

宁芜和庐枞火山岩盆地玢岩铁矿矿床地球化学特征及其成矿动力学背景探讨

陈津华¹, 曾键年¹, 王思源¹, 李锦伟¹, 邱金亮², 张 燕²

(1. 中国地质大学资源学院, 武汉 430074; 2. 中国地质调查局南京地质调查中心, 南京 210016)

摘 要: 玢岩铁矿是我国铁矿的一个重要成矿类型, 宁芜和庐枞火山岩盆地是长江中下游地区玢岩铁矿的主要矿集区。对宁芜和庐枞盆地的构造分析结果表明, NNE 向断裂和 NW 向断裂控制了区内的岩浆活动, 断裂的交汇部位往往是玢岩铁矿产出的有利空间。综合对比了宁芜和庐枞地区玢岩铁矿成矿岩体的主量元素、稀土元素以及铅同位素特征, 表明其具有相似的地球化学特征和共同的物质来源。稀土元素特征表明两盆地玢岩铁矿的成矿物质主要来源于地幔或下地壳; Pb 同位素特征则进一步说明其与 EM-II 型富集地幔具有密切关系。宁芜和庐枞盆地在燕山期受太平洋板块俯冲作用的影响, 成矿作用受岩浆活动所控制。两盆地玢岩铁矿成矿作用的差异, 可能是由于其受地壳物质混染程度不同所致。

关键词: 地球动力学机制; 成矿作用; 成矿地球化学对比; 玢岩铁矿; 宁芜盆地; 庐枞盆地

中图分类号: P618.31

文献标志码: A

文章编号: 1000-7849(2012)01-0086-09

玢岩铁矿是 20 世纪 70 年代末期我国地质工作者在研究宁芜地区铁矿时首次提出, 是指在陆相安山质火山岩分布区, 与辉石闪长玢岩有时空及成因联系的一组以铁为主的矿床^[1-6]。长江中下游地区是我国玢岩铁矿的主要产地, 其中尤以宁芜和庐枞地区最为重要。众多学者^[2,4,7-15]运用同位素地球化学、流体包裹体、矿床地球化学等技术方法, 对玢岩铁矿的矿床地质特征、成矿规律、矿床成因等做了进一步的研究。被认为是近 20 年来长江中下游最大发现的泥河铁矿的成功勘探^[16-17], 使庐枞地区玢岩铁矿的研究又逐渐被地质学家们所重视^[17-20]。

宁芜和庐枞火山岩盆地同处于长江中下游成矿带内, 在盆地的演化过程中, 受中生代构造体制大转折——主构造线由 EW 向转换为 NE—NNE 向的影响^[21-22]; 晚中生代在岩石圈大规模拆沉、软流圈上涌的机制下^[23-28], 岩浆大规模喷发, 并在庐枞和宁芜火山岩盆地形成铁、铜、金矿床。近年来, 受益于成岩成矿精确定年技术 (如锆石 LA-ICP-MS、SHRIMP、辉钼矿 Re-Os 和含钾矿物的⁴⁰Ar-³⁹Ar 等) 的成熟及运用, 宁芜和庐枞地区积累了一批准确的成岩成矿定年数据, 为区内成矿规律的时间演化

研究提供了可靠的数据支撑。因此, 笔者在系统收集整理前人研究成果的基础上, 通过区内构造特征分析宁芜和庐枞地区玢岩铁矿的空间分布特点, 结合区内主要玢岩铁矿中与成矿有关的岩浆岩及矿石地球化学特征; 继而联立区域上中生代中国东部地球动力学板块作用机制, 对本区域的成矿作响应分析。

1 区域地质背景

长江中下游铁铜金成矿带是中国重要的多金属成矿带之一^[1-3], 位于扬子板块与华北板块拼合带的下扬子褶皱带内, 自西向东依次形成了鄂东南、九瑞、安庆—贵池、庐枞、铜陵、宁芜、宁镇等重要矿集区 (图 1)。带内经历了前震旦纪变质基底形成、震旦纪—早三叠世盖层沉积和中新生代板内变形 3 个演化阶段^[4]; 特提斯构造域与古太平洋构造域两种地球动力学机制的转换与复合以及深部壳幔的共同作用^[30], 控制了本带地质演化及中生代成矿作用过程。三叠纪以来, 长江中下游地区经历了碰撞挤压、拆沉伸展、底侵熔融等地球动力学过程^[31]; 大规模的岩浆作用和成矿作用主要集中于 145~135 Ma、

收稿日期: 2011-06-18 编辑: 禹华珍

基金项目: 中国地质调查局资源评价项目 (1212010781014; 1212010660404); 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室开放基金课题 (MGMR2001-1)

作者简介: 陈津华 (1987—), 男, 正在攻读矿产普查与勘探专业硕士学位, 主要从事矿床学、矿床地球化学及成矿规律与成矿预测工作。E-mail: chenjinhua1488@163.com

通信作者: 曾键年 (1956—), 男, 教授, 主要从事矿床地球化学、矿床学、成矿规律与成矿预测方面的科研与教学工作。E-mail: 1178911300@qq.com

135~127 Ma、127~123 Ma 3 个阶段^[32];区内岩浆岩主要由 3 个系列组成,不同的岩浆系列具有其成矿专属性,即:钙碱性系列岩浆^[4]主要产出 Fe-Cu-Au 等多金属矿产、橄榄玄粗岩系列岩浆^[33-34]与玢岩型 Fe-Cu 矿床^[4]关系密切、碱性(A 型)花岗岩系列^[35-36]与区域上 Au、Cu、Mo 的矿化有密切联系^[37]。

宁芜和庐枞火山岩盆地主体位于安徽省境内,分隔于长江两侧,长轴都呈北北东向展布,相距约 150 km。两盆地属于继承式的陆相火山岩盆

地^[38-39],是长江中下游成矿带内两个重要矿集区。宁芜和庐枞地区矿产资源十分丰富,各种类型矿床及矿化点星罗棋布,多达数百处。宁芜地区主要产出一套与火山一次火山岩有关的玢岩型铁矿^[1-4],辉石闪长玢岩是其主要成矿母岩和显著的找矿标志。庐枞地区主要产出与橄榄玄(安)粗岩系岩浆有关的玢岩型 Fe-Cu 矿床、沉积-热液改造型 Fe-Cu 矿床、热液脉型 Cu-Au 矿床,还产出与钙碱性(埃达克质)岩浆有关的斑岩-矽卡岩型 Cu-Au 矿床^[17]。

