

# 长江中下游成矿带火山岩盆地的成岩成矿作用

周涛发, 范裕, 袁峰, 张乐骏, 马良, 钱兵, 谢杰

合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥, 230009

**内容提要:**长江中下游成矿带是我国重要的铜铁多金属成矿带, 其中发育溧水、溧阳、宁芜、繁昌、庐枞、怀宁和金牛盆地等火山岩盆地。与成矿带中断隆区相比, 火山岩盆地内的成岩成矿作用研究仍显滞后。本文综合已有研究工作和资料, 以庐枞盆地和宁芜盆地为主, 探讨长江中下游地区火山岩盆地的地质特征、岩浆岩时空格架、地球化学特征及成矿作用和成矿模式等。长江中下游成矿带火山岩盆地内岩浆岩的年代学研究表明, 各陆相火山岩盆地内岩浆岩均形成于早白垩世(135~123Ma), 不同盆地内各旋回火山活动时间几乎相同, 盆地中侵入岩的分期、岩性和成岩时代也大致可以对比。地球化学特征研究表明, 盆地内早晚两旋回火山岩与两期侵入岩在岩浆起源、岩浆演化特征、岩石成因等方面一致, 可以完全对应。岩浆源区为成分接近富集的交代地幔, 交代地幔的形成与古板块的俯冲交代作用有关。岩浆演化经历了结晶分异作用和同化混染作用, 岩浆结晶分异作用主要发生于深部岩浆房中。长江中下游成矿带火山岩盆地中成矿作用以铁矿化为主, 产出以著名的“玢岩铁矿”矿床组合为特征的一系列不同类型的火山-次火山热液型和沉积改造型等铁矿床及硫铁矿、硬石膏和明矾石矿床。矿床地质地球化学特征研究表明, 铁矿床和次火山岩(闪长玢岩)关系密切, 其形成还受火山构造和基底膏盐层等控制和影响。成矿年代学研究证实不同玢岩型矿床的成矿时代基本一致, 均为130Ma左右, 盆地内铁成矿作用是在较短时间(1~2Ma)内集中“爆发式”形成的。综合火山岩盆地成岩成矿作用特征, 本文建立了长江中下游成矿带火山岩盆地的成岩成矿模式, 并认为火山岩盆地成岩成矿作用是中国东部中生代构造-岩浆-成矿系统演化的有机组成部分, 受中国东部中生代地球动力学背景的制约。

**关键词:** 火山岩盆地; 地球化学特征; 成岩成矿作用; 成矿模式; 长江中下游成矿带

长江中下游成矿带是我国重要的铜铁多金属成矿带之一(常印佛等, 1991; 翟裕生等, 1992; 唐永成等, 1998; 周涛发等, 2008)。区内中生代燕山期岩浆活动和成矿作用强烈, 在断隆区形成了宁镇、铜陵、安庆-贵池、九瑞和鄂东南等矿集区, 发育了以花岗闪长岩-石英闪长岩为主的高钾钙碱性中酸性侵入岩, 产出砂卡岩-斑岩型铜金矿床(杜建国等, 2003; 毛景文等, 2004; 王彦斌等, 2004; 张达等, 2006; 杨晓勇, 2006; 张乐骏等, 2008; 周涛发等, 2000, 2008; 吴淦国等, 2008; 蒋少涌等, 2010)。在断凹区由东向西顺次有溧水、溧阳、宁芜、繁昌、庐枞、怀宁和金牛盆地等火山岩盆地(图1), 这些火山岩盆地主要为北

北东向, 具有拉分盆地的性质, 发育一套橄榄安粗岩质火山-侵入岩, 产生了以著名的“玢岩铁矿”组合为特征的火山-次火山热液型和沉积改造型等铁矿床及硫铁矿、硬石膏和明矾石矿床(宁芜玢岩铁矿编写组, 1978; 周涛发等, 2008, 2010; 范裕等, 2010)。近年来, 长江中下游成矿带岩浆作用的时代、地球化学特征、深部过程及其成矿作用的相关研究取得了重要进展, 但与成矿带内的断隆区相比, 火山岩盆地内的成岩成矿作用研究仍显滞后。上述火山岩盆地以宁芜盆地和庐枞盆地出露面积最大, 成矿规模大, 矿产种类多, 其他盆地只发现规模不大的金属和非金属矿床。火山岩盆地内成矿作用的差异与岩浆的来

注: 本文为国家自然科学基金项目(编号 40830426, 40803015)、国家“深部探测技术与实验研究专项计划”专题(编号 SinoProbe-03-02-05)及国土资源部公益性行业科研专项项目课题(编号 201011047-07)、中国地质调查局地质调查工作项目(编号 1212011121115)、“十一五”国家科技支撑计划项目(编号 2009BAB43B02)、高等学校博士学科点专项科研基金(编号 201001111110010)、安徽省地质公益性地质项目(编号 2007-1)和新世纪优秀人才支持计划项目(编号 NCET-10-0324)资助的成果。

收稿日期: 2010-11-12; 改回日期: 2011-03-15; 责任编辑: 郝梓国。

作者简介: 周涛发, 男, 1964年生。教授, 博士生导师。主要从事矿床学、地球化学和矿山环境等方面的教学和科研工作。Email: tfzhou@hfut.edu.cn。

DOI: CNKI:11-1951/P. 20110511. 2140. 004 网络出版时间: 2011-5-11 21:40:17

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1951.P.20110511.2140.004.html>

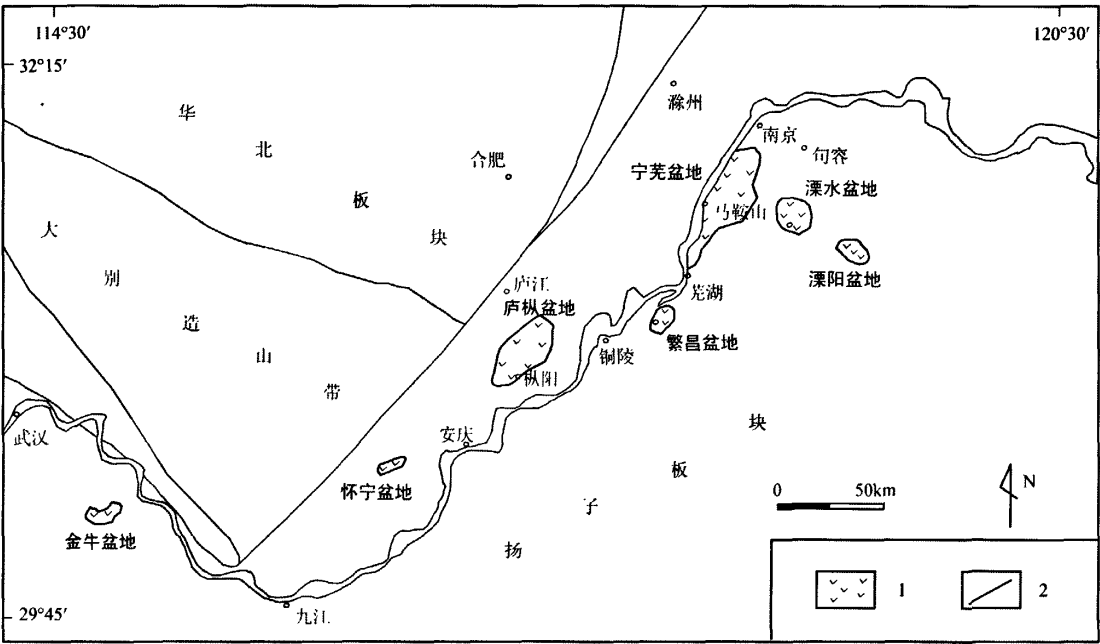


图 1 长江中下游成矿带火山岩盆地分布略图(据翟裕生等,1992 修改)

Fig. 1 Regional geology and the locations of volcanic basins in the middle and lower reaches of the Yangtze River area (after Zhai Yusheng et al., 1992)

1 火山岩;2—断裂

1 Volcanic rocks; 2— Fault

源、性质和演化有关,同时受地球动力学背景、基底特征等多种地质要素的控制。本文综合已有研究工作和资料,以庐枞盆地和宁芜盆地为主,探讨长江中下游地区火山岩盆地的地质特征、岩浆岩时空格架、地球化学特征及火山岩盆地的成矿作用和成矿模式等,促进区域火山岩盆地的成岩成矿作用研究。

1 火山盆地简要地质特征

长江中下游成矿带由东向西分布的火山岩盆地有溧水盆地、溧阳盆地、宁芜盆地、繁昌盆地、庐枞盆地、怀宁盆地和金牛盆地等。各盆地的简要地质特征如下。

1.1 庐枞盆地

庐枞盆地位于安徽省庐江县和枞阳县之间(图 1),为四组深大断裂控制(图 2),盆地基底东浅西深,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 800km<sup>2</sup>。庐枞盆地出露的沉积地层主要为中侏罗统罗岭组(J<sub>2</sub>l)陆相碎屑沉积岩,与火山岩系不整合接触。火山岩由老至新分为龙门院组、砖桥组、双庙组和浮山组,自盆地边缘至盆地中心依次出露,空间上大致呈同心环状分

布,各组之间均为喷发不整合接触(任启江等,1991; 周涛发等,2008),构成四个火山活动旋回。各旋回的火山活动均由爆发相开始,此后溢流相逐渐增多,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、火山碎屑岩和次火山岩组成,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零星分布,出露面积较小,以粗面质火山岩为主(图 2)。

庐枞盆地内部有 34 个侵入岩岩体分布(周涛发等,2007;2010;范裕等,2008)(图 2),这些岩体按岩性主要分为三种:一种为闪长(玢)岩和二长岩体,主要分布在盆地的北部,出露面积较大岩体有巴家滩岩体,龙桥岩体和罗岭岩体等;第二种为正长岩和花岗岩体,出露面积较大岩体有土地山岩体和凤凰山岩体等;第三种为 A 型花岗岩,出露面积较大的岩体有城山岩体,花山岩体和黄梅尖岩体等。庐枞盆

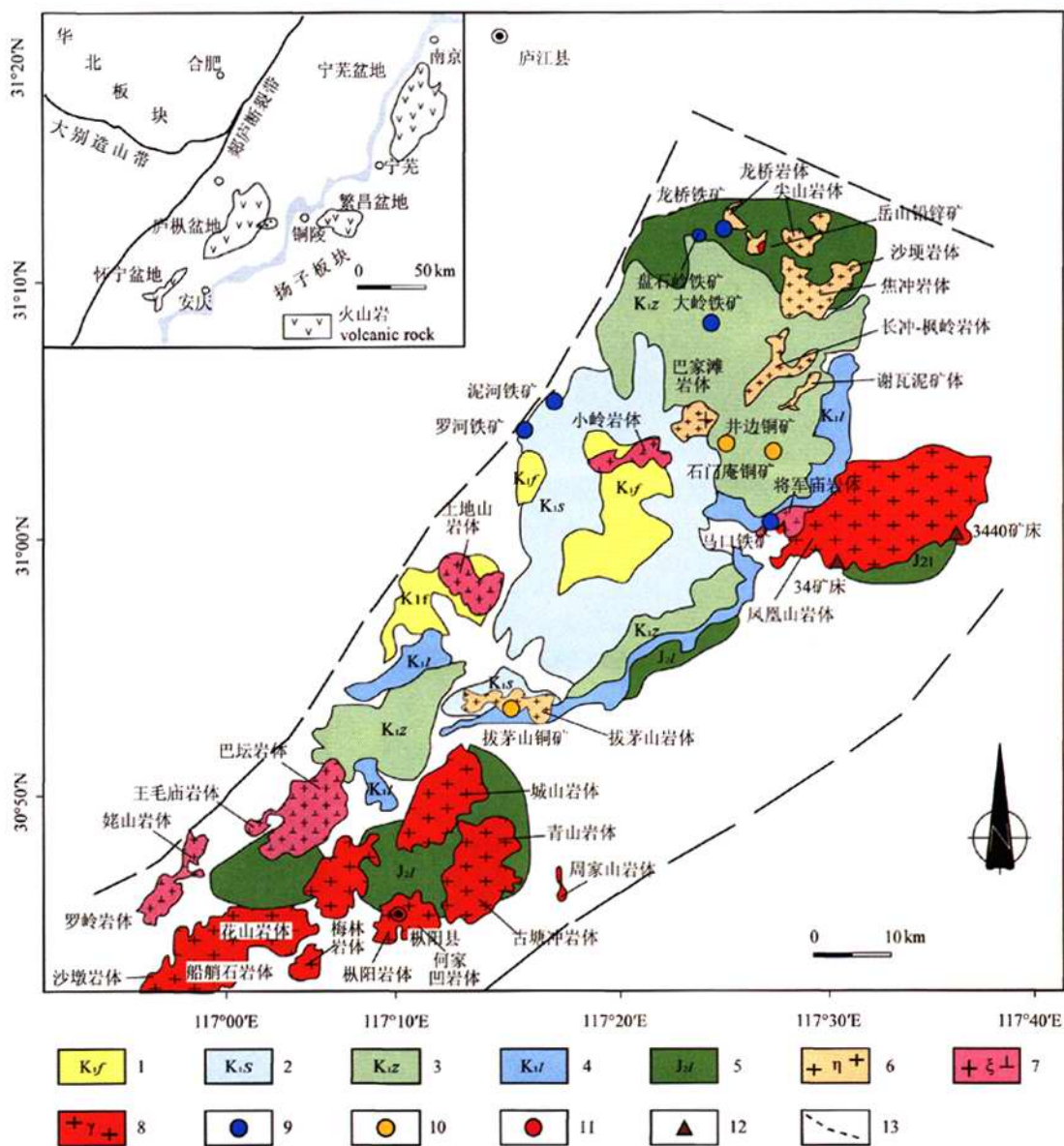


图2 庐枞盆地地质矿产略图(周涛发等,2010)

