

宁芜矿集区多阶段火山作用岩浆源区的转变: 来自侵入岩锆石 Hf-O 同位素特征的记录*

段超¹, 李延河¹, 毛景文^{1,2}, 王丛林³, 杨秉阳³, 侯可军¹, 万秋⁴, 施珂⁵,
蔡杨⁵, 王倩¹, 王天顺¹

(1 中国地质科学院矿产资源研究所 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 2 中国地质大学(北京), 北京 100083; 3 安徽马钢矿业资源集团南山矿业有限公司, 安徽 马鞍山 243033; 4 安徽省地质矿产勘查局, 安徽 合肥 230001; 5 安徽省地质调查院, 安徽 合肥 230001)

摘要 宁芜玢岩型铁矿矿集区是中国东部重要的铁矿矿集区之一。宁芜矿集区在早白垩世 135~126 Ma 间连续发育了成分和源区相似的 4 组火山作用旋回, 并伴随有两大类侵入岩发育: 一类为辉石闪长玢岩-闪长玢岩, 与玢岩型铁矿床的形成密切相关, 主要发育于大王山火山旋回晚期(约 131 Ma); 另一类为花岗岩类侵入岩, 形成于铁矿化之后, 成岩时代与姑山和娘娘山火山旋回相近(130~126 Ma)。两类侵入岩源区的差异与联系目前尚未揭露。本次研究通过对两类侵入岩锆石年代学、Hf-O 同位素特征的研究, 区分了不同侵入岩源区差异。结果表明, 与成矿母岩同旋回侵入岩锆石的 $\delta^{18}\text{O}$ 集中于 6.0‰~6.5‰, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 集中于 -6.0~-5.0; 成矿后形成的花岗岩类侵入岩锆石的 $\delta^{18}\text{O}$ 集中于 7.0‰至 8.0‰, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 分布于 -8.7~-1.2。结合前人研究, 区内岩浆活动存在有富集地幔、太古代地壳和新元古代地壳 3 个岩浆源区, 4 个火山作用旋回的岩浆源区在 130 Ma 左右发生了改变。130 Ma 之前的龙王山和大王山火山旋回的岩浆岩源区主要为受太古代地壳混染的富集地幔, 而 130 Ma 之后的姑山和娘娘山火山作用旋回的岩浆岩源区主要为受新元古代地壳混染的富集地幔。多阶段火山作用中只有大王山旋回的闪长玢岩与玢岩型铁矿的形成有关。相比较其他火山旋回, 大王山旋回具有更高的富集地幔组分以及更少的新元古代地壳的混染。因而, 岩浆中较高比例的富集地幔含量是控制玢岩型铁矿形成的关键因素之一。

关键词 锆石; Hf-O 同位素; 岩浆源区; 玢岩型铁矿床; 宁芜矿集区

中图分类号: P618.42

文献标志码: A

Magma source transformation of multi-stage volcanism in Ningwu ore district, eastern China: Evidence from zircon Hf-O isotopes of intrusions

DUAN Chao¹, LI YanHe¹, MAO JingWen^{1,2}, WANG CongLin³, YANG BingYang³, HOU KeJun¹, WAN Qiu⁴,
SHI Ke⁵, CAI Yang⁵, WANG Qian¹ and WANG TianShun¹

(1 MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resource, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China; 3 Nanshan Mine Company, Anhui Magang Mining Resources Group Company Limited, Maanshan 243033, Anhui, China; 4 Bureau of Geology and Mineral Exploration of Anhui Province, Hefei 230001, Anhui, China; 5 Geological Survey of Anhui Province, Hefei 230001, Anhui, China)

Abstract

The Ningwu ore district is the best-defined iron oxide-apatite (IOA) district in China, which hosts more than

* 本文得到国家重点研发计划(编号:2022YFC2903703)、国家自然科学基金项目(编号:42172102, 41973022)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(编号:KK2019)联合资助

第一作者简介 段超, 男, 1983年生, 副研究员/高级工程师, 矿床学和矿床地球化学研究方向。Email: duanchao@cags.ac.cn

收稿日期 2023-09-03; 改回日期 2024-03-11。张绮玲编辑。

30 IOA deposits and is one of the important Fe resource areas in eastern China. Four groups of volcanic cycles (suits) with similar compositions and magma sources have been continuously developed in the Ningwu district during 135~126 Ma. Two major types of intrusions have been formed with the multi-stage volcanism. One type is pyroxene diorite porphyrite/diorite porphyrite, closely related to the formation of IOA deposits and mainly developed in the late of the Dawangshan volcanic cycle (~131 Ma). The other type is granite rocks, formed after Fe mineralization and of a similar age to the volcanic cycles of the Gushan and Niangniangshan (130~126 Ma). The relationship and differences between these two types of intrusions have not yet been revealed. In this contribution, chronology and Hf-O isotope characteristics of zircons from these two types of intrusions have been studied, effectively distinguishing the differences in the magma sources of different intrusions. Zircons from the syn-mineralization intrusion rocks have a concentrated $\delta^{18}\text{O}$ range of 6.0‰ to 6.5‰, with $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values between -6.0 and -5.0. In comparison, the zircons of the post-mineralization intrusions have a higher $\delta^{18}\text{O}$ range of 7.0‰~8.0‰, with $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ range of -8.7 to -1.2. The magma source transformation of multi-stage volcanism happened at ~130 Ma. The source areas of volcanic and intrusive rocks formed in the Longwangshan and Dawangshan volcanism cycles (before 130 Ma) are mainly from the enriched mantle contaminated by the Archean crust. The source areas of volcanic and intrusive rocks formed in the Gushan and Niangniangshan volcanic cycles (after 130 Ma) are mainly from the enriched mantle contaminated by the Neoproterozoic crust. In multi-stage volcanic activity, only the Dawangshan cycle is related to the formation of IOA deposits. Compared to other volcanic cycles, the Dawangshan cycle has higher enriched mantle components and less contamination of the Neoproterozoic crust. Therefore, the higher enriched mantle content in the ore-forming parent rock is one of the key factors controlling the formation of IOA deposits.

Key words: zircon, Hf-O isotope, magma source, iron oxide-apatite deposit, Ningwu ore district

长江中下游多金属成矿带是中国东部最重要的成矿带之一,中生代岩浆活动剧烈并形成了大量的斑岩-矽卡岩型、玢岩型、热液脉型矿床(常印佛等, 1991; Mao et al., 2011; 毛景文等, 2012; 2020; 周涛发等, 2011a; 2017; Yu et al., 2011)。其中,宁芜矿集区是最为重要的一个玢岩型铁矿矿集区(图1)。洋壳的俯冲作用控制着中国东部中生代的成矿作用。宁芜矿集区岩浆岩的活动处于区域大地构造挤压后的拉张时期,在较短的时间内(10 Ma)连续发育有龙王山、大王山、姑山和娘娘山4个火山作用旋回,每个火山作用旋回都伴随着次火山岩或侵入岩的发育。目前对宁芜矿集区岩浆岩成因的主要认识为岩石由大洋板块俯冲或加厚的古大陆下地壳部分熔融形成的富集地幔,在岩浆向上移动的过程中经历了或没有经历地壳同化混染作用,或直接来自超镁铁质成分较少的富集地幔源的部分熔融(邢凤鸣, 1996; 邢凤鸣等, 1999; 王元龙等, 2001; 张旗等, 2003; Hou et al., 2010; Mao et al., 2011; 毛景文等, 2012; 周涛发等, 2011a; Tang et al., 2013; 薛怀民等, 2015; Yan et al., 2015; Chen et al., 2016; 陈长健等, 2017)。

前人根据火山岩地质-地球化学特征的差异将

宁芜矿集区发育的4组火山作用旋回分为2组,提出了岩浆特征的转折。毛建仁等(1990)认为大王山旋回与姑山旋回间存在火山作用由强到弱、岩性从中基性到中酸性的转换。Zhou等(2011b)通过对不同旋回火山岩的地质特征和年代学研究,认为宁芜地区的4个火山岩旋回可以分为2个阶段,早期包括龙王山旋回和大王山旋回,晚期包括姑山旋回和娘娘山旋回。Duan等(2023)通过对4组火山旋回中火山岩中锆石年代学、Hf-O同位素及微量元素的研究,确定了火山岩岩浆源区的变化,也将多阶段火山作用分为早期龙王山旋回-大王山旋回和姑山旋回-娘娘山旋回2个主要阶段。4个火山作用旋回晚期形成的侵入岩大致可分为2类:一类是与玢岩型铁矿相关的侵入岩,形成于早阶段火山旋回(主要形成于大王山火山旋回晚期);另一类是成矿期后穿切矿体的花岗质岩石,多形成于晚阶段火山旋回(姑山火山旋回和娘娘山火山旋回)。但目前对花岗质侵入岩的研究较少,缺失了较多的指示岩浆特征改变的信息。

锆石作为副矿物普遍发育于各类岩浆岩中,由于其封闭温度高、抗风化能力强,即使经历风化、弱

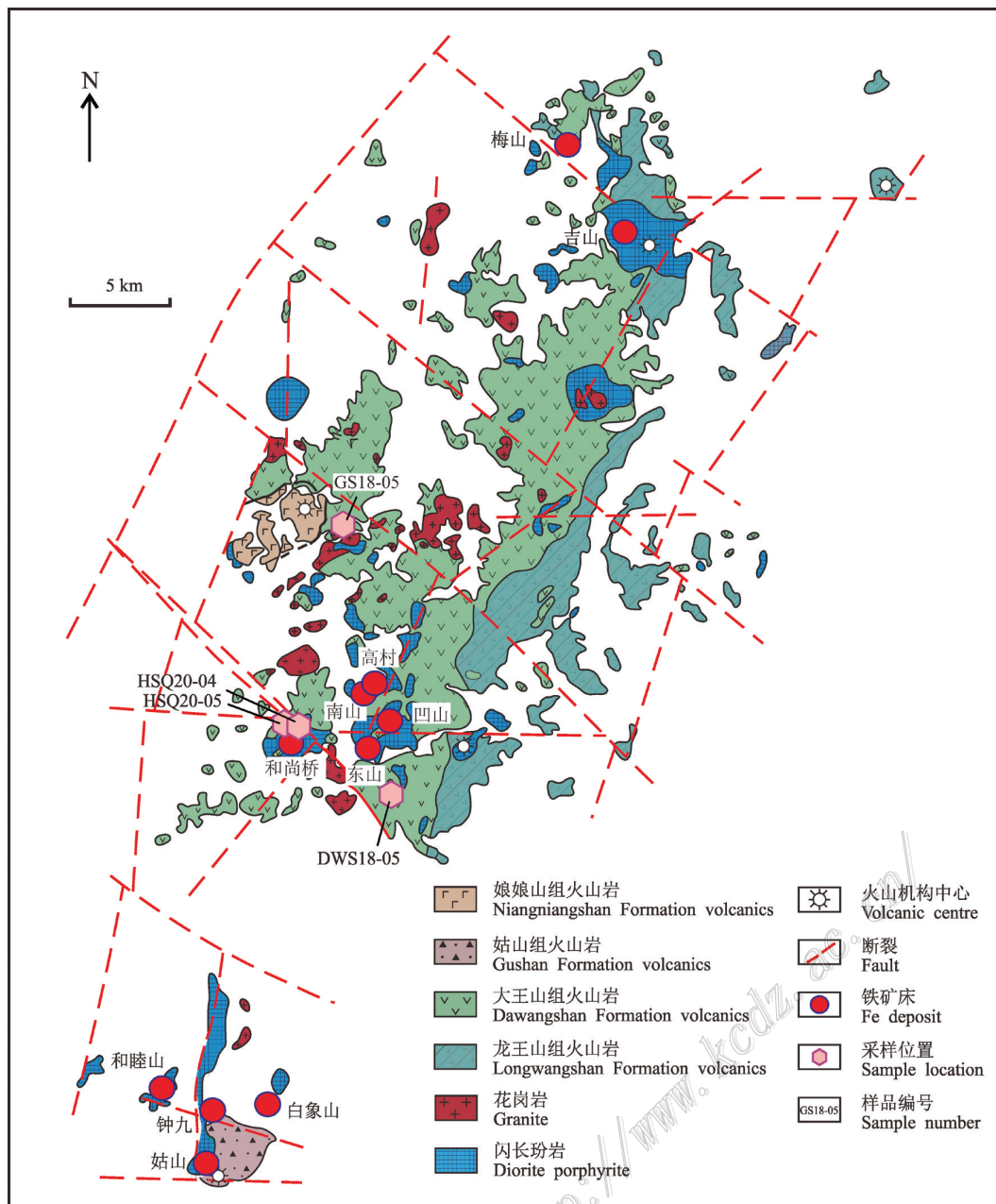


图 1 宁芜矿集区矿产地质简图(据宁芜研究项目编写小组, 1978 修改)

Fig. 1 Simplified geologic map of the Ningwu ore district, with corresponding distributions of Fe deposits (modified from the Ningwu Research Group, 1978)

