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*

毛景文[1,2] 段超[2] 刘佳林[2] 张成[2]

MAO JingWen[1,2], DUAN Chao[2], LIU JiaLin[2] and ZHANG Cheng[2]

1. 中国地质科学院矿产资源研究所,国土资源部成矿作用和资源评价重点实验室,北京 100037
2. 地质过程与矿产资源国家重点实验室,中国地质大学地球科学与资源学院,北京 100083
1. *MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing* 100037, *China*
2. *State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, School of the Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing* 100083, *China*

2011-11-01 收稿, 2011-12-10 改回.

Mao JW, Duan C, Liu JL and Zhang C. 2012. Metallogeny and corresponding mineral deposit model of the Cretaceous terrestrial volcanic-intrusive rocks-related polymetallic iron deposits in Middle-Lower Yangtze River Valley. *Acta Petrologica Sinica*, 28(1):1 −14

Abstract Most terrestrial volcanic-intrusion related-Cretaceous iron deposits along the Middle-Lower Yangtze River Valley developed in Cretaceous basins whereas a few, such as the Chengchao and Jinshandian skarn iron deposits, occur in uplift area. The mineralization spatially can be divided into two episodes with age ranges of 133 ~ 130Ma and 127 ~ 125Ma. In light of substance sources and mineralization processes, it can be recognized as four ore systems, i. e. skarn iron deposits in the uplift area (system 1); volcanic-subvolcanism of the Dawangshan (or Zhuanqiao) cycle-related polymetallic iron deposits, comprising apatite-magnetite iron deposit, skarn-like iron deposit, magmatic iron deposit, hydrothermal S-Cu deposit and hydrothermal Pb-Zn deposit (system 2); monzonite and syenite-related skarn iron deposits (system 3); volcanic-subvolcanism of Niangniangshan cycle-related Cu (Au) and Au-U deposits (system 4). Late three systems merely occurred in the Cretaceous volcanic basins. The skarn iron deposits in both basins and uplift area share the same mineralization age and are temporally a little later than the polymetallic iron deposits associated with pyroxene diorite porphyry, and earlier than system 4 of Cu-Au-U mineralization. Based on the apatite-magnetite iron deposit, skarn-like iron deposit and magmatic iron deposit of system 2 and the other types of non-industrial value iron mineralizations, previous researchers proposed a mineral model entitled in "porphyry iron deposit model" with extensive impact in China. In this study based on the porphyry iron mineral model we suggest a polymetallic iron deposit model comprising the major characteristics of the four ore systems. The varied ore systems and ore types are indicators each other for prospecting.

Key words Apatite-magnetite deposit; Magmatic iron ore; Hydrothermal S-Cu-Au ore; Mineral model of porphyry iron deposit; Terrestrial volcanic basin; Cretaceous; Middel-Lower Yangtze River Valley

摘 要 在长江中下游地区,与白垩纪陆相火山-侵入岩有关的铁多金属矿床在空间上绝大多数发育于白垩纪火山盆地,仅程潮和金山店出现于隆起区;成矿时间上分为两个时代,即 133 ~ 130Ma 和 127 ~ 125Ma。按照成矿物质来源和成矿过程,鉴别出 4 个成矿系统:即在隆起区与石英闪长岩有关的矽卡岩铁矿(系统 1);在火山盆地内,与大王山(或砖桥)旋回火山-次火山活动有关的铁多金属矿床(包括,磷灰石-磁铁矿型铁矿、类矽卡岩型铁矿、矿浆型铁矿、热液型硫铜金矿、热液型铅锌矿)(系统 2)和与二长-正长岩有关的矽卡岩型铁矿(系统 3);与娘娘山(或浮山)旋回火山-次火山活动有关的铜(金)矿和金铀矿(系统 4)。盆地内和隆起区的矽卡岩型铁矿形成时间基本一致,略晚于与辉石闪长玢岩有关的铁多金属矿床(系统 2),但早于铜金铀为主的成矿系统 4。前人以系统 2 中的磷灰石-磁铁矿型铁矿、类矽卡岩型铁矿和矿浆型铁矿为主,结合其他一些少见或

* 本文受国家自然科学重点基金项目(40930419)和中国地质调查项目(1212011120831)联合资助.

第一作者简介: 毛景文,男,1956 年生,研究员,从事矿床学与地球化学研究,E-mail: jingwenmao@263.net

不具工业意义的铁矿类型,提出一个具有广泛影响的玢岩铁矿成矿模式。此文以玢岩铁矿成矿模式为基础,结合4个成矿系统的基本特点,提出了白垩纪陆相火山-侵入岩有关的铁多金属矿床模型。以上这些具有成因联系的矿床系统和类型及其分带互为找矿标志。

关键词 磷灰石-磁铁矿矿床;矿浆型铁矿;热液型硫铜金矿;玢岩铁矿模式;陆相火山岩盆地;白垩纪;长江中下游地区

中图法分类号 P611; P618.31

1 引言

在宁芜、庐枞以及繁昌盆地中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,前人已经进行了大量研究工作,并针对宁芜火山盆地中的磷灰石-磁铁矿型,矽卡岩型和矿浆型铁矿开展深入解剖研究,提出了影响广泛的宁芜玢岩铁矿成矿模式(宁芜研究项目编写小组,1978)。近10年以来,运用大量精确同位素测年方法比较精确地测定了玢岩铁矿及有关的火山岩和次火山岩成岩成矿时代(周涛发等,2011;Mao *et al.*, 2011),还鉴别出鄂东南金牛火山盆地东侧隆起区与花岗岩岩类有关的程潮和金山店矽卡岩铁矿也在同一时代形成,可能与前者具有成因联系(谢桂青等,2008;Mao *et al.*, 2011;Xie *et al.*, 2011a)。除了铁矿床外,在火山盆地中部分铁矿与铜金以及硫铁矿和硬石膏矿显示出密切的成因联系,属于同一成矿系列。除了以往所知道的铜井脉状型金铜矿和岳山脉状铅锌矿,近几年地质找矿工作还发现铜铅锌金矿化具有较好的找矿前景(吴明安等,2007)。基于前人工作基础,尤其是近10年的重要进展,本文尝试基于"宁芜玢岩铁矿模式",增加新内容,提出一个综合性矿床模型。

2 地质背景

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。区内地层经历了三个不同的演化阶段:1. 前震旦纪变质基底发育阶段;2. 震旦纪-早三叠世海相沉积阶段;3. 中晚三叠世-白垩纪陆源碎屑岩和火山岩阶段。

前震旦纪基底分为南北两个部分:北部出露于大别山地区,主要为晚太古代-早元古代大别山群角闪岩相黑云斜长片麻岩、黑云角闪斜长片麻岩夹斜长角闪岩、大理岩,晚元古代绿片岩相海底碎屑岩和碳酸盐岩夹长英质火山岩、白云石英片岩、黑云钠长片岩、绿帘钠长片岩、白云钠长石英片岩、含磷锰碳酸盐岩夹角闪岩;南部出露于幕阜山-怀玉山一带,主要为中元古代绿片岩相千枚岩和板岩夹细碧角斑岩(常印佛等,1991)。

震旦纪砾岩、千枚岩、白云岩和燧石岩覆盖于前震旦纪变质岩之上。在寒武纪-早三叠世长江中下游地区处于一个稳定的海槽环境,沉积了一套浅海相碳酸盐岩和碎屑岩。寒武纪-奥陶纪砂岩和页岩夹白云灰岩和泥灰岩发育于震旦纪地层之上。志留纪主要发育厚层石英砂岩、长石石英砂岩、页岩、泥灰岩和白云岩,与下伏奥陶纪地层呈假整合接触。从晚志留纪-泥盆纪,长江中下游地区抬升为陆相环境。晚泥盆纪发育的陆相碎屑岩主要为厚层石英砂岩、砂岩和底砾岩,煤层和富赤铁矿地层发育。石炭纪滨海相碳酸盐岩整合发育于晚泥盆纪碎屑岩之上。二叠纪沉积岩分布很广,在整个长江中下游地区均有出露。二叠纪地层上部为滨海相-浅海相碳酸盐岩夹碳质页岩,下部由海陆互层碳酸盐岩夹硅质泥灰岩、富钙质页岩、砂岩、粉砂岩和夹煤层沉积岩组成(翟裕生等,1992)。早三叠纪地层中主要为浅海相-滨海相白云岩、灰岩和少量的石膏,中三叠纪主要发育海相灰岩、泥灰岩、白云岩和陆相泥灰岩、粉砂岩互层,晚三叠纪主要发育陆相泥质粉砂岩、砂岩夹煤层,部分地区砂岩中发育有铜矿化。从侏罗纪-白垩纪,一系列陆相断陷火山沉积盆地沿长江中下游地区发育。侏罗纪地层主要为湖相-沼泽相砂岩、粉砂岩、页岩上覆火山岩、火山碎屑岩。早白垩纪-中白垩纪地层主要由火山岩和火山碎屑岩组成,包括安山岩、粗面岩、粗安岩、玄武安山岩、流纹岩、橄榄安粗岩、熔结角砾岩和凝灰岩,锆石SHRIMP和LA-ICP-MS U-Pb年龄测定结果为135~127Ma(张旗等,2003;周涛发等,2008)。晚白垩纪主要发育一套红色碎屑岩:砾岩、砂砾岩、砂岩和粉砂岩夹少量的安山岩、玄武岩和薄层石膏。第三纪地层主要为砾岩、砂岩、玄武凝灰角砾岩、熔岩和集块岩。

断裂在长江中下游多金属成矿带较为发育,其中成矿带的边界是由三条断裂界定,即位于西南部的襄樊-广济断裂带(XGF),西北部的郯城-庐江断裂带(TLF)和南部-东部的阳兴-常州断裂带(YCF)(图1)。通过古地磁和年代学的研究,Lin *et al.* (1985),Zhao and Coe (1987)认为在中三叠纪扬子板块与中朝板块发生了碰撞,形成了大别山超高压变质带(Eide,1995)。此外,地球物理资料证实了长江断裂带的存在,其从西部的湖北大冶一直延伸到东部的江苏镇江,总长近450km(常印佛等,1991;Zhai *et al.*,1996)。断裂带最初形成于新元古代,在印支期(晚二叠纪-三叠纪)和燕山期(侏罗纪-白垩纪)重新活化。多次活动的构造作用使得该地区发育有大量的网脉状断裂和褶皱。在长江断裂带中大型断裂和褶皱均形成于印支期,作用于寒武纪-三叠纪沉积岩及前寒武纪基底,形成于印支期的S型褶皱的构造轴在西部的武汉到九江地区为WNW方向,在九瑞地区转为为E-W和ENE方向,九江到南京为NE方向,宁镇地区为E-W方向(常印佛等,1991;翟裕生等,1992)。印支期构造活动在长江中下游地区形成了众多的隆起区和洼陷盆地。由于受太平洋

