



湘东锡田合江口锡钨多金属矿床地质特征及 辉钼矿 Re-Os 同位素年龄

邓湘伟^{1,2}, 刘继顺^{1,2}, 戴雪灵³

- (1. 中南大学 有色金属成矿预测教育部重点实验室, 长沙 410083;
2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083;
3. 湖南省有色地质勘查局, 长沙 410016)

摘 要: 对合江口矿的矿床地质特征, 特别是岩相学和矿相学特征进行系统研究, 并对该矿床中的辉钼矿进行 Re-Os 同位素测年, 获得印支期(225 ± 3.6 Ma)成岩成矿作用的地质和年代学证据; 结合以往的成岩成矿时代资料, 认为锡田地区存在多期成矿事件, 并讨论成矿动力学演化特征。结果表明: 合江口矿床的第 I 期成矿事件发生在印支期, 成矿物质来源为壳幔混合源, 发生于挤压大地构造背景中, 矿化较弱; 第 II 期为燕山早期, 在拉张的构造背景下, 幔源物质大规模参与成矿, 是本区的主成矿期; 第 III 期为燕山晚期, 是与花岗斑岩脉侵入相关的斑岩-矽卡岩型矿体的成矿期, 该期形成的矿体为锡田矿田内新发现类型, 也是下一步的找矿方向之一。

关键词: 锡钨矿床; 多期成矿作用; Re-Os 同位素; 合江口; 锡田; 钦杭带

中图分类号: P597.3

文献标志码: A

Geological characteristics and molybdenite Re-Os isotopic age of Hejiangkou tungsten and tin polymetallic deposit, East Hunan, China

DENG Xiang-wei^{1,2}, LIU Ji-shun^{1,2}, DAI Xue-ling³

- (1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Non-ferrous Metals, Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, China;
2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;
3. Hunan Nonferrous Geological Exploration Bureau, Changsha 410016, China)

Abstract: The geology and mineralogy of the Hejiangkou deposit and conducted Re-Os isotopic dating on molybdenite from the Hejiangkou deposit were systematically studied. The dating results provided new evidence for the mineralization that occurred during the Indosinian (225 ± 3.6 Ma). By combining the rock-forming ages and mineralization ages obtained by both previous researches, the Xitian area experienced multi-periods mineralizations. Moreover, the metallogenetic tectonic settings of different mineralizations were also discussed. The results show that period I is the Indosinian mineralization period that involves mixing between both crust-derived and mantle-derived ore-forming materials. The period of mineralization took place under the compressional tectonic regime and featured by the weak mineralization. Period II is the early Yanshanian mineralization that represents the main mineralization period of the area and is related to a large influx of mantle-derived materials under an extensional regime. Period III is the late Yanshanian porphyry-skarn type mineralization that is related to the emplacement of granite-porphyry veins and is a recently discovered type in the Xitian orefield. The porphyry-skarn type mineralization also becomes the target of the future ore-prospecting.

Key words: Sn-W deposit; multi-periods mineralization; Re-Os isotope; Hejiangkou; Xitian; Qin Zhou-Hang Zhou suture

基金项目: 国家重点基础研究发展计划前期研究专项(2007CB416608); 湖南省创新基金资助项目(CX2010B105); 中南大学优秀博士生基金资助项目(2010ybfz050)

收稿日期: 2014-09-24; 修订日期: 2015-09-02

通信作者: 刘继顺, 教授, 博士; 电话: 13607489990; E-mail: 2421648758@qq.com

湘东合江口锡钨多金属矿床位于钦杭带结合部中段, 隶属锡田矿田。钦杭带指华夏与扬子古陆块碰撞拼贴带, 自广西钦州湾经湘东、赣中直达浙江杭州, 全长约 2000 km, 宽约 100~150 km^[1]。钦杭结合带的多次开合以及后期的陆陆碰撞和板块俯冲引起的地壳加厚和减薄导致了多旋回的构造-岩浆作用, 也为该区多期多阶段成矿作用及矿床形成奠定了基础^[2]。锡田矿田与柿竹园、黄沙坪、芙蓉、荷花坪、香花岭、瑶岗仙、大垌、姑婆山等锡钨矿田(矿床)一起产于钦杭缝合带中段。

近年来, 多位研究者在锡田矿田的矿床类型、控岩控矿构造、成矿规律、成岩时代、花岗岩与成矿的关系等方面作了一些有意义的探讨^[3-16], 也注意到了该区的多次成矿作用^[4-5], 但对印支期是否发生过成矿作用存在较大争议, 且因勘探程度略浅未对锡田矿田内的矿床做过较为详细的研究, 而当前矿床学研究已经从矿床地质特征的定性描述转向对成矿过程和成矿演化机理的定量和半定量的分析^[17-18]。本文作者在前人研究成果基础上, 通过野外地质调查、大量钻探岩芯和坑道的观察编录、岩矿标本观察、矿相学特征研究, 对合江口矿床乃至锡田矿田的成矿过程进行了系统研究, 识别出多期成矿的地质特征; 应用辉钼矿 Re-Os 法, 首次获得(225±3.6) Ma 的等时线年龄, 证实了印支期成矿作用的存在, 进而提出区内钨锡多金属成矿作用的多期多阶段的新认识, 丰富了华南地区中生代以来的成矿作用研究内容, 为下一步的找矿勘查提供了新思路。

1 矿田地质概况

1.1 合江口矿区地质

锡田矿田内出露地层主要为下石炭统岩关阶、上泥盆统锡矿山组、余田桥组、中泥盆统棋梓桥组、跳马涧组。在合江口矿床内, 出露地层有锡矿山组(D_{3x})中厚层含云母石英砂岩夹泥岩和条带状灰岩; 余田桥组(D_{3s})中厚层含云母石英砂岩夹砂质泥岩、石英岩、粉砂岩; 棋梓桥组(D_{2q})中厚层含钙质白云岩、泥灰岩、灰岩夹泥岩、砂质页岩。上述地层表现为一单斜构造, 地层走向 325°, 倾向 SW, 倾角 20°~30°。其中, 棋梓桥组是矿田内最重要的赋矿地层, 经接触交代及热变质作用形成一套大理岩、大理岩化灰岩、透辉石矽卡岩、石榴石矽卡岩夹钙硅角岩。

锡田矿田内构造主要由基底构造和盖层构造两部分组成, 基底构造以较为紧闭的近 SN 向线型褶曲、断裂变形为主, 伴有不同方向的断裂; 盖层构造以较

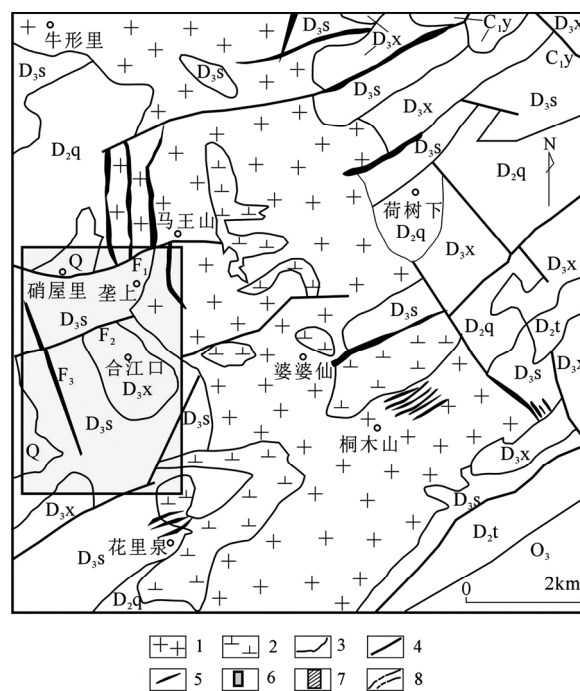


图 1 湘东锡田地质图^[16-19]: Q—第四系; C_{1y}—下石炭系岩关阶; D_{3x}—上泥盆系锡矿山组; D_{3s}—上泥盆系余田桥组; D_{2q}—中泥盆系棋梓桥组; D_{2t}—中泥盆系跳马涧组; O₃—奥陶系上统; 1—印支期花岗岩; 2—燕山早期花岗岩; 3—地质界线; 4—断层; 5—矿体; 6—合江口矿区范围; 7—锡田; 8—钦-杭缝合带

Fig. 1 Geological map of Xitian area, Eastern Hunan^[16-19]: Q—Quaternary; C_{1y}—Yanguan stage; D_{3x}—Xikuangshan formation; D_{3s}—Shetianqiao group; D_{2q}—Qiziqiao formation; D_{2t}—Tiaomajian formation; O₃—Upper system of Ordovician; 1—Indosinian granite; 2—Early yanshanian granite; 3—Geological boundaries; 4—Fault; 5—Ore body; 6—Hejiangkou ore district; 7—Xitian ore field; 8—Qin-Hang suture

为开阔的线型褶曲、断裂变形为主, 主要分布在锡田岩体的 NE 及 SW 接触带^[5]。合江口矿床的北部发育一条弧形断裂(F1), 从矿区西部外围延至硝屋里, 经马王山往北东延至, 全长大于 2 km, 地表呈硅化破碎带产出, 出露宽 1~4.5 m。断层西段走向 NWW, 倾向 SSW, 倾角约 75°, 中段走向近东西, 东段走向 NE, 倾向 SE, 倾角 35°左右, 为一压扭性断裂。另外还发育有 NEE 向和 NNW 向断裂, 其中(F3)走向约 330°, 倾向 SW, 倾角 65°~70°, 控制长度大于 2 km, 断裂上盘张节理局部发育成石英脉带型钨锡矿体, 断裂向下延伸为花岗斑岩脉侵入。断裂(F2)为后期构造, 将早期的 NNW 向断层左行错断, 其出露长度约 3 km, 宽度 5~8 m, 地表呈沟谷状, 走向约 70°, 倾向 NW,

倾角 $65^{\circ}\sim 75^{\circ}$ (见图 1)。

前人在锡田矿田内共发现有三期长英质岩体: 第一期为粗斑状黑云母花岗岩; 第二期为二云母花岗岩; 第三期为晚期的岩脉。通过岩性对比及坑道中脉体穿插关系观察、钻孔岩芯编录, 发现这三期长英质岩在合江口矿床中均有产出: 第一期为深部隐伏主岩基(γ_s^1), 岩性为灰白色中-粗粒似斑状黑云母二长花岗岩; 第二期为灰白色细粒二云母花岗岩株和岩枝(γ_s^2), 第二期花岗岩部分出露于主岩基旁侧, 大部分隐伏于主岩基之下, 除岩性上与主岩基有区别外, 主要表现在成矿能力上的差异, 如该期花岗岩侵入部位的棋子

