

王铁柱,车林睿,余金杰,等. 宁芜地区梅山铁矿床矿物的电子探针分析和稀土元素地球化学特征[J]. 中国地质, 2014, 41(6): 1964–1985.  
Wang Tiezhu, Che Linrui, Yu Jinjie, et al. Electron microprobe analysis and REE geochemical characteristics of minerals from the Meishan iron deposit in Nanjing—Wuhu area, Eastern China[J]. Geology in China, 2014, 41(6): 1964–1985(in Chinese with English abstract).

## 宁芜地区梅山铁矿床矿物的电子探针分析和 稀土元素地球化学特征

王铁柱<sup>1</sup> 车林睿<sup>1,2</sup> 余金杰<sup>1</sup> 陆邦成<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质科学院矿产资源研究所,国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室,北京 100037;  
2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院,北京 100083)

**摘要:**梅山铁矿床位于长江中下游成矿带宁芜盆地北段,矿体赋存于辉长闪长玢岩和下白垩统大王山组辉石安山岩的接触带。研究表明,梅山铁矿的石榴石以钙铁榴石为主,为钙铁-钙铝榴石系列,与传统意义矽卡岩矿床的石榴石组成相似;磁铁矿和赤铁矿具有斑岩铜矿和Kiruna型矿床的双重特征;赤铁矿和菱铁矿显示热液交代成因特征,但赤铁矿至少有2个成矿世代。成矿母岩辉长闪长玢岩、磁铁矿及磷灰石具有相似的稀土配分模式,暗示三者具有同源性。辉长闪长玢岩无Eu异常,代表了高氧逸度下岩浆的分离结晶作用;磁铁矿和磷灰石均具有中度负Eu异常,可能是在辉长闪长玢岩发生钠长石化的过程中,Eu以Eu<sup>3+</sup>形式在钠长石内富集,造成流体Eu亏损,后来生成的磷灰石和磁铁矿继承了流体的Eu含量特征,辉长闪长玢岩的钠长石化导致富Fe<sup>2+</sup>硅酸盐矿物淋滤铁元素进入流体,为矿床提供了铁物质。

**关键词:**玢岩铁矿;宁芜盆地;梅山铁矿床;电子探针;稀土元素

**中图分类号:**P618.31 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2014)06-1964-22

宁芜盆地位于长江中下游多金属成矿带,盆地内发育有一系列与白垩纪陆相火山岩-次火山岩有关的铁矿床<sup>[1]</sup>。众多学者和地勘单位已对宁芜地区进行了大量的研究工作。宁芜研究项目编写小组<sup>[2]</sup>根据矿床与辉长闪长玢岩的成因联系以及矿床本身的次火山成因特点,提出了“玢岩铁矿”的成矿模式,认为长江中下游宁芜、庐枞盆地中铁矿床的形成与安山质岩浆活动有关。

梅山铁矿床位于宁芜盆地北段,是一大型铁矿床<sup>[3-4]</sup>,前人曾对其进行了较为详尽的研究工作,但

对于矿床的成因仍存在争议,主要观点有:岩浆-热液型<sup>[3]</sup>,岩浆型<sup>[4-7]</sup>,热液交代型<sup>[8-11]</sup>,类矽卡岩型<sup>[12]</sup>。坚持岩浆成因观点的主要依据有:①主矿体整体呈团块状形态,②在有些部位,矿体和围岩的接触界线分明,③矿体内发育大量的气孔构造。持热液交代成因观点的主要依据是:矿床伴随强烈的围岩蚀变并且具有明显的蚀变分带现象。认为矿床属于类矽卡岩型的也是在强调矿床的热液交代成因。岩浆说和热液交代说争执的根本原因是无论哪一种成因都很难解释矿床存在的全部现象,如岩浆成

收稿日期:2014-10-08;改回日期:2014-11-03

基金项目:国家重点基础研究发展计划“973计划”(2012CB416803)和国家自然科学基金项目(41372091)联合资助。

作者简介:王铁柱,男,1990年生,硕士生,矿物学岩石学矿床学专业;E-mail: 742621160@qq.com。

通讯作者:余金杰,男,1966年生,研究员,主要从事金属矿床成矿作用研究;E-mail: yjchina@sina.com。

因很难解释矿床下盘广泛发育的钠长石化和存在的热液交代特征,对矿体出现在次火山岩体的顶部也不能给出合理解释。热液交代成因能解释矿体下盘的钠长石化,但不能解释矿石的熔浆结构以及矿体与围岩的截然关系。

在前人研究基础上,通过野外宏观地质观察以及室内岩矿石薄片的研究,本文对梅山铁矿成矿阶段进行了划分,共划分出4个成矿阶段;对典型矿物的电子探针进行了分析,精确测定了其矿物成分;对梅山铁矿床矿石中磁铁矿和赤铁矿开展了微量元素研究;通过对成矿母岩辉长闪长玢岩及矿石中磷灰石和磁铁矿的稀土元素地球化学特征研究,探讨了成矿物质来源及在成矿过程中的行为。这些研究对深入探讨梅山铁矿的成因具有重要意义,对类似矿床的找矿勘查工作具有指导作用。

## 1 区域地质背景

宁芜盆地位于下扬子沿江拗陷带,是一个在中生代褶皱拗陷基础上产生的继承性断陷型火山盆地。宁芜盆地以方山—小丹阳断裂、长江断裂带、芜湖断裂和南京—湖熟断裂为边界断裂,从南京至芜湖呈NE—SW向展布,长约60 km,宽约20 km,整体呈略向长江方向倾伏的纺锤状。

区内分布的地层有三叠系青龙群、黄马青组,侏罗系象山群、西横山组,白垩系火山岩系列,古近—新近系及第四系(图1)。三叠系青龙群主要为海相碳酸盐建造,其中周冲村组为白云质灰岩和膏盐层,黄马青组为海陆交互到陆相砂页岩。侏罗系象山群为陆相碎屑岩建造,与黄马青组假整合接触;西横山组为类磨拉石建造,假整合于象山群之上<sup>[2,8]</sup>。三叠系和侏罗系为火山岩的“基底”地层。

本区大规模的火山活动发生在中生代晚期,广泛发育陆相火山岩地层,由老至新依次为龙王山组、大王山组、姑山组和娘娘山组,各组之间均为喷发不整合接触,构成4个火山岩旋回。龙王山旋回火山岩分布于盆地北段和中段的东部,以龙王山一带最为发育,厚513 m;大王山旋回火山岩在盆地内分布最广,厚度也最大,主要分布于中、西部的广大地区,最厚达967 m;姑山旋回火山岩目前仅见于盆地的南段和北段,厚度较小,仅152~185 m;娘娘山旋回火山岩主要见于娘娘山古火山口及其周围,但

厚度较大,可达882 m<sup>[2]</sup>。宁芜火山岩以橄榄玄粗岩(或称橄榄安粗岩)系为主<sup>[13-17]</sup>,其中龙王山组为橄榄玄粗岩,大王山组属于橄榄玄粗岩和高钾钙碱性系列,姑山组为高钾钙碱系列<sup>[15]</sup>,娘娘山组以各种响岩为主,属典型的碱性岩<sup>[16]</sup>。次火山岩主要以超浅成相侵入体为主,岩石成分为辉长闪长玢岩或辉石闪长岩,主要形成于大王山旋回的晚期。本地区一系列的铁矿床,在空间上都与辉长闪长玢岩或辉石闪长岩密切相关,铁矿体或产于次火山岩体的内部,如陶村、吉山铁矿;或产于岩体内接触带,如凹山铁矿;或产于浅成岩体顶部边缘的内外接触带,如梅山铁矿、姑山铁矿和白象山铁矿等<sup>[18,18-20]</sup>。另外,花岗岩也出露于盆地中北部,由于资料缺乏,花岗岩的成因及与火山岩的关系不是很清楚。盆地中“盖层”包括上白垩统浦口组 and 赤山组砖红色砂岩、杂色砾岩、古近—新近系黄褐色粘土、细砂岩、含砾粗砂岩、砾石层、方山组玄武岩和第四系现代沉积物。

近年来,多位学者对宁芜盆地火山岩进行了定年工作,测得龙王山、大王山、姑山和娘娘山组火山岩锆石U—Pb年龄介于135~127 Ma<sup>[21-23]</sup>;辉长闪长玢岩锆石U—Pb年龄在132~128 Ma,介于大王山组和姑山组成矿时代之间<sup>[23-25]</sup>;花岗质岩石锆石U—Pb年龄为128~126 Ma<sup>[23,25]</sup>。

盆地内矿床以铁矿为主,主要矿床有梅山铁矿床、凹山铁矿床、陶村铁矿床、和尚桥铁矿床、姑山铁矿床和白象山铁矿床等。余金杰等<sup>[26]</sup>测得梅山铁矿和陶村铁矿钠长石岩带中钠长石的<sup>40</sup>Ar—<sup>39</sup>Ar年龄分别为(122.90±0.16) Ma和(124.89±0.30) Ma,代表钠长石结晶年龄或矿化年龄;袁顺达等<sup>[27]</sup>通过对宁芜盆地白象山、和睦山及陶村3个铁矿床中金云母的Ar—Ar同位素测年研究,认为整个宁芜地区的铁氧化物—磷灰石矿床主要形成于135~126 Ma。

## 2 矿床地质特征

梅山铁矿床位于宁芜盆地北段,中华门—梅山NE向挤压破碎带和梅山—吉山—凤凰山NNW向断裂带的交汇处<sup>[3,7]</sup>。矿区内出露的地层主要为上侏罗统西横山组长石石英砂岩、下白垩统龙王山组、大王山组和姑山组。其中龙王山组下部为火山角砾岩和集块岩,中部为安山质凝灰岩和角闪安山

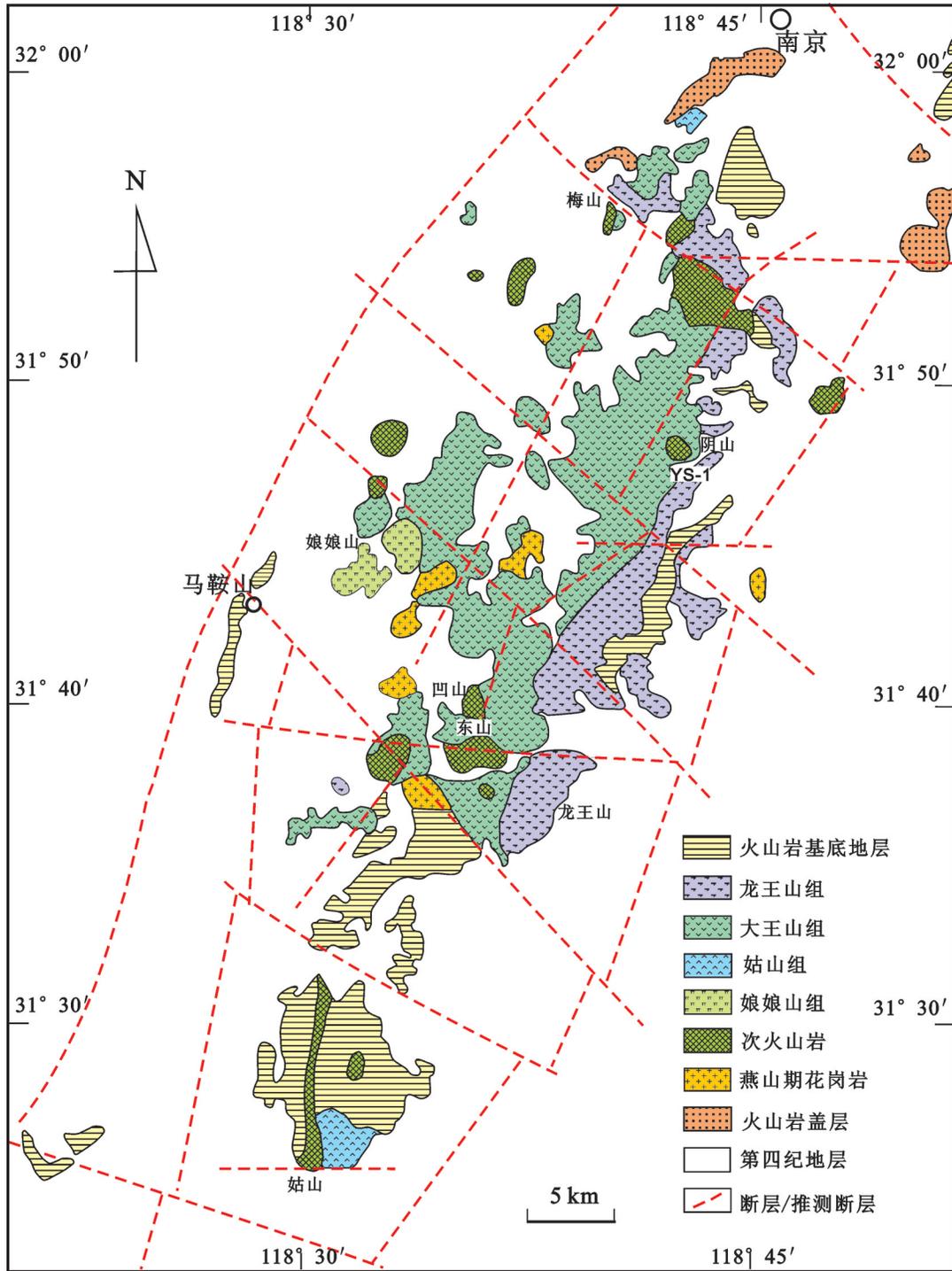


图1 宁芜盆地地质简图(据文献[2])

Fig.1 Simplified geological map of the Ningwu basin (modified after reference [2])

岩,上部为凝灰质砂岩;大王山组下部为黑云母辉石安山岩、中间为凝灰质粉砂岩、上部为辉石黑云

母安山岩;姑山组为角闪安山岩夹火山角砾岩<sup>①[3]</sup>。次火山岩除与成矿密切相关的大王山旋回末期的

①孙喜华,张龙生,蔡卫东等.江苏省南京市梅山铁矿接替资源勘查报告.2011.