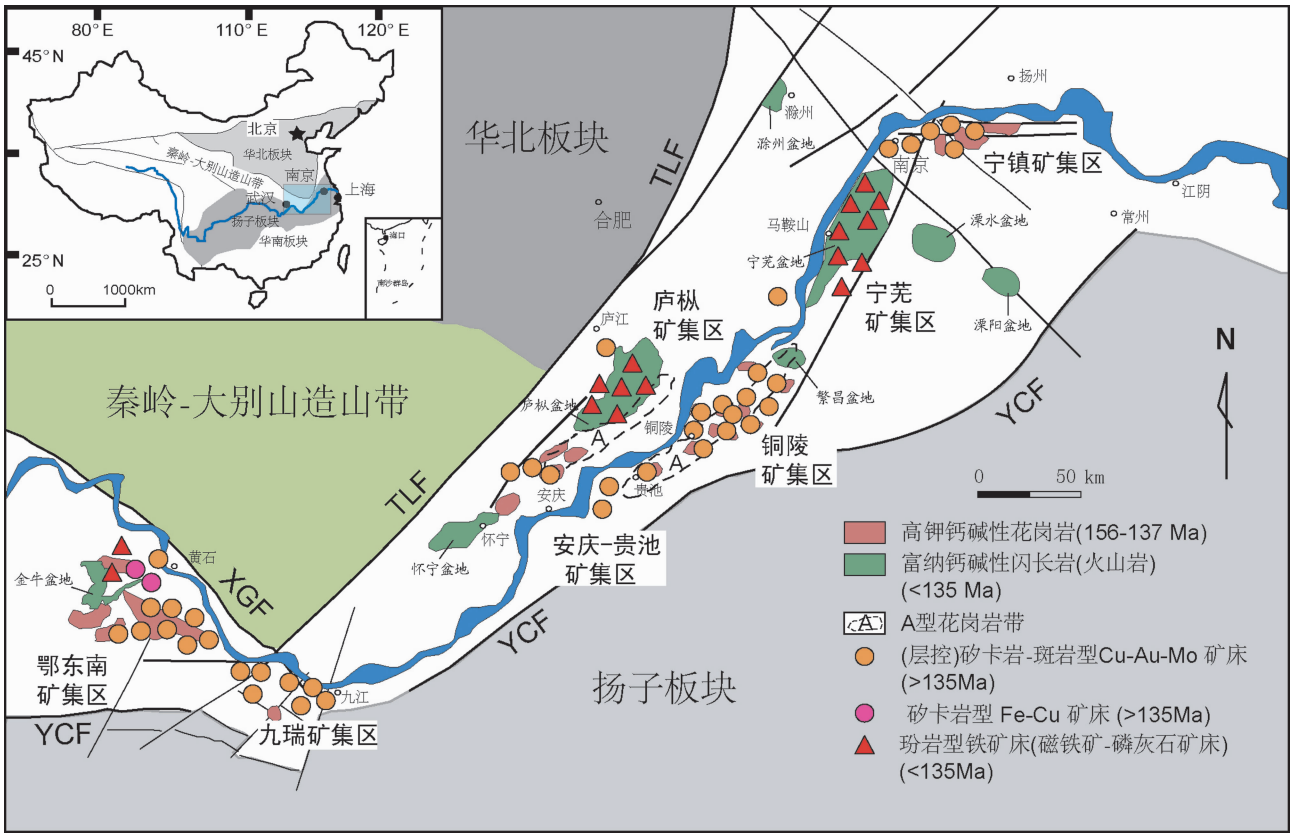


图 1 长江中下游成矿带主要矿集区及矿床分布略图(据 Mao *et al.*,2011)

Fig. 1 Map showing the distribution of the ore deposits in the Middle-Lower Yangtze River Valley metallogenic belt (after Mao *et al.*, 2011)

板块俯冲作用的影响,中侏罗纪-早白垩纪发育了大量的 NE-NNE 向断裂和褶皱,这种后期的构造作用叠加在早期的地质体之上,使得在长江中下游地区形成了许多白垩纪火山断陷盆地,例如:宁芜盆地、庐枞盆地等(图 1)。

长江中下游多金属成矿带内岩浆岩广泛分布并伴随有大量的 Cu-Fe-Au 矿床,其成岩作用可分为三个阶段:(1)高钾钙碱性中酸性岩,包括闪长岩、石英闪长岩和花岗质闪长岩(156 ~ 137Ma),属于 I 型花岗岩(Pei and Hong,1995; Xie *et al.*,2008)或者为磁铁矿型花岗岩(Ishihara,1977)。近些年,张旗等(2001,2004),Xu *et al.* (2002)、王强等(2001)、Wang *et al.* (2004a,b,2006,2007)和 Ling *et al.* (2009)将这类岩浆岩归类为埃达克岩类。与之伴随发育的矿产主要为矽卡岩-斑岩-层控型 Cu-Au-Mo-Fe 矿床(148 ~ 135Ma)。(2)发育于火山沉积盆地中的白垩纪次火山岩(135 ~ 123Ma)(Mao *et al.*, 2006),包括辉石闪长玢岩、闪长玢岩、正长花岗斑岩及与次火山岩产出相关的喷出岩。王德滋等(1996)认为他们应划分为橄榄粗玄岩。与之有关的矿产主要为玢岩型铁矿床(135 ~ 123Ma)。(3)A 型花岗岩(126.5 ~ 124.8Ma)。这类岩石分布较局限,发育于长江中部两侧 NE 向带内,两条 A 型花岗岩带展布长约 100km,与金矿化有关,包括:石英正长岩、正长岩、石英二长岩、碱性花岗岩及与其产出有关的响岩质火山岩(唐永成等,1998;倪若水等,1998;范裕等,2008)。

3 宁芜和庐枞盆地火山岩和次火山岩年龄

3.1 白垩纪盆地火山岩年龄

晚中生代火山岩盆地在长江中下游地区广泛发育,自西向东依次分布有金牛、怀宁、庐枞、繁昌、宁芜、溧水、溧阳盆地(图 1)。在这些火山岩盆地中均为中生代陆相地层(倪若水等,1998),由于陆相火山岩地层古生物标志不清(邓晋福等,1992),地层时代确定主要依据放射性同位素测年资料。但在 20 世纪 70-80 年代该区火山岩同位素测年方法主要为 K-Ar 法,所获得的年龄数据不仅偏新而且范围很宽(167 ~ 70Ma),造成许多年龄值和地质事实相矛盾(邓晋福等,1992;周涛发等,2008)。最近几年,通过精确测年,所有盆地火山岩和大多数次火山-次火山岩的成岩时代日渐明晰。

3.1.1 庐枞盆地火山岩年龄

庐枞火山岩盆地位于庐江县(庐)和枞阳县(枞)之间,受 4 组深大断裂控制。盆地基底西深东浅,属于继承式的中生代陆相盆地(任启江等,1991),火山岩出露面积约

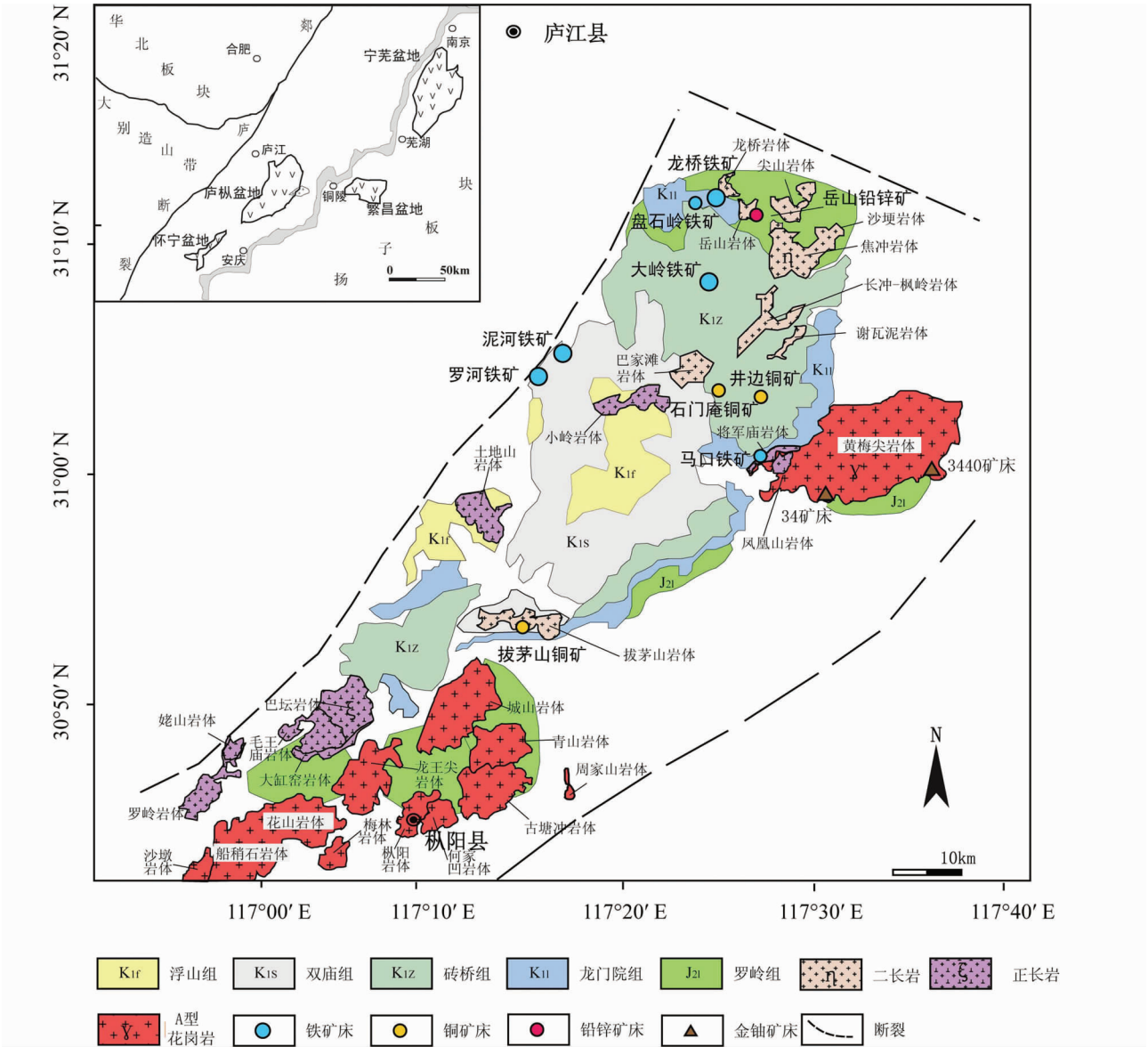


图 2 庐枞盆地岩浆岩及矿产分布地质图(据周涛发等,2010)

Fig. 2 Map showing the magmatic rocks and related ore deposits in the Luzong Cretaceous volcanic basin (after Zhou *et al.*, 2010)

