

文章编号 0258-7106(2010)02-0283-07

宁芜盆地凹山和东山铁矿床中阳起石的激光 ^{39}Ar - ^{40}Ar 年代学研究*

马芳¹, 蒋少湧², 薛怀民³

(1 北京大学地球与空间科学学院教育部造山带与地壳演化重点实验室, 北京 100871; 2 南京大学地球科学系成矿作用国家重点实验室, 江苏 南京 210093; 3 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

摘 要 文章通过对凹山和东山铁矿床中特征的组合矿物之一伟晶状阳起石进行激光 ^{39}Ar - ^{40}Ar 法定年, 精确测定了玢岩铁矿的成矿时代。其中东山铁矿中新鲜阳起石(黑绿色)的 ^{39}Ar - ^{40}Ar 等时线年龄在 126~129 Ma 之间, 与赋矿围岩大王山组火山岩中角闪石的等时线年龄(127 Ma)一致, 证明成矿与成岩密切相关, 成矿与成岩是同时期的产物。而凹山铁矿中蚀变阳起石(灰绿色)的 ^{39}Ar - ^{40}Ar 等时线年龄为(114 ± 16)Ma。2 种阳起石分别形成于成矿作用的不同阶段, 黑绿色新鲜阳起石与磷灰石、磁铁矿同期形成, 形成于岩浆向热液演化的高温阶段, 在成岩和成矿之后的冷却过程中, 矿体和潜火山岩体具有相同的闪石封闭温度(500℃±); 而灰绿色蚀变阳起石形成于中期阳起石(透辉石)-钠长石-磷灰石-磁铁矿化矿体围岩蚀变阶段。

关键词 地球化学; 阳起石; 激光 ^{39}Ar - ^{40}Ar 定年; 玢岩铁矿; 宁芜盆地

中图分类号: P618.31

文献标志码: A

Early Cretaceous mineralizations in Ningwu basin: Insight from actinolite ^{39}Ar - ^{40}Ar laser dating results

MA Fang¹, JIANG ShaoYong² and XUE HuaiMin³

(1 Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2 State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China; 3 Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract

Actinolite ^{39}Ar - ^{40}Ar laser fusion technique was employed to determine the metallogenic epochs of the Ningwu porphyrite iron deposits. The ^{39}Ar - ^{40}Ar isochron ages of the fresh actinolite (dark green) from the Dongshan iron deposit are from 126 to 129 Ma, which agree with the ^{39}Ar - ^{40}Ar isochron age (127 Ma) of hornblende from the host volcanic rock of Dawangshan Group within the analytical errors, indicating that iron mineralization was associated with the Dawangshan Group volcanic rocks. The ^{39}Ar - ^{40}Ar spectrum ages of altered actinolite (gray green) from the Washan iron deposit is (114 ± 16) Ma. The two kinds of actinolites were formed at different metallization stages. The dark green actinolite was formed synchronously with apatite and magnet when the temperatures of the subvolcanic rock and the ore body fell to the hornblende closure temperature (ca. 500℃). The gray green altered actinolite was formed at the middle stage of the actinolite (diopside)-albite-apatite-magnetic wall rock alteration.

* 本文得到国家自然科学基金(40503006)和中国地质调查局项目(1212010711814)的联合资助

第一作者简介 马芳, 女, 1975年生, 高级工程师, 研究方向为同位素地球化学。

收稿日期 2009-04-30; 改回日期 2010-08-04。李岩编辑。

Key words: geochemistry, actinolite, ^{39}Ar - ^{40}Ar laser dating, porphyrite iron deposit, Ningwu basin

凹山和东山铁矿是宁芜玢岩铁矿系列中 2 个非常重要的高温气液型矿床。自 20 世纪 70 年代以来,对这 2 个矿区进行了详细的岩石学、矿物学、矿床学、地球化学的研究(宁芜研究项目编写小组, 1978;陈毓川等, 1982; Ishihara et al., 1986;中国科学院地球化学研究所, 1987;薛怀民等, 1989;卢冰等, 1990),以及 H、O、S、Sr 和 Pb 等同位素的研究(Ishihara et al., 1986;中国科学院地球化学研究所, 1987;余金杰等, 2003;马芳, 2005;马芳等, 2006a; 2006b),取得了很多成果,为铁矿床的成因解释提供了依据。

