

湖南大义山矿田白沙子岭锡矿床 Rb-Sr 同位素等时线年龄及其地质意义

张晓军¹, 罗 华², 吴志华³, 范先旺¹, 熊 俊¹, 杨 杰¹, 牟金焱¹

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

2. 湖北省地质调查院, 湖北武汉 430034

3. 湖南省地质矿产勘查开发局四一七队, 湖南衡阳 421001

摘要: 大义山矿田处于华南褶皱带南岭成矿带中段北缘, 位于阳明山—大义山—上堡东西向基底断裂、攸县—宁远北东向基底断裂和郴州—邵阳北西向隐伏深断裂带的交汇部位, 主要受大义山岩体控制, 其中云英岩脉型锡矿为该矿田典型的成矿类型之一。对该矿田白沙子岭锡矿床云英岩脉型锡矿脉中的石英进行了流体包裹体 Rb-Sr 同位素测年及其地质意义的讨论。结果显示, 矿脉中石英流体包裹体 Rb-Sr 同位素等时线年龄为 160 ± 1 Ma, 属于南岭地区中生代 $160 \sim 150$ Ma 时段成矿高峰期产物; 成矿与大义山岩体中侏罗世二长花岗岩具有密切的时间、空间和成因联系, 为该期岩浆晚期热液成矿作用的产物; 流体包裹体 Rb-Sr 同位素 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值为 $0.706\,79 \pm 0.003\,66$, 预示其成矿流体有幔源物质的参与, 具有地壳和地幔混合流体的特征。

关键词: Rb-Sr; 同位素; 流体包裹体; 二长花岗岩; 地质年代学; 矿床。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2014)10-1322-11

收稿日期: 2014-03-31

Rb-Sr Isochron Age and Its Geological Significance of Baishaziling Tin Deposit in Dayishan Ore Field, Hunan Province

Zhang Xiaojun¹, Luo Hua², Wu Zhihua³, Fan Xianwang¹, Xiong Jun¹, Yang Jie¹, Mou Jinyi¹

1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Hubei Institute of Geological Survey, Wuhan 430034, China

3. The 417 Geological Team of Hunan Bureau of Geology and Mineral Resources, Hengyang 421001, China

Abstract: Dayishan ore field located in the north rim of the middle section of the Nanling metallogenic belt in South China fold zone, and at the intersection of Yangmingshan-Dayishan-Shangpu EW basement fault, Youxian-Ningyuan NE basement fault and Chenzhou-Shaoyang NW concealed deep fault, has been controlled by the Dayishan intrusive rock. The greisens-vein type tin deposit is one of the typical mineralization types in this ore field. The Rb-Sr geochronology of fluid inclusions in quartz of the ore veins is presented and its geological significance of the Baishaziling greisens-vein type tin deposit is discussed in this paper. The Rb-Sr isotopic dating of fluid inclusions of quartz is 160 ± 1 Ma, which indicates that the tin deposit was likely formed in the peaks ($160 \sim 150$ Ma) of Mesozoic mineralization period of Nanling region, and the mineralization was closely related to the magmatic intrusion of the Middle Jurassic monzogranite of Dayishan intrusive rock, as a result of the post-magmatic hydrothermal mineralization. The initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ value of the fluid inclusions is $0.706\,79 \pm 0.003\,66$, which may indicate a mantle-derived fluid contribution to the ore-forming fluids.

Key words: Rb-Sr; isotopes; quartz fluid inclusion; monzogranite; geochronology; mineral deposit.

位于衡阳常宁市区南东的大义山岩体与该区千里山岩体、九嶷山岩体所围成地区被称为“成矿金三角”(陈庆等,2005),已发育有香花岭矿田、骑田岭矿田、千里山矿田等多个国内有名的锡钨多金属矿田和柿竹园、瑶岗仙、白腊水、黄沙坪等超大型一大型钨锡钼铋多金属矿床,成矿条件优越。前人对该地区与花岗岩有关的钨锡多金属矿床进行过比较深入的研究,也取得一些比较精确的成岩及成矿年龄数据(李红艳等,1996;毛景文等,2004b;姚军明等,2005;李华芹等,2006;Peng *et al.*,2006;付建明等,2007;马丽艳等,2007;Yuan *et al.*,2007;袁顺达等,2012),但对大义山矿田花岗岩体成岩及成矿机制研究还较为薄弱,尤其缺乏精确的成矿年龄数据。本文以发育在大义山中北部的白沙子岭—杨柳塘一带的云英岩脉型锡矿床为对象,对其成矿年龄进行精确测定,为矿床成因研究提供了年代学的证据,并就其成矿物质来源问题进行了讨论。

1 地质背景

大义山矿田处于华南褶皱带南岭成矿带中段北缘,位于阳明山—大义山—上堡东西向基底断裂、攸县—宁远北东向基底断裂和郴州—邵阳北西向隐伏深断裂带的交汇部位(图 1),是滨西太平洋成矿域

(I 级),华南褶皱系燕山、喜山期锡、钨多金属成矿区(II 级)(华南成矿区),湘中南坳陷锡、钨多金属成矿亚区的重要组成部分(伍光英等,2000,2005;龚述清等,2002;刘铁生,2002;周厚祥等,2005)。区域上已知锡钨多金属矿床主要围绕着中酸性花岗质侵入岩体分布,如与香花岭岩体有关的香花岭矿田、与骑田岭岩体有关的骑田岭矿田和与千里山岩体有关的千里山矿田等都是湘南地区重要的锡钨多金属矿田(龚述清等,2002;毛景文等,2004b;陈庆等,2005;周厚祥等,2005)。

大义山矿田出露地层主要为晚古生代泥盆系、石炭系和二叠系,而震旦系、寒武系和第四系出露面积较少。震旦系—寒武系主要为一套浅海相类复理石沉积建造,出露于大义山岩体西南,其中震旦系岩性以石英砂岩夹砂质板岩、板岩、长石石英砂岩为主;寒武系岩性以浅变质砂岩类为主,夹杂泥质及粉砂质板岩类。晚古生界为地台型陆缘海沉积类型,以浅海相碳酸盐沉积为特征;其中泥盆系主要为中厚层石英砂岩、砂岩、粉砂岩以及中厚层至厚层灰岩、白云质灰岩;石炭系主要为中厚层灰岩、白云岩以及石英砂岩、粉砂岩、页岩等;二叠系岩性主要为中厚层灰岩、含铁锰硅质岩、硅质页岩以及石英砂岩、粉砂岩。泥盆系、石炭系各类碳酸盐岩与接触交代型矿床的形成关系密切。

