

# 膏盐层氧化障在长江中下游玢岩铁矿成矿中的作用\*

李延河<sup>1</sup> 段超<sup>1</sup> 韩丹<sup>1</sup> 陈新旺<sup>2</sup> 王丛林<sup>2</sup> 杨秉阳<sup>2</sup> 张成<sup>1</sup> 刘锋<sup>1</sup>

LI YanHe<sup>1</sup>, DUAN Chao<sup>1</sup>, HAN Dan<sup>1</sup>, CHEN XinWang<sup>2</sup>, WANG CongLin<sup>2</sup>, YANG BingYang<sup>2</sup>, ZHANG Cheng<sup>1</sup> and LIU Feng<sup>1</sup>

1. 国土资源部成矿作用和资源评价重点实验室, 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

2. 马钢集团矿业公司南山矿, 马鞍山 243033

1. MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. Nanshan Mine, Maanshan Iron and Steel Group Mining Company, Maanshan 243033, China

2013-11-02 收稿, 2014-01-24 改回.

Li YH, Duan C, Han D, Chen XW, Wang CL, Yang BY, Zhang C and Liu F. 2014. Effect of sulfate evaporate salt layer for formation of porphyrite iron ores in the Middle-Lower Yangtze River area. *Acta Petrologica Sinica*, 30(5):1355–1368

**Abstract** The Middle-Lower Yangtze Polymetallic Ore Belt is one of the most important metallogenic belts in East China, comprising more than 200 polymetallic (Cu-Fe-Au, Mo, Zn, Pb, Ag) deposits. Ningwu and Luzong ore districts are the most important component of this belt. In these districts, volcanic-subvolcanic rocks, intrusions and subvolcanic rocks-related iron deposits which are well known as porphyrite iron deposits in China are widespread, during the Late Mesozoic. Based on the geological characteristics, spatial distribution and relationship with volcanic-subvolcanic rocks, the famous iron porphyrite deposit model has been established which improved the development of metallogenic theory and the effective guidance of porphyrite deposit prospecting greatly. This mineralization model emphasizes mainly magmatic-hydrothermal role, but the sulfate evaporate salt layers, at the top of the Zhouchongcun group in Middle Triassic, did not cause the attention in the role of mineralization. And this model mainly reflects the mineralization in shallow. The latest researches and prospecting results reveal that the Middle Triassic sulfate evaporates salt layers and mineralization has closely relationship. However, the ore-controlling mechanism of evaporate salt layers has still been unrevealed, “sulfate evaporate salt layers as oxidation barrier” in porphyry ore mineralization role rarely reported. In this paper, sulfur isotope characteristics of porphyrite iron deposits have been studied in Middle-Lower Yangtze River Polymetallic Ore Belt, and evaporate salt layers oxidation barrier in porphyry ore mineralization role has been revealed. Porphyrite iron deposits and Fe-S deposits commonly contain gypsum, and iron deposits, Fe-S deposits and gypsum deposits are paragenesis closely. In these deposits, the values of sulfide  $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$  are abnormally high, and the average values are higher than 5‰. Most of the values of gypsum  $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$  are about 20‰, which are similar to the value of marine sulfate. Sulfur isotopic composition of the deposits is closely related with the genesis types, with the reduced sulfur isotope value from ore magma type to ore magma-hydrothermal type to hydrothermal type. Such as the values of sulfide  $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$  are 10.8‰ from Gushan deposit, 7.85‰ from Meishan deposit and 5.01‰ from Washan deposit. The variation of sulfur isotopic composition of the deposits is mainly controlled by the sulfate reduced temperature and the proportion of original magma sulfur. The higher sulfate reduced temperature is, the higher sulfide  $\delta^{34}\text{S}$  value is. And the higher proportion percent of the original magma sulfur is the lower sulfide  $\delta^{34}\text{S}$  value. The calculate results obtained that most of sulfur is derived from sulfates in evaporate salt layers, and the proportion is approximately 60% ~ 80%. The reduction temperature is more than 450°C. The temperature of the sulfide precipitation was lower and relatively later. Thus, we infer that evaporate salt layers not just provide a large number of agents of mineralization for the sodium alteration, scapolitization and skarn alteration, like  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  and so on, but also course the  $\text{Fe}^{2+}$  transport as the complex (e. g. Na-Fe-Cl). On the other hand, the evaporate salt layer is the most important oxidation barrier in the depth crust, which could oxidize the  $\text{Fe}^{2+}$  into  $\text{Fe}^{3+}$  in the silicate magma and hydrothermal solution, and enrich the iron to be the iron deposit. It is a critical factor of the ore-forming of the porphyrite iron deposit. While the magma is assimilating evaporate salt layers ( $\text{CaSO}_4$ ),  $\text{SO}_4^{2-}$  oxidize  $\text{Fe}^{2+}$  into  $\text{Fe}^{3+}$  in the silicate melt, which prevent  $\text{Fe}^{2+}$  to enter the lattice silicate minerals, with forming  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Fe}_2\text{O}_3$  and poor iron silicate minerals like diopside, actinolite, tremolite and so on. The immiscibility occurs between iron oxide

\* 本文受国家“973”项目(2012CB416801)、公益行业科研专项项目(200911007、201011027、201211074)和安徽省国土资源科技项目(2012-K-30)联合资助。

第一作者简介: 李延河,男,1962年生,研究员,博士生导师,长期从事同位素地球化学研究,E-mail: lyh@cei.gov.cn

and silicate melt in magma chamber, by the effects of P, NaCl and volatile, forming the iron ore magma. The iron ore magma has strong viscous behavior, with short migration distance, penetrating along favorable structural parts, near the contact zone of intrusion and salt layers. It forms ore magma type or like-skarn type iron deposit like Gushan and Meishan deposits. Metallogenic hydrothermal has strong mobility, transporting in the form of iron complex, with long migration distance, concentrating and precipitating in the distal the contact zone of intrusion and salt layers, like the volcanic rocks covering the subvolcanic rocks. These two type iron deposits coexist in the porphyrite iron deposit family with a certain spatial zonation, forming the "double-metallogenic structure". In the contact zone of intrusion and salt layers, there might present the Daye ore magma-skarn iron deposit, with high grade and high reserve, and the scale may exceed the iron deposit occurred in the shallow part of subvolcanic rocks or volcanic rocks. And,  $\text{SO}_4^{2-}$  itself is reduced into  $\text{S}^{2-}$ , while it is oxidizing the  $\text{Fe}^{2+}$ , and  $\text{S}^{2-}$  combine with  $\text{Fe}^{2+}$  to form pyrite, in the top or side portion of the iron deposit. These are underlying reasons of paragenesis closely among iron deposits, Fe-S deposits and gypsum deposits.

**Key words** Porphyrite iron ores; Sulfate evaporate salt layers; Oxidation barrier; Iron ore magma;  $\delta^{34}\text{S}$ ; The Middle-Lower Yangtze area

**摘要** 长江中下游是我国著名的铁铜金等多金属成矿带,其中宁芜和庐枞盆地产出一系列与白垩纪中基性火山-次火山岩有关的玢岩铁矿床。前人根据玢岩铁矿的地质特征、空间分布规律及其与火山-次火山岩的关系建立了著名玢岩铁矿成矿模式,发展了成矿理论,有效指导了玢岩铁矿找矿工作。但三叠系膏盐层在成矿中的作用没有引起应有的重视,深部矿化基本没有涉及。最新研究和勘查结果揭示中下三叠统周冲村组顶部膏盐层与矿化关系密切,但膏盐层的控矿机理还不清楚,“膏盐层氧化障”在玢岩铁矿成矿中的作用鲜有报道,宁芜-庐枞盆地深部矿化类型和矿体赋存部位知之甚少。本文研究了长江中下游玢岩铁矿的硫同位素组成,探讨了膏盐层氧化障在玢岩铁矿成矿中的作用。宁芜和庐枞盆地玢岩铁矿、硫铁矿中普遍含有石膏,玢岩铁矿、硫铁矿和石膏矿三者密切共生。玢岩铁矿及伴生硫铁矿中黄铁矿的  $\delta^{34}\text{S}_{\text{V.CDT}}$  值异常高,平均值均在 5‰ 以上,石膏的  $\delta^{34}\text{S}_{\text{V.CDT}}$  值大部分位于 20‰ 左右,与海相硫酸盐的值相似,指示矿床中硫主要来自三叠纪膏盐层。矿床中黄铁矿的硫同位素组成与矿床成因类型密切相关。宁芜盆地姑山矿田的  $\delta^{34}\text{S}_{\text{V.CDT}}$  值最高,为 10.8‰,梅山矿田次之,为 7.85‰,凹山矿田最低,为 5.01‰;矿床成因类型也发生相应变化,矿浆型→矿浆-热液型→热液型。矿床中黄铁矿的硫同位素变化主要由硫酸盐的还原温度和原始岩浆硫所占比例不同引起,还原温度越高,  $\delta^{34}\text{S}$  值越高;原始岩浆硫所占比例越高,  $\delta^{34}\text{S}$  值越低。计算结果表明矿床中约 60%~80% 的硫来自膏盐层硫酸盐的还原,还原温度多在 450℃ 以上,但硫化物的沉淀温度相对较低,就位时间稍晚。提出膏盐层(富含碳酸盐、石膏和石盐等)不仅可以为成矿提供大量  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$  等矿化剂,使围岩发生钠长石化、方柱石化(氯化)和矽卡岩化等蚀变,使  $\text{Fe}^{2+}$  以  $\text{NaFeCl}_3$  等络合物形式搬运,膏盐层还是地壳深处最重要的氧化障,能够将硅酸盐熔体和成矿溶液中的  $\text{Fe}^{2+}$  氧化成  $\text{Fe}^{3+}$ ,富集形成铁矿床,是玢岩铁矿成矿的关键因素。当炽热的岩浆与膏盐层( $\text{CaSO}_4$ )发生同化混染时,  $\text{SO}_4^{2-}$  将硅酸盐熔体中的  $\text{Fe}^{2+}$  氧化成  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  无法进入硅酸盐矿物晶格之中,而形成铁氧化物  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Fe}_2\text{O}_3$  和贫铁的硅酸盐矿物透辉石/阳起石、透闪石等。铁氧化物在磷、水和氯化钠等盐类物质的作用下在岩浆房中与硅酸盐熔体发生液态不混溶,熔离形成铁矿浆。铁矿浆粘滞性强,迁移距离不远,在岩体与膏盐层的接触带附近,沿构造有利部位贯入,形成姑山、梅山等矿浆型铁矿床。以铁的络合物形式搬运的成矿热液流动性强,迁移距离远,可以在远离岩体与膏盐层接触带部位、在上部白垩纪火山岩中富集沉淀。长江中下游玢岩铁矿中矿浆充填型和热液交代-充填型矿体同时存在,二者在空间上具有明显的分带,具“双层成矿结构”。在盆地深部岩体与膏盐层的接触部位产出“大冶式”矿浆充填-接触交代型富铁矿床,规模可能超过了赋存于浅部火山-次火山中的狭义“玢岩铁矿”。位于宁芜盆地南北两端的姑山和梅山矿田是找寻“大冶式”矿浆充填-接触交代型富铁矿的有利地段。在  $\text{SO}_4^{2-}$  氧化  $\text{Fe}^{2+}$  的同时自身被还原为  $\text{S}^{2-}$ ,  $\text{S}^{2-}$  与  $\text{Fe}^{2+}$  结合形成硫铁矿,在铁矿的上部或边部富集形成硫铁矿矿床;这是石膏矿、铁矿和硫铁矿密切共生的根本原因。

