

文章编号: 0258-7106(2014)04-0689-08

安徽姑山矿浆型铁矿床 Fe 同位素初步研究*

王 跃¹, 朱祥坤^{1**}, 毛景文², 程彦博²

(1 中国地质科学院地质研究所 国土资源部同位素地质重点实验室, 大陆构造与动力学国家重点实验室, 北京 100037;

2 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)

摘 要 文章报道了宁芜矿集区内姑山矿浆型铁矿床中的铁氧化物、辉石闪长玢岩和赋矿围岩的 Fe 同位素组成, 其 $\delta^{57}\text{Fe}$ 的总体分布范围为 $-0.05\text{‰} \sim 0.79\text{‰}$ 。结果显示, 姑山铁矿床的铁氧化物赤铁矿和镜铁矿均比硅酸盐岩浆结晶产物(辉石闪长岩)富集重的 Fe 同位素, 并且硅酸盐岩浆的 Fe 同位素组成比已报道的火山岩的平均 Fe 同位素组成更富集轻的 Fe 同位素, 表明在岩浆不混溶的过程中 Fe 同位素发生了分馏, 富铁熔体相对富集重的 Fe 同位素, 而硅酸盐熔体相对富集轻的 Fe 同位素; 相对于赋矿地层(黄马青组石英砂岩)和辉石闪长玢岩, 赤铁矿和镜铁矿更富集重的 Fe 同位素, 围岩地层和闪长岩岩体则富集轻的 Fe 同位素。因此, 姑山铁矿床的铁质不大可能来自于地层或闪长玢岩岩体, 而主要来源于深部岩浆房。

关键词 地球化学; Fe 同位素; 岩浆不混溶; 矿浆; 姑山铁矿

中图分类号 P618.31; P597

文献标志码 A

Preliminary Fe isotopic study of Gushan ore magma deposit in Anhui Province

WANG Yue¹, ZHU XiangKun¹, MAO JingWen² and CHENG YanBo²

(1 Laboratory of Isotope Geology, MLR, State Key Laboratory for Continental Tectonics and Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037, China; 2 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract

Fe isotope compositions of Fe-oxide minerals and pyroxene-diorite porphyry as well as ore-hosting wall rocks from the Gushan ore magma deposit in Anhui Province are reported in this paper. An overall variation in $\delta^{57}\text{Fe}$ values from -0.05‰ to 0.79‰ has been observed. Fe-oxide minerals have higher $\delta^{57}\text{Fe}$ values than pyroxene-diorite porphyry, whereas the pyroxene-diorite porphyry is slightly enriched in light iron isotopes relative to average Fe isotopic composition of igneous rocks reported both in China and abroad, indicating that Fe isotope fractionation occurred during the process of fluid immiscibility. Fe-rich melts are enriched in heavy Fe isotopes while Fe-poor silicate melts are enriched in light Fe isotopes. Moreover, Fe isotope compositions of Fe-oxide minerals, pyroxene-diorite porphyry and wall-rock are comparatively studied. Both pyroxene-diorite porphyry and wall rocks have lower $\delta^{57}\text{Fe}$ values than the Fe-oxide minerals, and the Fe isotopes distribution characteristics are consistent with melt immiscibility and also accordant with the basic theory of Fe isotopic fractionation, suggesting that the Fe in the Gushan iron deposit was most probably derived from deeper chamber rather than from strata and pyroxene-diorite porphyry. Field observations and Fe isotopic studies conducted by the authors

* 本文得到国家自然科学基金项目(编号:41203006)、国土资源公益性行业专项经费项目(编号:201011027、201311144)和国家重点基础研究发展计划项目(编号:2012CB416806)联合资助

第一作者简介 王 跃, 女, 1984 年生, 助理研究员, 同位素地球化学专业。Email: wyivy@cags.ac.cn

** 通讯作者 朱祥坤, 男, 1961 年生, 研究员, 主要从事同位素地球化学研究。Email: xiangkun@cags.ac.cn

收稿日期 2014-06-16; 改回日期 2014-06-30。张绮玲编辑。

strongly suggest that the main orebodies in the Gushan deposit were subjected to ore-magma type mineralization.

Keyw ords: geochemistry, Fe isotopes, magmatic immiscibility, ore magma, Gushan deposit

