

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

鄂东南铁铜矿集区铜山口铜(钼)矿床 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学及对区域成矿作用的指示

赵新福¹⁾, 李建威^{1,2)}, 马昌前^{2,3)}

1) 中国地质大学资源学院, 武汉, 430074; 2) 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉, 430074; 3) 中国地质大学地球科学学院, 武汉, 430074

内容提要: 铜山口铜-钼矿床发育有夕卡岩型和斑岩型两类矿化, 是鄂东南矿集区内典型的夕卡岩-斑岩复合型矿床。成矿作用与铜山口花岗闪长斑岩岩株和大冶群碳酸盐岩有关, 矿体主要沿两者的接触带分布。本文利用激光阶段加热技术分别对两类矿化有关的蚀变矿物金云母和绢云母进行 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄测定。结果表明, 铜山口矿区经历了两次蚀变-矿化事件: 铜山口矿床成矿作用发生于约 143 ± 0.3 Ma, 而矿区东南缘的牛鼻峰石英二长斑岩的热液蚀变发生于约129 Ma。牛鼻峰石英二长斑岩的侵入及蚀变对铜山口矿床斑岩型矿化的部分地段产生热扰动, 导致绢云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄比实际矿化蚀变年龄偏年轻。铜山口矿区两次蚀变-矿化年龄分别与长江中下游成矿带早晚两期成岩成矿事件(145~133 Ma 和130~120 Ma)一致。岩石圈伸展及幔源玄武质岩浆底侵作用可能是区域上大规模岩浆活动与成矿作用的深部地球动力学因素。

关键词: 铜山口铜-钼矿床; $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄; 鄂东南矿集区; 成矿时代; 底侵作用

鄂东南铁铜多金属矿集区是长江中下游铁铜成矿带的重要组成部分, 也是我国重要的铁铜多金属成矿区之一。矿集区内的矿产以铁和铜为主, 其次有钼、金、铅、钨、锌等。其中, 程潮铁矿、铁山铁铜矿、铜录山铜铁矿和封山洞铜钼矿等大型矿床, 品位富, 易选冶, 是我国重要的铁铜生产基地之一(舒全安等, 1992)。该区大规模的成矿作用和成矿规律研究集中于20世纪70~80年代, 20世纪90年代以后仅开展过零星的工作(舒全安等, 1992)。成岩成矿年代学一直是鄂东南地区矿床成因和区域成矿研究的重要内容之一。前人主要利用 K-Ar 法和 Rb-Sr 等时线法对该区主要含矿岩体进行了年龄测定, 并近似的用来限定成矿年龄(舒全安等, 1992; 周王均等, 1994; Pan et al., 1999)。由于 K-Ar 法本身的局限性, 早期的成岩、成矿年龄分布比较离散, 同一个岩体或矿床经常出现多个年龄数据, 相互之间有时相差几十个百万年, 如殷祖岩体的黑云母 K-Ar 年龄介于150~190 Ma; 灵乡岩体的黑云母、角闪石和全岩 K-Ar 年龄分别为140 Ma、101 Ma 和127 Ma, 而黑云母的 Rb-Sr 等时线年龄则为157 Ma(舒全安等, 1992)。这些年龄数据有的可能代表了真实的成岩成矿年龄,

有的可能没有地质意义。由于文献中缺少样品处理和分析方法的介绍, 目前很难对这些年龄数据的质量和可靠性做出客观评价, 这种状况制约了对区内成岩成矿时代的精确限定。

铜山口矿床是鄂东南地区典型的斑岩和夕卡岩复合型矿床, 成矿作用与铜山口花岗闪长斑岩和三叠系大冶群碳酸盐岩有关, 斑岩体内部以典型的斑岩型矿化为特征, 在斑岩体与碳酸盐岩的接触带则出现典型的夕卡岩型矿化。宜昌地质矿产研究所的研究人员于1976年和1981年对铜山口花岗闪长斑岩开展过 K-Ar 测年, 4个样品给出的年龄分别为127 Ma(全岩), 131 Ma(全岩), 132 Ma(全岩)和146 Ma(黑云母)(舒全安等, 1992; 黄崇轲等, 2001), 迄今尚没有人进行过直接的成矿年龄测定。本文采用激光阶段加热技术分别对铜山口矿床与夕卡岩型矿化有关的蚀变矿物金云母和与斑岩型矿化有关的蚀变矿物绢云母进行 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄测定, 以直接限定成矿年龄。与 K-Ar 法相比, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 激光阶段加热分析具有以下优点: ① 能有效识别样品中是否存在过剩氩; ② 可以判断样品是否发生过氩丢失, 如果样品仅发生过部分氩丢失, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 激光阶段加热分析

注: 本文为国家自然科学基金重点项目(编号 40334037)和创新研究群体科学基金项目(编号 40521001)联合资助成果。

收稿日期: 2005-11-09; 改回日期: 2006-04-13; 责任编辑: 刘淑春。

作者简介: 赵新福, 男, 1982年生。硕士研究生, 矿床学专业。通讯地址: 430074, 湖北省武汉市, 中国地质大学(武汉)资源学院; 电话: 027-67883061; Email: zhaoxf-cug@163.com。

仍然可以给出样品的真实年龄;③ 可判断样品中是否有其他矿物的混染。如果混染的矿物与待测定的矿物具有明显不同的热稳定性,则通过精细的阶段加热分析有可能获得有意义的年龄信息;④ 对绢云母、伊利石等微细矿物, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 激光阶段加热分析可以识别出样品在反应堆中接受快中子照射时是否发生过 ^{39}Ar 的发射;⑤ 可对样品进行原位分析,分辨率很高;⑥ 需要的样品量很少,可对微米级的单矿物进行直接定年(McDougall et al., 1988; Vasconcelos, 1999)。以铜山口矿床成矿年龄为基础,结合鄂东南和长江中下游地区典型矿床已有可靠年代学资料,笔者进一步总结和探讨区域大规模成矿作用的时限及其地球动力学背景。

1 区域地质背景

鄂东南矿集区地处扬子地台北缘,毗邻大别造山带,巨型郧庐断裂从其东侧通过(图1)。区内寒武系至第四系地层广泛出露,但缺失中、下泥盆统和上

侏罗统。古生界地层主要为浅海相的碳酸盐岩、砂页岩、砂岩等。中生界地层分布最广,其中三叠系地层是区域内生矿床的主要成矿围岩。下三叠统大冶群为一套碳酸盐岩组合,自下而上分为7段,其中4~6段地层多与中酸性侵入岩接触或在岩体内以捕虏体的形式产出,是成矿的主要岩性段。三叠系中上统逐渐由碳酸盐岩过渡为泥岩、砂页岩、粉砂岩等。侏罗系地层分布较少,为以内陆盆地沉积为主的一套砂页岩建造。下白垩统是一套陆相火山岩系,自下而上分为马架山组、灵乡组、大寺组和太和组,上白垩统至第三系地层分布于断陷盆地中,属于山间盆地相砂砾岩堆积(舒全安等,1992)。区内地质构造复杂,褶皱和断裂多为印支和燕山期构造活动的产物,主要有NW—WNW和NE—ENE向两组(图1)。燕山期岩浆活动强烈,既有岩浆侵入,又有火山喷发,并显示多期次活动的特点。侵入岩体自北向南依次有鄂城、铁山、金山店、灵乡、阳新、殷祖六大岩体和铜录山、铜山口、封山洞等30多个小岩株,岩性主要为

(石英)闪长岩和花岗闪长(斑)岩(图1)。火山岩主要分布于灵乡—太和—保安和黄石花湖火山盆地中,为一套玄武岩—安山岩—英安岩—流纹岩的岩性组合,火山活动由早到晚表现为中基性向中酸性演化的特点(舒全安等,1992)。

2 矿床地质特征

矿区范围有二叠系到第四系的地层出露,其中与成矿关系密切的是下三叠统大冶群4~6段(图2)。由铜山口岩体侵位所引起的热变质作用使大冶群灰岩和白云岩发生重结晶,其中大冶群4段(T_4^1)和大冶群6段(T_6^1)主要为方解石大理岩夹结晶白云岩,大冶群5段(T_5^1)为白云质大理岩。矿区主要的褶皱构造为近EW向的天台山倒转向斜。矿区内有6条断层($F_1 \sim F_6$),其中 F_2 规模最大,并被后期的岩脉充填(图2)。

野外观察表明,铜山口地区经历了多次岩浆侵位,依次形成了花岗闪长斑岩岩株、花岗闪长斑岩岩脉(充填于 F_2 断层)、石英二长斑岩

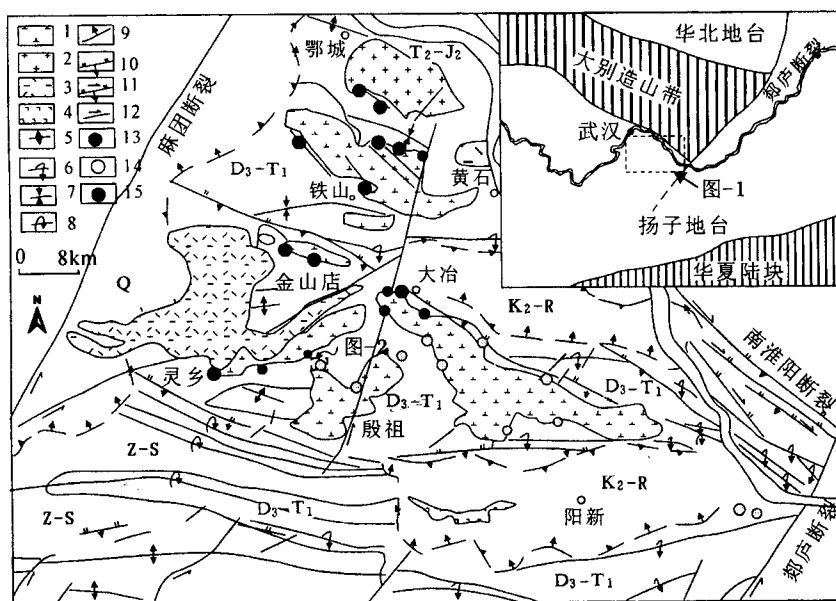


图1 鄂东南矿集区地质矿产简图(据舒全安等,1992,略有修改)

Fig. 1 Simplified geologic map of southeastern Hubei. Also shows the major ore deposits and their spatial relationship to the intrusive rocks (modified from Shu et al., 1992)