**关键词** 玢岩铁矿;膏盐层;氧化障;铁矿浆;硫同位素;长江中下游

**中图法分类号** P611; P618.31

长江中下游是我国著名的多金属成矿带,发育一系列大中型铁铜金矿床。其中宁芜和庐枞中生代火山岩盆地产出一系列与白垩纪中基性火山-次火山岩有关的玢岩铁矿床。宁芜研究项目编写小组(1978)根据矿床产出位置、矿化类型和矿石岩石矿物组合将宁芜玢岩铁矿分为三类八式:产于火山岩中的铁矿床为龙旗山式、竹园山式、龙虎山式;产于次火山岩体(辉石闪长玢岩)及其附近火山岩层中的铁矿床为梅山式、凹山式、陶村式;产于次火山岩体与前火山岩系沉积岩接触带中的铁矿为凤凰山式、姑山式。建立了著名玢岩铁矿成矿模式,发展了成矿理论,有效指导了玢岩铁矿找矿工作。在此基础上,人们又对长江中下游玢岩铁矿形成的地质背

景、成矿时代、成矿流体演化、矿床的空间分布规律和不同矿床类型之间的成因联系等开展了大量深入系统的研究(李秉伦和谢奕汉,1984;常印佛等,1991;胡文瑄等,1991;翟裕生等,1992;丁毅,1992;周涛发等,2008,2011;董树文等,2010;范裕等,2008;段超等,2011,2012;侯可军和袁顺达,2010),取得一系列重要成果,丰富和发展了玢岩铁矿成矿理论,深部找矿取得重大突破。大量地质事实表明长江中下游玢岩铁矿与三叠系膏盐层(含石膏、石盐和碳酸盐的蒸发沉积地层)关系密切,但以前没有引起应有的重视,现在虽然认识到膏盐层在玢岩铁矿成矿作用中的重要性,但膏盐层的控矿机理还不清楚,“膏盐层氧化障”在玢岩铁矿成矿中的作用国

内外鲜有报道; 是否存在矿浆型铁矿体及其形成机制, 国内外都存在激烈地争论(翟裕生等, 1982; 林新多, 1984; 赵永鑫, 1993; Meinert *et al.*, 2005; Barton and Johnson, 1996; Frutos and Oyarzun, 1975; Henriquez *et al.*, 2003; Haller and Fontbote, 2009)。玢岩铁矿成矿模式反映的主要是浅层矿化, 深部矿化基本没有涉及。虽然宁芜-庐枞盆地深部找矿工作取得重大进展, 但对深部矿体的赋存部位、矿化类型和控矿因素知之甚少(高道明和赵云佳, 2008; 林刚和许德如, 2010; 杜建国和常丹燕, 2011; 周涛发等, 2011)。本文展示了三叠纪膏盐层与玢岩铁矿的空间关系和二者存在成因联系的地质和硫同位素证据, 揭示了膏盐层氧化障的控矿机理和铁矿浆的形成过程, 探讨了长江中下游玢岩铁矿的“双层成矿结构”及深部矿体的赋存部位和矿化形式。

## 1 长江中下游玢岩铁矿的主要类型和地质特征

长江中下游多金属成矿带位于扬子板块北缘, 华北板块和秦岭-大别造山带南侧。在早白垩世 135Ma 后, 长江中下游区域构造体制发生了重大转变, 进入太平洋构造体制, 主构造线方向由近 EW 转换为 NE-NNE。太平洋板块斜向俯

冲、岩石圈拆沉、软流圈上涌加剧, 区域伸展作用加强。这种后期构造叠加在早期基底之上, 在区内形成众多隆起区和继承性断陷盆地, 并爆发大规模火山岩浆活动和成矿作用, 形成了一系列大中型玢岩型、斑岩型、矽卡岩型和热液型 Fe-Cu-Au-Mo-Pb-Zn 等矿床(常印佛等, 1991; 翟裕生等, 1992; 董树文等, 2010; 周涛发等, 2008; Mao *et al.*, 2011)(图 1)。玢岩铁矿主要分布在侏罗纪-白垩纪陆相断陷火山沉积盆地之中, 从西到东依次为怀宁-庐枞-滁州-繁昌-宁芜-溧水-溧阳盆地。宁芜和庐枞火山岩盆地是其典型代表, 火山盆地规模大, 铁矿最为发育。下面以宁芜火山盆地及赋存的玢岩铁矿为例, 做一简要介绍。

宁芜火山盆地以方山-小丹山断裂, 长江断裂带, 芜湖断裂和南京-湖熟断裂为边界, 从南京至芜湖呈 NE-SW 向展布, 长约 60km, 宽约 20km, 总面积 1200km<sup>2</sup>, 中生代火山岩和玢岩铁矿床广泛发育。该盆地从下至上分为三个构造层: 下部构造层由前火山岩系的地层组成, 构成了盆地的“基底”, 中部构造层由火山岩系组成, 上部构造层由火山岩系之后的地层组成(宁芜研究项目编写小组, 1978)。宁芜盆地基底地层主要有三叠纪上青龙组(T<sub>1s</sub>)海相碳酸盐建造, 周冲村组(T<sub>2z</sub>)白云质灰岩、膏岩层和泥质灰岩, 黄马青组(T<sub>2h</sub>)紫红色钙质粉砂岩、粉砂质页岩和页岩; 侏罗纪象山群(J<sub>1-2x</sub>)陆

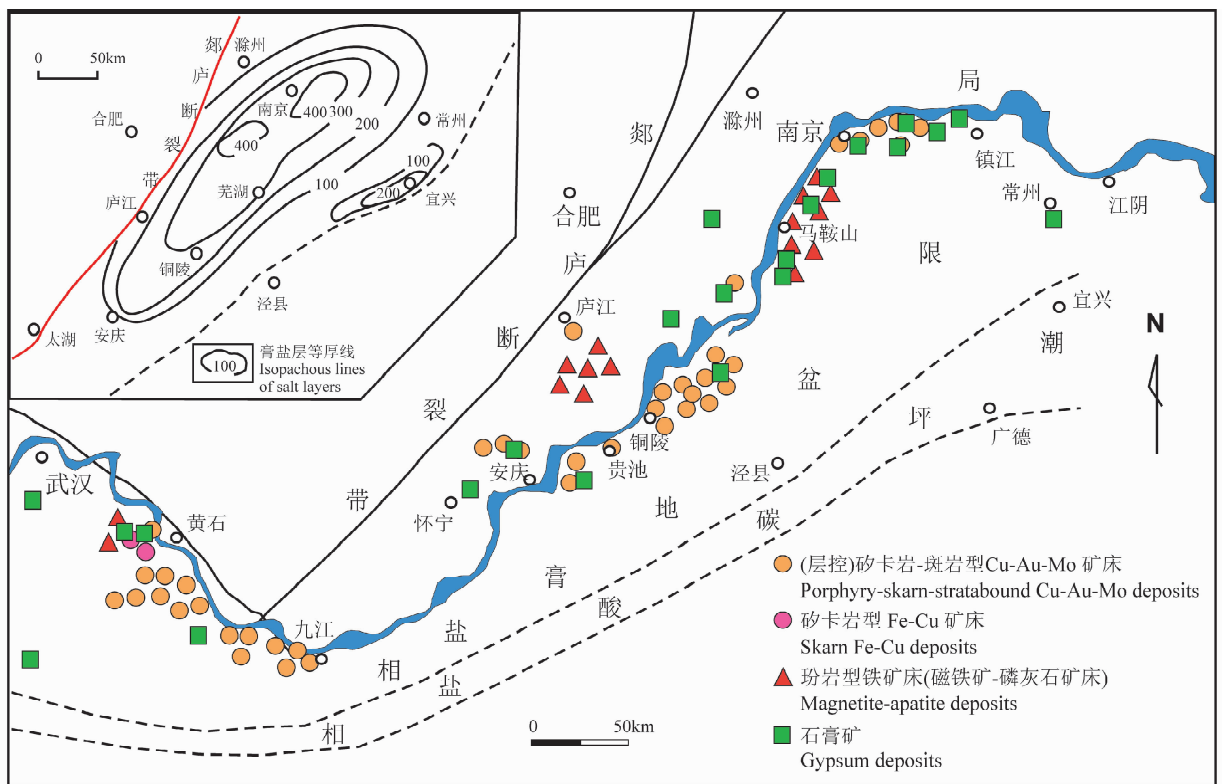


图 1 长江中下游多金属成矿带与三叠纪岩相古地理及膏盐层分布(据王文斌等, 1994; 范洪源等, 1995; 毕仲其和丁保良, 1997; 侯增谦等, 2004 略修改)

Fig. 1 Map of Triassic lithofacies-paleogeography, showing the distribution of anhydrous sequences and related mineral deposits in the Middle-Lower Yangtze area (modified after Wang *et al.*, 1994; Fan *et al.*, 1995; Bi and Ding, 1997; Hou *et al.*, 2004)

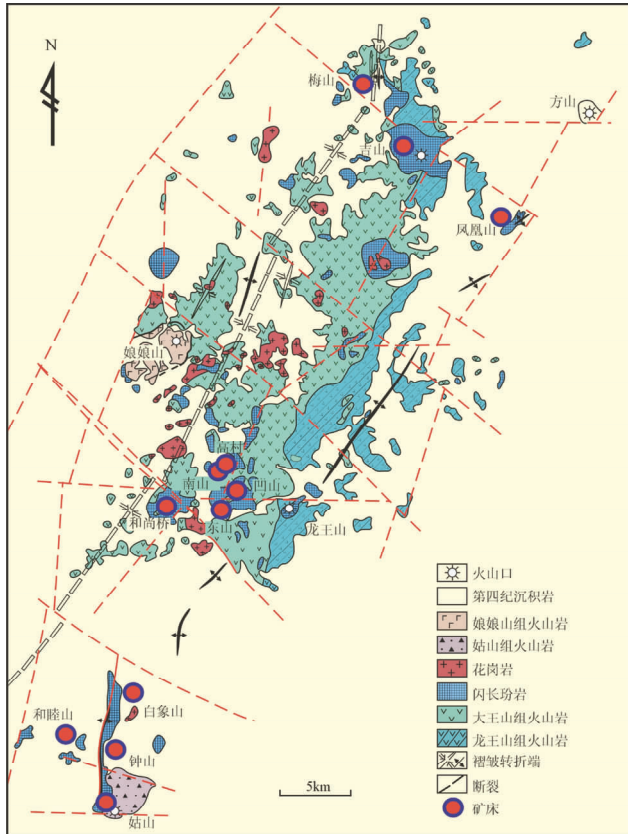


图2 宁芜盆地岩浆岩及矿产分布地质图(据宁芜研究项目编写小组,1978)

Fig.2 Geological map with the distribution of deposits of Ningwu ore district(after Ningwu Research Group, 1978)

相碎屑岩建造,西横山组( $J_3x$ )类磨拉石建造;白垩纪早期火山岩-次火山岩在盆地中广泛发育;此后浦口组( $K_2p$ )砂岩、砾岩,赤山组( $K_2c$ )细砂岩、粉砂岩以及第三纪砂砾岩覆盖于火山岩之上(宁芜研究项目编写小组,1978;胡文瑄,1991;翟裕生等,1992;唐永成等,1998)。盆地中白垩纪火山岩被划分为四个火山喷发喷溢旋回,从早到晚依次为龙王山组、大王山组、姑山组和娘娘山组,各火山岩旋回以爆发相开始,此后溢流相增多,最后以火山沉积相结束。在大王山组火山活动之后,火山喷发活动变弱,岩浆侵入活动增强,广泛发育与铁矿床形成关系密切的辉石闪长岩-辉石闪长玢岩。矿体往往围绕着一个火山-侵入活动中心分布。

宁芜盆地内4组火山岩的锆石 U-Pb 年龄分别为:龙王山组  $134.8 \pm 1.8\text{Ma}$ ;大王山组  $132.2 \pm 1.6\text{Ma}$ 、 $130.3 \pm 0.9\text{Ma}$ ;姑山组  $129.5 \pm 0.8\text{Ma}$ 、 $128.2 \pm 1.3\text{Ma}$ 、 $128.5 \pm 1.8\text{Ma}$ ;娘娘山组  $126.8 \pm 0.6\text{Ma}$ (周涛发等,2011;侯可军和袁顺达,2010)。含矿辉石闪长玢岩的锆石 U-Pb 年龄集中分布在  $128 \sim 132\text{Ma}$  之间(侯可军和袁顺达,2010;范裕等,2008,2010;段超等,2011)。矿后花岗闪长斑岩的锆石 U-Pb 年龄为  $126 \sim 128\text{Ma}$ (侯可军和袁顺达,2010;段超等,2011;Duan *et al.*, 2012)。宁芜玢岩铁矿的成矿年龄为  $\sim 130\text{Ma}$ ,