同位素示踪技术是矿床学研究的重要手段,近代矿床学的许多重大进展都与稳定同位素示踪技术的应用有关。但从成矿学角度讲,传统的 H、C、O、S 等稳定同位素对成矿物质来源与集聚过程的示踪毕竟是间接的,其主要研究对象是矿化剂元素,而不是矿化元素本身,因此研究仍带有一定的推断性和不确定性。多接收器等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)的诞生使得运用 Fe 同位素直接示踪铁的成矿作用成为可能。正确运用这一新兴的同位素体系进行成矿作用示踪的前提是查明和掌握其在不同类型矿床中的基本分布特征及其在重要成矿作用过程中的地球化学行为。近十年来,国内外学者先后对不同类型的矿床开展了 Fe 同位素研究,包括 BIF(例如 Johnson et al., 2003; Dauphas et al., 2004; Whitehouse et al., 2007; 李志红等, 2008; 2012; 闫斌等, 2010)、沉积型铁矿床(李志红等, 2012)、前寒武纪层状硫化物矿床(朱祥坤等, 2008a)、赋存于太古代科马提岩中的镍矿床(Bekker et al., 2009)、太古代石英英砾岩型金矿床(Hofmann et al., 2009)、现代洋底热液系统(Sharma et al., 2001; Rouxel et al., 2004, 2008)和斑岩-矽卡岩型矿床等与岩浆热液作用有关的矿床(Graham et al., 2004; Wang et al., 2011; 王跃等, 2013)、岩浆型铁矿床(王世霞等, 2012; Chen et al., 2014; Liu et al., 2014)以及表生热液铁矿床(Markl et al., 2006)等,显示出 Fe 同位素在示踪成矿物质来源和成矿作用过程方面具有应用潜力。但总体上,Fe 同位素在矿床学领域的应用研究仍处于探索阶段,研究所涉及的矿床数量较少,矿床类型也较为单一,对于如何运用这一新兴的同位素技术进行成矿作用过程示踪的工作方法也尚未建立起来。

玢岩铁矿是中国富铁矿石的重要来源,姑山铁矿床是玢岩铁矿中岩浆成因矿床的典型代表,可以很好地与瑞典基鲁纳型铁矿床进行对比(侯通等, 2010; Hou et al., 2011)。目前,国内外对这一类型铁矿床的 Fe 同位素研究尚属空白。本文试图通过对宁芜盆地姑山铁矿床的岩体、围岩以及主要金属矿物的 Fe 同位素研究,查明这一类型矿床中的 Fe 同位素的基本分布特征,并结合已发表的资料,对岩浆不混溶过程中的 Fe 同位素地球化学行为进行研究,进而为今后运用 Fe 同位素体系进行同类型矿床

成矿作用的研究提供有益的参考。

1 区域地质概况

长江中下游宁芜火山岩盆地是一个在中生代褶皱拗陷的黄马青组及象山群盆地基础上发育起来的继承式断陷型火山盆地。宁芜矿集区沿长江构造剪切带东侧呈 NNE 向带状展布,北起江苏省梅山铁矿,南至安徽省钟姑山矿田,全长约 80 km。宁芜矿集区内有 3 个明显的矿床(点)密集段:北段以梅山铁矿为中心,中段以凹山铁矿为中心,南段为钟姑山矿田(图 1)。宁芜盆地呈纺锤形,向长江方向倾伏。自南京梅山北到安徽当涂县查湾一带,火山岩带最宽处约 16 km,向南沿宁芜线至钟姑山矿田呈狭窄的带状,宽度不足 3 km,明显受 NNE 向拉张断裂的控制。宁芜盆地火山岩由龙王山组、大王山组、姑山组和娘娘山组组成,它们的锆石 SHRIMP 年龄分别为 (131 ± 4) Ma、 (127 ± 3) Ma(张旗等, 2003)和 (130.6 ± 1.1) Ma(Yan et al., 2009),表明宁芜火山岩是早白垩世喷发的。与成矿有关的次火山岩主要发生在大王山组火山岩喷发旋回末期。

钟姑山矿田位于宁芜火山岩盆地的南段,面积近 200 km²,NNE 向与 NWW 向基底断裂带控制了区内火山-侵入作用和矿化作用,也为火山喷发和岩浆侵入提供了上升的通道。区内火山基底地层为三叠系中统周冲村组白云质灰岩夹膏盐层、中统黄马青组砂页岩、侏罗系中-下统象山群砂页岩。区域上与铁矿床成矿密切的相关地层为三叠系周冲村组和黄马青组,与铁矿床有关的侵入体均为浅成-超浅成的小岩体。

2 矿床地质特征

姑山铁矿床位于宁芜火山岩盆地南缘,钟-姑背斜东翼。矿区出露的地层主要有三叠系黄马青组、侏罗系象山群、白垩系龙王山组、大王山组和姑山组火山岩。NNE 向姑山-钟山断裂与 NWW 向姑山-向阳断裂以及辉石闪长玢岩岩钟的原生构造控制了矿体的空间分布、产状和形态。矿体主要产于辉石闪长玢岩岩钟顶部与黄马青组砂页岩等的接触带中,

