

文章编号 10258-7106(2009)04-0403-10

华南志留纪钼的矿化：白石顶钼矿锆石 SHRIMP U-Pb 年龄和辉钼矿 Re-Os 年龄证据*

李晓峰^{1,2}, 冯佐海², 李容森³, 唐专红³, 屈文俊⁴, 李军朝²

(1 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 2 桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林 541004;
3 广西区域地质调查研究院, 广西 桂林 541003; 4 中国地质科学院国家地质测试中心, 北京 100037)

摘 要 白石顶钼矿床位于湘粤桂交界的桂北姑婆山地区, 主要以石英辉钼矿脉的形式产于桂岭岩体(角闪石)黑云母二长花岗岩和南华系浅变质浅海相碎屑岩中。桂岭岩体岩石类型以中-细粒斑状(角闪石)黑云母二长花岗岩为主, 岩石呈灰白色, 似斑状结构。斑晶主要由微斜长石和斜长石组成, 基质则由微斜长石、斜长石、石英、黑云母和普通角闪石组成。副矿物有磁铁矿、锆石、褐帘石、绿帘石、磷灰石、榍石等。白石顶钼矿的矿石矿物主要为辉钼矿、黄铁矿、黄铜矿和白钨矿等。围岩蚀变有黄铁矿化、钾长石化、白云母化、绿泥石化等。文章通过对桂岭岩体及其包体中锆石 SHRIMP U-Pb 年龄和辉钼矿 Re-Os 年龄的测定, 初步揭示了白石顶钼矿床的成矿年代。桂岭岩体(角闪石)黑云母二长花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 $(424.4 \pm 5.6) \text{ Ma}$, 其中的闪长质包体的 SHRIMP U-Pb 年龄为 $(428 \pm 4) \text{ Ma}$, 6 件辉钼矿 Re-Os 的加权平均年龄为 $(424.6 \pm 5.7) \text{ Ma}$, 这表明白石顶钼矿床形成于志留纪。此次工作首次认为在华南地区志留纪也发生了金属钼的富集成矿, 该成果对于深入认识华南地区加里东期的构造-岩浆演化及其成矿作用具有重要的科学价值。

关键词 地球化学, 石英脉型钼矿, 志留纪, 加里东期, 花岗岩, 白石顶, 华南

中图分类号: 618.65

文献标志码: A

Silurian Mo mineralization at Baishiding molybdenum deposit in northern Guangxi: Constraints from zircon SHRIMP U-Pb and molybdenite Re-Os ages

LI XiaoFeng^{1,2}, FENG ZuoHai², LI RongSen³, TANG ZhuanHong³, QU WenJun⁴ and LI JunZhao²

(1 Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 College of Geoscience, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China; 3 Institute of Guangxi Regional Geological Survey, Guilin 541003, Guangxi, China; 4 National Research Center for Geoanalysis, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract

The Baishiding molybdenum deposit is located in northern Guangxi, and its ore bodies occur mainly as quartz + molybdenite veins in Guiling biotite monzogranite and epimetamorphic neritic facies clastic rocks in Nanhua System. Ore minerals are composed of molybdenite, pyrite, chalcopyrite and scheelite. The Mo grade ranges from 0.1% to 0.3% with an average of 0.12%. With the distance from the quartz vein, the monzogranite has been altered into K-feldspar, sericite and chlorite in succession. Molybdenite is precipitated in the quartz vein, mostly occurring along the boundary between the monzogranite and the quartz vein or assuming disseminations in monzogranite. Scheelite is also intergrown with molybdenite in the quartz vein. Six molybdenite Re-Os

* 本文由国家自然科学基金项目(编号 40772126, 40872065)和人事部留学回国人员科技活动择优资助启动基金联合资助
第一作者简介 李晓峰, 男, 1971 年生, 博士, 研究员。主要从事金属矿床地质地球化学研究工作。Email: x-f-li@hotmail.com
收稿日期 2009-02-13; 改回日期 2009-04-30。张绮玲编辑。

ages from six samples indicate that mineralization took place in Silurian. Zircon SHRIMP U-Pb dating of Guling biotite monzogranite shows that the granite was emplaced at (424.4 ± 5.6) Ma, whereas the zircon from the enclave has an age of (428 ± 4) Ma. These data suggest that the Baishiding molybdenum deposit was formed in Silurian, implying that Mo mineralization did occur in Silurian in South China.

Key words: geochemistry, quartz vein mineralization, Silurian, Caledonian, granite, Baishiding, South China

白石顶钼矿床位于南岭西段湘粤桂交界的桂北姑婆山地区桂岭岩体中。2002 年广西区域地质调查研究院在桂岭白石顶一带进行矿产踏勘检查时,发现了 2 个钼矿化体,后经进一步勘查,陆续发现 7 个石英脉型钼矿体,累计储量有望可达中型规模。这些钼矿体或赋存于桂岭岩体中细粒似斑状(角闪石)黑云母二长花岗岩,或赋存于南华系正园岭组长石英砂岩中,矿石中 Mo 品位变化于 $0.1\% \sim 0.3\%$ 之间,平均 0.12% (广西壮族自治区区域地质调查研究院 2006)。由于白石顶钼矿位于姑婆山地区,而姑婆山地区是中国南岭地区重要的燕山期构造岩浆岩带,也是中国重要的 W、Sn 和 REE 等金属矿产资源地,如珊瑚、新路、水岩坝等钨锡矿床的形成均与姑婆山复式岩体的侵入有关,因此,人们认为白石顶钼矿床也应该是燕山期构造岩浆作用的产物,与该地区 W、Sn 和 REE 等金属矿床的成矿作用是同期的,但缺乏可靠的年龄数据的支持。在详细野外调查的基础上,笔者对桂岭白石顶钼矿及与成矿有关的(角闪石)黑云母二长花岗岩分别进行了辉钼矿 Re-Os 法和锆石 SHRIMP U-Pb 法定年,厘定了白石顶钼矿的成矿时代及其有关的岩体的结晶时代,初步探讨了其成矿的地质背景。

1 地质背景

桂岭白石顶钼矿位于华南湘桂海西-印支拗陷区与粤北-东江海西期、燕山期复合拗陷区交汇部位。区域上出露地层主要有南华系浅变质浅海相碎屑岩、震旦系和寒武系海相碎屑岩、浅变质浊积岩及硅质岩、泥盆系滨海-陆相碎屑岩和浅海台地相碳酸盐岩等。区域上出露的岩浆岩由西向东依次有金子岭岩体、乌羊山岩体、姑婆山复式岩体、桂岭岩体和大宁岩体(图 1)。