热液蚀变,甚至多次地质事件后仍可保存,并记录形成时岩浆岩的源区和岩浆性质等特征(Belousova et al. 2002; Hoskin et al., 2003; Valley, 2003),是研究岩石形成和演化的重要探针。锆石 Hf-O 同位素联合示踪是近年来岩石源区研究领域成熟的重要示踪方法,锆石的氧同位素在不同的地质储库中具有差异明显的数值特征,能够有效示踪岩浆中各端员组分。本

次研究通过对宁芜矿集区两类侵入岩的锆石年代学、Hf-O 同位素特征的研究,有效区分了不同侵入岩源区的差异,进一步揭示了矿集区多阶段火山作用特征。

1 区域地质特征

在中生代,宁芜矿集区内共发育有 4 个火山作

用旋回,其中龙王山、大王山和姑山旋回以安山质岩石为主,娘娘山旋回以碱性火山岩(白榴石响岩和蓝方石响岩)为主,尽管娘娘山旋回存在一定的差异,但其并未形成一个独立的岩系(唐永成等,1998;王元龙等,2001)。在矿物学和地球化学特征上,娘娘山旋回火山岩与长江中下游多金属成矿带内发育的A型花岗岩均富含高钾矿物(钾长石),含有较少的斜长石和镁铁矿物的特征(唐永成等,1998),并具有相似的成岩年龄(范裕等,2008;Zhou et al., 2011b),可归为同一类型(毛建仁等,1990;唐永成等,1998;Mao et al., 2011)。

研究普遍认为,宁芜矿集区发育的2类侵入岩(次火山岩)中与铁矿有关的闪长玢岩(辉石闪长玢岩)主要为大王山旋回后期的产物(宁芜研究项目编写小组,1978;毛建仁等,1990;常印佛等,1991;邢凤鸣,1996;侯可军等,2010;袁顺达等,2010;范裕等,2010;2011;Yu et al., 2011;段超等,2011;Zhou et al., 2011b; 2013; Duan et al., 2012; 2019; 李锦伟等, 2012; Sun et al., 2017a; 赵新福等, 2020)。铁矿化后在矿集区中部发育有较大规模的花岗类侵入岩,形成于姑山旋回晚期,与娘娘山旋回相近或稍早(宁芜研究项目编写小组,1978)。其分布大致北起施川,南至青山-四合山,西至宁芜铁路一线,东至南山、陶村(高村)及围屏山一带,花岗岩类侵入体大多呈小岩体产出,它们在深部可能相连,呈长轴 35° 方向的似橄榄形大岩基(袁峰等,2011)。岩性以石英二长岩、石英闪长岩、石英二长斑岩、石英闪长斑岩、黑云母花岗岩、文象花岗岩、花岗斑岩为主。在宁芜盆地整个火山岩作用的后期,矿集区部分地区发育有热液脉型(-斑岩型)铜、金矿床(点)(例如:铜井铜金矿、大平山铜矿等),其与火山岩晚期的娘娘山旋回(或及姑山旋回)相联系(宁芜项目研究小组,1978)。

2 样品特征与测试方法

2.1 样品特征

本次研究采集了与玢岩铁矿形成密切相关的大王山火山旋回晚期侵入岩(闪长玢岩)和成矿后姑山旋回晚期侵入岩(黑云母闪长玢岩)以及穿切矿体发育的侵入岩(花岗闪长斑岩)。样品采集与特征如下。

DWS18-05样品为闪长玢岩(图2a),采自矿集区中部的凹山矿田南部,地理坐标为 $N31^\circ39'29.94''$,

$E118^\circ37'32.1''$,岩体侵入于大王山组二段安山岩中,岩石呈墨绿色,斑状结构,斑晶含量30%,主要为斜长石、角闪石、黑云母,基质主要为斜长石微晶。斜长石含量25%,粒径大小不一,0.5~2.5 mm,环带结构和聚片双晶结构发育;暗色矿物主要为角闪石,黑云母、辉石含量较少。基质以斜长石微晶为主,粒径0.02 mm左右。蚀变较发育,多为绿泥石化、绿帘石化和黏土化,碱性长石化少量发育。磁铁矿化呈星点状,粒径0.02~0.2 mm。

GS18-05样品为黑云母闪长玢岩(图2b),采自矿集区中部凹山矿田以北,地理坐标为 $N31^\circ43'40.5''$, $E118^\circ36'31.7''$,岩体侵入姑山组一段安山岩中。岩石呈墨绿色,斑状结构,斑晶含量50%,主要为斜长石和角闪石,基质主要为斜长石微晶。斜长石含量40%,粒径大小不一,0.5~4.0 mm,环带结构和聚片双晶结构发育;暗色矿物主要为角闪石和黑云母,含量约5%。岩石发育泥化、绿泥石化和绿帘石化蚀变。磁铁矿少量发育。

HSQ20-04和HSQ20-05样品均为花岗闪长斑岩(图2c、d),采自和尚桥铁矿床采坑北邦,地理坐标为 $N31^\circ37'57.3''$, $E118^\circ33'44.02''$ 。岩体侵入矿体及其赋矿围岩中。岩石呈浅肉红色,斑状结构,斑晶含量50%左右,主要为斜长石、钾长石、石英、黑云母,基质为长石、石英。斜长石含量35%左右,粒径大小不一,大者3 mm小者0.5 mm,环带结构和聚片双晶结构发育,多发生钾长石化;石英斑晶呈他形,多发生熔蚀边现象;角闪石、黑云母含量较少。后期多发生绿泥石化、钾长石化、泥化等。黄铁矿化呈稀疏浸染状(或星点状)发育。

2.2 测试方法

将采集的4件样品粉碎,挑选出锆石单矿物颗粒开展锆石SIMS U-Pb定年和Hf、O同位素测试。将锆石颗粒与U-Pb定年参考物质一起制成环氧树脂靶。在显微镜下进行透-反射光观察拍照。锆石靶镀碳后,采用阴极发光图像揭露锆石颗粒内部结构,结合透-反射光观察选择测试锆石颗粒。去除锆石靶表面碳之后再经过超声洗涤和真空干燥,镀上纯金以备后续测试。测试顺序先后为锆石O同位素,锆石SIMS U-Pb定年,锆石Hf同位素。具体测试方法见下文。

2.2.1 锆石O同位素

锆石氧同位素测试在核工业北京地质研究院采用二次离子质谱CAMECA IMS-1280HR测试完成。

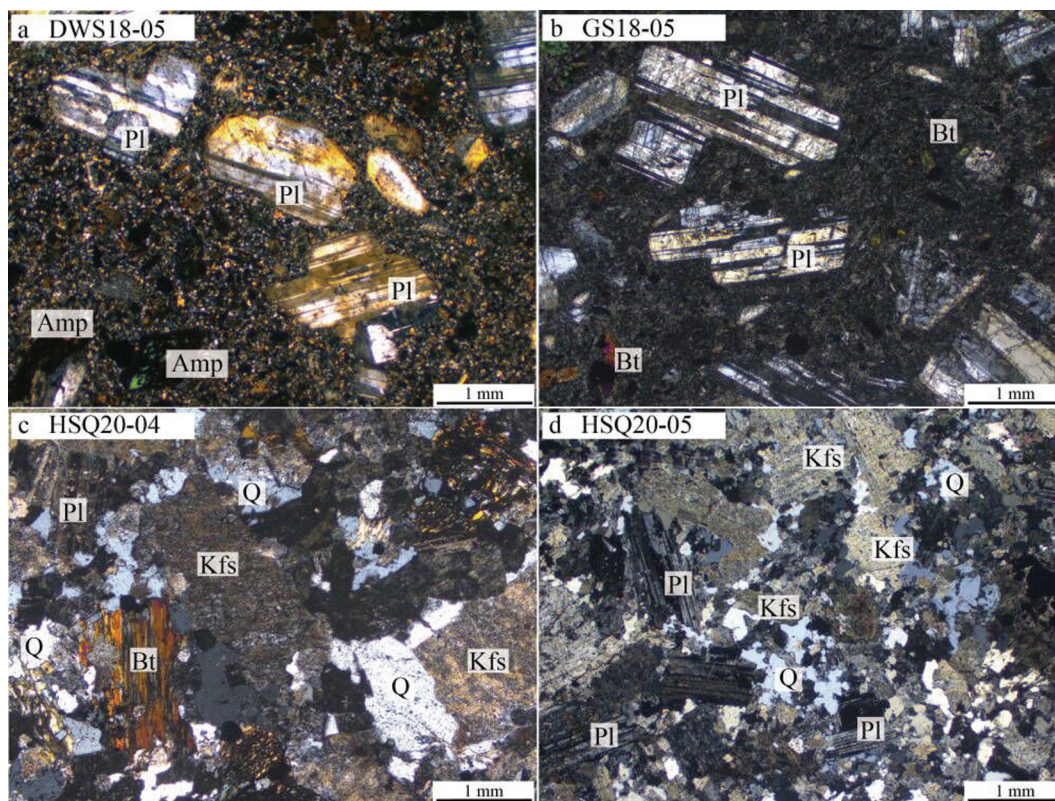


图 2 宁芜矿集区侵入岩显微镜正交偏光照片

a. 大王山旋回晚期闪长玢岩; b. 姑山旋回晚期黑云母闪长玢岩; c, d. 穿切矿体发育的花岗闪长斑岩
Pl—斜长石; Kfs—钾长石; Amp—角闪石; Bt—黑云母; Q—石英

Fig. 2 Orthogonally polarized micrographs of samples from the intrusions in the Ningwu ore district

a. Diorite porphyrite intrudes in the late of the Dawangshan cycle; b. Biotite diorite porphyrite intrudes in the late of the Gushan cycle;
c, d. Granodiorite porphyry cut through the Fe ore bodies at the Heshagnqiao mining pit
Pl—Plagioclase; Kfs—K-feldspar; Amp—Amphibole; Bt—Biotite; Q—Quartz

测试方法据 He 等 (2024) 和 Li 等 (2021), 一次离子光路系统采用高斯模式, 一次离子光阑大小为 $400\ \mu\text{m}$, Cs^+ 一次离子束强度约为 $2\ \text{nA}$, 栅格扫描大小为 $10\ \mu\text{m}$, 调制一次离子光路系统使到达样品表面的一次离子束斑大小约为 $20\ \mu\text{m}$ 。以垂直入射的电子枪均匀覆盖于 $100\ \mu\text{m}$ 范围内来中和样品的表面荷电效应。经过 $-10\ \text{kV}$ 加速电压提取负二次离子。二次离子光路对比度光阑为 $400\ \mu\text{m}$, 入口狭缝 $152\ \mu\text{m}$, 视场光阑 $5001\ \mu\text{m}$, 能量狭缝 $50\ \text{eV}$, 出口狭缝 $405\ \mu\text{m}$, 仪器质量分辨率约为 2400 (以 10% 峰高定义)。用参考物质 Penglai 锆石作为氧同位素测试主标样, Qinghu 锆石作为质量监控标样。二次离子信号采用多接收系统的法拉第杯接收, 采集 ^{16}O 和 ^{18}O 的信号, 单点测试采集 20 个循环。单点测试时间约为 3 分 40 秒, 其中包括 60 秒预剥蚀时间以及 2 分 40 秒信号采集时

间及仪器参数优化时间。单点数据内精度优于 0.2‰ (1σ)。

SIMS 的仪器质量分馏 (IMF) 校正采用 Penglai 锆石标准, 其中 Penglai 锆石氧同位素推荐值为 $5.31\text{‰} \pm 0.10\text{‰}$, 测量的 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比值通过维也纳平均标准海洋水 (V-SMOW) 值 ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}=0.002\ 005\ 2$) 校正后, 减去 IMF 即为该点的 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 计算公式如下:

$$(\delta^{18}\text{O})_{\text{M}} = ((^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{M}} / 0.002\ 005\ 2 - 1) \times 1000(\text{‰})$$

$$\text{IMF} = (\delta^{18}\text{O})_{\text{M(Standard)}} - (\delta^{18}\text{O})_{\text{V-SMOW}}$$

$$(\delta^{18}\text{O})_{\text{Sample}} = (\delta^{18}\text{O})_{\text{M}} - \text{IMF}$$

2.2.2 锆石 SIMS U-Pb 测年

锆石氧同位素测试在核工业北京地质研究院二次离子质谱 CAMECA IMS-1280HR 测试完成。锆石测试颗粒与锆石 O 同位素测试相同。测试采用一次离子光路系统采用科勒模式, 一次离子束强度约

为10 nA,主要质量过滤光阑大小为200 μm ,调制一次离子光路系统使到达样品表面的一次离子束斑大小约为20 μm ×30 μm 。二次离子光路对比度光阑为400 μm ,入口狭缝80 μm ,视场光阑7000 μm ,能量狭缝50 eV,出口狭缝173 μm 。实验过程中用参考物质 Plesovice 锆石定年主标样, Qinghu 锆石作为质量监控标样。每次分析保证有 Plesovice 均匀间隔在待测样品点中间,以控制样品测试整个过程的仪器分馏等分析条件,同时分析 Qinghu 锆石参考物质。二次离子信号通过扫描磁场的方式采用单接收系统的电子倍增器接收,单点测试点采集7个循环,单点测试时间约为11分钟。采用标准比对法,计算真实值。经过普通铅校正后的数据使用 Isoplot 软件投点获得谐和图。

