

湘南新田岭大型钨钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素测年及其地质意义^{*}

袁顺达^{1,2} 张东亮³ 双燕⁴ 杜安道⁵ 屈文俊⁵

YUAN ShunDa^{1,2}, ZHANG DongLiang³, SHUANG Yan⁴, DU AnDao⁵ and QU WenJun⁵

1. 中国地质科学院矿产资源研究所,国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室,北京 100037

2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室,北京 100083

3. 中南大学地学与环境工程学院,长沙 410083

4. 重庆地质矿产研究院,重庆 400042

5. 国家地质测试中心,北京 100037

1. MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

3. School of Geoscience and Environmental Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

4. Chongqing Institute of Geology & Mineral Resources, Chongqing 400042, China

5. National Research Center of Geoanalysis, Beijing 100037, China

2010-01-01 收稿, 2011-02-20 改回.

Yuan SD, Zhang DL, Shuang Y, Du AD and Qu WJ. 2012. Re-Os dating of molybdenite from the Xintianling giant tungsten-molybdenum deposit in southern Hunan Province, China and its geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 28 (1): 27–38

Abstract The Xintianling tungsten deposit is a large-sized skarn and vein-type tungsten-molybdenum polymetallic deposit located in southern Hunan Province, which is genetically associated with the early stage hornblende-biotite monzonitic granite of Qitianling pluton. Direct Re-Os dating on molybdenites collected from the skarn and quartz-vein type ore in the Xintianling deposit have been carried out, to better understand the age of mineralization. The results show that the Re-Os dating of one molybdenite sample collected from skarn-type ore yields a ^{187}Re - ^{187}Os model age of $159.1 \pm 1.9\text{Ma}$, and six molybdenite samples collected from quartz-vein-type ore yield ^{187}Re - ^{187}Os model ages ranging from $159.1 \pm 1.9\text{Ma}$ to $160.2 \pm 2.9\text{Ma}$, with an average of $159.4 \pm 1.3\text{Ma}$, and give an isochron age of $161.7 \pm 9.3\text{Ma}$ (2σ), with an initial ^{187}Os of 0.6 ± 2.3 (MSWD = 0.051). Comparison of the Re-Os ages with published Ar-Ar date ($157.1 \pm 0.3\text{Ma}$) on iron mica and Rb-Sr date ($157.4 \pm 3.2\text{Ma}$) on quartz indicates that the timing of skarnization and tungsten-molybdenum mineralization are identical within error. Therefore, we can constrain the absolute age of tungsten-molybdenum mineralization in the Xintianling deposit at ca. $161.7 \sim 157.1\text{Ma}$. These ages are consistent with the SHRIMP zircon U-Pb ages ($163 \sim 160\text{Ma}$) of the early stage hornblende-biotite monzonitic granite. Based on previous studies, it is suggested that the mineralization of the Xintianling W-Mo deposit is spatially and temporally related to the early stage hornblende-biotite monzonitic granite of Qitianling pluton. While the Furong tin deposit located in southern part of Qitianling pluton may be closely related to the late stage biotite monzonitic granite. The emplacement of the Qitianling A-type granite and associated tungsten-tin polymetallic mineralization is a continuous evolution process, which are the products of large-scale mineralization of the Nanling in Middle-Late Jurassic ($150 \sim 160\text{Ma}$). Under the tectonic setting of Mesozoic lithospheric extension, asthenosphere upwelling along deep fault, intensive mantle-crust interaction processes probably

^{*} 本文受国家自然科学基金项目(40903020, 40930419, 40434011)、中央级公益性科研院所基本业务费专项资金(K1001、K2007-1-12)、国土资源大调查项目(1212010634001)、中国地质大学地质过程与矿产资源重点实验室基金(GPMR200839)和中国博士后科学基金(20080430457)联合资助。

第一作者简介: 袁顺达,男,1980年生,博士,副研究员,矿床地球化学专业, E-mail: sdyuan011981@yahoo.com.cn

provide not only the high heat flow, but also part mantle-derived material for large-scale W-Sn-polymetallic mineralization in this area.

Key words Molybdenite Re-Os isotopic dating; Tungsten-molybdenum-polymetallic deposit; Xintianling; Southern Hunan Province

摘要 新田岭矿床是湘南地区一大型矽卡岩-石英脉型钨钼多金属矿床,在成因上与骑田岭岩体早期侵位的角闪石黑云母二长花岗岩相关。分别对该矿床矽卡岩型和石英脉型矿石内的辉钼矿单矿物进行了 Re-Os 同位素测年,结果显示,矽卡岩型矿石中 1 件辉钼矿的 ^{187}Re - ^{187}Os 模式年龄为 $159.1 \pm 2.6\text{Ma}$,6 件石英脉型矿石中辉钼矿的 ^{187}Re - ^{187}Os 模式年龄为 $159.1 \sim 160.2\text{Ma}$,加权平均值为 $159.4 \pm 1.3\text{Ma}$,对应的等时线年龄为 $161.7 \pm 9.3\text{Ma}$,与已有的矽卡岩内铁云母 Ar-Ar 年龄 ($157.1 \pm 0.3\text{Ma}$) 和石英脉内石英流体包裹体的 Rb-Sr 年龄 ($157.4 \pm 3.2\text{Ma}$) 在误差范围内相吻合,指示新田岭钨钼矿床的成矿时限大致可限定为 $157.1 \sim 161.7\text{Ma}$,表明钨钼矿化与该区骑田岭岩体早期侵位的角闪石黑云母花岗岩 ($160 \sim 163\text{Ma}$) 具有密切的时间关系。结合已有的研究结果认为,新田岭大型钨钼矿床与骑田岭岩体早期侵位的角闪石黑云母二长花岗岩具有密切的时空联系,而南部的芙蓉锡矿与晚期侵位的黑云母二长花岗岩更为密切,整个骑田岭 A 型花岗岩的侵位及相关的钨锡多金属成矿作用应为一个连续的演化过程,均为南岭地区 $150 \sim 160\text{Ma}$ 钨锡多金属爆发式成矿作用的产物。该区在中-晚侏罗世 ($150 \sim 165\text{Ma}$) 岩石圈的伸展减薄背景下,软流圈地幔物质沿着深大断裂上涌,强烈的壳幔相互作用可能为大规模的花岗质岩浆活动及钨锡多金属的成矿大爆发提供了主要的热动力和部分物源。

关键词 辉钼矿 Re-Os 同位素定年;钨钼多金属矿床;新田岭;湘南

中图法分类号 P618.65; P618.67; P597.3

1 引言

湘南钨锡矿集区位于全球规模最大的南岭钨锡多金属成矿带的中段,在构造位置上,处于扬子地块与华夏地块的对接地带,十(万大山)-杭(州)NNE 向具有高 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ -低 t_{DM} 值花岗岩带的中部,是研究华南中生代成岩成矿作用及构造演化的重要场所。骑田岭岩体是该带内出露较大的花岗岩基,出露面积约 520km^2 。长期以来许多学者对其进行过大量的研究,积累了大量同位素年代学数据,早期数据显示该花岗岩体形成时代变化范围较大,从印支期到燕山晚期都有活动 ($225 \sim 118\text{Ma}$,转引自黄革非,1992)。近年来,随着岩体南部芙蓉超大型锡矿床的发现,有关骑田岭岩体的成岩成矿作用引起了人们的广泛关注。最新的高精度锆石 U-Pb 年龄和云母 Ar-Ar 年龄显示,骑田岭主岩体各个单元均形成于 $153 \sim 163\text{Ma}$ (黄革非,1992;郑基俭和贾宝华,2001;朱金初等,2003,2005,2009;付建明等,2004;赵葵东等,2006),岩石类型应属于铝质 A 型(或 A_2 亚型)花岗岩,为同源岩浆在不同演化阶段的产物(朱金初等,2003,2005a,2008;柏道远等,2005;蒋少涌等,2008;毕献武等,2008)。在成矿作用时限方面,尽管许多学者对新近发现的芙蓉锡矿进行了大量的同位素测年工作,但由于采用的测试对象和测试方法的差异,所获的年龄数据分布范围较宽,为 $133 \sim 177\text{Ma}$ (王登红等,2003;Mao *et al.*, 2004;李华芹等,2006;彭建堂等,2007)。目前,对该区花岗岩成岩、成矿关系仍存在较大分歧:一部分学者认为,该区钨锡多金属成矿与中晚侏罗世花岗岩具有密切的时空关系,成矿作用与花岗岩的成岩作用近于同时或稍晚于成岩作用(毛景文等,2004,2007;彭建堂等,2007);而另外一些学者则认为,钨锡多金属成矿作用明显晚于花岗岩的成岩作用(华仁民,2005;李华芹等,2006;蒋少涌等,2006;Hua

and Yao, 2006)。此外,有关骑田岭 A 型花岗岩是否能分异出富锡成矿流体仍有不同看法(Zhao *et al.*, 2005;蒋少涌等,2006;双燕,2006,2009a, b;李鸿莉等,2007;Yuan *et al.*, 2008a, 2011;毕献武等,2008)。因而,高精度成矿年龄的直接获取是正确理解该区区域成岩成矿作用的关键之一。

