



# 广西油麻坡钨钼矿床成岩成矿年代学 研究及其地质意义\*

冯定素<sup>1</sup>, 毛景文<sup>1,2</sup>, 陈懋弘<sup>2\*\*</sup>, 张静<sup>1</sup>, 郭申祥<sup>1</sup>, 陈受文<sup>3</sup>, 李忠阳<sup>3</sup>,  
韦子任<sup>3</sup>, 王新宇<sup>4</sup>

(1 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 2 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; 3 广西第六地质队, 广西 贵港 537000; 4 广西地质矿产勘查开发局, 广西 南宁 530023)

**摘要** 广西博白-岑溪断裂带位于钦杭成矿带南段, 既是一条长期活动的地体边界断裂带, 也是一条岩浆活动频繁的 W-Mo-Sn-Pb-Zn-Sb-Au-Ag 多金属成矿带。文章以该带中的广西博白县油麻坡砂卡岩型钨钼矿床为研究对象, 在详细的岩性鉴别和划分的基础上, 对区内花岗岩类进行了单颗粒锆石 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年, 获得深灰色花岗斑岩的等时线年龄为(479.7±3.9) Ma, 灰色黑云母花岗闪长岩为(109.7±1.1) Ma, 浅灰色细粒白云母花岗岩为(103.3±1.2) Ma。辉钼矿 Re-Os 测年获得加权平均年龄为(97.4±1.9) Ma。由此可见, 油麻坡岩体为一个复式岩体, 由早奥陶世(加里东期)的花岗斑岩和早白垩世(燕山晚期)的黑云母花岗闪长岩和细粒白云母花岗岩组成, 其中, 黑云母花岗闪长岩构成油麻坡岩体的主体。钨钼矿形成于早白垩世晚期(即燕山晚期), 与黑云母花岗闪长岩和白云母花岗岩密切相关。这些高精度测年数据的获得, 进一步表明博白断裂带是一条长期活动的断裂, 其在加里东期已经活动, 并伴有岩浆岩的侵位。燕山晚期, 该断裂重新复活, 并导致大量的岩浆活动和一定强度的 W-Mo-Sn-Pb-Zn-Sb-Au-Ag 成矿作用, 形成由多个大-中型矿床组成的多金属成矿带。博白-岑溪成矿带属于华南 100~80 Ma 大规模成矿的一部分, 成矿背景与华南地区白垩纪的地壳伸展、钦杭成矿带的再次裂陷有关。

**关键词** 地球化学; LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄; 辉钼矿 Re-Os 年龄; 油麻坡钨钼矿床; 广西博白-岑溪断裂带; 钦杭成矿带

中图分类号: P618.65; P618.67

文献标志码: A

## Geochronology of Youmapo W-Mo deposit in Guangxi and its geological significance

FENG DingSu<sup>1</sup>, MAO JingWen<sup>1,2</sup>, CHEN MaoHong<sup>2</sup>, ZHANG Jing<sup>1</sup>, GUO ShenXiang<sup>1</sup>, CHEN ShouWen<sup>3</sup>,  
LI ZhongYang<sup>3</sup>, WEI ZiRen<sup>3</sup> and WANG XinYu<sup>4</sup>

(1 School of Earth Science and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 3 No. 6 Geological Party of Guangxi, Guigang 537000, Guangxi, China; 4 Guangxi Bureau of Geology and Mineral Prospecting and Exploitation, Nanning 530023, Guangxi, China)

\* 本文受国家重点基础研究发展计划 973 课题(编号: 2012CB416704)和广西地矿局部门预算前期地质勘查项目(编号: 桂地矿地[2014]17、桂地矿科[2015]43号)资助

第一作者简介 冯定素, 女, 1991 年生, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。Email: fengdingsu@cugb.edu.cn

\*\* 通讯作者 陈懋弘, 男, 1971 年生, 研究员, 主要从事矿床学研究。Email: mhchen666@163.com

收稿日期 2016-03-25; 改回日期 2016-04-15。秦思婷编辑。

## Abstract

The Bobai-Cenxi fault belt in Guangxi is located in the southern section of the Qinzhou Bay-Hangzhou Bay (Qin-Hang) metallogenic belt. It is not only a long-term active boundary fault zone but also a W-Mo-Sn-Pb-Zn-Sb-Au-Ag polymetallic metallogenic belt with frequent magmatic activities. Choosing the Youmapo skarn type tungsten molybdenum deposit in Bobai County of Guangxi along the Qin-Hang metallogenic belt as the research object, the authors conducted zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of these granitoids on the basis of the detailed division of magmatite lithology. The results show that the zircon U-Pb age of the dark gray granite porphyry, gray biotite granodiorite and grayish muscovite granite are  $(479.7 \pm 3.9)$  Ma,  $(109.7 \pm 1.1)$  Ma, and  $(103.3 \pm 1.2)$  Ma, respectively. The molybdenite Re-Os dating was also carried out for metallogenic epoch, and the result is  $(97.4 \pm 1.9)$  Ma. These high precision dating data suggest that the Youmapo stock is a multiple stock, which consists of granite porphyry of early Ordovician (Caledonian) as well as biotite granodiorite and muscovite granite of early Cretaceous. Biotite granodiorite makes up the bulk of Youmapo stock. The W-Mo deposit was formed in the late Early Cretaceous (i. e., late Yanshanian), and closely related to biotite granodiorite and muscovite granite. These high precision dating data also show that Bobai-Cenxi fault zone is a long-term active fault which was already active in Caledonian and accompanied by the emplacement of magmatic rocks. This fault reactivated in the late Yanshanian, which led to magmatic activities and W-Mo-Sn-Pb-Zn-Sb-Au-Ag mineralization. Overall, the Bobai-Cenxi metallogenic belt belongs to large-scale mineralization during 100 ~ 80 Ma in South China. The mineralization background was related to the crustal extension of South China in Cretaceous and the second time rift-depression of the Qinzhou Bay-Hangzhou Bay metallogenic belt.

**Key words:** geochemistry, LA-ICP-MS zircon U-Pb age, molybdenite Re-Os age, Youmapo W-Mo deposit, Bobai-Cenxi fault zone in Guangxi, Qinzhou Bay-Hangzhou Bay metallogenic belt

钦杭结合带是扬子与华夏两个古陆于新元古代碰撞拼接所形成的古板块结合带(水涛,1987;李孝全等,1994;杨明桂等,1997;毛景文等,2011),同时,也是一条重要的多金属成矿带(即钦杭成矿带),但是将它作为一个独立成矿单元的研究才刚刚开始(周永章等,2015)。目前,学者们认为钦杭结合带可划分为北、中、南3段(周永章等,2012;2015),其中传统的南岭成矿带与中段重叠。

博白-岑溪断裂带位于广西东南部,属于钦杭结合带的南段,是一条重要的边界断裂(广西壮族自治区地质矿产局,1985;周永章等,2015),南东为云开地块,北西为博白坳陷(图1)。作为华南地区重要的边界断裂之一,其在地质历史演化过程中经历了多次构造运动和岩浆活动。至加里东运动以来,经历了多次挤压和伸展。特别是燕山晚期,区域伸展作用明显加强,并伴随大规模的岩浆活动及成矿事件,形成一条W-Mo-Sn-Pb-Zn-Sb-Au-Ag多金属成矿带(陈毓川等,1990;毛景文等,2004)。其中,在断裂带的西南段形成了一系列的大-中型矽卡岩型钨钼矿

床(图2),包括油麻坡钨钼矿床、安垌钨钼矿床、三叉冲钨钼矿床、六苏钨钼矿床、大坡钨钼矿床等。这些钨钼矿床均与花岗岩有密切关系,如与黑云母花岗闪长斑岩及黑云母斜长花岗斑岩密切相关的安垌钨钼矿床(傅勇等,2005),与黑云母花岗闪长斑岩相关的三叉冲钨钼矿床(叶振广,2005),与黑云母花岗岩、花岗闪长岩相关的米场(六苏-莫村)钨钼矿床(钟卡彬,2007)等。

广西博白县油麻坡钨钼矿床是博白-岑溪断裂带上一个与花岗岩类有关的大型矽卡岩型钨钼矿床,前人仅对矿床地质特征进行了简单描述(付强等,2010;2014;杨拓,2013;王炯辉等,2014),研究程度总体较低。为此,本文在对矿区岩浆岩进行解剖的基础上,重点对花岗岩类进行系统的锆石U-Pb测年和辉钼矿Re-Os测年,以确定成岩成矿时代,进而探讨成矿作用与断裂作用及岩浆活动的关系,为进一步了解钦杭结合带的复杂演化过程及其成岩成矿作用提供资料。

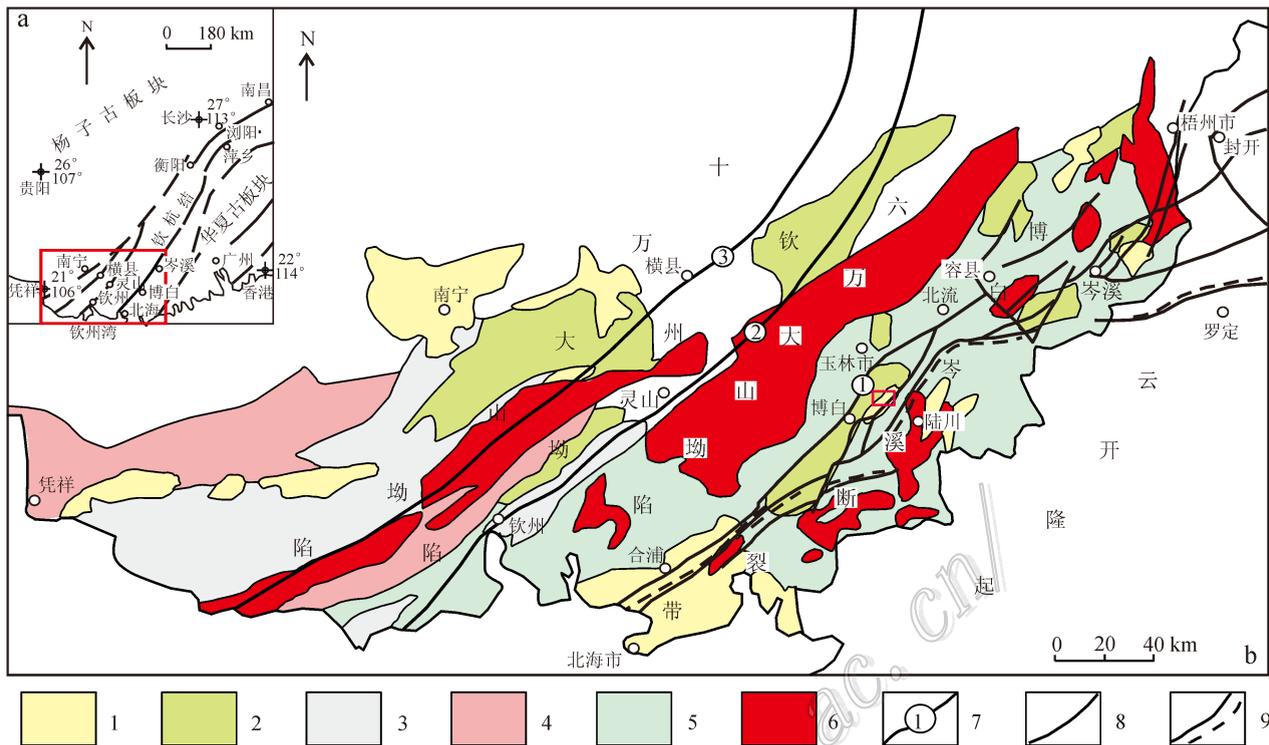


图 1 博白-岑溪断裂带地质略图(据梁新权等, 2005; 罗璋, 1990; 杨明桂等, 1997 修改)

