

湖北大冶与矽卡岩型铁矿床有关的铁山岩体中黑云母、角闪石 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 同位素年龄及其地质意义

瞿泓滢^{1,2,3} 裴荣富² 姚 磊⁴ 王永磊^{2,3} 王浩琳^{2,3}

(1. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710064; 2. 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, 北京 100037; 3. 南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 江苏 南京 210093; 4. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要: 长江中下游是中国东部中生代大规模成矿的重要地区之一, 是中国东部一个重要的 Cu-Fe-Au-Mo 多金属成矿区带。鄂东南地区铜铁多金属矿床是长江中下游地区金属成矿带的重要组成部分, 但关于岩体年龄及岩体热年代学的研究比较少, 本文以湖北大冶与矽卡岩型铁矿床有关的铁山岩体中的黑云母与角闪石为研究对象, 利用 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 阶段加热同位素定年方法对该岩体进行了成岩时代的研究, 获得了黑云母、角闪石的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 坪年龄分别为 $(133.0 \pm 1.0)\text{Ma}$ 、 $(137.0 \pm 2.0)\text{Ma}$, 等时线年龄分别为 $(133.4 \pm 1.5)\text{Ma}$ 、 $(137.3 \pm 1.6)\text{Ma}$, 结合前人的资料, 认为黑云母、角闪石的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 坪年龄代表了铁山岩体的成岩时代, 结果与鄂东南地区和长江中下游地区成矿岩体年龄一致。与铜陵地区主要成矿岩体年龄对比, 利用岩体冷速率与成矿关系以及小岩体成大矿的原理, 铁山岩体冷速率偏高, 成矿规模一般与冷速率呈反相关, 但可能由于其有着特殊的生长结构, 浅部小侵入体可以得到一定深度岩浆房的成矿流体和热能补充, 以致会出现“小岩体成大矿”的现象。同时, 在结合已有的岩石学、地球化学以及矿床同位素年龄资料基础上, 可以推断出鄂东南地区早白垩世矽卡岩铁矿床形成于岩石圈伸展-减薄环境。

关键词: $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 同位素年龄; 铁山岩体; 冷速率; 成岩成矿作用; 湖北大冶

中图分类号: P597; P618.31

文献标志码: A

文章编号: 1000-3657(2012)06-1635-12

1 引言

长江中下游是中国东部中生代大规模成矿的重要地区之一, 是中国东部一个重要的 Cu-Fe-Au-Mo 多金属成矿区带。前人对长江中下游地区中矿床分布、矿床地质、成矿过程、成矿作用、成矿预测和岩石地球化学特征、岩体演化、成岩时代、成岩机制以及矿田构造、变形特征及其岩体侵位机制等方面进行了大量而深入的研究工作, 积累了丰富的基础地质资料, 取得了许多重要认识, 尤其在成矿年代学和成岩成矿作用关系等方面^[1-27]。鄂东南地区矽卡岩型铁矿床成岩成矿关系密切, 主要矿体赋存于闪长

质岩与碳酸盐岩的断裂复合接触带上, 有些与花岗岩有关。自 20 世纪 50 年代以来, 先后有众多单位在鄂东南地区进行地质勘探和科研工作, 不仅发现了一大批重要的矽卡岩型矿床, 而且理论上取得了重要的成果, 提出了著名的“大冶式”铁矿床的成矿模式^[28]。近年对鄂东南地区中生代进行了大量的测年工作, K-Ar 和 Rb-Sr 以及传统 U-Pb 方法测得侵入体年龄为 240~90 Ma^[29-30], 但通过测试与成矿有关岩体年龄进行岩体热年代学(即冷速率、热效应)的研究则相对较少。本文在详细观察湖北大冶地区铁山岩体的地质特征基础上, 选择与成矿关系密切的石英闪长岩为研究对象, 利用黑云母、角闪石 $^{40}\text{Ar}-$

收稿日期: 2012-11-07; 改回日期: 2012-11-20

基金项目: 科学技术部 973 课题(2012CB416802)、国土资源部公益性行业课题(200911007-18)和南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室基金项目(15-09-01)共同资助。

作者简介: 瞿泓滢, 女, 1978 年生, 助理研究员, 博士, 主要从事矿床学和矿产普查与勘探研究工作; E-mail: hongyingqu@126.com。

³⁹Ar 同位素测年方法对该地区的铁山石英闪长岩进行成岩时代制约,获得精确的岩体年龄,对比 LA-ICP-MS 法测年结果,根据不同矿物封闭温度异同计算岩体冷凝速率和热效应,初步探讨岩体热年代学与深部岩体成矿的关系。

2 区域地质背景

长江中下游成矿带位于扬子板块北缘,秦岭—大别造山带和华北克拉通之南。南缘为阳兴—常州大断裂(YCF),以北为长江中下游地段,以南为扬子板块,内部发育沿江分布的断裂带(邻近长江)和北西向断裂;西北侧以襄樊—广济大断裂(XGF)为界,断裂以北为大别造山带,以南为长江中下游西段;东北界以郟庐大断裂(TLF)为界,以东为长江中下游中东段。从西向东该区依次分布有鄂东南(Fe-Cu)、九瑞(Cu-Au)、安庆(Cu)、庐枞(Fe-Cu)、铜陵(Cu)、宁芜(Fe)和宁镇(Cu-Pb-Zn)7个大型矿集区(图1),以及与火山岩有关的玢岩铁矿和与侵入岩有关的斑岩-矽卡岩 Cu-Fe-Au-Mo 矿床为主^[31-33]。区内地层发育完整,根据其演化历史可分为前震旦纪基底岩

系、古生代海相沉积为主的盖层岩系和中新生代陆相碎屑及火山岩系三大类。前震旦纪基底岩系主要出露在区域南北缘,是一套浅变质岩系。其南北缘岩性差异较大,北缘地层由古元古界—震旦系组成;南缘地层主要为新元古界下、中部的浅变质海相复理石和类复理石砂、泥质夹碳酸盐岩,上部有火山岩夹层。震旦系—下三叠统主要是海相碳酸盐和碎屑岩沉积,该套地层分布广泛,岩相稳定,为区域内生 Cu-Fe-Au-Mo 矿床的重要赋矿层位。志留系南北差异现象逐渐消失,为海相笔石页岩和碎屑岩沉积。除二叠系下部夹有陆相—滨海相煤系,并表现有一定程度的火山活动外,石炭系—下三叠统主要为浅海—滨海相碳酸盐岩沉积,区域自印支运动开始,处于板块内部变形阶段^[9]。翟裕生等^[9]将长江中下游地区的构造称为长江中下游成矿构造带或构造—岩浆—成矿带,整体上属于大陆板内断裂与裂陷交织的成矿带。区内发育 EW、NWW、NNE、NE、SN 多组断裂构造,按照断裂规模及切割深度可分为岩石圈断裂、壳断裂、盖层大断裂和一般断裂四级,其中岩石圈断裂和壳断裂对形成岩浆带、成矿带、成矿亚