2.2.3 锆石 Hf 同位素

锆石 Hf 同位素测试在中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室完成。使用 Neptune 多接收等离子质谱和 Geolas 193 pro 紫外激光剥蚀系统(LA-MC-ICP-MS)。实验过程中采用 He 作为剥蚀物质载气,根据锆石大小,剥蚀直径采用55 μm ,测定时使用锆石国际标样 GJ1 和 Plesovice 作为参考物质,分析点与 O 同位素分析点为同一位置。相关仪器运行条件及详细分析流程见侯可军等(2007)。分析过程中锆石标准 GJ1 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 测试加权平均值分别为 $0.282\ 022\pm 0.000\ 007(2\sigma)$,与文献报道值(Morel et al., 2006; 侯可军等, 2007)在误差范围内完全一致。

3 测试结果

3.1 锆石 SIMS U-Pb 年龄

DWS18-05 闪长玢岩样品中锆石颗粒无色透明,呈自形和棱柱形,粒径150~300 μm (图3)。共获得了20个有效锆石颗粒 U-Pb 年龄。锆石 $w(\text{Th})$ 和 $w(\text{U})$ 分别为 58×10^{-6} ~ 210×10^{-6} 和 100×10^{-6} ~ 238×10^{-6} , Th/U 值范围为0.58~0.95(表1),结合 CL 图像中的振荡生长分带,表明锆石为岩浆成因。20颗锆石颗粒的谐和年龄为 $(131.1\pm 0.6)\text{Ma}$ (MSWD=1.0),加权平均年龄为 $(130.4\pm 0.7)\text{Ma}$ (MSWD=0.4)(图4a)。

GS18-05 黑云母闪长玢岩样品中锆石颗粒无色透明,呈自形和棱柱形,粒径150~300 μm (图3)。获得了17颗有效锆石 U-Pb 年龄。锆石 $w(\text{Th})$ 和 $w(\text{U})$ 分别为 38×10^{-6} ~ 150×10^{-6} 和 53×10^{-6} ~ 148×10^{-6} , Th/U

值范围为0.65~1.03(表1),结合 CL 图像中的振荡生长分带,表明锆石为岩浆成因。17颗锆石颗粒的谐和年龄为 $(129.8\pm 2.2)\text{Ma}$ (MSWD=1.7),加权平均年龄为 $(130.9\pm 0.9)\text{Ma}$ (MSWD=0.9)(图4b)。

HSQ20-04 花岗闪长斑岩样品中锆石颗粒无色透明,呈自形和棱柱形,粒径100~400 μm (图3)。共获得了21个有效锆石颗粒 U-Pb 年龄。锆石 $w(\text{Th})$ 和 $w(\text{U})$ 分别为 206×10^{-6} ~ 947×10^{-6} 和 285×10^{-6} ~ 736×10^{-6} , Th/U 值范围为0.65~1.29(表1),结合 CL 图像中的振荡生长分带,表明锆石为岩浆成因。21颗锆石颗粒的谐和年龄为 $(129.8\pm 0.5)\text{Ma}$ (MSWD=1.3),加权平均年龄为 $(129.3\pm 0.6)\text{Ma}$ (MSWD=0.7)(图4c)。

HSQ20-05 花岗闪长斑岩样品中锆石颗粒无色透明,呈自形和棱柱形,粒径200~500 μm (图3)。共获得了23个有效锆石颗粒 U-Pb 年龄。锆石 $w(\text{Th})$ 和 $w(\text{U})$ 分别为 178×10^{-6} ~ 953×10^{-6} 和 250×10^{-6} ~ 815×10^{-6} , Th/U 值范围为0.65~1.30(表1),结合 CL 图像中的振荡生长分带,表明锆石为岩浆成因。23颗锆石颗粒的协和年龄为 $(129.4\pm 0.6)\text{Ma}$ (MSWD=1.4),加权平均年龄为 $(128.7\pm 0.6)\text{Ma}$ (MSWD=0.7)(图4d)。

3.2 锆石 Hf-O 同位素

宁芜矿集区火山岩锆石 Hf-O 同位素特征值见表2、图5和图6。样品锆石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值、 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和 $T_{\text{DM}2}$ 年龄均呈现为单峰, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 与锆石 U-Pb 年龄呈现负相关关系(图6)。

DWS18-05 闪长玢岩中的锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值在0.282 503~0.282 605之间, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为-6.7~-3.2。两阶段 Hf 模式年龄 $T_{\text{DM}2}$ 为1.10~1.27 Ga。这些锆石颗粒的 $\delta^{18}\text{O}$ 值范围为6.04‰~6.65‰。统计显示,锆石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值、 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和 $T_{\text{DM}2}$ 年龄均为单峰,分别集中在6.0‰~6.5‰(图5a)、-6.0~-5.0(图5b)和1200 Ma 至1250 Ma(图5c)。

GS18-05 闪长玢岩中的锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值在0.282 495~0.282 570之间, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为-7.0~-4.3。两阶段 Hf 模式年龄 $T_{\text{DM}2}$ 为1.16~1.28 Ga。这些锆石颗粒的 $\delta^{18}\text{O}$ 值范围为7.05~7.52。统计显示,锆石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值、 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和 $T_{\text{DM}2}$ 年龄均为单峰,分别集中在7.0‰~7.5‰(图5a)、-7.0~-5.5(图5b)和1200 Ma 至1300 Ma(图5c)。

HSQ20-04 和 HSQ20-05 花岗闪长斑岩样品中的锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值在0.282 448~0.282 660之间, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为-8.7~-1.2。两阶段 Hf 模式年龄 $T_{\text{DM}2}$ 为1.00~1.37 Ga。锆石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值范围为6.91‰~8.11‰。

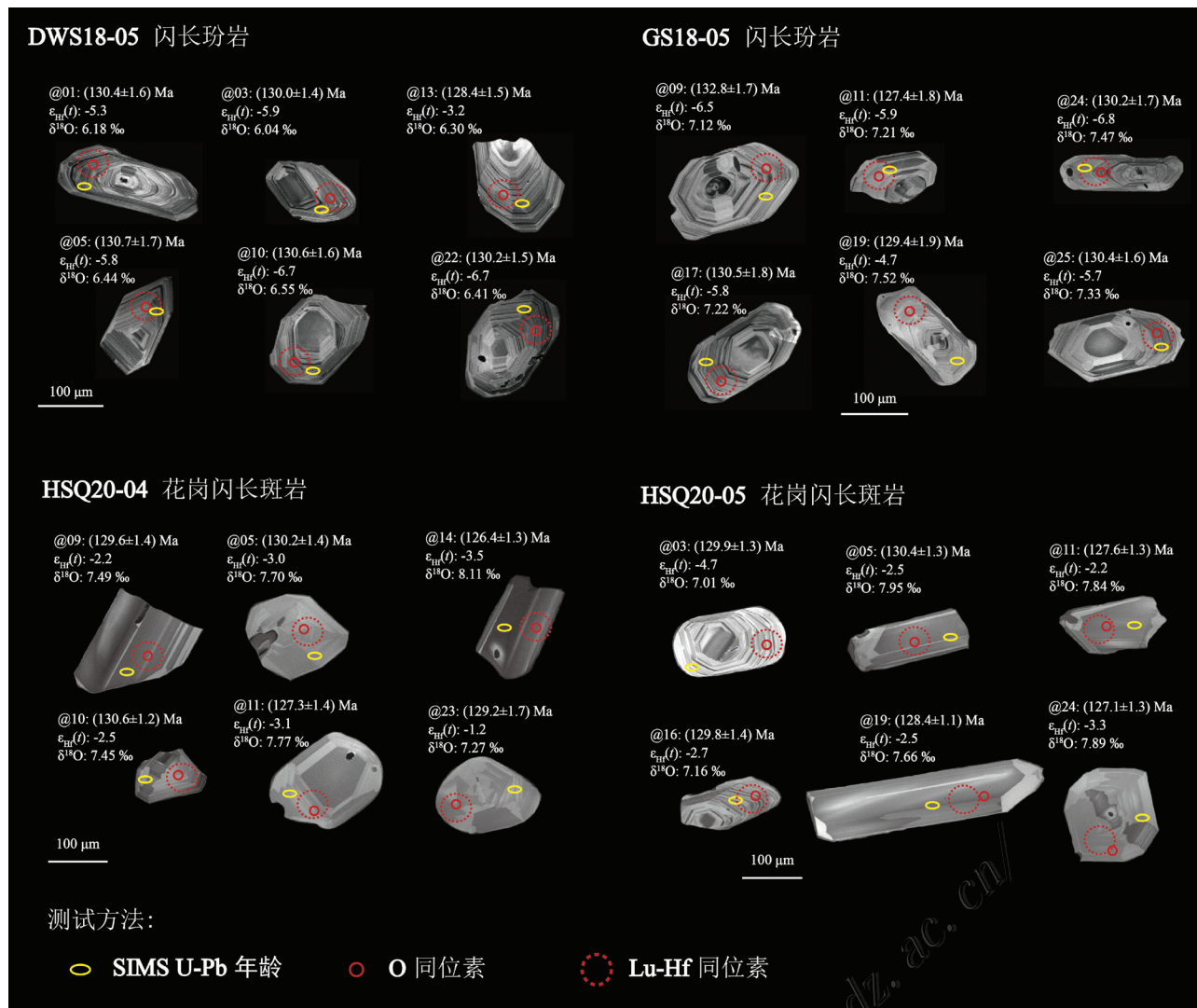


图3 宁芜矿集区侵入岩典型锆石阴极发光照片

实线椭圆为 SIMS $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄测试位置, 虚线圆圈为 Lu-Hf 同位素测试位置, 实线圆圈为 O 同位素测试位置

Fig. 3 Representative zircon grain cathodoluminescence (CL) images from intrusions in the Ningwu ore district

The analytical positions are shown, with solid ellipses for $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages, dashed circles for Lu-Hf isotope, and solid circles for O isotope

统计显示, 锆石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值、 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和 T_{DM2} 年龄均为单峰, 分别集中在 $7.0\text{‰}\sim 8.0\text{‰}$ 、 $-3.5\sim -2.0$ 和 1050 Ma 至 1150 Ma (图 5)。

4 讨论

4.1 宁芜矿集区多阶段火山作用时代

在宁芜矿集区中生代晚期发育有 4 个火山作用旋回。在过去十多年中, 通过锆石 LA-(MC)-ICP-MS (激光剥蚀多收集器电感耦合等离子体质谱)、SIMS (二次离子质谱) 等高精度 U-Pb 年龄测试, 对区内火山岩、次火山岩和侵入岩的形成时代进行了约

束, 4 个火山旋回形成于 125~135 Ma。然而, 由于火山旋回之间的时间间隔较短, 且测试分析存在一定的误差, 单个火山作用旋回显示出较大的成岩年龄阈值, 导致 2 个相邻的火山旋回之间存在测试误差内的年龄重叠 (图 7)。这种现象在大王山旋回和姑山旋回的年代学研究中非常明显。本次研究对大王山旋回晚期侵入的闪长玢岩、姑山旋回晚期侵入的黑云母闪长玢岩以及侵入和尚桥铁矿床中的花岗闪长斑岩进行了 SIMS 锆石 U-Pb 测年, 分别获得了 (131.1 ± 0.6) Ma、 (129.8 ± 2.2) Ma、 (129.8 ± 0.5) Ma 和 (129.4 ± 0.6) Ma 的成岩年龄。结合前人数据, 对 2 期主要侵入岩的平均侵入时间进行计算, 获得了与玢

