

# 中国铁矿床伴生关键金属:基本特征、分布规律 及资源潜力\*

杨志爽<sup>1,2</sup>, 黄小文<sup>1\*\*</sup>, 孟郁苗<sup>1</sup>, 谭侯铭睿<sup>1,2</sup>, 谭茂<sup>1,2</sup>, 高英辉<sup>1,2</sup>, 张鑫<sup>1,2</sup>

(1 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要** 关键金属对于国家高精尖科技发展具有举足轻重的地位。近年来,随着科技革命推进和新兴产业发展,许多国家对关键金属资源的争夺愈加激烈。中国战略性关键金属与“四稀金属”大致对应,主要以伴生形式赋存于各种类型的矿床中。铁矿是中国分布最广泛,研究最成熟的金属矿产之一,但以往的研究主要注重于铁矿床类型及成因的研究,对其伴生的关键金属研究程度不够。文章通过对大量文献开展深入调研工作,系统地总结了中国铁矿床中关键金属的基本特征和时空分布规律,并初步评价了铁矿床中关键金属的资源潜力。研究结果显示,铁矿作为大宗金属矿产主要伴生 REE、Sc、Nb、Ta、PGE、Co、Ni、Ga、Ge、Se、Cd、In、Te、Re 等关键金属以及 Mn、Ti、V 等有色金属;中国伴生关键金属铁矿床主要划分为 5 个成矿区:扬子地台西缘成矿区、长江中下游成矿区、鲁西成矿区、华北准地台北缘成矿区和白乃庙-东升庙成矿区。对铁矿床中伴生关键金属的赋存状态和超常富集机制的深入研究,将为关键金属资源综合利用和找矿勘查提供参考,并提高中国战略性关键金属资源储备和国际竞争力。

**关键词** 铁矿床;伴生关键金属;稀土元素;稀散元素;资源潜力

中图分类号:P618.4

文献标志码:A

## Iron deposits associated critical metals in China: Basic features, distribution, and resource potential

YANG ZhiShuang<sup>1,2</sup>, HUANG XiaoWen<sup>1</sup>, MENG YuMiao<sup>1</sup>, TANHOU MingRui<sup>1,2</sup>, TAN Mao<sup>1,2</sup>,

GAO YingHui<sup>1,2</sup> and ZHANG Xin<sup>1,2</sup>

(1 State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, Guizhou, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

### Abstract

The crucial role of critical metals in the high-tech development of a nation cannot be overstated. In recent years, due to the advancement of technological revolution and the growth of emerging industries, the competition for critical metal resources among countries has intensified. Critical metals in China correspond roughly to the “Four-type Rare Metals” and are primarily associated with various types of ore deposits. Iron deposits, one of the most widely distributed and well-studied metal deposit in China, has received considerable attention in terms of ore deposit types and genesis. However, research on the associated critical metals has been insufficient. Based on extensive literature research, this article systematically summarizes the basic features and distribution patterns of critical metals in Chinese iron deposits, and provides a preliminary assessment of the resource potential of these

\* 本文得到中国科学院百人计划项目、贵州省省级科技计划项目(编号:黔科合基础-ZK[2023]重点 050)、矿床地球化学国家重点实验室领域前沿项目(编号:202101)和国家自然科学基金贵州省后补助经费(编号:GZ2020SIG、GZ2021SIG)联合资助

第一作者简介 杨志爽,男,1999年生,硕士研究生,地球化学专业。Email:yangzhishuang4244@163.com

\*\* 通讯作者 黄小文,男,1985年生,研究员,主要从事成因矿物学与热液成矿作用研究。Email:huangxiaowen@mail.gyig.ac.cn

收稿日期 2023-08-03;改回日期 2024-01-24。秦思婷编辑。

critical metals. The study reveals that the associated critical metals in iron deposits are primarily those rare metals such as rare earth elements, Sc, Nb, Ta, PGE, Co, Ni, Ga, Ge, Se, Cd, In, Te and Re, as well as non-ferrous metals like Mn, Ti and V. The distribution area of associated critical metals in Chinese iron deposits could be classified into five metallogenic provinces: western margin of Yangtze Craton, middle-lower Yangtze River, western Shandong, northern margin of North China Craton and Bainaimiao-Dongshengmiao region. Intensive studies on the occurrence and super enrichment mechanisms of associated critical metals in iron deposits will provide valuable references for the comprehensive utilization of critical metal resources and mineral exploration. In addition, the related research will enhance China's critical metal resource reserves and international competition.

**Key words:** iron deposit, associated critical metal, rare earth element metals, dispersed element metals, resource potential

关键金属和关键矿产资源指的是现今社会所必需、但安全供应存在较高风险的一类矿产总称(Nguyen et al., 2008; Schulz, 2017; Gulley et al., 2018),它是各个国家按照自身发展需求所界定的,因此,其所包含的关键金属种类是变化的。中国的关键矿产资源主要与通常所讲的“四稀金属”(稀有、稀土、稀散和稀贵)大致对应(毛景文等, 2019; Hu et al., 2020)。其中,稀有金属包括Li、Be、Rb、Cs、Nb、Ta、Zr、Hf、W、Sn等,稀土金属包括稀土元素(Rare Earth Element)和Sc,稀散金属包括Ga、Ge、Se、Cd、In、Te、Re、Tl等,稀贵金属包括铂族元素(PGE)、Co、Cr、Ni等;除此之外,还包括一些其他重要金属,比如有色金属Sb、Sn、Ti、V和Mn等(王登红, 2019)。关键金属矿产通常有“稀”“细”“伴”特征(翟明国等, 2019),导致其在成矿理论研究和选冶利用中具有难示踪、难辨识和难分离3大难点。随着科技和新兴产业的发展,关键矿产资源的需求量将迅猛增加,关键金属显得愈发重要。

关键金属主要以伴生形式赋存于各种类型矿床,而铁矿床是中国分布最广泛、研究最成熟的金属矿床之一,它不仅作为重要的大宗矿产资源,还伴生大量的关键金属,对不同类型的铁矿床富集机制已取得比较清晰的认识,并提出了相应的成矿模式(张招崇等, 2014; 2021)。近年来,随着国家对关键金属资源的高度重视以及未来高科技产业对关键金属的巨大需求,铁矿中伴生关键金属的研究也得到了重视,并取得了初步进展。

文章通过对中国铁矿床中伴生关键金属的资料文献系统调研,总结了我国铁矿床中伴生关键金属的基本特征,包括赋存状态和富集规律等,初步探讨了关键金属在铁矿床中的超常富集机制;明确了铁矿床中关键金属的分布规律,以及重大地质事件对关键金属的控制作用。另外,根据已有的矿石品位数

据以及矿物中关键金属含量数据,初步计算了中国铁矿床中各类关键金属的资源量。以上研究成果为资源综合利用和找矿勘查提供了重要的理论支持,进而为中国战略性关键金属资源储备提供重要支撑。

## 1 中国铁矿类型和时空分布规律

中国铁矿资源丰富,总体呈现类型丰富、数量众多、品位较低和组分复杂的特点。铁矿类型主要有沉积变质型(48%)、岩浆型(16%)、矽卡岩型(15%)、火山岩型(8%)和沉积型(12%)(李厚民等, 2012; Zhang et al., 2014)。

沉积型和沉积变质型铁矿主要集中在华北克拉通及其边缘,有辽东-吉南、冀东-辽西、五台、鲁西-胶东、白云鄂博-狼山和吕梁-中条等成矿带;岩浆型铁矿主要集中在康滇、冀东-辽西和东天山-北山等成矿带;矽卡岩型铁矿主要集中在长江中下游、邯邢-临汾和鲁西-胶东等成矿带;火山岩型铁矿主要集中在康滇、阿尔泰、东天山-北山、长江中下游和西南三江等成矿带(李厚民等, 2012)。总的来说,中国铁矿相对集中在华北及其周缘、康滇和长江中下游等地区(李厚民等, 2012)。从成矿时代角度分析沉积变质型铁矿主要集中在太古代—古元古代,岩浆型铁矿主要集中在华力西期和中元古代,矽卡岩型铁矿主要集中在中生代,沉积型铁矿主要集中在元古代和晚古生代,而火山岩型铁矿在中生代、新元古代和元古宙均有出现(李厚民等, 2012)。

## 2 伴生关键金属铁矿类型和时空分布规律

### 2.1 伴生关键金属铁矿类型

铁矿床按照伴生关键金属类型可以划分为4类

(图1),包括:伴生稀土金属铁矿床、伴生稀贵金属铁矿床、伴生稀有金属铁矿床和伴生稀散金属铁矿床。

伴生稀土金属铁矿床数量占比26.7%(图1),其矿床类型主要有岩浆Fe-Ti-V矿床、铁氧化物-铜-金(Iron Oxide-Copper-Gold, IOCG)矿床、铁氧化物-磷灰石(Iron Oxide-Apatite, IOA)矿床、白云鄂博型铁矿床、矽卡岩铁矿床、沉积型铁矿床和沉积变质型铁矿床。伴生稀贵金属铁矿床数量占比42.7%(图1),其矿床类型主要有岩浆Fe-Ti-V矿床、IOCG矿床、IOA矿床、矽卡岩铁矿床和风化沉积型铁矿床。伴生稀有金属铁矿床数量占比1.3%(图1),最具代表性的是白云鄂博型铁矿床。伴生稀散金属铁矿床数量占比29.3%(图1),其矿床类型主要有岩浆Fe-Ti-V矿床、IOCG矿床、IOA矿床、矽卡岩铁矿床、沉积型铁矿床和沉积变质型铁矿床。

## 2.2 伴生关键金属铁矿床时空分布规律

已有的研究表明,岩浆Fe-Ti-V(-P)多金属矿床主要位于四川攀西和河北承德地区(图2),主要伴生REE、Sc、PGE、Co、Ni、Ga和Ge等金属;攀西地区有攀枝花、太和、白马和红格等矿床,承德地区有大庙和黑山等矿床。IOCG矿床主要分布于康滇和东准噶尔北缘地区(图2),主要伴生REE、Co、Ni、Ge、Re等金属;康滇地区有拉拉、大红山、迤纳厂和稀矿山等矿床,东准噶尔北缘地区仅有乔夏哈拉矿床。IOA矿床主要分布于长江中下游宁芜和庐枞等地区(图2),主要伴生REE、Co、Te等金属,如罗河、泥河、高村、和尚桥和姑山等矿床。矽卡岩铁矿床主要分布于长江中下游和鲁西地区(图2),主要伴生REE、Co、Ga、Ge、Se、Te、Cd、Re和In等金属;长江中下游地区有湖北程潮、大广山、铜绿山、铁山、金山店、安徽新桥、龙桥、白象山和朱冲等矿床,鲁西地区有莱芜和淄博金岭等矿床。沉积和沉积变质型铁矿床较少,且分布较分散(图2),主要伴生REE、Sc、Co、Ni等关键金属。Nb-REE-Fe矿床以白云鄂博矿床最具代表性,伴生大量的REE、Nb、Ta、Sc等金属。

中国伴生关键金属铁矿床成矿时代跨度较大,不同类型的铁矿床与不同区域的构造演化存在一定联系,按照成矿时代大致划分为中元古代—新元古代、早古生代—晚古生代和中生代—新生代3个成矿期(图3),不同时期的构造、岩浆活动导致了不同类型铁矿床的形成。

中元古代—新元古代,扬子地台受中条运动作用形成陆块基底,大量地幔岩浆上涌使陆块破裂并发育成陆内盆地,形成以云南大红山和迤纳厂为代表的一系列IOCG矿床;晋宁期—澄江期,扬子板块具有造山带、沉积盆地和地幔上涌侵位活动,形成以四川拉拉为代表的IOCG矿床。华北克拉通受吕梁运动作用影响下拼合,其后内部和边缘发生大规模拉张破裂,形成了白云鄂博裂谷和燕辽裂谷,白云鄂博逐渐发育为火山-沉积建造,华北克拉通内部岩浆活动强烈并沿裂隙充填,形成以承德地区钒钛磁铁矿床为代表的斜长岩-辉长岩建造。

早古生代—晚古生代,华北地区趋于稳定,沉积形成巨厚盖层,其后遭受地壳抬升运动导致大范围风化剥蚀,缺失晚奥陶世、志留纪、泥盆纪和早石炭世地层;华南地区二叠纪末期以来岩浆活动相对活跃,地幔柱活动作用下形成攀枝花、太和、红格和白马等一系列岩浆钒钛磁铁矿床。

中生代—新生代,华北克拉通遭受破坏,岩石圈减薄,岩浆作用开始活跃。鲁西地区形成莱芜和淄博金岭等矽卡岩矿床。长江中下游地区为陆内断块与陷裂交织,岩浆作用发育,形成宁芜和庐枞等火山盆地。

## 3 铁矿床中伴生关键金属赋存状态及其富集机制

### 3.1 铁矿床中的伴生稀土金属

稀土金属是指元素周期表ⅢB族中的钪、钇和15个镧系元素共17个元素的总称,分别为钪(Sc)、钇(Y)、镧(La)、铈(Ce)、镨(Pr)、钕(Nd)、钷(Pm)、铈(Sm)、铕(Eu)、钆(Gd)、铽(Tb)、镝(Dy)、钬(Ho)、铒(Er)、铥(Tm)、镱(Yb)、镱(Lu)元素。15个镧系元素和Y合称为稀土元素(REE),Sc与稀土元素性质相似,因此将其归入稀土金属讨论,但其不与稀土元素共生。按照化学性质相近和共生产原则,通常将La、Ce、Pr、Nd、Pm、Sm、Eu称为轻稀土元素,将Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、Y称为重稀土元素。

稀土元素在自然界主要以独立矿物、类质同象和离子状态3种形式存在。世界上已知稀土元素矿物或含稀土元素矿物250余种,中国主要的稀土元素矿物20余种,其中具有工业价值的矿物约10种,分别为独居石、氟碳铈矿、氟碳钙铈矿、氟碳铈