1—闪长岩类;2—花岗岩;3—早白垩世火山岩;4—玄武岩;5—背斜;6—倒转背斜;7—向斜;8—倒转向斜;9—断陷盆地;10—逆断层;11—压扭性断层;12—走滑断层;13—铁矿床;14—铜(钼、金)矿床;15—铁-铜矿床

1—Granodiorite; 2—granite; 3—Early Cretaceous volcanics; 4—basalts; 5—anticline; 6—invtrted anticline; 7—syncline; 8—invtrted syncline; 9—basin; 10—reversed fault; 11—compresso-shear fault; 12—strike-slip fault; 13—iron deposits; 14—copper (molybdenum, gold) deposits; 15—iron-copper deposits

岩筒(位于牛鼻峰)和花岗细晶岩岩脉。与矿化关系密切的花岗闪长斑岩岩株是岩体的主体,平面上略呈北西向的椭圆形,中心直径500~600 m,出露面积0.33 km²(图2)(鄂东地质队,1965^①;吕新彪等,1992)。花岗闪长斑岩具有以下地球化学特点(王强等,2004):SiO₂含量中等(65.0%~65.82%),Al₂O₃含量高(>14.79%),高Sr(>860×10⁻⁶)和高Sr/Y比值(>67),低Y和Yb(分别<12.9×10⁻⁶和<1.2×10⁻⁶),在Sr/Y-Y关系图上均落入埃达克质岩的范围(Defant et al., 1990)。F₂断层中的花岗闪长斑岩岩脉与铜山口花岗闪长斑岩岩株呈侵入接触,表明前者形成时间要晚于后者。矿区东南部的牛鼻峰石英二长斑岩中可见矿化的花岗闪长斑岩角砾,说明石英二长斑岩的侵位同样晚于铜山口花岗闪长斑岩岩株。花岗细晶岩规模很小,成脉状分布于石英二长斑岩中。F₂断层中的岩脉和牛鼻峰岩筒也

发生了一定程度的蚀变和矿化,但因规模太小而不具有工业意义。

2.1 矿化特征

铜山口矿床由6个矿体组成,其中I号IV号、矿体产于岩体内接触带中,近岩体处为斑岩型矿化,向外逐渐过渡到夕卡岩型矿化,其他矿体均为隐伏夕卡岩型矿体。I号矿体规模最大,占全区总储量的60%,矿体形态近似筒状,厚10~40 m,最厚达100 m,斜深300~600 m。II号矿体和V号矿体成层状赋存于围岩的层间破碎带中;III号矿体是由岩体侵位过程中捕获的碳酸盐岩地层经夕卡岩化形成^①。矿体的空间分布和产状清楚地表明,接触带是最重要的控矿构造和成矿部位(图2,3)。矿石结构以它形粒状结构、交代残余结构和半自形—自形粒状结构等为主。矿石构造主要为致密浸染状、细脉浸染状、脉状和块状构造等。常见金属矿物为黄铁矿、黄铜矿、斑铜矿、辉钼矿、磁铁矿、赤铁矿、闪锌矿、辉铜矿和黝铜矿。

2.2 热液蚀变

按蚀变矿物组合及形成机理,可将围岩蚀变分成两个系列:斑岩型蚀变系列及夕卡岩型蚀变系列。斑岩型蚀变主要发生在花岗闪长斑岩岩株内部,而接触带以及岩体中的围岩捕虏体(III号矿体)则发育典型的夕卡岩型蚀变。从岩体内部向外依次出现钾化带(钾长石+黑云母)、石英—绢云母化带(绢云母+石英)、夕卡岩带(石榴子石、透辉石、金云母等)和大理岩带(大理岩中发育有石榴子石脉)。牛鼻峰岩筒以发育强烈的黄铁绢英岩化为特征。

绢云母集合体可达0.5~1 cm,手标本上呈淡黄绿色,由花岗闪长斑岩的造岩矿物斜长石或钾长石蚀变而来,蚀变彻底,经常与黄铁矿、黄铜矿、辉钼矿和石英等共生(图4a,c)。夕卡岩蚀变带中的金云母有两种产状:①呈墨绿色,颗粒细小(<1~2 mm),与石榴子石、黄铜矿、赤铁矿、黄铁矿等共生,组成块状集合体(图4d);②呈浅墨绿色,云母片直径很大(可达数厘米),呈块状或脉状产出,一般与绿泥石共生(图4b)。本次分析的金云母样品为第一类。

3 样品处理及分析方法

本次研究选取夕卡岩型矿化蚀变带中的金云母(TSK-25)和斑岩型矿化蚀变带中的绢云母(TSK-02和TSK-11)共3个样品进行⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄测定。所有样品均采自露天采坑(取样位置如图2所示)。样品TSK-02取自花岗闪长斑岩体内部的石英—绢云

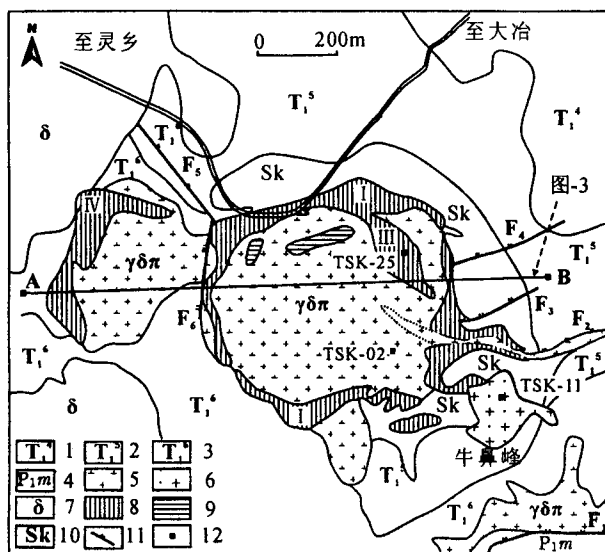


图2 铜山口铜-钼矿床地质图(据薛迪康等,1997)

Fig. 2 Geological map of the Tongshankou Cu-Mo deposit (after Xue et al., 1997)

1—三叠系大冶群第4段;2—大冶群第5段;3—大冶群第6段;4—下二叠统茅口组;5—花岗闪长斑岩;6—石英二长斑岩;7—石英闪长岩;8—铜矿体;9—钼矿体;10—夕卡岩;11—断层;12—采样位置。I、II、IV—为矿体编号;A—B—为图3的剖面线位置

1—Limestones of unit 4 from the Triassic Daye Formation; 2—dolomite of unit 5 from the Daye Formation; 3—limestones of unit 6 from the Daye Formation; 4—Lower Permian Maokou Formation; 5—granodioritic porphyry; 6—quartz monzonite porphyry; 7—quartz diorite; 8—copper orebody; 9—molybdenum orebody; 10—skarn; 11—faults; 12—sample locations. I, II, IV—means orebody numbers; A—B—denotes the prospecting line in Fig. 3

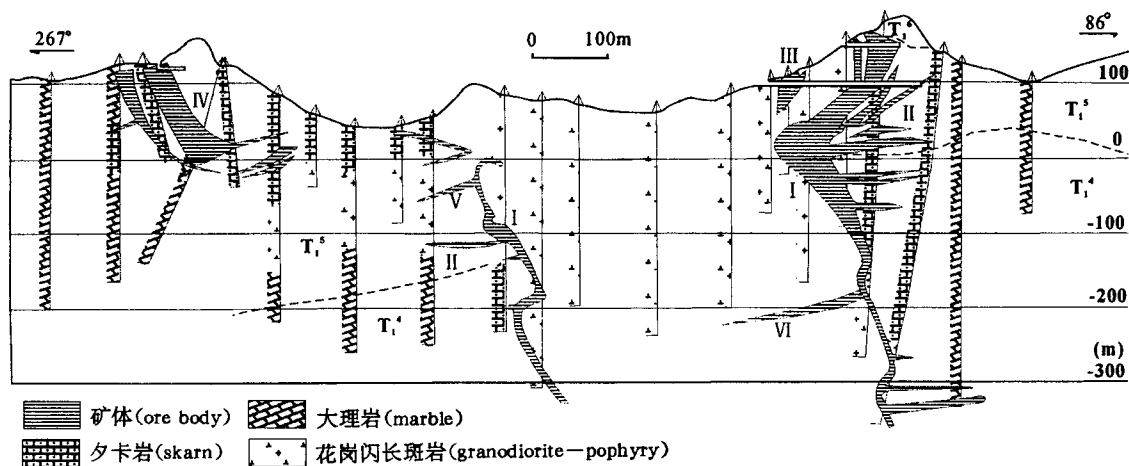


图3 铜山口矿床9号勘探线地质剖面图(据铜山口矿床1965年勘探报告^①)

Fig. 3 Geologic section of the No. 9 exploration line showing the occurrences of ore bodies (modified from the prospecting report of Tongshankou deposit in 1965^①)

母化带,TSK-11取自牛鼻峰岩筒的黄铁绢英岩。

首先将样品磨制成光薄片,在光学显微镜下对其进行详细的岩石学研究,查明样品的矿物组成、共生组合及绢云母矿物的纯度和大小,以了解所采集样品是否适合于 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学研究。然后将样品进行破碎,筛选出大小适中的部分(0.2~3 mm),洗净烘干后,在双目镜下挑选出纯的绢云母集合体颗粒和金云母单矿物。将绢云母集合体在玛瑙钵中研磨至小于200目的粉末,在中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室利用D/MAX III B粉晶衍射仪进行X-射线粉晶衍射分析,以进一步确定样品的纯度。然后将样品与用于中子通量监测的标样(Fish Canyon 透长石,年龄为28.02 Ma)一起装入照射碟中,用铝箔将照射碟包装好,在真空中封于硅玻璃管内,送往美国俄勒冈州立大学放射中心B-1 CLICIT反应堆中照射约14 h。照射后的样品冷却约四个月后,在澳大利亚昆士兰大学地球科学系利用MAP 215~50稀有气体同位素质谱仪进行激光阶段加热 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素分析,每次测定未知样品之前都严格进行系统的本底分析。样品与标样的排列关系及详细的实验分析流程见Vasconcelos(1999)。用于同位素年龄计算的 ^{40}K 总衰变常数采用 $5.543 \times 10^{-10} \text{a}^{-1}$ (Steiger et al., 1977);中子照射过程中由Ca和K裂变所产生的同位素比值为: $(^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = (2.64 \pm 0.02) \times 10^{-4}$, $(^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = (7.04 \pm 0.06) \times 10^{-4}$, $(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{K}} = (8 \pm 3) \times 10^{-4}$ 。文中报道的年龄数据均为95%信度水平(2σ)。