姑婆山复式岩体西侧与金子岭、乌羊山等岩体相连,东侧与桂岭、大宁等岩体连在一起。该复式岩体主要由里松岩体细-中粒(或中粒)斑状角闪石黑

云母二长花岗岩(162 ± 3)Ma, 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 法,朱金初等,2006),姑婆山岩体中-粗粒斑状黑云母正长花岗岩和中-粗粒斑状黑云母二长花岗岩[(163 ± 4)Ma, 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 法,朱金初等,2006],以及新路岩体细粒斑状黑云母二长花岗岩和细粒斑状黑云母正长花岗岩[(151 ± 7)Ma, 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 法,朱金初等,2006]组成。金子岭岩体主要由中-粗粒黑云母二长花岗岩组成。乌羊山岩体主要由中粒斑状黑云母二长花岗岩组成。大宁岩体主要岩石类型为花岗闪长岩[(407 ± 5)Ma, 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 法,朱金初等,2006]。

桂岭岩体呈南北向狭窄长条状位于姑婆山复式岩体与大宁复式岩体之间,西侧为东西向的花山-姑婆山复式岩体,南东侧为北西向的大宁岩体。桂岭岩体与大宁岩体呈断层接触,而与震旦系、寒武系和泥盆系呈侵入接触关系。岩石类型主要为中-细粒斑状(角闪石)黑云母二长花岗岩[(424.4 ± 5.6)Ma, 锆石 SHRIMP U-Pb 法,本文],少部分为钾长花岗岩或花岗闪长岩。岩石呈浅灰白色、浅灰红色,似斑状结构。斑晶主要由微斜长石和斜长石组成,基质则由微斜长石、斜长石、石英、黑云母和普通角闪石组成,副矿物有磁铁矿、锆石、褐帘石、绿帘石、磷灰石、榍石等。桂岭岩体(角闪石)黑云母二长花岗岩属于钙碱性系列,过铝质“S”型花岗岩, SiO_2 含量为 $72.01\% \sim 73.79\%$, Al_2O_3 含量变化于 $12.40\% \sim 13.90\%$ 之间, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 含量变化于 $7.97\% \sim 8.40\%$ 之间, A/CNK 为 $0.97 \sim 1.13$, δEu 为 $0.40 \sim 0.56$, LREE/HREE 比值为 $7.44 \sim 9.11$,轻、重稀土元素分馏不太显著。在花岗岩类微量元素构造位置判别图 $Y + \text{Nb}-\text{Rb}$ 和 $Y-\text{Nb}$ 中,桂岭岩体属于同碰撞花岗岩(冯佐海等,2003)。

2 钼矿体地质特征

矿区内出露的地层主要是南华系正园岭组长石英砂岩(图 2),它分布于矿区中部白石顶和西南

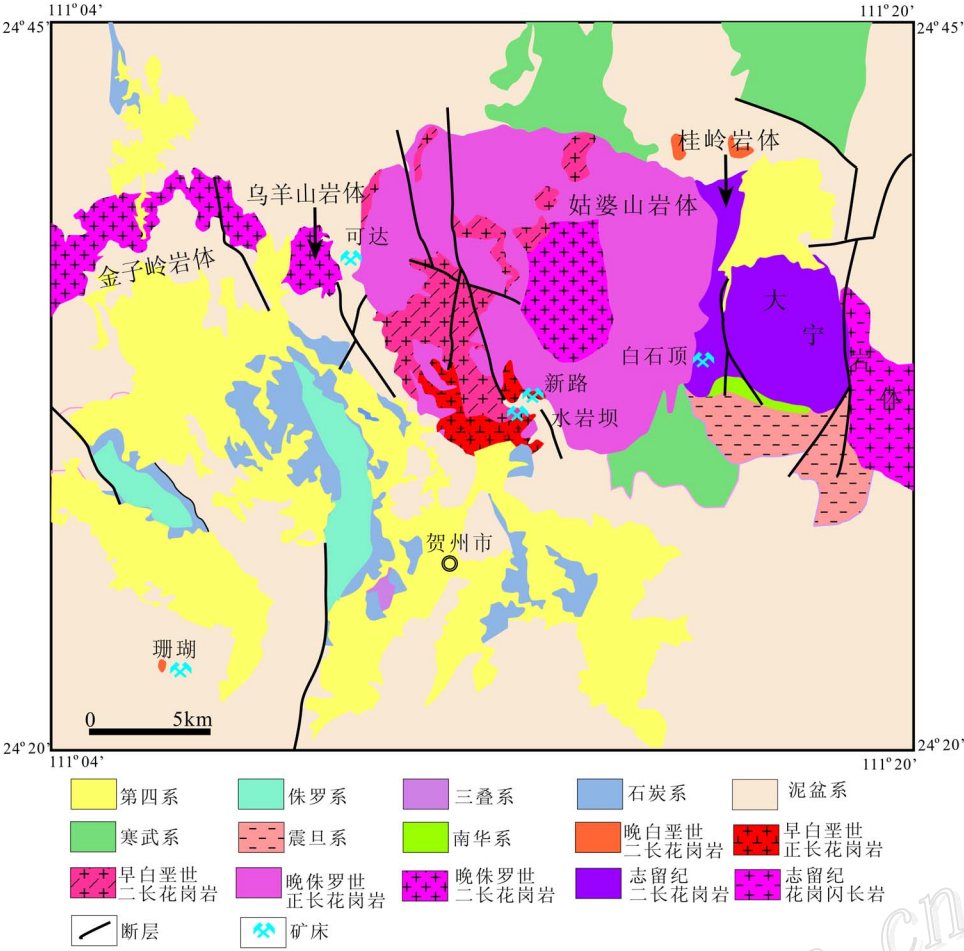


图 1 姑婆山地区区域地质图(据冯佐海等,2002 修改)

Fig. 1 Regional geological map of Guposhan area (modified after Feng et al. , 2002)

园山顶一带,主要表现为残留体(残留顶盖)。地层倾向西或南西,倾角 30~60°,岩石接触变质强烈,角岩化明显。矿区出露岩浆岩主要有志留系(角闪石)黑云母二长花岗岩和晚侏罗世正长花岗岩。

白石顶钼矿分为白石顶和园山顶 2 个矿段。白石顶矿段位于矿区中部白石顶一带,共发现钼多金属矿体 4 个,呈 NE 向、NEE 向、近南北向展布,以 NE 向、NEE 向较发育,平行产出,其中①号矿脉倾向为 NNW 向,局部倾向 SSE,倾角 75~80°,呈脉状、透镜状产出,矿石品位(w_B ,下同)Mo 0.1%~0.3%,平均品位 0.15%;Cu 0.08%~0.25%,平均品位 0.09%;Pb 0.05%~0.52%,平均品位 0.21%。现已控制了 780 m、764 m、725 m 等 3 个中段,已控制矿体长 150 m,矿体厚度较稳定,厚 10.52~15.48 m,平均厚度 11.84 m。②号矿体倾向 140~146°,倾角 55~70°。矿石品位 Mo 0.1%~0.3%,

