为赤铁矿和磁铁矿,矿石呈致密块状,多为高品位矿石,铁含量多>60%,成分均一稳定,杂质少。这类富铁矿在乌克兰的克里沃罗格、加拿大的苏必利尔湖及印度的辛格布姆铁矿区均有产出。

(3)“风化淋滤说”(Kneeshaw, 1975; Morris, 1985; Rosiere et al., 2004; Spier et al., 2007, 2008)认为

一些富矿是前寒武纪含铁建造在地质演化过程中遭受到表生氧化和风化淋滤作用而形成的。在风化作用下,脉石组部分(或全部)溶解和带走,金属矿物部分或全部转变成针铁矿或赤铁矿,伴随淋滤作用,下渗的地表水溶解并带走二氧化硅,使铁残留富集而成。受这种表生风化和淋滤作用形成的矿石即风化淋滤型富铁矿石,也称为风化壳型富铁矿石。

风化淋滤观点认为大型富矿的形成与以下几个因素有关(冶金部情报标准研究所,1976):①存在长期下渗的地表水;②需要有厚大的含铁建造;③铁的矿物相为氧化物相,含铁量中等;④铁建造变质程度浅(不超过绿片岩相);⑤存在一个持续上升的有利于准平原化的稳定地貌条件。二氧化硅在水中被淋滤的程度与其结晶粒度、溶液温度、淋滤持续时间及水的含盐度有关,一般来说,二氧化硅结晶粒度越细、淋滤时间越长、水溶液温度越高、碱度越大,二氧化硅越容易被淋滤。

风化淋滤型富铁矿一般产在含铁建造的顶部,形成厚度较大,具有起伏不平底板的平稳矿层称面型风化,如库尔斯克磁异常区的富铁矿床等;由于构造控制,产于含铁建造深部断裂带或在褶皱带内部形成脉状或透镜状的富矿体,称为线型风化。风化淋滤型富矿在垂向上有明显的分带特点,一般顶部为壳型矿石带,由针铁矿、褐铁矿组成;向下为疏松多孔状、粉末状矿石带,为主要富铁矿层位;再向下为假象赤铁矿石英岩带;最后过渡到未被风化的含铁石英岩带^①。由于风化淋滤型富铁矿受表生淋滤的程度不同,含铁的品位变化也较大,与风化淋滤程度呈正相关关系(施俊法等,2010)。

风化淋滤型富铁矿在全球分布很广,是目前富铁矿石的主要来源,并多为大型或超大型矿床(区),如巴西的“铁四角”、卡拉加斯,澳大利亚的哈默斯利,乌克兰的克里沃罗格,南非的锡兴、德巴齐姆比及印度的贝拉迪拉等地区的铁矿床,矿石均为赤铁矿,铁品位均大于60%。

中国BIF相关型富铁矿床成因与国外有很大不同,如辽宁鞍山的弓长岭富铁矿1.6亿t,为磁铁矿富矿,最大富矿体长2840 m,厚1~30 m,延伸>600 m(李曙光,1982)。目前普遍认为鞍本地区富铁矿是贫铁矿经变质和热液作用改造“去硅富铁”而形

成(李厚民等,2012,2014;王恩德等,2012;刘明军,2013)。而李延河等(2014)通过对鞍本矿区Fe、Si、O、S同位素的分析,认为富铁矿的形成是偏酸性弱还原的热热水溶液与BIF贫铁矿等围岩反应,使磁铁矿等含铁物质溶解,Fe、Si进入溶液,Fe主要以 Fe^{2+} 溶解态被迁移,当温度降低、氧逸度升高或与大气降水混合,铁质与硅质先后沉淀,造成硅铁分离,形成富铁矿。

2)找矿标志

从区域地质、局部地质及找矿方法上总结全球BIF相关型富铁矿床的找矿标志如下:

(1)区域地质找矿标志

前寒武纪条带状铁建造是形成高品位赤铁矿矿床的母体,巨厚的铁建造对形成富铁矿床最为有利。高品位富铁矿床多数与元古宙1.8~2.6 Ga,特别是1.9~2.1 Ga期间形成的铁建造有关(Huston and Logan,2004)。

大而富的赤铁矿矿体几乎都产在绿泥石化相和黑云母变质相的弱变质铁建造中,变质程度越高对富矿越不利,在角闪岩相、辉石岩相和麻粒岩相的铁建造几乎没有具工业价值的富铁矿。

高品位富铁矿床多产在复向斜或向斜的轴部,特别是由于褶皱挤压使含铁岩层变厚的地方,少数产在背斜褶皱的转折末端。

高品位铁矿床只产在后期地质事件(变质作用、深成热液作用、表生作用)将铁矿石品位提高的地段。

(2)局部地质找矿标志

①在铁建造的褶皱中存在低角度产状正断层、深部断裂、破碎带和其他作为热液流体通道的有利构造部位及渗透性增高的褶皱枢纽,对富矿体的形成具有重要意义。

②富铁矿常产在铁建造底部与黑色页岩的接触带上。

③不透水的页岩和粒玄岩的存在有利于形成富矿体。

④高品位赤铁矿矿床的围岩蚀变有绿泥石化、赤铁矿化、碳酸盐化和滑石化,这些蚀变主要出现在靠近矿化的粒玄岩岩墙和页岩中。

⑤条带状铁建造中含大量粗粒磁铁矿和赤铁矿,在表生作用下可形成假象赤铁矿-针铁矿矿石,

而富铁矿床中的高品位赤铁矿石主要是假象赤铁矿-赤铁矿石和微板状赤铁矿-假象赤铁矿。

⑥矿床产在现代地形或古地形不整合面上或附近,在近代强烈风化作用下,在假象赤铁矿-针铁矿矿石顶部形成一个玻璃状的针铁矿硬帽。

(3)地球物理找矿标志

富矿地段上的磁场强度往往显著降低,在富矿厚度较大地段磁场强度很低,在某些地段几乎接近背景值。但富矿地段的剩磁和感磁的比值却比贫矿地段大。

富矿地段有明显的重力异常,矿化带内含铁岩石剩余密度普遍增高可作为富矿重要普查标志。

关于前寒武纪铁建造中的富铁矿床,在国外分布较广,是目前全球富铁矿石的主要来源,但在中国的地台区,由于前寒武纪古地形起伏和构造变动较大,缺乏长期稳定的地质环境,古气候干燥、寒冷,基底变质岩系变质程度深及石英颗粒粗不易被淋滤等原因,很难形成象国外那种有工业价值的大型风化淋滤型富铁矿床。

3.2 火山成因型铁矿床

该类型铁矿床是指成矿物质全部或部分来源于火山作用,与火山岩、次火山岩有成因联系的铁矿床,包括火山喷发溢流、侵入及与之有关的火山期后气液活动过程中所形成的矿床^①。

据不完全统计,全球火山成因型铁矿储量有250亿t以上,约占铁矿总储量的10%,是除BIF相关型铁矿以外,该类型铁矿所占比例最大,居第二位,富铁矿的储量约150亿t,约占富铁储量的10%(沈承珩等,1995)。

3.2.1 火山成因型铁矿床的分类

关于火山成因型铁矿床的划分,目前全球尚未形成统一认识。中国学者更多是根据该类铁矿床形成的大地构造环境、成矿作用等因素将其分为海相火山成因型和陆相火山成因型两类(李厚民等,2012)。

(1)海相火山成因型铁矿

该类铁矿床多分布于元古宙到古生代或更新世地槽褶皱带内,形成于强烈的沉降或迅速隆升期(沈承珩等,1995),根据不同的成矿作用分为海底火山型(如瑞典的基鲁纳、加拿大的海伦菱铁矿等)、火山沉积型(如俄罗斯的阿尔泰、萨彦岭、塔什克桑等地区的铁矿,阿富汗的塔吉加克铁矿及我国

内蒙的谢尔塔拉铁矿和广东丰顺八乡铁矿等)、火山沉积-次火山岩型(如哈萨克斯坦的图尔盖地区铁矿床及我国新疆西天山阿吾拉勒铁矿区、云南大红山一些铁矿床)和海底喷溢熔浆型(如伊朗中部的一些磁铁矿床等)四个亚类,这四亚类海相火山成因型铁矿床的成矿作用是相互联系的,有时在一个矿床内可兼有两种或多种火山成矿作用,有时在一地区找到一种类型的铁矿床,在其相邻地区可找到另一种类型的铁矿床^①。

(2)陆相火山成因型铁矿

该类铁矿床主要是由陆相火山-侵入作用形成的各种矿床,以与次火山岩或火山岩筒有关的成矿作用为主^①,按其成因分为次火山岩型(如美国西部内达华式铁矿、智利北部一些铁矿床及中国宁芜玢岩铁矿)、喷溢矿浆型(如智利的埃尔拉科铁矿)、爆发岩筒型(如俄罗斯的安加拉-伊利姆地区的爆发角砾岩筒铁矿床及中国宁芜地区的凹山和梅山铁矿床中也有部分角砾状铁矿石)、火山热液(矿浆)型(如墨西哥的塞罗梅卡多铁矿等)和火山沉积型(如美国密苏里州的比洛特岗铁矿)5个亚类(沈承珩等,1995)。