800km^2。出露的沉积地层主要为中侏罗统罗岭组陆相碎屑沉积岩,与白垩纪火山岩系呈不整合接触。中生代燕山期岩浆活动在盆地内形成了大量橄榄安粗岩系火山岩组合,火山岩由老至新分为龙门院组、砖桥组、双庙组和浮山组。4 组火山岩在空间上大致呈同心环状分布,自盆地边缘至盆地中心依次出露龙门院组、砖桥组、双庙组和浮山组,各组之间均为喷发不整合接触(任启江等,1991),构成 4 个旋回。各旋回的火山活动均由爆发相开始,随后溢流相逐渐增多,最后以火山沉积相结束,喷发方式由裂隙-中心式向典型的中心式喷发演化。火山岩类由熔岩、碎屑熔岩、火山碎屑岩及次火山岩组成,火山碎屑岩的总量高于熔岩类。龙门院组主要分布在盆地边缘,以角闪粗安岩为特征岩性标志。砖桥组主要分布在庐枞火山岩盆地中部,以辉石粗安岩为特征岩性标志,构成了庐枞盆地火山岩的主体部分。双庙组主要分布在庐枞盆地中部和南部,以粗面玄武岩为特征岩性标志。浮山组仅在庐枞盆地中部仅零星分布,出露面积较小,以粗面质火山岩为主。4 组火山岩分层、厚度及岩性特征见图 2。周涛发等(2008)对庐枞盆地龙门院组、砖桥组、双庙组和浮山组火山岩进行了系统测年,获得年龄分别为 134.8 ± 1.8Ma、134.1 ± 1.6Ma、130.5 ± 0.8Ma 和 127.1 ± 1.2Ma,均属于早白垩世。

3.1.2 宁芜盆地火山岩年龄

宁芜火山岩盆地位于长江东侧(图 1),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

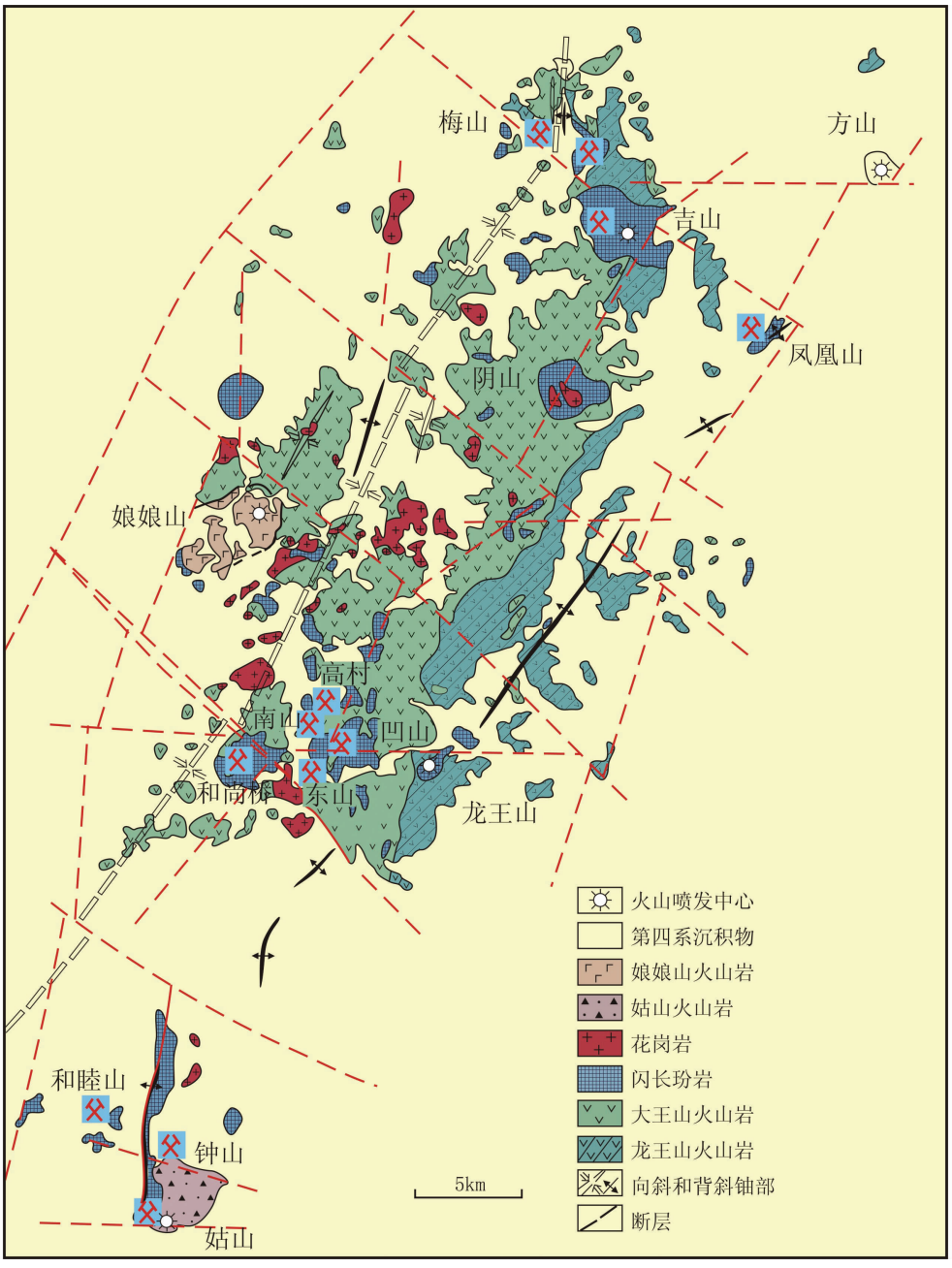


图 3　宁芜盆地岩浆岩及矿产分布地质图(据宁芜研究项目编写小组,1978)

Fig. 3　Map showing the magmatic rocks and related iron deposits in the Ningwu Cretaceous volcanic basin (after Ningwu Research Group, 1978)

南京至芜湖呈 NE-SW 向展布,长约 60km,宽约 20km,总面积 1200km^2,以中生代火山岩和铁矿床的广泛发育为特征(图 3)。矿集区内基底地层主要有三叠纪青龙群海相碳酸盐建造、周冲村组白云质灰岩和膏岩层、黄马青组砂页岩;侏罗纪象山群陆相碎屑岩建造、西横山组类磨拉石建造;白垩纪早期火山岩-次火山岩在宁芜盆地广泛发育,晚白垩世浦口组砂岩、砾岩,赤山组细砂岩、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;中国科学院地球化学研究所,1987)。宁芜盆地中火山岩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。其中,龙王山组(约占 20%)主要分布于盆地的东部和北部,由下部沉凝灰岩、粉砂质泥岩、火山集块岩和上部为粗面岩、橄榄玄粗岩、角闪石玄粗岩组成;大王山组是盆地火山岩的主体(占 75%),下部以辉石玄粗岩为主,中部为紫红色安山岩,上部为灰红色、浅灰色粗面岩、

粗面质熔结凝灰岩;姑山组和娘娘山组分布范围较少(5%),姑山组火山岩仅见于盆地南部和北部,主要为安山岩、英安岩、火山碎屑岩和沉积岩;娘娘山组火山岩仅见于盆地西部娘娘山一带,以白榴石响岩和蓝方石响岩为主的碱性火山岩组成,其火山活动方式及岩石成分均与其他火山岩旋回不同(王元龙等,2001)。通过对4组火山岩中熔岩的锆石LA-ICP-MS同位素定年,得到各组火山岩形成的时间分别为:龙王山组134.8±1.8Ma,大王山组132.2±1.6Ma、130.3±0.9Ma,姑山组129.5±0.8Ma、128.2±1.3Ma、128.5±1.8Ma和娘娘山组126.8±0.6Ma(周涛发等,2011;侯可军和袁顺达,2010)。火山岩浆活动发生的起止时间约为135~127Ma,持续时间在8~10Ma左右。

除了上述两个主要含矿盆地外,其他几个盆地火山岩的年龄也得到测定,由于每个盆地四组火山岩出露的完整程度不一致,因而所获得年龄资料有一定差别,其中金牛盆地火山岩为130±2Ma~124±2Ma之间(Xie *et al.*, 2011b),繁昌盆地内火山岩浆活动的时限约在135~128Ma之间(袁峰等,2010),滁州盆地为132~126Ma(谢成龙等,2007),溧水盆地为128.7Ma(禹尧和徐夕生,2009)和溧阳盆地为131~128Ma(毛建仁等,1994)。

3.2 盆地侵入岩(或次火山岩)年龄

相对于火山岩,获得的次火山岩精确年龄较少,主要集中于矿产资源丰富的庐枞盆地和宁芜盆地。

在庐枞盆地内部鉴别出34个侵入岩岩体(图2),它们与火山活动关系极为密切。这些侵入岩可以划分为早晚两期,早期侵入岩主要为二长岩和闪长岩类,以黄屯岩体、巴家滩岩体、焦冲岩体、龙桥岩体、谢瓦泥岩体、尖山岩体和拔茅山岩体为代表,成岩时代为134~130Ma;晚期侵入岩主要为正长岩类,以巴坛岩体、大缸窑岩体、罗岭岩体、龙王尖岩体和凤凰山岩体等为代表,成岩时代为129~123Ma(周涛发等,2010)。

此外,在庐枞盆地还有A型花岗岩,以枞阳岩体、花山岩体、城山岩体和黄梅尖岩体为代表,是平行长江的北侧A型花岗岩带的主要组成部分,不属于庐枞盆地火山岩的单元。其成岩时代126~123Ma,稍晚于庐枞火山岩盆地最晚喷发的浮山组火山岩(127.1±1.2Ma)(范裕等,2008)。

通过对宁芜盆地内含矿的辉石闪长玢岩体,包括吉山岩体、凹山岩体、陶村岩体、和尚桥岩体、东山岩体、白象山岩体、睦山岩体和姑山岩体进行了锆石LA-ICP-MS同位素测年,获得数据分别为128.2±1.0Ma、130.2±2.0Ma、131.7±0.7Ma、130.7±1.8Ma、131.1±1.5Ma、131.1±3.1Ma、130.0±1.4Ma、131.1±1.9Ma和129.2±1.7Ma(侯可军和袁顺达,2010;范裕等,2010a;段超等,2011)。对于成矿后的朱门和石山花岗岩体进行锆石LA-ICP-MS同位素定年,获得时代为127.1±1.2Ma和128.3±0.6Ma(侯可军和袁顺达,2010)。在凹山、东山、和尚桥和南山铁矿区发育有穿切铁矿体的花岗岩墙或小岩体,其成岩时代分别为126.1±0.5Ma、127.3±0.5Ma、126.3±0.4Ma和126.8±0.5Ma(段超等,待刊)。

4 矿床成矿时代

相对于岩体,矿床测年数据明显偏少,精确年龄更少。运用$^{40}Ar/^{39}Ar$同位素方法测定白象山铁矿及和睦山铁矿金云母Ar-Ar坪年龄分别为134.9±1.1Ma和132.9±1.1Ma,陶村铁矿金云母的反等时线年龄为128±14Ma(袁顺达等,2010);Zhou *et al.*(2011)获得龙桥铁矿金云母的$^{40}Ar/^{39}Ar$坪年龄130.5±1.1Ma,等时线年龄为131.9±2.7Ma。Yu and Mao(2004)测得钟九铁矿金云母的Ar-Ar年龄为126.7±0.17Ma,陶村和梅山铁矿钠长石的Ar-Ar年龄分别为124.89±0.30Ma和122.90±0.16Ma。后两组数据明显偏新,有待于检验。