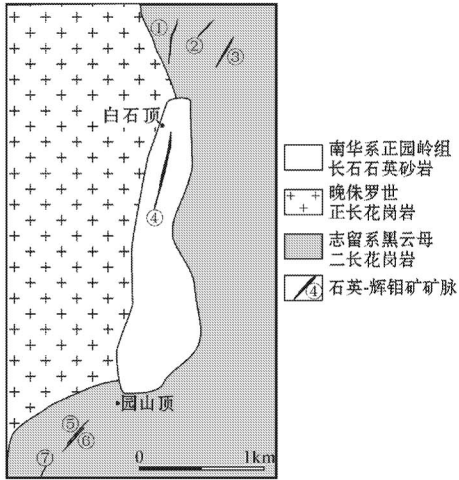


图 2 桂岭白石顶钼矿体地质图(据广西区域地质调查研究院,2006 修改)

Fig. 2 Geological map of Baishiding Mo ore bodies (modified after Institute of Guangxi Regional Geological Survey, 2006)

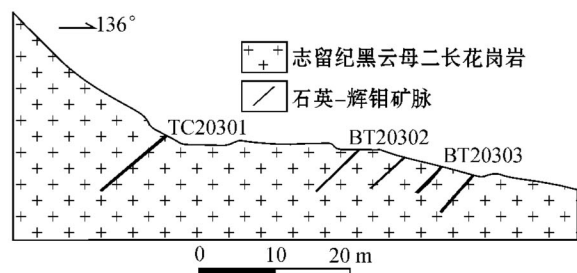


图 3 桂岭白石顶钼矿体园山顶矿段 203 勘探线剖面图

Fig. 3 Geological section along No. 203 exploration line at Yuanshanding block in Baishiding

平均品位 0.12%；Cu 0.04% ~ 0.35%，平均品位 0.08%；Pb 一般在 0.06% ~ 0.48%，平均品位 0.18%。控制矿体长度 120 m，矿体呈透镜状产出，厚 1.56 ~ 20.71 m，平均 10.1 m。

园山顶矿段位于矿区西南角，发现钼多金属矿体 3 个，均为北东向，平行产出。其中⑤号矿体厚 0.69 ~ 2.0 m，矿体倾向 310 ~ 320°，倾角 40 ~ 45°（图 3）。矿石品位（ w_B ，下同）：Mo 0.09% ~ 0.23%、Cu 0.11% ~ 0.19%、Pb 0.01% ~ 0.38%。⑦号矿体厚 0.74 ~ 1.90 m，矿体倾向 310 ~ 320°，倾角 40 ~ 45°。矿石品位：Mo 0.13% ~ 0.18%、Cu 0.03% ~ 0.14%、Pb 0.20% ~ 0.24%。

矿化类型以石英-辉钼矿脉为主（图 4a、4b、4c、4d）。在石英-辉钼矿脉的两侧主要发育绢云母化晕（图 4b）和钾长石化晕（图 4c）。在矿脉的上、下盘，围岩蚀变发育程度不一。一般矿脉上盘蚀变较下盘发育。在上盘，石英-辉钼矿脉与围岩界限比较模糊，而在下盘，石英脉与围岩界限则比较明显、平直，有时在接触带上发育一层厚达 3 cm 的断层泥，反映



图 4 桂岭白石顶钼矿体特征

a. 南华系正园岭组石英砂岩中的石英-辉钼矿脉，被后期的正长石脉切割，而后又发生右旋滑动；b. 黑云母二长花岗岩中的石英-辉钼矿脉，辉钼矿主要沿石英脉的脉壁分布。在靠近石英脉的花岗岩中，发育绢云母化蚀变；c. 黑云母二长花岗岩中的石英-辉钼矿脉及其两侧的钾长石化蚀变，辉钼矿呈浸染状分布于花岗岩中；d. 石英-辉钼矿脉中的辉钼矿和白钨矿共生

Fig. 4 Characteristics of molybdenite ore bodies in Baishiding

a. Quartz-molybdenite vein in quartzose sandstone from Zhengyuan Group, Nanhua System. The vein was cut by later syenite dike, then overprinted by dextral slip movement; b. Quartz-molybdenite vein in biotite monzonite. Molybdenite occurs mostly along the boundary between quartz vein and monzonite, whereas sericitization occurs in biotite monzonite close to the quartz vein; c. Quartz-molybdenite vein and adjacent K-feldspar alteration in biotite monzonite, with molybdenite occurring as disseminations in biotite monzonite; d. The intergrowth of molybdenite and scheelite in quartz-molybdenite vein

了石英-辉钼矿脉形成之后的构造运动的叠加。

从矿脉往外,依次发育钾长石化、绢云母化和绿泥石化蚀变。黄铁矿化主要发育于矿脉和近矿围岩中。矿体中矿石矿物主要为辉钼矿,次为黄铜矿、方铅矿、黄铁矿、白钨矿,还有少量磁黄铁矿、闪锌矿、辉铋矿和毒砂。非金属矿物以石英为主,含少量绢云母、方解石和绿泥石。辉钼矿呈浸染状、团块状、片状分布于石英脉中或者呈浸染状分布于靠近石英脉的围岩中。粒度一般在 0.2~8 mm 之间,个别可达 15 mm。在石英-辉钼矿脉中,辉钼矿主要呈片状分布于石英脉与围岩之间的脉壁上,而在石英脉内部,辉钼矿主要呈团块状或者圆球状分布。局部地段可以看到白钨矿与辉钼矿共生(图 4d)。赋存于南华系正园岭组长石石英砂岩中的石英-辉钼矿脉主要呈网脉状,局部地段可以看到石英-辉钼矿脉被后期的正长石脉切穿,而正长石脉又发生右旋位移(图 4a)。在长石石英砂岩中,石英-辉钼矿脉外侧的围岩蚀变较不发育。

3 样品采集与分析方法

3.1 锆石 SHRIMP U-Pb 测试

测试所需的锆石样品采自无蚀变的桂岭岩体(角闪石)黑云母二长花岗岩。为精选锆石样品,先将无蚀变的岩石样品破碎至 0.2 mm 以下,用常规的人工淘洗和电磁选方法处理样品,再在双目镜下逐个精选锆石颗粒。锆石 SHRIMP U-Pb 分析在中国地质科学院北京离子探针中心完成。制样时先将锆石样品与标样锆石(年龄为 417 Ma)用环氧树脂固定、抛光,使锆石内部暴露。然后在透射光、反射光以及阴极发光扫描电镜下照相,以了解锆石的内部结构,选出最理想的供分析的锆石颗粒,再镀上黄金膜。分析流程和原理以及分析数据处理方法参考简平等(2003)。