3.2.2 火山成因型铁矿床的分布

火山成因铁矿床在全球的分布比较广泛,且一般规模较大,富矿较多,常成群成带出现,形成范围较大的铁成矿带(区)。如中国东部的宁芜玢岩铁矿区,分布在火山岩-次火山岩建造区,在岩体内部、顶部及周围火山岩接触带、火山碎屑岩中产有“陶村式”、“凹山式”、“梅山式”、“姑山式”、“龙旗山式”等铁矿,构成一个巨型火山岩型铁矿矿集区(徐志刚,2014;宁芜研究项目编写小组,1978);还有南北美洲太平洋海岸科迪勒拉带的秘鲁中南部-智利中北部安第斯海岸铁矿带及墨西哥太平洋海岸铁矿带,均为中生代以来的巨型火山成因型铁矿带(区)(赵宏军等,2017)。

火山成因型铁矿床在全球的分布具有不均匀性,主要分布在中亚、西亚及南北美洲太平洋海岸带^①,以哈萨克斯坦的图尔盖地区铁矿床及阿塔苏铁锰矿床、俄罗斯阿尔泰和萨彦岭地区的磁铁矿床和赤铁矿床及位于安加拉-伊利姆地区产于爆发角砾岩筒中的磁铁矿床、阿富汗哈吉加克地区的磁铁矿和赤铁矿床、伊朗的乔加卡特磁铁矿床、

瑞典北部产于基鲁纳地区的形成于前寒武纪的磷灰石-磁铁矿矿床、东南欧泥盆纪的菱铁矿矿床、加拿大海伦前寒武纪菱铁矿矿床、秘鲁中南部—智利中北部产于古生代海相沉积岩及中生代的海陆交互沉积岩-火山碎屑岩系列中的磁铁矿床、墨西哥的佩纳科罗拉达磁铁矿床等最具代表性。中国该类铁矿床分布也较广泛,最主要的有长江中下游宁芜地区的玢岩铁矿、新疆准噶尔盆地西南缘的西天山阿吾拉勒铁矿带及西南地区大红山、惠民等海相火山成因型铁矿等(图9)。

从大地构造背景看,火山成因型铁矿床一般产于(古)大陆板块和(古)大洋板块的结合部位。

3.2.3 火山成因型铁矿床地质特征

(1) 构造背景(表4)

从大地构造背景看,火山成因型铁矿床一般产于(古)大陆板块和(古)大洋板块的结合带或陆间裂陷带发育的部位,陆间裂谷-岛弧带、褶皱带(系)或褶皱带(系)间的山间盆地,或继承式、上叠式火山盆地等部位(沈承珩等,1995)。如萨彦岭成矿区位于加里东褶皱带,图尔盖铁矿产在主造山期后的继承式盆地内,阿尔泰和中哈萨克斯坦铁矿产在上叠式盆地中,中国宁芜地区的玢岩型铁矿位于环太平洋外带,属扬子陆块下扬子台坳沿江拱断褶带的NE端,产于中生代陆相火山岩断陷盆地中;新疆西天山阿吾拉勒铁矿带产于准噶尔盆地西南缘、伊犁地块东北部石炭纪陆缘活动带的中基性火山熔岩、火山碎屑岩和次火山岩中(张作衡,2012; Zhang et al., 2015; Zhang et al., 2014; Zhang, 2014)。另外,(深)大断裂常控制着主构造单元的边界,并在控矿方面起着重要作用,如位于乌拉尔和哈萨克斯坦褶皱区之间的图尔盖凹陷,古生代褶皱基底受近NS向的托尔波尔、里瓦诺夫、中图尔盖、塞瓦斯托波尔等深大断裂的控制,绝大部分铁矿床就产在瓦列里雅诺夫复向斜的早石炭世火山沉积岩层中,南北美洲太平洋海岸科迪勒拉带的秘鲁中南部—智利中北部安第斯海岸铁矿带及墨西哥太平洋海岸铁矿带,受太平洋板块俯冲作用的影响,铁矿床主要产于海岸带古生代海相沉积岩及中生代的海陆交互沉积岩-火山碎屑岩系列中,受与海岸带平行的断裂构造控制明显(赵宏军,2017)。

火山成因型铁矿床一般分布于断裂交汇处的

火山喷发中心或火山-侵入活动中心及其附近的火山-沉积地层或火山-侵入岩(次火山)中(沈承珩等,1995),如哈萨克斯坦的图尔盖铁矿和俄罗斯的阿尔泰铁矿等都产于火山盆地内。这种火山-沉积岩系,既具有较好的岩浆分异特征,铁矿层往往产于不同岩性火山岩层的界面或换层部位,由基性向酸性过渡的火山岩系对铁矿的形成有利,而成分单一的火山岩系则对成矿不利;还具有线性带状分布的特征,反映地壳演化、岩浆活动受控于板块机制和裂谷作用。

(2) 矿床地质(表4)

① 容矿岩石

火山成因铁矿床的容矿岩石多以海相火山岩为主的火山沉积岩建造,与成矿有关的火山岩主要为中基性与中酸性或偏碱性的岩石,少部分为酸性岩石,以偏碱富钠为特征。含矿建造一般为火山-碳酸盐岩建造、硅质页岩建造、长英变粒岩建造、碧玉铁质岩建造等,以火山-碳酸盐建造最为常见,如俄罗斯的阿尔泰、萨彦岭地区铁矿,哈萨克斯坦的图尔盖铁矿及德国的莱茵页岩山铁矿均赋存在该类建造中。

② 矿床(体)形态与特征

火山成因铁矿床形成于地槽发育早期裂谷作用阶段,强烈的火山喷发、喷气活动将有用组分搬运到对成矿有利的海底盆地沉积成矿。成矿物质与火山-侵入活动直接有关,且大多以明显而广泛的蚀变为特征,成矿作用多发生在火山喷发的间歇期,而火山喷发的多期次性使该类矿床具有多层次特征。

铁矿床与火山机构关系密切,爆发角砾岩筒型铁矿则明显受次火山爆发角砾岩筒的控制,中国宁芜玢岩铁矿在火山机构的不同部位及其附近形成一系列配套展布的铁矿床。

火山-沉积(次火山)作用形成的铁矿床主要分布在火山喷发中心或附近,矿床规模常与火山岩系的厚度成正比,岩系厚度越大,铁矿规模也大。如瑞典基鲁纳铁矿有近2000 m厚的火山岩,主矿体平均厚度为90 m;哈萨克斯坦的图尔盖火山盆地区,其中部矿带的火山岩系厚度一般在1000 m以上,铁矿床的规模也较大,铁矿储量约占整个盆地区铁矿总量的95%,而东西矿带的火山岩系厚度小,分布