Fig. 2 Geology and mineral resources in the Lu-Zong Basin(Zhou Taofa et al.,2010)

1—浮山组;2—双庙组;3—砖桥组;4—龙门院组;5—罗岭组;6—二长岩;7—正长岩;8—A型花岗岩;9—铁矿床;

10—铜矿床;11—铅锌矿床;12—金铀矿床;13—断裂

1—Fushan Formation; 2—Shuangmiao Formation; 3—Zhuangqiao Formation; 4—Longmenyuan Formation; 5—Luoling Formation; 6—monzonite; 7—syenite; 8—A-type granite; 9—iron deposits; 10—copper deposits; 11—Pb-Zn deposits; 12—Au-U deposits; 13—fault

地内主要矿床包括罗河、龙桥和泥河等大型铁矿床、岳山中型铅锌银矿床、井边石门庵、天头山和拔茅山等小型铜金矿床以及矾山等大型明矾石矿床,此外还有马口、杨桥、吴桥和3440、31等铁-铜-金-铀多金属矿床(点),探明的铁矿石储量约7亿吨。

## 1.2 宁芜盆地

宁芜盆地位于长江中下游成矿带东部,江苏省南京市和安徽省芜湖市之间(图1),盆地边界受北北东向长江断裂、方山-南陵断裂、北西向为南京-湖熟断裂控制,属于继承式的中生代陆相盆地(宁芜研

究项目编写小组,1978)(图3)。盆地内的断裂主要为北北东向和北西向两组,构成宁芜盆地的构造骨架,其中,北北东向断裂控制了盆地内火山岩和次火山岩的分布,北西向断裂稍晚,切割火山岩系地层和北北东向断裂。

宁芜盆地内前火山岩系地层主要由三叠系中、上统至侏罗系中统组成,以断裂与邻区为界,分布有三叠系周冲村组( $T_2z$ )、黄马青组( $T_3h$ )和侏罗系象山群( $J_{1-2}xn$ )(图3)。

盆地内的上覆火山岩系为中生代燕山期岩浆活动形成的大量橄榄安粗岩系火山岩组合,火山岩由老至新分为龙王山、大王山、姑山和娘娘山四组(宁芜研究项目编写小组,1978;Zhou et al,2011),各组之间均为喷发不整合接触,构成四个火山活动旋回(图3)。各旋回的火山活动均由爆发相开始,此后溢流相逐渐增多,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、火山碎屑岩和次火山岩组成,火山碎屑岩的总量高于熔岩类。

宁芜盆地内的主要侵入岩为(辉石)闪长玢岩或闪长岩,岩体以超浅成相为主,侵入深度约为0.5~1.5km,岩体出露面积为0.01~10km<sup>2</sup>,明显受北北东和北西向两组深部隐伏断裂控制(图3),呈带状分布,与盆地内玢岩型铁矿床关系密切(范裕等,2010)。区域的重磁资料和矿区的钻孔结果表明,地表成群的小岩体在深部可能彼此相连。宁芜盆地中段局部地区出露花岗岩体,大多呈小岩体产出,经过钻探和物探证实,它们在深部连成一片,并切穿早期形成的闪长玢岩(图3)。

宁芜盆地内共产出大、中、小型铁矿床30余处,铁矿石储量约27亿吨。大型铁矿床包括梅山铁矿床、凹山铁矿床、陶村铁矿床、和尚桥铁矿床、白象山铁矿床、和陆山铁矿床和姑山铁矿床等,此外还有大平山、铜井和谷里等小型铜金矿床。

### 1.3 繁昌盆地

繁昌盆地位于安徽省铜陵市和繁昌县之间,属于上叠式的中生代陆相盆地(宁芜研究项目编写小组,1978)。繁昌盆地广泛发育中生代火山岩和火山碎屑岩,出露面积约62km<sup>2</sup>,按野外地质关系由老至新划分为中分村组、赤沙组、蝌蚪山组和三梁山组(袁峰等,2010)。中分村组主要出露于火山盆地边缘的繁昌县白儿岭-柯家冲、三梁山等地,分为上下两段,下段主要为粉砂岩、沉凝灰岩,上段主要为粗安岩和流纹岩,不整合上覆于侏罗纪沉积地层之上。

赤沙组主要出露于繁昌县石塘、陡山-黄浒等地,主要为粗面质和流纹质熔岩、熔火山碎屑岩及火山碎屑岩,呈喷发不整合上覆于早白垩世早期中分村组之上。蝌蚪山组出露于繁昌县黄浒、九龙山、三梁山、沙园一带,可分为上、中、下岩性段,下段主要为沉火山碎屑岩、火山碎屑沉积岩和正常沉积岩,中段主要为玄武岩和安山岩,上段主要为流纹岩,与下伏赤沙组呈不整合接触。三梁山组出露于繁昌县三梁山及其周围,可分为上、下二部分,下部为紫红色凝灰质粉砂岩、灰紫色粗面质凝灰角砾岩,上部为黑云母粗面岩、粗面质熔岩,与蝌蚪山组为不整合接触。繁昌盆地内主要矿床为中型规模的白马山铁矿床和桃冲铁矿床。

### 1.4 溧水盆地

溧水盆地位于江苏省溧水县,呈近南北向展布,大致呈椭圆形,发育于茅山复式背斜构造的西部,火山岩系分别叠置在 $T_3-J_1$ 地层之上,既有继承式,又有上叠式火山岩盆地的特征(倪若水等,1998)。火山岩由老至新分为四组:(1)龙王山组,主要出露于盆地四周,中部有少量分布,其下部为角闪和云闪安山岩及角砾岩、凝灰岩等,中部为辉石安山岩及火山碎屑岩,上部钾玄岩及火山碎屑岩;(2)东芦山组:出露盆地的东部和南部,北部呈零星分布,其下部为沉火山碎屑岩和火山碎屑岩,夹铁碧玉和赤铁矿层,中部为粗安-安山质熔结凝灰岩和熔岩,上部为玄武粗安质熔岩及火山碎屑岩;(3)观山组,分布盆地的南部地区,主要为高钾粗面岩夹火山碎屑岩;(4)甲山组,分布于盆地北部边缘地区,主要为英安流纹质熔岩和熔结凝灰岩(倪若水等,1998)。溧水盆地内矿床较少,仅有老虎头铁矿床、小梅山铁矿床和横山铜矿床等小型矿床。

### 1.5 溧阳盆地

溧阳盆地位于江苏省溧阳县南部,盆地呈近南北向展布,并发育在由三叠纪地层组成的复式向斜构造之上,为一上叠式火山岩盆地(倪若水等,1998)。火山岩由老至新分为四组:①龙王山组,主要出露在盆地南部边缘,少量分布在东部,其下部为角闪安山岩和粗安岩及火山碎屑岩,底部见粉砂岩和凝灰岩等,上部为流纹岩和熔结凝灰岩等;②大王山组,主要出露在南部和东南部,钻孔揭示溧阳北部的隐伏火山岩区也有分布,其下部为火山碎屑岩和沉火山碎屑岩,内夹少量砂泥岩,上部为辉石安山岩、同成分角砾熔岩、熔结凝灰岩及有关的火山碎屑岩;③沙河组,出露于盆地中部,由英安质-流纹质熔

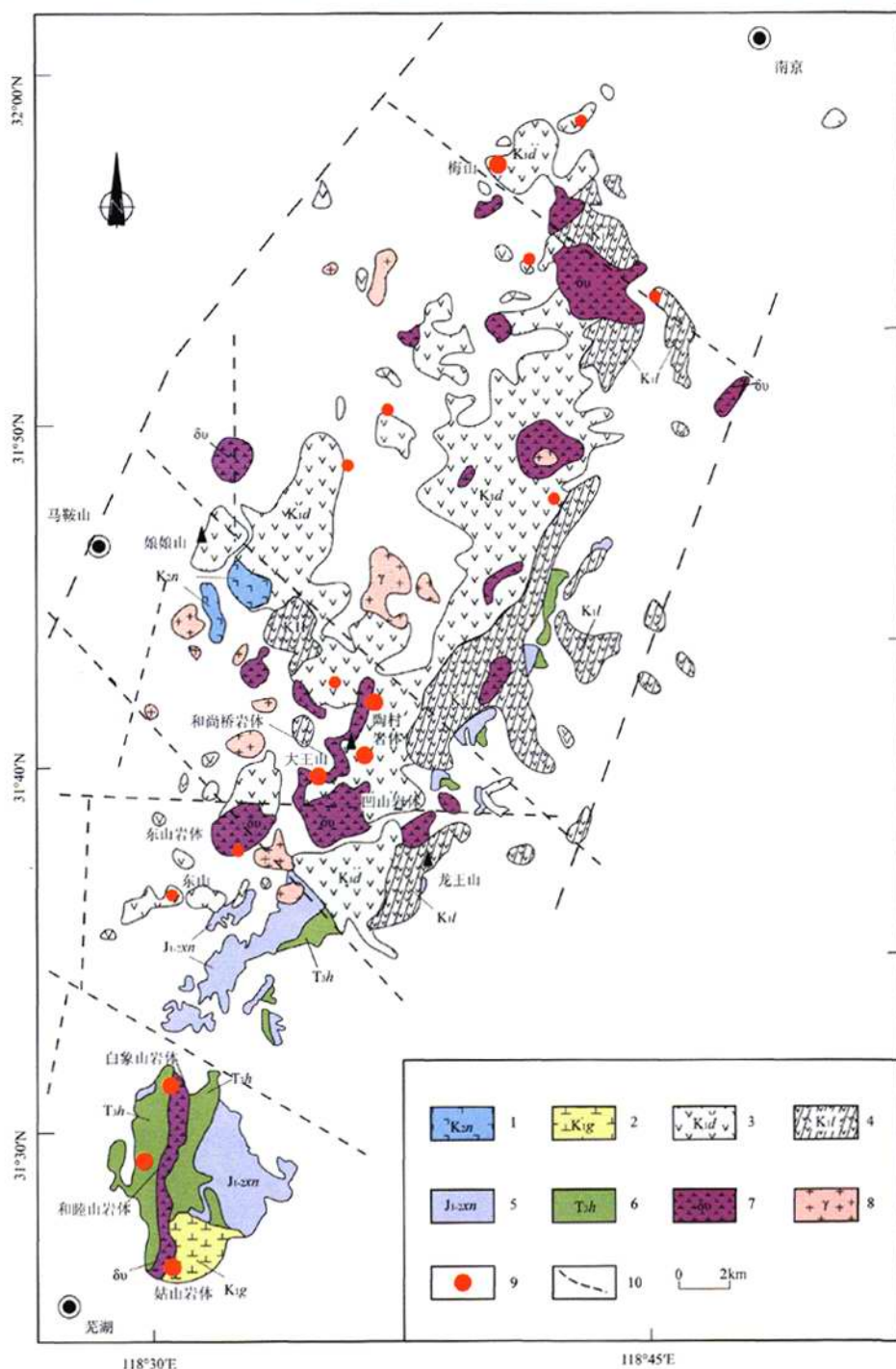


图3 宁芜盆地地质矿产略图(据宁芜研究项目编写小组,1978)

Fig. 3 Geology and mineral resources in the Ning-Wu Basin (from Ningwu Research Group, 1978)

- 1—娘娘山组; 2—姑山组; 3—大王山组; 4—龙王山组; 5—象山群; 6—黄马青组; 7—闪长玢岩; 8—花岗岩; 9—铁矿床; 10—断裂  
 1—Niangniangshan group; 2—Gushan group; 3—Dongwangshan group; 4—Longwangshan group; 5—Xiangshan group;  
 6—Huangmaqing group; 7—Diorite porphyry; 8—Granite; 9—Iron deposit; 10—Fault

岩和熔结凝灰岩及侵入相流纹斑岩所组成;④大溪组,主要分布在盆地北部及西南边缘,由粗安质-粗面质熔岩组成,含少量流纹岩,局部见同成分火山碎屑岩等。溧阳盆地内矿床较少,仅有土包山金铁矿床、新芳桥铁矿床和钟巷铜铁矿床等小型矿床。

