

宁芜盆地凹山铁矿床黄铁矿 Re-Os 同位素 定年及其地质意义

徐益龙, 黄德志, 刘震, 郑涛, 周炜鉴

(中南大学 地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083; 中南大学 有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 湖南 长沙 410083)

摘要: 宁芜盆地是长江中下游成矿带的7个矿集区之一, 以中生代火山岩和玢岩铁矿的广泛发育为特征。凹山铁矿床位于盆地中部, 是宁芜盆地玢岩型铁矿床的重要代表之一。本文首次利用成矿元素 Fe 的金属矿物对宁芜盆地凹山铁矿床的黄铁矿进行了 Re-Os 同位素测年, 获得凹山铁矿床的黄铁矿 Re-Os 同位素等时线年龄为 127.7 ± 2.6 Ma ($n=5$, $MSWD=0.66$), 直接代表凹山铁矿床的成矿年龄。 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始比值为 1.73 ± 0.56 , $\gamma_{\text{Os}(t)}$ 值为 527.18 ~ 535.93, 介于地幔与地壳之间, 结合已有研究成果, 认为凹山铁矿床的成矿物质主要来源于富集地幔, 少量来自地壳。

关键词: Re-Os 同位素定年; 黄铁矿; 凹山; 玢岩铁矿; 宁芜盆地

中图分类号: P597+.3; P618.31

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2019)02-0219-11

Re-Os isotopic dating of pyrite from the Washan iron deposit in Ningwu Basin and its geological implications

XU Yi-long, HUANG De-zhi, LIU Zhen, ZHENG Tao and ZHOU Wei-jian

(School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China; Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring (Central South University), Ministry of Education, Changsha 410083, China)

Abstract: Ningwu Basin, which is characterized by widespread porphyritic iron ore deposits, is one of the seven ore concentration areas in the Middle and Lower Yangtze metallogenic belt. The Washan iron deposit, which is one of the important representatives of porphyritic iron-ore deposits in Ningwu Basin, is located in the middle of the basin. In this study, the result of Re-Os isotopic dating of pyrites collected from the Washan iron deposit was reported. It is for the first time that the metallogenic age was determined by iron-bearing metallic minerals in Ningwu area. The results show that the Re-Os isochron age of pyrites in Washan iron deposit is 127.7 ± 2.6 Ma ($n=5$, $MSWD=0.66$), which can directly represent the metallogenic age of the Washan iron deposit. The initial $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ ratio is 1.73 ± 0.56 , and the $\gamma_{\text{Os}(t)}$ values are from 527.18 to 535.93, which are between the value of the mantle and that of the crust. Combined with previous studies, it is suggested that ore-forming materials of the Washan iron deposit was mainly derived from the enriched mantle and partly from the crust.

收稿日期: 2018-08-05; 接受日期: 2019-01-08; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家科技支撑项目(2011BAB04D01)

作者简介: 徐益龙(1994-), 男, 硕士研究生, 构造地质与地球化学专业, E-mail: 294547855@qq.com; 通讯作者: 黄德志(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事构造地质与地球化学研究, E-mail: Dzhuang_01@163.com。

Key words: Re-Os isotopic dating; pyrite; Washan; porphyric iron-ore deposits; Ningwu Basin

Fund support: National Science and Technology Support Program (2011BAB04D01)

宁芜中生代火山盆地是我国著名的长江中下游成矿带的7个矿集区之一,位于长江中下游成矿带的东段(图1),以中生代火山岩和玢岩铁矿的广泛发育为特征。前人对该地区成岩成矿作用进行了总结,提出了著名的玢岩铁矿理论,并建立了成矿模式(宁芜研究项目编写小组,1978)。自20世纪70年代以来,人们对宁芜玢岩型铁矿床进行了详细的岩石学、矿物学、矿床学、地球化学的研究(宁芜项目编写小组,1978;李秉伦等,1984;卢冰等,1990;段超等,2012),对宁芜地区铁矿床的成因、地球动力学背景等也进行了探讨(薛怀民等,2010;袁顺达等,2010;段超等,2012)。关于玢岩铁矿的成因,主要存在3种不同的观点:矿浆或岩浆型(宁芜项目编写小组,1978;吴言昌等,1999; Hou *et al.*, 2009, 2010)、热液型(卢冰等,1990)、岩浆热液型(林新多等,1998)。研究表明该地区在成岩成矿过程中可能经历了岩石圈伸展-减薄、软流圈物质上涌及壳幔相互作用的动力学演化过程(毛景文等,2005;段超等,2011)。

近年来,众多学者对该地区进行了大量的年代学研究,积累了大量的年代学数据。根据这些年龄资料,宁芜火山岩盆地的成岩成矿年代被限定为早白垩世,成岩年代为131.1~127.6 Ma(范裕等,2010a;薛怀民等,2010;侯可军等,2010;段超等,2011;张燕等,2013),而成矿年代学研究却得出一个相对宽泛的年龄134.9~122.9 Ma(Yu and Mao, 2004;马芳等,2010;袁顺达等,2010;范裕等,2011)。宁芜矿集区成矿年代的精确厘定对于该地区成岩成矿作用的深入研究具有重要的意义。段超等(2011)通过对宁芜铁矿辉长闪长玢岩和花岗闪长斑岩的锆石测年研究得出一个较为狭窄的年龄(131~126 Ma),并以此代表成矿年龄。然而,目前针对矿床金属矿物进行直接的成矿年龄测定尚较缺乏。凹山铁矿床是宁芜盆地玢岩型铁矿床的重要代表之一,位于盆地中部。本文在野外工作基础上,对凹山铁矿床中黄铁矿开展了Re-Os同位素年代学研究,以期得出一个精确的成矿年龄,并试探讨凹山铁矿娘娘山组是以石榴石响岩为主的碱性火山岩,总体为一套偏碱性的中基性-碱性岩石组合。盆地内出露的岩体主要为花岗岩和闪长岩类。花岗岩类岩石

床的成矿物质来源。

1 区域地质背景

长江中下游多金属成矿带是中国东部中生代大规模成矿的重要地区之一,位于扬子板块北缘的长江断裂带内,长期的构造作用、岩浆活动和成矿作用形成了断隆区和断凹区的次级构造格局及丰富多样的多金属矿床组合(王存智等,2018)。该地区金属矿床(点)共计有200余处,包括7个大型矿集区,由北东向南西,依次为宁镇Cu-Fe-Pb-Zn矿集区、宁芜Fe矿集区、铜陵Cu-Au矿集区、庐枞Fe-Cu矿集区、安庆-贵池Cu矿集区、九瑞Cu-Au矿集区和鄂东南Fe-Cu矿集区。主要的矿床类型包括与高钾钙碱性花岗岩类有关的矽卡岩-斑岩型Cu-Fe-Au-Mo矿床和与富钠钙碱性闪长岩类有关的玢岩型Fe矿床,这两类矿床分别主要位于长江中下游成矿带的断隆区和断凹区。

宁芜盆地位于长江中下游成矿带东部断凹区,东临方山-小丹阳断裂,西依长江断裂带,南、北分别以芜湖断裂和南京-湖熟断裂为界,是一个继承式的中生代断陷型火山盆地(图1)。盆地内主要发育有NNE向和NWW向两组断裂,构成盆地内部的主要构造格架。其中NNE向断裂大多呈25°~35°方向延伸,对火山岩分布和矿化具有重要的控制作用;NWW断裂大多呈300°~330°方向延伸,切割火山岩系及NNE向断裂。