1—古近系陆相沉积; 2—白垩系碎屑岩; 3—上三叠统一侏罗系砂岩、泥岩; 4—上二叠统一中三叠统砾岩、砂岩、泥岩; 5—上二叠统碳酸盐岩; 6—花岗岩; 7—大断裂及编号: ①—博白-岑溪断裂带; ②—灵山-藤县断裂; ③—横县断裂; 8—一般断层; 9—韧性剪切带

Fig. 1 Geological map of Bobai-Cenxi fault (modified after Liang et al., 2005; Luo, 1990; Yang et al., 1997)

1—Palaeogene terrestrial deposit; 2—Cretaceous clastic rocks; 3—Upper Triassic—Jurassic sandstone, mudstone; 4—Upper Permian—Middle Triassic conglomerate, sandstone and mudstone; 5—Upper Permian carbonate; 6—Granite; 7—Large fracture and its serial number:

①—Bobai-Cenxi fault; ②—Lingshan-Tengxian fault; ③—Henxian fault; 8—Common fault; 9—Ductile shear zone

## 1 地质背景

钦杭结合带在大地构造上属于扬子与华夏 2 个古陆于新元古代碰撞拼接所形成的古板块结合带(水涛, 1987; 杨明桂等, 1997; 2009; 毛景文等, 2011), 尽管学者们对其位置、范围、拼合方式和过程等还有争论, 但普遍认为新元古代早期伴随着古华南的闭合, 扬子与华夏板块碰撞对接, 成为 Rodinia 大陆的一部分。聚合不久, 由于受 Rodinia 超大陆裂解事件的影响, 该带重新裂陷, 形成震旦纪—早古生代的深海槽。加里东运动时期, 除钦防地区外, 海槽关闭, 伴随强烈的岩浆活动和变质作用, 使扬子与华夏板块再次对接, 形成统一的华南大陆。三叠纪华南大陆发生了由特提斯构造域向古太平洋构造域的体制转换。中晚侏罗世开始, 由于古太平洋板

块向亚洲大陆的俯冲, 华南东南部发生强烈的陆内伸展, 钦杭结合带重新复活, 形成一系列岩浆岩和相关的多金属矿产, 构成了一个罕见的板内多金属成矿带——钦杭成矿带(毛景文等, 2011; 徐德明等, 2015)。

博白-岑溪断裂带属于钦杭结合带南部的边界断裂, 展布于六万大山、大容山与云开大山之间, 是一条斜贯桂东南的巨型 NEE 向断裂带(图 1)。作为钦杭结合带的一部分, 该断裂带在加里东期为扬子与华夏板块的碰撞接合带, 导致断裂带东南部的云开地块出现大量的深熔花岗岩和剪切变形带, 伴随大量的岩浆活动。海西期—印支期断裂带西北部的钦防残余海槽封闭, 形成大容山-六万大山岩浆岩。该断裂带在燕山期重新复活, 形成裂陷盆地, 导致大量岩浆活动和成矿作用。因此, 博白-岑溪断裂带的演化历史就是钦杭结合带演化过程的一个缩影。

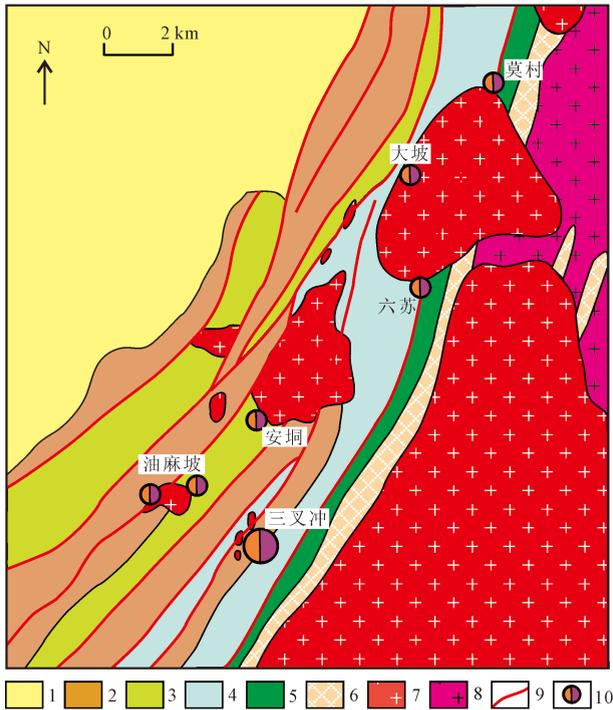


图2 油麻坡钨钼矿床区域地质图(据陈受文等,2013)

- 1—白垩系—古近系砾岩; 2—泥盆系碎屑岩及片岩; 3—志留系片岩夹砂卡岩; 4—奥陶系千枚岩; 5—寒武系片岩及片麻岩; 6—元古宇混合岩; 7—燕山期花岗岩; 8—加里东期花岗岩; 9—断层; 10—钨钼矿床

Fig. 2 Regional geological map of the Youmapo

W-Mo deposit(modified after Chen et al., 2013)

- 1—Cretaceous-Palaeogene conglomerate; 2—Devonian clastic sedimentary rocks and schist; 3—Silurian schist and skarn; 4—Ordovician phyllite; 5—Cambrian schist and gneiss; 6—Proterozoic migmatite; 7—Yanshanian granite; 8—Caledonian granite; 9—Faults; 10—W-Mo deposit

博白-岑溪断裂带以NE向那车坳-莲都大断裂为骨干,具多组分复合与多旋回活动特点,主要由形成于志留纪的NEE向断裂、形成于泥盆纪的NE向断裂和形成于白垩纪的NNE向断裂,通过利用、抑制、改造等反复接合而成(罗璋,1990)。三者于SW向收敛,向NE向撒开,强度变弱。NEE向断裂最早于志留纪出现,广西运动时出现了NE向断裂的雏形,泥盆纪时进一步扩展成为规模巨大的主干断裂。在此过程中,部分利用和改造了NEE向断裂。华力西期—印支期及燕山早期的活动居主导地位,其他2组断裂活动渐弱,古近纪后几乎停止。NNE向断裂于西南段、中段迭加复合在主干断裂上并对之加以利用、改造。这些复合部位控岩、控矿、控震作用都很明显,是断裂带成矿最好的部位(罗璋,1990)。

区内寒武系、奥陶系、志留系、泥盆系及下石炭统出露完整;中石炭统至下二叠统分布零星;缺失上二叠统至中三叠统;上三叠统至第四系为陆相盆地沉积。

博白-岑溪断裂带主要岩浆活动有加里东期、华力西期—印支期和燕山期,其中,最重要的为加里东期和燕山期。加里东期以中性岩浆为主的海底火山喷发及比较强烈的中酸性和酸性岩浆的侵入为主。燕山晚期则以中酸性-酸性岩浆侵入为主,形成大桥(陆川)、柏丫、米场、平塘、油麻坡、三叉冲等岩体(图2)(广西壮族自治区地质矿产局,1985),且在岩体内外接触带均发现了钨钼锡矿体。

## 2 矿床地质特征

### 2.1 矿床地层

矿区主要出露志留系下统大岗顶组( $S_1d^3$ )、泥盆系下统莲花山组( $D_1l$ )、那高岭组( $D_1n$ )、郁江组( $D_1y$ )和中统信都组( $D_2x$ )(图3),它们均不同程度遭受了区域变质及后期交代作用。

由古至新为:志留系下统大岗顶组第三段( $S_1d^3$ ),出露于矿区西南及东南边部,主要岩性为浅黄色-浅紫红色绢云石英片岩夹石英绢云片岩,部分钨钼矿体赋存于该层位中,厚度大于500m;泥盆系下统( $D_1l$ )主要出露莲花山组、那高岭组、郁江组地层。其中,莲花山组分为上、下两段,莲花山组下段( $D_1l^1$ )主要为绢云石英片岩、石英片岩、石英岩,中部局部夹砂卡岩和石英绢云片岩、绢云片岩,在矿区南西部可见底部的变斑状石英片岩或绢云石英片岩与下伏地层志留系下统大岗顶组第三段( $S_1d^3$ )呈不整合接触,IV、V号钨矿体赋存于该层位中,厚度150~180m;莲花山组上段( $D_1l^2$ )北东段为绢云石英片岩、黑云石英片岩夹石英片岩,南西段为石英岩、石英片岩夹绢云石英片岩、石英绢云片岩,厚度100~200m;那高岭组( $D_1n$ )出露绢云石英片岩、石英片岩、石英岩,局部夹石英绢云片岩、石英二云片岩和二云片岩,厚度120~150m;郁江组( $D_1y$ )为矿区主要赋矿层位,部分地段由于岩体侵入出露不全,主要岩性为绢云片岩、石英绢云片岩及砂卡岩;深部为砂卡岩、大理岩、白云岩,夹少量石英绢云片岩、绢云片岩等。大理岩在地表出露很少,多埋深在0m标高以下,钨矿体主要赋存于该层位的砂卡岩中,地层厚度由地表往深部逐渐变厚,厚度50~200m;泥盆

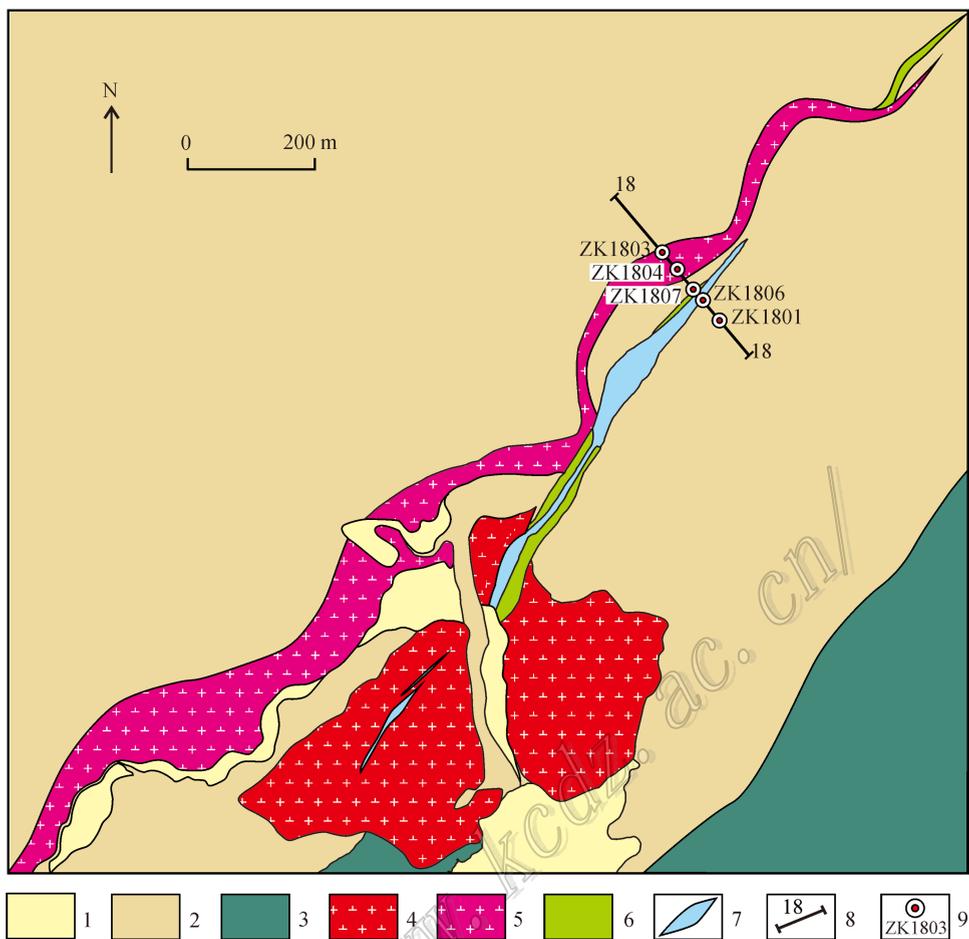


图 3 油麻坡钨钼矿床地质图

1—第四系；2—泥盆系石英片岩、大理岩；3—志留系绢云石英片岩；4—燕山期花岗岩；5—花岗斑岩；6—矽卡岩；7—钨钼矿脉；8—勘探线及编号；9—钻孔及编号

Fig. 3. Geological map of the Youmapo W-Mo deposit

1—Quaternary; 2—Devonian quartz schist and marble; 3—Silurian sericite quartz schist; 4—Yanshanian granite; 5—Granite porphyry; 6—Skarn; 7—W-Mo ore vein; 8—Exploration line and its numbers; 9—Drill hole and its numbers

