

文章编号: 0254 - 5357(2012)05 - 0889 - 09

## 矽卡岩型铁矿的铁质来源与迁移富集机理探讨

陈艳, 张招崇

(中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

**摘要:** 矽卡岩型铁矿是我国最重要的富铁矿类型,其铁质来源及迁移富集机理是目前最核心、也最具争议的问题之一。本文在矽卡岩矿床复杂性和多成因性研究的基础上,对浅部铁质活化、迁移和富集机理进行整理归纳,建立了流程图;分别探讨了不同类矽卡岩型铁矿铁质的最大可能来源,认为与中酸性侵入体有关的该类铁矿,铁质主要源于浅部侵入岩;与酸性侵入体有关的该类铁矿,矿床附近的原始赋铁层位可能提供了大量铁质。但并非所有与酸性岩有关的此类铁矿床附近都存在赋铁地层,故本文对铁质深部来源的可能性进行了探讨,结合“岩浆矽卡岩-富碱侵入岩对”的概念,提出了全新的深部铁质活化、运移和富集的可能模式,即深部岩浆同化钙质岩石融离出的富铁矿浆上升并运移到浅部侵入岩与碳酸盐岩的接触带附近,与该系统中的热液相遇并反应,热液吸收矿浆中的铁质生成富铁的复合热液,后复合热液在接触带因物理化学条件的剧变而沉淀成矿。

**关键词:** 铁质来源; 迁移富集; 矽卡岩型铁矿; 矽卡岩

**中图分类号:** P618.31; P619.221 **文献标识码:** A

## Study on Source, Transport and the Enrichment Mechanism of Iron in Iron Skarn Deposits

CHEN Yan, ZHANG Zhao-chong

(Faculty of Geosciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing),  
Beijing 100083, China)

**Abstract:** Iron skarn deposits are of global concern, due to its complicated metallogenic mechanism. It is also one of the most important types of high-grade iron deposits in China. The source, transportation and enrichment mechanism of iron plays an important role in the study of iron skarn deposits, which are highly controversial at present. Based on the compilation of recent studies, the complex and polygenetic characteristics of iron skarn deposits are described in this paper, the transport and precipitation process of iron is summarized and a process flowchart has been constructed. Then the most possible iron sources in different kinds of iron skarn deposits are then. Above all, it was found that the deposits related to intermediate-acid intrusion and probably gained their iron from shallow intrusions. Many cases showed that most of the iron probably came from iron-rich strata nearby for those skarn deposits that related to acid intrusion. However, not all of this type of skarn deposits were hosted in iron-rich strata. Therefore, the possibility of deep iron source is also discussed. Combined with the theory of magmatic skarn and the cogenetic alkali-rich intrusion, it is proposed that the possible model is on the activation of deep source iron, transportation and enrichment process. The iron enriched ore pulp, derived by the assimilation of

收稿日期: 2012-06-02; 接受日期: 2012-08-05

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目“我国富铁矿形成机制与预测研究”(2012CB416806)

作者简介: 陈艳, 博士研究生, 矿产普查与勘探专业, 主要从事矽卡岩型铁矿的相关研究。E-mail: chenyan0209@yeah.net。

deep magma and calcic rocks, was transported to the aureole between shallow intrusion and carbonates. The ore pulp met the hydrothermal fluid to form iron enriched complex hydrothermal fluid, which precipitated the iron ores with the change of physical and chemical conditions in the aureole.

**Key words:** iron source; transport and enrichment; iron skarn deposits; skarns

矽卡岩一词起源于瑞典,指主要由钙质硅酸盐矿物组成的岩石<sup>[1-8]</sup>,与矽卡岩脉石相关的金属矿床称为矽卡岩矿床<sup>[4,9]</sup>。矽卡岩型铁矿是我国最重要的一种富铁矿类型。据统计,矽卡岩铁矿集中了约25%的世界富铁矿资源;在我国,其占全国富铁矿的50%以上<sup>[10]</sup>。

矽卡岩矿床的多成因性和复杂性、时空演化机理及岩石矿物组合的特殊性等,一直是学者们关注的热点。此外,矽卡岩矿床的形成还包含了从岩浆、高温气成热液到中低温热液交代(充填)作用的许多成因信息和各种地质环境中复杂的成岩成矿作用机理<sup>[10]</sup>。因此,一个多世纪以来,国内外对矽卡岩和矽卡岩矿床的研究长盛不衰<sup>[5,7-8,11-22]</sup>,从最初“接触矿床”的定义,到“接触变质矿床”<sup>[11]</sup>、“高温交代矿床”和最后的“矽卡岩矿床”,人们对矽卡岩矿床的认识不断完善;矽卡岩溶液理论、接触反应交代新理论及岩浆矽卡岩的提出,则将我们的思维带到了新的高度。

但矽卡岩矿床的形成是一个漫长复杂的过程,仍有很多重大理论问题亟待进一步深化研究。矽卡岩型铁矿的铁质来源及其迁移富集机理是目前最核心,也是最具争议的问题之一。例如,裂隙充填式(图1A)和层控式(图1B)矽卡岩型铁矿(特别是在远离岩浆侵入体的情况下)与岩浆热液系统是何关系?什么因素导致了铁质的大规模积聚产出?在成矿物质来源上,特别是与中酸性、酸性侵入岩有关的大型矽卡岩型铁矿,其侵入体中的铁质足以形成富矿体吗?无疑,这些问题的解决对于阐明矽卡岩型铁矿的形成机制具有重要的意义。本文根据近年研究的有关资料,在矽卡岩型矿床复杂性和多成因性研究的基础上,分别探讨了与中酸性、酸性侵入岩有关的矽卡岩型铁矿的铁质来源和迁移富集机理,并建立了深部铁质活化、运移和富集的可能模式。