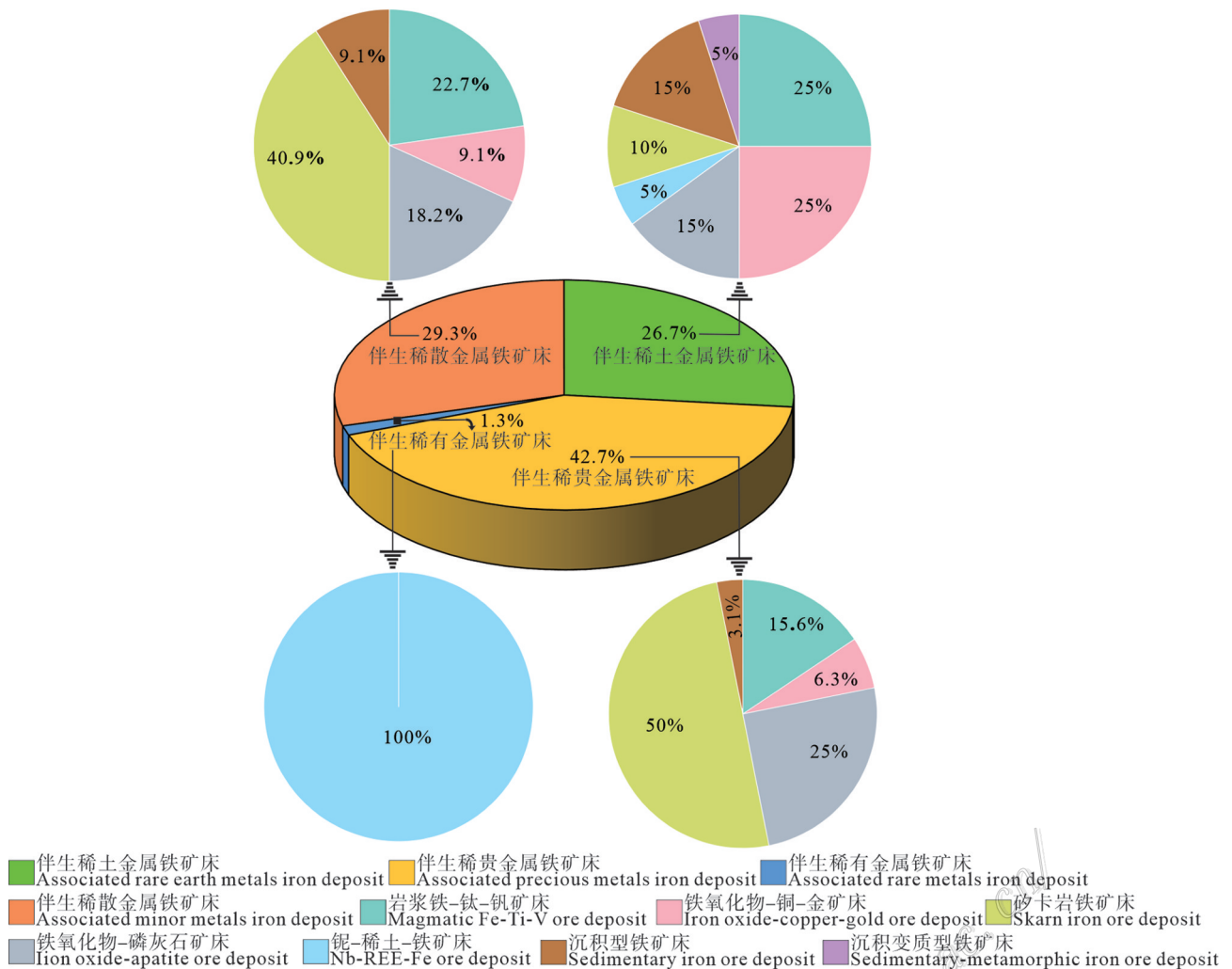


图1 中国伴生关键金属各类铁矿床比重复合饼图

Fig. 1 Composite pie charts showing the proportion of various associated critical metals in Chinese iron deposits

镧矿、褐帘石、烧绿石、磷钇矿、硅钨钇矿、褐钇铋矿和钽铋矿等(资料来源于《矿产资源工业要求参考手册》)。世界上Sc资源十分稀缺但市场需求量巨大,因为其在工业、5G芯片和光学领域的特殊用途,成为最贵重的金属之一(吕宪俊等, 1992),其氧化物4000~5000美元/千克,卤化物和金属120~250美元/克(U.S.Geological Survey, 2008~2023)。Sc主要赋存于铌铁矿、水钨石、锂云母、白云母、锡石、黑钨矿、绿柱石、电气石和锐钛矿等矿物中,并且钽常常作为黑钨矿、锡石、铌钇矿和铌钽铁矿的伴生组分被提取利用(资料来源于《矿产资源工业要求参考手册》,2014;2021)。

铁矿中伴生稀土金属主要是REE和Sc,REE的地壳丰度平均值为 $165.35 \times 10^{-6}$ ,Sc的地壳丰度为

$22 \times 10^{-6}$ (Rudnick et al., 2014)。据《矿产地质勘查规范》(DZ/T 0242-2002)2021年报批稿,原生稀土矿床边界品位要求稀土氧化物总量 $w(\text{REO})$ :0.5%~1.0%,最低工业品位要求 $w(\text{REO})$ :1.5%~2.0%;风化壳离子吸附型轻稀土矿床边界品位要求 $w(\text{REO})$ :0.020%~0.033%、重稀土矿床 $w(\text{REO})$ :0.035%~0.065%,轻稀土矿床最低工业品位要求 $w(\text{REO})$ :0.035%~0.065%、重稀土矿床 $w(\text{REO})$ :0.050%~0.098%。Sc一般在精矿中提取,因此没有具体的工业指标。

### 3.1.1 内生作用有关的伴生稀土金属铁矿床

岩浆Fe-Ti-V(-P)矿床在四川攀西、河北承德和陕西汉中等地区均有分布,伴生REE的矿床分布在攀西和承德地区,伴生Sc的矿床主要分布在攀西地

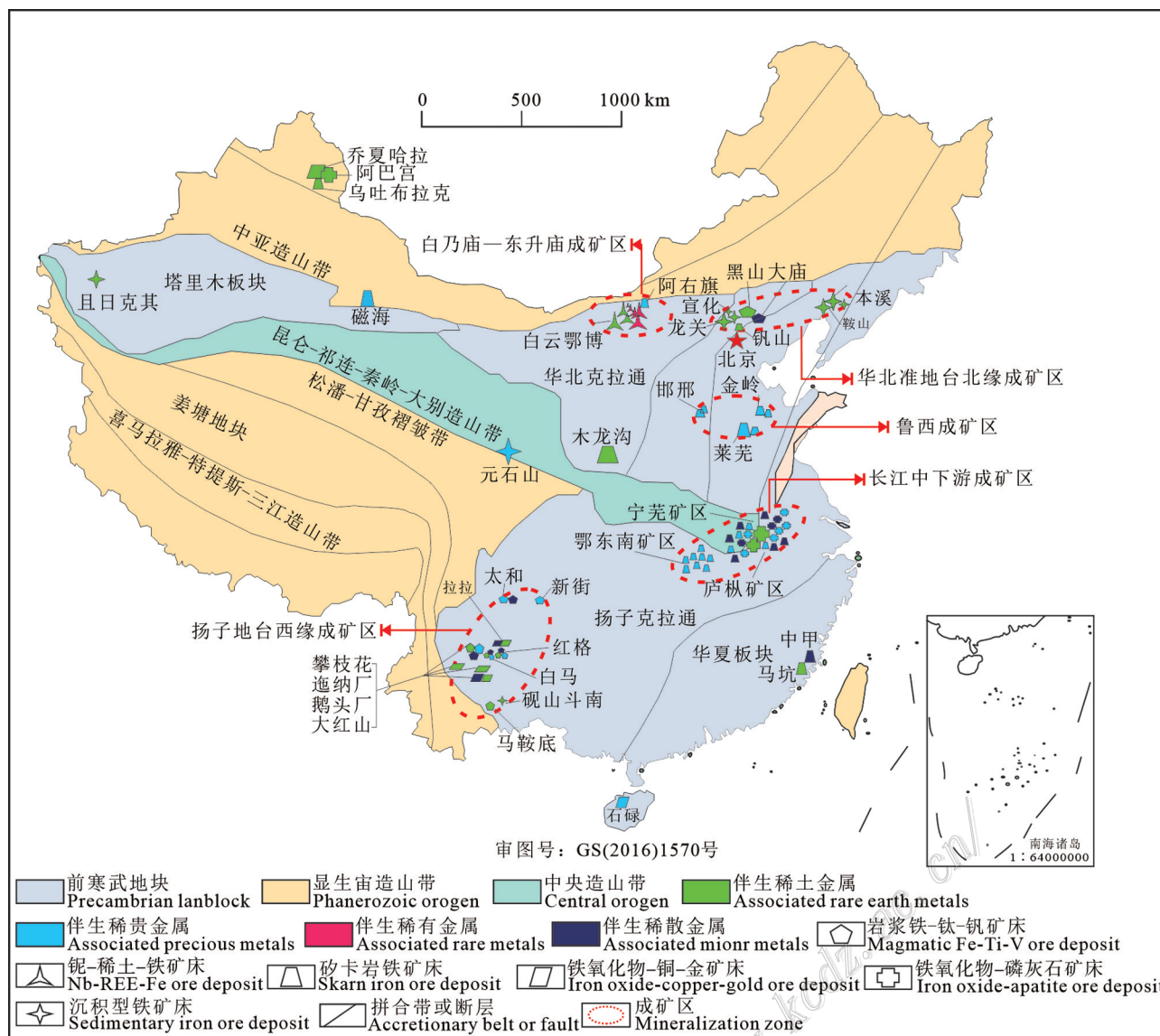


图 2 中国伴生关键金属铁矿空间分布图(底图据标准地图服务系统: <http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/>)

Fig. 2 Spatial distribution map of associated critical metal iron deposits in China (China base map is from Standard Map Service System: <http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/>)

区。攀枝花矿床矿石中含有少量的稀土元素,品位约  $3.010 \times 10^{-6} \sim 325.53 \times 10^{-6}$  (温春齐等, 2002; Zhong et al., 2006; Zhou et al., 2008); 承德大庙-黑山钒钛磁铁矿床产于斜长岩杂岩体中, 矿石主要为斜长岩、苏长岩、铁磷矿石以及钒钛磁铁矿(周永昶等, 1989), 斜长岩的 REE 约  $21.54 \times 10^{-6} \sim 104.68 \times 10^{-6}$ , 苏长岩约  $25.60 \times 10^{-6} \sim 224.52 \times 10^{-6}$ , 铁磷矿石约  $275.58 \times 10^{-6} \sim 1060.91 \times 10^{-6}$ , 钒钛磁铁矿约  $13.71 \times 10^{-6} \sim 50.71 \times 10^{-6}$  (周永昶等, 1989)。杂岩体中赋存大量磷灰石, 磷灰石独立矿物平均 REE 约  $1565.95 \times 10^{-6}$  (周永昶等,

1989)。

攀枝花、红格等钒钛磁铁矿床不仅伴生 V、Co、Ni 等金属, 还伴生 Sc (吕宪俊等, 1992)。钒的岩浆作用地球化学行为与  $Fe^{2+}$  和  $Mg^{2+}$  关系密切, 晶体化学性质相似, 同时受  $SiO_2$  的间接影响, 在岩浆岩中含量低, 分散程度大, 难以形成独立矿床, 多伴生于暗色造岩矿物, 因此在岩浆活动早期 Sc 很难富集, 而更倾向于在岩浆作用晚期富集(郭彩莲等, 2020)。钒可以类质同象替换铁, 赋存于钛普通辉石、钛铁矿和钛磁铁矿等矿物(吕宪俊等, 1992; 黄霞光等,

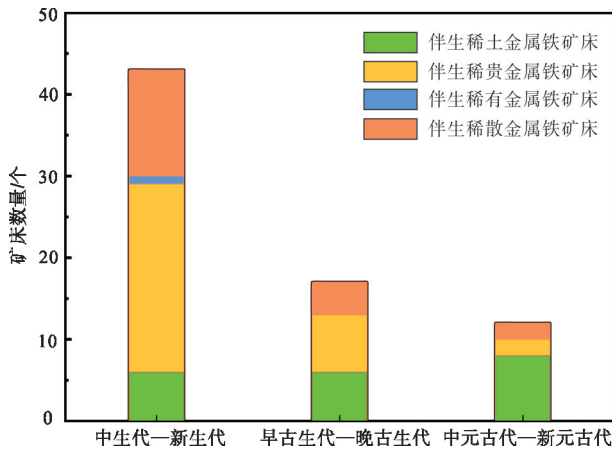


图3 中国伴生关键金属铁矿床成矿时代统计图

Fig. 3 Statistics on the mineralization ages of iron deposits in China containing associated critical metals

2016)。普通辉石与角闪石中 $w(\text{Sc}_2\text{O}_3)$ 最高,可达 $68 \times 10^{-6}$ ,其次是钛铁矿, $w(\text{Sc}_2\text{O}_3)$ 约 $33 \times 10^{-6}$ ,钒钛磁铁矿中 $w(\text{Sc}_2\text{O}_3)$ 约 $13 \times 10^{-6}$ (表1);普通辉石、角闪石和钛铁矿化学能谱分析表明,钪的富集可能与Mg、Fe类质同象置换存在关联(黄霞光等, 2016)。

中国矽卡岩铁矿床通常体量小,但分布较集中,主要有河北邯邢矿集区、山西临汾矿集区、河南安林矿集区、山东鲁西矿集区和长江中下游鄂东南矿集区(金子梁, 2017)。关于矽卡岩铁矿床伴生稀土金属的研究和报道较少,有限的统计资料显示矽卡岩铁矿床稀土金属品位较低。譬如,位于阿尔泰山南缘成矿区的乌吐布拉克矿床,磁铁矿的REE品位为 $4.39 \times 10^{-6} \sim 156.94 \times 10^{-6}$ ,围岩的REE品位为 $105.82 \times 10^{-6} \sim 324.19 \times 10^{-6}$ ,且均为轻稀土元素富集型(杨富全等, 2011)。陕西木龙沟矿床受控于秦岭构造带东西向断裂,区内可见震旦系白云岩和燕山期中酸性侵入体,围岩花岗闪长岩REE品位为 $188 \times 10^{-6} \sim$

表1 岩浆Fe-Ti-V矿床中钪在各矿物中的含量及分配占比  
Table 1 Scandium content in magmatic Fe-Ti-V deposits and distribution percentage of each mineral

矿物种类	矿物含量/%	$w(\text{Sc}_2\text{O}_3)$ /%	Sc分配占比/%
辉石+角闪石	37.27	0.0068	66.70
钛铁矿	16.99	0.0033	15.09
磁铁矿	18.14	0.0013	6.30
长石	6.08	0.00009	0.15
矿泥	5.91	0.0037	5.76
其他(橄榄石等)	15.34	0.0015	6.02

注:据黄霞光等(2016)修改。

$253.8 \times 10^{-6}$ (柯昌辉等, 2013; 李六权, 2019),因此,推测矽卡岩铁矿稀土金属成矿潜力较低。

值得注意的是,伴随岩浆热液作用过程中形成富含REE的副矿物,如褐帘石、萤石和磷灰石等矿物。譬如,位于河北钒山层状岩体中的磷铁矿床,其岩性为钾质偏碱性层状超镁铁-正长岩杂岩体,并遭受3期岩浆侵入,而钒山磷铁矿产于第一期侵入岩中(程春, 2001; Hou et al., 2015)。第一期侵入岩稀土元素含量最高,且为轻稀土元素富集型,辉石岩、黑云母辉石岩、磷灰石岩中REE品位依次递增,尤其是磷灰石岩中REE平均品位高达 $3117.7 \times 10^{-6}$ ,磷灰石矿物的REE品位高达 $4053.41 \times 10^{-6}$ (程春, 2001)。程春(2001)认为残余岩浆中由于 $\text{Ca}^{2+}$ 缺乏,导致REE较容易发生类质同象进入磷灰石晶格A位置。这也说明磷灰石作为REE的良好载体,在以后稀土金属找矿勘查中具有重要的指示意义。

铁氧化物-磷灰石矿床又称为基鲁纳型(Kiruna-type)铁矿(Kolker, 1982; Fleischer, 1983; Frietsch et al., 1995),中国学者习惯将其称为陆相火山岩型铁矿或玢岩型铁矿,主要分布在中国的长江中下游成矿带的宁芜和庐枞等火山岩盆地(中国科学院地球化学研究所, 1987; 余金杰等, 2002)。IOA矿床中含有较高含量的磷灰石,余金杰等(2002)对宁芜地区玢岩型铁矿床的磷灰石进行REE分析,并与国际上典型IOA矿床中磷灰石的REE进行对比,发现早期磷灰石的 $w(\text{REE})$ 高达 $3031.4 \times 10^{-6} \sim 12080 \times 10^{-6}$ ,晚期磷灰石 $w(\text{REE})$ 小于 $2000 \times 10^{-6}$ ,且为轻稀土元素富集型。位于阿尔泰山地区的阿巴宫矿床中磷灰石与磁铁矿共生,矿石中磷灰石含量约11%,磷灰石的 $w(\text{REE})$ 为 $1352.96 \times 10^{-6} \sim 6986.33 \times 10^{-6}$ ,平均约 $3717.7 \times 10^{-6}$ (刘锋等, 2009)。