多形成于大王山组火山岩旋回晚期。

宁芜火山盆地玢岩铁矿分为三个矿田,从北至南依次是:梅山矿田、凹山矿田和钟姑矿田。典型矿床有梅山、凹山、高村(陶村)、南山、东山、和尚桥、姑山、钟山、和睦山、白象山、杨庄铁矿床等(图2)。铁矿床主要赋存于辉石闪长玢岩岩体隆起部位与火山岩接触带附近的辉石闪长玢岩岩体之中。铁矿床以透辉石(阳起石)-磷灰石-磁铁矿三矿物组合为特色,普遍含有石膏,富磷、钒和钛。矿床围岩蚀变强烈,以钠化(钠长石化)、钾化(钾长石化)、氯化(钠柱石、方柱石)和石膏化、黄铁矿化为特色。围岩蚀变具有明显的分带,从下而上相应的可分为三个带:下部浅色蚀变带,分布在岩体之中,主要由早期蚀变产物透辉石、钠长石、钾长石构成;中部深色蚀变带分布在岩体上部至接触带附近的安山质

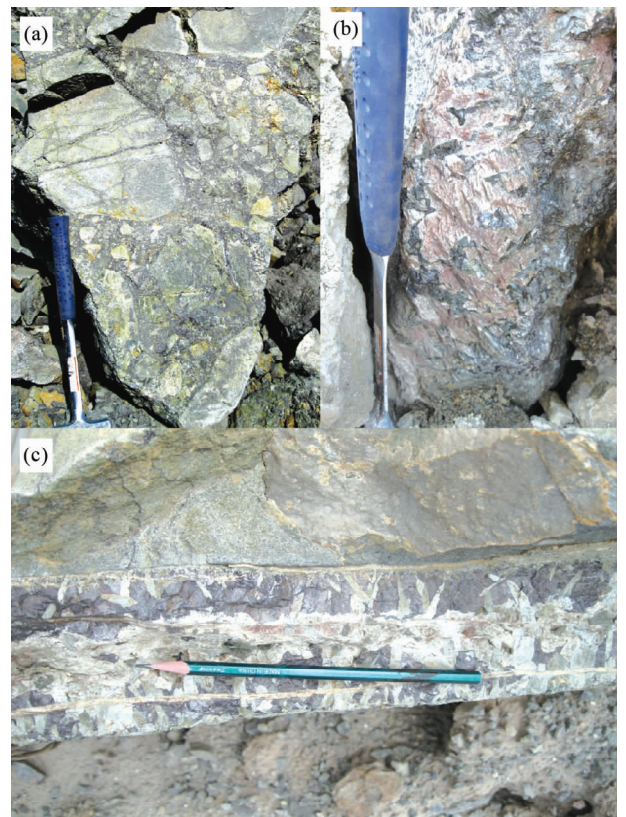


图3 宁芜凹山矿田玢岩铁矿的主要矿石类型

(a)-凹山矿床角砾状矿石,角砾为含浸染状磁铁矿的辉石闪长玢岩,胶结物为磁铁矿;(b)-凹山矿床伟晶状磷灰石-磁铁矿-阳起石矿石;(c)-高村矿床磁铁矿-阳起石-磷灰石矿脉穿切早期浸染状矿石

Fig.3 Photos of main ore types of Washan ore field in Ningwu ore district

(a)-breccia ore from Washan deposit. The breccia is pyroxene diorite porphyrite with disseminated magnetite, and binding material is mainly magnetite; (b)-pegmatitic magnetite-catinolite-apatite vein from Washan deposit; (c)-magnetite-catinolite-apatite vein cut earlier disseminated magnetite ore

火山岩中,主要由早期的石榴子石、透辉石、磁铁矿、石膏及中期叠加的绿泥石、绿帘石等组成;上部浅色蚀变带分布于接触带之上的安山质火山岩中,主要发育有黄铁矿化、硅化、石膏化和泥化等(宁芜项目研究编写小组,1978)。矿石矿物主要有磁铁矿、赤铁矿、菱铁矿和黄铁矿,脉石矿物主要有透辉石、阳起石、磷灰石、石膏、绿泥石、绿帘石、石榴石、钠长石、钾长石、方柱石和石英、方解石、高岭石等组成。矿石结构构造以浸染状、块状、角砾状、脉状和伟晶状为主(图3)。不同种类的矿石之间穿切关系明显,由早到晚分别为浸染状/块状矿石→角砾状矿石→网脉状矿石→伟晶状矿石。浸染状矿石主要分布于凹山矿田,位于矿体的下部,磁铁矿呈浸染状发育于辉石闪长玢岩中;块状矿石主要分布姑山和梅山矿田,磁铁矿/赤铁矿粒度细,气孔状构造发育;角砾状矿石多分布于矿体的边部,磁铁矿胶结辉石闪长玢岩或含浸染状磁铁矿矿石,角砾多发育绿泥石化、阳起石化和钠长石化;粗粒脉状磁铁矿矿石分布于矿体的中部,矿物组合主要为阳起石-磁铁矿-磷灰石,阳起石含量较多,呈纤维状集合体,磁铁矿呈中-粗粒自形晶,磷灰石含量较少,脉体围岩多发育钠长石化;伟晶状磁铁矿矿石分布于矿体的上部,矿物组合主要为磷灰石-磁铁矿-(阳起石),磷灰石与磁铁矿含量多达70%~90%,呈伟晶状,自形-半自形,阳起石含量较少。在近地表氧化带中,磁铁矿多被氧化为赤铁矿。后期发育有黄铁矿、赤铁矿、菱铁矿、镜铁矿、石英脉、方解石脉等。

宁芜玢岩铁矿矿化类型复杂多样,既有铁矿浆贯入式,也有热液交代-充填式(宁芜项目研究编写小组,1978;李秉伦和谢奕汉,1984;宋学信等,1981;Hou *et al.*, 2010,

2011)。矿浆贯入式矿体以赤铁矿为主,矿石品位特富,块状、气孔状和角砾状构造发育,多数与围岩界线截然。矿化类型与基底地层的埋深具有明显的相关性。位于宁芜盆地南段的姑山矿田基底地层埋藏最浅,区内见有上青龙组和黄马青组地层出露,姑山矿床主体为矿浆型;位于宁芜盆地北段的梅山矿田基底地层埋藏也比较浅,在凤凰山地区也见有上青龙组地层出露,梅山矿床则既有矿浆型矿体,也有热液交代-充填型矿体,二者密切共生;凹山矿田位于宁芜盆地的中部,火山岩系厚度巨大,矿床则以热液交代-充填型为主。区内玢岩铁矿的类型虽然不同,但成矿阶段和成矿过程非常相似,可以相互对比。

庐枞盆地岩浆火山侵入活动、成矿作用和形成时代与宁芜盆地非常相似(周涛发等,2010,2008,2011;Zhou *et al.*, 2007;范裕等,2008,2012;吴明安等,2011;董树文等,2010)。比较而言,庐枞盆地铁矿体的埋藏较深,矿床中硫化物和石膏硫酸盐含量较高,发育独特的透辉石-石膏-磁铁矿(膏辉岩)和石榴石-石膏-磁铁矿组合,有些地段则形成了独立的硫铁矿和石膏矿矿体(图4、图5)。庐枞盆地的典型玢岩铁硫矿床有罗河、泥河、杨山、龙桥和大鲍庄。

## 2 膏盐层与玢岩铁矿的关系

膏盐层是指富含石膏/硬石膏和石盐的蒸发岩地层;岩性通常为含石膏的白云岩、白云质灰岩或含石膏的灰岩,有些地段则形成石膏矿,常见石盐假晶。长江中下游地区膏盐层属于中下三叠统,相当于鄂东的嘉陵江组、安徽的马鞍山

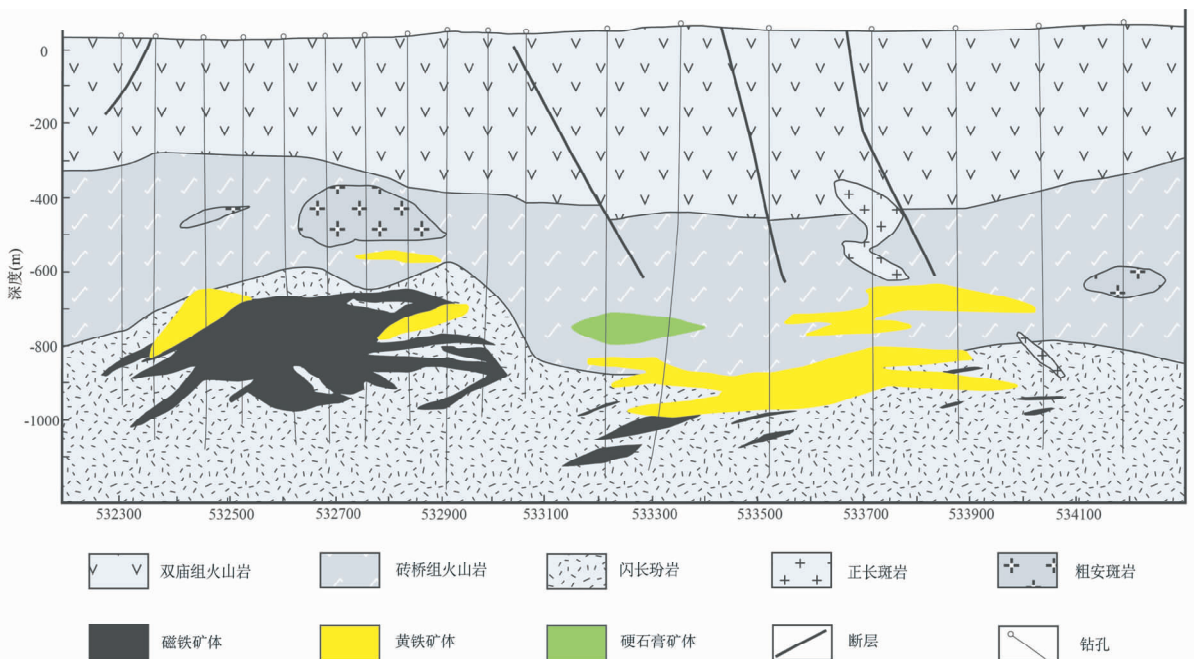


图4 庐枞盆地泥河铁矿I纵剖面图(据范裕等,2012修改)

Fig.4 Number I geological longitudinal section map of Nihe deposit in Luzong basin (after Fan *et al.*, 2012)

表1 宁芜和庐枞盆地玢岩铁矿、硫铁矿的硫同位素组成

Table 1 Sulfur isotopic compositions of porphyrite iron ore and pyrite ore from Ningwu and Luzong basin, China

矿田/矿床	黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ (‰)		石膏 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ (‰)		$\Delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4^{2-}-\text{s}_2}$ (‰)	还原温度 (°C)	数据来源
	变化范围	平均	变化范围	平均			
凹山矿田							
东山	2.4~6.7	5.0 (12)					本文
高村	4.9~9.5	6.6 (12)					本文
凹山	1.4~7.2	4.2 (14)					本文
凹山	2.0~2.4	2.2 (3)					
莺子山	2.5~2.6	2.6 (2)					熊先孝和姚超美, 2000
马山	7.4~10.1	8.9 (3)					
向山	-2.1~9.5	3.0 (17)	6.2~24.3	17.9 (9)	14.9	442	胡文瑄等,1991; 熊先孝和姚超美,2000
梅山矿田							
梅山	1.6~14.3	7.3 (20)	18.5~23.3	20.9 (7)	13.6	475	本文
云台山	10.4~12.6	11.8 (3)					殷友东等,1996
姑山矿田							
姑山矿田	-2.5~22.8	10.8 (81)	18.6~23.4	21.2	10.4	582	中国科学院地球 化学研究所,1987
夏家庄							
夏家庄	2.7~14.3	6.3 (4)	21.1~31.0	25.2(11)	18.9	362	本文
罗河							
泥河	-8.4~9.8	4.2	16.1~23.7	18.4	14.2	459	储雪蕾等,1984; 黄清涛和尹恭沛,1989
罗河	-9.3~10.4	5.2	14.1~24.4	18.3	13.1	490	储雪蕾等,1984; 黄清涛和尹恭沛,1989