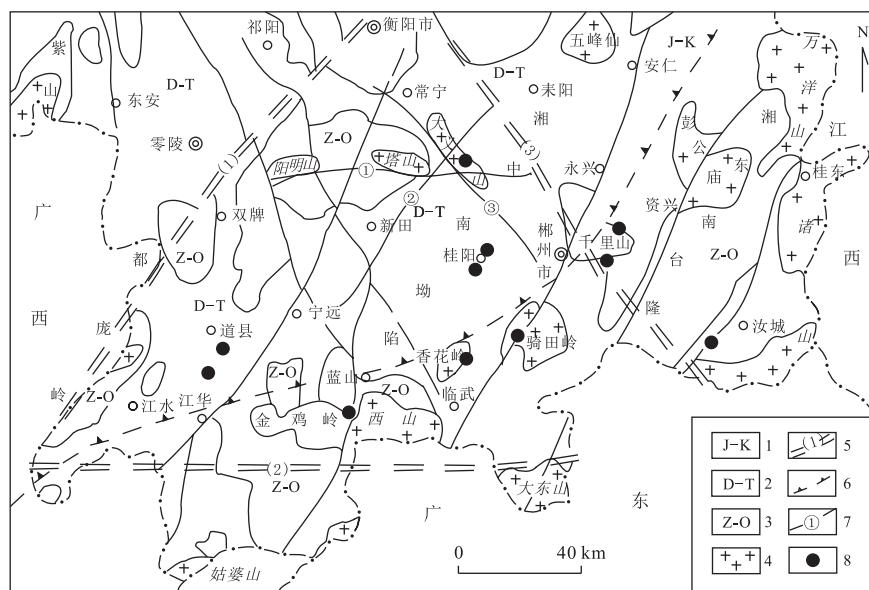


图 1 大义山矿田区域位置(据陈庆等,2005)

Fig.1 Geological sketch map of the Dayishan ore field

1.侏罗系—白垩系;2.泥盆系—三叠系;3.震旦系—奥陶系;4.花岗岩体;5.深大断裂带及编号;6.级构造单元分界线;7.主要断裂及编号;8.典型内生金属矿产。主要断裂名称:(1)NE 向宁远—常宁深大断裂带;(2)EW 向九嶷山—大东山基底褶皱带;(3)NW 向郴州—邵阳断裂带;① 阳明山—大义山—上堡东西向基底断裂;②攸县—宁远北东向基底断裂;③郴州—邵阳北西向隐伏深断裂带

表1 大义山岩体岩性及年龄数据

Table 1 The Lithology and chronology of Dayishan intrusive rock

时代	代号	岩性	年龄(Ma)	测试方法	数据来源
晚侏罗世	J ₃ γγ	中细—细(微)粒二长花岗岩	141, 143, 144	B	湖南地质矿产勘查局, 湖南1:5万白沙镇幅区域地质调查报告, 1988; 伍光英等, 2005
中侏罗世	J ₂ γγ	细粒(少斑)二云二长花岗岩	156	B	伍光英等, 2005
	J ₂ βγγ	中粗—细(微)粒斑状黑云二长花岗岩	169, 181, 177	B	湖南地质矿产勘查局, 湖南1:5万白沙镇幅区域地质调查报告, 1988; 伍光英等, 2005
早侏罗世	J ₁ βκγ	中—细粒斑状(含角闪石)黑云钾长花岗岩	174	Z	湖南地调院, 湖南1:5万罗家桥幅、阳嘉洲幅区域地质调查报告, 2000

注: B. 黑云母 K-Ar 法; Z. 独居石 U-Pb 模式年龄。

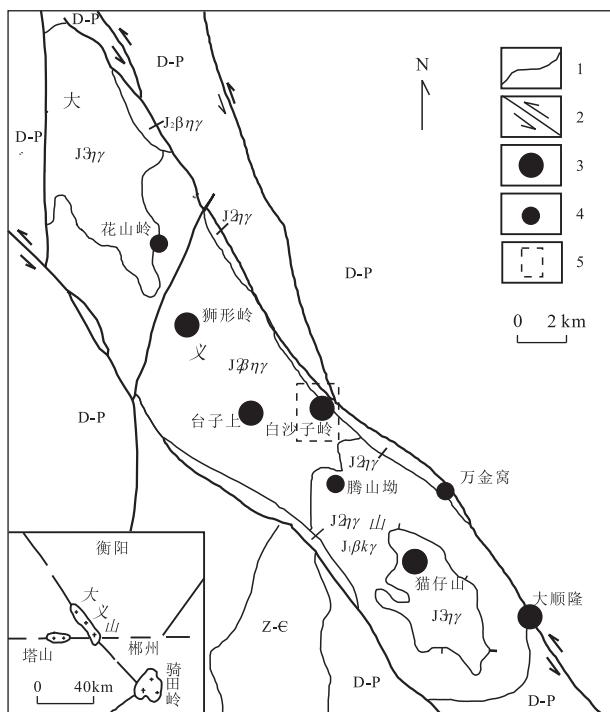


图2 湘南大义山矿田锡多金属矿产地质简图(伍光英等, 2005)

Fig.2 The geological sketch map of the tin-polymetallic deposits in the Dyishan ore field, southern Hunan Province

D-P. 泥盆系一二叠系; Z-E. 震旦系—寒武系; J₃γγ. 晚侏罗世二长花岗岩; J₂γγ. 中侏罗世二云二长花岗岩; J₂βγγ. 中侏罗世黑云二长花岗岩; J₁βκγ. 早侏罗世黑云钾长花岗岩; 1. 地质界线; 2. 左行走滑断裂; 3. 大型矿床; 4. 中小型矿床; 5. 白沙子岭矿区

大义山矿田岩浆岩出露面积达 280 km², 被称为大义山岩体, 为呈北西向展布的燕山期复式花岗岩体。依据侵入期次, 该岩体可分为3期, 分别为早侏罗世中—细粒斑状(含角闪石)黑云钾长花岗岩, 中侏罗世中粗—细(微)粒斑状黑云二长花岗岩及细粒(少斑)二云二长花岗岩, 晚侏罗世中细—细(微)粒二长花岗岩(表1, 图2)。与成矿关系最为密切的是中侏罗世细粒二云二长花岗岩。

大义山矿田经历了多期多次构造影响, 形成了

以断裂为主, 褶皱次之的构造格局。著名的“大义山式”北西向断裂是该区的主要控岩控矿构造(彭和求和伍光英, 2000; 伍光英等, 2005)。岩体内外分布的南北向、北东向、近东西向断裂则是锡多金属矿体的主要容矿构造。

大义山矿田具有湘南地区常见的矿床类型, 这些矿床分布在大义山岩体内部及与围岩的接触带附近, 主要的矿床类型从岩体内部到接触带外部包括蚀变花岗岩体型、云英岩脉型、矽卡岩型、石英脉型(图2)。另外在大义山岩体外围还有砂锡矿床的分布。

2 矿床地质特征

本次研究采集样品主要集中在白沙子岭矿区, 矿区主要成矿类型以云英岩脉型锡矿床为主, 还发育有蚀变花岗岩体型。矿床位于大义山岩体东侧, 出露岩体为二云二长花岗岩和黑云二长花岗岩等(图3)。

白沙子岭矿区已发现云英岩脉型锡矿脉18条, 赋存于中侏罗世岩体东西向断裂内。各矿脉近于平行展布, 构成980 m×1 200 m的矿脉发育区; 脉间距15~150 m, 自北向南, 单条矿脉走向由65°渐转为90°, 呈由西向东撤开趋势; 单矿脉倾向北, 倾角一般大于70°, 走向长360~950 m, 厚0.35~10.00 m(脉带)。

矿区云英岩型锡矿脉由一系列密集分布的云英岩细脉(多达5~30条)石英脉及脉间碎裂化、云英岩化花岗岩组成(图3); 脉壁平直、整齐, 延伸较稳定, 有分支复合现象; 自地表往深部: 中部细脉(脉幅2~10 cm)变粗(脉幅大于50 cm)、条数减少、脉间距变宽、品位变富, 脉体下部品位变贫, 逐渐变薄尖灭。