5 矿床类型及概述

5.1 矿床分类

按照矿床产出的构造单元,分出隆起区和火山盆地两大类。按照成矿物质来源和成矿过程特点,将区内矿床分为8个类型:

隆起区:(1)矽卡岩型铁矿(程潮和金山店)。

火山盆地:(2)磷灰石-磁铁矿型铁矿(凹山、陶村、南山、和尚桥、泥河、罗河);(3)类矽卡岩型铁矿(梅山、吉山、太山、钟九、白象山、油坊村及和睦山);(4)矿浆型铁矿(姑山和太平山);(5)矽卡岩型铁矿(龙桥);(6)热液型硫-铜-金矿(何家大岭、何家小岭、向山、向山南、大鲍庄、和尚桥、罗河和泥河;梅山、井边、巴家滩和拔茅山);(7)热液型铜金矿(铜井、天头山和王庄);(8)热液型铅锌矿(岳山)。

按照矿床形成时代和有关次火山岩类,可鉴别出4个成矿系统:即在隆起区与石英闪长岩有关的矽卡岩铁矿(系统1);在火山盆地内,与大王山(或砖桥)旋回辉石闪长玢岩有关的铁多金属矿床(包括磷灰石-磁铁矿型铁矿、类矽卡岩型铁矿、矿浆型铁矿、热液型硫铜金矿、热液型铅锌矿)(系统2)和与二长岩有关的矽卡岩型铁矿(系统3);与娘娘山(或浮山)旋回火山-次火山活动有关的铜(金)矿和金铀矿(系统4)。

5.2 主要矿床类型概述

5.2.1 *磷灰石-磁铁矿型铁矿*

磷灰石-磁铁矿型铁矿是火山盆地最发育的矿床类型,也是玢岩铁矿成矿模式的核心部分。矿化发育于辉石闪长岩或辉石闪长玢岩的隆起部位,以细脉浸染状铁矿化为特点,主要矿物组合有:钠长石-绿泥石-磁铁矿,钠长石-绿帘石

(绿泥石)-磁铁矿-黄铁矿,阳起石-钠长石-磁铁矿-黄铁矿;在浸染状矿化之上沿裂隙发育脉状粗晶矿物组成的网状细脉,主要矿物组合为磁铁矿-阳起石-磷灰石,磁铁矿-磷灰石或磁铁矿集合体,在局部有绿泥石-磁铁矿-黄铁矿团块或球体,也有沿隐爆角砾岩呈填隙形式产出。在以磁铁矿为代表的矿化完成之后,黄铁矿细脉,石英细脉及石英-碳酸盐岩脉和碳酸盐岩脉的先后叠加形成。这类矿石往往构成较贫的矿石,以陶村(或高村)、南山及和尚桥为代表。当成矿温度较高,气液充足且在岩体隆起部位有较大裂隙时,出现粗晶、甚至巨晶阳起石(或透辉石)-磷灰石-磁铁矿-(±金云母)或钠长石-阳起石(或透辉石)-磷灰石-磁铁矿,叠加在细脉浸染状的矿石之上,通常构成高品位矿石,例如凹山。在这类矿床中普遍见到规模较大的隐爆角砾岩筒,角砾岩为强蚀变的辉石闪长玢岩类,填隙物质为磁铁矿-透辉石(阳起石)-磷灰石-绿泥石-黄铁矿集合体。从中心向外,由杂乱无章的强钠长石化角砾岩,到只有破裂没有位移且可拼接且蚀变程度弱的角砾岩,相应铁矿化也减弱。前人(宁芜研究项目编写小组,1978;常印佛等,1991;翟裕生等,1992)已经总结指出,这类矿化具有明显的围岩蚀变分带,从下向上为碱质蚀变带,以钠长石及钾长石发育为特征,还可见到退化蚀变的方沸石,葡萄石和水云母;中部深色蚀变带,以阳起石(或透辉石)-磁铁矿-磷灰石-(±方柱石或钠柱石)为特征,还有含水矿物绿泥石、绿帘石等,该带通常就是铁矿体的产出区域;上部浅色蚀变带,以泥化和硅化为特点,广泛发育高岭石-黄铁矿-石英,也有大量的硬石膏层或硬石膏化。在个别矿区后一个蚀变带就是硫矿体和/或石膏矿体,例如在泥河矿区,该带中的硫铁矿和硬石膏分别构成大型和中型规模(吴明安等,2011)。总体来看,前两个蚀变带出现在辉石闪长玢岩的隆起部位,而浅色蚀变带在围岩中。

5.2.2 类矽卡岩型铁矿

类矽卡岩型铁矿发育于宁芜火山盆地北部边缘的梅山矿田和南部边缘的钟九-姑山矿田。尽管这些矿区发育有以石榴石、透辉石、阳起石和金云母为代表的矽卡岩矿化,甚至有些矿体发育于辉石闪长玢岩与辉石安山岩的接触带或附近,但它们与通常所认知的矽卡岩不同,这些矽卡岩并非由岩浆分异出的流体与围岩碳酸盐岩相互作用的结果,而是由岩浆分异出流体对本身已凝固岩石交代的产物,因此称之为类矽卡岩。在梅山矿田,蚀变分带表现出从下向上为钠长石化(少量钾长石化)→钠柱石岩或透辉石钠长石岩→透辉石钙铁榴石岩→硅化→高岭石化(陈毓川等,1981)。后两种蚀变发育在接触带之上或之外的辉石安山岩中,其余在辉石闪长玢岩体内。透辉石钙铁榴石岩与磁铁矿化密切相关,从下部向上,由浸染状磁铁矿,到在透辉石钙铁榴石填隙状磁铁矿,最上部为块状磁铁矿。块状磁铁矿矿体的顶板为辉石安山岩,向下逐渐变成填隙状矿石和浸染状矿石。在块状磁铁矿矿石中也可以见到矽卡岩矿物的残留体,与其他两类所不同的是有磁铁矿大量堆积,相应矽卡岩矿物明显变少。在块状矿体中有诸多角砾,这些角砾明显比磁铁矿集合体早形成,但角砾本身也已经被交代成细粒磁铁矿集合体。在铁矿形成之后有石英黄铁矿细网脉的穿插,接着出现钾长石化和碳酸盐化。在吉山和太山矿区,富铁矿石很少,主要是填隙状和浸染状铁矿石,脉石矿物以透辉石和钙铁榴石为主,向深部出现大量钠柱石岩和钠长石岩。无论是上述三类矿石还是钠柱石岩,磷灰石都是一种重要的组成矿物。在钟山-姑山矿田的白象山、和睦山等矿区,含矿侵入体仍然是大王山旋回的辉石闪长玢岩,但围岩以上三叠统黄马青页岩为主。铁矿体主要发育于辉石闪长玢岩体与上三叠统黄马青组页岩的接触带,或沿裂隙产于接触带下部附近的岩体内部或延伸到岩体外部黄马青页岩中。在钟九矿区,可以见到矿体位于岩体下部与上三叠统周冲村组碳酸盐岩的接触带。无论围岩是哪一种岩石,其矿石矿物的组合基本相同,即金云母-磷灰石-阳起石-磁铁矿或钠长石-金云母(或白云母)-磁铁矿,类似于大冶地区的矽卡岩型铁矿(常印佛等,1991)。矿体下盘通常是钠长石化,上盘为由页岩受热变质形成的角岩,再向上出现高岭石化。即使在钟九矿区,上三叠统碳酸盐岩为围岩,也仅出现大理岩化。

5.2.3 矿浆型铁矿

姑山铁矿是矿浆型矿床的代表,铁矿体分布于辉石闪长玢岩体的上部隆起与上三叠统黄马青页岩的接触带,姑山组火山岩沉积覆盖其上(翟裕生等,1992),形态似钟状。矿石具有一系列典型矿浆成矿特点,流动构造,气孔构造,淬火构造,角砾构造,熔渣构造,菊花构造,条带构造和致密块状构造。其中角砾构造是蚀变辉石闪长玢岩为角砾,隐晶质铁矿物为胶结物;菊花构造为自形斜长石沿矿浆流动方向分布于隐晶质铁矿石中。在镜下观察,矿石主要矿物为赤铁矿(少量磁铁矿)-斜长石-石英。尽管在矿浆贯入之后,也有明显的热液活动,例如,硅化,高岭石化,绿泥石化和碧玉化,但与成矿关系不密切。

5.2.4 矽卡岩型铁矿

到目前为止,已知矽卡岩型铁矿仅有 3 处,在隆起区有程潮和金山店,其形成时代为 132.6±1.2Ma 和 131.6±1.2Ma(Xie *et al.*, 2011a),在庐枞盆地的龙桥,其形成时代为 130.5±1.1Ma(Zhou *et al.*, 2011)。这表明矽卡岩型矿床无论是在隆起区还是在火山盆地基本上是同时形成,而且与砖桥或大王山岩浆活动具有同时性。但是,矽卡岩铁矿有关的侵入岩不是辉石闪长玢岩,而是偏酸性和碱性岩石,例如,在龙桥铁矿区是二长岩(唐永成等,1998),在程潮和金山店矿区是石英闪长岩、闪长玢岩和二长花岗岩(Xie *et al.*, 2011a)。在龙桥矿区,早白垩世的二长岩侵位于上三叠统东马鞍山组钙质粉砂岩、灰质白云岩、白云岩夹碎屑岩和早白垩世龙门院组火山岩。沿东马鞍山组碳酸盐岩和钙质粉砂岩交代形成矽卡岩,主要由石榴石、透辉石-钙铁辉石、金云母、镁橄榄石和尖晶石组成,退化蚀变矿物有透闪石-阳起石、绿帘石和绿泥石。与侵入体接触的龙门院组火山岩和东

马鞍山组的碎屑岩遭受强烈的角岩化。矿石主要矿物组合为绿泥石-磁铁矿、透辉石-磁铁矿和金云母-磁铁矿。在磁铁矿形成之后,普遍发育黄铁矿或石英-黄铁矿-黄铜矿,局部铜可以达到工业品位。程潮和金山店铁矿位于鄂城和金山店岩体南部边缘,与下三叠统碳酸盐岩的接触,岩体主要由石英闪长岩、闪长玢岩和二长花岗岩组成。这两个矿床是典型矽卡岩矿床,金属矿物以磁铁矿为主,还有少量赤铁矿、黄铁矿和黄铜矿,脉石矿物透辉石、石榴石、金云母、绿帘石、绿泥石等。矿石有块状和浸染状,取决于磁铁矿与矽卡岩矿物及退化蚀变矿物含量的比例。上述三个矿床在矽卡岩矿化之后,都有热液活动,多表现为硅化和碳酸盐化。

5.2.5 *热液型硫-铜-金矿*

这类矿床可以分为热液型硫铁矿和热液型金铜(钼)矿,通常位于磷灰石-磁铁矿型和类矽卡岩型铁矿上部的浅色蚀变带中。越来越多证据表明热液型硫铁矿也含金和铜,所以两者趋同。