注:还原温度按下式计算,  $10^3 \ln \alpha_{\text{硫酸盐-黄铁矿}} = 2.76^2 \times 10^6 / T^2 \pm 1$  (Ohmoto and Rye, 1979); 括号中数字为样品数

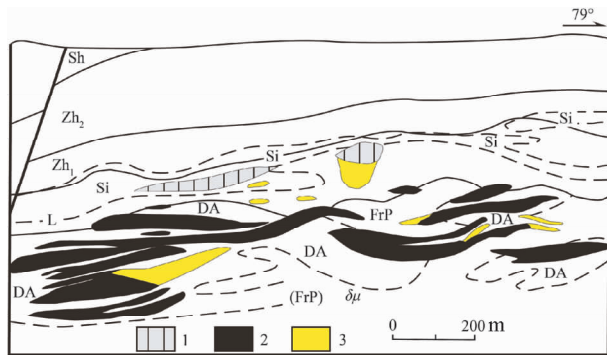


图5 罗河铁、硫矿床 I 线纵剖面图 (据胡文瑄和徐克勤,1992)

1-硬石膏矿; 2-铁矿; 3-硫铁矿; Sh-双庙组火山岩; Zh1-2-砖桥组各岩性段火山岩; L-龙门院组火山岩; DA-硬石膏透辉石岩(膏辉岩); FrP-碱性长石蚀变岩; Si-硅质岩或/和硅化岩;  $\delta\mu$ -辉石粗安玢岩

Fig.5 Number I Geological longitudinal section map of Luohe deposit in Luzong basin (after Hu and Xu, 1992)

1-anhydrite ore body; 2-iron ore body; 3-pyrite ore body; Sh-Shuangmiao Formation; Zh1-2-Zhuangqian Formation; L-Longmenyuan Formation; DA-diopside-anhydrite; FrP-alkali feldspar alteration; Si-silicification;  $\delta\mu$ -diorite porphyrite

组和江苏的周冲村组,分布范围从鄂东经皖南到苏南,绵延500km,发育陶厂等大中型层状石膏/硬石膏矿床(点)30余处,石膏矿层厚度由数十米到数百米(蔡本俊,1980;范洪源等,1995;侯增谦等,2004)。长江中下游玢岩铁矿与三叠纪膏盐层关系密切,三叠纪蒸发盆地膏盐层分布与玢岩铁矿分布空间上完全一致(图1)。玢岩铁矿中普遍含有石膏,在有些矿床和地段石膏富集形成独立的石膏矿。玢岩铁矿-石膏矿-硫铁矿空间上紧密共生(图4、图5、图6),这既是长江中下游玢岩铁矿的一大特色,也是重要找矿标志。

长江中下游玢岩铁矿中钠化、钾化、钙化(透辉石化、透闪石化、阳起石化)和氯化(方柱石化、钠柱石化)、石膏化、碳酸盐岩化、黄铁矿化等普遍发育、规模大。在庐枞罗河、泥河铁矿和宁芜太山铁矿则形成了独特的膏辉岩(石膏-透辉石)组合,是辉石闪长玢岩岩浆与膏盐层高温反应的最好证据。岩浆岩和蚀变岩石中大量增加的碱金属(Na、K)、碱土金属(Ca、Mg)和矿化剂(Cl、F、CO<sub>2</sub>、SO<sub>4</sub>)等正是膏盐层的主要成分。这些碱金属和卤素元素是铁离子迁移搬运的重要络合剂,与铁矿化关系密切。

### 3 膏盐层控矿的硫同位素证据

玢岩铁矿中普遍存在石膏等硫酸盐矿物。在硫酸盐-硫

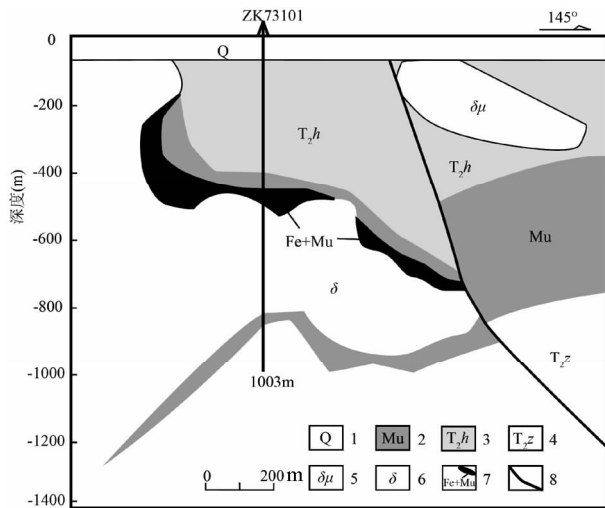


图6 宁芜盆地姑山南部73101线地质剖面图(据林刚和许德如,2010)

1-第四系;2-膏盐层;3-黄马青组;4-周冲村组;5-闪长玢岩;6-闪长岩;7-铁矿体+石膏;8-断裂

Fig. 6 Geological sections map of 73101 line in the south of Gushan deposit (after Lin and Xu, 2010)

1-Quaternary; 2-salt layers; 3-Huangmaqing Formation; 4-Zhoucongkun Formation; 5-diorite porphyrite; 6-diorite; 7-iron ore body + gypsum; 8-fault

化物体系中,硫酸盐强烈富集 $^{34}\text{S}$ ,硫化物刚好相反。如果矿床中的硫主要来自深源岩浆, $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S V-CDT}} \approx 0$ ,根据质量平衡,在硫酸盐和磁铁矿/赤铁矿普遍存在的情况下,硫化物的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 应为很低的负值(Ohmoto and Rye, 1979)。我们分析统计了长江中下游玢岩铁矿中硫化物和石膏的硫同位素组成,结果列于表1,示于图7、图8、图9。由图表可以看出,宁芜玢岩铁矿及伴生硫铁矿中黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值普遍较高,平均值均在5‰以上,姑山矿田达到10‰以上,远高于幔源硫的分布范围。在已知的成矿条件下,幔源岩浆硫( $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S V-CDT}} \approx 0$ )无论如何都不可能演化出如此高的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值。矿床中石膏的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值大部分分布在20‰左右,与三叠纪海相硫酸盐及区内周冲村组膏盐层中硬石膏的硫同位素组成(28.0‰~28.2‰)(储雪蕾等,1986)相似,说明玢岩铁矿和硫铁矿中的硫主要来自区内中下三叠统膏盐层,而不是来自原始岩浆。玢岩铁矿中硫化物的硫同位素组成主要取决于原始岩浆硫和膏盐层硫所占比例及膏盐层硫酸盐的还原温度和成矿系统的氧逸度。在矿床中石膏普遍存在、铁矿-石膏矿密切共生的条件下,矿床中硫化物的硫同位素组成则主要取决于原始岩浆硫和膏盐层硫所占比例及膏盐层硫酸盐的还原温度,膏盐层硫所占比例和硫酸盐的还原温度越高,硫化物的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值越高;反之原始岩浆硫所占比例越高,硫酸盐的还原温度越低,硫化物的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值也越低。

庐枞盆地罗河和泥河玢岩铁矿中黄铁矿的硫同位素变化范围较大,磁铁矿阶段黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值明显高于硫化

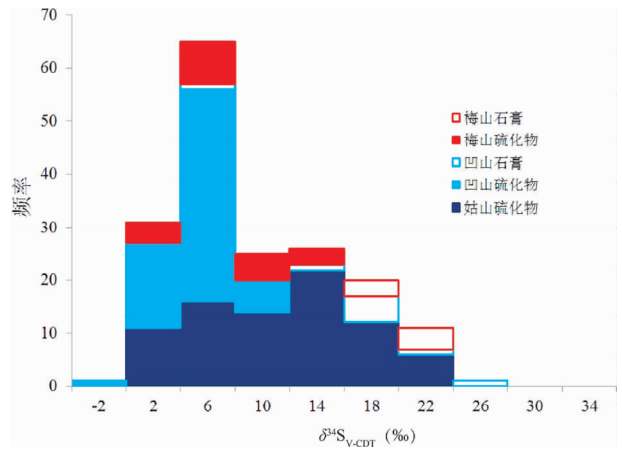


图7 宁芜玢岩铁矿和硫铁矿的硫同位素组成

Fig. 7 Sulfur isotope characteristics of iron ore in Ningwu basin

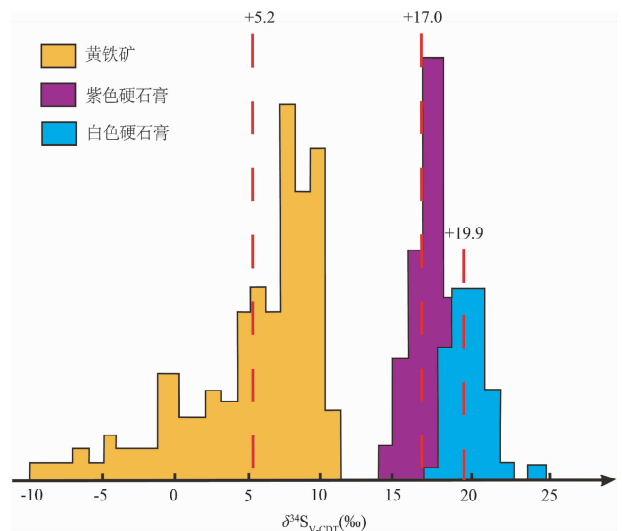


图8 庐枞盆地罗河铁矿黄铁矿和石膏的硫同位素组成(据储雪蕾等,1984;黄清涛和尹恭沛,1989)

Fig. 8 Sulfur isotope characteristics of Luohe deposit in Luzong (after Chu, 1984; Huang and Yin, 1989)

物阶段黄铁矿的值。罗河铁矿中黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值自下而上逐渐降低,硬石膏的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值随深度变化不明显(储雪蕾等,1984,黄清涛和尹恭沛,1989)(图9),说明成矿溶液中硫酸盐硫占绝对优势,硫酸盐的硫同位素组成基本代表了成矿热液中总硫的硫同位素组成,黄铁矿的硫同位素组成主要取决于硫酸盐-黄铁矿之间的硫同位素分馏( $\Delta^{34}\text{S}$ ),也就是硫酸盐-黄铁矿的平衡温度。从下至上,成矿温度逐渐降低,二者之间的硫同位素分馏不断增大,在 $\text{SO}_4^{2-}$ 占绝对优势的含硫热液成矿系统,黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值则随着温度的降低而不断减少,而硫酸盐的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值则基本保持不变。假设原始岩浆硫的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值为0‰,三叠纪膏盐层的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值为