辉长闪长玢岩外,还能见到辉绿玢岩,推断为姑山旋回末期产物。

矿床产于大王山组辉石安山岩(上盘)和辉长闪长玢岩(下盘)之间,主矿体形态为一巨型透镜体,上下盘皆有一些缓角度伸向围岩的矿枝,矿体下部的网脉浸染状贫矿赋存于岩体的蚀变带内,与围岩呈渐变关系或产于主矿体边部。围岩蚀变十分发育,蚀变带垂直方向总厚度大于600 m<sup>[3, 28]</sup>,具有明显的蚀变分带特征,自下往上发育下部浅色蚀变带(钠长石岩或含透辉石钠长石岩)、中部深色蚀变带和上部浅色蚀变带,其中中部深色蚀变带可细分为透辉石-钙铁榴石-钠柱石亚带、方解石-透辉石亚带和磁铁矿-透辉石-钙铁榴石亚带(图2)。主矿体上盘或矿体的西南、西北部围岩广泛发育黄铁矿化、碳酸盐化和硅化,形成上部浅色蚀变带<sup>[2-3]</sup>。

矿石类型有块状、角砾状、脉状、浸染状、似竹叶状(前人也称之为“竹叶状”)等(图3)。矿石结构

主要有半自形-他形结构、假象结构、浸蚀结构、交代网状结构,自形粒状结构、交代残余结构和交代反应边结构等。

矿石矿物主要为磁铁矿、赤铁矿、菱铁矿、黄铁矿和少量黄铜矿。脉石矿物主要为石榴石、透辉石、磷灰石、方解石、白云石、石英、硬石膏等矿物。现将主要矿物分述如下:

(1)磁铁矿:梅山铁矿的主要矿石矿物,呈半自形或他形粒状结构,在块状、角砾状、脉状、浸染状、似竹叶状矿石中均有分布。磁铁矿普遍发育赤铁矿化(图4-a),常与磷灰石、透辉石、石榴石共生,部分磁铁矿被后期的黄铁矿包裹或充填。

(2)赤铁矿:可分为2种,一种是交代磁铁矿形成,大量出现在各类型矿石中,多呈他形粒状或交代网状,当交代强烈时形成块状赤铁矿矿石(图4-a);另一种含量较少,表现为铁白云石或菱铁矿边缘发育赤铁矿化,形成赤铁矿的交代反应边(图4-b、

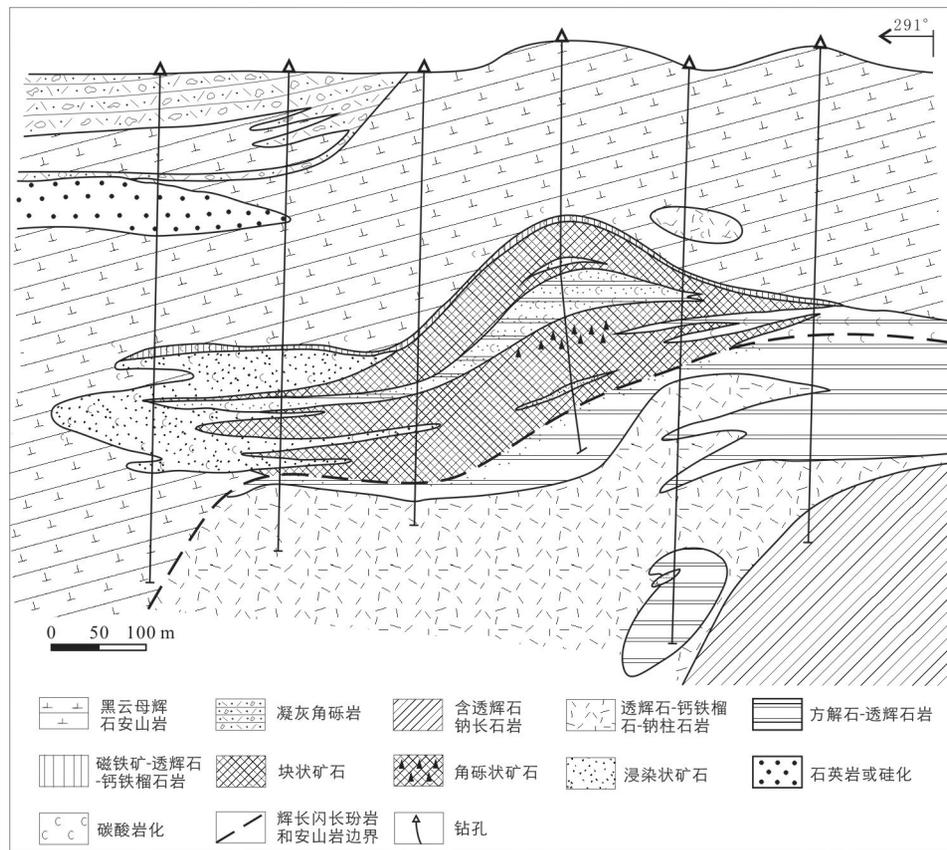


图2 梅山铁矿床剖面图(据文献[3])

Fig.2 Geological section of the Meishan iron deposit (modified after reference [3])

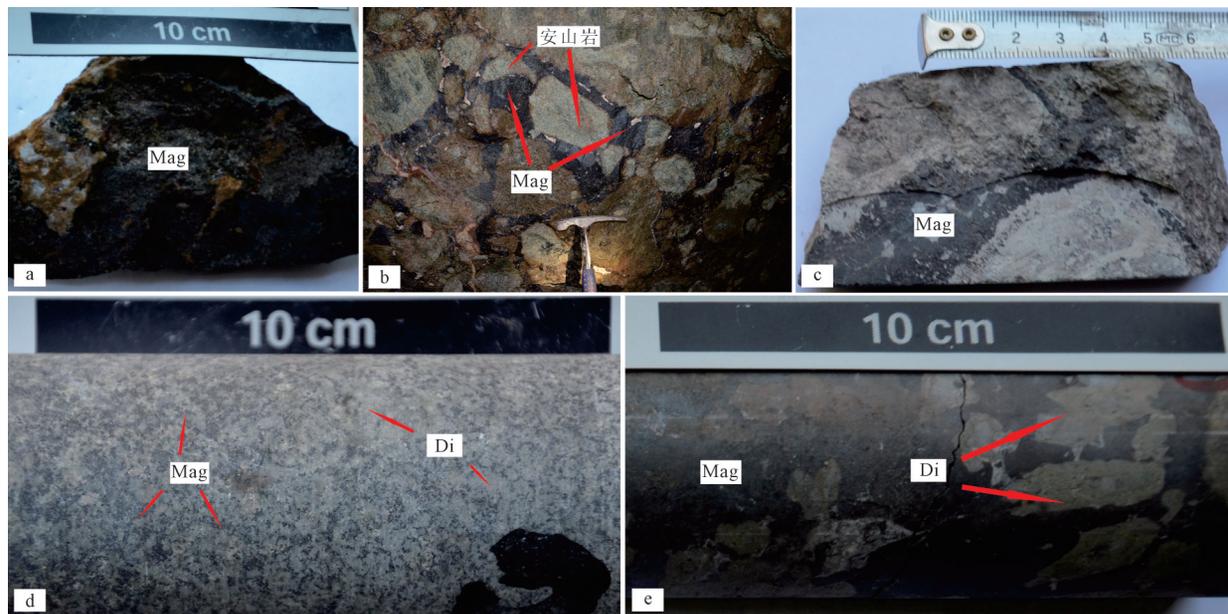


图3 梅山铁矿矿石构造

a—块状矿石；b—角砾状矿石（角砾成分为安山岩）；c—脉状矿石；d—浸染状矿石；  
e—似竹叶状矿石，竹叶成分为透辉石；Mag—磁铁矿；Di—透辉石

Fig. 3 Photographs of ores in the Meishan iron deposit

a—Massive iron ore; b—Brecciated andesite cemented by magnetite and hematite ore; c—veined iron ore; d—Disseminated ore;  
e—Bamboo-like leaf-shaped ore (the compositions of bamboo leaves are diopsides); Mag—Magnetite; Di—Diopside

h), 2种赤铁矿分属于不同的成矿世代。

(3)菱铁矿: 主要为交代透辉石和石榴石形成的, 多呈被交代矿物的形态, 部分边部发育赤铁矿化, 在似竹叶状和浸染状矿石中含量较多, 交代强烈时甚至形成块状菱铁矿矿石(图4-b)。

(4)黄铁矿: 分布广泛, 在矿石、蚀变围岩中均有发育, 分布状态可分为2种: 一种呈半自形—他形充填于早期形成的矿物的间隙, 包裹、交代早期形成的磁铁矿或赤铁矿, 与石英共生呈脉状穿切矿体(图4-c); 另一种呈独立矿体分布于主矿体的西北部。

(5)黄铜矿: 含量较少, 主要呈他形粒状, 多与黄铁矿和石英共生(图4-c)。

(6)石榴石: 矿石中石榴石分布广泛, 主要与透辉石、磁铁矿等矽卡岩矿物共生, 多呈自形—半自形粒状结构, 颗粒较大, 部分石榴石后期发育碳酸盐化(图4-d)。蚀变的辉长闪长玢岩中石榴石主要呈集合体产出(图4-e)。

(7)透辉石: 自形—半自形结构, 在似竹叶状矿石中呈大竹叶形状与磁铁矿共生(图3-e), 透辉石镜下多发生较为强烈的碳酸盐化, 本次研究未见到

新鲜的透辉石变斑晶。

(8)磷灰石: 矿床中含量较多的脉石矿物, 在块状和浸染状矿石中均有产出, 矿石中磷灰石和磁铁矿共生, 呈自形—半自形柱状结构, 多以集合体的状态产出(图4-f), 亦有少量磷灰石呈单个的大晶体分布于矿石或围岩中。

(9)方解石: 至少存在2个阶段的方解石, 早期方解石呈自形—半自形结构, 多充填于早期形成的磁铁矿中<sup>[2-3]</sup>, 部分具轻微蚀变; 晚期方解石和石英共生, 呈细脉状穿切磁(赤)铁矿(图4-g)。

(10)白云石: 可分为2种, 一种是交代早期的透辉石、石榴石形成, 呈被交代矿物的形态, 部分电子探针数据显示为铁白云石, 边部发育赤铁矿化(图4-h); 另一种形成于铁矿化期后, 与石英和硫化物共生, 呈脉状穿切矿体和围岩。

(11)石英: 可分为2种: 一种是与磁铁矿、磷灰石等共生的早期石英; 另一种是与黄铁矿、碳酸盐共生呈脉状穿切早期形成的矿体或充填于矿石晶洞中的晚期石英(图4-c, g)。

(12)硬石膏: 矿化后期出现的主要脉石矿物之

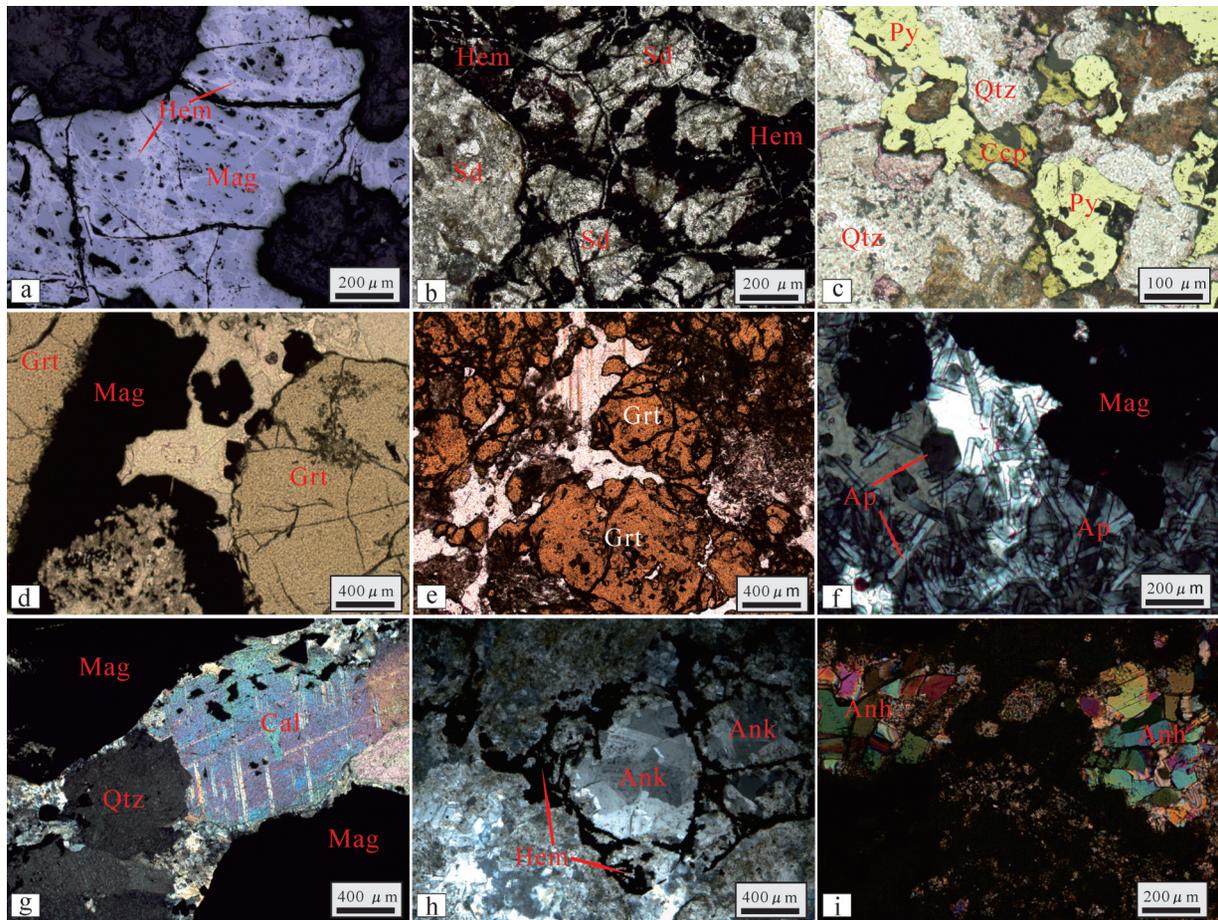


图4 梅山铁矿石显微照片

a—赤铁矿交代磁铁矿(反射光);b—菱铁矿交代透辉石或石榴石,菱铁矿边缘赤铁矿化(单偏光);c—黄铁矿-黄铜矿-石英共生(混光);d—磁铁矿-石榴石共生,被碳酸岩脉穿切(单偏光);e—蚀变辉长闪长玢岩中的石榴石集合体,方解石充填于石榴石间隙(单偏光);f—磁铁矿-磷灰石共生(正交偏光);g—方解石-石英脉穿切磁铁矿(正交偏光);h—铁白云石交代透辉石或石榴石,仍保留原矿物晶形,铁白云石边缘赤铁矿化(正交偏光);i—硬石膏脉(正交偏光);Mag—磁铁矿;Hem—赤铁矿;Sd—菱铁矿;Py—黄铁矿;Ccp—黄铜矿;Qtz—石英;Grt—石榴石;Ap—磷灰石;Cal—方解石;Ank—铁白云石;Anh—硬石膏