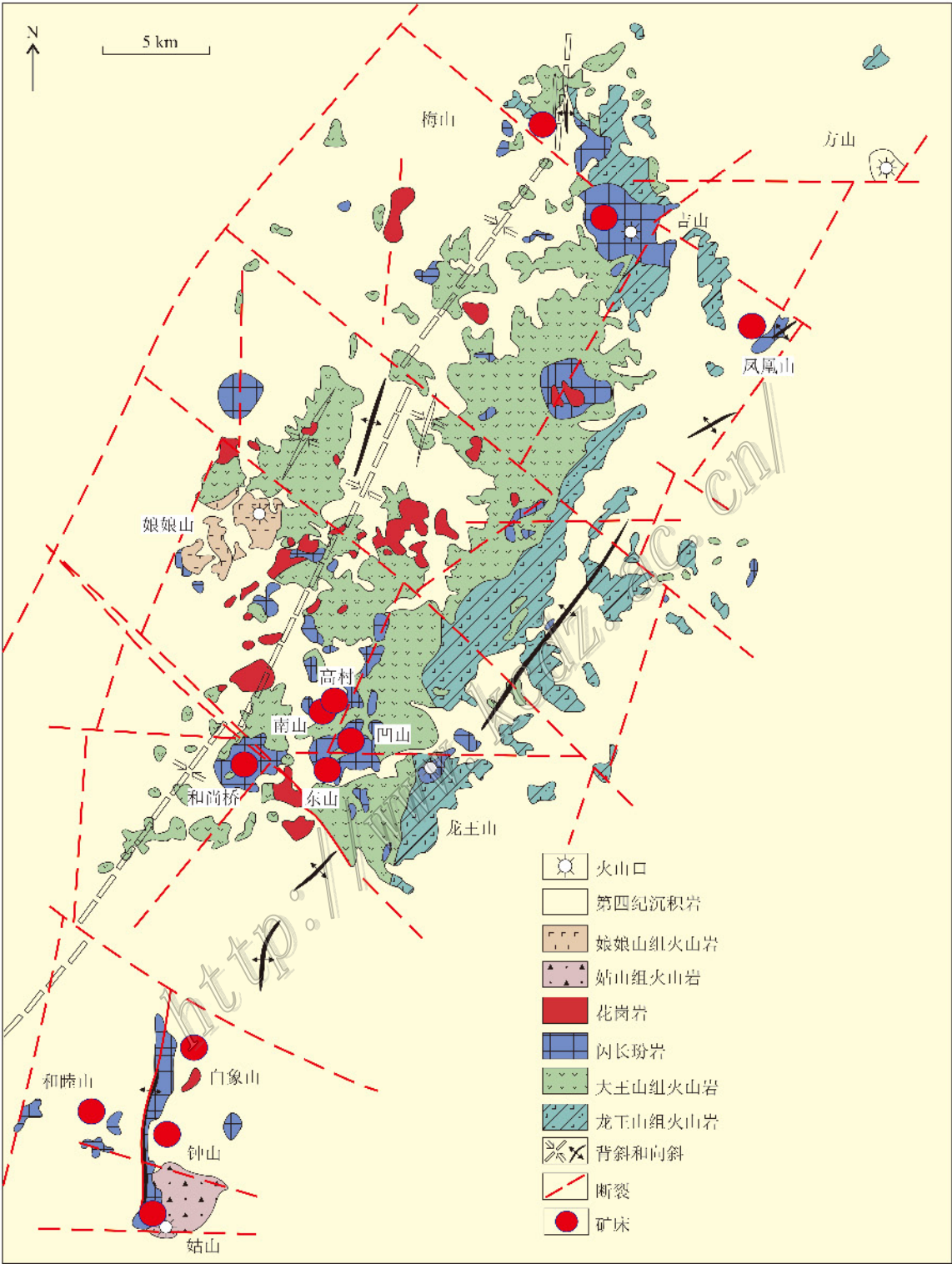


图 1 宁芜盆地地质简图(引自段超等,2012)
Fig. 1 Geological sketch map of the Ningwu basin(after Duan et al. , 2012)

其顶板主要为高岭土化辉石闪长岩、火山岩、页岩等,底板主要为辉石闪长岩。受与岩体有关的隐爆角砾岩带(圈)的控制,矿体平面呈半环状,剖面呈古钟状(图2)。矿体垂直延深不均,厚度为10~140 m,平均厚60.6 m。铁矿石主要为块状假象赤铁矿,次为磁铁矿和赤铁矿矿石。贫矿石则为角砾状赤铁

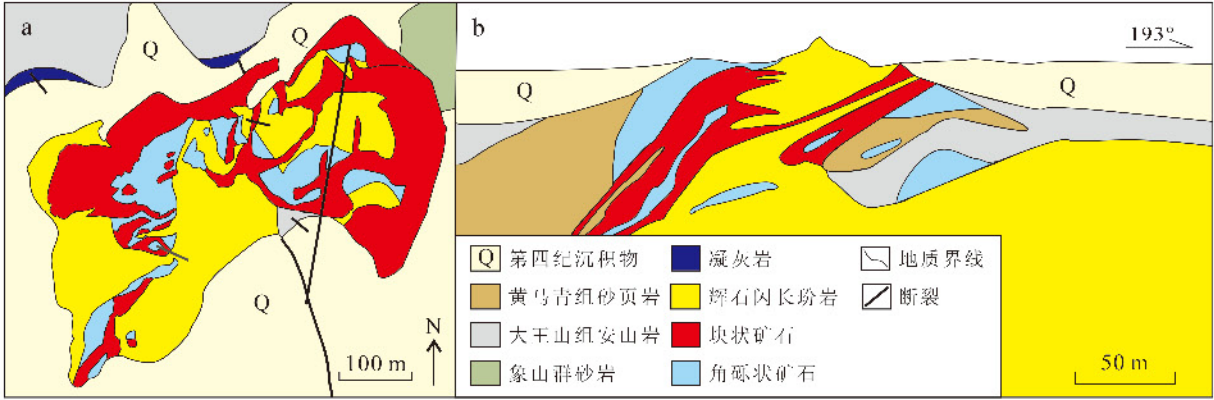


图 2 姑山铁矿床的地质平面图(a)和剖面图(b)(据 Hou et al., 2011 修改)