盆地内出露的基底地层自上而下有青龙组(T_2q)海相石灰岩、黄马青组(T_3h)陆相砂页岩、象山群($J_{1-2}xn$)陆相碎屑岩和西横山组(J_3x)类磨拉石建造。发育的火山岩地层从老至新为龙王山组(134.8 ± 1.8 Ma)、大王山组(132.2 ± 1.6 Ma)、姑山组(129.5 ± 0.8 Ma)和娘娘山组(126.8 ± 0.6 Ma)(Zhou *et al.*, 2011),组成4个火山岩旋回。各火山岩旋回均以爆发相开始,随后溢流相增多,最终以火山沉积相结束(范裕等,2010b;段超等,2011)。其中龙王山组、大王山组和姑山组以安山质岩石为主,主要产于盆地中段,出露零星,大多呈小岩体产出,主要为石英二长岩类和花岗质岩,形成于130~126 Ma之间(侯可军等,2010;段超等,2011;袁峰等,

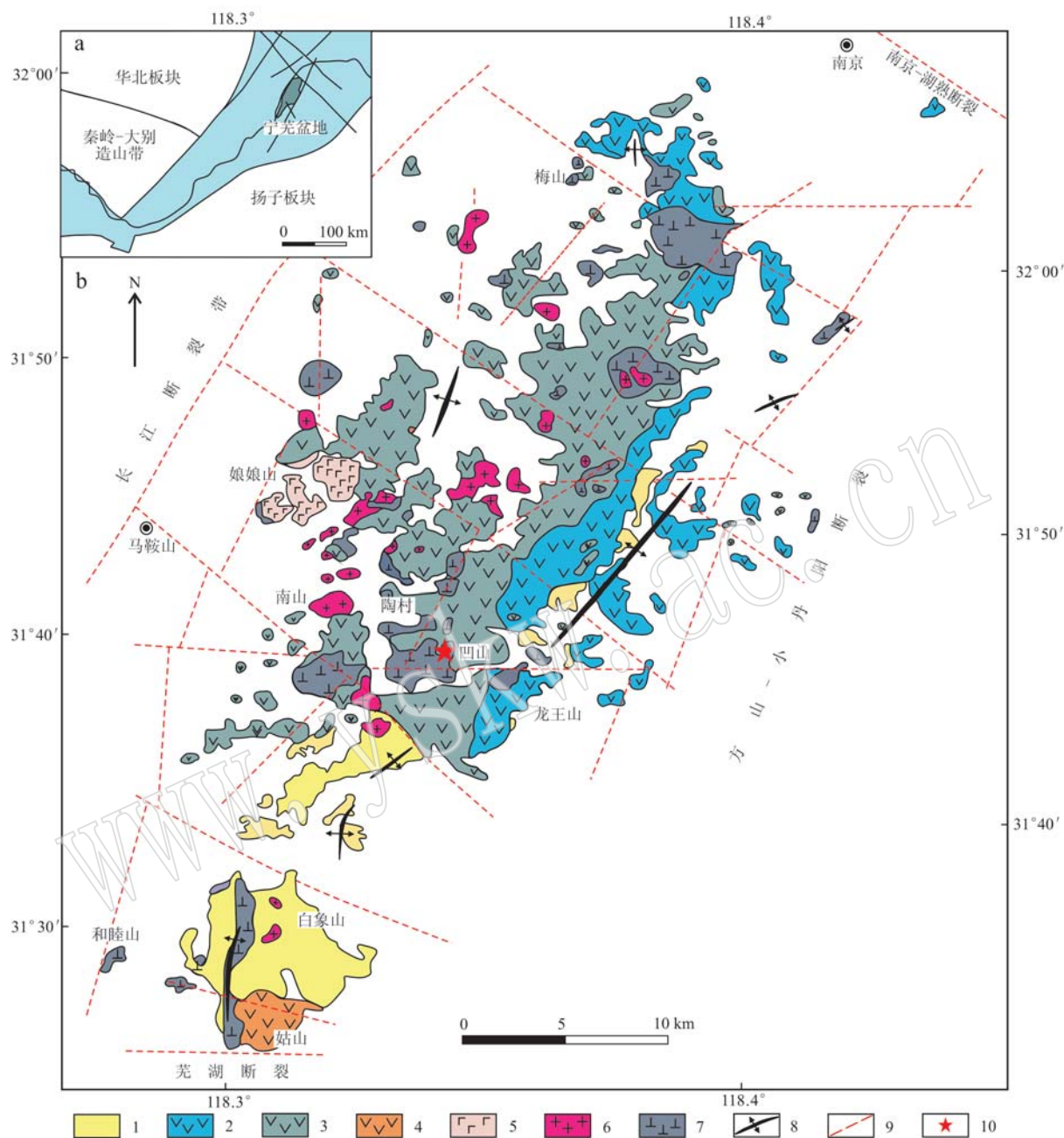


图1 宁芜盆地地质简图(据宁芜项目编写小组, 1978 修改)

Fig. 1 Geological sketch map of the Ningwu Basin (modified after Ningwu Research Group, 1978)

1—火山岩基底地层; 2—龙王山火山岩; 3—大王山火山岩; 4—姑山火山岩; 5—娘娘山火山岩; 6—花岗岩; 7—闪长玢岩; 8—背斜;
9—断裂; 10—凹山铁矿床

1—volcanic basement; 2—Longwangshan volcanic rocks; 3—Dawangshan volcanic rocks; 4—Gushan volcanic rocks; 5—Niangniangshan volcanic rocks; 6—granite; 7—diorite porphyrite; 8—anticlines; 9—fault; 10—Washan iron deposit

2011)。闪长岩类出露面积大小不一, 约为 $0.01 \sim 10 \text{ km}^2$, 呈带状分布, 受 NNE 和 NWW 向断裂控制, 主要为辉长闪长岩和辉长闪长玢岩, 其中辉长闪长玢岩与铁矿的形成密切相关, 为盆地内铁矿床的富矿

岩石, 形成于 $131.1 \sim 127.6 \text{ Ma}$ 之间(范裕等, 2010a; 薛怀民等, 2010; 侯可军等, 2010; 段超等, 2011; 张燕等, 2013)。

2 矿床地质特征

凹山铁矿床位于盆地中段,为宁芜矿集区发育的3个矿田之一,同时也是玢岩型铁矿床的重要代表之一。区内出露地层为龙王山组和大王山组,它们均由一套火山碎屑岩(下段)、火山熔岩(中段)和火山沉积岩(上段)组成,总厚约千余米,岩性为富碱质偏基性的粗安岩-安山岩系列。区内主要发育有3组断裂,分别为NE-NNE向的纵向断裂、NW-NWW向的横向断裂和NW向的断裂,这3组断裂对矿化的分布均有一定的控制作用。区内侵入岩主要分为两期,第1期为中基性-中性超浅成侵入岩,包括辉长闪长玢岩、辉石闪长玢岩和闪长玢岩等,与铁矿的形成密切相关;第2期为酸性-中酸性侵入岩,包括石英二长岩、花岗岩等,大多呈小岩体产出,并穿切早期形成的闪长玢岩。

凹山铁矿床的主要赋矿围岩为辉长闪长玢岩,矿体形态复杂,主要呈囊状、透镜状、脉状、环状等,受岩体冷凝收缩时的原生节理和隐爆角砾岩筒控制(图2a)(宁芜研究项目编写小组,1978)。区内曾发生过广泛而强烈的热液蚀变作用,且垂直分带明显,从上向下可分为3带:上部浅色蚀变带,主要蚀变矿物为高岭石、绢云母、石英、黄铁矿等;中部深色蚀变