表1 宁芜矿集区侵入岩锆石SIMS U-Pb年代学测试数据

Table 1 Zircon SIMS U-Pb dating results of the intrusions at Ningwu ore district

样品原号	$w(B)/10^{-6}$		Th/U	^{206}Pb	^{207}Pb	$\pm\%$	^{207}Pb	$\pm\%$	^{206}Pb	$\pm\%$	ρ	$T_{207/206}$	$\pm\text{Ma}$	$T_{207/235}$	$\pm\text{Ma}$	$T_{206/238}$	$\pm\text{Ma}$
	U	Th		$/^{204}\text{Pb}$	$/^{206}\text{Pb}$		$/^{235}\text{U}$		$/^{238}\text{U}$			/Ma		/Ma		/Ma	
DWS18-05@01	171	111	0.648	3.35E+04	0.0486	1.91	0.1370	2.26	0.0204	1.21	0.54	128.6	44.3	130.3	2.8	130.4	1.6
DWS18-05@02	115	70	0.605	1.44E+04	0.0483	2.34	0.1367	2.84	0.0206	1.60	0.56	112.0	54.4	130.1	3.5	131.1	2.1
DWS18-05@03	238	210	0.884	1.74E+04	0.0485	1.61	0.1361	1.96	0.0204	1.11	0.57	121.8	37.5	129.5	2.4	130.0	1.4
DWS18-05@05	126	78	0.620	6.61E+03	0.0506	3.23	0.1428	3.48	0.0205	1.29	0.37	220.6	73.1	135.5	4.4	130.7	1.7
DWS18-05@10	154	100	0.650	7.18E+03	0.0487	2.25	0.1373	2.57	0.0205	1.25	0.49	131.9	52.0	130.7	3.2	130.6	1.6
DWS18-05@11	180	115	0.639	1.71E+04	0.0494	2.58	0.1396	2.85	0.0205	1.21	0.42	164.5	59.3	132.7	3.6	130.9	1.6
DWS18-05@13	171	127	0.743	3.34E+04	0.0508	2.40	0.1408	2.68	0.0201	1.20	0.45	229.5	54.5	133.7	3.4	128.4	1.5
DWS18-05@14	212	197	0.929	2.71E+04	0.0495	1.66	0.1407	1.99	0.0206	1.10	0.55	172.8	38.3	133.7	2.5	131.5	1.4
DWS18-05@15	223	168	0.756	1.43E+04	0.0480	1.65	0.1367	2.00	0.0207	1.12	0.56	99.4	38.6	130.1	2.4	131.8	1.5
DWS18-05@17	133	99	0.748	1.71E+04	0.0489	2.36	0.1363	2.84	0.0202	1.59	0.56	140.9	54.4	129.8	3.5	129.2	2.0
DWS18-05@19	100	58	0.579	2.06E+04	0.0501	2.74	0.1402	3.00	0.0203	1.22	0.41	201.7	62.3	133.3	3.7	129.5	1.6
DWS18-05@20	151	113	0.750	6.64E+04	0.0495	1.98	0.1399	2.33	0.0205	1.23	0.53	169.9	45.6	132.9	2.9	130.9	1.6
DWS18-05@21	103	63	0.615	6.83E+03	0.0491	3.85	0.1404	4.05	0.0207	1.26	0.31	152.1	87.9	133.4	5.1	132.3	1.6
DWS18-05@22	150	102	0.679	>1 E+06	0.0491	1.99	0.1382	2.32	0.0204	1.19	0.51	154.6	45.9	131.4	2.9	130.2	1.5
DWS18-05@24	130	94	0.723	1.76E+04	0.0501	2.09	0.1412	2.45	0.0204	1.27	0.52	198.2	47.9	134.1	3.1	130.5	1.6
DWS18-05@25	165	155	0.942	1.06E+04	0.0496	1.88	0.1387	2.20	0.0203	1.15	0.52	176.4	43.2	131.9	2.7	129.4	1.5
DWS18-05@26	119	76	0.637	5.72E+03	0.0501	2.21	0.1411	2.53	0.0204	1.24	0.49	197.5	50.5	134.0	3.2	130.5	1.6
DWS18-05@27	165	157	0.950	9.17E+03	0.0496	1.87	0.1394	2.18	0.0204	1.12	0.51	177.0	43.1	132.5	2.7	130.0	1.4
DWS18-05@29	137	80	0.584	1.34E+04	0.0492	2.07	0.1373	2.40	0.0203	1.22	0.51	156.9	47.8	130.7	3.0	129.2	1.6
DWS18-05@30	158	110	0.692	1.05E+04	0.0492	2.41	0.1400	2.66	0.0206	1.11	0.42	158.2	55.5	133.0	3.3	131.6	1.5
GS18-05@08	73	59	0.812	7.12E+03	0.0498	2.83	0.1377	3.15	0.0200	1.39	0.44	187.3	64.5	131.0	3.9	127.9	1.8
GS18-05@09	81	54	0.666	6.54E+03	0.0501	2.63	0.1436	2.91	0.0208	1.26	0.43	197.3	59.9	136.3	3.7	132.8	1.7
GS18-05@10	84	60	0.710	4.64E+04	0.0508	2.55	0.1450	2.87	0.0207	1.32	0.46	232.8	57.9	137.5	3.7	132.1	1.7
GS18-05@11	60	57	0.948	>1 E+06	0.0502	3.06	0.1382	3.36	0.0200	1.39	0.41	205.4	69.6	131.5	4.2	127.4	1.8
GS18-05@12	73	51	0.706	>1 E+06	0.0503	2.76	0.1421	3.05	0.0205	1.29	0.42	209.9	62.7	134.9	3.9	130.7	1.7
GS18-05@13	67	44	0.654	3.33E+03	0.0490	2.91	0.1387	3.28	0.0205	1.50	0.46	145.5	67.0	131.9	4.1	131.1	1.9
GS18-05@15	53	38	0.715	3.61E+03	0.0485	3.22	0.1400	3.64	0.0209	1.69	0.46	124.5	74.2	133.1	4.5	133.5	2.2
GS18-05@17	107	72	0.669	5.30E+03	0.0505	2.27	0.1424	2.68	0.0204	1.42	0.53	219.3	51.7	135.2	3.4	130.5	1.8
GS18-05@18	63	44	0.689	>1 E+06	0.0486	3.57	0.1361	3.84	0.0203	1.41	0.37	130.8	81.8	129.6	4.7	129.5	1.8
GS18-05@19	62	49	0.793	5.03E+03	0.0510	3.56	0.1425	3.86	0.0203	1.50	0.39	240.5	80.0	135.3	4.9	129.4	1.9
GS18-05@20	123	127	1.031	2.60E+03	0.0554	4.55	0.1419	6.81	0.0207	1.34	0.20	185.1	148.4	134.7	8.6	131.9	1.8
GS18-05@22	114	77	0.673	5.45E+03	0.0496	2.42	0.1414	2.76	0.0207	1.33	0.48	177.6	55.5	134.3	3.5	131.9	1.7
GS18-05@24	77	52	0.680	1.64E+04	0.0508	2.65	0.1430	2.97	0.0204	1.34	0.45	233.6	60.1	135.7	3.8	130.2	1.7
GS18-05@25	116	80	0.693	2.50E+04	0.0485	2.21	0.1365	2.54	0.0204	1.26	0.50	121.4	51.2	129.9	3.1	130.4	1.6
GS18-05@26	148	150	1.017	6.45E+03	0.0505	1.98	0.1373	2.84	0.0207	1.21	0.43	109.9	59.5	130.6	3.5	131.8	1.6
GS18-05@28	72	50	0.699	1.03E+04	0.0494	2.73	0.1420	3.02	0.0208	1.29	0.43	168.4	62.6	134.8	3.8	132.9	1.7
GS18-05@30	101	67	0.657	1.06E+04	0.0491	2.33	0.1389	2.66	0.0205	1.28	0.48	153.6	53.7	132.1	3.3	130.9	1.7
HSQ20-04@01	354	296	0.836	5.78E+03	0.0484	2.56	0.1354	2.76	0.0203	1.05	0.38	119.3	59.2	128.9	3.4	129.4	1.3
HSQ20-04@02	459	341	0.742	2.08E+04	0.0478	2.35	0.1326	2.77	0.0201	1.45	0.53	89.6	54.9	126.5	3.3	128.4	1.9
HSQ20-04@03	634	758	1.196	1.03E+04	0.0491	1.89	0.1382	2.10	0.0204	0.93	0.44	152.7	43.6	131.4	2.6	130.2	1.2
HSQ20-04@04	382	247	0.646	9.43E+03	0.0488	2.43	0.1379	2.81	0.0205	1.40	0.50	138.2	56.2	131.2	3.5	130.8	1.8
HSQ20-04@05	378	326	0.862	7.31E+03	0.0475	2.47	0.1337	2.69	0.0204	1.07	0.40	74.4	57.6	127.4	3.2	130.2	1.4
HSQ20-04@07	344	357	1.038	1.09E+04	0.0491	3.15	0.1396	3.37	0.0206	1.21	0.36	153.6	72.1	132.7	4.2	131.6	1.6
HSQ20-04@08	356	322	0.905	1.69E+04	0.0488	2.54	0.1366	2.74	0.0203	1.03	0.37	136.4	58.7	130.0	3.4	129.7	1.3

续表 1

Continued Table 1

样品原号	$w(\text{B})/10^{-6}$		Th/U	^{206}Pb	^{207}Pb	$\pm\%$	^{207}Pb	$\pm\%$	^{206}Pb	$\pm\%$	ρ	$T_{207/206}$	$\pm\text{Ma}$	$T_{207/235}$	$\pm\text{Ma}$	$T_{206/238}$	$\pm\text{Ma}$
	U	Th		$/^{204}\text{Pb}$	$/^{206}\text{Pb}$		$/^{235}\text{U}$		$/^{238}\text{U}$					/Ma		/Ma	
HSQ20-04@09	560	714	1.276	2.62E+04	0.0486	2.43	0.1361	2.65	0.0203	1.06	0.40	129.5	56.2	129.6	3.2	129.6	1.4
HSQ20-04@10	620	744	1.200	1.01E+04	0.0486	1.93	0.1371	2.12	0.0205	0.89	0.42	128.7	44.7	130.5	2.6	130.6	1.2
HSQ20-04@11	385	303	0.786	1.77E+04	0.0505	3.28	0.1388	3.47	0.0199	1.13	0.33	218.1	74.2	132.0	4.3	127.3	1.4
HSQ20-04@12	429	313	0.730	6.11E+03	0.0490	2.34	0.1360	2.59	0.0201	1.11	0.43	149.5	53.9	129.5	3.2	128.4	1.4
HSQ20-04@13	285	214	0.753	7.36E+03	0.0497	2.88	0.1393	3.08	0.0203	1.09	0.35	181.1	65.7	132.4	3.8	129.7	1.4
HSQ20-04@14	390	334	0.857	8.95E+03	0.0507	2.41	0.1384	2.62	0.0198	1.01	0.39	227.9	54.8	131.6	3.2	126.4	1.3
HSQ20-04@15	319	315	0.985	6.41E+03	0.0505	3.22	0.1407	3.43	0.0202	1.19	0.35	217.5	72.8	133.7	4.3	129.0	1.5
HSQ20-04@16	342	288	0.840	1.59E+04	0.0482	3.01	0.1354	3.23	0.0204	1.17	0.36	110.7	69.6	128.9	3.9	129.9	1.5
HSQ20-04@18	422	378	0.895	1.31E+04	0.0496	2.84	0.1384	3.27	0.0203	1.61	0.49	174.5	65.0	131.6	4.0	129.3	2.1
HSQ20-04@19	286	206	0.720	4.37E+03	0.0507	2.82	0.1412	3.05	0.0202	1.15	0.38	229.2	63.9	134.1	3.8	128.8	1.5
HSQ20-04@20	377	416	1.106	8.83E+03	0.0492	2.62	0.1366	2.89	0.0201	1.23	0.42	156.3	60.1	130.0	3.5	128.5	1.6
HSQ20-04@21	736	947	1.287	8.66E+03	0.0488	1.78	0.1354	2.06	0.0201	1.04	0.50	138.0	41.3	129.0	2.5	128.5	1.3
HSQ20-04@23	351	276	0.787	9.52E+03	0.0491	2.56	0.1370	2.89	0.0202	1.34	0.46	150.9	59.0	130.3	3.5	129.2	1.7
HSQ20-04@24	512	554	1.083	8.14E+04	0.0473	2.43	0.1323	2.78	0.0203	1.36	0.49	66.8	56.9	126.1	3.3	129.3	1.7
HSQ20-05@01	347	267	0.769	1.06E+04	0.0511	4.18	0.1408	4.32	0.0200	1.12	0.26	246.9	93.4	133.7	5.4	127.5	1.4
HSQ20-05@02	468	409	0.874	8.83E+03	0.0485	2.77	0.1338	3.02	0.0200	1.22	0.40	121.5	63.9	127.5	3.6	127.9	1.5
HSQ20-05@03	555	390	0.702	6.54E+03	0.0490	2.42	0.1376	2.62	0.0204	1.00	0.38	149.4	55.8	130.9	3.2	129.9	1.3
HSQ20-05@04	422	279	0.661	7.86E+03	0.0477	2.41	0.1345	2.66	0.0205	1.12	0.42	83.1	56.2	128.1	3.2	130.5	1.4
HSQ20-05@05	452	519	1.150	5.41E+03	0.0489	2.26	0.1378	2.48	0.0204	1.01	0.41	144.3	52.3	131.1	3.1	130.4	1.3
HSQ20-05@06	408	281	0.688	1.86E+04	0.0479	3.41	0.1348	3.57	0.0204	1.06	0.30	96.3	78.7	128.4	4.3	130.2	1.4
HSQ20-05@07	381	249	0.654	5.03E+03	0.0476	3.50	0.1319	3.66	0.0201	1.08	0.29	80.9	81.0	125.8	4.3	128.2	1.4
HSQ20-05@08	432	371	0.859	3.70E+04	0.0505	3.50	0.1395	3.64	0.0200	0.97	0.27	216.5	79.2	132.6	4.5	127.9	1.2
HSQ20-05@09	483	601	1.244	1.49E+04	0.0498	2.19	0.1364	2.51	0.0199	1.22	0.49	184.4	50.3	129.8	3.1	126.9	1.5
HSQ20-05@10	462	343	0.743	1.41E+04	0.0498	2.24	0.1386	2.45	0.0202	0.98	0.40	186.3	51.4	131.8	3.0	128.8	1.2
HSQ20-05@11	449	544	1.212	1.34E+04	0.0489	2.97	0.1348	3.15	0.0200	1.05	0.33	142.4	68.4	128.4	3.8	127.6	1.3
HSQ20-05@12	423	486	1.151	6.73E+03	0.0494	2.44	0.1367	2.65	0.0201	1.03	0.39	164.8	56.1	130.1	3.2	128.2	1.3
HSQ20-05@13	353	319	0.905	1.60E+04	0.0501	2.55	0.1398	2.75	0.0202	1.03	0.37	199.8	58.2	132.9	3.4	129.2	1.3
HSQ20-05@14	334	241	0.722	3.04E+04	0.0484	2.66	0.1356	2.87	0.0203	1.10	0.38	118.7	61.5	129.1	3.5	129.7	1.4
HSQ20-05@16	714	554	0.776	1.34E+04	0.0487	2.59	0.1366	2.79	0.0203	1.05	0.38	133.7	59.8	130.0	3.4	129.8	1.4
HSQ20-05@17	725	942	1.298	8.34E+03	0.0495	1.79	0.1380	2.03	0.0202	0.96	0.47	172.2	41.4	131.3	2.5	129.0	1.2
HSQ20-05@18	612	438	0.715	5.25E+04	0.0484	2.07	0.1338	2.36	0.0200	1.13	0.48	121.3	48.1	127.5	2.8	127.8	1.4
HSQ20-05@19	815	953	1.169	8.43E+03	0.0479	1.73	0.1329	1.95	0.0201	0.90	0.46	94.5	40.4	126.7	2.3	128.4	1.1
HSQ20-05@20	471	351	0.745	1.88E+04	0.0474	2.81	0.1345	3.17	0.0206	1.47	0.46	70.7	65.6	128.1	3.8	131.2	1.9
HSQ20-05@21	250	178	0.713	7.76E+03	0.0496	3.27	0.1378	3.51	0.0202	1.26	0.36	175.0	74.6	131.1	4.3	128.7	1.6
HSQ20-05@22	330	332	1.007	7.28E+03	0.0503	3.71	0.1384	3.86	0.0200	1.06	0.27	207.1	83.9	131.6	4.8	127.5	1.3
HSQ20-05@24	417	384	0.922	1.90E+04	0.0496	2.37	0.1363	2.59	0.0199	1.04	0.40	178.3	54.3	129.7	3.2	127.1	1.3
HSQ20-05@25	337	232	0.688	1.35E+04	0.0491	2.66	0.1379	2.89	0.0203	1.14	0.39	154.5	61.1	131.1	3.6	129.8	1.5