与骑田岭岩体南部芙蓉锡矿田相对应,新田岭钨钼矿床位于骑田岭岩体的北东部位,是该区一大型矽卡岩-石英脉型钨钼矿床,其钨储量仅次于柿竹园钨矿,目前已探明钨矿资源储量达 32.047 万吨, WO_3 平均品位约为 0.4%,钨钼矿石储量超过 1 亿吨,同时伴有 Bi-Pb-Fe-Sn 矿化,是我国重要的钨矿资源储备基地。在空间上,新田岭钨钼矿床与骑田岭岩体第一阶段的角闪石黑云母二长花岗岩密切相关,是研究骑田岭 A 型花岗岩成岩成矿作用的重要对象之一。然而,自 20 世纪 80 年代初由湖南地矿局 408 地质队发现以来,一直未有大规模的开采,有关新田岭钨矿的研究工作还很少,尤其是缺乏直接的成矿年龄数据。因而精确测定新田岭大型钨钼矿床的成矿时代,查明新田岭钨钼矿床与骑田岭早阶段角闪石黑云母二长花岗岩的时、空及成因联系,对深入认识骑田岭 A 型花岗岩成岩成矿演化过程具有重要意义。

相对于利用蚀变岩石或蚀变矿物的同位素年龄间接指示成矿年龄,利用金属矿物进行同位素测年可以直接获取成矿年龄,并随着分析测试技术的发展正逐渐成为成矿年代学研究的趋势(Peng *et al.*, 2003;Yuan *et al.*, 2008b;张长青等,2008)。目前,辉钼矿 Re-Os 同位素测年体系被认为是较为成熟的金属矿物测年手段,已广泛应用于国内外各类矿床成矿时限的研究(Stein *et al.*, 1997;Mao *et al.*, 2003, 2006, 2008;Xie *et al.*, 2007;谢桂青等,2009;刘晓菲等,2012)。本研究通过对新田岭矽卡岩-石英脉型钨钼矿床辉钼矿单矿物 Re-Os 同位素测年,试图在精确厘定其成矿时限的基础上,进一步讨论该区花岗岩与钨锡多金属成矿作用关系。

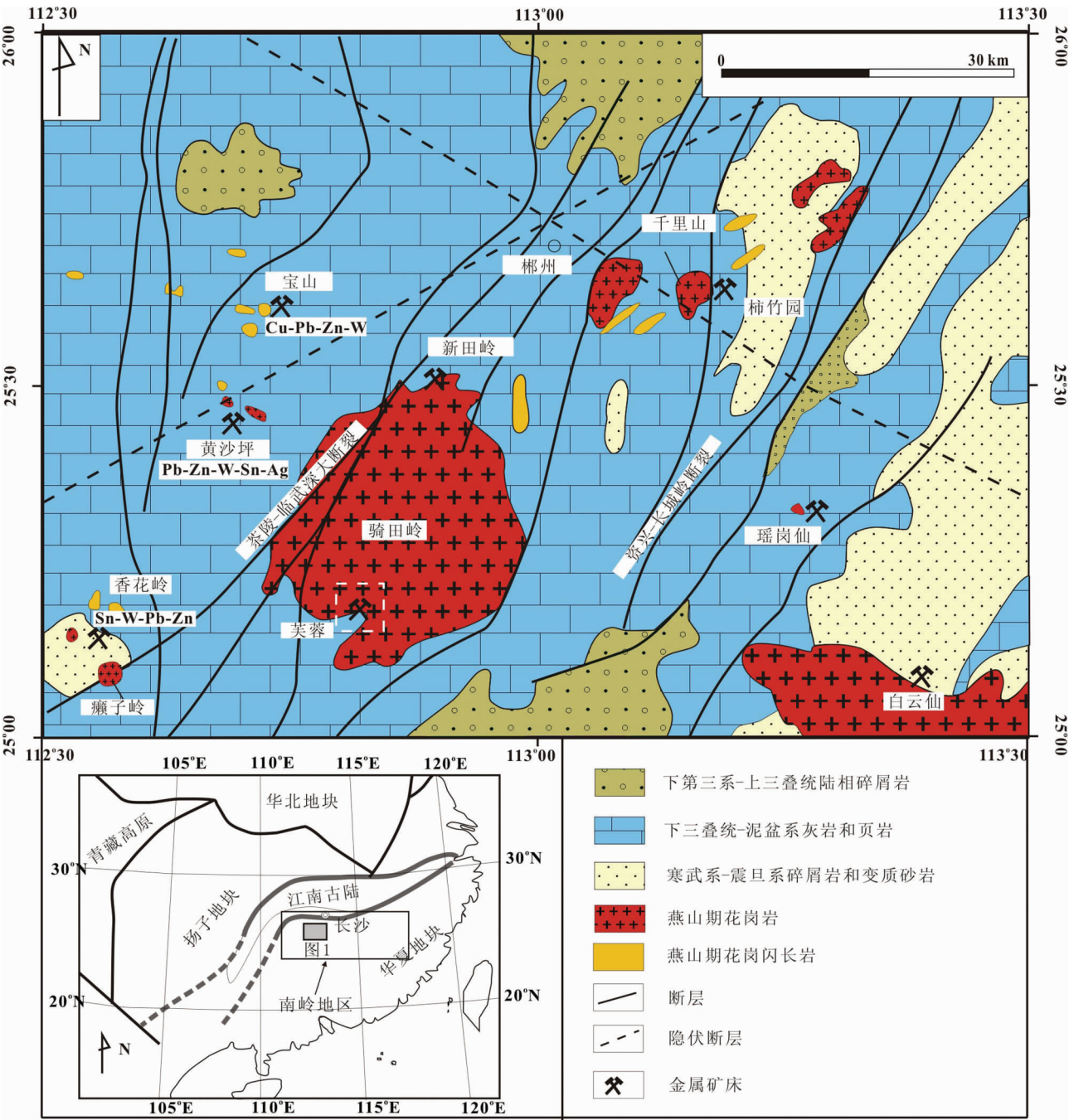


图1 湘南千里山-骑田岭一带地质矿产简图(据 Peng *et al.* , 2006 修改)
Fig.1 Sketch map of nonferrous metal deposits in the Qianlishan-Qitianling district, southern Hunan (modified after Peng *et al.* , 2006)

2 区域地质及矿床地质特征

骑田岭复式岩体在构造位置上位于扬子地块与华夏地块的对接地带(图1),处于炎陵-郴州-蓝山 NE 向基底构造岩岩带和郴州-邵阳 NW 向构造岩岩带的结合部位,岩石类型主要包含第一阶段的角闪石黑云母二长花岗岩、第二

阶段的黑云母二长花岗岩以及第三阶段的细粒(斑状)黑云母花岗岩(朱金初等,2005a,2009;毕献武等,2008,图2)。岩体南部发育超大型芙蓉锡矿田,而新田岭大型钨钼矿床位于岩体东北部与石炭系灰岩的接触部位(图1)。新田岭矿区面积约为15km²,区内出露的地层自下而上依次为下石炭统孟公坳组、石磴子组、测水组、梓门桥组和中石炭统的壶天群。其中,孟公坳组为一套白云质灰岩夹砂页岩;石磴子组

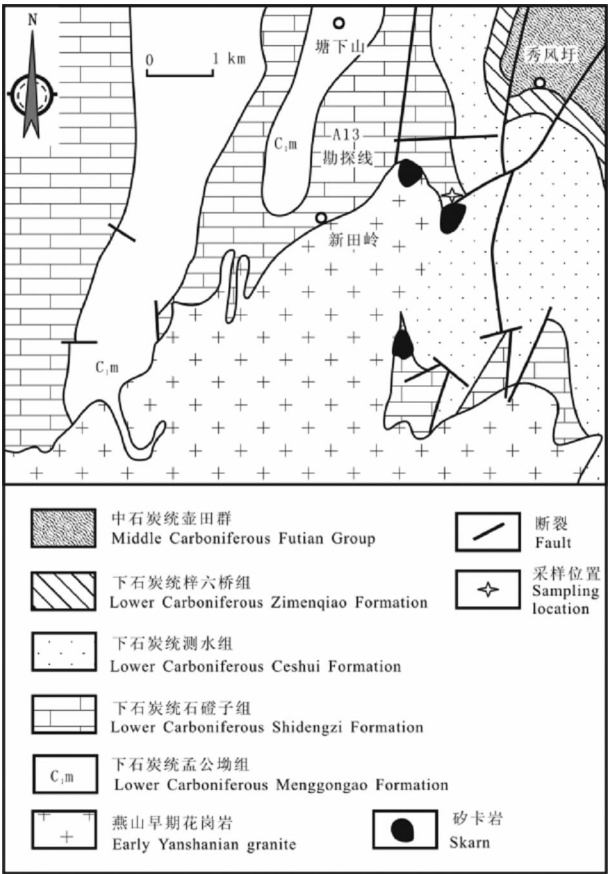


图3 新田岭白钨矿床地质略图(据蔡明海等,2008 修改)
Fig.3 Sketch geological map of the Xintianling scheelite deposit (modified after Cai *et al.* , 2008)

大小矿体 80 个,其中,内接触带 47 个,外接触带 33 个。内接触带矿体规模较大,构成了白钨矿主矿体,占全矿区总储量的 90% 以上;而外接触带矿体分布零星,厚度小,品位也低,