锆石样品 G0802 和 G0801 选自同一寄主岩石,其中 G0802 为(角闪石)黑云母二长花岗岩岩石,而样品 G0801 则分选自其中的闪长质包体。(角闪石)黑云母二长花岗岩呈浅灰白色-浅灰红色,似斑状结构。斑晶以微斜微纹长石为主,少量为斜长石,粒径 12~30 mm 不等。基质由微斜长石、斜长石、石英、黑云母和少量的普通角闪石组成。副矿物有磁铁矿、锆石、褐帘石、绿帘石、磷灰石、榍石、黄铁矿等。

3.2 辉钼矿 Re-Os 测试

辉钼矿样品分别采集于白石顶矿段 3 个石英-辉钼矿脉,分属不同类型的石英-辉钼矿脉。不同样品的矿物组合见表 3。在测试分析前,先对辉钼矿样品进行 XRD 分析,以确定辉钼矿的多型和所测试的辉钼矿的杂质成分。辉钼矿 Re-Os 年龄测试在国家地质测试中心完成。有关分析测试原理、流程 and 数据处理分析方法参见杜安道等(1994, 2001)。

4 测试结果

4.1 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄

锆石样品 G0801 和 G0802 的 SHRIMP U-Pb 定年结果列于表 1 和表 2。由表 1 可知,样品 G0801 共分析 17 个锆石颗粒、17 个测试点,其中的 14 个颗粒的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(428 \pm 4) \text{ Ma}$ ($n=14$, $\text{MSWD}=1.2$)。另外 1 个锆石颗粒(6.1)的分析结果显示出高含量的 $^{206}\text{Pb}^*$, 2 个锆石颗粒(9.1 和 17.1)具有异常高的 U 含量,其中 1 个锆石颗粒(G0801-17.1)还偏离了和谐曲线(图 5),这反应了它们可能受到后期构造岩浆热事件的叠加,而造成锆石颗粒 U-Th-Pb 同位素体系的破坏。

样品 G0802 共分析 16 个锆石颗粒、17 个测试点。从阴极发光图像可以看出,样品 G0802 中锆石具有明显热液流体的叠加,可以分为 2 种类型(图 6),一类是溶蚀现象明显,大部分锆石颗粒呈现深灰色,锆石原有的形态已经遭到破坏,锆石韵律环带不清晰。另一类是虽然受到了后期热液流体的叠加,但是锆石韵律环带明显,锆石颗粒还保持原有的封闭体系。从锆石 SHRIMP U-Pb 测试结果来看,第一类锆石颗粒的 U ($3.383 \times 10^{-6} \sim 11.298 \times 10^{-6}$) 和 Th ($2.967 \times 10^{-6} \sim 13.203 \times 10^{-6}$) 含量很高, $^{206}\text{Pb}^*$ 含量在 $179 \times 10^{-6} \sim 314 \times 10^{-6}$ 。由于其 U-Th 同位素体系受到破坏,因而造成 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄(139.6~253.6 Ma)不同程度偏低。第二类锆石颗粒 U ($1.119 \times 10^{-6} \sim 1.765 \times 10^{-6}$) 和 Th ($371 \times 10^{-6} \sim 666 \times 10^{-6}$) 含量较低, $^{206}\text{Pb}^*$ 含量在 $62 \times 10^{-6} \sim 103 \times 10^{-6}$ 。从锆石的形态和同位素组成来看,第二类锆石的年龄基本可以代表岩浆的结晶年龄。第二类锆石 10 个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的加权平均年龄为 $(424.4 \pm 5.6) \text{ Ma}$ ($n=10$, $\text{MSWD}=1.2$) (图 7)。

表 1 桂岭岩体黑云母二长花岗岩包体中锆石(G0801)SHRIMP U-Pb 年龄测试结果
Table 1 SHRIMP zircon U-Pb dating of enclaves from biotite monzogranite in Guiling plutons

点号	²⁰⁶ Pb _c /%	U/10 ⁻⁶	Th/10 ⁻⁶	²³² Th/ ²³⁸ U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U 年龄/Ma	²⁰⁷ Pb*/ ²⁰⁶ Pb*	± %	²⁰⁷ Pb*/ ²³⁵ U	± %	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	± %
1.1	0.34	2203	561	0.26	439.0±6.6	0.05526	0.84	0.5373	1.8	0.0705	1.6
2.1	1.41	2039	520	0.26	434.3±6.6	0.05430	1.0	0.5200	1.9	0.0695	1.6
3.1	0.12	1976	750	0.39	436.4±6.6	0.05524	0.85	0.5337	1.8	0.0701	1.6
4.1	0.30	2411	585	0.25	426.0±6.4	0.05455	0.81	0.5143	1.8	0.0684	1.6
5.1	0.43	2351	972	0.43	426.5±6.5	0.05476	0.81	0.5174	1.8	0.0685	1.6
6.1	6.82	2752	979	0.37	370.9±6.1	0.0474	2.30	0.383	2.8	0.0585	1.6
7.1	0.13	1945	782	0.42	432.5±6.6	0.05559	0.89	0.5322	1.8	0.0694	1.6
8.1	0.16	1694	530	0.32	439.0±6.7	0.05659	0.90	0.5510	1.8	0.0706	1.6
9.1	4.08	2919	2367	0.84	406.7±6.4	0.05257	1.70	0.472	2.3	0.0651	1.6
10.1	2.03	1402	466	0.34	422.7±6.6	0.05435	1.50	0.505	2.2	0.0674	1.6
11.1	3.18	996	196	0.20	421.7±7.0	0.0519	5.50	0.480	5.7	0.0670	1.6
12.1	1.37	2046	568	0.29	422.6±6.4	0.05695	1.00	0.5318	1.9	0.0677	1.6
13.1	0.22	2269	522	0.24	418.4±6.4	0.05555	0.93	0.5140	1.8	0.0671	1.6
14.1	0.21	1246	308	0.26	433.2±6.7	0.05434	1.10	0.520	2.0	0.0694	1.6
15.1	0.89	2175	843	0.40	418.2±6.4	0.05590	0.91	0.5162	1.8	0.0670	1.6
16.1	0.47	2302	777	0.35	428.0±6.5	0.05483	0.99	0.5177	1.9	0.0685	1.6
17.1	1.52	3357	1247	0.38	370.4±6.0	0.05563	1.10	0.4497	2.0	0.0586	1.7

注:误差为 1σ ,Pb_c and Pb* 分别代表普通铅和放射成因铅的含量。普通铅的校正采用所测²⁰⁴Pb 进行校正。

表 2 桂岭岩体黑云母二长花岗岩中锆石(G0802)SHRIMP U-Pb 年龄测试结果
Table 2 SHRIMP zircon U-Pb dating of biotite monzogranite in Guiling plutons