## 1 矽卡岩铁矿的复杂性和多成因性

矽卡岩型铁矿普遍具有复杂性和多成因性,不同的形成环境和成矿机制往往暗示着不同的矿质来源与富集方式,故矿床成因的争议总是与铁质来源的分歧息息相关。

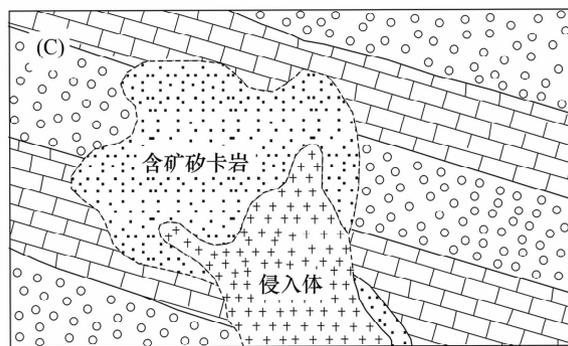
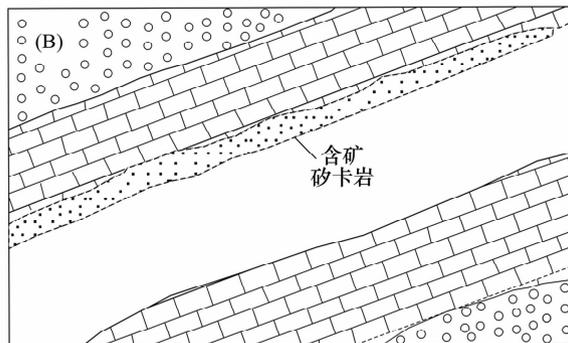
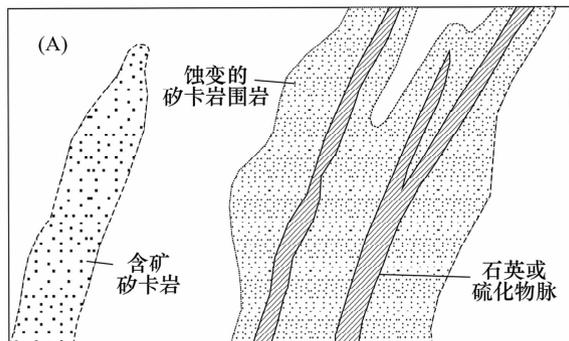


图1 主要的矽卡岩矿床类型

Fig. 1 The main types of skarns

A—岩浆贯入式,矿体沿裂隙充填交代形成脉状含矿矽卡岩; B—层控式,矿体沿一定层位在外接触带或远离侵入岩呈层状、似层状或透镜状产出; C—接触交代式,矿体就位于侵入岩与碳酸盐岩接触带上。修改自 Ray 等<sup>[6]</sup>(详见原文)。

矿体位于侵入体与碳酸盐岩的接触带及其附近 (proximal skarns, 如图 1C), 是矽卡岩矿床的标准产出条件<sup>[23]</sup>。此类矿床的时空演化与其亲缘侵入体的就位和冷却历史往往是同步发展的<sup>[24]</sup>, 其演化过程可分为三个主要阶段: 等化学接触变质作用阶段、交代作用阶段、硫化物沉淀和退化蚀变阶段。各阶

段间无明显界限,常互相重叠交错,组成一个动态、完整、连续的演化过程(如图2)。交代作用阶段发生了非挥发份(Ca、Fe、Si等)的带入带出,一般伴有矿石沉淀,但大部分金属和硫化物矿化都形成于退化蚀变阶段,且多持续到此阶段之后,磁铁矿的沉淀也是在退化蚀变阶段才达到高峰。

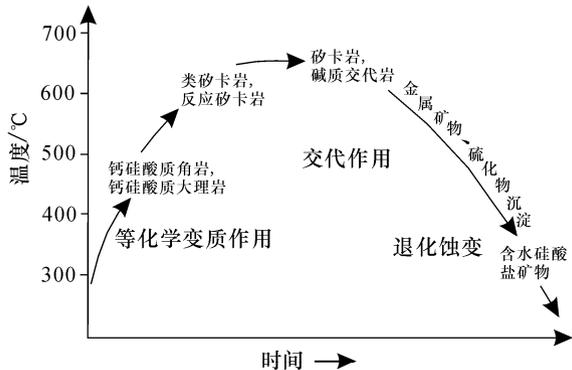


图2 矽卡岩系统的时间-温度演化图(修改自 Brown 等<sup>[25]</sup>)

Fig. 2 Schematic diagram summarizing the major steps in the development of skarn and orebody (modified from reference [25])

除产于接触带及其附近的矽卡岩外,成矿流体还可能沿着构造、岩性界面或层理面迁移较长的距离,形成远端矽卡岩(distal skarns)<sup>[6,26]</sup>。除接触交代作用外,矽卡岩型铁矿的形成还包括了岩浆贯入作用以及后期叠加的沉积变质作用、火山-次火山气液作用、混合岩化作用和区域变质作用等<sup>[5,23,27]</sup>。此外,与矽卡岩矿床有关的岩浆侵入往往是多期次、多阶段的,美国拉斯维加斯的Peladas铁矿是典型实例,其为性质、方向完全不同的两次岩浆侵入作用(早期的闪长岩侵入和晚期的花岗岩侵入)综合叠加的结果<sup>[28]</sup>。汪国栋等<sup>[29]</sup>研究了我国的某些大型矽卡岩型铁矿后认为,有利的成矿地质条件只是成矿的前提,富铁矿的形成取决于整个成矿富集作用的机制和特点,单一成矿作用和一次成矿不能形成工业规模的富铁矿,只有多期次、多阶段或多种成矿作用叠加才能形成大型富铁矿。由于上述及其他原因,一般认为矽卡岩型铁矿具有复杂性和多成因性。

过去学者们常过分关注矽卡岩的形成,而忽略了矽卡岩伴生的矿化及二者之间关系的研究。矽卡岩化与铁矿化的关系因矿床成因不同而异,梳理清两者关系,有助于我们更透彻地理解矽卡岩矿床的复杂性和多成因性。梁祥济<sup>[30]</sup>从5000多次实验中总结出,能否形成矽卡岩取决于物质化学成分中的五组分(Si、Al、Ca、Mg和Fe)的比例,无论处于什么构造位