4 实验结果

X-射线粉晶衍射结果表明(图5),样品TSK-11完全由绢云母组成,样品TSK-02也以绢云母为主,但可能含有微量未完全蚀变的斜长石残余,表明所挑选绢云母样品的纯度很高,可以用于Ar-Ar年代学研究。

各样品的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素分析结果列于表1中,相应的表观年龄谱和等时线年龄如图6所示。由图6可知,金云母样品(TSK-25)给出了很好的坪年龄 $143.0 \pm 0.3 \text{ Ma}$;8个连续加热阶段所产生的表观年龄在误差范围内完全一致,所释放的 ^{39}Ar 占 ^{39}Ar 总量的81.4%(图6a)。最初的两个加热阶段的表观年龄较坪年龄偏低且误差很大,这两个阶段所释放的氩气中放射性成因氩的百分比(图6a中的Rad.%)也较低,说明金云母矿物表面遭受了很轻微的氩丢失,同时有少量大气氩吸附在矿物晶体表面或混入矿物外层晶格。从表观年龄谱可知,该样品中不含过剩氩,也不存在岩浆矿物的污染,金云母形成以后没有遭受明显的热事件干扰,其氩同位素体系基本处于封闭状态。利用所有加热阶段产生的数据拟和出一条很好的反等时线,等时线年龄为 $143.6 \pm 0.3 \text{ Ma}$ (图6b),在误差范围内与坪年龄完全一致,证明分析结果可靠,即金云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 冷却年龄为143 Ma左右。根据反等时线在 $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 轴上的截距所计算的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 初始比值为 247 ± 4 ,比正常的大气氩比值(295.5)要小。这主要是因为构成坪

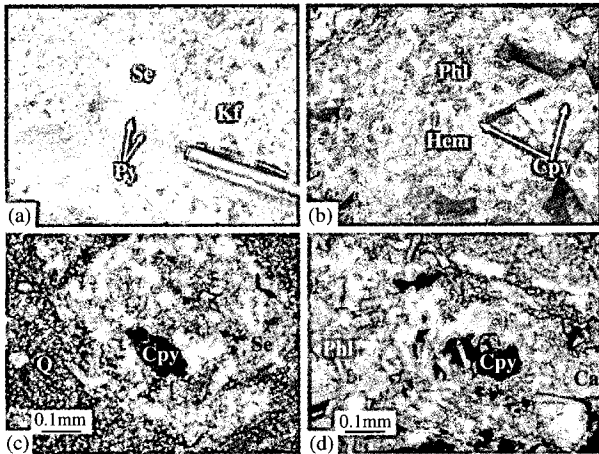


图4 蚀变的绢云母集合体,包裹有黄铁矿颗粒(a),典型的金云母夕卡岩,金云母呈脉状产出(共生矿物有赤铁矿和细脉状黄铜矿)(b),黄铜矿与石英和绢云母共生(正交偏光)(c),金云母与黄铜矿共生(偏光)(d)

Fig. 4 Photographs and photomicrographs showing mineralogy and texture of the alteration rocks. (a) aggregates of hydrothermal sericite intergrown with pyrite; (b) phlogopite-dominated skarn. Occurrence of phlogopite as veins indicates its hydrothermal origin. Phlogopite coexists with hematite and chalcopyrite; (c) intergrowth of chalcopyrite, quartz and sericite (cross-polarized); (d) coexisting phlogopite and chalcopyrite (plane polarized)

金属矿物与蚀变矿物紧密共生,表明两者近于同时形成。Se—绢云母,Py—黄铁矿,Kf—钾长石,Phl—金云母,Hem—赤铁矿,Cpy—黄铜矿,Q—石英,Ca—方解石

These texture relationships indicate that the alteration minerals are genetically related to copper mineralization, and dating of alteration minerals can provide reliable constraints on the timing of mineralization. Se—sericite; Py—pyrite; Kf—K-feldspar; Phl—phlogopite; Hem—hematite; Cpy—chalcopyrite; Q—quartz; Ca—calcite

年龄的8个加热阶段的放射性成因氩比例太高(大于96%,表1),使多数加热阶段的数据点位于 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 轴附近,导致拟合的反等时线在 $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 轴上的交点出现偏差(Kuiper, 2002)。牛鼻峰石英二长斑岩中的蚀变绢云母样品 TSK-11给出了 128.7 ± 0.4 Ma 的似坪年龄(两个连续加热阶段所释放的 ^{39}Ar 占全部加热阶段的70%,其表观年龄在误差范围内一致)。根据所有加热阶段计算的总气体年龄(integrated age,相当于 K-Ar 年龄)为 129.1 ± 0.5 Ma(图6c),在误差范围内与上述似坪年龄完全吻合。由于各阶段的表观年龄相差较大,且构成年龄坪的阶段数偏少,该样品未能拟和出等时线年龄。

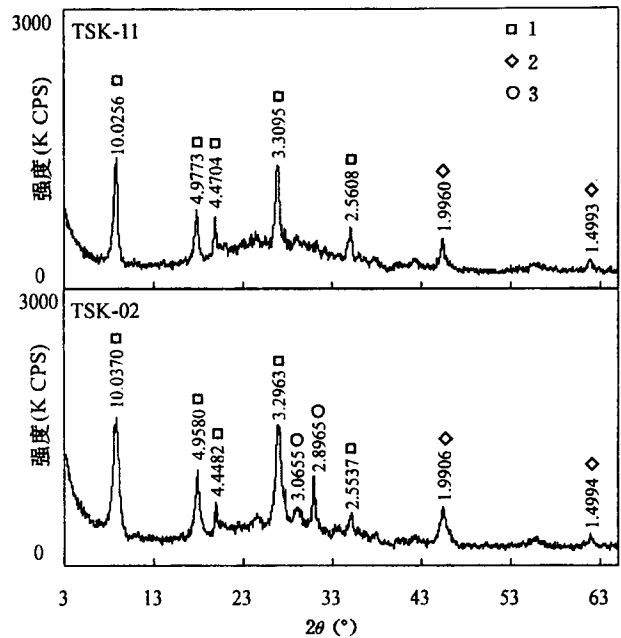


图5 绢云母样品 X-射线粉晶衍射图谱

Fig. 5 X-ray diffraction spectrum for the sericite samples

1—绢云母;2—白云母;3—斜长石

1—Sericite;2—muscovite;3—plagioclase

铜山口花岗闪长斑岩中的蚀变绢云母样品 TSK-02 没能给出坪年龄(图6d)。分析其表观年龄谱可知,前两个阶段释放的 ^{39}Ar 占有阶段释放总量的59%,所对应的表观年龄分别为141.5 Ma 和138 Ma,与金云母样品 TSK-25的坪年龄较为接近。第三个阶段的 ^{39}Ar 释放量占有阶段释放总量的31%,所对应的表观年龄为125 Ma,与牛鼻峰岩筒中蚀变绢云母的坪年龄相似。在三个样品总的最大概率年龄图上(图6e),也分别在142.7 Ma 和128.1 Ma处出现了最强的峰值。野外观察和地质分析说明,铜山口矿床内的斑岩型矿化和夕卡岩型矿化基本同时,因此与这两种矿化类型有关的绢云母和金云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄也应大体相同。结合矿化特征与 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄分析结果认为,绢云母样品 TSK-02前两个加热阶段的表观年龄接近斑岩型矿化的实际年龄,而第三个加热阶段的表观年龄反映后期热事件对蚀变绢云母氩同位素体系产生了一定程度的扰动,导致放射性成因氩同位素的部分丢失。这一热事件很可能是牛鼻峰岩筒的侵位及相关热液活动。最近我们对鄂东南地区王豹山铁矿床内的花岗二长岩和闪长玢岩进行激光剥蚀 ICP-MS 锆石 U-Pb 定年,获得132~122 Ma 的岩体结晶年龄,证明区域上同样存在这次热事件。

表 1 铜山口矿床绢云母和金云母氩同位素分析结果

Table 1 Analytical results of argon isotopes of alteration sericite and phlogopite at the Tongshankou deposit