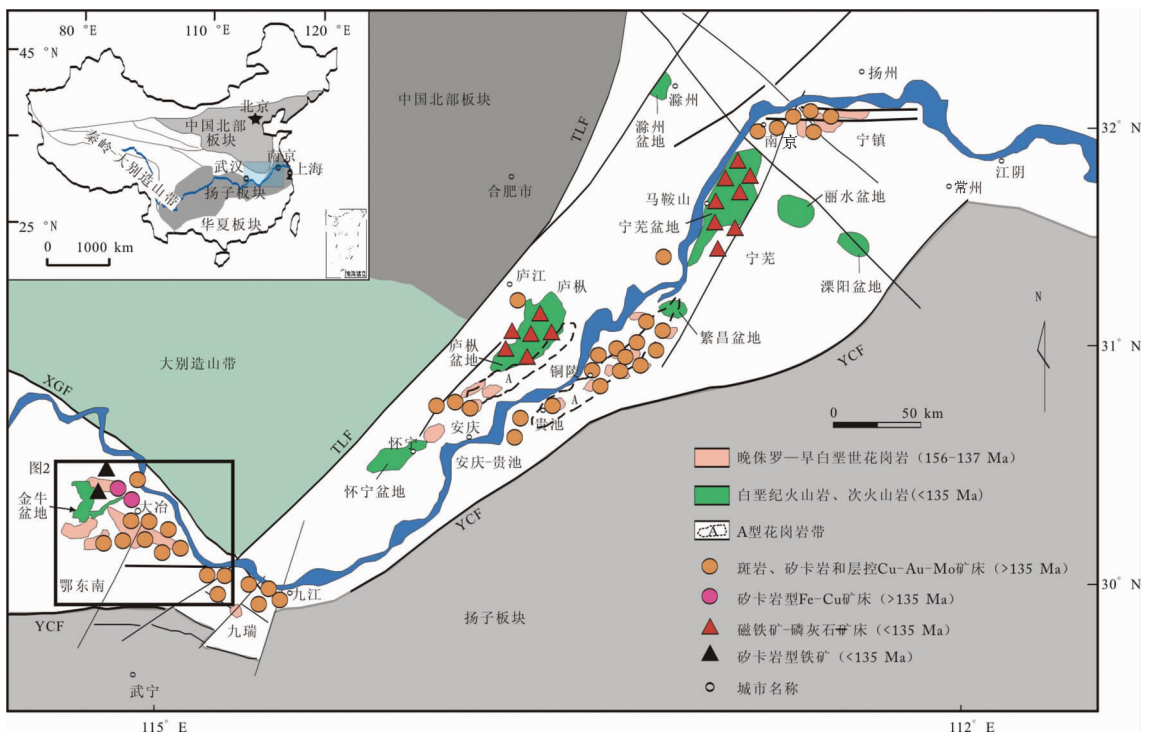


图1 扬子板块东部七大岩浆源区示意图^[32](据 Mao et al., 2011)

TLF—郟庐大断裂, XGF—襄樊—广济大断裂, YCF—常州—阳兴大断裂

Fig.1 Schematic illustration of seven magmatic regions in eastern Yangtze craton^[32] (after Mao et al., 2011)

TLF—Tanlu Fault, XGF—Xiangfan and Guangji Fault, CYF—Changzhou and Yangxing Fault

带及大型矿床起主导作用, 盖层断裂则控制侵入体就位和矿田、矿床位置。本区中生代的岩浆活动始于印支期, 均受岩石圈断裂及次一级构造断裂控制, 多数为岩株状中浅成复式侵入体, 岩体地表形态多为椭圆形、圆形。岩体侵入地层为志留系—白垩系, 以石炭系—侏罗系为主。岩性为花岗岩类, 具斑状及流动构造^[2-3,34-35]。

鄂东南地区位于长江中下游最西段, 以铜、铁为主要优势矿种, 是长江中下游成矿带的重要组成部分。区内地层出露从古生代到中、新生代地层, 以三叠纪大冶组碳酸盐岩、蒲圻组砂页岩、侏罗纪武昌组含煤砂页岩和自流井组砂质碎屑岩、灵乡组和大寺组火山岩和火山碎屑岩分布广泛, 其中三叠纪大冶组大理岩和蒲圻组砂页岩为区内矽卡岩铁铜矿最重要的赋矿围岩^[3]。北西西向褶皱和断裂为本区最主要控矿构造, 近南北向褶皱和断裂发育较差^[29]。该区岩浆岩主要为燕山期, 与铜铁矿产有关的多期侵入

的中酸性复式岩体规模不等, 其中主要的自北向南依次有鄂城、铁山、金山店、阳新、灵乡、殷祖六大岩体, 同时还有铜山口、丰山洞、阮家湾等许多小岩体分布。由图 2 可知, 鄂东南地区各岩体均发育规模不等的斑岩—矽卡岩铁铜矿(除殷祖岩体), 斑岩—矽卡岩型铁铜矿床分布于岩体与围岩接触部位。该区重要的矿床类型和典型矿床包括:“大冶式”大型高品位矽卡岩型铁矿床(如铁山、金山店、程潮)、斑岩—矽卡岩复合型铜钨矿床(铜山口和丰山洞)、矽卡岩型铜金矿床(鸡笼山、鸡冠嘴)、矽卡岩型铜钨矿床(阮家湾)和全国最大的矽卡岩型铜矿床(铜绿山)(图 2)^[29], 这些矿床均属于与燕山期中酸性侵入岩有关的成矿系列^[1]。

3 矿床地质特征、岩体地质和采样位置

大冶矽卡岩型铁矿床是一个以铁为主铜为辅、

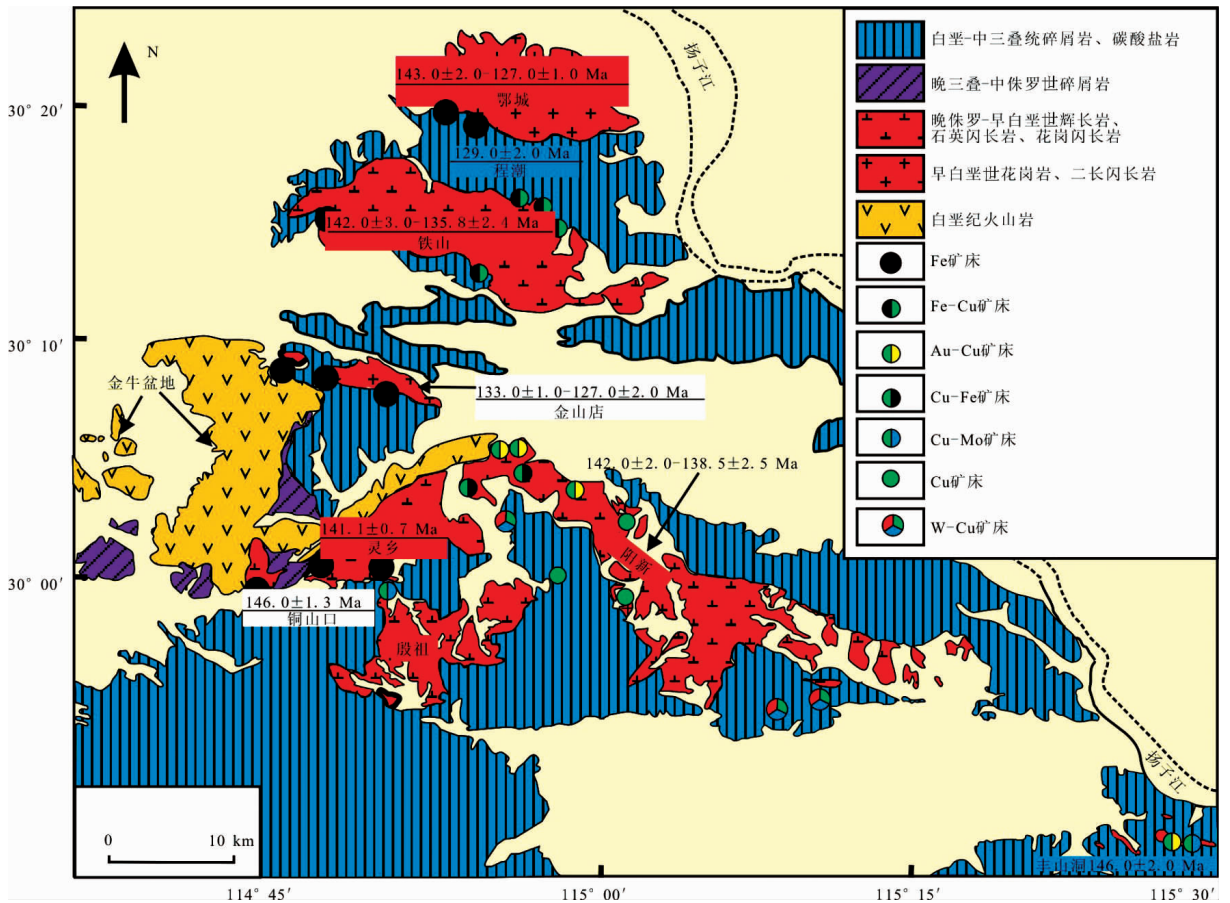


图 2 鄂东南地区地质图以及岩体年龄^[29](据舒全安等, 1992)

