

赣南崇义地区淘锡坑钨矿的地质特征与成矿时代

陈郑辉¹, 王登红¹, 屈文俊², 陈毓川³, 王平安⁴, 许建祥^{3,5}, 张家菁^{3,5}, 许敏林⁵

CHEN Zheng-hui¹, WANG Deng-hong¹, QU Wen-jun², CHEN Yu-chuan³,
WANG Ping-an⁴, XU Jian-xiang^{3,5}, Zhang Jia-jing^{3,5}, XU Min-lin⁵

1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;

2. 国家地质实验测试中心, 北京 100037;

3. 中国地质科学院, 北京 100037;

4. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

5. 江西省赣南地质调查大队, 江西 赣州 341000

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

2. *National Research Center of Geoanalysis, Beijing 100037, China;*

3. *Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;*

4. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*

5. *Gannan Geological Survey Party of Jiangxi Province, Ganzhou 341000, Jiangxi, China*

摘要:江西省崇义县淘锡坑钨矿区位于南岭东西向构造带东段与武夷山北东—北北东向构造带南段的复合部位,是九龙脑—淘锡坑矿田的一个重要矿区,属于以石英脉型黑钨矿为主的钨多金属矿床。矿脉穿切于震旦系中,成矿主要受北西向断裂控制,成因与燕山期岩浆作用有关。选取含矿石英脉中与黑钨矿共生的辉钼矿进行Re—Os等时线年龄的测定,得到辉钼矿的等时线年龄为 $154.4\text{ Ma} \pm 3.8\text{ Ma}$,黑钨矿的模式年龄为 $164.0\text{ Ma} \pm 2.7\text{ Ma}$,表明该矿床形成于燕山早期。

关键词:Re—Os等时线;矿化年龄;辉钼矿;黑钨矿;赣南崇义地区

中图分类号:P618.67

文献标识码:A

文章编号:1671-2552(2006)04-0496-06

Chen Z H, Wang D H, Qu W J, Chen Y C, Wang P A, Xu J X, Zhang J J, Xu M L. Geological characteristics and mineralization age of the Taoxikeng tungsten deposit in Chongyi County, southern Jiangxi Province, China. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25(4):496-501

Abstract: The Taoxikeng tungsten deposit, located in the compounding belt between the eastern segment of the E-W-trending Nanling tectonic zone and the southern segment of the NE-NNE Wuyishan tectonic belt, is an important mining area in the Jiulongnao-Taoxikeng orefield, belonging to a quartz vein-type tungsten polymetallic deposit consisting predominantly of wolframite. The ore veins cut the Sinian and the tungsten mineralization is mainly controlled by a NW-trending fault. Molybdenite associated with wolframite from quartz ore veins yielded a Re—Os isochron age of $154.4 \pm 3.8\text{ Ma}$ and the model age of wolframite is $164.0 \pm 2.7\text{ Ma}$. This suggests that the Taoxikeng deposit formed in the early Yanshanian and is genetically related to Yanshanian magmatism.

Key words: Re—Os isochron; mineralization age; molybdenite; wolframite; Chongyi, southern Jiangxi

收稿日期:2005-06-15;修订日期:2006-02-13

地调项目:中国地质调查局地质调查项目《中国成矿体系与区域成矿评价》(K1.4-3-4)、国土资源部百人计划项目、科技攻关项目(2003BA612A-01)等的资助。

作者简介:陈郑辉(1973-),男,在读博士,岩石、矿物、矿床学专业,从事矿产资源评价和基于GIS的矿产资源评价软件开发研究。E-mail: chenzhenghui@sina.com

赣南地区所处的全球构造位置,属滨太平洋(环太平洋)构造域(一级构造)中生代构造带的南东部,次级构造单元为南岭东西向构造带(二级构造)东段与武夷山北东—北北东向构造带南段的复合部位。它经历了3个重要地史发展阶段,每一阶段都有花岗岩形成。震旦纪至早古生代,以海相类复理石沉积建造为特征,志留纪末褶皱、转化为地台,与扬子地台合并;晚古生代至中生代初,以海陆交替相碳酸盐岩及碎屑岩沉积为主,地壳表现为垂直振荡运动;早三叠世以后发展到了一个新阶段,海水全部退出,继之而起的是内陆断陷盆地沉积、断裂发育,并伴随大规模的岩浆活动,形成了极其丰富的钨、锡、铌、钽、稀土等矿产^[1]。