Fig. 2 Geological map(a) and cross section(b) of the Gushan iron deposit(modified after Hou et al., 2011)



图 3 姑山铁矿床典型矿石的矿物组成和结构构造

a、c. 角砾状矿石, 赤铁矿为胶结物, 角砾为辉石闪长玢岩, 角砾大小不等、磨圆较差; b. 块状赤铁矿矿石, 气孔构造发育;
d. 层状镜铁矿矿石

Fig. 3 Photographs of typical ores from the Gushan iron deposit

a, c. Breccia ore, the breccias chiefly consisting of pyroxene-diorite porphyry and the cement dominated by hematite; b. Massive ore with fumarolic structure, mainly consisting of hematite; d. Layered specularite ore

矿矿石和硅化赤铁矿矿石。矿体下部出现透辉石-磷灰石-磁铁矿脉。矿石主要呈结晶粒状、斑状结构,致密块状、角砾状、网脉状、树枝状、骨架状和气孔-晶洞构造等(图3),显示出熔体成矿的特点。矿石中的矿物成分简单,金属矿物主要为赤铁矿、磁铁矿、镜铁矿等;脉石矿物为石英、磷灰石、透辉石(阳起石)、高岭石、方解石、白云石等。赤铁矿的形成温度高,为720~1040℃(李秉伦等,1984)。矿体与围岩的界线明显,围岩中蚀变作用不发育,矿体无明显的热液蚀变分带,部分矿体受到硅化和成矿后期的碳酸盐化,说明成矿时的热液作用较弱,矿石的形成以铁矿浆贯入为主(唐永成等,1998;侯通等,2010;刘佳林等,2011)。

3 Fe 同位素

3.1 分析方法

本次研究选取姑山矿床的5件全岩样品(辉石闪长岩和围岩)和10件单矿物(赤铁矿、镜铁矿)样品,单矿物样品取自角砾状、块状赤铁矿矿石和层状镜铁矿矿石,矿石样品采自姑山矿床露天采场。

分别称取质量约30 mg全岩样品和1 mg单矿物样品并将其放入Teflon溶样瓶中,以HF和HNO₃混合酸溶解全岩样品,赤铁矿和镜铁矿单矿物样品

用盐酸将其消解。完全溶解后的样品均转换为盐酸介质并加入0.001%的H₂O₂以确保样品中的Fe全部被氧化成Fe³⁺后,采用离子交换层析法实现Fe与其他元素的有效分离(唐索寒等,2006)。样品的化学处理在国土资源部同位素重点实验室的超净实验室完成。实验所需要的器皿均经过了严格的清洗,实验所用的H₂O经Elga系统纯化,电阻为18.2 MΩ, HF、HNO₃和HCl均为优级纯试剂在超净室经二次亚沸蒸馏纯化得到,H₂O₂为优级纯试剂。

Fe同位素的测定在国土资源部同位素地质重点实验室的Nu Plasma HR型多接收器电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)上进行。化学分离后的样品通过自动进样器和膜去溶DSN-100进入等离子体,在高分辨模式下对Fe同位素进行高精度分析测定,采用标准-样品交叉法对仪器的质量分馏进行校正(朱祥坤等,2008b)。Fe同位素的测定结果以样品相对于国际标准物质(IRMM-014)的千分偏差表示,即:

$$\delta^x\text{Fe}_{\text{IRMM-014}}(\text{‰}) = \left[\left(\frac{x\text{Fe}/^{54}\text{Fe}}{(\text{Fe})_{\text{IRMM-014}}} - 1 \right) \times 1000 \right] \quad (x = 57, 56)$$

$\delta^{56}\text{Fe}$ 的外部精度为 $\pm 0.08(2\sigma)$ 。Fe同位素测试结果见表1。

3.2 分析结果

姑山矿床 $\delta^{57}\text{Fe}$ 的总体分布范围为 $-0.05\text{‰} \sim 0.79\text{‰}$ (表1)。其中,辉石闪长岩全岩样品的 $\delta^{57}\text{Fe}$ 变化范围为 $-0.05\text{‰} \sim 0.19\text{‰}$,平均值为 0.03‰ ;围

表1 姑山铁矿床全岩和单矿物的铁同位素组成

Table 1 Fe isotope compositions of whole rocks and mineral separates of the Gushan iron deposit