Fig.2 Geological map of southeast Hubei area, showing pluton ages^[29] (after Shu et al., 1992)

伴有多种具有综合利用价值的有益组分、而有害杂质含量较低的综合矿床。该铁矿床由六大矿体组成,自西向东为铁门坎、龙洞、尖林山、象鼻山、狮子山和尖山,主要矿体赋存于铁山杂岩体南缘中段闪长岩类与下三叠统灰岩强主动力侵位的接触带上,并展示呈顶沉(roof-founding)多种接触构造模式^[28],其总体走向 NWW,总长 4 300 m。矿区内出露的地层主要为三叠系大冶组,其次为上二叠统大隆组和龙潭组。地层岩性以下三叠统大冶组的碳酸盐岩、泥质岩为主。近接触带地层随距岩体远近不同而发生不同程度的蚀变作用。接触热动力构造十分发育。本区经历了复杂的构造变动,印支期北西西向构造为基础构造格架,后有燕山运动以来与侵入岩体热动力有关的褶皱构造和北北东向构造叠加其上,最晚为北西向喜山期断裂。铁山岩体是燕山期多次岩浆侵入活动侵入形成的复式岩体,其岩性为中细粒含石英闪长岩、黑云母透辉石闪长岩、正长闪长岩以及斑状含石英闪长岩。石英闪长岩由斜长石(55%)、钾长石(15%)、石英(10%)、角闪石(15%)、黑云母(5%)以及磷灰石、榍石、磁铁矿、锆石组成。主要矿石矿物为磁铁矿、赤铁矿、菱铁矿,次要矿石矿物为黄铁矿、黄铜矿,主要脉石矿物为方解石、白云石、透辉石,次要脉石矿物为金云母、方桂石、斜长石、钠长石、石榴石、绿帘石、阳起石、硬石膏、石英、绿泥石、铁白云石。矿床范围内多数地段矿体与围岩呈截然接触,仅在黑云母透辉石闪长岩分布地段矿体与围岩出现渐变浸染矿石带。矿体围岩蚀变局部地段较为发育,主要蚀变类型为矽卡岩化、钠化、钾化、硅化、碳酸盐化、绿泥石化、蒙脱石化。本文采集大冶铁矿床尖林山矿体 10 号钻孔-937 m 处(jls3)和 35 号钻孔-254 m 处(jls5)石英闪长岩。

4 分析方法

将样品粉碎过筛后,对碎样样品进行水漂、磁选和重液分离等步骤,分选出 60~80 目大小的黑云母、角闪石样品,在双目镜下手工挑选 200 mg,其纯度为 99.9%,送实验室进行测试。选纯的黑云母、角闪石用超声波清洗。超声清洗过程中要注意清洗液的选择并严格控制时间。一般先用经过两次亚沸蒸馏净化的纯净水清洗 3 次,每次 3 min,在此过程中矿物表面和解理缝中在天然状态下和碎样过程中吸附的粉末和杂质被清除。然后在丙酮中清洗 2 次,每次

3 min,在此过程中,矿物表面吸附的油污等有机物质被清除。清洗后的样品被封进石英瓶中送核反应接受中子照射,照射工作在中国原子能科学研究所的“游泳池堆”中进行。使用 H8 孔道,中子流密度约为 $6.0 \times 10^{12} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。照射总时间为 3 000 min,积分中子通量为 $1.13 \times 10^{18} \text{ n cm}^{-2}$ 。样品的阶段升温加热使用电子轰击炉,每一个阶段加热 30 min,净化 30 min。质谱分析在中国地质科学院地质研究所 Ar-Ar 年代学同位素实验室 MM-1200B 质谱计上进行,每个峰值均采集 8 组数据。所有的数据在回归到时间零点值后再进行质量歧视校正、大气氩校正、空白校正和干扰元素同位素校正。系统空白水平为 $m/e=40,39,37,36$ 分别小于 $6 \times 10^{-15} \text{ mol}$ 、 $4 \times 10^{-16} \text{ mol}$ 、 $8 \times 10^{-17} \text{ mol}$ 和 $2 \times 10^{-17} \text{ mol}$ 。中子照射过程中所产生的干扰同位素校正系数通过分析照射过的 K_2SO_4 和 CaF_2 来获得,其值为 $(^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = 0.0002389$ 、 $(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{K}} = 0.004782$ 、 $(^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = 0.000806$ 。 ^{37}Ar 经过放射性衰变校正, ^{40}K 衰变常数 $\lambda = 5.543 \times 10^{-10} \text{ 年}^{-1}$ ^[36](Steiger and Jager, 1977)。用 ISOPLOT 程序计算坪年龄和等时线年龄^[37](Ludwig, v2.49, 2001),坪年龄误差以 2σ 给出。中子照射、样品处理和仪器测试均用国内标样黑云母(ZBH-25 标准年龄为 132.7 Ma, K 含量为 7.6%)^[38]做监控。详细实验流程见有关文章^[39]。

5 定年结果

样品 jls3 和样品 jls5 分别经过 10 和 7 个阶段不等的逐级加热后得到了 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄数据表,从而得到了样品中黑云母和角闪石矿物的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄图谱及 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 等时线年龄,样品测定结果见表 1,年龄图谱见图 3。石英闪长岩中的黑云母在 860~1300°C 的温度范围内,其累计 ^{39}Ar 占总释放量的 95.8%,所获得的坪年龄为 $(133.0 \pm 1.0) \text{ Ma}$;角闪石在 1100~1300°C 的温度范围内,其累计 ^{39}Ar 占总释放量的 77.8%,所获得的坪年龄为 $(137.0 \pm 2.0) \text{ Ma}$ 。上述样品在反等时线图上,其对应的年龄分别是 $(133.4 \pm 1.5) \text{ Ma}$ 和 $(137.3 \pm 1.6) \text{ Ma}$,初始 Ar 同位素组成 ($^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$) 分别为 266 ± 43 和 289.9 ± 5.2 ,与大气 Ar 比值 (295.5 ± 0.5) 在误差范围内基本一致,表明岩浆冷却矿物生成时没有捕获过剩的 Ar,而样品的坪年龄与反等时线年龄基本吻合,说明样品的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄真实可信。