### 1.6 怀宁盆地

怀宁盆地位于安徽省怀宁县城东西两侧,呈长条状北东向展布,西部受邻庐断裂影响。火山岩系发育于复式向斜内,基底地层为中侏罗世地层,为继承式火山岩盆地(倪若水等,1998)。火山岩由老至新分为三组:①彭家口组,出露于盆地东南翼,呈条带状零星分布,其下部为晶玻屑熔结凝灰岩、凝灰质砾岩和角砾岩夹凝灰岩及凝灰质粉砂岩,中部为粗面质晶屑凝灰熔岩,上部为粉砂岩、钙质粉砂岩、夹泥岩及泥灰岩;②江镇组,分布在盆地中部和东部地区。下部为钾玄岩、粗面岩及玄武安山岩夹火山碎屑岩,上部为流纹岩、球粒状流纹岩及流纹质熔结凝灰岩;③汪公庙组,是盆地的主要地层,分布较广,下部为凝灰质角砾岩、凝灰质砂岩和粉砂岩,上部为长石岩屑砂岩、细砂岩、粉砂岩和页岩互层。怀宁盆地内仅发育若干矿化点,未见有经济价值的矿床。

### 1.7 金牛盆地

金牛盆地位于湖北省鄂城和大冶两县保安和金牛、灵乡之间,近南北向展布,西部受梁子湖断拗带影响呈半月形。火山岩系叠置在近东西向复式向斜之上,为继承式火山岩盆地(倪若水等,1998)。火山岩由老至新分为三组:①马架山组,出露于盆地南北两侧,范围不大,以喷发不整合覆盖在侏罗纪武昌群地层之上,下部流纹质火山碎屑岩和流纹岩,上部为流纹岩和珍珠岩;②灵乡组,出露在盆地东、北、南的边部地带,其下部以粗碎屑沉积岩为主,有砾岩、砂砾岩、粗细砂岩、粉砂岩及粉砂质灰岩,中部以细碎屑沉积岩为主,有钙质粉砂岩、粉砂质灰岩、杂砂岩、钙质页岩夹灰岩和少量玄武岩,上部为粉砂岩、含砾杂砂岩、粉砂质灰岩夹安山岩和粗安岩;③大寺组,在盆地中出露广。下部下段为安山岩、珍珠岩和玄武岩夹粉砂岩,下部为上段流纹岩、珍珠岩和流纹质熔结凝灰岩,上段下部粉砂岩、砂岩、砂砾岩,偶夹泥灰岩,上段上部为砂砾岩、粉砂岩和泥质粉砂岩等。金牛盆地内仅发育若干矿化点,未见有经济价值的矿床。

## 2 火山岩盆地的岩浆作用

### 2.1 岩浆岩时空格架

庐枞盆地中龙门院组、砖桥组、双庙组和浮山组

四组火山岩的形成时代分别为  $134.8 \pm 1.8\text{Ma}$ 、 $134.1 \pm 1.6\text{Ma}$ 、 $130.5 \pm 0.8\text{Ma}$  和  $127.1 \pm 1.2\text{Ma}$ ,均为早白垩世早期(周涛发等,2008)。庐枞盆地内34个侵入岩体(周涛发等,2010)可划分成早晚两期:①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  $134 \sim 130\text{Ma}$ ,与砖桥旋回火山岩浆活动关系最为密切,岩体侵位受火山结构和北东向构造联合控制;②晚期侵入岩分为两类:第一类主要为正长岩类,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  $129 \sim 123\text{Ma}$ ,大部分岩体与同期火山岩在空间上分离,岩体受火山机构或基底断裂控制,岩体的排列及长轴均为北东向者居多,受盆地内黄屯-巴家滩-柳峰山-枞阳基底断裂控制,受火山机构因素影响较小。第二类主要为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,A型花岗岩的成岩时代  $126 \sim 123\text{Ma}$ (范裕等,2008),分布主要受区域北东向深断裂系控制,而与庐枞盆地的火山机构无关。

宁芜盆地中龙王山组、大王山组、姑山组和娘娘山组火山岩的形成的时间分别为  $134.8 \pm 1.8\text{Ma}$ 、 $132.2 \pm 1.6\text{Ma}$ 、 $129.5 \pm 0.8\text{Ma}$  和  $126.8 \pm 0.6\text{Ma}$ 。侯可军和袁顺达(2010)也测得大王山组火山岩的年龄为  $130.3 \pm 0.9\text{Ma}$ ,姑山组火山岩的年龄为  $128.2 \pm 1.3\text{Ma}$  和  $128.5 \pm 1.8\text{Ma}$ ,张旗等(2003)曾测得龙王山组火山岩的年龄为  $131 \pm 4\text{Ma}$ ,大王山组顶部火山岩的年龄为  $127 \pm 3\text{Ma}$ 。故宁芜盆地的四组火山岩均为早白垩世早期岩浆活动产物(Zhou et al,2011)。根据宁芜盆地内侵入岩的成岩时代(范裕等,2010;袁峰等,2011本辑),并结合野外地质证据,可将宁芜盆地内侵入岩划分成早晚两期:(1)早期侵入岩为(辉石)闪长玢岩,以凹山岩体、陶村岩体和和尚桥岩体、东山岩体、白象山岩体、和陡山岩体和姑山岩体为代表,成岩时代为  $131 \sim 129\text{Ma}$ (范裕等,2010),盆地内不同地区产出的(辉石)闪长玢岩体是基本同时形成的,它们的成岩时代应十分接近,均为  $130\text{Ma}$  左右,成岩年龄在误差范围内一致;(2)晚期侵入岩为花岗岩,以牛迹山岩体、霍里岩体、姑山岩体、小石山岩体和娘娘山岩体为代表,成岩时代  $129 \sim 126\text{Ma}$ (袁峰等,2011本辑)。

繁昌盆地内中分村组、赤沙组、蝌蚪山组和三梁山组火山岩的形成的时间分别为  $134.4 \pm 2.9\text{Ma}$ 、 $131.3 \pm 1.8\text{Ma}$ 、 $130.8 \pm 2.2\text{Ma}$  和  $128.1 \pm 3.1\text{Ma}$ ,



均为早白垩世早期(袁峰等,2010)。繁昌盆地内侵入岩可分成早、晚两期:①早期侵入岩为石英闪长玢岩,以白马山岩体和老山岩体为代表,成岩时代为130~129Ma(袁峰等,2010);②晚期侵入岩为花岗岩,以板石岭岩体、滨江岩体和浮山岩体为代表,成岩时代130~126Ma(袁峰等,2011;楼亚儿和杜杨松,2006)。

溧阳、溧水、怀宁和金牛盆地系统的年代学数据仍相对较少,谢桂青等(待刊资料)测得金牛盆地和怀宁盆地火山岩的活动时限分别为130~124Ma和130~127Ma。

上述火山岩盆地内岩浆岩成岩年代学数据的积累及部分盆地内岩浆岩时空格架的建立,为长江中下游成矿带火山岩盆地火山-侵入岩浆作用的时代对比提供了依据。根据火山岩盆地内岩浆岩的年代学研究结果(表1),通过对比分析可知:

(1)大多数盆地内火山活动都可划分为两期四个旋回,对应四组火山岩地层,不同火山岩盆地内各旋回火山活动在时间上大致可以对应。从表1可见,宁芜盆地内龙王山组、庐枞盆地内龙门院组和繁昌盆地内分村组火山岩的形成时代分别为134.8±1.3Ma、134.8±1.8Ma和134.4±2.9Ma(袁峰等,2010),完全相同。金牛盆地内大寺组火山岩年龄为128±1Ma(谢桂青等,2006),与宁芜盆地内姑山组和庐枞盆地内双庙组火山岩年龄相近。

(2)不同火山岩盆地内侵入岩的岩性和时代也可以大致对比。大多数火山岩盆地内侵入岩可划分为早晚两期,如宁芜盆地早期(辉石)闪长玢岩的形成时代为131~129Ma,庐枞盆地早期二长岩和闪长岩的形成时代为130~134Ma,繁昌盆地早期闪长岩的形成时代为131~130Ma;宁芜盆地内晚期花岗岩的形成时代为129~126Ma,庐枞盆地内晚期正长岩的形成时代为129~123Ma,繁昌盆地内晚期花岗岩的形成时代为127~125Ma。

因此,长江中下游成矿带中内数百公里相距不等的宁芜、庐枞、繁昌、金牛和怀宁盆地内火山岩的形成时代基本一致,各旋回火山活动时间几乎相同。侵入岩的分期、岩性和成岩时代也大致可以对比。各陆相火山岩盆地均形成于早白垩世,区域上不存在前人认为的侏罗纪火山岩浆活动,这些火山岩盆地的形成应受统一的动力学背景控制。

2.2 岩浆岩成因

岩浆岩的地质地球化学特征是确定岩石类型、阐明岩浆来源及反演岩浆演化过程的重要基础,长江中下游地区火山岩盆地内岩浆岩地球化学相关研究工作已广泛开展(吴利仁等,1982;王德滋等,1996;王元龙,2001;刘洪等,2002;闫峻等,2005;袁峰等,2008;孙卫东等,2008;周涛发等,2007,2010;范裕等,2008),主要集中在宁芜盆地、庐枞盆地和繁昌盆地,其他火山岩盆地内岩浆岩的相关研究工作则开展较少。在作者研究基础上,并收集前人关于宁芜盆地、庐枞盆地和繁昌盆地内岩浆岩主量元素数据,绘制图4,从图4中可见,庐枞盆地内四组火山岩基本均位于碱性系列区域,岩性主要集中于玄武质粗面安山岩、粗面安山岩、粗面岩和粗面英安岩区域。宁芜盆地四组火山岩样品部分位于碱性系列区域,部分位于亚碱性系列区域,岩性主要为粗面安山岩、粗面岩、粗面英安岩和安山岩,娘娘山组火山岩样品落入碱玄质响岩和响岩质碱玄岩区域。繁昌盆地四组火山岩样品部分位于碱性系列区域,部分位于亚碱性系列区域,其中,蝌蚪山组火山岩分为两种岩性,一种为玄武岩、粗面玄武岩,另一种为粗面岩、流纹岩和英安岩,显示出明显的双峰式火山岩特征。庐枞盆地内侵入岩主量元素特征与同期火山岩相似,岩性主要为闪长岩、二长岩、正长岩、石英正长岩、碱长花岗岩、碱长正长岩等。宁芜盆地内侵入岩主要为闪长岩,花岗岩、二长花岗岩和正长岩等。繁昌盆地侵入岩主要为闪长岩、花岗岩和碱长花岗岩。

表1 长江中下游火山岩盆地内岩浆岩成岩时代(Ma)对比表  
Table 1 Epoch of magma activity in different volcanic basins in the Middle-Lower Yangtze River Valley

火山岩	宁芜盆地		庐枞盆地		繁昌盆地		金牛盆地		怀宁盆地	
早旋回火山岩	娘娘山组	126.6±1.1	浮山组	127.1±1.2	三梁山组	128.1±3.1	大寺组 灵乡组	130~124	汪公庙组 江镇组	130~127
晚旋回火山岩	姑山组	129.5±0.8	双庙组	130.5±0.8	蝌蚪山组	130.8±2.2				
晚旋回火山岩	大王山组	132.1±1.6	砖桥组	134.1±1.6	赤沙组	131.3±1.8				
侵入岩	龙王山组	134.8±1.3	龙门院组	134.8±1.8	中分村组	134.4±2.9	马架山组		彭家口组	
	宁芜盆地		庐枞盆地		繁昌盆地		金牛盆地		怀宁盆地	
早期	闪长玢岩	131~129	二长岩	134~130	闪长岩	131~130				
晚期	花岗岩	129~126	正长岩	129~123	花岗岩	127~125				

注:金牛盆地、怀宁盆地暂无相关侵入岩年代学工作。

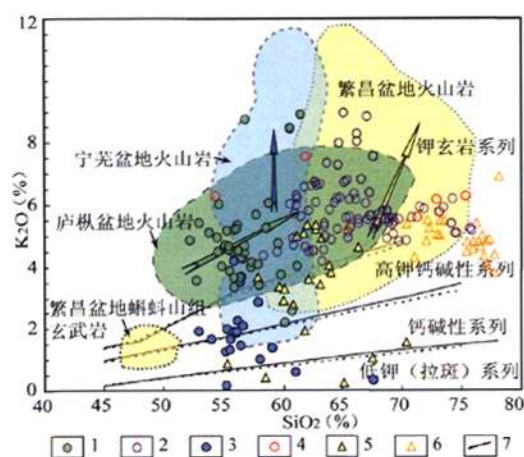


图4 宁芜、庐枞和繁昌盆地内火山岩和侵入岩  
K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>图解(底图据 Ewart, 1982)

Fig. 4 K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> diagram of volcanic rocks  
(after Ewart, 1982)

1—庐枞盆地第一期侵入岩; 2—庐枞盆地第二期侵入岩; 3—宁芜盆地第一期侵入岩; 4—宁芜盆地第二期侵入岩; 5—繁昌盆地第一期侵入岩; 6—繁昌盆地第二期侵入岩; 7—四组火山岩从早到晚演化方向

1—The first period intrusive rock in Luzong basin; 2—The second period intrusive rock in Luzong basin; 3—The first period intrusive rock in Ningwu basin; 4—The second period intrusive rock in Ningwu basin; 5—The first period intrusive rock in Fanchang basin; 6—The second period intrusive rock in Fanchang basin; 7—The evolution direction of four groups volcanic rocks (from early to late) in different basin