带,主要蚀变矿物为阳起石、钠长石、磷灰石、磁铁矿、绿泥石等,为主要的铁矿化带;下部浅色蚀变带,主要蚀变矿物为钠长石、方柱石、硬石膏等。在上述各种蚀变中,钠长石化与铁矿关系最为密切。

矿床的成矿阶段比较复杂,根据不同类型矿石间的穿插关系、矿石成分和构造结构特征可将其分为晚期岩浆期、气化-热液期和表生作用期这3个成矿期。其中,气化-热液期为主要的矿化期,主要发育有磁铁矿化,矿石种类可分为浸染状磁铁矿矿石、角砾状磁铁矿矿石、网脉状磁铁矿矿石、伟晶状磁铁矿矿石等4种类型。其中浸染状磁铁矿矿石分布于矿体下部,发育于辉长闪长玢岩中;角砾状磁铁矿矿石产于矿体的中下部,胶结辉长闪长玢岩或含浸染状磁铁矿辉长闪长玢岩,角砾多发育绿泥石化、阳起石化和钠长石化;网脉状磁铁矿矿石分布于矿体的中部,矿物组合为钠长石-阳起石-磁铁矿,阳起石含量较多,脉体围岩多发育钠长石化;伟晶状磁铁矿矿石分布于矿体上部,矿物组合为阳起石-磷灰石-磁铁矿,磁铁矿含量较大,呈伟晶状(图2b)。黄铁矿、黄铜矿、镜铁矿等是气化-热液期后期的矿化产物,穿插交代早期形成的磁铁矿及其它蚀变矿物(图3a)。本地区成矿过程具脉动式、多阶段性的特征(段超等,2010)。

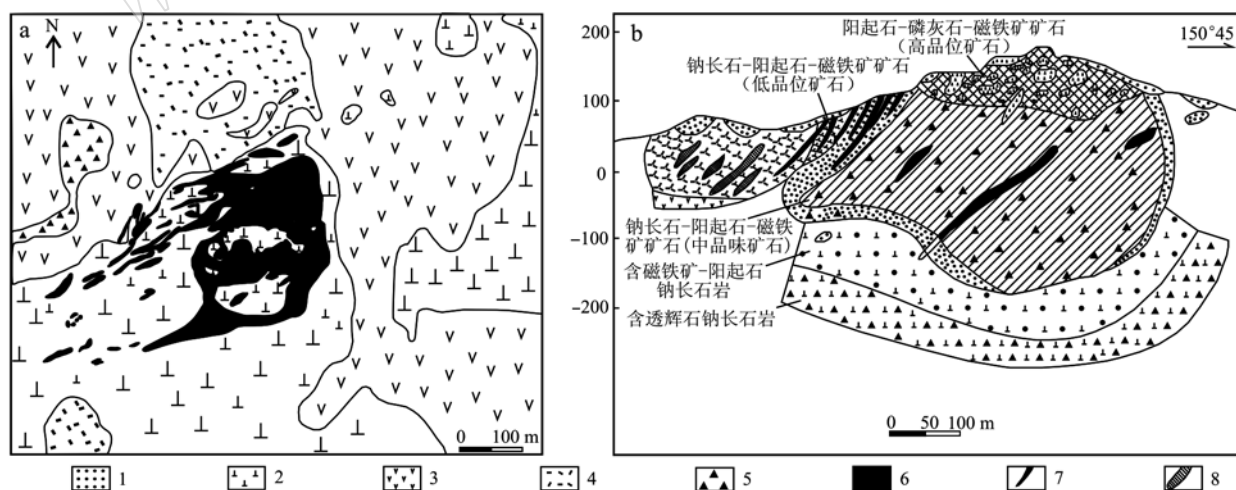


图2 凹山铁矿床地质简图(a, 据宁芜项目编写小组, 1978)和凹山铁矿床剖面图(b, 据段超等, 2010)

Fig. 2 Geological sketch map of the Washan iron deposit (a, modified after Ningwu Research Group, 1978) and simplified geological map of the Washan iron deposit (b, modified after Duan Chao *et al.*, 2010)

1—第四系沉积物; 2—辉长闪长玢岩; 3—安山岩; 4—凝灰岩; 5—角砾岩; 6—矿体; 7—富铁矿脉; 8—黄铁矿矿石

1—Quaternary; 2—gabbro diorite porphyrite; 3—andesite; 4—tuff; 5—breccia; 6—orebody; 7—iron rich vein; 8—pyrite ore

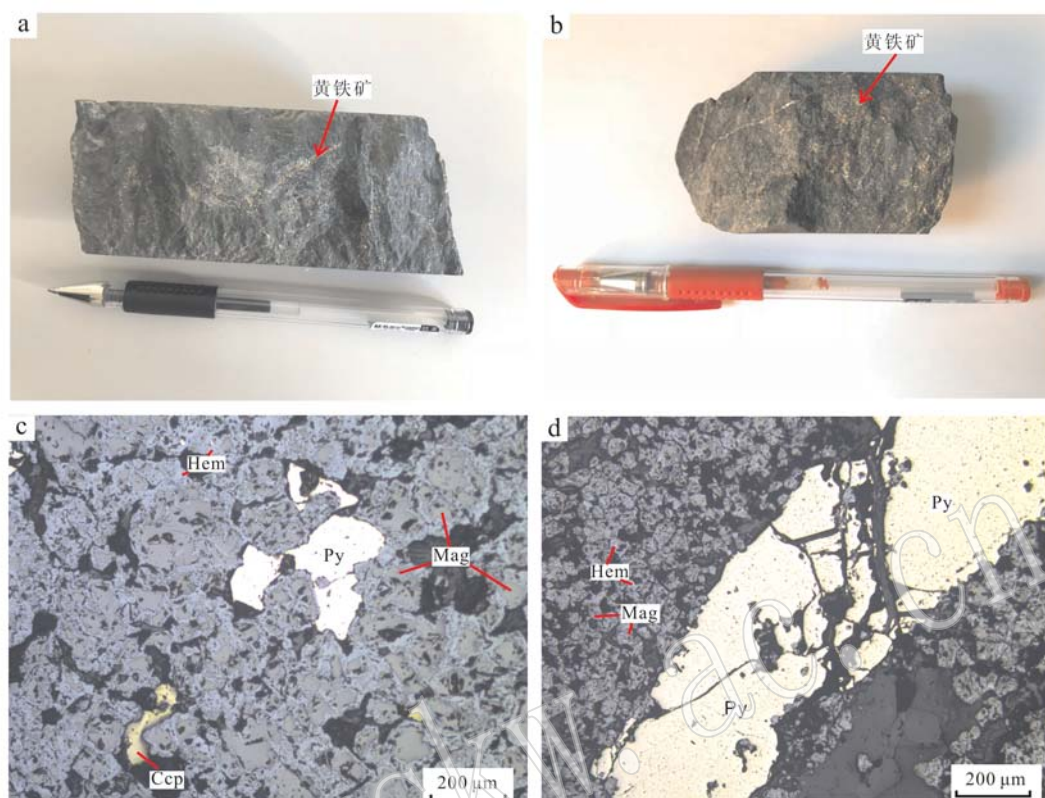


图3 凹山铁矿床矿石样品手标本(a,b)和显微镜下照片(c,d,单偏光)