系中统信都组 ( $D_2x$ ) 主要分为上、下两段, 信都组下段 ( $D_2x^1$ ) 出露地层为轻变质-变质粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、粉砂岩、细砂岩。北东段可见较多板岩、斑点状板岩、夹含炭泥岩及变质石英砂岩, 厚度大于 180 m。信都组上段 ( $D_2x^2$ ) 只见下部, 为轻变质泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、含碳泥岩等, 厚度大于 100 m。

## 2.2 矿床构造

矿区位于博白-岑溪断裂带南西侧, 构造线方向为 NE-SW。区内为一单斜构造, 褶皱不发育。岩层走向 NE 向, 倾向 NW 向, 倾角  $40\sim 80^\circ$ , 局部产状倒转。断裂以 NE 向逆断层为主, NW 向次之, NW 向断层切割 NE 向断层。其中, NE 向断层成群成带

密集分布, 间距 200~1000 m, 断层延伸长, 深度大, 为本区主要控岩控矿构造。规模较大的断裂有陆尾-顶古口断裂、大塘尾-朱屋塘断裂。

## 2.3 岩浆岩

矿区内出露岩体主要为油麻坡岩体, 出现于矿区东南部, 岩体出露面积约  $1.3\text{ km}^2$ , 呈小岩株产出, 侵入于志留系及泥盆系中(图 2、图 3), 与围岩接触面呈波状弯曲, 产状外倾, 倾角  $44\sim 60^\circ$ 。岩性以灰色花岗闪长岩为主, 岩石普遍具热液蚀变现象, 常见有石英微细脉及黄铁矿石英脉充填, 局部伴有辉钼矿化、硅化、云英岩化、绢云母化。

矿体发育于岩体西部的外接触带的地层中, 沿 NE 向断层有长条状的深灰色花岗斑岩出露。钻孔

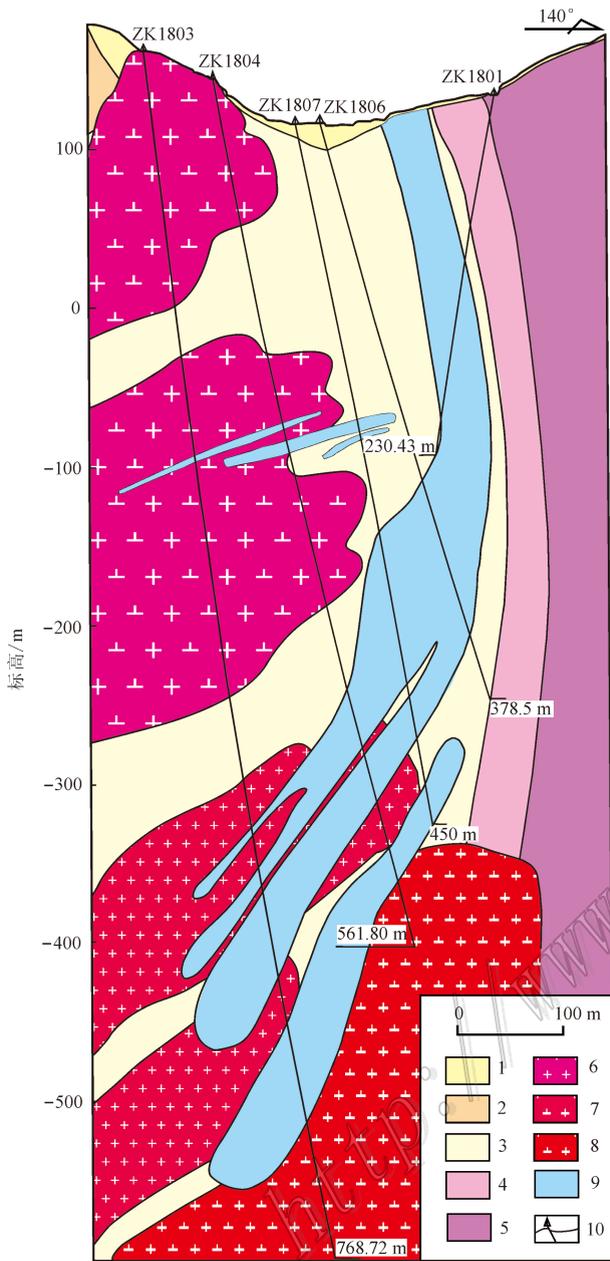


图4 油麻坡钨钼矿床18线剖面图

1—第四系；2—泥盆系中统下组变质粉砂泥岩、板岩；3—泥盆系中统下组大理岩、矽卡岩夹页岩；4—泥盆系下统上组绢云石英片岩、石英片岩；5—泥盆系下统中组绢云石英片岩；6—花岗斑岩；7—白云母花岗岩；8—花岗闪长岩；9—钨钼矿体；10—钻孔  
Fig. 4 Geological section along No. 18 line in the Youmapo W-Mo deposit

1—Quaternary; 2—Lower Formation of Middle Devonian metamorphic silt mudstone and slate; 3—Silurian schist Lower Formation of Middle Devonian marble, skarn and shale; 4—Upper Formation of Lower Devonian sericite quartz schist and quartz schist; 5—Middle Formation of Lower Devonian sericite quartz schist; 6—Granite porphyry; 7—Muscovite granite; 8—Biotite granodiorite; 9—W-Mo orebody; 10—Drill hole

揭露其深部有灰色花岗闪长岩和浅灰色细粒白云母花岗岩侵入,位于-300~-400 m标高以下。围岩蚀变有角岩化、矽卡岩化、方解石化(陈受文等,2013)。

## 2.4 矿体特征

矿区共发现钨矿体13个、钼矿体17个(图4)、硫矿体3个。矿体规模相差悬殊,最大的为I号钨矿体,占矿区总资源量的84%,其次为IV号、V号矿体。各矿体产状基本相似,走向NE向,倾向NW向,少数于地表倒转倾向SE向,往深部逐渐转向NW向。矿体产状与地层总体产状基本一致,呈透镜状、似层状产出。钨、硫矿体(包括部分钼矿体)产于泥盆系下统矽卡岩带中。钼矿体主要产于花岗闪长岩中,部分产于下泥盆统绢云石英片岩中。其中,I号矿体为矿区最大规模的矿体,产于泥盆系下统郁江组( $D_{1y}$ )的矽卡岩中,矿体厚度1.47~90.07 m,平均36.06 m,除主要组分钨以外,还共(伴)生有用钼、硫、铜、铋等组分。V号矿体规模仅次于I号矿体,产于泥盆系下统莲花山组下段( $D_{1l}^1$ )的矽卡岩中,矿体厚度0.38~16.40 m,平均8.71 m,矿石主要有用组分为钨,其他共(伴)生有用元素含量较低或分布不均匀,工业利用价值低或没有利用价值。IV号矿体规模仅次于I号、V号矿体,产于泥盆系下统莲花山组下段( $D_{1l}^1$ )的矽卡岩中,矿体厚度5.45~7.21 m,平均6.43 m,除主要有用组分钨以外,还共(伴)生有用组分钼、硫、铜、铋等(陈受文等,2013)。

根据矿石矿物共生组合、结构构造特征以及各种矿物之间相互交代、穿插关系,油麻坡钨钼矿床的形成可划分为早矽卡岩阶段、晚矽卡岩阶段、早期硫化物阶段和晚期硫化物阶段。依据野外宏观地质现象观察及室内镜下矿物鉴定,研究区矽卡岩钨钼矿成矿作用主要发生在热液成矿期。其中,早矽卡岩阶段主要生成石榴子石、透闪石;晚矽卡岩阶段主要生成白钨矿、角闪石、阳起石、绿帘石;早期硫化物阶段主要生成辉钼矿、磁黄铁矿、黄铁矿、黄铜矿等金属矿物,另还有大量绿泥石、黑云母生成;晚期硫化物阶段主要生成石英、方解石、黄铁矿、黄铜矿等。

## 3 样品采集和测试方法

### 3.1 样品位置和特征

根据矿段和岩性的不同,分别采集了3件岩浆岩样品和2件辉钼矿样品。

花岗斑岩和细粒白云母花岗岩采自 ZK1804 钻孔,前者为 50~95 m 处,后者为 557 m 处,花岗斑岩硅化强烈。黑云母花岗闪长岩采自 ZK1803 钻孔 733 m 处,岩石黑云母化强烈。

**花岗斑岩** 深灰色,斑状结构,块状构造(图 5a、5b)。斑晶含量约为 45%,主要成分为石英(约 23%,粒状,粒度约 2.5~4 mm)、钾长石(10%)、斜长石(约 7%,宽板状,粒度 2~3 mm,可见聚片双晶)、黑云母(约占 5%)。基质主要为绢云母(20%)、

斜长石(15%)、石英(10%)、透闪石(5%)和绿泥石(3%),常见黄铁矿(2%)及少量黄铜矿。岩石蚀变较强烈,主要发生矽卡岩化、硅化、黑云母化。斜长石斑晶普遍发生绢云母化和硅化。黑云母斑晶也普遍蚀变,析出铁质和石英。岩石中常见细粒的黑云母,表现为细粒黑云母分布于石英斑晶四周裂隙中,或者沿斜切斜长石的裂隙充填(图 5c),证明细粒黑云母为后期蚀变而成。岩石中可见大量的透闪石-石英脉沿岩石节理充填(图 5d)。化学成分:  $w(\text{SiO}_2)$