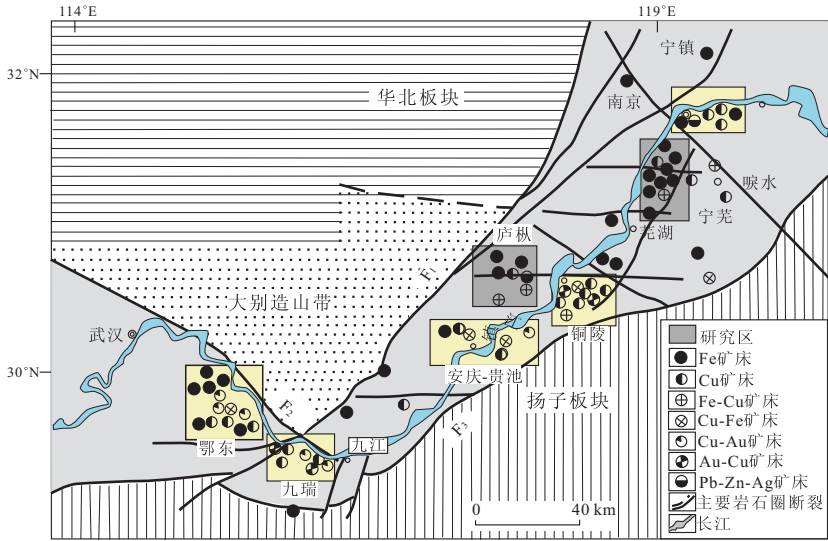


图 1 长江中下游成矿带大地构造和矿集区分布略图(据文献[5,29]改绘)

Fig.1 Sketch showing distribution of geotecture and metallogenic province in mineralization belt of the middle and lower reaches of Yangtze River
F₁. 郯庐断裂带;F₂. 襄樊—广济断裂带;F₃. 阳新一常州断裂带。

2 成矿地质条件

宁芜和庐枞地区处于同一大地构造背景之下,属于中生代形成的断陷盆地^[1,38]。因此,其在玢岩铁矿成矿地质特征上具有很多相似性。出露地层主要有志留系、三叠系、侏罗系、白垩系、古近系、新近系和第四系^[39];火山岩盆地内分布有为数众多的断裂构造,断裂构造是主要的控矿构造。

2.1 宁芜地区成矿地质条件

宁芜地区火山岩从下向上分为龙王山组、大王山组、姑山组和娘娘山组。龙王山组沿盆地东侧呈长条形分布,以粗面岩为主;大王山组是宁芜火山岩的主体,以粗面岩和辉石玄粗岩为主;姑山组分布范围小,主要分布在盆地南段的姑山、北段的梅山等地,主要出露安山质岩石;娘娘山组仅见于盆地西侧的娘娘山一带,与前 3 个组不同,是以石榴石响岩和黝方石响岩为主的碱性火山岩。空间分布上,宁芜火山岩以龙王山组(约占 20%)和大王山组(约占

75%)为主^[1],姑山组和娘娘山组空间分布则相对很小,不到 5% (图 2-B)。

中生代古特提斯构造作用的逐渐减弱、太平洋板块对欧亚大陆的俯冲作用,导致中国东部地区构造体制大转折^[24-25],郯庐断裂发生大规模的左行平移^[40-41]。区内 NNE 向基底断裂的形成与演化,在郯庐断裂左行动力剪切的影响下,制约了宁芜火山岩盆地的构造演化^[38]。NNE 向断裂与区内的 NW 向构造叠加复合的交汇部位,是岩浆—热液活动的有利构造空间,其对区内火山岩地层的空间分布形态和玢岩铁矿床的总体分布规律控制作用明显(图 2-B);NW 向断裂在区域动力场作用下,以左行剪切作用为主,其应力性质表现为剪张性。而与其共轭的 NNE 向断裂所处的交汇部位,往往是构造的薄弱区,是岩浆—热液活动以及成矿作用的有利部位;近 EW 向断裂主要表现为右行剪切,在左行应力场的持续作用下,其力学性质发生转变,由剪性变为剪张性。晚期花岗岩的东西向展布明显受 EW 向断裂的控制^[42]。

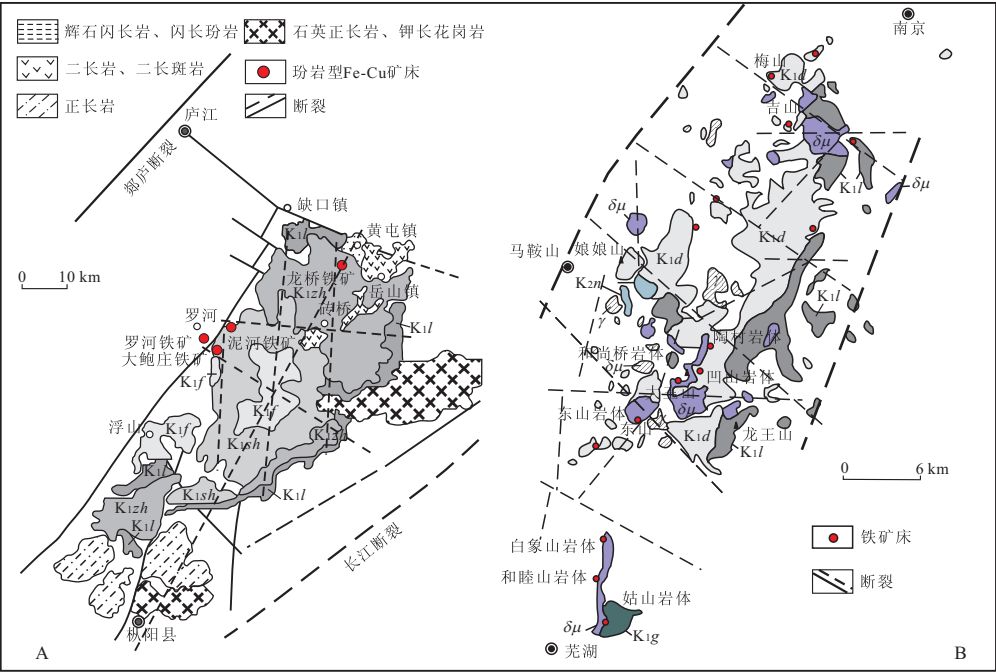


图 2 宁芜和庐枞盆地地质简图(据文献[1,20]修编)

Fig. 2 Simplified geologic map of Ningwu Basin and Luzong Basin

A. 庐枞盆地;B. 宁芜盆地。图 A:K₁l. 龙门院组;K₁zh. 砖桥组;K₁f. 浮山组;K₁sh. 双庙组。图 B:K₂n. 娘娘山组火山岩;K₁g. 姑山组火山岩;K₁d. 大王山组火山岩;K₁l. 龙王山组火山岩;δμ. 闪长玢岩;γ. 花岗岩。