桥组灰岩的矽卡岩化和矿化作用均十分明显, 多为顺层白钨矿化、矽卡岩型锌铜锡矿化和云英岩化; 第三期为燕山晚期侵入的灰白色-浅肉红色花岗岩斑岩脉(γ_s^3), 穿插早期的主岩基及第二期花岗岩。

1.2 矿体特征

前人将锡田矿田内的工业矿体分为矽卡岩型、云英岩-石英脉型、破碎蚀变岩型 3 种类型^[5]。合江口矿区除上述 3 种类型矿体外, 还有花岗岩斑岩脉-矽卡岩复合型矿体, 其工业矿体一般赋存在地表下 50~800 m 之间, 主矿体产于 300 m 标高以下(见图 2)。不

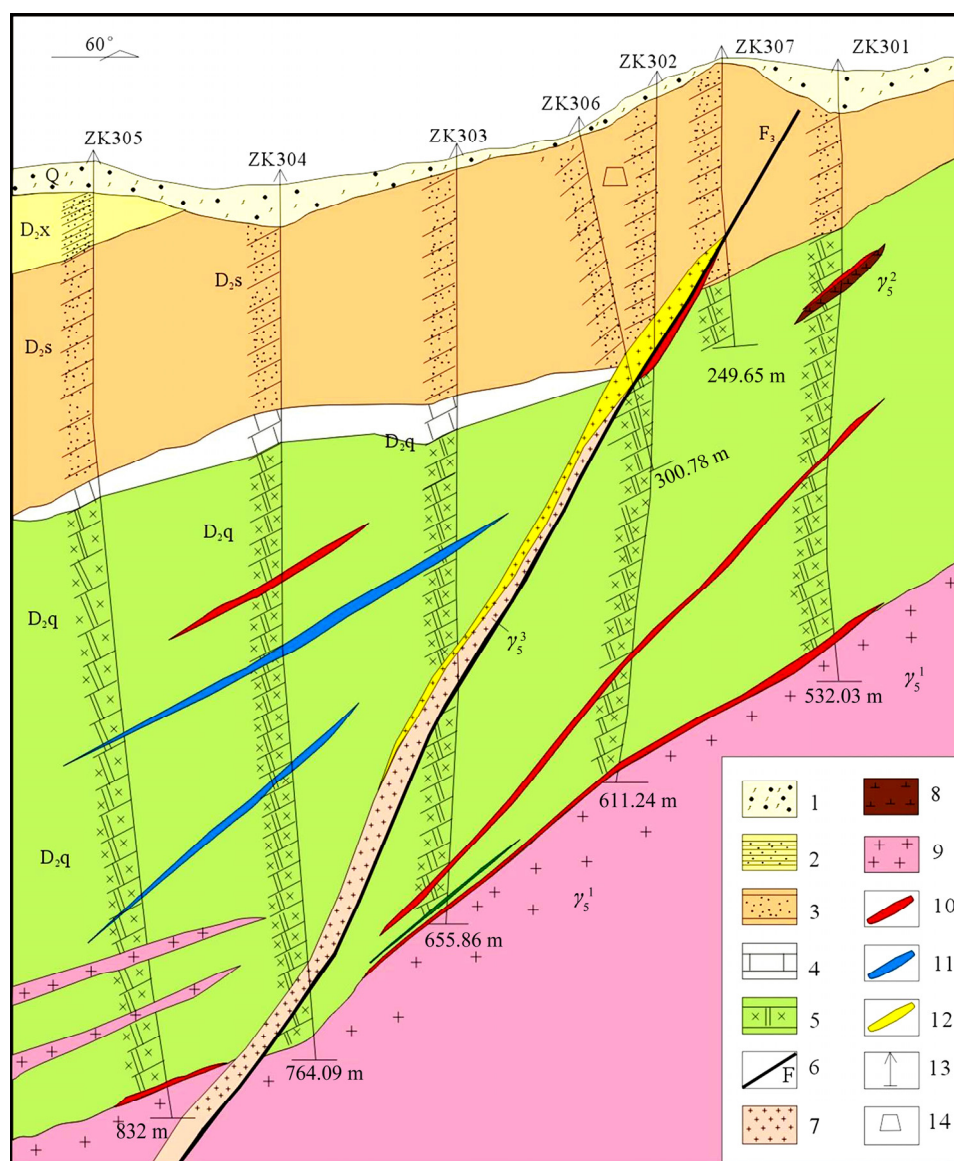


图 2 合江口矿区 3 号勘探线剖面图: 1—浮土; 2—灰岩; 3—砂岩; 4—大理岩; 5—矽卡岩; 6—断层; 7—燕山晚期花岗岩斑岩脉; 8—燕山早期白云母花岗岩; 9—印支期粗斑状黑云母花岗岩; 10—矽卡岩矿体; 11—石英脉矿体; 12—斑岩脉型矿体; 13—钻孔; 14—坑道

Fig. 2 Cross-section of No.3 segment in Hejiangkou mine: 1—Soil; 2—Limestone; 3—Sandstone; 4—Marble; 5—Skarn; 6—Fault; 7—Granite Porphyry veins; 8—Muscovite granite; 9—Coarse-grained porphyritic biotite granite; 10—Skarn orebody; 11—Quartz-vein orebody; 12—Porphyry-dike orebody; 13—Drillhole; 14—Tunnel

同类型矿体特征如下:

1) 矽卡岩型矿体。该类型矿体在区内规模最大,产于花岗岩与棋子桥组的外接触带矽卡岩之中,根据形成接触带的花岗岩的类型,又可以进一步分为3种

类型矿体:

一是沿主岩基(印支期)灰白色中粗粒斑状花岗岩与棋子桥组接触带产出矽卡岩型铜-锡矿化(体),伴生钨,呈薄层状、透镜体状产出(见图3(a), (b), (c)),

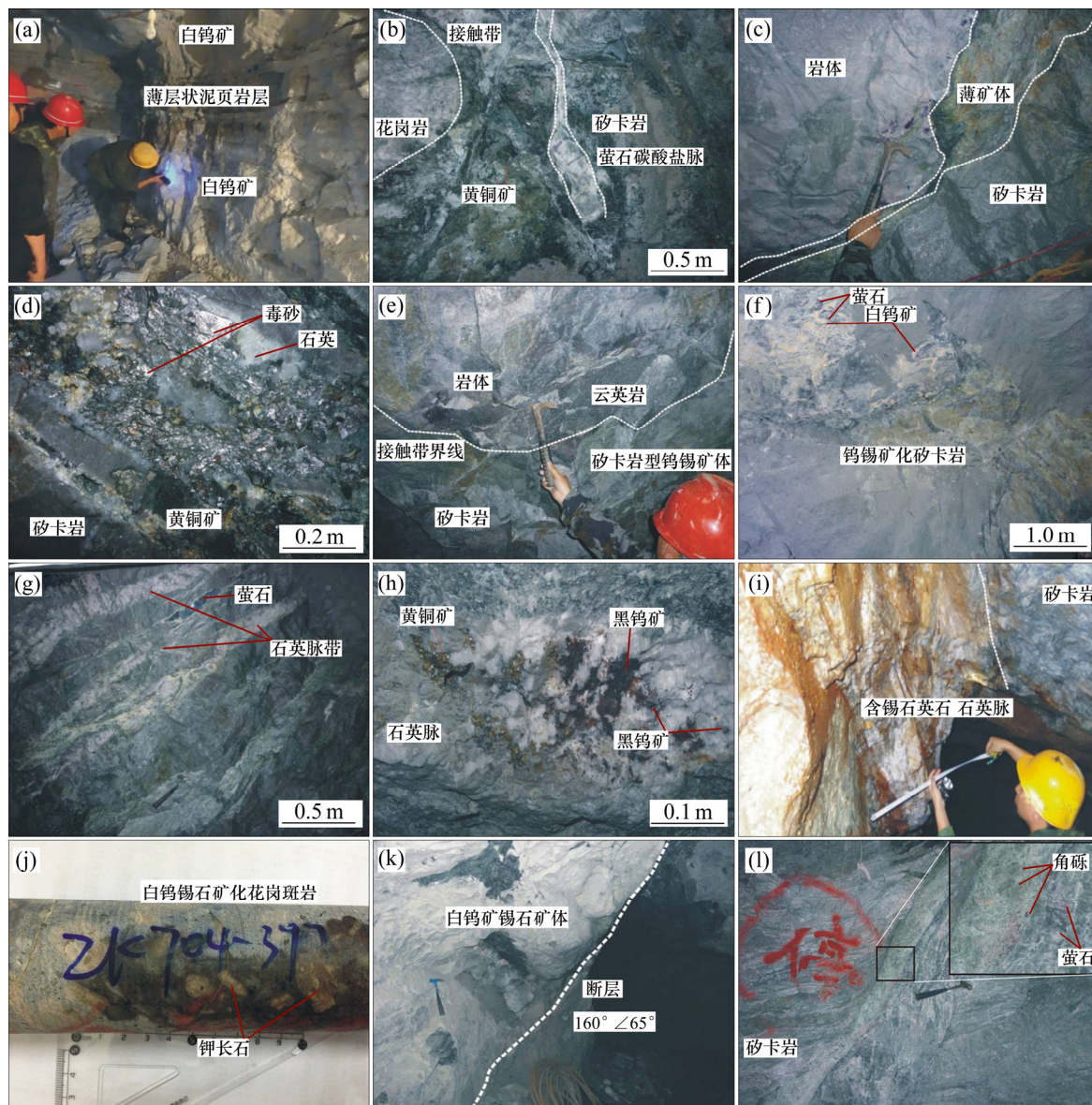


图3 合江口矿床矿化特征及不同类型矿体的交切关系: (a) 地层中产出的白钨矿体; (b) 主接触带上的黄铜矿化矽卡岩被萤石碳酸盐脉穿插; (c) 主岩基与围岩的接触带上的薄层状透镜状矿体; (d) 毒砂与黄铁矿、石英共生; (e) 二云母花岗岩与围岩的接触带上云英岩型和矽卡岩型钨锡矿体共生; (f) 接触带含萤石白钨矿矿层; (g) 石英(萤石)脉带; (h) 黑钨黄铜矿化石英脉; (i) 含钨锡石英萤石脉; (j) 白钨锡石矿化钾化花岗岩斑岩脉; (k) NEE 向断层与主接触带接触时矿体变厚变富; (l) NEE 向断层中见矽卡岩角砾被碳酸盐等矿物胶结