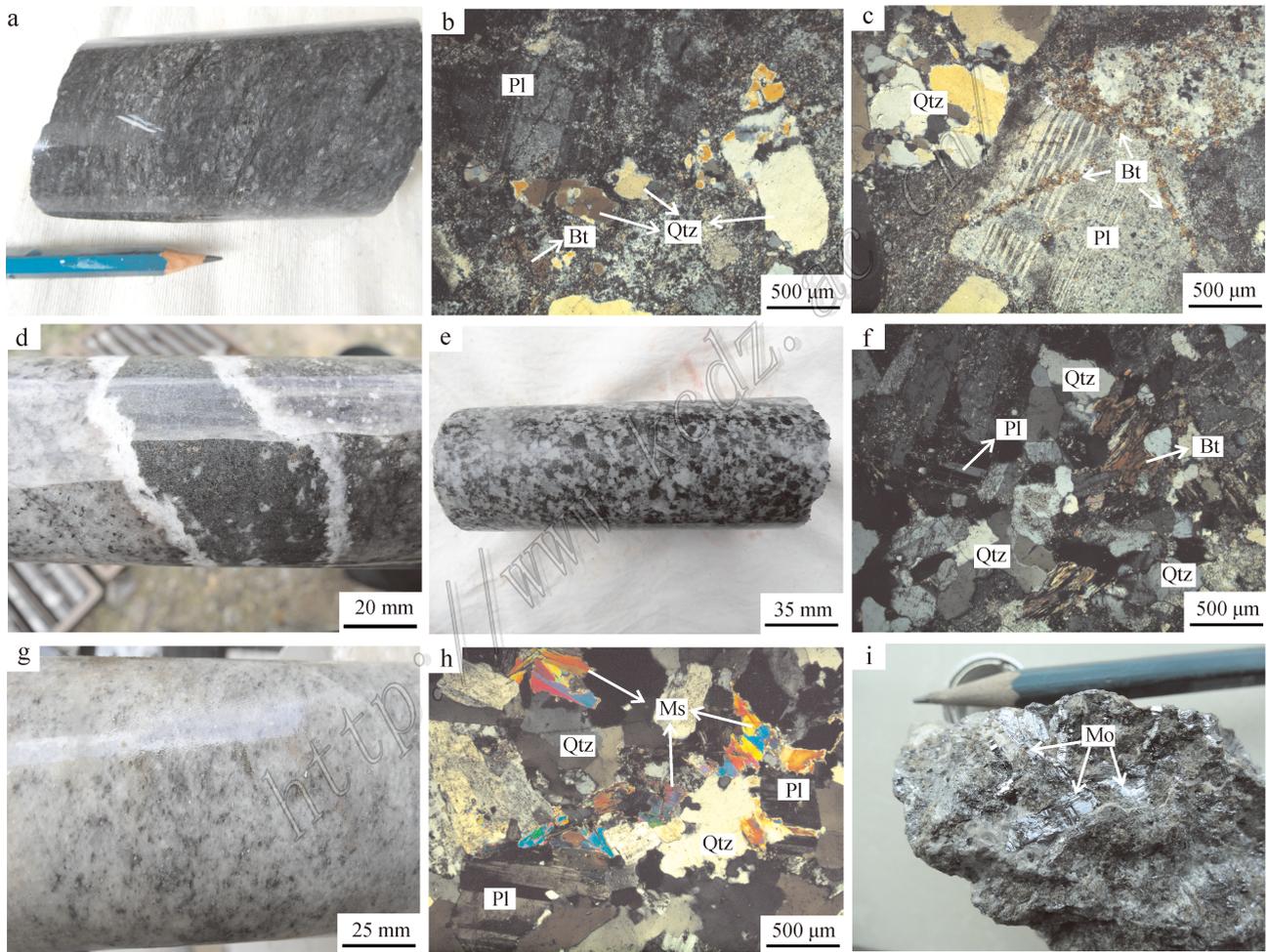


图 5 油麻坡钨钼矿床花岗质岩石野外及镜下照片

a. 花岗斑岩(ZK1804 钻孔, 50~95 m); b. 花岗斑岩显微结构(正交偏光); c. 后期黑云母沿斜切斜长石的裂隙充填; d. 花岗斑岩中的透闪石-石英脉; e. 黑云母花岗闪长岩(ZK1803 钻孔 733 m 处); f. 黑云母花岗闪长岩显微结构(正交偏光); g. 细粒白云母花岗岩(ZK1804 钻孔, 557 m); h. 细粒白云母花岗岩显微结构(正交偏光); i. 含辉钼矿矽卡岩  
Mo—辉钼矿; Pl—斜长石; Ms—白云母; Bt—黑云母; Qtz—石英

Fig. 5 Photos of magmatic rock and photomicrographs for the granites from the Youmapo W-Mo deposit

a. Granite porphyry (drill hole ZK1804, 50~95 m); b. Microphotographs of granite porphyry (crossed nicols); c. Late biotite filling fractures of anorthose; d. Tremolite-quartz vein in granite porphyry; e. Biotite granodiorite (drill hole ZK1803, 733 m); f. Micrographs of biotite granodiorite (crossed nicols); g. Muscovite granite (drill hole ZK1804, 557 m); h. Micrographs of muscovite granite (crossed nicols); i. Skarn containing molybdenite

Mo—Molybdenite; Pl—Plagioclase; Ms—Muscovite; Bt—Biotite; Qtz—Quartz

为 70.69%、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  为 14.54%、 $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$  为 0.08%、 $w(\text{FeO})$  为 2.34%、 $w(\text{CaO})$  为 2.29%、 $w(\text{MgO})$  为 1.43%、 $w(\text{K}_2\text{O})$  为 3.43%、 $w(\text{Na}_2\text{O})$  为 3.39%、 $w(\text{TiO}_2)$  为 0.28%、 $w(\text{MnO})$  为 0.06%、 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$  为 0.09%。

黑云母花岗闪长岩 灰色,花岗结构,块状构造(图 5e、5f)。主要成分为斜长石(约 35%,宽板状,粒度约 1~2.5 mm,大部分发生绢云母化)、石英(约 30%,粒度约 2~3 mm)、黑云母(约 15%,具一定程度的绿泥石化)、角闪石(约 7%)、辉石(约 3%)。局部可见浸染状黄铁矿-磁黄铁矿-黄铜矿化。化学成分: $w(\text{SiO}_2)$  为 67.40%、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  为 15.72%、 $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$  为 0.15%、 $w(\text{FeO})$  为 2.77%、 $w(\text{CaO})$  为 3.97%、 $w(\text{MgO})$  为 1.41%、 $w(\text{K}_2\text{O})$  为 2.98%、 $w(\text{Na}_2\text{O})$  为 2.53%、 $w(\text{TiO}_2)$  为 0.31%、 $w(\text{MnO})$  为 0.04%、 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$  为 0.18%。

细粒白云母花岗岩 浅灰色,细粒花岗结构,块状构造(图 5g、5h)。主要成分为长石(约 35%,粒度约 1~2 mm)、石英(约 33%,粒度约 1~2 mm)、白云母(约 17%)、角闪石(约 2%)。还含少量石榴子石以及少量副矿物褐帘石、锆石(约 3%)。局部含浸染状黄铁矿-黄铜矿-方铅矿。化学成分: $w(\text{SiO}_2)$  为 75.53%、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  为 13.45%、 $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$  为 0.40%、 $w(\text{FeO})$  为 0.72%、 $w(\text{CaO})$  为 0.49%、 $w(\text{MgO})$  为 0.09%、 $w(\text{K}_2\text{O})$  为 3.78%、 $w(\text{Na}_2\text{O})$  为 4.37%、 $w(\text{TiO}_2)$  为 0.04%、 $w(\text{MnO})$  为 0.26%、 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$  为 0.02%。

对比上述 3 种岩浆岩样品可以发现,花岗斑岩具有特征的斑状结构,呈深灰色,而黑云母花岗闪长岩与细粒白云母花岗岩则为花岗结构,颜色较浅,细粒白云母花岗岩蚀变较弱,黑云母花岗闪长岩显示弱的透闪石化,而花岗斑岩蚀变强烈,以典型的细粒黑云母化为标志。

2 件辉钼矿样品分别采自坑道中的矽卡岩型矿石(图 5i)及石英脉型矿石中。

### 3.2 测试方法

上述各样品均送河北省廊坊市诚信地质服务有限公司进行常规的重选和磁选,然后在双目镜下挑纯。

#### 3.2.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年

将选纯的锆石置于环氧树脂中,待固结后抛磨

至锆石粒径约二分之一,使锆石内部充分暴露,制成环氧树脂样品靶,然后在中国地质科学院矿产资源研究所电子探针实验室进行阴极发光和背散射照像,研究锆石颗粒的显微结构,确定待测锆石部位。

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年测试在中国地质科学院矿产资源研究所完成,测试仪器为 Finnigan Neptune 型 MC-ICP-MS 及与之配套的 New wave UP 213 激光剥蚀系统。激光剥蚀所用斑束直径为 25  $\mu\text{m}$ ,频率为 10 Hz,能量密度约为 2.5  $\text{J}/\text{cm}^2$ ,以 He 为载气。信号较弱的 $^{207}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}$ 、 $^{204}\text{Pb}$ (+ $^{204}\text{Hg}$ )、 $^{202}\text{Hg}$  用离子计数器(multion-counters)接收, $^{208}\text{Pb}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 、 $^{238}\text{U}$  信号用法拉第杯接收,实现了所有目标同位素信号的同时接收,并且不同质量数的峰基本上都是平坦的,进而获得高精度的数据。均匀锆石颗粒的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  测试精度在  $2\sigma$  左右。LA-ICP-MS 激光剥蚀采样采用单点剥蚀的方式,数据分析前用锆石 GJ-1 进行仪器调试,使之达到最优状态。锆石 U-Pb 定年以锆石 GJ-1 为外标, $w(\text{U})$ 、 $w(\text{Th})$  以锆石 M127( $w(\text{U})=923 \times 10^{-6}$ 、 $w(\text{Th})=439 \times 10^{-6}$ ,Th/U 比值为 0.475; Nasdala et al., 2008) 为外标进行校正。测试过程中,在每测定 10 个样品前后重复测定 2 个锆石 GJ-1,对样品进行校正,并测量一个锆石标样 Plesovice,观察仪器的状态,以保证测试的精确度。数据处理采用 ICPMSDataCal 程序(Liu et al., 2010)。锆石年龄谐和图用 Isoplot 3.0 程序获得,表达式中所列单个数据点的误差均为  $1\sigma$ ,谐和年龄具 95% 的置信度。详细测试实验过程可参照侯可军等(2009)。

#### 3.2.2 辉钼矿 Re-Os 定年

将选纯的辉钼矿样品研磨至 200 目,以避免大颗粒辉钼矿中由于 Re 和 Os 的失耦而引起的测年误差(杜安道等,1994;2001;屈文俊等,2003;李超等,2009),实验过程主要包括分解样品、蒸馏分离钼、萃取分离 Re、质谱测定等 4 个步骤,采用美国 TJA 公司生产的 TJA X-series 电感耦合等离子体质谱仪测定同位素比值。

本次实验的全流程空白为:Re = 0.0038 ng,普 Os = 0.0002 ng,  $^{187}\text{Os}$  = 0.0002 ng。实验流程由 JDC 监控,测定的模式年龄为(139.0  $\pm$  2.0) Ma,对应的年龄推荐值为(139.6  $\pm$  3.8) Ma,两者在误差范围内完全一致,表明本次测试的数据是准确可靠的。