火山岩、次火山岩和侵入岩系统的岩石化学、REE、微量元素和同位素地球化学特征的深入分析对比研究表明(王元龙, 2001; 闫峻等, 2005; 袁峰等, 2008), 盆地内早晚两旋回火山岩与同区两期侵入岩在岩浆起源、由早到晚的岩浆演化特征、岩石成因等方面一致, 基本可以完全对应, 岩浆演化经历了分离结晶作用和同化混染作用, 岩浆的分离结晶作用主要发生于深部岩浆房中。除娘娘山组火山岩外, 宁芜、庐枞和繁昌三个盆地火山岩和侵入岩 Sr、Nd 同位素组成较为一致, 指示盆地内侵入岩和火山岩具有同源性。侵入岩和火山岩在  $\epsilon_{\text{Nd}}(t) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  图解中(图 5), 由地幔线向下排列, 指示岩浆源区为富集的交代地幔, 交代地幔的形成与古板块的俯冲交代作用有关, 在岩浆演化的过程中受到了一定的地壳物质的混染(唐永成等, 1998; 王元龙等, 2001; 袁峰等, 2008)。

### 3 盆地的成矿作用

#### 3.1 矿床地质特征

长江中下游地区火山岩盆地以铁矿化为主, 其

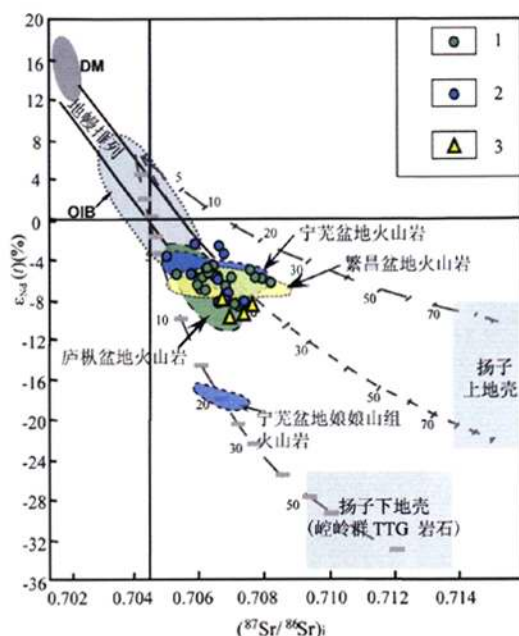


图5 宁芜、庐枞和繁昌盆地内火山岩和侵入岩

$\epsilon_{\text{Nd}}(t) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  图解

Fig. 5  $\epsilon_{\text{Nd}}(t) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  diagram of volcanic and intrusive rocks from Ningwu, Luzong and Fanchang Basin

1—庐枞盆地侵入岩; 2—宁芜盆地侵入岩; 3—繁昌盆地侵入岩; (DM—亏损地幔; OIB—洋岛玄武岩; 图中带数字的虚线代表幔源物质与壳源物质之间的混合比例)

1—Intrusive rock in Luzong basin; 2—Intrusive rock in Ningwu basin; 3—Intrusive rock in Fanchang basin; (DM—Depleted Mantle; OIB—Oceanic Island Basalts; Dotted lines with numbers showing the mixing ratio of the mantle and crust material)

次发育铜、金、铅锌和铀等多金属矿化, 矿床主要发育在宁芜和庐枞盆地内, 如前文所述的陶村铁矿床、凹山铁矿床、罗河铁矿床、泥河铁矿床等各类玢岩型铁矿床。其他火山岩盆地内矿化则不发育, 或仅在盆地周边产出一些与中酸性侵入岩有关小型矿床, 如深水盆地老虎头铁矿、小梅山铁矿和横山铜矿床等与闪长玢岩有关; 溧阳盆地土包山金铁矿床、新芳桥铁矿床和钟巷铜铁矿床等与闪长岩有关; 金牛盆地王豹山铁矿床产于闪长玢岩与火山岩接触带附近(倪若水等, 1998); 小梅岭、桃花岭和松岭铁矿床等与石英闪长岩有关(梁业恒等, 2010); 繁昌盆地白马山铁矿床产于闪长玢岩隐爆角砾岩筒内(袁峰等, 2010)。总体而言, 长江中下游地区火山岩盆地内主要矿床类型为“玢岩型”铁矿床, 下面以宁芜盆地和庐枞盆地为例, 阐述火山岩盆地主要矿床的地质特



征和成矿系列。

庐枞盆地内的矿床可以分为三个成矿系列,即:

(1)砖桥旋回铁、铜、铅、锌成矿系列,主要包括三类矿床:Ⅰ.热液脉型铅锌矿床,如岳山铅锌矿床;Ⅱ.玢岩型铁矿床,包括四类玢岩型铁矿床:①龙桥式铁矿床,如龙桥铁矿床、马鞭山铁矿床;②罗河式铁矿床,如罗河铁矿床;③泥河式铁矿床,如泥河铁矿床;④盘石岭式铁矿床,如盘石岭铁矿床;Ⅲ.热液脉型(及高硫型)铜成矿系列,如井边铜矿床、拔茅山铜矿床和矾山铜矿床。

(2)双庙旋回铁、铜成矿系列,主要包括两类矿床:Ⅰ.与正长岩有关的铁矿床,如马口铁矿床;Ⅱ.与石英正长岩有关的铜矿床,如城山铜矿床、巴坛铜矿床、龙王尖铜矿床。

(3)与A型花岗岩有关的金铀成矿系列,包括3440金铀矿床(点),34金铀矿床(点)。

上述成矿系列中,热液脉型铅锌矿床和铜金矿床规模都较小,如岳山铅锌矿床和井边铜矿床等,这类矿床主要和砖桥旋回的次火山岩(粗安斑岩)活动有关,呈脉状、网脉状产于在砖桥组火山岩或粗安斑岩裂隙中(图6a)。马口铁矿床是庐枞盆地内新发现的矿床类型,与双庙旋回同期正长岩有关,矿体呈脉状,北西向展布,矿体赋存在正长岩岩体构造破碎带中(图6b),主要矿石组合为磁铁矿-磷灰石-阳起石,其成因仍有争议。庐枞盆地内最重要的成矿类型为玢岩型铁矿床,可以分为若干式,其主要特征如下:

盘石岭式铁矿床:主要产于砖桥旋回的火山沉积岩中,围岩为沉凝灰角砾岩、沉凝灰岩和沉积碎屑岩,矿体顺层产出。矿石主要由隐晶和微晶的石英和赤铁矿组成,为成分单一的硅铁建造,局部含少量镜铁矿和黄铁矿。矿石构造包括致密块状构造、条带状构造、层纹状构造,热液蚀变作用弱。

龙桥式铁矿床:主要含矿层位为东马鞍山组膏溶角砾岩、泥灰岩、白云质灰岩及其含铁锰质建造等。矿体呈层状和似层状,与围岩产状一致,矿体产状平缓(图6c),铁矿体的附近有正长岩等侵入岩。矿石结构主要为他形细粒结构和交代残余结构;矿石构造有块状构造、稠密浸染状或稀疏浸染状构造、条带状构造和层纹状构造等。正长岩体和东马鞍山组接触带附近的矿石以透辉石-石榴子石-磁铁矿等矽卡岩矿物组合为特征,远离接触带矿石则以细粒块状磁铁矿-石英为主,局部可见层纹状矿石,以磁铁矿-菱铁矿矿物组合为特征。该类型矿床包括龙桥

和马鞭山等铁矿床。

罗河式铁矿床:主要产于砖桥旋回晚期侵位的次火山岩(闪长玢岩)体上部,部分铁矿体呈脉状产于安山岩和凝灰岩围岩中,或赋存于闪长玢岩穹隆体顶部的隐爆角砾岩中。矿石结构构造主要呈脉状、网脉状、角砾状及块状和浸染状构造及细粒他型结构和中粗粒自形半自形结构。矿石以透辉石-硬石膏-磁铁矿三矿物组合为特征,上部矿体以细脉浸染状矿石为主,下部矿体逐渐过渡为浸染状矿石为主,在闪长玢岩和岩体顶部的脉状矿石常呈粗晶或伟晶产出(图6d),局部可见磁铁矿矿体被改造成赤铁矿矿体。铁矿体的外侧常产出独立的硬石膏矿体和硫铁矿体。矿床中围岩蚀变强烈,自下而上大致可以分为下部的深色辉石-硬石膏-磁铁矿矿化蚀变带和上部的石英-硬石膏-黄铁矿浅色矿化蚀变带,深色蚀变带内常叠加绿泥石化、绿帘石化和碳酸盐化蚀变。该类型矿床包括罗河、大鲍庄和大岭等铁矿床。

泥河式铁矿:主要产于砖桥旋回晚期侵位的次火山岩(闪长玢岩)体内部。矿石结构构造主要细脉浸染状和浸染状构造,细粒他型结构、中粗粒自形半自形结构。矿石以透辉石-硬石膏-磁铁矿三矿物组合为特征,上部少量矿体以细脉浸染状矿石为主,下部大部分矿体以浸染状矿体为主,局部可见脉状矿石常呈粗晶或伟晶产出。铁矿体的外侧常产出独立的硬石膏矿体和硫铁矿体(图6d)。矿床地质特征和围岩蚀变特征基本与罗河式铁矿相似,但考虑到矿床产出部位更靠近次火山岩体内部,矿石类型也与罗河式铁矿床有差别,划为泥河式。该类型矿床包括泥河铁矿床等。

宁芜盆地是一个以铁、硫矿床为主的矿集区,其次产出少量铜矿床,主要成矿系列包括:

(1)大王山旋回铁成矿系列,包括:Ⅰ.玢岩型铁矿床,包括3类玢岩型铁矿床:①产于火山沉积岩中的层状铁矿床,如龙旗山式和竹园山式铁矿床;②次火山岩体及其附近火山岩层中的铁矿床,如梅山式、凹山式、陶村式铁矿床;③次火山岩与前火山岩系沉积地层接触带中的铁矿床,如姑山式、凤凰山式铁矿床。

(2)姑山旋回铜成矿系列,包括与花岗岩有关的铜矿床,如大平山、铜井、谷里等铜矿床。

宁芜盆地内铜矿床规模都较小,主要与姑山旋回产出的花岗岩有关,呈脉状、网脉状产于在花岗岩或姑山旋回火山岩裂隙中。宁芜盆地内最主要的矿

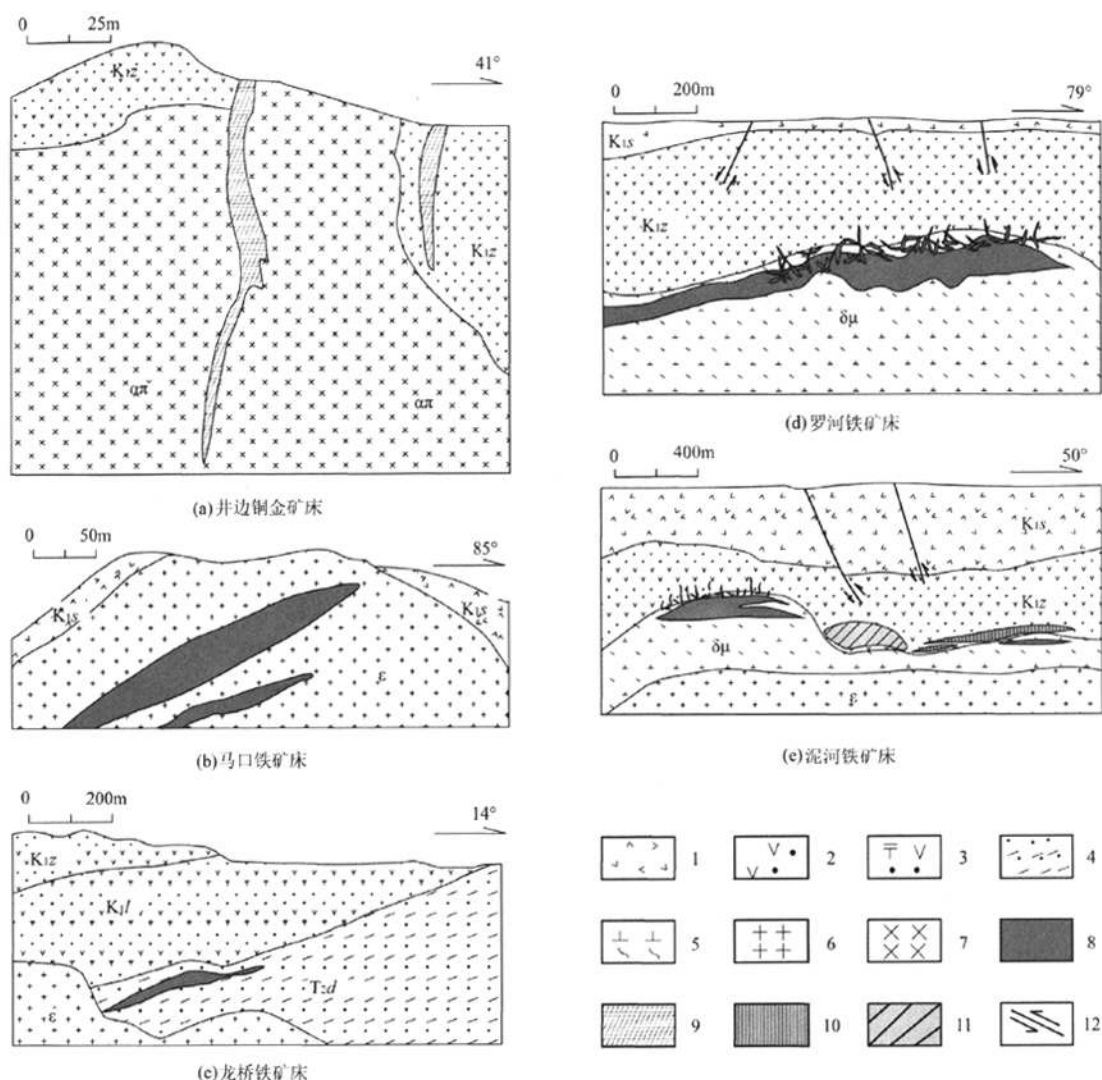


图6 庐枞盆地中的主要矿床剖面图

Fig. 6 Profile of the typical deposits in the Lu-Zong volcanic basin

1—双庙组; 2—砖桥组; 3—龙门院组; 4—东马鞍山组; 5—闪长玢岩; 6—正长岩; 7—安山斑岩; 8—铁矿体; 9—铜矿体;