江西省崇义县淘锡坑钨矿位于北北东向九龙脑—营前岩浆岩带与东西向古亭—赤土区域构造—岩浆—成矿带的交会部位,是九龙脑—淘锡坑矿田的一部分。20世纪60年代初、80年代和2003年至今分别在该矿区开展了地质找矿工作,但很少开展科研工作。本文在淘锡坑矿区烂埂子区段海拔标高为206 m的中段坑道V2号脉采集了5个辉钼矿样品,由中国地质科学院国家地质实验测试中心,采用同位素稀释—等离子体质谱法,进行了Re—Os等时线年龄测定,获得了 $154.4\text{ Ma}\pm 3.8\text{ Ma}$ 的辉钼矿等时线年龄数据。

1 区域地质背景

区内广泛出露震旦系—奥陶系,分布面积占80%以上;另有少量泥盆系、石炭系、二叠系、白垩系、第三系分布。震旦系为火山物质、泥砂质所构成的复理石建造,断块状分布于樟东坑—天井窝、仙鹅塘—淘锡坑一带,包括坝里组与老虎塘组;寒武系则以泥砂质岩石为主体,下部含炭、上部夹透镜状碳酸盐岩层,集中出露于矿田东南与北部;奥陶系更为复杂,主要为笔石页岩建造,间夹多层砂质、砾质碳酸盐岩层。这些地层经加里东运动,褶皱隆起而成为本区基底。泥盆系、石炭系、二叠系的地层角度不整合于基底地层之上,岩性从磨拉石建造开始,以浅海碳酸盐岩建造为主,至陆相沼泽泥砂质含煤建造结束。侏罗系、白垩系、第三系为断陷盆地沉积的红色碎屑岩系。

本区构造变形强烈,褶皱断裂发育,长期多阶段构造演化而形成了各具特色的加里东、海西—印支、燕山构造层。每个构造层均有独特的沉积建造、岩浆活动、构造变形及复杂的组合形式,并彼此交汇、叠加改造,形成以北北东向、东西向构造为主,叠加北东、北西、近南北向构造的总体格局。东西向构造和北北东向构造在钨锡成矿时期均有过多次反复的活动,形成了广泛的、形式多样的复合构造及其他方向的次级配套构造。这些构造为本区燕山期成矿岩体和钨锡多金属矿床的形成提供了有利的条件。

区内岩浆活动以加里东期和燕山期为主,加里东早期阶段以中基性至酸性海底火山喷发为主,晚期阶段表现为

强烈的混合岩化和酸性岩浆侵入;燕山早期主要为酸性岩浆侵入活动,间有少量基性岩浆侵入;海西—印支期岩浆活动比较微弱,仅有少许中酸性岩株出露。九龙脑岩体:出露在矿区以南8 km处,南起洪水寨,北至园洞,东西宽15 km,南北长12 km,面积约105 km²。形成于燕山早期第II阶段(约183 Ma)^[1],呈岩基状出露于矿田中部,作北北东向展布,往北、往南隐伏。该岩体可划分出马子塘、园洞、石溪、竹高岭4个不同期次形成的岩体。其受区域性北北东与东西向构造的复合控制,起始于晚三叠世,以中侏罗世为主体,晚侏罗世与钨锡成矿关系最为密切。岩体南端为粗粒黑云母花岗岩,往北逐渐过渡为二云母花岗岩,并有小岩枝伸延到柯树岭矿区。岩体为重熔S型花岗岩^[1-2],石英含量较高,钾长石高于斜长石,暗色矿物以黑云母为主,副矿物中常有磁铁矿、锆石、磷灰石、独居石、萤石、黑钨矿等,多阶段活动明显,演化程度较高,并富含W、Sn、Pb、Ag等成矿元素,是矿田内钨、锡、铅、锌矿的成矿母岩。