矿区锡矿体呈脉状、透镜状赋存于云英岩型锡

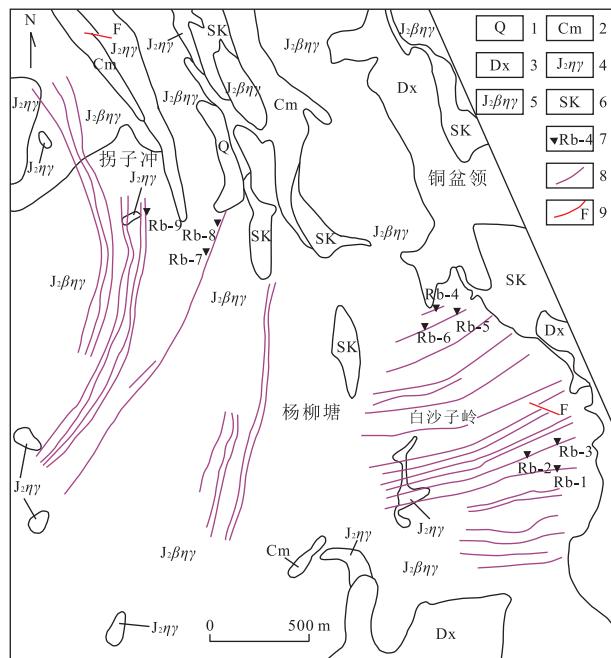


图 3 大义山地区白沙子岭锡矿床地质简图(据曾志方等,2008)

Fig.3 The geological map of the Baishaziling tin deposit in the Dayishan ore field

1.第四系地层;2.马兰边组;3.孟公坳组;4.中侏罗世二云二长花岗岩;5.中侏罗世黑云二长花岗岩;6.矽卡岩;7.取样位置及编号;8.锡矿脉及编号;9.断层

矿脉中,矿化连续,一般一条矿脉中只有一个矿体,部分矿脉有2~3个矿体。矿体产状与矿脉一致。锡矿体走向长492~940 m,倾斜延深最深已达240 m,平均厚1.31~2.55 m。

矿区矿石自然类型均为原生锡氧化物矿石,按

照矿石的矿物组成,可以划分为石英—云母—锡石矿石,石英—电气石—黄玉—锡石矿石,石英—电气石—锡石矿石,石英—云母—黄玉—锡石矿石等组合类型。矿石的主要有用组分为锡,平均品位 $0.49 \times 10^{-2} \sim 1.34 \times 10^{-2}$,伴生有铜、钨、砷等有益组分,分布极不均匀,钨在局部地段可形成工业矿体外,其他一般很难形成独立矿体。

矿区矿石结构以自形一半自形—他形结构、交代残余结构、显微鳞片结构、镶嵌结构等为主,矿石构造主要包括脉状构造、浸染状构造、团块状构造、角砾状构造等。矿石金属矿物主要有锡石、黄铜矿、毒砂、黄铁矿等,非金属矿物主要有石英、长石、云母等(图4)。

矿区围岩蚀变主要为岩体自变质作用及岩浆期后气—液蚀变作用,蚀变种类主要有云英岩化、白云母化、电英岩化、绢云母化、绿泥石化、黄玉化、电气石化、硫化物化等;岩体自变质作用主要发育于中侏罗世细粒斑状黑云二长花岗岩及细粒二云二长花岗岩,分布范围较大,主要有云英岩化、白云母化、绿泥石化;岩浆期后气—液蚀变主要沿成矿断裂带或劈理(节理)带线状分布,与锡成矿有关的主要有云英岩化、黄玉化、电气石化及多种硫化物化。当碎裂岩带内出现云英岩化、电气石化与硅化等蚀变组合时,往往是锡矿化的集中地带,多种硫化物化叠加部位矿化富集。

曾志方等(2008)根据矿区内地质特征,将本区钨锡矿化划分为伟晶岩期(I)、云英岩期

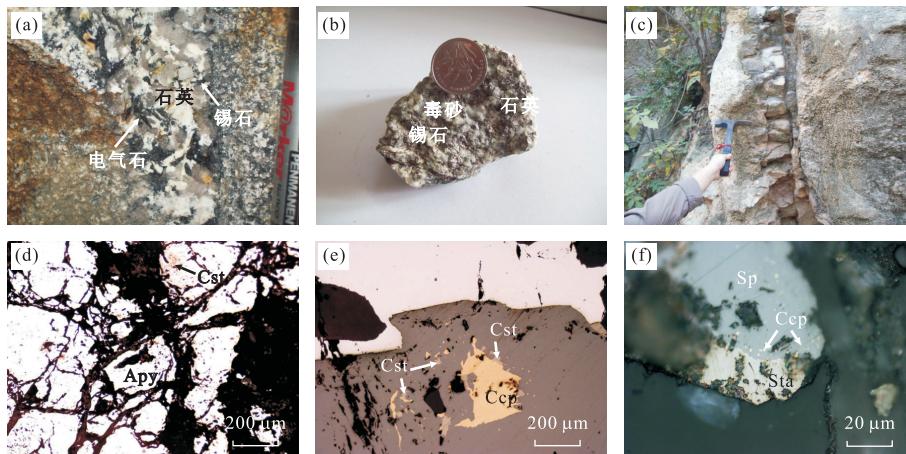


图 4 白沙子岭锡矿床典型矿石及镜下典型矿物照片

Fig.4 Photos of typical ores and microscopic images of typical minerals in the Baishaziling tin deposit

a.石英—锡石—电气石脉型矿石;b.石英—锡石—毒砂脉型矿石;c.含矿云英岩脉;d.毒砂(Apy)、锡石(Cst)共生;e.黄铜矿(Ccp)、锡石(Cst)共生;f.黝锡矿(Sta)、闪锌矿(Sp)与黄铜矿(Ccp)共生

(Ⅱ)、硫化物期(Ⅲ)3个成矿期5个成矿阶段.其中第Ⅱ期云英岩型锡矿化为主成矿期,规模和分布范围较大,矿化较强;可以细分为体型云英岩和脉型云英岩两个阶段.矿物组合为铁锂云母—石英—白云母—黄玉—锡石,其次见铁闪锌矿、辉钼矿、方铅矿、黄铜矿、黄铁矿等少量硫化物及电气石.锡石颗粒较细,粒径 $0.1\sim1.1\text{ mm}$,呈浸染状分布,与锂云母—铁锂云母共生,矿石呈鳞片变晶结构.在岩体型云英岩中锂云母含量较高,且含较多长石.流体包裹体研究表明该矿床成矿温度为 $130\sim425\text{ }^{\circ}\text{C}$,盐度为 $1.40\%\sim11.22\%$,成矿压力为 $67\times10^5\sim537\times10^5\text{ Pa}$.矿床属中高温岩浆热液矿床.