Fig.4 Microscopic photographs of typical minerals in the Meishan iron deposit

a-Hematite replacing magnetite (reflected light); b-Diopside or garnet replaced by siderite, hematite replacing siderite at the grain boundaries (transmitted light); c-Pyrite coexisting with chalcopyrite and quartz (combined reflected and transmitted light); d-Magnetite coexists with garnet, cutting by carbonate (transmitted light); e-Garnet in altered gabbro-diorite porphyry, carbonate filled into the interspace of garnet (transmitted light); f-Magnetite coexisting with apatite (crossed nicols); g-Calcite-quartz vein cutting magnetite (crossed nicols); h-Diopside or garnet replaced by ankerite, hematite replacing ankerite at the grain boundaries (crossed nicols); i-Anhydrite vein (crossed nicols); Mag-Magnetite; Hem-Hematite; Sd-Siderite; Py-Pyrite; Ccp-Chalcopyrite; Qtz-Quartz; Grt-Garnet; Ap-Apatite; Cal-Calcite; Ank-Ankerite; Anh-Anhydrite

一,多呈细脉状穿切矿石矿物(图4-i)。

### 3 成矿阶段划分

梅山铁矿床具有多阶段成矿特点,根据矿物之间的交代和穿插关系、矿石组构及矿物共生组合特征,并结合前人的研究成果,本文将成矿过程划分为4个成矿阶段(表1):

#### 3.1 钠长石化阶段

梅山铁矿发育明显而强烈的围岩蚀变,在主矿

体下部分布有厚层的钠长石岩带(图2),是玢岩铁矿最早的蚀变带<sup>[2-3]</sup>。钠长石岩的主要矿物为钠长石,见钠柱石残晶,含少量透辉石、磁铁矿、石榴石、磷灰石、榍石和石英。局部见磁铁矿呈细粒浸染状分布于钠长石岩中,形成浸染状和网脉状贫铁矿石。石榴石主要呈集合体产出,与长柱状磷灰石、粒状石英等共生。

#### 3.2 类矽卡岩阶段

是在钠长石化的基础上进行的,为铁矿的主成

表1 梅山铁矿成矿阶段和矿物生成顺序  
Table 1 Mineral-forming sequence and ore-forming stages of the Meishan iron deposit

矿物	钠长石化阶段	类砂卡岩阶段	赤铁矿和菱铁矿矿化阶段	石英-硫化物阶段
钠长石	—			
钠柱石	—			
透辉石	—	—		
磷灰石	—	—		
石榴石	—	—		
磁铁矿	—	—	—	
榍石	—			
石英	—	—		—
方解石		—	—	—
白云石			—	—
赤铁矿			—	
菱铁矿			—	
铁白云石			—	
高岭石				—
黄铁矿				—
黄铜矿				—
方铅矿				—
硬石膏				—

矿阶段,块状富铁矿石主要形成于此阶段,该阶段形成前人所说的中色蚀变带<sup>[2-3]</sup>,可细分为透辉石-钙铁榴石-钠柱石亚带、方解石-透辉石亚带和磁铁矿-透辉石-钙铁榴石亚带(图2),梅山主矿体形成于此阶段。在次火山岩体辉长闪长玢岩上部及边部也形成脉状、角砾状、浸染状和似竹叶状矿石(图3)。本阶段出现类似砂卡岩的矿物组合,矿物组合是磁铁矿-石榴石-透辉石-方解石-磷灰石±石英(表1),其中的磷灰石为长柱状集合体,与磁铁矿共生(图4-f)。但它们与传统的接触交代型(中酸性岩体侵入碳酸盐中,在接触带形成蚀变硅酸盐矿物组合)钙质砂卡岩矿物具不同形成环境,是由次火山岩侵入火山岩围岩经交代作用所形成,前人称之为类砂卡岩<sup>[9,29]</sup>。

### 3.3 赤铁矿和菱铁矿化阶段

本阶段主要表现为对前期矿化的叠加改造,在钠长石化阶段形成的矿床下部的钠长石岩带中,本阶段蚀变相对比较微弱,但仍能见到透辉石发生蚀变,生成方解石、白云石等碳酸盐矿物,但仍保留透辉石晶形,也能见到磁铁矿的赤铁矿化。类砂卡岩

阶段生成的蚀变带在本阶段遭受了强烈的叠加蚀变,主要表现为磁铁矿的赤铁矿化(图4-a),辉石和石榴石的菱铁矿化和铁白云石化(图4-b、d、e、h)。赤铁矿明显为2个世代的产物,第一种为交代磁铁矿的产物(图4-a),第二种从边缘交代菱铁矿和铁白云石,在菱铁矿或铁白云石边缘形成赤铁矿(图4-b、h),后者发生稍晚,规模较小。石榴石比较稳定,部分保留下来,交代作用强烈时,石榴石被碳酸盐(菱铁矿和/或铁白云石)交代(图4-d、h)等;本阶段在改造早阶段蚀变过程中,部分地段保留了原来矿石的结构构造以及早期蚀变矿物的晶形。在本阶段蚀变强烈地段,局部形成块状赤铁矿矿石和菱铁矿矿石<sup>①</sup>。

### 3.4 石英-硫化物阶段

本阶段矿化主要发生在磁铁矿矿体上部、边部或外围,是成矿晚期以水溶液为主导的矿化蚀变。发育硅化、碳酸岩化、黄铁矿化和高岭土化等,生成石英(图4-g)、方解石(图4-g)、硬石膏(图4-i)、白云石、高岭石和少量菱铁矿。在矿体某些部位黄铁矿比较发育,偶见伴生少量黄铜矿(图4-c)和方铅矿,表现为磁铁矿或赤铁矿被黄铁矿细脉不同程度的穿插。硬石膏多呈脉状产出(图4-i),生成较晚。石英-硫化物阶段大致与上部浅色蚀变带<sup>[2-3]</sup>相对应,局部形成黄铁矿矿体和金矿体<sup>②</sup>。

## 4 典型矿物电子探针分析

### 4.1 样品位置和测试分析方法

本文样品采自梅山矿区的矿体和火山岩,包括块状矿石、脉状矿石、浸染状矿石、似竹叶状矿石、辉长闪长玢岩和辉绿玢岩。样品位置和主要矿物组成见表2。样品磨制探针薄片后先在光学显微镜下观察,然后选取典型矿物进行电子探针分析测试。

电子探针测试分析在中国地质科学院矿产资源研究所电子探针实验室完成,仪器型号为JE-OLJXA-8230,工作条件为:加速电压20 kV,电流20 nA,束斑直径5 μm。

### 4.2 矿物特征及数据分析

#### 4.2.1 磁铁矿

磁铁矿电子探针分析数据显示(表3):矿石样

①江苏省地质调查研究院. 江苏省南京市梅山铁矿区资源储量核查报告. 2009.

②孙喜华, 张龙生, 蔡卫东, 等. 江苏省南京市梅山铁矿接替资源勘查报告. 2011.

表2 电子探针样品特征描述

Table 2 Characteristics and locations of samples for electron microprobe analysis

样品号	地点	岩石/矿石描述
MS-12-12	ZK4041 孔 76.8 m	蚀变辉长闪长玢岩, 见脉状磁铁矿穿插
MS-12-13	ZK4041 孔 80 m	蚀变辉长闪长玢岩
MS-12-30	-303 m2LN14 巷道	块状铁矿石, 矿石成分主要为磁铁矿+赤铁矿
MS-12-81	-273 m2LN23 巷道	铁矿石, 主要矿物为石榴石+磁铁矿
MS-12-88	ZK4141 孔 33 m	蚀变辉长闪长玢岩
MS-12-107	ZK4143(JK001) 孔 110.5 m	辉绿玢岩
MS-12-113	ZK4143(JK001) 孔 161.4 m	辉绿玢岩
MS-12-121	ZK4101 孔 701.9 m	辉长闪长玢岩, 可见细黄铁矿脉穿入
MS-12-122	ZK4101 孔 712.9 m	辉长闪长玢岩, 可见细黄铁矿脉穿入
MS-12-126	JD-44 孔 8.2 m	浸染状矿石, 主要矿物为磁铁矿+赤铁矿+磷灰石+菱铁矿+石英
MS-12-135	JD-49 孔 6.9 m	块状富矿石, 主要矿物为磁铁矿+磷灰石+石榴石
MS-12-139	JD-49 孔 25.2 m	块状富矿石, 主要矿物为磁铁矿+赤铁矿+磷灰石+菱铁矿+石英+硬石膏
MS-12-141	MS-12-141 孔 41.4 m	块状富矿石, 主要矿物为磁铁矿+磷灰石+菱铁矿+硬石膏
MS-12-161	JD-55 孔 51m	块状富矿石, 主要矿物为磁铁矿+赤铁矿+磷灰石+菱铁矿+石英
MS-12-162	JD-55 孔 53.8 m	块状矿石, 矿物为磁铁矿+磷灰石+石英, 石英充填于孔洞中
MS-12-165	-303 m, 9LN18 巷道	块状菱铁矿矿石, 含浸染状磁铁矿+赤铁矿
MS-12-168	-303 m, 7LN16 巷道	菱铁矿矿石, 矿物组合为菱铁矿+磁铁矿+赤铁矿

品中磁铁矿  $\text{TiO}_2$  含量为 0~0.54%, 平均为 0.28%;  $\text{MgO}$  含量为 0~0.30%, 平均含量 0.10%;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 0.02%~1.02%, 平均为 0.24%;  $\text{MnO}$  的含量为 0~0.34%, 平均为 0.19%。火山岩(辉长闪长玢岩和辉绿玢岩)样品中  $\text{TiO}_2$  含量为 0.64%~17.96%, 平均为 10.38%;  $\text{MgO}$  含量为 0.01%~3.89%, 平均为 1.71%;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 0.33%~4.69%, 平均为 2.56%;  $\text{MnO}$  的含量为 0.07%~1.49%, 平均为 0.52%。

林师整<sup>[30]</sup>通过对 3000 多个数据的整理分析, 制作了  $\text{TiO}_2$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ -( $\text{MgO}+\text{MnO}$ )三角成因图解, 将磁铁矿化学成分标型成因分为 6 类: 副矿物型、岩浆型、火山岩型(玢岩型)、接触交代热液型、矽卡岩型和沉积变质型。梅山铁矿床矿石中磁铁矿和火山岩中磁铁矿成分投图(图 5-a)显示: 矿石中磁铁矿主要分布于火山岩型(玢岩型)和沉积变质型区域, 可能反映磁铁矿经历了后期改造作用。火山岩中磁铁矿几乎全部分布于副矿物型区域, 显示了数据的可靠性。

Dupuis et al<sup>[31]</sup>通过对不同成因类型矿床中磁铁矿和赤铁矿的元素含量分析总结, 建立了  $(\text{Ca}+\text{Al}+\text{Mn})$ - $(\text{Ti}+\text{V})$ 图解。梅山铁矿矿石中磁铁矿和赤铁矿的投图显示(图 5-b), 磁铁矿和赤铁矿主要集中

在斑岩型区域, 3 件样品落入 Kiruna 型区域, 说明梅山铁矿床矿石中磁铁矿和赤铁矿具有斑岩型铜矿和 Kiruna 型矿床的双重特征。图 5-a 和 5-b 仅有 1 件样品落入矽卡岩型矿床区域, 说明梅山铁矿磁铁矿与传统意义矽卡岩矿床中的磁铁矿成分有差异。

#### 4.2.2 赤铁矿

赤铁矿的电子探针数据显示(表 4): 矿石中的赤铁矿  $\text{TiO}_2$  含量为 0~0.38%, 平均为 0.14%;  $\text{MgO}$  含量为 0~0.21%, 平均为 0.07%;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 0.13%~0.97%, 平均为 0.33%;  $\text{SiO}_2$  含量为 0.03%~1.24%, 平均为 0.44%。本文对赤铁矿和磁铁矿中各主量元素含量进行对比, 结果显示(图 6): 赤铁矿中 Na、K、Si、P、Cr 元素百分比含量明显高于磁铁矿(约 2~3 倍), Al 略高于磁铁矿; 而 Ti、Mg、Ca、Mn 低于磁铁矿, 但差别不大(不低于磁铁矿的 1/2), V 略高; Ni 元素含量二者相持平。

#### 4.2.3 菱铁矿和铁白云石

菱铁矿和铁白云石的电子探针分析结果见表 5, 2 件样品中 Fe 元素含量较低( $\text{FeO}=16.21\%$ 和  $18.60\%$ ,  $\text{FeO}$  为全铁, 下同), 但均大于 Mg 含量( $\text{MgO}=8.02\%$ 和  $6.81\%$ ), 当  $\text{FeO} > \text{MgO}$  时应为铁白云石<sup>[32]</sup>, 因此, 表 5 中 2 个点为铁白云石, 其余点为菱

表3 梅山铁矿床磁铁矿电子探针分析结果(%)

Table 3 Electron microprobe analyses of magnetite from the Meishan iron deposit (%)