本区已知矿床较多,矿化复杂,类型多样,环绕燕山期九龙脑岩体,分布着以樟东坑、九龙脑为代表的钨矿床,以洪水寨、淘锡坑、柯树岭为代表的钨锡矿床和以赤坑、宝山为代表的银铅锌矿床。成矿多与隐伏、半隐伏小花岗岩体密切相关,矿床类型以石英脉型为主,次为矽卡岩型、破碎蚀变岩和云英岩型。

2 矿区地质特征简介

矿区地层较简单,大范围出露的为震旦纪、寒武纪、奥陶纪变质岩系,也是矿区的主要赋矿围岩,仅在矿区东部有泥盆纪、二叠纪、石炭纪沉积岩出露,构成宝山近南北向斜拗陷的一部分(图1)^[2]。区内断裂发育,形式复杂,规模不大,活动时间较长,既有控矿、储矿断裂又有成矿期后破坏性断裂构造。根据空间展布可分为以下4组:①南北向断裂;②北西向断裂;③北东向断裂;④东西向断裂。据地表和深部工程揭露,淘锡坑矿区岩浆岩可分3期:最早为闪长岩脉,其次是隐伏花岗岩体(包括伴随的各种酸性岩脉),最后为基性的辉长岩脉。根据深部钻孔资料^[2],推测区内隐伏岩体总体呈北北西向延伸,以北西段(宝山、棋洞、烂埂子)、牛角湾、西坑口为顶凸起,标高在+50~200 m之间。在深部隐伏花岗岩体的热力作用下,于外接触带的变质岩中形成了较为明显的热力蚀变晕圈。越近花岗岩体变质越强,反之则逐渐减弱。根据野外观察及钻孔编录,可以观察到自花岗岩体向外,大致可分为3个蚀变带:①角岩带;②强角岩化蚀变带;③角岩化—弱角岩化蚀变带。

根据工作程度不同,本矿区可以分为淘锡坑北西矿段、枫林坑—天虹山矿段。淘锡坑北西矿段工作程度较高,已经做过评价,而枫林坑—天虹山矿段工作程度相对较低,是目前开展地质找矿工作的重点区。

① 江西冶金地质勘探二队.江西南部钨矿资料汇编,内部资料,1978,3:45.

淘锡坑北西矿段包括宝山、棋洞、烂埂子3个区段,矿体主要赋存于震旦系浅变质岩内,向下延伸于隐伏花岗岩体内,矿脉在地表出露长度340~682 m不等,倾向延伸250~660 m。矿体产出标高为690 m至-56 m,已控制最低标高-56 m,尚未尖灭,部分矿脉深度大于长度。矿化类型主要为石英大脉型,局部见黑钨矿赋存于云英岩脉或云英岩化岩石中。矿体根据走向分为北西组、南北组和北东组、东西组。北西组:矿脉走向300~330°,倾向北东,倾角75~80°。平面展布略呈北西向散开,南东向收敛;南北组:矿脉呈南北向延展,北端略向西弯曲,总体产状:倾向270~285°,倾角80°左右,矿脉延伸较稳定,具明显的左行尖灭侧现;北东组:脉体短小,形态简单,倾向330°,倾角80°左右;另偶见东西向脉组:在坑道中见其走向近东西,倾向北北东,倾角80°左右,脉体细小,脉厚小于10 cm,延长数米。矿脉平面形态和剖面形态:本区矿体形态变化不大,脉幅稳定,延伸较深。矿体呈脉状,单脉在平面上较平直,略呈舒缓波状弯曲,局部见弯折,大部分矿体见分枝、尖灭侧现、尖灭再现,局部见膨大缩小;在剖面上为薄至厚板状,也见分枝复合现象,总体形态向上发散向下收敛,地表脉体细小密集,往下脉体变厚变少,部分单脉形态呈透镜状,上下小、中间大,从地表至156 m标高矿脉逐渐增大,向下至岩体内逐渐尖灭,部分单脉呈楔形,上小下大(图2)。根据赣南地质调查大队在该矿区的工作资料^[2],宝山区段V11号矿脉由356 m中段标高到106 m中段标高,矿体厚度由0.3~0.5 m变大到1.7~1.9 m。 WO_3 品位也由浅部到深部有变富的趋势(表1,图3)。