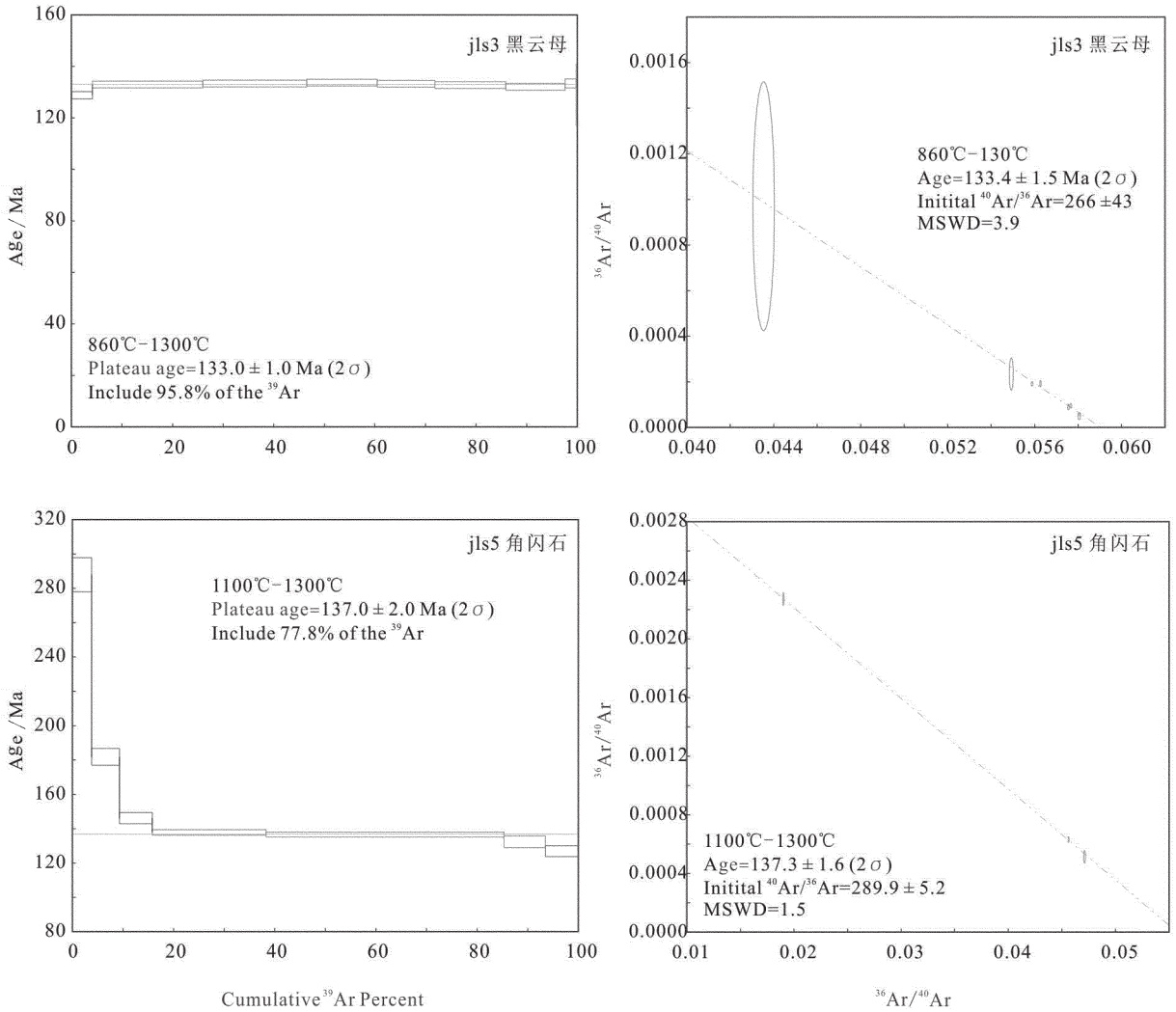


图 3 石英闪长岩中黑云母、角闪石 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄谱与反等时线图

Fig.3 ^{40}Ar - ^{39}Ar step heating age spectrum and isochron diagram of biotite and hornblende from quartz diorite

6 讨论和结论

6.1 岩体年龄

湖北大冶铁山石英闪长岩黑云母、角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄图谱及 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 等时线年龄, 样品测定结果见表 1, 年龄图谱见图 3, 黑云母和角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄分别为 $(133.0 \pm 1.0)\text{Ma}$ 、 $(137.0 \pm 2.0)\text{Ma}$, 等时线年龄分别为 $(133.4 \pm 1.5)\text{Ma}$ 、 $(137.3 \pm 1.6)\text{Ma}$, 与前人测得的铁山石英闪长岩锆石 U-Pb 年龄 $(138.24 \pm 0.94)\text{Ma}$ ^[40]、 $(142.0 \pm 3.0)\text{Ma}$ ^[41]、 $(135.8 \pm 2.4)\text{Ma}$ ^[42] 基本一致, 为早白垩世。鄂东南地区(鄂城、程潮、金山店、阳新、铜山口、灵乡)岩体锆石 U-Pb 年龄集中于 $146\sim 127 \text{ Ma}$, 地质年代数据显示该地区岩

体形成于晚中生代(图 2)。长江中下游地区(图 1)其他岩体地质年代研究数据, 铜陵地区岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 $(142.8 \pm 2.2)\text{Ma}$ 和 $(135.8 \pm 1.1)\text{Ma}$ ^[43], 安庆和九瑞地区岩体年龄分别为 $(142.3 \pm 1.6)\text{Ma}$ 、 $(134.7 \pm 2.3)\text{Ma}$ ^[23,44-46], 上述数据说明, 扬子板块东部成岩作用为同时代, 早期成岩作用始于 $143\sim 132 \text{ Ma}$, 一系列的火山活动和岩体侵位为 $130\sim 113 \text{ Ma}$ ^[42]。

6.2 岩体热年代学

本文对湖北大冶铁山岩体进行了冷速率的研究。锆石的封闭温度较高 ($>850^\circ\text{C}$), 其结晶年龄代表了岩体的侵入年龄。岩浆岩的 K-Ar 同位素年龄代表被测矿物冷却到其对放射性成因 ^{40}Ar 成为封闭

表 1 湖北大冶铁山岩体石英闪长岩中黑云母、角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 阶段加热分析同位素数据
 Table 1 Results of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ incremental heating experiments of biotite and hornblende from
 Tieshan quartz diorite in Daye, Hubei Province

加热 阶段	t/°C	($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$) _m	($^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$) _m	($^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$) _m	($^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$) _m	^{40}Ar /%	F	^{39}Ar / 10^{14} mol	^{39}Ar (Cum.)/%	Age /Ma	$\pm 1\sigma$ /Ma
黑云母 样号: jls3											
1	700	283.2477	0.9482	1.2647	0.2105	1.10	3.1281	0.02	0.08	25	45
2	800	33.3144	0.0574	0.0292	0.0270	49.05	16.3411	0.97	4.18	128.8	1.4
3	860	17.8993	0.0034	0.0033	0.0152	94.34	16.8858	5.19	25.99	133.0	1.3
4	910	17.2256	0.0010	0.0000	0.0148	98.25	16.9245	4.89	46.52	133.3	1.3
5	960	17.2312	0.0008	0.0000	0.0150	98.54	16.9794	3.32	60.46	133.7	1.3
6	1020	17.3790	0.0015	0.0030	0.0150	97.34	16.9175	2.71	71.86	133.2	1.3
7	1080	17.3452	0.0016	0.0000	0.0149	97.17	16.8539	3.33	85.85	132.7	1.3
8	1140	17.7754	0.0034	0.0250	0.0156	94.30	16.7628	2.79	97.59	132.0	1.3
9	1200	18.2094	0.0043	0.0440	0.0142	93.06	16.9456	0.53	99.81	133.4	1.7
10	1300	22.9698	0.0222	0.2667	0.0176	71.44	16.4142	0.05	100.00	129	12
测试参数: W=27.22 mg J=0.00453, 坪年龄=(133.0±1.0) Ma (860~1300°C), 反等时线年龄=(133.4±1.5) Ma											
角闪石 样号: jls5											
1	800	412.1305	1.2629	3.0236	0.3630	9.50	39.2482	0.09	3.80	287.9	9.9
2	900	56.8312	0.1111	0.5844	0.0601	42.31	24.0584	0.14	9.29	181.8	4.9
3	1000	29.5134	0.0355	1.3660	0.0329	64.76	19.1328	0.16	15.77	146.1	3.3
4	1100	21.1736	0.0117	3.3230	0.0247	84.81	18.0053	0.56	38.30	137.8	1.6
5	1200	21.6283	0.0176	16.6563	0.0278	81.37	17.8383	1.17	85.35	136.6	1.4
6	1300	36.3385	0.1745	383.4774	0.0775	32.84	17.2725	0.20	93.53	132.3	3.4
7	1400	82.7405	0.2762	182.9540	0.0771	17.03	16.5300	0.16	100.00	126.9	3.2
测试参数: W=120.24 mg J=0.004408, 坪年龄=(137.0±2.0) Ma (110~1300°C), 反等时线年龄=(137.3±1.6) Ma											

注:表中下标 m 为质谱测量同位素比值;F 为放射成因 ^{40}Ar 与 K 生成的 ^{39}Ar 比值。

体系的温度后所经历的时间,含钾矿物在结晶之后几乎马上就聚集放射性成因 ^{40}Ar ,角闪石和黑云母对放射性成因 ^{40}Ar 封闭温度高,尤其是前者经常没有 Ar 的丢失^[47],其 K-Ar 同位素年龄可以代表岩体冷结晶开始的年代,而且最为接近岩浆岩侵入时代,可以代表岩浆侵入年龄。斜长石的封闭温度较低,一般接近岩浆冷结晶结束的年代。若已知角闪石(或黑云母)和斜长石对放射成因 ^{40}Ar 的封闭温度,则可以根据两者的 K-Ar 年龄差计算岩体的冷速率^[47]。不同岩体侵位时的温度虽然有所差别,但其结晶矿物对放射成因 ^{40}Ar 的封闭温度一般相差不大。研究表明^[48],角闪石对放射成因 ^{40}Ar 的封闭温度约为 >650°C,黑云母对放射成因 ^{40}Ar 封闭温度为 250°C、300°C、350°C,斜长石为 230°C。