3 分析方法和结果

3.1 样品采集

本次用于Rb-Sr同位素测年研究的9个样品均取自白沙子岭矿区形成的近东西、北北东向含锡石英脉中,同属云英岩期(Ⅱ)脉型云英岩成矿阶段产物(图3).所采集的矿石样品中金属矿物主要有锡石、黄铜矿、黄铁矿、毒砂等,非金属矿物主要有石英、长石、云母、电气石等.矿石结构以自形一半自形—他形结构、交代残余结构、显微鳞片结构、镶嵌结构等为主,构造以浸染状构造、脉状构造、团块状构造及角砾状构造为主.

3.2 测试方法

样品Rb-Sr同位素测试分析在中国地质调查局宜昌地质矿产研究所MAT-261可调多接收质谱仪上进行.具体试验流程见文献(蔡明海等,2006;孙敬博等,2013).同位素分析中,用GBW04411、NBS607和NBS987标准物质分别对分析流程和仪器进行监控.NBS987的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素组成测定值为

$0.710\ 23\pm0.000\ 05(2\sigma)$;NBS607平均值分别为 $\text{Rb}=523.2\times10^{-6}$, $\text{Sr}=65.3\times10^{-6}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=1.200\ 35\pm0.000\ 09(2\sigma)$;GBW04411的Rb、Sr含量与 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值分别为 249.4 ± 0.7 、 159.0 ± 0.2 和 $0.759\ 91\pm0.000\ 08(2\sigma)$.同位素分析样品制备的全过程均在超净化实验室内完成,全流程Rb、Sr空白分别为 $1.0\times10^{-10}\text{ g}$ 和 $6.7\times10^{-10}\text{ g}$.

3.3 分析结果

测试结果见表1,大义山矿田成矿流体Rb含量为 $0.412\ 6\times10^{-6}\sim6.198\ 0\times10^{-6}$,Sr含量为 $0.041\ 7\times10^{-6}\sim1.760\ 0\times10^{-6}$, $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 比值变化较大,在 $3.18\sim325.30$ 之间, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为 $0.718\ 72\sim1.451\ 28$.年龄数据的处理采用Ludwig(1999)ISOPLOT程序, $\lambda=1.42\times10^{-11}\text{ a}^{-1}$, $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 及 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 输入误差分别为2%和0.02%,获得等时线年龄为 $160\pm1\text{ Ma}(1\sigma)$ (MSWD=0.12), $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值为 $0.706\ 79\pm0.003\ 66(1\sigma)$ (表2,图5).

4 讨论

4.1 成矿时代

石英由于具有良好的机械强度、高的化学纯度、较好的热稳定性和后生变化微弱等特点,是Rb-Sr法直接测定成矿作用时代的理想矿物(Shepherd and Darbyshire,1981;李华芹等,1993).Rb、Sr在石英矿物中主要赋存于流体包裹体中(Norman and Lands,1983;Rossman *et al.*,1987;Changkakoti and Gray,1988;李华芹等,1993).本次测试样品Rb-1~Rb-6取自近东西向矿脉,Rb-7~Rb-9取自NNE向矿脉(图3),根据矿石特征和矿物组合特征样品同属云英岩期(Ⅱ)脉型云英岩成矿阶段,为同

表2 大义山矿田白沙子岭锡矿床云英岩脉型矿体中石英流体包裹体Rb-Sr同位素组成

Table 2 Rb-Sr isotopic compositions of fluid inclusion in quartzes from the greisite vein type orebody of the Baishaziling tin deposit

序号	样品编号	矿物	Rb(10^{-6})	Sr(10^{-6})	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(2\sigma)$	t(Ma)
1	Rb-1	石英	0.412 6	0.041 7	28.75	$0.775\ 89\pm0.000\ 04$	
2	Rb-2	石英	3.647 0	0.058 2	188.10	$1.126\ 82\pm0.000\ 04$	
3	Rb-3	石英	4.205 0	0.047 3	272.00	$1.330\ 66\pm0.000\ 07$	
4	Rb-4	石英	1.010 0	0.043 7	67.59	$0.856\ 17\pm0.000\ 05$	
5	Rb-5	石英	5.618 0	0.159 4	104.00	$0.949\ 13\pm0.000\ 06$	$160\pm1(1\sigma)$
6	Rb-6	石英	3.988 0	0.075 3	157.90	$1.058\ 22\pm0.000\ 10$	
7	Rb-7	石英	6.198 0	0.058 9	325.30	$1.451\ 28\pm0.000\ 08$	
8	Rb-8	石英	1.940 0	1.760 0	3.18	$0.718\ 72\pm0.000\ 05$	
9	Rb-9	石英	5.594 0	0.103 0	162.20	$1.071\ 34\pm0.000\ 06$	

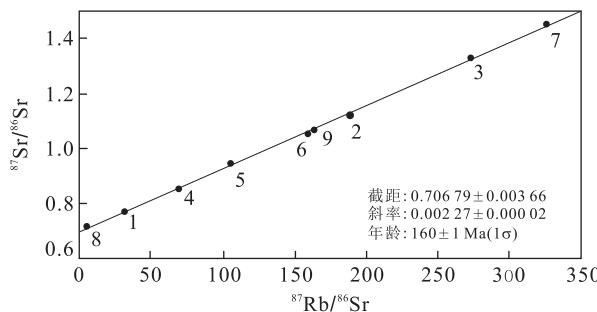


图 5 白沙子岭锡矿床云英岩脉型锡矿体中石英流体包裹体 Rb-Sr 等时线

Fig.5 Rb-Sr isochron of fluid inclusion in quartzes from the greisen vein orebody of the Baishaziling tin deposit

时、同源、同类型矿石;镜下观察样品中石英比较完整,基本未见裂隙,流体包裹体中 Rb-Sr 具有很好的封闭性,可以认为其未受其他构造热液成矿期的叠加改造。为降低次生包裹体对年龄测定的影响,测试中首先将样品加热至 120~180 °C 进行爆裂,因此所测 Rb、Sr 结果基本可以代表主成矿阶段原生流体包裹体中二者的含量。样品 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 具有较大的变化范围,满足 Rb-Sr 同位素等时线年龄测试的要求,保证了确定等时线年龄所需要的条件。因此本次获得的石英流体包裹体 Rb-Sr 同位素等时线年龄 $160 \pm 1 \text{ Ma} (1\sigma)$ ($\text{MSWD} = 0.12$) 可以代表大义山锡多金属矿田成矿年龄,这也是迄今为止首次公开发表的大义山矿田锡成矿年龄数据。

湘南地区是我国最著名的钨锡多金属成矿地区,虽然近几年出现了关于华南地区有印支期成矿事件的报道(刘善宝等,2008;邹先武等,2009;付建明等,2011),但该地区规模最大的钨锡多金属成矿主要还是发生在燕山期。毛景文等(2004a)通过研究认为,华南地区中生代以钨锡成矿为主的大规模成矿作用主要发生在 170~150 Ma、140~125 Ma 和 110~80 Ma 这 3 个时间段;付建明等(2011)通过研究认为南岭地区原生钨锡多金属矿床形成时代从晋宁期到燕山期都有分布,但以燕山期为主,并可大致分为 150~160 Ma、130~140 Ma 和 90~100 Ma 这 3 个阶段;其中 150~160 Ma 期间的成矿尤为集中,是区内成矿高峰期。笔者通过对湘南地区主要钨锡多金属矿床的成岩成矿年龄数据进行统计显示(表 3),该地区主要成矿事件集中发生在 2 个时段:160~150 Ma 和 140~130 Ma。这说明无论从整个华南地区来说,还是就湘南地区来说,160~150 Ma 是钨锡多金属成矿的最主要时段。大义山云英岩脉型