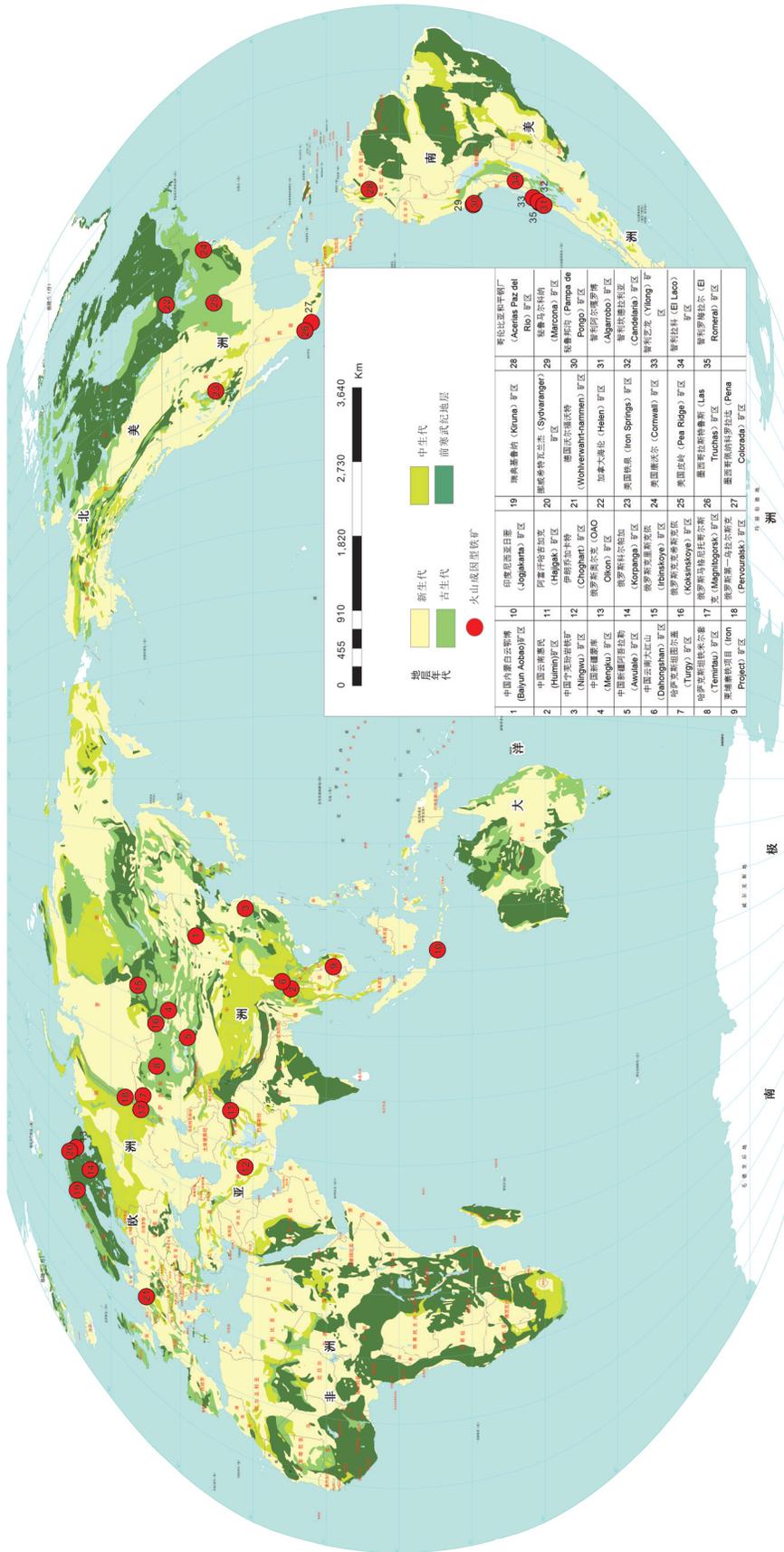


图9 火山成因铁矿床分布图
Fig.9 Distribution of volcanic iron deposits

有限,铁储量仅占2%。矿床主要出现在喷发熔岩、火山碎屑岩、次火山岩或次火山岩与围岩的接触带及其附近,且火山喷发的多期性会造成铁矿的多层性,如俄罗斯阿尔泰地区的铁矿层产于下伏的角斑岩、石英角斑岩与上覆石英斑岩之间的浅海相凝灰岩、碳酸盐岩层中;哈萨克斯坦的图尔盖铁矿产于上下玢岩之间的凝灰岩和沉凝灰岩层位中;俄罗斯的萨彦岭康多姆矿带含铁层位于底层安山玢岩等熔岩与上部安山玄武玢岩之间的沉凝灰岩碳酸盐岩层中(沈承珩等,1995)。

矿体层控特征明显,以层状、似层状为主,厚度由数米至数百米不等,延伸由几百米到数千米,含矿层位一般由下而上显示出还原-氧化环境条件的变化。矿层与围岩一般呈整合接触,也有矿层局部与底板呈不整合接触。

③蚀变与矿化分带特征

蚀变特征随铁矿床类型不同而有所不同。次火山岩型铁矿床的典型蚀变矿物组合为方柱石-钠长石-磷灰石-透辉石(阳起石)-磁铁矿,以磷灰石-透辉石(阳起石)-磁铁矿最为常见。该类矿床与接触交代矽卡岩型铁矿床的区别是没有大量的石榴子石和硫化物出现;爆发角砾岩筒型热液蚀变最强,矿浆铁矿床则无明显蚀变现象,如智利的埃拉拉科铁矿(赵宏军等,2017)。

在含矿的火山-沉积地层中,往往含有碳酸岩类岩石和较多的硅质类岩石,近矿岩石普遍具有明显的碱质交代特点,以钠化为主,钾化次之。

从国内外矿床实例看,火山成因型铁(铜)矿床成矿背景、总体特征与黄铁矿型铜多金属矿床类似,具有相近的双层结构分带模式(刘华山等,1998),只是火山成因铁(铜)矿床上部为层状“红矿”(赤铁矿、磁铁矿、镜铁矿、菱铁矿)和含铁硅质岩、碧玉岩、重晶石岩,相当于氧化物矿床;下部为浸染状铜矿,含一定的块状“黄矿”(黄铁矿、黄铜矿)及含炭质细碎屑岩(凝灰岩),相当于块状硫化物矿床;中部为过渡带,硫化物矿床与氧化物矿床共存,但通常不明显。这种双层结构模式是地壳演化过程中不同构造-岩浆活动阶段产物。除垂向分带外,水平方向上也呈典型分带特征,即随着与火山口距离的增加,依次出现块状硫化物、硫化物与氧化物共存、氧化物矿床(刘华山等,1998)。

另外,铁矿层的下盘常常具有铁矿化的先兆。如俄罗斯的萨彦岭地区的康多姆铁矿带下盘的安山玢岩及凝灰岩就发现有赤铁矿化;瑞典基鲁纳矿区主矿体底板的角斑岩中有浸染状赤铁矿,含铁在10%~25%,这些现象可作为找矿的标志特征(沈承珩等,1995)。

④矿石矿物组合与结构构造

火山成因铁矿床的矿石矿物主要有赤铁矿、菱铁矿、镜铁矿、磁铁矿、黄铁矿、褐铁矿等,在次火山岩铁矿中,典型的矿物组合为方柱石(钠长石)-磷灰石-透辉石(阳起石)-磁铁矿组合。这种矿物组合具有明显的钠质带入,表现为钠长石化、钠质角闪石化和钠质辉石化(施俊法等,2010;徐志刚,2014)。

铁矿或与火山-沉积围岩共生沉积,或是火山气液在有利的构造部位和岩性条件下充填交代形成,矿床伴生组分较多,含有磷、钒、锰、铜、铅、锌、硫和稀土等。

矿石结构主要为半自形粒状结构、叶片状结构,偶见残余鲕状结构;构造以条带状、条纹状为主,此为块状、浸染状构造及角砾状构造(施俊法等,2010)。

⑤成矿时代

火山成因铁矿床形成时代从元古宙到新生代均有,主要是古生代后,以泥盆-石炭纪、侏罗-白垩纪最为集中(施俊法等,2010;沈承珩等,1995)。

3.2.4 火山成因型铁矿成矿模式

火山成因铁矿床成矿模式主要有两种:一种是火山喷发沉积作用成矿;另一种是次火山岩作用成矿,即由早期火山沉积成矿与晚期的次火山岩成矿共同作用形成矿体。前者形成的矿体产在接近火山活动中心或稍远部位,铁质可有一定的搬运距离,含矿岩系为火山-沉积岩。矿床一般具有沉积矿床的地质特征,规模以大型为主,富矿居多。后者与次火山岩作用有关,热液交代和充填作用明显,伴有强烈蚀变,矿床兼有火山沉积型和交代型两种特征(施俊法等,2010)。

产于中国南京-芜湖地区,与偏碱性的玄武安山质岩浆的火成侵入活动有密切关系的玢岩型铁矿,是最典型的陆相火山成因铁矿。中国一批老地质专家通过该区铁矿的研究,提出了玢岩铁矿的三部八式成

矿模式(徐志刚, 2014; 宁芜研究项目编写小组, 1978)(图10):①产于火山岩中的铁矿床,包括火山沉积成因的龙旗山式、经后期热液改造形成的竹园山式、火山岩中中低温热液充填成因的龙虎山式;②产于次火山岩体(辉石玄武安山玢岩-辉石闪长玢岩)及其附近火山岩层中的铁矿床,包括高温气液交代-充填成因及矿浆充填成因的梅山式、脉状伟晶高温气液交代-充填成因的凹山式、浸染状晚期岩浆到高温气液交代成因的陶村式;③产于次火山岩体(辉石闪长岩-辉石闪长玢岩)与前火山岩系沉积岩接触带中的铁矿床,包括中-高温气液交代-充填成因的凤凰山式、高温矿浆充填成因的姑山式。

3.2.5 火山成因型铁矿找矿标志

(1) 区域地质找矿标志

①(古)大陆板块和(古)大洋板块结合带或陆间裂隙带是火山成因铁矿发育的有利构造环境,如陆间裂谷-岛弧带、褶皱带(系)或褶皱带(系)中的山间盆地、继承式或上叠式火山盆地等。

②区域性大断裂及其交汇处是火山成因铁矿成矿的重要场所。

(2) 局部地质找矿标志

①火山喷发中心或火山-侵入活动中心及其附近的火山沉积地层或火山-侵入岩,是火山成因铁矿成矿的有利部位(沈承珩等, 1995)。

②(层状氧化物)铁矿和(块状硫化物)铜矿的共(伴)生特征是该类铁矿的重要找矿标志,即在火山成因铁铜矿床分布区,有“上铁下铜”双层结构模式和可能存在的近(火山口)铜远(火山口)铁的成矿模式,互找铁、铜矿床(刘华山等, 1998)。