样品和 阶段号	激光功率 (W)	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}(\%)$	$^{40}\text{Ar}^*$	^{39}Ar (Moles)	^{40}Ar (Moles)	^{40}Ar (nA)	表观年龄 (Ma)	± (Ma)
TSK-02 (参数 $J=0.003634\pm0.000023$)												
3639-01A	0.20	22.580	0.012	0.153	0.000	22.450	99.42	2.02E-14	4.56E-13	16.535	141.46	0.65
3639-01B	0.40	21.881	0.012	0.183	0.000	21.845	99.83	6.84E-14	1.50E-12	54.342	137.82	0.57
3639-01C	0.60	19.726	0.012	0.390	0.000	19.665	99.67	4.65E-14	9.17E-13	33.281	124.53	0.48
3639-01D	0.70	19.427	0.012	0.869	0.001	19.330	99.46	7.54E-15	1.47E-13	5.318	122.49	0.69
3639-01E	0.80	21.640	0.011	2.570	0.000	22.230	102.50	1.16E-15	2.50E-14	0.909	140.20	1.80
3639-01F	0.90	22.450	0.012	3.100	0.001	22.560	100.30	6.26E-16	1.41E-14	0.510	142.20	3.10
3639-01G	1.00	22.720	0.015	3.500	-0.003	23.820	104.60	5.71E-16	1.30E-14	0.471	149.80	3.20
3639-01H	1.10	21.920	0.008	5.900	0.000	23.500	106.60	2.34E-16	5.12E-15	0.186	147.70	7.00
3639-01I	1.20	23.360	0.008	6.200	0.000	24.560	104.70	4.29E-16	1.00E-14	0.363	154.20	4.20
3639-01J	1.30	23.050	0.015	4.600	0.003	22.750	98.40	6.48E-16	1.49E-14	0.542	143.30	2.90
3639-01K	1.50	22.720	0.012	0.000	0.000	22.520	99.18	2.24E-15	5.10E-14	1.849	141.90	1.10
3639-01L	2.00	22.550	0.013	0.620	0.001	22.380	99.21	2.40E-15	5.42E-14	1.967	141.00	1.10
3639-01M	3.50	21.900	0.008	2.900	0.000	23.180	105.60	5.16E-16	1.13E-14	0.410	145.90	3.20
TSK-11 (参数 $J=0.003634\pm0.000023$)												
3641-01A	0.20	23.610	0.012	0.080	0.001	23.280	98.59	7.89E-15	1.86E-13	6.761	146.50	0.85
3641-01B	0.40	20.528	0.012	0.076	0.000	20.449	99.61	4.49E-14	9.22E-13	33.474	129.32	0.50
3641-01C	0.60	20.281	0.012	0.065	0.000	20.245	99.82	6.49E-14	1.32E-12	47.750	128.07	0.52
3641-01D	0.70	18.964	0.012	0.165	0.000	18.849	99.38	2.08E-14	3.94E-13	14.297	119.53	0.53
3641-01E	0.80	20.310	0.013	0.470	0.000	20.240	99.64	6.69E-15	1.36E-13	4.930	128.07	0.76
3641-01F	0.90	22.330	0.013	3.980	0.003	21.900	97.80	1.38E-15	3.09E-14	1.122	138.20	1.80
3641-01G	1.00	23.040	0.015	2.800	0.004	22.080	95.70	5.49E-16	1.27E-14	0.459	139.30	3.50
3641-01H	1.10	23.050	0.013	2.160	0.000	23.600	102.20	7.40E-16	1.71E-14	0.619	148.40	2.70
3641-01I	1.20	21.540	0.012	1.990	0.001	21.500	99.69	2.47E-15	5.32E-14	1.929	135.70	1.10
3641-01J	1.30	23.900	0.009	2.100	0.000	26.000	108.70	2.29E-16	5.47E-15	0.199	163.00	7.70
3641-01K	1.50	21.540	0.019	11.300	0.006	20.880	96.20	4.06E-16	8.74E-15	0.317	131.90	4.20
3641-01L	2.00	22.250	0.013	0.270	0.001	21.960	98.70	5.91E-15	1.31E-13	4.770	138.53	0.86
3641-01M	3.50	21.530	0.014	0.340	0.001	21.170	98.30	1.65E-15	3.56E-14	1.291	133.70	1.40
TSK-25 (参数 $J=0.003632\pm0.000021$)												
3647-01A	0.20	80.080	0.055	1.600	0.234	11.200	14.00	1.57E-15	1.26E-13	4.557	71.90	8.00
3647-01B	0.40	39.740	0.025	0.660	0.070	19.060	47.95	3.98E-15	1.58E-13	5.733	120.80	2.90
3647-01C	0.60	27.110	0.015	0.000	0.016	22.450	82.81	9.91E-15	2.69E-13	9.746	141.40	1.10
3647-01D	0.70	24.420	0.013	0.145	0.005	22.930	93.89	1.20E-14	2.94E-13	10.653	144.30	0.79
3647-01E	0.80	23.620	0.012	0.027	0.003	22.730	96.25	1.72E-14	4.06E-13	14.736	143.13	0.71
3647-01F	0.90	23.467	0.013	0.099	0.003	22.730	96.87	2.74E-14	6.43E-13	23.334	143.12	0.62
3647-01G	1.00	23.270	0.012	0.167	0.002	22.630	97.24	2.27E-14	5.29E-13	19.210	142.52	0.65
647-01H	1.10	23.180	0.012	0.259	0.002	22.580	97.43	2.11E-14	4.89E-13	17.736	142.23	0.65
3647-01I	1.20	23.220	0.013	0.341	0.001	22.880	98.53	1.44E-14	3.34E-13	12.115	144.02	0.76
3647-01J	1.30	23.180	0.012	0.748	0.001	22.840	98.45	1.53E-14	3.56E-13	12.904	143.75	0.66
3647-01K	1.50	23.055	0.012	0.508	0.002	22.660	98.25	2.09E-14	4.83E-13	17.518	142.67	0.61
3647-01L	2.00	22.970	0.013	1.742	0.002	22.640	98.44	2.05E-14	4.71E-13	17.075	142.56	0.66
3647-01M	3.50	22.310	0.013	2.844	0.002	22.060	98.70	8.98E-15	2.00E-13	7.268	139.04	0.76

5 讨论

5.1 铜山口矿床的成矿时代

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄一般代表所测定矿物的冷却年龄(McDougall et al., 1988)。氩同位素体系在金云母和绢云母中的封闭温度为350~300℃(McDougall et al., 1988),因此,本次研究获得的坪年龄分别代

表了所研究样品冷却到350~300℃以下的年龄。铜山口矿床流体包裹体的显微测温结果表明(吕新彪等,1992;方可栋,1994;夏林等,2003),与绢云母共生的石英矿物中原生流体包裹体的均一温度多数介于280~360℃,十分接近绢云母/金云母中氩同位素的封闭温度,因此本文获得的绢云母和金云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄同时又代表了这些蚀变矿物的结晶年龄

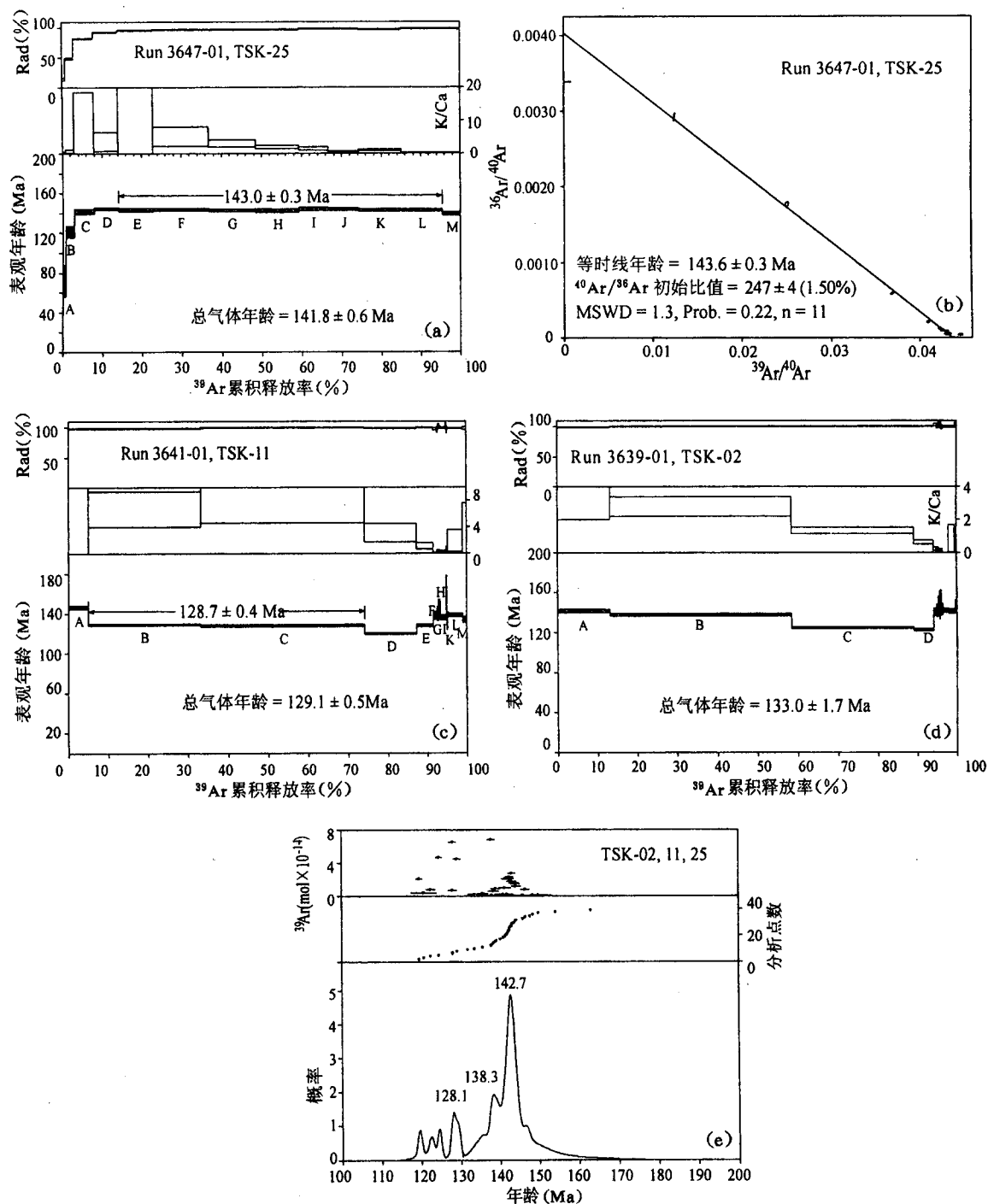


图 6 (a), (c), (d) 分别为 TSK-25, TSK-11 和 TSK-02 的表观年龄谱, (b) 为 TSK-25 的反等时线图, (e) 为三个样品共 39 个加热阶段的表观年龄概率分布曲线

Fig. 6 Step-heating spectra of samples TSK-25 (a), TSK-11 (c), and TSK-02 (d). Also shows the isochron of sample TSK-25 (b). The probability density plot (ideogram) obtained by 39 apparent ages from the three samples reveals two peaks of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages at ca. 143 Ma and 128 Ma, respectively (e)

(即冷却年龄与矿物结晶年龄一致)。在铜山口矿床, 绢云母和金云母是岩浆热液与斑岩体或围岩发生相互作用的产物; 它们分别与斑岩型矿化和夕卡岩型矿化的矿石矿物黄铜矿、黄铁矿、辉钼矿等紧密共生

(图 4a, c, d), 因此金云母和绢云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄可以解释为铜山口矿床的热液蚀变和矿化年龄。由于斑岩铜矿的蚀变和矿化起源于斑岩岩浆结晶过程中释放出的流体, 其年龄应接近或略小于斑岩体的

侵位年龄,因而,斑岩型矿化的年龄也可近似看作岩体的侵位年龄(Quang et al., 2003; McInnes et al., 2005; Pollard et al., 2005)。

绢云母样品 TSK-11 的坪年龄 128.7 ± 0.4 Ma 代表了牛鼻峰石英二长斑岩的蚀变/矿化年龄。牛鼻峰岩筒的绢云母化十分强烈,斜长石和钾长石斑晶均完全蚀变成绢云母。而牛鼻峰岩筒是矿区范围内最后一次较大规模的岩浆活动,这种强烈的热液蚀变应该与牛鼻峰石英二长斑岩结晶过程中分凝出的岩浆流体有关,故而其蚀变年龄可近似代表岩筒的侵位年龄。