铁氧化物-铜-金矿床是近三十年提出的重要铁矿类型(Hitzman et al., 1992),中国比较典型的IOCG矿床主要分布在3个成矿带:西南康滇地区、新疆东天山地区(无明显REE富集)和东准噶尔北缘地区(陈伟等, 2019)。西南康滇地区规模大小不一的铁铜矿床有20余个,典型矿床譬如四川拉拉、云南大红山和迤纳厂等中大型Fe-Cu矿床,成矿阶段主要分为早期Fe矿化和晚期Cu矿化,并伴随钠化、Fe-Na(-Ca)蚀变、钾化和碳酸岩化作用(Zhou, 2011; Chen et al., 2012; Zhou et al., 2014)。前人研究认为,稀土矿物的形成可能与携带REE的成矿流体与有效载体反应结合有关,朱利岗(2019)提出由于岩浆分

异作用形成的富含REE成矿流体与碳酸岩、氯化物、氟化物、硫酸盐和磷酸盐等相互作用,沉淀富集形成稀土矿床。四川拉拉矿床的REE最高可达 $7700 \times 10^{-6}$ (Chen et al., 2012),云南迤纳厂矿床的REE最高可达 $6650 \times 10^{-6}$ (Yang et al., 2005; Li et al., 2015),REE主要赋存于黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿、磁铁矿等硫化或氧化矿物。

东准噶尔北缘地区岩浆岩显著发育且主要是晚古生代钙碱性花岗闪长岩和镁铁质-超镁铁质侵入岩(梁培, 2018),成矿阶段主要有矽卡岩化、早期Fe矿化和晚期Cu矿化。相较于西南康滇地区,东准噶尔北缘地区REE富集程度偏弱,如乔夏哈拉铁铜矿床,仅有铜矿石中REE富集且磁铁矿矿石中不富集,品位为 $205.38 \times 10^{-6} \sim 2021.68 \times 10^{-6}$ ,平均品位约 $736.26 \times 10^{-6}$ ,REE赋存矿物及状态不明确(闫升好, 2005; 应立娟等, 2006)。

白云鄂博矿床稀土金属资源量占据世界首位,储量巨大(Ho, 1935; 李毓英, 1959),过去几十年对其开展了大量研究,但仍面临矿床成因不清楚、成矿物质来源模糊、赋存状态及机制不明确以及提取利用困难等“卡脖子”问题。白云鄂博矿床成因争议主要有沉积热液交代成因(孟庆润, 1982; Campbell, 1999)、火成碳酸岩成因(周振玲等, 1980; 刘铁庚等, 2012; Wang et al., 2019)以及海底火山碳酸岩喷发成因、微晶丘成因、陨石撞击成因等观点,但是单一的模型很难完美地解释白云鄂博复杂的形成机制,成矿过程可能是多期次的(张培善等, 2001; Ling et al.,

2013; Smith et al., 2015; Fan et al., 2016; Yang et al., 2016; Song et al., 2018)。

白云鄂博矿床铁矿石主要是赤铁矿和磁铁矿,曾玫吾等(1981)和Wei等(1983)将磁铁矿按形成时间分为3类,第一类磁铁矿形成于沉积阶段;第二类磁铁矿是沉积磁铁矿遭受热液改造作用形成;第三类磁铁矿是晚古生代花岗岩侵入接触交代白云岩形成。其中,第一类磁铁矿比第二类磁铁矿更富集REE,REE进一步富集可能与热液作用有关(Huang et al., 2015)。磁铁矿遭受富含稀土元素的热液改造作用发生强烈的热液蚀变,导致磁铁矿的铁品位贫化,并形成各种富含REE的条带状或浸染状中-低品位磁铁矿石,如萤石型、霓石型和钠闪石型等铁矿石(曹荣龙等, 1994)。

侯晓志等(2022)统计了白云鄂博东矿区发育6种类型铁矿石(全铁 $w(\text{TFe}) \geq 20\%$ ,稀土氧化物总量 $w(\text{REO}) \geq 1\%$ )和2种类型稀土矿石(图4),分别为萤石型钕稀土铁矿石(FT)、霓石型钕稀土铁矿石(AT)、钠闪石型钕稀土铁矿石(RT)、云母型钕稀土铁矿石(BT)、白云石型钕稀土铁矿石(DT)、块状钕稀土铁矿石(MT)、霓石型钕稀土矿石(A)和白云石型钕稀土矿石(D)。其中,稀土元素含量最高的2种矿石类型是AT型和FT型, $w(\text{REO})$ 分别为8.215%和9.72%(表2)。

虽然白云鄂博矿床Sc资源储量,但是分布稀疏,主要以类质同象形式赋存于其他矿物, $w(\text{Sc}_2\text{O}_3)$ 最高的矿石类型是A型和AT型(图4), $w(\text{Sc}_2\text{O}_3)$ 最高

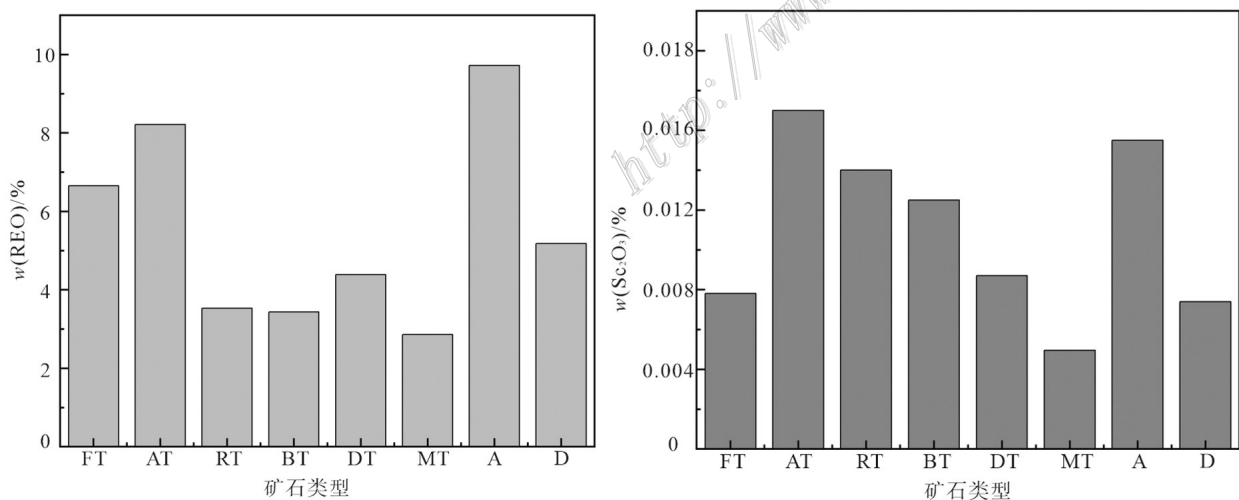


图4 白云鄂博东矿铁矿石中稀土元素含量(据侯晓志等, 2022 修改)

Fig. 4 Content of rare earth elements in iron ore of Bayan Obo Dong Mine (modified from Hou et al., 2022)

表2 白云鄂博东矿床中铁矿石稀土元素含量(w(B)/%)

Table 2 Rare earth elements content (w(B)/%) of iron ore from Bayan Obo deposit

样品编号	矿石类型	w(TFe)/%	w(Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )/%	w(REO)/%	$\bar{w}(\text{Sc}_2\text{O}_3)/\%$	$\bar{w}(\text{REO})/\%$	资料来源
1	FT	29.38	0.0081	6.27	0.0078	6.655	侯晓志等, 2022
2	FT	27.30	0.0075	7.04			金海龙等, 2021
3	AT	21.04	0.018	7.03	0.017	8.215	侯晓志等, 2022
4	AT	31.30	0.016	9.40			金海龙等, 2021
5	RT	27.48	0.012	3.83	0.014	3.53	侯晓志等, 2022
6	RT	33.65	0.016	3.23			金海龙等, 2021
7	BT	25.94	0.009	3.64	0.0125	3.435	侯晓志等, 2022
8	BT	33.65	0.016	3.23			金海龙等, 2021
9	DT	28.24	0.0095	4.81	0.0087	4.385	侯晓志等, 2022
10	DT	22.46	0.0079	3.96			金海龙等, 2021
11	MT	50.57	0.0047	1.92	0.00495	2.86	侯晓志等, 2022
12	MT	55.98	0.0052	3.80			金海龙等, 2021
13	A	13.78	0.015	8.63	0.0155	9.72	侯晓志等, 2022
14	A	18.24	0.016	10.81			金海龙等, 2021
15	D	11.12	0.005	3.29	0.0074	5.175	侯晓志等, 2022
16	D	16.26	0.0098	7.06			金海龙等, 2021

的矿物是铈钇矿,平均约2.45%,铈铁矿中平均含约1.263%,磁铁矿中的平均约0.005%(杨波等, 2022)。

### 3.1.2 外生作用有关的伴生稀土金属铁矿床

河北宣化-龙关一带分布着著名的浅海相沉积型宣龙式铁矿,矿体赋存于中元古界长城系串岭沟组底部,矿石以赤铁矿为主,多见肾状和鲕状结构,REE品位 $116.6 \times 10^{-6} \sim 240.6 \times 10^{-6}$ ,平均约 $162.7 \times 10^{-6}$ ,尚未达到目前的工业品位(李志红等, 2012)。鞍山-本溪地区的铁矿床夹存于鞍山群地层,磁铁矿矿石以及黄铁矿化严重的围岩Sc品位约 $20 \times 10^{-6} \sim 50 \times 10^{-6}$ ,可作为伴生金属在尾矿中提取利用(王乐乐等, 2012)。

热液活动对沉积型铁矿床的叠加改造作用可能促进稀土元素的富集。譬如,新疆且日克其铁矿床属于喷流沉积型菱铁矿床(李金虎等, 2011),REE主要赋存于菱铁矿中,品位约 $868.76 \times 10^{-6} \sim 1024.57 \times 10^{-6}$ ,属轻稀土元素富集型。李金虎等(2011)认为,稀土元素相对于 $\text{Fe}^{2+}$ 具有较小的离子半径,REE更容易进入菱铁矿,再者菱铁矿结晶晚,REE更倾向于在残余流体中富集,因此,晚结晶的菱铁矿具有较高的稀土元素含量。

大洋水成铁锰矿床可能具备稀土元素富集的潜力,铁锰氧化物可以直接从海水中吸附REE并大量沉淀,但由于稀土元素在海水中滞留时间大约只有

几十年到几百年,稀土元素分布不均匀以及氧化还原条件的差异性致使大洋铁锰结核中稀土元素总量参差不齐。

### 3.2 铁矿床中伴生的稀贵金属

铁矿床中伴生的稀贵金属主要是铂族元素(PGE)、Co和Ni等(表4),PGE是钯(Pd)、铂(Pt)、锇(Os)、依(Ir)、钌(Ru)、铑(Rh)等元素的总称,具有高度亲铁性,按照熔融温度将其分为IPGE(Os、Ir、Ru)和PPGE(Pd、Pt、Rh),前者主要赋存于尖晶石等矿物相,后者主要赋存于金属硫化物相。自然界中可见PGE的独立矿物,其也可以天然合金或者金属互化物形式存在,其具有较强亲硫性,常以类质同象赋存于磁黄铁矿、黄铜矿和镍黄铁矿等硫化物。

PGE的大陆地壳丰度平均值约 $0.18 \times 10^{-6}$ ,其中,Ru、Rh、Pd、Os、Ir、Pt的大陆地壳丰度分别为 $0.1 \times 10^{-6}$ 、 $0.06 \times 10^{-6}$ 、 $0.4 \times 10^{-6}$ 、 $0.05 \times 10^{-6}$ 、 $0.05 \times 10^{-6}$ 和 $0.4 \times 10^{-6}$ (Wedepohl, 1995),Co的地壳丰度为 $25 \times 10^{-6}$ ,Ni的地壳丰度为 $84 \times 10^{-6}$ (Rudnick et al., 2014)。

铂族元素常与铜、镍、钴、金、硒、碲等共生或伴生,其没有专门的工业指标。参考1987年出版的《矿产工业要求参考手册》,硫化钴或砷化钴矿床中Co最低工业品位要求为0.03%~0.06%,钴土矿床中Co最低工业品位要求为0.05%,据《矿产地质勘查规范-铜、铅、锌、银、镍、钼》(DZ/T0214-2020),硫化镍



表 3 中国铁矿床中伴生稀土金属品位及资源量统计

Table 3 Statistics on grade and resources of associated rare earth metals in iron ore deposits of China