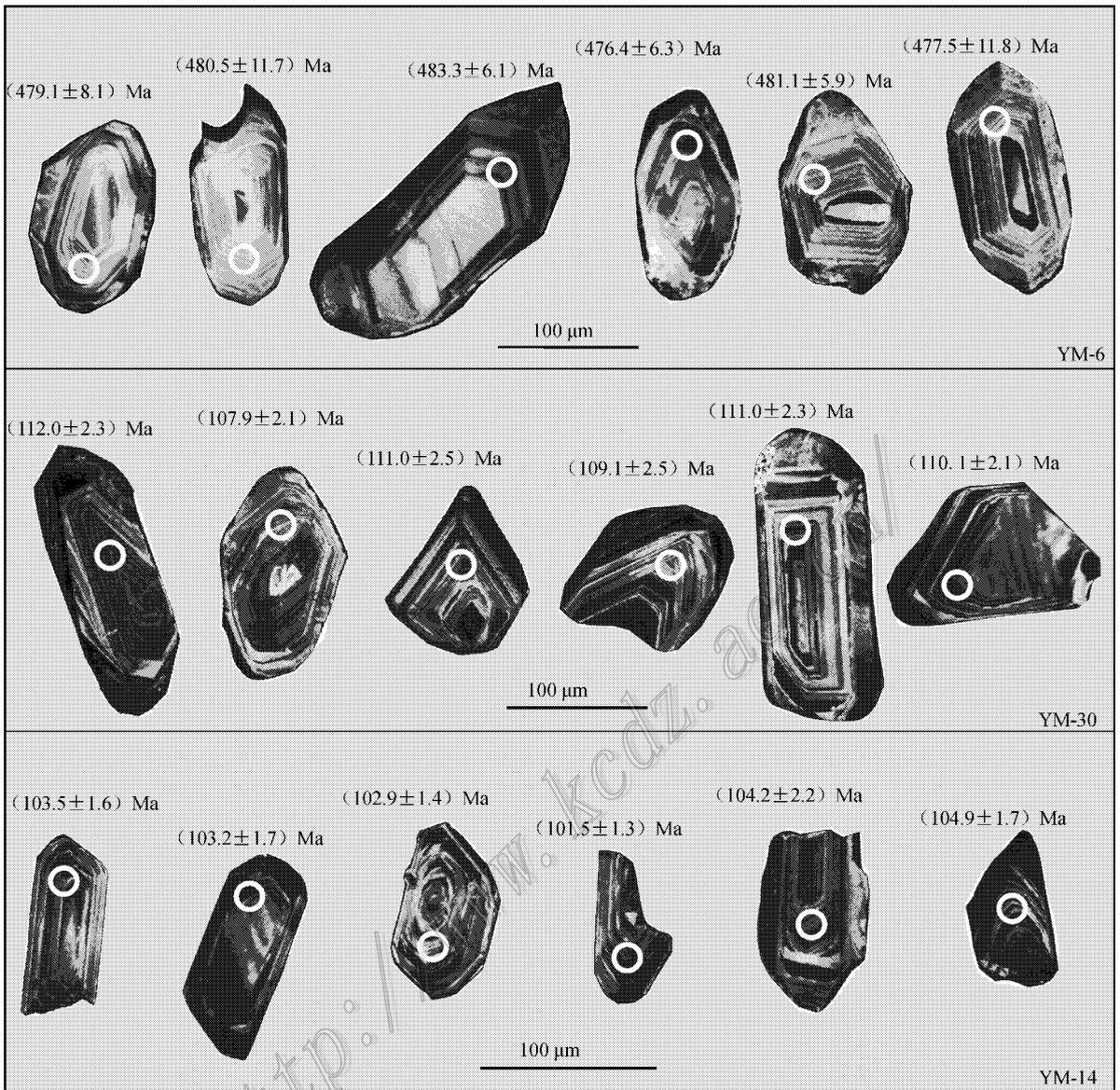


图 6 油麻坡钨钼矿床代表性锆石 CL 图像及测年结果  
圆圈代表分析点位置及编号,数值代表该点的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄

Fig. 6 CL images of representative zircons from the Youmapo ore district

Site of analyzed point Circle represents site of analyzed point and its serial number, numerical value represents <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U age

## 4 测试结果

### 4.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄

3 个样品的锆石均为无色透明,晶体自行程度较好,绝大部分呈典型的长柱状晶形,少量呈短柱状晶形。在阴极发光图像(图 6)中,大部分颗粒具有清晰的岩浆振荡环带结构,属于典型的岩浆结晶锆石。

对各样品分别选择环带结构清晰的约 20 个代

表性锆石颗粒进行 U-Pb 年龄测定,各样品中除部分测点的谐和度较低而不参加计算外,其余测点的测试结果如表 1 所示。

花岗斑岩中的锆石(YM-6)花岗斑岩的阴极发光图像显示,锆石呈无色,长柱状,颗粒较大,长度 60~240 μm,长宽比约 2~4,裂隙少,晶体自行程度好,绝大部分具有密集而清晰的岩浆振荡环带。 $\alpha(U)$ 为(12 064~99 796)×10<sup>-6</sup>, $\alpha(Th)$ 为(6293~112 762)×10<sup>-6</sup>,Th/U 比值为 0.27~1.17(平均

表 1 油麻坡钨钼矿床锆石 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果

Table 1 Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating results of the Youmapo W-Mo deposit

样品名称 及样号	测点号	$\epsilon_{\text{U}}(\text{Pb})/10^{-6}$	$\epsilon_{\text{U}}(^{232}\text{Th})/10^{-6}$	$\epsilon_{\text{U}}(^{238}\text{U})/10^{-6}$	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}/\text{Ma}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}/\text{Ma}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}/\text{Ma}$		
						测量值	误差(1 $\sigma$ )	测量值	误差(1 $\sigma$ )	测量值	误差(1 $\sigma$ )	年龄	误差(1 $\sigma$ )	年龄	误差(1 $\sigma$ )	年龄
YM-6-01	680	6293	12064	0.52	0.0605	0.0032	0.6353	0.0316	0.0776	0.0014	620.4	113.7	499.4	19.6	481.5	8.6
YM-6-02	1576	8156	29842	0.27	0.0552	0.0056	0.5758	0.0591	0.0754	0.0017	420.4	223.1	461.8	38.1	468.4	10.5
YM-6-03	2272	30730	39052	0.79	0.0542	0.0040	0.5774	0.0414	0.0774	0.0018	388.9	197.2	462.8	26.6	480.7	10.6
YM-6-04	1264	14047	22368	0.63	0.0564	0.0034	0.5941	0.0359	0.0772	0.0014	477.8	133.3	473.5	22.9	479.1	8.1
YM-6-05	1306	13766	23445	0.59	0.0543	0.0048	0.5801	0.0527	0.0774	0.0020	383.4	198.1	464.5	33.8	480.5	11.7
YM-6-06	2444	14233	47040	0.30	0.0601	0.0029	0.6430	0.0313	0.0777	0.0015	609.3	105.5	504.1	19.4	482.3	9.2
YM-6-07	2227	15134	40895	0.37	0.0569	0.0029	0.6034	0.0302	0.0778	0.0016	487.1	114.8	479.4	19.1	483.0	9.4
YM-6-08	2542	12343	47578	0.26	0.0572	0.0025	0.6170	0.0272	0.0782	0.0009	498.2	98.1	488.0	17.1	485.6	5.6
YM-6-09	4341	34464	78665	0.44	0.0603	0.0026	0.6508	0.0281	0.0779	0.0010	613.0	94.4	509.0	17.3	483.4	6.1
YM-6-10	4973	27838	92289	0.30	0.0574	0.0027	0.6087	0.0264	0.0767	0.0011	509.3	69.4	482.8	16.7	476.4	6.3
YM-6-11	3781	27051	68176	0.40	0.0590	0.0034	0.6196	0.0344	0.0762	0.0011	568.6	124.1	489.6	21.6	473.5	6.6
YM-6-12	3658	27430	64445	0.43	0.0519	0.0027	0.5654	0.0284	0.0786	0.0013	283.4	113.9	455.0	18.5	487.6	7.5
YM-6-13	5575	29092	99796	0.29	0.0545	0.0021	0.5850	0.0197	0.0775	0.0010	390.8	85.2	467.7	12.6	481.1	6.0
YM-6-14	6074	112762	96677	1.17	0.0578	0.0061	0.6100	0.0545	0.0769	0.0020	524.1	202.8	483.6	34.4	477.5	11.8
YM-6-15	2457	37013	41539	0.89	0.0611	0.0064	0.6162	0.0624	0.0731	0.0021	642.6	227.8	487.4	39.2	454.7	12.3
YM-6-16	4958	30568	86914	0.35	0.0516	0.0037	0.5455	0.0362	0.0764	0.0015	333.4	167.6	442.0	23.8	474.8	9.1
YM-30-01	8	447	2437	0.18	0.0432	0.0018	0.1024	0.0053	0.0169	0.0003	-	-	99.0	4.9	107.8	2.0
YM-30-02	9	448	2438	0.18	0.0464	0.0031	0.1117	0.0076	0.0174	0.0003	16.8	155.5	107.5	6.9	111.1	1.7
YM-30-03	10	449	2439	0.18	0.0441	0.0031	0.1078	0.0082	0.0175	0.0004	-	-	103.9	7.5	112.0	2.3
YM-30-04	11	450	2440	0.18	0.0480	0.0033	0.1102	0.0075	0.0167	0.0002	101.9	155.5	106.1	6.9	106.6	2.3
YM-30-05	12	451	2441	0.18	0.0492	0.0033	0.1134	0.0074	0.0169	0.0003	166.8	138.9	109.1	6.7	107.9	2.3
YM-30-06	13	452	2442	0.19	0.0501	0.0030	0.1136	0.0066	0.0166	0.0002	198.2	138.9	109.3	6.0	106.0	2.3

黑云母花  
岗闪长岩  
(YM-30)