2.2 庐枞地区成矿地质条件

庐枞地区火山岩分为两期 4 个喷发旋回:早期龙门院旋回、砖桥旋回;晚期双庙旋回和浮山旋回。龙门院旋回以玄武粗安质火山岩为主,砖桥旋回主要为安粗质火山岩,双庙旋回以粗面玄武岩所占比例最高,而浮山旋回则以粗面岩占绝对优势,在该旋回晚期还出现少量含假白榴石的粗面岩^[43]。4 个旋回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。龙门院组主要分布在盆地边缘;砖桥组主要分布在盆地中部,构成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;浮山组仅零星分布在庐枞盆地中部,出露面积较小(图 2-A)。

庐枞盆地的构造演化与宁芜盆地具有相似性,即同一大地构造背景的郯庐断裂左行平移,导致庐枞盆地中生代的构造演化。区内 NNE 向构造的形成与演化,不仅制约火山岩盆地基底沉积地层的空间展布^[19],并且对区内的铁—铜—金矿产的空间分布起明显的控制作用。NNE 向断裂与近 EW 向和 NW 向构造的交汇部位,是岩浆活动、成矿作用有利的构造部位。有别于宁芜盆地玢岩铁矿的“全面”产出,庐纵盆地玢岩铁矿主要分布于盆地的西部泥河—罗河以及东北部龙桥等地(图 2-A)。庐枞西部与东北部的玢岩铁矿主要分布于 NW 向断裂与 NNE

向断裂的交汇部位,NW 向断裂以左行剪切作用为主,其与 NNE 向断裂共轭,以剪张性作用为主。共轭断裂的交汇部位,是岩浆活动最为活跃的部位,在岩浆的侵入作用下极易成矿^[44]。

3 矿床地球化学特征

3.1 成矿岩体主量元素特征对比

长江中下游的成矿作用主要与 3 个岩浆岩系列有关^[32],宁芜和庐枞地区与成矿关系密切的火山岩是中国东部中生代燕山期岩浆大爆发的产物,玢岩铁矿的成矿与橄榄玄(安)粗岩系列岩浆的活动关系密切。宁芜地区的侵入岩是火山岩的同源侵入体^[1],是玢岩铁矿的成矿母岩^[9],主要由辉长闪长玢岩—辉长闪长岩、辉长岩和闪长玢岩组成;庐枞地区玢岩铁矿的成矿母岩与宁芜类似,主要由玄武粗安岩、辉石粗安岩、正长岩等组成。

宁芜和庐枞地区主要成矿岩体的常量元素组成见表 1。宁芜地区含矿岩体的 $w(\text{SiO}_2)$ 为 54.79%~60.68%,平均值为 56.01%; $w(\text{Na}_2\text{O})$ 为 3.50%~7.16%,平均值为 5.22%; $w(\text{K}_2\text{O})$ 为 0.58%~2.44%,平均值为 1.59%; $w(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 为 5.73%~7.74%,碱质含量较高,富钠贫钾, $w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{Na}_2\text{O})$ 比值为 0.08~0.64;里特曼指数(σ)为 2.85~4.45,属于钙碱性—碱性岩。庐枞地区

表 1 主要玢岩铁富含矿岩体主量元素组成

Table 1 Major elements composition of major porphyry iron intrusions		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	总和	资料来源
样号	岩性	w _B /%												
GY-1	闪长玢岩	57.94	0.74	16.96	3.99	1.43	0.08	3.76	4.62	4.09	2.44	0.31	99.79	本文
WY-1	闪长玢岩	54.79	0.89	16.77	5.66	4.07	0.13	3.80	4.53	6.14	1.10	0.21	99.78	
本文 DY-1	闪长玢岩	60.68	0.66	17.40	1.76	3.15	0.14	3.12	2.72	7.16	0.58	0.18	99.83	
JY-1	辉石闪长玢岩	50.62	1.06	17.75	5.41	4.13	0.14	5.05	7.58	3.50	2.23	0.36	99.71	
W29	辉石粗安玢岩	49.83	0.61	15.57	1.74	2.88	0.16	4.99	11.78	4.99	0.99	0.01	95.97	文献[20]
NHK1-2	辉石粗安玢岩	46.01	0.57	13.97	3.32	1.60	0.22	3.28	17.19	4.23	1.19	0.29	97.12	
L-1	玄武粗安玢岩	50.74	0.95	17.82	3.70	3.39	0.20	1.93	8.50	3.51	3.60	0.54	—	文献[45]
L-2	云辉二长斑岩	51.58	1.11	17.58	2.59	5.03	0.16	1.98	3.47	3.11	4.86	0.59	—	
ZK521-585	正长岩	63.00	0.36	16.34	1.99	2.85	0.06	0.88	1.39	4.05	6.93	0.11	100.31	文献[19]
ZK604-676	正长岩	62.01	0.30	15.92	3.25	2.80	0.06	1.27	1.66	3.46	7.97	0.14	100.46	

注:测试单位为国土资源部武汉矿产资源监督测试中心。GY-1. 姑山矿床;WY-1. 凹山矿床;DY-1. 东山矿床;JY-1. 吉山矿床;W29、NHK1-2. 泥河矿床;L-1、L-2 为罗河矿床;ZK521-585、ZK604-676 为龙桥矿床。

含矿岩体的 $w(\text{SiO}_2)$ 为 49.83%~63.00%, 平均值为 53.86%; $w(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 为 5.42%~11.43%, 相比于宁芜的富钠贫钾, 庐枞地区既富钠又富钾; $w(\text{Na}_2\text{O})$ 平均值为 3.89%, $w(\text{K}_2\text{O})$ 平均值为 4.26%, $w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{Na}_2\text{O})$ 比值为 0.20~2.30; σ 为 5.24~9.76, 属于碱性—过碱性岩。在 TAS 图(图 3)上, 宁芜和庐枞地区主要玢岩铁矿成矿岩体的岩性基本一致, 主要属于玄武质粗面安山岩、粗面安山岩和粗面岩; 庐枞地区成矿岩体主要属于钾玄岩系列(图 4), 表现为富碱富钾的特性, 这与庐枞地区火山岩的特征相似^[34]; 宁芜地区成矿岩体的岩石系列从低钾系列到高钾钙碱性系列均有分布, 这可能与宁芜地区火山岩从早期到晚期岩浆从低钾到高钾演化的特征有关^[1]。

宁芜和庐枞地区玢岩铁矿床成矿岩体普遍表现出较高的 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ (13.97%~17.82%)、高的 $w(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO})$ (4.62%~9.73%)、低的 $w(\text{TiO}_2)$