Fig. 3 Mineralization characteristics and different types of orebodies intersection relations of deposit: (a) Scheelite-rich orebody in strata; (b) Chalcopyrite-rich skarn cross-cutted by fluorite and carbonate vein in contact zones; (c) Thin-bedded and lenticular orebody in contact zone between granite and wallrock; (d) Arsenopyrite, pyrite and quartz assemblage; (e) Greisen-type, skarn-type W-Sn orebodies in contact zone between two-mica granite and wallrock; (f) Scheelite and fluorite orebody in contact zone; (g) Quartz and fluorite veins belt; (h) Wolframite and copper in quartz veins; (i) Tungsten and tin in quartz-fluorite vein; (j) Scheelite and cassiterite in potassic granite porphyry dikes; (k) NEE-striking fault cross-cutting main contact zone where the ore body became thicker and richer; (l) Skarn breccias cemented by carbonate minerals in NEE-striking faults

矿(化)体不连续,大部分以品位低、富砷为特征(局部可见大量的毒砂,见图3(d)),部分仅发育星散浸染状黄铜矿化,达不到边界品位,但期矽卡岩在有晚期岩脉(枝)、石英脉穿插部位矿体急剧膨大,品位变富,显示出叠加成矿的特点(见图4)。

二是沿燕山早期二云母花岗岩与棋子桥组接触带产出的矽卡岩型矿体,该类型矿体以富萤石为特征,局部形成萤石矿体,主要产出白钨矿,伴生锡矿,远离接触带产出矽卡岩型锌矿,伴生铜矿,该类型矽卡岩型矿体常与云英岩矿体共生(见图3(e)和(f))。

三是产于燕山晚期花岗斑岩脉下盘的矽卡岩型钨、锡矿体,该类型矿体与花岗斑岩脉型矿体为同一个矿体(见图2)。

2) 云英岩-石英(方解石、萤石)脉(带)型矿体。石英脉型矿体分两种:一是主产于岩体内部、部分切入围岩的石英脉或石英脉带型黑钨矿-白钨矿夹黄铜矿-锡石脉体,单脉宽约0.1~0.8 m,脉带厚约1~3 m,走向 NEE-EW,倾向 N,倾角 60°~70°,延长约 50~200 m;二是产于地层内的石英脉带型黑钨矿-锡石-黄铜矿脉体,单脉厚约0.1~0.5 m,脉带厚约3~8 m,受断层面上盘张节理控制,走向 NNW,倾向 SWW,倾角 40°~50°,单个矿体延伸长约100~200 m(见图3(g)~(i))。云英岩型矿体常与石英脉型矿体或矽卡岩型矿体相伴产出。当燕山早期花岗岩与棋子桥组灰岩接触时常见有云英岩型矿体与矽卡岩型矿体相伴产出,云英岩型矿体产于内接触带或岩体内部,为陡倾斜锡钨矿体,矿体厚度、品位变化大,延长不大(见图2, 3(e)和4)。

3) 花岗斑岩脉型矿体。区内出露一条 NNW 向的灰白-肉红色花岗斑岩脉(F3),走向 330°,倾向 SWW,倾角 60°~70°,该岩脉控制长度约 2 km,最大控制深度达 850 m。该脉被 NEE 向断层(F2)左行错断,岩脉主要发生钾化、硅化,具有上锡下钨的矿化特征,在脉体延伸上端,矿体变厚变富,一般整条岩脉均发生斑岩型矿化,局部形成富厚矿体,在岩脉与棋子桥组接触部位局部形成矽卡岩型钨锡矿体,控制矿体最厚处达 7 m;最富处品位为 W_2O_3 达 2.3%、Sn 达 1.7%,平均厚度 2.7 m;平均品位 W_2O_3 0.43%, Sn 0.65%(见图3(j))。

4) 构造蚀变岩型矿化,该构造带走向约 70°,倾向 NNW,倾角约 70°(F4, 见图4),矿体在构造带中呈透镜体状,由于在本区未形成很好的工业矿体,故未具体描述,但断层穿切矽卡岩型矿体时,矿体变富变厚(见图3(k))。

综合上述矿体之间的空间穿插关系及成矿作用的

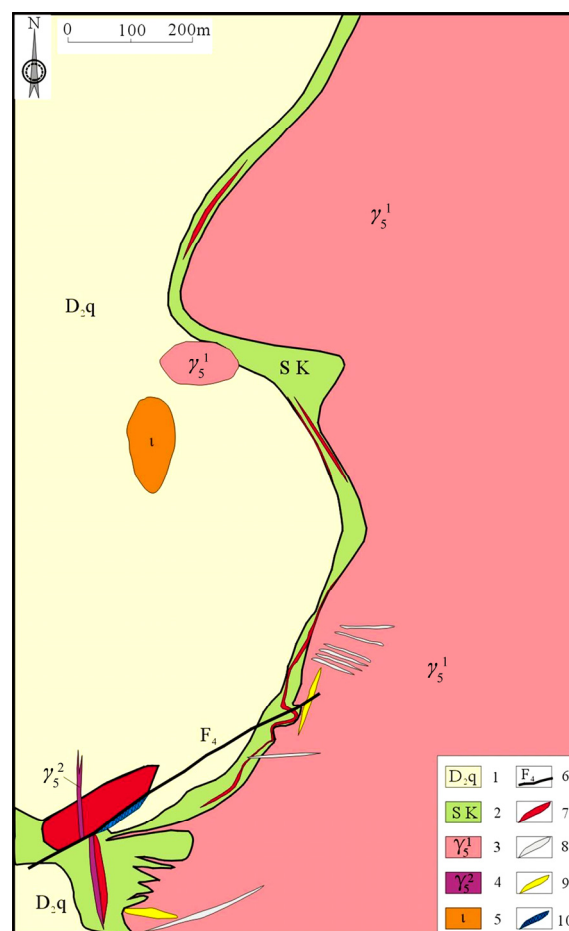


图4 合江口矿区 288 中段平面图: 1—棋子桥组灰岩夹大理岩; 2—矽卡岩; 3—粗斑状黑云母斑状花岗岩; 4—二云母花岗岩; 5—细晶岩; 6—断层; 7—矽卡岩型矿体; 8—石英脉型矿体; 9—云英岩型矿体; 10—萤石夹石英脉型矿体

Fig. 4 Plane graph of level 288 in Hejiangkou mine: 1—Qiziqiao group limestone and marble; 2—Skarn; 3—Coarse-grained porphyritic biotite granite; 4—Two mica granite; 5—Fault; 6—Skarn type orebody; 7—Quartz-vein orebody; 8—Greisen orebody; 9—Fluorite and quartz-vein orebody

先后,可分为3期,即印支期主岩基上的矽卡岩型钨锡铜矿、燕山早期花岗岩与棋子桥组接触带的矽卡岩型矿体和云英岩-石英脉型矿体和花岗斑岩脉-矽卡岩型复合型矿体。研究后还发现,后期成矿作用对前期有叠加富集之效应,具体表现为:

1) 钻探和坑探均揭露出在印支期岩体接触带普遍发育有矽卡岩型矿化,但仅在局部发育成工业矿体;

2) 印支期岩体下常隐伏有燕山早期细粒二云母花岗岩,据合江口钻孔及 320 中段采场观察,含钨锡石英脉型矿体穿切叠加印支期岩体接触带矽卡岩型铜

锡钨矿体,下延至印支期岩体内部进入燕山早期岩体之中,且当燕山期岩体侵入至印支期主岩基时,其主接触带上矿体变厚变富(见图4);

3) 在288中段中见有燕山早期云英岩型矿体叠加在印支期薄层状矽卡岩型矿体之上,而破碎蚀变带型矿体中见大小不等被硅质胶结的早期矽卡岩的次棱角状角砾(见图3(l));

4) 合江口矿床156中段见燕山早期花岗岩接触带上含萤石白钨矿为主的矽卡岩型钨锡矿体;

5) 合江口矿床3线钻孔揭露晚期花岗斑岩脉穿切主岩基时,形成斑岩脉型钨锡矿体,局部形成矽卡岩型钨锡矿体(见图2);

6) 合江口矿区10线钻孔揭露晚期花岗斑岩脉穿切燕山早期二云母花岗岩,形成斑岩脉型钨锡矿体。

1.3 矿石的矿物组成及组构

合江口矿床的矿物成份十分复杂,金属矿物主要有白钨矿、锡石、黄铜矿、闪锌矿、黄铁矿、黑钨矿、毒砂、磁黄铁矿、磁铁矿,其次为辉钼矿、辉铋矿、硫铋银矿。脉石矿物为石英、方解石、石榴子石、透辉石、绿帘石、硅灰石、白云母、萤石、电气石、尖晶石、硅灰石。矿石结构以半自形-它形粒状结构为主,其次为交代结构、填隙结构、包含结构。矿石构造以浸染状和块状构造为主,其次为条带状构造,局部可见乳滴状构造。各矿物描述如下:

白钨矿是本矿床最丰富的矿石矿物,分为3个世代。第一世代一般为它形-半自形粒状,粒径一般较小约1 mm,包裹早期形成的黑钨矿和锡石(见图5(a)),一般呈星散浸染状产出;第二世代的白钨矿一般呈脉状穿插早期形成的黄铜矿化矽卡岩(见图5(b))或顺层产出,局部形成大理岩型萤石白钨矿体(见图3(a)),该期白钨矿粒径较大,大的可达厘米级,一般呈稠密浸染状产出;第三世代白钨矿一般产于花岗斑岩岩脉或其下盘矽卡岩中,白钨矿粒径一般0.1~0.5 mm,呈浸染状或半团块状产出。

锡石和木锡石的含量仅次于白钨矿,也分为3个世代。第一世代主要产出星散浸染状锡石,一般呈半自形-自形晶,具楔形,呈黑褐色,产于薄层状矽卡岩中,以与黄铜矿伴生为主,呈星散浸染状产出,第一世代锡石以粒径小为特征,一般小于0.1 mm,矿化晚于黑钨矿化而又早于白钨矿(见图5(c)),第一世代形成的锡石大部分由于后期的构造作用发生碎裂化,被后期的黄铁矿、黄铜矿所交代、穿插。第二世代锡石矿物手标本颜色较第一期的要浅,呈淡棕色、褐色,