置,与何种岩石有关,进行哪种形式交代,只要有这五种元素存在,且比例较合理,在适宜的反应溶液和温度、压力等物理化学条件下,都能形成矽卡岩。翟裕生<sup>[24]</sup>指出,矽卡岩的形成只是整个矽卡岩矿化作用的一个组成部分,有的矽卡岩是矿石沉淀的先驱和场地,有的是伴随矿化而形成的,有的则作为变质产物叠加在原有矿石之上。第三种情况中,矽卡岩完全与其他地质作用和溶液来源有关,层控式矽卡岩矿床常显示出此类特征,此时作为变质产物叠加的矽卡岩化会使铁质重新萃取、活化、富集,有时甚至会破坏原有矿化,实例有福建马坑铁矿<sup>[31-34]</sup>、广东大顶铁矿<sup>[35-36]</sup>、内蒙黄岗梁铁锡矿<sup>[37-38]</sup>、四川泸沽铁矿<sup>[39-40]</sup>等。矽卡岩矿床实际上包括了一大套不同成因类型的矿床,其形成的地质条件和机制彼此相差很大,远超出矽卡岩作用的范畴。

那么,矽卡岩化与铁矿化之间究竟有何本质联系?实验研究表明<sup>[30]</sup>,有利于矽卡岩形成的各类物化条件与铁质活化富集的条件极相似,如偏酸性的,含K、Na、Cl、F、氟化物为主的热液流体,弱氧化-弱还原的环境等。换言之,在物质成分充足且比例适合的情况下,利于矽卡岩形成的环境也利于铁质的活化富集。而中酸性、酸性岩浆侵入到碳酸盐围岩中恰能产生此极优的物理、化学条件和充足的物质成分,这就不难解释为何矽卡岩化和铁矿化有时间和空间上的密切联系。但是,常作为铁质载体的矽卡岩,对于铁质的萃取、沉淀是否有促进作用,还需进一步研究。

总之,矽卡岩型铁矿形成于纷繁复杂的地质过程,具有多期次、多阶段、多来源和多成因的特点。在研究矽卡岩型铁矿的多成因时,应正视矽卡岩化与矿化之间的关系,突破内生和外生,同生和后生的藩篱,着眼于成矿作用全过程<sup>[27]</sup>。

## 2 铁质活化富集的机理研究

### 2.1 影响铁质迁移富集的因素

从矽卡岩的演化可看出,影响铁质迁移富集的因素很多,但温度、环境 Eh 值、流体 pH 值的变化及挥发份和卤素的含量起了决定性作用。

温度的变化往往控制了矿化不同的演化阶段(如图2)。梁祥济<sup>[30]</sup>的实验研究表明,在早期铁质活化阶段,从侵入岩中活化出的 TFe 量,随着温度的升高(450~650°C)而增加,且在600°C以上急增,说明在一定范围内,温度越高,从岩石中萃取的铁量越多。铁质的沉淀富集则是在中晚期温度降低过程中

进行的,该阶段温度控制着不同矽卡岩矿物组合的出现,据统计,磁铁矿的形成主要集中在退化蚀变阶段 300 ~ 500℃ 的范围内<sup>[41]</sup>。

在成矿过程中溶液酸碱度的变化、硫-氧在溶液中的状况也是重要的影响因素,常常正是由于酸碱度或氧化-还原态的变化,促使金属元素从成矿溶液中沉淀出来。实验研究表明,pH 值低、含 NaCl 浓度高的反应溶液对活化围岩中的 Fe 更有利<sup>[30]</sup>。在矿化中后期,碱性介质对酸性溶液的中和作用又促使铁质从溶液中沉淀出来并富集成矿。据矿物流体包裹体研究,形成矽卡岩矿石的含矿溶液属弱酸-弱碱性,Eh 值在 -0.65 ~ 0.95 之间,具有弱还原性质<sup>[41]</sup>。

与矽卡岩有关的侵入体可分为钙碱系列和碱性系列,矽卡岩型铁矿的成矿母岩主要介于花岗闪长岩到二长岩之间,以偏碱性的钙碱质岩石系列为主,并以较高的 Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O 为特征。碱质对矽卡岩铁矿化具有重要意义。研究表明,盐水溶液对铁质的溶解量比纯水高几十倍<sup>[42]</sup>,盐类是从硅酸盐中置换铁质的良好助熔剂和矿化剂,通过钠交代和钾交代,含铁矿物解体,带入溶液中的 Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O,带出铁质<sup>[43]</sup>。其次,碱金属离子还是铁络合物的重要组成部分。

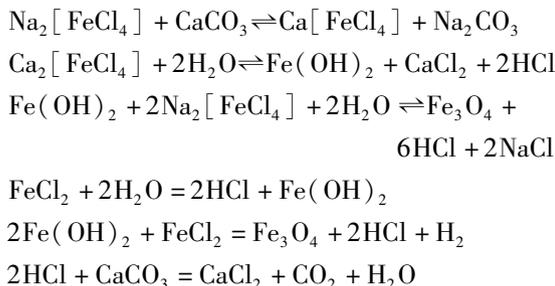
流体中的挥发组分(Cl、F、S、B、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O)对铁质的萃取、迁移也起着积极的作用,其不仅参与了交代矿物的晶格和组成赋存于矿物多相包裹体中的盐类矿物,最重要的是其与金属元素离子、碱金属阳离子组成络合物和卤化物,成为铁质迁移的主要形式。王玉荣等<sup>[44]</sup>的实验表明:挥发组分中以 Cl<sup>-</sup> 对铁的搬运能力最强,其次是 F<sup>-</sup>,铁卤化物主要的搬运形式可能是 FeCl<sub>2</sub> 和 FeF<sub>2</sub>。铁络合物和卤化物在高温气液相中的溶解度很大,且稳定性高,适合进行长距离搬运。

总之,卤素和 K、Na 卤化物,挥发组分是矽卡岩成矿铁质的活泼萃取剂和载体,能降低成矿温度、加速化学反应速度,起了催化剂的作用,而偏酸性溶液则能携带和迁移较多的铁质,相关研究主要有蔡本俊<sup>[42,45]</sup>、梁祥济等<sup>[30,46]</sup>、Zhao 等<sup>[47]</sup>、赵一鸣等<sup>[10,17,43]</sup>。

### 2.2 铁质迁移富集的过程

前人研究<sup>[42,45-46,48-53]</sup>表明,铁质活化的具体过程可能是:在高温、富含挥发份、富碱的流体作用下,岩石中暗色矿物(黑云母、角闪石等)和磁铁矿解体消失,碱质被带入岩体,形成碱质交代岩,铁质带出,带出的铁质与挥发份流体反应,生成络合物或卤化物,从而进行搬运迁移(见图3)。