成矿年龄测试结果显示,大义山矿田云英岩脉型成矿属于华南地区成矿高峰期的产物,而且是区域上该成矿时段内较早期形成的锡多金属矿床。

4.2 成岩成矿关系及成矿物质来源

湘南地区锡钨多金属矿产的形成与中生代花岗岩具有密切的成因关系,尽管成岩与成矿之间的时差问题还有不同的观点(毛景文等,2004b;华仁民,2005;蒋少涌等,2006;刘晓菲等,2012),但总体来说成岩与成矿的时间比较接近(表 3)。

大义山岩体的成岩成矿年龄研究都比较薄弱,缺乏高精度的同位素数据,前人数据多数基于黑云母 K-Ar 年龄和独居石 U-Pb 模式年龄(表 1)。伍光英等(2000,2005)认为大义山岩体是一个由印支期和燕山期多阶段岩浆活动形成的复式岩体,大义山岩体可划分为印支期(210~278 Ma)至燕山期(156~185 Ma, 128~148 Ma)3 个大期,包括 76 个侵入体,12 个单元,归并为 3 个超单元;刘铁生(2002)把大义山岩体划分为关口(J_1)、汤市铺(J_2)、泥板田(J_3)等 3 个超单元及早白垩世下马塘单元(K_1),共 14 个单元。从大义山岩体成岩年龄数据分布上看,大义山岩体南体年龄还有争议(伍光英等,2000,2005;刘铁生,2002),但总体比北部年龄老。目前大义山较为精确的同位素年龄数据主要有刘耀荣等(2005)获得的南体北部中细粒斑状黑云母二长花岗岩黑云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄 $156.2 \pm 1.6 \text{ Ma}$ 。笔者对与地质成矿关系密切的北体中部介头单元细粒二云二长花岗岩进行了 LA-ICPMS 单颗粒锆石 U-Pb 年龄测定,结果显示为 $160.7 \pm 2.9 \text{ Ma}$ (另文发表),与本次获得的石英脉 Rb-Sr 等时线年龄 $160 \pm 1 \text{ Ma} (1\sigma)$ 一致。

白沙子岭锡矿床矿体以云英岩脉型和蚀变岩体型为主,矿体主要赋存于中晚侏罗世的二长花岗岩内,少量赋存于岩体与围岩接触带附近。空间上,岩体内主要发育云英岩脉型和蚀变岩体型矿体,接触带上主要发育少量接触交代型蚀变矿化,接触带外围发育少量脉状矿化。云英岩脉型矿体主要受北东向和北北东向断裂和裂隙控制,矿石结构主要为自形—他形结构、填隙结构、出溶结构、乳滴状结构等,构造主要为脉状构造、浸染状构造、团块状构造和角砾状构造,蚀变花岗岩围岩具粒柱变晶结构、柱纤变晶结构和鳞片变晶结构,其中粒柱变晶结构、柱纤变晶结构出现部位往往是矿脉中心或矿化较强处。时间上控矿断裂主要为岩体原生裂隙,矿液充填和就位时间主要发生岩浆侵入晚期,而且据前面同位素

表3 湘南地区部分花岗岩体及钨锡多金属矿床成岩成矿年龄

Table 3 Rock-forming and ore-forming ages of some tungsten-tin polymetallic deposits in southern Hunan Province

矿区	岩体	成岩年龄(Ma)	成矿年龄(Ma)	测试方法	文献
大义山	大义山岩体		160±1	石英 Rb-Sr 等时线年龄	本文
黄沙坪	花岗斑岩	162		LA-ICPMS 钨石 U-Pb 年龄	姚军明等, 2005
黄沙坪	花岗斑岩		153.8±4.8	辉钼矿 Re-Os 等时线年龄	马丽艳等, 2007
黄沙坪	花岗斑岩		154.8±1.9	辉钼矿 Re-Os 等时线年龄	姚军明等, 2005
金船塘	千里山岩体		133.4±5.9	石英 Rb-Sr 等时线年龄	马丽艳等, 2010
金船塘	千里山岩体		141±11	符山石、石榴石 Sm-Nd 等时线年龄	马丽艳等, 2010
金船塘	千里山岩体		164±12	辉铋矿—黄铁矿 Pb-Pb 等时线年龄	肖红全等, 2003
金船塘	千里山岩体		158.8±6.6	辉钼矿 Re-Os 等时线年龄	刘晓菲等, 2012
红旗岭	千里山岩体		143.1±8.7	石英 Rb-Sr 等时线年龄	马丽艳等, 2010
红旗岭	千里山岩体	155~151	153.3±1	白云母 Ar-Ar 坪年齡	袁顺达等, 2012
柿竹园	千里山岩体		151.1±3.5	辉钼矿 Re-Os 等时线年龄	李红艳等, 1996
瑶岗仙	瑶岗仙岩体		154.9±2.6	辉钼矿 Re-Os 等时线年龄	Peng et al., 2006
瑶岗仙	瑶岗仙岩体		153.0±1.1	金云母 Ar-Ar 坪年齡	Peng et al., 2006
瑶岗仙	瑶岗仙岩体		155.1±1.1	白云母 Ar-Ar 坪年齡	Peng et al., 2006
香花岭	香花岭岩体		151.9±3	白云母 Ar-Ar 等时线年龄	Yuan et al., 2007
香花岭	香花岭岩体		160.0±3.2	白云母 Ar-Ar 等时线年龄	Yuan et al., 2007
香花岭	香花岭岩体		160.3±3.2	白云母 Ar-Ar 等时线年龄	Yuan et al., 2007
大坳	九嶷山岩体		151.3±2.4	辉钼矿 Re-Os 等时线年龄	付建明等, 2007
骑田岭	骑田岭岩体	155.5±1.3		锆石 SHRIMP U-Pb 年齡	赵葵东等, 2006
骑田岭	骑田岭岩体	157.1±1.2		锆石 SHRIMP U-Pb 年齡	赵葵东等, 2006
骑田岭	角闪黑云花岗岩	157.5±0.3		黑云母 Ar-Ar 坪年齡	毛景文等, 2004b
骑田岭	三门锡矿		156.1±0.4	白云母 Ar-Ar 坪年齡	毛景文等, 2004b
骑田岭	淘洗窝锡矿		160.1±0.9	白云母 Ar-Ar 坪年齡	毛景文等, 2004b
白腊水 骑田岭岩体	南溪单元	146±10		Rb-Sr 等时线年龄	李华芹等, 2006
	含矿花岗斑岩体	146±5		锆石 SHRIMP U-Pb 年齡	李华芹等, 2006
白腊水 骑田岭岩体	主花岗岩体	155±6		锆石 SHRIMP U-Pb 年齡	李华芹等, 2006
	矿化花岗岩	156±5		锆石 SHRIMP U-Pb 年齡	李华芹等, 2006
	矿化花岗岩		137±5	Rb-Sr 等时线年龄	李华芹等, 2006
	矿化花岗岩		133±15	Sm-Nd 等时线年龄	李华芹等, 2006