岩型铁矿矿化相关的或同旋回侵入岩形成时间为 $(130.7 \pm 0.6)\text{Ma}$ ($n=20, 2\sigma$), 晚期花岗类侵入岩的形成时间为 $(127.4 \pm 0.9)\text{Ma}$ ($n=17, 2\sigma$) (图 7)。

本次研究获得的地质年代学结果也与地质特征相符合, 可以区分不同的地质事件。Zhou 等 (2011b) 发现, 姑山组下部的火山岩覆盖着闪长玢岩和角砾

状铁矿石, 姑山组火山岩晚期形成的岩墙侵入闪长玢岩和磁铁矿脉, 姑山旋回形成于铁矿化之后。玢岩型铁矿床成矿时代约 130Ma (袁顺达等, 2010; 范裕等, 2011; Zeng et al., 2016)。与玢岩型矿床相关的闪长岩产于约 $(130.8 \pm 0.6)\text{Ma}$ (图 7), 被认为是大王山火山旋回晚期的侵入相 (次火山岩)。因此, 大

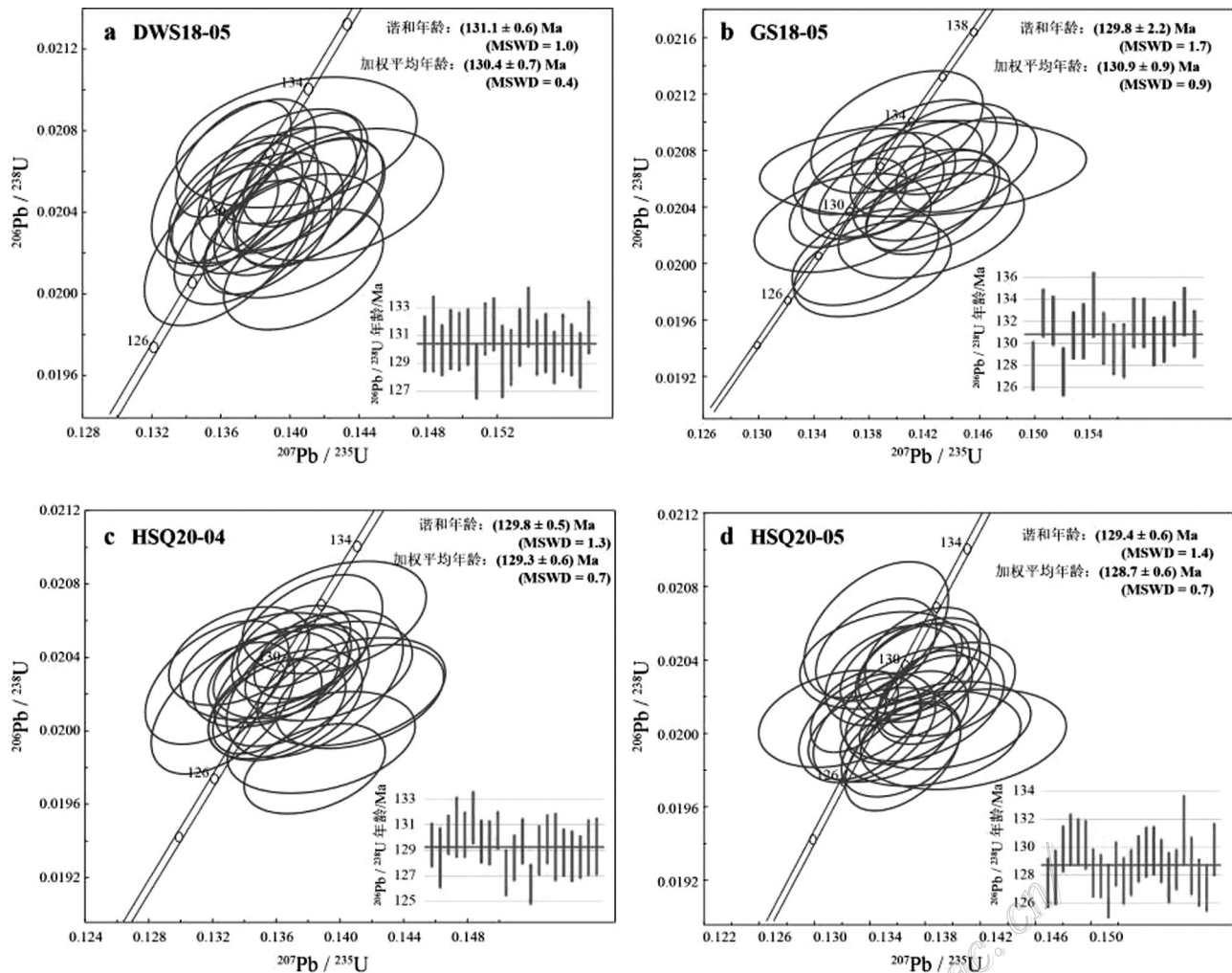


图4 宁芜矿集区侵入岩(a~d)锆石年龄特征

Fig. 4 U-Pb isotopic age diagrams of zircons from intrusions (a~d) in the Ningwu ore district

王山旋回形成于130 Ma或之前,而姑山旋回形成于130 Ma之后。130 Ma后,花岗岩类侵入并破坏了广泛发育的闪长玢岩和玢岩型铁矿体(侯可军等, 2010; Zhou et al., 2011b; 袁峰等, 2011; 段超等, 2011; Duan et al., 2012; 王丽娟等, 2014)。这些新数据进一步确认了宁芜矿集区火山事件的地质年代学框架。

4.2 宁芜矿集区侵入岩源区与成因特征

前人研究认为,多阶段火山作用形成的4个火山旋回中每个旋回的火山岩与侵入岩(次火山岩)具有相似的岩浆源区和成分特征(宁芜研究项目编写小组, 1978)。4组火山旋回具有相似的源区特征,都亏损高场强元素(HFSE),富集轻稀土元素和大离子亲石元素(LILE),具有岛弧成因岩浆岩的微量元素特征(薛怀民等, 2015; Yan et al., 2015),显示了Rb、

Th、U、K和LREE的正异常,Ta、Ti和Nb的负异常。4组火山岩在Sr-Nd同位素示踪图解中沿地幔演化线分布,其中部分娘娘山组火山岩样品处于扬子克拉通下地壳的区域,指示娘娘山组火山岩混染了更多的大陆地壳物质,这与娘娘山组火山岩含有较高轻稀土元素的特征相一致。根据4组火山岩具有的相对基性的SiO₂含量、高K₂O、Th和U含量、高K₂O/Na₂O比值和较高Sr-Nd-Pb同位素组成,认为宁芜矿集区中的火山岩具有类似的岩浆来源,源于与古太平洋板块俯冲有关的富集地幔,并在上升过程中混染了地壳物质(邢凤鸣, 1996; 邢凤鸣等, 1999; Mao et al., 2011; Yan et al., 2015)。这种火山岩具有的与俯冲作用相关的富集地幔的源区组分端员与长江中下游其他成矿母岩的特征相一致(Mao et al., 2011; Yan et al., 2015)。洋壳的俯冲作用控制着中国东部

表 2 宁芜矿集区侵入岩锆石 Hf-O 同位素测试数据
Table 2 Zircon Hf-O isotopic data of the intrusions at Ningwu ore district