促使 Fe 络合物或卤化物分解和沉淀的因素很多,如温度、压力、pH 值和 Eh 值等的变化,其中热流体温度的下降和 pH 值的增大可能是铁质沉淀的主要原因。对于接触交代式矽卡岩型铁矿,可能的分解、沉淀过程是:在矽卡岩化晚期,当热流体运移至接触带时,物理化学条件发生急剧变化,温度、压力迅速降低,流体从超临界状态转入溶液状态,酸度不断增大,当其与早期形成的矽卡岩或碳酸盐围岩相遇时,产生相互作用,溶液碱度升高,促使铁络合物或卤化物分解;由于碳酸盐是铁络合物、卤化物最重要的沉淀剂,可提供大量的碳酸钙,中和铁络合物、卤化物分解后产生的 HCl、HF 等强酸,磁铁矿才能以交代碳酸盐的方式不断沉淀<sup>[43,54]</sup>。以氯铁络合物和 FeCl<sub>2</sub> 为例,其反应式如下:



综合上述资料,可将铁质的迁移、富集机理概括为图3。

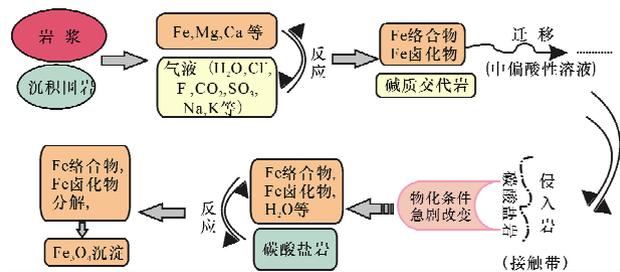


图3 Fe 质迁移富集流程图

Fig.3 The flowchart of iron transport and enrichment

### 3 矽卡岩型铁矿的铁质来源探讨

目前一般认为矽卡岩型铁矿的铁质主要有三种可能来源:接触带附近已经固结的侵入体、深部岩浆源和沉积围岩,前两者同属岩浆源。对于具体矿床来说,常同时有两种或三种来源,只是比例不同。现阶段学者们都倾向于认为岩浆是铁的主要来源,沉积围岩在某些情况下能提供一定量的铁,但不是主体<sup>[17,37-39,55-60]</sup>。但是,与基性、超基性岩不同,与矽卡岩型铁矿密切相关的中酸性、酸性岩中铁的含量较低,其足以形成我国数量庞大的矽卡岩富铁矿吗?

且为含铁较高的超基性岩侵入的环境中却几乎不发育矽卡岩富铁矿?对于某些矽卡岩型铁矿,岩浆似乎是铁质唯一可能的来源,故在浅部侵入岩所含铁质不足以成矿的情况下,深源应是我们思考的方向。如若来自深部,是什么因素导致铁的大量熔离及上升?下面本文结合前人研究,从矿体与岩浆作用的关系出发,就铁质来源问题进行探讨,尽可能为读者提供较为客观的分析。

### 3.1 与中酸性侵入岩有关的矽卡岩型铁矿的铁质来源研究

梁祥济<sup>[30]</sup>进行了矽卡岩型铁矿围岩中铁的活化实验研究,实验采用矽卡岩型铁矿的若干不同类型围岩——橄辉岩、辉绿岩、黑云母辉石闪长岩、石英闪长岩(样品含铁量依次递减)作为原料,用化学试剂模拟岩浆热液配制了含 H<sub>2</sub>O、F、Cl 和 CO<sub>2</sub> 等挥发份的反应溶液,实验在高温高压下的冷封自紧式高压釜内进行,实验结果见表 1。

表 1 侵入岩在不同温度、压力和不同 pH 的介质溶液中铁的析出量<sup>[30]</sup>

Table 1 Quantity of iron extracted from intrusive rocks in aqueous media with varied pH under different temperatures and pressures

样品名称	实验压力 p/MPa	实验温度 θ/°C	介质溶液 pH 值		从岩石中析出的铁含量 ρ <sub>B</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> )																	
			实验前	实验后	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TFe															
橄辉岩	70	6.0	450	9.0	0	30.00	20.98															
								500	8.0	0	36.00	25.18										
													550	6.7	36.00	20.00	41.97					
																		600	6.0	85.48	15.00	66.45
辉绿岩	50	5.5	450	7.0	8.99	2.00	8.39															
								500	6.8	7.20	4.00	8.39										
													550	6.5	47.69	3.00	39.17					
																		600	6.2	67.48	7.00	57.35
黑云母 辉石 闪长岩	60	5.0	450	8.6	6.00	1.33	5.60															
								500	8.2	6.75	2.50	6.99										
													550	7.8	28.79	2.00	23.78					
																		600	7.2	54.57	7.43	47.55
石英 闪长岩	60	4.0	450	6.7	9.00	2.50	8.74															
								500	6.5	60.00	16.67	58.28										
													550	4.8	926.79	20.00	734.41					
																		600	4.0	1232.73	40.00	986.21

表 1 除反映出随温度的升高,活化的铁量随之增加,且铁于高温高压下主要呈 Fe<sup>2+</sup> 存在和迁移外,更清楚地说明从四种侵入岩,特别是中酸性岩

(石英闪长岩)中活化出的铁量十分可观,足以构成含矿溶液。

我们注意到,从橄辉岩到石英闪长岩,随着岩石酸度的增加,铁的含量递减,但实验后它们析出的铁量却并未与之呈正比。相反,650℃时石英闪长岩中析出的全铁量(TFe)达到了 3864.41 mg/L,而此时橄辉岩 TFe 的析出量仅为 240.60 mg/L,前者约是后者的 16 倍;换言之,原本铁含量少得多的石英闪长岩,实验后却活化出了更多的铁。这主要是由于反应介质不同引起的,酸度大的,含 NaCl 浓度高的反应溶液对活化围岩中的铁更有利:作用于橄辉岩的反应溶液为 0.5 mol/L KCl + 0.5 mol/L NaF 溶液, pH = 6.0,而作用于石英闪长岩的反应溶液为 0.7 mol/L NaCl + 0.3 mol/L KF + 几滴(HCl + HF)水溶液, pH = 4.0。可见热液流体成分在成矿中所起的巨大作用。这说明,即使原本含铁量较少的中酸性岩,在极有利的物理化学条件下,析出大量铁,形成一定规模的矽卡岩型铁矿是完全可能的。进一步推理可得,自然界中之所以极少存在与基性、超基性侵入岩有关的矽卡岩型铁矿,原因之一很可能是由于此类岩浆在演化过程中很难形成有利于铁质活化迁移的,具有富含挥发份和碱质、呈偏酸性等特征的热液流体。