主要受层间裂隙和层间破碎带控制(殷顺生和王昌烈,1994)。各类矿体呈似层状、透镜状、眼球状、大扁豆状、囊状及不规则板状产出。主要矿石类型为矽卡岩型钨钼矿石和石英脉型钨钼矿石(图 4),在矽卡岩矿石裂隙内部可见到石英脉型矿石充填。主要的金属矿物为白钨矿和辉钼矿、少量辉铋矿、方铅矿、闪锌矿、磁黄铁矿、黄铁矿、黄铜矿及毒砂等;主要的脉石矿物有石榴石、次透辉石、符山石、阳起石、铁云母、绿泥石、石英及少量方解石、萤石和绿帘石等。矿石结构以自形-半自形粒状结构、他形粒状结构为主,次为交代作用形成的溶蚀、残余结构;矿石构造以浸染状为主,次为块状、斑杂状和脉状等。主要的围岩蚀变有矽卡岩化、云英岩化和大理岩化,其次为角岩化、硅化、绢云母化、绿帘石化及绿泥石化等,其中以矽卡岩化与矿化最为密切。

3 样品采集与分析

本次用于 Re-Os 同位素分析的 1 件矽卡岩矿石(XTL-XF-8)和 6 件石英脉型矿石(XTL-1,4,5,XTL-XF-1,3,5)均采自新田岭钨钼矿秀峰矿区(图 3)。其中,矽卡岩型矿石的主要矿石矿物为辉钼矿和白钨矿,脉石矿物主要为石榴石,其次有次透辉石及铁云母等,辉钼矿呈浸染状分布于矽卡岩型矿石内;石英脉型矿石的主要金属矿物为辉钼矿,少量黄铁矿及其他硫化物,脉石矿物为石英,辉钼矿呈浸染状分布于石英脉内。两类矿石中的辉钼矿均为钢灰色细鳞片状集合体(图 4)。样品经粉碎至 60 ~ 80 目,在双目镜下分选至纯度达 99% 以上,并用玛瑙钵研磨至 200 目,用于 Re-Os 同位素分析。

Re-Os 同位素分析测试工作在国家地质测试中心 Re-Os 同位素实验室完成,采用 Carius 管封闭溶样分解样品,Re-Os 同位素分析原理及详细分析流程参照 Shirey and Walker (1995)和 Du *et al.* (2004),现简述如下:

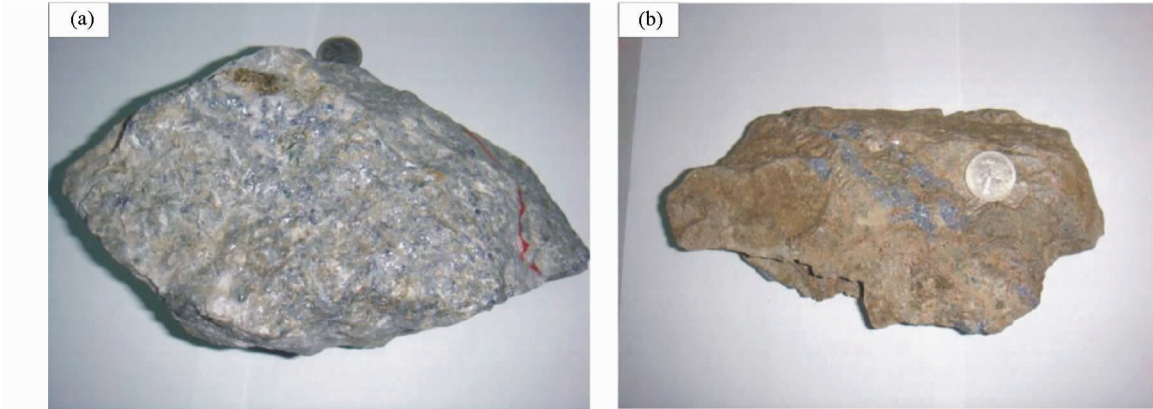


图4 新田岭钨钼矿床主要矿石类型
(a)-石英脉型矿石;(b)-矽卡岩型矿石

Fig.4 Photographs of main type ores from the Xintianling tungsten-molybdenum deposit
(a)-quartz vein ore; (b)-skarn-type ore

准确称取待测样品,通过长细颈漏斗加入到 Carius 管底部,将装好样的 Carius 管置于装有乙醇的保温瓶内,调节温度至 $-50 \sim -80^{\circ}\text{C}$ 。通过长细颈漏斗把称好的 ^{185}Re 和 ^{190}Os 混合稀释剂加入 Carius 管底部,再加入 2mL 10mol/L HCl, 4mL 16mol/L HNO_3 。待管底溶液冰冻后,用丙烷氧气火焰加热封好 Carius 管的细颈部位。置于不锈钢套管内,并将套管轻放入鼓风烘箱内,待回到室温后,逐渐升温到 200°C ,并保温 24h。在底部冷冻的情况下,打开 Carius 管,并用 40mL 水将管中溶液转入蒸馏瓶中。

将蒸馏瓶置于电热板上微沸蒸馏 50min,用 5mL 水吸收蒸出的 OsO_4 ,用于 ICP-MS 测定 Os 同位素比值。将蒸馏残液倒入 150mL Teflon 烧杯中待分离 Re。

将上述蒸馏残液置于电热板上,加热近干,加少量水,加热近干。重复两次以降低酸度。加入 10mL 5mol/L NaOH,稍微加热,转为碱性介质。转入 50mL 聚丙烯离心管内离心,取上清液转入 120mL Teflon 分液漏斗中,加入 10mL 丙酮,振荡 1min 萃取 Re。静止分相,弃去水相,排丙酮到 150mL 已加有 2mL 水的 Teflon 烧杯中。将烧杯置于电热板上 50°C 加热以蒸发丙酮,加热溶液至干。再加入数滴浓硝酸和 30% 过氧化氢,加热蒸干以除去残存的 Os。用数毫升稀 HNO_3 溶解残渣,并稀释至硝酸浓度为 2%,备 ICP-MS 测定 Re 同位素比值。

采用美国 TJA 公司生产的 TJA X-series 电感耦合等离子体质谱仪(美国 Thermo 公司)测定同位素比值。对于 Re,选择质量数 185、187,用 190 监测 Os;对于 Os,选择质量数为 186、187、188、189、190、192,用 185 监测 Re。TJA X-series ICP-MS 测得的 Re、Os 和 ^{187}Os 的空白值分别为 $(0.0092 \pm 0.0013) \times 10^{-9} \sim (0.0409 \pm 0.0018) \times 10^{-9}$ 、 $(0.0002 \pm 0.0000) \times 10^{-9} \sim (0.0000 \pm 0.0000) \times 10^{-9}$ 和 $(0.0001 \pm 0.0000) \times 10^{-9} \sim (0.0003 \pm 0.0001) \times 10^{-9}$ 。远小于所测样品和标样中 Re、Os 含量,因此不会影响实验结果。辉钼矿 Re-Os 定年实验误差为 2σ ,普 Os 是根据原子量表(Wieser, 2006)和同位素丰度表(Bohlkea, 2005),通过 $^{192}\text{Re}/^{190}\text{Os}$ 测量比计算得出(Bohlkea, 2005; Wieser, 2006)。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。模式年龄的不确定度还包括衰变常数的不确定度(1.02%),置信度为 95%。实验采用国家标准物质 GBW04436(JDC)为标样,监控化学流程和分析数据的可靠性,两次分析标样(JDC) Re 和 ^{187}Os 及模式年龄与标准值在误差范围内完全一致(表 1),表明所获辉钼矿的 Re-Os 数据准确可靠。

4 结果

新田岭钨钼矿床 1 件矽卡岩型矿石和 6 件石英脉型矿石内辉钼矿的 Re-Os 测试结果列于表 2,矽卡岩型矿石中辉

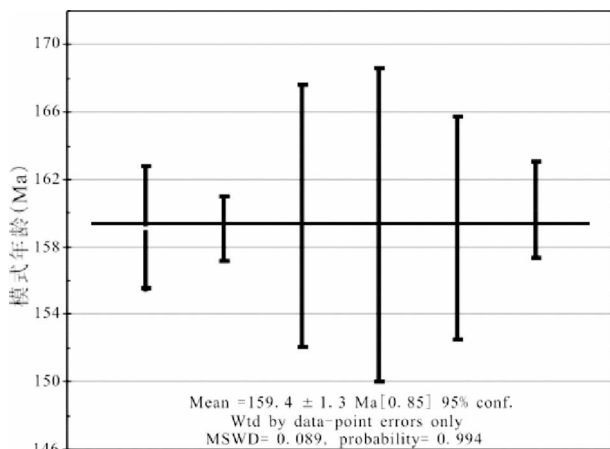


图 5 湘南新田岭钨钼矿床辉钼矿 ^{187}Re - ^{187}Os 年龄加权平均图

Fig. 5 Weighted average of ^{187}Re - ^{187}Os model age of molybdenites from the Xintianling tungsten-molybdenum deposit in southern Hunan Province