综上所述,铜山口地区至少经历了两次热液蚀变/矿化。早期热液蚀变发生于 143 Ma 左右,并形成铜山口花岗闪长斑岩中的夕卡岩型和斑岩型矿化。大约 129 Ma 左右,牛鼻峰石英二长斑岩在矿区东南方向侵位,随即发生强烈的黄铁绢英岩化蚀变及微弱的铜矿化。晚期热液蚀变对铜山口矿床的部分地段(主要是离牛鼻峰岩筒较近的东南区域)产生一定程度的热扰动,致使这部分地段样品(如 TSK-02)所记录的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄偏年轻。

5.2 鄂东南矿集区及长江中下游晚中生代巨量岩浆活动与大规模成矿

宜昌地质所曾测得与铜山口矿床相隔仅几公里、产于灵乡岩体中的大广山和脑窑铁矿金云母 K-Ar 年龄分别为 144 Ma 和 139 Ma (引自舒全安, 1992)。最近,李建威等(未发表资料)对鄂东南 5 个典型夕卡岩矿床的矿石矿物辉钼矿进行 Re-Os 定年, 11 个样品的 Re-Os 模式年龄介于 144~135 Ma, 等时线年龄为 141 Ma。Re-Os 同位素定年是目前唯一成熟的、对矿石矿物直接进行年龄测定的方法。由于辉钼矿中 Re-Os 同位素的封闭温度很高(一般大于 $500\sim 600^\circ\text{C}$; Suzuki et al., 1996), 因而其中的放射性成因钼不易受后期构造—热事件的影响, 能够更好地记录成矿年龄(Raith et al., 2000)。上述辉钼矿 Re-Os 年龄与铜山口矿床夕卡岩型矿石的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄一致, 再次证明本次分析结果的可靠性。结合前人获得的某些较精确的蚀变岩 K-Ar 年龄认为, 鄂东南地区晚中生代大规模成矿作用发生于早白垩世 144~135 Ma。

地质分析表明, 鄂东南地区几乎所有矿床都与中酸性侵入岩有关。20 世纪 70~80 年代积累的岩体年龄数据虽然比较分散, 但多数仍集中在 145~115 Ma 之间(图 7)。最新的锆石 SHRIMP U-Pb 和 LA-ICPMS U-Pb 定年结果发现, 该区主要含矿岩体(如

铁山、阳新、灵乡等)的侵位时代为 143~135 Ma (李建威, 未发表资料), 与周珣若等(1994)所测定的阳新和铁山岩体角闪石 Ar-Ar 年龄较为接近。因此可以认为, 研究区强烈的岩浆侵位与大规模成矿作用在时间上完全一致, 均集中发生于白垩纪早期 8~10 Ma 的时间内。早白垩世中晚期, 研究区岩浆侵入活动趋于平息, 取而代之的是强烈的火山喷发, 形成一套基性—中性—酸性喷出岩岩石组合。火山岩的 K-Ar 年龄主要分布在 130~95 Ma (图 7), 与长江中下游的庐枞和宁芜地区火山活动的时间基本一致(刘洪等, 2002; 王元龙等, 2002; 张旗等, 2003)。

近年来对长江中下游其他地区(主要是铜陵、安庆、庐枞和宁芜地区)精确的年代学(锆石 SHRIMP U-Pb 法和 LA-ICPMS U-Pb 法, 单颗粒蚀变矿物激光阶段加热 Ar-Ar 法, 矿石矿物 Re-Os 法)研究表明, 这些地区的大规模岩浆活动与成矿作用集中于 145~120 Ma (图 8)。进一步分析发现, 长江中下游地区成岩成矿大致可以分成两个阶段(图 8): 第一阶段为 145~133 Ma, 岩浆活动主要表现为中酸性岩和少量基性岩(如铜陵地区的辉长岩)的侵位, 形成的矿床类型主要为夕卡岩型、斑岩型及少量层控热液型; 第二阶段为 130~120 Ma, 主要发育火山岩、潜火山岩以及碱性侵入岩(正长岩、石英正长斑岩等), 对应的矿床类型多为玢岩型铁矿(如鄂东南的王豹山铁矿及宁芜地区的陶村和梅山铁矿; 舒全安等, 1992; 余金杰等, 2002)以及花岗岩型铀矿(如庐

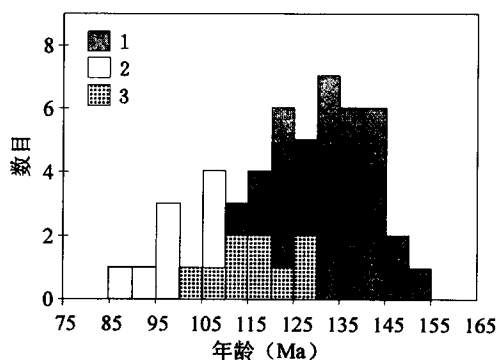


图 7 鄂东南矿集区岩浆岩年龄分布直方图[数据来自舒全安等(1992); 周珣若等(1994); Pan 等(1999)]

Fig. 7 Histogram of age data of the magmatic rocks in southeastern Hubei, central China (age data from Shu et al., 1992; Zhou et al., 1994; Pan et al., 1999)

1—侵入岩; 2—火山岩; 3—侵入岩+火山岩

1—Intrusive rock; 2—volcanic rock; 3—intrusive rock + volcanic rock

枞地区大龙山正长岩中的铀矿床;Zhao et al., 2004),但矿床的数量和规模较第一期大大减小。与此相对应的是,区域上主要矿床的年龄也大致可以分成145~135 Ma和126~122 Ma两组(图8)。显然,区域岩浆活动与成矿作用具有密切的时间、空间和成因联系。

综上所述,鄂东南矿集区与长江中下游成矿带其他地区大规模岩浆活动和成矿作用(夕卡岩型、斑岩型、层控热液型)的时间几乎完全一致,均集中发生于145~133 Ma;一些潜火山岩、碱性岩、大量火山岩及与其相伴的玢岩型铁矿、花岗岩型铀矿形成于130~120 Ma期间。早白垩世中期至晚白垩世(120~95 Ma),虽然还有一定程度的火山喷发,但迄今为止还没有发现与之有关的工业矿化。长江中下游成矿带不同矿集区内岩浆活动与成矿作用近于同时发生的事实表明它们具有统一的地球动力学背景。

5.3 成矿动力学背景

鄂东南地区和铜陵地区的中酸性侵入岩中经常发育有中基性的岩石包体(马昌前等,1994;杜杨松等,2004a,2004b,2004c),表明在中酸性岩浆侵位时普遍存在基性岩浆的活动。这些包体大致可以分为角闪石、辉石堆积岩(晶)包体和具有岩浆混合特征的微粒闪长质包体两类(Wu et al., 2000;杜杨松等,2004a,2004c;徐夕生等,2004)。铜陵地区微粒闪长质包体中大量针状磷灰石的出现意味着明显的岩

浆混合(田世洪等,2001;杜杨松等,2004b)。徐夕生等(2004)对铜陵地区铜官山石英闪长岩及其中的微粒闪长质包体进行了精确的LA-ICP-MS锆石定年,证明此类岩石包体与寄主岩的结晶年龄完全相同(137.5 Ma),进一步支持岩浆混合在上述地区中酸性岩浆活动过程中扮演着重要作用。矿物温度计计算和熔融包裹体的显微测温学结果表明,鄂东南和铜陵地区许多中基性包体(如角闪闪长岩、角闪辉长岩)与中酸性寄主岩(花岗闪长岩、石英二长闪长岩等)的母岩浆温度高达1100~1280℃以上(舒全安等,1992;田世洪等,2001)。结合该区已有的地球化学和同位素研究成果认为(Chen et al., 2001;王元龙,2001;刘洪等,2002),如此高温的岩浆很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(Petford et al., 2001),这很可能是长江中下游地区晚中生代大规模中酸性岩浆活动的重要控制因素。最近完成的深地震反射剖面清晰地揭示出铜陵地区的下地壳普遍存在似层状强反射层,目前认为这一强反射层是由于基性或超基性岩浆底侵引起的(吕庆田等,2004)。

近年来,在长江中下游的鄂东南、铜陵、安庆、庐枞和宁镇等地,相继发现了一系列具有埃达克岩地球化学特征的中酸性侵入岩(Xu et al., 2002;王强等,2003,2004;汪洋等,2004)。多数人将这些埃达克质侵入岩的成因解释为拆沉下地壳(Xu et al.,

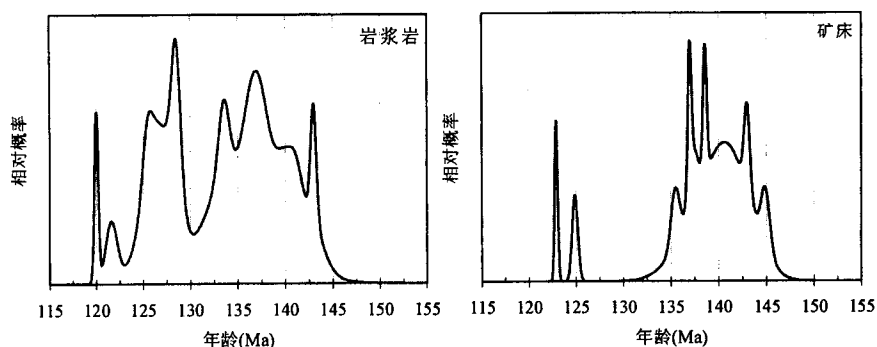


图8 长江中下游地区典型岩体及矿床的年龄分布概率曲线(年龄数据来自陈江峰等,1991,2003;徐祥等,1994;周珣若等,1994;吴才来等,1996;吴良士等,1997;傅斌等,1997;余金杰等,2002;张旗等,2003;Sun et al., 2003; Zhao et al., 2004; Wang et al., in press; 毛景文等,2004;徐夕生等,2004;曾普胜等,2004;蒙义峰等,2004;王彦斌等,2004a,2004b,2004c及李建威等未发表资料)

Fig. 8 Probability diagram of age data of the magmatic rocks and ore deposits in the middle and lower reaches of Yangtze metallogenic belt (age data after Chen et al., 1991, 2003; Xu et al., 1994; Zhou et al., 1994; Wu et al., 1996; Fu et al., 1997; Wu et al., 1997; Yu et al., 2002; Zhang et al., 2003; Sun et al., 2003; Zhao et al., 2004; Wang et al., in press; Mao et al., 2004; Xu et al., 2004; Zeng et al., 2004; Meng et al., 2004; Wang et al., 2004a, 2004b, 2004c and some unpublished data from Li et al.)