枫岭坑至天虹山地段,出露规模宏大的矿

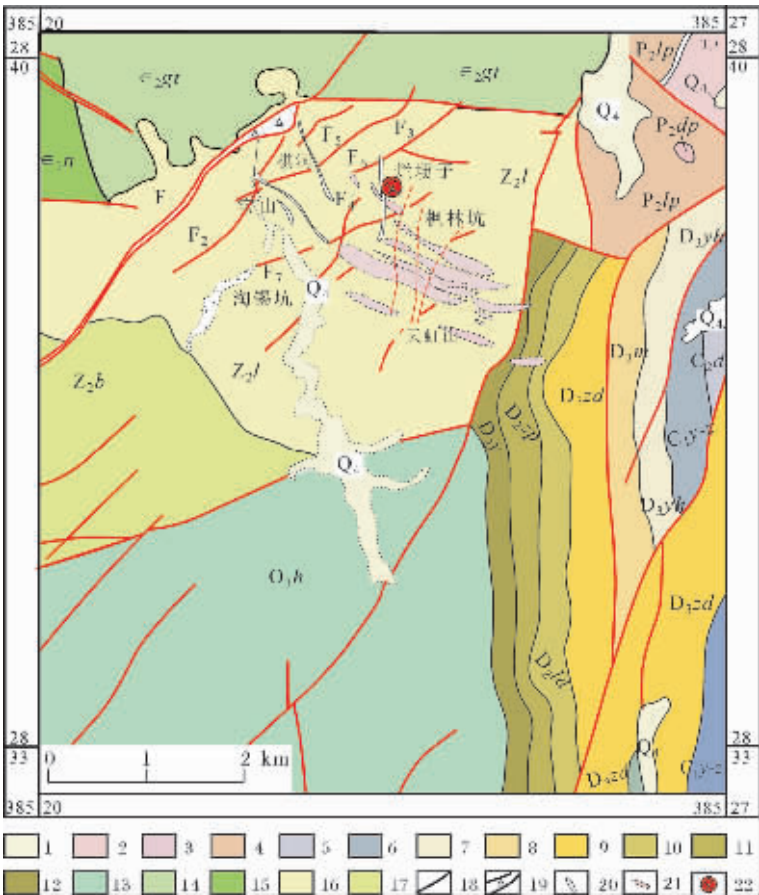


图1 崇义县淘锡坑矿区地质图(据江西省赣南地质大队资料改编)

Fig.1 Geological map of the Taoxikeng mining area, Chongyi, Jiangxi
1—第四系;2—下三叠统铁石组;3—中二叠统大棚组;4—中二叠统乐平组;
5—中石炭统大埔组;6—下石炭统杨家源组、梯山组并层;7—上泥盆统洋湖组;
8—上泥盆统麻山组;9—上泥盆统樟东组;10—中泥盆统罗段组;11—中泥盆统中棚组;12—中泥盆统云山组;13—上奥陶统黄竹洞组;14—中寒武统高滩组;
15—下寒武统牛角组;16—上震旦统老虎塘组;17—下震旦统坝里组;
18—断裂;19—断层破碎带;20—矿体带;21—矿化标志带;
22—采样位置(图中28/40、385/20等表示高斯投影的公里数)

表1 崇义县淘锡坑V11号黑钨矿矿脉W品位

Table 1 Tungsten grade of the No. V11 wolframite vein in the Taoxikeng tungsten deposit, Chongyi, Jiangxi

顺序	356中段		306中段		256中段		206中段		156中段	
	样长 /m	WO ₃ /%	样长 /m	WO ₃ /%	样长 /m	WO ₃ /%	样长 /m	WO ₃ /%	样长 /m	WO ₃ /%
H1	0.31	3.16	0.6	0.96	0.90	25.5	0.35	3.42	1.15	13.6
H2	0.54	1.05	0.4	3.15	0.3	15.5	0.95	4.11	0.68	24.4
H3	0.54	4.2	0.35	2.72	0.4	3.4	1.3	9.04	1.5	8.5
H4	0.66	4.0	0.45	1.79	1.7	7.58	0.3	3.27	1.6	1.52
H5	0.65	3.96	0.45	0.98	0.6	11.5	1.10	6.66	0.55	30.24
H6	0.24	2.7	0.45	0.864	0.4	4.0	0.2	3.29	0.5	9.8