本次研究取锆石封闭温度为 900°C 以及角闪石、黑云母、斜长石对放射成因 ^{40}Ar 的封闭温度分别为 600°C、350°C、230°C,表 2 列出湖北大冶与矽卡岩

型铁矿有关的铁山岩体的冷结晶时间和其冷速率以及铜陵矿集区主要成矿岩体的冷结晶时间和冷速率。

计算结果表明,岩体冷速率相差较大,湖北大冶铁山岩体冷速率最高为 114°C/Ma,铜陵矿集区以鸡冠石岩体冷速率最高 26°C/Ma、沙滩脚岩体冷速率最低为 2.51°C/Ma。当侵入岩体的成分相近时,其侵位时的单位热能可能差别很小,而岩体的总能量与其规模是成正比的,所以不同规模岩体的总能量是有差别的,规模愈大的岩体其热能量也愈高,与围岩达到平衡所需的时间愈长,热效应愈大,冷速率相应愈低。从铜陵矿集区沙滩脚和鸡冠石岩体可以看出,前者规模较大,冷速率最低,后者冷速率最高,规模也较小,符合冷速率与岩体规模成反比这一认识。然而,青山脚、大团山等岩体的规模虽然较小,但其冷速率却相对较低,尤其是青山脚岩体的冷速率仅为 6.36°C/Ma,但并不影响岩体规模与冷速率成反比这

表 2 湖北大冶铁山岩体和铜陵矿集区主要成矿岩体的冷速率
Table 2 Data of Tieshan quartz diorite from Daye and metallogenic pluton
from the Tongling ore concentration area

序 号	岩体 名称	岩体类型	冷凝开始		冷凝结束		冷凝时间 /Ma	温度差 /°C	冷速率 /°C/Ma
			测试对象	年龄 / Ma	测试对象	年龄 / Ma			
1	铁山	石英闪长岩	锆石	138.24±0.94	黑云母	133.40±1.50	5.50	550	114
2	鸡冠石	石英二长闪长岩	角闪石	138.66±2.99	斜长石	124.43±1.87	14.23	370	26
3	大团山	花岗闪长岩	角闪石	139.31±3.11	斜长石	109.34±2.42	29.97	370	12.35
4	青山脚	石英二长闪长岩	黑云母	135.80±1.10	斜长石	116.92±1.78	18.88	120	6.36
5	铜官山	石英二长闪长岩	角闪石	134.35±3.03	斜长石	109.75±2.56	24.60	370	15.04
6	凤凰山	花岗闪长岩	角闪石	145.46±4.00	斜长石	107.38±1.77	38.08	370	9.72
7	沙滩脚	花岗闪长岩	黑云母	148.20±2.13	斜长石	100.46±3.32	47.74	120	2.51

注:铜陵矿集区主要成矿岩体冷速率数据引自中国地质调查局地质调查项目课题研究报告^①。

一认识,这是由于这些岩体的围岩受岩浆侵入的热烘烤而发生较大范围的热变质,其较低的冷速率无疑是深部存在供应热能的大岩基的反映,铜陵矿集区侵入岩普遍发育“体中体”^①,深部存在大的岩基或岩株,构造中不同期次岩浆侵入活动形成小岩体的共岩浆补余分异效应^①也是能够发生大规模成矿作用的有利条件。因此,对于侵入岩体的冷速率不能简单地以其规模进行判断。对于矽卡岩热液型矿床热作用维持的时间和成矿流体的供应是成矿关键因素,矿床自身热量可能无法满足形成规模较大矿床所需的能量,围岩的热变质作用也要消耗较大能量,因此深部岩浆房提供成矿所需热能是必不可少的。总体上侵入岩体的冷速率一般与其相关成矿作用的强度是成反相关的,但不能简单用其判断。因为,侵入岩体有着特殊的生长结构,浅部小侵入体可以得到一定深度岩浆房的成矿流体和热能补充,以致会出现“小岩体成大矿”的现象,并造成岩体冷速率并不受其本身规模的绝对制约。

6.3 岩浆作用与成矿作用

鄂东南地区斑岩-矽卡岩型铁铜多金属矿床形成于早白垩世早期^[49]。辉钼矿 Re-Os、与成矿共生的含钾矿物 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 的年龄测定表明长江中下游成矿带铜陵、安庆和九瑞矽卡岩型铜多金属矿床的成矿时代分别为 145~135 Ma、144~137 Ma^[30, 33, 50-51],表明鄂东南地区矽卡岩型铁矿床和长江中下游地区矽卡岩型多金属矿床形成于同一期成矿事件。长江中下游地区矽卡岩型多金属矿床与中酸性侵入岩密

切相关,成岩成矿形成于同一构造背景。长江中下游地区晚中生代岩浆岩是中国东部火山-侵入杂岩带的重要组成部分,前人对包括长江中下游地区在内的中国北方中生代的矿床分布特征和时代进行了系统的研究,认为大爆发成矿主要集中于 190~160 Ma、140 Ma 和 120 Ma,其地球动力学背景分别为后碰撞造山过程、构造体制大转折晚期和岩石圈大规模快速减薄^[51],整理已有的矿床高精度测年结果表明长江中下游地区存在两期重要的成矿事件,时代集中于 145~132 Ma 和 125~123 Ma。

长江中下游地区的前震旦纪基底形成阶段和震旦纪-早三叠世沉积盖层形成阶段一直相对稳定,直至中三叠世以来的碰撞造山和造山后板内变形诱发了本区强烈的岩浆活动,同时产生一系列成矿事件^[2],长江中下游地区晚侏罗世为挤压造山,白垩纪时构造环境为拉张背景,成矿动力学背景为夭折的大陆裂谷环境^[3,52]。长江中下游地区同位素测年结果表明该地区存在早白垩世碱性侵入岩,地球化学特征显示它们形成于软流圈上涌和岩石圈伸展-减薄环境^[53]。

鄂东南地区中酸性侵入岩中经常发育有中基性的岩石包体^[25,54-56],表明中酸性岩浆侵入时普遍存在基性岩浆的活动,中基性包体与中酸性寄主岩的母岩浆为高温岩浆^[29,57],表明该地区高温岩浆可能是底侵的幔源玄武质岩浆加热、熔融下地壳的产物。幔源玄武质岩浆的大规模底侵可以为下地壳大范围的熔融提供充足的热源^[58],为长江中下游地区晚中生

①李进文,裴荣富,梅燕雄,王浩琳.长江中下游铜、铁、金(硫)成矿带大型矿集区成矿对比研究.中国地质调查局地质调查项目课题研究报告,2006:1-88.

代大规模中酸性岩浆活动的重要控制因素。基于区域地质背景和岩石学研究, 本文认为鄂东南大型矽卡岩型铁矿床形成于区域岩石圈伸展和减薄构造环境。鄂东南地区早白垩世晚期的酸性侵入岩的地球化学特征明显不同于埃达克质岩, 表明当时地壳已发生减薄作用^[43]。因此可以推断出鄂东南地区早白垩世(140~132 Ma)矽卡岩铁矿床形成于岩石圈伸展-减薄环境。

致谢:在野外期间得到武钢矿业公司大冶铁矿各位工作人员的帮助,⁴⁰Ar-³⁹Ar 测试得到了陈文研究员和张彦老师的大力帮助, 最终定稿得益于专家们富有建设性的意见和建议和编辑老师的悉心指导。在此一并致谢。

参考文献(References):