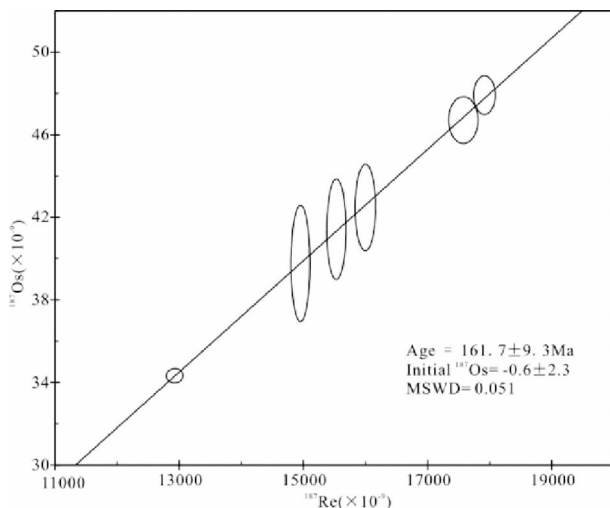


图 6 湘南新田岭钨钼矿床辉钼矿 Re-Os 等时线年龄

Fig. 6 Re-Os isochron of molybdenites from the Xintianling tungsten-molybdenum deposit in southern Hunan Province

钼矿 Re 含量为 $(34.69 \pm 0.29) \times 10^{-6}$,略高于石英脉型矿石中辉钼矿的 Re 含量;6 件石英脉中辉钼矿的 Re 含量变化范围为 $(20.56 \pm 0.17) \times 10^{-6} \sim (28.52 \pm 0.23) \times 10^{-6}$; Re 与 ^{187}Os 含量变化协调,给出的 1 件矽卡岩型矿石中辉钼矿模式年龄为 $159.0 \pm 2.6 \text{ Ma}$,6 件石英脉型矿石中辉钼矿 Re-Os 模式年龄为 $159.1 \pm 1.9 \text{ Ma} \sim 160.2 \pm 2.9 \text{ Ma}$ 之间,加权平均值为 $159.4 \pm 1.3 \text{ Ma}$,MSWD = 0.089(图 5)。采用 ISOPLLOT 软件(Smoliar *et al.*, 1996)对 6 件石英脉型辉钼矿数据进行等时线拟合,获得 Re-Os 等时线年龄为 $161.7 \pm 9.3 \text{ Ma}$,MSWD = 0.103(图 6)。

表 1 标样金堆城(JDC)辉钼矿的 Re-Os 测试结果及标准值*

Table 1 Certificated values and analytical data of Re-Os isotopes for standard sample JDC

编号	原样名	样重(g)	Re(× 10 ⁻⁶)	¹⁸⁷ Os(× 10 ⁻⁹)	<i>t</i> (Ma)
090615-19	GBW04436(JDC)	0. 1009	17. 17 ± 0. 14	25. 25 ± 0. 21	140. 2 ± 2. 0
090625-19	GBW04436(JDC)	0. 10018	17. 32 ± 0. 15	25. 30 ± 0. 23	139. 3 ± 2. 1
	GBW04436(JDC)		17. 39 ± 0. 32 *	25. 46 ± 0. 60 *	139. 6 ± 3. 8 *

注: * 为推荐值(据 Du *et al.* , 2004)

表 2 新田岭钨矿辉钼矿 Re-Os 同位素测试结果

Table 2 Re-Os isotopic data of molybdenites from the Xintianling tungsten deposit

样品号	样重(g)	Re ± 2σ (× 10 ⁻⁶)	普 Os ± 2σ (× 10 ⁻⁹)	¹⁸⁷ Re ± 2σ (× 10 ⁻⁶)	¹⁸⁷ Os ± 2σ (× 10 ⁻⁹)	扣初始 ¹⁸⁷ Os 之后 ¹⁸⁷ Os ± 2σ(× 10 ⁻⁹)	模式年龄 (Ma) *
XTL-XF-5	0. 03022	27. 98 ± 0. 31	0. 9742 ± 0. 0384	17. 58 ± 0. 20	47. 12 ± 0. 45	46. 70 ± 0. 92	159. 2 ± 3. 6
XTL-1	0. 05032	20. 56 ± 0. 17	0. 0484 ± 0. 0247	12. 92 ± 0. 11	34. 31 ± 0. 28	34. 29 ± 0. 29	159. 1 ± 1. 9
XTL-XF-3	0. 05037	24. 71 ± 0. 20	2. 373 ± 0. 0440	15. 53 ± 0. 13	42. 44 ± 0. 37	41. 42 ± 1. 99	159. 8 ± 7. 8
XTL-4	0. 05117	23. 79 ± 0. 20	2. 760 ± 0. 0540	14. 95 ± 0. 12	40. 94 ± 0. 33	39. 74 ± 2. 30	159. 3 ± 9. 7
XTL-XF-1	0. 05149	25. 46 ± 0. 22	2. 050 ± 0. 0580	16. 00 ± 0. 14	43. 36 ± 0. 36	42. 47 ± 1. 73	159. 1 ± 6. 6
XTL-5	0. 05193	28. 52 ± 0. 23	0. 8022 ± 0. 0322	17. 93 ± 0. 14	48. 26 ± 0. 39	47. 91 ± 0. 77	160. 2 ± 2. 9
XTL-XF-8	0. 05149	34. 69 ± 0. 29	0. 8191 ± 0. 0405	21. 80 ± 0. 18	58. 18 ± 0. 47	57. 83 ± 0. 83	159. 0 ± 2. 6

注:Re-Os 模式年龄计算公式为 $t = [\ln (1 + ^{187}\text{Os}/^{187}\text{Re})] / \lambda$, 其中 $\lambda(^{187}\text{Re}$ 衰变常数) = $1.666 \times 10^{-11} / \text{a}$ (Smoliar *et al.* , 1996). * 扣除初始非放射成因¹⁸⁷Os 后所计算的模式年龄

5 讨论

5.1 成矿时代

已有的研究显示,一些粗颗粒的(尤其是年龄较老的)辉钼矿由于 Re 和¹⁸⁷Os 在辉钼矿单个晶体的亚晶粒范围内会出现失耦现象(decoupling),而不能获得准确且重现性好的 Re-Os 年龄(Stein *et al.* , 2001;杜安道等,2007)。但大多数情况下,通过增大取样量,将辉钼矿颗粒研磨到 0.1mm 以下使其均匀可以有效地消除失耦现象对准确定年的影响,而由多个样品获取的等时线年龄可以较为准确的代表其形成时代(杜安道等,2007)。通常情况下钨钼矿床中的辉钼矿的 Re 含量较低,容易发生失耦现象(杜安道等,2007),但从分析结果可以看出,本次分析的矽卡岩型矿石和石英脉型矿石中的辉钼矿的 Re 含量并不低($n \times 10^{-5}$)。尽管由于样品间的 Re 含量变化较小,使得 6 件石英脉型矿石辉钼矿拟合的 Re-Os 等时线年龄误差稍大,但等时线年龄与所获 Re-Os 模式年龄及其加权平均值在误差范围内几乎一致,表明未发生明显的辉钼矿失耦现象,相比较误差稍大的等时线年龄,其模式年龄的加权平均值(159.4 ± 1.1Ma)更加可靠地代表了矿床的形成年龄。对比已有的研究结果,本次获得的辉钼矿 Re-Os 年龄明显要大于蚀变岩石获得的 K-Ar 年龄(142.57 ~ 149.38Ma,毕承思等,1988),而与矽卡岩退化蚀变阶段的铁云母 Ar-Ar 年龄(157.1 ± 0.3Ma,Mao *et al.* , 2004)及石英脉型矿石中石英的 Rb-Sr 等时线年龄(157.4 ± 3.2Ma,蔡明海等,2008)在误差范围内一致或稍老,这可能与辉钼矿 Re-Os

同位素体系封闭温度(~ 500℃, Suzuki *et al.* , 1996)较高有关,亦与 Mao *et al.* (1999)和 Stein *et al.* (1997)认为辉钼矿 Re-Os 年龄通常稍老于其他同位素体系测定的与成矿有关的蚀变岩石和脉状物所得年龄的观点相一致。因此,本次辉钼矿的 Re-Os 年龄可以很好的代表该矿床的形成年龄,结合已有的铁云母 Ar-Ar 年龄及石英流体包裹体的 Rb-Sr 年龄,新田岭钨钼矿床的成矿时限大致可限定为 157.1 ~ 161.7Ma。

5.2 成岩成矿关系讨论

自毕承思等(1992)最先在国内报道了与 A 型花岗岩有关的钨锡矿床以来,与 A 型花岗岩有关的钨锡多金属成矿作用引起了人们的广泛关注(毕承思等,1992;蒋少涌等,2006;毕献武等,2008)。然而,相对于传统的与 S 型花岗岩有关的钨锡矿床而言,其研究程度还很低。骑田岭岩体与新田岭大型矽卡岩-石英脉型钨钼矿床及新近发现的芙蓉超大型锡矿田均具有密切的空间关系,因而被认为是研究 A 型花岗岩与钨锡多金属成矿作用的典型代表。近年来,有关骑田岭花岗岩期次的划分,成岩成矿作用的研究已取得了一系列重要成果。黄革非(1992)、郑基俭和贾宝华(2001)从岩石学和年代学角度将骑田岭岩体主体相分为菜岭单元(斑状角闪石-黑云母二长花岗岩)、芙蓉单元(中粒角闪石-黑云母二长花岗岩)和荒滩岭单元(细粒二云母花岗岩)。Zhao *et al.* (2005)对角闪石黑云母二长花岗岩的矿物化学研究得出,该区的角闪石黑云母二长花岗岩具有较高的氧逸度,其演化过程中锡以 Sn⁴⁺ 的形式进入硅酸盐熔体相,而不能分异出富含锡的成矿流体。此后,李鸿莉等(2007)、毕献武等(2008)

