文章编号: 0254-5357(2009)03-0259-06

安徽滁州琅琊山铜矿辉钼矿铼 - 锇同位素定年及其地质意义

秦 燕¹,梅玉萍²,王登红³,张 建¹,吴礼彬⁴

(1.中国地质科学院研究生院,北京 100037; 2.中国地质调查局宜昌地质矿产研究所,湖北 宜昌 443003;3.中国地质科学院矿产资源研究所,北京 100037; 4.安徽省地质调查院,安徽合肥 230000)

摘要:首次运用铼-锇同位素方法对滁州琅琊山铜矿床中的辉钼矿进行定年。5件辉钼矿样品的模式年龄为(128.9±1.8) Ma~(130.3±1.9) Ma,¹⁸⁷Re-¹⁸⁷Os 等时线年龄为(128.6±2.2) Ma,其加权平均方差(MSWD)为0.45,为滁州琅琊山铜矿床提供了准确的形成时限。分析结果表明,滁州琅琊山铜矿床是 早白垩纪(燕山晚期)区域构造-岩浆活动的产物。琅琊山铜矿床辉钼矿中铼含量较高,推断成矿物质主要是壳幔混源,且主要是幔源。

关键词:琅琊山铜矿;辉钼矿;铼-锇同位素定年 中图分类号: P579.3; P578.291 文献标识码: A

Re-Os Isotopic Dating of Molybdenite from the Langyashan Copper Deposit in Chuzhou of Anhui Province and Its Geological Significance

QIN Yan¹, MEI Yu-ping², WANG Deng-hong³, ZHANG Jian¹, WU Li-bin⁴

(1. Graduate School of Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

2. Yichang Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Yichang 443003, China;

3. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

4. Geological Survey of Anhui Province, Hefei 230000, China)

Abstract: A precise Re-Os age is given for the Langyashan copper deposit in Chuzhou. The model age for five molybdenite samples from the deposit varies from (128.9 ± 1.8) Ma to (130.3 ± 1.9) Ma and the isochron age is (128.6 ± 2.2) Ma, MSWD = 0.45. The results indicate that the origin of the deposit is from regional tectno-magmatic activities during the early cretaceous period. The molybdenites from the Langyashan copper deposit have a very high Re content, which indicates that the deposit originated from the mixing of the crust and the mantle sources with the mantle as a primary source.

Key words: the Langyashan copper deposit; molybdenite; Re-Os isotopic dating

安徽滁州市琅琊山铜矿在 1958 年前称破山口 铜矿,1958—1978 年称滁州铜矿,1978 年改称琅琊 山铜矿。该矿是以铜为主,伴生铁、钼、金、银等组 分的多金属矿床。矿区位于滁州市区西南,随着城 市的发展,逐渐变为一个位于城区内的矿床。

琅琊山铜矿有着悠久的采矿和冶炼历史。据相 关资料记载,该区最晚在明朝初期就已经开始开采。 新中国成立以前,德国、日本的地质人员先后在此地 进行地质调查,并编写了《安徽省滁县破山口铜矿调 查报告》、《安徽省滁县破山口电气探矿调查报告》 和《安徽省滁县铜矿地质再调查报告》^[1]。建国以 来,琅琊山地区地质找矿和研究历程大致可分为3 个阶段。第一阶段为浅部找矿阶段:20世纪50~70 年代,以安徽省冶金勘探公司811地质队为主在矿

收稿日期: 2009-02-01;修订日期: 2009-03-15

基金项目:国土资源地质大调查项目资助(1212010633903);中国成矿体系综合研究项目资助(1212010634002) 作者简介:秦燕(1982 -),女,安徽宿州人,在读博士研究生,同位素地球化学专业。E-mail: happyqinyan1982@163.com。