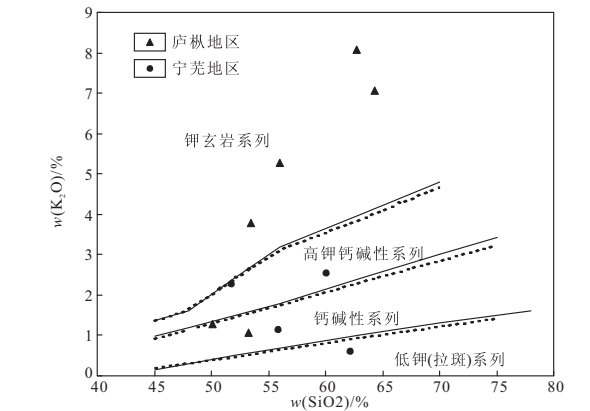


图 4 玢岩铁富含矿岩浆 $w(\text{K}_2\text{O})-w(\text{SiO}_2)$ 图解(底图引自文献[47])
Fig.4 Diagram of $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ of ore-bearing magmatic rocks in porphyry iron deposit

(0.30%~1.11%)。而与成岩有密切关系的 $w(\text{MgO})$ 和 $w(\text{CaO})$, 则表现出较大的差异: 宁芜地区 $w(\text{MgO})$ 为 3.12%~5.05%, $w(\text{CaO})$ 为 2.72%~7.58%; 庐枞地区 $w(\text{MgO})$ 为 0.88%~4.99%, $w(\text{CaO})$ 为 1.39%~11.79%。宁芜的 $w(\text{MgO})$ 、 $w(\text{CaO})$ 与 $w(\text{Na}_2\text{O})$ 间呈现负相关, 庐枞的 $w(\text{MgO})$ 、 $w(\text{CaO})$ 与 $w(\text{K}_2\text{O})$ 间表现出明显的正相关。这可能说明了宁芜地区成矿岩体与钠化和庐枞地区成矿岩体与钾化关系密切的特征。

3.2 稀土元素特征对比

宁芜和庐枞地区主要成矿岩体的稀土元素组成见表 2。宁芜地区含矿岩体稀土元素特征为: $w(\Sigma\text{REE})$ 为 $76.13\times 10^{-6}\sim 90.52\times 10^{-6}$, 平均值为 81.69×10^{-6} ; $\delta(\text{Eu})$ 为 0.73~0.92, 平均值为 0.83, 具有弱的负 Eu 异常; $w(\text{LREE})/w(\text{HREE})$ 比值为 4.97~6.39, 平均值为 5.68; $[w(\text{La})]_{\text{N}}/[w(\text{Yb})]_{\text{N}}$ 比值在 4.93~7.73 之间, 平均值为 6.20。庐枞玢岩铁矿成矿岩体稀土元素特征如下: $w(\Sigma\text{REE})$ 为 $176.80\times 10^{-6}\sim 349.64\times 10^{-6}$, 平均值为 251.462×10^{-6} ; $\delta(\text{Eu})$ 为 0.43~0.77, 平均值为 0.62, 为中—弱的负 Eu 异常; $w(\text{LREE})/w(\text{HREE})$ 比值为 9.21~14.96,

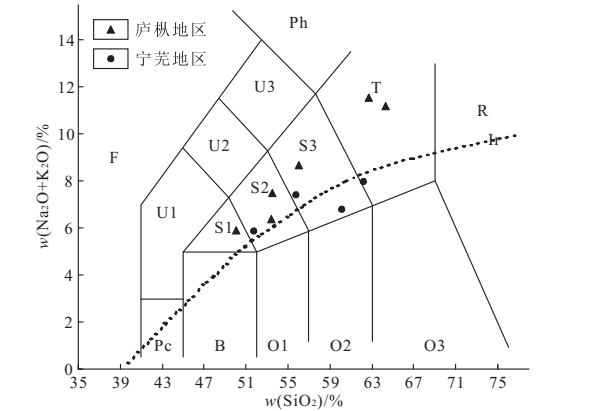


图 3 玢岩铁富含矿岩浆岩全碱—硅(TAS)分类(底图引自文献[46])
Fig.3 TAS classification diagram of porphyry iron deposit in ore-bearing magmatic rocks

Ir—Irvine 分界线, 上方为碱性, 下方为亚碱性; S1. 粗面玄武岩; S2. 玄武质粗面安山岩; S3. 粗面安山岩; T. 粗面岩、粗面英安岩。Ph. 响岩; U₃. 碱玄质响岩; U₂. 响岩质碱玄岩; U₁. 碱玄岩碧玄岩; Pc. 苦橄玄武岩; B. 玄武岩; O₁. 玄武安山岩; O₂. 安山岩; O₃. 英安岩; R. 流纹岩。

表 2 岩体及其磁铁矿稀土元素成分

Table 2 The characteristic of REE in intrusions and their corresponding magnetite

样号	GY-1	WY-1	DY-1	JY-1	LJ23	NHK1-2	ZK521-585	ZK604-676	DK-5	JK-6	WK-7	LJ-21	LJ-34	LQK-2	W6	LH-J
La	16.70	13.80	13.60	16.30	39.10	45.32	80.05	70.78	1.87	0.37	0.75	4.41	0.71	1.03	4.35	1.78
Ce	24.90	28.30	26.40	34.80	71.66	78.42	162.77	136.29	4.35	0.66	1.66	9.30	0.97	1.52	6.17	2.11
Pr	4.76	3.51	3.63	4.26	8.51	9.09	18.43	15.73	0.59	0.09	0.18	0.76	0.15	0.30	0.75	0.27
Nd	19.60	14.60	15.00	17.80	32.59	32.36	55.25	41.83	2.85	0.37	0.78	2.21	0.61	0.78	2.33	1.05
Sm	4.19	3.58	3.82	3.91	6.18	5.83	9.62	8.22	0.79	0.08	0.21	0.40	0.25	0.22	0.49	0.24
Eu	1.22	0.96	0.93	1.20	1.44	1.39	1.19	1.23	0.14	0.02	0.08	0.10	0.06	0.05	0.08	0.05
Gd	4.14	3.66	3.86	4.02	5.36	4.89	6.63	5.64	0.90	0.08	0.25	0.39	0.26	0.22	0.29	0.24
Tb $w_B/10^{-6}$	0.58	0.55	0.58	0.56	0.77	0.68	1.09	0.92	0.13	0.02	0.04	0.06	0.04	0.04	0.04	0.03
Dy	3.05	3.22	3.36	3.18	4.14	3.69	5.10	4.17	0.77	0.08	0.27	0.37	0.24	0.22	0.23	0.18
Ho	0.58	0.65	0.65	0.63	0.87	0.74	1.07	0.87	0.16	0.02	0.06	0.09	0.05	0.05	0.05	0.04
Er	1.48	1.67	1.72	1.65	2.56	2.02	3.25	2.58	0.42	0.05	0.16	0.23	0.12	0.17	0.13	0.12
Tm	0.23	0.28	0.31	0.26	0.42	0.31	0.59	0.47	0.07	0.01	0.03	0.04	0.02	0.03	0.02	0.02
Yb	1.55	1.86	1.98	1.71	2.73	1.97	3.98	3.18	0.46	0.07	0.19	0.21	0.12	0.21	0.13	0.10
Lu	0.21	0.26	0.30	0.24	0.47	0.31	0.62	0.51	0.06	0.01	0.03	0.04	0.03	0.04	0.02	0.02
Y	16.20	18.60	17.80	17.30	21.77	17.73			4.15	0.42	1.40	2.56	1.43	1.91	2.04	1.67
ΣREE	83.19	76.91	76.13	90.52	176.80	187.02	349.64	292.39	13.56	1.93	4.68	18.61	3.61	4.88	15.08	6.25
LREE	71.37	64.75	63.38	78.27	159.48	172.41	327.31	274.07	10.59	1.60	3.67	17.18	2.74	3.89	14.17	5.50
HREE	11.82	12.16	12.76	12.25	17.32	14.61	22.33	18.32	2.97	0.33	1.01	1.43	0.87	0.98	0.91	0.75
LREE/HREE	6.04	5.33	4.97	6.39	9.21	11.80	14.66	14.96	3.57	4.82	3.63	11.99	3.16	3.96	15.57	7.33
La _N /Yb _N	7.73	5.32	4.93	6.84	10.27	16.50	14.43	15.99	2.93	3.76	2.84	14.79	4.31	3.44	24.00	12.77
资料来源	本文				[20]		[48]		本文				[20]			