Fig. 3 Hand specimen photographs (a, b) and microphotographs (c, d, plain light) of ores in the Washan iron deposit

Mag—磁铁矿; Hem—赤铁矿; Py—黄铁矿; Ccp—黄铜矿
Mag—magnetite; Hem—hematite; Py—pyrite; Ccp—chalcopyrite

3 样品和分析方法

本次用于 Re-Os 同位素测试的 5 件黄铁矿样品采自宁芜地区凹山玢岩铁矿床的黄铁矿化带,黄铁矿呈细脉状、浸染状发育,并穿切早期形成的磁铁矿(图 3a、3b)。矿石主要由磁铁矿、黄铁矿、赤铁矿及黄铜矿组成,其中磁铁矿为自形-半自形粒状结构,并沿边缘发生赤铁矿化(图 3c)。黄铁矿为半自形粒状结构,并可见部分黄铁矿呈细脉浸染状穿切早期形成的磁铁矿(图 3d)。还可见少量黄铜矿,呈他形粒状结构(图 3c)。黄铁矿单矿物挑选由廊坊诚信地质服务公司完成,黄铁矿 Re-Os 同位素测试由广州澳实分析检测有限公司完成。采用的测试方法为 N-TIMS 法,所用仪器为 Triton 型热电质谱仪,实验采用国家标准物质 GBW04436(JDC)为标样,监控化学流程和分析数据的可靠性。采用 Isoplot 软件对得到的 Re-Os 同位素数据进行处理,采用的衰变

常数 $\lambda(^{187}\text{Re}) = 1.666 \times 10^{-11}/\text{a}$ 。

4 结果

凹山铁矿黄铁矿 Re-Os 同位素测试结果列于表 1。由表 1 可看出,Re 含量为 $5\,550.48 \times 10^{-12} \sim 13\,135.86 \times 10^{-12}$, ^{187}Re 含量为 $3\,488.67 \times 10^{-12} \sim 8\,256.34 \times 10^{-12}$, ^{187}Os 含量为 $8.09 \times 10^{-12} \sim 17.86 \times 10^{-12}$, $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 同位素比值为 $5\,606.18 \sim 104\,828.74$, $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 同位素比值为 $13.52 \sim 225.66$ 。黄铁矿的 Re-Os 模式年龄为 $138.98 \sim 128.57\text{ Ma}$,加权平均年龄为 $132.37 \pm 5.4\text{ Ma}$ 。利用 ISOPLOT 软件做 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os} - ^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 等时线图(图 4),得到黄铁矿的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始值为 1.73,平均权重方差 MSWD 为 0.66,获得等时线年龄为 $127.7 \pm 2.6\text{ Ma}$ 。该等时线年龄拟合度较高,并且 MSWD 值较小,与加权平均年龄在误差范围内一致,说明该测年数据是可靠的,可直接代表凹山铁

表 1 凹山铁矿黄铁矿 Re-Os 同位素测试数据

$w_B/10^{-12}$

Table 1 Re-Os isotopic data of pyrite from the Washan iron deposit

样品号	样重/g	Re	普 Os	¹⁸⁷ Re	¹⁸⁷ Os
AS2015-4	2	13 135.86 ±40.24	20.04 ±1.40	8 256.34 ±25.59	17.86 ±0.55
AS2015-5	2	9 591.04 ±30.20	19.39 ±1.06	6 028.3 ±18.98	13.68 ±0.73
aoshan-7	6	9 093.10 ±28.80	13.45 ±1.31	5 715.33 ±18.10	12.26 ±0.56
aoshan-8	1	12 187.36 ±37.51	16.82 ±2.69	7 660.18 ±23.57	16.43 ±0.36
aoshan-11	2	5 550.48 ±19.27	10.62 ±0.72	3 488.67 ±12.11	8.09 ±0.42
样品号	¹⁸⁷ Re/ ¹⁸⁸ Os	¹⁸⁷ Os/ ¹⁸⁸ Os	模式年龄/Ma	(¹⁸⁷ Os/ ¹⁸⁸ Os) _t	γ _{Os(t)}
AS2015-4	20 344.44 ±1 677.96	44.81 ±3.91	129.70 ±4.00	0.802 2	535.93
AS2015-5	5 606.18 ±283.91	13.52 ±0.87	136.02 ±7.25	0.801 5	535.59
aoshan-7	25 589.79 ±3 820.54	55.67 ±8.67	128.57 ±5.89	0.798 5	532.96
aoshan-8	104 828.74 ±45 567.76	225.66 ±98.21	128.62 ±2.78	0.791 2	527.18
aoshan-11	7 330.57 ±587.38	17.79 ±1.62	138.98 ±7.18	0.797 1	532.20

注：模式年龄 t 按 $t = 1/\lambda \ln(1 + ^{187}\text{Os}/^{187}\text{Re})$ 计算，其中 $\lambda(^{187}\text{Re}) = 1.666 \times 10^{-11}/\text{a}$ ；表中误差为相对误差 (2σ)。

矿床的成矿年龄。

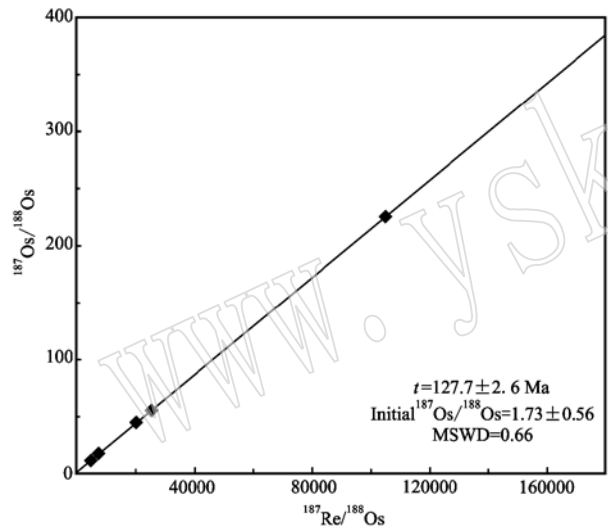


图 4 凹山铁矿床黄铁矿 Re-Os 等时线图

Fig. 4 Re-Os isochron line of pyrite in the Washan iron deposit

5 讨论

5.1 成矿时代

近年来,研究者对宁芜地区玢岩型铁矿进行了大量的成岩成矿年代学研究,对于与成矿作用密切相关的闪长玢岩的年代学研究更是取得了一大批较为精确的年龄数据。范裕等(2010a)通过对宁芜盆地凹山岩体、陶村岩体、和尚桥岩体、东山岩体、姑山岩体、白象山岩体、和睦山岩体中的闪长玢岩进行了系统的锆石 U-Pb 年代学研究,得出宁芜盆地闪长玢岩的成岩时代为 $131.1 \pm 3.1 \sim 129.2 \pm 1.7 \text{ Ma}$ 。侯可军等(2010)通过对吉山矿床的主要赋矿母岩辉长闪长玢岩进行锆石 U-Pb 定年,得出其成岩时代为

$128.2 \pm 1 \text{ Ma}$ 。薛怀民等(2010)对阴山辉石闪长玢岩进行锆石 U-Pb 定年,得出其成岩时代为 $127.8 \pm 1.8 \text{ Ma}$ 。对凹山铁矿床成矿母岩的定年也获得了较为精确的年龄数据,Hou 等(2012)通过对凹山铁矿床赋矿母岩闪长玢岩的锆石 U-Pb 定年测试,得出其成岩时代为 $130.8 \pm 0.9 \text{ Ma}$ 。之后,张燕等(2013)也对凹山闪长玢岩进行了锆石 U-Pb 定年,得出其成岩时代为 $127.6 \pm 4.4 \text{ Ma}$ 。总结以上定年数据,发现宁芜地区闪长玢岩同位素测年结果较为集中,宁芜地区铁矿床赋矿围岩的总体成岩时代为 $131.1 \pm 3.1 \sim 127.6 \pm 4.4 \text{ Ma}$ 。