点号	²⁰⁶ Pb _c /%	U/10 ⁻⁶	Th/10 ⁻⁶	²³² Th/ ²³⁸ U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U Age/Ma	²⁰⁷ Pb*/ ²⁰⁶ Pb*	± %	²⁰⁷ Pb*/ ²³⁵ U	± %	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	± %
1.1	0.38	1339	406	0.31	445.5±5.2	0.05642	1.1	0.5585	1.6	0.07180	1.2
2.1	0.22	1545	380	0.25	448.3±5.3	0.05480	1.1	0.5439	1.6	0.07199	1.2
3.1	0.68	9142	4536	0.51	174.4±2.0	0.03273	1.4	0.1212	1.8	0.02685	1.2
4.1	0.31	11298	13203	1.21	172.6±2.8	0.01819	2.8	0.0656	3.3	0.02615	1.6
5.1	0.53	1765	623	0.36	422.4±4.9	0.05300	1.1	0.4939	1.6	0.06759	1.2
6.1	0.12	1705	635	0.38	421.1±5.5	0.05623	10.0	0.5242	1.7	0.06761	1.4
7.1	0.25	1608	371	0.24	429.3±5.0	0.05495	1.0	0.5227	1.6	0.06898	1.2
8.1	0.13	1567	474	0.31	432.3±5.1	0.05550	1.1	0.5313	1.6	0.06942	1.2
9.1	0.33	6374	6443	1.04	357.9±4.1	0.05936	0.48	0.4703	1.3	0.05746	1.2
10.1	0.84	8535	10333	1.25	264.9±3.0	0.06087	0.49	0.3556	1.3	0.04237	1.2
11.1	0.37	1758	666	0.39	422.8±4.9	0.05451	0.97	0.5101	1.5	0.06787	1.2
12.1	0.23	3383	2967	0.91	413.7±4.8	0.05841	0.67	0.5364	1.4	0.06660	1.2
13.1	2.78	9249	5681	0.63	139.6±1.7	0.04366	1.7	0.1291	2.1	0.02145	1.2
14.1	2.52	9267	11705	1.31	150.5±1.8	0.0561	3.8	0.1830	4.0	0.02368	1.2
15.1	1.70	8962	12839	1.48	253.6±3.1	0.06508	0.87	0.3635	1.5	0.04051	1.2
16.1	0.29	1447	531	0.38	401.7±4.8	0.05480	1.3	0.4867	1.8	0.06441	1.2
17.1	0.24	1119	647	0.60	404.5±4.9	0.05637	1.3	0.5039	1.8	0.06483	1.2

注:误差为 1σ ,Pb_c and Pb* 分别代表普通铅和放射成因铅的含量。普通铅的校正采用所测²⁰⁴Pb 进行校正。

4.2 辉钼矿 Re-Os 年龄

6 件辉钼矿样品的 Re-Os 同位素分析结果列于表 3。由表 3 可知,不同样品中 Re 的含量都比较高,变化于 127.3~383.9 μg/g,¹⁸⁷Re 变化于 98.29~241.3 μg/g 之间,¹⁸⁷Os 变化于 572.6~1 683 μg/g 之间。总体上来说,白石顶辉钼矿样品中的 Re、Os

含量比华南燕山期钨矿辉钼矿中的 Re、Os 含量要高(Mao et al., 1999)。① 号脉中两件辉钼矿的年龄分别为(433.3±6.3)Ma 和(428.1±7.4)Ma;② 号脉中两件辉钼矿的年龄分别为(417.2±5.7)Ma 和(423.8±6.4)Ma;③ 号脉中两件辉钼矿的年龄分别为(428.6±6.5)Ma 和(418.7±6.5)Ma。

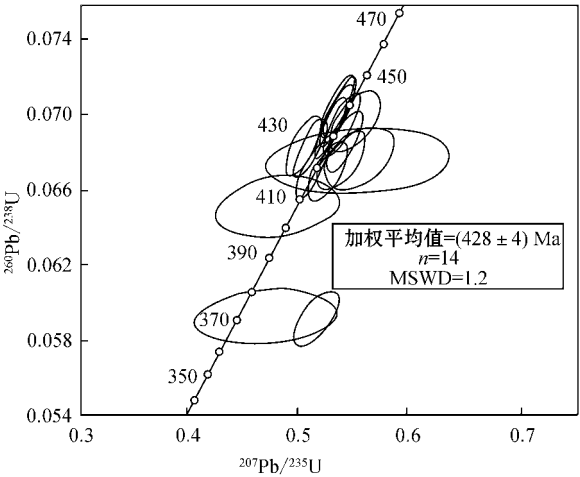


图 5 桂岭岩体黑云母二长花岗岩包体中锆石 SHRIMP U-Pb 年龄谐和图

Fig. 5 Concordia plot showing all sensitive high-resolution ion microprobe data for zircons from enclave sample G0801 in Guiling pluton

5 讨 论

5.1 辉钼矿的 Re-Os 年龄及钼矿体的成矿时代

像其他同位素体系一样,在不同的地质条件下,辉钼矿的 Re-Os 同位素系统也会受到扰动 (Barra et al. 2003, 2005)。McCandless 等 (1993) 和 Suzuki 等 (2000) 认为后期的热液蚀变和表生作用过程会干扰辉钼矿的 Re-Os 系统,从而导致错误的年龄。然而, Stein 等 (1998) 和 Selby 等 (2001) 认为辉钼矿的 Re-Os 系统不受后期地质作用的影响。McCandless 等 (1993) 提出在进行辉钼矿 Re-Os 年龄分析之前,应对样品进行红外显微镜、XRD、背散射电子图像等多

种手段测试,以确定辉钼矿样品是否受到了蚀变作用的叠加。然而, Suzuki 等 (2000) 认为辉钼矿的红外光下的透明度与 Re-Os 年龄之间没有关系,红外显微镜方法也不能评价辉钼矿 Re-Os 系统的可靠性。杜安道等 (2007) 认为在钨矿床中的辉钼矿存在失偶现象,由于 Os 的迁移,导致 Os 在辉钼矿的不同部位分布不均,从而引起辉钼矿的真实年龄变轻。McCandless 等 (1993) 认为与辉钼矿共生的 K-Al 硅酸盐矿物或者其中的包裹体由于富集 Re,从而导致异常年轻的年龄。尽管一些学者在对一个辉钼矿样品进行多次分析测试后,结果相差可达几个 Ma (Zacharias et al., 2001),甚至 50 Ma (Raith et al., 2000),但是其中的原因还是个谜。XRD 衍射结果表明,此次测试所用的辉钼矿样品纯度很高,均为 2H 型辉钼矿。除了少量的石英外,没有发现其他 K-Al 硅酸盐矿物与辉钼矿共生。从不同脉体测试结果的重复性来看,尽管误差较大,但辉钼矿 Re-Os 样品的结果还是有一定地质意义的。从辉钼矿矿脉的蚀变晕特征来看,所测试的样品可以分为 2 类,一类是钾长石晕,如 BSD-12;另一类是绢云母化晕,如 BSD-18。因此,可以认为,桂岭白石顶矿体钾长石晕辉钼矿形成于 433~423 Ma,而绢云母化晕辉钼矿的形成年龄为 417 Ma 左右。白石顶钼矿辉钼矿 Re-Os 年龄的不一致有可能反映了两期钼的矿化,也有可能是其他的原因(如构造运动的叠加)造成的。