热液型硫铁矿包括何家大岭和何家小岭,在大鲍庄、和尚桥、罗河和泥河等铁矿床中,磁铁矿矿体上部也有规模较大的硫铁矿,构成大中型矿体。何家大岭和何家小岭以硫铁矿为主,磁铁矿矿体规模相对较小。与成矿有关的侵入体为辉石粗安玢岩或辉石闪长玢岩,围岩为龙门院组和砖桥组火山岩,成矿与次火山岩及火山机构关系密切(刘昌涛,1994)。何家大岭硫铁矿赋存于爆破角砾岩中,呈蘑菇状和囊状,而何家小岭硫铁矿体呈似层状出现在次火山岩体的隆起部位的内外接触带。和尚桥、向山、向山南、罗河和泥河矿区的硫铁矿体均在外接触带的火山岩中,有时与硬石膏矿层密切相关,伴随有硅化、泥化和高岭石化,其下部通常为磁铁矿矿体,相伴的围岩蚀变为磷灰石-阳起石化(胡文瑄,1990)。刘湘培(1989)、张少斌和范永香(1992)总结提出这些矿产在剖面上分布特点是,从下向上为磁铁矿矿体→硫铁矿→铜矿体或硬石膏矿体。

热液型金铜(钼)矿化在宁芜和庐枞火山盆地广泛分布,但成型矿床较少,以最近发现和探明的梅山 Au-Cu-Mo 矿为代表。该矿位于梅山铁矿的北东端,埋深于 400m 以下,发育于辉石闪长岩体顶部接触带,向外为大王山组火山角砾岩,通常出现在梅山铁矿体的边部。Au-Cu-Mo 矿体厚度 13 ~ 3m,平均 6 ~ 7m, 伴随有强硅化,石英与浸染状黄铁矿共生,品位一般较低,1 ~ 2g/t。其中有一层胶状黄铁矿层,具微细粒和胶状构造,含诸多黄铁矿角砾,但没有棱角,似乎有好的磨圆度,也属于高品位矿石,组成矿物有黄铁矿、黄铜矿、辉钼矿、方铅矿,更多是胶状黄铁矿,其中金最高品位可达 8g/t。阶段性勘查报告(陈华明等,2011①)表明初步探明金 5.7t,平均品位 2.5g/t,铜 4.7t,平均品位 0.35%,钼 1.05t,平均品位 0.078%。在庐枞火山盆地砖桥组火山中发育有井边、拔茅山和石门庵等小型铜金矿,过去曾推测为浮山火山旋回有关的成矿作用(翟裕生等,1992)。最近,张乐骏等(2010)对井边矿床中的安山斑岩和主成矿阶段石英中流体包裹体开展了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 和 Ar-Ar 同位素定年,获得了安山玢岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 133.2 ± 1.7Ma,石英流体包裹体 Ar-Ar 等时线年龄为 133.3 ± 8.3Ma。表明这些铜金矿化仍然与砖桥旋回岩浆活动有关。

5.2.6 *热液型铜金矿*

这类矿化在时空上与娘娘山-浮山旋回碱性火山-岩浆活动有关,以铜井金铜矿为代表。该矿床位于江苏省与安徽省交界处的娘娘山古火山口附近,为一个中型金和小型铜矿床。矿区内主要出露有娘娘山旋回的碱性火山岩,包括响岩、火山集块岩、熔结角砾岩和熔结凝灰岩,侵入岩有霓辉正长岩、白榴石斑岩和粗面斑岩。矿化呈含铜金石英脉和含铜金菱铁矿脉以及成矿期后的重晶石脉和石英脉方解石脉。矿脉受构造控制,成雁行状排列。赋矿围岩除了娘娘山组的碱性火山岩外,还有大王山辉石安山岩。除了铜井金铜矿外,最近在庐枞盆地探明的天头山和王庄铜金矿也属此类,具有类似的地质特征和成矿过程。

5.2.7 *热液型铅锌矿*

迄今为止,在火山盆地中仅见岳山铅锌矿一处,该矿床位于庐枞盆地庐江县黄屯镇,探明铅锌储量约 50 万吨。矿体呈似层状和脉状,产于粗安斑岩的内外接触带,赋矿围岩是粗安斑岩和中上三叠统和下侏罗统碎屑岩,矿化受接触带构造和一组张性断裂控制。矿石呈浸染状及细脉浸染状,主要由方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、白铁矿和自然银组成,主要脉石矿物为石英、绢云母、绿泥石、绿帘石、铁白云石和方解石(唐永成等,1998)。与成矿有关的围岩蚀变主要是硅化和粘土化。

除此之外,还有一些小型金铀矿,例如,3440 和 34,也被认为与浮山或娘娘山旋回火山活动有关。

6 成矿作用与矿床模型

长江中下游地区与白垩纪陆相火山-侵入岩有关的铁多金属矿床在空间上绝大多数发育于白垩纪火山盆地内,极个别在隆起区;成矿时间上可以分为两个时代,即 133 ~ 130Ma 和 125 ~ 127Ma。前者包括隆起区的矽卡岩型铁矿;火山盆地中的磷灰石-磁铁矿型铁矿,类矽卡岩型铁矿,矿浆型铁矿,矽卡岩型铁矿,热液型硫-铜-金矿和热液型铅锌矿。后者仅有热液型铜金矿。如前所述,从成因上可以将 8 类矿床归为 4 个成矿系统,即与辉石闪长玢岩有关的磷灰石-磁铁矿型铁多金属矿床(包括前述的磷灰石-磁铁矿型铁矿、矿浆型铁矿、类矽卡岩型铁矿、热液型硫-铜-金矿床和热液型铅锌矿),与二长-正长斑岩有关的龙桥式矽卡岩型铁矿和与石英闪长岩有关的程潮式矽卡岩型铁矿,虽然这三个系统矿床形

① 陈华明, 孙喜华, 蔡卫东, 张龙生. 2011. 江苏省南京市梅山铁矿接替资源勘查报告. 江苏省地质矿产局第一地质队(内部报告), 1 - 80

成时代大致在大王山-砖桥火山-岩浆活动旋回,但后两者比前者形成稍微晚一点,与之有关岩浆岩的酸性和碱性程度均增强。此外,还有与娘娘山-浮山碱性火山-岩浆活动有关的铜金矿床。

限于目前的研究程度,对于成矿过程的认识尚处于初级阶段。原始岩浆起源于富集岩石圈地幔形成基性的辉长质岩浆,其在深部发生过相对贫铁的单斜辉石和基性斜长石的分离结晶作用而形成富铁的闪长质岩浆。这种岩浆喷发形成辉石安山岩,高侵位形成辉石闪长玢岩。其成矿有两种途径,其一,以矿浆方式成矿,例如,姑山矿区块状矿石的高含量 P,Ti,REE 和高场强元素表明其是通过液态不混溶作用形成(Hou *et al.*, 2010,2011),也就是说通过液态不混溶作用形成铁矿浆。在辉石闪长玢岩岩体凝固晚期和期后,于上隆接触带由于凝固冷缩出现裂隙带,紧接着铁矿浆贯入,因而矿浆型铁矿石具有流动构造、空洞构造、井绳构造、气孔构造、纹层构造、角砾构造、淬火构造、炉渣构造和致密块状构造,矿石中的主要脉石矿物是斜长石及石英,部分具有定向排列,指示出流动方向。尽管在矿浆贯入成矿之后,也有高温到中低温热液活动,例如少见的金云母-透辉石矽卡岩化、硅化、高岭石化、绿泥石化和碳酸盐岩化,但与主体成矿关系不密切。其二,以流体形式成矿。一旦辉石闪长玢岩岩浆在上侵过程同化混染了三叠纪周冲村组膏岩层,岩浆中的 Na、S、Cl、P 和 Ca 等组分急剧增加,不仅导致岩浆固结熔点大幅度下降,而且形成大量富含挥发组分的气体和液体,并大大提升了对铁等金属元素的搬运能力。这些含矿气液形成之后开始对已经凝固的辉石闪长玢岩进行交代,其交代按照温度和浓度递减原理,在深部形成钠长石、钠柱石和方柱石(消耗 Na 和 Ca),原岩中的辉石和闪石被交代,甚至消失,铁镁质组分进入流体系统。随着温度降低,在岩体隆起部位开始大规模成矿,由于岩体与围岩之间是一个重要的物理化学界面,大量流体在岩体中交代沉淀成矿。如果岩体在结晶过程由于冷凝产生的裂隙系统不发育,则形成细脉浸染状磷灰石-阳起石-磁铁矿矿石(例如,陶村、泥河);如果裂隙系统发育不仅形成细脉浸染状磷灰石-阳起石-磁铁矿矿石,而且在裂隙较宽大的裂隙交代沉淀出粗晶,甚至巨晶磷灰石-阳起石-磁铁矿或磷灰石-阳起石-磁铁矿-金云母矿石(例如,凹山、罗河)。尽管网脉状裂隙是良好的控矿构造,接触界面及其在岩体内与接触带平行的引张裂面往往是有利的成矿空间(例如,钟九,白象山)。该成矿作用一般经过这次高温成矿作用后,流体中铁、镁、磷和硼在流体中减少,硫、铜、金、钙、氯和水相对增高,因此在岩体隆起部位的接触带发生中低温成矿作用,可见石英黄铁矿细网脉通常叠加在磁铁矿矿石之上。但更重要的矿化主要出现于外接触带,在平行接触带由于岩体冷凝引发的层间断裂或细网脉状断裂系统以及成矿前的有利构造,为成矿提供了良好的空间。所形成的矿体有硫铁矿(例如,向山、马山、何家小岭、和尚桥)、硫铁矿与石膏矿互层(例如大鲍庄,罗河和泥河),甚至铜矿(例如,罗河和何家小岭),在一些矿体中金可能是一种潜在资源(例如,何家小岭),有待于查证。在成矿的同时伴随有强烈的硅化、黄铁绢英岩化、泥化等。在宁芜和庐枞盆地,热液型硫-铜-金成矿强度不同,似乎庐枞盆地的辉石闪长玢岩岩浆在侵位前更大程度地与膏岩层进行过相互作用,因而硫铁矿和石膏矿及铜金矿规模更大。在一些矿床中暗色岩带磷灰石-磁铁矿矿体规模较小,而硫-铜-金矿及石膏矿更大(例如,大鲍庄、何家大岭和何家小岭)。上述的流体成矿作用是长江中下游白垩纪陆相火山-侵入活动期间的最普遍成矿方式。