在成矿年代方面也进行了一些研究。笔者总结了近年来对于宁芜地区玢岩型铁矿床所做的成矿年代学研究,发现其研究对象均为非金属蚀变矿物,大致有金云母、阳起石、钠长石等。袁顺达等(2010)通过对宁芜地区陶村、白象山、和睦山 3 个矿床的金云母 Ar-Ar 法定年测试,得出这 3 个矿床的成矿年龄分别为 128 ± 14 、 134.9 ± 1.1 和 $132.9 \pm 1.1 \text{ Ma}$ 。范裕等(2011)在陶村、白象山、和睦山这 3 个矿床做了金云母 Ar-Ar 法定年测试,获得的成矿年龄分别为 129.3 ± 1.1 、 130.7 ± 1.1 和 $129.1 \pm 0.9 \text{ Ma}$,与袁顺达等(2010)所得年龄结果虽有误差,但基本一致。马芳等(2010)通过对东山铁矿床的阳起石 Ar-Ar 法定年测试,得到东山铁矿床的成矿年龄为 $129.5 \pm 2 \sim 126 \pm 1.7 \text{ Ma}$ 。Yu 和 Mao(2004)通过对陶村和梅山铁矿床的钠长石 Ar-Ar 法定年测试,得出成矿年龄分别为 124.89 ± 0.3 和 $122.9 \pm 0.16 \text{ Ma}$,要明显晚于通过金云母、阳起石定年得出的数据。这可能是由于斜长石系列 Ar 同位素体系的封闭温度较低

(225 ~ 300℃, Cassata *et al.*, 2009) 而宁芜地区玢岩型铁矿床的形成温度较高(马芳等, 2006a)所致, 故而钠长石 Ar-Ar 法得出的年龄可能比铁矿化的真实年龄小。笔者在剔除了钠长石 Ar-Ar 法定年数据后, 总结以上定年数据认为宁芜地区的总体成矿年龄为 $134.9 \pm 1.1 \sim 126 \pm 1.7$ Ma。

综合上述宁芜地区的成岩成矿年龄发现, 宁芜玢岩型铁矿的成岩年龄与成矿年龄虽被限定在了一定的范围之内, 但是两者之间并不统一, 且较为宽泛(图5), 这为精确厘定凹山玢岩型铁矿床的成矿时

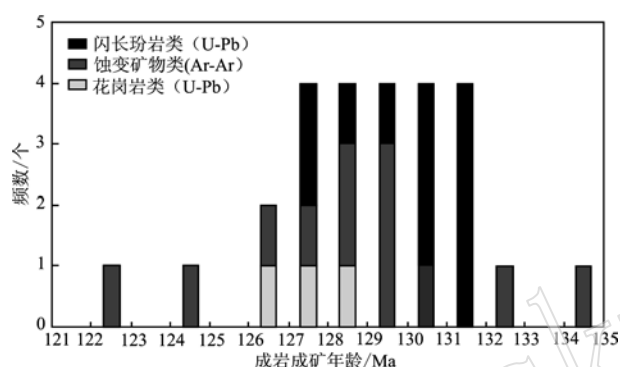


图5 宁芜盆地铁矿床成岩成矿年龄分布直方图

Fig. 5 Histogram of petrogenetic and metallogenic ages of the iron deposits in Ningwu Basin

代带来了一定的困扰。段超等(2011)在对凹山铁矿的成矿时代进行研究时认为, 闪长玢岩作为本地区的主要赋矿围岩, 其年龄可以代表凹山铁矿床成矿时代的上限($131.7 \pm 0.7 \sim 127.6 \pm 0.5$ Ma); 而花岗闪长斑岩作为后期穿切矿体发育的岩体, 可以代表凹山铁矿床成矿时代的下限($128.3 \pm 0.6 \sim 126.1 \pm 0.5$ Ma), 从而得出一个相对狭窄的成矿年代范围: $131.1 \pm 0.7 \sim 126.1 \pm 0.5$ Ma。

虽然矿床的成矿时代被限定在了较小的范围之内, 但是在近10年里并没有学者对宁芜地区矿床的金属矿物做过直接的定年测试, 笔者所收集到的宁芜地区成矿年龄数据均为与磁铁矿密切共生的非金属蚀变矿物(表2), 虽可间接代表宁芜玢岩型铁矿的成矿年龄, 但始终缺少能够直接代表本地区铁矿床成矿年龄的金属矿物定年数据, 这为精确厘定凹山铁矿的成矿年龄造成了一定的困扰。Re-Os 同位素定年是目前能够直接测定金属矿床矿化年龄的唯一成熟方法(陈文等, 2011)。前文已述, 凹山铁矿床的主要成矿期为气化-热液期, 黄铁矿为该成矿期晚阶段的矿化产物。本次研究工作测得的凹山铁矿床黄铁矿 Re-Os 同位素年龄为 127.7 ± 2.6 Ma, 与宁芜地区前人所做非金属矿物成矿时代结果 $134.9 \pm$

表2 宁芜盆地铁矿床成岩成矿年龄统计

Table 2 Statistics of petrogenetic and metallogenic ages of the iron deposits in Ningwu Basin

位置名称	测试矿物	测试方法	年龄/ Ma	资料来源
吉山	辉长闪长玢岩	U-Pb	128.2 ± 1	侯可军等, 2010
阴山	辉石闪长玢岩	U-Pb	127.8 ± 1.8	薛怀民等, 2010
凹山	辉长闪长玢岩	U-Pb	131.1 ± 0.7	段超等, 2011
凹山	辉石闪长玢岩	U-Pb	127.6 ± 4.4	张燕等, 2013
凹山	闪长玢岩	U-Pb	130.2 ± 2	范裕等, 2010a
和尚桥岩体	闪长玢岩	U-Pb	131.1 ± 1.5	范裕等, 2010a
东山岩体	闪长玢岩	U-Pb	131.1 ± 3.1	范裕等, 2010a
白象山	闪长玢岩	U-Pb	130 ± 1.4	范裕等, 2010a
陶村	闪长玢岩	U-Pb	130.7 ± 1.8	范裕等, 2010a
和睦山	闪长玢岩	U-Pb	131.1 ± 1.9	范裕等, 2010a
姑山	闪长玢岩	U-Pb	129.2 ± 1.7	范裕等, 2010a
凹山	闪长玢岩	U-Pb	130.8 ± 0.9	Hou <i>et al.</i> , 2012
陶村	金云母	Ar-Ar	128 ± 14	袁顺达等, 2010
白象山	金云母	Ar-Ar	134.9 ± 1.1	袁顺达等, 2010
和睦山	金云母	Ar-Ar	132.9 ± 1.1	袁顺达等, 2010
陶村	金云母	Ar-Ar	129.3 ± 1.1	范裕等, 2011
白象山	金云母	Ar-Ar	130.7 ± 1.1	范裕等, 2011
和睦山	金云母	Ar-Ar	129.1 ± 0.9	范裕等, 2011
钟九	金云母	Ar-Ar	127.2 ± 1.63	Yu and Mao, 2004
陶村	钠长石	Ar-Ar	124.89 ± 0.3	Yu and Mao, 2004
梅山	钠长石	Ar-Ar	122.9 ± 0.16	Yu and Mao, 2004
东山	阳起石	Ar-Ar	$129.5 \pm 2 \sim 126 \pm 1.7$	马芳等, 2010
朱门岩体	花岗斑岩	U-Pb	127.1 ± 1.2	侯可军等, 2010
石山岩体	斜长花岗岩	U-Pb	128.3 ± 0.6	侯可军等, 2010
凹山	花岗闪长斑岩	U-Pb	126.1 ± 0.5	段超等, 2011