桂岭岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 (424.4 ± 5.6) Ma,表明花岗质岩浆的结晶年龄为 424 Ma 左右,说明桂岭白石顶钼矿体的形成年龄不早于 430 Ma。虽然 6 件辉钼矿的 Re-Os 同位素年龄相差较大,但是其加权平均年龄 (424.6 ± 6.7) Ma 与赋存岩

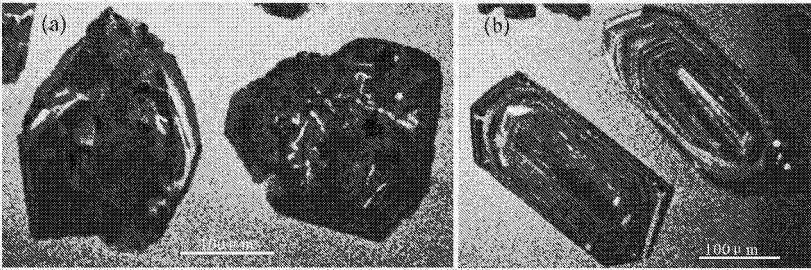


图 6 样品 G0802 锆石阴极发光图像

a. 被后期热液活动强烈叠加的锆石颗粒,其晶格已经受到破坏;b. 基本不受热液活动影响的锆石颗粒

Fig. 6 CL images of zircon from sample G0802

a. Overprinted strongly by hydrothermal activity, with the lattice in zircon being destroyed;b. Least alteration zircon

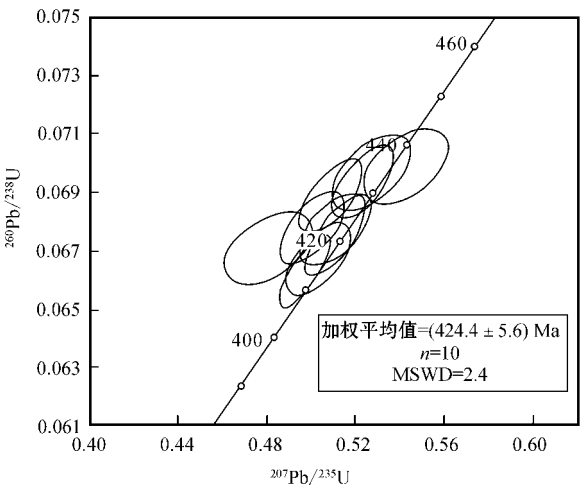


图 7 桂岭岩体黑云母二长花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄谐和图

Fig. 7 Concordia plot showing all sensitive high-resolution ion microprobe data for zircons from biotite monzonite sample G0802 in Guiling pluton

体的结晶年龄基本一致,故白石顶钼矿形成于志留纪是不容置疑的。与华南地区中生代钨锡铜钼成矿作用相比,虽然华南地区也存在古生代钨锡成矿作用,但是与钼有关的成矿作用还尚无报道。尽管白石顶石英脉型钼矿的品位稍低($Mo\ 0.1\% \sim 0.3\%$; $Cu < 0.25\%$),储量仅可达中型规模,但是志留纪钼矿的发现及其研究无疑对于认识桂北乃至华南地区志留纪的构造岩浆演化及其成矿作用具有重要的科学价值(陈毓川等,1995;周新民等,2003;舒良树等,2006)。

5.2 华南加里东期花岗岩与白石顶钼矿形成的地质背景

自徐克勤首次在华南地区发现加里东期花岗岩以来,加里东期花岗岩及其成矿作用得到了人们的关注,但是加里东期花岗岩不如燕山期花岗岩那样

分布广泛且有多期次、多旋回。加里东期花岗岩主要分布于湘-赣、湘-桂和桂-粤交界地区,并以武夷山和云开地区最为集中,其中又以强过铝质花岗岩为主(黄汲清等,1986)。在桂北地区,加里东期花岗岩主要有越城岭岩体、猫儿山岩体、牛塘界岩体、海洋山岩体、桂岭岩体和大宁岩体。与加里东期花岗岩有关的金属矿床主要有W和Sn矿床,其中钨矿床主要分布在江南隆起南缘的猫儿山及赣湘桂粤褶皱带的海洋山等地(黄汲清等,1986)。猫儿山岩体侵入寒武系,海洋山岩体侵入奥陶系,均被泥盆系沉积不整合覆盖,岩体的岩性一般为中-细粒似斑状花岗岩或斑状黑云母花岗岩(李晓峰等,1997)。在花岗岩体的接触带附近常见有黑钨矿石英脉发育,可达中、小型规模,如与猫儿山岩体有关的佑安钨矿、与海洋山岩体有关的茶湾钨矿以及与牛塘界岩体有关的牛塘界钨矿(汪金榜等,1988)等。加里东期形成的锡矿床主要有钦甲锡矿。另外,在云开大山也有与加里东期安山质火山岩及花岗岩有关的锡矿产出。然而,华南加里东期花岗岩及其成矿作用的研究则较少,积累的地质资料也较为有限,其地球动力学体制还不清楚(陈毓川等,1995;周新民等,2003;舒良树,2006)。

郭令智等(1980)认为加里东期由俯冲作用形成武夷-云开岛弧褶皱系,桂北一带属于弧后盆地范围,构造体制是拉张环境,并进一步演化为残余岛弧。继奥陶纪浙闽粤岛弧与浙东地体碰撞后,在桂北志留纪末的加里东运动使弧后盆地封闭,碰撞作用可以传递到内陆相当远的距离,出现花岗岩侵位和变质,例如桂北的猫儿山和越城岭岩体就远离加里东期俯冲带。刘宝珏等(1993)认为华南加里东期盆地消亡过程中,虽然发生过有限的俯冲作用,但没有形成典型的岛弧型或科迪勒拉型或地体拼贴型造山带,也不同于拗拉槽造山作用形成的陆内造

表 3 桂岭白石顶石英脉型钼矿中辉钼矿 Re-Os 同位素数据

Table 3 Re-Os dating of molybdenite from quartz-molybdenite veins in Baishiding ore bodies