(3) 含矿层位找矿标志

①厚度大、分异好、高碱富钠的火山岩系有利于成大矿、富矿,尤其是火山-碳酸盐岩建造。

②火山喷发熔岩、碎屑岩、次火山岩或次火山岩与围岩的接触带及其附近是矿床重要的产出层位标志(施俊法等, 2010)。

③基性、中基性、中性、中酸性、酸性火山岩都可以成矿,但岩性发生变化(如从基性向酸性分异)的界面或转换层部位是有利的成矿标志层位(沈承珩等, 1995)。

④矿层附近往往有铁矿化的先兆,如俄罗斯康多姆矿带沙雷姆矿床铁矿层下盘的凝灰岩中见有

浸染状的赤铁矿,岩石呈玫瑰色调。

(4) 蚀变与矿化找矿标志

①在铁矿层、铜矿层构成的双层结构模式中,含铁硅质岩、红碧玉、重晶石岩石为最重要的含矿层位标志,而硅化、绢云母化、绿泥石化、碳酸盐化、重晶石化与黄铁矿化是重要的矿化标志(刘华山等, 1998)。

②后期铁矿的次生蚀变可能会形成褐铁矿化标志,如果伴生硫化物,局部可能还会出现黄钾铁矾、石膏化。

③铁铜矿体和铜矿体可能形成次生铁锰帽和黄钾铁矾、孔雀石、蓝铜矿、石膏等组成的彩色带。

④孔雀石、褐铁矿化与黄铁矿、黄铜矿组合出现是寻找火山成因型铁铜矿体最为直接可靠的标志。

⑤蚀变岩常具有明显的分带现象, CaO 、 Na_2O 含量向矿体方向明显降低,而 K_2O 、 MgO 含量一般会增高。

⑥具有明显的金属矿化分带。除 Fe 、 Cu “双层结构模式”外, Fe 与主要伴生元素 Mn 常分离并呈带状分布,其在垂直向上或水平向外表现尤为明显,如在底部矿体中,锰含量普遍较低,上部矿体中普遍较高(施俊法等, 2010)。

(5) 地球物理找矿标志

与其他类型铁矿床一样,火山成因铁矿床通常有较高的重、磁异常,物探方法中重、磁方法最为有效。

4 全球铁矿重要分布区带潜力分析

不同的成矿地质条件、控矿因素决定着不同的铁矿成因类型, BIF 相关型铁矿床与古老克拉通的分布密切相关;而火山成因的铁矿床的分布受区域性深大断裂构造控制,发育于优地槽演化的早期阶段,与中性及中基性火山岩关系密切;岩浆型铁矿床是岩浆结晶晚期分异作用形成的,主要赋存在分异良好的以辉长岩为主的基性岩体中。

根据主要铁矿床产出的大地构造单元、地层层序、含矿建造特征及矿床类型、成矿时代等综合因素,在全球主要大地构造单元中共圈出 33 个铁矿分布区, 47 个重要分布区带(表 5, 图 11)。

通过这些区带的划分,可以揭示铁矿床的成矿规律和分布规律。

从圈定的 47 个三级成矿区看,其中有 22 个产

于前寒武纪地台区的条带状铁建造中,这些成矿区的铁矿规模目前在全球铁矿中占据着绝对主导地位,前寒武纪之后的各地质时代中,虽然也有大量的铁矿床形成,但其规模和数量,均无法与前寒武纪条带状铁建造的铁矿相比。

在前寒武纪的各时期中,太古宙形成的阿尔戈马型含铁硅质建造铁矿产出的规模、数量、分布都比较有限,主要分布在加拿大米契皮克坦、中国的鞍本和冀东等地区;而古元古代(2.5~1.9 Ga)形成的苏比利尔型含铁硅质建造铁矿的规模最大,主要分布在俄罗斯的库尔斯克磁异常区、乌克兰的克里沃罗格盆地、澳大利亚的哈默斯利盆地、巴西的米纳斯—吉拉斯(“铁四角”)和卡拉加斯、美国的苏比利尔湖区、加拿大的拉布拉多地槽以及印度、南非等地。这说明古元古代是全球铁矿特殊成矿期。

5 结 论

(1)全球铁矿资源丰富,分布广泛,但又相对集

中,以澳大利亚、加拿大、俄罗斯、巴西、中国、玻利维亚、几内亚、印度、乌克兰等国资源最为丰富。

(2)全球铁矿床划分为BIF相关型、火山成因型、岩浆型、接触交代—热液型和沉积型五大类,以BIF相关型铁矿床最为重要,该类型铁矿床以规模大、分布相对集中,常形成巨型矿床,矿石成分简单,易采易选为特点,是全球最主要的富铁矿床类型。

(3)BIF相关型铁矿床主要分布在前寒武纪含铁条带状硅质岩建造中,形成时代以3.2~3.3 Ga、2.7~2.8 Ga、2.5~2.4 Ga及1.8~1.9 Ga时间段集中出现。该类型的富矿体在空间上与前寒武纪条带状铁建造的含铁石英岩关系密切。富矿的成矿作用主要表现在硅质从石英岩中被淋滤出来,铁质富集含铁>55%的矿石。

(4)火山成因型铁矿床一般发育在优地槽演化的早期阶段,也可形成于地台上的断陷盆地内,其分布受区域性深大断裂构造控制。发生成矿作用的火山岩主要是中性至基性(少数为酸性),以碱性

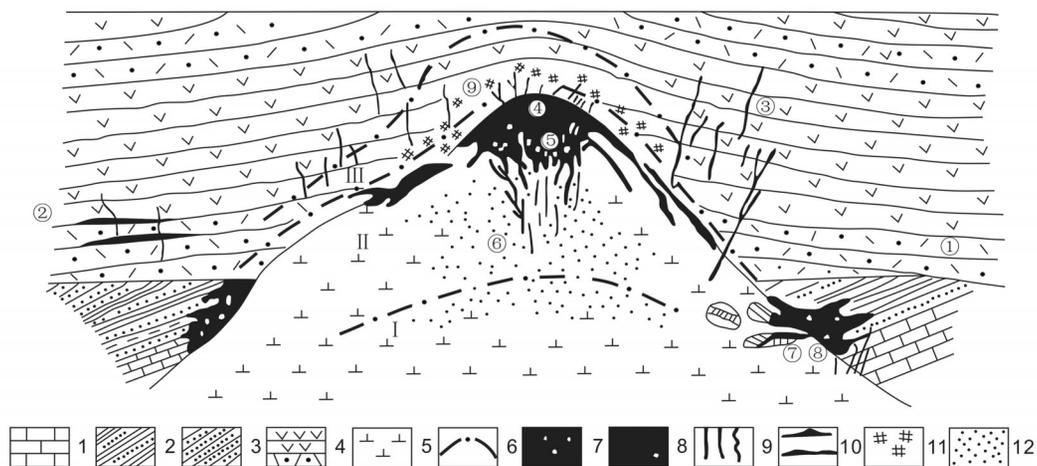


图10 玢岩铁矿的理想模式图(转引宁芜研究项目编写小组,1978)

1—青龙群石灰岩($T_{1-2}Q$); 2—黄马青组砂页岩(T_3h); 3—象山群砂岩($J_{1-2}X$); 4—龙王山、大王山两旋回火山岩(J_3/K_1); 5—辉长闪长玢岩—辉长闪长岩; 6—蚀变分带界线; 7—角砾岩化带及角砾状矿石; 8—块状矿石; 9—镜铁矿或磁铁矿脉; 10—层状铁矿; 11—黄铁矿化; 12—浸染状磁铁矿化; ①—龙旗山式; ②—竹园山式; ③—龙虎山式; ④—梅山式; ⑤—凹山式; ⑥—陶村式; ⑦—向山式(黄铁矿); ⑧—姑山式; ⑨—凤凰山式; 蚀变带: I—下部浅色蚀变带; II—中部深色蚀变带; III—上部浅色蚀变带

Fig.10 Ideal modal map for the porphyritic iron deposits (after Research Group of the Ning-Wu Project, 1978)

1—Qingling Group($T_{1-2}Q$)limestone; 2—Huangmaqing Formation(T_3h)siltstones; 3—Xiangshan Group($J_{1-2}X$)sandstone; 4—Longwangshan and Dawangshan Cycles(J_3/K_1)volcanic rocks; 5—Gabbro diorite and gabbro diorite porphyllite; 6—Boundary of alteration belt; 7—Breccia belt and breccia ore; 8—Massive ore; 9—Specularote or magnetite veins; 10—Bedded iron ore; 11—Pyritization; 12—Disseminated magnetite;

Deposit types: ①—Longqishan type; ②—Zhuyuanshan type; ③—Longhushan type; ④—Meishan type; ⑤—Aoshan type; ⑥—Taocun type; ⑦—Xiangshan type(pyrite); ⑧—Gushan type; ⑨—Fenghuangshan type;

Alteration belts: I—leucoctatic alteration in lower part; II—deep color alteration in middle part; III—leucoctatic alteration in the upper part