对矽卡岩型铁矿中普遍发育的钠交代研究也能间接地为铁质来源问题提供一些信息。钠长石化的实质是一个从硅酸盐中去铁的过程。沈保丰等<sup>[49]</sup>以河北北洛河铁矿五号矿体为例,计算了岩体钠化后大约析出的铁量。其侵入岩新鲜闪长岩中 TFe = 5.62% (样品平均值,下同),钠化闪长岩 TFe = 2.52%,钠长石岩 TFe = 0.94%,岩体面积从 1:2000 的地质图上量取,根据五号矿体南北端的两个钻孔资料,钠化岩石深度约会 325 m,经计算(全铁带出量 = 含石英闪长岩的全铁量 - 钠化闪长岩的全铁量 - 钠长石岩的全铁量),在 2 × 10<sup>7</sup> m<sup>3</sup> 的体积内,有共约 233 万吨全铁被带出,这个数值与实际产出的矿产数量比较接近。这表明,钠长石化从闪长岩中活化转移出的铁质是形成此类矿床的重要来源。

综上所述,与中酸性侵入岩有关的矽卡岩型铁矿,在适宜的物理化学条件下,通过交代作用,侵入岩中的铁质可以也足够形成矿床,侵入岩应该是铁质的主要来源。但是,此类矿床中时有分布的岩浆贯入式矿体,与围岩接触截然不同,往往无明显交代作用或交代作用极微弱,其铁质显然不是源于浅部固结侵入体的钠(钾)化,它的形成还蕴藏着另一机理。

### 3.2 与酸性侵入岩有关的矽卡岩型铁矿的铁质来源研究

与酸性岩有关的矽卡岩型铁矿在我国有广泛的分布,重要的有福建马坑铁矿、内蒙古朝不楞铁多金

属矿、广东大顶铁矿、四川泸沽铁矿、海南石碌铁钴铜矿等。由于花岗岩中 Fe 含量很低,目前还没有相关实验研究证明从花岗岩中活化出的铁质足以形成矿体,故此类矿床在成因上还存在较大争议。

表2 我国与酸性侵入岩有关的典型矽卡岩型铁矿的若干特征

Table 2 Features of typical acid intrusive-related iron skarn deposits

矿床名称	矿体特征	区内出露的岩体	铁质主要可能来源	争议性成因类型
福建马坑铁矿	矿体多限于灰岩之下,碎屑岩之上;为巨厚层状矿体	黑云母花岗岩、辉长辉绿岩、辉绿闪长岩	火山喷气(液)作用沉积的铁质	海相火山沉积-热液改造矿床
内蒙黄岗梁铁锡矿	矿体顺层产于钾长花岗岩与安山岩、凝灰岩和大理岩、钙质砂页岩接触带中	钾长花岗岩、玄武-安山岩	火山喷发沉积的铁矿层、玄武-安山岩钠化转移出的铁质	火山喷发沉积-热液改造矿床
四川泸沽铁矿	矿体主要沿大理岩和砂岩接触面成矿,呈多层状延长	花岗岩、辉绿岩脉	含火山碎屑物质和晶屑石英的地层	沉积变质-热液改造矿床
广东大顶铁矿	矿体呈似层状、扁豆状产于黑云母花岗岩与碳酸盐岩接触带中	黑云母花岗岩,少量微晶闪长岩、英安玢岩、煌斑岩、辉绿岩等	火山喷发沉积的铁矿层	海相火山沉积-热液改造矿床
广东尖山铁矿	矿体产于花岗岩与碳酸盐岩接触带及沉积岩层的不整合面	花岗岩、花岗斑岩石英斑岩、闪长玢岩、辉绿岩等	下石岩统砂岩和粉砂岩地层	接触交代型铁矿

通过研究我国主要与酸性岩有关的矽卡岩型铁矿,可发现该类矿床有许多共同特征,如矿体多具层控性,铁常与锡伴生,矿区除出露花岗岩外,还常分布其他富铁岩体或地层(如表2)。这些矿床在成因上普遍存在接触交代型和沉积变质-热液改造型两种观点,前者很难解释矿体的层控特征和铁质来源问题,后者一般认为矿化与花岗岩侵入无必然联系,花岗岩不是铁质的主要来源,其可能只起到了对原始含铁岩层的改造作用。沉积变质-热液改造型的观点能较合理地解释矿质来源和矿床形成机理,从该观点出发,这些铁矿(福建马坑铁矿、内蒙黄岗梁铁锡矿、四川泸沽铁矿、广东大顶铁矿)的典型形成模式可概括为:在早期中、基性岩浆活动中,从地幔带来的大量金属物质(如 Fe、Sn、Zn 等)随岩浆分异和挥发份的作用,富集在富 Fe 的岩浆分异体中,火山喷发后,便在地表凹陷处形成了原始火山喷发-沉积的铁矿层;而后后期岩浆侵入,尤其是花岗岩的侵入,对原始沉积铁质进行了叠加改造(矽卡岩化),使 Fe、Sn 出现迁移和再分配。这种模式下,矽卡岩只是作为变质产物叠加原有矿化之上,碱交代使矿质活化和再富集,早期火山作用沉积的铁质才是铁的主要来源。另外,原始铁矿层除可能是火山喷气(液)作用沉积的铁质外,还可为早先沉积的菱铁矿,如四川泸沽铁矿,也可为附近富铁的砂岩和粉砂岩地层,如广东尖山铁矿<sup>[56]</sup>。