区开展铜矿地质工作,获得C+D级铜金属储量17 万吨、伴生金8.1吨、伴生银2000多吨。这一阶段 主要是积累和掌握了一些基础性矿产地质资料,矿 区综合研究程度与长江中下游的沿江地区相比相对 较低。第二阶段为综合研究阶段:"七五"期间,国家 重点科研攻关项目《苏皖赣鄂沿江地区薄皮推覆构 造与铁、铜矿床关系及隐伏矿床预测研究》,得出"琅 琊山岩体应具凸向北东方位的弯月形态,在其北东 方位近距离下方的陡倾斜接触带,还有以铜为主的 矿体存在"的结论,并指出隐伏主矿体存在的位置和 埋深,由此推测本区具有寻找隐伏矿体的潜力;受其 启示,琅琊山矿业总公司于 1993—1995 年开展了 《琅琊山铜矿床成矿规律及成矿预测研究》,成果表 明,琅琊山矿区受S形旋扭褶皱构造控制,岩体沿褶 皱核部定位,推测隐伏主矿体位于琅琊山岩体的西 南部。对于上述研究成果,琅琊山矿业总公司选择 CSAMT 方法(可控源音频大地电磁法)对矿区南部 的推断隐伏矿体进行了物探验证。第三阶段为深部 找矿阶段:根据第一阶段和第二阶段研究和物探验 证成果,安徽省地质矿产勘查局 313 地质队于 2003 年申报了国家矿产资源补偿费项目,拉开了琅琊山 地区深部找矿工作的序幕^[2]。

前人对该矿床的地质特征、矿床成因等方面取 得了重要成果^[2-3];但对其成矿年龄研究较少。可 靠的同位素年龄有利于深入研究成矿作用,并对找 矿勘查工作有帮助。因此,对滁州琅琊山铜矿床开 展同位素年代学的研究是必要的。随着分析测试 技术的不断进步,Re - Os 同位素测年技术已成为 用来直接测定不同类型钼矿床和含钼矿床的成矿 年龄的有效方法。本文利用辉钼矿的 Re - Os 同 位素定年法,对滁州琅琊山铜矿床的成矿年龄进行 精确厘定,并阐述其地质意义;对矿床的形成时代、 成矿物质来源和形成机理进行探讨,为指导老区找 新矿、扩大矿床规模提供一定的科学依据。

1 区域地质背景

滁州琅琊山铜矿床位于大别造山带的前陆褶冲 带北东缘、郯城一庐江深断裂的东侧,属滁县一庐江 铜金成矿带。本区出露地层主要有震旦系上统灯影 组、寒武系下统黄栗树组、中统全家凹组、上统琅琊山 组、奥陶系上统欧冲组、侏罗系上统红花桥组和黄石 坝组、白垩系下统浦口组、第四系地层等(见图1)。



图 1 琅琊山铜矿区域地质简图

Fig. 1 Simple geological map of the Langyashan copper deposit 地质简图根据 2000 年邢善强成果改编。

由图 1 可见,与成矿作用有关的是寒武系上统 琅琊山组灰岩。主要矿体的矿化围岩与赋矿层位 是寒武系下统琅琊山组强劈理化的黑色含碳质灰 岩层,由于强烈劈理化使该层某些部位呈现条状与 薄层状特征,在劈理化强烈地段,铜矿化相对富集。 矿石呈薄层状、条纹条带状和稠密浸染状。寒武系 含碳质地层在铜生成岩作用过程中,对主成矿物质 进行了初始富集,使该类岩石中 Cu、Au、Ag 的含量 显著高于本区其他层位的灰岩,如 Cu 为 20 ~ > 1000 µg/g, Au 为 0.013 ~ 0.26 µg/g, Ag 为 0.5 ~ 8.6 µg/g; 另一方面,该类岩石为条带状和薄层状, 其上覆岩石为厚层状灰岩,下覆地层为孔隙较为发 育的泥砂质岩石,其特殊的含水 – 透水层地层系统 促使成矿热液主要顺该层运移并沉淀,对形成矽卡 岩型铜矿床起到重要作用。这些地质背景均与长 江中下游地区层控砂卡岩型铜矿床具有相似的成 矿特点。