10—硫铁矿体; 11—硬石膏矿体; 12—断层

1—Shuangmiao group; 2—Zhuanqiao group; 3—Longmenyuan group; 4—Dongmaanshan group; 5—diorite porphyry; 6—syenite;

7—andesite porphyry; 8—iron ore body; 9—copper ore body; 10—sulfur-iron ore body; 11—anhydrite ore body; 12—fault

床类型为玢岩型铁矿床,成矿作用与大王山旋回晚期侵位的次火山岩(辉石闪长玢岩)或侵入岩(辉长闪长岩)关系密切。根据其地质特征,可以分为若干式(宁芜研究项目编写小组,1978),其主要特征简述如下:

龙旗山式和竹园山式铁矿床:主要产于大王山旋回的火山沉积岩中,矿体呈顺层透镜体产出,围岩为沉凝灰角砾岩、沉凝灰岩、沉积碎屑岩,未经过后

期热液改造的矿石以石英-赤铁矿组合为特征,普遍含重晶石,赤铁矿常具胶状结构,以龙旗山矿床为代表。原始火山沉积的石英-赤铁矿矿石被后期热液改造,赤铁矿部分转变为磁铁矿,并形成阳起石-石榴子石等矿物,以竹园山铁矿床为代表。

梅山式铁矿床:矿体产于辉石闪长玢岩与大王山组火山岩的接触带上,以致密块状磁铁矿及假象赤铁矿为主,除透辉石-磷灰石-磁铁矿三矿物组合

之外,以产出石榴子石-磁铁矿矿物组合为特征,由于受后期热液影响,部分脉石矿物为碳酸盐所交代,磁铁矿大多转变为假象赤铁矿,围岩强烈蚀变,以石榴子石化和透辉石化为主。该类矿床主要包括梅山、梅子山和牛首山等铁矿床。

**凹山式铁矿床:**矿体主要产于辉石闪长玢岩体顶部及边部,部分伸入到围岩安山岩和凝灰岩中,呈脉状、网脉状、角砾状及块状,以透辉石(阳起石)-磷灰石-磁铁矿“三矿物组合”为特征,闪长玢岩顶部的脉状矿石常呈粗晶或伟晶产出。在铁矿体的外侧常产出独立的硬石膏矿体和硫铁矿体(图7a)。矿床围岩蚀变强烈,可以分为下部的浅色钠长石化蚀变带,中部的深色辉石-钠柱石-磁铁矿矿化蚀变带和上部的石英-黄铁矿浅色矿化蚀变带,深色蚀变带内常叠加绿泥石化、绿帘石化和碳酸盐化蚀变。矿床主要包括凹山、大东山、丁山和萝卜山等铁矿床等。

**陶村式铁矿床:**矿体主要产于闪长玢岩体中,呈浸染状或细脉浸染状,矿石为钠柱石(通常变为钠长石)-透辉石-磷灰石-磁铁矿组合,在铁矿体的外侧常产出独立的硬石膏矿体和硫铁矿体(图4B)。矿床中围岩蚀变强烈,自下而上大致可以分为下部的浅色钠长石化蚀变带,中部的深色辉石-钠柱石-磁铁矿矿化蚀变带和上部的石英-黄铁矿浅色矿化蚀变带,深色蚀变带内常叠加绿泥石化、绿帘石化和碳酸盐化蚀变。矿床主要包括陶村、和尚桥和东山等铁矿床(图7b、c、d)。

**姑山式铁矿床:**产于辉长闪长岩与前火山岩系沉积岩之间的接触带。矿体受接触带内外的角砾岩带控制,充填产出,呈钟状及脉状,以块状假象赤铁矿为主,矿体下部出现透辉石-磷灰石-磁铁矿三矿物组合细脉。围岩透辉石化和钠长石化较弱,后期的硅化、高岭石化、碳酸盐化强烈(图7e),以姑山铁矿床为代表。

**凤凰山式铁矿床:**矿体产于辉长闪长岩与前火山岩系沉积岩的接触带上,受接触带控制。矿石为金云母-磷灰石-磁铁矿组合,含或多或少的透辉石、碱性长石或阳起石。围岩前期经过角岩化阶段,后期常遭受中低温热液改造,出现强烈的碳酸盐化与高岭石化,磁铁矿转变成假象赤铁矿。矿体主要在沉积围岩一侧,岩体中仅捕虏体有矿化。矿床形成深度较前述几种矿床大。该类型矿床主要包括凤凰山、其林山、钟九、和睦山和白象山等铁矿床(图7f、g)。

### 3.2 成矿时代

矿床的精确测年是建立矿床模型和反演成矿地球动力学背景的重要基础。长江中下游成矿带火山岩盆地内矿床的成矿时代研究一直是研究者关注的热点,宁芜盆地和庐枞盆地内主要矿床相关定年工作近几年来开展较多,其他火山岩盆地内成矿时代研究工作则相对较少。

庐枞盆地内主要矿床的成矿时代研究结果如下:我们通过对矿床中与磁铁矿共生的金云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 法测年,确定龙桥铁矿和马鞍山铁矿的成矿时代为 $130.5 \pm 1.1 \text{ Ma}$ 和 $130.5 \pm 0.9 \text{ Ma}$ (Zhou et al, 2011)。泥河矿床中与磁铁矿共生的金云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 法为 $131.2 \pm 0.9 \text{ Ma}$ (作者未刊资料)。覃永军等(2010)通过对罗河矿床中与成矿关系密切的闪长玢岩锆石 LA-ICP MS U-Pb 定年方法测年,确定闪长玢岩的成岩时代为 $133.3 \text{ Ma} \pm 0.6 \text{ Ma}$ ,推测罗河矿床的成矿时代约为 $133 \text{ Ma}$ 。我们通过大岭矿床中含矿闪长玢岩的锆石 LA-ICP MS U-Pb 定年方法测年(待刊资料),确定闪长玢岩的成岩时代为 $132.0 \pm 1.9 \text{ Ma}$ ,推测大岭矿床的成矿时代约为 $132 \text{ Ma}$ ;通过马口矿床中含矿正长岩的锆石 LA-ICP MS U-Pb 定年方法测年,确定正长岩的成岩时代为 $129.9 \pm 1.1 \text{ Ma}$ ,推测马口矿床的成矿时代约为 $130 \text{ Ma}$ 。张乐骏等(2010)通过井边铜矿床中的安山斑岩次火山岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年和主成矿阶段石英中流体包裹体 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 同位素定年,获得了安山斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $133.2 \pm 1.7 \text{ Ma}$ ,石英流体包裹体 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 等时线年龄为 $133.3 \pm 8.3 \text{ Ma}$ ,确定井边铜矿床的成矿时代约为 $133 \text{ Ma}$ 。与铀、金矿化关系密切的黄梅尖石英正长岩 LA-ICP MS U-Pb 定年结果为 $125.4 \pm 1.7 \text{ Ma}$ (范裕等, 2008),推测庐枞盆地内铀矿床的成矿时代与之相似。上述定年结果表明,庐枞盆地铁矿床的形成时代均为 $130 \text{ Ma}$ 左右,铁成矿作用集中发生在第二次火山喷发旋回(砖桥旋回)活动的末期。此外,砖桥旋回早期发生少量的铜矿化,双庙旋回发育少量与正长岩有关铁矿化,浮山旋回发育与 A 型花岗岩有关的金铀矿化。

宁芜盆地内矿床的成矿时代已有一定的研究探索(Yu and Mao, 2004; 袁顺达等, 2010; 马芳等, 2006, 2010; 胡劲平等, 2010)。范裕等(2011)通过对陶村、白象山和和睦山矿床中与磁铁矿共生的金云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 法测年,确定了陶村、白象山和和睦山矿床成矿时代分别为 $129.3 \pm 1.1 \text{ Ma}$ 、 $130.7 \pm 1.1$

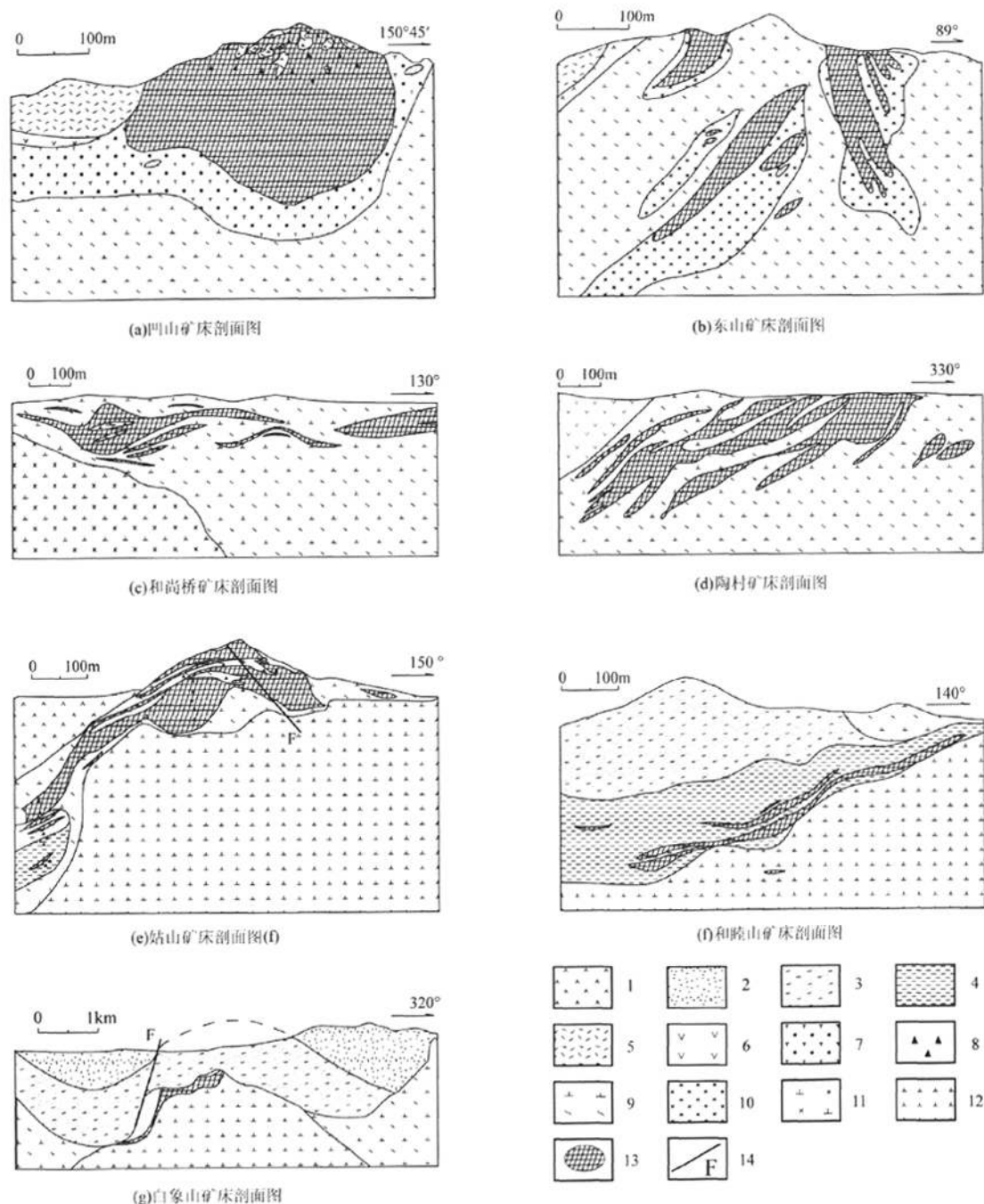


图7 宁芜盆地中的主要矿床剖面图

Fig. 7 Profile of the typical deposits in the Lu-Zong volcanic basin

- 1—姑山组; 2—象山群; 3—黄马青组; 4—周冲村组; 5—凝灰岩; 6—安山岩; 7—钠长石岩; 8—角砾岩带; 9—闪长玢岩;  
10—透辉石化闪长玢岩; 11—花岗岩; 12—辉长闪长岩; 13—铁矿体; 14—断裂
- 1—Gushan group; 2—Xiangshan group; 3—Huangmaqing group; 4—Zhouchongcun group; 5—tuff; 6—andesite; 7—albite; 8—breccia zone; 9—diorite porphyry; 10—diopside altered diorite porphyry; 11—granite; 12—gabbro-diorite; 13—iron ore body; 14—fault