样品编号	<i>t</i> /Ma	$\epsilon_{\text{Hf}}(\text{O})$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	T_{DM1}	T_{DM2}	f_{LwHf}	$\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$ /‰	abs /‰	样品编号	<i>t</i> /Ma	$\epsilon_{\text{Hf}}(\text{O})$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	T_{DM1}	T_{DM2}	f_{LwHf}	$\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$ /‰	abs /‰
DWS18-05-01	130.4	-8.0	-5.3	999	1200	-0.97	6.18	0.05	HSQ20-04-05	130.2	-5.8	-3.0	902	1091	-0.98	7.70	0.07
DWS18-05-02	131.1	-7.7	-4.9	980	1185	-0.98	6.07	0.08	HSQ20-04-07	131.6	-5.5	-2.6	886	1072	-0.99	7.27	0.05
DWS18-05-03	130.0	-8.7	-5.9	1016	1230	-0.98	6.04	0.05	HSQ20-04-08	129.7	-4.9	-2.1	865	1045	-0.98	7.29	0.09
DWS18-05-05	130.7	-8.6	-5.8	1012	1225	-0.98	6.44	0.06	HSQ20-04-09	129.6	-5.0	-2.2	878	1050	-0.97	7.49	0.06
DWS18-05-10	130.6	-9.5	-6.7	1056	1271	-0.97	6.55	0.09	HSQ20-04-10	130.6	-5.3	-2.5	881	1065	-0.98	7.45	0.06
DWS18-05-11	130.9	-7.4	-4.6	969	1167	-0.98	6.41	0.09	HSQ20-04-11	127.3	-5.9	-3.1	904	1093	-0.98	7.77	0.06
DWS18-05-13	128.4	-5.9	-3.2	912	1097	-0.97	6.30	0.06	HSQ20-04-12	128.4	-6.2	-3.5	916	1111	-0.99	7.55	0.08
DWS18-05-14	131.5	-8.2	-5.4	1013	1209	-0.96	6.36	0.06	HSQ20-04-13	129.7	-6.1	-3.3	910	1103	-0.99	7.51	0.05
DWS18-05-15	131.8	-8.4	-5.6	1011	1216	-0.97	6.43	0.09	HSQ20-04-14	126.4	-6.2	-3.5	914	1110	-0.99	8.11	0.07
DWS18-05-17	129.2	-8.4	-5.6	1003	1215	-0.98	6.50	0.08	HSQ20-04-15	129.0	-5.4	-2.6	884	1069	-0.98	7.36	0.06
DWS18-05-19	129.5	-8.7	-5.9	1014	1230	-0.98	6.51	0.09	HSQ20-04-16	129.9	-5.2	-2.3	872	1057	-0.99	7.66	0.07
DWS18-05-20	130.9	-8.2	-5.4	1002	1209	-0.98	6.40	0.09	HSQ20-04-18	129.3	-5.3	-2.5	885	1067	-0.98	7.70	0.07
DWS18-05-21	132.3	-8.9	-6.1	1026	1241	-0.98	6.65	0.09	HSQ20-04-19	128.8	-5.6	-2.8	891	1081	-0.99	7.57	0.06
DWS18-05-22	130.2	-9.5	-6.7	1049	1271	-0.98	6.41	0.08	HSQ20-04-20	128.5	-5.7	-2.9	893	1083	-0.99	7.62	0.06
DWS18-05-24	130.5	-8.4	-5.6	1008	1218	-0.98	6.45	0.06	HSQ20-04-21	128.5	-4.5	-1.7	852	1026	-0.98	7.56	0.07
DWS18-05-25	129.4	-6.1	-3.3	918	1105	-0.98	6.32	0.08	HSQ20-04-23	129.2	-4.0	-1.2	828	1001	-0.99	7.27	0.07
DWS18-05-26	130.5	-9.0	-6.2	1029	1247	-0.98	6.50	0.12	HSQ20-04-24	129.3	-7.0	-4.1	943	1145	-0.99	7.77	0.07
DWS18-05-27	130.0	-8.3	-5.6	1010	1214	-0.97	6.45	0.10	HSQ20-05-01	127.5	-6.3	-3.5	917	1112	-0.99	7.73	0.06
DWS18-05-29	129.2	-8.4	-5.6	1013	1217	-0.97	6.44	0.08	HSQ20-05-02	127.9	-7.3	-4.6	957	1164	-0.99	7.86	0.08
DWS18-05-30	131.6	-7.8	-5.0	985	1189	-0.98	6.49	0.08	HSQ20-05-03	129.9	-7.5	-4.7	968	1171	-0.98	7.01	0.08
GS18-05-08	127.9	-9.4	-6.6	1038	1266	-0.99	7.36	0.08	HSQ20-05-04	130.5	-5.5	-2.7	889	1075	-0.98	7.10	0.07
GS18-05-09	132.8	-9.3	-6.5	1038	1260	-0.98	7.12	0.08	HSQ20-05-05	130.4	-5.3	-2.5	887	1066	-0.98	7.95	0.06
GS18-05-10	132.1	-8.9	-6.1	1022	1241	-0.99	7.50	0.08	HSQ20-05-06	130.2	-6.3	-3.5	920	1112	-0.98	7.18	0.07
GS18-05-11	127.4	-8.6	-5.9	1017	1228	-0.98	7.21	0.06	HSQ20-05-07	128.2	-11.5	-8.7	1129	1367	-0.98	7.16	0.07
GS18-05-12	130.7	-9.8	-7.0	1056	1283	-0.98	7.26	0.05	HSQ20-05-08	127.9	-6.1	-3.3	909	1103	-0.99	7.90	0.06
GS18-05-13	131.1	-9.8	-7.0	1059	1284	-0.98	7.18	0.07	HSQ20-05-09	126.9	-4.0	-1.3	837	1002	-0.97	7.76	0.05
GS18-05-15	133.5	-9.5	-6.6	1047	1267	-0.98	7.05	0.06	HSQ20-05-10	128.8	-6.1	-3.3	916	1105	-0.98	7.14	0.07
GS18-05-17	130.5	-8.6	-5.8	1017	1229	-0.98	7.22	0.06	HSQ20-05-11	127.6	-4.9	-2.2	872	1049	-0.98	7.84	0.06
GS18-05-18	129.5	-9.0	-6.2	1027	1246	-0.98	7.18	0.08	HSQ20-05-12	128.2	-5.5	-2.7	886	1073	-0.99	7.85	0.08
GS18-05-19	129.4	-7.5	-4.7	965	1174	-0.99	7.52	0.06	HSQ20-05-13	129.2	-5.2	-2.4	875	1060	-0.99	8.05	0.07
GS18-05-20	131.9	-8.3	-5.5	1004	1213	-0.98	7.28	0.07	HSQ20-05-14	129.7	-7.7	-4.9	973	1180	-0.98	7.26	0.05
GS18-05-22	131.9	-9.7	-6.9	1056	1280	-0.98	7.09	0.05	HSQ20-05-16	129.8	-5.5	-2.7	893	1075	-0.98	7.16	0.09
GS18-05-24	130.2	-9.6	-6.8	1050	1273	-0.98	7.47	0.08	HSQ20-05-17	129.0	-5.5	-2.7	900	1076	-0.97	7.87	0.07
GS18-05-25	130.4	-8.5	-5.7	1008	1220	-0.98	7.33	0.08	HSQ20-05-18	127.8	-6.5	-3.8	934	1126	-0.98	6.93	0.05
GS18-05-26	131.8	-8.8	-6.0	1023	1236	-0.98	7.47	0.05	HSQ20-05-19	128.4	-5.2	-2.5	887	1061	-0.97	7.66	0.05
GS18-05-28	132.9	-9.1	-6.2	1030	1250	-0.98	7.41	0.06	HSQ20-05-20	131.2	-7.1	-4.3	964	1154	-0.97	6.93	0.06
GS18-05-30	130.9	-7.1	-4.3	956	1155	-0.98	7.12	0.06	HSQ20-05-21	128.7	-6.0	-3.2	905	1100	-0.99	7.98	0.08
HSQ20-04-01	129.4	-5.4	-2.6	883	1069	-0.98	7.58	0.06	HSQ20-05-22	127.5	-5.6	-2.9	897	1081	-0.98	7.65	0.07
HSQ20-04-02	128.4	-5.7	-2.9	895	1083	-0.98	7.69	0.06	HSQ20-05-24	127.1	-6.0	-3.3	908	1099	-0.98	7.89	0.05
HSQ20-04-03	130.2	-5.8	-3.0	907	1091	-0.98	7.45	0.06	HSQ20-05-25	129.8	-5.7	-2.9	894	1085	-0.99	7.73	0.07
HSQ20-04-04	130.8	-6.1	-3.3	914	1104	-0.98	6.91	0.09									

中生代的成矿作用,长江中下游地区存在有 3 个岩浆源区端员,即太古宙地壳基底、新元古代地壳基底

和富集地幔(张旗等,2003;Yan et al.,2015;Chen et al.,2016;Duan et al.,2023)。

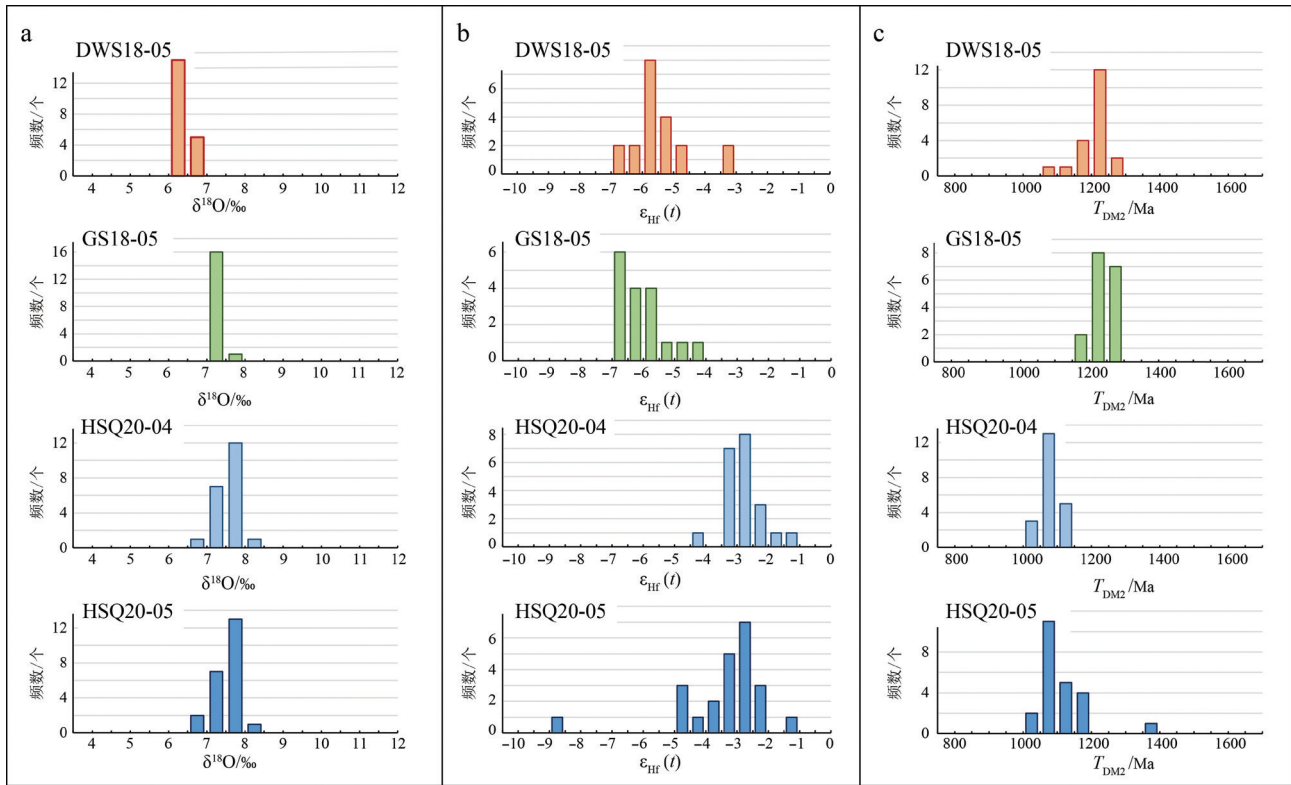


图5 宁芜矿集区侵入岩锆石 Hf-O 同位素值(a,b)及 Hf 同位素两阶段模式年龄(c)直方图

Fig. 5 Histograms of zircon Hf-O isotope compositions (a, b) and two-stage Hf isotope model ages (c) of intrusions in the Ningwu ore district

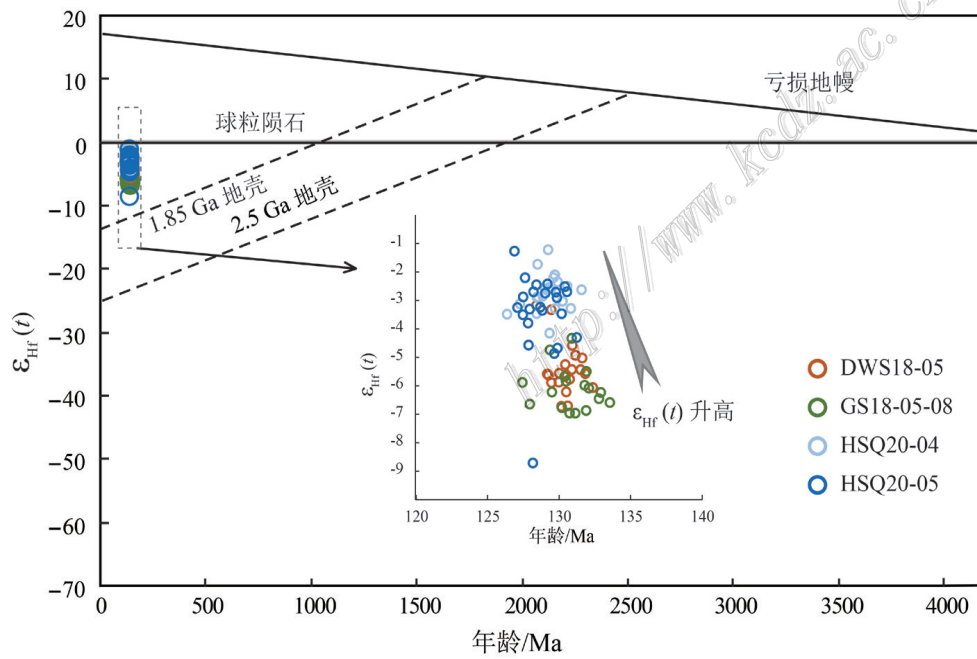


图6 宁芜矿集区侵入岩锆石 Hf 同位素特征

虚线为平均大陆地壳的演化线, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.015$

Fig. 6 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values versus U-Pb ages of zircon grains from intrusions in the Ningwu ore district

The dashed lines indicate the evolutionary trends of the average continental crust, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.015$