主要产于云英岩及其旁侧的矽卡岩和石英脉中,为不规则粒状或集合体状,呈浸染状和细脉状产出,第二世代锡石粒径较大,一般大于0.1 mm,大者可达1~2 cm,第二世代中锡石一般与木锡石共生(见图5(d))。

黄铜矿分两世代产出。第一世代为主产世代,呈它形粒状,稠密浸染状-半团块状产出,粒径一般为0.1~1 mm,产出于主岩基与围岩的接触带上,呈浸染状产出,为单独的矽卡岩型黄铜矿体,镜下见黄铜矿穿插、溶蚀黑钨矿、锡石、白钨矿、砷黝铜矿、毒砂等(见图5(e))。第二世代一般呈星散浸染状、细脉状产出,数量较少,粒径很小,一般呈它形粒状,镜下见黄铜矿穿插和溶蚀早世代形成的闪锌矿,粒径为0.01~0.1 mm(见图5(f))。

砷黝铜矿仅在主岩基与围岩的接触带上见到,第二世代未见,砷黝铜矿较黄铜矿稍早,常被黄铜矿包裹(见图5(g)),呈它形粒状产出,粒径一般0.05~0.5 mm。

闪锌矿分两世代产出。第一世代闪锌矿较为干净,呈它形晶产出,一般为星散浸染状产出,被晚世代的黄铜矿等交代、溶蚀(见图5(f));第二世代闪锌矿普遍有呈固溶体分离的叶片状黄铜矿包裹体分布,大部分闪锌矿边缘有辉铜矿产出,说明该世代成矿持续时间较长。第二世代为闪锌矿的主产世代,在云英岩旁的矽卡岩中锌矿体最厚处可达十余米,平均品位10.5%(见图5(h))。

黑钨矿分两世代产出。第一世代黑钨矿是本区最早的金属矿化,被后世代形成的锡石、白钨矿、黄铜矿等矿物交代、溶蚀,本世代黑钨矿一般呈它形细粒结构,具有星散浸染状构造,碎裂后又被后世代的石英脉穿插(见图5(i))。第二世代黑钨矿呈小板状或其集合体状产出,一般粒径1~4 mm,大者达1 cm,产于云英岩脉、石英脉和二云母花岗岩与围岩接触带上的矽卡岩中,据光学性质判断,本区黑钨矿更趋于钨铁矿端元,黑钨矿一般与锡石、电气石、尖晶石、绿柱石伴生,黑钨矿溶蚀早世代形成的黄铜矿(见图5(e))。

黄铁矿是本区产出最多的矿物之一,各成矿世代均有产出,早世代形成的黄铁矿被晚世代的黄铜矿交代(见图5(h));晚世代黄铁矿又溶蚀早世代形成的黄铜矿、黑钨矿;最晚一代黄铁矿一般呈自形晶产出,交代早世代形成的黄铜、黄铁、黑钨、白钨矿等(见图5(j))。

磁铁矿呈粒状产出,主要产出于主岩基接触带中,被后世代的黄铜矿、黄铁矿等包围和溶蚀。

磁黄铁矿仅产于燕山早世代二云母花岗岩与围

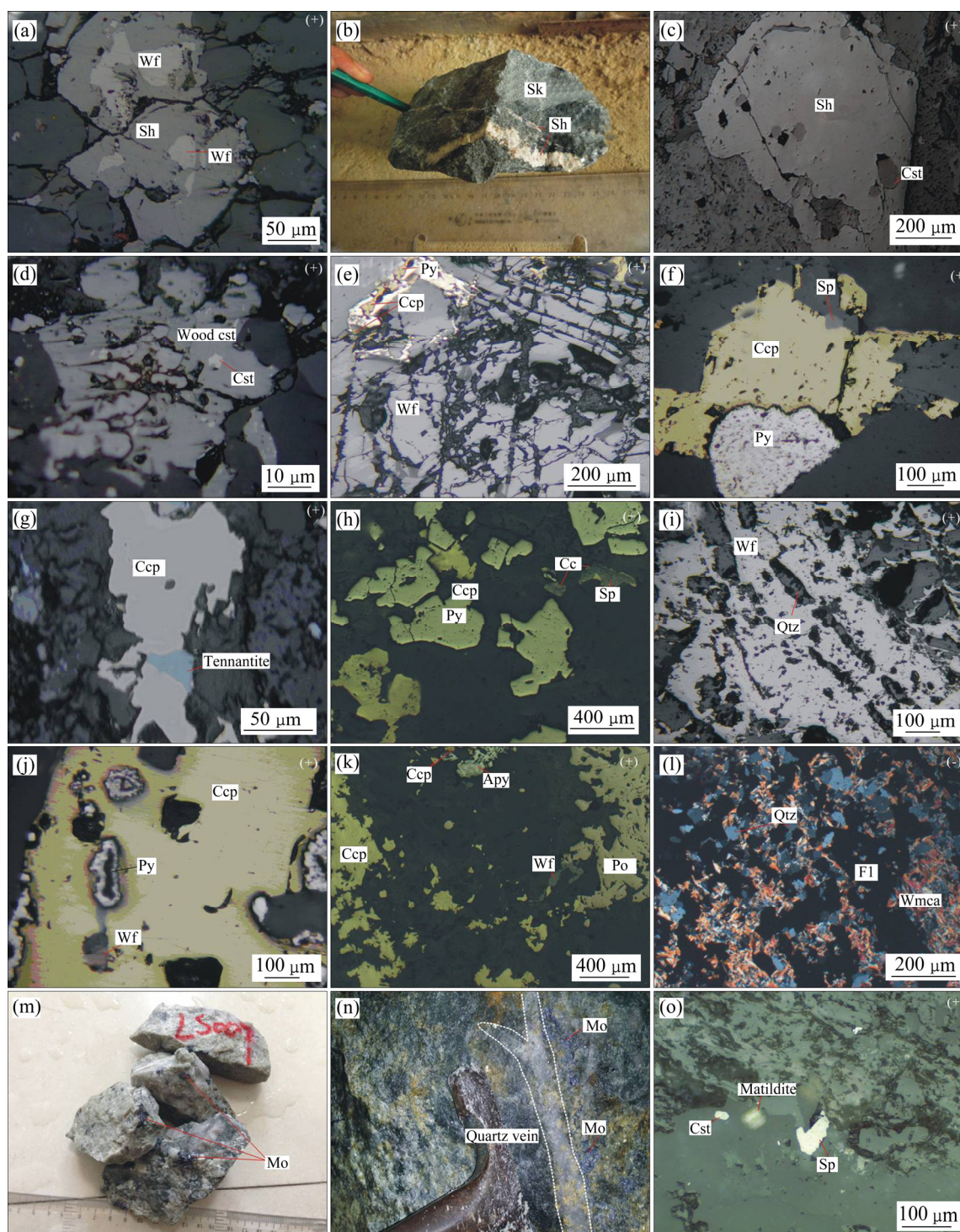


图 5 合江口矿床矿石结构构造的典型照片: (a) 白钨矿包裹黑钨矿; (b) 白钨矿脉穿插黄铜矿化矽卡岩; (c) 白钨矿包裹锡石; (d) 木锡石与锡石共生; (e) 黑钨矿溶蚀黄铜矿, 黄铁矿溶蚀黄铜矿和黑钨矿; (f) 黄铜矿溶蚀闪锌矿和黄铁矿; (g) 黄铜矿溶蚀砷黝铜矿; (h) 闪锌矿中有乳滴状黄铜矿, 周围析出辉铜矿, 自形黄铁矿溶蚀黄铜矿和闪锌矿; (i) 黑钨矿碎裂后石英沿裂隙充填; (j) 黄铜矿包裹黑钨矿和黄铁矿; (k) 磁黄铁矿溶蚀黑钨矿和黄铜矿, 黄铜矿溶蚀毒砂和黑钨矿; (l) 云萤岩; (m), (n) 蚀变花岗岩中的浸染状辉钼矿(Re-Os 测龄标本); (o) 浸染状硫铋银矿、锡石和闪锌矿, 闪锌矿中有乳滴状黄铜矿

Fig. 5 Typical photos of mineral texture and structure in Hejiangkou deposit: (a) Scheelite including wolframite; (b) Scheelite vein cut chalcopyrite skarn; (c) Scheelite including cassiterite; (d) Cassiterite and wood cassiterite assemblage; (e) Chalcopyrite dissolution by wolframite, chalcopyrite wolframite corroded by pyrite; (f) Sphalerite and pyrite chalcopyrite corroded by chalcopyrite; (g) Tennantite corroded by chalcopyrite; (h) Chalcopyrite in sphalerite; (i) Quartz vein cross wolframite cracks; (j) Wolframite and pyrite around by chalcopyrite; (k) Wolframite and chalcopyrite corroded by arsenopyrite; (l) Mica and fluorite rock; (m), (n) Disseminated molybdenite in alteration granite (samples for Re-Os isotopic dating); (o) Disseminated matildite, cassiterite and sphalerite

岩的接触带或叠加接触带位置,为第二世代成矿的产物,一般溶蚀交代早世代形成的黄铜矿和黄铁矿,呈它形粒状或集合体产出,粒径一般 0.01~0.1 mm(见图 5(k))。

毒砂产于主岩基与围岩的接触带或石英脉中,与黑钨矿和锡石共生,后代被闪锌矿、黄铁矿、黄铜矿交代。呈半自形晶产出,粒径一般 0.1 mm~1 cm。一般与主接触附近的石英脉关系密切,被晚世代形成的黄铜矿所溶蚀(见图 5(k))。

萤石呈白色、淡绿、局部紫色,玻璃光泽,半透明,多呈自形-半自形粒状,产于砂卡岩、呈脉状出于大理岩的层理间、与云英岩共生成云萤岩(见图 5(l)),局部见萤石脉穿插地层中。萤石一般与白钨矿共生或被白钨矿所包围,萤石产出与燕山早世代二云母花岗岩侵入关系密切,为第二世代矿化产物。

辉钼矿产出极少,仅在 320 中段和 288 中段的主花岗岩基中见到(Re-Os 测龄标本采集处),据测龄结果认为辉钼矿主要形成于第一世代,后代被黄铜矿、闪锌矿和黄铁矿所交代,见有后世代的石英细脉穿插进早世代形成的辉钼矿中(见图 5(m)和(n))。