印支期,扬子地台与华北地台碰撞对接,主要 表现为挤压缩短机制下的盖层褶皱和层间推覆-滑覆构造,构成一系列北东向S形同斜倒转褶曲, 褶皱轴线在平面上均呈S形展布,褶皱轴面的三维 空间形态为"麻花状",即褶皱中段轴面近直立,两 翼大致对称,南北两段轴面分别倾向北西和南东, 这种S形褶皱可能是东西向基底断裂限制了北东 向S形变形所致。北东向褶皱之上又叠加有东西 向褶皱,为轴向280°的宽缓褶皱,叠加褶皱的横跨 复合造成北东向向斜枢纽昂起,形成的隆起、虚脱 空间则是岩体和矿体赋存的有利地段² S 形构 造是长江中下游地区一种典型的控岩控矿构造。 长江中下游地区与矽卡岩型铜矿床有关的岩体大 都分布于S形褶皱的核部,如滁州地区与铜陵地区 等。目前长江中下游地已知的一些铜矿床都分布 于这种褶皱构造,尤其是背斜钩造的核部或翼部, 琅琊山矿床分布于大丰山背斜中3

矿区内的岩浆活动有石英闪长玢岩侵入体及 较晚形成的微晶闪长玢岩、闪长煌斑岩等脉岩,与 该矿床成矿有关的侵入体为规模小、高侵位的石英 闪长玢岩,侵入时代为燕山晚期。石英闪长玢岩体 是顺S形褶皱的核部虚脱部位侵位,受S形倒转旋 扭褶皱控制,空间上以22~50线为主体,向南北两 个方向呈"蘑茹状"扩展,覆盖寒武系地层,绝大部 分矿体均位于岩体向内倾斜与围岩的接触部位或 凹部,呈现弧形弯曲特征,岩体南部扬起,向北北东 侧伏,侧伏角 50°;北部倾伏,岩体埋藏相对较深。 岩体出露面积约1.2 km²,平面上呈椭圆形,剖面 上呈东陡西缓的"V"字形,长轴方向北东,主岩体 四周有岩枝岩脉发育。岩体呈细粒斑状结构。接 触变质带厚度小,捕虏体多 石英闪长玢岩呈白-灰黑色,中-细粒斑状结构,斑晶主要由中长石、普 通角闪石、黑云母等组成。

2 矿床地质特征

矿区位于滁州市西南 2.5 km, 交通十分便利。随着城市化的发展, 该矿床已经变成了"城中矿", 这也是国内外罕见的位于城市区的铜金矿。琅琊 山铜矿为典型的矽卡岩型富铜矿床。矿区位于大 丰山复式倒转向斜东南翼的次级褶皱——醉翁山 不对称紧闭向斜的轴部 琅琊山铜矿床的所有矿

体根据其产出位置,可大致分为3条明显的矿带, 即东矿带、西矿带与底部矿带,其中东矿带产于石 英闪长玢岩体的外接触带,且在岩体接触界面朝岩 体倾斜的外接触带上,底部矿带位于岩体正下方的 外接触带,西矿带则位于岩体内外接触带。该矿区 包含的矿体达 260 多个,除 6、21、32、67、23、93 号 矿体稍具规模外,其余均为零星分散的小矿体。矿 体严格受闪长玢岩与大理岩接触带前缘的层间剥 离体接触带及相关构造的控制 2 矿体均呈"多" 字形排列,单个矿体呈脉状、透镜状、扁豆状、囊状 等;其规模一般为:长50~120 m(最长435 m),延 深 50~120 m(最大延深 265 m),厚度2~10 m(最 厚17.94 m)。矿体走向与其相应的接触带部位走 向基本一致。矿石矿物主要为黄铜矿、斑铜矿、磁 铁矿,次矿物为黄铁矿、辉铜矿、赤铁矿、铜蓝、辉钼 矿(见图2)及少量黝铜矿、镜铁矿、方铅矿、闪锌 矿、自然金等;脉石矿物有钙铁石榴子石、透辉石、 斜长石、角闪石、绿泥石、绿帘石、透闪石、阳起石和 少量石英、玉髓、方解石等。