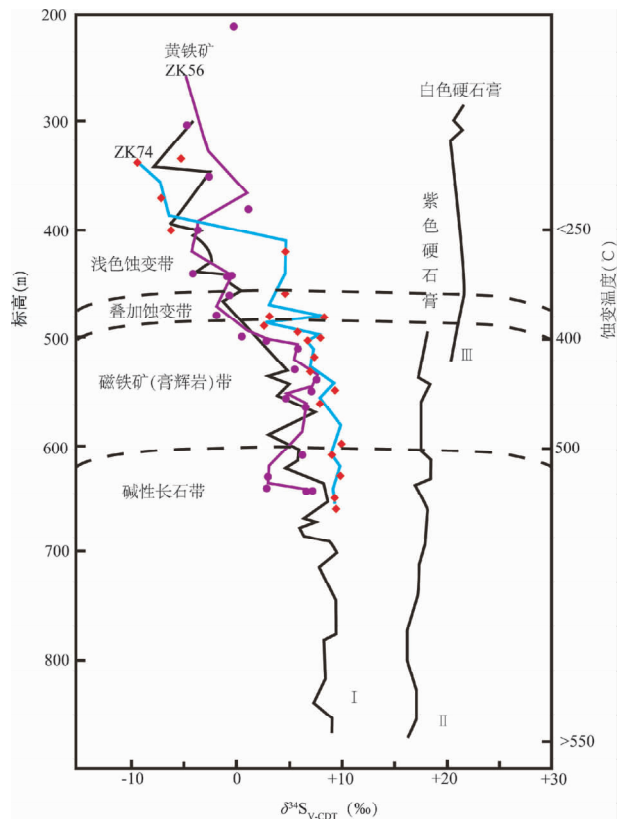


图9 庐枞罗河铁矿黄铁矿和石膏的硫同位素组成随深度的变化(据储雪蕾等,1984;黄清涛和尹恭沛,1989)

Fig.9 Variation of sulfur isotope characteristics with depth in Luohe deposit in Luzong (after Chu, 1984; Huang and Yin, 1984)

28‰(储雪蕾等,1986),矿床中石膏的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值代表成矿热液中总硫的硫同位素组成,则可以根据矿床中石膏和膏盐层的硫同位素组成,利用二元混合模式估算矿床中膏盐层硫所占的比例。计算结果表明矿床中60%~80%的硫来自周冲村组膏盐层。若以20‰代表膏盐层的硫同位素组成,计算出的膏盐层硫所占比例更高。

统计结果显示矿床中黄铁矿的硫同位素组成与矿床成因类型密切相关。宁芜盆地姑山矿田黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值最高,为10.8‰,梅山矿田次之,为7.85‰,凹山矿田最低,为5.01‰(图7);矿床成因类型也发生了相应变化,矿浆型→矿浆-热液型→热液型。根据黄铁矿与硫酸盐的硫同位素平均值计算出的硫酸盐的平均还原温度450~580℃(表1),姑山>梅山>凹山。储雪蕾等(1984)计算出的罗河铁矿浅色蚀变带的硫同位素地质温度为240~340℃,与其他方法获得温度基本一致,深色蚀变带的硫同位素温度异常高,534~961℃,大部分在600℃以上,明显高于其他方法获得的温度(表2),因而认为深色蚀变带中硫酸盐-硫化物之间没有达到硫同位素平衡。实际上该温度可能真实地反映了硫酸盐的最低还原温度,表明硫酸盐的还原主要是在岩浆与膏盐层的

表2 庐枞罗河铁矿硫同位素地质温度计算结果与其他测温结果的对比

Table 2 A contrast of temperature between calculated by sulfur isotope thermometry and other methods, Luohe iron deposit in Luzong ore district

蚀变带	硫同位素温度(℃)	其他温度(℃)	资料来源
浅色蚀变带	243~343	200~350	
深色蚀变带	534~741	350~480	储雪蕾等, 1984
磁铁矿体	544~741	350~480	
膏辉岩带	534~748	350~500	
辉石碱性长石岩带	544~961	400~600	

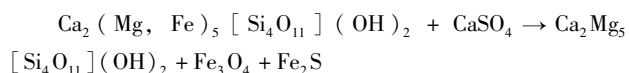
同化混染过程中发生的,只是深色蚀变带中硫化物的沉淀就位时间稍晚,沉淀温度较低,硫酸盐-硫化物之间尚未达到新的硫同位素平衡。

## 4 讨论

铁在硅酸盐熔体、矿物和水溶液中主要以 $\text{Fe}^{2+}$ 存在,在成矿溶液中以 $\text{Na-Fe-Cl}_3$ 等络合物的形式搬运(刘玉山等,1981;Chou and Eugster, 1977; Zhang *et al.*, 2014; 张招崇等, 2014)。在铁矿中则主要以 $\text{Fe}^{3+}$ ( $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Fe}_2\text{O}_3$ )形式存在(菱铁矿除外)。因此铁矿的形成不仅需要丰富的Fe成矿物质, $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 等矿化剂,同时需要将 $\text{Fe}^{2+}$ 氧化成 $\text{Fe}^{3+}$ 。膏盐层富含 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 和 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 等组分,不仅可以为铁矿化提供上述矿化剂,使成矿物质活化迁移;膏盐层还是地壳深部最重要的氧化障,使熔体和热液中 $\text{Fe}^{2+}$ 氧化富集沉淀,这可能是玢岩铁矿与膏盐层关系密切的根本原因。关于膏盐层为铁矿提供矿化剂的作用,国内外已有很多专家学者开展过研究(蔡本俊, 1980; Barton and Johnson, 1996; Sillitoe, 2003),但膏盐层氧化障在铁矿成矿中作用国内外鲜有报道(李延河等,2013)。

### 4.1 岩浆熔体的氧化

铁在硅酸盐熔体中主要以 $\text{Fe}^{2+}$ 形式存在。在地壳深部岩浆房中炽热岩浆与膏盐 $\text{CaSO}_4$ 发生同化混染时, $\text{SO}_4^{2-}$ 将硅酸盐熔体中的 $\text{Fe}^{2+}$ 氧化成 $\text{Fe}^{3+}$ , $\text{Fe}^{3+}$ 无法进入硅酸盐矿物晶格之中,而形成 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,导致熔体中 $\text{Fe}^{2+}$ 含量降低,使本应形成的铁辉石转化为透辉石、铁闪石则转变为透闪石等贫铁矿物; $\text{SO}_4^{2-}$ 被首先还原为 $\text{SO}_2$ , $\text{SO}_2$ 是气体氧化剂,可以快速扩散进入熔体; $\text{SO}_2$ 进一步氧化 $\text{Fe}^{2+}$ 形成 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , $\text{SO}_2$ 最终被还原形成 $\text{H}_2\text{S}/\text{FeS}_2$ 。宁芜和庐枞地区广泛发育的透辉石/阳起石化和膏辉岩化等很好地证明了这一点。基本反应形式如下:





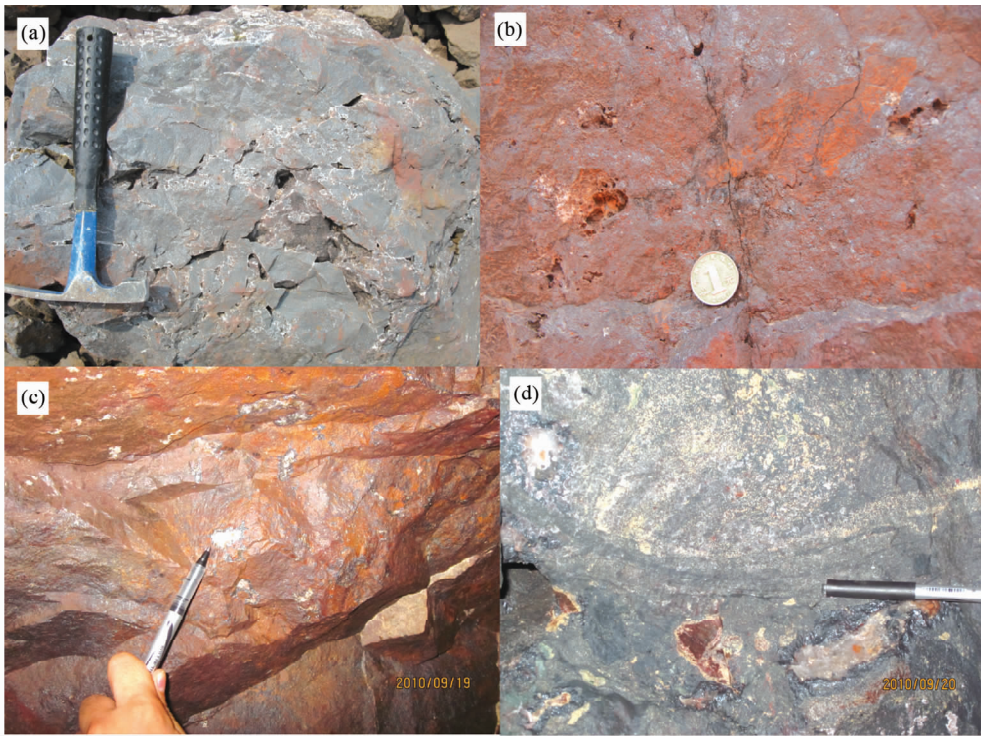


图 10 宁芜姑山和梅山铁矿的主要矿石类型

(a)-姑山矿床含气孔的块状赤铁矿矿石;(b)-梅山矿床含气孔的块状赤铁矿矿石;(c)-梅山矿床含气孔的块状赤铁矿矿石,气孔壁为镜铁矿,内部充填物为石英和方解石;(d)-梅山矿床含气孔的块状磁铁矿矿石

Fig. 10 Photos of main ore types of Gushan and Meishan deposits in Ningwu ore district

(a)-massive hematite ore containing gas cavities from Gushan deposit; (b)-massive hematite ore containing gas cavities from Meishan deposit; (c)-massive hematite ore containing gas cavities from Meishan deposit, and specularite occurred on the wall of cavities with quartz and calcite filling internal; (d)-massive magnetite ore containing gas cavities from Meishan deposit

岩浆熔体中的铁氧化物在磷、水和 NaCl 等盐类物质作用下,在岩浆房中与硅酸盐熔体发生液态不混熔,熔离形成铁岩浆,在构造有利部位充填形成矿浆型铁矿床。岩浆熔离/分异形成铁岩浆的作用过程并非专属于基性-超基性岩浆作用,中酸性岩浆熔离/分异作用也可形成铁岩浆。Philpotts(1967)所做的闪长岩-磁铁矿-磷灰石系统的熔离实验证实了这一点。苏良赫(1984)所做的  $\text{FeO}-\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}-\text{NaAlSi}_3\text{O}_8-\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$  实验、袁家铮(1990)所做的方铁矿-磷灰石-透辉石-霞石四元系实验和喻学惠(1984)所做的  $\text{FeO}-\text{CaMgSi}_2\text{O}_6-\text{KMg}_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})\text{F}_2$  实验,均证明了中-酸性岩浆在磷等挥发分的参与下可以熔离出铁岩浆。磷的参与是岩浆发生液态不混溶形成铁岩浆的重要因素,但不是唯一因素。富铁岩浆熔体与膏盐层氧化障的同化混染,熔体氧逸度升高可能是形成铁岩浆的必要条件,NaCl、 $\text{H}_2\text{O}$  等盐类物质和挥发份的加入是岩浆发生液态不混溶形成铁岩浆的重要因素。Snyder *et al.* (1993)实验证明在富铁玄武质岩浆体系氧逸度升高将引起铁氧化物大量提前形成。铁氧化物在硅酸盐液相线温度之上提前形成有利于铁氧化物熔体的形成(Naslund, 1983)。岩浆与膏盐层的反应将导致岩浆体系的氧逸度快速大幅度升高,使铁氧化物在熔体中大规模提前形

成。最近 Veksler *et al.* (2007, 2008)采用高温原位离心熔离技术实验研究了玄武质岩浆和  $\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{FeO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  岩浆体系的液相不混熔,结果表明富铁-富硅熔体不仅可以通过分离结晶产生,也可以通过硅酸盐的液相不混熔形成,而且液相不混熔不是发生在传统观念认为的岩浆结晶的最后阶段,而是在较早阶段,这为铁岩浆的形成提供了新的实验依据。火山岩中富铁-富硅熔融包裹体的发现进一步证实了上述实验结果(Philpotts, 1982)。