本次研究获得的大王山旋回闪长玢岩 (DWS18-05) 较姑山旋回黑云母闪长玢岩 (GS18-05) 的锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值差异较大, 分别集中于 $6.0\text{‰}\sim 6.5\text{‰}$ 和 $7.0\text{‰}\sim 7.5\text{‰}$ (图 5a), 大王山旋回闪长玢岩具有略高的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (图 5b, 图 6) 以及和姑山旋回黑云母闪长玢岩相似的 T_{DM2} 值 (图 5c), 表现出姑山旋回黑云母闪长玢岩较大王山旋回闪长玢岩混染了更多的地壳物质。综合区域岩浆源区特征, 锆石 Hf-O 同位素指示出大王山旋回闪长玢岩的源区为富集地幔混染太古代地壳物质, 而新元古代地壳物质含量较少; 姑山旋回黑云母闪长玢岩源区则为富集地幔混染了较多的新元古代地壳和较少的太古代地壳物质 (图 8)。两个侵入岩都耦合于对应火山旋回中火山岩的岩浆源区特征 (大王山组火山岩锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值集中于 $5.6\text{‰}\sim 6.4\text{‰}$, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值集中于 $-6\sim -2$; 姑山组火山岩锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $6.7\text{‰}\sim 8.3\text{‰}$, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-8.9\sim -1.2$; Duan et al., 2023)。穿切和尚桥铁矿床矿体发育的花岗闪长斑岩 (HSQ20-04/05) 中锆石 Hf-O 同位素特征与大王山旋回闪长玢岩差异较大, 与姑山旋回黑云母闪长玢岩既存在差异也存在联系。花岗闪长斑岩中锆石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值较高 (集中于 $7.0\text{‰}\sim 8.0\text{‰}$, 图 5a), 其阈值涵盖了姑山旋回锆石氧同位素的特征区间, 远高于大王山旋回闪长玢岩。花岗闪长斑岩锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值较高 (集中于 $-4.5\sim -2.0$, 图 5b, 图 6) 并具有较低的 T_{DM2} 年龄 (1050~1150 Ma, 图 5c), 指示出岩浆源区具有较前 2 个旋回更新的壳源特征和更高的壳源物质比例 (新元古代地壳), 其特征与娘娘山旋回中火山岩的特征相类似 (图 8)。尽管宁芜矿集区大王山旋回和姑山旋回在成岩年代学研究出现了部分的重叠, 但侵入岩中锆石 Hf-O 同位素特征鲜明的区别指示出宁芜矿集区多阶段火山作用在大王山旋回和姑山旋回之间 (约 130 Ma) 存在岩浆源区的演化转变, 富集地幔混染壳源物质的种类和多少产生了较大的差异。这可能与幔源岩浆侵入时间及在地壳中的停留时间有关。本次研究结果也进一步印证了宁芜矿集区岩浆作用存在富集地幔、太古代地壳和新元古代地壳 3 个岩浆源区。

多阶段火山作用中只有大王山旋回闪长玢岩与玢岩型铁矿床的形成有关, 相比大王山旋回具有更高的富集地幔组分以及更少的新元古代地壳的混染。因此, 成矿母岩中较高的富集地幔含量是控制

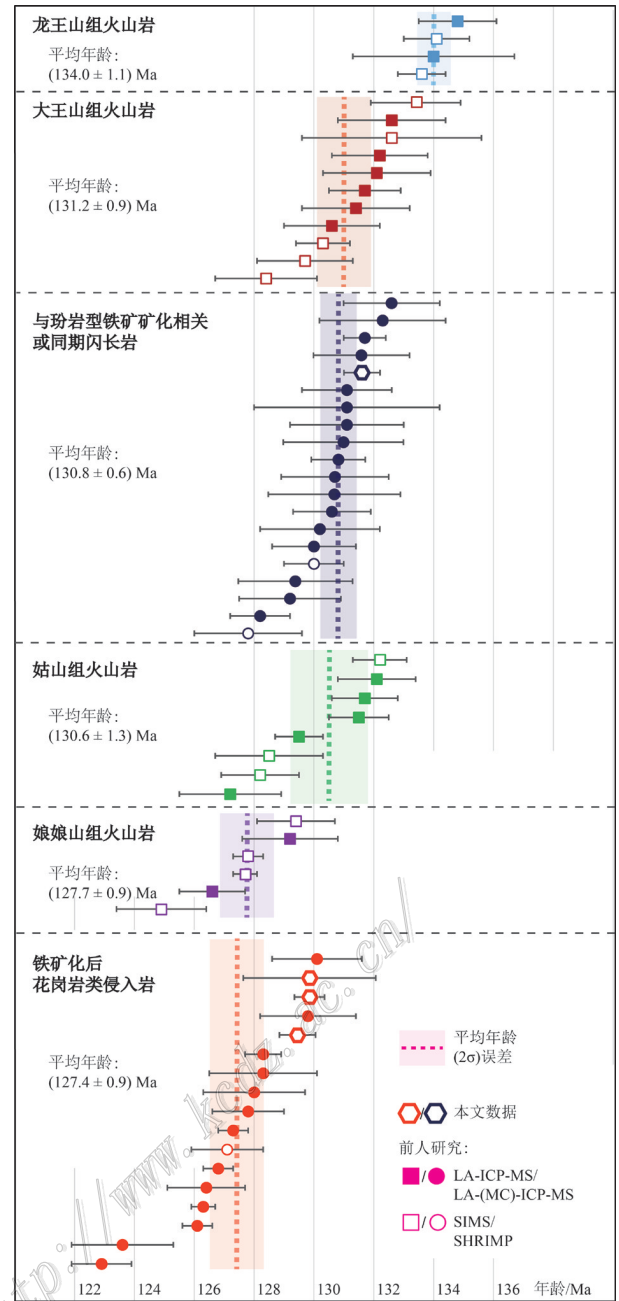


图 7 宁芜矿集区火山岩和侵入岩年代学特征
数据来自本文和张旗等, 2003; 范裕等, 2010; 侯可军等, 2010; 薛怀民等, 2010; 2015; 袁峰等, 2011; Zhou et al., 2011b; 段超等, 2011; Duan et al., 2012; 2023; Hou et al., 2012; 李锦伟等, 2012; 王丽娟等, 2014; Yan et al., 2015; 杨颖鹤等, 2015; Sun et al., 2017a; Duan et al., 2023
Fig. 7 Geochronological data for volcanic rocks and intrusions in the Ningwu ore district
Data are from this study and Zhang et al., 2003; Fan et al., 2010; Hou et al., 2010; Xue et al., 2010; 2015; Yuan et al., 2011; Zhou et al., 2011b; Duan et al., 2011; 2012; 2023; Hou et al., 2012; Li et al., 2012; Wang et al., 2014; Yan et al., 2015; Yang et al., 2015; Sun et al., 2017a; Duan et al., 2023

玢岩型铁矿床形成的关键因素之一。

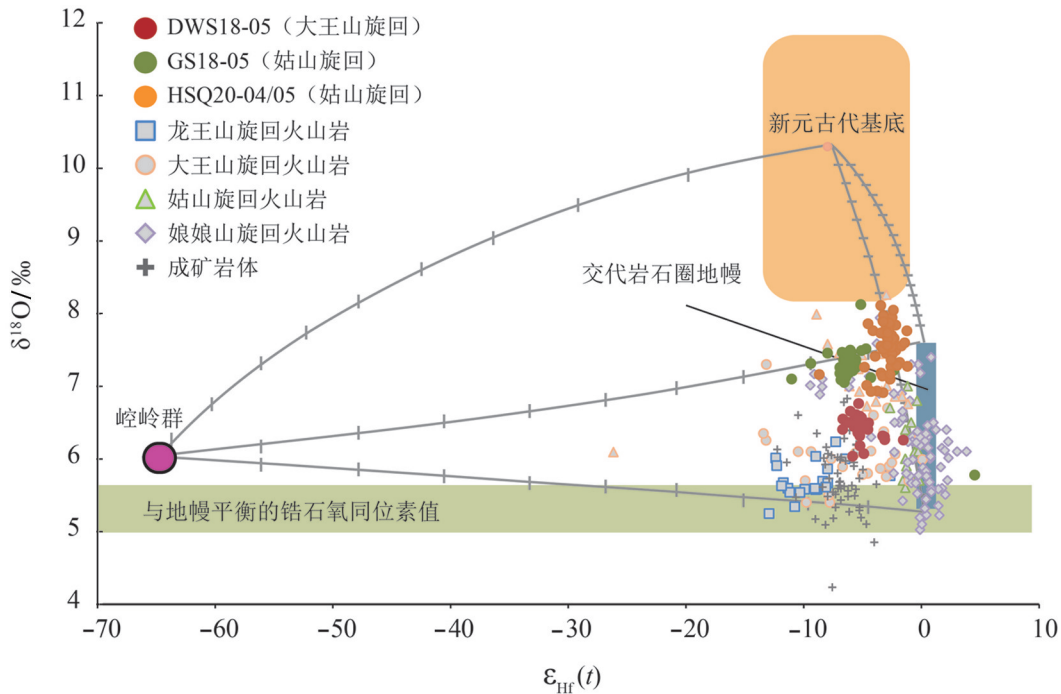


图8 宁芜矿集区岩浆岩锆石 Hf-O 同位素特征

区域太古宙崆岭群($\epsilon_{\text{Hf}}(t)=-65, \delta^{18}\text{O}=6.0\%$)、新元古代基底($\epsilon_{\text{Hf}}(t)=-8, \delta^{18}\text{O}=10.3\%$)和交代岩石圈地幔($\epsilon_{\text{Hf}}(t)=0, \delta^{18}\text{O}=5.3\% \sim 7.6\%$)Hf-O 同位素数据区域源于 Yan 等(2015); 投点数据源于本文和 Duan 等(2023); 孙维安等(2017); Yan 等(2015)

Fig. 8 Plot of zircon $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ versus $\delta^{18}\text{O}$ values of the intrusions in the Ningwu ore district

The fields of zircons equilibrated with mantle, the Archean Kongling Group and the Neoproterozoic basement are after Yan et al., 2015 and references therein. Endmembers used for mixing calculated lines are the Archean Kongling Group, with $\epsilon_{\text{Hf}}(t)=-65$ and $\delta^{18}\text{O}=6.0\%$, Neoproterozoic basement, with $\epsilon_{\text{Hf}}(t)=-8$ and $\delta^{18}\text{O}=10.3\%$, and the field of the metasomatized lithospheric mantle, with $\epsilon_{\text{Hf}}(t)=0$ and $\delta^{18}\text{O}=5.3\% \sim 7.6\%$ (after Yan et al., 2015); data are from this study and Duan et al., 2023; Sun et al., 2017b; Yan et al., 2015

5 结论

(1) 宁芜矿集区侵入岩 SIMS 锆石 U-Pb 年代学研究进一步确定了矿集区中生代多阶段火山事件的年代学框架,与玢岩铁矿形成相关的侵入岩形成于 130 Ma 之前(约 131 Ma),晚期穿切矿体的花岗岩质岩石形成于 130 Ma 之后。

(2) 宁芜矿集区中生代岩浆作用存在 3 个岩浆源区端员:富集地幔、太古代和新元古代地壳基底。玢岩铁矿形成相关的大王山旋回的侵入岩、姑山旋回侵入岩以及成矿后穿切矿体发育的侵入岩之间具有较大的源区差异,指示出矿集区 4 组火山作用旋回在 130 Ma 发生了岩浆源区的改变。形成于 130 Ma 之前的龙王山和大王山火山作用旋回的岩浆源区主要为受太古代地壳混染的富集地幔,而形成于 130 Ma 之后的姑山和娘娘山火山作用旋回的岩浆

源区主要为受新元古代地壳混染的富集地幔。成矿母岩中含有较高含量的富集地幔是控制玢岩型铁矿床形成的关键因素之一。

致谢 感谢安徽省地质矿产勘查局 322 地质队谢祖军教授级高级工程师和杨前国高级工程师在野外地质调查工作中给予的支持和帮助。感谢核工业北京地质研究院何升和武勇在锆石年代学和氧同位素测试中给予的帮助。感谢两位审稿专家对本文的详细审阅和提出的建设性修改意见。

References

- Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y and Fisher N I. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 143: 602-622.