2002; Wang et al., in press)或加厚下地壳(王强等, 2001, 2004)的部分熔融。按照上述埃达克质岩的成因模式, 岩石圈伸展减薄与玄武质岩浆底侵及下地壳部分熔融应当互为因果。这与同位素地球化学数据揭示的本区岩浆岩起源于富集地幔的认识一致(Chen et al., 2001; Wang et al., in press)。因此, 岩石圈尺度的伸展是长江中下游地区地幔岩石部分熔融和大量玄武质岩浆底侵的重要因素。从图9可以看出, 长江中下游成矿带主要金属矿床的产出位置正好是区域上地壳厚度最薄的地方, 反映岩石圈伸展

减薄与大规模成矿作用之间的密切联系。伸展作用可能在早白垩世中期(130~120 Ma)达到高峰, 长江中下游地区成为典型的陆内拉张环境, 形成前人提出的长江中下游凹陷带(常印佛等, 1991; 翟裕生等, 1992)。这也为同一时期大量橄榄安粗岩系火山岩、碱性岩(正长岩)及一些辉长岩的侵入所证明(徐祥, 1994; 王元龙等, 2001; 刘洪等, 2002; Wang et al., in press)。强烈的岩石圈伸展及玄武岩浆底侵为大规模岩浆活动提供了必要的动力学环境, 也为成矿作用带来了丰富的热能、流体及金属成矿元素。

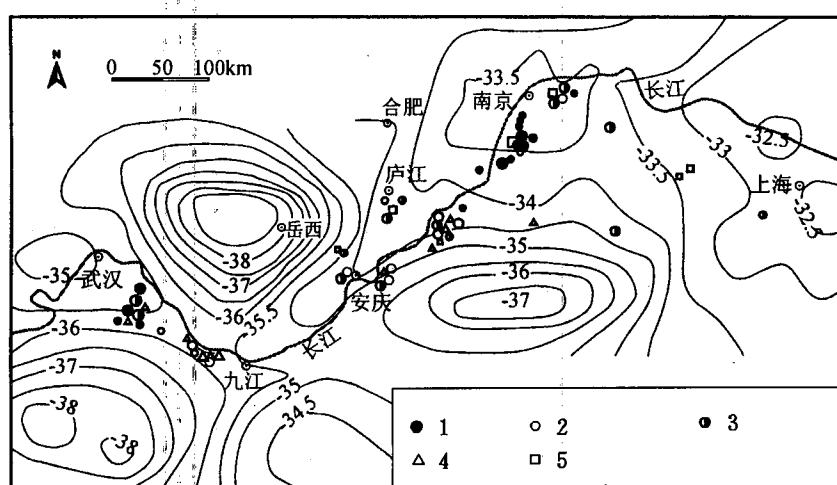


图9 长江中下游地区莫霍面等值线图(据翟裕生等, 1992)

Fig. 9 The depth of Moho in the middle and lower reaches of Yangtze River (modified from Zhai et al., 1992)

1—铁矿床; 2—铜矿床; 3—铁铜矿床; 4—钼矿床; 5—其他金属矿床

1—Iron deposit; 2—copper deposit; 3—iron-copper deposit; 4—molybdenum deposit; 5—other metallic deposit

6 结论

铜山口铜(钼)矿床大致形成于143 Ma, 矿床的形成与花岗闪长斑岩岩株有关。在129 Ma左右, 牛鼻峰石英二长斑岩在矿区东南方向侵位, 这一岩浆事件及由其引起的热液活动对铜山口矿床部分地段(主要是东南区域)的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素体系产生了一定程度的扰动。结合区域上已有的资料, 本次研究结果支持长江中下游成矿带晚中生代时期(早白垩世)存在两期成岩成矿作用: 绝大多数夕卡岩型、斑岩型及部分层控热液型矿床是早期(145~133 Ma)成矿作用的产物, 主要的含矿岩体为闪长岩—花岗闪长岩类中酸性侵入岩; 而主要的玢岩型铁矿和花岗岩型钼矿是晚期(130~120 Ma)成矿作用的产物, 对应的岩浆活动主要为橄榄安粗系列火山岩、潜火山岩及碱性岩。长江中下游地区早白垩世大规模

岩浆活动与成矿作用起源于强烈的岩石圈伸展减薄及广泛的幔源玄武岩浆底侵。

致谢: 感谢赵永鑫教授、张震兵工程师和铜山口矿山地测科在野外工作和资料收集过程中的大力帮助。氩同位素分析由 David Thiede 博士完成; 郎银生参加了部分野外工作。与邓小东和王建中的交流和讨论使笔者受益颇多。审稿专家提出了中肯的意见和有益的建议, 大大提高了本文的质量。《地质学报》的编辑在处理和编辑本文过程中付出了辛勤劳动。对上述单位和个人表示衷心感谢!

注 释

① 鄂东地质队. 1965. 铜山口矿床详细勘探报告. 内部资料.

参 考 文 献

陈江峰, 李学明, 周泰禧, Foland K A. 1991. 安徽月山岩体的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄及其有关的成矿时代估计. 现代地质, 5(1): 91~99.

- 陈江峰, 谢智, 郑永飞, 龚冰, 陈文, 周泰禧. 2003. 皖东侵入岩矿物 Rb-Sr 和 Ar-Ar 年代学及其与氧同位素平衡之间的关系. 高校地质学报, 9(2): 172~184.
- 常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 1991. 长江中下游铜铁成矿带. 北京: 地质出版社, 1~379.
- 杜杨松, 李铨具. 2004a. 安徽铜陵岩浆岩中辉长质岩石包体的发现及其地质意义. 高校地质学报, 10(3): 332~342.
- 杜杨松, 秦新龙, 田世洪. 2004b. 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. 岩石学报, 20(2): 339~350.
- 杜杨松, 秦新龙, 李铨具. 2004c. 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. 岩石矿物学杂志, 23(2): 109~116.
- 方可栋. 1994. 铜山口铜矿床成矿成岩演化机理探讨. 地质与勘探, 22(5): 7~13.
- 傅斌, 任启江, 邢凤鸣, 徐兆文, 胡文瑄, 郑永飞. 1997. 安徽沙溪含铜斑岩⁴⁰Ar-³⁹Ar 定年及其地质意义. 地质论评, 43(3): 310~316.
- 黄崇轲, 白治, 朱裕生, 王惠章. 2001. 中国铜矿床. 北京: 地质出版社, 1~372.
- 刘洪, 邱检生, 罗清华, 徐夕生, 凌文黎, 王德滋. 2002. 安徽庐枞中生代富钾火山岩成因的地球化学制约. 地球化学, 31(2): 129~140.
- 吕新彪, 姚书振, 林新多. 1992. 湖北大冶铜山口夕卡岩一斑岩复合型铜(钼)矿床地质特征和成矿机制. 地球科学——中国地质大学学报, 17(2): 171~180.
- 吕庆田, 侯增谦, 杨竹森, 史大年. 2004. 长江中下游地区的底侵作用及动力学演化模式: 来自地球物理资料的约束. 中国科学(D 辑), 34(9): 783~794.
- 马昌前, 杨坤光, 唐仲华, 李增田. 1994. 花岗岩类岩浆动力学——理论方法及鄂东花岗岩类例析. 武汉: 中国地质大学出版社, 1~260.
- 毛景文, Holly Stein, 杜安道, 周涛发, 梅燕雄, 李永峰, 藏文栓, 李进文. 2004. 长江中下游地区铜金(钼)矿 Re-Os 年龄测定及其对成矿作用的指示. 地质学报, 78(1): 121~131.
- 蒙义峰, 杨竹森, 曾普胜, 徐文艺, 王训成. 2004. 铜陵矿集区成矿流体系统时限的初步厘定. 矿床地质, 23(3): 271~280.
- 舒全安, 陈培良, 程建荣. 1992. 鄂东铁铜矿产地质. 北京: 冶金工业出版社, 1~532.
- 田世洪, 杜杨松, 秦新龙, 李铨具, 金尚中, 尹京武, 李赞熙. 2001. 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. 地质前缘, 8(4): 422~428.
- 王强, 赵振华, 熊小林, 许继峰. 2001. 底侵玄武质下地壳的熔融: 来自安徽沙溪 adakite 质富钠石英闪长玢岩的证据. 地球化学, 30(4): 353~362.
- 王强, 许继峰, 赵振华, 熊小林, 包志伟. 2003. 安徽铜陵地区燕山期侵入岩的成因及其对深部动力学过程的制约. 中国科学(D 辑), 34(4): 323~334.
- 王强, 赵振华, 许继峰, 白正华, 王建新, 刘成新. 2004. 鄂东南铜山口、殷祖埃达克质(adakitic)侵入岩的地球化学特征对比:(拆沉)下地壳熔融与斑岩铜矿的成因. 岩石学报, 20(2): 351~360.
- 王彦斌, 刘敦一, 曾普胜, 杨竹森, 田世洪. 2004a. 安徽铜陵地区幔源岩浆底侵作用的时代——朝山辉石闪长岩锆石 SHRIMP 定年. 地球学报, 25(4): 423~427.
- 王彦斌, 刘敦一, 曾普胜, 杨竹森, 蒙义峰, 田世洪. 2004b. 铜陵地区小铜官山石英闪长岩锆石 SHRIMP 的 U-Pb 年龄及其成因指示. 岩石矿物学杂志, 23(4): 298~304.
- 王彦斌, 刘敦一, 蒙义峰, 曾普胜, 杨竹森, 田世洪. 2004c. 安徽铜陵新桥铜-硫-铁-金矿床中石英闪长岩和辉绿岩锆石 SHRIMP 年代学及其意义. 中国地质, 31(2): 169~173.
- 王元龙, 张旗, 王焰. 2001. 宁芜火山岩的地球化学特征及其意义. 岩石学报, 17(4): 565~575.
- 汪洋, 邓晋福, 姬广义. 2004. 长江中下游地区早白垩世埃达克质岩的大地构造背景及其成矿意义. 岩石学报, 20(2): 297~314.
- 吴才来, 周珣若, 黄许陈, 张成火, 黄文明. 1996. 铜陵地区中酸性侵入岩年代学研究. 岩石矿物学杂志, 15(4): 299~306.
- 吴良士, 邹晓秋. 1997. 江西城门山铜矿钼-钨同位素年龄研究. 矿床地质, 16(4): 376~381.
- 夏林, 徐启东, 吕古贤, 舒斌, 郭涛. 2003. 铜山口铜(钼)矿床成矿流体水-岩反应数值模拟. 地质地球化学, 31(3): 6~12.
- 徐夕生, 范钦成, O'Reilly S Y, 蒋少涌, Griffin W L. 2004. 安徽铜官山石英闪长岩及其包体锆石 U-Pb 定年与成因探讨. 科学通报, 49(18): 1883~1891.
- 徐祥, 邢凤鸣. 1994. 宁芜地区三个辉长岩的全岩和矿物 Rb-Sr 等时线年龄. 地质科学, 29(3): 309~312.
- 薛迪康, 葛宗侠, 张宏泰. 1997. 鄂东南铜金矿床成矿模式与找矿模型. 武汉: 中国地质大学出版社, 1~202.
- 余金杰, 毛景文. 2002. 宁芜玢岩铁铜矿床⁴⁰Ar-³⁹Ar 定年及意义. 自然科学进展, 12(10): 1059~1063.
- 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. 中国科学(D 辑), 33(4): 309~314.
- 曾普胜, 杨竹森, 蒙义峰, 裴荣富, 王彦斌, 王训成, 徐文艺, 田世洪, 姚孝德. 2004. 安徽铜陵矿集区燕山期岩浆流体系统时空结构及成矿. 矿床地质, 23(3): 298~309.
- 翟裕生, 姚书振, 林新多, 周珣若. 1992. 长江中下游地区铁铜(金)成矿规律. 北京: 地质出版社, 1~234.
- 周珣若, 任进. 1994. 长江中下游中生代花岗岩. 北京: 地质出版社, 1~119.
- Chang Yinbo, Liu Xiangpei, Wu Yanchang. 1991. The copper-iron belt of the lower and middle reaches of the Changjiang river. Beijing: Geological Publishing House, 1~379(in Chinese).
- Chen Jiangfeng, Li Xueming, Zhou Taixi, Foland K A. 1991. ⁴⁰Ar-³⁹Ar dating for the Yueshan diorite, Anhui province and the estimated formation time of the association ore deposit. Geoscience, 5(1): 91~99 (in Chinese with English abstract).
- Chen Jiangfeng, Xie Zhi, Zheng Yongfei, Gong Bin, Chen Wen, Zhou Taixi. 2003. The relation between Rb-Sr, Ar-Ar geochronometers and oxygen isotopic equilibrium of intrusions from Eastern Anhui Province, China. Geological Journal of China University, 9(2): 172~184 (in Chinese with English abstract).
- Chen J F, Yan J, Xie Z, Xu X, Xing F. 2001. Nd and Sr isotopic compositions of igneous rocks from the Lower Yangtze region in eastern China: constraints on sources. Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy, 26(9-10): 719~731.
- Defant M J, Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. Nature, 347: 662~665.
- Du Yang-song, Lee Hyun-koo. 2004a. Discovery of gabbroic xenoliths form early Cretaceous intrusions in Tongling, Anhui province, China and its geologic significance. Geological Journal of China University, 10(3): 332~342 (in Chinese with English abstract).
- Du Yang-song, Qin Xin-long, Tian Shi-hong. 2004b. Mesozoic magmatic to hydrothermal process in the Tongguanshan ore field, Tongling, Anhui province, China: evidence from xenoliths and