对于区内火山、潜火山岩的形成时代,到目前为止已有了较多的年龄资料(王元龙等, 2001;叶水泉, 2000;唐永成等, 1998;薛怀民, 1987;张旗等, 2003),根据这些年龄资料,宁芜盆地火山活动的时代被限定在早白垩世。而对于盆地内玢岩铁矿的成矿时代,前人多根据赋矿母岩辉长闪长(玢)岩的年龄间接推断矿床形成于早白垩世;余金杰等(2002)测定了铁矿体下部钠长石岩带中钠长石的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 坪年龄,获得了 $(123 \pm 1)\text{Ma}$ 和 $(125 \pm 1)\text{Ma}$ 两组数据,与赋矿母岩年龄类似。凹山和东山铁矿床具有特征的磁铁矿-磷灰石-阳起石矿物组合,笔者曾尝试采用磷灰石 ^{208}Pb - ^{232}Th 等时线法对矿体进行直接定年(马芳等, 2006b),并且得到了 $(124 \pm 41)\text{Ma}$ 的年龄,但误差显然太大。本次研究通过对铁矿床中阳起石的激光 Ar-Ar 法定年,精确测定了玢岩铁矿的成矿时代。

1 成矿地质背景

凹山和东山铁矿床位于长江中下游宁芜火山岩盆地的中段(图 1)。该盆地是一个在黄马青组及象山群基础上发育起来的继承式断陷型火山岩盆地。盆地内密集地分布着矿浆、晚期岩浆到高温气液交代、伟晶高温气液交代充填、高温接触交代、中低温热液及火山喷发沉积等多种成因类型的铁矿床(宁芜研究项目编写小组, 1978)。这些类型的铁矿床成因上均与盆地中的中生代火山-潜火山岩密切相关。

盆地内火山活动的产物自下而上依次为下白垩统龙王山组、大王山组、姑山组和娘娘山组,为一套偏碱性的中基性-碱性岩石组合。盆地内的潜火山

岩主要为辉长闪长(玢)岩,是宁芜盆地内铁矿床的含矿岩体。这些潜火山岩在成因上往往与大王山组的火山岩有密切联系(宁芜研究项目编写小组, 1978;薛怀民, 1987),其侵位年龄也接近于大王山组火山岩的喷发年龄(唐永成等, 1998)。

凹山和东山铁矿产于凹山岩体的凸起部位(图 1)。矿床中断裂构造和边缘冷缩裂隙构造、顶部塌陷角砾岩构造和隐蔽爆发角砾岩构造等潜火山岩原生构造极为发育,对控矿、容矿具有重要的意义。矿体规模较大,矿体形态复杂,主要矿石矿物组合为磷灰石-阳起石-磁铁矿,矿石构造为块状、浸染状、脉状、角砾状和条带状等。矿体围岩蚀变强烈,按形成顺序大体被分为 3 期:第一期为浅色钠长石和方柱石化,伴有少量阳起石、绿帘石和磁铁矿化;第二期为深色的阳起石(透辉石)-钠长石-磷灰石-磁铁矿化,伴有少量的绿帘石化和碳酸盐化;第三期为浅色的泥化、硅化、硬石膏化、明矾石化、碳酸盐化和黄铁矿化(翟裕生等, 1992)。围岩蚀变形成明显的垂向分带。

2 样品描述及分析方法

样品 DS-003、DS-004 和 DS06-2 采自大东山铁矿矿体,其中 DS-003 和 DS-004 的矿物组合为阳起石-磁铁矿;DS06-2 的矿物组合为磷灰石-阳起石,阳起石为长柱状伟晶,呈黑绿色;样品 WS06-2-1 采自凹山铁矿,矿物组合阳起石-磁铁矿,阳起石明显蚀变,为软纤维状,呈灰绿色;NW-3 采自元山街,为大王山组角闪辉石粗安岩,样品中所含闪石为短柱状细粒黑色角闪石。