图 2 琅琊山铜矿床中的辉钼矿

Fig. 2 Photos of molybdenites in the Langyashan copper deposit A-黄铜矿与辉钼矿共生产出;

B一辉钼矿成浸染状分布于石榴子石砂卡岩中

3 实验部分

3.1 样品描述

本文年龄测定所用的辉钼矿样品 ZK07-509、

ZK07-589、ZK07-590、ZK07-748 采自7 号钻孔 岩心,其中 ZK07-590 为灰绿色侵染状含黄铁矿 矽卡岩型辉钼矿矿石;ZK07-748 为灰色含黄铜矿 侵染状矽卡岩型辉钼矿矿石;ZK07-589 为灰色侵 染状矽卡岩型辉钼矿矿石;ZK07-509 为灰绿色星 点状矽卡岩型辉钼矿矿石;ZK08-982 采自8 号钻 孔岩心,为灰色星点状辉钼矿化矽卡岩。

3.2 样品前处理

辉钼矿样品 Re – Os 同位素定年工作由国家 地质实验测试中心 Re – Os 同位素实验室完成。 分析流程如下,测年方法见文献[4-7]。

准确称取样品,加入到 Carius 管底部。加液氮 至有半杯乙醇的保温杯中,调节温度至 50~80 ℃。 将已装入样品的 Carius 管置于该保温杯中,将准确 称取的¹⁸⁵ Re和¹⁹⁰ Os 混合稀释剂加入到 Carius 管底 部,再加入 4 mL 10 mol/L HCl、4 mL 16 mol/L HNO₃。当管底溶液冰冻后,用丙烷 - 氧气火焰加 热封好 Carius 管的细颈部分,放入不锈钢套管内。 不锈钢套管放入鼓风烘箱,待回到室温,逐渐升温 至230 ℃,保温 12 h。在底部冷冻的情况下,用 40 mL水将 Carius 管中溶液转入蒸馏瓶中。

3.3 蒸馏分离锇

于 105~110℃蒸馏 50 min,用 10 mL 水吸收 蒸出的 OsO₄,用等离子体质谱法(ICP - MS)测定 锇同位素比值。将蒸馏残液倒入 150 mL 聚四氟乙 烯烧杯中,待分离铼。

3.4 萃取分离铼

将第一次蒸馏残液置于电热板上,加热近干。 加少量水,再加热近干。重复两次以降低酸度。加 人 10 mL 5 mol/L NaOH 溶液,稍微加热,转为碱性 介质。转入 50 mL 聚丙烯离心管中,离心,取上清 液转入 120 mL 聚四氟乙烯分液漏斗中。加入 10 mL 丙酮,振荡 5 min,萃取 Re。静止分相,弃去水 相。加入 2 mL 5 mol/L NaOH 溶液到分液漏斗中,

表1 琅琊山铜矿辉钼矿 Re-Os 同位素测定

Table 1 Re-Os isotopic data of molybdenites from the Langyashan copper deposit

振荡 2 min,洗去丙酮相中的杂质。弃去水相,排丙 酮至已加有 2 mL 水的 150 mL 聚四氟乙烯烧杯中。 在电热板上 50 ℃加热蒸发丙酮。加热溶液至干。 加数滴浓 HNO₃和 φ = 30% (体积分数,下同)的 H₂O₂,加热蒸干以除去残存的 Os。用数毫升稀 HNO₃溶解残渣,稀释至 HNO₃浓度为 2%,备 ICP – MS 测定 Re 同位素比值。如含 Re 溶液中盐量超 过 1 mg/mL,需采用阳离子交换柱除去钠。

3.5 质谱测定

Re-Os 同位素比值用 TJA PQ ExCell ICP-MS 测定(美国 Thermo 公司)。Re 选择的质量数为 185、187,用 190 监测 Os。Os 选择的质量数为 186、187、188、189、190 和 192,用 185 监测 Re。空 白水平 Re 为 0.005 5 ng/g, Os 普为 0.000 11 ng/g,¹⁸⁷Os 为 0.00005 ng/g。