辉铋矿仅见于花岗斑岩脉中,呈浸染状产出,后代被黄铁矿和闪锌矿交代,产出少。

硫铋银矿产于第二世代,呈星半自形鳞片状结构,散浸染状构造,常与自形的锡石和具有乳滴状构造的闪锌矿一起产于石英边缘(见图 5(o))。

2 Re-Os 同位素测年

2.1 样品采集与分选

本次测年用辉钼矿样品均采自合江口矿区 320 中段和 288 中段的钨锡辉钼矿化第一期蚀变花岗岩基。岩石呈灰白色,粗斑状结构,块状构造,斑晶主要为石英(35%~40%,质量分数)、斜长石(25%~20%,质量分数)、钾长石(20%~25%,质量分数)及角闪石(5%,质量分数)、黑云母(5%,质量分数),基质为石英、斜长石、钾长石、角闪石,钾长石为正长石和微斜长石,斜长石大部分发生绢云母化,An=35±,属中长石(见图 3(a)和(b))。辉钼矿呈灰白色,浸染状分布,裂隙面较集中,镜下呈簇状,并见有自形粒状锡石与之共生。

辉钼矿单矿物的样品分选工作中南大学有色金属成矿预测教育部重点实验室完成,在室内无污染环境下,将样品粉碎至 180~250 μm,在双目镜下挑纯至 99%(质量分数)以上,然后用玛瑙钵研磨至 75 μm。

2.2 测试方法与结果

Re-Os 同位素分析测试在中国地质科学院国家地质测试中心 Re-Os 同位素实验室完成,分析流程见文献[20]。本次分析的辉钼矿普 Os 含量几乎接近于 0。3 个样品的模式年龄非常接近,为 224.9~225.5 Ma,利用 Isoplot 软件对所测得的 3 个数据进行等时线拟合(见图 6),获得的等时线年龄为(225.5±3.6) Ma, MSWD 为 0.0034,模式年龄和等时线年龄结果一致。

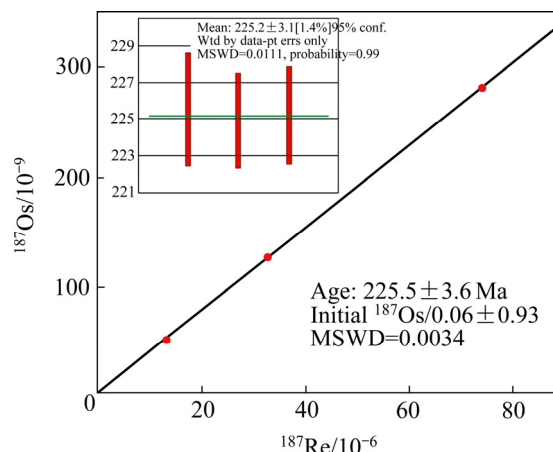


图 6 合江口矿床辉钼矿 Re-Os 等时线年龄

Fig. 6 Re-Os isochron age of molybdenites from Hejiangkou deposit

3 锡田矿田成岩成矿时代对比

前人在锡田矿田内积累了成岩成矿的大量同位素测龄数据,但由于矿田内岩浆的多次侵位、大地构造的复杂演化、各作者的测试对象不同及测试精度的区别,使得对该区成岩成矿时代一直存在争议。本文作者将锡田矿田内各年龄数据进行了统计(见表 1),以厘清该区的成岩成矿序列。

目前,单颗粒锆石的 U-Pb 法测年被公认为花岗岩定年的可靠方法,本次研究主要根据 U-Pb 法测年结果,参考 Rb-Sr 法等测年结果,将本区的成岩年龄主要划分为 3 期,分别是印支期,年龄介于(215.7±3.3)~(230.4±2.3) Ma,峰值为 225 Ma;燕山早期,同位素年龄为(141.6±4.1)~(157.0±2.6),峰值 152 Ma;燕山晚期,同位素年龄为(114±14) Ma。另外,从统计的同位素测年结果看,锡田矿田与钦杭带上多数岩体类似,同一复式岩体中不同阶段花岗岩的侵入年龄相差 10~20 Ma,而这种高度演化的花岗岩对钨锡的成矿十分有利^[26]。

表 1 锡田矿田成岩成矿年龄统计

Table 1 Geochronology data in Xitian area

时代	矿床名称	采样位置	测试矿物	测试方法	测试结果/Ma	文献	
岩体 侵位 时代		堽上	主岩基	锆石	锆石 SHRIMP	230.4±2.3	[4]
		小田	贺家田单元	锆石	锆石 SHRIMP	228.5±2.5	[9]
	印支期 花岗岩体	花里泉	粗粒斑状黑云母二长花岗岩基	锆石	LA-ICP-MS	225.24±0.58	[21]
		牛形里北	中粒斑状黑云母花岗岩基	锆石	LA-ICP-MS	224.4±1.4	[21]
		桐木山	ZK11601 钻孔深度 225 m	锆石	锆石 SHRIMP	220.9±0.6	[22]
		堽上	ZK14a01 钻孔深度 77 m	锆石	锆石 SHRIMP	220.7±0.7	[22]
		牛形里	中粒斑状黑云母二长花岗岩基	锆石	SHRIMP	215.7±3.3	[21]
			花棚里	花岗岩	全岩	Rb-Sr 等时线	165±16
	燕山早期 花岗岩体	花里泉	细粒斑状二云母花岗岩	锆石	SHRIMP	157.0±2.6	[21]
		小田	水尾单元	锆石	SHRIMP	155.5±1.7	[9]
		堽上	ZK1409 钻孔深度 242 m	锆石	SHRIMP	154.4±0.7	[20]
		花棚里	花岗岩	全岩	Rb-Sr 等时线	151±24	[5]
		堽上	ZK10C02 细粒花岗岩	锆石	LA-ICP-MS	151.7Ma	[23]
		花里泉	细粒二云母花岗岩	锆石	SHRIMP	151.6±2.8	[21]
		花岗岩	花岗岩	锆石	LA-ICP-MS	150.4±0.52	[21]
		花里泉	花岗岩体	锆石	SHRIMP	147±3	[24]
		花里泉	花岗岩包体	锆石	LA-ICP-MS	145.09±0.52	[21]
		桐木山	微细粒二云母二长花岗岩	锆石	LA-ICP-MS	141.6±4.1	[21]
	燕山晚期岩脉	花棚里	花岗岩	全岩	Rb-Sr 等时线	114±14	[5]
成 矿 年 龄	印支期	堽上	铜钼矿化主岩基蚀变花岗岩	辉钼矿	Re-Os 等时线	225±3.6	本文
	燕山早期	桐木山	含矿矽卡岩	辉钼矿	Re-Os 等时线	160.2±3.2	[25]
		山田	含矿石英脉	辉钼矿	Re-Os 等时线	158.9±2.2	[25]
		花棚里	21 号矿体	白云母	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	156.5±1.7	[7]
		花棚里	21 号矿体	白云母	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	155.4±1.5	[7]
		花里泉	含矿云英岩脉和石英脉	石英	Rb-Sr 等时线	153±12	[24]
		荷树下	云英岩石英脉型矿体	辉钼矿	Re-Os 等时线	150±2.7	[5]

成矿年龄集中于两个时期,印支期(225±3.6) Ma 和燕山早期(150±2.7)~(160.2±3.2) Ma,说明本区的成岩年龄与成矿年龄有较好的对应关系,也与南岭中段表现出的伴随着多期岩浆活动发生的多期次成矿,而形成多金属矿床的特征吻合^[27]。

4 锡田矿田多期成矿事件

4.1 成矿物质来源

辉钼矿的钼含量可以指示成矿物质来源,与幔源、I 型、S 型花岗岩有关的矿床,Re 含量从 $n \times 10^{-4} \rightarrow n \times 10^{-5} \rightarrow n \times 10^{-6}$ (质量分数)^[28-29]。本研究获得合江口矿床印支期辉钼矿的 Re 含量为 $12.21 \sim 118.1 \times 10^{-6}$,

平均为 61.6×10^{-6} ,相当于壳幔混合源数量级;邓湘伟等^[16]认为合江口矿床印支期花岗岩属过铝质花岗岩,姚远等^[22]认为锡田矿田印支期花岗岩源区还是以地壳物质为主、有少量地幔物质参与成岩作用铝质 A 型花岗岩。综上所述,应有部分幔源物质参与印支期的成岩成矿作用。刘国庆等^[5]在锡田矿田荷花坪矿床获得燕山早期辉钼矿 Re 含量为 $1106 \sim 2800 \times 10^{-6}$ (见表 2),燕山早期合江口矿床中的矿体普遍具有富含萤石的特征,周云等^[23]和李建康等^[27]认为富萤石矿床一般与幔源物质参与成矿作用有关,说明燕山早期锡田矿田的成矿物质以幔源为主^[30-31]。

4.2 成岩成矿动力学模式

多位学者^[2, 32-35]已对钦杭带上所发育的超大型、

表 2 锡田辉钼矿 Re-Os 同位素数据

Table 2 Re-Os isotopic data for molybdenum in Xitian orefield

编号	样品质量/g	w(Re)/10 ⁻⁶	w(普 Os)/10 ⁻⁹	w(¹⁸⁷ Re)/10 ⁻⁶	w(¹⁸⁷ Os)/10 ⁻⁹	模式年龄/Ma	采样位置
H320-2	0.00547	118.10±0.90	0.0335± 0.0187	74.22±0.60	279.37±2.60	225.5±3.1	合江口 320 m 中段
H320-1	0.01423	12.21±0.09	0.0110±0.0115	7.67±0.06	28.80±0.22	224.9±2.6	合江口 320 m 中段
H288	0.14285	52.89±0.44	0.0037±0.0033	33.24±0.28	124.96±0.96	225.2±2.7	合江口 288 m 中段
050829-6	0.10829	2800±21.0	0.0048±0.0020	1760±13	4.392±0.032	149.6±1.7	荷树下 ^[5]
050829-7	0.0265	1181.0±9.2	0.0047±0.0010	742.3±5.8	1.845±0.014	149.0±1.8	荷树下 ^[5]
050829-8	0.20037	1106.7±902	0.0053±0.0010	695.6±5.8	1.729±0.015	149.0±1.9	荷树下 ^[5]