样品破碎后,在双目镜下挑选阳起石和角闪石单矿物,纯度达 99% 以上。选好的样品用 5% 的稀 HNO_3 清洗,并用去离子水清洗并低温烘干($< 80^\circ\text{C}$)。样品照射在中国原子能研究院进行,照射总时间 24 h,用于监测的标准样为 ZBH-25。测试工作在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室进行,采用全自动激光 Ar-Ar 定年系统。由于样品 K 含量较低,用阶段加热法所需样品量较大,容易造成激光加热过程中的不均匀,因而未采用激光阶段加热法,而是采用激光全熔方法进行定年。照射后的样品装入铜样品座的小孔中,每一样品装 23~24 个

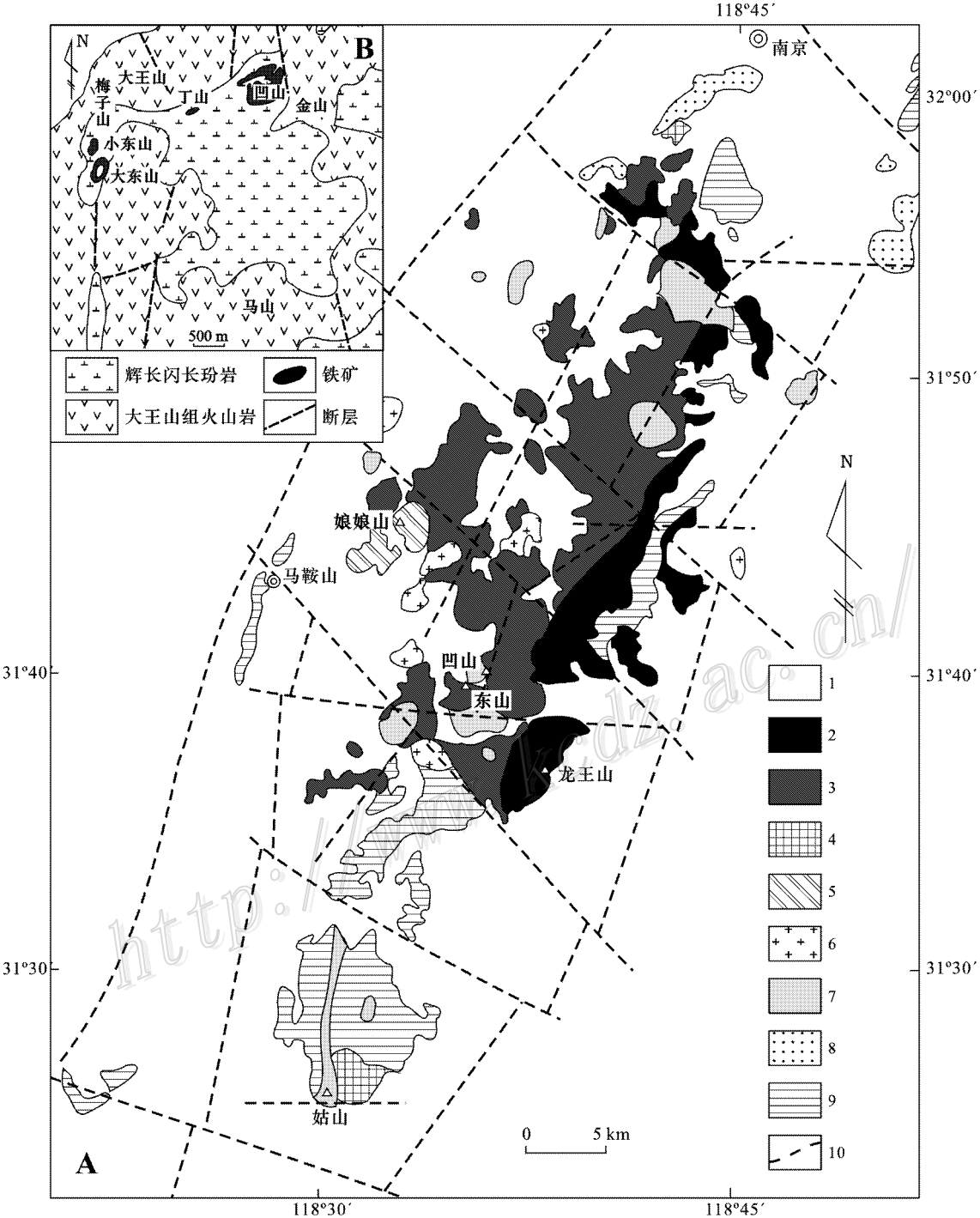


图 1 A. 宁芜盆地地质简图;B. 凹山和东山铁矿地质简图(据宁芜研究项目编写小组 ,1978)