注:资料来源于江西省崇义县章源钨制品有限公司淘锡坑钨矿区北西段储量地质报告

化标志带,地表延长最短者300 m,最长1600 m,宽度70~95 m,含脉密度1~2条/m,含脉率1%左右,绝大多数细脉厚度在0.1~1 cm之间,形态平直、稳定。矿化标志带总体走向280~300°,倾向北北东,倾角70~80°。

本矿床矿石类型为原生矿石,主要矿物组合为石英-黑钨矿-硫化物。主要金属矿物有黑钨矿、锡石、白钨矿、黄铜矿、黄铁矿、毒砂及少量的闪锌矿、辉钼矿、辉铋矿。非金属矿物有石英、黄玉、萤石、电气石、铁锂云母、方解石、叶腊石、绿泥石、绢云母、白云母等。氧化矿物常见的有铜蓝、高岭土、褐铁矿。有用矿物黑钨矿结晶程度较好,大部分为自形至半自形板状晶体,其长轴一般为0.1~10 cm,最大可达数十厘米,脉石矿物主要为石英,属易选矿石。矿石的结构构造有:交代结构、交代残留结构、乳滴状交代结构,其次是半自形粒状-交代结构和嵌晶结构;致密块状构造及少量的线状-条带状构造,角砾状、扁豆状构造和晶洞构造。近围岩蚀变有硅化、白云母化、绿泥石化、黄铁矿化、云英岩化,其中以前3种常见。

本区矿床主要赋存于花岗岩体外接触带浅变质岩内,矿体中主要矿物为黑钨矿、锡石、黄铜矿等,脉旁围岩蚀变主要为硅化、白云母化,成矿阶段以高温热液型为主。据此,本区矿床属近侵入体带高温热液裂隙充填锡石-黑钨矿-石英建造类型。

本矿区的北西段(宝山、棋洞、烂埂子)已完成评价,并且其历年采出钨精矿累计约 $1.4\times 10^4\text{t}$,现保有三氧化钨储量 $3.5\times 10^4\text{t}$,达中型矿床规模。

3 样品及测试技术

本文采集的辉钼矿样品是烂埂子区段海拔标高为206 m中段坑道V2号脉的矿石样品(图4),用以进行Re-Os同位素研究。矿石中主要成分是黑钨矿、辉钼矿、石英和云母等。采样地点标在图1中。矿石中黑钨矿呈板状自形半自形晶体,自围岩向脉体中心生长。辉钼矿呈半自形晶赋存于黑钨矿边。云母主要生长在围岩与脉体的交界处,为自形、半自形晶体。

分析样品主要选取与黑钨矿伴生的辉钼矿单矿物,共5个样品,并尝试性地采取一个黑钨矿样品进行Re-Os同位素定年试验。本次研究中的测试分析是在国家地质实验测试中心Re-Os同位素实验室进行的,Re、Os化学分离步骤和质谱测定等的分析方法见相关文献^[3-6]。

准确称取待分析样品,通过长细颈漏斗加入到Carius管底部。缓慢加液氮到有半杯乙醇的保温杯中,调节温度到摄氏-50~-80℃。将装好样的Carius管放到该保温杯中,通过长