分析项目	铁矿石									火山岩(辉长闪长玢岩和辉绿玢岩)									
	MS-12	MS-12	MS-12	MS-12	MS-12	MS-12	MS-12	MS-12	MS-12	MS-12									
	-165	-139	-141	-141	-141	-141	-81	-126	-30	-88	-88	-113	-113	-113	-113	-107	-107	-122	-122
	1-2	5-2	3-1	3-2	3-3	3-4	1-2	2-1	2-2	1-1	1-2	1-4	1-5	3-1	3-2	2-1	2-2	3-1	3-2
Na <sub>2</sub> O	0.00	0.02	0.00	0.00	0.10	0.09	0.00	0.05	0.01	0.00	0.06	0.01	0.04	0.04	0.00	0.04	0.05	0.02	0.02
MgO	0.02	0.00	0.11	0.17	0.16	0.04	0.13	0.00	0.30	1.47	0.91	0.08	3.89	3.36	0.01	3.66	3.58	0.05	0.06
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.19	0.26	0.11	0.12	0.11	0.11	0.22	0.02	1.02	3.14	2.38	1.65	4.69	4.01	1.48	3.78	3.74	0.38	0.33
CaO	0.00	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K <sub>2</sub> O	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00
SiO <sub>2</sub>	0.29	0.30	0.07	0.06	0.03	0.16	0.03	0.13	0.09	0.20	0.76	0.14	0.12	0.09	0.10	0.14	0.17	0.06	0.04
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.02	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FeO	91.46	91.41	91.54	93.08	92.72	91.92	93.18	91.42	89.65	82.72	83.16	74.90	76.53	70.68	73.95	75.14	75.73	92.29	92.34
TiO <sub>2</sub>	0.39	0.00	0.26	0.45	0.32	0.40	0.06	0.14	0.54	6.34	6.59	16.87	9.10	15.55	17.96	14.79	15.17	0.84	0.64
NiO	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00	0.01	0.02	0.00	0.01	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.03	0.00	0.00
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.07	0.00	0.00	0.06	0.00	0.02	0.03	0.04	0.07	0.10	0.09	0.26	1.61	0.11	0.33	0.36	0.03	0.04
MnO	0.18	0.01	0.13	0.34	0.30	0.11	0.30	0.00	0.30	0.25	0.28	1.24	0.43	0.41	1.49	0.42	0.40	0.19	0.07
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.10	0.07	0.05	0.11	0.04	0.06	0.05	0.27	0.11	0.32	0.28	0.72	0.52	0.67	0.78	0.69	0.80	0.40	0.35
Total	92.68	92.35	92.27	94.36	93.85	92.91	94.01	92.08	92.09	94.53	94.55	95.75	95.62	96.49	95.89	99.06	100.03	94.26	93.87

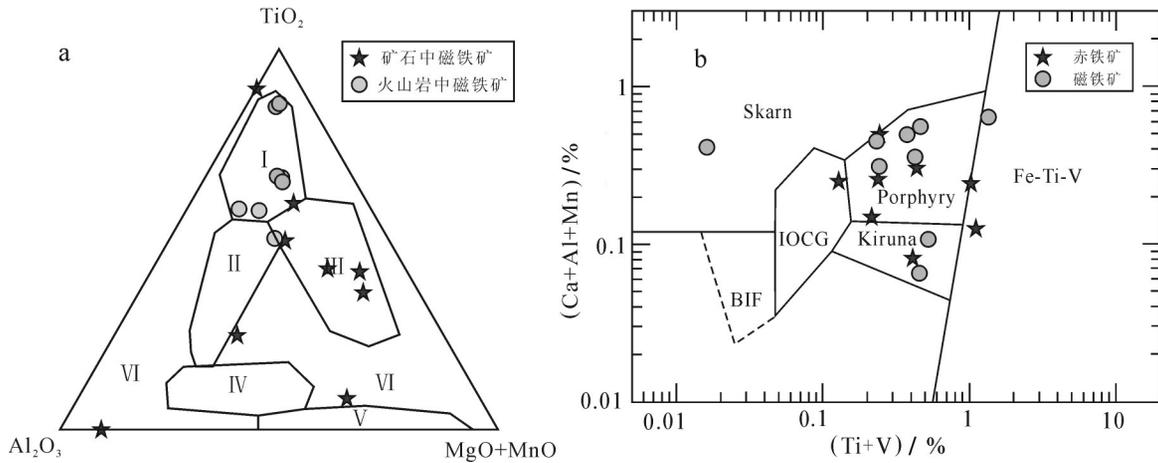


图5 梅山铁矿床铁氧化物成因分类图解

a—磁铁矿成因分类图解(据文献[30]); I—副矿物型; II—岩浆型; III—火山岩型(玢岩型); IV—接触交代热液型; V—矽卡岩型; VI—沉积变质型;b—Ca+Al+Mn-Ti+V图解(据文献[31])

Fig.5 Genetic classification diagram of iron oxides from the Meishan iron deposit

a—Genetic classification diagram of magnetite (after reference [30]); I—Accessory mineral origin; II—Magmatic origin; III—Volcanic origin (porphyry); IV—Contact metasomatic origin; V—Skarn origin; VI—Sedimentary metamorphism origin; b—Ca+Al+Mn versus Ti+V discriminant diagram of magnetite and hematite (after reference [31])

铁矿。菱铁矿和铁白云石中MgO含量为3.88%~9.12%, Mn含量均较低(MnO=0.10%~1.39%)。根据电子探针数据,通过氧原子法计算二者的晶体化学式,菱铁矿和铁白云石分别基于3个和6个O原

子进行计算,电子探针各组分总量(Total)不足100%的部分认为是CO<sub>2</sub>。经计算,菱铁矿和铁白云石的晶体化学式可分别表示为(计算结果见表5):



表4 梅山铁矿床赤铁矿电子探针分析结果(%)

Table 4 Electron microprobe analyses of hematite from the Meishan iron deposit (%)

样品号	点号	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	FeO	TiO <sub>2</sub>	NiO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Total
MS-12-165	1-1	0.04	0.03	0.20	0.00	0.01	0.33	0.02	88.98	0.38	0.00	0.03	0.04	0.12	90.19
MS-12-139	4-2	0.20	0.00	0.19	0.00	0.04	0.62	0.06	88.91	0.12	0.01	0.13	0.03	0.03	90.32
MS-12-139	4-3	0.08	0.04	0.13	0.00	0.02	0.60	0.00	87.87	0.19	0.05	0.12	0.00	0.06	89.16
MS-12-139	5-1	0.02	0.21	0.15	0.10	0.03	0.43	0.06	89.43	0.25	0.01	0.07	0.18	0.06	91.00
MS-12-126	2-2	0.03	0.00	0.14	0.01	0.02	0.35	0.02	89.87	0.16	0.00	0.03	0.08	0.10	90.83
MS-12-161	1-1	0.12	0.07	0.97	0.00	0.03	1.24	0.00	88.19	0.00	0.03	0.05	0.13	0.13	90.96
MS-12-161	1-2	0.11	0.00	0.78	0.00	0.00	0.20	0.02	90.14	0.05	0.00	0.05	0.25	0.20	91.78
MS-12-168	2-1	0.03	0.08	0.16	0.00	0.00	0.13	0.00	90.16	0.00	0.00	0.01	0.25	0.00	90.82
MS-12-168	2-2	0.05	0.16	0.20	0.00	0.01	0.03	0.00	90.71	0.08	0.00	0.00	0.21	0.00	91.46

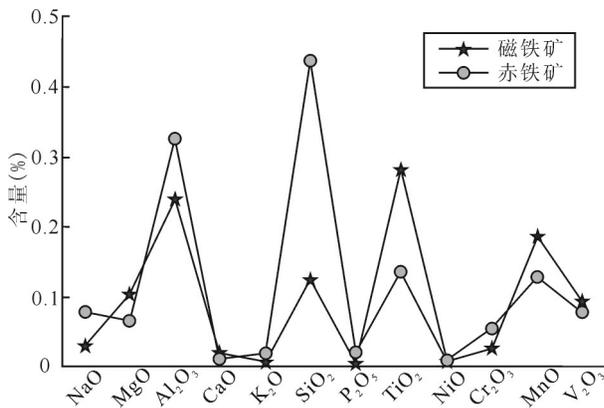
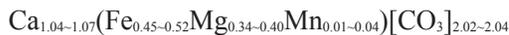


图6 梅山铁矿床矿石中磁铁矿和赤铁矿主要元素平均含量对比图解

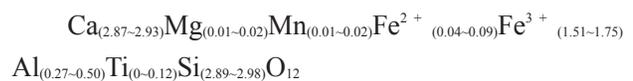
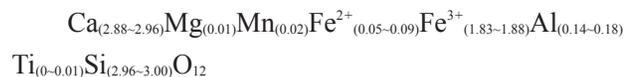
Fig.6 Contrast diagram of the average values of main constituents between magnetite and hematite from the Meishan iron deposit



#### 4.2.4 石榴石

电子探针结果显示(表6):铁矿石中石榴石And(钙铁榴石)端元组分范围在90.86%~92.89%,平均为92.17%;其次为Gro(钙铝榴石),端元组分范围在3.38%~5.30%,平均为4.42%;再次为Alm(铁铝榴石),端元组分范围在1.70%~3.13%,平均为2.60%;其他端元组分含量均不到1%。矿石中的石榴石属于钙铁榴石-钙铝榴石系列。辉长闪长玢岩

中石榴石的端元组分分别为:And(钙铁榴石)75.05%~86.68%,平均为80.75%;Gro(钙铝榴石)9.70%~21.29%,平均为15.76%;Alm(铁铝榴石)1.40%~3.10%,平均为2.39%;其他端元组分含量亦均低于1%。矿石中石榴石的And含量明显高于火山岩,平均值分别为92.17%和80.75%;而Gro和Alm含量要低于火山岩。矿石和辉长闪长玢岩中石榴石的晶体化学式分别可表示为:



梅山铁矿石榴石多和磁铁矿、透辉石共生,具有矽卡岩的矿物组合特征,石榴石端元组分与一些典型钙矽卡岩型矿床中石榴石成分相似,如安庆矽卡岩型铁铜矿床<sup>[33]</sup>,新疆蒙库铁矿<sup>[34-35]</sup>,邯鄹—邢台地区矽卡岩铁矿<sup>[36]</sup>,鄂东南程潮铁矿<sup>[37]</sup>。均属于以钙铁榴石为主的钙铁榴石-钙铝榴石系列(图7)。

#### 4.2.5 磷灰石

磷灰石的电子探针分析结果显示(表7):矿石中磷灰石CaO含量为52.29%~54.69%,平均53.73%;P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含量为37.42%~39.80%,平均为38.54%。辉长闪长玢岩中磷灰石CaO含量为54.65%~55.52%,平均55.03%;P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含量为37.03%~38.85%,平均为38.11%,火山岩磷灰石的CaO含量偏高。

表5 梅山铁矿床菱铁矿和铁白云石电子探针分析结果(%)  
Table 5 Electron microprobe analyses (%), ion proportions and end members of siderite  
and ankerite from the Meishan iron deposit

分析 项目	菱铁矿							铁白云石	
	MS-12	MS-12	MS-12	MS-12	MS-12	MS-12	MS-12	MS-12	MS-12
	-139	-141	-141	-168	-168	-13	-13	-165	-165
	1-2	2-1	2-2	1-1	1-2	2-3	2-4	1-3	1-4
Na <sub>2</sub> O	0.06	0.07	0.06	0.04	0.06	0.03	0.06	0.00	0.04
MgO	6.01	3.88	5.88	6.97	7.33	8.46	9.12	6.81	8.02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.07	0.09	0.03	0.02	0.17	0.05	0.16	0.03	0.05
CaO	5.38	2.85	2.56	6.17	5.04	1.60	5.06	29.93	29.19
K <sub>2</sub> O	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.02	0.03	0.00	0.00
SiO <sub>2</sub>	0.11	0.04	0.00	0.04	0.01	0.06	0.20	0.02	0.02
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.00	0.00	0.02
FeO <sub>T</sub>	45.46	51.45	49.46	44.71	38.64	47.81	43.23	18.60	16.21
TiO <sub>2</sub>	0.04	0.01	0.63	0.00	0.00	0.10	0.00	0.05	0.00
NiO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.02	0.05
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.01	0.00	0.04	0.01	0.02	0.04	0.00	0.03
MnO	0.30	0.54	1.39	0.59	0.30	0.38	0.36	0.35	1.27
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.04	0.02	0.03	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.02
Total	57.48	58.97	60.04	58.57	51.61	58.55	58.27	55.83	54.92
	基于3个O原子							基于6个O原子	
Na	0.002	0.003	0.002	0.001	0.002	0.001	0.002	0.000	0.001
Mg	0.317	0.211	0.320	0.371	0.361	0.450	0.479	0.341	0.396
Al	0.003	0.004	0.001	0.001	0.007	0.002	0.007	0.001	0.002
Ca	0.204	0.111	0.100	0.236	0.179	0.061	0.191	1.076	1.035
K	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000
Si	0.004	0.001	0.000	0.001	0.000	0.002	0.007	0.001	0.001
P	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001
Fe	1.345	1.567	1.511	1.334	1.068	1.426	1.274	0.522	0.449
Ti	0.001	0.000	0.017	0.000	0.000	0.003	0.000	0.001	0.000
Ni	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001
Cr	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001
Mn	0.009	0.017	0.043	0.018	0.008	0.011	0.011	0.010	0.036
V	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001
CO <sub>3</sub>	2.053	2.040	1.993	2.018	2.184	2.018	2.008	2.023	2.037

笔者基于25个O离子计算(磷灰石分子式采用Ca<sub>10</sub>[PO<sub>4</sub>]<sub>6</sub>(OH, F, Cl)<sub>2</sub>, 计算方法据Cao et al<sup>[38]</sup>), 计算结果列于表7。矿石中氟磷灰石端元组分范围0.58~1.11, 平均为0.96; 氯磷灰石端元组分范围0.03~0.14, 平均为0.09, 羟基磷灰石端元组分范围0.75~1.28, 平均为1.00; 辉长闪长玢岩中氟磷灰石端元组分范围0.71~1.28, 平均为0.91; 氯磷灰石端元

组分范围0.35~0.41, 平均为0.39; 羟基磷灰石端元组分范围0.31~0.88, 平均为0.70。

矿石中氯磷灰石端元明显低于辉长闪长玢岩, 氟磷灰石没有明显差别。根据计算结果, 按照磷灰石的阴离子分类, 矿石中主要为氟磷灰石和羟基磷灰石, 辉长闪长玢岩主要为氟磷灰石。矿石和辉长闪长玢岩磷灰石的晶体化学式分别可表示为:

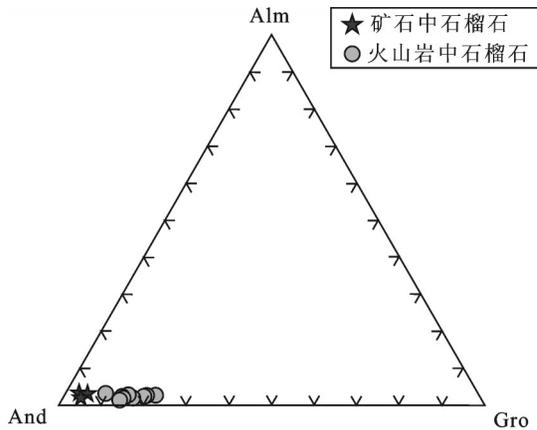
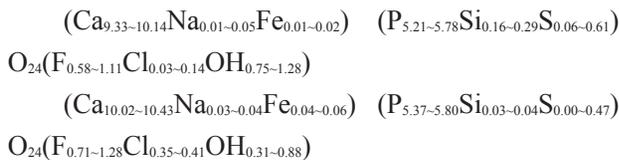


图7 梅山铁矿床石榴石端员组分图解

Alm—铁铝榴石; And—钙铁榴石; Gro—钙铝榴石

Fig.7 End members of garnets from the Meishan iron deposit

Alm - Almandite; And - Andradite; Gro - Grossular



## 5 稀土元素特征及分析

### 5.1 样品特征及分析方法

本次研究采集了4件成矿母岩辉长闪长玢岩样品,5件磁铁矿样品和5件磷灰石样品。4件辉长岩闪长玢岩样品均采自梅山ZK4101钻孔,岩石比较新鲜。磁铁矿样品MS-12-14,采自JD-49钻孔,为似竹叶状矿石,“竹叶”成分为透辉石,胶结物为磁铁矿/赤铁矿;MS-12-70采自JD-39钻孔,样品矿物组合为透辉石+磁铁矿/赤铁矿+磷灰石;MS-12-72同上;MS-12-83采自-318 m,3LN14巷道,为菱铁矿矿石中的浸染状赤铁矿,矿物组合为透辉石+磁铁矿/赤铁矿;MS-12-131采自JD-44钻孔,浸染状矿石,矿物组合为透辉石+磁铁矿/赤铁矿。磷灰石样品MS-12-16采自JD-44钻孔,为含磷灰石铁矿石,磷灰石含量约40%~60%;MS-12-125采自JD-44钻孔,浸染状矿石,矿物组合为磁铁矿+透辉石+磷灰石+石英;样品MS-12-135、MS-12-139和MS-12-126特征见表2。

辉长闪长玢岩的稀土元素分析在国家地质实验测试中心完成,具体操作为:称取全岩粉末样品放入Teflon瓶中,加入HF和HNO<sub>3</sub>混合酸,并用

Teflon封闭反应罐进行溶样,溶解后的样品用电感耦合等离子质谱(ICP-MS)进行稀土元素的分析测试。该仪器对稀土元素的检测下限为 $(0.n\sim n)\times 10^{-9}$ ,分析误差小于5%。单矿物的稀土元素分析在核工业北京地质研究院完成,首先将野外采集的矿石样品经手选、洗净、干燥后送至岩石矿物分选技术服务公司挑选单矿物,得到纯度为99%以上的单矿物样品。准确称取样品0.0500 g放入25 mL专用溶样罐中,先用少量水润湿,轻轻震动使样品均匀,加入1 mL氢氟酸,3 mL硝酸,1 mL高氯酸,盖上专用溶样罐盖,在低温电热板上200℃加热溶解,待样品分解后,打开溶样罐,在低温电热板上加热蒸至近干,滴加2滴高氯酸,再次蒸至近干后加入1:1硝酸3 mL,盖上专用溶样罐盖焖置一段时间。用1%硝酸提取至50 mL容量瓶中,摇均匀后在ICP-MS上采用在线内标(Rh)法进行测量,得各样品的测定结果,分析误差小于5%。

梅山铁矿辉长闪长玢岩、矿石中磁铁矿和磷灰石单矿物稀土元素分析结果列于表8,图8-a~c为样品球粒陨石标准化的稀土元素配分模式图。样品的稀土元素地球化学特征如下:

4件辉长闪长玢岩样品稀土元素含量差别不大, $\Sigma \text{REE}=126.7\sim 139.6 \mu\text{g/g}$ ,LREE/HREE=8.7~9.6,(La/Yb)<sub>N</sub>=10.1~11.7,轻、重稀土元素之间分异明显,轻稀土元素相对富集。(La/Sm)<sub>N</sub>=3.6~3.7,(Gd/Yb)<sub>N</sub>=1.85~2.04,显示轻重稀土元素组内部均有分异,而HREE内部分异相对较弱; $\delta\text{Eu}=1.01\sim 1.08$ ( $\delta\text{Eu}=\text{Eu}_N/\sqrt{\text{Sm}_N+\text{Gd}_N}$ ,下同),平均值为1.04, $\delta\text{Ce}=0.98\sim 1.01$ ( $\delta\text{Ce}=\text{Eu}_N/\sqrt{\text{La}_N+\text{Pr}_N}$ ,下同),平均值为1.00,Eu和Ce均无明显异常。稀土元素配分模式为轻稀土富集,重稀土相对亏损的右倾型,并具有左陡右缓特征。

5件磁铁矿/赤铁矿样品稀土元素含量略有差异,但整体具有一致性, $\Sigma \text{REE}=3.1\sim 15.0 \mu\text{g/g}$ ,LREE/HREE=8.8~14.6,(La/Yb)<sub>N</sub>=10.0~24.1,轻、重稀土元素之间分异明显,轻稀土元素相对富集。(La/Sm)<sub>N</sub>=6.0~12.2,(Gd/Yb)<sub>N</sub>=1.1~2.1,显示轻重稀土元素组内部均有分异,LREE内部分异强,而HREE内部分异相对较弱; $\delta\text{Eu}=0.53\sim 0.73$ ,平均为0.65,具中度Eu异常, $\delta\text{Ce}=0.88\sim 1.00$ ,平均值为0.93,无明显Ce异常。稀土元素配分模式为轻稀土

表6 梅山铁矿床石榴石电子探针分析结果(%)

Table 6 Electron microprobe analyses (%), ion proportions and end members of garnet from the Meishan iron deposit

分析 项目	铁矿石			辉长闪长玢岩								
	MS-12	MS-12	MS-12	MS-12	MS-12	MS-12	MS-12	MS-12	MS-12	MS-12	MS-12	MS-12
	-81	-81	-81	-12	-12	-12	-12	-13	-13	-13	-13	-13
	2--1	2--2	2--3	1--1	1--2	1--3	1--4	2--1	2--2	1--1	1--2	1--3
SiO <sub>2</sub>	36.26	35.52	35.01	36.24	35.69	35.81	36.20	35.50	36.88	35.66	35.65	35.23
TiO <sub>2</sub>	0.02	0.00	0.08	0.80	0.74	0.65	1.33	0.17	0.00	0.94	0.66	1.93
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.48	1.87	1.44	4.06	3.91	3.49	4.80	2.73	5.27	4.61	3.31	3.61
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.06	0.00	0.02	0.02	0.01	0.01
FeO	28.15	27.42	27.40	24.32	24.84	24.77	23.72	26.41	23.59	23.74	24.85	24.86
MnO	0.24	0.27	0.23	0.24	0.23	0.23	0.22	0.12	0.21	0.13	0.20	0.24
MgO	0.04	0.06	0.06	0.16	0.17	0.10	0.20	0.06	0.11	0.18	0.13	0.18
CaO	32.52	32.39	32.76	33.14	32.71	32.40	33.07	32.63	33.69	32.90	33.05	32.88
Na <sub>2</sub> O	0.02	0.00	0.01	0.03	0.00	0.03	0.00	0.04	0.00	0.02	0.00	0.03
K <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.01	0.04	0.03	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.03	0.02
NiO	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.04	0.07	0.10	0.11	0.08	0.08	0.01	0.10	0.09	0.16
Total	98.74	97.57	97.08	99.11	98.41	97.63	99.71	97.75	99.79	98.30	97.98	99.19
Si	3.00	2.98	2.96	2.96	2.94	2.98	2.93	2.96	2.98	2.93	2.95	2.89
Ti	0.00	0.00	0.01	0.05	0.05	0.04	0.08	0.01	0.00	0.06	0.04	0.12
Al	0.15	0.18	0.14	0.39	0.38	0.34	0.46	0.27	0.50	0.45	0.32	0.35
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe <sup>3+</sup>	1.85	1.83	1.88	1.60	1.63	1.65	1.53	1.75	1.51	1.56	1.68	1.64
Fe <sup>2+</sup>	0.09	0.09	0.05	0.06	0.09	0.07	0.08	0.09	0.08	0.08	0.04	0.06
Mn	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
Mg	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
Ca	2.88	2.91	2.96	2.90	2.89	2.88	2.87	2.92	2.91	2.90	2.93	2.89
Ura	0.00	0.00	0.02	0.04	0.01	0.00	0.18	0.00	0.07	0.05	0.03	0.04
And	92.77	90.86	92.89	80.38	81.07	82.83	76.80	86.68	75.05	77.66	83.82	82.45
Pyr	0.17	0.24	0.26	0.66	0.69	0.43	0.81	0.23	0.45	0.73	0.55	0.74
Spe	0.56	0.63	0.55	0.56	0.53	0.54	0.50	0.29	0.47	0.29	0.46	0.55
Gro	3.38	5.30	4.58	16.45	14.88	13.79	19.11	9.70	21.29	18.72	13.74	14.14
Alm	3.13	2.96	1.70	1.90	2.82	2.42	2.60	3.10	2.67	2.55	1.40	2.07

富集,重稀土相对亏损的右倾型,具左陡右缓,中度负Eu异常的特征。

磷灰石REE含量明显高于辉长闪长玢岩和磁铁矿,这是由其矿物晶体结构所决定,Ca容易被REE类质同相替代。 $\Sigma \text{REE}=12595.9\sim 16026.2 \mu\text{g/g}$ , LREE/

HREE为32.0~57.4,  $(\text{La/Yb})_N=153.2\sim 882.9$ ,轻、重稀土元素之间分异明显,轻稀土元素相对富集。 $(\text{La/Sm})_N$ 为14.5~29.9,平均为19.5,  $(\text{Gd/Yb})_N=9.3\sim 38$ ,平均为19.4,显示轻重稀土元素组内部均有分异,且分异程度相似; $\delta\text{Eu}=0.32\sim 0.82$ ,平均为0.55,具中度Eu异

表7 梅山铁矿床磷灰石电子探针分析结果(%)

Table 7 Electron microprobe analyses (%), ion proportions and end members of apatite from the Meishan iron deposit

分析 项目	铁矿石								辉长闪长玢岩			
	MS-12	MS-12	MS-12	MS-12								
	-162	-162	-162	-126	-126	-126	-135	-135	-121	-121	-121	-121
	1-1	1-2	1-3	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	1-3	1-4	1-5	1-6
Na <sub>2</sub> O	0.08	0.08	0.16	0.08	0.02	0.04	0.10	0.06	0.12	0.10	0.12	0.09
MgO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.03	0.02	0.05
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01
SiO <sub>2</sub>	1.33	1.60	1.40	1.15	0.91	1.76	1.15	1.44	0.21	0.20	0.23	0.16
K <sub>2</sub> O	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02
CaO	54.25	53.75	52.29	53.29	53.51	54.02	54.69	54.05	54.65	54.82	55.52	55.14
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	38.38	37.85	38.22	39.26	39.80	37.42	39.26	38.13	37.03	38.85	38.32	38.27
FeO	0.05	0.14	0.08	0.11	0.17	0.16	0.07	0.10	0.40	0.24	0.33	0.27
TiO <sub>2</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00
SO <sub>3</sub>	4.06	1.13	4.52	1.13	0.91	4.97	0.45	0.45	3.63	0.00	0.46	0.46
MnO	0.01	0.02	0.00	0.02	0.02	0.05	0.02	0.07	0.06	0.07	0.10	0.07
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
F	2.13	1.80	1.17	1.87	1.88	1.77	1.07	1.78	2.36	1.28	1.41	1.57
Cl	0.47	0.48	0.46	0.14	0.12	0.12	0.46	0.31	1.42	1.36	1.16	1.30
F=O	0.90	0.76	0.49	0.79	0.79	0.75	0.45	0.75	0.99	0.54	0.59	0.66
Cl=O	0.11	0.11	0.10	0.03	0.03	0.03	0.10	0.07	0.32	0.31	0.26	0.29
Total	99.79	95.98	97.71	96.22	96.52	99.56	96.76	95.60	98.58	96.13	96.80	96.45
Na	0.02	0.03	0.05	0.03	0.01	0.01	0.03	0.02	0.04	0.03	0.04	0.03
Mg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01
Al	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Si	0.22	0.28	0.23	0.20	0.16	0.29	0.20	0.25	0.04	0.04	0.04	0.03
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca	9.60	10.02	9.33	9.83	9.84	9.52	10.09	10.14	10.02	10.35	10.43	10.41
P	5.37	5.58	5.39	5.72	5.78	5.21	5.72	5.65	5.37	5.80	5.69	5.71
Fe	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.06	0.04	0.05	0.04
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
S	0.50	0.15	0.56	0.15	0.12	0.61	0.06	0.06	0.47	0.00	0.06	0.06
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
F	1.11	0.99	0.62	1.02	1.02	0.92	0.58	0.99	1.28	0.71	0.78	0.87
Cl	0.13	0.14	0.13	0.04	0.03	0.03	0.13	0.09	0.41	0.40	0.35	0.39
OH	0.75	0.87	1.25	0.94	0.94	1.05	1.28	0.92	0.31	0.88	0.87	0.74