该类矿床具有多期、多阶段的特点,是成矿时间较长的复合成因矿床。

多数此类矿床中原始赋铁层位的发现,为铁质的可能来源提供了新的渠道,但并非所有与酸性侵入岩有关的矽卡岩型铁矿的附近都发现了赋铁沉积层,上述成矿模式或许只是一种较普遍的“特殊情况”,在这种“特殊情况”之外,其铁质是否有其他来源,其岩浆系统与铁质来源之间是何种关系,值得进一步探讨。

### 3.3 铁质深部来源的可能性探讨

矽卡岩型铁矿的铁质还可能来源于深部岩浆源。我国典型的矽卡岩型铁矿,特别是与酸性侵入岩有关的,区内除酸性侵入岩外,还常分布基性岩,且基性岩和铁矿存在一定空间关系,如四川泸沽铁矿<sup>[39]</sup>、内蒙朝不楞铁矿<sup>[61]</sup>。这些现象说明,此类矽卡岩矿床深部同时存在酸性岩浆和基性岩浆活动,铁矿体的形成与基性岩浆之间存在着某些联系。

从接触交代式铁矿中铁质的迁移富集流程(见图3)可知,铁质主要通过碱交代作用从浅部侵入岩中解体,而后以络合物和卤化物的形式运移到接触带成矿。假设深部铁质来源确实存在,则可能的过程应该是,气液携带从深部基性岩浆中熔离出的铁质,运移到酸性岩与碳酸盐岩的接触带沉淀。存在的问题便一目了然:大量深源铁质是如何熔离并运

移至浅部沉淀的。

吴言昌等<sup>[62-64]</sup>研究我国长江中下游岩浆贯入式矽卡岩矿床时,提出了“岩浆矽卡岩-富碱侵入岩对”的概念(深部岩浆经一系列作用衍生出的两种不同性质和特征的岩浆产物,二者有明显的共轭互补关系),认为该类矿床的形成机制为:深部(高位岩浆房)富碱的中基性、中酸性岩浆在同化混染(或同熔混合)部分钙质岩石后,发生去挥发份、脱硅和液态不混溶分离作用,使原始岩浆携带的或被捕获的成矿元素所形成的金属硫化物或铁氧化物液体,趋向于聚集到从被混染岩浆中分离出来的富铁(镁)质高密度钙(铁、镁)硅酸盐质熔体中,聚集到一定量时则形成矽卡岩-铁氧化物/硫化物矿浆或含矿矽卡岩浆,此矽卡岩浆及其矿浆经运移后沿构造裂隙贯入结晶便形成矿床。赵斌等<sup>[65]</sup>进行的岩浆矽卡岩成岩(成矿)实验的结果有力支持了这个模式。许国建等<sup>[66]</sup>在研究安徽长龙山铁矿时也提出了类似的“矽卡岩浆型铁矿”的成岩成矿模式:壳幔同熔型富铁硅酸岩浆在上侵过程中同化了部分碳酸盐岩地层,形成了距深部岩浆源有一定距离的岩浆房,由于外来组分的加入,使之逐渐演化为具矽卡岩化学成分,富含铁及挥发组分的特殊岩浆熔融体;该熔融体在一定的地质和物理化学条件下发生熔离,形成矽卡岩浆和富含挥发组分铁矿浆的二元不混溶体系,由于重力分异作用下,比重大的铁矿浆沉于下部,后其在断裂构造的作用下,依次侵位、贯入成岩成矿。

若上述机制成立,那么是否存在另一种情况:深部岩浆同化钙质岩石融离出的富铁矿浆上升后未沿裂隙充填,而是运移到浅部侵入岩与碳酸盐岩的接触带附近,与该系统中的热液相遇并反应,热液吸收矿浆中的铁质生成富铁的复合热液,后复合热液在接触带因物理化学条件的剧变而沉淀成矿,具体过程如图4所示。按此设想,则该类铁矿中与矿体密切相关的基性岩体很可能就是深部岩浆演化而来的富碱侵入岩。如前文所述,酸性、中酸性岩浆侵入到碳酸盐岩中能产生十分有利于铁质迁移、富集和沉淀的热液,而含铁较高的基性岩浆则不然,矽卡岩浆及其矿浆与浅部系统热液的结合汲取了二者的优点,对铁成矿无疑是极有利的。但这只是一种理论推测,还存在很多未解决的问题,如深部矽卡岩矿浆的生成和运移方式,复合热液的具体形成机理等,还需要将来地质工作者更多的深入研究和验证。

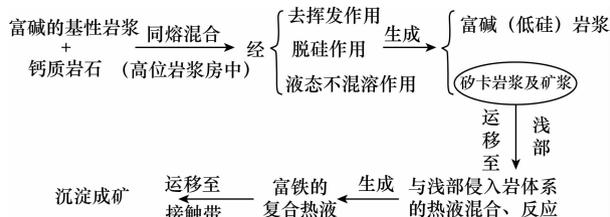


图4 深源铁质迁移沉淀的可能模式(修改自吴言昌等<sup>[64]</sup>)

Fig. 4 The possible model on deep source iron's activation, transport and enrichment process (modified from reference [64])

## 4 主要认识

由于矽卡岩型铁矿的复杂性和多成因性,铁质的来源多样、复杂。与中酸性侵入岩有关的矽卡岩型铁矿,浅部侵入体中的铁质足以也可以构成矿体;与酸性侵入岩有关的矽卡岩型铁矿,铁质可能主要源于接触带附近的富铁沉积层,但并非所有该类铁矿矿区附近都存在富铁层位,故铁质还有其他来源。本文参考野外地质特征并结合前人针对岩浆贯入式矽卡岩建立的“岩浆矽卡岩-富碱侵入对”理论,对深源铁质进行了研究,提出了其全新的迁移沉淀的可能模式,但该模式还有待将来更多的研究验证。

岩浆系统、矿化和矽卡岩化三者之间的关系及金属元素来源、迁移和富集机理是矽卡岩矿床领域两个十分重要的课题,但近年来这方面的研究并未取得明显进展,主要经典成果多为上世纪地质学家所提出。本文对铁质来源和迁移富集机理的探讨仅为蜻蜓点水,很多看法只是一个模糊的倾向性认识,有待将来更深入、全面的论证。

现阶段,岩浆贯入式铁矿和异地矽卡岩型铁矿的成矿机理还不甚明了,与酸性侵入岩有关的矽卡岩型铁矿和异地矽卡岩型铁矿中铁质的来源仍存在争议,铁质深部来源的模式仅为一种猜测,探明这些机制定能为矽卡岩矿床的深入研究提供新的启迪,它们应成为今后研究的重点方向。总之,矽卡岩型铁矿的形成是一个复杂、漫长的地质过程,对于铁质来源、迁移和富集机理,我们应结合矿床实际,具体问题具体分析,从已知入手解决未知,相信在不久的将来,存在的问题都能迎刃而解。

## 5 参考文献

- [1] Watanabe T. Characteristic features of ore deposits found in contact metamorphic aureoles in Japan [J]. *International Geology Review*, 1960, 2: 946-966.