续表 1  
Cont. Table 1

样品名称 及样号	测点号	$\frac{\alpha(\text{Pb})}{\alpha(\text{Th})}$ $10^{-6}$	$\frac{\alpha(^{232}\text{Th})}{\alpha(^{238}\text{U})}$ $10^{-6}$	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}/\text{Ma}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}/\text{Ma}$					
					测量值	误差(1 $\sigma$ )	测量值	误差(1 $\sigma$ )	年龄	误差(1 $\sigma$ )	年龄	误差(1 $\sigma$ )	年龄	误差(1 $\sigma$ )		
	YM-30-07	14	453	0.19	0.0489	0.0038	0.1191	0.0096	0.0178	0.0004	142.7	179.6	114.3	8.7	113.6	2.3
	YM-30-08	15	454	0.19	0.0515	0.0024	0.1233	0.0057	0.0176	0.0003	264.9	109.2	118.0	5.2	112.4	2.3
	YM-30-09	16	455	0.19	0.0477	0.0026	0.1129	0.0061	0.0175	0.0003	87.1	122.2	108.6	5.6	111.6	2.3
	YM-30-10	17	456	0.19	0.0525	0.0044	0.1233	0.0105	0.0174	0.0004	305.6	192.6	118.0	9.5	111.0	2.3
	YM-30-11	18	457	0.19	0.0505	0.0035	0.1149	0.0071	0.0171	0.0004	216.7	158.3	110.4	6.5	109.1	2.3
	YM-30-12	19	458	0.19	0.0440	0.0030	0.1052	0.0078	0.0174	0.0004	—	—	101.6	7.2	111.0	2.3
	YM-30-13	20	459	0.19	0.0474	0.0027	0.1105	0.0062	0.0172	0.0003	77.9	120.4	106.4	5.7	110.1	2.3
	YM-30-14	21	460	0.19	0.0479	0.0022	0.1092	0.0051	0.0167	0.0003	100.1	98.1	105.2	4.7	107.1	2.3
	YM-30-15	22	461	0.19	0.0464	0.0024	0.1084	0.0055	0.0172	0.0002	16.8	122.2	104.5	5.0	109.9	2.3
	YM-30-16	23	462	0.19	0.0492	0.0028	0.1163	0.0063	0.0174	0.0002	166.8	131.5	111.7	5.8	111.0	2.3
	YM-30-17	24	463	0.19	0.0470	0.0029	0.1113	0.0065	0.0174	0.0003	55.7	131.5	107.1	5.9	111.4	2.3
	YM-30-18	25	464	0.19	0.0475	0.0033	0.1121	0.0078	0.0173	0.0003	72.3	155.5	107.8	7.1	110.3	2.3
	YM-14-01	21	482	0.38	0.0489	0.0026	0.1097	0.0061	0.0162	0.0003	142.7	125.9	105.7	5.6	103.5	2.3
	YM-14-02	22	483	0.38	0.0632	0.0023	0.1405	0.0052	0.0161	0.0003	716.7	75.9	133.5	4.7	103.2	2.3
	YM-14-03	23	484	0.38	0.0523	0.0020	0.1158	0.0044	0.0161	0.0002	298.2	87.0	111.3	4.0	102.9	2.3
	YM-14-04	24	485	0.38	0.0602	0.0046	0.1320	0.0095	0.0163	0.0003	613.0	164.8	125.9	8.5	104.3	2.3
	YM-14-05	25	486	0.38	0.0544	0.0019	0.1182	0.0039	0.0159	0.0002	387.1	79.6	113.5	3.6	101.5	2.3
	YM-14-06	26	487	0.38	0.0765	0.0070	0.1697	0.0133	0.0163	0.0003	1107.1	178.7	159.1	11.5	104.2	2.3
	YM-14-07	27	488	0.39	0.0535	0.0029	0.1197	0.0064	0.0163	0.0003	350.1	128.7	114.8	5.8	104.2	2.3
	YM-14-08	28	489	0.39	0.0502	0.0023	0.1123	0.0047	0.0164	0.0003	211.2	104.6	108.0	4.3	104.9	2.3

注：“—”表示数据出错。

0.50), 为典型的岩浆锆石比值(吴元保等, 2004), 在一致曲线图(图7a)中, 所获得的16个数据点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $(479.7 \pm 3.9)$  Ma (MSWD=0.64, 置信度为95%)

黑云母花岗闪长岩中的锆石(YM-30) 黑云母花岗闪长岩的阴极发光图像显示, 锆石呈无色, 大部

分为长柱状, 少量为短柱状, 颗粒的粒度不一, 长度为 $40\sim 250\ \mu\text{m}$ , 长宽比约 $2\sim 4$ , 裂隙较少, 晶体自行程度好。 $\alpha(\text{U})$ 为 $(2437\sim 2454)\times 10^{-6}$ ,  $\alpha(\text{Th})$ 为 $(447\sim 464)\times 10^{-6}$ , Th/U 比值 $0.18\sim 0.19$ (平均 $0.19$ )。在一致曲线图(图7b)中, 所获得的18个数据点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $(109.7 \pm 1.1)$

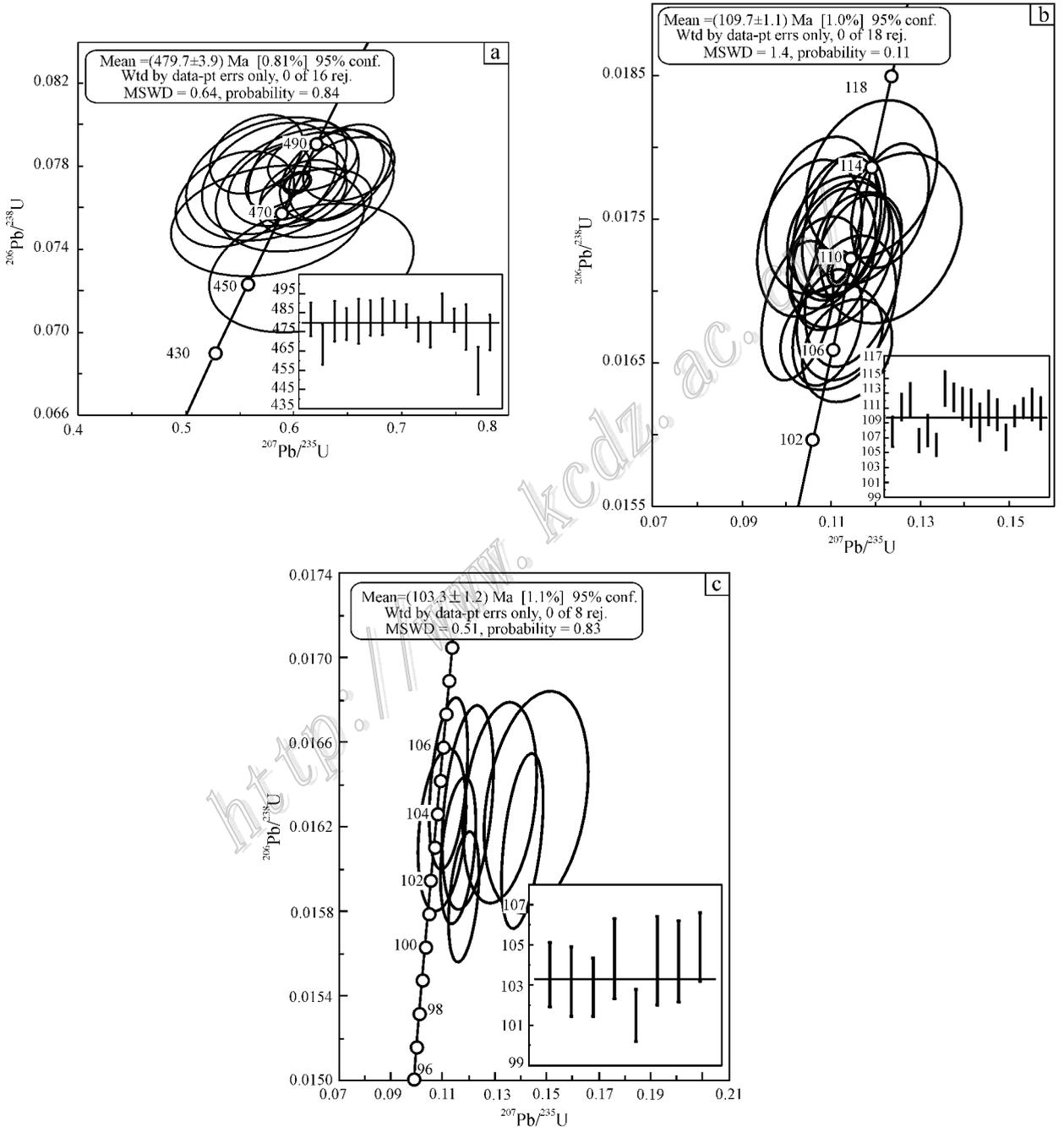


图7 油麻坡钨矿铂床岩岩浆锆石 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 谐和图

a. 油麻坡岩体蚀变花岗斑岩(YM-6); b. 油麻坡岩体黑云母花岗闪长岩(YM-30); c. 油麻坡岩体细粒白云母花岗岩(YM-14)

Fig. 7 LA-ICP-MS U-Pb dating concordia diagram of zircons in magmatic rock from the Youmapo W-Mo deposit

a. Granite porphyry in Youmapo intrusion(YM-6); b. Biotite granodiorite in Youmapo intrusion(YM-30); c. Muscovite granite in Youmapo intrusion(YM-14)

表 2 油麻坡钨钼矿床中辉钼矿 Re-Os 同位素数据

Table 2 Re-Os dating data of molybdenite from the Youmapo W-Mo deposit

样品号	m/g	$\alpha(\text{Re})(\mu\text{g/g})$		$\alpha(\text{普 Os})(\text{ng/g})$		$\alpha(^{187}\text{Re})(\mu\text{g/g})$		$\alpha(^{187}\text{Os})(\text{ng/g})$		模式年龄/Ma	
		测量值	不确定度	测量值	不确定度	测量值	不确定度	测量值	不确定度	测量值	不确定度
YM-1	0.00507	47.29	0.35	0.4316	0.2612	29.72	0.22	47.90	0.40	96.67	1.33
YM-2	0.01038	66.48	0.53	0.5751	0.0579	41.79	0.33	68.46	0.54	98.26	1.36

Ma (MSWD=1.4, 置信度为 95%)。

细粒白云母花岗岩中的锆石(YM-14) 细粒白云母花岗岩的阴极图像显示, 锆石呈无色, 大部分呈短柱状, 颗粒较小, 长度为 30~150  $\mu\text{m}$ , 长宽比约 2~4, 裂隙发育, 晶体自行程度较好, 发育振荡环带。 $\alpha(\text{U})$ 为(1262~1269) $\times 10^{-6}$ ,  $\alpha(\text{Th})$ 为(482~489) $\times 10^{-6}$ , Th/U 比值为 0.38~0.39(平均 0.38)。在一致曲线图(图 7c)中, 所获得的 8 个数据点的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄加权平均值为(103.3 $\pm$ 1.2) Ma (MSWD=0.51, 置信度为 95%)。

上述 3 个样品的  $\alpha(\text{U})$ 、 $\alpha(\text{Th})$  和 Th/U 比值差别较大, 结合岩石和变质特征来看, 三者确实有较大的差别, 说明数据与地质事实吻合、可信。

#### 4.2 辉钼矿 Re-Os 年龄

2 件辉钼矿样品的 Re-Os 同位素测试结果见表 2。2 个样品数值: $\alpha(\text{Re})$ 分别为 47.29  $\mu\text{g/g}$ 、66.48  $\mu\text{g/g}$ ;  $\alpha(\text{普 Os})$ 分别为 0.4316 ng/g、0.5751 ng/g;  $\alpha(^{187}\text{Os})$ 分别为 47.90 ng/g、68.46 ng/g。Re-Os 模式年龄值分别为(96.67 $\pm$ 1.33) Ma、(98.26 $\pm$ 1.36) Ma。采用 ISOPLOT 软件对所获得的 2 个数据进行了加权平均年龄计算, 加权平均年龄为(97.4 $\pm$ 1.9) Ma (MSWD=0.70)。

## 5 讨论

### 5.1 成岩成矿时代

本次工作系统地油麻坡岩体进行了高精度的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年和矿石辉钼矿 Re-Os 测年, 获得油麻坡岩体中深灰色花岗斑岩的等时线年龄为(479.7 $\pm$ 3.9) Ma, 灰色黑云母花岗闪长岩为(109.7 $\pm$ 1.1) Ma, 浅灰色细粒白云母花岗岩为(103.3 $\pm$ 1.2) Ma。尽管近年来对于锆石 U-Pb 年龄能否代表岩体侵位年龄还存在很大争论(章邦桐等, 2008; 2010a; 2010b), 但对于面积较小(<100  $\text{km}^2$ )的岩体, 则公认其侵位-结晶时差很小(<1.5 Ma), 锆石 U-Pb 年龄能代表岩体的侵位年龄。本文

研究的油麻坡岩体面积仅 1.3  $\text{km}^2$ , 且部分为斑岩, 表明其为快速冷却的小岩枝, 岩体侵位年龄与结晶年龄和冷却年龄的时差很小, 因此, 本文所获得的锆石年龄在误差范围内完全可以代表岩体的形成时代(陈懋弘等, 2011)。