注: LJ23 为罗河玄武粗安玢岩; DK-5 为东山磁铁矿; JK-6 为吉山磁铁矿; WK-7 为凹山磁铁矿; LJ-21、LJ-34、LH-J 为罗河磁铁矿; LQK-2 为龙桥磁铁矿; W6 为泥河磁铁矿。其他样号同表 1。

平均值为 12.66; $[w(\text{La})]_{\text{N}}/[w(\text{Yb})]_{\text{N}}$ 为 10.27~16.50, 平均值为 14.30。由此可以清楚地表明: 庐枞地区的铁矿成矿岩体相比于宁芜地区 $w(\Sigma\text{REE})$ 更高, $\delta(\text{Eu})$ 较小, 轻稀土元素更加富集, 稀土元素的分馏程度也更高。

宁芜和庐枞地区的稀土元素配分曲线总体都呈右倾斜(图 5), 表明岩浆主要起源于地幔或玄武质下地壳。岩体均表现出较明显的负 Eu 异常, 说明岩浆岩在深部形成期间存在斜长石分离结晶作用。轻稀土元素部分的斜率大于重稀土元素部分, 表明其具有轻稀土元素富集的特征。虽然磁铁矿的 $w(\Sigma\text{REE})$ 明显低于含矿岩浆岩的 $w(\Sigma\text{REE})$, 但磁铁矿的 REE 特征继承或保存了含矿岩浆岩的源区信息。尽管矿物的 REE 总量并不一致, 但配分模式曲线与相应岩浆岩的右倾模式类似, 表明成矿作用与成矿岩体关系密切。磁铁矿的 REE 配分曲线基本与含矿岩体一致, 但相比于岩体更富集 HREE, 这是由于磁铁矿比岩体更易捕获岩浆热液中的 HREE。

3.3 铅同位素特征

宁芜地区玢岩型铁矿床(凹山、东山、吉山、梅山、姑山)矿石中磁铁矿、赤铁矿和黄铁矿的铅同位素组成: $N(^{206}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb})$ 为 18.25~19.33, 平均值为 18.52; $N(^{207}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb})$ 为 15.60~15.69, 平均值为 15.64; $N(^{208}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb})$ 为 38.34~49.80, 平均值为 39.21^[49]。庐枞地区玢岩铁矿床(大鲍庄、罗河)矿石中黄铁矿、磁铁矿、赤铁矿的铅同位素组成: $N(^{206}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb})$ 为 17.92~18.20; $N(^{207}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb})$ 为 15.384~15.591; $N(^{208}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb})$ 为 37.602~38.420。对比代表宁芜和庐枞盆地火山岩铅同位素特征的同源侵入体铅同位素

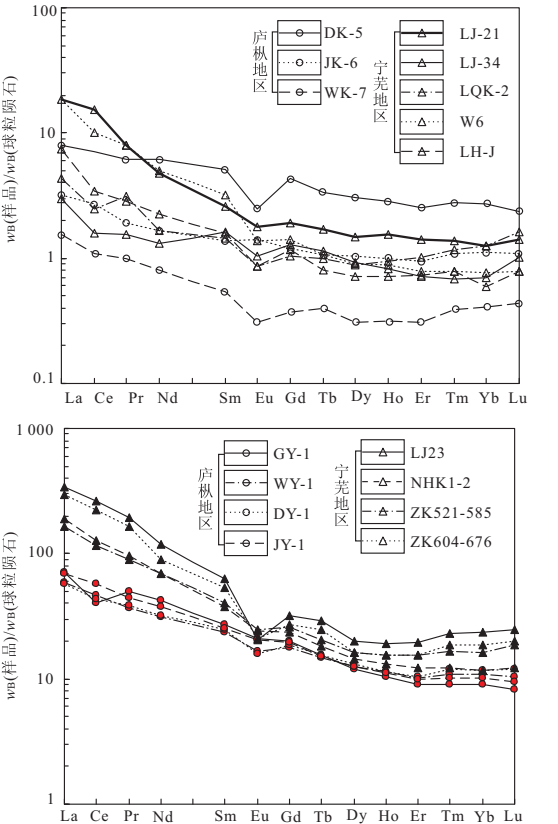


图 5 玢岩铁矿岩浆岩和磁铁矿稀土元素 C_1 球粒陨石标准化图解
Fig. 5 C_1 chondrite-normalized diagrams of ore-bearing magmatic rocks and magnetite in porphyry iron deposit

(表 3), 其 $N(^{206}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb})$ 为 18.072~18.830、 $N(^{207}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb})$ 为 15.460~15.740、 $N(^{208}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb})$ 为 37.951~38.870。可以看出, 玢岩铁矿矿石铅同位素基本位于岩体铅同位素组成的范围内, 表明二者存在成因上的联系。