- [2] Zharikov V A. Skarns [J]. *International Geology Review*, 1970, 12: 541 – 775.
- [3] Smirnov V I. Skarn deposits, in *Geology of mineral deposits* [M]. Moscow: MIR Publications, 1976: 156 – 188.
- [4] Burt D M. Mineralogy and petrology of skarn deposits [J]. *Rendiconti della Societa Italiana di Mineralogia e Petrologia*, 1977, 33: 859 – 873.
- [5] Einaudi M T, Meinert L D, Newberry R J. A special issue devoted to skarn deposits (Introduction—terminology, classification and composition of skarn deposits)[J]. *Economic Geology*, 1982, 77: 745 – 754.
- [6] Ray G E, Webster O C L. An overview of skarn deposits; B. C. Ministry of energy [J]. *Mines and Petroleum Resources Paper*, 1991, 4: 213 – 252.
- [7] Meinert L D. Skarns and skarn deposits [J]. *Geoscience Canada*, 1992, 19: 145 – 162.
- [8] Meinert L D. Application of skarn deposit zonation models to mineral exploration [J]. *Exploration Mining Geology*, 1997, 6(2): 185 – 208.
- [9] Burt D M. Mineralogy and geochemistry of Ca-Fe-Si skarn deposits [D]. Massachusetts: Harvard University, 1972.
- [10] 赵一鸣. 矽卡岩矿床研究的某些重要新进展[J]. 矿床地质, 2002, 21(2): 113 – 136.
- [11] Törnebohm A E. Geognostisk beskrifning ofver Persbergets grufvefalt [J]. *Sveriges Geologiska Undersokning*, 1875, 14: 21.
- [12] 孟宪民. 矽卡岩的找矿意义[J]. 地质学报, 1955, 35(1): 59 – 80.
- [13] 徐克勤. 湘南钨铁锰矿矿区中矽卡岩型钙钨矿的发现, 并论两类矿床在成因上的关系[J]. 地质学报, 1957, 37(2): 117 – 147.
- [14] 郭文魁. 论安徽铜官山铜矿成因[J]. 地质学报, 1957, 37(3): 317 – 332.
- [15] 翟裕生, 林新多, 池三川, 姚书振. 长江中下游内生铁矿床成因类型及成矿系列探讨[J]. 地质与勘探, 1980(3): 9 – 14.
- [16] Burt D M. Skarn deposits—Historical bibliography through 1970 [J]. *Economic Geology*, 1982, 77: 755 – 763.
- [17] 赵一鸣, 毕承思, 李大新. 中国主要矽卡岩型铁矿的挥发组分和碱质交代特征及其在成矿中的作用[J]. 地质论评, 1983, 29(1): 66 – 74.
- [18] Nicolescu S, Marza I. On the history of ore deposit studies in Romania [J]. *Studia Univ Babes-Bolyai, Geologia-Geografia*, 1989, 34: 94 – 99.
- [19] Aksyuk A M. Physico-chemical conditions of the formation of skarns of the magmatic stage [C]//Skarns—Their genesis and metallogeny. Athens: Theophrastus Publications S A, 1991: 593 – 617.
- [20] 梁祥济. 混合岩化作用中交代岩和铁矿形成的实验研究[J]. 矿床地质, 1993, 12(4): 358 – 369.
- [21] Meinert L D. Skarn zonation and fluid evolution in the Groundhog mine, Central mining district, New Mexico [J]. *Economic Geology*, 1987, 82(3): 523 – 545.
- [22] Baker T, Achterberg E V, Ryan C G, Lang J R. Composition and evolution of ore fluids in a magmatic-hydrothermal skarn deposit [J]. *Geology*, 2004, 32: 17 – 120.
- [23] 涂光炽. 地质学中的若干思维方法[J]. 地质与勘探, 1981(7): 1 – 5.
- [24] 翟裕生. 矽卡岩矿床研究的若干问题[J]. 地质科技情报, 1983(1): 46 – 54.
- [25] Brown P E, Bowman J R, Kelly W C. Petrologic and stable isotope constraints on the source and evolution of skarn-forming fluids at Pine Creek, California [J]. *Economic Geology*, 1985, 80: 72 – 95.
- [26] 杜杨松, 曹毅, 张智宇, 庞振山, 李大鹏. 安徽沿江地区中生代原地和异地矽卡岩岩浆[J]. 地质学报, 2011, 85(5): 699 – 711.
- [27] 常印佛, 刘学圭. 关于层控式矽卡岩型矿床——以安徽省内下扬子拗陷中的一些矿床为例[J]. 矿床地质, 1983, 2(1): 11 – 20.
- [28] Pons J M, Franchini M, Meinert L, Recio C, Etcheverry R. Iron skarns of the Vegas Peladas District, Mendoza, Argentina [J]. *Economic Geology*, 2009, 104(2): 157 – 184.
- [29] 汪国栋, 宋雄. 多重级富集是工业富铁矿形成的核心机制——兼论长江中下游铁矿找矿[J]. 地质找矿论丛, 1996, 11(1): 1 – 7.
- [30] 梁祥济. 中国矽卡岩和矽卡岩矿床形成机理的实验研究[M]. 北京: 学苑出版社, 2000: 152 – 192.
- [31] 葛朝华, 韩发, 邹天人, 陈德潜. 马坑铁矿火山沉积成因探讨[J]. 中国地质科学院院报, 1981, 3(1): 47 – 67.
- [32] 潘廓祥, 连天萍, 林永生. 再论马坑式铁矿的沉积—改造(再造)成因[J]. 中国地质科学院南京地质矿产研究所所刊, 1982, 3(2): 1 – 14.
- [33] 陈述荣, 谢家亨, 许超南, 郭维伍. 马坑铁矿区火山岩与铁矿原始铁质来源关系的初步探讨[J]. 地质科技情报, 1982(Z1): 69 – 72.
- [34] 韩发, 葛朝华. 马坑铁矿——一个海相火山热液—沉积矿床[J]. 中国科学: B辑, 1983, 3(5): 439 – 445.
- [35] 林国锦. 广东大顶锡铁矿床矽卡岩与成矿的关系[C]//第二届全国矿床会议论文摘要汇编(上). 1980.
- [36] 郑昌能, 欧阳玉飞, 王涌泉. 广东连平大顶铁矿床地质特征及成因探讨[J]. 甘肃冶金, 2009, 31(1):