以及双燕等(2006, 2009a, b)通过对不同期次花岗岩和各类矿床的矿物化学、元素地球化学、流体包裹体地球化学的研究认为,晚期黑云母二长花岗岩为锡成矿作用提供了主要的成矿流体。

最近,朱金初等(2005a, 2009)根据花岗岩的空间接触关系、岩石地球化学资料以及同位素年龄数据,将骑田岭复式岩体大致划分为3个阶段侵位:第一阶段侵位于163~160Ma,峰值在161Ma左右,岩性主要为角闪石黑云母二长花岗岩,少量黑云母二长花岗岩,大致与以往的菜岭单元相一致,但其范围从岩体东侧扩大到东部、北部和西部;第二阶段侵位于157~153Ma,峰值在157~156Ma,岩性主要为黑云母二长花岗岩,少量含角闪石黑云母二长花岗岩,相当于以往的芙蓉单元,主要分布在岩体中部和南部;第三阶段侵位于150~146Ma,峰值为149Ma左右,岩性主要为细粒(含斑)黑云母花岗岩,分布在岩体中南部,对应于荒滩岭单元(图2)。其中,前两阶段为岩体主体相,第三阶段为补体相。根据新的划分,以往认为与芙蓉超单元花岗岩相关的新田岭钨钼矿床(蔡明海等, 2008)实际上与早期侵位的角闪石黑云母二长花岗岩具有密切的空间关系。

在成矿年代学方面,王登红等(2003)首先获得芙蓉锡矿田白腊水10号矿脉强绿泥石化似斑状花岗岩的Rb-Sr等时线年龄为136Ma;此后,李华芹等(2006)通过蚀变花岗岩Rb-Sr同位素测年、蚀变花岗岩型矿脉矿石Rb-Sr同位素测年认为,白腊水锡矿的成矿年龄应为133~141Ma,与骑田岭岩体主体侵入岩浆活动无直接关系。然而,已有的研究认为,花岗岩蚀变发生锡矿化时,其成矿体系往往处于一种开放状态,会发生严重的 ^{87}Sr 丢失,从而导致所获Rb-Sr同位素年龄较真实年龄偏低(Walraven *et al.*, 1990; 彭建堂等, 2007)。而云母类矿物阶段释热Ar-Ar测年方法可以较好地反映矿物的形成年龄,是一种有效获取间接成矿年龄的手段。Mao *et al.* (2004)和彭建堂等(2007)利用黑云母、金云母和角闪石Ar-Ar测年方法限定了芙蓉锡矿的成矿时限为150~160Ma,与骑田岭岩体晚阶段黑云母二长花岗岩形成时限(153~157Ma)一致。本文通过骑田岭北东部新田岭钨钼矿床辉钼矿Re-Os同位素测年,获取了与骑田岭岩体有关矿床的直接成矿年龄,1件砂卡岩型矿石辉钼矿的模式年龄(159.0 \pm 2.6Ma)与6件石英脉型矿石辉钼矿模式年龄的加权平均值(159.4 \pm 1.1Ma)及等时线年龄(161.7 \pm 9.3Ma)在误差范围内一致,与已有的铁云母Ar-Ar年龄和石英流体包裹体Rb-Sr年龄在误差范围内接近或稍老,鉴于所测矿物和同位素体系的差异,新田岭钨钼矿床的砂卡岩化蚀变及钨钼成矿时限大致可限定为157.1~161.7Ma,与早期角闪石黑云母花岗岩的侵位年龄(163~160Ma)相一致,可能稍早于晚阶段黑云母二长花岗岩及芙蓉锡矿的成矿作用。综合上述研究可以得出,新田岭砂卡岩-石英脉型钨钼矿床可能与骑田岭岩体早期阶段的角闪石黑云母二长花岗岩具有密切的时、空关系,而芙蓉锡矿的成矿作用与晚阶段的黑云母二

长花岗岩关系更为密切,整个骑田岭A型花岗岩及相关的钨锡多金属成矿作用应为一个连续的演化过程。

通过与区域上其他钨锡矿床对比显示,湘南地区主要的钨锡矿床均形成于150~160Ma,如李红艳等(1996)获得柿竹园钨多金属矿床的Re-Os等时线年龄为151.0 \pm 3.5Ma; Peng *et al.* (2006)获得瑶岗仙钨矿的辉钼矿Re-Os等时线年龄为154.9 \pm 2.6Ma; Yuan *et al.* (2007, 2008)获得香花岭锡矿田的白云母Ar-Ar年龄为154.4~161.3Ma,锡石U-Pb年龄为156~157Ma;姚军明等(2007)获得黄沙坪铅锌钨矿的辉钼矿Re-Os年龄为154Ma。最近,毛景文等(2004, 2007, 2009)和彭建堂等(2008)对整个南岭钨锡成矿省的总结发现,尽管该区分布有不同时代的钨锡多金属矿床,如荷花坪锡矿Re-Os等时线年龄为224.9 \pm 1.9Ma(蔡明海等, 2006),界牌岭锡矿与成矿有关的黑云母Ar-Ar年龄为91.1 \pm 1.1Ma(毛景文等, 2007),但钨锡多金属成矿作用主要集中于150~160Ma,与相应的花岗岩具有密切的时间关系,具有爆发式成岩成矿作用的特点(华仁民等, 1999)。

5.3 壳幔相互作用对成岩成矿的响应

近年来华南地区花岗岩研究的一项重要成果即是识别出了一系列NE-NNE向具有高 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ -低 t_{DM} 值的花岗岩带(Gilder *et al.*, 1996; Hong *et al.*, 1998),湘南钨锡多金属成矿带正好位于这样的花岗岩带内。赵振华等(2000)对千里山花岗岩的岩石化学、微量元素及Nd-Pb-Sr-O同位素的研究得出,该岩体应为铝质碱性花岗岩,壳幔相互作用对花岗岩及柿竹园超大型矿床的形成具有重要贡献。此后,朱金初等(2003, 2005b)对该区骑田岭岩体和牛庙花岗岩的研究认为,该区与钨锡成矿有关的花岗岩具有壳幔混合来源。Li *et al.* (2006)对芙蓉锡矿田硫化物的He同位素研究认为,幔源物质参与了该区的成矿作用。Wu *et al.* (2007)对柿竹园超大型矿床的He同位素研究亦认为成矿流体为壳幔混合来源。最近,蔡明海等(2008)对新田岭矿床的一件黄铁矿稀有气体同位素分析也显示其具有壳幔混合的特点。Mao *et al.* (1999, 2003)和Stein *et al.* (2001)通过对比不同类型矿床中辉钼矿Re含量的变化,发现从幔源、壳幔混源到壳源,其辉钼矿的Re含量变化规律为 $n \times 10^{-4} \rightarrow n \times 10^{-5} \rightarrow n \times 10^{-6}$,即呈数量级下降。本次研究的新田岭矿床辉钼矿的Re含量应落于壳幔混源的范围内,具有壳幔混合来源,这与蔡明海等(2008)根据稀有气体同位素组成显示的壳幔混源特征相吻合。综上所述,壳幔相互作用可能对该区中-晚侏罗世大规模的花岗岩浆活动及钨锡多金属的爆发式成矿作用具有重要贡献,地幔不仅为成岩成矿提供了主要的热动力,而且为成岩成矿贡献了部分幔源物质。

5.4 成矿构造背景初探

南岭地区作为华南大花岗岩省的重要组成部分,发育了一系列世界级钨锡矿床,成岩成矿作用主要集中于150~

160Ma,被称之为成岩成矿的大爆发(华仁民等,1999),其形成的构造背景一直是人们关注的焦点,许多学者从不同角度对其构造背景进行了研究。郑基伦和贾宝华(2001)、朱金初等(2003, 2005a, 2008)、马铁球等(2006)及 Chen *et al.* (2008) 的研究认为该区中-晚侏罗世大规模的花岗岩浆活动形成于后造山伸展背景。而毛景文等(2007)、蒋少涌等(2008)、Jiang *et al.* (2008)及 Mao *et al.* (2011) 认为,该区 NE 向的花岗岩及相关钨锡多金属矿床的空间分布格局与印支造山带的近 EW 走向不同而与古太平洋板块俯冲缝合线走向一致,应与古太平洋板块向西俯冲有关,可能是一条 NE 向的弧后或弧内伸展带。Li and Li (2007) 提出水平俯冲过程中在该区发生的岩石圈的断裂拆离,导致中-晚侏罗世大规模的板内岩浆活动。最近,毛景文等(2008)提出,该区中-晚侏罗世爆发式钨锡多金属成矿作用可能与 Izanagi 板块俯冲过程中板块出现大面积撕裂或开天窗,导致地幔物质直接上涌到地壳发生强烈壳幔相互作用的结果。尽管该区中-晚侏罗世大规模的成岩成矿作用的地球动力学背景仍存在较大争论,但此时的岩石圈伸展作用已经被普遍认同,该区大规模的花岗岩浆活动及钨锡多金属爆发式成矿作用可能是在这一岩石圈伸展体制下,软流圈地幔不断上涌发生强烈的壳幔相互作用的结果。