表 3 岩体铅同位素成分表

Table 3 The characteristic of Pb isotope in intrusions

样品	$N(^{206}\text{Pb})/$ $N(^{204}\text{Pb})$	$N(^{207}\text{Pb})/$ $N(^{204}\text{Pb})$	$N(^{208}\text{Pb})/$ $N(^{204}\text{Pb})$	$N(^{206}\text{Pb})/$ $N(^{207}\text{Pb})$	t/Ma	μ	$w(\text{Th})/$ $w(\text{U})$	资料来源
钟九钠长闪长岩	18.268	15.590	38.264	1.171 8	258	9.46	3.73	文献[9]
姑山辉长闪长岩	18.375	15.589	38.371	1.178 7	179	9.45	3.72	
陶村钠长岩	18.335	15.630	38.543	1.173 1	259	9.53	3.82	
蒋庙辉长岩	18.592	15.591	38.467	1.192 5	22	9.43	3.65	
阳湖塘辉长岩	18.072	15.473	37.951	1.168 0	257	9.25	3.68	
蒋庙辉长岩	18.473	15.528	38.258	1.189 7	28	9.32	3.61	
姑山辉长岩	18.830	15.740	38.870	1.196 3	38	9.70	3.72	
罗河粗安岩	18.610	15.460	38.760	1.203 8	-169	9.17	3.74	文献[43]
罗河粗安岩	18.370	15.540	38.640	1.182 1	121	9.35	3.83	文献[46]
龙桥二长岩	18.568	15.635	38.714	1.187 6	96	9.52	3.77	
龙桥正长岩	18.396	15.539	38.331	1.183 9	100	9.35	3.68	

在铅的演化图上,宁芜和庐枞的成矿岩体铅主要分布于地幔和上地壳之间的区域(图 6),并且与 EM-Ⅱ 型地幔关系密切。宁芜和庐枞岩浆岩铅同位素多为正常铅(异常铅为负年龄值), μ 值为 9.25~9.70(表 3),高于地幔 μ 值(8~9)^[51],也表明地幔源区不是原始地幔而可能是交代地幔。另外,宁芜地区和庐枞地区部分岩体铅靠近地壳铅的区域,可能表明两区岩体铅的来源并不是单一的。长江中下游地区下二叠统栖霞组、上石炭统黄龙组一船山组碳酸盐岩的铅同位素^[52]和石炭系的铅同位素^[53]组成涵盖了宁芜和庐枞地区岩体与矿石铅同位素的变化范围。因此,玢岩铁矿的岩浆来源可能同时有部分地壳物质的参与。

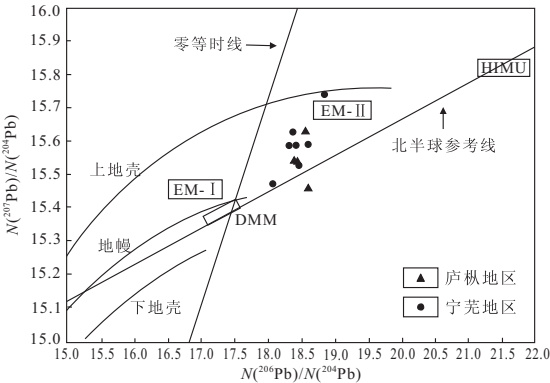


图 6 含矿岩浆岩铅同位素演化图解(底图引自文献[50])

Fig. 6 Pb isotope evolution diagram of ore-bearing magmatic rocks EM-I. 富集地幔 I; EM-II. 富集地幔 II; DMM. 亏损的 MORB 地幔; HIMU. 高 $w(\text{U})/w(\text{Pb})$ 值的地幔。

4 成矿动力学背景探讨

4.1 玢岩铁矿成岩成矿年代

张旗等^[54]运用 SHRIMP 锆石 U-Pb 方法测得与玢岩铁矿成矿关系密切的宁芜龙王山组和大王山组火山岩年龄分别为(131±4)Ma 和(127±3)Ma;侯可军等^[55]测得大王山组锆石年龄为(130.3±0.9)Ma,姑山组两个锆石年龄分别为(128.2±1.3)Ma 和(128.5±1.8)Ma。综合对比前人^[54-55]的研究

成果,认为宁芜地区火山岩的形成年龄在 131~126 Ma 之间较为合理。周涛发等^[56]运用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 方法对庐枞盆地 4 个火山旋回进行了系统的年龄测试,获得岩浆岩的主体年龄为 135~127 Ma。以 135 Ma 作为侏罗纪和白垩纪的分界,宁芜和庐枞盆地火山岩均形成于早白垩世;早期岩浆活动与晚期岩浆活动之间间隔 5~8 Ma,表明盆地内火山活动几乎是集中爆发,并且持续时间较短。

宁芜盆地内与玢岩铁矿成矿有关的主要闪长玢岩的成岩年龄约为 130 Ma^[57]。覃永军等^[20]测得泥河铁矿辉石粗安玢岩锆石年龄为(132.8±2.6)Ma,罗河铁矿两个玄武粗安玢岩锆石年龄为(133.3±0.6)Ma 和(133.2±1.1)Ma。陶村铁矿金云母³⁹Ar-⁴⁰Ar 和东山铁矿阳起石³⁹Ar-⁴⁰Ar 等时线年龄分别为(128±14)Ma^[58]和 129~126 Ma^[59];龙桥铁矿与成矿作用密切的金云母³⁹Ar-⁴⁰Ar 等时线年龄为(130.5±1.1)Ma^[50]。通过测试玢岩铁矿成矿岩体的年龄,同时结合野外岩体与矿体之间的空间产出关系,可以定性推测岩体与成矿作用在时间上近于一致或略晚;而与成矿作用密切相关的单矿物年龄,则可以从定量的角度确定矿床的形成年龄。研究区岩体与成矿在时间上相差大约 2 Ma。因此,根据玢岩铁矿岩体年龄和成矿年龄可以推测:宁芜地区玢岩铁矿形成于约 128 Ma,庐枞地区玢岩铁矿形成于 131~130 Ma。这与长江中下游成矿带自西向东成矿时代由早到晚的趋势是一致的^[4,31-32]。

4.2 成矿地球动力学机制

早三叠世,印支运动使扬子、华北两大板块碰撞焊接,中国东部经过持续的南北向挤压,形成了总体以 EW 向为主的构造线;燕山期来自南东的太平洋板块俯冲欧亚板块的主导作用,使该区域发生了构造体制转换与调整的过程,主构造线由 EW 向转变为 NE-NNE 向^[22,60]。南、北陆块的相向挤压,使得中国东部发生陆内造山运动,导致岩石圈显著加厚^[60-61];此后,大陆岩石圈在中生代发生软流圈的上涌和大规模的减薄作用^[23-24,62-65]。长江中下游地区

[9] 邢凤鸣. 宁芜地区中生代岩浆岩的成因:岩石学与 Nd, Sr, Pb 同位素证据[J]. 岩石矿物学杂志, 1996, 15(2):126-137.

[10] 薛怀民, 陶奎元. 宁芜地区中生代火山岩系列的新认识及其地质意义[J]. 江苏地质, 1989, 13(3):9-14.

[11] 胡文瑄, 胡受爰. 宁芜和庐枞地区钠长石化的钠质来源新探[J]. 地质找矿论丛, 1991, 6(2): 36-46.