样品号	测试对象	$\delta^{57}\text{Fe}_{\text{IRMM-014}}/\text{‰}$	$\delta^{56}\text{Fe}_{\text{IRMM-014}}/\text{‰}$
10GS-1-wr	辉石闪长岩全岩	0.19	0.14
10GS-7-wr	辉石闪长岩全岩	-0.05	-0.03
10GS-9-wr	辉石闪长岩全岩	0.00	0.00
10GS-12-wr	辉石闪长岩全岩	-0.02	-0.02
辉石闪长岩平均值		0.03 ± 0.11	0.02 ± 0.08
10GS-10-wr	围岩黄马青组红色石英砂岩	0.05	0.03
10GS-4-Hm	块状赤铁矿矿石(气孔构造)中的赤铁矿	0.35	0.24
10GS-5-Hm	块状赤铁矿矿石(气孔构造)中的赤铁矿	0.50	0.32
10GS-6-Hm	块状赤铁矿矿石(气孔构造)中的赤铁矿	0.79	0.53
10GS-17-Hm	块状赤铁矿矿石(气孔构造)中的赤铁矿	0.37	0.24
10GS-19-Hm	块状赤铁矿矿石(气孔构造)中的赤铁矿	0.15	0.09
10GS-20-Hm	块状赤铁矿矿石(气孔构造)中的赤铁矿	0.75	0.49
10GS-7-Hm	角砾状矿石中的赤铁矿	0.37	0.24
10GS-8-Hm	角砾状矿石中的赤铁矿	0.31	0.20
10GS-9-Hm	角砾状矿石中的赤铁矿	0.09	0.06
赤铁矿平均值		0.41 ± 0.24	0.27 ± 0.16
10GS-23-JT	晚期层状镜铁矿	0.46	0.31

岩黄马青组石英砂岩的一个全岩样品 $\delta^{57}\text{Fe}$ 值为 0.05‰; 铁的氧化物赤铁矿和镜铁矿的 $\delta^{57}\text{Fe}$ 变化范围为 0.09‰~0.79‰, 平均值为 0.41‰。所获结果显示以下特征: ① 辉石闪长岩的 Fe 同位素组成落入前人报道的火成岩 Fe 同位素组成变化范围内, 但相对于前人报道的闪长岩类的平均 Fe 同位素组成 ($\delta^{57}\text{Fe}$ 变化范围为 0.05‰~0.19‰, 平均值为 0.17‰, Heimann et al., 2008; Beard et al., 2003; 王跃等, 2012), 姑山矿床辉石闪长岩略富集轻的 Fe 同位素; ② 相对于辉石闪长岩, 姑山矿床所有铁的氧化物呈现出富集重的 Fe 同位素的特征; ③ 相对于赋矿地层(黄马青组石英砂岩), 赤铁矿和镜铁矿呈现出富集重的 Fe 同位素的特征; ④ 与前人报道的砂卡岩型热液矿床中的磁铁矿 ($\delta^{57}\text{Fe}$ 变化范围为 -0.54‰~0.20‰, 平均值为 -0.11‰, Wang et al., 2011) 相比, 姑山铁矿床中的赤铁矿相对富集重的 Fe 同位素, 其赤铁矿的 Fe 同位素组成与前人报道的岩浆型矿床中的磁铁矿 ($\delta^{57}\text{Fe}$ 变化范围为 0.15‰~0.61‰, 王世霞等, 2012; Chen et al., 2014; Liu et al., 2014) 的平均 Fe 同位素组成更为接近, 前者的 $\delta^{57}\text{Fe}$ 平均值为 0.46‰, 后者的 $\delta^{57}\text{Fe}$ 平均值为 0.34‰, 岩浆型矿床略微富集重的 Fe 同位素。

4 讨论

通过大量的地质和地球化学研究, 前人普遍认为姑山矿床是典型的矿浆贯入式矿床(于景林等, 1977; 常印佛等, 1991; 李秉伦等, 1984; 宋学信等, 1981; 侯通等, 2010; Hou et al., 2011), 区内富铁、富钠的母岩浆经过不混溶作用形成铁氧化物熔体(铁岩浆)和硅酸盐岩浆(岩体), 在构造条件发生变化时, 分离后的硅酸盐岩浆喷出或以次火山岩的形式侵入, 随后铁岩浆沿火山通道和裂隙上移成矿, 于岩体和围岩的接触带等物化条件合适之处形成姑山式矿浆型铁矿(侯通等, 2010)。下面将根据姑山铁矿床的岩体、围岩以及主要含铁矿物赤铁矿的 Fe 同位素组成特征, 对岩浆不混溶过程中的 Fe 同位素地球化学行为以及姑山铁矿床的铁质来源进行探讨。

4.1 岩浆不混溶过程中的 Fe 同位素地球化学行为

岩浆不混溶作用作为一种重要的岩浆演化机理, 已被许多学者用来解释基性岩体中的铜、镍硫化物矿床、层状侵入体中的铬铁矿和钒钛磁铁矿矿床

(Zhou et al., 2005) 以及典型的基鲁纳型铁氧化物矿床(Lyons, 1988) 的形成。对这一作用过程中 Fe 同位素地球化学行为的理解, 是正确运用 Fe 同位素示踪岩浆演化和岩浆矿床成矿作用过程的关键。