大型、中型矿床做了详细研究，利用蛇绿岩套、高压蓝片岩及其之后的蛇绿岩套带错位、同位素测龄数据等证据，阐明了华夏地块与扬子地块的拼合-裂解-拼合的历史过程。志留纪在全球板块碰撞聚合的背景下，形成了现在的华南南方大陆^[2]。

与南岭地区其它钨锡矿床一致^[36-37]，合江口矿区的成岩与成矿作用也是一个连续的过程。本矿床的成因类型是与花岗质岩浆侵入有关的矽卡岩型、云英岩-石英脉型和花岗斑岩脉型热液矿床^[16, 38]。根据在合江口矿区地表、钻孔岩芯和坑道编录观察到的矿体与岩(脉)体的关系、岩脉与岩体的穿插关系及矿石结构构造，镜下鉴定结果及测龄数据，将合江口矿床的原生矿成矿作用划分为 3 期：第 I 期为印支期热液交代初步富集期(晚三叠世 225 Ma)；第 II 期为燕山早期热液充填、交代、活化、叠加的进一步富集期，为主成矿期(中晚侏罗世 150 Ma)；第 III 期为燕山晚期与花岗斑岩脉侵入相关的斑岩-矽卡岩成矿期(114 Ma)。不同期次的成岩成矿作用过程概述如下：

1) 印支期成岩成矿事件

印支期，发生在华南地块两侧的古特提斯洋的闭合及其碰撞作用导致华南地块受挤压加厚^[39]，而地壳在加厚 10~20 Ma 的时间间隔内会发生热-应力松弛作用，形成超基性-基性-碱性岩浆的底侵作用并诱发过铝花岗岩质岩浆作用^[40]。前人^[4, 9]在锡田印支期花岗岩中获得的继承性锆石的年龄数据(1704.5 Ma、1648 Ma、1017.0 Ma、460.7 Ma)说明，锡田矿田过铝质花岗岩岩浆的主要来源为前南华纪洋壳基底地层、蛇绿杂岩、深源岩浆岩、喷流沉积物等，这些地层中存在的铁、硫化物、钨锡，可能为印支期矿化作用的矿源层^[35]之一，当然也不能排除少量底侵幔源岩浆的贡献。钦杭带印支期花岗岩大多数不成矿，只有少部分与钨、锡、铀矿化有关，已经证实的印支期钨锡矿床仅有广西栗木、湖南荷花坪和江西仙鹅塘矿床^[26]。柏道远等^[41]认为在印支期华南整体处于碰撞环境下的弱挤压构造

体制中，岩浆侵位时断裂构造不发育，流体与矿质被封闭在岩体内部，从而导致成矿作用较弱。本次合江口矿床接触带发现了大量的矽卡岩型薄、贫矿体，也证实印支期锡田矿田整体处于挤压环境中，但之间可能有应力松弛间隔，使少量幔源物质上涌参与成矿作用，本期为热液交代初步富集期。

2) 燕山早期成岩成矿事件

燕山早期，Izanagi 板块向欧亚大陆俯冲，局部撕裂后于南岭地区开天窗^[42]，软流圈物质直接涌上地壳，形成华南盆岭构造和大型矿集区。该成矿期也是锡田矿田的主成矿期，刘国庆等^[5]、马艳丽等^[7]、马铁球等^[9]、付建明等^[24]的测年数据均指示了该成矿期的存在。此时，由于太平洋板块强烈的俯冲作用引发地幔物质的响应，使幔源岩浆上涌、底侵^[43-44]，在本区形成了大量壳幔混合型花岗岩，岩浆活动不仅带来了深源矿质，而且使原矿源层的矿质在热液流体作用下得以活化迁移，并叠加于印支期形成的锡钨矿化(体)之上，本期为热液充填-交代-活化-叠加进一步富集成矿期(见图 7)。

考虑到本研究所述矽卡岩型矿化与云英岩型矿化、云英岩型阶段与氧化物阶段和高温硫化物阶段在时间上部分重叠，本文作者仍采用前苏联经典的矽卡岩型成矿作用的成矿阶段划分方式。具体划分为：

第 II₁ 阶段为矽卡岩阶段。形成的干矽卡岩矿物包括石榴子石、透辉石、硅灰石等，湿矽卡岩矿物包括透闪石、阳起石、绿帘石等。本期的主要矿化有少量的磁铁及黑钨矿。

第 II₂ 阶段为氧化物-早期云英岩阶段。在高温热液作用中，生成黑钨矿、锡石、白钨矿、磁铁矿、黄铁矿和少量辉钼矿、磁黄铁矿、毒砂，并产出大量的云母类、长石类及少量石英、萤石等脉石矿物。

第 II₃ 阶段为高温硫化物-云英岩阶段：该阶段产生了大量的石英及萤石及少量的绿泥石、绿帘石、绢云母、碳酸盐矿物矿物，并析出黄铜矿、磁黄铁矿、

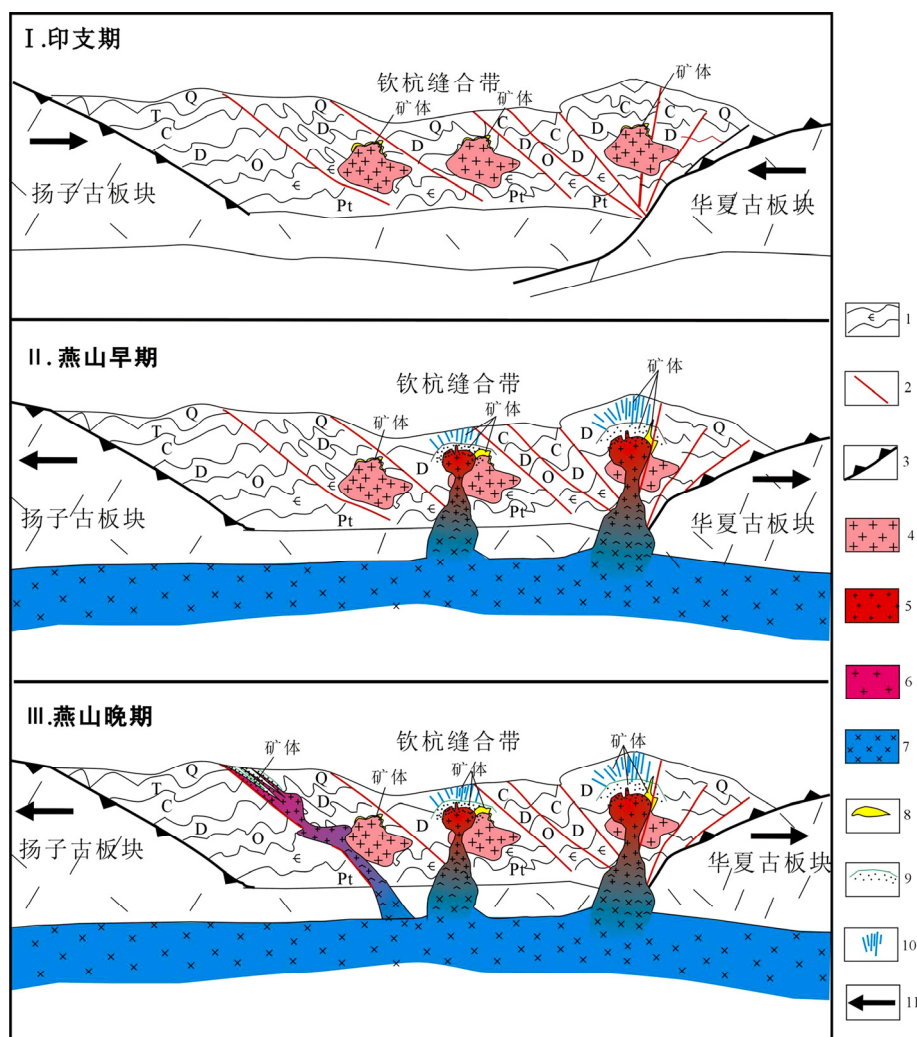


图7 合江口锡钨多金属矿床成因模式图: 1—地层; 2—断层; 3—缝合带; 4—印支期花岗岩; 5—燕山早期花岗岩; 6—晚期花岗斑岩; 7—地幔岩浆; 8—矽卡岩型矿体; 9—云英岩型矿体; 10—脉状矿体; 11—大地构造应力方向

Fig. 7 Matellogenic models of Hejiangkou W-Sn polymetal deposit: 1—Strata; 2—Fault; 3—Suture zone; 4—Indosinian granite; 5—Early Yanshanian granite in; 6—Late Yanshanian granite; 7—Mantle magma; 8—Skarn; 9—Greisen type orebodies; 10—Vein type orebodies; 11—Direction of tectonic stress

毒砂、黄铁矿、辉钼矿、辉铋矿白钨矿等矿物,该阶段伴随着石英的结晶,生成大量的云英岩和石英脉。

第Ⅱ₄阶段为低温硫化物阶段:温度降至低温范畴,生成大量的低温矿物如方解石、白云石、绿泥石、绢云母、石英,在靠近岩体约10 m的范围中沉淀闪锌矿、黄铁矿、硫铋银矿等矿物。

3) 燕山晚期成岩成矿事件

目前对南岭地区花岗质岩脉(包括香花岭主成矿岩脉)的研究程度一直不高,一般说来含矿花岗质岩脉是岩浆高度演化、最晚期、高侵位的产物^[26],而这种脉岩的侵入暗示深部存在一期更晚的含幔源物质更多的岩浆活动。本次在合江口矿区内勘探中所揭露的规

模较大、矿化较好的花岗斑岩脉(F3)说明本矿区可能存在着地幔物质上涌的构造通道,侵入时期为燕山晚期^[5]。该类型是本次在锡田矿田内新发现的一类矿体,主要生成矿物为白钨矿和锡石,次要矿物为黄铜矿和辉铋矿。

值得说明的是本区还存在一期构造蚀变岩型的矿化作用,矿化主要表现为在NEE向构造带内形成透镜状矿体,该期构造带切断花岗斑岩脉,且在构造带与岩脉交接附近斑岩脉型矿体成矿更好,说明其成矿时代应还晚于斑岩脉成矿期,基于本次已揭露坑道中仅见构造蚀变岩型贫矿化,而在NEE向构造与主岩基接触带上叠加形成的富矿前已描述,因此,对该类矿化

不做重点描述。

5 结论

1) 综合锡田矿田合江口矿床的不同期次酸性侵入体(岩脉)之间、不同类型矿体之间的穿插关系, 矿石中不同世代矿物间的溶蚀、包裹和交代等现象, 把该矿床的成矿作用划分为印支期(I)、燕山早期(II)和燕山晚期(III), 其中第II期为主成矿期。各期成矿作用均与花岗质岩浆侵位关系密切, 晚期成矿作用对早期的矿化具有继承、叠加和再富集的特点。