1.1 ~ 126 ± 1.7 Ma 相一致,略晚于闪长玢岩的形成,且 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os} - ^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 等时线图拟合度较高,MSWD 值较低(图4)。因此,本文黄铁矿 Re-Os 定年结果可直接代表凹山铁矿床气化-热液期黄铁矿矿化阶段的成矿年龄,并限制了主要矿体磁铁矿的成矿年龄。

5.2 成矿物质来源

Re-Os 同位素体系封闭性好,一般很难被后期地质过程重置破坏,并且源于地幔的岩石具有类似于

球粒陨石的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 值,而地壳具有异常高的放射性成因 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 值,因此初始 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 值是判断幔源岩石和壳源岩石的很好的示踪剂(杜安道等,2012)。本次分析得出凹山矿床黄铁矿 Re-Os 同位素体系的初始 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 值为 1.73 ± 0.56 ,明显高于各类地幔的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 值 $0.105 \sim 0.152$,低于平均大陆地壳的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 值 3.63,介于二者之间(表3),表明凹山铁矿床黄铁矿的成矿物质应源自地幔,同时有壳源物质的加入。

表3 某些地幔和地壳岩石储库的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 值和 $\gamma_{\text{Os}(t)}$ 值
Table 3 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ and $\gamma_{\text{Os}(t)}$ values of various mantle and crust reservoirs

岩石	$^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$	$\gamma_{\text{Os}(t)}$	资料来源
球粒陨石	0.127	0	Walker and Morgan, 1989
原始上地幔	0.129	+1.6	Meisel <i>et al.</i> , 1996
亏损地幔(MORB)	0.123 ~ 0.126 (平均 0.125)	-3.1 ~ -0.8 (平均 -1.9)	Snow and Reisberg, 1995
富集地幔(EM I)	0.152	+19.7	Shirey and Walker, 1998
富集地幔(EM II)	0.136	+7.1	Shirey and Walker, 1998
HIMU 地幔	0.15	+18.1	Shirey and Walker, 1998
富集地幔柱(EP)	0.13 ~ 0.135	+2.4 ~ +6.3	Widom and Shirey, 1996
大陆岩石圈地幔(SCLM)	0.105 ~ 0.129 (平均 0.113)	-17.3 ~ +1.6 (平均 -11)	Shirey and Walker, 1998
平均大陆地壳	3.63	+2 758	Palmer and Turekian, 1986
元古宙 Virginia 建造变质沉积岩(1 100 Ma)	9.68	+3 430	Ripley <i>et al.</i> , 1998
Sudbury 元古宙变质沉积岩(1 850 Ma)	1.08 ~ 1.32	+844 ~ +1 054	Walker <i>et al.</i> , 1991

γ_{Os} 是样品 Os 同位素初始值相对于成矿时球粒陨石 Os 同位素值的百分差异,是指示地壳物质加入成矿体系更灵敏的一个参数(段士刚等,2017)。 γ_{Os} 的计算公式为: $\gamma_{\text{Os}(t)} = 100 [(^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_{\text{样品}(t)} / (^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_{\text{球粒陨石}(t)} - 1]$, 其中 $(^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_{\text{球粒陨石}(t)} = (^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_i + (^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}) (e^{\lambda T} - e^{\lambda t})$, $(^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_i = 0.09531$, $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os} = 0.40186$, 地球形成年龄 $T = 4.558 \times 10^9$ a (Shirey and Walker, 1998; 张作衡等, 2005)。据以上公式得出 5 件黄铁矿的 $\gamma_{\text{Os}(t)}$ 值为 527.18 ~ 535.93, 高于各类地幔的 $\gamma_{\text{Os}(t)}$ 值 1.6 ~ 19.7, 低于平均大陆地壳的 $\gamma_{\text{Os}(t)}$ 值 2 758 (表3), 进一步揭示了黄铁矿的成矿物质来源并非单一的幔源或者壳源。

本次黄铁矿样品 Re-Os 同位素测试得出的初始 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 值与 $\gamma_{\text{Os}(t)}$ 值均反映出凹山铁矿床成矿物质来源的壳幔混合特征。地壳物质加入的途径有地壳混染、下地壳拆沉、板块俯冲等。综合研究认为,宁芜地区玢岩型铁矿的成矿与本地区火山岩、次火山岩关系密切。凹山铁矿床矿石中 Pb 同位素,磷灰石 C、Sr 同位素的特征表明成矿流体主要来自岩

浆热液,并与围岩同源,其成矿所需铁质主要来源于岩浆(马芳等,2005,2006b)。余金杰(2003)对凹山和太山矿床的岩浆岩进行的 Sr 同位素研究发现, I_{Sr} 值介于 0.704 0 ~ 0.707 7 之间,认为这是由地幔岩浆受到地壳物质混染所致。其后陈长健等(2017)对宁芜地区凹山、陶村矿床的中生代火山岩进行的 Sr-Nd 同位素研究发现, ϵ_{Nd} 值为 -8.2 ~ -4.1, I_{Sr} 值为 0.705 25 ~ 0.707 74,在 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) - I_{\text{Sr}}(t)$ 关系图上呈反相关关系,同样表明起源于富集地幔的岩浆与下地壳发生了混染作用。同时,宁芜地区火山岩、次火山的锆石 Hf 同位素特征均显示出岩浆源区为富集地幔并受到了地壳物质混染的特点(胡劲平,2010; 袁峰,2011)。

综合前人研究成果与本次 Re-Os 同位素测试结果,认为凹山玢岩型铁矿的成矿物质主要来源于富集地幔,并受到了地壳物质的混染。

6 结论

(1) 凹山铁矿床的黄铁矿 Re-Os 等时线年龄为 127.7 ± 2.6 Ma, 矿床形成时代为中生代早白垩世,

略晚于赋矿围岩辉长闪长玢岩的成岩年龄,可代表凹山铁矿床气化-热液期晚阶段的黄铁矿成矿时代。

(2) 凹山铁矿床黄铁矿的初始 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 值为 1.73 ± 0.56 , $\gamma_{\text{Os}(t)}$ 值为 $527.18 \sim 535.93$, 介于各类地幔与平均大陆地壳的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 值和 $\gamma_{\text{Os}(t)}$ 值之间, 结合前人已有研究, 认为凹山玢岩型铁矿的成矿物质来源为富集地幔, 部分来自地壳。