表5 全球主要铁矿分布区带
Table 5 Distribution of major iron ore deposits in the world

大洲分布	主要大地构造单元	分布区带	主要成因类型	规模 /亿 t	铁品位/%	主要成矿时代	主要矿矿物			
北美洲 (含格陵兰岛)	北美陆块	1.加拿大地盾东部拉布拉多地槽区铁矿分布带	BIF 相关型	531	50-62;30-36	古元古代	含铁石英岩赤铁矿、磁铁矿、针铁矿			
		2.加拿大地盾北部巴芬岛铁矿分布带	BIF 相关型	170	30-46	古元古代	磁铁矿、赤铁矿			
		3.加拿大地盾南部苏必利尔湖铁矿分布带	BIF 相关型	436	25-45	古元古代	磁铁矿、赤铁矿			
	造山带	格陵兰地盾	4.格陵兰西南部努克-伊苏卡塞铁矿分布带	BIF 相关型	10	40-62	古太古代	磁铁矿		
			5.北美阿巴拉契亚地槽铁矿分布带	海相沉积型	22	30-45	古生代	赤铁矿、菱铁矿、鲕绿泥石		
		造山带	造山带	6.北美格林威尔造山带铁矿分布带	岩浆型、 接触交代型	111	26-56	前寒武纪	钛磁铁矿	
				7.墨西哥海岸科迪勒拉铁矿分布带	火山成因型	10	36-60	中生代	磁铁矿、赤铁矿	
			南美陆块	圭亚那地盾	8.委内瑞拉伊马塔卡铁矿分布带	BIF 相关型	146	44-63	古太古代	赤铁矿、假象赤铁矿、针铁矿、磁铁矿
					9.巴西阿马帕铁矿分布带	BIF 相关型	23	40-60	古太古代	赤铁矿、假象赤铁矿、针铁矿、磁铁矿
				造山带	10.巴西米纳斯-吉拉斯(铁四角)铁矿分布带	BIF 相关型	586	>50	古元古代	赤铁矿、假象赤铁矿、针铁矿、磁铁矿
11.巴西北奥格兰德-巴拉伊巴铁矿分布带	BIF 相关型	26	40-60		古元古代	赤铁矿、假象赤铁矿、针铁矿、磁铁矿				
南美洲	造山带	12.巴西伊亚中部铁矿分布带	BIF 相关型	112	40-60	古元古代	赤铁矿、假象赤铁矿、针铁矿、磁铁矿			
		13.巴西卡拉加斯铁矿分布带	BIF 相关型	122	>53	古元古代	赤铁矿、假象赤铁矿、针铁矿、磁铁矿			
	造山带	安第斯造山带	14.玻利维亚穆通-巴西乌鲁库姆铁矿分布带	BIF 相关型	458	>55	晚前寒武纪	赤铁矿、假象赤铁矿、磁铁矿、磷酸锰		
			15.秘鲁安第斯造山带中部铁矿分布带	接触交代 -热液型	8	30-55	中生代	磁铁矿、赤铁矿		
		16.秘鲁南部-智利中北部海岸科迪勒拉铁矿分布带	火山岩型	238	>50;35-45	中生代	磁铁矿、赤铁矿			
	西部非洲克拉通	雷圭巴特地盾	17.毛里坦尼亚克迪亚吉勒铁矿分布带	BIF 相关型	90	>55;30-40	太古宙	赤铁矿、假象赤铁矿、针铁矿、磁铁矿		
			18.西非利比亚-几内亚-科特迪瓦等铁矿分布带	BIF 相关型	370	>60;30-40	太古宙	赤铁矿、假象赤铁矿、针铁矿、磁铁矿		
	非洲	中部非洲克拉通	19.坦桑尼亚铁矿分布带	岩浆型	7	25-45	太古宙	磁铁矿、钛磁铁矿、钒钛磁铁矿		
20.加蓬-喀麦隆-安哥拉铁矿分布带			BIF 相关型	200	>55;30-40	太古宙 -古元古代	赤铁矿、假象赤铁矿、针铁矿、磁铁矿			
南部非洲克拉通		津巴布韦铁矿分布带	岩浆型	300	25-60	古元古代	赤铁矿、褐铁矿、铬铁矿			
		南非卡普瓦拉克拉通	BIF 相关型	60	>50	古元古代	赤铁矿、假象赤铁矿、针铁矿、磁铁矿			

续表 5

大洲分布	主要大地构造单元	分布区带	主要成因类型	规模/亿 t	铁品位/%	主要成矿时代	主要矿石矿物	
欧洲	乌克兰地盾	23.乌克兰沃罗格铁矿分布带	BIF 相关型	200	>55; 30~45	古元古代	赤铁矿、假象赤铁矿、针铁矿	
		24.俄罗斯科拉半岛—卡累利阿铁矿分布带	BIF 相关型	40	30~45	新太古代	磁铁矿、赤铁矿	
	东欧地台中南部	25.俄罗斯库尔斯克铁矿分布带	BIF 相关型	556	>50; 32~45	新太古代~古元古代	赤铁矿、磁铁矿、假象赤铁矿、针铁矿	
		26.瑞典北部基鲁纳铁矿分布带	火山成因型	35	64	古元古代末	磁铁矿	
		27.法国洛林—德国萨尔茨吉特成矿带	沉积型	81	31~37; 40~52	侏罗纪	针铁矿、菱铁矿、赤铁矿	
	印度陆块	辛格布姆克拉通 布海因达拉克拉通 达尔瓦克拉通	28.印度奥比哈尔—里萨邦铁矿分布带	BIF 相关型	64	>60	古元古代	赤铁矿、假象赤铁矿、磁铁矿
			29.印度中央邦铁矿分布带	BIF 相关型	78	60~69; 25~30	古元古代	赤铁矿、假象赤铁矿、磁铁矿
30.印度果阿—卡纳塔克邦成矿带			BIF 相关型	60	59~62	古元古代	赤铁矿、假象赤铁矿、磁铁矿	
亚洲	中朝陆块	31.朝鲜茂山铁矿分布带	BIF 相关型	60	25~60	古元古代	磁铁矿、赤铁矿	
		32.中国鞍山—冀东铁矿分布带	BIF 相关型	160	20~45	太古宙	磁铁矿、赤铁矿	
		33.中国五台—吕梁铁矿分布带	BIF 相关型	38	20~40	古元古代	磁铁矿、赤铁矿	
		34.中国包头—白云鄂博铁矿分布带	火山成因型	33	35.5	古元古代—早古生代	磁铁矿、含稀土碳酸盐矿物等	
	扬子陆块	长江中下游 康滇地槽	35.中国宁芜—庐枞铁矿分布带	火山成因型	20	24~43	中生代	磁铁矿
			36.中国攀西铁矿分布带	岩浆型	70	28~35	中生代	磁铁矿、钛铁矿、钽铁矿、磁铁矿
		缝合带(造山带)	37.伊朗东南部孔格罗—卢特铁矿分布带	火山成因型	43	30~50	古生代	磁铁矿、赤铁矿
			38.阿富汗巴米扬塔吉克铁矿分布带	火山成因型	20	>60	古生代	磁铁矿、赤铁矿
		西伯利亚陆块	39.俄罗斯东西伯利亚—伊尔库茨克铁矿分布带	接触交代—热液型	100	>45; 20~30	中生代	磁铁矿、赤铁矿
			40.俄罗斯远东南阿尔丹铁矿分布带	BIF 相关型	20	30~45	新太古代	磁铁矿
造山带	乌拉尔造山带	41.俄罗斯远东东恰拉—托科铁矿分布带	BIF 相关型	63	30~45	新太古代	磁铁矿	
		42.俄罗斯卡奇卡纳尔铁矿分布带	岩浆型	140	14~57	晚古生代	磁铁矿、钛铁矿、钽铁矿、磁铁矿	
		43.哈萨克斯坦图尔盖铁矿分布带	火山成因型	142	40.5	晚古生代	磁铁矿、赤铁矿	
		44.俄罗斯阿尔泰—萨彦岭铁矿分布带	火山成因型、接触交代	30	22~55	古生代	磁铁矿	
大洋洲	西澳克拉通	45.澳大利亚哈默斯利铁矿分布带	BIF 相关型	400	50~65; >30	古元古代	赤铁矿、假象赤铁矿、磁铁矿	
		46.澳大利亚伊尔冈铁矿分布带	BIF 相关型	100	>50; 30~45	中—新太古代	赤铁矿、假象赤铁矿、磁铁矿	
	南澳克拉通	高岗地块	47.澳大利亚高岗铁矿分布带	BIF 相关型	200	>50; 30~45	早中元古代	赤铁矿、假象赤铁矿、磁铁矿