在玢岩铁矿中矿浆充填型铁矿床(体)应该是很普遍的成矿形式,只是以前人们没有认识到或没有识别出来而已。虽然还存在争论,但智利、瑞典 Kiruna 型铁矿和宁芜姑山、梅山部分矿体的矿浆成因已得到很多人的认可(Park, 1961; Nystroem and Henriquez, 1994; Henriquez *et al.*, 2003; 宁芜研究项目编写小组, 1978; 宋学信等, 1981; Hou *et al.*, 2010)。矿浆贯入式矿石品位特富,多呈块状产出,气孔状和角砾状构造发育(图 10)。最近在姑山矿田杨庄铁矿下部发现的铁矿体与闪长玢岩的渐变过渡关系(从致密块状细粒磁铁矿经稠密浸染→浸染→稀疏浸染状磁铁矿渐变为浅灰色闪长玢岩)为铁岩浆的形成过程提供了很好的野外证据。根据玢岩铁矿中硫酸盐-硫化物的硫同位素组成计算出的硫酸

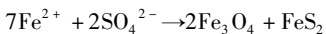
盐最低还原温度多分布在 450 ~ 600℃ 之间(表 1), 罗河铁矿深色蚀变带的硫同位素温度大部分在 600℃ 以上, 最高达到 961℃, 为玢岩铁矿的矿浆成因提供了理论依据。矿石的气孔状构造是判定矿浆成因的重要证据, 但不是唯一的证据, 深部岩浆不混熔形成的矿浆, 因气体无法逸出, 气孔状构造则可能不发育。

Hou *et al.* (2011) 对姑山闪长玢岩中的单斜辉石斑晶进行了电子探针分析, 结果发现, 从中心到边缘, Fe 含量存在从逐渐升高到突然降低而后又慢慢升高的现象。提出铁含量的突然降低是发生铁矿浆熔离的结果; 认为富铁的辉长质岩浆在上升过程中混染了富磷的地层, 导致了不混熔, 形成铁矿浆以及贫铁的闪长质岩浆。实际上区域内并没有特别富磷的地层。岩浆在上升过程中与膏盐层同化混染, 导致系统氧逸度快速升高, 熔体中  $\text{Fe}^{2+}$  被氧化成  $\text{Fe}^{3+}$ , 形成大量  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 熔体中  $\text{Fe}^{2+}$  浓度降低, 可能才是形成铁矿浆的真正原因, 磷、水、NaCl 等挥发分和盐类物质可能促进了熔体的不混熔和铁矿浆的熔离。因此岩浆与膏盐层的同化混染是导致铁矿浆形成的关键因素。

铁矿浆的形成需要几个条件: ①膏盐层规模大, 能够将硅酸盐熔体中的铁充分氧化, 形成足够铁氧化物; ②岩浆房高压条件和组分适合铁矿浆熔离/结晶分离; ③熔体中铁氧化物有充足的聚集熔离时间。

#### 4.2 成矿热液的氧化

以溶液形式搬运的  $\text{Fe}^{2+}$  遇到膏盐层氧化障时被快速氧化, 生成铁氧化物, 在原地或迁移一段距离后随着温度降低, 沉淀富集形成热液交代型/热液充填型铁矿床。基本反应如下:



在同一个玢岩铁矿床中, 矿浆充填和热液交代/充填型矿化作用可能同时存在, 只是有的矿体以矿浆充填型为主, 有的矿体以热液交代-充填型为主, 但矿浆型铁矿没有引起应有的重视。二者在空间上具有一定的分带性, 矿浆型矿石带主要赋存深部成矿岩体与膏盐层接触带附近, 向上逐渐过渡为热液交代-充填型矿石带; 时间上矿浆型铁矿形成较早。

#### 4.3 膏盐的还原

膏盐将  $\text{Fe}^{2+}$  氧化成  $\text{Fe}^{3+}$  并富集形成铁矿床的同时, 石膏等硫酸盐自身被还原, 形成  $\text{H}_2\text{S}/\text{S}^{2-}$ , 向成矿系统提供硫源,  $\text{S}^{2-}$  与  $\text{Fe}^{2+}$  结合, 形成黄铁矿等硫化物。因此玢岩铁矿、硫铁矿与石膏矿密切共生(图 4、图 5、图 6)。矿床中黄铁矿的  $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCD}}$  值普遍较高(表 1、表 2、图 7、图 8、图 9), 根据石膏-硫化物矿物对计算出的硫酸盐最低还原温度多在 450℃ 之上。这暗示大部分  $\text{S}^{2-}$  可能是在岩浆熔体与膏盐层的高温反应过程中形成的, 只是硫化物的沉淀温度相对较低, 就位时间较晚而已。伴生硫铁矿与玢岩铁矿具有相似的成矿机制, 二者属于同一成矿系列。

## 5 火山盆地的“双层成矿结构”

在岩浆上侵过程中, 首先穿越深部的三叠纪膏盐层。岩浆熔体与膏盐层发生同化混染和氧化还原作用, 硅酸盐熔体中的  $\text{Fe}^{2+}$  被氧化成  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  无法进入硅酸盐矿物晶格, 而形成  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 进入熔体。铁氧化物在磷、水和 NaCl 等盐类物质作用下, 在岩浆房中与硅酸盐熔体发生液态不混熔, 形成铁矿浆。铁矿浆温度高, 粘滞性强, 难以长距离迁移, 因此大部分铁矿浆充填型-接触交代型铁矿体一般赋存于成矿岩体与膏盐层的接触带附近, 少量铁矿浆在盖层较薄和构造有利部位, 随岩浆上侵到早期火山岩之中, 形成姑山、梅山等矿浆充填型矿床。在火山盆地中心, 火山岩盖层很厚, 矿浆难以穿越, 而以络合物形式搬运的成矿热液流动性强, 迁移距离远, 可以在远离岩体与膏盐层接触带部位富集沉淀。因此在盆地中部凹山地区浅层火山岩中仅发育热液交代-充填型铁矿。膏盐在岩浆-热液的作用下也会发生迁移和再沉淀, 在有些地段富集形成脉状-透镜状石膏矿。

宁芜和庐枞火山盆地可能存在“双层成矿结构”(高道明和赵云佳, 2008; 周涛发等, 2011), 在盆地深部岩体与膏盐层的接触部位产出“大冶式”矿浆充填-接触交代型富铁矿体, 规模可能超过了赋存于浅部火山-次火山中的“热液型玢岩铁矿”。最近在姑山矿田杨庄铁矿下部成矿岩体与黄马青组地层接触带部位发现的巨厚富矿体及在庐枞盆地罗河铁矿下部 2000 多米深处发现的厚层富铁矿就是最好的证明。位于宁芜盆地南北两端的姑山和梅山地区, 白垩纪火山岩盖层的厚度较小, 赋存于深部岩体与膏盐层的接触部位的“大冶式”矿浆充填-接触交代型富铁矿体埋藏也比较浅, 是找寻“大冶式”矿浆充填-接触交代型富铁矿的有利地段; 位于宁芜盆地中心的凹山地区, 其深部可能也存在“大冶式”矿浆充填-接触交代型富铁矿体, 由于火山岩盖层的厚度较大, 埋藏可能较深(图 11)。

## 6 结论

(1) 长江中下游中三叠统周冲村组膏盐层不仅为玢岩铁矿的成矿提供大量  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  等矿化剂, 使围岩发生钠化和氯化等蚀变,  $\text{Fe}^{2+}$  以 Na-Fe- $\text{Cl}_3$  等络合物形式搬运, 膏盐层还是地壳深处最重要的氧化障, 能够将硅酸盐熔体和成矿溶液中的  $\text{Fe}^{2+}$  氧化成  $\text{Fe}^{3+}$ , 使铁富集形成铁矿床, 是玢岩铁矿成矿和控矿的关键因素。

(2) 在岩浆上侵过程中, 首先穿越三叠纪膏盐层。岩浆与膏盐层发生同化混染和氧化还原反应, 硅酸盐熔体中的  $\text{Fe}^{2+}$  被氧化成  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  无法进入硅酸盐矿物晶格, 而形成  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 铁氧化物在磷、NaCl 和水等组分的作用下, 在岩浆房中与硅酸盐熔体发生液态不混熔, 形成铁矿浆, 矿浆沿构造有利部位充填, 形成矿浆型铁矿床。以溶液形式迁移

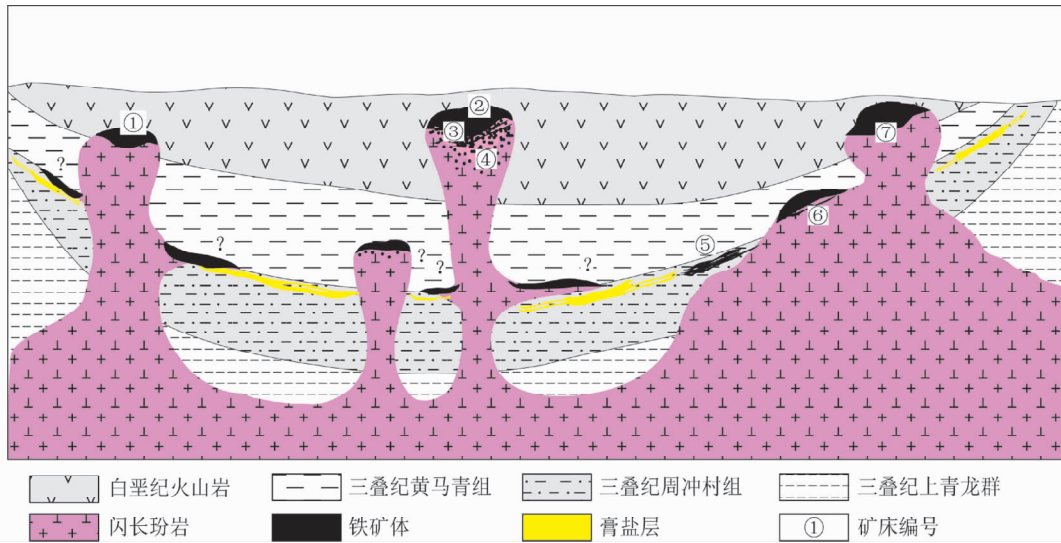


图 11 长江中下游玢岩铁矿“双层成矿结构”

1-梅山铁矿;2-凹山铁矿;3-东山铁矿;4-高村铁矿;5-和睦山铁矿;6-白象山铁矿;7-姑山铁矿

Fig. 11 “Double-Metallogenic Structure” of iron porphyrite deposits

1-Meishan deposit; 2-Washan deposit; 3-Dongshan deposit; 4-Gaocun deposit; 5-Hemushan deposit; 6-Baixiangshan deposit; 7-Gushan deposit

的  $\text{Fe}^{2+}$  与  $\text{SO}_4^{2-}$  反应生成  $\text{Fe}^{3+}$ , 沉淀富集形成热液交代型/热液充填型铁矿床。膏盐在岩浆-热液作用过程中也会发生迁移和再沉淀, 在膏盐层上部形成石膏矿。

(3) 在  $\text{SO}_4^{2-}$  将熔体和溶液中  $\text{Fe}^{2+}$  氧化成  $\text{Fe}^{3+}$  的同时, 自身被还原为  $\text{S}^{2-}$ , 向成矿系统提供硫源,  $\text{S}^{2-}$  与  $\text{Fe}^{2+}$  结合形成硫铁矿矿床。玢岩铁矿与硫铁矿空间上密切共生, 二者具有内在成因联系和相似的成矿机制, 属于同一成矿系列。

(4) 矿床中的硫 60% ~ 80% 来自膏盐层硫酸盐的还原, 还原温度多在 450℃ 以上。膏盐层硫酸盐所占比例和硫酸盐还原温度越高, 硫化物的  $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$  值越高。硫化物的沉淀温度较硫酸盐的还原温度低, 就位时间晚。

(5) 在玢岩铁矿中, 矿浆型和热液型矿体同时存在, 二者在空间上具有明显的分带, 垂向上呈“双层成矿结构”。在盆地深部岩体与膏盐层的接触带附近主要产出“大冶式”矿浆充填-接触交代型富铁矿床, 在浅部火山-次火山岩中则主要发育热液交代-充填型铁矿。位于宁芜盆地南北两端的姑山和梅山矿田是找寻“大冶式”矿浆充填-接触交代型富铁矿的有利地段。