年龄数据,两者基本近于同时。

与成矿关系密切的中晚侏罗世二长花岗岩高硅、富碱、贫钙、富 Sn, 轻稀土浓度相对重稀土富集, “V”型稀土元素配分曲线型, Eu 强烈亏损, Eu/Eu^* 小于 0.3 的特征, 属超酸性铝过饱和 S 型或陆壳改造型花岗岩的特征(伍光英等, 2005), 这与整个湘南地区主要锡钨矿产成矿花岗岩的特征类似。微量元素中富集岩石富含 Sn、Cu、W、As、F、B 等成矿要素和矿化剂元素, 其中 Sn 元素含量普遍可达上地壳平均含量的 5~10 倍以上。晚期介头单元花岗岩 Sn 含量最高, 最高可达 114 倍, 具备形成锡多金属矿产的良好条件。

曾志方等(2008)对该矿床同位素特征进行了研究。结果显示, 矿床蚀变花岗岩型矿石 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $0.3\text{\textperthousand} \sim 2.8\text{\textperthousand}$, 平均 $1.8\text{\textperthousand}$; 云英岩脉型矿石 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-2.8\text{\textperthousand} \sim 0.7\text{\textperthousand}$, 平均 $-0.6\text{\textperthousand}$; 硫同位素组成变化范围小, 组成稳定, 靠近零值, 且不超过 $+8\text{\textperthousand}$, 为典型的岩浆来源矿床。两类矿石的铅同位素组成基本

一致。其中蚀变花岗岩型矿石 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 $18.5070 \sim 18.8803$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 $15.6374 \sim 15.6604$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 $38.916 \sim 39.105$; 云英岩脉型矿石 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 $18.5269 \sim 18.6907$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 $15.6121 \sim 15.6427$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 $38.748 \sim 38.953$; 根据铅同位素构造模式判断铅的来源可能是岩浆来源的造山带与地层中铅相互作用的结果。蚀变花岗岩型锡矿石 δD 为 $-79\text{\textperthousand}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 为 $6.64\text{\textperthousand}$ 。云英岩脉型锡矿石 δD 为 $-58\text{\textperthousand} \sim -54\text{\textperthousand}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 为 $4.14\text{\textperthousand} \sim 7.64\text{\textperthousand}$ 。成矿流体中水的氢、氧同位素组成远离大气降水线而位于岩浆水范围。

以上地质和地球化学证据显示, 以白沙子岭矿区为代表的云英岩脉型矿体的形成与大义山中晚侏罗世的二长花岗岩具有密切的共生关系。这与该区成岩与成矿关系的主流认识相一致, 曾志方等(2008)认为, 白沙子岭云英岩脉型锡矿的形成与大义山岩体中侏罗汤市铺超单元介头单元岩浆活动关

系密切,为该期岩浆期后热液成矿作用的产物;伍光英等(2005)也认为大义山矿田的成矿作用与大义山岩体中侏罗世及晚侏罗世的燕山期第4次介头单元岩浆活动(160 ± 5 Ma)关系最为密切;刘义茂等(1997)认为 160.8 ± 2.4 Ma 是该地区中侏罗世岩浆活动和矿床形成峰期。

另外,笔者在进行矿床成矿年龄研究的时候,采用 Geokit 软件(路远发,2004)分别进行了 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值的计算,为避免放射性 ^{87}Rb 衰变对锶同位素造成显著影响,将成矿时代换算到 160 Ma,计算结果为 $0.706\ 79$,接近地幔与地壳边界 Sr 的初始值 0.707 (Faure,1986).这也许预示着石英包裹体中的成矿热液除了壳源物质外,可能还有地幔物质的混合。关于湘南地区成岩成矿中的地幔物质影响,已经有多位专家进行过讨论(毛景文,1997;李兆丽等,2006;付建明等,2011;Zhao et al., 2012),付建明等(2011)通过对南岭地区的黄铁矿流体包裹体 He、Ar 同位素研究,也证实南岭地区成矿流体以地幔流体为主,同时混合了地壳流体和大气水;李兆丽等(2006)通过对芙蓉矿田中矿石硫化物流体包裹体的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 同位素的研究,指出有幔源流体参与成矿作用;毛景文(1997)也认为,地幔流体在湖南柿竹园钨锡钼多金属矿床成矿过程中起了重要作用。因此,笔者推断在大义山矿田的锡多金属成矿过程中,可能也有地幔流体的参与。

5 结论

(1)白沙子岭锡多金属矿床云英岩脉型锡矿体石英流体包裹体 Rb-Sr 等时线年龄为 160 ± 1 Ma,可以代表大义山矿田云英岩脉型成矿时间,是南岭地区中生代 $160 \sim 150$ Ma 时段成矿高峰期产物。

(2)白沙子岭锡多金属矿床与大义山岩体中中晚侏罗世二长花岗岩在时间和空间上均具有密切的成因关系,为该期岩浆活动晚期热液成矿作用的产物。

(3)大义山矿田云英岩脉型锡多金属矿床石英流体包裹体中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值为 $0.706\ 79 \pm 0.003\ 66$,这可能预示着该区云英岩脉型锡成矿流体有地幔物质的参与,应为壳幔混合流体。

致谢:感谢编委和匿名审稿专家对本文提出的宝贵修改意见和付出的辛勤劳动。

References

- Cai, M. H., Liang, T., Wei, K. L., et al., 2006. Rb-Sr Dating of the No. 92 Orebody of the Tongkeng-Changpo Deposit in the Dachang Tin-Polymetallic Ore Field, Guangxi, and Its Significance. *Geology and Mineral Resources of South China*, (2): 31—36 (in Chinese with English abstract).
- Changkakoti, A., Gray, J., Krstic, D., et al., 1988. Determination of Radiogenic Isotope (Rb/Sr, Sm/Nd and Pb/Pb) in Fluid Inclusion Water: An Example from the Bluebell Pb-Zn Deposit, British Columbia, Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52: 1961—1967. doi: 10.1016/0016-7037(88)90251-7
- Chen, Q., Xu, H. C., He, Z. H., et al., 2005. Ore-Controlling Features of Qianlishan-Dayishan-Jiuyishan Triangle Mineralization Region, Hunan Province. *Geology and Mineral Resources of South China*, (1): 31—36, 46 (in Chinese with English abstract).
- Faure, G., 1986. Principles of Isotope Geology. John Wiley Sons (2nd Edition), New York, 183—199.
- Fu, J. M., Li, H. Q., Qu, W. J., et al., 2007. Re-Os Isotope Dating of the Da'ao Tungsten-Tin Deposit in the Jiuyi Mountains, Southern Hunan Province. *Geology in China*, 34 (4): 651—656 (in Chinese with English abstract).
- Fu, J. M., Xu, D. M., Yang, X. J., et al., 2011. Tin Deposits in Nanling Range. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Gong, S. Q., Huang, G. F., Hu, Z. K., et al., 2002. Types and Exploration Prospecting of Tin Deposits in Southeastern Dayishan Granite Body. *Geology and Mineral Resources of South China*, (1): 67—72 (in Chinese with English abstract).
- Hua, R. M., 2005. Differences between Rock-Forming and Related Ore-Forming Times for the Mesozoic Granitoids of Crust Remelting Types in the Nanling Range, South China, and Its Geological Significance. *Geological Review*, 51 (6): 633—639 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, S. Y., Zhao, K. D., Jiang, Y. H., et al., 2006. New Type of Tin Mineralization Related to Granite in South China: Evidence from Mineral Chemistry, Element and Isotope Geochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (10): 2509—2516 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. Q., Liu, J. Q., Wei, L., 1993. Geochronology and Geologic Application of Fluid Inclusions in Hydrothermal Ore Deposits. Geol. Pub. House, Beijing, 1—27 (in Chinese).