1—第四系;2—下白垩统龙王山组;3—下白垩统大王山组;4—下白垩统姑山组;5—下白垩统娘娘山组;6—燕山期花岗岩;
7—潜火山岩;8—火山岩盖层;9—火山岩基底地层;10—断层

Fig. 1 A. Geological sketch map of Ningwu basin;B. Geological sketch map of Wushan and Dongshan iron deposits
(after Ningwu Research Group ,1978)

1—Quaternary;2—Lower Cretaceous Longwanshan Formation;3—Lower Cretaceous Dawanshan Formation;4—Lower Cretaceous Gushan
Formation;5—Lower Cretaceous Niangniangshan Formation;6—Yanshanian granite;7—Subvolcanic rock;8—Volcanic cover;
9—Volcanic basement;10—Fault

小孔,每孔用样量为 2~10 个颗粒。将样品座安置于样品仓中,在高真空系统中加热至 100℃ 去气 24 h。样品由 Newwave 公司 CO₂ 红外激光器加热 80 s 析出的气体由 Zr-Al 泵纯化后由 VG5400 惰性气体质谱仪进行氩同位素测量,该仪器的质量分辨率为 400,灵敏度大于 1.25×10^{-3} A/Torr。⁴⁰Ar 和 ³⁶Ar 本底分别为 10^{-16} mol 和 10^{-18} mol,Ca 和 K 照射产生的干扰反应应用校正因子校正,校正参数为:
[³⁶Ar/³⁷Ar]_{Ca} = $2.775 \times 10^{-4} \pm 2.53 \times 10^{-5}$ [³⁹Ar/³⁷Ar]_{Ca} = $6.633 \times 10^{-4} \pm 3.535 \times 10^{-4}$ [⁴⁰Ar/³⁹Ar]_K = $3.9448 \times 10^{-3} \pm 1.5421 \times 10^{-3}$ 。年龄计算中的衰变常数取 Steiger 和 Jager 的建议值。每天测定 3~4 次标准空气,以监视仪器质量歧视作用的变化,质量歧视因子 $D = 1.0045 \pm 0.0013$ 。全自动测样采用 Berkley 大学 Alan 编写的 Mass spec 程序控制,并进行数据处理。

3 分析结果

对每个样品均进行了 23~24 次表观年龄的测试,结果见附表。根据测试结果作等时线和频率曲线,结果见表 1 和图 2。

潜火山岩样品(NW-3)中的角闪石等时线年龄为(127±1)Ma(图 2a),峰值年龄为 128 Ma(图 2b)。根据 Ar-Ar 等时线得到的初始氩比值为 301±4(图 2a),略高于现在的大气氩比值 295.5 ± 0.5 ,然而其等时线年龄(127±1)Ma 接近于各个样品点的表观年龄 124~131 Ma,也非常接近统计出的峰值年龄 128 Ma,因此可以认为样品中不含过剩 Ar。

而东山铁矿中的黑绿色阳起石,等时线年龄为 126~129 Ma(图 2c、图 2e、图 2g),峰值年龄为 131~138 Ma(图 2d、图 2f、图 2h)。矿体中的这些阳起石样品,根据 Ar-Ar 等时线得到的初始氩比值为 300~

305(±2),尽管也是略高于现在的大气氩比值,但样品点的表观年龄明显高于其等时线年龄,这表明样品中含有一定的过剩 Ar。凹山铁矿中的灰绿色阳起石,等时线年龄为(114±16)Ma(图 2i),峰值年龄为 181 Ma(图 2j)。根据 Ar-Ar 等时线得到的初始氩比值 303 扣除非放射性成因⁴⁰Ar,重新计算了表观年龄,获得新的年龄峰值约为 120 Ma。

4 讨论

4.1 成岩与成矿作用的关系

对于盆地内火山岩的形成时代已有大量 K-Ar 和部分 Ar-Ar 法同位素定年资料(王元龙等,2001;叶水泉,2000),以及全岩-单矿物 Rb-Sr 等时线年龄(薛怀民,1987)和锆石 SHRIMP 年龄资料(张旗等,2003),其中龙王山组为 136~125 Ma,大王山组为 127~120 Ma,姑山组为 117~110 Ma,娘娘山组为 108~95 Ma。赋矿母岩梅山和凹山辉长闪长(玢)岩的年龄分别为 123 Ma 和 120 Ma(唐永成等,1998),与大王山组火山岩年龄一致。