矿床类型	矿区/矿床	伴生稀土金属及矿石品位	铁矿石储量	伴生稀土金属资源量*	成矿时代/Ma	资料来源
岩浆 Fe-Ti-V(-P) 矿床	四川攀枝花	Sc: $20 \times 10^{-6} \sim 60 \times 10^{-6}$ $\Sigma$ REE: $3.01 \times 10^{-6} \sim 325.53 \times 10^{-6}$	71.8 亿 t	Sc: ~25 万 t REE: ~117.9 万 t	~260	温春齐等, 2002; Zhong et al., 2006; Zhou et al., 2008; 王录锋等, 2022
	四川红格	Sc: $20 \times 10^{-6} \sim 60 \times 10^{-6}$	12 亿 t	Sc: ~7.11 万 t	~260	朱秀松等, 1981; 宋谢炎等, 2023
	四川太和	Sc: $20 \times 10^{-6} \sim 60 \times 10^{-6}$	9.5 亿 t	Sc: ~3.8 万 t	~260	宋谢炎等, 2023
	四川白马	Sc: $20 \times 10^{-6} \sim 60 \times 10^{-6}$	8.7 亿 t	Sc: ~3.4 万 t	~260	宋谢炎等, 2023
	云南马鞍山	Sc: $\sim 57 \times 10^{-6}$	0.7 亿 t	Sc: ~4023 t	~260	何照波等, 2022
IOCG 矿床	河北大庙	$\Sigma$ REE: $1565.9 \times 10^{-6}$ (磷灰石 30%)	3.99 亿 t	REE: ~102.38 万 t	~1740	周永昶等, 1989
	四川拉拉	$\Sigma$ REE: $\sim 2500 \times 10^{-6}$	1444.9 万 t	REE: ~3.6 万 t	~1086	Chen et al., 2012
	云南大红山	$\Sigma$ REE: $50 \times 10^{-6} \sim 66 \times 10^{-6}$	4.24 亿 t	REE: ~2.46 万 t	~1115	Jin et al., 2017; 杨光树等, 2020
	云南迤纳厂	$\Sigma$ REE: $1446.83 \times 10^{-6} \sim 11259.23 \times 10^{-6}$	2.46 亿 t	REE: ~1.28 万 t	~1700	Li et al., 2015; 温利刚等, 2018
	云南鹅头厂	$\Sigma$ REE: $144.17 \times 10^{-6} \sim 305.87 \times 10^{-6}$	1817 万 t	REE: ~4088 t	~1450	温利刚等, 2019
IOA 矿床	乔夏哈拉	$\Sigma$ REE: $205.38 \times 10^{-6} \sim 2021.68 \times 10^{-6}$	949.6 万 t	REE: ~1.05 万 t	~380	杨富全等, 2011
	阿巴宫	$\Sigma$ REE: $1352.96 \times 10^{-6} \sim 6986.33 \times 10^{-6}$ (磷灰石 11%)	465 万 t	REE: ~2100 t	~220	刘锋等, 2009
	宁芜	$\Sigma$ REE: $\sim 126.7 \times 10^{-6}$	27 亿 t	REE: ~14.2 万 t	~130	余金杰等, 2002; 张乐骏等, 2011
	庐枞	$\Sigma$ REE: $\sim 227.9 \times 10^{-6}$	10 亿 t	REE: ~8560 t	~135	车英丹等, 2017
	Nb-REE-Fe 矿床	Sc: $49.5 \times 10^{-6} \sim 170 \times 10^{-6}$ $\Sigma$ REE: $28600 \times 10^{-6} \sim 97200 \times 10^{-6}$ Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> : $1400 \times 10^{-6}$	14 亿 t	REE: ~1.1 亿 t Sc: ~6.06 万 t Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> : ~660 万 t	~1288	范亚洲等, 2014; 谢玉玲等, 2019; 杨波等, 2022
矽卡岩铁矿床	乌吐布拉克	$\Sigma$ REE: $4.39 \times 10^{-6} \sim 156.94 \times 10^{-6}$	996 万 t	REE: ~155.1 t	~240	杨富全等, 2011
	陕西木龙沟	$\Sigma$ REE: $188 \times 10^{-6} \sim 253.8 \times 10^{-6}$	1925 万 t	REE: ~4244.6 t	~150	柯昌辉等, 2013; 李六权, 2019
	河北钒山 (热液?)	$\Sigma$ REE: $\sim 4053.41 \times 10^{-6}$ (磷灰石 12.8%)	6717 万 t	REE: ~3.48 万 t	~220	程春, 2001; Hou et al., 2015
沉积型铁矿床	新疆且日克其	$\Sigma$ REE: $740 \times 10^{-6} \sim 820 \times 10^{-6}$	1.1 亿 t	REE: ~10.4 万 t	~430	李金虎等, 2011
	云南斗南	$\Sigma$ REE: $15.04 \times 10^{-6} \sim 155.89 \times 10^{-6}$	690 万 t	REE: ~586.5 t	~240	符亚洲等, 2017
	宣化-龙关	$\Sigma$ REE: $\sim 126.7 \times 10^{-6}$	3.6 亿 t	REE: ~4.5 万 t	~1660	李志红等, 2012
沉积变质型铁矿床	鞍山-本溪	Sc: $20 \times 10^{-6} \sim 50 \times 10^{-6}$	127 亿 t	Sc: ~40 万 t	~1800	王乐乐等, 2012

注: 矿石储量数据及部分伴生资源储量数据来源于全国地质资料馆; 伴生稀土金属资源量\* = 铁矿石储量 × 伴生稀土金属及矿石品位。

矿原生矿石最低工业品位 0.3%~0.6%、氧化矿石最低工业品位 1%。

### 3.2.1 内生作用有关的伴生稀贵金属铁矿床

在幔源岩浆有关的富含磁铁矿的超镁铁-镁铁质层状侵入岩体中, 发现了富集 PGE 的现象, 磁铁矿中 (Pt+Pd) 最高可达  $10 \times 10^{-6} \sim 15 \times 10^{-6}$  (王敏芳等, 2014), 如美国 Minnesota 洲 Duluth 岩体 (Hauck et al., 1997)、加拿大 Coldwell 岩体 (Barrie et al., 2002)、

南非 Stella (Maier et al., 2003) 和 Bushveld 岩体 (Barnes et al., 2004)。

攀西地区攀枝花、红格、太和、白马、新街、黑古田等钒钛磁铁矿床伴生的 Co 和 Ni 相当可观 (郑析科, 2020), 块状矿石中 Co 品位最高, 可达  $290 \times 10^{-6}$  (宋谢炎等, 2023), Co<sup>2+</sup> 可以类质同象置换 Fe<sup>2+</sup> (罗金华等, 2015), 在磁黄铁矿和黄铁矿等矿物中, 品位高达  $100 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$  (赵俊兴等, 2019; 吴强, 2020)。

表4 中国铁矿床中伴生稀贵金属品位及资源量统计

Table 4 Statistics on the grade and resources of associated rare and precious metals in iron ore deposits of China

矿床类型	矿区/矿床	伴生稀贵金属及矿石品位	铁矿石储量	伴生稀贵金属资源量*	成矿时代/Ma	资料来源	
岩浆 Fe-Ti-V 矿床	四川攀枝花	Co: $100 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$ , Ni: $80 \times 10^{-6} \sim 150 \times 10^{-6}$	71.8 亿 t	Co: ~90 万 t, Ni: ~70 万 t	~260	郑析科, 2020	
	四川红格	Co: $\sim 162.56 \times 10^{-6}$ , Ni: $\sim 270 \times 10^{-6}$	12 亿 t	Co: ~19 万 t, Ni: ~32 万 t	~260	郑析科, 2020	
	四川白马	Co: $100 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$ , Ni: $\sim 160 \times 10^{-6}$	8.7 亿 t	Co: ~13 万 t, Ni: ~14 万 t	~260	郑析科, 2020	
	四川太和	Co: $100 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$	9.5 亿 t	Co: ~14.2 万 t	~260	郑析科, 2020	
	四川新街	Co: $\sim 118.36 \times 10^{-6}$	0.3 亿 t	Co: ~3550 t	~260	郑析科, 2020	
IOCG 矿床	四川拉拉	Co: $6800 \times 10^{-6} \sim 8500 \times 10^{-6}$	1444.9 万 t	Co: ~11.05 万 t	~850	朱志敏等, 2009	
	海南石碌	Co: $\sim 2900 \times 10^{-6}$	2.27 亿 t	Co: ~65.8 万 t	~880	Xu et al., 2015	
IOA 矿床	安徽罗河	Co: $\sim 35 \times 10^{-6}$	5 亿 t	Co: ~1.75 万 t	~130	石磊等, 2023	
	安徽泥河	Co: $\sim 37 \times 10^{-6}$	2.1 亿 t	Co: ~7700 t	~130	石磊等, 2023	
	安徽高村	Co: $\sim 41 \times 10^{-6}$	1.2 亿 t	Co: ~4920 t	~130	石磊等, 2023	
	安徽和尚桥	Co: $\sim 34 \times 10^{-6}$	1.1 亿 t	Co: ~4920 t	~130	石磊等, 2023	
	江苏梅山	Co: $\sim 43 \times 10^{-6}$	3.3 亿 t	Co: ~1.4 万 t	~130	石磊等, 2023	
	安徽姑山	Co: $\sim 29 \times 10^{-6}$	3.2 亿 t	Co: ~9000 t	~130	石磊等, 2023	
	安徽大包庄	Co: $\sim 70 \times 10^{-6}$	9800 万 t	Co: ~6860 t	~130	石磊等, 2023	
	安徽黄屯	Co: $\sim 55 \times 10^{-6}$	6100 万 t	Co: ~3355 t	~130	石磊等, 2023	
矽卡岩铁矿床	河北邯邢	Co: $\sim 120 \times 10^{-6}$	10 亿 t	Co: ~12 万 t	~125	Zhu et al., 2016	
	山东莱芜	Co: $\sim 200 \times 10^{-6}$	534.9 万 t	Co: ~1069 t	~130	段壮, 2019	
	山东淄博金岭	Co: $\sim 147 \times 10^{-6}$	5000 万 t	Co: ~7350 t	~130	方邵平等, 2017	
	新疆磁海	Co: $\sim 100 \times 10^{-6}$ (磁铁矿 90%)	9837 万 t	Co: ~9000 t	~280	王玉往等, 2018	
	湖北大广山	Co: $\sim 220 \times 10^{-6}$	1.8 亿 t	Co: ~4150 t	~140	魏克涛等, 2021	
	湖北张泗朱	Co: $\sim 500 \times 10^{-6}$	500 万 t	Co: ~2500 t	~140	魏克涛等, 2021	
	湖北许家咀	Co: $\sim 290 \times 10^{-6}$	388 万 t	Co: ~1100 t	~140	魏克涛等, 2021	
	湖北程潮	Co: $\sim 170 \times 10^{-6}$	1.6 亿 t	Co: ~1.27 万 t	~140	魏克涛等, 2021	
	湖北铁山	Co: $\sim 170 \times 10^{-6}$	1.6 亿 t	Co: ~3.03 万 t	~140	魏克涛等, 2021	
	湖北铜绿山	Co: $\sim 120 \times 10^{-6}$	2139 万 t	Co: ~2500 t	~140	魏克涛等, 2021	
	湖北金山店	Co: $\sim 67 \times 10^{-6}$	1.1 亿 t	Co: ~7178 t	~130	石磊等, 2023	
	安徽龙桥	Co: $\sim 110 \times 10^{-6}$	1 亿 t	Co: ~1.08 万 t	~130	石磊等, 2023	
	安徽朱冲	Co: $\sim 190 \times 10^{-6}$	5164 万 t	Co: ~9028 t	~140	石磊等, 2023	
	安徽白象山	Co: $\sim 80 \times 10^{-6}$	1.4 亿 t	Co: ~1.05 万 t	~130	石磊等, 2023	
	安徽新桥	Co: $\sim 113 \times 10^{-6}$	1.3 亿 t	Co: ~1.4 万 t	~140	石磊等, 2023	
	内蒙古阿右旗	Co: $\sim 270 \times 10^{-6}$	3000 万 t	Co: ~8100 t	~310	陈其平等, 2009	
	沉积型铁矿床	青海元石山	Co: $\sim 470 \times 10^{-6}$ , Ni: $\sim 840 \times 10^{-6}$	561 万 t	Co: ~4378 t, Ni: ~7.8 万 t	~30	刘福祥等, 2007

注: 矿石储量数据及部分伴生资源储量数据来源于全国地质资料馆; 伴生稀贵金属资源量\* = 铁矿石储量 × 伴生稀贵金属及矿石品位。

四川拉拉 IOCG 矿床位于扬子地块西缘川滇岛弧带, 伴生大量的 Co 和 Ni (Zhao et al., 2013), 黄铁矿中  $w(\text{Co})$  最高, 可达  $6800 \times 10^{-6} \sim 8570 \times 10^{-6}$ , 其次是白铁矿 ( $4800 \times 10^{-6} \sim 14\,700 \times 10^{-6}$ ) 和黄铜矿 ( $87 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$ ), Ni 主要赋存于硫镍黄铁矿, 含量约  $600 \times 10^{-6}$  (朱志敏等, 2009)。海南石碌 IOCG 矿床中 Co 主要赋存于黄铁矿、磁黄铁矿和黄铜矿, 矿石中 Co

品位约  $2940 \times 10^{-6}$ , 少部分以钴独立矿物包裹于黄铁矿裂隙 (Xu et al., 2015)。

中国长江中下游地区众多的 IOA 矿床不仅蕴含铁、铜等大宗金属资源, 还伴生大量的钴, 如罗河、泥河、高村、和尚桥、姑山、大包庄和梅山等矿床中黄铁矿  $w(\text{Co})$  最高, 介于  $19 \times 10^{-6} \sim 5639 \times 10^{-6}$ , 而磁黄铁矿和磁铁矿等矿物中  $w(\text{Co})$  较低, 仅  $20 \times 10^{-6}$  (石磊等,

2023)。前人研究认为,Co离子、Fe离子的半径和电负性相近,在内生成矿作用过程中,Co离子可以类质同象置换铁硫化物及铁氧化物中Fe离子,并且温度对黄铁矿中Co含量具有一定控制作用,如安徽罗河铁矿床早期高温黄铁矿 $w(\text{Co})$ 高达 $1000 \times 10^{-6} \sim 5000 \times 10^{-6}$ ,晚期低温黄铁矿中 $w(\text{Co})$ 仅约 $1 \times 10^{-6} \sim 10 \times 10^{-6}$ (石磊等, 2023)。

Co富集程度与黄铁矿存在正相关关系,如河北邯邢砂卡岩铁矿床中黄铁矿 $w(\text{Co})$ 最多,介于 $4000 \times 10^{-6} \sim 14\,000 \times 10^{-6}$ ,最高可达 $70\,000 \times 10^{-6}$ ,其次赋存于黄铜矿、赤铁矿和磁黄铁矿(Zhu et al., 2016)。山东淄博金岭大型砂卡岩铁矿床,矿石中Co平均品位约 $147 \times 10^{-6}$ ,且Co主要赋存于黄铁矿和磁铁矿(方邵平等, 2017)。新疆东天山地区磁海矿床中Co和Ni主要以独立矿物存在且多产于磁黄铁矿边部,并与黄铜矿共生包裹于早期磁铁矿中,另外, $w(\text{Co})$ 以伴生组分赋存于磁铁矿约 $100 \times 10^{-6}$ ,总量可达1万t(王玉往等, 2018)。

长江中下游地区众多砂卡岩铁矿床也伴生大量的Co,鄂东南地区有大广山、张泗朱、许家咀、程潮、铁山、铜绿山和金山店等矿床(魏克涛等, 2021),宁芜-庐枞地区有龙桥、朱冲、白象山和新桥等矿床。Co主要赋存于黄铁矿中, $w(\text{Co})$ 约 $500 \times 10^{-6} \sim 2600 \times 10^{-6}$ ,其次是黄铜矿, $w(\text{Co})$ 约 $370 \times 10^{-6} \sim 760 \times 10^{-6}$ ,局部有Co的独立矿物(硫铜钴矿)产出(石磊等, 2023)。

### 3.2.2 外生作用有关的伴生稀贵金属铁矿床

沉积型铁矿床虽然在中国规模很大,但其物质来源主要是大陆地壳的风化产物,而Co、Ni和PGE等金属的克拉克值本身很低,在没有岩浆或热液作用参与下很难形成伴生Co、Ni和PGE等金属的沉积型铁矿床。据有限的资料统计,位于南祁连拉鸡山成矿带的青海元石山Ni-Fe(-Co)矿床,矿石中Co平均品位约 $470 \times 10^{-6}$ ,Ni平均品位约 $8400 \times 10^{-6}$ ,因加里东时期的超基性岩在新时代遭受风化淋滤,Ni以氧化物形式被 $\text{Fe}^{3+}$ 吸附呈凝胶态,Ni、Co主要赋存于铁镍矿物水针铁矿、针铁矿和赤铁矿中(刘福祥等, 2007)。

### 3.3 铁矿床中伴生的稀有金属

铁矿床中伴生的稀有金属主要是Nb、Ta,Nb的平均地壳丰度为 $8 \times 10^{-6}$ ,Ta为 $0.7 \times 10^{-6}$ (Rudnick et al., 2014)。中国的白云鄂博矿床拥有最大的铌钽资源储备(李建康等, 2019),铌( $\text{Nb}_2\text{O}_5$ )储量约660万t,

占全国已探明铌储量的63.4%,Nb、Ta主要赋存于铌铁矿、铌钽铁矿、铌钽金红石等矿物并被包裹于磁铁矿中(张培善等, 2001; 袁忠信, 2012)。主矿区主要是块状磁铁矿和萤石型铁矿,铌平均品位 $1400 \times 10^{-6}$ ,东矿区主要是萤石型铁矿和白云石型铁矿,铌平均品位 $1410 \times 10^{-6}$ ,西矿区主要是白云石型铁矿、萤石型铁矿和云母型铁矿,铌平均品位 $770 \times 10^{-6} \sim 940 \times 10^{-6}$ (张培善等, 2001)。