2) 合江口矿床主岩基接触带中辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为(255±3.5) Ma(早三叠世), 与印支期花岗质岩浆侵位时间对应, 证实合江口矿床印支期成矿事件的存在, 但矿化较弱。

3) 第I期为印支期热液初步富集期, 在碰撞挤压构造环境下形成以壳源物质为主、少量幔源物质参与的花岗质岩浆, 并在其接触带形成矽卡岩型贫薄矿体; 第II期为燕山早期热液充填、交代、活化、叠加的进一步富集期, 在地壳拉张构造环境下地幔物质上涌形成以幔源为主的花岗质岩浆, 并形成矽卡岩型和云英岩型矿体; 第III期为燕山晚期与花岗斑岩脉侵入相关的斑岩-矽卡岩成矿期, 在伸展构造环境中幔源岩浆侵位而形成的花岗斑岩脉, 并生成斑岩脉-矽卡岩复合型矿体。

4) 通过勘探首次在本区发现花岗斑岩脉-矽卡岩复合型矿体, 为本区的找矿勘探提供了新的思路。

REFERENCES

- [1] 毛景文, 陈懋弘, 袁顺达, 郭春丽. 华南地区钦杭成矿带地质特征和矿床时空分布规律[J]. 地质学报, 2011, 85(5): 636-655. MAO Jing-wen, CHEN Mao-hong, YUAN Shun-da, GUO Chun-li. Geological characteristics of the Qinhang (or Shihang) metallogenic belt in South China and spatial-temporal distribution regularity of mineral deposits[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(5): 636-655.
- [2] 舒良树. 华南构造演化的基本特征[J]. 地质通报, 2012, 31(7): 1035-1053. SHU Liang-shu. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block[J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(7): 1035-1053.
- [3] 蔡新华, 贾宝华. 湖南锡田锡矿的发现及找矿潜力分析[J]. 中国地质, 2006, 33(5): 1100-1108. CAI Xing-hua, JIA Bao-hua. Discovery of the Xitian tin deposit, Hunan, and its ore potential[J]. Geology in China, 2006, 33(5): 1100-1108.
- [4] 付建明, 伍式崇, 徐德明, 马丽艳, 程顺波, 陈希清. 湘东锡田钨锡多金属矿区成岩成矿时代的再厘定[J]. 华南地质与矿产, 2009(3): 1-7. FU Jian-ming, WU Shi-chong, XU De-ming, MA Li-yan, CHENG Shun-bo, CHEN Xi-qing. Reconstraint from zircon SHRIMP U-Pb dating on the age of magma intrusion and mineralization in Xitian tungsten-tin polymetallic orefield, eastern Hunan Province[J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2009(3): 1-7.
- [5] 刘国庆, 伍式崇, 杜安道, 付建明, 杨晓君, 汤质华, 魏君奇. 湘东锡田钨锡矿区成岩成矿时代研究[J]. 大地构造与成矿学, 2008, 32(1): 63-71. LIU Guo-qing, WU Shi-chong, DU An-dao, FU Jian-ming, YANG Xiao-jun, TANG Zhi-hua, WEI Jun-qi. Metallogenic ages of the Xitian tungsten-tin deposit, eastern Hunan Province[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2008, 32(1): 63-71.
- [6] 罗洪文, 曾钦旺, 曾桂华, 伍式崇, 余阳春. 湘东锡田锡矿田矿床地质特征及矿床成因[J]. 华南地质与矿产, 2005(2): 61-68. LUO Hong-wen, ZENG Qin-wang, ZENG Gui-hua, WU Shi-chong, YU Yang-chun. Geological characteristics and origin of the Xitian tin orefield in eastern Hunan Province[J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2005(2): 61-68.
- [7] 马丽艳, 付建明, 伍式崇, 徐德明, 杨晓君. 湘东锡田垄上多金属矿床 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素定年研究[J]. 中国地质, 2008, 35(4): 706-715. MA Li-yan, FU Jian-ming, WU Shi-chong, XU De-ming, YANG Xiao-jun. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ isotopic dating of the Longshang tin-polymetallic deposit, Xitian orefield, eastern Hunan[J]. Geology in China, 2008, 35(4): 706-715.
- [8] 马铁球, 王先辉, 柏道远. 锡田含 W, Sn 花岗岩体的地球化学特征及其形成构造背景[J]. 华南地质与矿产, 2004(1): 11-17. MA Tie-qiu, WANG Xian-hui, BAI Dao-yuan. Geochemical characteristics and its tectonic setting of the Xitian tungsten-tin-bearing granite pluton[J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2004(1): 11-17.
- [9] 马铁球, 柏道远, 邝军, 王先辉. 湘东南茶陵地区锡田岩体锆石 SHRIMP 定年及其地质意义[J]. 地质通报, 2005, 24(5): 415-421. MA Tie-qiu, BAI Dao-yuan, KUANG Jun, WANG Xian-hui. Zircon SHRIMP dating of the Xitian granite pluton, Chaling, southeastern Hunan, and its geological significance[J]. Geological Bulletin of China, 2005, 24(5): 415-421.
- [10] 伍式崇, 罗洪文, 黄韬. 锡田中部地区锡多金属矿成矿地质特征及找矿潜力[J]. 华南地质与矿产, 2004(2): 21-27. WU Shi-chong, LUO Hong-wen, HUANG Tao. Metallogenic geological characteristics and prospecting of tin-polymetallic

- deposits in central Xitian area, Eastern Hunan[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2004(2): 21–27.
- [11] 伍式崇, 洪庆辉, 龙伟平, 罗 郢. 湖南锡田钨锡多金属矿床成矿地质特征及成矿模式[J]. *华南地质与矿产*, 2009(2): 1–6.
WU Shi-chong, HONG Qing-hui, LONG Wei-ping, LUO Yun. Geological features and metallogenic model of Xitian W-Sn polymetallic deposit, Hunan province[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2009(2): 1–6.
- [12] 徐辉煌, 伍式崇, 余阳春, 谢友良, 龙伟平. 湖南锡田地区矽卡岩型锡钨矿床地质特征及控矿因素[J]. *华南地质与矿产*, 2006(2): 37–42.
XU Hui-huang, WU Shi-chong, YU Yang-chun, XIE You-liang, LONG Wei-ping. Geological characteristics and ore-controlling factors of Xitian skarn-type W-Sn deposit in Hunan province[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2006(2): 37–42.
- [13] 余阳春, 伍式崇, 梁铁刚. 锡田地区成矿地质特征及找矿方向[J]. *资源调查与环境*, 2006, 27(2): 136–122.
YU Yang-chun, WU Shi-chong, LIANG Tie-gang. Metallogenetic geological characteristics and ore prospecting direction in Xitian area[J]. *Resources Survey & Environment*, 2006, 27(2): 136–122.
- [14] 杨晓君, 伍式崇, 付建明, 黄惠兰, 常海亮, 刘云华, 魏君奇, 刘国庆, 马丽艳. 湘东锡田垄上锡多金属矿床流体包裹体研究[J]. *矿床地质*, 2007, 26(5): 5011–5022.
YANG Xiao-jun, WU Shi-chong, FU Jian-ming, HUANG Hui-lan, CHANG Hai-liang, LIU Yun-hua, WEI Jun-qi, LIU Guo-qing, MA Li-yan. Fluid inclusion studies of Longshang tin-polymetallic deposit in Xitian ore field, eastern Hunan Province[J]. *Mineral Deposits*, 2007, 26(5): 5011–5022.
- [15] 吴自成, 刘继顺, 舒国文, 王 伟, 马慧英. 南岭燕山期构造-岩浆热事件与锡田锡钨成矿[J]. *地质找矿论丛*, 2010, 25(3): 201–205.
WU Zi-cheng, LIU Ji-shun, SHU Guo-wen, WANG Wei, MA Hui-ying. The relationship between Yanshanian tectonic-magmatic thermal event and Tin, Tungsten mineralization at Xitian, Nanling area[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2010, 25(3): 201–205.
- [16] 邓湘伟, 戴雪灵, 刘广东, 刘继顺. 钦-杭缝合带锡田合江口 SP 花岗岩地质地球化学特征及其对比研究[J]. *矿物岩石*, 2012, 32(2): 45–55.
DENG Xiang-wei, DAI Xue-ling, LIU Guang-dong, LIU Ji-shun. Geological and geochemical characteristics of SP granites in Hejiangkou deposit of Xitian orefield and their contraction with pluton of Qinhang suture zone[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2012, 32(2): 45–55.
- [17] 翟裕生, 邓 军, 王建平, 彭润民, 刘家军, 杨立强. 深部找矿研究问题[J]. *矿床地质*, 2004, 23: 142–149.
ZHAI Yu-sheng, DENG Jun, WANG Jian-ping, PENG Run-min, LIU Jia-jun, YANG Li-qiang. Researches on deep ore prospecting[J]. *Mineral deposits*, 2004, 23: 142–149.
- [18] 刘庚寅, 杨 斌, 彭省临, 刘海刚, 陈 艳, 梁琴琴, 陈 燕, 刘贤红, 李守生, 王 慧, 窦源东, 杨玉权. 胶西北大尹格庄金矿岩石化学与成矿作用[J]. *中国有色金属学报*, 2012, 22(3): 743–750.
LIU Geng-yin, YANG Bin, PENG Sheng-lin, LIU Hai-gang, CHEN Yan, LIANG Qin-qin, CHEN Yan, LIU Xian-hong, LI Shou-sheng, WANG Hui, DOU Yuan-dong, YANG Yu-quan. Petrogeochemistry and metallization in Dayingezhuang gold deposit, northwest Jiaodong peninsula[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2012, 22(3): 743–750.
- [19] 杨明桂, 黄水保, 楼法生, 唐维新, 毛素斌. 中国东南陆区岩石圈结构与大规模成矿作用[J]. *中国地质*, 2009, 36(3): 528–543.
YANG Ming-gui, HUANG Shui-bao, LOU Fa-sheng, TANG Wei-xin, MAO Su-bin. Lithospheric structure and large-scale metallogenetic process in Southeast China continental area[J]. *Geology in China*, 2009, 36(3): 528–543.
- [20] SHIREY S B, WALKER R J. Carius tube digestion for low-blank rhenium-osmium analysis[J]. *Anal Chem*, 1995, 67(13): 2136–2141.
- [21] 陈 迪, 马爱军, 刘 伟, 刘耀荣, 倪艳军. 湖南锡田花岗岩体锆石 U-Pb 年代学[J]. *现代地质*, 2013, 27(4): 819–831.
CHEN Di, MA Ai-jun, LIU Wei, LIU Yao-rong, NI Yan-jun. Research on U-Pb chronology in Xitian pluton of Hunan Province[J]. *Geoscience*, 2013, 27(4): 819–831.
- [22] 姚 远, 陈 骏, 陆建军, 章荣清. 湘东锡田 A 型花岗岩的年代学、Hf 同位素、地球化学特征及其地质意义[J]. *矿床地质*, 2013, 32(3): 467–488.
YAO Yuan, CHEN Jun, LU Jian-jun, ZHANG Rong-qing. Geochronology Hf isotopic compositions and geochemical characteristics of Xitian A-type granite and its geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 2013, 32(3): 467–488.
- [23] 周 云, 梁新权, 梁细荣, 伍式崇, 蒋 英, 温淑女, 蔡永丰. 湖南锡田含 W-Sn A 型花岗岩年代学与地球化学特征[J]. *大地构造与成矿学*, 2013, 37(6): 511–529.
ZHOU Yun, LIANG Xin-quan, LIANG Xi-rong, WU Shi-chong, JIANG Ying, WEN Shu-nü, CAI Yong-feng. Geochronology and geochemical characteristics of the Xitian tungsten-tin-bearing A-type granites, Hunan Province, China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2013, 37(6): 511–529.
- [24] 付建明, 程顺波, 卢友月, 伍式崇, 马丽艳, 陈希清. 湖南锡田云英岩-石英脉型钨锡矿的形成时代及其赋矿花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年[J]. *地质与勘探*, 2012, 48(2): 313–320.
FU Jian-ming, CHENG Shun-bo, LU You-yue, WU Shi-chong, MA Li-yan, CHEN Xi-qing. Geochronology of the greisens-quartzvein type tungsten tin deposit and its host granite in Xitian, Hunan Province[J]. *Geology and Exploration*, 2012,