东山铁矿中阳起石均为新鲜的黑绿色阳起石,未遭受蚀变,其等时线年龄在 126~129 Ma 之间(图 2c、图 2e、图 2g),与赋矿母岩辉长闪长(玢)岩的年龄一致,亦与其相应的喷出相大王山组火山岩的角闪石等时线年龄(127 Ma,图 2a)一致。证明成矿与成岩密切相关,成矿与成岩是同时期的产物。

余金杰等(2002)测定了铁矿体下部钠长石岩带中钠长石的⁴⁰Ar-³⁹Ar 坪年龄为 123 Ma 和 125 Ma,考虑到不同实验室的分析误差可达 4% 以上(James 等,1986),该年龄值与本次测定的新鲜阳起石的年龄值 126~129 Ma 无法做有意义的区分。因此,翟裕生等(1992)划分的第一期浅色钠长石和方柱石化矿体围岩蚀变阶段,应与成岩成矿作用近于同时,或

表 1 凹山和东山铁矿床中阳起石和潜火山岩中角闪石³⁹Ar-⁴⁰Ar 年龄

Table 1 ³⁹Ar-⁴⁰Ar ages of actinolite from Washan and Dongshan iron deposits and hornblende from subvolcanic rocks

样号	测试对象	等时线年龄/Ma	(⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar) ₀	表观年龄/Ma	峰值年龄/Ma
NW-3	角闪石	126.7±0.9	301±4	124~131	127.7
DS-003	黑绿色阳起石	126.0±1.7	301.1±1.7	125~146	131.1
DS-004	黑绿色阳起石	129.5±2.0	299.7±1.1	126~176	134.6
DS06-2	黑绿色阳起石	128.4±1.7	304.6±1.0	133~178	137.9
WS06-2-1*	灰绿色阳起石	114±16	302.6±1.8	103~213	181.4