- [1] 闻广, 吴思本. 安徽铜陵凤凰山岩体若干特征与成矿关系[J]. 中国地质科学院院报, 1983, 7:343-349.
Wen Guang, Wu Siben. Some characteristics of the Fenghuangshan Intrusion and its affinity to mineralization [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences, 1983, 7:343-349 (in Chinese with English abstract).
- [2] 常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 长江中下游铁铜矿成矿带 [M]. 北京: 地质出版社, 1991:1-379.
Chang Yinfu, Liu Xiangpei, Wu Yanchang. Fe-Cu Metallogenic Belt in the Middle-lower Reaches of the Yangtze River Area [J]. Beijing: Geological Publishing House, 1991:1-379(in Chinese).
- [3] 翟裕生, 姚书振, 林新多, 等. 长江中下游地区铁铜(金)成矿规律 [M]. 北京: 地质出版社, 1992:1-234.
Zhai Yusheng, Yao Shuzhen, Lin Xinduo, et al. Metallogenic Regularity of Fe-Cu (-Au) in the Middle-lower Reaches of the Yangtze-River Area [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992: 1-234(in Chinese).
- [4] 吴才来, 周珣若, 黄许陈, 等. 铜陵地区中酸性侵入岩年代学研究 [J]. 岩石矿物学杂志, 1996, 5(4):299-306.
Wu Cailai, Zhou Xunruo, Huang Xuchen, et al. ⁴⁰Ar/³⁹Ar chronology of intrusive rocks from Tongling [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 1996, 5 (4):299-306 (in Chinese with English abstract).
- [5] 刘文灿, 高德臻, 储国正. 安徽铜陵地区构造变形分析及成矿预测 [M]. 北京: 地质出版社, 1996:1-133.
Liu Wencan, Gao Dezhen, Chu Guozheng. The Analysis of Structure Deformation and the Metallogenic Prediction in the Middle and Lower Yangzi Reaches [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996:1-133 (in Chinese).
- [6] 唐永成, 吴言昌, 储国正, 等. 安徽沿江地区铜金多金属矿床地质 [M]. 北京: 地质出版社, 1998:1-351.
Tang Yongcheng, Wu Yanchang, Chu Guozheng, et al. Geology of Copper-gold Polymetallic Deposits in the Along-Changjiang area of Anhui Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998:1-351 (in Chinese).
- [7] 毛景文, 华仁民, 李晓波. 浅议大规模成矿作用与大型矿集区[J]. 矿床地质, 1999, 18:39-43.
Mao Jingwen, Hua Renmin, Li Xiaobo. A preliminary study of large-scale metallogenesis and large clusters of mineral deposits [J]. Mineral Deposits, 1999, 18:39-43 (in Chinese with English abstract).
- [8] 张达, 李东旭. 铜陵凤凰山岩体侵位构造变形特征 [J]. 地球学报, 1999, 20(3):405-410.
Zhang Da, Li Dongxu. Study of characteristics of structural deformation with the emplacement of Fenghuangshan pluton, Tongling, Anhui [J]. Acta Geoscientia Sinica, 1999, 20(3):405-410 (in Chinese with English abstract).
- [9] 张达, 吴淦国, 李东旭. 铜陵凤凰山岩体接触带构造变形特征 [J]. 地学前缘, 2001, 8(3):223-229.
Zhang Da, Wu Ganguo, Li Dongxu. Characteristics of contact structural deformation of Fenghuangshan pluton in Tongling, Anhui Province [J]. Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing), 2001, 8 (3): 223-229 (in Chinese with English abstract).
- [10] 张达, 吴淦国, 狄永军, 等. 铜陵凤凰山岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄与构造变形及其对岩体侵位动力学背景的制约 [J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2006, 31(6):823-829.
Zhang Da, Wu Ganguo, Di Yongjun, et al. Emplacement dynamics of Fenghuangshan pluton (Tongling, Anhui Province): Constraints from U-Pb SHRIMP dating of zircons and structural deformation [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2006, 31 (6): 823-829(in Chinese with English abstract).
- [11] 周涛发, 岳书仓, 袁峰, 等. 长江中下游两个系列铜、金矿床及其成矿流体系统的氢、氧、硫、铅同位素研究 [J]. 中国科学(D 辑), 2000, 30(增刊):122-1-28.
Zhou Taofa, Yue Shucang, Yuan Feng, et al. Two series of copper-gold deposits in the middle and lower reaches of the Yangtze River area (MLYRA) and the hydrogen, oxygen, sulfur and lead isotopes of their ore-forming hydrothermal systems [J]. Science in China (Series D), 2000, 30 (Supp.):122-128 (in Chinese).
- [12] 周涛发, 袁峰, 岳书仓. 安庆铜牛井热液脉型铜、钼、金矿床石英的 ⁴⁰Ar-³⁹Ar 快中子活化年龄 [J]. 地质论评, 2003, 49: 212-216.
Zhou Taofa, Yuan Feng, Yue Shucang. ⁴⁰Ar-³⁹Ar fast neutron activation dating of quartz from the Tongniujing Cu, Mo, Au vein-type hydrothermal deposit, Anhui [J]. Geological Review, 2003, 49:212-216(in Chinese with English abstract).
- [13] 周涛发, 宋明义, 范裕, 等. 安徽庐火火山岩盆地中巴架滩岩体的岩石地球化学特征及成因 [J]. 岩石学报, 2007, 23:2379-2386.