矿脉编号	样品	矿物组合	样重/g	Re/ $\mu\text{g/g}$	$\alpha\text{Os}_{\text{普}}/\text{ng/g}$	$^{187}\text{Re}/\mu\text{g/g}$	$^{187}\text{Os}/\text{ng/g}$	模式年龄/Ma
①	BSD-1	Q + Mo + Cp	0.00545	223.2 $\pm$ 2.0	0.0890 $\pm$ 0.4986	140.3 $\pm$ 1.2	1016 $\pm$ 8	433.3 $\pm$ 6.3
①	BSD-6	Q + Mo	0.00582	127.3 $\pm$ 1.6	0.0832 $\pm$ 0.4660	80.00 $\pm$ 1.02	572.6 $\pm$ 4.7	428.1 $\pm$ 7.4
②	BSD-8	Q + Mo + Py	0.00735	383.9 $\pm$ 2.9	0.0021 $\pm$ 0.0022	241.3 $\pm$ 1.8	1683 $\pm$ 14	417.2 $\pm$ 5.7
②	BSD-12	Q + M(α 钾长石化晕)	0.00503	156.4 $\pm$ 1.5	0.0002 $\pm$ 0.0005	98.29 $\pm$ 0.93	696.4 $\pm$ 5.8	423.8 $\pm$ 6.4
③	BSD-19	Q + Mo	0.005	284.9 $\pm$ 2.7	0.0002 $\pm$ 0.0004	179.0 $\pm$ 1.7	1283 $\pm$ 11	428.6 $\pm$ 6.5
③	BSD-18	Q + Mo + P(α 绢云母化晕)	0.00508	278.3 $\pm$ 2.8	0.0928 $\pm$ 0.3120	174.9 $\pm$ 1.8	1224 $\pm$ 11	418.7 $\pm$ 6.5

Q=石英;Mo=辉钼矿;Cp=黄铜矿;Py=黄铁矿。

山带,而是华夏板块向北西漂移,导致华南盆地脉动式收缩形成的一种独特的“南华型”造山带。丘元禧等(1999)则认为华南加里东褶皱系是弧后盆地进一步演化而形成的陆弧碰撞拼贴造山带,桂北位于扬子古陆东南边缘的褶断山系。任纪舜(1964;1990)认为华南加里东褶皱系为拗拉槽造山作用形成的陆内褶皱系,而非碰撞造山带。丘元禧等(1999)在桂北四堡-融水-融安一带加里东强烈褶皱层中识别出了自 SSE 向 NNW 逆冲的推覆构造,证明了加里东期区域性巨型推(滑)覆体的存在。周新民等(2003)认为加里东期花岗岩缺少相匹配的大规模同期火山岩系,不具备洋-陆俯冲活动大陆边缘的特征,主要表现为板内性质的岩浆活动。陈毓川等(1995)认为在加里东期,桂北地区处于挤压环境。张桂林(2004)对桂北前寒武纪花岗岩中的滑脱型韧性剪切带糜棱岩(本洞花岗质糜棱岩、摩天岭花岗质糜棱片麻岩、元宝山花岗质糜棱片麻岩的) ^{40}Ar - ^{39}Ar 法坪年龄结果分别为 $(404.3 \pm 6.2) \text{ Ma}$ 、 $(425.7 \pm 0.9) \text{ Ma}$ 、 $(324.8 \pm 0.6) \text{ Ma}$,这说明在 425 Ma 以前,桂北地区处于挤压向伸展转换的环境,随后进入后造山的伸展环境,因此白石顶钼矿体形成由挤压向伸展转换的构造背景中。

6 结 论

(1) 首次对桂北姑婆山地区白石顶钼矿辉钼矿样品进行了 Re-Os 同位素测试,6 件辉钼矿样品年龄为 $(433.3 \pm 6.3) \text{ Ma}$ ~ $(417.2 \pm 5.7) \text{ Ma}$,表明钼矿化发生在志留纪,而钼矿体寄主岩石桂岭岩体黑云母二长花岗岩岩石中锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 $(424.4 \pm 5.6) \text{ Ma}$,其中的闪长质包体中锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 $(428 \pm 4) \text{ Ma}$ 。表明桂岭岩体和白石顶石英脉型钼矿均属于加里东期构造岩浆活动的产物,形成于由挤压向伸展转换构造环境中。

(2) 桂北姑婆山地区志留纪钼矿体的发现,对于指导和部署华南地区的找矿工作具有重要的实际意义。以前,该地区的找矿工作主要集中于燕山期花岗岩,此次工作的成果,将有利于扩大找矿勘查范围。同时,深入研究加里东期花岗岩及其有关的金属成矿作用,对于认识华南地区加里东期构造岩浆演化也具有科学意义。

References

- Barra F, Ruiz J and Titley S. 2003. A Re-Os study on sulfide minerals from Bagdad porphyry Cu-Mo deposit, northern Arizona, USA [J]. *Mineralium Deposita*, 38: 585-596.
- Barra F, Ruiz J, Valencia V A, Ochoa-Landin L, Chesley J T and Zurcher L. 2005. Laramide porphyry Cu-Mo mineralization in northern Mexico: Age constraints from Re-Os geochronology in molybdenite [J]. *Econ. Geol.*, 100: 1605-1616.
- Chen Y C and Mao J W. 1995. Metallogenic series of ore deposits and metallogenic evolution through geological history in north Guangxi [M]. Nanning: Guangxi Scientific and Technological Pub. House. 410 p (in Chinese with English abstract).
- Du A D, He H L and Yin N W. 1994. A study on the rhenium-osmium geochronometry of molybdenite [J]. *Acta Geological Sinica*, 68(4): 339-347 (in Chinese with English abstract).
- Du A D, Qu W J, Wang D H, Li H M, Feng C Y, Liu H, Ren J and Zeng F G. 2007. Subgrain-size decoupling of Re and ^{187}Os within molybdenite [J]. *Mineral Deposits*, 26(5): 572-580 (in Chinese with English abstract).
- Du A D, Zhao D M, Wang S X, Sun D Z and Liu D Y. 2001. Precise Re-Os dating for molybdenite by ID-NTIMS with Carius Tube sample preparation [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 20(4): 247-252 (in Chinese with English abstract).
- Feng Z H, Liang J C, Zhang G L, Li X F and Deng J X. 2002. On the lithogenic units of Mesozoic granitoid in east Guangxi—A case from Guposhan-Huashan granitic pluton [J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 22: 333-340 (in Chinese with English abstract).
- Feng Z H. 2003. Emplacement process and structural analysis of Guposhan-Huashan granitic pluton, Guangxi (dissertation for Doctor degree) [D]. Changsha: Central South University Dissertation. 87-93 (in Chinese with English abstract).
- Guo L Z, Shi Y S and Ma R S. 1980. Geotectonic framework and crust evolution of the South China [C]. *Scientific papers on geology for international exchange* [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 109-116 (in Chinese with English abstract).
- Huang J Q and Chen T Y. 1986. On the problem of polycyclic mineralization of tungsten and tin deposits in South China [J]. *Geological Review*, 32: 138-143 (in Chinese with English abstract).
- Li X F, Liang J C and Feng Z H. 1997. Research on the geochemical evolution and the forming geological environment, Haiyangshan granite plutons, Guangxi [J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 17: 228-233 (in Chinese with English abstract).
- Liu B J, Xu X S and Pan X N. 1993. The sedimentary crustal evolution and its metallogenic of Paleo-continent in South China [M]. Beijing: Science Press. 9-33 (in Chinese with English abstract).