* 样品 WS06-2-1 的统计剔除了 2 个测试点。

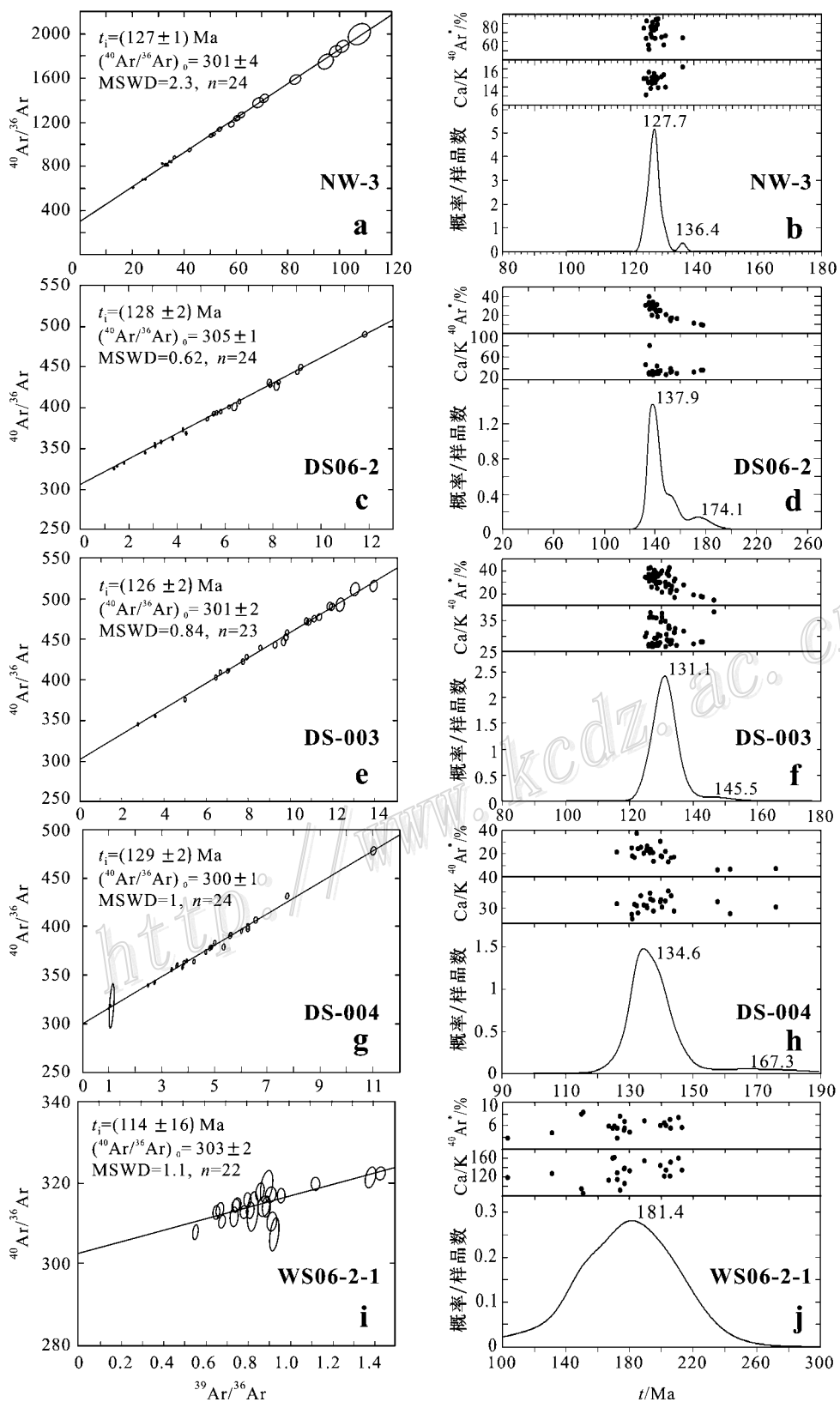


图 2 凹山和东山铁矿床中阳起石和潜火山岩中角闪石³⁹Ar-⁴⁰Ar 等时线(a, c, e, g, i)和表观年龄(b, d, f, h, j)频率分布图
Fig. 2 ³⁹Ar-⁴⁰Ar isochron(a, c, e, g, i) and age-probability diagrams(b, d, f, h, j) of actinolite from Washan and Dongshan iron deposits and hornblende from subvolcanic rocks

发生在成岩成矿之后的很短时间内。

4.2 两种成因的阳起石

在凹山和东山铁矿等脉状、伟晶状矿床中,最常见的矿物组合为磷灰石-阳起石-磁铁矿,在野外即可将伟晶状阳起石分为 2 种:一种是新鲜的黑绿色阳起石(少量),另一种为蚀变的灰绿色阳起石。2 种阳起石的化学成分具有显著的差异:黑绿色阳起石的 TiO_2 和 K_2O 含量明显高于灰绿色阳起石中的含量,其成分介于灰绿色阳起石与含矿岩体内的角闪石之间,显示出与岩浆的亲缘性(马芳, 2005)。2 种阳起石的氢同位素组成相当,为 $-96\text{‰} \sim -74\text{‰}$,而氧同位素组成则明显不同:灰绿色阳起石的 $\delta^{18}\text{O}$ 为 $2.3\text{‰} \sim 4.7\text{‰}$;黑绿色阳起石的 $\delta^{18}\text{O}$ 明显偏高,为 $7.3\text{‰} \sim 9.9\text{‰}$ (马芳等, 2006a)。

本次的激光 ^{39}Ar - ^{40}Ar 定年结果进一步表明 2 种阳起石具有不同的成因,形成于成矿的不同阶段。其中采自东山铁矿的 3 个新鲜阳起石样品,其等时线年龄非常集中,介于 $126 \sim 129 \text{ Ma}$ 之间,在误差范围内一致。其与潜火山岩的成岩年龄一致,与之平衡的流体氧同位素组成($\delta^{18}\text{O}$ 为 $7.3\text{‰} \sim 9.9\text{‰}$)与磁铁矿所反映的流体氧同位素组成($\delta^{18}\text{O}$ 为 $7.7\text{‰} \sim 10.0\text{‰}$)一样具有较高的值,表明这些黑绿色阳起石与磷灰石、磁铁矿是同期形成,形成于岩浆向热液演化的高温阶段(马芳, 2005)。矿体中阳起石与潜火山岩中角闪石的 ^{39}Ar - ^{40}Ar 等时线年龄一致也证明了铁矿床形成于流体演化的高温阶段,因而在成岩和成矿之后的冷却过程中,和潜火山岩体具有相同的闪石封闭温度(约 500°C ; Harrison, 1981)。