- Zhou Taofa, Song Mingyi, Fan Yu, et al. Chronology of the Bajiatan intrusions in the Luzong basin, Auhui, and its significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23:2379–2386 (in Chinese with English abstract).
- [14] 周涛发, 范裕, 袁峰. 长江中下游成矿带成岩成矿作用研究进展 [J]. *岩石学报*, 2008, 24(8):1665–1678.
- Zhou Taofa, Fan Yu, Yuan Feng. Advances on petrogenesis and metallogeny study of the mineralization belt of the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River area [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(8):1665–1678(in Chinese with English abstract).
- [15] 刘亮明, 王志超, 彭省临. 综合信息论在储量危急矿山深部找矿中的应用—以铜陵凤凰山铜矿为例 [J]. *地质科学*, 2002, 37(4):444–452.
- Liu Liangming, Wang Zhichao, Peng Shenglin. Application of comprehensive informationism prediction for ore prospecting in deeper and outer of mines with critical reserves: An example from the Fenghuangshan copper mine, Tongling [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2002, 37 (4):444–452(in Chinese with English abstract).
- [16] 吴淦国, 张达, 臧文栓. 铜陵矿集区构造滑脱及分层成矿特征研究 [J]. *中国科学(D 辑)*, 2003, 33(4):300–308.
- Wu Ganguo, Zhang Da, Zang Wenshuan. Study on tectonic layering movement and layering mineralization in the Tongling metallogenic cluster [J]. *Science in China (Series D)*, 2003, 33 (4):300–308 (in Chinese).
- [17] 狄永军, 赵海玲, 张贻全, 等. 安徽铜陵地区燕山期花岗岩类岩石中的岩浆混合结构 [J]. *北京地质*, 2003, 15(1):12–17.
- Di Yongjun, Zhao Hailing, Zhang Yiquan, et al. Petrographic evidences for magma mixing in the granitoids from Tongling area, Anhui Province [J]. *Beijing Geology*, 2003, 15 (1):12–17 (in Chinese with English abstract).
- [18] 杨中宝, 丁美青, 银霞. 岩浆侵位过程的反演及其在矿体定位预测中的应用—以安徽铜陵凤凰山矿田为例 [J]. *世界地质*, 2003, 22(4):339–343.
- Yang Zhongbao, Ding Meiqing, Yin Xia. Magmatic emplacement process inversion and its application to location prediction of orebody [J]. *Global Geology*, 2003, 22 (4):339–343 (in Chinese with English abstract).
- [19] 邵拥军, 彭省临, 刘亮明, 等. 凤凰山矿田成矿地质条件和控矿因素分析 [J]. *中南工业大学学报 (自然科学版)*, 2003, 34(5):562–566.
- Shao Yongjun, Peng Shenglin, Liu Liangming, et al. Analysis of the geological conditions of mineralization and the ore-control factors in Fenghuangshan field [J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2003, 34 (5):562–566 (in Chinese with English abstract).
- [20] 邵拥军, 彭省临, 吴淦国, 等. 铜陵凤凰山岩体成岩机制探讨 [J]. *地质与勘探*, 2003, 39(5):39–43.
- Shao Yongjun, Peng Shenglin, Wu Ganguo, et al. The analysis on the rock-forming mechanism of Fenghuangshan rock body in Tongling area [J]. *Geology and Prospecting*, 2003, 39 (5):39–43(in Chinese with English abstract).
- [21] 邓军, 王庆飞, 黄定华, 等. 铜陵矿集区燕山期地壳浅部成矿流体活动的构造控矿 [J]. *矿床地质*, 2004, 23(3):399–404.
- Deng Jun, Wang Qingfei, Huang Dinghua, et al. Structural control of ore-forming fluid activities in shallow crust of Tongling ore concentration area in Yanshanian period [J]. *Mineral Deposits*, 2004, 23 (3):399–404(in Chinese with English abstract).
- [22] 王庆飞, 邓军, 黄定华, 等. 铜陵矿集区浅层隐伏岩体预测及其形态分析 [J]. *矿床地质*, 2004, 23(3):405–410.
- Wang Qingfei, Deng Jun, Huang Dinghua, et al. Prognosis and morphological analysis of subsurface concealed magmatic bodies in Tongling ore concentration area [J]. *Mineral Deposits*, 2004, 23 (3):405–410(in Chinese with English abstract).
- [23] 王元龙, 王焰, 张旗, 等. 铜陵地区中生代中酸性侵入岩的地质地球化学特征及其成矿—地球动力学意义 [J]. *岩石学报*, 2004, 20(2):325–338.
- Wang Yuanlong, Wang Yan, Zhang Qi, et al. The geochemical characteristics of mesozoic intermediate-acid intrusives of the Tongling area and its metallogenesis-geodynamic implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20 (2):325–338 (in Chinese with English abstract).
- [24] 毛政利, 赖健清, 彭省临, 等. 安徽铜陵凤凰山铜矿床地球化学特征及其意义 [J]. *地质与勘探*, 2004, 40(2):28–31.
- Mao Zhengli, Lan Jianqing, Peng Shenglin, et al. The chemical characteristics and significances of the Fenghuangshan copper deposit in Tongling, Anhui Province [J]. *Geology and Prospecting*, 2004, 40 (2):28–31(in Chinese with English abstract).
- [25] 杜杨松, 秦新龙, 田世洪. 安徽铜陵铜官山矿区中生代岩浆—热液过程: 来自岩石包体及其寄主岩的证据 [J]. *岩石学报*, 2004, 20(2):339–350.
- Du Yangsong, Qin Xinlong, Tian Shihong. Mesozoic magmatic to hydrothermal process in the Tongguanshan ore field, Tongling, Anhui province, China: Evidence from xenoliths and their hosts [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20 (2):339–350 (in Chinese with English abstract).
- [26] 李进文, 裴荣富, 梅燕雄. 铜陵矿集区矿田构造垂直分布 [J]. *矿床地质*, 2004, 23(2):206–215.
- Li Jinwen, Pei Rongfu, Mei Yanxiang. Vertical zoning of orefield structures in Tongling ore concentration area, Anhui Province [J]. *Mineral Deposits*, 2004, 23 (2):206–215 (in Chinese with English abstract).
- [27] 李进文, 裴荣富, 张德全, 等. 铜陵矿集区燕山期中酸性侵入岩地球化学特征及其地质意义 [J]. *地球学报*, 2007, 28(1):11–22.
- Li Jinwen, Pei Rongfu, Zhang Dequan, et al. Geochemical characteristics of the Yanshanian intermediate-acid intrusive rocks in the Tongling mineralization concentration area, Anhui Province,

- and their geological implications [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2007, 28 (1):11–22(in Chinese with English abstract).
- [28] 裴荣富. 中国矿床模式[M]. 北京:地质出版社, 1995:262–264.
Pei Rongfu. Chinese Deposit Model [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1995:262–264(in Chinese).
- [29] 舒全安, 陈培良, 程建荣, 等. 鄂东铁铜矿产地质[M]. 北京:冶金工业出版社, 1992:1–510.
Shu Qunan, Chen Peiliang, Cheng Jinrong, et al. Geology of Iron–copper Deposits in Eastern Hubei Province, China [M]. Beijing: Metallurgic Industry Press, 1992:1–510(in Chinese).
- [30] Sun Weidong, Xie Zhi, Chen Jiangfeng, et al. Os–Os dating of copper and molybdenite deposits along the Middleand Lower reaches of the Yangtze River, China [J]. *Economic Geology*, 2003, 98:175–180.
- [31] Pan Yuanming, Dong Ping. The Lower Changjiang (Yangzi/Yangtze River) metallogenic belt, East China:Intrusion– and wall rock–hosted Cu–Fe–Au, Mo, Zn, Pb, Ag deposits [J]. *Ore Geology Reviews*, 1999, 15:177–242.
- [32] Mao Jingwen, Xie Guiqing, Duan Chao, et al. 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*, 2011, 43:294–314.
- [33] Mao Jingwen, Wang Yitian, Bernd Lehmann, et al. Molybdenite Re–Os and albite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of Cu–Au–Mo and magnetite porphyry systems in the Yantze River valley and metalogenic implications [J]. *Ore Geology Reviews*, 2006, 29:307–324.
- [34] 邓晋福, 叶德隆, 赵海玲, 等. 下扬子地区火山作用深部过程盆地形成[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1992:1–184.
Deng Jinfu, Ye Delong, Zhao Hailing. Volcanism, Deep Internal Processes and Basin Formation in the Lower Reaches of Yangtze River [M]. Wuhan: Chian University of Geosciences Press, 1992:1–184(in Chinese).
- [35] 邓晋福, 莫宣学, 赵海玲, 等. 中国东部燕山期岩石圈–软流圈系统大灾变与成矿环境[J]. *矿床地质*, 1999, 18(4):309–315.
Deng Jinfu, Mo Xuanxue, Zhao Hailing, et al. The Yanshanian lithosphere asthenosphere catastrophe and metallogenic environment in East China [J]. *Mineral Deposits*, 1999, 18(4):309–315(in Chinese with English abstract).
- [36] Steiger RH, Jager E. Subcommission on geochronology: Convention on the use of decay constants in geo–and cosmochronology [J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 1977, 36:359–362.
- [37] Ludwig K R. User’s manual for isoplot/ex, v2. 49, a geochronological toolkit for Microsoft Excel [J]. *Geochronological Centre Special Publication*, 2001, No. 1a:1–58.
- [38] 王松山. 我国 K–Ar 法标准样(^{40}Ar –(^{40}K) 和(^{40}Ar –(^{39}Ar) 年龄测定及放射成因 ^{40}Ar 的析出特征 [J]. *地质科学*, 1983, (4):315–323.
Wang Songshan. Age determinations of ^{40}Ar – ^{40}K , ^{40}Ar – ^{39}Ar and radiogenic ^{40}Ar released characteristics on K–Ar geostandards of China [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1983, (4):315–323 (in Chinese with English abstract)
- [39] 陈文, 张彦, 金贵善, 等. 青藏高原东南缘晚新生代幕式抬升作用的 Ar–Ar 热年代学证据[J]. *岩石学报*, 2006, 22:867–872.
Chen Wen, Zhang Yan, Jin Guishan, et al. Late Cenozoic episode uplifting in southeastern part of the Tibetan plateau: Evidence from Ar–Ar thermochronology [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22:867–872(in Chinese with English abstract).
- [40] 瞿泓滢, 王浩琳, 裴荣富, 等. 鄂东南地区与铁山和金山店铁矿有关的花岗质岩体锆石 LA–ICP–MS 年龄和 Hf 同位素组成及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2012, 28(1):147–165.
Qu Hongying, Wang Haolin, Pei Rongfu, et al. Zircon U–Pb geochronological and Hf isotopic constraints on petrogenesis of Tieshan and Jinshandian plutons in the southeastern Hubei Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28 (1):147–165 (in Chinese with English abstract).
- [41] Xie Guiqing, Mao Jingwen, Zhao Haijie. Zircon U–Pb geochronological and Hf isotopic constraints on petrogenesis of Late Mesozoic intrusions in the southeast Hubei Province, Middle–Lower Yangtze River belt (MLYRB), East China [J]. *Lithos*, 2011, 125:693–710.
- [42] Li Jianwei, Zhao Xinfu, Zhou Meifu, et al. Late Mesozoic magmatism from the Daye region, eastern China: U–Pb ages, petrogenesis, and geodynamic implications [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2009, 157:383–409.
- [43] Xie Guiqing, Mao Jingwen, Li Ruiling, et al. Geochemistry and Nd–Sr isotopic studies of Late Mesozoic granitoids in the southeastern Hubei Province, Middle–Lower Yangtze River belt, Eastern China: Petrogenesis and tectonic setting [J]. *Lithos*, 2008, 104:216–230.
- [44] 邢凤鸣, 徐祥. 安徽两条 A 型花岗岩带 [J]. *岩石学报*, 1994, 10(4):357–369.
Xing Fengming, Xu Xiang. Two A–type granite belts from Anhui [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1994, 10:357–369 (in Chinese with English abstract).
- [45] 邢凤鸣, 徐祥. 铜陵地区高钾钙碱系列侵入岩 [J]. *地球化学*, 1996, 25(1):29–38.
Xing Fengming, Xu Xiang. High–potassium calc–alkaline intrusive rocks in Tongling area, Anhui province [J]. *Geochimica*, 1996, 25:29–38(in Chinese with English abstract).
- [46] Liu Liangming, Wang Zhiqiang, Peng Shenglin. Application of comprehensive informationism prediction for ore prospecting in deeper and outer of mines with critical reserves:An example from the Fenghuangshan copper mine, Tongling [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2002, 37 (4):444–452.