**致谢** 在野外工作期间得到了马钢集团南山矿业公司和姑山矿业公司的大力支持与帮助; 二位审稿专家提出了富有建设性的修改意见; 在此一并致谢。

## References

Barton MD and Johnson DA. 1996. Evaporitic-source model for igneous-related Fe oxide-(REE-Cu-Au-U) mineralization. *Geology*, 24(3): 259 - 262

- Bi ZQ and Ding BL. 1997. Sedimentary environments of Triassic evaporate formations in the Lower Yangtze River region. *Volcnology and Mineral Resources*, 18(2): 127 - 136 (in Chinese with English abstract)
- Cai BJ. 1980. The relationship of gypsum salt beds with endogenic copper and iron ores in the Middle-Lower Yangtze Valley. *Geochimica*, (2): 193 - 199 (in Chinese with English abstract)
- Chang YF, Liu XP and Wu YC. 1991. The Copper-Iron Belt of the Lower and Middle Reaches of the Changjiang River. Beijing: Geological Publishing House, 1 - 379 (in Chinese)
- Chou IM and Eugster HP. 1977. Solubility of magnetite in supercritical chloride solutions. *Amer. J. Sci.*, 277(10): 1296 - 1314
- Chu XL, Chen JS and Wang SX. 1984. Sulfur isotopic temperatures and their significance of Luohe iron deposit in Anhui Province. *Geochimica*, 12(4): 350 - 356 (in Chinese with English abstract)
- Chu XL, Chen JS and Wang SX. 1986. Study on fractionation mechanism of sulfur isotope and physicochemical conditions of alteration and ore formation in Luohe iron deposit, Anhui. *Scientia Geologica Sinica*, 26(3): 189 - 195 (in Chinese with English abstract)
- Ding Y. 1992. A new theory concerning the origin of the Ningwu (Nanjing-Wuhu) porphyritic iron deposits: Assimilation-high-level emplacement-aggregation of ferruginous substance. *Mineral Deposits*, 11(3): 195 - 202 (in Chinese with English abstract)
- Dong SW, Xiang HS, Gao R, Lü QT, Li JS, Zhan SQ, Lu ZW and Ma LC. 2010. Deep structure and ore formation with in Lujiang-Zongyang volcanic ore concentrated area in Middle to Lower Reaches of Yangtze River. *Acta Petrologica Sinica*, 26(9): 2529 - 2542 (in Chinese with English abstract)
- Du JG and Chang DY. 2011. Consideration on the deep-rion deposits prospecting in the Middle-Lower Yangtze Metallogenic Belt. *Acta Geologica Sinica*, 85(5): 687 - 698 (in Chinese with English abstract)
- Duan C, Mao JW, Li YH, Hou KJ, Yuan SD, Zhang C and Liu JL. 2011. Zircon U-Pb geochronology of the gabbro-diorite porphyry and granodiorite porphyry from Washan iron deposit in Ningwu basin, and its geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 85(7): 1159 - 1171 (in Chinese with English abstract)
- Duan C, Li YH, Hou KJ, Yuan SD, Zhang C and Liu JL. 2012. Late Mesozoic ore-forming events in Ningwu Ore district, Middle-Lower Yangtze River polymetallic ore belt, East China: Evidences from

- zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic compositions of the granitic stocks. *Acta Geologica Sinica*, 86(3): 719–736
- Duan C, Li YH, Yuan SD, Hu MY, Zhao LH, Chen XD, Zhang C and Liu JL. 2012. Geochemical characteristic of magnetite from Washan iron deposit in Ningwu ore district and its constraints on ore-forming. *Acta Petrologica Sinica*, 28(1): 243–257 (in Chinese with English abstract)
- Fan HY, Li WD and Wang WB. 1995. On the relationship between the marine Triassic evaporate horizons and Cu(Au), Fe deposits in the Middle-Lower Yangtze area. *Volcanology and Mineral Resources*, 16(2): 32–41 (in Chinese with English abstract)
- Fan Y, Zhou TF, Yuan F, Qian CC, Lu SM and Cooke DR. 2008. LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of the A-type granites in the Lu-Zong (Lujiang-Zongyang) area and their geological significances. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1715–1724 (in Chinese with English abstract)
- Fan Y, Zhou TF, Yuan F, Zhang LJ, Qian B, Ma L and Cooke DR. 2010. Geochronology of the diorite porphyrites in Ning-Wu basin and their metallogenic significances. *Acta Petrologica Sinica*, 26(9): 2715–2728 (in Chinese with English abstract)
- Fan Y, Zhou TF, Hao L, Yuan F, Zhang LJ and Wang WC. 2012. Ore-forming fluid characteristic of Nihe iron deposit in Lu-Zong basin, Anhui Province and its significance to ore genesis. *Acta Petrologica Sinica*, 28(10): 3113–3124 (in Chinese with English abstract)
- Frutos JJ and Oyarzun JM. 1975. Tectonic and geochemical evidence concerning the genesis of El Laco magnetite lava flow deposits, Chile. *Economic Geology*, 70(5): 988–990
- Gao DM and Zhao YJ. 2008. Rerecognition of porphyrite iron ore deposit. *Geology of Anhui*, 18(3): 164–168 (in Chinese with English abstract)
- Haller AD and Fontbote L. 2009. The raúl-condestable iron oxide copper-gold deposit, central coast of Peru; Ore and related hydrothermal alteration, sulfur isotopes, and thermodynamic constraints. *Economic Geology*, 104(3): 365–384
- Henriquez F, Naslund HR, Nystrom JO, Vivallo W, Dobbs FM and Lledo H. 2003. New field evidence bearing on the origin of the El Laco magnetite deposit, northern Chile: A discussion. *Economic Geology*, 98(7): 1497–1502
- Hou KJ and Yuan SD. 2010. Zircon U-Pb age and Hf isotopic composition of the volcanic and sub-volcanic rocks in the Ningwu basin and their geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 26(3): 888–902 (in Chinese with English abstract)
- Hou T, Zhang ZC, Encarnacion J, Du YS, Zhao ZD and Liu JL. 2010. 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. *Lithos*, 119(3–4): 330–344
- Hou T, Zhang ZC and Kusky T. 2011. Gushan magnetite-apatite deposit in the Ningwu basin, Lower Yangtze River Valley, SE China: Hydrothermal or Kiruna-type? *Ore Geology Reviews*, 43(1): 333–346
- Hou ZQ, Yang ZS, Li YQ, Zeng PS, Meng YF, Xu WY and Tian SH. 2004. Large-scale migration of fluids towards foreland basins during collisional orogeny: Evidence from Triassic anhydrite sequences and regional alteration in Middle-Lower Yangtze area. *Mineral Deposits*, 23(3): 310–326 (in Chinese with English abstract)
- Hu WX, Hu SX and Zhao YC. 1991. Sedimentary genesis of anhydrite deposits in the volcanic series and their relation to the pyrite deposits in Xiangshang district Anhui Province. *Geoscience*, 5(2): 164–173 (in Chinese with English abstract)
- Hu WX and Xu KQ. 1992. Study on Dabaozhuang-type pyrite deposits exhalation-sedimentation-superimposition-transformation sulfide deposits in the Lujiang-Zongyang Basin, Anhui Province. *Scientia Geologica Sinica*, (3): 213–224 (in Chinese with English abstract)
- Huang QT and Yin GP. 1989. Iron Ore Deposit of Luohe in Lujiang, Anhui Province. Beijing: Geological Publishing House, 1–193 (in Chinese)
- Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences. 1987. Ore-Forming Mechanism of Ningwu Type Iron Deposits. Beijing: Science Press, 1–152 (in Chinese)
- Li BL and Xie YH. 1984. Origin, classification, and ore-forming model of Ningwu type iron deposits in Ningwu area. *Science in China (Series B)*, (1): 80–86 (in Chinese)
- Li YH, Xie GQ, Duan C and Han D. 2013. Effect of sulfate evaporate salt layer over the formation of skarn-type iron ores. *Acta Geologica Sinica*, 87(9): 1324–1334 (in Chinese with English abstract)
- Lin G and Xu DR. 2010. Prospecting for Daye-type iron deposit in depth of porphyrite-type iron deposit: A case study of southern Ningwu iron deposits in Anhui Province. *Mineral Deposits*, 29(6): 427–436 (in Chinese with English abstract)
- Lin XD, Yao SZ and Zhang SZ. 1984. A study on nature of ore-bearing fluids of “Daye Type” iron ore deposits in eastern Hubei, China. *Earth Science*, 27(4): 99–106 (in Chinese with English abstract)
- Liu YS, Cheng LX and Liao WP. 1981. Experimental studies on extraction of iron by reaction of diorite-porphyrite with chloride solution at elevated temperatures and pressures. *Acta Geologica Sinica*, (4): 276–289 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Xie GQ, Duan C, Pirajno F, Ishiyama D and Chen YC. 2011. A tectono-genetic model for porphyry-skarn Cu-Au-Mo-Fe and magnetite-apatite deposits along Middle-Lower Yangtze River Valley, Eastern China. *Ore Geology Reviews*, 43(1): 294–314
- Meinert LD, Dipple GM and Nicolescu S. 2005. World Skarn Deposits. In: Hedenquist JW *et al.* (eds.). *Economic Geology 100<sup>th</sup> Anniversary Volume*, Society of Economic Geologists. Littleton, Colorado, USA: 299–336
- Naslund HR. 1983. The effect of oxygen fugacity on liquid immiscibility in iron-bearing silicate melts. *Amer. J. Sci.*, 283(10): 1034–1059
- Ningwu Research Group. 1978. Magnetite Porphyry Deposits in Ningwu Area. Beijing: Geological Publishing House, 1–196 (in Chinese)
- Nystrom JO and Henriquez F. 1994. Magmatic features of iron ores of the Kiruna type in Chile and Sweden; Ore textures and magnetite geochemistry. *Econ. Geol.*, 89(4): 820–839
- Ohmoto H and Rye RO. 1979. Isotopes of sulfur and carbon. In: Barnes HL (ed.). *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. 2<sup>nd</sup> Edition. New York: John Wiley and Sons, 10: 509–576
- Park CF. 1961. A magnetite “flow” in northern Chile. *Econ. Geol.*, 56(2): 431–436
- Philpotts AR. 1967. Origin of certain iron titanium oxide and apatite rocks. *Econ. Geol.*, 62(3): 303–315
- Philpotts AR. 1982. Compositions of immiscible liquids in volcanic rocks. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 80(3): 201–218
- Sillitoe RH. 2003. Iron oxide-copper-gold deposits: An Andean view. *Mineralium Deposita*, 38(7): 787–812
- Snyder D, Carmichael ISE and Wiebe RA. 1993. Experimental study of liquid evolution in a Fe-rich, layered mafic intrusion; Constraints Fe-Ti oxide precipitation on the  $Tf_{O_2}$  and  $T-P$  paths of tholeiitic magmas. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 113(1): 73–86
- Song XX, Chen YC, Sheng JF and Ai YD. 1981. On iron deposits formed from volcanogenic-hypabyssal ore magma. *Acta Geologica Sinica*, (1): 41–54 (in Chinese with English abstract)
- Su LH. 1984. The importance of liquid immiscibility in petrology and mineral deposits. *Earth Science*, (1): 1–12 (in Chinese with English abstract)
- Tang YC, Wu YC, Chu GZ, Xing FM, Wang YM, Cao FY and Chang YF. 1998. Geology of Copper-gold Polymetallic Deposits in the along-Changjiang Area of Anhui Province. Beijing: Geological Publishing House, 1–351 (in Chinese with English abstract)
- Veksler IV, Dorfman AM, Borisov A, Wirth R and Dingwell DB. 2007. Liquid immiscibility and evolution of basaltic magma. *Journal of Petrology*, 49: 2177–2186
- Veksler IV, Dorfman AM, Borisov A, Wirth R and Dingwell DB. 2008. Liquid unmixing kinetics and the extent of immiscibility in the system  $K_2O-CaO-FeO-Al_2O_3-SiO_2$ . *Chemical Geology*, 256(3–4): 119–130