致谢 本文在撰写期间得到了中南大学唐韬、白龙峰等同学的支持与帮助, 在此致以诚挚的感谢。

References

- Cassata W S, Renne P R and Shuster D L. 2009. Argon diffusion in plagioclase and implications for thermochronometry: A case study from the Bushveld Complex, South Africa[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(21): 6 600 ~ 6 612.
- Chen Changjian, Chen Bin and Wang Zhiqiang. 2017. Petrology of the Mesozoic magmatic rocks in Ningwu area: Insights from in-situ zircon Hf isotope and Nd-Sr isotopes, East China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(2): 415 ~ 439(in Chinese with English abstract).
- Chen Wen, Wan Yusheng, Li Huaqin, *et al.* 2011. Geochronology: Technique and application[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(11): 1 917 ~ 1 947(in Chinese with English abstract).
- Du Andao, Qu Wenjun, Wang Denghong, *et al.* 2012. Re-Os Method and Its Application in Ore Deposit[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2 ~ 4(in Chinese).
- Duan Chao, Li Yanhe, Mao Jingwen, *et al.* 2010. The research progress of the Washan ore-porphyrity type iron deposit in the Ningwu volcanic basin[J]. *Mineral Deposits*, 29(s1): 73 ~ 74(in Chinese).
- Duan Chao, Li Yanhe, Yuan Shunda, *et al.* 2012. Geochemical characteristics of magnetite from Washan iron deposit in Ningwu ore district and its constraints on ore-forming[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(1): 243 ~ 257(in Chinese with English abstract).
- Duan Chao, Mao Jingwen, Li Yanhe, *et al.* 2011. Zircon U-Pb geochronology of the gabbro-diorite porphyry and granodiorite porphyry from the Washan iron deposit in Ningwu Basin, and its geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(7): 1 159 ~ 1 171(in Chinese with English abstract).
- Duan Shigang, Jiang Zongsheng, Zhang Zuoheng, *et al.* 2017. Re-Os isotopic analysis of pyrrhotite from Tianyu Cu-Ni sulfide deposit in Eastern Tianshan Mountains, Xinjiang: Constraints on sources of ore-forming materials[J]. *Mineral Deposits*, 36(1): 25 ~ 37(in Chinese with English abstract).
- Fan Yu, Zhou Taofa, Yuan Feng, *et al.* 2010a. Geochronology of the diorite porphyrites in Ningwu Basin and their metallogenic significances[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(9): 2 715 ~ 2 728(in Chinese with English abstract).
- Fan Yu, Zhou Taofa, Yuan Feng, *et al.* 2010b. High sulfidation epithermal hydrothermal system in Lu-Zong volcanic basin: Evidence from geological characteristics and sulfur isotope data of Fanshan alunite deposit[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(12): 3 657 ~ 3 666(in Chinese with English abstract).
- Fan Yu, Zhou Taofa, Yuan Feng, *et al.* 2011. Geochronology of the porphyry-like type iron deposits in Ning-Wu Basin: Evidence from ^{40}Ar - ^{39}Ar phlogopite dating[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(5): 810 ~ 820(in Chinese with English abstract).
- Hou Kejun and Yuan Shunda. 2010. Zircon U-Pb age and Hf isotopic composition of the volcanic and sub-volcanic rocks in the Ningwu basin and their geological implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(3): 888 ~ 902(in Chinese with English abstract).
- Hou T, Zhang Z C, Du Y S, *et al.* 2009. Geology of the Gushan iron oxide deposit associated with dioritic porphyries, eastern Yangtze craton, SE China[J]. *International Geology Review*, 51(6): 22.
- Hou T, Zhang Z C, Encarnacion J, *et al.* 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[J]. *Lithos*, 119(3 ~ 4): 330 ~ 344.
- Hou T, Zhang Z C, Encarnacion J, *et al.* 2012. Geochronology/geochemistry of the Washan dioritic porphyry associated with kiruna-type iron ores, middle-lower Yangtze river valley, eastern China: Implications for petrogenesis/mineralization[J]. *International Geology Review*, 54(11): 1 332 ~ 1 352.
- Hu Jinping and Jiang Shaoyong. 2010. Zircon U-Pb dating and Hf isotopic compositions of porphyrites from the Ningwu Basin and their geological implications[J]. *Geological Journal of China Universities*, 16(3): 294 ~ 308(in Chinese with English abstract).
- Li Binglun and Xie Yihan. 1984. The origin, classification, and genesis model of the Ningwu type iron deposits in the Nanjing and Wuhu area[J]. *Science China(B)*, 14(1): 80 ~ 86(in Chinese).
- Lin Xinduo. 1998. Geological characteristics of magma-hydrothermal transitional ore deposits[J]. *Geoscience*, (4): 485 ~ 492(in Chinese with English abstract).
- Lu Bing, Hu Shouxi, Lin Yushi, *et al.* 1990. A study on origin and ore-

- forming model of Ninwu type iron deposits[J]. *Mineral Deposits*, (1): 13~25(in Chinese).
- Ma Fang and Jiang Shaoyong. 2005. Metallogenic characteristics and genesis of Fe-Cu-Au deposits related to continental volcanic rocks[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 20(4): 233~241(in Chinese with English abstract).
- Ma Fang, Jiang Shaoyong, Jiang Yaohui, *et al.* 2006a. Fluid inclusions and H-O isotopic compositions in the Washan and Dongshan iron deposits, Ningwu basin, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2581~2589(in Chinese with English abstract).
- Ma Fang, Jiang Shaoyong, Jiang Yaohui, *et al.* 2006b. Pb isotope research of porphyrite Fe deposits in the Ning-Wu area[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(2): 279~286(in Chinese with English abstract).
- Ma Fang, Jiang Shaoyong and Xue Huaimin. 2010. Early Cretaceous mineralizations in Ningwu Basin: Insight from actinolite ^{39}Ar - ^{40}Ar laser dating results[J]. *Mineral Deposits*, 29(2): 283~289(in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Zhang Zuoheng, *et al.* 2005. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 169~188(in Chinese with English abstract).
- Meisel T, Walker R J and Morgan J W. 1996. The osmium isotopic composition of the Earth's primitive upper mantle[J]. *Nature*, 383(6600): 517~520.
- Ningwu Research Group. 1978. *Porphyrite Iron Deposit of Ningwu*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~320(in Chinese).
- Palmer M R and Turekian K K. 1986. $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}$ in marine manganese nodules and the constraints on the crustal geochemistries of rhenium and osmium[J]. *Nature*, 319(6050): 216~220.
- Ripley E M, Lambert D D and Frick L R. 1998. Re-Os, Sm-Nd, and Pb isotopic constraints on mantle and crustal contributions to magmatic sulfide mineralization in the Duluth Complex[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(19~20): 3349~3365.
- Shirey S B and Walker R J. 1998. The Re-Os isotope system in cosmochemistry and high-temperature geochemistry[J]. *Annual Review of Earth & Planetary Sciences*, 26(1): 423~500.
- Snow J E and Reisberg L. 1995. Os isotopic systematics of the MORB mantle: Results from altered abyssal peridotites[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 133(3~4): 723~733.
- Walker R J and Morgan J W. 1989. Rhenium-osmium isotope systematics of carbonaceous chondrites[J]. *Science*, 243(4890): 519~522.
- Walker R J, Morgan J W, Naldrett A J, *et al.* 1991. Re-Os isotope systematics of Ni-Cu sulfide ores, Sudbury Igneous Complex, Ontario: Evidence for a major crustal component[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 105(4): 416~429.
- Wang Cunzhi, Huang Zhizhong, Zhao Xilin, *et al.* 2018. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of Early Cretaceous acid volcanic rocks in Shuidong area, Xuancheng City, in the middle-lower reaches of the Yangtze River[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 37(5): 697~715(in Chinese with English abstract).
- Widom E and Shirey S B. 1996. Os isotope systematics in the Azores: Implications for mantle plume sources[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 142(3): 451~465.
- Wu Yanchang, Chao Fenyang and Chang Yinfo. 1999. A preliminary study on the deep-seated structural-magmatic control over the metallogenic system around the Yangtze River reaches in Anhui Province[J]. *Earth Science Frontiers*, (2): 285~296(in Chinese with English abstract).
- Xu Jifeng, Wang Qiang, Xu Yigang, *et al.* 2001. Geochemistry of Anjishan intermediate-acid intrusive rocks in Ningzhen area: Constraint to origin of the magma with HREE and Y depletion[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 576~584(in Chinese with English abstract).
- Xue Huaimin, Dong Shuwen and Ma Fang. 2010. Zircon U-Pb SHRIMP ages of sub-volcanic bodies related with porphyritic Fe-deposits in the Luzong and Ningwu basins, Middle and Lower Yangtze River Reaches, Central China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(9): 2653~2664(in Chinese with English abstract).
- Yu Jinjie. 2003. Sr isotope of apatites from the Washan and Taishan iron deposits in the Nanjing- Wuhu area and its implications[J]. *Geological Review*, 49(3): 272~276(in Chinese with English abstract).
- Yu Jinjie and Mao Jingwen. 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[J]. *Acta Geologica Sinica*, 78(2): 435~442.
- Yuan Feng, Zhou Taofa, Fan Yu, *et al.* 2011. Zircon U-Pb ages and isotopic characteristics of the granitoids in the Ningwu Basin, China, and their significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(5): 821~833(in Chinese with English abstract).
- Yuan Shunda, Hou Kejun and Liu Min. 2010. Timing of mineralization and geodynamic frame work 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[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(3): 797~808(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yan, Guo Kunyi and Zeng Jiannian. 2013. Zircon U-Pb dating of the ore-bearing porphyries and its geological significance for the Washan iron deposit, Nanjing-Wuhu basin[J]. *East China Geology*, 34(4): 228~233(in Chinese with English abstract).