本文还获得油麻坡矿石中辉钼矿的加权平均年龄为(97.4 $\pm$ 1.9) Ma。虽然部分学者认为辉钼矿中 Re 和 Os 在低温成矿溶液中可能会发生活化(Suzuki et al., 2000), 但由于辉钼矿 Re-Os 同位素体系的封闭温度较高(约 500 $^{\circ}\text{C}$ , Suzuki et al., 1996), 不易受到后期热液、变质和构造事件的影响(Stein et al., 2001), 因此, 辉钼矿 Re-Os 年龄能够精确地代表硫化物的形成时代(Mao et al., 2008; 谢桂青等, 2009)。另外, 辉钼矿 Re-Os 同位素体系容易发生失耦作用, 造成样品测试结果的重现性较差(Stein et al., 2001), 但在颗粒较细(<2 mm)的情况下进行测试以及采用加权平均年龄, 可以消除失耦作用(Selby et al., 2004; 杜安道等, 2007)。因此, 本次测试所获得的 Re-Os 加权平均年龄(97.4 $\pm$ 1.9) Ma 可以代表成矿年龄。

前人一直认为油麻坡岩体是燕山晚期的单一岩体(广西壮族自治区地质矿产局, 1985; 付强等, 2010; 2014; 杨拓, 2013; 王炯辉等, 2014), 本次获得的高精度测年数据表明油麻坡花岗岩体实际上是一个复式岩体, 存在 2 期岩浆侵入活动, 分别为早奥陶世(加里东期)的深灰色花岗斑岩和早白垩世晚期(燕山晚期)的灰色黑云母花岗闪长岩和浅灰色细粒白云母花岗岩。其中, 早白垩世晚期黑云母花岗闪长岩是岩体的主体部分, 细粒白云母花岗岩应该是补体。早奥陶世(加里东期)的深灰色花岗斑岩与地层围岩一起发生了明显黑云母化, 证明加里东运动(或者海西期—印支期运动)对地层和岩浆岩的共同影响。

上述测年数据还表明钨钼矿化形成于早白垩世晚期, 主要与早白垩世(燕山晚期)的黑云母花岗闪长岩、细粒白云母花岗岩密切相关。此外, 早奥陶世

(加里东期)的深灰色花岗斑岩中常见沿节理的矽卡岩化和钨钼矿化,也证明矽卡岩和钨钼矿化晚于早奥陶世(加里东期)的深灰色花岗斑岩。

综上所述,油麻坡岩体是一个复式岩体,由早奥陶世(加里东期)的深灰色花岗斑岩、早白垩世(燕山晚期)的灰色黑云母花岗闪长岩和浅灰色细粒白云母花岗岩组成,钨钼矿化形成于早白垩世晚期,与黑云母花岗闪长岩和细粒白云母花岗岩有关。

## 5.2 博白-岑溪断裂带与成矿作用

华南地区岩浆活动主要为加里东期、海西期—印支期和燕山期3个峰期,其中,以燕山期最为显著,与成矿关系最为密切。目前的研究表明,华南中生代的花岗岩和矿化主要可以分为3个时期:晚三叠世(230~210 Ma)、中晚侏罗世(170~150 Ma)和白垩纪(120~80 Ma)。白垩纪的矿化大约持续了将近40 Ma,但是主要集中在100~90 Ma(华仁民等,2005;毛景文等,2004,2008;Mao et al.,2012)。

钦杭结合带作为扬子与华夏板块在新元古代的碰撞拼接带,具有华南地区中生代岩浆活动与成矿作用的普遍特点,也具有特殊性。从中侏罗世(170 Ma)开始,受伊泽奈奇板块向欧亚大陆俯冲影响,沿钦杭结合带发生板片重熔,甚至撕裂,形成高钾钙碱质岩浆岩,在南部由于有较多地壳物质的加入,形成斑岩型铜钼矿,如圆珠顶铜钼矿。白垩纪由于伊泽奈奇板块由斜向俯冲调整到几乎平行大陆边缘沿NE向走滑,造成大陆岩石圈大面积伸展,形成白垩纪断陷盆地和变质核杂岩,并伴随大规模的火山活动和花岗质岩浆侵入。由于钦杭结合带属于多次开合的板块结合带,因此也是具有“伤疤”的薄弱地带,壳幔相互作用强烈,岩浆活动和成矿具有强度大、多样性的特点,导致多金属矿产在100~80 Ma时间段巨量聚集,成为华南中生代大规模金属成矿的一个缩影(毛景文等,2008,2011;Mao et al.,2013)。

从本文获得成岩成矿年龄数据来看,博白-岑溪断裂带作为钦杭结合带的部分南界断裂,在钦杭结合带的演化历史中扮演着重要的角色,不同时期的岩浆活动与成矿作用明显不同,并与其所处的大地构造环境密切相关。

加里东期,由于扬子与华夏板块再次拼接,沿博白-岑溪断裂带的东侧云开陆块,形成大量深熔花岗岩,为洋-陆俯冲-碰撞背景下后碰撞构造环境伸展-拆沉-底侵岩浆活动的产物(彭少梅等,1995;彭松柏等,2006;王磊等,2013)。在断裂带中存在一定规模

的中酸性岩浆岩侵入,包括本文报道的油麻坡岩体早期的深灰色花岗斑岩,但这一时期是否成矿尚未明晰。在博白-岑溪断裂带的西北部广大地区,有大量的加里东期岩浆活动,包括呈大型岩基产出的壳源重熔型花岗岩,如猫儿山、越城岭、海洋山、宁潭岩体等;以及呈岩株和岩脉产出的壳幔混源型花岗闪长岩,包括大宁岩体,以及大瑶山内几十个小岩体(陈懋弘等,2015)。这一地区不同时代的花岗质岩石,都伴随有钨钼锡铋多金属矿床,如桂北的牛塘界钨矿床(杨振等,2014)、桂东的白石顶钨矿床(李晓峰等,2009)、桂西南的钦甲锡铜矿床(王永磊等,2010)和大瑶山地区的社洞钨钼矿床(陈懋弘等,2011,2015)。

白垩纪在岩石圈伸展的背景下,作为带有“伤疤”的薄弱地带,博白-岑溪断裂带再次裂解,除了形成一系列的断陷盆地外,还有大量的岩浆岩侵入,形成大桥(陆川)、柏丫、米场、平塘、油麻坡、三叉冲等岩体。由于断裂的多次活动,常常形成受断裂控制的复式岩体,如本文报道的油麻坡岩体,且早期(如加里东期)的岩体常常发生变质变形作用。伴随着岩浆活动,形成一系列的斑岩-矽卡岩-石英型的钨、钼、锡、铅、锌、铋、金、银矿床,如佛子冲铅锌多金属矿床、油麻坡钨钼矿床、三叉冲钨矿床、安垌钨矿床、松旺钨锡钼矿床、六苏-大坡-莫村钨矿床等。

由此可见,博白-岑溪断裂带的长期活动,导致了多期次的岩浆侵入和相关斑岩-矽卡岩型矿床的形成。油麻坡钨钼矿属于华南100~80 Ma大规模成矿的一部分,成矿背景与华南地区白垩纪的地壳伸展、钦杭成矿带的再次裂陷有关。

## 6 结 论

(1)广西博白油麻坡钨钼矿床中的花岗岩类锆石 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年表明,深灰色花岗斑岩的等时线年龄为(479.7±3.9) Ma,灰色黑云母花岗闪长岩为(109.7±1.1) Ma,浅灰色细粒白云母花岗岩为(103.3±1.2) Ma,矿石中辉钼矿的 Re-Os 加权平均年龄为(97.4±1.9) Ma。说明油麻坡岩体为一个复式岩体,存在2期岩浆侵入活动,由早奥陶世(加里东期)的深灰色花岗斑岩和早白垩世(燕山晚期)的灰色黑云母花岗闪长岩和浅灰色细粒白云母花岗岩组成。钨钼矿床形成于早白垩世晚期,与黑云母花岗闪长岩和白云母花岗岩密切相关。

(2) 这些高精度测年数据的获得,进一步表明博白断裂带是一条长期活动的断裂,其在加里东期已经活动,并伴有岩浆岩的侵位。燕山晚期该断裂重新复活,并导致大量的岩浆活动和一定强度的 W-Mo-Sn-Pb-Zn-Sb-Au-Ag 成矿作用,形成由多个大-中型矿床组成的多金属成矿带。

志 谢 野外工作得到了广西第六地质队的大力协助;实验阶段得到了中国地质科学院矿产资源研究所侯可军、国家地质测试中心屈文俊、李超等人的帮助,在此表示衷心感谢。

## References

- Chen M H, Mo C S, Huang Z Z, Li B and Huang H W. 2011. Zircon LA-ICP-MS U-Pb ages of granitoid rocks and molybdenite Re-Os age of Shedong W-Mo deposit in Cangwu County of Guangxi and its geological significance[ J ]. *Mineral Deposits*, 30( 6 ): 963-978 ( in Chinese with English abstract ).
- Chen M H, Li Z Y, Li Q, Wei Z R, Huang H W, Zhang Z Q and Xiao L Y. 2015. A preliminary study of multi-stage granitoids and related metallogenic series in Dayaoshan area of Guangxi[ J ]. *Earth Science Frontiers*, 22( 2 ): 41-53( in Chinese with English abstract ).
- Chen S W and Wei Z R. 2013. The prospecting report of Youmapo W-Mo deposits in Bobai of Guangxi[ R ]. ( in Chinese ).
- Chen Y C, Pei R F and Zhang H L. 1990. The geology of nonferrous and rare metal deposits related to Mesozoic granitoids in the Nanling region, China[ R ]. *The Proceedings of Chinese Academy of Geological Sciences*. 79-85( in Chinese ).
- Du A D, He H L and Yin N W. 1994. A Study on the rhenium-osmium geochronometry of molybdenite deposit[ J ]. *Acta Geologica Sinica*, 68( 4 ): 339-347( in Chinese with English abstract ).
- Du A D, Zhao H L and Yin N W. 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 ).
- 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 <sup>187</sup>Os within molybdenite[ J ]. *Mineral Deposits*, 26( 5 ): 572-580( in Chinese with English abstract ).
- Fu Q, Ge W S, Wen C S, Li S F, Li X F and Zhang Z W. 2010. Geological characteristics and genesis of Youmapo W-Mo deposit in Guangxi[ J ]. *Mineral Deposits*, 29( Supp. ): 183-184( in Chinese ).
- Fu Q, Ge W S, Wen C S and Li S B. 2014. Geochemistry and genesis of Youmapo W-Mo deposit in Guangxi[ J ]. *Mineral Deposits*, 33( 4 ): 785-794( in Chinese with English abstract ).
- Fu Y and Wei Z R. 2005. Geological characteristics and genesis of Andong Mo deposit in Luchuan of Guangxi[ J ]. *The South of Land and Resources*, 11( 4 ): 36-38( in Chinese ).
- Guangxi Bureau of Geology and Mineral Prospecting and Exploitation. 1985. Regional geology of the Guangxi Province[ M ]. Beijing: Geological Publishing House. 137-139( in Chinese ).
- Hou K J, Li Y H and Tian Y R. 2009. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation multi-counting ICP-MS[ J ]. *Mineral Deposits*, 28( 4 ): 481-492( in Chinese with English abstract ).
- Hua R M, Chen P R, Zhang W L and Lu J J. 2005. Three major metallogenic events in Mesozoic in South China[ J ]. *Mineral Deposits*, 24( 2 ): 99-107( in Chinese with English abstract ).
- Li C, Du A D and Qu W J. 2009. Decoupling of Re and Os and migration model of <sup>187</sup>Os in coarse-grained molybdenite[ J ]. *Mineral Deposits*, 28( 5 ): 707-712( in Chinese with English abstract ).
- Li X F, Feng Z H, Li R S, Tang Z H, Qu W J and Li J C. 2009. Silurian Mo mineralization at Baishiding molybdenum deposit in northern Guangxi: Constraints from zircon SHRIMP U-Pb and molybdenite Re-Os ages[ J ]. *Mineral Deposits*, 28( 4 ): 403-412( in Chinese with English abstract ).
- Li X Q, Liu W J and Zheng R C. 1994. Formation of Qinzhou-Fangcheng folding belt and its geological influence[ J ]. *Guangxi Geology*, 7( 1 ): 15-25( in Chinese with English abstract ).
- Liang X Q, Li X H, Qiu Y X and Yang D S. 2005. Indo-sinian collisional orogeny: Evidence from structural and sedimentary geology in Shiwandashan Basin, South China[ J ]. *Geotectonica et Metallogenia*, 29( 1 ): 403-412( in Chinese with English abstract ).
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, Gao C G, Zong K Q and Wang D B. 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths[ J ]. *Journal of Petrology*, 51: 537-571.
- Luo Z. 1990. The geological features and tectonic evolution in Bobai-Cenxi deep fault zone, Guangxi[ J ]. *Geology of Guangxi*, 3( 1 ): 25-34( in Chinese with English abstract ).
- Mao J W, Xie G Q, Li X F, Zhang C Q and Mei Y X. 2004. Mesozoic large scale mineralization and multiple lithospheric extension in