- Li, H.Q., Lu, Y.F., Wang, D.H., et al., 2006. Dating of the Rock-Forming and Ore-Forming Ages and Their Geological Significances in the Furong Ore-Field, Qitian Mountain, Hunan. *Geological Review*, 52(1): 113—121 (in Chinese with English abstract).
- Li, H.Y., Mao, J.W., Sun, Y.L., et al., 1996. Re-Os Isotopic Chronology of Molybdenites in the Shizhuyuan Polymetallic Tungsten Deposit, Southern Hunan. *Geological Review*, 42(3): 261—267 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z.L., Hu, R.Z., Peng, J.T., et al., 2006. Helium Isotope Composition of Fluid Inclusions and the Origin of Ore-Forming Fluids of Furong Tin Orefield in Hunan Province, China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(1): 129—135 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S.B., Wang, D.H., Chen, Y.C., et al., 2008. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Ages of Muscovite from Different Types Tungsten-Bearing Quartz Veins in the Chong-Yu-You Concentrated Mineral Area in Gannan Region and Its Geological Significance. *Acta Geologica Sinica*, 82(7): 932—940 (in Chinese with English abstract).
- Liu, T.S., 2002. Geological Characteristics and Genesis of Rock Body-Type Tin Deposits in the Dayishan Ore Field. *Geology in China*, 29(4): 411—415 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X.F., Yuan, S.D., Wu, S.H., 2012. Re-Os Dating of the Molybdenite from the Jinchuantang Tin-Bismuth Deposit in Hunan Province and Its Geological Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 28(1): 39—51 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y.M., Dai, T.M., Lu, H.Z., et al., 1997. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and Sm-Nd Isotope Dating of Rocking, Ore-Forming of the Qianlishan Granites. *Science in China (Series D)*, 27(5): 425—430 (in Chinese).
- Liu, Y.R., Kuang, J., Ma, T.Q., et al., 2005. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Dating of Biotite in South Dayishan Granite and Its Geological Significance. *Resources Survey & Environment*, 26(4): 244—249 (in Chinese with English abstract).
- Lu, Y.F., 2004. GeoKit—A Geochemical Toolkit for Microsoft Excel. *Geochimica*, 33(5): 459—464 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig, K., 1999. Isoplot/Ex. Version 2.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Geochronology Center Special Publication, Berkeley, 1a: 47.
- Ma, L.Y., Lu, Y.F., Fu, J.M., et al., 2010. The Rb-Sr and Sm-Nd Geochronology Constraints on the Formation Age of Jinchuantang and Hongqiling Tin-Polymetallic Deposits in Dongpo Orefield, Hunan Province. *Geology and Mineral Resources of South China*, (4): 23—29 (in Chinese with English abstract).
- Ma, L.Y., Lu, Y.F., Qu, W.J., et al., 2007. Re-Os Isotopic Chronology of Molybdenites in Huangshaping Lead-Zinc Deposit, Southeast Hunan, and Its Geological Implications. *Mineral Deposits*, 26(4): 425—431 (in Chinese with English abstract).
- Mao, J.W., 1997. Metallogenetic Speciality of Super Giant Polymetallic Tungsten Deposit: Taking the Shizhuyuan Deposit as an Example. *Scientia Geologica Sinica*, 32(3): 351—363 (in Chinese with English abstract).
- Mao, J.W., Xie, G.Q., Li, X.F., et al., 2004a. Mesozoic Large Scale Mineralization and Multiple Lithospheric Extension in South China. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 45—55 (in Chinese with English abstract).
- Mao, J.W., Li, X.F., Lehmann, B., et al., 2004b. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Dating of Tin Ores and Related Granite in Furong Tin Orefield, Hunan Province, and Its Geodynamic Significance. *Mineral Deposits*, 23(2): 164—175 (in Chinese with English abstract).
- Norman, D.Z., Lands, G.P., 1983. Source of Mineralizing Components in Hydrothermal Ore Fluids as Evidenced by $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and Stable Isotope Data from the Pasto Bueno Deposit, Peru. *Econ. Geol.*, 78: 451—456. doi: 10.2113/gsecongeo.78.3.451
- Peng, H.Q., Wu, G.Y., 2000. Determination of “Dayishan-Style Structure” in Southern Hunan and Its Geological Significance. *Hunan Geology*, 19(2): 87—89 (in Chinese with English abstract).
- Peng, J.T., Zhou, M.F., Hu, R.Z., et al., 2006. Precise Molybdenite Re-Os and Mica Ar-Ar Dating of the Mesozoic Yaogangxian Tungsten Deposit, Central Nanling District, South China. *Mineralium Deposita*, 41(7): 661—669. doi: 10.1007/s00126-006-0084-4
- Rossman, G.R., Weis, D., Wasserburg, G.J., 1987. Rb, Sr, Nd and Sm Concentrations in Quartz. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51: 2325—2329. doi: 10.1016/0016-7037(87)90286-9
- Shepherd, T.J., Derbyshire, D.P.F., 1981. Fluid Inclusion Rb-Sr Isochrons for Dating Mineral Deposits. *Nature*, 290: 578—579. doi: 10.1038/290578a0
- Sun, J.B., Zhang, L.M., Chen, W., et al., 2013. Quartz Rb-Sr Isotopic Dating of Hongshi Gold Deposit in East Tianshan Mountains. *Geological Review*, 59(2): 383—388 (in Chinese with English abstract).
- Wu, G.Y., Pan, Z.F., Li, J.D., et al., 2005. Geological and Geochemical Characteristics of the Dayishan Granitoids in