表8 梅山铁矿辉长闪长玢岩、磁铁矿/赤铁矿和磷灰石稀土元素分析结果( $10^{-6}$ )Table 8 Rare earth element (REE) content ( $10^{-6}$ ) of gabbro-diorite porphyry, magnetite/hematite and apatite from the Meishan iron deposit

分析 项目	辉长闪长玢岩				磁铁矿					磷灰石				
	MS-12	MS-12	MS-12	MS-12	MS-12	MS-12	MS-12	MS-12	MS-12	MS-12	MS-12	MS-12	MS-12	MS-12
	-120	-121	-122	-123	-83	-14	-131	-70	-72	-135	-139	-16	-125	-126
La	27.5	30.0	29.5	28.6	1.5	0.9	1.3	2.3	5.0	5818.0	4500.0	4071.0	4133.0	4675.0
Ce	51.5	57.7	58.4	56.4	2.8	1.3	2.2	3.2	6.5	7054.0	5979.0	5705.0	6637.0	6308.0
Pr	5.8	6.4	6.6	6.4	0.3	0.1	0.2	0.3	0.6	655.0	597.0	588.0	591.0	565.0
Nd	22.6	24.9	25.4	25.0	1.0	0.4	0.8	1.2	1.7	1887.0	1838.0	1721.0	1822.0	1468.0
Sm	4.6	5.2	5.0	5.0	0.2	0.1	0.1	0.2	0.3	185.0	195.0	147.0	166.0	98.2
Eu	1.6	1.6	1.5	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	25.7	22.4	46.0	41.2	23.5
Gd	4.2	4.3	4.3	4.4	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	245.0	229.0	202.0	203.0	168.0
Tb	0.6	0.6	0.6	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	20.4	21.9	15.8	13.4	10.1
Dy	3.2	3.3	3.3	3.4	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	75.5	84.6	57.3	44.7	32.1
Ho	0.7	0.6	0.7	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.6	12.1	6.8	6.3	2.5
Er	2.0	2.0	2.0	2.0	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	30.6	36.5	22.9	20.7	11.7
Tm	0.3	0.3	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.1	4.0	2.1	1.5	0.7
Yb	1.8	1.8	1.7	1.8	0.1	0.0	0.1	0.1	0.2	15.7	19.8	10.1	7.8	3.6
Lu	0.3	0.3	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	2.1	1.0	0.8	0.4
Y	--	--	--	--	0.7	0.5	0.8	0.6	1.0	285.0	354.0	200.0	185.0	70.1
$\Sigma$ REE	126.7	138.9	139.6	136.3	6.3	3.1	5.2	7.7	15.0	16026.2	13541.4	12595.9	13688.3	13366.7
LREE	113.6	125.7	126.5	123.0	5.7	2.8	4.7	7.2	14.1	15624.7	13131.4	12278.0	13390.2	13137.7
HREE	13.1	13.1	13.1	13.4	0.6	0.2	0.5	0.5	0.9	401.5	410.0	317.9	298.1	229.0
LREE/HREE	8.7	9.6	9.6	9.2	10.4	11.6	8.8	14.6	15.4	38.9	32.0	38.6	44.9	57.4
(La/Yb) <sub>N</sub>	10.1	11.6	11.7	10.7	10.0	17.9	11.5	24.1	20.6	249.8	153.2	271.7	359.1	882.9
(Gd/Yb) <sub>N</sub>	1.8	2.0	2.0	2.0	1.1	1.7	1.3	2.1	1.4	12.6	9.3	16.1	21.1	38.0
(La/Sm) <sub>N</sub>	3.7	3.7	3.7	3.6	6.0	8.7	6.4	7.8	12.2	19.8	14.5	17.4	15.7	29.9
$\delta$ Eu	1.1	1.0	1.0	1.0	0.7	0.5	0.7	0.7	0.6	0.4	0.3	0.8	0.7	0.6
$\delta$ Ce	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	0.9

注:--表示本元素未测试。

常,  $\delta$ Ce=0.87~1.02, 平均值为 0.92, 无明显 Ce 异常。稀土元素配分模式为轻稀土富集, 重稀土相对亏损的右倾型, 左(LREE)右(HREE)倾斜程度相当, 具有中度负 Eu 异常。

## 6 讨 论

### 6.1 氧逸度与成岩作用

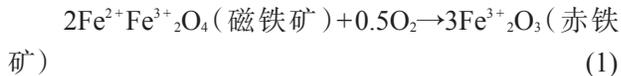
辉长闪长玢岩无 Eu 异常(图 8-a), 同庐枞盆地

安粗岩相类似, 代表它们处于地幔源区低氧逸度的还原环境<sup>[8]</sup>或反映氧逸度较高情况下的分离结晶作用<sup>[39]</sup>。一般认为 Eu 异常的产生与斜长石的分离有关, 在氧逸度较低的情况下, Eu 主要以 Eu<sup>2+</sup>存在, 斜长石的分离结晶使得岩浆产生 Eu 负异常。但是, 在氧逸度较高时, Eu 主要以 Eu<sup>3+</sup>存在, 即便有斜长石的分离也不可能产生 Eu 负异常<sup>[39]</sup>。Hou et al<sup>[40-41]</sup>对宁芜盆地成矿母岩辉长闪长玢岩或辉石闪长岩的

成岩机制进行了研究,概括为:①富集岩石圈地幔部分融熔产生的玄武质岩浆,因其部位深,处于封闭的还原环境;②这种玄武质母岩浆沿着长江断裂向近地表运移时,由于大气氧混入,导致氧逸度升高,它发生了单斜辉石和斜长石的分离结晶作用,导致闪长质岩浆和成矿流体的形成。辉长闪长玢岩无Eu异常说明了岩浆分离结晶作用形成于高氧逸度条件下,尽管它的源区为富集地幔。

## 6.2 矿物蚀变讨论

磁铁矿和赤铁矿广泛存在于各类岩石和矿床中,二者之间常发生相互转换,普遍认为,这是氧化还原反应的结果,磁铁矿在氧化性的流体环境易发生赤铁矿化<sup>[42]</sup>。反应式为:



梅山铁矿床赤铁矿和磁铁矿空间产出状态具有高度一致性,赤铁矿常呈假象赤铁矿或半假象赤铁矿产出。在镜下,赤铁矿具有明显的热液交代成因特征(图4-a)。笔者认为磁铁矿在氧逸度较高的成矿流体环境被氧化生成赤铁矿,在氧化过程中同时伴随磁铁矿和流体的物质交换,从而导致赤铁矿和被交代矿物磁铁矿之间的主微量元素差异(图6)。

前人研究认为菱铁矿和铁白云石主要是钙铁榴石、透辉石分解生成的<sup>[3, 8, 28, 43]</sup>,镜下观察菱铁矿和/或铁白云石常呈石榴石或透辉石形态(图4-b、h),支持了前人的看法。在钙铁榴石( $\text{Ca}_3\text{Fe}^{3+}_2[\text{SiO}_4]_3$ )分解为菱铁矿( $\text{Fe}^{2+}\text{CO}_3$ )的过程中铁元素由 $\text{Fe}^{3+}$ 被还原为 $\text{Fe}^{2+}$ ,说明菱铁矿/铁白云石形成时流体具还原特征。这可能是由于反应(1)的不断进行,流体中的 $\text{O}_2$ 不断被消耗,氧逸度降低,体系由氧化环境转变为还原环境,反应(1)停止,钙铁榴石开始分解生成铁的碳酸盐矿物。

张迎春等<sup>[44]</sup>在开放的空气环境加热菱铁矿,研究其受热分解产物,实验显示,菱铁矿在480℃开始分解,晶体外层生成 $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ,内部生成 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,当温度升至519℃时外层全部转化成 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,内部在800℃时完全转化成 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ;冯志力等<sup>[45]</sup>在流动的氮气(纯度99.99%)环境加热菱铁矿,菱铁矿在490℃时开始分解,至630℃左右时完全分解,生成 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 和 $\text{FeO}$ 。以上实验至少可以说明2点:①菱铁矿在一定的温度下分解,在有氧气参与的情况下生成

$\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,无氧条件下生成 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 和 $\text{FeO}$ ;②菱铁矿分解先生成 $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ,温度升高全部转化成 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,可以说明菱铁矿比磁铁矿更容易分解。根据上述实验结果,我们推断,块状矿石和浸染状矿石中菱铁矿或铁白云石边缘的赤铁矿化,发生在磁铁矿大规模的赤铁矿化之后,其形成时间要晚于大面积的赤铁矿。赤铁矿化只发育在矿物边缘,而内部保存完好的菱铁矿和铁白云石,指示流体中没有足够多的氧气使菱铁矿全部氧化。可能的反应为:



总之,磁铁矿在氧逸度较高的成矿流体环境被氧化生成赤铁矿,产生了第一代赤铁矿,这是矿区赤铁矿的主要产出形式。然而,当环境变为还原时,钙铁榴石或透辉石分解为菱铁矿/铁白云石,第二代赤铁矿化(次要赤铁矿产出形式)只发育在菱铁矿/铁白云石边缘,而内部保存完好的菱铁矿和铁白云石,指示流体中没有足够多的氧气使菱铁矿全部氧化成第二代的赤铁矿。

## 6.3 稀土元素对成矿的示踪

宁芜研究项目编写小组<sup>[2]</sup>对宁芜盆地多个铁矿床中成矿母岩的化学分析显示,10个辉长闪长玢岩样品的( $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$ )含量平均值为8.3%,我们最近对梅山铁矿辉长闪长玢岩的化学全分析也得到相似的( $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$ )含量值,而微弱蚀变的辉长闪长玢岩中( $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$ )含量值约为4.5%,远低于新鲜的辉长闪长玢岩(另文发表)。陈毓川等<sup>[29]</sup>通过计算辉长闪长玢岩和钠长石岩的全铁含量,认为太山铁矿(深部与梅山铁矿连为一体<sup>[46]</sup>)每立方米的辉长闪长玢岩发生钠长石化可迁出88.8 kg的铁。中国科学院地球化学研究所<sup>[8]</sup>通过计算认为梅山铁矿每立方米的辉长闪长玢岩发生钠长石化可迁出136.5 kg的铁。基于以上信息,我们认为,在辉长闪长玢岩的钠长石化过程中铁被析出进入成矿流体,参与了后来的成矿作用,下面的稀土元素讨论也证实了这一点。

梅山铁矿赋矿围岩辉长闪长玢岩、磁铁矿及磷灰石均表现为明显的轻稀土富集,重稀土亏损的特征,具有相似的右倾稀土配分模式(图8-a~c)。REE具有十分相似的物理、化学性质,在地质地球化学作用过程中往往整体活动,通常认为REE在低级变质作用、风化作用和热液蚀变作用中保持相对

的不活泼性,后期的变质变形作用很难使岩(矿)石的稀土配分模式发生明显改变<sup>[47-49]</sup>。因此可以认为梅山铁矿赋矿围岩和矿石的稀土元素配分特征在矿床形成后没受到后期作用的影响,辉长闪长玢岩、磁铁矿和磷灰石一致的稀土配分模式指示三者具有同源性,也说明磁铁矿-磷灰石矿石与辉长闪长玢岩具有紧密的成因联系。

在自然界中,REE 主要呈稳定的+3 价存在,但 Eu 具有 2 种价态,分别为  $\text{Eu}^{2+}$  和  $\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Eu}^{2+}$  半径大于  $\text{Eu}^{3+}$ , 由于电荷数的减少和离子半径的相对增大,使  $\text{Eu}^{2+}$  具有不同于其他三价稀土的地球化学行为,在地质作用过程中与其他稀土元素发生分离,形成 Eu 的正异常或负异常<sup>[47-52]</sup>。造成矿物具有 Eu 异常特征的原因可能有 3 种:①矿物形成时从流体或熔体中继承了 Eu 的相对含量特征;②Eu 在该矿物中的分配系数高于或者低于其他稀土元素;③矿物形成后的改造导致 Eu 分异。结合成矿母岩辉长闪长玢岩、磁铁矿/赤铁矿、磷灰石三者具有相似稀土配分模式的特征,我们认为磷灰石和磁铁矿的负 Eu 异常最可能是原因①所致,即成矿流体也具有中度负 Eu 异常特征。Eu 异常主要受控于长石,  $\text{Eu}^{2+}$  可以被斜长石和钾长石所容纳,而 +3 价的 REE 却是不相容的<sup>[47, 53-54]</sup>。杨耀民等<sup>[55]</sup>认为岩石中钠长石的存在也可能造成 Eu 异常。就梅山铁矿而言,流体的负 Eu 异常,可能是在辉长闪长玢岩的钠长石化过程中, Eu 以  $\text{Eu}^{2+}$  形式在钠长石内富集,导致蚀变流体 Eu 浓度相对降低,后来形成的磷灰石、磁铁矿继承了流体负 Eu 异常的特征。  $\text{Eu}^{2+}$  的存在,表明辉长闪长玢岩的钠长石化发生在还原环境。铁元素在还原环境下易于迁移的地球化学特征已被普遍认同<sup>[8, 56]</sup>, 地球大氧化事件的 C-W-K-H 模型认为含  $\text{Fe}^{2+}$  的硅酸盐容易溶解在不含  $\text{O}_2$  的水中<sup>[57]</sup>。梅山铁矿床钠长石化阶段的还原环境,为铁质迁移提供了必要条件,在钠长石化阶段,辉长闪长玢岩中含铁硅酸盐矿物的  $\text{Fe}^{2+}$  被淋滤进入流体,参与了后来的成矿作用。然而,对于辉长闪长玢岩分离结晶至钠长石化形成过程中,氧逸度从高到低的转变机制,我们没有掌握更多的资料,尚需进一步研究。