6 结论

(1) 新田岭特大型钨钼多金属矿床成矿时限大致为 $157.1 \pm 0.3 \text{ Ma} \sim 161.7 \pm 9.3 \text{ Ma}$ 。

(2) 该矿床与骑田岭岩体早期阶段的角闪石黑云母花岗岩具有密切的时、空关系,而岩体南部的芙蓉超大型锡矿可能与晚阶段的黑云母花岗岩更为密切;整个骑田岭 A 型花岗岩的侵位及相关的钨锡多金属成矿作用应为一个连续的演化过程,均为南岭地区中-晚侏罗世(150 ~ 160Ma)大规模成岩成矿作用的产物。

(3) 南岭地区大规模的花岗岩浆活动及钨锡多金属爆发式成矿作用可能是该区在中-晚侏罗世岩石圈伸展体制下,软流圈地幔沿深大断裂不断上涌发生强烈的壳幔相互作用的结果,地幔不仅为成岩成矿提供了主要的热动力,而且为成岩成矿贡献了部分幔源物质。

References

Bai DY, Chen JC, Ma TQ and Wang XH. 2005. Geochemical characteristics and tectonic setting of Qitianling A-type granitic pluton in southeast Hunan. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 24(4): 255–272 (in Chinese with English abstract)

Bi CS, Wu JS Wang MY and Ai SZ. 1988. Stable isotope geology of the Xintianling scheelite deposit. *Mineral Deposits*, 7(2): 39–48 (in Chinese with English abstract)

Bi CS, Shen XY and Xu QS. 1992. The first discovery of a tin deposit related to Hercynian A-type granites in China. *Science in China*

(Series B), 6: 632–638 (in Chinese)

Bi XW, Li HL, Shuang Y, Hu XY, Hu RZ and Peng JT. 2008. Geochemical characteristics of fluid inclusions from Qitianling A-type granite, Hunan Province, China. *Geological Journal of China Universities*, 14(4): 539–548 (in Chinese with English abstract)

Bohler JK, Laeter JR, Bievre PD, Peiser HS, Rosman KJR and Taylor PDP. 2005. Isotopic compositions of the elements. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 34(1): 57–67

Cai MH, Chen KX, Qu WJ, Liu GQ, Fu JM and Yin JP. 2006. Geological characteristics and Re-Os dating of molybdenites in Hehuaping tin-polymetallic deposit, southern Hunan Province. *Mineral Deposits*, 25(3): 263–268 (in Chinese with English abstract)

Cai MH, Han FB, He LQ, Liu GQ, Chen KX and Fu JM. 2008. He, Ar isotope characteristics and Rb-Sr dating of the Xintianling skarn scheelite deposit in southern Hunan, China. *Acta Geoscientia Sinica*, 29(2): 167–173 (in Chinese with English abstract)

Chen CH, Lee CY and Shinjo. 2008. Was there Jurassic paleo-Pacific subduction in South China? Constraints from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating, elemental and Sr-Nd-Pb isotopic geochemistry of the Mesozoic basalts. *Lithos*, 106: 83–92

Du AD, Wu SQ, Sun DZ, Wang SX, Qu WJ, Markey R, Stein H, Morgan J and Malinovsky D. 2004. Preparation and certification of Re-Os dating reference materials; Molybdenite HLP and JDC. *Geostandard and Geoanalytical Research*, 28(1): 41–52

Du AD, Qu WJ, Wang DH, Li HM, Feng CY, Liu H, Ren J and Zeng FG. 2007. Subgrain-size decoupling of Re and ^{187}Os within molybdenite. *Mineral Deposits*, 26(5): 572–580 (in Chinese with English abstract)

Fu JM, Ma CQ, Xie CF, Zhang YM and Peng SB. 2004. Zircon SHRIMP dating of the eastern margin of the Qitianling granite, Hunan, South China, and its significance. *Geology in China*, 31(1): 96–100 (in Chinese with English abstract)

Gilder SA, Gill J, Coe RS, Zhao XX, Liu ZW, Wang GX, Yuan KR, Liu WL, Kuang GD and Wu HR. 1996. Isotopic and paleomagnetic constraints on the Mesozoic tectonic evolution of South China. *Journal of Geophysical Research (B)*, 101(7): 16137–16155

Hong DW, Xie XL and Zhang JS. 1998. Isotopic geochemistry of granitoids in South China and their metallogeny. *Resource Geology*, 48(4): 251–263

Hua RM and Mao JW. 1999. A preliminary discussion on the Mesozoic metallogenic explosion in east China. *Mineral Deposits*, 18(4): 300–308 (in Chinese with English abstract)

Hua RM and Yao JM. 2006. Re-Os isotope dating of molybdenite in the Huangshaping polymetallic deposit, Hunan, China, and its geological significance. *Goldschmidt Conference Abstracts*, A270

Hua RM. 2005. Differences between rock-forming and related ore-forming times for the Mesozoic granitoids of crust remelting types in the Nanling Ranges, South China, and its geological significance. *Geological Review*, 51(6): 633–639 (in Chinese with English abstract)

Hua RM, Zhang WL, Gu SY and Chen PR. 2007. Comparison between REE granite and W-Sn granite in the Nanling region, South China, and their mineralizations. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2321–2328 (in Chinese with English abstract)

Huang GF. 1992. A discussion on ages of emplacement of Qitianling granite complex. *Geology and Prospecting*, 11: 7–11 (in Chinese with English abstract)

Jiang SY, Zhao KD, Jiang YH and Dai BZ. 2006. A 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)

Jiang YH, Jiang SY, Dai BZ, Liao SY, Zhao KD and Ling HF. 2008. Middle to Late Jurassic felsic and mafic magmatism in southern Hunan Province, Southeast China: Implications for a continental arc to rifting. *Lithos*, 107(3–4): 185–204