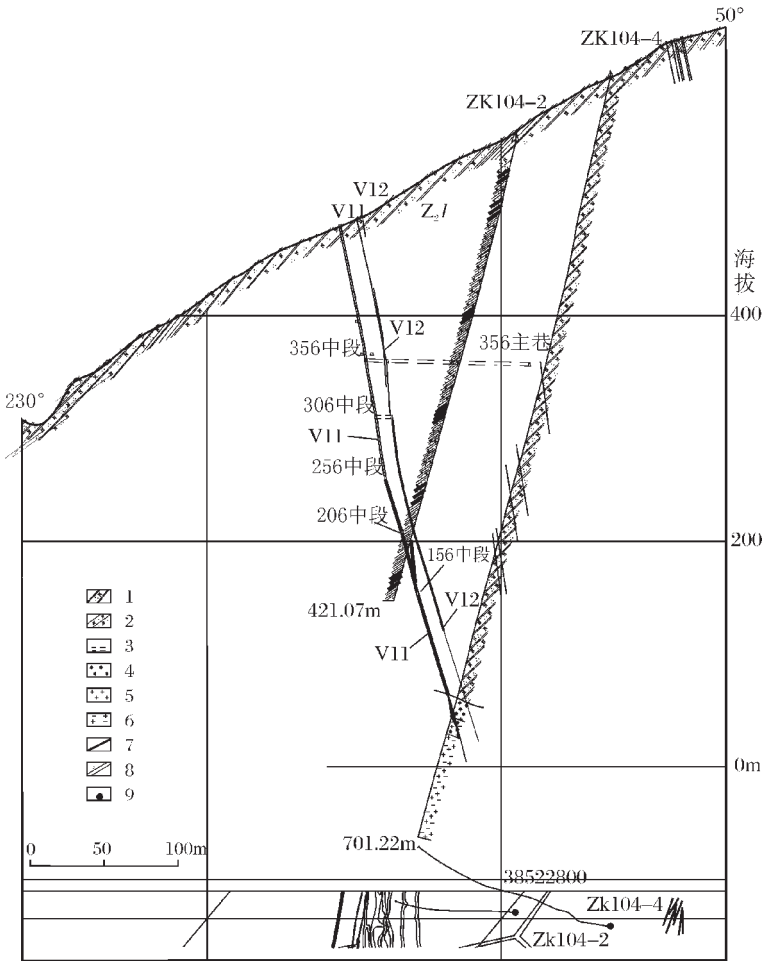


图2 淘锡坑矿区104线剖面

(据江西省赣南地质大队数据改编)

Fig.2 Exploration line No.104 in the Taosikeng mining area
1—变质长石英砂岩;2—变质细砂岩;3—粉砂质板岩;4—细粒花岗岩;
5—黑云母花岗岩;6—中细粒含斑黑云母花岗岩;7—钨矿脉;
8—坑道;9—钻孔;ZJ—上震旦统老虎塘组

细颈漏斗把准确称取的¹⁸⁵Re和¹⁹⁰Os混合稀释剂加入到Carius管底部,再加入4 mL 10 mol/L的HCl,4 mL 16 mol/L的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。轻轻放套管入鼓风烘箱内,待回到室温后,逐渐升温到230℃,保温12 h。在底部冷冻的情况下,打开Carius管,并用40 mL水将管中溶液转入蒸馏瓶中。在105~110℃条件下蒸馏,用10 mL水吸收蒸出的OsO₄。以ICPMS(等离子体质谱仪)测定Os同位素比值。将第一次蒸馏残液置于电热板上,加热近干。加少量水,加热近干。重复2次以降低酸度。加入10 mL 5 mol/L NaOH,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 Teflon分液漏斗中。加入10 mL丙酮,萃取Re。静止分相,弃去水相。加2 mL 5 mol/L NaOH溶液到分液漏斗中,洗