- 48(2): 313–320.
- [25] 郭春丽, 李超, 伍式崇, 许以明. 湘东南锡田辉钼矿 Re-Os 同位素定年及其地质意义[J]. 岩矿测试, 2014, 33(1): 145–152.
- GUO Chun-li, LI Chao, WU Shi-chong, XU Yi-ming. Molybdenite Re-Os isotopic dating of Xitian deposit in Hunan Province and its geological significance[J]. Rock and Mineral Analysis, 2014, 33(1): 145–152.
- [26] 陈骏, 陆建军, 陈卫锋, 陆建军, 马东升. 南岭多时代花岗岩的钨锡成矿作用[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(1): 111–121.
- CHEN Jun, LU Jian-jun, CHEN Wei-feng, LU Jian-jun, MA Dong-sheng. Multiple-aged granitoids and related tungsten-tin mineralization in the Nanling Range, South China[J]. Science China: Earth Sciences, 2013, 44(1): 111–121.
- [27] 李建康, 王登红, 梁婷, 许以明, 张怡军, 梁华英, 卢焕章, 赵斌, 李建国, 屈文俊, 周四春, 王汝成, 韦龙明, 林锦福. 南岭区域成矿与深部探测的研究进展及其对西藏钨锡找矿的指示[J]. 地球学报, 2013, 34(1): 58–74.
- LI Jian-kang, WANG Deng-hong, LIANG Ting, XU Yi-ming, ZHANG Yi-jun, LIANG Hua-ying, LU Huan-zhang, ZHAO Bin, LI Jian-guo, QU Wen-jun, ZHOU Si-chun, WANG Ru-cheng, WEI Long-ming, LIN Jin-fu. Progress of research on metallogenic regularity and deep exploration in Nanling region and its indication for W-Sn exploration in Tibet[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2013, 34(1): 58–74.
- [28] MAO Jing-wen, ZHANG Zhao-chong, ZHANG Zuo-heng, DU An-dao. Rhenium-osmium isotopic dating of molybdenite in the Xiaoliugou W(Mo) deposit in North Qilian Mountains and its geological significance[J]. Geochim Cosmochim Acta, 1999, 63(11/12): 1815–1818.
- [29] STEIN H J, MARKEY R J, MORGAN J W, HANNAH J L, SCHERSTEN A. The remarkable Re-Os chronometer in molybdenite: How and why it works[J]. Terra Nova, 2001, 13(6): 479–486.
- [30] CHENG Yong-sheng. Fluid inclusion and mineralization of Dafulou tin deposit in Dachang metal district, Guangxi, south China[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(9): 2726–2735.
- [31] CHENG Yong-sheng, PENG Cheng. Ore-forming material of Dachang tin deposit in Guangxi, China: Lead isotope evidence[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(11): 3652–3659.
- [32] 杨明桂, 梅勇文. 钦-杭古板块结合带与成矿带的主要特征[J]. 华南地质与矿产, 1997(3): 52–59.
- YANG Ming-gui, MEI Yong-wen. Characteristics of geology and metallogenesis in the qinzhou-hangzhou paleoplate juncture[J]. Geology and Mineral Resources of South China, 1997(3): 52–59.
- [33] 余达淦, 管太阳, 王贵金. 闽、浙、赣边境晚元古代早期地层特征及与板溪群对比[J]. 东华理工学院学报, 1993(4): 320–333.
- YU Da-gan, GUAN Tai-yang, Wang Gui-jin. The strata characteristics of early late proterozoic era in the border of Min, Zhe and Gan and its comparison with Banxi group[J]. Journal of East China Geological Institute, 1993(4): 320–333.
- [34] 李光来, 华仁民, 黄小娥, 韦星林, 屈文俊, 王旭东. 赣中下桐岭钨矿辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 2011, 30(6): 1075–1084.
- LI Guan-lai, HUA Ren-ming, HUANG Xiao-e, WEI Xing-lin, QU Wen-jun, WANG Xu-don. Re-Os isotopic age of molybdenite from Xiatongling tungsten deposit, central Jiangxi Province, and its geological implications[J]. Mineral Deposit, 2011, 30(6): 1075–1084.
- [35] 陈星霖, 吴延之. 从锡矿山矿田的古流障系统看锡矿山锑矿深边部的找矿方向[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(9): 2621–2630.
- CHEN Xing-lin, WU Yan-zhi. Prospecting direction on deep and side prospecting of Xikuangshan antimony deposit based on ancient flow block system of ore-field[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(9): 2621–2630.
- [36] 付建明, 马丽艳, 程顺波, 卢月友. 南岭地区锡(钨)矿成矿规律及找矿[J]. 高校地质学报, 2013, 19(2): 202–212.
- FU Jian-ming, MA Li-yan, CHEN Shun-bo, LU Yue-you. Metallogenesis of W(Sn) deposits and their exploration in Nanling Range, China[J]. Geological Journal of China Universities, 2013, 19(2): 202–212.
- [37] 成永生, 胡瑞忠, 伍永田. 广西大厂矿田福楼锡多金属矿床地质和地球化学特征[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(3): 751–760.
- CHENG Yong-sheng, HU Rui-zhong, WU Yong-tian. Geology and geochemistry of Dafulou tin-polymetallic ore deposit in Dachang ore field, Guangxi, China[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(3): 751–760.
- [38] 宋文彬, 赖健清, 黄敏, 杨自安, 张普斌, 欧阳华平. 青海省卡尔却卡铜多金属矿床流体包裹体特征及成矿流体[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(3): 733–742.
- SONG Wen-bin, LAI Jian-qing, HUANG Min, YANG Zi-an, ZHANG Pu-bin, OUYANG Hua-ping. Characteristics of fluid inclusions and origin of Kaerqueka copper polymetallic deposit, Qinghai Province[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(3): 733–742.
- [39] 王岳军, 范蔚茗, 梁新权, 彭头平, 石玉若. 湖南印支期花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其成因启示[J]. 科学通报, 2005, 50(12): 1259–1266.
- WANG Yue-jun, FAN Wei-ming, LIANG Xin-quan, PENG Tou-ping, SHI Yu-ruo. Research on U-Pb chronology of the indosinian granitoids in South China and its indication[J]. Scientia, 2005, 50(12): 1259–1266.

- [40] 郭春丽, 郑佳浩, 楼法生, 曾载淋. 华南印支期花岗岩类的岩石特征、成因类型及其构造动力学背景探讨[J]. 大地构造与成矿学, 2012, 36(3): 457-475.
- GUO Chun-li, ZHENG Jia-hao, LOU Fa-sheng, ZENG Zai-lin. Petrography, genetic types and geological dynamical settings of the indosinian granitoids in South China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2012, 36(3): 457-475.
- [41] 柏道远, 马铁球, 王先辉, 张晓阳, 陈必河. 南岭中段中生代构造—岩浆活动与成矿作用研究进展[J]. 中国地质, 2008, 35(3): 436-455.
- BAI Dao-yuan, MA Tie-qiu, WANG Xian-hui, ZHANG Xiao-yang, CHEN Bi-he. Progress in the study of Mesozoic tectono-magmatism and mineralization in the central segment of the Nanling Mountains-Summary of major achievements of the 1:250,000 geological survey in southeastern Hunan[J]. *Geology in China*, 2008, 35(3): 436-455.
- [42] 毛景文, 谢桂青, 程彦博, 陈毓川. 华南地区中生代主要金属矿床模型[J]. 地质论评, 2009, 55(3): 347-353.
- MAO Jin-wen, XIE Gui-qing, CHENG Yan-bo, CHEN Yu-chuan. Mineral deposit models of mesozoic ore deposits in South China[J]. *Geological Review*, 2009, 55(3): 347-353.
- [43] 戴塔根, 尹学朗, 张德贤. 喀拉通克铜镍矿成岩成矿模式[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(9): 2568-2573.
- DAI Ta-gen, YIN Xue-lang, ZHANG De-xian. Diagenetic and metallogenic model of Kalatongke Cu-Ni deposit[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2013, 23(9): 2568-2573.
- [44] CHENG Yong-sheng. Geochemistry of intrusive rock in Dachang tin-polymetallic ore field, Guangxi, China: Implications for petrogenesis and geodynamics[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2015, 25(1): 284-292.

(编辑 王超)