对姑山矿浆型矿床含矿岩体和主要矿石类型(块状矿石和角砾状矿石)中的铁氧化物的 Fe 同位素组成研究显示, 从铁氧化物熔体中沉淀出来的金属矿物(赤铁矿和镜铁矿)均比硅酸盐岩浆结晶产物(辉石闪长岩)富集重的 Fe 同位素, 并且硅酸盐岩浆的 Fe 同位素组成比已报道的火山岩的平均 Fe 同位素组成富集轻的 Fe 同位素。由于赤铁矿是 Fe^{3+} 矿物, 其从铁的氧化物熔体(以 Fe^{3+} 为主)中晶出的过程中并未改变铁的氧化还原状态和配位, 基本继承了铁质熔体的 Fe 同位素组成, 矿物和熔体之间的同位素比值相等或产生非常小的同位素动力学分馏。因此, 姑山铁矿岩体和赤铁矿的 Fe 同位素组成特征表明, 在岩浆不混溶的过程中 Fe 同位素发生了分馏, 富铁熔体相对富集重的 Fe 同位素, 硅酸盐熔体相对富集轻 Fe 同位素。这一认识符合 Fe 同位素分馏理论。前人的研究结果表明, 氧化还原过程会导致 Fe 同位素发生分馏, 相对于二价铁, 三价铁呈现重同位素富集(Johnson et al., 2002; Welch et al., 2003; Croal et al., 2004; Anbar et al., 2005; Polyakov et al., 2007)。

对于姑山矿床来讲, 富铁、富钠的同源岩浆经不混溶作用分离出了富铁熔体和富硅酸盐熔体, 前者以 Fe^{3+} 形式为主, 后者以 Fe^{2+} 形式为主。在这一过程中, Fe 同位素在两相之间发生分馏, 重 Fe 同位素优先进入 Fe^{3+} 相而轻铁同位素优先进入 Fe^{2+} 相, 从而形成赤铁矿相对辉石闪长岩富集重 Fe 同位素的现象。

这一认识也很好解释了为什么本区的辉石闪长岩比大多数火成岩富集轻 Fe 同位素。本区的硅酸盐岩浆是母源岩浆经过了岩浆不混溶作用后分离出来的硅酸盐岩浆, 在这一过程中重 Fe 同位素进入了富铁熔体, 硅酸盐岩浆相对母源岩浆富集轻 Fe 同位素, 而大多数硅酸盐岩浆没有经过岩浆不混溶作用, 所以结晶出来的火成岩要比本区硅酸盐岩浆结晶出来的辉石闪长岩富集重的 Fe 同位素。

4.2 姑山铁矿床的 Fe 质来源

成矿物质来源是矿床学研究的一个重要问题。对于姑山铁矿床的铁质来源, 一些学者提出铁质可能来自于岩浆对黄马青组原生富铁沉积层的萃

取,也有一些学者认为铁质主要来自闪长岩岩体(林传仙等,1983),还有学者认为铁质不大可能来自于地层或闪长玢岩岩体,而有可能来源于深部的偏基性岩浆(侯通等,2010)。

Fe 同位素研究结果显示,姑山铁矿赋矿地层黄马青组的 $\delta^{57}\text{Fe}$ 为 0.05‰,辉石闪长玢岩全岩的 $\delta^{57}\text{Fe}$ 为 0.03‰,两者均比赤铁矿更富集轻的 Fe 同位素。赤铁矿是姑山铁矿的主要含铁金属矿物,其 Fe 同位素组成基本可以代表其形成时岩浆的 Fe 同位素组成。姑山铁矿床中的赤铁矿 $\delta^{57}\text{Fe}$ 的平均值为 0.41‰,最大值可达 0.79‰,这种富集重 Fe 同位素的特征无法通过富集轻 Fe 同位素组成的围岩或辉石闪长岩岩体的加入而形成,铁质不大可能来自于地层或闪长玢岩岩体。含铁矿物和岩体的 Fe 同位素组成特征与岩浆不混溶过程中的 Fe 同位素变化规律一致,且符合同位素分馏的基本理论,可以认为姑山铁矿床的铁质主要来源于深部岩浆,这是首次运用 Fe 元素本身探讨姑山铁矿床的铁质来源,并对其进行的直接制约。这个结果也印证了前人对于姑山矿床的成因是矿浆贯入式的认识。

5 结 论

姑山铁矿床的铁氧化物——赤铁矿和镜铁矿均比硅酸盐岩浆结晶产物(辉石闪长岩)富集重的 Fe 同位素,并且硅酸盐岩浆的 Fe 同位素组成相对已报道的火山岩的平均 Fe 同位素组成富集轻的 Fe 同位素,表明在岩浆不混溶的过程中 Fe 同位素发生分馏,富铁熔体相对富集重的 Fe 同位素,硅酸盐熔体相对富集 Fe 的轻同位素;赤铁矿相对富集重的 Fe 同位素,其 Fe 同位素组成无法通过富集轻的 Fe 同位素组成的围岩或辉石闪长岩岩体的加入而形成,同时含铁矿物和岩体的 Fe 同位素组成特征与岩浆不混溶过程中的 Fe 同位素变化规律一致,并且符合同位素分馏基本理论,因此,姑山铁矿的铁质既不可能来自于围岩地层,也不可能来源于闪长玢岩岩体本身,而主要来自于深部岩浆房。