灰绿色蚀变阳起石(WS06-2-1)的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 和 $^{39}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 投影点明显偏离黑绿色阳起石所处的等时线,落在 114 Ma 等时线的附近(图 2i)。结合其较低的氧同位素值,表明灰绿色阳起石的形成明显晚于新鲜的阳起石,是由后者经历了水-岩反应的蚀变而成的。其形成时代对应于陈毓川等(1982)所划分的中期矿化蚀变阶段,也对应于翟裕生等(1992)划分的第二期深色的阳起石(透辉石)-钠长石-磷灰石-磁铁矿化矿体围岩蚀变阶段。样品 WS06-2-1 的 22 个数据点投影形成一条(114 ± 16)Ma 的“等时线”,其年龄误差明显偏大。这是样品 K 含量太低造成的。

5 结 论

根据对宁芜盆地铁矿床中角闪石和阳起石的激

光 Ar-Ar 全熔法定年,可以得到如下结论:

(1) 东山铁矿中新鲜阳起石(黑绿色)的 ^{39}Ar - ^{40}Ar 等时线年龄在 $126 \sim 129 \text{ Ma}$ 之间,代表了矿床的形成年龄。该值与赋矿围岩大王山组火山岩中角闪石的等时线年龄(127 Ma)一致,证明成矿与成岩密切相关,成矿与成岩是同时期的产物。

(2) 铁矿床中存在 2 种不同的阳起石,它们分别形成于成矿作用的不同阶段。黑绿色阳起石与磷灰石、磁铁矿同期形成,形成于岩浆向热液演化的高温阶段($126 \sim 129 \text{ Ma}$),而灰绿色蚀变阳起石形成于中期阳起石(透辉石)-钠长石-磷灰石-磁铁矿化矿体围岩蚀变阶段(114 ± 16)Ma)。

References

- Chen Y C, Zhang R H, Sheng J F and Ai Y D. 1982. The mineralization and alteration of the porphyrite iron deposits and their mechanism[J]. Bulletin of the Institute of Mineral Deposits, CAGS, (1): 1-24 (in Chinese with English abstract).
- Harrison T M. 1981. Diffusion of ^{40}Ar in hornblende[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 78: 324-331.
- Institute of Geochemistry, CAS. 1987. Ore-forming mechanism of Ningwu type iron deposits[M]. Beijing: Sci. Press. 62-76 (in Chinese).
- Ishihara S, Li W, Shibata K, Matsuhisa Y and Terashima S. 1986. Characteristics of Cretaceous magmatism and related mineralization of the Nanjing-Wuhu basin, Lower Yangtze area, eastern China[J]. Bulletin of the Geological Survey of Japan, 37(5): 207-231.
- James E C, Paul R K, Edwin H M and Luo X Q. 1986. U. S. Geological survey K_2O and Ar analysis of ZBH-25, laboratory standard, Academy of Geological Sciences of the Ministry of Geology and Mineral Resources, Beijing, P. R. [J]. Isochron, 45: 3-4.
- Lu B, Hu S X, Lin Y S and Ye S Q. 1990. A discussion on genesis and metallogenic model of Ningwu-type iron deposits[J]. Mineral Deposits, 9: 13-24 (in Chinese with English abstract).
- Ma F. 2005. Isotope and fluid inclusions research of Ningwu iron deposits and the discussion on ore genesis—Cased by Washan and Dongshan iron deposits (report of post-doctor [J]. Nanjing: Nanjing University. 1-73 (in Chinese with English abstract).
- Ma F, Jiang S Y, Jiang Y H, Ni P and Ling H F. 2006a. Fluid inclusions and H-O isotopic compositions in the Washan and Dongshan iron deposits, Ningwu basin, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 22: 2581-2589 (in Chinese with English abstract).
- Ma F, Jiang S Y, Jiang Y H, Wang R C, Ling H F and Ni P. 2006b. Pb isotope research of porphyrite Fe deposits in the Ning-Wu area[J]. Acta Geologica Sinica, 80: 279-286 (in Chinese with English abstract).
- Ningwu Research Group. 1978. Ningwu porphyrite iron ores[M]. Bei-