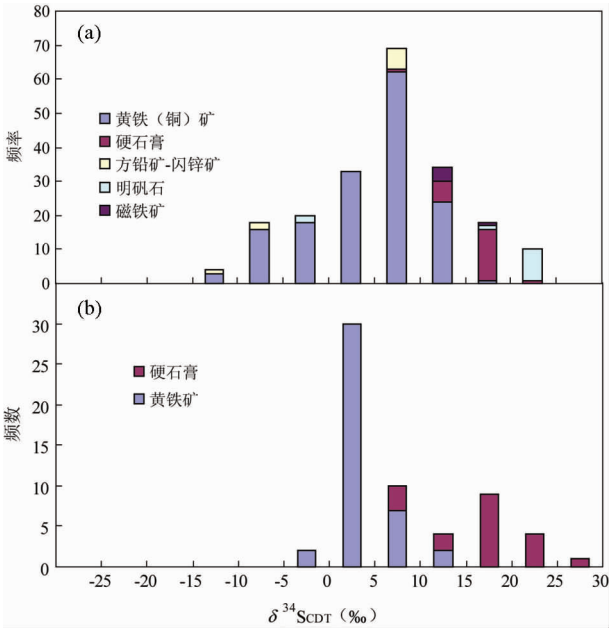


图 4 庐枞矿集区(a)和宁芜矿集区(b)矿石矿物硫同位素直方图

数据来自:张荣华等,1982;巫全淮等,1983;中国科学院地球化学研究所,1987;任启江等,1991;胡文瑄等,1991a,b;化工部地质研究院,1991①;吴长年等,1993;倪若水等,1994;吴明安等,1996;熊先孝和姚超美,2000,2001;杨晓勇等,2002;查世新和韩忠义,2002;唐敏慧,2008;范裕等,2010b;覃永军,2010

Fig. 4 Histograms showing the distribution of sulfur isotopic components of the ore deposits in the Luzong (a) and Ningwu (b) Cretaceous volcanic basins

另一方面,如果辉石闪长玢岩岩浆没有同化足够多膏岩层,将可能出现不同的成矿特点。岩浆结晶晚期形成的含矿流体对已经凝固了的岩体本身进行交代,在高温时形成方柱石化及钠长石化(例如,梅山和吉山)(主要消耗钙元素,其次为钠元素),原岩中的含铁镁矿物消失,而铁和镁进入流体系统,形成一种高浓度含铁流体(陈毓川等,1982)。这种流体运移到辉石闪长玢岩体隆起部位,并开始对已凝固岩石进

① 化工部地质研究院. 1991. 长江中下游硫铁矿成矿规律及其预测报告

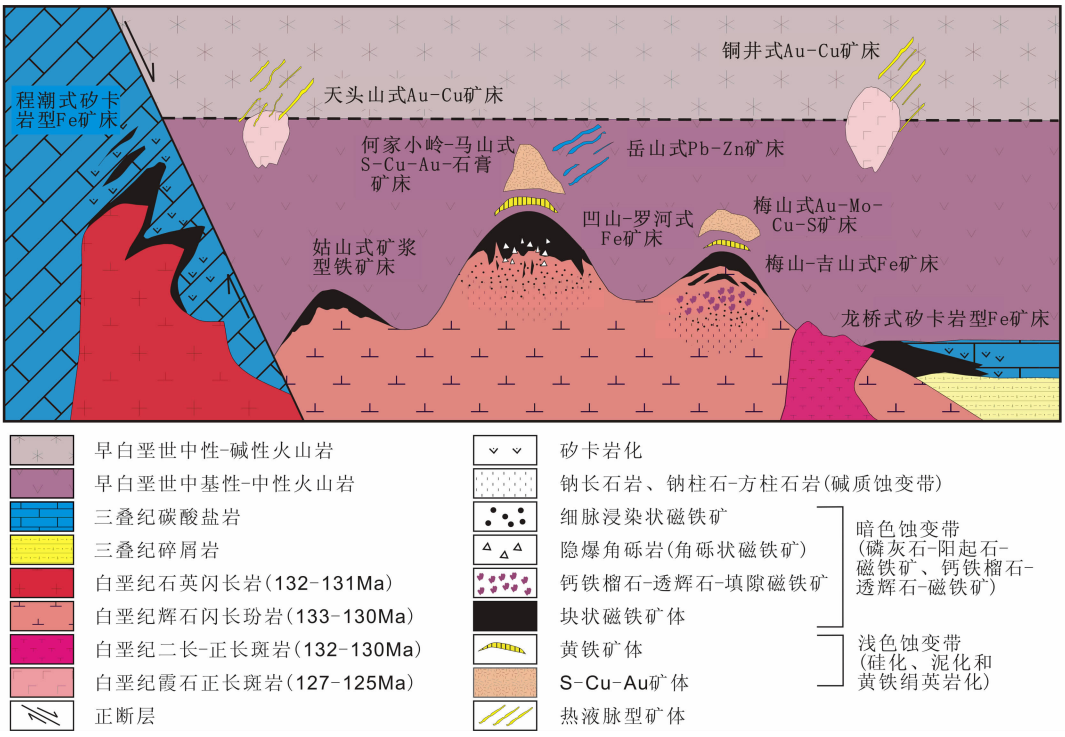


图 5 与陆相火山-侵入岩浆活动有关的铁多金属矿床模型

Fig. 5 Mineral deposit model of polymetallic iron deposits associated with Cretaceous terrestrial volcanic-intrusive rocks along the Middle-Lower Yangtze River Valley

行交代,形成以钙铁辉石-透辉石为代表的类矽卡岩,磁铁矿集合体填隙于钙铁榴石-透辉石之间,在接触界面大规模卸载成矿,构成富矿体(例如,梅山)。值得指出的是形成磷灰石-磁铁矿的流体成矿温度高,因而隐爆现象普遍,相应角砾状矿石不同程度在暗色岩带存在,个别甚至延伸到浅色蚀变带(例如,凹山)。

此外,正是由于岩浆在侵位过程与膏岩层的相互作用,在庐枞和宁芜两个盆地中矿石中的硫同位素值既呈现出宽广的变化范围,也清楚地显示出经历过均一化过程(图 4)。

龙桥和程潮、金山店矽卡岩矿被称之为两个成矿系统,是由于一个在火山盆地,另一个在隆起台地,与之有关的岩浆岩分别是二长岩和石英闪长岩,成矿物质来源有一定差别。但它们的共同之处是同为岩浆流体与三叠纪碳酸盐岩的相互作用的产物,几乎经历了相同的成矿过程,其成矿时间上也相近,分别为 130.5 ± 1.1Ma(Zhou *et al.*, 2011)和 132.6 ± 1.2Ma ~ 131.6 ± 1.2Ma(Xie *et al.*, 2011a),略晚于辉石闪长玢岩浆的侵位和有关成矿作用。从含矿岩浆岩的组分来看,从辉石闪长玢岩,到石英闪长岩和二长岩,是一个硅质和碱质增高和铁镁质降低趋向。由于同属于矽卡岩型铁矿,其成矿过程都是经历了以形成石榴石-辉石(透辉石-钙铁辉石过度系列)-金云母(局部少量镁橄榄石和尖晶石)矿物组合为特点的水/岩反应过程,随之是发生矽卡岩的退化蚀变作用,形成透闪石-阳起石-绿泥石-绿帘石组合,在矽卡岩阶段和退化蚀变阶段都有磁铁矿沉淀成矿,形成铁矿石。之后,出现以黄铁矿为主的硫化物阶段,伴随有少量黄铜矿。相对于程潮和金山店,位于火山盆地中的龙桥铁矿,可能曾出现过侵位岩浆与三叠纪周冲村组膏岩层的相互作用,其中硫化物含量远远高于前两者。在龙桥矿区,沿夹于三叠纪碎屑岩之间的碳酸盐岩和钙质砂岩-粉砂岩层位交代形成,钙镁质碳酸盐矿物被交代后,形成一系列具有层纹状构造的矽卡岩和矿层,通常被误认为是同生沉积和热液叠加的结果。在龙桥矿区也存在菱铁矿层,段超等(2009)研究认为属于同生沉积的产物。事实上,与新桥和大宝山斑岩-矽卡岩-Manto 型矿床相类似,广泛发育的菱铁矿的形成机制已经成为合理认识成这类矿床矿作用的瓶颈问题。

铜井、天头山和王庄热液脉型铜金矿成矿系统的成矿物质主要来自于地幔,与西南太平洋岛弧型斑岩铜金矿具有一定类似性,来自地幔的岩浆在侵位时没有经历过与地壳物质的大量而强烈的混染作用。事实上,这些矿化与娘娘山(或浮山)旋回的碱性岩浆活动有密切关系,成矿流体来自于碱性岩浆的结晶分异作用,成矿晚阶段有一定量大气降水的参与。

由于上述 4 个矿床系统及 8 类型矿床在时空上具有密切联系,都是同一构造-热-成矿时间的产物,初步建议一个与陆相火山-侵入岩有关铁多金属矿的成矿模型(图 5),这些不同类型矿床和不同矿床系统互为找矿的指示。

7 矿床模型的找矿意义

与陆相火山-次火山岩有关的矿床分布于火山盆地及其毗邻的隆起区。火山盆地是由区域大断裂走滑拉分所形成,整体处于一种岩石圈伸展环境。

上述4个系统8类矿床是同一成矿事件的产物,在成因上有着密切联系,不同成矿系统之间互为找矿的指示,即发现一种,就可能找到另一种。

在同一成矿系统,不同矿化蚀变分带也互为找矿的标志,例如,与辉石闪长玢岩有关的暗色岩带所赋存的铁矿与其上部浅色岩带有关的硫铜金-石膏矿之间有着密切的成因关系,互为找矿的指示。在以往找矿评价期间对于浅色岩带内硫铁矿中的金很少给予关注,是目前找矿评价的新目标。

在白垩纪火山盆地中,无论是大王山(或砖桥)岩浆活动旋回还是娘娘山(或浮山)岩浆活动有关的成矿作用,都是发生在火山口附近,并与下伏次火山岩有着成因联系。在地表利用遥感可以较好地确定破火山口,是找矿评价的有效方法。

针对磁铁矿找矿方法已经成熟,磁法是一种最有效的探测技术,在浅表找矿探测具有很好效果,而低缓弱异常可能是深部矿体的反映。

References

Chang YF, Liu XP and Wu CY. 1991. The Copper-Iron Belt of the Lower and Middle Reaches of the Changjiang River. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 379 (in Chinese with English abstract)

Chen YC, Sheng JF and Ai YD. 1981. Meishan iron deposit-An ore magma-hydrothermal deposit. Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences, 2(1): 25 – 48 (in Chinese with English abstract)

Chen YC, Zhang RH, Sheng JF and Ai YD. 1982. The mineralization and alteration of the porphyry iron deposits and their mechanism. Bulletin of Institute of Mineral Deposits, Chinese Academy of Geological Sciences, 1: 1 – 29 (in Chinese with English abstract)

Deng JF, Ye DL, Zhao HL and Tang HP. 1992. Volcanism, Deep Internal Processed and Basin Formation in the Lower Reaches of the Yangtze River. Wuhan: Publishing House of China University of Geosciences, 1 – 184 (in Chinese)

Duan C, Zhou TF, Fan Y, Yuan F, Ding M, Shang SG and Zhang LJ. 2009. Geological characteristics of siderite from Longqiao iron deposit in Luzong volcanic basin and their genetic significance. Mineral Deposits, 28(5): 643 – 652 (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)

Eide EA. 1995. A model for the tectonic history of HP and UHPM regions in east-central China. In: Coleman RG and Wang X (eds.). Ultrahigh Pressure Metamorphism. New York: Cambridge University Press, 391 – 426

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. 2010a. 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, Yuan F, Tang MH, Zhang LJ, Ma L and Xie J. 2010b. High sulfidation epithermal hydrothermal system in Lu-Zong volcanic basin: Evidence from geological characteristics and sulfur isotope data of Fanshan alunite deposit. Acta Petrologica Sinica, 26(12): 3657 – 3666 (in Chinese with English abstract)