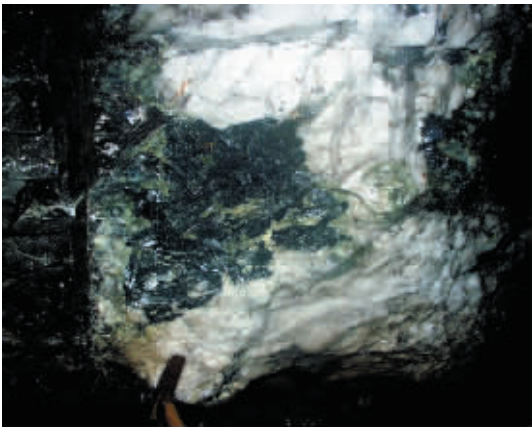


图3 淘锡坑钨矿156 m标高黑钨矿矿脉

Fig.3 Wolframite vein in the Taoxikeng tungsten deposit at an altitude of 156 m

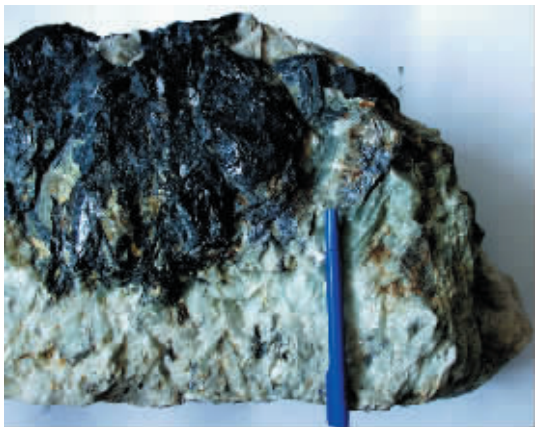


图4 淘锡坑钨矿206 m标高含辉钼矿黑钨矿矿标本

Fig.4 Molybdenite and wolframite specimens from the Taoxikeng deposit at an altitude of 206 m

去丙酮相中的杂质。在电热板上加热溶液至干。加数滴浓硝酸和30%过氧化氢,加热蒸干以除去残存的Os。用稀HNO₃溶解残渣,稀释到硝酸浓度为2%时测定Re同位素比值。

4 测试结果

经过样品的测试,得出每个样品中¹⁸⁷Re、¹⁸⁷Os的含量和根据公式计算所得的模式年龄值(表2,其中除TXK1-6为黑钨矿之外,其余均为辉钼矿单矿物)。根据¹⁸⁷Re和¹⁸⁷Os的含量绘制等时线图,图形显示见图5。Re-Os同位素分析测试的结果表明,辉钼矿的模式年龄变化于(153.5±2.7)~(156.4±3.5)Ma之间。表2中样品TXK1-6为与辉钼矿同一矿脉中的黑钨矿,其成矿年龄(164.0 Ma±2.7 Ma)要比辉钼矿早。其中样号为TXK1-3的辉钼矿作为平行样测试了2次,目的是检测测试的结果。平行样的测试结果非常接近,说明测试结果是可靠有效的。

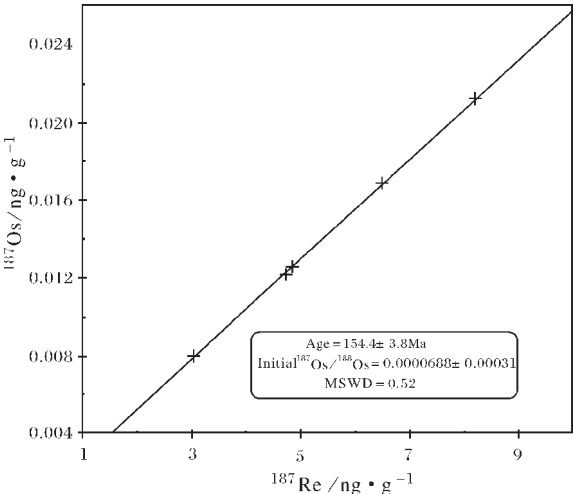


图5 辉钼矿的¹⁸⁷Re-¹⁸⁷Os等时线

Fig.5 ¹⁸⁷Re-¹⁸⁷Os isochron of molybdenite

表2 淘锡坑钨矿中辉钼矿的Re-Os同位素数据

Table 1 Re-Os data for molybdenite from the Taoxikeng tungsten deposit

样号	样重 /g	Re/ng·g ⁻¹		C普Os/ng·g ⁻¹		¹⁸⁷ Re/ng·g ⁻¹		¹⁸⁷ Os/ng·g ⁻¹		模式年龄/Ma	
		测定值	d	测定值	d	测定值	d	测定值	d	测定值	d
TXK1-1	0.403	13.03	0.10	0.00072	0.00021	8.192	0.066	0.02122	0.00032	155.3	2.7
TXK1-2	0.404	10.35	0.09	0.00105	0.00025	6.508	0.055	0.01684	0.00019	155.1	2.3
TXK1-3	0.405	7.486	0.061	0.00132	0.00027	4.705	0.038	0.01221	0.00014	155.5	2.2
TXK1-4	0.401	7.711	0.059	0.00197	0.00014	4.847	0.037	0.01257	0.00016	155.5	2.4
TXK1-5	0.418	4.851	0.054	0.00131	0.00021	3.049	0.034	0.00796	0.00015	156.4	3.5
TXK1-6	0.256	8.973	0.084	0.00232	0.00020	5.640	0.053	0.01543	0.00020	164.0	2.7
TXK1-3	0.400	7.567	0.067	0.00136	0.00016	4.756	0.042	0.01218	0.00018	153.5	2.7