- jing: Geol. Pub. House (in Chinese).
- Tang Y C, Wu Y C, 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: Geol. Pub. House (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: 565-575 (in Chinese with English abstract).
- Xue H M. 1987. Geochemical characteristics of Mesozoic volcanic rocks in Nanjing-Wuhu area and the genesis and evolution of the magma (dissertation for Master degree) [D]. Supervisor: Tao Q Y. Nanjing: Nanjiang Institute Geology of Mineral Deposits (in Chinese with English abstract).
- Xue H M and Tao K Y. 1989. New view on the Mesozoic volcanic sequences in Ningwu [J]. Geol. Jiangsu, 13(11): 9-14 (in Chinese with English abstract).
- Ye S Q. 2000. A discussion on the time of volcanic rock system for Gushan Fm., north section of Ning-Wu [J]. Geol. Jiangsu, 24(4): 210-214 (in Chinese with English abstract).
- Yu J J and Mao J W. 2002. ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of albite of Ningwu porphyrite iron deposits and its implication [J]. Process in Natural Sci., 12: 1059-1063 (in Chinese with English abstract).
- Yu J J. 2003. Sr isotope of apatites from the Washan and Taishan iron deposits in the Nanjing-Wuhu area and its implications [J]. Geol. Rev., 49: 272-277 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Y S, Yao S Z, Lin X D, Zhou X R, Wan T F, Jin F Q and Zhou Z G. 1992. Fe-Cu(Au) metallogeny of the middle-lower reaches area of Yangtze River [M]. Beijing: Geol. Pub. House (in Chinese).
- Zhang Q, Jian P, Liu D Y, Wang Y L, Qian Q, Wang Y and Xue H M. 2003. Zircon SHRIMP dating of Ningwu volcanic and its implication [J]. Science in China (Series D), 33: 309-314 (in Chinese).
- 附中文参考文献
- 陈毓川, 张荣华, 盛继福, 艾永德. 1982. 玢岩铁矿矿化蚀变作用及成矿机理 [J]. 中国地质科学院矿床地质研究所所刊, 第1号: 1-24.
- 卢冰, 胡受奚, 蔺雨时, 叶水泉. 1990. 宁芜型铁矿床成因和成矿模式的探讨 [J]. 矿床地质, 9(1): 13-24.
- 马芳. 2005. 宁芜铁矿同位素和流体包裹体研究及矿床成因探讨——以凹山和东山铁矿为例 [博士出站报告] [R]. 南京: 南京大学. 1-73.
- 马芳, 蒋少涌, 姜耀辉, 倪培, 凌洪飞. 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: 2581-2589.
- 马芳, 蒋少涌, 姜耀辉, 王汝成, 凌洪飞, 倪培. 2006b. 宁芜地区玢岩铁矿 Pb 同位素研究 [J]. 地质学报, 80: 279-286.
- 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.
- 唐永成, 吴言昌, 储国正, 邢凤鸣, 王永敏, 曹奋扬, 常印佛, 编著. 1998. 安徽沿江地区铜多金属矿床地质 [M]. 北京: 地质出版社.
- 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.
- 薛怀民. 1987. 宁芜中生代火山岩地球化学特征及岩浆的成因与演化 [硕士学位论文] [D]. 导师: 陶奎元. 南京: 南京地质矿产研究所.
- 薛怀民, 陶奎元. 1989. 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, (4): 9-14.
- 叶水泉. 2000. 宁芜北段姑山组火山岩系的时代讨论 [J]. 江苏地质, 24(4): 210-214.
- 余金杰, 毛景文. 2002. 宁芜玢岩铁矿钠长石 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年及意义 [J]. 自然科学进展, 12(10): 1059-1063.
- 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): 272-277.
- 翟裕生, 姚书振, 林新多, 周珣若, 万天丰, 金福全, 周宗桂. 1992. 长江中下游地区铁(金)成矿规律 [M]. 北京: 地质出版社.
- 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.
- 中国科学院地球化学研究所. 1987. 宁芜型铁矿床形成机理 [M]. 北京: 科学出版社. 62-76.