[12] 李荫青, 魏家秀, 周兴汉, 等. 某玢岩铁矿床中气液包裹体特征和成矿温度[J]. 地质学报, 1979, 53(1): 50-59.

[13] 李秉伦, 谢奕汉. 宁芜地区宁芜型铁矿的成因、分类和成矿模式[J]. 中国科学:B 辑, 1984, 3(1):80-86.

[14] 余金杰. 宁芜地区凹山和太山铁矿床中磷灰石 Sr 同位素特征及意义[J]. 地质评论, 2003, 49(3): 272-277.

[15] 赵永鑫. 关于白象山铁矿床矿质来源的讨论[J]. 地质科技情报, 1983, 12(增刊 1): 95-104.

[16] 江永宏. 安徽庐枞地区铁—铜矿成矿规律与找矿[J]. 世界地质, 2010, 29(3):372-382.

[17] 吴礼彬, 陈芳, 杜建国, 等. 安徽庐枞地区铁矿成矿条件和综合信息标志[J]. 地质通报, 2010, 29(10):1572-1578.

[18] 曾键年, 覃永军, 郭坤一, 等. 安徽庐枞地区含矿岩体锆石 U-Pb 年龄及其对成矿时限的约束[J]. 地质学报, 2010, 84(4): 465-478.

[19] 吴明安, 侯明金, 赵广文. 安徽省庐枞地区成矿规律及找矿方向[J]. 资源调查与环境, 2007, 28(4): 269-278.

[20] 覃永军, 曾键年, 曾勇, 等. 安徽南部庐枞盆地罗河—泥河铁矿田含辉石粗安玢岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义[J]. 地质通报, 2010, 29(6):851-862.

[21] 和政军, 李锦铁, 牛宝贵, 等. 燕山—阴山地区晚侏罗世强烈推覆—隆升事件及沉积响应[J]. 地质论评, 1998, 44(4): 407-418.

[22] 董树文, 张岳桥, 龙长兴, 等. 中国侏罗纪构造变革与燕山期运动新诠释[J]. 地质学报, 2007, 81(11): 1449-1461.

[23] 邓晋福, 莫宣学, 赵海铃, 等. 中国东部岩石圈去根/去根作用与大陆“活化”[J]. 现代地质, 1994, 8(3): 349-356.

[24] 吴福元, 孙德有. 中国东部中生代岩浆作用与岩石圈减薄[J]. 长春科技大学学报, 1999, 29(4): 313-318.

[25] 徐义刚. 岩石圈的热—机械侵蚀和化学侵蚀与岩石圈减薄[J]. 矿物岩石地球化学通报, 1999, 18(1): 1-5.

[26] 郑建平, 路凤香, Griffin W L, 等. 华北东部橄榄岩与岩石圈减薄中的地幔伸张和侵蚀置换作用[J]. 地学前缘, 2006, 13(2): 77-85.

[27] Mao J W, Wang Y T, Lehmann B. Molybdenite Re-Os and albite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of Cu-Au-Mo and magnetite porphyry systems in the Yangtze River Valley and metallogenic implications[J]. Ore Geology Reviews, 2006, 29(3/4):307-324.

[28] Xie G Q, Mao J W, Li R L, Bierlein F P. Geochemistry and Nd-Sr isotopic studies of Mesozoic granitoids in the southeastern Hubei Province, Middle-Lower Yangtze River belt, eastern China: Petrogenesis and tectonic setting[J]. Lithos, 2008, 104: 216-230.

[29] Pan Y M and Dong P. The Lower Changjiang (Yangzi/Yangtze River) metallogenic belt, east central China: Intrusion-and wall rock hosted Cu-Fe-Au, Mo, Zn, Ag deposits[J]. Ore Geology Reviews, 1999, 15(4): 177-241.

[30] 陶奎元, 毛建仁, 杨祝良, 等. 中国东南部中生代岩石构造组合和复合动力学过程的记录[J]. 地学前缘, 1998, 5(4): 183-192.

[31] 吕庆田, 侯增谦, 杨竹森, 等. 长江中下游地区的底侵作用及动力学演化模式: 来自地球物理资料的约束[J]. 中国科学:D 辑, 2004, 34(9): 783-794.

[32] 周涛发, 范裕, 袁峰. 长江中下游成矿带成岩成矿作用研究进展[J]. 岩石学报, 2008, 24(8):1665-1678.

[33] 王德滋, 任启江, 邱检生, 等. 中国东部橄榄安粗岩省的火山岩特征及其成矿作用[J]. 地质学报, 1996, 70(1): 23-34.

[34] 袁峰, 周涛发, 范裕, 等. 庐枞盆地中生代火山岩的起源、演化及其形成背景[J]. 岩石学报, 2008, 24(8): 1691-1702.

[35] 邢凤鸣, 徐翔. 安徽扬子岩浆岩带与成矿[M]. 合肥: 安徽人民出版社, 1999: 1-70.

[36] 范裕, 周涛发, 袁峰, 等. 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[J]. 岩石学报, 2008, 24(8): 1715-1724.

[37] 毛景文, 邵拥军, 谢桂青, 等. 长江中下游成矿带铜陵矿集区铜多金属矿床模型[J]. 矿床地质, 2009, 28(2): 109-119.

[38] 姜波, 徐嘉炜. 一个中生代的拉分盆地: 宁芜盆地的形成与演化[J]. 地质科学, 1989, 32(4):314-321.

[39] 任启江, 王德滋, 徐朝文, 等. 安徽庐枞火山—构造洼地的形成、演化及成矿[J]. 地质学报, 1993, 67(2): 131-145.

[40] 朱光, 徐嘉炜. 庐庐断裂带的平移幅度、平移时代及其构造模式[C]//陈毓川, 张荣华, 盛继福, 等. 第 30 届国际地质大会论文集, 第 14 卷. 构造地质学、地质力学. 北京: 地质出版社, 1998: 167-175.

[41] Xu J W, Zhu G. Tectonic models of the Tan-Lu fault zone, eastern China[J]. International Geology Review, 1994, 36: 771-784.

[42] 曾键年, 王思源, 陈津华, 等. 长江中下游重要矿集区成矿地球动力学背景及构造—成矿响应(宁芜地区报告)[R]. 武汉: 中国地质大学, 2010.

[43] 刘洪, 邱检生, 罗清华, 等. 安徽庐枞中生代富钾火山岩成因的地质地球化学制约[J]. 地球化学, 2002, 31(2): 235-249.

[44] 曾键年, 王思源, 马振东, 等. 长江中下游重要矿集区成矿地球动力学背景及构造—成矿响应(庐枞地区报告)[R]. 武汉: 中国地质大学, 2009.

[45] 黄清涛, 尹恭沛. 安徽庐江罗河铁矿[M]. 北京: 地质出版社, 1989:4-7, 44, 46, 70, 111.