Ma 和  $129.1 \pm 0.9$  Ma。范裕等(2011)还通过对凹山矿床、陶村矿床、和尚桥矿床、东山矿床、白象山矿床、和睦山矿床和姑山矿床中与成矿关系密切的闪长玢岩锆石 LA-ICP-MS 法测年,确定了凹山岩体、陶村岩体、和尚桥岩体、东山岩体、白象山岩体、和睦山岩体和姑山岩体的成岩时代分别为  $130.2 \pm 2.0$  Ma、 $130.7 \pm 1.8$  Ma、 $131.1 \pm 1.5$  Ma、 $131.1 \pm 3.1$  Ma、 $130.0 \pm 1.4$  Ma、 $131.1 \pm 1.9$  Ma 和  $129.2 \pm 1.7$  Ma,同一矿床的成矿时代与成岩时代十分接近,因此提出宁芜盆地内不同铁矿床的成矿时代均为 130Ma(129~131 Ma)左右,铁成矿作用集中发生在第二次火山喷发旋回(大王山旋回)活动的末期。

由上述宁芜盆地和庐枞盆地内主要矿床的定年结果可知,长江中下游成矿带火山岩盆地内矿床的成矿时代总体上是基本一致的,均为 130Ma 左右,表明火山岩盆地内的铁成矿作用是在较短时间内集中“爆发式”形成的。

收集整理长江中下游成矿带断隆区如铜陵、安庆-贵池、九瑞和鄂东南等矿集区内花岗闪长岩-石英闪长岩类侵入岩的成岩年龄以及相关矽卡岩-斑岩型铜金矿床的成矿年龄,结合前文所述火山岩盆地内的成岩成矿年代学数据,绘制了图 8。从图 8 中可见,长江中下游地区的岩浆活动在时空上表现出明显的分区性和阶段性特征。断隆区的成岩成矿时代在 146~135Ma 之间(毛景文等,2004;周涛发等,2000;Zhou et al., 2007;王彦斌等,2004;张达等,2006;张乐骏等,2008;蒋少涌等,2010),以铜金为主的成矿作用持续时间较长;而断凹区(火山岩盆地)的成岩时代为 135~126Ma,以铁为主的成矿作用时间则非常集中在 130Ma 左右;之后与铀、金矿化有关的 A 型花岗岩集中形成于 126~123Ma,既可以产出于断隆区,又可以产出于断凹区(楼亚儿和杜杨松,2006;范裕等,2008;周涛发等,2008,2010)。因此,长江中下游地区岩浆岩的形成时代分期集中在 146~135Ma、135~126 Ma、126~123 Ma 等三个阶段,成矿作用亦可分为三个阶段:隆起区铜金为主的成矿作用在 146~135Ma 之间,断凹区以铁为主的成矿作用在 129~131 Ma 之间,与 A 型花岗岩有关的铀、金多金属矿化的时代还缺乏精确同位素年代学数据制约,在 125Ma 左右。总之,长江中下游成矿带火山岩盆地中铁矿床是在 1~2Ma 的时间范围内集中形成的,比隆起区铜-金矿床的形成时代约晚 5~10Ma,因此,成矿带内断凹区中的斑岩型铁矿床和隆起区矽卡岩-斑岩型铜金矿床是不同

阶段成矿作用的产物。

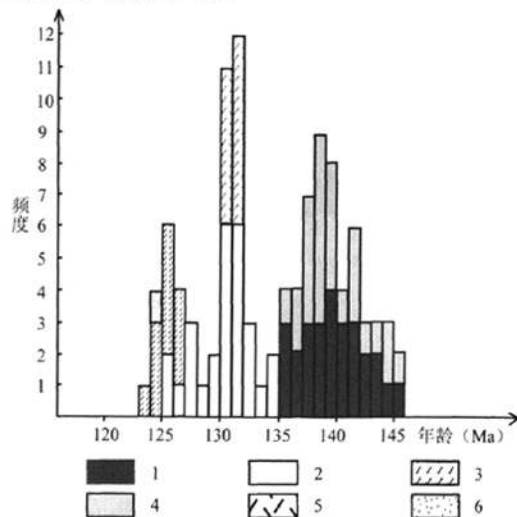


图 8 长江中下游成矿带三阶段成岩成矿年龄直方图

Fig. 8 Age frequency spectrum for magmatic rock and deposits in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River

1—断隆区岩体年龄;2—断凹区岩体年龄;3—A 型花岗岩;4—断隆区成矿年龄;5—断凹区成矿年龄;6—与 A 型花岗岩有关的铁铜铀金成矿年龄

1—Age of magmatic rocks in fault-controlled uplift area; 2—Age of magmatic rocks in fault-controlled depression area; 3—A-type granite; 4—Age of mineralization in fault-controlled uplift area; 5—Age of mineralization in fault-controlled depression area; 6—Age of Fe-Cu-U-Au mineralization related to A-type granite

### 3.3 成矿模式

#### 3.3.1 矿床成因

根据前人的大量研究与观察(宁芜研究项目编写小组,1978,黄清涛,1989),宁芜和庐枞盆地中次火山岩(辉石闪长玢岩)广泛发育,以岩体为中心,不同的空间位置形成了一系列不同类型的玢岩型铁矿床,同时次火山岩体的顶面形态、接触面产状与成矿作用的强弱有较为密切的关系,如凹山岩体呈岩瘤状、岩体接触面倾向围岩,倾角较陡,形成富铁矿体。宁芜盆地南部落星等地岩体呈平缓隆起,接触面倾角较缓,仅有较弱(贫)的矿化。成矿带中其他火山岩盆地内次火山岩不发育,未见有规模较大的次火山岩体,在盆地内部未见有规模的金属矿床,因此,长江中下游地区火山岩盆地内铁矿床的形成与闪长玢岩的关系密切。

根据基底地层特征,可将长江中下游成矿带的



火山岩盆地分为上叠式火山岩盆地和继承式火山岩盆地(宁芜研究项目编写小组, 1978; 倪若水等, 1998)。宁芜、庐枞盆地属于继承式火山岩盆地, 火山岩系与基底的前火山岩系地层之间仅缺失上侏罗统地层, 两套岩系间具有继承性的构造关系, 上、下地层之间多为喷发假整合或角度很小的喷发不整合。繁昌、溧阳等盆地属于上叠式盆地(倪若水等, 1998), 火山岩系可叠置在不同时代的地层之上, 火山岩系与基底地层的为喷发不整合接触, 两套地层的呈叠加状态, 缺失三叠系等地层单元。

另据钻探资料表明, 庐枞盆地和宁芜盆地的基底地层中广泛存在中三叠统地层, 其岩石组合为膏溶角砾岩、泥灰岩、白云质灰岩及其含铁锰质建造等, 对玢岩型铁矿的形成起着重要的作用。膏盐层中富含  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{Na}^{+}$  等活性离子和挥发组分, 深部岩浆在上升侵位过程中, 易与膏盐层发生同熔混染作用, 从而形成富  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^{+}$  和挥发组分的成矿热液, 产生强烈围岩蚀变, 形成铁矿床。同时, 盆地中三叠统地层中的铁锰质建造为岩浆热液的进一步叠加改造提供部分成矿物质基础。膏盐层、泥灰岩和白云质灰岩本身也是一个构造薄弱带, 有利于岩浆的侵位, 常为成矿热液的运移提供了通道及赋矿空间(草广金, 1977; 蔡本俊, 1980)。除宁芜盆地和庐枞盆地外, 在其他火山岩盆地基底和外围均未见这套中三叠统岩石组合, 虽然一些盆地局部也产出闪长质侵入岩, 但难以形成规模大的矿床。

玢岩型铁矿床中硫同位素的系统研究表明, 矿床中热液成因黄铁矿和硬石膏的  $\delta^{34}\text{S}$  值变化范围为  $-9.3\text{‰} \sim +10.4\text{‰}$  和  $+14.1\text{‰} \sim +18.5\text{‰}$ (储雪蕾等, 1986), 中三叠统地层中沉积成因石膏的  $\delta^{34}\text{S}$  值变化  $+28.0\text{‰} \sim +28.2\text{‰}$ (陈锦石等, 1986)。因此, 玢岩型铁矿床的成矿热液为与闪长玢岩有关的岩浆热液, 矿床中的硫除主要来自岩浆外, 部分来自三叠纪膏盐层。

矿床的氢氧同位素地球化学相关研究表明(图 9), 宁芜盆地和庐枞盆地内玢岩型铁矿床早期的成矿流体温度较高, 成矿热液主要为岩浆水, 晚期矿化蚀变作用以中温为主, 成矿热液除岩浆水外, 也混合了大量大气降水。

我们对庐枞盆地泥河铁矿床四个不同成矿阶段硬石膏中流体包裹体系统研究还表明, 随着成矿作用的进行, 成矿流体温度逐渐降低, 流体盐度逐渐降低, 各阶段成矿流体的温度、压力等物理化学参数直接控制了蚀变岩的矿物组合和金属矿物沉淀。(图

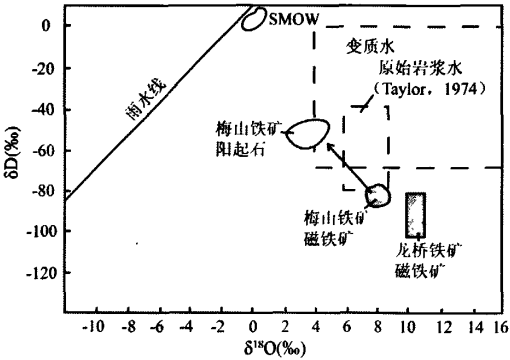


图 9 玢岩型铁矿床的氢氧同位素组成(底图据 Taylor, 1977; 龙桥铁矿氢氧同位素数据来源于 Zhou et al., 2011; 梅山铁矿和东山铁矿氢氧同位素数据来源于马芳等, 2006)

Fig. 9 H-O isotopic composition of ore-forming fluids of magnetite-actinolite deposits in volcanic-sedimentary basin (After Taylor, 1977; the H-O isotopic data of Longqiao iron deposit from Zhou et al., 2011; the H-O isotopic data of Meishan and Dongshan iron deposit from Ma et al., 2006)

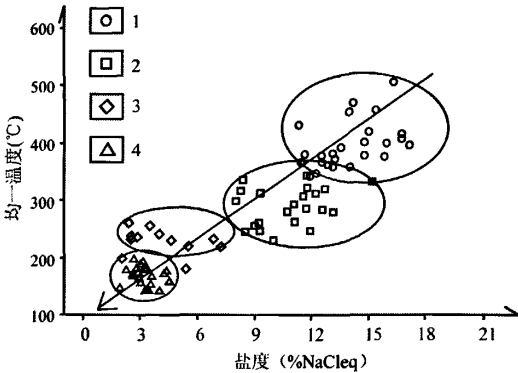


图 10 泥河铁矿床不同阶段成矿流体温度-盐度图  
Fig. 10 Temperature-salinity histogram of fluid inclusions in Nihe iron deposit

1—第一阶段; 2—第二阶段; 3—第三阶段; 4—第四阶段  
1—The first stage; 2 The second stage;  
3—The third stage; 4—The fourth stage

10)。

综上矿床地质地球化学特征可见, 长江中下游成矿带火山岩盆地中的铁矿床是与燕山期早白垩世(辉石)闪长玢岩有关的火山-次火山岩浆热液矿床, 矿床的形成还受火山构造、基底膏盐层等控制和影响。

### 3.3.2 成矿模式

在上述火山岩盆地地质特征、盆地中主要类型矿床的地质地球化学特征及矿床成因研究基础上,建立了长江中下游成矿带火山岩盆地的成矿模式,如图 11 所示。

长江中下游成矿带火山岩盆地内发育一套具成因联系的中生代火山-侵入岩,主要由闪长玢岩、二长岩-正长岩、花岗岩、粗安岩、安山岩、粗面岩、响岩及火山岩碎屑岩组成,火山岩和侵入岩的喷出及侵位机制主要受盆地内的深大断裂和火山机构控制。铁矿化主要和第二旋回火山-侵入活动有密切的成因联系,除产于沉凝灰角砾岩和沉凝灰岩中火山沉积成因的层状、似层状铁矿床外,主要铁矿床均与第二火山喷发旋回(砖桥旋回或大王山旋回)结束阶段(130Ma)侵位的次火山岩体(闪长玢岩)或二长岩-正长岩体有关。