Hou KJ and Yuan SD. 2010. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and Hf component of the magmatic rocks in Ningwu Cretaceous basin in Anhui Province and its geological significance. 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: 330 – 334

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: 333 – 346. doi: 10.1016/j.oregeorev.2011.09.014

Hu WX. 1990. Exhalative sedimentation and hydrothermal superimposition-transformation characteristics of the Xiangshannan pyrite deposit, Anhui Province. Mineral Deposits, 9(4): 375 – 384 (in Chinese with English abstract)

Hu WX, Hu SX and Zhao YC. 1991a. Sedimentary genesis of anhydrite deposits in the volcanic series and their relation to the pyrite deposits in Xiangshan district, Anhui Province. Geoscience, 5(2): 164 – 173 (in Chinese with English abstract)

Hu WX, Xu KQ, Hu SX and Ren QJ. 1991b. Exhalative Sedimentation and Hydrothermal Transformation-superimposition Iron and Pyrite Deposits in the Ningwu-Luzong Continental Volcanic Basins. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 150 (in Chinese)

Institute of Geochemistry, China Academy of Sciences. 1987. Ore-forming Mechanism of Ningwu Type Iron Deposits. Beijing: Science Press, 1 – 152 (in Chinese)

Ishihara S. 1977. The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks. Mining Geology, 27: 293 – 305

Lin JL, Zhang WY and Fuller M. 1985. Preliminary Phanerozoic polar wander paths for the North and South China blocks. Nature, 313: 444 – 449

Ling MX, Wang FY, Ding X, Hu YH, Zartman RE, Xiong XL and Sun WD. 2009. Cretaceous ridge subduction along the Lower Yangtze River belt, Eastern China. Economic Geology, 104: 303 – 321

Liu CT. 1994. Geological characteristics and ore-controlling factors of the pyrite deposits in Luzong basin, Anhui. Geology of Chemical Minerals, 16(3): 163 – 171 (in Chinese with English abstract)

Liu XP. 1989. The minerogenetic series and metallogenic models of ore deposits in the Middle-Lower Reaches of the Changjiang River. Geological Review, 35(5): 398 – 408 (in Chinese with English abstract)

Mao JR, Wang ZJ and Zheng JL. 1994. An approach to the open system magmatic activity in Daibu volcanic rocks, Liyang. Acta Petrologica Sinica, 10(1): 54 – 67 (in Chinese with English abstract)

Mao JW, Wang YT, Lehmann B, Yu JJ, Du AD, Mei YX, Li YF, Zang WS, Stein HJ and Zhou TF. 2006. Molybdenite Re-Os and albite $^{40}Ar/^{39}Ar$ dating of Cu-Au-Mo and magnetite porphyry systems in the Changjiang valley and metallogenic implications. Ore Geology Reviews, 29: 307 – 324

Mao JW, Xie GQ, Duan C, Pirajno F, Ishiyama D and Chen YC. 2011. 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. Ore Geology Reviews, 43(1): 294 – 314

Ni RS, Wu QC, Wang XY, Wu MA and Zhang QM. 1994. New data and evolutionary model of polymineralization for the Longqiao iron deposit, Lujiang, Anhui. Geological Review, 40(6): 565 – 575 (in Chinese with English abstract)

Ni RS, Wu QC, Yue WZ, Zhang DB and Wang HT. 1998. The Evolution and Mineralization of Terrestrial Basins from the Lower Yangtze Region. Shanghai: Shanghai Science and Technology Literature Publishing House, 1 – 118 (in Chinese)

Ningwu Research Group. 1978. Magnetite Porphyry Deposits in Ningwu Area. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 196 (in Chinese)

Pei RF and Hong DW. 1995. The granites of South China and their metallogeny. Episodes, 18: 77 – 86

Qin YJ. 2010. Research on Yanshanian metallogenic geodynamic setting and metallogenic model in Lu-Zong basin, Anhui Province. Master Degree Thesis. Wuhan: China University of Geosciences, 1 – 149 (in Chinese with English summary)

Ren QJ, Liu XS, Xu ZW, Qiu DT, Hu WX, Fang CQ, Ruan HC, Dong HG, Li ZL and Wu QZ. 1991. Mesozoic Volcanic Structural Depression and Its Mineralization in Luzong Region of Anhui. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 206 (in Chinese)

Tang HM. 2008. Study on geological characteristics and ore genesis of Da Fanshan alunite deposit in Luzong basin, Anhui. Master Degree Thesis. Hefei: Hefei University of Technology, 1 – 94 (in Chinese with English summary)

Tang YC, Wu CY, 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)

Wang DZ, Ren QJ, Qiu JS, Chen KR, Xu ZW and Zeng JH. 1996. Characteristics of volcanic rocks in the shoshonite province, eastern China, and their metallogenesis. Acta Geologica Sinica, 70(1): 23 – 34 (in Chinese with English abstract)

Wang Q, Zhao ZH, Xiong XL and Xu JF. 2001. Melting of the underplated basaltic lower crust: Evidence from Shaxi adakitic sodic quartz dirorite-porphyrites, Anhui Province, China. Geochimica, 30(4): 353 – 362 (in Chinese with English abstract)

Wang Q, Zhao ZH, Bao ZW, Xu JF, Liu W, Li CF, Bai ZH and Xiong XL. 2004a. Geochemistry and petrogenesis of the Tongshankou and Yinzu adakitic intrusive rocks and the associated porphyry copper-molybdenum mineralization in southeast Hubei, East China. Resource Geology, 54: 137 – 152

Wang Q, Xu JF, Zhao ZH, Bao ZW, Xu W and Xiong XL. 2004b. Cretaceous high-potassium intrusive rocks in the Yueshan-Hongzhen area of east China: Adakites in an extensional tectonic regime within a continent. Geochemical Journal, 38: 417 – 434

Wang Q, Wyman DA, Xu JF, Zhao ZH, Jian P, Xiong XL, Bao ZW, Li CF and Bai ZH. 2006. Petrogenesis of Cretaceous adakitic and shoshonitic igneous rocks in the Luzong area, Anhui Province (eastern China): Implications for geodynamics and Cu-Au mineralization. Lithos, 89: 424 – 446

Wang Q, Wyman DA, Xu JF, Zhao ZH, Jian P and Zi F. 2007. Partial melting of thickened or delaminated lower crust in the middle of eastern China: Implications for Cu-Au mineralization. Journal of Geology, 115: 149 – 161

Wang YL, Zhang Q and Wang Y. 2001. Geochemical characteristics of volcanic rocks from Ningwu area, and its significance. Acta Petrlogica Sinica, 17(4): 565 – 575 (in Chinese with English abstract)

Wu CN, Ren QJ, Ruan HC and Hu WX. 1993. Pyrite deposits of the Hejia-Xiaoling mine, Lujiang-Zongyang basin, Anhui Province: Characteristics and genesis. Geotectonica et Metallogenic, 17(3): 229 – 237 (in Chinese with English abstract)

Wu MA, Zhang QM, Wang XY, Gao CS, Shang SG and Wang MH. 1996. Longqiao Iron Deposit in Lujiang, Anhui. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 172 (in Chinese)

Wu MA, Hou MJ and Zhao WG. 2007. Mineralization regularity and exploration direction in Luzong area, Anhui. Resources Survey and Environment, 28(4): 269 – 277 (in Chinese with English abstract)

Wu MA, Wang QS, Zheng GW, Cai XB, Yang SX and Di QS. 2011. Discovery of the Nihe iron deposit in Lujiang, Anhui, and its exploration significance. Acta Geologica Sinica, 85(5): 802 – 809 (in Chinese with English abstract)

Wu QH, Wang HT, Zhang CS and He JR. 1983. Sulfur isotope studies of the Dabaozhuang and Luohuo iron deposits with an approach to their genesis. Mineral Deposits, 2(4): 26 – 34 (in Chinese with English abstract)

Xie CL, Zhu G, Niu ML and Wang YS. 2007. LA-ICP MS zircon U-Pb ages of the Mesozoic volcanic rocks from Chuzhou area and their tectonic significances. Geological Review, 53(5): 642 – 655 (in Chinese with English abstract)

Xie GQ, Mao JW, Li LR and Beirlein F. 2008. Geochemistry and Nd-Sr isotopic studies of Late Mesozoic granitoids in the southeastern Hubei Province, Middle-Lower Yangtze River belt, Eastern China: Petrogenesis and tectonic setting. Lithos, 104: 216 – 230

Xie GQ, Mao JW, Li RL, Jiang GH, Zhao CS, Zhao HJ, Hou KJ and Pan HJ. 2008. ^{40}Ar-^{39}Ar phlogopite dating of large skarn Fe deposits and tectonic framework in southeastern Hubei Province, Middle-Lower Reaches of the Yangtze River, East China. Acta Petrologica Sinica, 24(8): 1917 – 1927 (in Chinese with English abstract)

Xie GQ, Mao JW, Zhao HJ, Duan C and Yao L. 2011a. Zircon U-Pb and phlogopite ^{40}Ar-^{39}Ar age of the Chengchao and Jinshandian skarn Fe deposits, southeast Hubei Province, Middle-Lower Yangtze River Valley metallogenic belt, China. Mineralium Deposita, doi: 10.1007/s00126 – 011 – 0367 – 2

Xie GQ, Mao JW, Li XW, Duan C and Yao L. 2011b. Late Mesozoic bimodal volcanic rocks in the Jinniu basin, Middle-Lower Yangtze River Belt (YRB), East China: Age, petrogenesis and tectonic implications. Lithos, 127: 144 – 146

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)

Xiong XX and Yao CM. 2001. New thoughts on formation of Xiangshan-type pyrite deposit in Nanjing-Wuhu region. Geology of Chemical Minerals, 23(2): 93 – 100 (in Chinese with English abstract)

Xu JF, Shinjo R Defant MJ, Wang Q and Rapp RP. 2002. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China: Partial melting of delaminated lower continental crust. Geology, 30: 1111 – 1114

Yang XY, Wang KR, Sun LG, Yang XM, Huang DZ, Li YX and Shi KF. 2002. A study on metallogenic geochemistry and delineation for mineralization target in Shaxi Cu-Au porphyry deposit. Geotectonica et Metallogenic, 26(3): 263 – 270 (in Chinese with English abstract)

Yu JJ and Mao JW. 2004. ^{40}Ar-^{39}Ar dating of albite and phlogopite from porphyry iron deposits in the Ningwu basin in east-central China and its significance. Acta Geologica Sinica, 78(2): 435 – 442

Yu Y and Xu XS. 2009. Cretaceous alkali-rich magmatism in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River. Earth Science, 34(1): 105 – 116 (in Chinese with English abstract)

Yuan F, Zhou TF, Fan Y, Huang YM and Zhang LJ. 2010. LA-ICPMS U-Pb ages of zircons from Mesozoic volcanic rocks and their significance in Fanchang basin, Anhui Province, China. Acta Petrologica Sinica, 26(9): 2805 – 2817 (in Chinese with English abstract)

Yuan SD, Hou KJ and Liu M. 2010. 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. Acta Petrologica Sinica, 26(3): 797 – 808 (in Chinese with English Abstract).