- Zhou T F, Fan Y, Yuan F, *et al.* 2011. Geochronology and significance of volcanic rocks in the Ning-Wu Basin of China[J]. *Science China Earth Sciences*, 54(2): 185 ~ 196.
- Zhang Zuoheng, Chai Fengmei, Du Andao, *et al.* 2005. Re-Os dating and ore-forming material tracing of the Karatungk Cu-Ni sulfide deposit in northern Xinjiang[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 24(4): 285 ~ 293 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈长健, 陈 斌, 王志强. 2017. 宁芜地区中生代富钾和富钠火山岩的源区特征: 岩石学和地球化学证据[J]. *岩石学报*, 33(2): 415 ~ 439.
- 陈 文, 万渝生, 李华芹, 等. 2011. 同位素地质年龄测定技术及应用[J]. *地质学报*, 85(11): 1 917 ~ 1 947.
- 杜安道, 屈文俊, 王登红, 等. 2012. 铼-钨法及其在矿床学中的应用[M]. 北京: 地质出版社, 2 ~ 4.
- 段 超, 李延河, 毛景文, 等. 2010. 宁芜火山岩盆地凹山玢岩型铁矿床研究进展[J]. *矿床地质*, 29(s1): 73 ~ 74.
- 段 超, 李延河, 袁顺达, 等. 2012. 宁芜矿集区凹山铁矿床磁铁矿元素地球化学特征及其对成矿作用的制约[J]. *岩石学报*, 28(1): 243 ~ 257.
- 段 超, 毛景文, 李延河, 等. 2011. 宁芜盆地凹山铁矿床辉长闪长玢岩和花岗岩闪长斑岩的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *地质学报*, 85(7): 1 159 ~ 1 171.
- 段士刚, 蒋宗胜, 张作衡, 等. 2017. 东天山天宇铜镍硫化物矿床磁黄铁矿 Re-Os 同位素物质来源示踪[J]. *矿床地质*, 36(1): 25 ~ 37.
- 范 裕, 周涛发, 袁 峰, 等. 2010a. 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*, 26(9): 2 715 ~ 2 728.
- 范 裕, 周涛发, 袁 峰, 等. 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[J]. *岩石学报*, 26(12): 3 657 ~ 3 666.
- 范 裕, 周涛发, 袁 峰, 等. 2011. 宁芜盆地玢岩型铁矿床的成矿时代: 金云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 同位素年代学研究[J]. *地质学报*, 85(5): 810 ~ 820.
- 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[J]. *岩石学报*, 26(3): 888 ~ 902.
- 胡劲平, 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[J]. *高校地质学报*, 16(3): 294 ~ 308.
- 李秉伦, 谢奕汉. 1984. 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*, 14(1): 80 ~ 86.
- 林新多. 1998. 岩浆-热液过渡型矿床的若干特征[J]. *现代地质*, (4): 485 ~ 492.
- 卢 冰, 胡受奚, 蔺雨时, 等. 1990. 宁芜型铁矿床成因和成矿模式的探讨[J]. *矿床地质*, (1): 13 ~ 25.
- 马 芳, 蒋少涌. 2005. 与陆相火山岩有关的铁、铜、金矿床成矿地质特征及矿床成因[J]. *地质找矿论丛*, 20(4): 233 ~ 241.
- 马 芳, 蒋少涌, 姜耀辉, 等. 2006a. 宁芜盆地凹山和东山铁矿床流体包裹体和氢氧同位素研究[J]. *岩石学报*, 22(10): 2 581 ~ 2 589.
- 马 芳, 蒋少涌, 姜耀辉, 等. 2006b. 宁芜地区玢岩铁矿 Pb 同位素研究[J]. *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³⁹Ar-⁴⁰Ar 年代学研究[J]. *矿床地质*, 29(2): 283 ~ 289.
- 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 等. 2005. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景[J]. *岩石学报*, 21(1): 169 ~ 188.
- 宁芜研究项目编写小组. 1978. 宁芜玢岩铁矿[M]. 地质出版社, 1 ~ 196.
- 王存智, 黄志忠, 赵希林, 等. 2018. 长江中下游宣城水东地区早白垩世酸性火山岩年代学、地球化学及岩石成因[J]. *岩石矿物学杂志*, 37(5): 697 ~ 715.
- 吴言昌, 曹奋扬, 常印佛. 1999. 初论安徽沿江地区成矿系统的深部构造-岩浆控制[J]. *地质前缘*, (2): 285 ~ 296.
- 许继峰, 王 强, 徐义刚, 等. 2001. 宁镇地区中生代安基山中酸性侵入岩的地球化学: 亏损重稀土和钇的岩浆产生的限制[J]. *岩石学报*, 17(4): 576 ~ 584.
- 薛怀民, 董树文, 马 芳. 2010. 长江中下游地区庐(江)-枞(阳)和宁(南京)-芜(湖)盆地内与成矿有关潜火山岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄[J]. *岩石学报*, 26(9): 2 653 ~ 2 664.
- 余金杰. 2003. 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]. *地质论评*, 49(3): 272 ~ 276.
- 袁 峰, 周涛发, 范 裕, 等. 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[J]. *地质学报*, 85(5): 821 ~ 833.
- 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[J]. *岩石学报*, 26(3): 797 ~ 808.
- 张 燕, 郭坤一, 曾键年. 2013. 宁芜盆地凹山铁矿含矿玢岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. *华东地质*, 34(4): 228 ~ 233.
- 张作衡, 柴红梅, 杜安道, 等. 2005. 新疆喀拉通克铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素测年及成矿物质来源示踪[J]. *岩石矿物学杂志*, 24(4): 285 ~ 293.