- their hosts. *Acta Petrologica Sinica*, 20 (2): 339 ~ 350 (in Chinese with English abstract).
- Du Yang-song, Qin Xin-long, Lee Hyun-koo. 2004c. Mesozoic mantle-derived magma underplating in Tongling, Anhui Province: evidence from megacrysts and xenoliths. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 23 (2): 109 ~ 116 (in Chinese with English abstract).
- Fang Kedong. 1994. Discussion on the mechanism of diagenetic and metallogenic evolution of Tongshankou Cu deposit. *Geology and Prospecting*, 22(5): 7~13 (in Chinese with English abstract).
- Fu Bin, Ren Qijiang, Xing Fengming, Xu Zhaowen, Hu Wenxuan, Zheng Yongfei. 1997. ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of copper (gold)-bearing porphyry in Shaxi, Anhui Province and its geological significance. *Geological Review*, 43 (3): 310-316 (in Chinese with English abstract).
- Huang C K, Bai Y, Zhu Y S, Wang H Z. 2001. Copper deposits in China. Beijing: Geological Publishing House, 1~372 (in Chinese with English abstract).
- Kuiper Y D. 2002. The interpretation of inverse isochron diagrams in ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology. *Earth and Planetary Science Letters*, 203: 499~506.
- Liu H, Qiu J S, Lo C H, Xu X S, Ling W L, Wang D Z. 2002. Petrogenesis of the Mesozoic potash-rich volcanic rocks in the Luzong basin, Anhui Province: Geochemical constraints. *Geochimica*, 31 (2): 129 ~ 140 (in Chinese with English abstract).
- Lu Qingtian, Hou Zengqian, Yang Zhusheng, Shi Danian. 2004. Magma underplating and geodynamic model in the middle and lower Yangtze river: evidence from geophysics. *Science in China (D)*, 34(9):783~794 (in Chinese).
- Lu Xinbiao, Yao Shuzheng, Lin Xinduo. 1992. Geologic characteristics and metallogeny of Tongshankou skarn-porphyry deposit in Daye, Hubei. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 17(2): 171~180 (in Chinese with English abstract).
- Ma C Q, Yang K G, Tang Z H, Li Z T. 1994. Magma dynamics of granitoids—Theory, method and a case study of the eastern Hubei granitoids. Wuhan: Press of China University of Geosciences, 1~260 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Holly Stein, Du Andao, Zhou Taofa, Mei Yanxiong, Li Yongfeng, Zang Wenshuang, Li Jinwen. 2004. Molybdenite Re-Os precise dating of molybdenite from Cu-Au-Mo deposits in the middle-lower reaches of Yangtze river belt and its implications for mineralization. *Acta Geologica Sinica*, 78 (1): 121 ~ 131 (in Chinese with English abstract).
- McDougall I, Harrison T. 1988. *Geochronology and Thermochronology by the ^{40}Ar - ^{39}Ar Method*. London/New York: Oxford University Press, 1~212.
- McInnes B I A, Evans N J, Fu F Q, Garwin S. 2005. Application of thermochronology to hydrothermal ore deposits. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 58(1): 467~498.
- Meng Yifeng, Yang Zhushen, Zeng Pusheng, Xu Wenyi, Wang Xuncheng. 2004. Tentative temporal constraints of ore-forming fluid systems in Tongling Metallogenic province. *Mineral Deposits*, 23(3): 271~280 (in Chinese with English abstract).
- Pan Y, Dong P. 1999. The Lower Changjiang (Yangzi/Yangtze River) metallogenic belt, east central China: intrusion- and wall rock-hosted Cu-Fe-Au, Mo, Zn, Pb, Ag deposits. *Ore Geology Reviews*, 15 (4): 177~242.
- Petford N, Gallagher K. 2001. Partial melting of mafic (amphibolitic) lower crust by periodic influx of basaltic magma. *Earth and Planetary Science Letters*, 193 (3~4): 483~499.
- Pollard P J, Taylor R G, Peters L. 2005. Ages of intrusion, alteration, and mineralization at the Grasberg Cu-Au Deposit, Papua, Indonesia. *Economic Geology*, 100(5): 1005~1020.
- Quang C X, Clark A H, Lee J K W, Guillen B J. 2003. ^{40}Ar - ^{39}Ar ages of hypogene and supergene mineralization in the Cerro Verde-Santa Rosa porphyry Cu-Mo cluster, Arequipa, Peru. *Economic Geology*, 98(8): 1683~1696.
- Raith J G, Stein H J. 2000. Re-Os dating and sulfur isotope composition of molybdenite from tungsten deposits in western Namaqualand, South Africa: implications for ore genesis and the timing of metamorphism. *Mineralium Deposita*, 35: 741~753.
- Shu Quan-an, Chen Peiliang, Chen Jianrong. 1992. The geology of iron and copper deposits in eastern Hubei province, China. Beijing: Metallurgical Industrial Press, 1~532 (in Chinese).
- Steiger R H, Jäger E. 1977. Subcommittee on geochronology: Convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology. *Earth and Planetary Science Letters*, 36 (3): 359~362.
- Sun W, Xie Z, Chen J, Zhang X, Cai Z, Du A, Zhang C, Zhou T. 2003. Os-Os dating of copper and molybdenum deposits along the middle and lower reaches of the Yangtze river, China. *Economic Geology*, 98: 175~180.
- Suzuki K, Shimizu H, Masuda A. 1996. Re-Os dating of molybdenites from ore deposits in Japan: implication for the closure temperature of the Re-Os system from molybdenite and the cooling history of molybdenum ore deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60: 3151~3159.
- Tian Shihong, Du Yangsong, Qin Xinlong, et al. 2001. Mineral inclusion studies of the intermediate-acid intrusive rocks and their rock enclaves in Tongling Area, Anhui province. *Earth Science Frontier*, 8(4): 422~428 (in Chinese with English abstract).
- Vasconcelos P M. 1999. ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology of supergene process in ore deposits. *Rev. Econ. Geol.*, 12: 73~113.
- Wang Qiang, Zhao Zhenghua, Xu Jifeng, Bai Zhenghua, Wang Jianxin, Liu Chengxin. 2004. The geochemical comparison between the Tongshankou and Yinzu adakitic intrusive rocks in southeastern Hubei: (delaminated) lower crustal melting and the genesis of porphyry copper deposit. *Acta Petrologica Sinica*, 20 (2): 351~360 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qiang, Xu Jifeng, Zhao Zhenghua, Xiong Xiaoling, Bao Zhiwei. 2003. Genesis of the Yanshanian intrusions and the constraints on dynamic process in the deep crust in Tongling Area, Anhui province. *Science in China (Series D)*, 34(4): 323~334 (in Chinese).
- Wang Qiang, Zhao Zhenghua, Xiong Xiaolin, Xu Jifeng. 2001. Melting of the underplated basaltic lower crust: evidence from the Shaxi adakitic sodic quartz diorite-porphyrates, Anhui province, China. *Geochimica*, 30(4): 353~362 (in Chinese with English abstract).
- Wang Q, Wyman D A, Xu J-F, Zhao Z-H, Jian P, Xiong X-L, et al. Petrogenesis of Cretaceous adakitic and shoshonitic igneous rocks in the Luzong area, Anhui Province (eastern China): Implications for geodynamics and Cu-Au mineralization. *Lithos* (in Press).
- Wang Y B, Liu D Y, Zeng P S, Yang Z S, Tian S H. 2004a.