注:由国家地质实验测试中心屈文俊测试

5 讨论与结论

(1)Re-Os同位素测年方法是直接精确测定辉钼矿及相关矿化模式年龄的有效手段^[9,10]。淘锡坑矿区同一矿脉中5个辉钼矿的模式年龄变化于 $(153.5\pm 2.7)\sim(156.4\pm 3.5)$ Ma之间,在等时线图上分布近于一条直线,其等时线年龄为 $154.4\text{ Ma}\pm 3.8\text{ Ma}$,等时线年龄与模式年龄很接近,说明测试结果是可信的,可以作为淘锡坑矿区的成矿年龄。

(2)使用黑钨矿进行Re-Os同位素定年还未见文献报道。本次尝试性地选择了一个样品进行测试,得到的模式年龄数据为 $164.0\text{ Ma}\pm 2.7\text{ Ma}$,要比辉钼矿的等时线年龄大约早10 Ma。这与黑钨矿先于辉钼矿形成的地质特征是吻合的,也表明该矿区的成矿作用从黑钨矿到辉钼矿经历了大约10 Ma的历史。这说明在较长时间内成矿物质在相对稳定的构造条件下不断补给,导致了富矿脉的形成和黑钨矿、辉钼矿等矿石矿物粗大晶体的形成。

(3)本矿区样品辉钼矿中Re含量比其他矿区的辉钼矿要低将近3个数量级^[9,10],代表了什么地质意义或什么原因造成的,还有待于进一步研究。

(4)赣南黑钨矿的形成是该地区多期岩浆构造演化活动的产物,而燕山早期的岩浆热液则是该地区钨矿成矿主要的物质来源。淘锡坑钨矿属于高温热液成因黑钨矿-石英大脉型矿床,其中辉钼矿年龄的测定结果表明成矿作用与燕山早期花岗岩有关。

致谢:野外工作期间得到江西省赣南地质调查大队许建祥、张家菁、许敏林等工程师和江西省崇义县章源钨制品有限公司黄泽兰董事长等的大力支持和帮助,在此一并致谢。

参考文献:

- [1]朱炎龄,李崇佑,林运淮.赣南钨矿地质[M].南昌:江西人民出版社,1981.
- [2]许建祥,许敏林,张家菁,等.江西省崇义县章源钨制品有限公司淘锡坑钨矿区北西段储量地质报告[R].江西省地矿局赣南地质调查大队地勘院,2004.
- [3]杜安道,何红蓼,殷宁万,等.辉钼矿的铼-钨同位素地质年龄测定方法研究[J].地质学报,1994,68(4):339-347.
- [4]Andao Du, Shuqi Wu, Dezhong Sun, et al. Preparation and certification of Re-Os dating reference materials: Molybdenite HLP and JDC[J]. Geostandard and Geoanalytical Research, 2004, 28(1): 41-52.
- [5]杜安道,赵敦敏,王淑贤,等.Carius管溶样和负离子热表面电离质谱准确测定辉钼矿铼-钨同位素地质年龄[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-钨地质年龄[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]. Anal. Chem., 1995, 67: 2136-2141.
- [8]Smoliar M I, Walker R J, Morgan J W. Re-Os ages of group IIA, IIIA, IVA and VIB iron meteorites[J]. Science, 1996, 271: 1099-1102.
- [9]李红艳,毛景文,孙亚利,等.柿竹园钨多金属矿床的Re-Os同位素等时线年龄研究[J].地质论评,1996,42(3):261-267.
- [10]毛景文, Holly Stein, 杜安道, 等.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[J].地质学报,2004,78(1):122-128.