闪长玢岩体呈岩钟、岩穹窿、岩瘤、岩舌或岩枝等小岩体产出,它们是深部较大岩体在浅部的突出部分,在岩体不同部位出现不同形式的铁矿床,如陶村-泥河式铁矿床、凹山-罗河式铁矿床、梅山式铁矿床、凤凰山-姑山式铁矿床、龙旗山-盘石岭式铁矿床等,这些不同类型铁矿是同一火山-侵入岩浆活动及演化形成的热液在不同地质条件下成矿作用产物,岩浆期后的气液交代-充填作用以及火山喷发-沉积作用等一系列成矿作用过程,在浅成条件下形成不同类型的铁矿床。矿体多数出现于次火山岩体的上部或顶部,如陶村-泥河式铁矿床、凹山-罗河式铁矿床和梅山式铁矿床等,但也有远离岩体而产于基底地层中的层状矿体,如龙桥式铁矿。铁矿床中典型的矿物组合包括辉石(阳起石)-磷灰石-磁铁矿组合及辉石-硬石膏-磁铁矿组合。在铁矿化带外围的火山岩地层中常有黄铁矿化、铜及多金属矿化、硬石膏化及明矾石化,分别形成向山-大鲍庄式、岳山式、井边式等硫、铜、铅锌和明矾石矿床。

围岩蚀变通常较强,含矿岩体及接触带岩石常遭受强烈蚀变。蚀变岩自下而上主要可分三个带,下部浅色蚀变带(钠长石化带)-中部深色蚀变带(由方柱石化、辉石化、石榴子石化和硬石膏化带组成)-上部浅色蚀变带(由硅化、高岭土化、硬石膏化和黄铁矿化组成)。蚀变岩相组合可以分为类矽卡岩化,类吉蓝岩化及泥英岩化等三类。

晚期火山-侵入活动的成矿作用较弱,正长岩-花岗岩(123~126Ma)侵位穿切早旋回火山岩地层和早期侵入岩,并破坏先存铁矿体,仅在局部形成一

些规模不大的铁、铜、铀矿床(图 11),如马口式铁矿床和铜井式铜矿床等。

## 4 成岩成矿地球动力学背景

长江中下游成矿带火山岩盆地的成岩成矿作用是中国东部中生代构造-岩浆成矿系统演化的有机组成部分,受中国东部中生代燕山期地球动力学背景的制约。长期的构造-岩浆作用形成了断隆区和断凹区的次级构造格局以及一系列陆相火山断陷盆地(常印佛等,1991;翟裕生等,1992;周涛发等,2008)。区域构造背景大致经历了以下三个阶段的演化过程:

(1)燕山早期,中国东部由特提斯构造体制向太平洋构造体制转换,岩石圈加厚,长江中下游断裂构造带形成。以占太平洋板块俯冲为主的 NW 向挤压作用,导致岩石圈构造垮塌,引发地幔对流异常,发生地幔交代作用,软流圈上升,含古俯冲洋壳物质的富集地幔岩石圈发生拆沉减薄和部分熔融作用,产生幔源含矿岩浆,底垫并融化下地壳物质,岩浆沿长江深断裂及次级断裂上升、定位和冷却,形成挤压-伸展过渡背景下的断隆区 145~136Ma 的高碱钙碱性岩浆及有关的矽卡岩-斑岩型铜金矿床。

(2)135Ma 后,区域完全进入太平洋构造体制,岩石圈拆沉、软流圈上升和地幔隆起作用加剧,区域伸展作用加强,断凹区开始发育,庐枞、宁芜、繁昌、怀宁、金牛、溧水和溧阳等火山岩盆地形成。软流圈地幔发生交代作用形成深源岩浆喷出和浅成侵入定位于断凹区火山盆地之中,在张性环境中先后形成盆地中 135~127Ma 的第一、第二火山喷发旋回的安山岩-粗安岩等和第三、第四火山喷发旋回的粗面岩-响岩、及与之对应的二长岩-闪长岩和正长岩-花岗岩类。对应第二火山旋回晚期的浅成-超浅成侵入的(辉石)闪长玢岩和闪长岩-正长岩类岩浆冷却分异形成的岩浆热液与围岩发生交代作用,在岩体内外不同部位形成不同产出特征的玢岩型铁矿床及其他多金属矿床,如图 12 所示。127Ma 前后,火山岩盆地生长基本停止,火山岩浆作用结束(图 12)。

(3)127Ma 后,成矿带完全处于环太平洋构造体系,区域进入伸展高峰期,长江断裂带的 NE 向断裂活动加强,126~123Ma 的碱性岩-变质核杂岩-A 型花岗岩形成,Au-U 多金属矿化形成,随后,区域燕山期的岩浆作用和成矿作用结束。

## 5 结论

(1)长江中下游成矿带断凹区由东向西顺次有

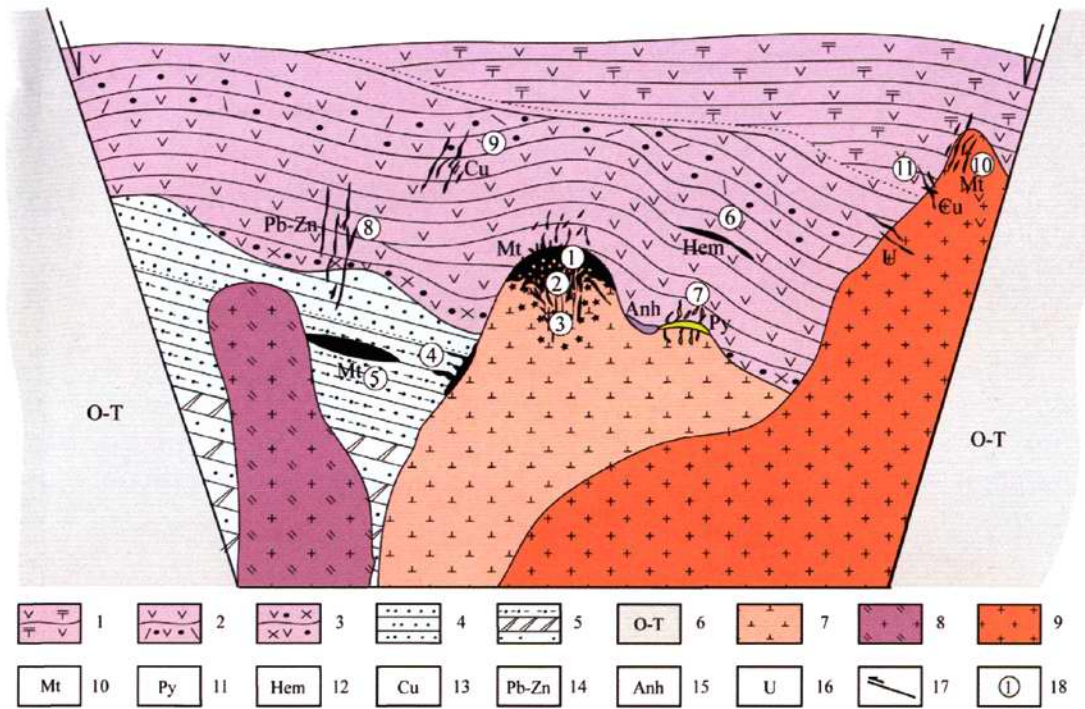


图 11 长江中下游成矿带火山岩盆地矿床成矿模式

Fig. 11 Metallogenic model of volcanic basin in the middle and lower reaches of the Yangtze River area

1—双庙组-姑山组火山岩;2—砖桥组-大王山组火山岩;3—龙门院组-龙王山组火山岩;4—罗岭组-象山群粉砂岩、砂岩;5—东马鞍山组-青龙群白云岩、灰岩;6—奥陶系-三叠系地层;7—闪长玢岩;8—二长岩-正长岩;9—正长岩-花岗岩;10—磁铁矿矿床;11—黄铁矿矿床;12—赤铁矿矿床;13—铜矿床;14—铅锌矿床;15—硬石膏矿点;16—铀矿床;17—断裂;18—矿床式;①—梅山式;②—罗河-凹山式;③—泥河-陶村式;④—姑山-凤凰山式;⑤—龙桥式;⑥—盘石岭-龙旗山式;⑦—大鲍庄-向山式;⑧—岳山式;⑨—井边式;⑩—马口式;⑪—铜井式

1—Shuangmiao group-Gushan group volcanic rocks; 2—Zhuanqiao group-Dawangshan group volcanic rocks; 3—Longmenyuan group-Longwangshan group volcanic rocks; 4—Luoling group-Xiangshan group siltstone and sandstone; 5—Dongmaanshan group-Qinglong group dolomite and limestone; 6—Ordovician-Triassic sedimentary sequence; 7—Diorite porphyry; 8—Mozonite-syenite; 9—Syenite-granite; 10—Magnetite deposit; 11—Pyrite deposit; 12—Hematite deposit; 13—Copper deposit; 14—Pb-Zn deposit; 15—Anhydrite deposit; 16—U deposit; 17—Fault; 18—Deposit style; ①—Meishan style; ②—Luohe-Washan style; ③—Nihe-Taocun style; ④—Gushan-Fenghuangshan style; ⑤—Longqiao style; ⑥—Panshiling-Longqishan style; ⑦—Dabaozhuang-Xiangshan style; ⑧—Yueshan style; ⑨—Jingbian style; ⑩—Makou style; ⑪—Tongjing Style

溧水、溧阳、宁芜、繁昌、庐枞、怀宁和金牛盆地等火山岩盆地,发育一套橄榄安粗岩质火山-侵入岩。大多数盆地内火山活动都可划分为两期四个旋回,各旋回火山活动时间几乎相同,侵入岩的分期、岩性和成岩时代也大致可以对比。各陆相火山岩盆地内的岩浆岩均形成于早白垩世(135~123Ma),它们的形成受统一的动力学背景控制。

(2)长江中下游成矿带火山岩盆地内早晚两个旋回火山岩与两期侵入岩的岩浆源区为成分接近富集的交代地幔,交代地幔的形成与古板块的俯冲交代作用有关。深部岩浆演化经历了岩浆分离结晶作用和同化混染作用。

(3)长江中下游成矿带火山岩盆地中的成矿作用以铁矿化为主,产出以著名的“玢岩铁矿”组合为特征的一系列火山-次火山热液型和沉积改造型等铁矿床及硫铁矿、硬石膏和明矾石矿床。主要的铁矿床类型包括陶村-泥河式铁矿床、凹山-罗河式铁矿床、梅山式铁矿床、凤凰山-姑山式铁矿床、龙旗山-盘石岭式铁矿床等,这些不同类型铁矿是同一火山-侵入岩浆-热液活动在不同地质条件下成矿作用产物,铁矿床和辉石闪长玢岩、闪长岩等次火山岩及侵入岩关系密切,铁矿床的形成还受火山构造和基底膏盐层等控制和影响。

(4)长江中下游成矿带火山岩盆地内玢岩型矿



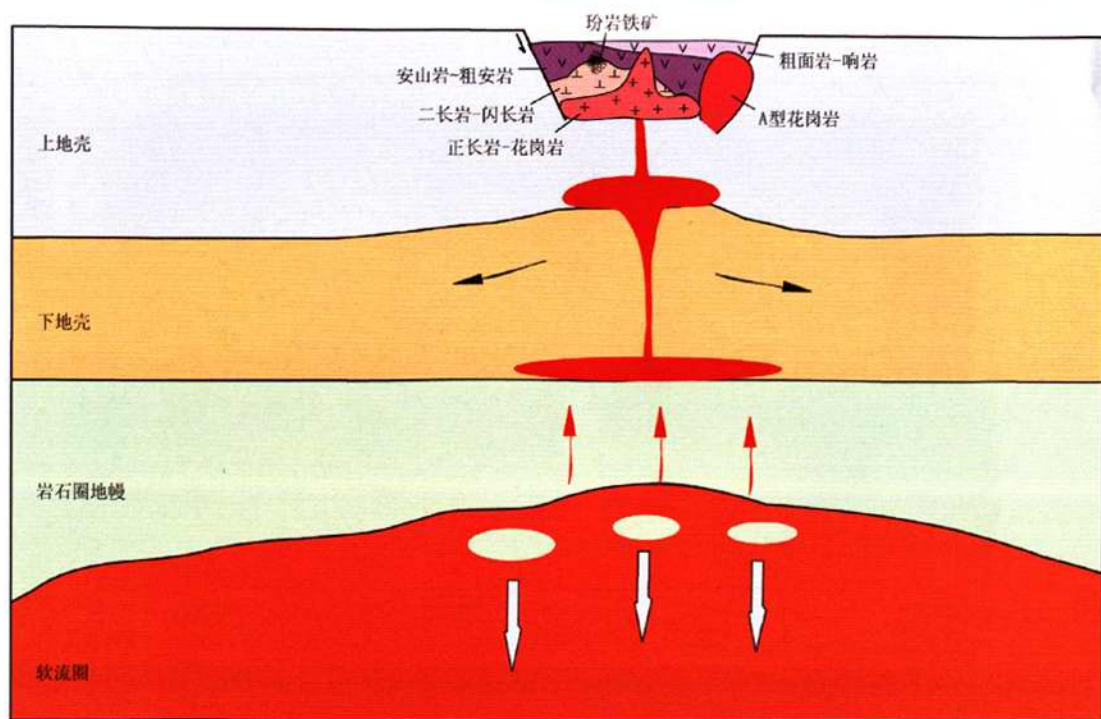


图 12 长江中下游成矿带火山岩盆地成岩成矿作用(135~123 Ma)地球动力学过程示意图

Fig. 12 Geodynamic backgrounds of diagenesis and mineralization process in volcanic basin in the middle and lower reaches of the Yangtze River area

床的成矿时代基本一致,均为 130Ma 左右,盆地内的铁成矿作用是在较短时间(1~2Ma)内集中“爆发式”形成的。长江中下游地区成矿作用表现出明显的分区性和阶段性,断凹区内铁矿床比隆起区铜-金矿床的形成时间约晚 5~10Ma,是不同构造-岩浆阶段岩浆热液成矿作用的产物。

(5)长江中下游成矿带火山岩盆地成岩成矿作用是中国东部中生代构造-岩浆-成矿系统演化的有机组成部分,受中国东部中生代燕山期地球动力学背景的制约。早白垩世 135Ma 后,区域完全进入太平洋构造体制,岩石圈拆沉、软流圈上升和地幔隆起作用加剧,区域伸展作用加强,在 135~123Ma 之间形成了一系列火山岩盆地及其中的铁、铜多金属矿床及某些非金属矿床。

致谢:研究过程中长期得到常印佛院士的精心指导,在此表示衷心感谢,撰写此文庆祝常印佛院士 80 华诞。

#### 参 考 文 献

蔡本俊. 1980. 长江中下游地区内生铁铜矿与青岩的关系. 地球化学,

1(2):1~25.