Zha SX and Han ZY. 2002. Geochemical characteristics and genetic study of Yueshan Ag-Pb-Zn deposit, Anhui. Resources Survey and Environment, 23(4): 272 – 280. (in Chinese with English abstract)

Zhai YS, Yao SZ, Lin XD, Zhou XR, 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)

Zhai YS, Xiong YY, Yao SZ and Liu XD. 1996. Metallogeny of copper and iron deposits in the Eastern Yangtze Craton, east-central China. Ore Geology Reviews, 11: 229 – 248

Zhang LJ, Zhou TF, Fan Y, Yuan F, Ma L and Qian B. 2010. Dating of copper mineralization in Jingbian deposit and its prospecting significance in Luzong basin, Anhui Province. Acta Petrologica Sinica, 26(9): 2729 – 2738 (in Chinese with English abstract)

Zhang Q, Wang Y, Qian Q, Yang JH, Wang YL, Zhao TP and Guo GJ. 2001. The characteristics and tectonic-metallogenic significances of the adakites in Yanshan Period from eastern China. Acta Petrologica Sinica, 17(2): 236 – 244 (in Chinese with English abstract)

Zhang Q, Jian P, Liu DY, Wang YL, Qian Q, Wang Y and Xue HM. 2003. SHRIMP dating of volcanic rocks from Ningwu area and geological implication. Science in China (Series D), 33(4): 309 – 314 (in Chinese)

Zhang Q, Qin KZ, Wang YL, Zhang FQ, Liu HT and Wang Y. 2004. Study on adakite broadened to challenge the Cu and Au exploration in China. Acta Petrologica Sinica, 20(2): 195 – 204 (in Chinese with English abstract)

Zhang RH, Sheng JF and Lu CQ. 1982. The mineralizing alteration and the sources of ore-forming materials at Lu-Zong volcanic basin. Bulletin of the Institute of Mineral Deposits, Chinese Academy of Geological Sciences, (2): 51 – 64 (in Chinese with English abstract)

Zhang SB and Fan YX. 1992. Volcanic basin in northern Anhui Province Luzong iron-sulfur porphyry-type polymetallic deposit series and deposits positioning mechanism research. Earth Science, 1: 24 – 25 (in Chinese)

Zhao X and Coe R. 1987. Paleomagnetic constraints on the collision and rotation of North and South China. Nature, 327: 141 – 144

Zhou TF, Fan Y, Yuan F, Lu SM, Shang SG, Cooke DR, 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), 38(11): 1342 – 1353 (in Chinese)

Zhou TF, Fan Y, Yuan F, Song CZ, Zhang LJ, Qian CC, Lu SM and Cooke DR. 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, Wu MA, Fan Y, Duan C, Yuan F, Zhang LJ, Liu J, Qian B, Pirajno F and Cooke DR. 2011. Geological, geochemical characteristics and isotope systematics of the Longqiao iron deposit in the Lu-Zong volcano-sedimentary basin, Middle-Lower Yangtze (Changjiang) River Valley, Eastern China. Ore Geology Reviews, 43: 154 – 169. doi: 10.1016/j.oregeorev.2011.04.004.

Zhou TF, Fan Y, Yuan F, Zhang LJ, Qian B, Ma L, Yang XF and Cooke DR. 2011. Geochronology and significance of volcanic rocks in the Ning-Wu basin of China. Scientia Sinica (Terrae), 41(7): 960 – 971 (in Chinese)

附中文参考文献

查世新, 韩忠义. 2002. 岳山银铅锌矿床地球化学特征. 资源调查与环境, 23(4): 272 – 280

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

陈毓川, 盛继福, 艾永德. 1981. 梅山铁矿——一个矿浆热液矿床. 中国地质科学院院报矿床地质研究所所刊, 2(1): 25 – 48

陈毓川, 张荣华, 盛继福, 艾永德. 1982. 玢岩铁矿矿化蚀变作用及成矿机理. 中国地质科学院矿床地质研究所所刊, 1: 1 – 29

邓晋福, 叶德隆, 赵海岭, 汤海平. 1992. 下扬子地区火山作用深部过程盆地形成. 武汉: 中国地质大学出版社, 1 – 184

段超, 周涛发, 范裕, 袁峰, 丁铭, 尚世贵, 张乐骏. 2009. 庐枞盆地龙桥铁矿床中菱铁矿的地质特征和成因意义. 矿床地质, 28(5): 643 – 652

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

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. 2010a. 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, 袁峰, 唐敏慧, 张乐骏, 马良, 谢杰. 2010b. 庐枞盆地高硫化型浅成低温热液成矿系统:来自矾山明矾石矿床地质特征和硫同位素地球化学的证据. 岩石学报, 26(12): 3657 – 3666

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

胡文瑄. 1990. 安徽向山南硫铁矿的沉积-喷气沉积与热液叠加改造特征. 矿床地质, 9(4): 375 – 384

胡文瑄, 胡受奚, 赵玉琛. 1991a. 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, 胡受奚, 任启江. 1991b. 宁芜和庐枞地区陆相火山喷气沉积-热液叠加改造型铁、硫矿体. 北京:地质出版社, 1 – 150

刘昌涛. 1994. 安徽庐枞盆地硫铁矿床地质特征及控矿因素. 化工矿产地质, 16(3): 163 – 171

刘湘培. 1989. 长江中下游地区矿床系列和成矿模式. 地质论评, 35(5): 398 – 408

毛建仁, 王中杰, 郑济林. 1994. 栗阳戴埠火山岩开放体系岩浆活动探讨. 岩石学报, 10(1): 54 – 67

倪若水, 吴其初, 汪祥云, 吴明安, 张千明. 1994. 安徽庐江龙桥矿层新资料及成矿作用多阶段演化模式. 地质论评, 40(6): 565 – 575

倪若水, 吴其初, 岳文浙, 张德宝, 王华田. 1998. 长江中下游中生代陆相盆演化与成矿作用. 上海:上海科学技术文献出版社, 1 – 118

宁芜研究项目编写小组. 1978. 宁芜玢岩铁矿. 北京: 地质出版社, 1 – 196

覃永军. 2010. 安徽庐枞盆地燕山期成矿地球动力学背景及成矿模式. 硕士学位论文. 武汉:中国地质大学, 1 – 149

任启江, 刘孝善, 徐兆文, 邱德同, 胡文瑄, 方长泉, 阮惠础, 董火根, 李兆麟, 吴启志. 1991. 安徽庐枞中生代火山构造洼地及其成矿作用. 北京:地质出版社, 1 – 206

唐敏慧. 2008. 安徽庐枞盆地大矾山明矾石矿床地质特征及成因研究. 硕士学位论文. 合肥:合肥工业大学, 1 – 94

唐永成, 吴昌言, 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

王德滋, 任启江, 邱检生, 陈克荣, 徐兆文, 曾家湖. 1996. 中国东

部橄榄安粗岩省的火山岩特征及其成矿作用. 地质学报, 70(1): 23 – 34

王强, 赵振华, 熊小林, 许继锋. 2001. 底侵玄武质下地壳的熔融: 来自安徽沙溪 adakite 质富钠石英闪长玢岩的证据. 地球化学, 30(4): 353 – 362

王元龙, 张旗, 王焰. 2001. 宁芜火山岩的地球化学特征及其意义. 岩石学报, 17(4): 565 – 575

巫全淮, 王华田, 章纯荪, 贺菊瑞. 1983. 大鲍庄和罗河铁矿区硫同位素特征及其成因的探讨. 矿床地质, 2(4): 26 – 34

吴长年, 任启江, 阮惠础, 胡文瑄. 1993. 安徽庐枞盆地何家小岭黄铁矿床特征和成因研究. 大地构造与成矿学, 17(3): 229 – 237

吴明安, 张千明, 汪祥云, 高昌生, 尚世贵, 王明华. 1996. 安徽庐江龙桥铁矿. 北京: 地质出版社, 1 – 172

吴明安, 侯明金, 赵文广. 2007. 安徽省庐枞地区成矿规律及找矿方向. 资源调查与环境, 28(4): 269 – 277

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

谢成龙, 朱光, 牛漫兰, 王勇生. 2007. 滁州中生代火山岩 LA-ICP MS 锆石 U-Pb 年龄及其构造地质学意义. 地质论评, 53(5): 642 – 655

谢桂青, 毛景文, 李瑞玲, 蒋国豪, 赵财胜, 赵海杰, 侯可军, 潘怀军. 2008. 鄂东南地区大型矽卡岩型铁矿床金云母^{40}Ar-^{39}Ar 同位素年龄及其构造背景初探. 岩石学报, 24(8): 1917 – 1927

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

熊先孝, 姚超美. 2001. 宁芜向山式硫铁矿地质及矿床成因新探. 化工矿床地质, 23(2): 93 – 100

杨晓勇, 王奎仁, 孙立广, 杨学明, 黄德志, 李英贤, 石昆发. 2002. 沙溪斑岩型铜(金)矿床成矿地球化学研究及靶区圈定. 大地构造与成矿学, 26(3): 263 – 270

禹尧, 徐夕生. 2009. 长江中下游地区白垩纪富碱火山岩浆作用. 地球科学, 34(1): 105 – 116

袁峰, 周涛发, 范裕, 黄贻梅, 张乐骏. 2010. 安徽繁昌盆地中生代火山岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其意义. 岩石学报, 26(9): 2805 – 2817

袁顺达, 侯可军, 刘敏. 2010. 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. 岩石学报, 26(3): 797 – 808

翟裕生, 姚书振, 林新多, 周珣若, 万天丰, 金福全, 周永桂. 1992. 长江中下游地区铁铜(金)成矿规律. 北京: 地质出版社, 1 – 235

张乐骏, 周涛发, 范裕, 袁峰, 马良, 钱兵. 2010. 安徽庐枞盆地井边铜矿床的成矿时代及其找矿指示意义. 岩石学报, 26(9): 2729 – 2738

张旗, 王焰, 钱青, 杨进辉, 王元龙, 赵太平, 郭光军. 2001. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造成矿意义. 岩石学报, 17(2): 236 – 244

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. 中国科学(D 辑), 33(4): 309 – 314

张旗, 秦克章, 王元龙, 张福勤, 刘红涛, 王焰. 2004. 加强埃达克岩研究, 开创中国 Cu、Au 等找矿工作的新局面. 岩石学报, 20(2): 195 – 204

张荣华, 盛继福, 陆成庆. 1982. 庐枞火山岩盆地的矿化蚀变与矿质来源. 中国地质科学院矿床地质研究所所刊, (2): 51 – 64

张少斌, 范永香. 1992. 安徽省庐枞火山岩盆地北部玢岩型铁硫多金属矿床系列及矿床定位机制研究. 地球科学, 1: 24 – 25

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

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, Cooke DR. 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, 钱兵, 马良, 杨西飞, Cooke DR. 2011. 宁芜(南京-芜湖)盆地火山岩的年代学及其意义. 中国科学(地球科学), 41(7): 960 – 971