- Southern Hunan and Their Relations to Mineralization. *Geology in China*, 32(3): 434—442 (in Chinese with English abstract).
- Wu, G. Y., Peng, H. Q., Jia, B. H., 2000. Geological Features and Emplacement Mechanism of the Dayishan Granitic Intrusion in South Hunan. *Geology and Mineral Resources of South China*, (3): 1—7 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, H. Q., Zhao, K. D., Jiang, S. Y., et al., 2003. Lead Isotope Geochemistry and Ore-Forming Age of Jinchuantang Sn-Bi Deposit in Dongpo Ore Field, Hunan Province. *Mineral Deposits*, 22(3): 264—270 (in Chinese with English abstract).
- Yao, J. M., Hua, R. M., Lin, J. F., 2005. Zircon LA-ICPMS U-Pb Dating and Geochemical Characteristics of Huangshaping Granite in Southeast Hunan Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 688—696 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, S. D., Liu, X. F., Wang, X. D., et al., 2012. Geological Characteristics and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Geochronology of the Hongqiling Tin Deposit in Southern Hunan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 28(12): 3787—3797 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, S. D., Peng, J. T., Shen, N. P., et al., 2007. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Isotopic Dating of the Xianghualing Sn-Polymetallic Ore-field in Southern Hunan, China and Its Geological Implications. *Acta Geologica Sinica*, 81(2): 278—286. doi: 10.1111/j.1755-6724.2007.tb00951.x
- Zeng, Z. F., Zeng, Z. X., Zeng, Y. H., et al., 2008. Geological and Geochemical Characteristics and Genesis of the Baishaziling Tin Deposit, Guiyang County, Hunan. *Geology in China*, 35(4): 725—737 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, K. D., Jiang, S. Y., Jiang, Y. H., et al., 2006. SHRIMP U-Pb Dating of the Furong Unit of Qitangling Granite from Southeast Hunan Province and Their Geological Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2611—2616 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, K. D., Jiang, S. Y., Yang, S. Y., et al., 2012. Mineral Chemistry, Trace Elements and Sr-Nd-Hf Isotope Geochemistry and Petrogenesis of Cailing and Furong Granites and Mafic Enclaves from the Qitianling Batholith in the Shi-Hang Zone, South China. *Gondwana Research*, 22: 310—324. doi: 10.1016/j.gr.2011.09.010
- Zhou, H. X., Yang, G. H., Jiang, Z. H., et al., 2005. Geological Characteristics and Origin of the Dayishan Tin Orefield in Nanling Region. *Geology and Mineral Resources of South China*, (2): 87—94 (in Chinese with English abstract).
- stract).
- Zou, X. W., Cui, S., Qu, W. J., et al., 2009. Re-Os Isotope Dating of the Liguifu Tungsten-Tin Polymetallic Deposit in Dupangling Area, Guangxi. *Geology in China*, 36(4): 837—844 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 蔡明海,梁婷,韦可利,等,2006.大厂锡多金属矿田铜坑—长坡92号矿体Rb-Sr测年及其地质意义.华南地质与矿产,(2):31—36.
- 陈庆,徐惠长,何周虎,等,2005.湖南千里山一大义山—九嶷山成矿金三角的控矿意义.华南地质与矿产,(1): 31—36,46.
- 付建明,李华芹,屈文俊,等,2007.湘南九嶷山大坳钨锡矿的Re-Os同位素定年研究.中国地质,34(4):651—656.
- 付建明,徐德明,杨晓君,等,2011.南岭锡矿.武汉:中国地质大学出版社.
- 龚述清,黄革非,胡志科,等,2002.大义山岩体东南部锡矿类型及找矿远景浅析.华南地质与矿产,(1):67—72.
- 华仁民,2005.南岭中生代陆壳重熔型花岗岩类成岩—成矿的时间差及其地质意义.地质论评,51(6):633—639.
- 蒋少涌,赵葵东,姜耀辉,等,2006.华南与花岗岩有关的一种新类型的锡成矿作用:矿物化学、元素和同位素地球化学证据.岩石学报,22(10):2509—2516.
- 李华芹,刘家齐,魏琳,1993.热液矿床流体包裹体年代学研究及其他地质应用.北京:地质出版社,1—27.
- 李华芹,路远发,王登红,等,2006.湖南骑田岭芙蓉矿田成岩成矿时代的厘定及其地质意义.地质论评,52(1): 113—121.
- 李红艳,毛景文,孙亚莉,等,1996.柿竹园钨多金属矿床的Re-Os同位素等时线年龄研究.地质论评,42(3): 261—267.
- 李兆丽,胡瑞忠,彭建堂,等,2006.湖南芙蓉锡矿田流体包裹体的同位素组成及成矿流体来源示踪.地球科学——中国地质大学学报,31(1):129—135.
- 刘善宝,王登红,陈毓川,等,2008.赣南崇义一大余—上犹矿区不同类型含矿石英中白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄及其地质意义.地质学报,82(7):932—940.
- 刘铁生,2002.大义山矿田岩体型锡矿地质特征及矿床成因.中国地质,29(4):411—415.
- 刘晓菲,袁顺达,吴胜华,2012.湖南金船塘锡铋矿床辉钼矿Re-Os同位素测年及其地质意义.岩石学报,28(1): 39—51.
- 刘义茂,戴樟谋,卢焕章,等,1997.千里山花岗岩成岩成矿的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 和Sm-Nd同位素年龄.中国科学(D辑),27(5):425—430.
- 刘耀荣,邝军,马铁球,等,2005.湖南大义山花岗岩南体黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年及地质意义.资源调查与环境,26(4):

- 244—249.
- 路远发,2004.GeoKit:一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包.地球化学,33(5):459—464.
- 马丽艳,路远发,屈文俊,等,2007.湖南黄沙坪铅锌多金属矿床的 Re-Os 同位素等时线年龄及其地质意义,矿床地质,26(4):425—431.
- 马丽艳,路远发,付建明,等,2010.湖南东坡矿田金船塘、红旗岭锡多金属矿床 Rb-Sr、Sm-Nd 同位素年代学研究,华南地质与矿产,(4):23—29.
- 毛景文,1997.超大型钨多金属矿床成矿特殊性——以湖南柿竹园矿床为例.地质科学,32(3):351—363.
- 毛景文,谢桂青,李晓峰,等,2004a.华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展.地学前缘,11(1):45—55.
- 毛景文,李晓峰,Bernd Lehmann,等,2004b.湖南芙蓉锡矿床锡矿石和有关花岗岩的⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄及其地球动力学意义.矿床地质,23(2):164—175.
- 彭和求,伍光英,2000.湘南“大义山式构造”的厘定及地质意义.湖南地质,19(2):87—89.
- 孙敬博,张立明,陈文,等,2013.东天山红石金矿床石英 Rb-Sr 同位素定年.地质论评,59(2):383—388.
- 伍光英,彭和求,贾宝华,2000.湘南大义山岩体地质特征及其侵位机制分析.华南地质与矿产,(3):1—7.
- 伍光英,潘仲芳,李金冬,等,2005.湘南大义山花岗岩地质地球化学特征及其与成矿的关系.中国地质,32(3):434—442.
- 肖红全,赵葵东,蒋少涌,等,2003.湖南东坡矿田金船塘锡铋矿床铅同位素地球化学及成矿年龄.矿床地质,22(3):264—270.
- 姚军明,华仁民,林锦富,2005.湘东南黄沙坪花岗岩 LA-ICPMS 镍石 U-Pb 定年及岩石地球化学特征.岩石学报,21(3):688—696.
- 袁顺达,刘晓菲,王旭东,等,2012.湘南红旗岭锡多金属矿床地质特征及 Ar-Ar 同位素年代学研究.岩石学报,28(12):3787—3797.
- 曾志方,曾佐勋,曾永红,等,2008.湖南桂阳县白沙子岭锡矿床地质地球化学特征及其成因.中国地质,35(4):725—737.
- 赵葵东,蒋少涌,姜耀辉,等,2006.湘南骑田岭岩体芙蓉超单元的镍石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义.岩石学报,22(10):2611—2616.
- 周厚祥,杨贵花,蒋中和,等,2005.大义山锡矿田矿床地质特征及矿床成因.华南地质与矿产,(2):87—94.
- 邹先武,崔森,屈文俊,等,2009.广西都庞岭李贵福钨锡多金属矿 Re-Os 同位素定年研究.中国地质,36(4):837—844.