- Chang Y F, Liu X P and Wu Y C. 1991. The copper-iron belt of the Lower and Middle reaches of the Yangtze River[M]. Beijing: Geological Publishing House. 379p(in Chinese with English abstract).
- Chen C J, Chen B and Wang Z Q. 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 L, Zheng Y F and Zhao Z F. 2016. Geochemical constraints on the origin of Late Mesozoic andesites from the Ningwu basin in the Middle-Lower Yangtze Valley, South China[J]. *Lithos*, 254-255: 94-117.
- Duan C, Mao J W, Li Y H, Hou K J, Yuan S D, Zhang C and Liu J L. 2011. Zircon U-Pb geochronology of the gabbro-diorite porphyry and granodiorite porphyry from Washan iron deposit in Ningwu basin, and its geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85: 1159-1171(in Chinese with English abstract).
- Duan C, Li Y H, Hou K J, Yuan S D, Zhang C and Liu J L. 2012. Late Mesozoic ore-forming events in Ningwu ore district, Middle-Lower Yangtze River polymetallic ore belt, East China: Evidences from zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic compositions of the granitic stocks[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 86: 719-736.
- Duan C, Li Y H, Mao J W, Hou K J, Wang C L, Yang B Y, Wang Q and Li W. 2019. Ore formation at the Washan iron oxide-apatite deposit in the Ningwu ore district, eastern China: Insights from in situ LA-ICP-MS magnetite trace element geochemistry[J]. *Ore Geology Reviews*, 112, 103064.
- Duan C, Li Y H, Mao J W, Wan Q, He S, Wang C L, Yang B Y and Hou K J. 2023. Zircon U-Pb ages, Hf-O isotopes and trace elements of the multi-volcanism in the Ningwu ore district, eastern China: Implications for the magma evolution and fertility of iron oxide-apatite (IOA) deposits[J]. *Gondwana Research*, 116: 149-167.
- Fan Y, Zhou T F, Yuan F, Qian C C, Lu S M and Cooke D R. 2008. LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of the A-type granites in the Lu-Zong (Lujiang-Zongyang) area and their geological significances[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1715-1724(in Chinese with English abstract).
- Fan Y, Zhou T F, Yuan F, Zhang L J, Qian B, Ma L and Cooke D. 2010. Geochronology of the diorite porphyrites in Ning-Wu basin and their metallogenic significances[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(9): 2715-2728 (in Chinese with English Abstract).
- Fan Y, Zhou T F, Yuan F, Zhang L J, Qian B, Ma L, Xie J and Yang X F. 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).
- He S, Li Y, Wu L G, Liu R P, Guo D F, Li Z Y and Li X H. 2024. A new working reference material for cassiterite oxygen isotope microanalysis[J]. *Surface and Interface Analysis*, 56:136-146
- Hoskin P W and Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53: 27- 62.
- Hou K J, Li Y H, Zou T R, Qu X M, Shi Y R and Xie G Q. 2007. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2595-2604(In Chinese with English abstract).
- Hou K J and Yuan S D. 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, Encarnacion J, Du Y S, Zhao Z D and Liu J L. 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: 330-334.
- Hou T, Zhang Z C, Encarnacion J, Huang H and Wang M. 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): 1332-1352
- Li J W, Chen J H, Zeng J N, Lu J P, Zhang Y X, Li X F, Wu Y F and Lu S F. 2012. SHRIMP zircon U-Pb dating of gabbro-diorite porphyrite in Jishan iron ore deposit of Ningwu basin and its geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 31(6): 1127-1236(in Chinese with English abstract).
- Li Y, Tang G Q, Liu Y, He S, Chen B, Li Q L and Li X H. 2021. Revisiting apatite SIMS oxygen isotope analysis and Qinghu-AP reference material[J]. *Chemical Geology*, 582: 120445.
- Mao J W, Xie G Q, Duan C, Pirajno F, Ishiyama D and Chen Y C. 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[J]. *Ore Geology Reviews*, 43: 294-314.
- Mao J W, Duan C, Liu J L 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[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28: 1-14 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Zhou T F, Xie G Q, Yuan F and Duan C. 2020. Metallogeny in Middle-Lower Yangtze River Ore Belt: Advances and problems remained[J]. *Mineral Deposits*, 39(4): 547-558(in Chinese with English abstract).
- Mao J R, Su Y X and Chen S Y. 1990. Intermedia-acid intrusions and mineralization in the Middle-Lower Reaches of Yangtze River [M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-191(in Chinese with English abstract).
- Morel M L A, Nebel O, Nebel-Jacobsen Y J, Miller J S and Vroon P Z. 2008. Hafnium isotope characterization of the GJ-1 zircon reference material by solution and laser-ablation MC-ICPMS[J]. *Chemical Geology*, 255: 231-235.
- Ningwu Research Group. 1978. Magnetite porphyry deposits in Ningwu area[M]. Beijing: Geological Publishing House. 196p (in Chinese).

- Sun W A, Yuan F, Jowitt S M, Zhou T F, Hollings P, Liu G X and Li X H. 2017a. Geochronology and geochemistry of the Fe ore-bearing Zhonggu intrusions of the Ningwu Basin: Implications for tectonic setting and contemporaneous Cu-Au mineralization in the Middle-Lower Yangtze Metallogenic Belt[J]. *Ore Geology Reviews*, 84: 246-272.
- Sun W A, Yuan F, Deng Y F, Liu G X, Yang D, Li X S and Fu B. 2017b. Hf-O isotope characteristics for ore-related intrusions of typical iron deposits in Zhonggu ore field, Ningwu basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33: 3559-3580(in Chinese with English abstract).
- Tang Y C, Wu C Y, Chu G Z, Xing F M, Wang Y M, Cao F Y and Chang Y F. 1998. Geology of copper-gold polymetallic deposits in the along-Changjiang area of Anhui Province[M]. Beijing: Geological Publishing House. 351p(in Chinese with English abstract).
- Tang Y J, Zhang H F, Ying J F, Su B X, Li X H and Santosh M. 2013. Rapid eruption of the Ningwu volcanics in eastern China: Response to Cretaceous subduction of the Pacific plate[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14: 1703-1721.
- Valley J W. 2003. Oxygen isotopes in zircon[J]. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 53(1): 343-385
- Wang L J, Wang R C, Yu J H, Yang Y H, Huang J P and Zhang S Q. 2014. Geochronology, geochemistry of volcanic-intrusive rocks in the Ningwu basin and its geological implications[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(7): 1247-1272 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y L, Zhang Q and Wang Y. 2001. Geochemical characteristics of volcanic rocks from Ningwu area, and its significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 565-575(in Chinese with English abstract).
- Xing F M. 1996. Petrological and Nd, Sr, Pb isotopic evidence for genesis of Mesozoic magmatic rocks in Nanjing-Wuhu area[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 15: 126-137(in Chinese with English Abstract).
- Xing F X and Xu X. 1999. Yangtze magmatic belt and metallogenesis[M]. Hefei: Anhui People's Publishing House. 170p(in Chinese).
- Xue H M, Dong S W and Ma F. 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).
- Xue H M, Ma F and Cao G Y. 2015. Late Mesozoic shoshonitic volcanic rocks in the Middle and Lower Yangtze River Reaches: Age, geochemical and genesis[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(8): 1380-1401(in Chinese with English abstract).
- Yan J, Liu J, Li Q, Xing G, Liu X, Xie J, Chu X and Chen Z. 2015. In situ zircon Hf-O isotopic analyses of Late Mesozoic magmatic rocks in the Lower Yangtze River Belt, Central eastern China: Implications for petrogenesis and geodynamic evolution[J]. *Lithos*, 227: 57-76.
- Yang Y H, Wang L J and Zhang S Q. 2015. Zircon U-Pb dating and Lu-Hf isotopic analysis of volcanic rocks from the Nanjing-Wuhu Basin in volcanism peak period[J]. *Journal of Geology*, 39(4): 556-566(in Chinese with English abstract).
- Yu J J, Chen Y C, Mao J W, Pirajno F and Duan C. 2011. Review of geology, alteration and origin of iron oxide-apatite deposits in the Cretaceous Ningwu basin, Lower Yangtze River Valley, eastern China: Implications for ore genesis and geodynamic setting[J]. *Ore Geology Review*, 43: 170-181.
- Yuan F, Zhou T F, Fan Y, Zhang L J, Ma L and Qian B. 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): 822-834 (in Chinese with English abstract).
- Yuan S D, Hou K J 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[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(3): 797-808(in Chinese with English abstract).
- Zeng L P, Zhao X F, Li X C, Hu H and McFarlane C. 2016. In situ elemental and isotopic analysis of fluorapatite from the Taocun magnetite-apatite deposit, eastern China: Constraints on fluid metasomatism[J]. *American Mineralogist*, 101: 2468-2483.
- Zhang Q, Jian P, Liu D Y, Wang Y L, Qian Q and Xue H M. 2003. SHRIMP dating of volcanic rocks from Ningwu area and geological implication[J]. *Science in China (Series D)*, 33: 830-837(in Chinese with English abstract).
- Zhao X F, Zeng L P, Liao W, Li W T, Hu H and Li J W. 2020. An overview of recent advances in porphyrite iron (iron oxide-apatite, IOA) deposits in the Middle-Lower Yangtze River Valley Metallogenic Belt and its implication for ore genesis[J]. *Earth Science Frontiers*, 27(2): 197-217(in Chinese with English abstract).
- Zhou T F, Fan Y, Yuan F, Ma L, Qian B and Xie J. 2011a. Petrogenesis and metallogeny study of the volcanic basins in the Middle and Lower Yangtze Metallogenic Belt[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(5): 712-730(in Chinese with English abstract).
- Zhou T F, Fan Y, Yuan F, Zhang L J, Qian B, Ma L, Yang X F and Cooke D C. 2011b. Geochronology and significance of volcanic rocks in the Ning-Wu basin of China[J]. *Science in China (Series D)*, 54(2): 185-196.
- Zhou T F, Fan Y, Yuan F, Zhang L J, Qian B, Ma L and Yang X F. 2013. Geology and geochronology of magnetite-apatite deposits in the Ning-Wu volcanic basin, eastern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 66: 90-107.
- Zhou T F, Fan Y, Wang S W and White N C. 2017. Metallogenic regularity and metallogenic model of the Middle-Lower Yangtze River Valley Metallogenic Belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(11): 3353-3372(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 常印佛, 刘湘培, 吴昌言. 1991. 长江中下游地区铜铁成矿带[M]. 北京: 地质出版社. 379页.

- 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.
- 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[J]. 地质学报, 85(7): 1159-1171.
- 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[J]. 岩石学报, 24(8): 1715-1724.
- 范裕,周涛发,袁峰,张乐骏,钱兵,马良, Cooke D R. 2010. 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): 2715-2728.
- 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}Ar - ^{39}Ar 同位素年代学研究[J]. 地质学报, 85(5): 810-820.
- 侯可军,李延河,邹天人,曲晓明,石玉若,谢桂青. 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用[J]. 岩石学报, 23(10): 2595-2604.
- 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.
- 李锦伟,陈津华,曾键年,陆建培,张燕霞,李小芬,吴亚飞,陆顺富. 2012. 宁芜盆地青山铁矿床辉长闪长玢岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 矿床地质, 31(6): 1227-1236.
- 毛建仁,苏郁香,陈三元. 1990. 长江中下游中酸性侵入岩与成矿[M]. 北京:地质出版社. 1-191.
- 毛景文,段超,刘佳林,张成. 2012. 陆相火山-侵入岩有关的铁多金属成矿作用及矿床模型——以长江中下游为例[J]. 岩石学报, 28(1): 1-14.
- 毛景文,周涛发,谢桂青,袁峰,段超. 2020. 长江中下游地区成矿作用研究新进展和存在问题的思考[J]. 矿床地质, 39(4): 547-558.
- 宁芜研究项目编写小组. 1978. 宁芜玢岩铁矿[M]. 北京:地质出版社. 196页.
- 孙维安,袁峰,邓宇峰,刘光贤,杨迪,李现锁,傅斌. 2017. 宁芜盆地钟姑矿田典型铁矿成矿岩体 Hf-O 同位素特征及地质意义[J]. 岩石学报, 33(11): 3559-3580.
- 唐永成,吴言昌,储国正,邢凤鸣,王永敏,曹奋扬,常印佛. 1998. 安徽沿江地区铜金多金属矿床地质[M]. 北京:地质出版社. 351页.
- 王丽娟,王汝成,于津海,杨颖鹤,黄建平,张少琴. 2014. 宁芜盆地火山——侵入岩的时代、地球化学特征及其地质意义[J]. 地质学报, 88(7): 1247-1272.
- 王元龙,张旗,王焰. 2001. 宁芜火山岩的地球化学特征及其意义[J]. 岩石学报, 17(4): 565-575.
- 邢凤鸣. 1996. 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, 15(2): 126-137.
- 邢凤鸣,徐祥. 1999. 安徽扬子岩浆岩带与成矿[M]. 合肥:安徽人民出版社. 170页.
- 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的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄[J]. 岩石学报, 26(9): 2653-2664.
- 薛怀民,马芳,曹光跃. 2015. 长江中下游地区晚中生代橄榄玄粗岩系列火山岩:年代学格架、地球化学特征及成因讨论[J]. 地质学报, 89(8): 1380-1401.
- 杨颖鹤,王丽娟,张少琴. 2015. 宁芜盆地火山作用峰期锆石 U-Pb 定年和 Lu-Hf 同位素研究[J]. 地质学刊, 39(4): 556-566.
- 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[J]. 地质学报, 85(5): 822-834.
- 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[J]. 中国科学(D辑), 33(4): 309-314.
- 赵新福,曾丽平,廖旺,李婉婷,胡浩,李建威. 2020. 长江中下游成矿带玢岩铁矿研究新进展及对矿床成因的启示[J]. 地学前缘, 27(2): 197-217.
- 周涛发,范裕,袁峰,张乐骏,马良,钱兵,谢杰. 2011a. 长江中下游成矿带火山岩盆地的成岩成矿作用[J]. 地质学报, 85(5): 712-730.
- 周涛发,范裕,王世伟, Noel White. 2017. 长江中下游成矿带成矿规律和成矿模式[J]. 岩石学报, 33(11): 3353-3372.