### 3.4 铁矿床中伴生的稀散金属

铁矿床中伴生稀散金属主要是Ga、Ge、Re、Te、In、Se、Cd等,伴生稀散金属的铁矿类型较多(表5)。Ga的地壳丰度为 $16 \times 10^{-6}$ ,Ge为 $1.3 \times 10^{-6}$ ,Re为 $0.188 \times 10^{-6}$ ,Te为 $0.001 \times 10^{-6}$ ,In为 $0.052 \times 10^{-6}$ ,Se为 $0.13 \times 10^{-6}$ ,Cd为 $0.08 \times 10^{-6}$ (Rudnick et al., 2014)。据1987年《矿产资源工业手册》,铁矿床中最低工业品位要求 $w(\text{Ga})$ 为0.02%~0.03%、 $w(\text{Ge})$ 为0.008%、 $w(\text{In})$ 为0.001%~0.030%、 $w(\text{Se})$ 为0.001%、 $w(\text{Te})$ 为0.001%、 $w(\text{Cd})$ 为0.01%,以及 $w(\text{Re})$ 为0.0002%。

#### 3.4.1 内生作用有关的伴生稀散金属铁矿床

Ga在不同的氧化还原条件下表现出差异性,还原条件下Ga六次配位的离子半径和Zn、Sn、Cu、 $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$ 、Sb相近,其电子构型和Zn最为相似,因此,闪锌矿是其载体矿物,氧化条件下Ga和Al、Fe相似且都具有强亲石性,可以广泛参与到各种地质活动中(涂光炽等, 2004)。磁铁矿具有反尖晶石型结构,Ga在磁铁矿中具有强相容性,因此,磁铁矿是Ga的重要载体矿物, $w(\text{Ga})$ 介于 $15 \times 10^{-6} \sim 45 \times 10^{-6}$ ,最高达 $100 \times 10^{-6}$ (刘英俊, 1984),如攀西地区攀枝花矿床已探明Ga工业储量约34.8万t(罗泰义等, 2007)。

攀西地区钒钛磁铁矿床中平均 $w(\text{Ge})$ 约 $0.05 \times 10^{-6} \sim 1.11 \times 10^{-6}$ ,不同矿床中Ge含量存在差异,可能与氧逸度促进了Ge在磁铁矿中富集有关(Liu et al., 2015; Meng et al., 2017),根据类质同象置换原则, $\text{Ge}^{4+}$ 可能联合 $\text{Fe}^{2+}$ 替换 $\text{Fe}^{3+}$ (Meng et al., 2017)。承德地区Fe-Ti-P矿床中磁铁矿Ge品位约 $1.36 \times 10^{-6} \sim 26.6 \times 10^{-6}$ (Liu et al., 2015)。

长江中下游地区众多的砂卡岩铁矿床,譬如铜陵凤凰山、冬瓜山、安徽新桥、琅琊山、安庆、庐江沙溪、茶亭、湖北程潮等矿床普遍伴生Ga、Ge、Re、Te、In、Se、Cd等稀散金属(周涛发等, 2020)。自然界中Se既能以独立矿物硒银矿或辉银矿存在,也能以类质同象赋存于硫化矿物,砂卡岩矿床中Se主要赋

存于黄铁矿中,  $w(\text{Se})$  介于  $10 \times 10^{-6} \sim 100 \times 10^{-6}$  (周涛发等, 2020), 如新桥和铜陵冬瓜山矿床矿石中 Se 品位约  $10 \times 10^{-6} \sim 300 \times 10^{-6}$ , 铜陵凤凰山和庐江沙溪-茶亭矿床矿石中 Se 品位约  $50 \times 10^{-6}$ , 安庆和琅琊山矿床矿石中 Se 品位约  $20 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$  (周涛发等, 2020)。自然界中, Te 既能以独立矿物存在, 也能以类质同象替换硫赋存于斑铜矿、黄铁矿、黄铜矿和磁黄铁矿等硫化矿物, 如铜陵凤凰山矿床中磁铁矿形成于晚期矽卡岩阶段和碳酸岩阶段 (Yi et al., 2015), 磁铁矿中  $w(\text{Ge})$  约  $1.5 \times 10^{-6} \sim 73 \times 10^{-6}$ , 平均  $11 \times 10^{-6}$  (Huang et al., 2016), 矿石中 Te 的品位约  $10 \times 10^{-6} \sim 100 \times 10^{-6}$  (周涛发等, 2020)。Cd 因其独特的地球化学性质, 主要伴生于低温热液铅锌矿床, 长江中下游地区仅有新桥和铜陵冬瓜山矿床检测出伴生 Cd, 品位分别为  $10 \times 10^{-6} \sim 100 \times 10^{-6}$ 、 $30 \times 10^{-6} \sim 300 \times 10^{-6}$  (周涛发等, 2020)。Re 常以类质同象替换 Mo 赋存于辉钼矿, 琅琊山矿床中矿石 Re 品位约  $200 \times 10^{-6} \sim 800 \times 10^{-6}$  (周涛发等, 2020)。Ga 在程潮铁矿床中品位约  $10 \times 10^{-6} \sim 100 \times 10^{-6}$ , 探明资源量约 1482 t (周涛发等, 2020)。In 和 Cd 地球化学性质相似, 可以类质同象形式赋存于闪锌矿中, 福建龙岩中甲矿床中 In 品位达  $70 \times 10^{-6}$ 、Cd 品位达  $266 \times 10^{-6}$ , 超过工业品位的数十倍 (毛光武等, 2013)。

长江中下游一些 IOA 矿床也具备伴生稀散金属潜力, 如凹山、姑山、罗河、泥河、小包庄等矿床检测伴生 Te、Ga、Se、Cd (周涛发等, 2020), 罗河-小包庄矿床中 Te 品位高达  $10 \times 10^{-6} \sim 50 \times 10^{-6}$ , 富集程度是大陆地壳的 10 000 倍, 主要以类质同象取代硫赋存于磁黄铁矿、黄铁矿和黄铜矿中, 局部可见 Te 以独立矿物辉碲铋矿形式产出。

康滇地区的大部分 IOCG 矿床经历了早期铁氧化物阶段和晚期铜硫化物阶段, 大多数矿床中磁铁矿主要形成于早期铁氧化物阶段, 但在拉拉矿床也发现了晚期铜硫化物阶段的磁铁矿, 铁氧化物阶段的磁铁矿  $w(\text{Ge})$  介于  $1.1 \times 10^{-6} \sim 5.1 \times 10^{-6}$ , 铜硫化物阶段的磁铁矿  $w(\text{Ge})$  介于  $0.6 \times 10^{-6} \sim 4 \times 10^{-6}$  (Chen et al., 2015a), 作为副矿物产出的辉钼矿  $w(\text{Re})$  达  $6.897 \times 10^{-6} \sim 199 \times 10^{-6}$  (罗丽萍等, 2016)。大红山矿床中磁铁矿  $w(\text{Ge})$  介于  $0.8 \times 10^{-6} \sim 5.5 \times 10^{-6}$ , 迤纳厂矿床中磁铁矿  $w(\text{Ge})$  介于  $0.9 \times 10^{-6} \sim 1.4 \times 10^{-6}$  (Chen et al., 2015a)。

#### 3.4.2 外生作用有关的伴生稀散金属铁矿床

位于大洋底部的铁锰结核矿床具有 Te 成矿潜

力, 其铁锰结核平均  $w(\text{Te})$  约  $3 \times 10^{-6} \sim 205 \times 10^{-6}$  (Hein et al., 2003), 如太平洋中铁锰结核 Te 富集程度是海水的 109 倍, 是大陆地壳的 5000~50 000 倍 (温汉捷等, 2019), Hein 等 (2003; 2013) 认为,  $\text{MnO}_2$  表面带负电, 吸附带正电的  $\text{FeOOH}$  与微量元素的结合体, 从而富集成矿。除铁锰结核外, Te 在次生蚀变矿物 (Mao et al., 2002) 及红层中也有富集现象, 主要以六价离子形式进入水铁矿晶格发生沉淀富集 (Parnell et al., 2018)。

综上所述, 铁矿床中关键金属的赋存矿物多样、赋存状态复杂, 多数矿床中的关键金属赋存状态研究仅仅是初步工作, 需要更加微观的分析手段来进一步限定。

## 4 铁矿床中伴生关键金属的资源潜力

综合考虑地质特征, 将中国伴生关键金属的铁矿床划分为 5 个成矿区 (图 2), 包括扬子地台西缘成矿区、长江中下游成矿区、鲁西成矿区、华北准地台北缘成矿区和白乃庙-东升庙成矿区。查明各类铁矿床中矿石储量, 并初步计算了伴生关键金属资源量 (表 3~表 5)。需要说明的是, 由于缺少相关矿床类型的关键金属元素工业品位标准, 以及准确的矿石量数据, 这些估算的资源量仅作为粗略参考。

扬子地台西缘成矿区 REE 约 125.7 万 t, 钪 ( $\text{Sc}_2\text{O}_3$ ) 约 39.7 万 t, Co 约 213.4 万 t, Ni 约 116 万 t, PGE 约 16.9 t, Ga 约 33.4 万 t, Ge 约 7100 t; 长江中下游成矿区 REE 约 15 万 t, Co 约 17 万 t, Ga 约 1500 t, Ge 约 65 t, Te 约 3.71 万 t, Se 约 4257 t, Cd 约 3410 t, Re 约 2410 t; 鲁西成矿区 Co 约 12.8 万 t; 华北准地台北缘成矿区 REE 约 150.36 万 t, Ge 约 2900 t; 白乃庙-东升庙成矿区 REE 约 1.1 亿 t, 钪 ( $\text{Sc}_2\text{O}_3$ ) 约 6.06 万 t, 铌 ( $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ) 约 660 万 t, 钽约 22 万 t, 并且富含钽、锰、磷、萤石等矿产资源。

## 5 结论

(1) 铁矿作为大宗金属矿产, 其伴生丰富的关键金属, 包括 REE、Sc、Nb、Ta、PGE、Co、Cr、Ni、Te、Re、Se、Cd、In、Ga、Ge 以及 Mn、Ti、V 等重要金属, 资源量可观, 具有巨大的资源潜力和研究价值。

(2) 中国伴生关键金属铁矿主要划分为扬子地

表 5 中国铁矿床中伴生稀散金属品位及资源量统计

Table 5 Statistics on the grade and resources of associated rare scattered metals in iron ore deposits of China

矿床类型	矿区/矿床	伴生稀散金属及矿石品位	铁矿石储量	伴生稀散金属资源量*	成矿时代/ Ma	资料来源
岩浆 Fe-Ti-V (-P) 矿床	四川攀枝花	Ga:~34×10 <sup>-6</sup> , Ge:0.58×10 <sup>-6</sup> (磁铁矿 70%)	71.8 亿 t	Ga:~24.4 万 t Ge:~2900 t	~260	罗泰义等, 2007
	四川太和	Ga:~35×10 <sup>-6</sup> , Ge:0.58×10 <sup>-6</sup> (磁铁矿 70%)	9.5 亿 t	Ga:~3.3 万 t Ge:~385 t	~260	罗泰义等, 2007
	四川白马	Ga:~25×10 <sup>-6</sup> , Ge:0.58×10 <sup>-6</sup> (磁铁矿 70%)	8.7 亿 t	Ga:~2.1 万 t Ge:~352 t	~260	罗泰义等, 2007
	四川红格	Ga:~30×10 <sup>-6</sup> , Ge:0.58×10 <sup>-6</sup> (磁铁矿 70%)	12 亿 t	Ga:~3.6 万 t Ge:~385 t	~260	罗泰义等, 2007
	河北大庙	Ge:14×10 <sup>-6</sup> (磁铁矿 70%)	2.1 亿 t	Ge:~2054 t	~1740	Liu et al., 2015
IOCG 矿床	四川拉拉	Ge:1.1~5.1×10 <sup>-6</sup> (磁铁矿 50%) Re:6.8~199×10 <sup>-6</sup> (辉钨矿 10%)	2 亿 t	Ge:~310 t, Re:~2000 t	~1260	Chen et al., 2015a
	云南大红山	Ge:0.8~5.5×10 <sup>-6</sup> (磁铁矿 50%)	4.58 亿 t	Ge:~720 t	~800	
IOA 矿床	安徽罗河-小包庄	Te:10~50×10 <sup>-6</sup>	2.2 亿 t	Te:~6600 t	~130	
	安徽泥河	Te:10~50×10 <sup>-6</sup>	5 亿 t	Te:~1.5 万 t	~130	周涛发等, 2020
	安徽凹山	Te:10~50×10 <sup>-6</sup>	1.8 亿 t	Te:~5400 t	~130	
	安徽姑山	Te:10~50×10 <sup>-6</sup>	3.2 亿 t	Te:~9600 t	~130	
矽卡岩铁矿床	铜陵凤凰山	Ge:~11×10 <sup>-6</sup> (磁铁矿 50%), Te:10×10 <sup>-6</sup> ~100×10 <sup>-6</sup>	1155 万 t	Ge:~65 t, Te:~570 t	~140	Yi et al., 2015
	安徽新桥	Se:10×10 <sup>-6</sup> ~300×10 <sup>-6</sup> , Cd:10×10 <sup>-6</sup> ~100×10 <sup>-6</sup>	1.15 亿 t	Se:~1340 t, Cd:~725 t	~140	周涛发等, 2020
	安徽琅琊山	Se:20×10 <sup>-6</sup> ~100×10 <sup>-6</sup> , Re:200×10 <sup>-6</sup> ~800×10 <sup>-6</sup>	486 万 t	Se:~290 t, Re:~2430 t	~140	周涛发等, 2020
	安徽安庆	Se:20×10 <sup>-6</sup> ~200×10 <sup>-6</sup>	2957 万 t	Se:~675 t	~140	周涛发等, 2020
	庐江沙溪	Se:50×10 <sup>-6</sup> ~150×10 <sup>-6</sup>	150 万 t	Se:~150 t	~140	周涛发等, 2020
	庐江茶亭	Se:50×10 <sup>-6</sup> ~150×10 <sup>-6</sup>	150 万 t	Se:~150 t	~140	周涛发等, 2020
	铜陵冬瓜山	Se:10×10 <sup>-6</sup> ~300×10 <sup>-6</sup> , Cd:30×10 <sup>-6</sup> ~300×10 <sup>-6</sup>	100 万 t	Se:~1652 t Cd:~618 t	~140	周涛发等, 2020
	湖北程潮	Ga:10×10 <sup>-6</sup> ~100×10 <sup>-6</sup>	2 亿 t	Ga:~1482 t	~140	周涛发等, 2020
	福建龙岩	In:~70×10 <sup>-6</sup> ,Cd:~266×10 <sup>-6</sup>	749 万 t	In:~570 t,Cd:~2067 t	~130	毛光武等, 2013

注: 矿石储量数据及部分伴生资源储量数据来源于全国地质资料馆; 伴生稀散金属资源量\*=铁矿石储量×伴生稀散金属及矿石品位。

台西缘成矿区、长江中下游成矿区、鲁西成矿区、华北准地台北缘成矿区和白乃庙-东升庙成矿区 5 个成矿区; 成矿时代划分为中元古代—新元古代、早古生代—晚古生代和中生代—新生代 3 个成矿期。