Jiang SY, Zhao KD, Jiang YH and Dai BZ. 2008. Characteristics and

- genesis of Mesozoic A-type granites and associated mineral deposits in the southern Hunan and northern Guangxi provinces along the Shi-Hang belt, South China. *Geological Journal of China Universities*, 14(4): 496–509 (in Chinese with English abstract)
- Li HL, Bi XW, Hu RZ, Peng JT, Shuang Y, Li ZL, Li XM and Yuan SD. 2007. Mineral chemistry of biotite in the Qitianling granite associated with the Furong tin deposit; Tracing tin mineralization signatures. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2605–2614 (in Chinese with English abstract)
- Li HQ, Lu YF, Wang DH, Chen YC, Yang HM, Guo J, Xie CF, Mei YP and Ma LY. 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 HY, Mao JW, Sun YL, Zou XQ, He HL and Du AD. 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 ZL, Hu RZ, Peng JT, Bi XW and Li XM. 2006. Helium isotope geochemistry of ore-forming fluids from Furong tin orefield in Hunan Province, China. *Resource Geology*, 56(1): 9–15
- Li ZX and Li XH. 2007. Formation of the 1300-km wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model. *Geology*, 35: 179–182
- Liu XF, Yuan SD and Wu SH. 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)
- Ma TQ, Bai DY, Kuang J, Peng XJ and Wang XH. 2006. ^{40}Ar - ^{39}Ar dating and geochemical characteristics of the granites in north Dadongshan pluton, Nanling Mountains. *Geochimica*, 35(4): 346–358 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Zhang ZC, Zhang ZH and Du AD. 1999. Re-Os isotopic dating of molybdenites in the Xiaoliugou W (Mo) deposit in the northern Qilian mountains and its geological significance. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 63(11–12): 1815–1818
- Mao JW, Du AD, Seltmann R and Yu JJ. 2003. Re-Os ages for the Shameika porphyry Mo deposit and the Lipovoy Log rare metal pegmatite, central Urals, Russia. *Mineralium Deposita*, 38: 251–257
- Mao JW, Li XF, Chen W, Lan XM and Wei SL. 2004. Geological characteristics of the Furong tin orefield, Hunan, ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of tin ores and related granite and its geodynamic significance for rock and ore formation. *Acta Geologica Sinica*, 78(2): 481–491
- Mao JW, Xie GQ, Li XF, Zhang CQ and Mei YX. 2004. Mesozoic large-scale mineralization and multiple lithospheric extension in South China. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 45–55 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Wang YT, Lehmann, Yu JJ, Du AD, Mei YX, Li YF, Zang WS, Stein HJ and Zhou TF. 2006. Molybdenite Re-Os and albite ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of Cu-Au-Mo and magnetite porphyry systems in the Yangtze River valley and metallogenic implications. *Ore Geology Reviews*, 29: 307–324
- Mao JW, Xie GQ, Guo CL and Chen YC. 2007. Large-scale tungsten-tin mineralization in the Nanling region, South China: Metallogenic ages and corresponding geodynamic processes. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2329–2338 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Xie GQ, Bierlein F, Ye HS, Qü WJ, Du AD, Pirajno F, Li HM, Guo BJ, Li YF and Yang ZQ. 2008. Tectonic implications from Re-Os dating of Mesozoic molybdenum deposits in the East Qinling-Dabie orogenic belt. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 72: 4607–4626
- Mao JW, Xie GQ, Guo CL, Yuan SD, Chen YB and Chen YC. 2008. Spatial-temporal distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their metallogenic settings. *Geological Journal of China Universities*, 14(4): 510–526 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Xie GQ, Cheng YB and Chen YC. 2009. Mineral deposit models of Mesozoic ore deposits in South China. *Geological Review*, 55(3): 347–354 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Pirajno F and Nigel CN. 2011. Mesozoic metallogeny in East China and corresponding geodynamic settings: An introduction to the special issue. *Ore Geology Reviews*, 43: 1–7
- Peng JT, Hu RZ, Zhao JH, Fu YZ and Lin YX. 2003. Scheelite Sm-Nd dating and quartz Ar-Ar dating for Woxi Au-Sb-W deposit, western Hunan. *Chinese Science Bulletin*, 48(23): 2640–2646
- Peng JT, Zhou MF, Hu RZ, Shen NP, Yuan SD, Bi XW, Du AD and Qu WJ. 2006. Precise molybdenite Re-Os and mica Ar-Ar dating of the Mesozoic Yaogangxian tungsten deposit, central Nanling district, South China. *Mineralium Deposita*, 41: 661–669
- Peng JT, Hu RZ, Bi XW, Dai TM, Li ZL, Li XM, Shuang Y, Yuan SD and Liu SR. 2007. ^{40}Ar - ^{39}Ar isotopic dating of tin mineralization in Furong deposit of Hunan Province and its geological significance. *Mineral Deposits*, 26(3): 237–248 (in Chinese with English abstract)
- Peng JT, Hu RZ, Yuan SD, Bi XW and Shen NP. 2008. The time ranges of granitoid emplacement and related nonferrous metallic mineralization in southern Hunan. *Geological Review*, 54(5): 617–625 (in Chinese with English abstract)
- Shirey SB and Walker RJ. 1995. Carius tube digestion for low-blank rhenium-osmium analysis. *Analytical Chemistry*, 67: 2136–2141
- Shuang Y, Bi XW, Hu RZ, Peng JT, Li ZL, Li XM, Yuan SD and Qi YQ. 2006. REE Geochemistry of hydrothermal calcite from tin polymetallic deposit and its indication of source of hydrothermal ore-forming fluid. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 26(2): 57–65 (in Chinese with English abstract)
- Shuang Y, Bi XW, Hu RZ, Peng JT, Su WC and Zhu CS. 2009a. Study on the ore-forming fluid geochemistry of the Furong tin polymetallic deposit, Hunan Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 25(10): 2588–2600 (in Chinese with English abstract)
- Shuang Y, Bi XW, Hu RZ, Peng JT, Zhu CS and Li DH. 2009b. Mineral chemistry of the skarn type ores from Furong tin polymetallic deposit in South Hunan Province, P. R. China. *Acta Mineralogica Sinica*, 29(3): 363–372 (in Chinese with English abstract)
- Smoliar MI, Walker RJ and Morgan JW. 1996. Re-Os ages of group IIA, IIIA, IVA and VIB iron meteorites. *Science*, 271: 1099–1102
- Stein HJ, Markey RJ, Morgan JW, Du AD and Sun Y. 1997. Highly precise and accurate Re-Os ages for molybdenite from the East Qinling molybdenum belt, Shannxi Province, China. *Economic Geology*, 92: 827–835
- Stein HJ, Markey RJ, Morgan JW, Hannah JL and Scherst'en A. 2001. The remarkable Re-Os chronometer in molybdenite: How and why it works. *Terra Nova*, 13: 479–486
- Suzuki K, Shimizu H and Masuda A. 1996. Re-Os dating of molybdenite from ore deposits in Japan: Implication for the closure temperature of the Re-Os system for molybdenite and cooling history of molybdenite ore deposit. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60: 3151–3159
- Walraven F, Strydom JH and Strydom N. 1990. Rb-Sr open-system behavior and its application as a parthfinder for Sn mineralization in granites of the Bushveld Complex, South Africa. *Journal of Geochemical Exploration*, 37(3): 333–350
- Wang DH, Chen YC, Li HQ, Chen ZH, Yu JJ, Lu YF and Li JY. 2003. Geological and geochemical features of the Furong tin deposit in Hunan and their significance for mineral prospecting. *Geological Bulletin of China*, 22(1): 50–56 (in Chinese with English abstract)
- Wieser ME. 2006. Atomic weights of the elements 2005 (IUPAC technical report). *Pure Appl. Chem.*, 78(11): 2051–2066
- Wu LY, Hu RZ, Peng JT and Bi XW. 2007. Helium and argon isotope compositions of fluid inclusions in pyrite from Shizhuyuan W-Sn-Mo-Bi deposit, Hunan Province. *Journal of China University of Geosciences*, 18(Suppl.): 297–299
- Xie GQ, Mao JW and Li RL. 2007. Re-Os molybdenite and Ar-Ar phlogopite dating of Cu-Fe-Au-Mo (W) deposits in southeastern Hubei, China. *Mineralogy and Petrology*, 90: 249–270
- Xie GQ, Zhao HJ, Zhao CS, Li XQ, Hou KJ and Pan HJ. 2009. Re-Os dating of molybdenite from Tonglushan ore district in southern Hubei

- Province, Middle-Lower Yangtze River belt and its geological significance. *Mineral Deposits*, 28(3): 227–239 (in Chinese with English abstract)
- Yao JM, Hua RM, Qu WJ, Qi HW, Lin JF and Du AD. 2007. Re-Os isotopic dating of molybdenite from the Huangshaping Pb-Zn-W-Mo deposit and its significance. *Science in China (Series D)*, 37(4): 471–477 (in Chinese)
- Yin SS and Wang CL. 1994. Xintianling scheelite deposit in Chenzhou County. *Hunan Geology*, 13(4): 205–211 (in Chinese with English abstract)
- Yuan SD, Peng JT, Shen NP, Hu RZ and Dai TM. 2007. ^{40}Ar - ^{39}Ar isotopic dating of the Xianghualing Sn-polymetallic orefield in southern Hunan and its geological implications. *Acta Geologica Sinica*, 81(2): 278–286
- Yuan SD, Peng JT, Hu RZ, Bi XW, Li ZL, Li XM and Shuang Y. 2008a. Characteristics of rare-earth elements (REE), strontium and neodymium isotopes in hydrothermal fluidites from the Bailashui tin deposit in the Furong ore field, southern Hunan Province, China. *Chin. J. Geochem.*, (27): 342–350
- Yuan SD, Peng JT, Hu RZ, Li HM, Shen NP and Zhang DL. 2008b. A precise U-Pb age on cassiterite from the Xianghualing tin-polymetallic deposit (Hunan, South China). *Mineralium Deposita*, 43:375–382
- Yuan SD, Peng JT, Hao S, Li HM, Geng JZ and Zhang DL. 2011. In situ LA-MC-ICP-MS and ID-TIMS U-Pb geochronology of cassiterite in the giant Furong tin deposit, Hunan Province, South China: New constraints on the timing of tin-polymetallic mineralization. *Ore Geology Reviews*, 43: 235–242
- Zhang CQ, Li XH, Yu JJ, Mao JW, Chen FK and Li HM. 2008. Rb-Sr dating of single sphalerites from the Daliangzi Pb-Zn deposit, Sichuan, and its geological significances. *Geological Review*, 54(4): 145–151 (in Chinese with English abstract)
- Zhao KD, Jiang SY, Jiang YH and Wang RC. 2005. Mineral chemistry of the Qitianling granitoid and the Furong tin ore deposit in Hunan Province, South China: Implication for the genesis of granite and related tin mineralization. *European Journal of Mineralogy*, 17(4): 635–648
- Zhao KD, Jiang SY, Jiang YH and Liu DY. 2006. SHRIMP U-Pb dating of the Furong unit of Qitianling granite from southeast Hunan Province and their geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2611–2616 (in Chinese with English abstract)
- Zhao ZH, Bao ZW, Zhang BY and Xiong XL. 2000. Crust-mantle interaction background of the ore formation in the giant Shizhuyuan tin polymetallic deposit. *Science in China (Series D)*, 28 (Suppl.): 7–14 (in Chinese)
- Zheng JJ and Jia BH. 2001. Geological characteristics and related tin-polymetallic mineralization of the Qitianling granite complex in southern Hunan. *Geology and Minerals Resources of South China*, 9(4): 50–57 (in Chinese with English abstract)
- Zhu JC, Huang GF, Zhang PH, Li FC and Rao B. 2003. On the emplacement age and material sources for the granites of Cailing superunit, Qitianling pluton, southern Hunan. *Geological Review*, 46(3): 245–252 (in Chinese with English abstract)
- Zhu JC, Zhang H, Xie CF, Zhang PH and Yang C. 2005a. Zircon SHRIMP U-Pb geochronology, petrology and geochemistry of the Zhujianshui granite, Qitianling pluton, southern Hunan Province. *Geological Journal of China Universities*, 11(3): 335–342 (in Chinese with English abstract)
- Zhu JC, Xie CF, Zhang PH, Yang C and Gu SY. 2005b. Niumiao and Tong'an intrusive bodies of NE Guangxi: Petrology, zircon SHRIMP U-Pb geochronology and geochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 665–676 (in Chinese with English abstract)
- Zhu JC, Chen J, Wang RC, Lu JJ and Xie L. 2008. Early Yanshanian NE trending Sn/W-bearing A-type granites in the western-middle part of the Nanling Mts region. *Geological Journal of China Universities*, 14(4): 474–484 (in Chinese with English abstract)
- Zhu JC, Wang RC, Zhang PH, Xie CF, Zhang WL, Zhao KD, Xie L, Yang C, Che XD, Yu AP and Wang LB. 2009. Zircon U-Pb geochronological framework of Qitianling granite batholith, middle part of Nanling Range, South China. *Science in China (Series D)*, 39(8): 1112–1127 (in Chinese)