## 7 结 论

(1)梅山铁矿床成矿作用具有多阶段的特点,本

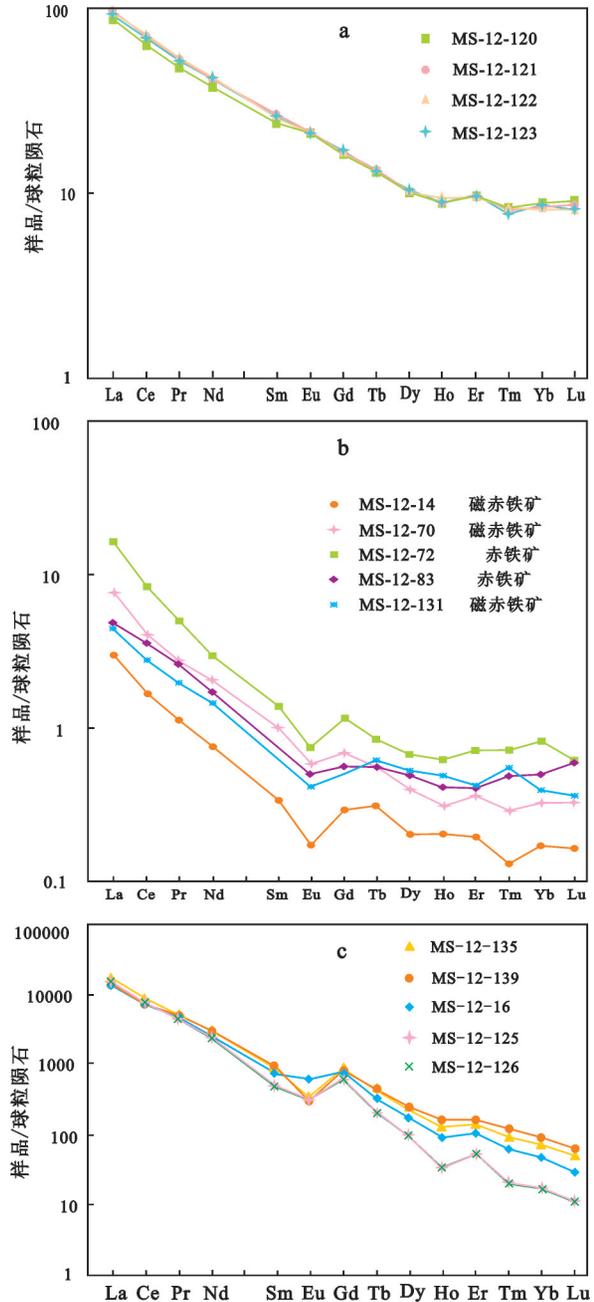


图 8 梅山铁矿辉长闪长玢岩、磁赤铁矿和磷灰石稀土元素球粒陨石标准化配分模式图

a—辉长闪长玢岩; b—磁赤铁矿; c—磷灰石

Fig.8 Chondrite-normalized REE patterns of gabbro-diorite porphyry, magnetite/hematite and apatite from the Meishan iron deposit

a—Gabbro-diorite porphyry; b—Magnetite/hematite; c—Apatite

文将成矿过程划分为 4 个成矿阶段:钠长石化阶段、类矽卡岩阶段、赤铁矿化和菱铁矿化阶段以及石英-硫化物阶段。其中,钠长石化淋滤铁元素进入流

体,类矽卡岩阶段为主成矿阶段,形成大量的块状富铁矿石,导致梅山主矿体的形成。

(2)梅山铁矿床类矽卡岩阶段的石榴石主要为钙铁榴石,其次为钙铝榴石,与传统意义矽卡岩矿床的石榴石组成相似。矿石中的磁铁矿和赤铁矿具有斑岩铜矿和Kiruna型矿床的双重特征。赤铁矿和菱铁矿显示热液交代成因,至少有2个世代的赤铁矿,最主要的为交代磁铁矿所形成的半假象赤铁矿。交代强烈时局部形成块状赤铁矿和菱铁矿矿石。

(3)成矿母岩辉长闪长玢岩、磁铁矿及磷灰石具有相似的稀土配分模式,说明三者具有同源性。辉长闪长玢岩无Eu异常,表明岩浆侵入体在高氧逸度下经历了分离结晶作用,而磁铁矿和磷灰石均具有中度负Eu异常,可能是辉长闪长玢岩钠长石化过程中Eu以Eu<sup>2+</sup>形式在钠长石内富集,造成流体Eu亏损,后来形成的磷灰石、磁铁矿继承了流体的负Eu异常的特征,同时指示辉长闪长玢岩钠长石化过程处于还原环境,在还原环境下,辉长闪长玢岩中含铁硅酸盐矿物的Fe<sup>2+</sup>被淋滤进入流体,为矿床提供了铁物质。

**致谢:**野外工作中得到上海梅山钢铁股份有限公司的大力支持和帮助;在电子探针测试中,中国地质科学院矿产资源研究所陈振宇老师、中国地质大学(北京)田泽瑾硕士给予了很大的指导和帮助;稀土元素分析在核工业北京地质研究院完成;中国地质大学(北京)张招崇教授和李胜荣教授、中科院地质与地球物理研究所秦克章研究员和曹明坚博士、中国科学院大学李永兵老师、华盛顿州立大学王达硕士给予了指导。审稿专家及责任编辑杨艳老师对论文提出了宝贵修改意见,在此一并致以诚挚的谢意!

#### 参考文献(References):

- [1] Mao Jingwen, Xie Guiqing, Duan Chao, et al. A tectono-genetic model for porphyry-skarn-stratabound Cu-Au-Mo-Fe and magnetite-apatite deposits along the Middle-Lower Yangtze River Valley, Eastern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2011, 43(1): 294-314.
- [2] 宁芜研究项目编写小组. 宁芜玢岩铁矿[M]. 北京:地质出版社, 1978: 1-196.
- Ningwu Research Group. Ningwu Porphyrite Iron Deposits[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1978:1-196 (in Chinese).

- [3] 陈毓川, 盛继福, 艾永德. 梅山铁矿——一个岩浆热液矿床[J]. 中国地质科学院院报矿床地质研究所分刊, 1981, 2(1): 26-48.
- Chen Yuchuan, Sheng Jifu, Ai Yongde. Meishan iron deposit——An ore magma-hydrothermal deposit[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, 1981, 2(1): 26-48 (in Chinese with English abstract).
- [4] 朱增青. 梅山铁矿富铁熔浆运移的探讨[J]. 地质科学, 1987, 3: 276-281.
- Zhu Zengqing. Study on migration of the iron-rich magma of the Meishan iron deposit[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1987, 3: 276-281 (in Chinese with English abstract).
- [5] 李秉伦, 谢奕汉. 宁芜地区宁芜型铁矿的成因、分类和成矿模式[J]. 中国科学(B辑), 1984, 1(1): 80-86.
- Li Binglun, Xie Yihan. Origin, classification, and ore-forming model of Ningwu type iron deposits in Ningwu area[J]. *Chinese Science in China(Series B)*, 1984, 1: 80-86 (in Chinese).
- [6] 袁家铮. 梅山铁矿矿石类型及成因——高温实验结果及探讨[J]. 现代地质, 1990, 4(4): 77-84.
- Yuan Jiazheng. Iron ore types and genesis of Meishan iron ore deposit——the study of high temperature experiments[J]. *Geoscience*, 1990, 4(4): 77-84 (in Chinese with English abstract).
- [7] 袁家铮, 张峰, 殷纯嘏, 等. 梅山铁矿岩浆成因的系统探讨[J]. 现代地质, 1997, 11(2): 170-176.
- Yuan Jiazheng, Zhang Feng, Yin Chungu, et al. Systematical study on ore-magma genesis of Meishan iron ore deposits[J]. *Geoscience*, 1997, 11(2): 170-176 (in Chinese with English abstract).
- [8] 中国科学院地球化学研究所. 宁芜型铁矿床形成机理[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 7-20, 62-88, 127-130.
- Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences. Ore-forming Mechanism of Ningwu Type Iron Deposits[M]. Beijing: Science Press, 1987: 1-20, 62-88, 127-130 (in Chinese).
- [9] 卢冰, 胡受奚, 蔺雨时, 等. 宁芜型铁矿床成因和成矿模式的探讨[J]. 矿床地质, 1990, 9(1): 13-24.
- Lu Bing, Hu Shouxi, Lin Yushi, et al. A study on origin and ore-forming model of Ningwu type iron deposits[J]. *Mineral Deposit*, 1990, 9(1): 13-24 (in Chinese with English abstract).
- [10] 卢冰, 胡受奚. 宁芜型铁矿床交代蚀变过程中稀土元素地球化学和活化转移[J]. 地球化学, 1991, 4: 366-375.
- Lu Bing, Hu Shouxi. Geochemistry and mobilization of the rare earth elements in metasomatic alteration of the Ningwu-type iron deposits[J]. *Geochimica*, 1991, 4: 366-375 (in Chinese with English abstract).
- [11] 胡文暄, 胡受奚. 宁芜和庐枞地区钠长石化的钠质来源新探[J]. 地质找矿论丛, 1991, 6(2): 36-46.
- Hu Wenxuan, Hu Shouxi. Na source of albitization in Ningwu-type iron-sulfur deposits of Ningwu-Luzong area[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 1991, 6(2): 36-46 (in Chinese with English abstract).

- [12] 毛景文, 段超, 刘佳林, 等. 陆相火山-侵入岩有关的铁多金属矿成矿作用及矿床模型——以长江中下游为例[J]. 岩石学报, 2012, 28(1): 1-14.  
Mao Jingwen, Duan Chao, Liu Jialin, et al. Metallogeny and corresponding mineral deposit model of the Cretaceous terrestrial volcanic-intrusive rocks-related polymetallic iron deposits in Middle-Lower Yangtze River Valley[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(1): 1-14 (in Chinese with English abstract).
- [13] 薛怀民, 陶奎元. 宁芜地区中生代火山岩系列的新认识及其地质意义[J]. 江苏地质, 1989, (4): 9-14.  
Xue Huaimin, Tao Kuiyuan. New view on the Mesozoic volcanic sequences in Ning-Wu[J]. Jiangsu Geology, 1989, 4: 8-14 (in Chinese with English abstract).
- [14] 王德滋, 任启江, 邱检生, 等. 中国东部橄榄安粗岩省的火山岩特征及其成矿意义[J]. 地质学报, 1996, 70(1): 23-34.  
Wang Dezi, Ren Qijiang, Qiu Jiansheng, et al. Characteristics of volcanic rocks in the shoshonite Province, Eastern China, and their metallogenesis[J]. Acta Geologica Sinica, 1989, 70(1): 23-34 (in Chinese with English abstract).
- [15] 王元龙, 张旗, 王焰. 宁芜火山岩的地球化学特征及其意义[J]. 岩石学报, 2001, 17: 565-575.  
Wang Yuanlong, Zhang Qi, Wang Yan. Geochemical characteristics of volcanic rocks from Ningwu area, and its significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17(4): 565-575 (in Chinese with English abstract).
- [16] 邢凤鸣. 宁芜地区中生代岩浆岩的成因——岩石学与Nd、Sr、Pb同位素证据[J]. 岩石矿物学杂志, 1996, 15(2): 126-137.  
Xing Fengming. Petrological and Nd, Sr, Pb isotopic evidence for genesis of Mesozoic rocks in Nanjing-Wuhu area[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 1996, 15(2): 126-137 (in Chinese with English abstract).
- [17] 薛怀民, 马芳, 关海燕, 等. 怀宁盆地火山岩的年代学、地球化学及与长江中下游其他火山岩盆地的对比[J]. 中国地质, 2013, 40(3): 694-714.  
Xue Huaimin, Ma Fang, Guan Haiyan, et al. Geochronology and geochemistry of volcanic rocks in Huaining basin in comparison with other basins in the middle-lower Yangtze region[J]. Geology in China, 2013, 40(3): 694-714 (in Chinese with English abstract).
- [18] Yu Jinjie, Chen Yuchuan, Mao Jingwen, et al. Review of geology, alteration and origin of iron oxide-apatite deposits in the Cretaceous Ningwu basin, Lower Yangtze River Valley, eastern China: implications for ore genesis and geodynamic setting[J]. Ore Geology Reviews, 2011, 43(1): 170-181.
- [19] 段超, 李延河, 毛景文, 等. 宁芜火山岩盆地凹山铁矿床侵入岩锆石微量元素特征及其地质意义[J]. 中国地质, 2012, 39(6): 1874-1884.  
Duan Chao, Li Yanhe, Mao Jingwen, et al. Zircon trace element characteristics of intrusions in the Washan iron deposit of Ningwu volcanic basin and their geological significance[J]. Geology in China, 2012, 39(6): 1874-1884 (in Chinese with English abstract).
- [20] Zhou Taofa, Fan Yu, Yuan Feng, et al. Geology and geochronology of magnetite-apatite deposits in the Ning-Wu volcanic basin, eastern China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 66: 90-107.
- [21] 周涛发, 范裕, 袁峰, 等. 宁芜(南京-芜湖)盆地火山岩的年代学及其意义[J]. 中国科学(D辑), 2011, 41(7): 960-971.  
Zhou Taofa, Fan Yu, Yuan Feng, et al. Geochronology and significance of volcanic rocks in the Ning-Wu Basin of China[J]. Science in China (Series D), 2011, 54(2): 185-196.
- [22] 张旗, 简平, 刘敦一, 等. 宁芜火山岩的锆石 SHRIMP 定年及其意义[J]. 中国科学(D辑), 2003, 33(4): 309-314.  
Zhang Qi, Jian Ping, Liu Dunyi, et al. SHRIMP dating of volcanic rocks from Ningwu area and its geological implications [J]. Science in China (Series D), 2003, 46(8): 830-837.
- [23] 侯可军, 袁顺达. 宁芜盆地火山-次火山岩的锆石U-Pb年龄、Hf同位素组成及其地质意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(3): 888-902.  
Hou Kejun, Yuan Shunda. Zircon U-Pb age and Hf isotopic composition of the igneous rocks in the Ningwu basin and their geological applications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(3): 888-902 (in Chinese with English abstract).
- [24] 范裕, 周涛发, 袁峰, 等. 宁芜盆地闪长玢岩的形成时代及对成矿的指示意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(9): 2715-2728.  
Fan Yu, Zhou Taofa, Yuan Feng, et al. Geochronology of the diorite porphyrites in Ning-Wu basin and their metallogenic significances[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(9): 2715-2728.
- [25] 段超, 毛景文, 李延河, 等. 宁芜盆地凹山铁矿床辉长闪长玢岩和花岗闪长斑岩的锆石U-Pb年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 2011, 85(7): 1159-1171.  
Duan Chao, Mao Jingwen, Li Yanhe, et al. Zircon U-Pb geochronology of the gabbro-diorite porphyry and granodiorite porphyry from Washan iron deposit in Ningwu basin, and its geological significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(7): 1159-1171 (in Chinese with English abstract).
- [26] 余金杰, 毛景文. 宁芜玢岩铁矿钠长石<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar定年及意义[J]. 自然科学进展, 2002, 12(10): 1059-1063.  
Yu Jinjie, Mao Jingwen. <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar dating of albite and phlogopite from porphyry iron deposits in the Ningwu basin in east-central China and its significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(2): 435-422.
- [27] 袁顺达, 侯可军, 刘敏. 安徽宁芜地区铁氧化物-磷灰石矿床中金云母Ar-Ar定年及其地球动力学意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(3): 797-808.  
Yuan Shunda, Hou Kejun, Liu Min. Timing of mineralization and geodynamic framework of iron-oxide-apatite deposits in Ningwu Cretaceous basin in the Middle-Lower Reaches of the Yangtze River, China: Constraints from Ar-Ar dating on phlogopites[J].

- Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(3): 797–808 (in Chinese with English abstract).
- [28] 林传仙, 张哲儒. 梅山铁矿床蚀变矿物组合的相平衡研究[J]. 矿物学报, 1984, 1: 12–20.  
Lin Chuanxian, Zhang Zheru. Phase equilibria of altered mineral assemblages in Meishan iron deposit[J]. Acta Mineralogica Sinica, 1984, 1: 12–20 (in Chinese with English abstract).
- [29] 陈毓川, 张荣华, 盛继福, 等. 玢岩铁矿矿化蚀变作用及成矿机理[J]. 中国地质科学院矿床地质研究所刊, 1982, 1: 1–29  
Chen Yuchuan, Zhang Ronghua, Sheng Jifu, et al. The mineralization and alteration of the porphyry iron deposits and their mechanism[J]. Bulletin of Institute of Mineral Deposits, Chinese Academy of Geological Sciences, 1982, 1: 1–29 (in Chinese with English abstract).
- [30] 林师整. 磁铁矿物化学、成因及演化的探讨[J]. 矿物学报, 1982, 3: 166–174.  
Lin Shizheng. A contribution to the chemistry, origin and evolution of magnetite[J]. Acta Mineralogica Sinica, 1982, 3: 166–174 (in Chinese with English abstract).
- [31] Dupuis C, Beaudoin G. Discriminant diagrams for iron oxide trace element fingerprinting of mineral deposit types[J]. Mineralium Deposita, 2011, 46(4): 319–335.
- [32] 李胜荣, 许虹, 申俊峰, 等. 结晶学与矿物学 [M]. 北京: 地质出版社, 2008: 268.  
Li Shengrong, Xu Hong, Shen Junfeng, et al. Crystallography and Mineralogy[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008: 268 (in Chinese).
- [33] 束学福. 安庆夕卡岩型铁铜矿床地质地球化学特征及铁质来源研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2004, 23(3): 219–224.  
Su Xuefu. Geology and geochemistry characteristics of Anqing skarn-type Fe–Cu deposit and its origin of iron materials[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2004, 23(3): 219–224 (in Chinese with English abstract).
- [34] 杨富全, 毛景文, 徐林刚, 等. 新疆蒙库铁矿床稀土元素地球化学及对铁成矿作用的指示[J]. 岩石学报, 2007, 23(10): 2443–2456.  
Yang Fuquan, Mao Jingwen, Xu Lingang, et al. REE geochemistry and the indication for iron mineralization of Mengku iron deposit in Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(10): 2443–2456 (in Chinese with English abstract).
- [35] 徐林刚, 毛景文, 杨富全, 等. 新疆蒙库铁矿床矽卡岩矿物学特征及其意义[J]. 矿床地质, 2007, 26(4): 455–463.  
Xu Lingang, Mao Jingwen, Yang Fuquan, et al. Skarn characteristics of Mengku iron deposits in Xinjiang, and its geological significance[J]. Mineral Deposits, 2007, 26(4): 455–463 (in Chinese with English abstract).
- [36] 郑建民, 毛景文, 陈懋弘, 等. 冀南邯郸—邢台地区矽卡岩铁矿的地质特征及成矿模式[J]. 地质通报, 2007, 26(2): 150–154.  
Zheng Jianmin, Mao Jingwen, Chen Maohong, et al. Geological characteristics and metallogenic model of skarn iron deposits in the Handan–Xingtai area, southern Hebei, China[J]. Geological Bulletin of China, 2007, 26(2): 150–154 (in Chinese with English abstract).
- [37] 姚磊, 谢桂青, 张承帅, 等. 鄂东南矿集区程潮大型矽卡岩铁矿的矿物学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 2012, 28(1): 133–146.  
Yao Lei, Xie Guiqing, Zhang Chengshuai, et al. Mineral characteristics of skarns in the Chengchao large-scale Fe deposit of southeastern Hubei Province and their geological significance [J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(1): 133–146 (in Chinese with English abstract).
- [38] Cao Mingjian, Li Guangming, Qin Kezhang, et al. Major and trace element characteristics of apatites in granitoids from Central Kazakhstan: implications for petrogenesis and mineralization[J]. Resource Geology, 2012, 62(1): 63–83.
- [39] 邓晋福, 叶德隆, 赵海玲, 等. 下扬子地区火山作用深部过程与盆地形成[M]. 北京: 地质出版社, 1992: 40–108  
Deng Jifu, Ye Delong, Zhao Hailing, et al. Volcanism, Deep Internal Processes and Basin Formation in the Lower Reaches of the Yangtze River[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992: 40–108 (in Chinese).
- [40] Hou Tong, Zhang Zhaochong, Encarnacion J, et al. Geochemistry of Late Mesozoic dioritic porphyries associated with Kiruna–style and stratabound carbonate-hosted Zhonggu iron ores, Middle–Lower Yangtze Valley, Eastern China: Constraints on petrogenesis and iron sources[J]. Lithos, 2010, 119(3): 330–344.
- [41] Hou Tong, Zhang Zhaochong, Encarnacion J, et al. Geochronology/geochemistry of the Washan dioritic porphyry associated with Kiruna–type iron ores, Middle–Lower Yangtze River Valley, eastern China: implications for petrogenesis/mineralization[J]. International Geology Review, 2012, 54(11): 1332–1352.
- [42] 翟德高, 王建平, 刘家军, 等. 成矿作用过程中赤铁矿—磁铁矿之间非氧化还原转变[J]. 地质论评, 2010, 56(6): 801–809.  
Zhai Degao, Wang Jianping, Liu Jiajun, et al. Nonredox Transformations of Hematite and Magnetite in Mineralization Process[J]. Geological Review, 2010, 56(6): 801–809 (in Chinese with English abstract).
- [43] 陈小华. 梅山铁矿床菱铁矿的地质特征及成因探讨[J]. 江苏地质, 2003, 97(17): 361–364.  
Chen Xiaohua. Discussion on the Geological Characters and Genesis of Siderite in Meishan Iron Mine, Jiangsu Province[J]. Jiangsu Geology, 2003, 97(17): 361–364 (in Chinese with English abstract).
- [44] 张迎春, 杨秀红, 施倪承, 等. 菱铁矿热分解产物及其变化规律的研究[J]. 湘潭矿业学院学报, 2002, 17(1): 55–57, 82.  
Zhang Yingchun, Yang Xiuhong, Shi Nicheng, et al. Study on the decomposition products of heat-treated siderite and its change

- regulation[J]. Journal of Xiangtan Mining Institute, 2002, 17(1): 55–57, 82 (in Chinese with English abstract).
- [45] 冯志力, 余永富, 刘根凡, 等. 菱铁矿在氮气中的热分解动力学研究[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(17): 11–14.  
Feng Zhili, Yu Yongfu, Liu Genfan, et al. Thermal decomposition kinetics of siderite in nitrogen[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(17): 11–14 (in Chinese with English abstract).
- [46] 余金杰. 宁芜地区凹山和太山铁矿床中磷灰石 Sr 同位素特征及意义[J]. 地质论评, 2003, 49(3): 272–276.  
Yu Jinjie. Sr isotope of apatites from the Washan and Taishan iron deposits in the Nanjing–Wuhu area and its implications [J]. Geological Review, 2003, 49(3): 272–276(in Chinese with English abstract).
- [47] Rollison H R. 著, 杨学明, 杨晓勇, 陈双喜译. 岩石地球化学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2000: 106–111.  
Rollison H R. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation[M]. Translated by Yang Xueming, Yang Xiaoyong, Chen Shuangxi. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2000: 106–111 (in Chinese).
- [48] 韩吟文, 马振东. 地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2003: 189–203.  
Han Yinwen, Ma Zhendong. Geochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003: 189–203(in Chinese).
- [49] 丁振举, 姚书振, 刘丛强, 等. 东沟坝多金属矿床喷流沉积成矿特征的稀土元素地球化学示踪[J]. 岩石学报, 2003, 19(4): 792–798.  
Ding Zhenju, Yao Shuzhen, Liu Congqiang, et al. The characteristics of exhalation–sedimentary deposit of Donggouba polymetal deposit: evidence from ore's REE composition [J]. Acta Petrologica Sinica, 2003, 19(04): 792–798 (in Chinese with English abstract).
- [50] 丁振举, 刘丛强, 姚书振, 等. 东沟坝多金属矿床矿质来源的稀土元素地球化学限制[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2003, 33(4): 437–442.  
Ding Zhenju, Liu Congqiang, Yao Shuzhen, et al. The REE constraints on ore sources of the Donggouba polymetallic deposit[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition). 2003, 33(4): 437–442 (in Chinese with English abstract).
- [51] 黄凡, 王登红, 陈毓川, 等. 中国钨矿中辉钨矿的稀土元素地球化学及其应用[J]. 中国地质, 2013, 40(1): 287–301.  
Huang Fan, Wang Denghong, Chen Yuchuan, et al. REE characteristics of molybdenites from endogenous molybdenum deposits in China[J]. Geology in China, 2013, 40(1): 287–301(in Chinese with English abstract).
- [52] 王立强, 程文斌, 罗茂澄, 等. 西藏蒙亚阿铅锌矿床金属硫化物、石英稀土元素组成特征及其成因研究[J]. 中国地质, 2012, 39(3): 740–749.  
Wang Liqiang, Cheng Wenbin, Luo Maocheng, et al. A study of metallic sulfides, quartz REE composition characteristics and genesis of the Mengya'a lead–zinc deposit[J]. Geology in China, 2012, 39(3): 740–749(in Chinese with English abstract).
- [53] 余金杰, 毛景文. 宁芜玢岩铁矿磷灰石的稀土元素特征[J]. 矿床地质, 2002, 21(1): 65–73.  
Yu Jinjie, Mao Jingwen. Rare earth elements in apatite from porphyrite iron deposits of Ningwu area[J]. Mineral Deposits, 2002, 21(1): 65–73 (in Chinese with English abstract).
- [54] 余金杰, 陈福雄, 王永辉, 等. 海南石碌铁矿外围花岗岩类成因及形成的构造环境[J]. 中国地质, 2012, 39(6): 1700–1711.  
Yu Jinjie, Chen Fuxiong, Wang Yonghui, et al. Origin and rock–forming environment of the granitoids in the periphery of the Shilu iron deposit[J]. Geology in China, 2012, 39(6): 1700–1711 (in Chinese with English abstract).
- [55] 杨耀民, 涂光炽, 胡瑞忠. 迤纳厂稀土铁铜矿床稀土元素地球化学[J]. 矿物学报, 2004, 24(3): 301–308.  
Yang Yaomin, Tu Guangzhi, Hu Ruizhong. REE geochemistry of Yinachang Fe–Cu–REE deposit in Yunnan Province [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2004, 24 (3): 301–308 (in Chinese with English abstract).
- [56] 翟裕生, 姚书振, 蔡克勤. 矿床学[M]. 北京: 地质出版社, 2011: 271.  
Zhai Yusheng, Yao Shuzhen, Cai Keqin. Mineral Deposits[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011: 271(in Chinese).
- [57] 赵振华. 条带状铁建造(BIF)与地球大氧化事件[J]. 地学前缘, 2010, 17(2): 1–12.  
Zhao Zhenhua. Banded iron formation and related great oxidation event[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17 (2): 1–12 (in Chinese with English abstract).

## Electron microprobe analysis and REE geochemical characteristics of minerals from the Meishan iron deposit in Nanjing–Wuhu area, Eastern China

WANG Tie–zhu<sup>1</sup>, CHE Lin–rui<sup>1,2</sup>, YU Jin–jie<sup>1</sup>, LU Bang–cheng<sup>1,2</sup>

(1. *MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*; 2. *School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China*)

**Abstract:** The Meishan iron deposit is located in the northern Ningwu Basin of the Middle–Lower Yangtze River metallogenic belt, and occurs at the contact zone between the gabbro–diorite porphyry and the pyroxene andesite of the Late Cretaceous Dawangshan Formation. The garnets of the Meishan iron deposit are similar to those of skarn deposits in end member, classified as andradite–grossular series. Magnetite and hematite display the characteristics of both Kiruna–type and porphyry copper deposits. Hematite and siderite were formed by hydrothermal fluids, and the hematite has at least two types. Gabbro–diorite porphyry (host rocks), magnetite and apatite share similar chondrite–normalized REE distribution patterns, indicating the same source. Nevertheless, the gabbro–diorite porphyry fails to show Eu anomalies and possibly resulted from magmatic fractional crystallization with high oxygen fugacity. Negative Eu anomalies of magnetites and apatites might have resulted from the enrichment of  $\text{Eu}^{2+}$  in the albites during the process of albitization. Iron was extracted from  $\text{Fe}^{2+}$ –rich silicate minerals and migrated into the ore–forming fluid due to albitization of the gabbro–diorite porphyry.

**Key words:** porphyrite iron deposit; Ningwu basin; Meishan iron ore deposit; electron microprobe analyses; REE

---

**About the first author:** WANG Tie–zhu, male, born in 1990, master candidate, majors in mineralogy, petrology and mineral deposit geology; E–mail: 742621160@qq.com.

**About the corresponding author:** YU Jin–jie, male, born in 1966, doctor, senior researcher, engages in the study of metallic mineralization; E–mail: yjjchina@sina.com.