(3) 前人对铁矿的研究已然非常成熟, 但目前对铁矿床中关键金属研究是初步的, 关键金属的赋存状态、富集机制和高效提取利用等科学问题仍然需进一步深入研究论证。如近几十年对白云鄂博矿床开展了大量的研究, 它是中国最大的稀土矿床, 不仅蕴含大量 REE、Nb 和 Ta, 还有丰富的 Sc 在尾矿中无法提取利用, 造成了严重浪费。因

此, 解决关键金属在铁矿床中的赋存状态和富集机制等科学问题, 创新出高效提取利用手段, 对进一步提升中国关键金属储备和竞争力具有重要意义。

**致谢** 两位匿名审稿专家给予了很好的建议和详细的修改意见, 对于提高文章的逻辑性和全面性颇具裨益, 在此表示衷心的感谢! 需要指出的是上述认识和总结是初步的, 许多矿床研究程度不深, 所以亟需今后更多具体研究工作来进一步证实和完善。

## References

- Barnes S J, Maier W D and Ashwal L D. 2004. Platinum-group element distribution in the main zone and upper zone of the Bushveld complex, South Africa[J]. *Chemical Geology*, 208(1-4): 293-317.
- Barrie C, Mactavish A, Walford P, Chataway R, Middaugh R and Cabri L. 2002. Contact-type and magnetite reef-type Pd-Cu mineralization in ferroan olivine gabbros of the Coldwell complex, Ontario[J]. *Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Special Volume*, 54: 321-337.
- Campbell L S. 1999. Discussion on Le Bas et al. (1997) 'Oxygen, carbon and strontium isotope study of the carbonatitic dolomite host of the Bayan Obo Fe-Nb-REE deposit, Inner Mongolia, China', *Mineralogical Magazine*, 61, 531-41[J]. *Mineralogical Magazine*, 63(6): 927-931.
- Cao R L, Zhu S H and Wang J W. 1994. Theoretical issues on material sources and genesis of the Baiyun Obo iron rare earth deposit[J]. *Science in China(Series B)*, 24(12): 1298-1307(in Chinese).
- Che Y D, Wu M A, Zhang S, Zhang Z Z and Cai X B. 2017. Geochemical features of the Huangtun diorite porphyrite in the Lu-Zong basin, Anhui and the geological implications[J]. *Geology of Anhui*, 27(4): 241-246(in Chinese with English abstract).
- Chen Q P, Chen J Y and An G B. 2009. Geological characteristics and ore-controlling factors of the Kaxiutata skarn type iron and gold deposit in Ayou Banner, Inner Mongolia[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 24(4): 286-291(in Chinese with English abstract).
- Chen W, Zhao X F, Li X C and Zhou M F. 2019. An overview on the characteristics and origin of iron-oxide copper gold (IOCG) deposits in China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(1): 99-118(in Chinese with English abstract).
- Chen W T and Zhou M F. 2012. Paragenesis, stable isotopes, and molybdenite Re-Os isotope age of the Lala iron-copper deposit, Southwest China[J]. *Economic Geology*, 107(3): 459-480.
- Chen W T, Zhou M F, Gao J F and Hu R Z. 2015. Geochemistry of magnetite from Proterozoic Fe-Cu deposits in the Kangdian metallogenic province, SW China[J]. *Mineralium Deposita*, 50(7): 795-809.
- Cheng C. 2001. Geochemical characteristics of rare earth elements of fanshan barringerite deposit[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 23(2): 104-108(in Chinese with English abstract).
- Duan Z. 2019. The mineralization and mechanism of the iron skarn deposits in Laiwu district, Shandong Province[D]. Supervisor: Li J W. Wuhan: China University of Geosciences. 60-180(in Chinese with English abstract).
- Editorial Board of the "Mineral Resources Industry Requirements Manual". 2014. *Mineral resources industry requirements manual*[M]. Beijing: Geological Publishing House Press. 87-268.
- Editorial Board of "Reference Manual for Mineral Resource Industry Requirements". 2021. *Reference Manual for Mineral Resource Industry Requirements*[M]. Beijing: Geological Publishing House Press. 185-286(in Chinese).
- Fan H R, Yang K F, Hu F F, Liu S and Wang K Y. 2016. The giant Bayan Obo REE-Nb-Fe deposit, China: Controversy and ore genesis[J]. *Geoscience Frontiers*, 7(3): 335-344.
- Fan Y Z, Zhou W, Wang Z X, Ling J L and Jiang C Y. 2014. The types of rare and disperse scandium deposits and prospecting potential[J]. *Northwestern Geology*, 47(1): 234-243(in Chinese with English abstract).
- Fang S P and Zhao Y P. 2017. Shandong Zibo area of Wangwangzhuang ore in Jinling iron mine geological features and ore controlling factors analysis[J]. *Energy Research and Management*, (1): 57-61(in Chinese with English abstract).
- Fleischer M. 1983. Distribution of the lanthanides and yttrium in apatites from iron ores and its bearing on the genesis of ores of the Kiruna type[J]. *Economic Geology*, 78(5): 1007-1010.
- Frietsch R and Perdahl J A. 1995. Rare earth elements in apatite and magnetite in Kiruna-type iron ores and some other iron ore types[J]. *Ore Geology Reviews*, 9(6): 489-510.
- Fu Y Z and Duan J B. 2017. Geochemical comparison of rare earth elements in ancient and modern manganese deposits and manganese sediments on land and in the ocean and its geological significance[A]. The 8th national symposium on metallogenic theory and prospecting methods[C]. *Acta Mineralogica Sinica*, (Supp.): 658-659(in Chinese).
- Gulley A L, Nassar N T and Xun S. 2018. China, the United States, and competition for resources that enable emerging technologies[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(16): 4111-4115.
- Guo C L, Cheng L S, Ning X X, Xiang H, Chen B L and Wu T J. 2020. Study on the occurrence state of scandium in Bijigou vanadium titanium magnetite in Yangxian, Shaanxi Province[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 40(5): 54-61(in Chinese with English abstract).
- Hauck S, Severson M, Zanko L, Barnes S J, Morton P, Alminas H, Foord E and Dahlberg E. 1997. An overview of the geology and oxide, sulfide, and Platinum-Group element mineralization along the western and northern contacts of the Duluth complex[J]. *Spapers Papers-Geological Society of America*, 312: 137-186.
- He Z B, He Y, Zhou X F, Zhang Y S, Wu B Q, Wang C X, Zhang L J and Yang J W. 2022. Geological characteristics and comprehensive evaluation of Ma'andi Sc-V-Ti magnetite deposit in South Yunnan[J]. *Mineral Resources and Geology*, 36(4): 723-731(in Chinese with English abstract).
- Hein J R, Koschinsky A and Halliday A N. 2003. Global occurrence of tellurium-rich ferromanganese crusts and a model for the enrichment of tellurium[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(6): 1117-1127.
- Hein J R, Mizell K, Koschinsky A and Conrad T A. 2013. Deep-ocean

- mineral deposits as a source of critical metals for high- and green-technology applications: Comparison with land-based resources[J]. *Ore Geology Reviews*, 51: 1-14.
- Hitzman M W, Oreskes N and Einaudi M T. 1992. Geological characteristics and tectonic setting of proterozoic iron oxide(Cu-U-Au-REE) deposits [J]. *Precambrian Research*, 58(1-4): 241-287.
- Ho T L. 1935. Note on some rare earth minerals from Beiyin Obo, Suiyuan[J]. *Bulletin of the Geological Society of China*, 14(2): 278-282.
- Hou T, Zhang Z C, Keiding J K and Veksler I V. 2015. Petrogenesis of the ultrapotassic Fanshan intrusion in the North China Craton: Implications for lithospheric mantle metasomatism and the origin of apatite ores[J]. *Journal of Petrology*, 56(5): 893-918.
- Hou X Z, Yang Z F and Wang Z J. 2022. REE-Nb-Fe-Th mineralization characteristics and multivariate mineralization analysis in the deep part of Baiyan Obo east-orebody[J]. *Chinese Rare Earths*, 43(6): 25-34(in Chinese with English abstract).
- Hu R Z, Wen H J, Ye L, Chen W T, Xia Y, Fan H F, Huang Y, Zhu J J and Fu S L. 2020. Metallogeny of critical metals in the southwestern Yangtze Block[J]. *Chinese Science Bulletin*, 65(33): 3700-3714.
- Huang X G, Luo G Q and Li Y P. 2016. Study on the occurrence state of scandium in Panxi vanadium-titanium magnetite[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, (6): 1-4, 10(in Chinese with English abstract).
- Huang X W, Zhou M F, Qiu Y Z and Qi L. 2015. In-situ LA-ICP-MS trace elemental analyses of magnetite: the Bayan Obo Fe-REE-Nb deposit, North China[J]. *Ore Geology Reviews*, 65: 884-899.
- Huang X W, Gao J F, Qi L, Meng Y M, Wang Y C and Dai Z H. 2016. In-situ LA-ICP-MS trace elements analysis of magnetite: The Fenghuangshan Cu-Fe-Au deposit, Tongling, eastern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 72: 746-759.
- Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences. 1987. Formation mechanism of Ningwu type iron ore deposit[M]. Beijing: Science Press. 15-30(in Chinese).
- Jin H L, Hou S C, Wei W and Li Q. 2021. Geochemistry characteristics of various types of ores at deep of east orebody in Bayan Obo[J]. *Chinese Rare Earths*, 42(5): 59-67(in Chinese with English abstract).
- Jin T F, Li Y G, Fei G C, Zhou H, Sha X B, Feng Y C and Wu K. 2017. Re-Os isotopic dating of chalcopyrite in quartz vein from dahongshan IOCG deposit in Kangdian copper metallogenic belt and its significance[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 37(4): 417-426.
- Jin Z L. 2017. Genesis of high-grade Fe skarns: A case study of Zibo and Laiwu iron deposits in Western Shandong[D]. Supervisor: Zhang Z C. Beijing: China University of Geosciences. 99-102(in Chinese with English abstract).
- Ke C H, Wang X X, Li J B, Yang Y, Qi Q J and Zhou X N. 2013. Zircon UPb age, geochemistry and Sr Nd-Hf isotopic geochemistry of the intermediate-acid rocks from the Heishan-Mulonggou area in the southern margin of North China Block[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(3): 781-800(in Chinese with English abstract).
- Kolker A. 1982. Mineralogy and geochemistry of Fe-Ti oxide and apatite (nelsonite) deposits and evaluation of the liquid immiscibility hypothesis[J]. *Economic Geology*, 77(5): 1146-1158.
- Li H M, Wang D H, Li L X, Chen J, Yang X Q and Liu M J. 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 J H, Zhang Z Z, Qin M, Qiu J J and Si R J. 2011. Geochemical characteristics of rare earth elements in the Keriqi siderite deposit in Xinjiang[J]. *Mineral Resources and Geology*, 25(1): 69-73(in Chinese with English abstract).
- Li J K, Li P, Wang D H and Li X J. 2019. A review of niobium and tantalum metallogenic regularity in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 64(15): 1545-1566(in Chinese with English abstract).
- Li L Q, Cui J R and Chen H. 2019. General situation of molybdenum, rhenium and rare earth resources and occurrence characteristics of rhenium and rare earth in mulonggou-huanglongpu area of luonan county[J]. *Geology of Shaanxi*, 37(1): 1-7(in Chinese with English abstract).
- Li X, Zhao X, Zhou M F, Chen W T and Chu Z. 2015. Fluid inclusion and isotopic constraints on the origin of the Paleoproterozoic Yinachang Fe-Cu-(REE) deposit, Southwest China[J]. *Economic Geology*, 110(5): 1339-1369.
- Li Y Y. 1959. Geology and exploration of baiyunebo iron deposit[M]. Beijing: Geological Publishing House Press. 1-179(in Chinese).
- Li Z H and Zhu X K. 2012. Geochemical features of Xuanlong type iron ore deposit in Hebei Province and their geological significances[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(9): 2903-2911(in Chinese with English abstract).
- Liang P. 2018. Study on the genetic mechanism of Paleozoic Fe-Cu-Au deposits in the northern margin of East Junggar, Xinjiang: Taking the Laoshankou and Qiaoxiahala deposits as examples[D]. Supervisor: Chen H Y. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences. 53-57(in Chinese with English abstract).
- Ling M X, Liu Y L, Williams I S, Teng F Z, Yang X Y, Ding X, Wei G J, Xie L H, Deng W F and Sun W D. 2013. Formation of the world's largest REE deposit through protracted fluxing of carbonate by subduction-derived fluids[J]. *Nature Publishing Group*, 3(1): 429-442.
- Liu F, Yang F Q, Li Y H, Ma B Q, Chai F M and Geng X X. 2009. Trace element and rare earth element characteristics of apatite from Abagong iron deposit in Altay City, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 28(3): 251-264(in Chinese with English abstract).
- Liu F X, Yu J M, Zhao K and Cui M Z. 2007. The occurrence state and changing regularity of the Yuanshishan awaruite deposit, Qinghai Province[J]. *Jilin Geology*, 26(2): 27-31(in Chinese with English abstract).
- Liu P P, Zhou M F, Wei T C, Gao J F and Huang X W. 2015. In-situ LA-ICP-MS trace elemental analyses of magnetite: Fe-Ti-(V) oxide-bearing mafic-ultramafic layered intrusions of the Emeishan large