- 53-55.
- [37] 李鹤年,段国正. 黄岗式铁锡多金属矿床的成矿模式[J]. 世界地质, 1988, 7(4): 17-28.
- [38] 王莉娟,岛崎英彦,王京彬,王玉往. 黄岗梁矽卡岩型铁锡矿床成矿流体及成矿作用[J]. 中国科学: D辑, 2001, 31(7): 553-562.
- [39] 黎荣国. 泸沽铁矿山富铁矿的形成规律及找矿方向[J]. 四川冶金, 1983(4): 1-5.
- [40] 魏富有. 泸沽地区铁矿成因探讨[J]. 地质地球化学, 1987(1): 65-67.
- [41] 陈正等. 矿理学概论(上编)[M]. 北京: 地质出版社, 1985: 221-251.
- [42] 蔡本俊. 长江中下游地区内生铁铜矿床与膏盐的关系[J]. 地球化学, 1980(2): 193-199.
- [43] 赵一鸣,沈文彬. 中国矽卡岩矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1990: 137-142.
- [44] 王玉荣,卢家烂,樊文岭. 高温气热溶液中铁元素迁移形式的初步实验研究[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [45] 蔡本俊. 鄂东大冶式铁矿床形成条件——蒸发岩对铁矿床形成的意义[J]. 中国地质科学院地质力学研究所所刊, 1981(1): 110-118.
- [46] 梁祥济,程莱仙,曲国林. 在高温高压下卤素和钾、钠卤化物在铁矿形成中的作用和影响[J]. 地球化学, 1982(3): 87-98.
- [47] Zhao Y M, Bi C S, Li D X. The characteristics of volatile components and alkaline metasomatism in main skarn-type iron deposits in China and their role in ore formation [J]. *Geochemistry*, 1984, 3(1): 14-23.
- [48] 王玉荣. 高温高压下络合物研究的地球化学意义与实验方法[J]. 科学通报, 1978, 1(11): 682-686.
- [49] 沈保丰,陆松年,翟安民,李增慧,汪玉麟. 中国接触交代型铁矿[J]. 中国地质科学院院报天津地质矿产研究所分刊, 1980, 1(2): 1-22.
- [50] 王玉荣,樊文答. 酸碱组分的分离与成矿元素的富集[J]. 科学通报, 1981, 27(7): 423-425.
- [51] 杨超群. 钠-氯型矽卡岩铁矿的地质、地球化学特征及其形成机制[J]. 中国地质科学院宜昌地质矿产研究所所刊, 1981(3): 1-20.
- [52] 赵斌,李统锦,李昭平. 夕卡岩形成的物理化学条件实验研究[J]. 地球化学, 1983(3): 256-267.
- [53] 王玉荣.  $\text{Na}_2\text{SnF}_6$ 在水热溶液中水解特征的实验研究[J]. 地球化学, 1986(3): 202-210.
- [54] 郑建民,毛景文,陈懋弘,李广栋,班长勇. 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.
- [55] 黄懿,裴荣富,任冠政,刘佑馨,周维屏. 论大冶式铁矿[J]. 地质学报, 1957, 37(2): 191-202.
- [56] 叶庆同,吴学汉,李慕洁,邓仕依. 广东尖山铁矿的成因[J]. 地质学报, 1980(3): 219-232.
- [57] 赵一鸣,谭惠静,许振南,袁润广,郑人来,林峰雪. 闽西南地区钙矽卡岩型铁矿床的生成地质条件和交代矿化特征[J]. 中国地质科学院院报矿床地质研究所分刊, 1980, 1(1): 21-48.
- [58] 李华芝,沈保丰,宋亮生. 吕梁地区狐姑山、尖山早前寒武纪含铁建造的岩石化学特征及成因探讨[J]. 中国地质科学院天津地质矿产研究所所刊, 1984, (11): 131-154.
- [59] 梁祥济,李德兴,张仲明,程莱仙. 交代岩与其有关铁矿形成的铁质来源的模拟实验[J]. 矿床地质, 1987, 6(2): 63-76.
- [60] 陈跃升. 马坑铁矿开发过程中对矿床成因的新认识[J]. 金属矿山, 2002, (11): 50-59.
- [61] 许立权,陈志勇,陈郑辉,张彤,张玉清. 内蒙古东乌旗朝不楞铁矿区中粗粒花岗岩 SHRIMP 定年及其意义[J]. 矿床地质, 2010, 29(2): 317-322.
- [62] 吴言昌. 论岩浆矽卡岩——一种新类型矽卡岩[J]. 安徽地质, 1992, 2(1): 12-26.
- [63] 吴言昌,邵桂清,吴炼. 岩浆矽卡岩及其矿床[J]. 安徽地质, 1996, 6(2): 30-39.
- [64] 吴言昌,常印佛. 关于岩浆矽卡岩问题[J]. 地学前缘, 1998, 5(4): 291-301.
- [65] 赵斌,赵劲松,张重泽,朱成明,蔡恩照. 岩浆成因矽卡岩的实验证据[J]. 科学通报, 1993, 38(21): 1986-1990.
- [66] 许国建,林新多. 安徽长龙山矽卡岩型铁矿床成因探讨[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1990, 15(6): 649-657.