志 谢 本次研究工作在野外工作过程中,得到安徽地质矿产勘查局、安徽地质矿产局 322 地质队的热情帮助和大力支持,在此志以衷心的感谢。

参考文献/References

- 常印佛,刘湘培,吴言昌. 1991. 长江中下游铁铜矿成矿带[M]. 北京:地质出版社. 1-359.
- 段超,李延河,袁顺达,胡明月,赵令浩,陈小丹,张成,刘佳林. 2012. 宁芜矿集区凹山铁矿床磁铁矿元素地球化学特征及其对成矿作用的制约[J]. 岩石学报, 28(1): 243-257.
- 侯通,张招崇,杜杨松. 2010. 宁芜南段种姑矿田的深部矿浆-热液系统[J]. 地学前缘, 17(1): 186-194.
- 李秉伦,谢奕汉. 1984. 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, 1(1): 80-86.
- 李志红,朱祥坤,唐索寒. 2008. 鞍山-本溪地区条带状铁建造的铁同位素与稀土元素特征及其对成矿物质来源的指示[J]. 岩石矿物学杂志, 27(4): 285-290.
- 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): 2903-2011.
- 林传仙,张哲儒,白正华. 1983. 论姑山铁矿床的形成条件[J]. 地球化学, 1: 15-24.
- 刘佳林,毛景文,段超,张成,姚磊,郑佳浩. 2011. 宁芜盆地姑山铁矿床地质特征及其成因研究[J]. 矿物学报, (增刊): 61-61.
- 宋学信,陈毓川,盛继福,艾永德. 1981. 论火山-浅成矿浆铁矿床[J]. 地质学报, 55(1): 41-54.
- 唐索寒,朱祥坤,蔡俊军,李世珍,何学贤,王进辉. 2006. 用于多接收等离子体质谱铜铁镍同位素测定的离子交换分离方法[J]. 岩矿测试, 25(1): 5-8.
- 唐永成,吴昌言,储国正,邢凤鸣,王永敏,槽奋扬,常印佛. 1998. 安徽沿江地区铜多金属矿床地质[M]. 北京:地质出版社. 1-351.
- 王世震,朱祥坤,宋谢炎,陈列钰. 2012. 四川攀枝花钒钛磁铁矿床 Fe 同位素特征及其成因指示意义[J]. 地球学报, 33(6): 995-1004.
- 王跃,朱祥坤. 2012. 铁同位素体系及其在矿床学中的应用[J]. 岩石学报, 28(11): 3638-3654.
- 王跃,朱祥坤,李志红,程彦博. 2013. 安徽新桥矿床矿相学与 Fe 同位素特征及其对矿床成因的制约[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 43(6): 1787-1798.
- 闫斌,朱祥坤,唐索寒,朱茂炎. 2010. 广西新元古代 BIF 的铁同位素特征及其地质意义[J]. 地质学报, 84(7): 1080-1086.
- 于景林,赵云佳. 1977. 姑山式铁矿成因探讨[J]. 地质与勘探, (1): 22-24.
- 张旗,简平,刘敦一,王元龙,钱青,王焰,薛怀民. 2003. 宁芜火山岩的锆石 SHRIMP 定年及其意义[J]. 中国科学: D 辑, 33(4): 309-314.
- 朱祥坤,李志红,唐索寒,李延河. 2008a. 早前寒武纪硫铁矿床 Fe