- igneous province, SW China-Science Direct[J]. *Ore Geology Reviews*, 65: 853-871.
- Liu T G, Zhang Z W, Ye L, Shen N P, Yang Z F, Li S X and Feng J R. 2012. Geological and geochemical characteristics and genesis of "Dolomite" at Bayan Obo, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 86(5): 723-734(in Chinese with English abstract).
- Liu Y J. 1984. *Element geochemistry*[M]. Beijing: Science Press. 20-80 (in Chinese).
- Luo J H, Wu Z Y, Li J H, Wu E H, Liao X J, Tang R and Yang S L. 2015. Mineralogical characteristics of sulfide in Hongge Vanadium Titanomagnetite[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 36(3): 63-67(in Chinese with English abstract).
- Luo L P and Zhu Z M. 2016. The distribution of rhenium in the Lala copper ore and its potential significance of resources[J]. *Mineral Resources*, (4): 27-30(in Chinese with English abstract).
- Luo T Y, Dong D X, Zhu D, Tao Y, Song X Y and Zhang H. 2007. Mineralization of gallium: Implication to Emeishan large igneous province[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 27(3/4): 281-285(in Chinese with English abstract).
- Lü X J, Cheng X and Zhou G H. 1992. Occurrence state of scandium in Panzhihua iron ore[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 12(4): 35-39(in Chinese with English abstract).
- Maier W D, Barnes S J, Gartz V and Andrews G. 2003. Pt-Pd reefs in magnetites of the Stella layered intrusion, South Africa: A world of new exploration opportunities for platinum group elements[J]. *Geology*, 31(10): 885-888.
- Mao G W, Zhu Y L and Hu M A. 2013. Geological characteristics and enrichment regularities of the dispersed elements indium and cadmium in the Zhongjia iron ore deposit of Longyan City, Fujian Province[J]. *Geology and Exploration*, 49(1): 130-143(in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Wang Y T, Ding T P, Chen Y C and Wei J X. 2002. Dashiugou tellurium deposit in Sichuan Province, China: S, C, O, and H isotope data and their implications on hydrothermal mineralization[J]. *Resource Geology*, 52(1): 15-23.
- Mao J W, Yuan S D, Xie G Q, Song S W, Zhou Q, Gao Y B, Liu X, Fu X F, Cao J, Zeng Z L, Li T G and Fan X Y. 2019. New advances on metallogenic studies and exploration on critical minerals of China in 21st Century[J]. *Mineral Deposits*, 38(5): 935-969(in Chinese with English abstract).
- Meng Q R. 1982. The genesis of the rock-dolomite of the Bayan Obo iron deposits and the analysis of its sedimentary environment[J]. *Geological Review*, 28(5): 481-489, 508(in Chinese with English abstract).
- Meng Y M, Hu R Z, Huang X W and Gao J F. 2017. Germanium in magnetite: A preliminary review[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(2): 343-358.
- National Commission of Mineral Reserves. 1987. *Mineral industry requirements reference manual*[M]. Beijing: Geological Publishing House Press. 40-280(in Chinese).
- National Geological and Mineral Standardization Technical Committee. 2002. *Specifications for rare earth mineral exploration: DZ/T 0204-2002*[S]. Beijing: Standards Press of China(in Chinese).
- National Resources and Territory Spatial Planning. 2020. *Specifications for copper, lead, zinc, silver, nickel, molybdenum mineral exploration: DZ/T 0214-2020*[S]. Beijing: Standards Press of China(in Chinese).
- Nguyen L V, Hwang D, Moon S, Moon D S and Chung Y. 2008. High temperature fiber sensor with high sensitivity based on core diameter mismatch[J]. *Opt Express*, 16(15): 11369-11375.
- Parnell J, Spinks S and Brolly C. 2018. Tellurium and selenium in Mesoproterozoic red beds[J]. *Precambrian Research*, 305: 145-150.
- Rudnick R and Gao S. 2014. *Composition of the continental crust*[J]. *Treatise on Geochemistry*, (4): 1-64.
- Schulz K J. 2017. *Critical mineral resources of the United States-Economic and environmental geology and prospects for future supply*[M]. U.S.Geological Survey. 862.
- Shi L, Zhou T F, Fan Y, Zhang Y F, Yan L and Liang X. 2023. Evaluation on the current status and comprehensive utilization prospect of associated cobalt resources in the Middle-Lower Yangtze River Valley metallogenic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 39(4): 1144-1156(in Chinese with English abstract).
- Smith M P, Campbell L S and Kynicky J. 2015. A review of the genesis of the world class Bayan Obo Fe-REE-Nb deposits, Inner Mongolia, China: Multistage processes and outstanding questions[J]. *Ore Geology Reviews*, 64: 459-476.
- Song W L, Xu C, Smith M P, Chakhmouradian A R, Brenna M, Kynicky J, Chen W, Yang Y H, Deng M and Tang H Y. 2018. Genesis of the world's largest rare earth element deposit, Bayan Obo, China: Protracted mineralization evolution over~1 b.y[J]. *Geology*, 46(4): 323-326.
- Song X Y, She Y W, Luan Y, He H L, Zhang Q L and Zheng W Q. 2023. Resources of Co, Ga and Sc of V-Ti magnetite deposits in the Panxi area within the Emeishan large igneous province and their integrated utilization potentials[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*: 42: 1-14(in Chinese with English abstract).
- U.S.Geological Survey. 2000~2023. *Mineral commodity summaries*[M]. Reston, VA: National Minerals Information Center. 1-210.
- Tu G Z, Gao Z M and Hu R Z. 2004. *Dispersed element geochemistry and mineralization mechanism*[M]. Beijing: Geological Publishing House Press. 1-300(in Chinese).
- Wang D H. 2019. Study on critical mineral resources: significance of research, determination of types, attributes of resources, progress of prospecting, problems of utilization, and direction of exploitation[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(6): 1189-1209(in Chinese with English abstract).
- Wang K Y, Fang A M, Zhang J E, Yu L J, Dong C, Zan J F, Hao M Z and Hu F Y. 2019. Genetic relationship between fenitized ores and hosting dolomite carbonatite of the Bayan Obo REE deposit, Inner Mongolia, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 174: 189-204.



- Wang L F and Dai C F. 2022. Research progress on recovery of scandium from Panzhihua vanadium-titanium-magnetite[J]. *Mineral Resources*, (4): 21-26+52(in Chinese with English abstract).
- Wang L L and Zhao T A. 2012. Analysis of the prospecting potential of scandium deposits in the iron bearing rock series of the Anshan Group in the Anben area[J]. *Intelligence*, (25): 222(in Chinese).
- Wang M F, Guo X N and Chen M T. 2014. Characteristics of composition of trace elements and PGE in magnetite[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 29(3): 417-423(in Chinese with English abstract).
- Wang Y W, Shi Y, Tang P Z, Li D D, Wang J B and Jie H J. 2018. The Cihai Fe-Co deposit, Xinjiang: A superimposed hydrothermal mineralization of two mantle-derived magmatic series[J]. *Earth Science Frontiers*, 25(2): 280-298(in Chinese with English abstract).
- Wedepohl K H. 1995. The composition of the continental crust[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(7): 1217-1232.
- Wei J and Shangguan Z. 1983. Oxygen isotope composition of magnetite and hematite in baiyun ebo iron deposit, Inner Mongolia[J]. *Chinese Journal of Geology*, 18(3): 217-224.
- Wei K T, Xu J Y, Wu C X, Liu D Q and Yan F. 2021. Discussion on the current status and comprehensive utilization prospect of cobalt ore resources in ore-concentrated area of southeast Hubei[J]. *Resources Environment & Engineering*, 35(6): 777-781(in Chinese with English abstract).
- Wen C Q, Cao Z M, Luo X J and Huo Y. 2002. Characteristics of rare earth elements of Panzhihua iron deposit[J]. *Mineral Deposits*, 21 (Supp.): 833-836(in Chinese with English abstract).
- Wen H J, Zhou Z B, Zhu C W, Luo C G, Wang D Z, Du S J, Li X F, Chen M H and Li H Y. 2019. Critical scientific issues of superenrichment of dispersed metals[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(11): 3271-3291(in Chinese with English abstract).
- Wen L G, Zeng P S, Zhan X C, Fan C Z, Sun D Y, Wang G, Yuan J H and Fei X J. 2018. The Yinachang deposit in Central Yunnan Province, Southwest China: A "Bayan Obo-type" Fe-Cu-REE deposit[J]. *Earth Science Frontiers*, 25(6): 308-329(in Chinese with English abstract).
- Wen L G, Zeng P S, Zhan X C, Fan C Z, Wang G, Sun D Y, Yuan J H and Fei X J. 2019. The discovery of rare earth minerals in the Etouchang Fe-Cu deposit in Lufeng, Central Yunnan Province, and its geological significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 38(4): 477-497(in Chinese with English abstract).
- Wu Q. 2020. Study on new process and mechanism of separating cobalt and sulfur from a complex Co-S concentrate using oxidizing roasting[D]. Supervisor: Xiao J H. Sichuan: Southwest University of Science and Technology. 1-5(in Chinese with English abstract).
- Xie Y L, Qu Y W, Yang Z F, Liang P, Zhong R C, Wang Q W, Xia J M and Li B C. 2019. Giant Bayan Obo Fe-Nb-REE deposit: Progresses, controversies and new understandings[J]. *Mineral Deposits*, 38(5): 983-1003(in Chinese with English abstract).
- Xu D, Kusiak M A, Wang Z L, Chen H Y, Bakun-Czubarow N, Wu C J, Konecny P and Hollings P. 2015. Microstructural observation and chemical dating on monazite from the Shilu Group, Hainan Province of South China: Implications for origin and evolution of the Shilu Fe-Co-Cu ore district[J]. *Lithos*, 216-217: 158-177.
- Yan S H, Zhang Z C, Wang Y T, Chen B L, Zhou G and Xin H L. 2005. REE geochemistry of Qiaoxiahala type Fe-Cu deposits in southern margin of Altay Mountains, Xinjiang, and its geological implications[J]. *Mineral Deposits*, 24(1): 25-33(in Chinese with English abstract).
- Yang B, Yang L and Meng W X. 2022. Application of electron probe microanalyzer in exploring the occurrence characteristic of scandium in different minerals of the Bayan Obo deposit[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 41(2): 185-198(in Chinese with English abstract).
- Yang F Q, Liu F, Chai F M, Zhang Z X, Geng X X, Lü S J, Jiang L P and Ouyang L J. 2011. Iron deposits in Altay, Xinjiang: Geological characteristics, time-space distribution and metallogenesis[J]. *Mineral Deposits*, 30(4): 575-598(in Chinese with English abstract).
- Yang G S, Mao Z B, Tan L J, Li Y G, Ye Z F, Wang K and Zhou Y. 2020. Geochemical characteristics of carbon and oxygen isotopes and trace elements of the dahongshan Cu-Fe deposit in Yunnan and their metallogenic significances[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 39(5): 945-960(in Chinese with English abstract).
- Yang X Y, Lai X D, Pirajno F, Liu Y L and Sun W D. 2016. Genesis of the Bayan Obo Fe-REE-Nb formation in Inner Mongolia, North China Craton: A perspective review[J]. *Precambrian Research*, 288: 39-71.
- Yang Y M, Tu G Z, Hu R Z and Shi X F. 2005. Sm-Nd isotopic geochronology of the Yinachang Fe-Cu-REE deposit at Wuding, Yunnan Province and its genetic significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 50(18): 2090-2096.
- Yi L W, Gu X P, Lu A H, Liu J P, Lei H, Wang Z L, Cui Y, Zuo H Y and Shen C. 2015. Major and trace elements of magnetite from the qimantag metallogenic belt: Insights into evolution of ore-forming fluids[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(4): 1226-1243.
- Ying L J, Wang D H, Liang T and Zhou R H. 2006. Geological character and its particularity of the Qiaoxiahala iron-copper-gold deposit in Altay, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(10): 1572-1577+1648(in Chinese with English abstract).
- Yu J J and Mao J W. 2002. Rare earth element in apatite from porphyrite iron deposits of Ningwu area[J]. *Mineral Deposits*, 21(1): 65-73(in Chinese with English abstract).
- Yuan Z X. 2012. *Metallogenic Laws of rare earth deposits in China*[M]. Beijing: Geological Publishing House Press. 1-200(in Chinese).
- Zeng M W, Wang M Z and Qu W Z. 1981. A study on the genetic mineralogy of magnetite in Baiyun Obo iron deposit[J]. *Mineralogy and Petrology*, (Supp.): 44-58(in Chinese).
- Zhai M G, Wu F Y, Fu R Z, Jiang S Y, Li W C, Wang R C, Wang D H, Qi T, Qin K Z and Wen H J. 2019. Critical metal mineral resources: Current research status and scientific issues[J]. *Fundamental*

- Research Science Foundation in China, 33(2): 106-111(in Chinese with English abstract).
- Zhang L J, Zhou T F, Fan Y, Yuan F, Qian B and Ma L. 2011. A LA-ICP-MS study on apatite from Taocun iron ore deposit in Ningwu basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(5): 834-848(in Chinese with English abstract).
- Zhang P S, Tao K J, Yang Z M, Yang X M and Song R K. 2001. Genesis of rare earths, niobium and tantalum minerals in Bayan Obo deposit of China[J]. *Journal of Rare Earths*, 19(2): 97-102(in Chinese with English abstract).
- Zhang Z, Hou T, Santosh M, Li H, Li J, Zhang Z, Song X and Wang M. 2014. Spatio-temporal distribution and tectonic settings of the major iron deposits in China: An overview[J]. *Ore Geology Reviews*, 57: 247-263.
- Zhang Z C, Hou T, Li H M, Li J W, Zhang Z H and Song X Y. 2014. Enrichment mechanism of iron in magmatic-hydrothermal system[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(5): 1189-1204(in Chinese with English abstract).
- Zhang Z C, Li H M, Li J W, Song X Y, Hu H, Li L X, Chai F M, Hou T and Xu D R. 2021. The metallogenic background and mechanism of rich iron ores in China[J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 51(6): 827-852(in Chinese).
- Zhao J X, Li G M, Qin K Z and Tang D M. 2019. A review of the types and ore mechanism of the cobalt deposits[J]. *Chinese Science Bulletin*, 64(24): 2484-2500(in Chinese with English abstract).
- Zhao X F, Zhou M F, Li J W, Selby D, Li X H and Qi L. 2013. Sulfide re-os and rb-sr isotope dating of the kangdian iocg metallogenic province, Southwest China: Implications for regional metallogenesis[J]. *Economic Geology*, 108(6): 1489-1498.
- Zheng X K. 2020. Enrichment characteristics of associated cobalt in vanadium titanium magnetite Panxi area[D]. Supervisor: Zhang C J. Sichuan: Chengdu University of Technology. 30-45(in Chinese with English abstract).
- Zhong H and Zhu W G. 2006. Geochronology of layered mafic intrusions from the Panxi area in the Emeishan large igneous province, SW China[J]. *Mineralium Deposita*, 41(6): 599-606.
- Zhou M F, Arndt N T, Malpas J, Wang C Y and Kennedy A K. 2008. Two magma series and associated ore deposit types in the Permian Emeishan large igneous province, SW China[J]. *Lithos*, 103(3-4): 352-368.
- Zhou M F, Zhao X F, Chen W T, Li X C, Wang W, Yan D P and Qiu H N. 2014. Proterozoic Fe-Cu metallogeny and supercontinental cycles of the southwestern Yangtze block, southern China and northern Vietnam[J]. *Earth-Science Reviews*, 139: 59-82.
- Zhou T F, Fan Y, Chen J, Xiao X and Zhang S. 2020. Critical metal resources in the middle-lower Yangtze River Valley metallogenic belt[J]. *Chinese Science Bulletin*, 65(33): 3665-3677(in Chinese with English abstract).
- Zhou Y X and Yuan C. 1989. A study on DaMiao anorthosite complex and iron-phosphorus ore based on rare earth elements geochemistry[J]. *Journal of Changchun University of Earth Science*, 19(1): 43-52+84(in Chinese with English abstract).
- Zhou Z F. 2011. Fe-Cu deposits in the Kangdian region, SW China: A proterozoic IOCG (iron-oxide-copper-gold) metallogenic province[J]. *Mineralium Deposita*, 46(7): 731-747.
- Zhou Z L, Li G Y, Song T Y and Liu Y G. 1980. Geological characteristics and genesis of dolomite carbonate rocks in Bayan Obo, Inner Mongolia[J]. *Geological Review*, 26(1): 35-42+92(in Chinese).
- Zhu B, Zhang H F, Zhao X M and He Y S. 2016. Iron isotope fractionation during skarn-type alteration: Implications for metal source in the Han-Xing iron skarn deposit[J]. *Ore Geology Reviews*, 74: 139-150.
- Zhu L G. 2019. The ore genesis and geodynamic setting of the Fe-Cu-Au-U-REE deposits in the Wuding region, Yunnan Province, SW China[D]. Supervisor: Liu J J. Beijing: China University of Geosciences. 29(in Chinese with English abstract).
- Zhu X S, Xiao H Z, Xiao X Q, Cha B J and Li J. 1981. A study on the occurrence states and trends of scandium in Panzhihua, Taihe, and Hongge vanadium-titanium magnetites during the dressing and smelting process[J]. *Chemical Metallurgy*, 2: 93-103(in Chinese).
- Zhu Z M, Zeng L X, Zhou J Y, Luo L P, Chen J B and Shen B. 2009. Lala iron oxide-copper-gold deposit in Sichuan Province: Evidences from mineralography[J]. *Geological Journal of China Universities*, 15(4): 485-495(in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 曹荣龙, 朱寿华, 王俊文. 1994. 白云鄂博铁-稀土矿床的物质来源和成因理论问题[J]. *中国科学(B辑)*, 24(12): 1298-1307.
- 车英丹, 吴明安, 张舒, 张赞赞, 蔡晓兵. 2017. 安徽庐枞盆地黄屯闪长玢岩地球化学特征及其地质意义[J]. *安徽地质*, 27(4): 241-246.
- 陈其平, 陈建英, 安国堡. 2009. 内蒙古阿右旗卡休他他夕卡岩型铁金矿床地质特征及控矿因素探讨[J]. *地质找矿论丛*, 24(4): 286-291.
- 陈伟, 赵新福, 李晓春, 周美夫. 2019. 中国铁氧化物-铜-金(IOCG)矿床的基本特征及研究进展[J]. *岩石学报*, 35(1): 99-118.
- 程春. 2001. 矾山磷铁矿床稀土元素地球化学特征[J]. *化工矿产地质*, 23(2): 104-108.
- 段壮. 2019. 山东莱芜地区矽卡岩型铁矿床成矿作用与成矿机制研究[D]. 导师: 李建威. 武汉: 中国地质大学. 60-180.
- 范亚洲, 周伟, 王子玺, 凌锦兰, 姜常义. 2014. 稀散元素Sc的矿床类型及找矿前景[J]. *西北地质*, 47(1): 234-243.
- 方邵平, 赵映普. 2017. 山东淄博金岭铁矿区王旺庄矿床地质特征及控矿因素简析[J]. *能源研究与管理*, (1): 57-61.
- 符亚洲, 段建兵. 2017. 陆地和海洋古今锰矿床和锰沉积物稀土元素地球化学对比及其地质意义[A]. 第八届全国成矿理论与找矿方法学术讨论会[C]. *矿物学报*, (增): 658-659.
- 郭彩莲, 成来顺, 宁新霞, 向虹, 陈炳龙, 吴天骄. 2020. 陕西省洋县毕机沟钒钛磁铁矿中钨的赋存状态研究[J]. *矿产保护与利用*, 40(5): 54-61.