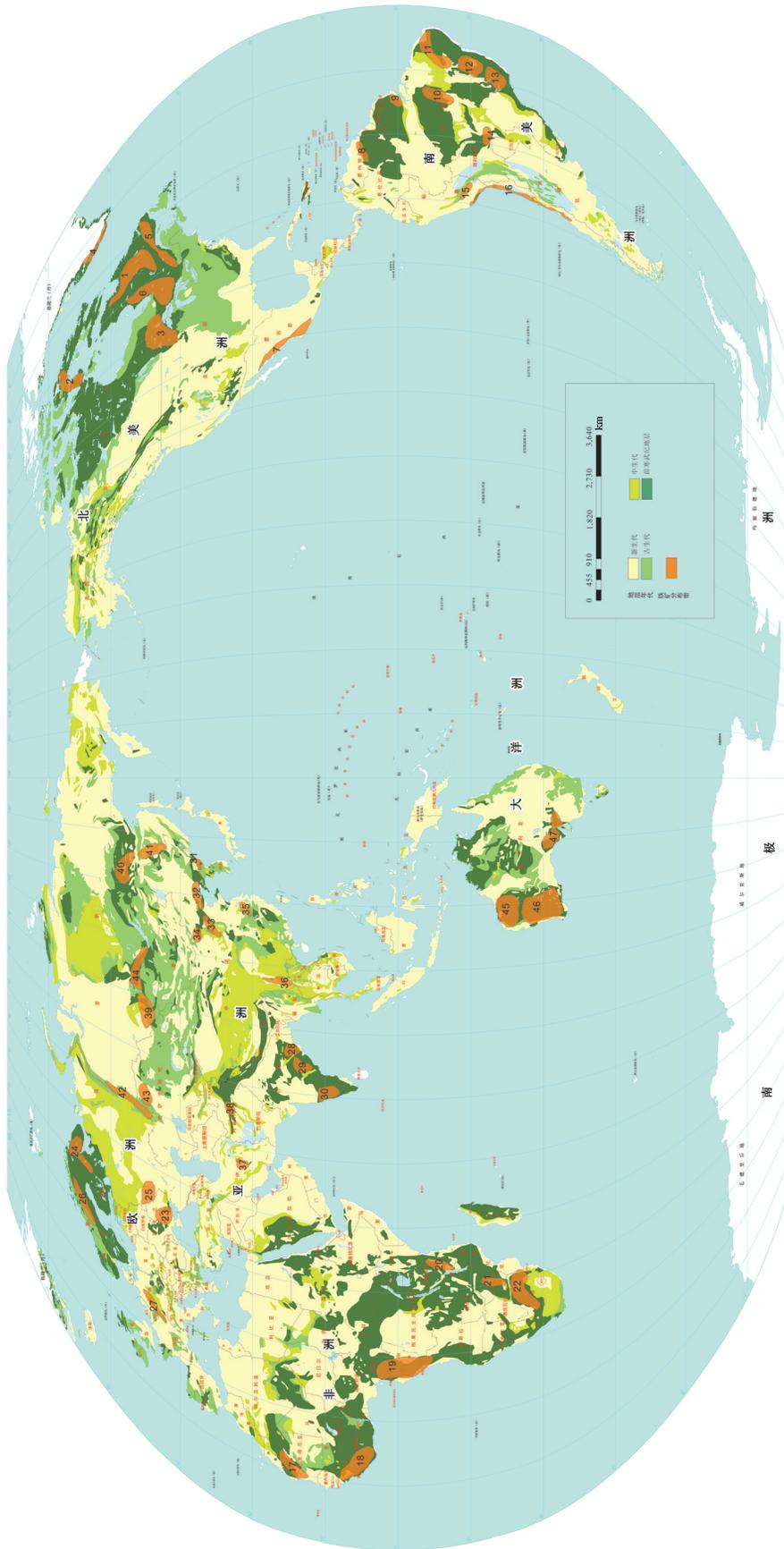


图 11 全球重要铁矿分布区带图(图中序号与表 5 中的铁矿分布区带号一致)
 Fig.11 Global important iron ore distribution map(The serial number in the diagram is consistent with the iron ore distribution zone number in Table 5)

偏高、富钠为特征。是全球又一富铁矿来源之一。

(5)根据全球铁矿床产出的大地构造单元、地层层序、含矿建造特征及矿床类型、成矿时代等综合因素,在全球主要大地构造单元中共圈出33个铁矿分布区,47个重要分布区带。

致谢:本文得到了国土资源部科技成果奖评审委员的肖庆辉研究员、国土资源部咨询研究中心李裕伟研究员、国土资源部信息中心马建民研究员、首钢地质勘查院施性明教授、中国地质调查局发展研究中心邱瑞照、叶锦华研究员精心指导和帮助,编辑部的专家和老师在成文中给予了精心指导,谨此一并表示诚挚的感谢!

注释

①周尚国,卢民杰,黄费新,等.2013.全球铁矿资源分布规律与战略选区研究成果报告[R].