- 同位素特征及其地质意义——以山东石河庄和河北大川为例[J]. 岩石矿物学杂志, 27(5): 429-434.
- 朱祥坤, 李志红, 赵新苗. 2008b. 铁同位素的 MC-ICP-MS 测定方法与地质标准物质的铁同位素组成[J]. 岩石矿物学杂志, 27(4): 263-272.
- Anbar A D, Jarzecki A A and Spiro T G. 2005. Theoretical investigation of iron isotope fractionation between $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ and $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{2+}$: Implications for iron stable isotope geochemistry[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69: 825-837.
- Beard B L, Johnson C M, Skulan J L, Nealon K H, Cox L and Sun H. 2003. Application of Fe isotopes to tracing the geochemical and biological cycling of Fe[J]. *Chemical Geology*, 195: 87-117.
- Bekker A, Barley M E, Fiorentini M L, Rouxel O J, Rumble D and Beresford S W. 2009. Atmospheric sulfur in Archean komatite-hosted nickel deposit[J]. *Science*, 326: 1086-1089.
- Chen L M, Song X Y, Zhu X K, Zhang X Q, Yu S Y and Yi J N. 2014. Iron isotope fractionation during crystallization and sub-solidus re-equilibration: Constraints from the Baima mafic layered intrusion, SW China[J]. *Chemical Geology*, doi: 10.1016/j.chemgeo.2014.04.020.
- Croal L R, Johnson C M, Beard B L and Newman D K. 2004. Iron isotope fractionation by Fe(II)-oxidizing photoautotrophic bacteria[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68: 1227-1242.
- Dauphas N, van Zuilen M, Wadhwa M, Davis A M, Marty B and Janney P E. 2004. Clues from Fe isotope variations on the origin of Early Archean BIFs from Greenland[J]. *Science*, 306: 2077-2080.
- Graham S, Pearson S, Jackson S and Griffin W. 2004. Tracing Cu and Fe from source to porphyry: In situ determination of Cu and Fe isotope ratios in sulfides from the Grasberg Cu-Au deposit[J]. *Chemical Geology*, 207: 147-169.
- Heimann A, Beard B L and Johnson C M. 2008. The role of volatile exsolution and sub-solidus fluid/rock interactions in producing high $^{56}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$ ratios in siliceous igneous rocks[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72: 4379-4396.
- Hofmann A, Bekker A, Rouxel O, Rumble D and Mastger S. 2009. Multiple sulphur and iron isotope composition of detrital pyrite in Archean sedimentary rocks: A new tool for provenance analysis[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 286: 436-445.
- Hou T, Zhang Z C and Kusky T. 2011. Gushan magnetite-apatite deposit in the Ningwu basin, Lower Yangtze River Valley, SE China: Hydrothermal or Kiruna-type[J]? *Ore Geology Reviews*, 43(1): 333-346.
- Johnson C M, Skulan J L, Beard B L, Sun H, Nealon K H and Braterman P S. 2002. Isotopic fractionation between $\text{Fe}(\text{III})$ and $\text{Fe}(\text{II})$ in aqueous solutions[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 195: 141-153.
- Johnson C M, Beard B L, Beukes N J, Klein C and O'Leary J M. 2003. Ancient geochemical cycling in the earth as inferred from Fe isotope studies of banded iron formations from the Transvaal Craton[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 144: 523-547.
- Liu P P, Zhou M F, Luis B, Cividini D and Rollion-Bard C. 2014. Disequilibrium iron isotopic fractionation during the high-temperature magmatic differentiation of the Baima Fe-Ti oxide-bearing mafic intrusion, SW China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 399: 21-29.
- Lyons J I. 1988. Volcanogenic iron oxide deposits, Cerro de Mercado and vicinity, Durango, Mexico[J]. *Econ. Geol.*, 83: 1886-1906.
- Markl G, Yann L and Gregor S. 2006. Copper isotopes as monitors of redox processes in hydrothermal mineralization[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70: 4215-4228.
- Polyakov V B, Clayton R N, Horita J and Mineev S D. 2007. Equilibrium iron isotope fractionation factors of minerals: Reevaluation from the data of nuclear inelastic resonant X-ray scattering and Mossbauer spectroscopy[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71: 3833-3846.
- Rouxel O, Fouquet Y and Ludden J N. 2004. Surface processes at the Lucky Strike hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge: Evidence from sulfur, selenium, and iron isotopes[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68: 2295-2311.
- Rouxel O, Shanks W C, Bach W and Edwards K. 2008. Integrated Fe and S isotope study of seafloor hydrothermal vents at East Pacific Rise 9-10 N[J]. *Chemical Geology*, 252: 214-227.
- Sharma M, Polizzotto M and Anbar A D. 2001. Iron isotopes in hot springs along the Juan de Fuca Ridge[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 194: 39-51.
- Wang Y, Zhu X K, Mao J W, Li Z H and Cheng Y B. 2011. Iron isotope fractionation during skarn-type metallogeny: A case study of Xinqiao Cu-S-Fe-Au deposit in the Middle-Lower Yangtze valley[J]. *Ore Geology Reviews*, 43: 194-202.
- Welch S A, Beard B L, Johnson C M and Braterman P S. 2003. Kinetic and equilibrium Fe isotope fractionation between aqueous $\text{Fe}(\text{II})$ and $\text{Fe}(\text{III})$ [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(22): 4231-4250.
- Whitehouse M J and Fedo C M. 2007. Microscale heterogeneity of Fe isotopes in > 3.7 Ga banded formation from the Isua Greenstone Belt, southwest Greenland[J]. *Geology*, 35: 719-722.
- Yan J, Liu H Q, Song C Z, Xu X S, An Y J and Dai L Q. 2009. Zircon U-Pb geochronology of the volcanic rocks from Fanchang-Ningwu volcanic basins in the Lower Yangtze region and its geological implications[J]. *Chinese Science Bulletin*, 54: 1716-1724.
- Zhou M F, Robinson P T, Leshner C M, Keays R R, Zhang C J and Malpas J. 2005. Geochemistry, petrogenesis and metallogeny of the Panzhihua gabbroic layered intrusion and associated Fe-Ti-V oxide deposits, Sichuan Province, SW China[J]. *Journal of Petrology*, 46: 2253-2280.