- Mao J W, Zhang Z, Zhang Z and Du A D. 1999. Re-Os isotopic dating of molybdenites in the Xiaoliugou W-(Mo) deposit in the northern Qilian Mountains and its geological significance [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 63: 1815-1818.
- McCandless T E and Ruiz J. 1993. Rhenium-osmium evidence for regional mineralization in southwestern North America [J]. *Science*, 261: 1282-1286.
- Qiu Y X, Zhang Y C and Ma W P. 1999. The tectonic attributes and evolution of Xuefengshan-the evolution model for an intra-orogenic belt [M]. Sun YAT-SEN University Pub. House. 1-153.
- Raith J G and Stein H J. 2000. Re-Os dating and sulfur isotope composition of molybdenite from tungsten deposits in western Namaqualand, South Africa: Implication for ore genesis and the timing of metamorphism [J]. *Mineralium Deposita*, 35: 741-753.
- Ren J S, Chen T Y and Niu B G. 1990. Tectonic evolution of the continental lithosphere and metallogeny in eastern China and adjacent areas [M]. Beijing: Science Press. 205p (in Chinese).
- Selby D and Creaser R A. 2001. Re-Os geochronology and systematics in molybdenite from base metal porphyry and mantle-type mineralization in Chile [J]. *International Geological Reviews*, 39: 317-324.
- Shu L S. 2006. Predevonian tectonic evolution of South China: from Cathaysian block to Caledonian period folded orogenic belt [J]. *Geological Journal of China Universities*, 12: 418-431 (in Chinese with English abstract).
- Stein H J, Sundblad K, Markey R, Morgan J W and Motuza G. 1998. Re-Os ages for Archean molybdenite and pyrite, Kuittila-Kinia: Testing the chronometer in a metamorphic and metasomatic setting [J]. *Mineralium Deposita*, 33: 329-345.
- Suzuki K, Kagi H, Nara M, Takano B and Nozaki Y. 2000. Experimental alteration of molybdenite: Evaluation of the Re-Os system, infrared spectroscopic profile and polytype [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64: 223-232.
- Wang J B and Tang H Y. 1988. Discussion on the Geology and genesis of Niutangjie scheelite deposit in Guangxi [J]. *Geology of Guangxi*, 1: 11-18 (in Chinese).
- Zacharias J, Pertold Z, Pudilova M, Zak K, Pertoldova J, Stein H and Markey R. 2001. Geology and genesis of Variscan porphyry-style gold mineralization, Petraková hora deposit, Bohemian Massif, Czech Republic [J]. *Mineralium Deposita*, 36: 517-541.
- Zhang G L. 2004. The study on the dynamics and kinetics of pre-Devonian tectonic evolution in the south margin of Yangtze block (North Guangxi) [dissertation for Doctor degree] [D]. Changsha Central South University, 1-182 (in Chinese with English abstract).
- Zhou X M. 2003. My thinking about granite geneses of South China [J]. *Geological Journal of China Universities*, 9: 556-565 (in Chinese with English abstract).
- Zhu J C, Zhang P H, Xie C F, Zhang H and Yang C. 2006. The Huashan-guposhan A-type granitoid belt in the western part of the Nanling Mountains: Petrology, geochemistry and genetic interpretations [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22: 2270-2278 (in Chinese with English abstract).
- 陈毓川, 毛景文. 1995. 桂北地区矿床查勘系列和成矿历史演化轨迹 [M]. 南宁: 广西科学技术出版社. 410 页.
- 杜安道, 何红蓼, 殷宁万. 1994. 辉钼矿的铼-钨同位素地质年龄测定方法研究 [J]. *地质学报*, 68(4): 339-347.
- 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 的失耦现象 [J]. *矿床地质*, 26(5): 572-580.
- 杜安道, 赵敏敏, 王淑贤, 孙德忠, 刘敦一. 2001. Carius 管溶样和负离子热表面电离质谱准确测定辉钼矿铼-钨同位素地质年龄 [J]. *岩矿测试*, 20(4): 247-252.
- 冯佐海, 梁金城, 张桂林, 李晓峰, 邓继新. 2002. 论广西东部中生代花岗岩类岩石谱系单位——以姑婆山—花山花岗岩体为例 [J]. *桂林工学院学报*, 22(3): 333-340.
- 冯佐海. 2003. 广西姑婆山-花山花岗岩体侵位过程及构造解析 (博士学位论文) [D]. 长沙: 中南大学. 87-93.
- 广西区域地质调查院. 2006. 广西贺州市白石顶矿区钨多金属矿详查地质报告 [R].
- 郭令智, 施央申, 马瑞士. 1980. 华南大地构造格架和地壳演化 [A]. 国际交流地质学术论文文集 [C]. 北京: 地质出版社. 109-116.
- 黄汲清, 陈廷愚. 1986. 华南钨锡矿之多旋回成矿问题 [J]. *地质论评*, 33(2): 138-143.
- 简 平, 刘敦一, 孙晓猛. 2003. 滇川西部金沙江石炭纪蛇绿岩 SHRIMP 测年: 古特提斯洋壳演化的同位素年代学制约 [J]. *地质学报*, 77: 217-277.
- 李晓峰, 梁金城, 冯佐海. 1997. 广西海洋山花岗岩体地球化学演变及其形成环境 [J]. *桂林工学院学报*, 17(3): 228-233.
- 刘宝珺, 许效松, 潘杏南. 1993. 中国南方古大陆沉积地壳演化与成矿 [M]. 北京: 科学出版社. 9-33.
- 丘元禧, 张淦昌, 马文璞. 1999. 雪峰山的构造性质与演化——一个陆内造山带的形成演化模式 [M]. 广州: 中山大学出版社. 1-153.
- 任纪舜. 1964. 中国东南部泥盆纪前几个大地构造问题的初步探讨 [J]. *地质学报*, 44(4): 418-431.
- 任纪舜, 陈廷愚, 牛宝贵. 1990. 中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿 [M]. 北京: 科学出版社. 25 页.
- 舒良树. 2006. 华南前泥盆纪构造演化: 从华夏地块到加里东造山带 [J]. *高校地质学报*, 12(4): 418-431.
- 汪金榜, 唐怀禹. 1988. 广西牛塘界白钨矿矿床地质特征及其成因探讨 [J]. *广西地质*, 1: 11-18.
- 张桂林. 2004. 扬子陆块南缘 (桂北地区) 前泥盆纪构造演化的运动学和动力学研究 (博士学位论文) [D]. 长沙: 中南大学. 1-182.
- 周新民. 2003. 对华南花岗岩研究的若干思考 [J]. *高校地质学报*, 9(4): 556-565.
- 朱金初, 张佩华, 谢才富, 张 辉, 杨 策. 2006. 南岭西段花山-姑婆山侵入岩带锆石 U-Pb 年龄格架及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 22(9): 2270-2278.