4 结果与讨论

4.1 辉钼矿的成矿年龄

ICP - MS 测量 Re、Os 含量的不确定度包括样 品和稀释剂的称量误差、稀释剂的标定误差、质谱 测量的分馏校正误差、待分析样品同位素比值测量 误差,置信度 95%。模式年龄的不确定度还包括 衰变常数的不确定度(1.02%),置信度 95%。模 式年龄 t 按下式计算:

 $t = 1/\lambda [\ln(1 + {}^{187}\text{Os}/{}^{187}\text{Re})]$ 式中, $\lambda - {}^{187}\text{Re}$ 衰变常数,1.666×10⁻¹¹。

琅琊山铜矿床的 5 件辉钼矿样品 Re - Os 同 位素测量结果见表 1。利用 ICP - MS 法测定5 件 辉钼矿样品,得到的模式年龄十分接近,为(128.9 ±1.8) Ma~(130.3±1.9) Ma,其加权平均值为 (129.39±0.83) Ma。采用 ISOPLOT 软件^[8] 对获 得的 5 个数据进行¹⁸⁷ Re - ¹⁸⁷ Os等时线拟合,获得的 等时线年龄为(128.6±2.2) Ma,其加权平均方差 (MSWD)为0.45(见图 3)。

样品名称	样品质量 m/g	$w_{\rm B'}(\rm ng\cdot g^{-1})$							
		Re		¹⁸⁷ Re		¹⁸⁷ 0s		— 模式平醇/Ma	
		测定值	不确定度	测定值	不确定度	 测定值	不确定度	测定值	不确定度
ZK07 - 509	0.05084	221 335	1 789	139114	1 1 25	300.0	2.4	129.3	1.8
ZK07 - 589	0.05041	132969	1 197	83 574	752	180.1	1.5	129.2	1.9
ZK07 - 590	0.05046	186 855	1460	117442	917	252.5	2.2	128.9	1.8
Zk07 - 748	0.05017	360 854	3515	226 804	2210	488.8	4.3	129.2	2.0
ZK08 - 982	0.05119	125 507	1113	78 884	700	171.5	1.5	130.3	1.9



图 3 琅琊山铜矿床辉钼矿 Re-Os 等时线年龄

Fig. 3 Re-Os isochron age of molybdenite from the Langyashan copper deposit

4.2 辉钼矿成矿时代的确定

本文测得 5 件辉钼矿样品的 Re - Os 同位素 的等时线年龄为(128.6±2.2) Ma, 与样品的模式 年龄基本一致。该等时线年龄为滁州琅琊山铜矿 床提供了一个准确的形成时限,可以代表成矿的真 实年龄。结果表明, 滁州琅琊山铜矿化于早白垩 世, 属燕山晚期中基性岩浆与相关热液上侵定位的 产物。这与翟裕生等^[9]提出的长江中下游地区燕 山期成矿时代(170~90 Ma)相吻合。

晚侏罗世到早白垩世(160~130 Ma)是中生 代成矿作用的高峰期,形成的矿床数量约占中生代 矿床总数的63%。早白垩世是中国东部动力体制 由挤压转为拉张的时期,而且也是中国东部由近东 西向构造线彻底转变为北东 - 北北东向构造线的 构造体制大转换时期。伴随着中国东部构造体制 大转换,壳幔相互作用和地壳硅铝层物质重熔作用 加剧,导致中 - 酸性及中基性岩浆的大规模侵入及 喷发和大规模成矿作用的发生,形成大量的与壳幔 混源花岗岩类及中基性侵入岩有关的矽卡岩型铜 矿、矽卡岩型 - 斑岩型铜钼矿床、矽卡岩型铁床 等^[10]。在整个成矿过程中,古生代至早中生代形 成的地层是重要的成矿因素和富矿场所,而燕山期 岩浆活动是直接的关键的成矿因素。