- [47] 魏菊英, 王关玉. 同位素地球化学[M]. 北京:地质出版社, 1988: 1-379.
Wei Juying, Wang Guanyu. Isotope Geochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988:1-379(in Chinese).
- [48] 肖庆辉, 邱瑞照, 邓晋福, 等. 中国花岗岩与大陆地壳生长方式初步研究[J]. 中国地质, 2005, 32(3):343-352.
Xiao Qinghui, Qiu Ruizhao, Deng Jinfu, et al. Granitoids and continental crustal growth modes in China [J]. Geology in China, 2005, 32(3):343-352.
- [49] 谢桂青, 李瑞玲, 蒋国豪, 等. 鄂东南地区晚中生代侵入岩的地球化学和成因及对岩石圈减薄时限的制约 [J]. 岩石学报, 2008, 24(8):1703-1714.
Xie Guiqing, Li Ruiling, Jiang Guohao, et al. Geochemistry and petrogenesis of Late Mesozoic granitoids in southeastern Hubei Province and constrains on the timing of lithospheric thinning, middle - lower reaches of the Yangtze River, Eastern China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24:1703-1714 (in Chinese with English abstract).
- [50] 吴良士, 邹晓秋. 江西城门山铜矿床 Re-Os 同位素年龄研究[J]. 矿床地质, 1997, 16:376-381.
Wu Liangshi, Zou Xiaoqiu. Re-Os isotopic age study on the Chengmenshan Cu deposit in Jiangxi Province [J]. Mineral Deposits, 1997, 16:376-381(in Chinese with English abstract).
- [51] 毛景文, 胡瑞忠, 陈毓川, 等. 大规模成矿作用与大型矿集区[M]. 北京:地质出版社, 2006, I-VII.
Mao Jingwen, Hu Ruizhong, Chen Yuchuan, et al. Large scale ore forming events and large ore dense areas [J]. Beijing:Geological Publishing House, 2006, I-VII(in Chinese).
- [52] Zhai Yusheng, Xiong YY, Yao Shuzhen, et al. Metallogeny of copper and iron deposits in the Eastern Yangtze Carton, east - central China [J]. Ore Geology Reviews, 1996, 11:229-248.
- [53] 王元龙, 张旗, 王焰. 宁芜火山岩的地球化学特征及其意义[J]. 岩石学报, 2001, 17(4):565-575.
Wang Yuanlong, Zhang Qi, Wang Yan. Geochemical characteristics of volcanic rocks from Ningwu area, and its significance [J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17:565-575 (in Chinese with English abstract).
- [54] 马昌前, 杨坤光, 唐仲华, 等. 花岗岩类岩浆动力学—理论方法及鄂东花岗岩类例析 [M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1994:1-260.
Ma Changqian, Yang Kunguang, Tang Zhonghua, et al. Magma dynamics of granitoids—Theory, method and a case study of the eastern Hubei granitoids [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1994:1-260(in Chinese with English abstract).
- [55] 杜杨松, 李炫具. 安徽铜陵岩浆岩中辉长质岩石包体的发现及其地质意义[J]. 高校地质学报, 2004, 10(3):332-342.
Du Yangsong, Lee Hyun-koo. Discovery of gabbroic xenoliths from early Cretaceous intrusions in Tongling, Anhui Province, China and its geologic significance [J]. Geologica Journal of China University, 2004, 10(3):332-342(in Chinese with English abstract).
- [56] 杜杨松, 秦新龙, 李炫具. 安徽铜陵地区中生代幔源岩浆底侵作用—来自矿物巨晶和岩石包体的证据 [J]. 岩石矿物学杂志, 2004c, 23(2):109-116.
Du Yangsong, Qin Xinlong, Lee Hyun-koo. Mesozoic mantle-derived magma underplating in Tongling, Anhui Province: Evidence from megacrysts and xenoliths [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2004, 23 (2):109-116 (in Chinese with English abstract).
- [57] 田世洪, 杜杨松, 秦新龙, 等. 安徽铜陵地区中酸性侵入岩及其岩石包体中的矿物包裹体研究[M]. 地学前缘, 2001, 8(4):422-428.
Tian shihong, Du Yangsong, Qin Xinlong, et al. Mineral inclusion studies of the intermediate -acid intrusive rocks and their rock enclaves in Tongling Area, Anhui Province [J]. Earth Science Frontier, 2001, 8(4):422-428(in Chinese with English abstract).
- [58] Petford N, Gallagher K. Partial melting of mafic (amphibiotic) lower cruster by periodic influx of basaltic magma [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2001, 193(3/4):483-499.

^{40}Ar – ^{39}Ar biotite and hornblende dating of Tieshan quartz diorite related to the skarn-type deposits in Daye area, Hubei Province, and its geological significance

QU Hong-ying^{1,2,3}, PEI Rong-fu², YAO Lei⁴, WANG Yong-lei^{2,3}, WANG Hao-lin^{2,3}

(1. College of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xian 710064, Shaanxi, China; 2. MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 4. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The Middle–Lower Yangtze River belt is one of the large-scale Mesozoic metallogenic areas in eastern China and also an important Cu–Fe–Au–Mo metallogenic belt in eastern China. The polymetallic Cu–Fe deposits in southeast Hubei area constitute an important part of the Yangtze River belt; nevertheless, studies of rock body chronology and thermal chronology remain very insufficient. Biotite and hornblende of the Tieshan rock body related to the skarn-type Fe deposits in Daye of Hubei Province yield ^{40}Ar – ^{39}Ar plateau ages of 133.0 ± 1.0 Ma and 137.0 ± 2.0 Ma and isochronal ages of 133.4 ± 1.5 Ma and 137.3 ± 1.6 Ma respectively. An integrated study of available petrological, geochemical and rock body U–Pb ages led the authors to believe that the rock body ages of southeast Hubei area are the same as the ages of the Yangtze River belt, and the skarn-type Fe mineralization in Daye of Hubei Province was associated with lithospheric extension and thinning during the Late Mesozoic in eastern China. Meanwhile, utilizing the rock body cooling rate theory (the mineralization scale retro-correlation to the rock body cooling rate), the authors found that, although the cooling rate of the Tieshan rock body is rather higher in comparison with the cooling rates of the main mineralization rock bodies in Tongling, small shallow plutons could be complemented by ore-forming fluids and heat energy of deep magma chamber.

Key words: ^{40}Ar – ^{39}Ar age; Tieshan pluton; cooling rate; petrogenesis and mineralization; Daye, Hubei Province

About the first author: QU Hong-ying, female, born in 1978, assistant researcher, doctor, mainly engages in the study of mineral deposits and ore resources survey and exploration; E-mail: hongyingqu@126.com.