- 何照波, 何云, 周晓峰, 张云生, 吴保乾, 王成仙, 张丽娟, 杨剑伟. 2022. 滇南马鞍底钒钛磁铁矿床地质特征与综合评价[J]. 矿产与地质, 36(4): 723-731.
- 侯晓志, 杨占峰, 王振江. 2022. 白云鄂博东矿深部稀土-铌-铁-钽矿化特征及多元成矿分析[J]. 稀土, 43(6): 25-34.
- 黄霞光, 罗国清, 李亚平. 2016. 攀西钒钛磁铁矿中钽的赋存状态研究[J]. 有色金属, (6): 1-4, 10.
- 金海龙, 侯少春, 魏威, 李强. 2021. 白云鄂博东矿体深部不同类型矿石的地球化学特征研究[J]. 稀土, 42(5): 59-67.
- 金子梁. 2017. 矽卡岩型富铁矿成因研究[D]. 导师: 张招崇. 北京: 中国地质大学. 99-102.
- 柯昌辉, 王晓霞, 李金宝, 杨阳, 齐秋菊, 周晓宁. 2013. 华北地块南缘黑山-木龙沟地区中酸性岩的锆石 U-Pb 年龄、岩石化学和 Sr-Nd-Hf 同位素研究[J]. 岩石学报, 29(3): 781-800.
- 《矿产资源工业要求参考手册》编委会. 2014. 矿产资源工业要求参考手册[M]. 北京: 地质出版社. 87-268.
- 《矿产资源工业要求参考手册》编委会. 2021. 矿产资源工业要求参考手册[M]. 北京: 地质出版社. 185-268.
- 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.
- 李建康, 李鹏, 王登红, 李兴杰. 2019. 中国钽铌矿成矿规律[J]. 科学通报, 64(15): 1545-1566.
- 李金虎, 张智慧, 秦明, 仇建军, 司荣军. 2011. 新疆且日克其菱铁矿床稀土元素地球化学特征[J]. 矿产与地质, 25(1): 69-73.
- 李六权, 崔江荣, 陈浩. 2019. 陕西木龙沟-黄龙铺地区钼、铌、稀土资源量概况及铌、稀土赋存特征[J]. 陕西地质, 37(1): 1-7.
- 李毓英. 1959. 白云鄂博铁矿地质与勘探[M]. 北京: 地质出版社. 1-179.
- 李志红, 朱祥坤. 2012. 河北省宣龙式铁矿的地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 28(9): 2903-2911.
- 梁培. 2018. 新疆东准噶尔北缘古生代 Fe-Cu-Au 矿床成因机制研究——以老山口和乔夏哈拉矿床为例[D]. 导师: 陈华勇. 北京: 中国科学院大学. 53-57.
- 刘锋, 杨富全, 李延河, 马宝钦, 柴凤梅, 耿新霞. 2009. 新疆阿勒泰市阿巴宫铁矿磷灰石微量和稀土元素特征及矿床成因探讨[J]. 矿床地质, 28(3): 251-264.
- 刘福祥, 于家明, 赵坤, 崔明涿. 2007. 青海省元石山铁镍矿床铁镍元素的赋存状态及变化规律[J]. 吉林地质, 26(2): 27-31.
- 刘铁庚, 张正伟, 叶霖, 沈能平, 杨占峰, 李称心, 冯建荣. 2012. 白云鄂博“白云岩”地质地球化学特征及成因讨论[J]. 地质学报, 86(5): 723-734.
- 刘英俊. 1984. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社. 20-80.
- 罗金华, 武昭好, 李俊翰, 吴恩辉, 廖先杰, 唐锐, 杨绍利. 2015. 红格钒钛磁铁矿中硫化物的矿物学特征研究[J]. 钢铁钒钛, 3: 63-67.
- 罗丽萍, 朱志敏. 2016. 拉拉铜矿床的分布和潜在资源利用意义[J]. 矿产综合利用, (4): 27-30.
- 罗泰义, 戴向东, 朱丹, 陶琰, 宋谢炎, 张欢. 2007. 镓的成矿作用及其在峨眉山大火成岩省中的成矿效应[J]. 矿物学报, 27(3/4): 281-285.
- 吕俊俊, 程希翱, 周国华. 1992. 攀枝花铁磁铁矿中钽的赋存状态研究[J]. 矿冶工程, 12(4): 35-39.
- 毛光武, 朱玉磷, 胡明安. 2013. 福建省龙岩中甲铁矿床特征及分散元素钢镉的富集规律[J]. 地质与勘探, 49(1): 130-143.
- 毛景文, 袁顺达, 谢桂青, 宋世伟, 周琦, 高永宝, 刘翔, 付小方, 曹晶, 曾载淋, 李通国, 樊锡银. 2019. 21世纪以来中国关键金属矿产找矿勘查与研究新进展[J]. 矿床地质, 38(5): 935-969.
- 孟庆润. 1982. 论白云鄂博铁矿含矿围岩——白云岩的沉积成因及其沉积环境分析[J]. 地质论评, 28(5): 481-489, 508.
- 全国地质矿产标准化技术委员会. 2002. 稀土矿产地质勘查规范: DZ/T 0204-2002[S]. 北京: 中国标准出版社.
- 全国矿产储量委员会. 1987. 矿产工业要求参考手册[M]. 北京: 地质出版社. 40-280.
- 全国自然资源与国土空间规划标准化技术委员会. 2020. 矿产地质勘查规范-铜、铅、锌、银、镍、钼: DZ/T 0214-2020[S]. 北京: 中国标准出版社.
- 石磊, 周涛发, 范裕, 张一帆, 阎磊, 梁贤. 2023. 长江中下游成矿带伴生钽资源现状及综合利用潜力评价[J]. 岩石学报, 39(4): 1144-1156.
- 宋谢炎, 余宇伟, 栾燕, 何海龙, 张祺龙, 郑文勤. 2023. 峨眉大火成岩省攀西钒钛磁铁矿矿集区钼、镓、钽资源及综合利用潜力[J]. 矿物岩石地球化学通报, 42: 1-14.
- 涂光炽, 高振敏, 胡瑞忠. 2004. 分散元素地球化学及成矿机制[M]. 北京: 地质出版社. 1-300.
- 王登红. 2019. 关键矿产的研究意义、矿种厘定、资源属性、找矿进展、存在问题及主攻方向[J]. 地质学报, 93(6): 1189-1209.
- 王乐乐, 赵廷安. 2012. 鞍本地区鞍山群含铁岩系钽矿找矿潜力分析[J]. 才智, (25): 222.
- 王录锋, 代长富. 2022. 从攀枝花钒钛磁铁矿中回收钽研究进展[J]. 矿产综合利用, (4): 21-26+52.
- 王敏芳, 郭晓南, 陈梦婷. 2014. 磁铁矿中微量元素和铂族元素的组成特征[J]. 地质找矿论丛, 29(3): 417-423.
- 王玉往, 石煜, 唐萍芝, 李德东, 王京彬, 解洪晶. 2018. 新疆磁海 Fe(-Co)矿床:两个系列幔源岩浆复合的热液矿床[J]. 地学前缘, 25(2): 280-298.
- 魏克涛, 徐江嫻, 吴昌雄, 刘冬勤, 闫芳. 2021. 鄂东南矿集区钽矿资源现状及综合利用前景浅析[J]. 资源环境与工程, 35(6): 777-781.
- 温春齐, 曹志敏, 罗小军, 霍艳. 2002. 攀枝花铁磁铁矿床稀土元素特征[J]. 矿床地质, 21(增): 833-836.
- 温汉捷, 周正兵, 朱传威, 罗重光, 王大钊, 杜胜江, 李晓峰, 陈懋弘, 李红谊. 2019. 稀散金属超常富集的主要科学问题[J]. 岩石学报, 35(11): 3271-3291.
- 温利刚, 曾普胜, 詹秀春, 范晨子, 孙冬阳, 王广, 袁继海, 费晓杰. 2018. 迦纳厂矿床:一个“白云鄂博式”铁-铜-稀土矿床[J]. 地学前缘, 25(6): 308-329.
- 温利刚, 曾普胜, 詹秀春等. 2019. 云南禄丰鹅头厂铁铜矿床中稀土矿物的发现及意义[J]. 岩石矿物学杂志, 38(4): 477-497.
- 吴强. 2020. 复杂钽硫精矿氧化焙烧分离钽硫新工艺及机理研究[D]. 导师: 肖军辉. 四川: 西南科技大学. 1-5.
- 谢玉玲, 曲云伟, 杨占峰, 梁培, 钟日晨, 王其伟, 夏加明, 李必成. 2019. 白云鄂博铁、钽、稀土矿床:研究进展, 存在问题和新认识[J]. 矿床地质, 38(5): 983-1003.

- 闫升好, 张招崇, 王义天, 陈柏林, 周刚, 何立新. 2005. 新疆阿尔泰山南缘乔夏哈拉式铁铜矿床稀土元素地球化学特征及其地质意义[J]. 矿床地质, 24(1): 25-33.
- 杨波, 杨莉, 孟文祥. 2022. 电子探针技术探究钪在白云鄂博矿床不同矿物中的赋存特征[J]. 岩矿测试, 41(2): 185-198.
- 杨富全, 刘锋, 柴凤梅, 张志欣, 耿新霞, 吕书君, 姜丽萍, 欧阳刘进. 2011. 新疆阿尔泰铁矿: 地质特征, 时空分布及成矿作用[J]. 矿床地质, 30(4): 575-598.
- 杨光树, 毛致博, 覃龙江, 李云刚, 叶紫枫, 王凯, 周艳. 2020. 云南大红山铁铜矿床碳、氧同位素和微量元素地球化学特征及成矿意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 39(5): 945-960.
- 应立娟, 王登红, 梁婷, 周汝洪. 2006. 阿尔泰乔夏哈拉铁铜金矿床的地质特征及其特殊性[J]. 地质学报, 80(10): 1572-1577+1648.
- 余金杰, 毛景文. 2002. 宁芜玢岩铁矿磷灰石的稀土元素特征[J]. 矿床地质, 21(1): 65-73.
- 袁忠信. 2012. 中国稀土矿床成矿规律[M]. 北京: 地质出版社. 1-200.
- 曾玫吾, 王曼祉, 曲维政. 1981. 白云鄂博铁矿磁铁矿成因矿物的研究[J]. 矿物岩石, (增): 44-58.
- 翟明国, 吴福元, 胡瑞忠, 蒋少涌, 李文昌, 王汝成, 王登红, 齐涛, 秦克章, 温汉捷. 2019. 战略性关键金属矿产资源: 现状与问题[J]. 中国科学基金, 33(2): 106-111.
- 张乐骏, 周涛发, 范裕, 袁峰, 钱兵, 马良. 2011. 宁芜盆地陶村铁铜床磷灰石的 LA-ICP-MS 研究[J]. 地质学报, 85(5): 834-848.
- 张培善, 陶克捷, 杨主明, 杨学明, 宋仁奎. 2001. 白云鄂博稀土、铌钽矿物及其成因探讨[J]. 中国稀土学报, 19(2): 97-102.
- 张招崇, 侯通, 李厚民, 李建威, 张作衡, 宋谢炎. 2014. 岩浆-热液系统中铁的富集机制探讨[J]. 岩石学报, 30(5): 1189-1204.
- 张招崇, 李厚民, 李建威, 宋谢炎, 胡浩, 李立兴, 柴凤梅, 侯通, 许德如. 2021. 中国铁矿成矿背景与富铁矿成矿机制[J]. 中国科学(地球科学), 51(6): 827-852.
- 赵俊兴, 李光明, 秦克章, 唐冬梅. 2019. 富含钴矿床研究进展与问题分析[J]. 科学通报, 64(24): 2484-2500.
- 郑析科. 2020. 攀西地区钒钛磁铁矿中伴生钴的富集规律[D]. 导师: 张成江. 四川: 成都理工大学. 30-45.
- 中国科学院地球化学研究所. 1987. 宁芜型铁矿床形成机理[M]. 北京: 科学出版社. 15-30.
- 周涛发, 范裕, 陈静, 肖鑫, 张舒. 2020. 长江中下游成矿带关键金属矿产研究现状与进展[J]. 科学通报, 65(33): 3665-3677.
- 周永昶, 袁朝. 1989. 大庙斜长岩杂岩体及铁磷矿的稀土元素地球化学研究[J]. 长春地质学院学报, 19(1): 43-52+84.
- 周振玲, 李功元, 宋同云, 刘宇光. 1980. 内蒙古白云鄂博白云石碳酸岩的地质特征及其成因探讨[J]. 地质论评, 26(1): 35-42+92.
- 朱利岗. 2019. 云南武定地区铁-铜-金-铀-稀土矿成矿作用与成矿动力学[D]. 导师: 刘家军. 北京: 中国地质大学. 29.
- 朱秀松, 肖骅昭, 肖绪琦, 查保杰, 李军. 1981. 关于攀枝花、太和、红格钒钛磁铁矿中钪的赋存状态和选冶过程中的走向研究[J]. 化工冶金, 2: 93-103.
- 朱志敏, 曾令熙, 周家云, 罗丽萍, 陈家彪, 沈冰. 2009. 四川拉拉铁氧化铜金矿床(IOCg)形成的矿相学证据[J]. 高校地质学报, 15(4): 485-495.