前人指出,与成矿关系密切的石英闪长玢岩岩体的同位素地质年龄为140 Ma¹¹¹,而辉钼矿年龄为128 Ma,比相关岩体的年龄晚11 Ma,可以推断出琅琊山铜矿床成矿过程中热液成矿作用要略晚于热液成岩作用。在长江中下游地区成矿带中,也不乏成矿年龄晚于成岩年龄的矿床。如江苏安基山铜矿,铜钼矿石辉钼矿年龄为108 Ma,而与成矿有关的石英闪长岩岩体固结年龄为123 Ma,成岩

明显要早于成矿;铜山铜钼矿床成矿年龄为 106 Ma,比相关岩体的年龄要晚11 Ma^[12]。

4.3 辉钼矿的铼含量特征

首先,在所研究的辉钼矿矿石中,Re 含量有所差别。测定结果显示,采集的琅琊山铜矿床辉钼矿中 Re 含量较高的样品为 ZK07 - 748 和 ZK07 - 509,这两 件样品的 Re 含量分别为 0.361 ng/g 和 0.221 ng/g。

Re 是WI族元素,具亲铜和亲铁的地球化学性 质。由其地球化学性质决定,从地壳向地核,Re的 丰度值有所提高^[13]。Re 的地球化学性质近似于 Pt,在矿物形成时,能以类质同象方式置换硫化物 矿物晶格中的 Mo、W 等元素。在辉钼矿中, Re 的 含量可以从微量到高达1.88%。滁州琅琊山铜矿 床中辉钼矿的 Re 含量为 0.126~0.361 ng/g, 比同 类型矿床辉钼矿 Re 含量要高。Gilos 等^[14]及 Рехарский^[15]认为辉钼矿中 Re 含量的高低与成矿 温度及矿物组合有着密切的关系。低温矿床中辉 钼矿中 Re 的高含量要比高温矿床辉钼矿中常见 得多,而且在光谱实验室研究不同矿物组合中辉钼 矿时杳明,辉钼矿-黄铜矿及辉钼矿-黄铜矿-黄 铁矿组合中,辉钼矿的 Re 含量比矿物组合中辉钼 矿的 Re 含量要高。而在所测试样品 ZK07 – 748 和 ZK07 – 509 中分别为辉钼矿 – 黄铜矿和辉钼矿 -黄铁矿组合,所以其辉钼矿中 Re 含量相对较 高,也证实了 Pexapский 的说法。

通过不同深度辉钼矿中 Re 含量的变化曲线 (见图4)可以看出,随着深度的变化,Re 含量并没 有发生相应的增减,这说明在该矿床中,辉钼矿中 的 Re 含量并不受矿体埋藏深度的影响。



图 4 Re 含量随矿体埋藏深度变化曲线

Fig. 4 Curve of Re content vis burial depth of ore body

此外,一些学者指出辉钼矿中 Re 含量对其物 质来源可能有指示意义^[16-17]。Mao 等^[16]在综合 分析对比中国各种类型铜(钼)矿床中辉钼矿的 Re — 263 — 含量后总结认为,从幔源、壳幔混源到壳源,辉钼矿 的 Re 含量各递减一个数量级(0.0x~0.x ng/g)。 从测试结果看出,琅琊山铜矿床辉钼矿 Re 含量平 均为0.206 ng/g,如此高的 Re 含量进一步证明了 与成矿有关的岩体一定是壳幔同熔作用的结果,而 且以幔源为主。

5 结语

(1)通过对安徽滁州琅琊山铜矿床中的辉钼 矿 Re-Os 同位素年龄测定,获得¹⁸⁷ Re-¹⁸⁷ Os 等时 线年龄为(128.6±2.2) Ma,首次得到本区的精确 成矿年龄。可以推断,滁州琅琊山铜矿化时间为早 白垩纪,属燕山期构造-岩浆活动的产物。