附中文参考文献

- 柏道远, 陈建超, 马铁球, 王先辉. 2005. 湘东南骑田岭岩体 A 型花岗岩的地球化学特征及其构造环境. *岩石矿物学杂志*, 24(4): 255–272
- 毕承思, 吴静淑, 王美玉, 艾上铮. 1988. 新田岭白钨矿床稳定同位素地质学研究. *矿床地质*, 7(2): 39–48
- 毕承思, 沈湘元, 徐庆生. 1992. 我国与海西期 A 型花岗岩有关锡矿床的新发现. *中国科学 (B 辑)*, 6: 632–638
- 毕献武, 李鸿莉, 双燕, 胡晓燕, 胡瑞忠, 彭建堂. 2008. 骑田岭 A 型花岗岩流体包裹体地球化学特征——对芙蓉超大型锡矿成矿流体来源的指示. *高校地质学报*, 14(4): 539–548
- 蔡明海, 陈开旭, 屈文俊, 刘国庆, 付建明, 印建平. 2006. 湘南荷花坪砂多金属矿床地质特征及辉钼矿 Re-Os 测年. *矿床地质*, 25(3): 263–268
- 蔡明海, 韩凤彬, 何龙清, 刘国庆, 陈开旭, 付建明. 2008. 湘南新田岭白钨矿床 He、Ar 同位素特征及 Rb-Sr 测年. *地球学报*, 29(2): 167–173
- 杜安道, 屈文俊, 王登红, 李厚民, 丰成友, 刘华, 任静, 曾法刚. 2007. 辉钼矿亚晶粒范围内 Re 和 ^{187}Os 的失偶现象. *矿床地质*, 26(5): 572–580
- 付建明, 马昌前, 谢才富, 张业明, 彭松柏. 2004. 湖南骑田岭岩体东缘菜岭岩体的锆石 SHRIMP 定年及其意义. *中国地质*, 31(1): 96–100
- 华仁民, 毛景文. 1999. 试论中国东部中生代成矿大爆发. *矿床地质*, 18(4): 300–308
- 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
- 黄革非. 1992. 骑田岭复式岩体侵位时代讨论. *地质与勘探*, 28(11): 7–11
- 蒋少涌, 赵葵东, 姜耀辉, 凌洪飞, 倪培. 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
- 蒋少涌, 赵葵东, 姜耀辉, 戴宝章. 2008. 十杭带湘南-桂北段中生代 A 型花岗岩带成岩成矿特征及成因讨论. *高校地质学报*, 14(4): 496–509
- 李红艳, 毛景文, 孙亚莉, 邹晓秋, 何红蓼, 杜安道. 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
- 李鸿莉, 毕献武, 胡瑞忠, 彭建堂, 双燕, 李兆丽, 李晓敏, 袁顺达. 2007. 芙蓉锡矿田骑田岭花岗岩黑云母矿物化学及其对锡成矿的指示意义. *岩石学报*, 23(10): 2605–2614
- 李华芹, 路远发, 王登红, 陈毓川, 杨红梅, 郭敬, 谢才富, 梅玉萍, 马丽艳. 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
- 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
- 马铁球, 柏道远, 邝军, 彭学军, 王先辉. 2006. 南岭大东山岩体北

- 部⁴⁰Ar-³⁹Ar 定年及地球化学特征. 地球化学, 35(4): 346-358
- 毛景文, 谢桂青, 李晓峰, 张长青, 梅燕雄. 2004. 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, 谢桂青, 郭春丽, 陈毓川. 2007. 南岭地区大规模钨锡多金属成矿作用: 成矿时限及地球动力学背景. 岩石学报, 23(10): 2329-2338
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 袁顺达, 陈彦博, 陈毓川. 2008. 华南地区中生代主要金属矿床时空分布规律和成矿环境. 高校地质学报, 14(4): 510-526
- 毛景文, 谢桂青, 程彦博, 陈毓川. 2009. 华南地区中生代主要金属矿床模型. 地质论评, 55(3): 347-354
- 彭建堂, 胡瑞忠, 毕献武, 戴樟谟, 李兆丽, 李晓敏, 双燕, 袁顺达, 刘世荣. 2007. 湖南芙蓉锡矿床⁴⁰Ar/³⁹Ar 同位素年龄及地质意义. 矿床地质, 26(3): 237-248
- 彭建堂, 胡瑞忠, 袁顺达, 毕献武, 沈能平. 2008. 湘南中生代花岗岩岩石成岩成矿的时限. 地质论评, 54(5): 617-625
- 双燕, 毕献武, 胡瑞忠, 彭建堂, 李兆丽, 李晓敏, 袁顺达, 齐有强. 2006. 芙蓉锡矿方解石稀土元素地球化学特征及其对成矿流体来源的指示. 矿物岩石, 26(2): 57-65
- 双燕, 毕献武, 胡瑞忠, 彭建堂, 苏文超, 朱长生. 2009a. 湖南芙蓉锡多金属矿床成矿流体地球化学. 岩石学报, 25(10): 2588-2600
- 双燕, 毕献武, 胡瑞忠, 彭建堂, 朱长生, 李大华. 2009b. 湘南芙蓉锡多金属矿床夕卡岩矿石的矿物化学特征. 矿物学报, 29(3): 363-372
- 王登红, 陈毓川, 李华芹, 陈正宏, 余金杰, 路远发, 李寄嶠. 2003. 湖南芙蓉锡矿的地质地球化学特征及找矿意义. 地质通报, 22(1): 50-56
- 谢桂青, 赵海杰, 赵财胜, 李向前, 侯可军, 潘怀军. 2009. 鄂东南铜绿山矿田矽卡岩型铜铁金矿床的辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义. 矿床地质, 28(3): 227-239
- 姚军明, 华仁民, 屈文俊, 戚华文, 林锦富, 杜安道. 2007. 湘南黄沙坪铅锌钨钼多金属矿的 Re-Os 同位素定年及其意义. 中国科学(D 辑), 37(4): 471-477
- 殷顺生, 王昌烈. 1994. 郴县新田岭钨矿床地质特征. 湖南地质, 13(4): 205-211
- 张长青, 李向辉, 余金杰, 毛景文, 陈福坤, 李厚民. 2008. 四川大梁子铅锌矿床单颗粒闪锌矿铷锶测年及地质意义. 地质论评, 54(4): 145-151
- 赵葵东, 蒋少涌, 姜耀辉, 刘敦一. 2006. 湘南骑田岭岩体芙蓉超单元的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义. 岩石学报, 25(10): 2611-2616
- 赵振华, 包志伟, 张伯友, 熊小林. 2000. 柿竹园超大型钨多金属矿床形成的壳幔相互作用背景. 中国科学(D 辑), 28(增刊): 7-14
- 郑基俭, 贾宝华. 2001. 骑田岭岩体基本特征及其与锡多金属成矿作用关系. 华南地质与矿产, 9(4): 50-57
- 朱金初, 黄革非, 张佩华, 李福春, 饶冰. 2003. 湖南骑田岭岩体菜岭超单元花岗岩侵位年龄和物质来源研究. 地质论评, 46(3): 245-252
- 朱金初, 张辉, 谢才富, 张佩华, 杨策. 2005a. 湘南骑田岭竹枧水花岗岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年代学和岩石学. 高校地质学报, 11(3): 335-342
- 朱金初, 谢才富, 张佩华, 杨策, 顾晟彦. 2005b. 桂北牛庙闪长岩和同安石英二长岩: 岩石学、锆石 SHRIMP U-Pb 年代学和地球化学. 岩石学报, 21(3): 665-676
- 朱金初, 陈骏, 王汝成, 陆建军, 谢磊. 2008. 南岭中西段燕山早期北东向含锡钨 A 型花岗岩带. 高校地质学报, 14(4): 474-484
- 朱金初, 王汝成, 张佩华, 谢才富, 张文兰, 赵葵东, 谢磊, 杨策, 车旭东, 于阿朋, 王禄彬. 2009. 南岭中段骑田岭花岗岩基的锆石 U-Pb 年代学格架. 中国科学(D 辑), 39(8): 1112-1127