- SHRIMP U-Pb geoChronology of pyroxene diorite in the Chaoshan gale deposit and its geological significance. *Acta Geoscientica Sinica*, 25(4): 423~427 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yanbin, Liu Dunyi, Zeng Pusheng, Yang Zhusen, Meng Yifeng, Tian Shihong. 2004b. SHRIMP U-Pb geochronology of Xiaotongguanshan quartz dioritic intrusions in Tongling district and its petrogenetic implications. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 23(4): 298~304 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yanbin, Liu Dunyi, Meng Yifeng, Zeng Pusheng, Yang Zhusen, Tian Shihong. 2004c. SHRIMP U-Pb geochronology of the Xinqiao Cu-S-Fe-Au deposit in the Tongling ore deposit, Anhui province. *Geology in China*, 31(2): 169~173 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yang, Deng Jinfu, Ji Guangyi. 2004. A perspective on the geotectonic setting of early Cretaceous adakite-like rocks in the lower reaches of Yangtze river and its significance for copper-gold mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 297~314 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y L, Zhang Q, Wang Y. 2001. Geochemical characteristics of volcanic rocks from Ningwu area, and its significance. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 565~575 (in Chinese with English abstract).
- Wu Cailai, Wang Zhihong, Qiao Dewu, Li Haibin. 2000. Types of enclaves and their features and origins in intermediate-acid intrusive rocks from the Tongling District, Anhui Province, China. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 74(1): 54~67.
- Wu Cailai, Zhou Xunruo, Huang Xuchen, Zhang Chenghuo, Huang Wenming. 1996. ⁴⁰Ar-³⁹Ar chronology of intrusive rocks from Tongling. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 15(4): 299~306 (in Chinese with English abstract).
- Wu Liangshi, Zhou Xiaoqi. 1997. Re-Os isotopic dating of the Chenmenshan copper deposit, Jiangxi Province. *Mineral Deposits*, 16(4): 376~381 (in Chinese with English abstract).
- Xia Lin, Xu Qidong, Lü Guxian, Shu Bin, Guo Tao. 2003. Numrical modeling on water-rock interaction of ore fluid of Tongshankou Cu (Mo) deposit. *Geology-Geochemistry*, 31(3): 6~12 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xiang, Xing Fengming. 1994. Whole-rock and mineral Rb-Sr isochron ages of the three gabbros in Nanjing-Wuhu Area, China. *Scientia Geologica Sinica*, 29(3): 309~312 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xisheng, Fan Qincheng, O'Reilly S Y, Jiang Shaoyong, Griffin W L. 2004. Zircon U-Pb dating of the quartz diorite and its enclaves in Tongguanshan, Anhui province: discussion on the petrologic genesis. *Chinese Science Bulletin*, 49(18): 1883~1891 (in Chinese).
- Xu J, Shinjo R, Defant M J, Wang Q. 2002. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China: Partial melting of delaminated lower continental crust? *Geology*, 30(12): 1111~1114.
- Xue Dikang, Ge Zongxia, Zhang Hongtai. 1997. Metallogenic and ore minerals models of the Cu-Au deposits in Southeast Hubei province. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1~202 (in Chinese).
- Yu Jinjie, Mao Jingwen. 2002. ⁴⁰Ar-³⁹Ar dating of the albite in porphyrites in Ningwu Area and its significance. *Progress in Natural Science*, 12(10): 1059~1063 (in Chinese).
- Zeng Pusheng, Yang Zhusen, Meng Yifeng, et al. 2004. Temporal-spatial configuration and mineralization of Yanshanian magmatic fluid systems in Tongling ore concentration area, Anhui Province. *Mineral Deposits*, 23(3): 298~309 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Yusheng, Yao Shuzheng, Lin Xinduo, Zhou Xunruo. 1992. Metallogeny of Fe-Cu-(Au) ore deposits in middle and lower Yangtze river. Beijing: Geological Publishing House, 1~234 (in Chinese).
- Zhang Qi, Jian Ping, Liu Dunyi, Wang Yuanlong, Qian Qing, Wang Yan, Xue Huaiming. 2003. Zircon SHRIMP dating of the volcanic rocks and its significance in Ningwu Area. *Science in China (Series D)*, 33(4): 309~314 (in Chinese).
- Zhao Z-F, Zheng Y-F, Chun-Sheng, Gong B. 2004. Temporal relationship between granite cooling and hydrothermal uranium mineralization at Dalongshan in China: a combined radiometric and oxygen isotopic study. *Ore Geology Reviews*, 25: 221~236.
- Zhou X R, Ren J. 1994. Mesozoic granitoids in middle and lower reaches of Yangtze River. Beijing: Geological Publishing House, 1~119 (in Chinese).

⁴⁰Ar/³⁹Ar Geochronology of the Tongshankou Cu (Mo) Deposit in the Southeastern Hubei Fe-Cu Province: Implications for Regional Metallogeny

ZHAO Xinfu¹⁾, LI Jianwei^{1,2)}, MA Changqian^{2,3)}

1) Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei, 430074; 2) State Key Laboratory of Geologic Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei, 430074

3) Faculty of Earth Science, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei, 430074

Abstract

Both porphyry type and skarn type mineralization are developed in the Tongshankou Cu (Mo) deposit, southeastern Hubei Fe-Cu province. The genesis of the deposit is related to the Tongshankou granodiorite porphyry and the Lower Triassic Daye Group carbonates, and orebodies are primarily hosted in their contact region. This paper presents precise ⁴⁰Ar/³⁹Ar ages of alteration sericites and phlogopite related to the porphyry

type and skarn type mineralization, respectively, obtained by laser incremental $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ analysis. Our results suggest that the Tongshankou ore deposit and the granodiorite host formed at ca. 143 Ma; whereas the Niubifeng quartz monzonite occurred to the southeast of the mining area was emplaced at ca. 129 Ma. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronometer of the Tongshankou deposit has been partially reset by the later-stage magmatism. When combined with previous results, this study suggests that there are two phases of magmatism and its related mineralization in southeastern Hubei and other metallogenic regions along the middle-lower Yangtze River occurred at 145 ~ 133 Ma and 130 ~ 120 Ma, respectively. Magma underplating and subsequent lithospheric extension could have been the geodynamic setting responsible for the voluminous magmatism and large-scale mineralization.

Key words: Tongshankou Cu-Mo deposit; $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating; southeastern Hubei Fe-Cu province; magma underplating

20世纪后半叶构造地质学的进展

董树文¹⁾, 郑亚东²⁾, 陈宣华³⁾, 史静⁴⁾, 谢广连¹⁾

1) 中国地质科学院, 北京, 100037; 2) 北京大学地球与空间科学学院, 100871

3) 中国地质科学院地质力学研究所, 北京, 100081; 4) 中国地质图书馆, 北京, 100083

本文简述了20世纪构造地质学的发展历史, 以上世纪100年构造地质学论文占地质学论文的比重变化, 讨论构造地质学在整个地质科学体系中的地位及其变化。对板块构造、大陆动力学和地球动力学等研究领域, 并在构造分析、岩石变形机制与流变学特征、造山带的推覆构造与晚造山伸展

垮塌作用、大型走滑断层与压入—挤出构造、活动构造与自然灾害等研究领域的进展进行了重点分析。从学科交叉的视角, 初步探讨了构造地质学、岩石学与地质年代学间的关系。最后, 对我国构造地质学的发展提出了初步建议。

义敦岛弧南段印支期构造背景: 闪长玢岩—花岗岩的 SHRIMP 锆石年代学和地球化学制约

刘树文¹⁾, 王宗起²⁾, 阎全人²⁾, 李秋根¹⁾, 张德惠³⁾, 王建国³⁾, 杨斌¹⁾, 古丽冰¹⁾, 赵凤山¹⁾

1) 北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院, 100871

2) 中国地质科学院地质研究所, 北京, 100037; 3) 中国地质大学, 北京, 100083

义敦岛弧南段理塘—稻城—乡城地区分布大量的花岗岩质到闪长质侵入体, 其中代表性的印支期侵入体主要有冬措花岗岩侵入体和乡城侵入位于岛弧火山岩的浅成侵入体。冬措花岗岩和马熊沟花岗岩主要由似斑状二长花岗岩、巨晶二长花岗岩和花岗细晶岩组成, 乡城浅成侵入体的主要岩性为闪长玢岩。SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学研究表明, 稻城冬措花岗岩和乡城闪长玢岩分别形成于 $224 \pm 3\text{Ma}$ 和 $222 \pm 3\text{Ma}$ 。地球化学分析表明乡城闪长玢岩表现为钙碱性特征, 具有较高的 Sr/Y 值, Nb、Ta、P 和 Ti 亏损, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -3.27$, 表明它们形成于岛弧环境下的幔源岩浆, 受到了老的陆壳物质的明显混染。冬措花岗岩和马熊沟花岗岩为高钾钙碱性系列, 表现

为过铝到亚铝地球化学特性, 相对较低的 $(\text{La}/\text{Yb})_n$ 、Sr/Y 值和 Nb、Ta、Sr、P 和 Ti 亏损, 大离子亲石元素富集, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -8.10$, 具有较高的 $\text{CaO}/(\text{FeOt} + \text{MgO})$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{FeOt} + \text{MgO})$ 分子比, 指示它们形成于陆壳物质在晚造山构造背景下的部分熔融, 其源岩主要为杂砂岩。乡城的闪长玢岩和冬措、马熊沟花岗岩反映了印支期可能首先发生了中咱地块和扬子西缘之间洋壳向西俯冲形成扬子西缘安迪型大陆边缘弧和弧后盆地, $224 \sim 222\text{Ma}$ 中咱地块和扬子西缘之间的洋盆闭合, 导致中甸—乡城大陆边缘弧与中咱地块之间左行斜碰撞, 使大陆边缘盆地沉积物部分熔融形成冬措—马熊沟花岗岩。