- Wang WB, Li WD, Fan HY and Cheng ZF. 1994. Controlling conditions of strata, lithofacies and paleogeography to copper-deposit concentration regions in Middle-Lower Yangtze River. *Volcanology and Mineral Resources*, 15(3): 33–41 (in Chinese with English abstract)
- Wu MA, Wang QS, Zheng GW, Cai XB, Yang SX and Di QS. 2011. Discovery of Nihe iron deposit in Lujiang, Anhui, and its exploration significance. *Acta Geologica Sinica*, 85(5): 802–809 (in Chinese with English abstract)
- Xiong XX and Yao CM. 2000. Mineralogy of pyrites from the Xiangshan iron and pyrite deposits, Anhui Province. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 19(2): 185–192 (in Chinese with English abstract)
- Yin YD, Liu ZH and Sheng RC. 1996. Yuntaishan Pyrite deposit in Nanjing-Wuhu region: Geological characters and genetic classification. *Geology of Chemical Minerals*, 18(4): 284–288 (in Chinese with English abstract)
- Yu XH. 1984. The geological significance and the phase equilibrium experiments of wustite-fluor-phlogopite-diopside melt system at one bar and high temperature. *Earth Science*, (1): 12–18 (in Chinese with English abstract)
- Yuan JZ. 1990. Iron ore type and genesis of Meishan iron ore deposit: The study of high temperature experiments. *Geoscience*, 4(4): 77–84 (in Chinese with English abstract)
- Zhai YS, Shi ZL, Lin XD, Xiong PF, Wang DY, Yao SZ and Jin ZM. 1982. Genesis of “Daye Type” iron ore deposits in eastern Hubei, China. *Earth Science*, (3): 239–251 (in Chinese with English abstract)
- Zhai YS, Yao SZ, Lin XD, Zhou XN, Wan TF, Jin FQ and Zhou ZG. 1992. Fe-Cu-Au Metallogeny of the Middle-Lower Changjiang Region. Beijing: Geological Publishing House, 1–235 (in Chinese)
- Zhang ZC, Hou T, Santosh M, Li HM, Li JW, Zhang ZH, Song XY and Wang M. 2014. Spatio-temporal distribution and tectonic settings of the major iron deposits in China: An overview. *Ore Geology Reviews*, 57: 247–263
- Zhang ZC, Hou T, Li HM, Li JW, Zhang ZH and Song XY. 2014. Enrichment mechanism of iron in magmatic-hydrothermal system. *Acta Petrologica Sinica*, 30(5): 1189–1204 (in Chinese with English abstract)
- Zhao YX. 1993. Mechanisms of Formation of the Contact Iron Deposits along the Middle-Lower Reaches of the Yangtze River. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1–120 (in Chinese)
- Zhou TF, Yuan F, Yue SC, Liu XD, Zhang X and Fan Y. 2007. Geochemistry and evolution of ore-forming fluids of the Yueshan Cu-Au skarn- and vein-type deposits, Anhui Province, South China. *Ore Geology Reviews*, 31(2): 279–303
- Zhou TF, Fan Y, Yuan F, Lu SM, Shang SG, Cooke D, Meffre S and Zhao GC. 2008. Geochronology of the volcanic rocks in the Luzong (Lujiang-Zongyang) basin and its significance. *Science in China (Series D)*, 51(10): 1470–1482
- Zhou TF, Fan Y, Yuan F, Song CZ, Zhang LJ, Qian CC, Lu SM and Cooke D. 2010. Temporal-spatial framework of magmatic intrusions in Luzong volcanic basin in East China and their constrain to mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 26(9): 2694–2714 (in Chinese with English abstract)
- Zhou TF, Fan Y, Yuan F, Zhang LJ, Ma L, Qian B and Xie J. 2011. Petrogenesis and metallogeny study of the volcanic basins in the Middle and Lower Yangtze metallogenic belt. *Acta Geologica Sinica*, 85(5): 712–730 (in Chinese with English abstract)
- 常印佛, 刘湘培, 吴昌言. 1991. 长江中下游地区铜铁成矿带. 北京: 地质出版社, 1–379
- 储雪蕾, 陈锦石, 王守信. 1984. 安徽罗河铁矿的硫同位素温度及意义. *地球化学*, 12(4): 350–356
- 储雪蕾, 陈锦石, 王守信. 1986. 罗河铁矿的硫同位素分馏机制和矿床形成的物理化学条件的研究. *地质科学*, 26(3): 189–195
- 丁毅. 1992. 宁芜玢岩铁矿成因新论同化作用、高侵位和铁质聚合. *矿床地质*, 11(3): 195–202
- 董树文, 项怀顺, 高锐, 吕庆田, 李建设, 战双庆, 卢占武, 马立成. 2010. 长江中下游庐江-枞阳火山岩矿集区深部结构与成矿作用. *岩石学报*, 26(9): 2529–2542
- 杜建国, 常丹燕. 2011. 长江中下游成矿带深部铁矿找矿的思考. *地质学报*, 85(5): 687–698
- 段超, 毛景文, 李延河, 侯可军, 袁顺达, 张成, 刘佳林. 2011. 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. *地质学报*, 85(7): 1159–1171
- 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. *岩石学报*, 28(1): 243–257
- 范洪源, 李文达, 王文斌. 1995. 长江中下游海相三叠系膏盐层与铜(金)、铁矿床. *火山地质与矿产*, 16(2): 32–41
- 范裕, 周涛发, 袁峰, 钱存超, 陆三明, Cooke DR. 2008. 安徽庐江-枞阳地区 A 型花岗岩的 LA-ICP-MS 定年及其地质意义. *岩石学报*, 24(8): 1715–1724
- 范裕, 周涛发, 袁峰, 张乐骏, 钱兵, 马良, Cooke DR. 2010. 宁芜盆地闪长玢岩的形成时代及对成矿的指示意义. *岩石学报*, 26(9): 2715–2728
- 范裕, 周涛发, 郝麟, 袁峰, 张乐骏, 王文财. 2012. 安徽庐枞盆地泥河铁矿床成矿流体特征及其对矿床成因的指示. *岩石学报*, 28(10): 3113–3124
- 高道明, 赵云佳. 2008. 玢岩铁矿再认识. *安徽地质*, 18(3): 164–168
- 侯可军, 袁顺达. 2010. 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. *岩石学报*, 26(3): 888–902
- 侯增谦, 杨竹森, 李荫清, 曾普胜, 蒙义峰, 徐文艺, 田世洪. 2004. 碰撞造山过程中流体向前陆盆地大规模迁移汇聚——来自长江中下游三叠纪膏盐建造和区域蚀变的证据. *矿床地质*, 23(3): 310–326
- 胡文瑄, 胡受奚, 赵玉琛. 1991. 安徽向山地区火山岩层中硬石膏的沉积成因特征及其与硫铁矿的关系. *现代地质*, 5(2): 164–173
- 胡文瑄, 徐克勤. 1992. 论安徽庐枞盆地大鲍庄式喷气沉积-叠加改造型硫铁矿床. *地质科学*, (3): 213–224
- 黄清涛, 尹恭沛. 1989. 安徽庐江罗河铁矿. 北京: 地质出版社, 1–193
- 中国科学院地球化学研究所. 1987. 宁芜型铁矿床形成机理. 北京: 科学出版社, 1–152
- 李乘伦, 谢奕汉. 1984. 宁芜地区宁芜型铁矿的成因、分类和成矿模式. *中国科学(B 辑)*, (1): 80–86
- 李延河, 谢桂青, 段超, 韩丹. 2013. 膏盐层在矽卡岩型铁矿成矿中的作用. *地质学报*, 87(9): 1324–1334

#### 附中文参考文献

- 毕仲其, 丁保良. 1997. 下扬子区三叠系膏盐建造的沉积环境. *火山地质与矿产*, 18(2): 127–136
- 蔡本俊. 1980. 长江中下游地区内生铁铜矿床与膏盐的关系. *地球化学*, (2): 193–199

- 林刚, 许德如. 2010. 在宁芜玢岩铁矿深部寻找大冶式铁矿的探讨——以宁芜铁矿南段为例. 矿床地质, 29(6): 427–436
- 林新多, 姚书振, 张叔贞. 1984. 鄂东大冶式铁矿成矿流体性质的探讨. 地球科学, 27(4): 99–106
- 刘玉山, 程莱仙, 缪婉萍. 1981. 闪长玢岩在高温、高压下与氯化物溶液作用析出铁的实验研究. 地质学报, (4): 276–289
- 宁芜项目编写组. 1978. 宁芜玢岩铁矿. 北京: 地质出版社, 1–196
- 宋学信, 陈毓川, 盛继福, 艾永德. 1981. 论火山-浅成岩浆铁矿床. 地质科学, (1): 41–54
- 苏良赫. 1984. 液相不共溶在岩石学及矿床学中的重要性. 地球科学, (1): 1–12
- 唐永成, 吴言昌, 储国正, 邢凤鸣, 王永敏, 曹奋扬, 常印佛. 1998. 安徽沿江地区铜金多金属矿床地质. 北京: 地质出版社, 1–351
- 王文斌, 李文达, 范洪源, 程忠富. 1994. 长江中下游铜矿集中区地层、岩相、古地理控制条件. 火山地质与矿产, 15(3): 33–41
- 吴明安, 汪青松, 郑光文, 蔡晓兵, 杨世学, 狄勤松. 2011. 安徽庐江泥河铁矿的发现及意义. 地质学报, 85(5): 802–809
- 熊先孝, 姚超美. 2000. 向山地区铁、硫矿床中黄铁矿矿物学研究. 岩石矿物学杂志, 19(2): 185–192
- 殷友东, 刘振红, 盛如崇. 1996. 宁芜云台山硫铁矿矿床地质特征及成因类型. 化工矿产地质, 18(4): 284–288
- 喻学惠. 1984. 常压高温下方铁矿( $\text{FeO}$ )-氟金云母 $[\text{KMg}_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})\text{F}_2]$ -透辉石( $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ )熔融体系相平衡实验及地质意义. 地球科学, (1): 12–18
- 袁家铮. 1990. 梅山铁矿矿石类型及成因-高温实验结果探讨. 现代地质, 4(4): 77–84
- 翟裕生, 石准立, 林新多, 熊鹏飞, 王定域, 姚书振, 金振民. 1982. 鄂东大冶式铁矿成因的若干问题. 地球科学, (3): 239–251
- 翟裕生, 姚书振, 林新多, 周启若, 万天丰, 金福全, 周宗桂. 1992. 长江中下游地区铁铜(金)成矿规律. 北京: 地质出版社, 1–235
- 张招崇, 侯通, 李厚民, 李建威, 张作衡, 宋谢炎. 2014. 岩浆-热液系统中铁的富集机制探讨. 岩石学报, 30(5): 1189–1204
- 赵永鑫. 1993. 长江中下游地区接触带铁矿床形成矿机理. 武汉: 中国地质大学出版社, 1–120
- 周涛发, 范裕, 袁峰, 陆三明, 尚世贵, Cooke DR, Meffre S, 赵国春. 2008. 安徽庐枞(庐江-枞阳)盆地火山岩的年代学及其意义. 中国科学(D辑), 38(11): 1342–1353
- 周涛发, 范裕, 袁峰, 宋传中, 张乐骏, 钱存超, 陆三明. 2010. 庐枞盆地侵入岩的时空格架及其对成矿的制约. 岩石学报, 26(9): 2694–2714
- 周涛发, 范裕, 袁峰, 张乐骏, 马良, 钱兵, 谢杰. 2011. 长江中下游成矿带火山岩盆地的成岩成矿作用. 地质学报, 85(5): 712–730