References

- Alexander B W, Bau M, Andersson P, Dulski P. 2008. Continentially-derived solutes in shallow Archean seawater: Rare earth element and Nd isotope evidence in iron formation from the 2.9 Ga Pongola Supergroup, South Africa[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72 : 378–394.
- Barley M E, Pickard A L, Sylvester P J. 1997. Emplacement of a large igneous province as a possible cause of banded iron formation 2.45 billion years ago[J]. *Nature*, 385 : 55–58.
- Basta F F, Maurice A E, Fontboté L, Favarger P Y. 2011. Petrology and geochemistry of the banded iron formation (BIF) of Wadi Karim and Um Anab, Eastern Desert, Egypt : Implications for the origin of Neoproterozoic BIF[J]. *Precambrian Research*, 187 : 277–292.
- Bekker A, S lack J F , Planavsky N , Krape B , Hofmann A , Konhauser K O, Rouxel O J. 2010. Iron formation: The sedimentary product of a complex interplay among mantle, tectonic, oceanic, and biospheric processes[J]. *Econ. Geol.*, 105(3) : 467–508.
- Cordani U G, Milani E J, Thomaz Filho A. 2000. Tectonic Evolution of South America[D]. Rio de Janeiro: 31#International Geological Congress: 1–856.
- Dai Yanpei, Zhu Yudi, Zhang Lianchang, Wang Changle, Chen Chao, Xiu Di. 2016. An Overview of Studies on Precambrian Banded Iron Formations (BIFs) in China and Abroad[J]. *Geological Review*, 62 (3) : 735–757 (in Chinese with English abstract).
- Dai Yanpei, Zhang Lianchang, Zhu Mingtian, Wang Changle, Liu Li, Xiang Peng. 2014. The composition and genesis of Mesoarchean Dagushan banded iron formation in the Anshan area, the North China Craton[J]. *Ore Geology Review*, 63 : 353–373 (in Chinese with English abstract).
- Deb M. 2014. Precambrian geodynamics and metallogeny of the Indian shield[J]. *Ore Geology Reviews*, 57 : 1–28.
- Dorr J V N. 1969. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilatero Ferrifero, Minas Gerais, Brazil. United States Geological Survey Professional Paper, 641–A.
- Editorial Committee of A DICTIONARY OF EARTH SCIENCES. 2005. A Dictionary of Earth Sciences, Applied Science Volume[M]. Beijing: Geological Publishing House, 641–645 (in Chinese).
- Fei Xuejin, Qiu Dianyun. 1994. Present conditions and future of the development of mineral resources in deep sea[J]. *China's Manganese Industry*, 12(6): 6–10 (in Chinese with English abstract).
- Gross G A. 1980. A classification of iron formations based on depositional environments[J]. *Canadian Mineralogist* , 18(2): 215–222 .
- Gross G A. 1983. Tectonic systems and the deposition of iron-formation [J]. *Precambrian Research*, 20(2/4): 171–187.
- Gross G A. 1965. Geology of iron deposits in Canada, Vol.1. General Geology and Evaluation of Iron Deposits[R]. Geological Survey of Canada , Economic Report 22.
- Guo Weimin, Dong Yongguan, Xing Guangfu, Zeng Yong. 2013. New Research Progress on Iron Deposits in Quadrilatero Ferrifero District, Brazil[J]. *Geological Science and Technology Information*. 32 (5): 79–85 (in Chinese with English abstract).
- Niu Hecai, Luo Yong, Li Ningbo, Jiang Yuhang, Yang Wubin, Shan Qiang, Yu Xueyuan. 2012. Study on the Cu–mineralization of the Chaganuoer Fe–deposit in the Awulale area, Xinjiang[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 48(3): 256–265 (in Chinese with English abstract).
- Huston D L, Logan G A. 2004. Barite, BIFs and bugs: Evidence for the evolution of the Earth's early hydrosphere[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 220 : 41–55.
- <http://www.SNL.Metals.Economics.com>; SNLinfo@snl.com.
- Isley A E. 1995. Hydrothermal plumes and the delivery of iron to banded iron formation[J]. *The Journal of Geology*, 103(2): 169–185.
- James H L .1954. Sedimentary facies of iron-formation [J]. *Econ. Geol.*, 49(3): 235–293.
- James H L , Trendall A F. 1982. Banded iron-formation: Distribution in time and paleoenvironmental significance[C]//Holland H D, Schidlowski M(eds.). *Mineral Deposits and the Evolution of the Biosphere*. New York : Springer Verlag Press, 199–218.
- Jiang Sihong, Liang Qingliang, Nie Fengjun, Liu Yifei, Bai Daming, Liu Yan, Chen Chunliang. 2013. Geological characteristics and metallogeny of the Mount Whaleback iron deposit in Pilbara Region, Western Australia[J]. *Geological Science and Technology Information*. 32(5): 95–105 (in Chinese with English abstract).
- 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.
- Kneeshaw M. Mt.1975. Whaleback iron orebody, Hamersley Iron Province [M]: Australasian Inst. Mining Metallurgy, Mon. 5: 910–916.
- Lan Tingguang, Fan Hongrui, Santosh M, Hu Fangfang, Yang Kuifeng, Liu Yongsheng. 2014. U–Pb zircon chronology, geochemistry and isotopes of the Changyi banded iron formation in the eastern Shandong Province: Constraints on BIF genesis and implications for Paleoproterozoic tectonic evolution of the North China Craton[J]. *Ore Geology Reviews*, 56 : 472–486 (in Chinese with English abstract).
- Liao Hang. 2015. Genesis of Lomoteng Fe–Mn deposit in South Africa and technical performance evaluation of ore processing[J]. *Mineral Resources and Geology*, 29(4): 509–513 (in Chinese with English abstract).
- Li Houmin, Liu Mingjun, Li Lixing, Yang Xiuqing, Chen Jing, Yao Liangde, Hong Xuekuan, Yao Tong. 2012. Geology and geochemistry of the marble in the Gongchangling iron deposit in Liaoning Province and their metallogenic significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3497–3512 (in Chinese with English abstract).
- Li Houmin, Liu Mingjun, Li Lixing, Yang Xiuqing, Yao Liangde, Chen Jing, Yao Tong. 2014. SHRIMP U–Pb geochronology of zircons from the garnet–rich altered rocks in the mining area II of the Gongchangling iron deposit: Constraints on the ages of the high grade iron deposit[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(5):1205–1217.
- Li Houmin, Wang Denghong, Li Lixing, Chen Jing, Yang Xiuqing, Liu Mingjun. 2012. Metallogeny of iron deposits and resource potential of major iron minerogenic units in China[J]. *Geology in China*, 39 (3) : 559–580 (in Chinese with English abstract).
- Li Shuguang. 1982. Geochemical Model for the Genesis of Gongchangling rich Magnetite deposit in China[J]. *Geochimica*, 34 (2): 113–121 (in Chinese with English abstract).
- Li Yanhe, Zhang Zengjie, Hou Kejun, Duan Chao, Wang Defang, Hu Guyue. 2014. The genesis of Gongchangling high–grade–iron ores, Anshan–Benxi area, Liaoning Province, NE China: Evidence from Fe–Si–O–S isotopes[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(12): 2351–2372 (in Chinese with English abstract).
- Liu Huashan, Li Qiulin, Yu Pusheng, Wu Jieren. 1998. Geological characteristics and genesis of the Jingtieshan type iron–copper deposits[J]. *Mineral Deposits*, 1: 25–35 (in Chinese with English abstract).
- Liu Mingjun. 2013. Hydrothermal Metasomatism and Its Metallogenic Significance of the Gongchangling iron Deposit, Liaoning, China[D]. Dissertation Master Degree, China University of Geosciences (Beijing).
- Lu Lina, Wu Cen. 2013. Iron Ore Deposit Distribution and Genetic Analysis in Western Australia State[J]. *Coal Geology of China*, 25 (12): 106–111 (in Chinese with English abstract).
- Lv Linsu, Wang Yunfeng, Li Hongbo, Zhou Zhenhua, Zhang Zuoheng, Xie Guiqing. 2011. Discussion on the metallogenesis of Bushveld magmatic Cu–Ni–PGEsulphide deposit in South Africa[J]. *Mineral Deposits*, 30(6): 1129–1153 (in Chinese with English abstract).
- Morris R C.1985. Genesis of iron ore in banded iron–formation by supergene and supergene–metamorphic processes: A conceptual model [C]//Wolff K H. *Handbook of Strata–bound and Stratiform Ore Deposits*. Amsterdam: Elsevier, 13 : 73–235.
- Powell C McA, Oliver N H, Li Z X, et al. 1999. Synorogenic hydrothermal origin for giant Hamersley iron oxide ore bodies[J]. *Geology*, 27 : 175–178.
- Qiu Ruizhao, Tan Yongjie, Zhu Qun, Li Baoqiang, Lin Fangcheng, Lu Minjie. 2012. Comparative Study on Metallogenic Regularity of Important Metallogenic Belts in China and Its Neighboring Areas[M]. Beijing: Geological Publishing House.
- Research Group of the Ning–Wu Project. 1978. *Porphyrite Iron Deposits of Ningwu Area*[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1–130 (in Chinese).
- Rosiere C A, Spier C A, Rios F J. 2004. The itabirites of the Quadrilatero Ferrifero and related high–grade iron ore deposits: An overview[J]. *Reviews in Economic Geology*, 15 : 223–254.
- Rosiere C A, Spier C A, Rios F J. 2008. The itabirites of the Quadrilatero Ferrifero and related high–grade iron ore deposits: An overview[J]. *Reviews in Economic Geology*, 15 : 223–254.
- Shen Chengheng, Wang Shoulun, Chen Senhuang. 1995. *Black Metallic Mineral Resources in the World*[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1–130 (in Chinese).
- Shi Junfa, Tang Jinrong, Zhou Ping, Jin Qinghua. 2010. *World Prospecting Models and Mineral Prospectin*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 491 (in Chinese).
- Spier C A, Oliveira S M B, Sial A N. 2007. Geochemistry and genesis of the banded iron formations of the Caue Formation, Quadrilatero Ferrifero, Minas Gerais, Brazil[J]. *Precambrian Reserch*, 152 : 170–260.
- Taylor D, Dalstra H J, Harding A E, Broadbend G C, Barler M E. 2001. Genesis of high grade hematite orebodies of the Hamersley province, Western Australia[J]. *Economic Geology*, 96 : 837–873.
- Trendall A F.1983 . Introduction[C]//Trendall A F, Morris R C(eds.). *Iron–formation: Facts and Problems*. Amsterdam: Elsevier Press.1–11 .
- 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 .
- Tyler I M, Thorne A M.1990. The northern margin of the Capricorn Orogen, Western Australia: An example of an Early Proterozoic collisional zone [J]. *J. Struct. Geol.* 12 : 685–701.
- U. S. Geological Survey. 2017. *Mineral Commodity Summaries 2017*[M].

- U. S. Geological Survey. 2015. Mineral Commodity Summaries 2015[M].
- Van Hise C R, Leith C K. 1911. The Geology of the Lake Superior Region[M]. Monogr. US Geol. Surv., 52 .641.
- 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).
- Wang Ende, Xia Jianming, Zhao Chunfu, Fu Jianfei, Hou Genqun. 2012. Forming mechanism of high– grade magnetite bodies in Gongchangling, Liaoning Province[J].Acta Geologica Sinica, 86 (11): 1761–1772 (in Chinese with English abstract).
- Wang Fengxiang, Nie Fengjun, Zhang Weibo, Cao Yi, Xie Xiaoying. 2013. Research progress on the world largest underground mining Iron deposit—Kiruna deposit in northern Sweden [J]. Geological Science and Technology Information. 32 (5) : 79–85 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yongchun, Li Mengmeng, Tan Liang, Liang Shuai, Liu Xing. 2015. Metallogenic model and potential analysis of the Canadian Labrador Lake Superior– type iron formation[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 30(1): 36– 42 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yifei, Xu Huifang, Merino E , Konishi H. 2009. Generation of banded iron formations by internal dynamics and leaching of oceanic crust[J]. Nature Geoscience, 2(11) : 781–784.
- Warren T, Steffen H. 2009. Oxygen isotope compositions of Iron Oxides from high– grade BIF– Hosted Iron ore deposits of the Central Hamersley Province, Western Australia: Constraints on the evolution of hydro– thermal fluids[J]. Economic Geology, 104: 1019–1035.
- Webb A, Clout J. 2008. Banded iron formation– related iron ore deposits of the Hamersley Province, Western Australia[J]. Econ. Geol., 15(3) : 197–221 .
- Xu ZhiGang. 2014. A Review:” The research of Ning–Wu porphylic Iron Deposit” and some further research problems[J]. Acta Geologica Sinica, 88(12) : 2394–2412 (in Chinese with English abstract).
- Yan Shuang, Jiang Yuhang, Zeng Lingjun. 2013. Discussion on metallogenic types and metallogenic mechanism of iron ore deposits in the Awulale metallogenic belt, West Tianshan[J]. Mineral Science(Supp.), 139– 140 (in Chinese with English abstract).
- Yao Chunyan, Dong Yongguan, Zeng Yong, Guo Weimin. 2014. Hydrothermal Genesis of High– grade Iron Deposits in North Ore Belt of Caracas Mines, Brazil[C]. China Earth Science Federation Annual Conference: 1137–1138 (in Chinese).
- Yao Chunyan, Dong Yongguan, Zeng Yong, Guo Weimin. 2014. Study on metallogenic characteristics and prospecting area of the Imataka iron ore belt in Venezuela[J]. Mineral Deposits, 33(Supp.) : 1137–1138 (in Chinese).
- Yao Chunyan, Dong Yongguan, Zhang Xiaoyong, Zeng Yong, Guo Weimin. 2012. Briefly Discussion on the Metallogenesis of the Carajas Precambrian BIF, Brazil[J]. Advances in Earth Science, 27: 281–285 (in Chinese with English abstract).
- Yao Chunyan, Yao Zhongyong, Xu Ming, Gao Weihua, Li Hongjun. 2014. Metallogenic characteristics and ore– control factors of the high– grade BIF of the Hamersley iron province in western Australia[J]. Geological Bulletin of China, 32(2/3) : 215–227 (in Chinese with English abstract).
- Zappettini E O, Kilibarda C R, Schobbenhaus C. 2005. Metallogenic map of South America at the scale of 1: 5000000[M]. Buenos Aires: The Commission for the Geological Map of the World, 1–274.
- Zeng Yong, Guo Weimin, Xiang Hongli, Yao Chunyan, Dong Yongguan. 2015. Massive Fe– Cu– Au polymetallic deposits metallogenesis in Carajás mineral province of Brazil[J]. Mineral Deposits, 34(4) : 828–841 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaochong, Li Jianwei, John Encarnacion. 2014. Iron metallogeny in China– An introduction to the special issue[J]. Ore Geology Reviews, 57: 243–246.
- Zhang Zhaochong, Santosh M, Li Jianwei. 2015. Iron deposits in relation to magmatism in China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 113: 951–956.
- Zhang Zuoheng, Hong Wei, Jiang Zongsheng, Duan Shigang, Li Fengming, Shi Fupin. 2014. Geological characteristics and metallogenesis of iron deposits in western Tianshan, China[J]. Ore Geology Reviews, 57: 425–440.
- Zhang Zuoheng, Hong Wei, Jiang Zongsheng, Duan Shigang, Wang Zhihua, Li Fengming, Shi Fupin, Zhao Jun, Zheng Renqiao. 2012. Geological features, mineralization types and metallogenic setting of Late Paleozoic iron deposits in western Tianshan Mountains of Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 31(5): 941– 964(in Chinese with English abstract).
- Zhao Hongjun, Lu Minjie, Zhou Shangguo, Ye Jinhua, Chen Xiufa, Zhang Chao, Guo Weimin, Huang Feixin, Yao Chunyan. 2017. A study on key metallogenetic zones and principal metallogenetic Regularities of Iron ore resources in south American Countries[J]. Geology in China, 44(4) : 690– 716 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 代堰镔, 朱玉娣, 张连昌, 王长乐, 陈超, 修迪. 2016. 国内外前寒武纪条带状铁建造研究现状[J]. 地质论评, 62(3): 735–757.
- 地质科学大辞典编委会. 2005. 地质科学大辞典(应用科学卷)[M]. 北京: 地质出版社.
- 费雪锦, 邱电云. 1994. 深海底矿物资源开发现状及前景[J]. 中国锰业, 12(6): 6–10.
- 郭维民, 董永观, 邢光福, 曾勇. 2013. 巴西铁四角地区铁矿床研究进