(2) 与已知的和成矿关系密切的石英闪长玢岩 岩体的同位素地质年龄相比,推断出琅琊山铜矿床在 成矿过程中,热液成矿作用要略晚于热液成岩作用。

(3) 滁州琅琊山铜矿床辉钼矿中铼含量较高, 推断其成矿物质来源为壳幔混合,且幔源占主要 地位。

6 参考文献

- [1] 中国矿床发现史编委会.中国矿床发现史・安徽卷
 [M].北京:地质出版社,1996:1-173.
- [2] 王波华,张怀东、彭海辉、安徽省滁州市琅琊山铜矿成矿规律 与深部找矿[J]. 安徽地质,2007,17(3):174-175.
- [3] 陈毓川,王登红,朱裕生,徐志刚,任纪舜,翟裕生, 常印佛,汤中立,裴荣富,滕吉文,邓晋福,胡云中, 任天祥,沈保丰,王世称,肖克炎,彭润民,钱壮志, 梅燕雄,杜建国,施俊法,张晓华,朱明玉,徐珏,薛春 纪.中国成矿体系与区域成矿评价(上册)[M]. 北京:地质出版社,2007: 1008.
- [4] 杜安道,何红蓼,殷宁万,邹晓秋,孙亚莉,孙德忠, 陈少珍,屈文俊,辉钼矿的铼-俄同位素地质年龄测 定方法研究[J].地质学报,1994,68(4):339-347.
- [5] 杜安道,赵敦敏,王淑贤,孙德忠,刘敦 Carius 管 溶样和负离子热表面电离质谱准确测定辉钼矿铼 -

(4) 我同位素地质年龄[J]. 岩矿测试, 2001, 20(4): 247-252.

- [6] 屈文俊,杜安道.高温密闭溶样电感耦合等离子体质 谱准确测定辉钼矿铼-银地质年龄[J].岩矿测试, 2003,22(4):254-257.
- [7] Shirey S B, Walker R J. Carius tube digestion for low blank rhenium-osmium analysis [J]. Analytical Chemistry, 1995, 67:2136-2141.
- [8] Ludwig K R. Using isoplot / E X, Version 2.0;
 A geochronological toolkit for Microsoft Excel [M].
 Berkeley: Geochronological Center (S1),1999.
- [9] 翟裕生,姚书振,林新多,金福全,周珣若,万天丰, 周宗桂.长江中下游地区铁、铜等成矿规律[J]. 矿床地质,1992,11(1):1-12.
- [10] 裴荣富,梅燕雄,毛景文,李进文,傅旭杰,龚羽飞, 杨德凤,胡如权,中国中生代成矿作用[M].北京:地 质出版社,2008:
- [11] 肖玉金. 琅琊山铜矿床成矿作用动力学初探[J]. 西部探矿工程, 2003(1):78-79.
- [12] 王立本,季克俭,陈东.安基山和铜山铜(钼)矿床中 辉钼矿的铼- #明位素年龄及其意义[J].岩石 矿物学杂志,1997,16(2):154-158.
- [13] 黎形,倪守斌,地球和地壳的化学元素丰度[M]. 北京:地质出版社,1990:10-25.
- [14] Gilos C L, Schilling J H. Variation in rhenium content of molybdenite [C] // Proceedings of 24th International Geological Congress. 1972,24(10):145 - 152.
- [15] Рехарский В N. Заводская лаборатория [M]. 陈寿 根,译. 1984, Т. 50, No. 1:3-7.
- [16] Mao J W, Zhang Z C, Zhang Z H, Du A D. Re-Os isotopic dating of molybdenites in the Xiaoliugou W (Mo) deposit in the northern Qilian mountains and its geological significance [J]. Geochim Cosmochim Acta, 1999,63(11-12):1815-1818.
- [17] Stein H J, Markey R J, Morgan J W, Hannah J L, Scherstén A. The remarkable Re-Os chronometer in molybdenite: How and why it works [J]. Terra Nova, 2001,13(6):479-486.