章广金. 1977. 长江中下游及华北地区内生铁铜矿与青岩的关系. 地质与勘探,1(1):26~33.

常印佛,刘湘培,吴言昌. 1991. 长江中下游铜铁成矿带. 北京:地质出版社,71~76.

陈锦石,储雪雷,邵茂茸. 1986. 三叠纪海水的硫同位素. 地质科学,4:330~339.

储雪雷,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. 地质科学,26(3):189~195.

杜建国,戴圣潜,莫宜学,邓晋福,许卫. 2003. 安徽沿江地区燕山期火成岩成矿地质背景. 地学前缘,10(4):551~560.

范裕,周涛发,袁峰,钱存超,陆三明, Cooke D R. 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,唐敏惠,张乐骏,马良,谢杰. 2010. 庐枞盆地高硫化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证据. 岩石学报,26(12):3657~3666.

范裕,周涛发,袁峰,张乐骏,钱兵,马良,谢杰,杨西飞. 2011. 宁芜盆地玢岩型铁矿床的成矿时代:金云母  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  同位素年代学研究. 地质学报,本辑.

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.

胡幼平,蒋少涌. 2010. 宁芜盆地浅成侵入岩的锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素研究及其地质意义. 高校地质学报,16(3):294~308.

- 黄清涛,尹恭沛. 安徽庐江罗河铁矿. 北京:地质出版社,1989,1~256.
- 蒋少涌,孙岩,孙明志,边立曾,熊永根,杨水源,罗兰,曹钟清,吴亚民. 2010. 江西九瑞矿集区叠合断裂系统和叠加成矿作用. 岩石学报, 26(9):2615~2625.
- 梁业恒,孙晓明,翟伟,马春,吴志强,丁存根,王堂喜. 2010. 江苏溧水观山高硫型铜铅金矿床 $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  定年及其地质意义. 高校地质学报, 16(2):143~148.
- 刘洪,邱检生,罗清华,徐夕生,凌文黎,王德滋. 2002. 安徽庐枞中生代富钾火山岩成因的地球化学制约. 地球化学, 31(2):129~140.
- 楼亚凡,杜杨松. 2006. 安徽繁昌中生代侵入岩的特征和锆石 SHRIMP 测年. 地球科学, 35(4):359~366.
- 马芳,蒋少涌,姜耀辉,倪培,凌洪飞. 2006. 宁芜盆地凹山和东山铁矿床流体包裹体和氦氧同位素研究. 岩石学报, 22(10):2581~2589.
- 马芳,蒋少涌,姜耀辉,王汝成,凌洪飞,倪培. 2006. 宁芜地区玢岩铁矿 Pb 同位素研究. 地质学报, 80(2):279~286.
- 马芳,蒋少涌,薛怀民. 2010. 宁芜盆地凹山和东山铁矿床中阳起石的激光 $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  年代学研究. 矿床地质, 29(2):283~289.
- 毛景文, Holly S, 杜安道, 周涛发, 梅燕雄, 李永峰, 戴文栓, 李进文. 2004. 长江中下游地区铜金(钼)矿 Re-Os 年龄测定及其对成矿作用的指示. 地质学报, 78(1):121~131.
- 倪若水, 吴其切, 岳文浙, 张德宝, 王华田. 1998. 长江中下游中生代陆相盆地演化与成矿作用. 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.
- 任启江, 刘孝善, 徐兆文, 胡受奚, 胡文瑄. 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.
- 宋传中, Lin SF, 周涛发, 闫峻, 任升莲, 李加好, 涂文传, 张妍, 张欢. 2010. 长江中下游及其邻区中生代构造体制转换. 岩石学报, 26(9):2774~2781.
- 孙卫东, 凌明星, 汪飞跃, 丁兴, 胡艳华, 周继彬, 杨晓勇. 2008. 太平洋板块俯冲与中国东部中生代地质事件. 矿物岩石地球化学通报, 27(3):218~225.
- 覃永军, 曾键年, 曾勇, 马振东, 陈津华, 金希. 2010. 安徽南部庐枞盆地罗河-泥河铁矿田含矿辉石粗安玢岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义. 地质通报, 9(6):851~863.
- 唐水成, 吴吉昌, 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, 60~85.
- 王德滋, 任启江, 邱检生, 陈克荣, 徐兆文, 曾家潮. 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, 1996, 70(1):23~34.
- 王彦斌, 刘敦一, 蒙义峰, 曾普胜, 杨竹森, 田世洪. 2004. 安徽铜陵新桥铜-硫-铁-金矿床中石英闪长岩和辉绿岩锆石 SHRIMP 年代学及其意义. 中国地质, 25(2):87~91.
- 王元龙, 张旗, 王焰. 2001. 宁芜火山岩的地球化学特征及意义. 岩石学报, 17(4):565~575.
- 吴淦国, 张达, 狄永军, 臧文拴, 张祥信, 宋彪, 张忠义. 2008. 铜陵矿集区侵入岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其深部动力学背景. 中国科学(D 辑), 38:630~645.
- 吴利仁, 齐进英, 王听渡. 1982. 中国东部中生代火山岩. 地质学报, 56(3):223~234.
- 谢桂青, 毛景文, 李瑞玲, 周少东, 叶会寿, 闫全人, 张祖送. 2006. 长江中下游鄂东南地区大寺组火山岩 SHRIMP 定年及其意义. 科学通报, 51(19):2283~2291.
- 谢智, 李全忠, 陈江峰, 高天山. 2007. 庐枞早白垩世火山岩的地球化学特征及其源区意义. 高校地质学报, 13(2):235~249.
- 徐晓春, 陆三明, 谢巧勤, 柏林, 储国正. 2008. 安徽铜陵狮子山矿田岩浆岩锆石 SHRIMP 定年及其成因意义. 地质学报, 82(4):500~510.
- 闫峻, 陈江峰, 谢智, 杨刚, 喻钢, 钱卉. 2005. 长江中下游地区蝌蚪山晚中生代玄武岩的地球化学研究: 岩石圈地幔性质与演化的制约. 地球化学, 34(5):455~470.
- 杨晓勇. 2006. 郑庐断裂带南段沙溪含铜斑岩体的 $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  年代学研究及其意义. 矿物岩石, 26(2):52~56.
- 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-ICPMS U-Pb 年龄及其意义. 岩石学报, 26(9):2805~2817.
- 袁峰, 周涛发, 范裕, 陆三明, 钱存超, 张乐骏, 段超, 唐敏慧. 2008. 庐枞盆地中生代火山岩的起源、演化及形成背景. 岩石学报, 24(8):1691~1702.
- 袁峰, 周涛发, 范裕, 张乐骏, 马良, 钱兵. 2011. 宁芜盆地花岗岩类的锆石 U-Pb 年龄、同位素特征及其意义. 地质学报, 本辑.
- 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. 1992. 长江中下游地区铁铜矿床. 北京:地质出版社, 1~120.
- 张达, 吴淦国, 狄永军, 臧文拴, 邵拥军, 余心超, 张祥信, 汪群峰. 2006. 铜陵凤凰山岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄与构造变形及其对岩体侵位动力学背景的制约. 地球科学, 31(6):823~830.
- 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.
- 张乐骏, 周涛发, 范裕, 袁峰. 2008. 安徽月山岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其意义. 岩石学报, 24(8):1725~1732.
- 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.
- 周涛发, 范裕, 袁峰, 宋传中, 张乐骏, 钱存超, 陆三明, Cooke D R. 2010. 庐枞盆地侵入岩的时空格架和对成矿制约. 岩石学报, 26(9):2694~2714.
- 周涛发, 范裕, 袁峰. 2008. 长江中下游成矿带成岩成矿作用研究进展. 岩石学报, 24(8):1665~1678.
- 周涛发, 宋明义, 范裕, 袁峰, 刘珏, 吴明安. 2007. 安徽庐枞盆地中巴家滩岩体的年代学研究及其意义. 岩石学报, 23(10):583~591.
- 周涛发, 袁峰, 岳书仓, 刘晓东. 2000. 长江中下游两个系列铜、金矿床及其成矿流体系统的氢、氧、硫、铅同位素研究. 中国科学(D 辑), 30(增刊):122~128.
- Ewart A. 1982. The mineralogy and petrology of Tertiary-Recent orogenic volcanic rocks with special reference to the andesitic-basaltic compositional range. In: R S Thorpe (Editor),



Andesites, Wiley, Chichester, 25~87.

- Taylor J H. 1977. Water/rock interactions and the origin of H<sub>2</sub>O in granitic batholiths; Thirtieth William Smith lecture. *Journal of Geological Society*, 133(6):509.
- Yu J J, Mao J W. 2004. <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar dating of albite and phlogopite from porphyry iron deposits in the Ningwu basin in east-central China and its significance. *Acta Geologica Sinica*, 78(2):435~422.
- Zhou T F, Fan Y, Yuan F, Zhang L J, Qian B, Ma L, Yang X F, Cooke D R. 2011. Geochronology and significance of volcanic rocks in the Ning-Wu Basin of China. *Science China (Earth Sciences)*, 54(2):185~196.
- Zhou T F, Wu M A, Fan Y, Duan C, Yuan F, Zhang L J, Liu J, Qian B, Pirajno F, Cooke D R. 2011. Geological, geochemical characteristics and isotope systematic of the Longqiao iron deposit in the Lu-Zong volcano sedimentary basin, Middle-Lower Yangtze (Changjiang) River Valley, Eastern China. *ore geology review*, in press.
- Zhou T F, Yuan F, Yue S C, Liu X D, Zhang X, 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.

## Petrogenesis and Metallogeny Study of the Volcanic Basins in the Middle and Lower Yangtze Metallogenic Belt

ZHOU Taofa, FAN Yu, YUAN Feng, ZHANG Lejun, MA Liang, QIAN Bing, XIE Jie  
*School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, 230009*

### Abstract

The Middle-Lower Yangtze River valley is one of the most important Cu-Fe polymetallic belts in China, in which hosts many volcanic basins, such as Li-Shu, Li-Yang, Ning-Wu, Fan-Chang, Lu-Zong, Huai-Ning and Jin-Niu volcanic basin. Compared with the uplift area in this region, the researches on the petrogenetic and metallogenetic in the volcanic basin are still poorly investigated. Basing on the contributions of the previous researchers as well as our fundamental studies in recent years mainly on Lu-Zong basin and Ning-Wu basin, this paper discussed the geological characteristics, the temporal-spatial framework, and geochemistry, geochronology of petrogenesis and mineralizations and metallogenetic model of the volcanic basins in the Middle-Lower Yangtze metallogenetic belt. The chronological results of the igneous rocks suggest that the magmatic rocks in the volcanic basins formed in early Cretaceous (135~123Ma). The geochemical features of the volcanic rocks and the intrusive rocks in the volcanic basins indicate that their evolution, sources and the origin of the four formation volcanic rocks and the two epochs of intrusions are comparable. The source of the igneous rocks might be the metasomatic mantle; the formation of the metasomatic mantle was related to the subduction of the paleo-Pacific plate. The magma evolution underwent fractional crystallization and in the magma chamber and contamination during rising. Iron is the main mineralization occurred in the volcanic basins, which represented by the "porphyry iron deposits". The "porphyry iron deposits" include a series of volcanic-subvolcanic hydrothermal deposits, sedimentary-reformed deposits, pyrite deposits, anhydrite deposits and alunite deposits. The geological and geochemical characteristics of these deposits indicated that their formation were closely related to the subvolcanic rocks (diorite porphyry) and diorite intrusions, and also controlled by the volcanic structures and the basal halites in the Triassic strata. The mineralization chronology shows all the porphyry iron deposits are "booming" formed around 130Ma in a short interval. This paper proposes a petrogenetic and metallogenetic model for the volcanic basins in the Middle and Lower Yangtze metallogenetic belt. The petrogenetic and metallogenetic in these volcanic basins is one part of Mesozoic tectonic-magmatic-metallogenetic event controlled by the geodynamic setting of eastern China in the Yanshanian period.

**Key words:** Volcanic basin; Geochemistry characteristics; petrogenic and metallogenetic epoch; Metallogenetic model; the Middle-Lower Yangtze River metallogenetic belt