- 展[J]. 地质科技情报, 32(5): 79-85.
- 江思宏, 梁清玲, 聂凤军, 刘翼飞, 白大明, 刘妍, 陈春良. 2013. 西澳皮尔巴拉地区鲸背山铁矿床地质特征与形成规律[J]. 地质科技情报, 32(5): 95-105.
- 廖航. 2015. 南非 Lomoteng 铁锰矿床成因及矿石加工技术性能评价[J]. 矿产与地质, 29(4): 509-513.
- 李厚民, 刘明军, 李立兴, 杨秀清, 陈靖, 姚良德, 洪学宽, 姚通. 2012. 辽宁弓长岭铁矿区大理岩地质地球化学特征及其成矿意义[J]. 岩石学报, 28(11): 3497-3512.
- 李厚民, 刘明军, 李立兴, 杨秀清, 姚良德, 陈靖, 姚通. 2014. 弓长岭铁矿二矿区蚀变岩中锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及地质意义[J]. 岩石学报, 30(5): 1205-1217.
- 李厚民, 王登红, 李立兴, 陈靖, 杨秀清, 刘明军. 2012. 中国铁矿成矿规律及重点矿集区资源潜力分析[J]. 中国地质, 39(3): 559-580.
- 李莎. 2017. 铁矿石专题报告二: 海外矿 VS 国内矿. 广发证券钢铁专题研究[R].
- 李曙光. 1982. 弓长岭富磁铁矿床成因的地球化学模型[J]. 地球化学, 34(2): 113-121.
- 刘华山, 李秋林, 于浦生, 郭介人. 1998. "镜铁山式"铁铜矿床地质特征及其成因探讨[J]. 矿床地质, 1: 25-35.
- 刘明军, 辽宁弓长岭沉积变质型铁矿热液改造作用及其成矿意义[D]. 中国地质大学(北京).
- 吕立娜, 吴岑. 2013. 西澳大利亚州铁矿分布规律及矿床成因分析[J]. 中国煤炭地质, 25(12): 106-111.
- 吕林素, 汪云峰, 李宏博, 周振华, 张作衡, 谢桂青. 2011. 南非布什维尔德岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床成因探讨[J]. 矿床地质, 30(6): 1129-1153.
- 李延河, 张增杰, 侯可军, 段超, 万德芳, 胡古月. 2014. 辽宁鞍山地区沉积变质型富铁矿的成因: Fe、Si、O、S 同位素证据[J]. 地质学报, 88(12): 2351-2372.
- 宁芜研究项目编写小组. 1978. 宁芜玢岩铁矿[M]. 北京: 地质出版社. 1-196
- 牛贺才, 罗勇, 李宁波, 姜玉航, 杨武斌, 单强, 于学元. 2012. 新疆阿吾拉勒地区查岗诺尔铁矿床铜矿化的成因探讨[J]. 南京大学学报(自然科学版), 48(3): 256-265.
- 邱瑞照, 谭永杰, 朱群, 李宝强, 林方成, 卢民杰. 2012. 中国及邻区重要成矿带成矿规律对比研究[M]. 北京: 地质出版社.
- 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, 1-130.
- 施俊法, 唐金荣, 周平, 金庆花. 2010. 世界找矿模型与矿产勘查[M]. 北京: 地质出版社. 491.
- 王长乐, 张连昌, 刘利, 代堰铭. 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.
- 王恩德, 夏建明, 赵纯福, 付建飞, 侯根群. 2012. 弓长岭铁矿床磁铁矿富矿形成机制探讨[J]. 地质学报, 86(11): 1761-1772.
- 王丰翔, 聂凤军, 张伟波, 曹毅, 谢小颖. 2013. 世界最大井采铁矿床——基鲁纳铁矿床研究现状与新进展[J]. 地质科技情报, 32(5): 146-152.
- 王永春, 李猛猛, 谭亮, 梁帅, 刘行. 2015. 加拿大拉布拉多地区 Superior 湖型铁建造成矿模式及资源潜力分析[J]. 地质找矿论丛, 30(1): 36-42.
- 徐志刚. 2014. "宁芜玢岩铁矿研究"回顾及某些问题的深化研究——贺陈毓川先生 80 华诞[J]. 地质学报, 88(12): 2394-2412.
- 严爽, 姜玉航, 曾令君. 2013. 西天山阿吾拉勒成矿带铁磁铁矿床成矿类型及成矿机制探讨[J]. 矿物学报(增刊), 139-140.
- 姚春彦, 董永观, 张晓勇, 曾勇, 郭维民. 2012. 浅谈巴西地区前寒武纪条带状含铁建造的成矿作用[J]. 地球科学进展, 27: 281-285.
- 姚春彦, 董永观, 曾勇, 郭维民. 2014. 巴西帕拉州卡拉加斯成矿带北矿带高品位铁矿床的热液成因[C]// 中国地球科学联合会学术年会: 1137-1138.
- 姚春彦, 董永观, 曾勇, 郭维民. 2014. 委内瑞拉伊玛塔卡铁矿带成矿特征及找矿选区研究[J]. 矿床地质, 33: 1137-1138.
- 姚春彦, 姚仲友, 徐鸣, 高卫华, 李红军. 2014. 澳大利亚西部哈默斯利铁成矿省 BIF 富铁矿的成矿特征与控矿因素[J]. 地质通报, 33(2/3): 215-227.
- 冶金部情报标准研究所. 1976. 国外前寒武纪铁硅建造风化淋滤型富铁矿[M]. 冶金工业出版社.
- 曾勇, 郭维民, 项红莉, 姚春彦, 董永观. 2015. 巴西卡拉加斯地区大规模铁—铜—金多金属矿床的成矿作用[J]. 矿床地质, 34(4): 828-841.
- 张作衡, 洪为, 蒋宗胜, 段士刚, 王志华, 李凤鸣, 石福品, 赵军, 郑仁乔. 2012. 新疆西天山晚古生代铁矿床的地质特征、矿化类型及形成环境[J]. 矿床地质, 31(5): 941-964.
- 赵宏军, 卢民杰, 周尚国, 叶锦华, 陈秀法, 张潮, 郭维民, 黄费新, 姚春彦. 2017. 南美洲铁矿重要成矿区带与成矿规律研究[J]. 中国地质, 44(4): 690-716.
- 中国产业信息. 2015. 2015-2020 年中国铁矿石行业前景预测及投资战略研究报告[R]. <http://www.chyxx.com>
- 中国海关统计数据. <http://www.customs.gov.cn/>
- 中华人民共和国地质矿产行业标准 DZ/T 0200-2002. 铁、锰、铬矿地质勘查规范[S].