[46] Le Bas M J, le Maitre R, Streckeisen A, et al. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram[J]. Petrol., 1986, 27:745-750.

[47] Peccerillo R, Taylor S R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey[J]. Mineral Petrol., 1976, 58:63-81.

[48] 吴明安, 张千明, 汪祥云, 等. 安徽庐江龙桥铁矿[M]. 北京: 地质出版社, 1996.

[49] 马芳, 蒋少涌, 蒋耀辉, 等. 宁芜地区玢岩铁矿 Pb 同位素研究[J]. 地质学报, 2006, 80(2): 279-286.

[50] 段超. 安徽庐枞盆地龙桥铁矿床地质地球化学特征和矿床成因研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.

[51] Stacey J S, Kramers J D. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two stage model[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1975, 26(2):207-221.

[52] 王文斌, 李文达, 谢华光, 等. 长江中下游铜铁多金属矿床铅同位素特征[J]. 火山地质与矿产, 1995, 16(2): 67-77.

[53] 周涛发, 岳书仓, 袁峰, 等. 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、铅同位素岩浆[J]. 中国科学: D 辑, 2000, 30(增刊): 122-128.

[54] 张旗, 简平, 刘敦一, 等. 宁芜火山岩的锆石 SHRIMP 定年及其意义[J]. 中国科学:D 辑, 2003, 33(4): 209-215.

[55] 侯可军, 袁顺达. 宁芜盆地火山一次火山岩的锆石 U-Pb 年龄, Hf 同位素组成及其地质意义[J]. 岩石学, 2010, 26(3): 888-902.

[56] 周涛发, 范裕, 袁峰, 等. 安徽庐枞(庐江—枞阳)盆地火山岩的年代学及其意义[J]. 中国科学:D辑, 2008, 38(11): 131-145.

[57] 范裕, 周涛发, 袁峰, 等. 宁芜盆地闪长玢岩的形成时代及对成矿的指示意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(9): 2715-2728.

[58] 袁顺达, 侯可军, 刘敏. 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[J]. 岩石学报, 2010, 26(3): 797-808.

[59] 马芳, 蒋少涌, 薛怀民. 宁芜盆地凹山和东山铁矿床中阳起石的激光³⁹Ar-⁴⁰Ar 年代学研究[J]. 矿床地质, 2010, 29(2): 283-289.

[60] 朱光, 刘国生. 皖南江南陆内造山带的基本特征与中生代造山过程[J]. 大地构造与成矿学, 2000, 24(2): 103-111.

[61] 薛怀民, 汪应庚, 马芳, 等. 高度演化的黄山 A 型花岗岩: 对扬子克拉通东南部中生代岩石圈减薄的约束? [J]. 地质学报, 2009, 83(2): 247-259.

[62] 路凤香, 郑建平, 邵济安, 等. 华北东部中生代晚期—新生代软流圈上涌与岩石圈减薄[J]. 地学前缘, 2006, 13(2): 87-92.

[63] 吴福元, 孙德友. 中国东部中生代岩浆作用与岩石圈减薄[J]. 长春科技大学学报, 1999, 29(4): 313-318.

[64] 嵇少臣, 王茜, 许志琴. 华北克拉通破坏与岩石圈减薄[J]. 地质学报, 2008, 82(2): 174-193.

[65] Sun W D, Xie Z, Chen J F et al. Os-Os dating of copper and molybdenum deposits along the middle and lower reaches of the Yangtze River, China[J]. Economic Geology, 2003, 98: 175-180.

[66] 徐晓春, 陆三明, 谢巧勤, 等. 安徽铜陵狮子山矿田岩浆岩锆石 SHRIMP 定年及其成因意义[J]. 地质学报, 2008, 82(4): 500-507.

[67] 王彦斌, 刘敦一, 蒙义峰, 等. 安徽铜陵新桥铜硫铁矿床中石英闪长岩和辉绿岩锆石 SHRIMP 年代学及其意义[J]. 中国地质, 2004, 31(2): 169-173.

[68] 楼亚儿, 杜杨松. 安徽繁昌中生代侵入岩的特征和锆石 SHRIMP 测年[J]. 地球化学, 2006, 35(4): 21-29.

[69] 徐夕生, 范钦成, O'Reilly S Y, 等. 安徽铜官山石英闪长岩及其包体锆石 U-Pb 定年与成因探讨[J]. 科学通报, 2008, 82(4): 500-507.

[70] 薛怀民, 董树文, 马芳. 安徽庐枞火山岩盆地橄榄玄粗岩系的地球化学特征及其对下扬子地区晚中生代岩石圈减薄机制的约束[J]. 地质学报, 2010, 84(5): 664-681.

[71] 谢桂青, 毛景文, 李瑞玲, 等. 长江中下游鄂东南地区大寺组火山岩 SHRIMP 定年及其意义[J]. 科学通报, 2006, 51(19): 2283-2291.

[72] 曹毅. 安徽庐枞地区中生代 A 型花岗岩类及其岩石包裹体[D]. 北京: 中国地质大学, 2008.

[73] 范裕, 周涛发, 袁峰, 等. 安徽庐江—庐枞地区 A 型花岗岩的 LA-ICP-MS 定年及其地质意义[J]. 岩石学报, 2008, 24(8): 1715-1724.

Characteristic of Deposit Geochemistry and Discussion
with Metallogenic Dynamics Background of Porphyrite Iron
in Ningwu and Luzong Volcanic Basins

CHEN Jin-hua¹, ZENG Jian-nian¹, WANG Si-yuan¹, LI Jin-wei¹, QIU Jin-liang², ZHANG Yan²

(1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;
2. Nanjing Center of Geological Survey, CGS, Nanjing 210016, China)

Abstract: Porphyrite iron deposit is one of important deposit types in China. Ningwu and Luzong volcanic basins are the main ore districts in the middle and lower reaches of Yangtza River. The structure of Ningwu and Luzong basins is analyzed separately. It shows that NNE-trending faults and NW-trending faults control magmatism in the area and the intersections of fracture are often the favorable space for porphyrite iron deposits. Comprehensive comparison with major elements, rare earth elements and lead isotopes of ore rock, in Ningwu and Luzong area, shows that they have similar geochemical characteristics and common material source. The characteristics of REE show that the ore-forming materials of porphyrite iron deposits are mainly from lower crust or mantle, Pb isotopic characteristics further illustrate that the ore-forming materials are closely related with EM-II mantle. Ningwu and Luzong basins were affected by the subduction of Pacific plate, and mineralization was controlled by magmatic activity. The difference in mineralization of porphyrite iron may be due to the different levels of contamination by crust.

Key words: geodynamic mechanism; mineralization; geochemical comparison of ore-forming; porphyrite iron deposit; Ningwu Basin; Luzong Basin