- South China[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 45-55( in Chinese with English abstract ).
- Mao J W ,Xie G Q ,Bierlein F ,Qu W J ,Du A D ,Ye H S ,Pirajno F ,Li H M ,Guo B J ,Li Y F and Yang Z Q. 2008 . Tectonic implications from Re-Os dating of Mesozoic molybdenum deposits in the east Qinling-Dabie orogenic belt[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta* 72 : 4607-4626 .
- Mao J W ,Chen M H ,Yuan S D and Guo C L. 2011. Geological characteristics of the Qinghang( or Shihang ) metallogenic belt in South China and spatial-temporal distribution regularity of mineral deposit[J]. *Acta Geologica Sinica* 85( 5 ): 636-658( in Chinese with English abstract ).
- Mao J W ,Firajno F ,Zhang Z H and Wan Y S. 2012. SHRIMP zircon U-Pb dating of alkaline dykes in the Pobei area ,Beishan rift ,Xinjiang autonomous region ,China :Implications for tectonic setting and mantle plume events[ J ]. *Acta Geologica Sinica* ,86( 4 ): 879-884.
- Mao J W ,Cheng Y B ,Chen M H and Pirajno F. 2013. Major types and time-space distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their geodynamic settings[ J ]. *Mineralium Deposita* 48 :267-294.
- Mao J W ,Xie G Q ,Guo C L ,Yuan S D ,Chen Y B and Chen Y C. 2008. Spatial-temporal distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their metallogenic settings[ J ]. *Geological Journal of China Universities* ,14( 4 ): 510-526( in Chinese with English abstract ).
- Peng S B ,Jin Z M ,Liu Y H ,Fu J M ,He L Q ,Cai M H and Wang Y B. 2006. Petrochemistry chronology and tectonic setting of strong peraluminous anatectic granitoids in Yunkai orogenic belt ,western Guangdong Province ,China[ J ]. *Earth Science* ,31( 1 ): 110-120 ( in Chinese with English abstract ).
- Peng S M ,Fu L F and Zhou G Q. 1995. Tectonic evolution of Yunkai massif and its shearing anatectic origin of gneissic granitic rock[ M ]. Wuhan :China University of Geosciences Press. 1-167 ( in Chinese ).
- Qu W J and Du A D. 2003. Highly precise Re-Os dating of molybdenite by ICP-MS with carius tube sample digestion[ J ]. *Rock and Mineral Analysis* ,22( 4 ): 254-258( in Chinese with English abstract ).
- Selby D and Creaser R A. 2004. Macroscale NTIMS and microscale LA-MC-ICP-MS Re-Os isotopic analysis of molybdenite :Testing spatial restrictions for reliable Re-Os age determinations and implications for the decoupling of Re and Os within molybdenite[ J ]. *Geochim. Cosmochim. Acta* 68 :3897-3908.
- Shui T. 1987. The tectonic framework of continental basement in South China[ J ]. *Science in China( Series B)* 4 :414-422( in Chinese ).
- Stein H J ,Markey R J ,Morgan J W ,Hannah J L and Scherstén A. 2001. The remarkable Re-Os chronometer in molybdenite :How and why it works[ J ]. *Terra Nova* ,13 :479-486.
- Suzuki K , Shimizu H and Masuda A. 1996. Re-Os dating of molybdenites from ore deposits in Japan :Implication for the closure temperature of the Re-Os system for molybdenite and the cooling history of molybdenum ore deposits[ J ]. *Geochim. Cosmochim. Acta* 60 :3151-3159 .
- Suzuki K ,Kagi H ,Nara M ,Takano B and Nozaki Y. 2000. Experiment alteration of molybdenite[ J ]. *Geochim. Cosmochim. Acta* ,64 : 223-232.
- Wang J H ,Ma X H ,Li Y ,Lu C Y ,Chen L Y ,Chen B and Wang Z Q. 2014. Petrogenesis of granitic complexes and implications for the W-Mo mineralization :A case study from the Youmapo pluton , Guangxi Province[ J ]. *Acta Geologica Sinica* ,88( 7 ): 1219-1235 ( in Chinese with English abstract ).
- Wang L ,Long W G and Zhou D. 2013. Zircon LA-ICP-MS U-Pb age of Caledonian granites from Precambrian basement in Yunkai area and its geological implications[ J ]. *Geology in China* ,40( 4 ): 1016-1029( in Chinese with English abstract ).
- Wang Y L ,Wang D H ,Zhang C Q ,Qu W J and Hu Y C. 2010. Molybdenite Re-Os isochron age of Debao Cu-Sn deposit in Guangxi and relation to Caledonian mineralization[ J ]. *Mineral Deposits* 29( 5 ): 881-889( in Chinese with English abstract ).
- Wu Y B and Zheng Y F. 2004. Zircon minerageny and its constraints on the explanation of U-Pb age[ J ]. *Chinese Science Bulletin* 49( 16 ): 1589-1604( in Chinese ).
- Xie G Q ,Zhao H J ,Zhao C S ,Li X Q ,Hou K J and Pan H J. 2009. Re-Os dating of molybdenite from Tonglushan ore district in southeastern Hubei Province , Middle-Lower Yangtze River belt and its geological significance[ J ]. *Mineral Deposits* ,28( 3 ): 227-239( in Chinese with English abstract ).
- Xu D M ,Lin Z Y ,Luo X Q ,Zhang K ,Zhang X H and Huang H. 2015. Metallogenic series of major metallic deposits in the Qin Zhou-Hangzhou metallogenic belt[ J ]. *Earth Science Frontiers* 22( 2 ):7-24( in Chinese with English abstract ).
- Yang M G and Mei Y W. 1997. Characteristics of geology and metallogenesis in the Qin Zhou-Hangzhou paleoplate juncture[ J ]. *Geology and Mineral Resources of South China* ,3 :52-59( in Chinese with English abstract ).

English abstract ).

- Yang M G ,Huang S B ,Lou F S ,Tang W X and Mao S B. 2009. Lithospheric structure and large-scale metallogenic process in southeast China continental area[ J ]. *Geology in China* ,36( 3 ): 528-543( in Chinese with English abstract ).
- Yang T. 2013. Geological characteristics and clues for prospecting of Youmapo W-Mo deposit in Bobai of Guangxi[ J ]. *Mineral Resources and Geology* ,27( 5 ): 381-387( in Chinese with English abstract ).
- Yang Z ,Wang R C ,Zhang W L ,Chu Z Y ,Chen J ,Zhu J C and Zhang R Q. 2014. Skarn-type tungsten mineralization associated with the Caledonian ( Silurian ) Niutangjie granite , northern Guangxi , China[ J ]. *Science China ( Earth Sciences )* ,44( 7 ): 1357-1373( in Chinese ).
- Ye Z G. 2005. Geological characteristics and ore-controlling factors of the Sanchachong W deposit in Bobai County ,Guangxi[ J ]. *The South of Land and Resources* ,33( 1 ): 31-34( in Chinese ).
- Zhang B T ,Wu J Q ,Ling H F and Chen P R. 2008. Doubts about the representation of zircon U-Pb age to the emplacement age of granite evidence of comparison between the zircon U-Pb ages and the whole rock Rb-Sr ages of granite pluton[ J ]. *Geological Review* , 54( 6 ): 775-785( in Chinese with English abstract ).
- Zhang B T ,Wu J Q ,Ling H F and Chen P R. 2010a. On the time elapsed from magma emplacement to crystallization-solidification of granites and its tectonic implication :Taking the Qitianling granite batholith of Nanling range in South China as an example[ J ]. *Geological Journal of China Universities* ,16( 1 ): 103 -118( in Chinese with English abstract ).
- Zhang B T ,Wu J Q ,Ling H F and Chen P R. 2010b. Magma-dynamic evidence for Indosinian cycle emplacement of the Qitianling granite batholith in Nanling range South China :Reply and discussion to comments by Prof. Zhu Jinchu et al[ J ]. *Geological Journal of China Universities* ,16( 3 ): 397-412( in Chinese with English abstract ).
- Zhong K B and Huang F Y. 2007. Geological characteristics and prospecting potential of the Michang W-Mo deposit in Luchuan County ,Guangxi[ J ]. *The South of Land and Resources* ,16( 3 ): 27-31( in Chinese ).
- Zhou Y Z ,Zeng C Y ,Li H Z ,An Y F ,Li J ,Lü W C ,Yang Z J ,He J G and Shen W J. 2012. Geological evolution and oreprospecting targets in southern segment of Qinzhou Bay-Hangzhou Bay juncture orogenic belt , southern China[ J ]. *Geological Bulletin of China* ,31( 2/3 ): 486-491( in Chinese with English abstract ).
- Zhou Y Z ,Zhen Y ,Zeng C Q and Liang J. 2015. On the understanding of Qinzhou Bay-Hangzhou Bay metallogenic belt[ J ]. *South China : Earth Science Frontiers* ,22( 2 ): 1-6( in Chinese with English abstract ).

## 附中文参考文献

- 陈懋弘 莫次生 黄智忠 李斌 黄宏伟. 2011. 广西苍梧县社洞钨钼矿床花岗岩类锆石 LA-ICP-MS 和辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义[ J ]. *矿床地质* ,30( 6 ): 963-978.
- 陈懋弘 李忠阳 李青 韦子任 黄宏伟 张志强 肖柳阳. 2015. 初论广西大瑶山地区多期次花岗岩岩浆活动与成矿系列[ J ]. *地学前缘* ,22( 2 ): 41-53.
- 陈受文 韦子任. 2013. 广西博白油麻坡钨钼矿床普查报告[ R ].
- 陈毓川 裴荣富 张宏良. 1990. 南岭地区与中生代花岗岩有关的有色及稀有金属矿床地质[ R ]. *中国地质科学院院报* . 79-85.
- 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 赵敦敏 王淑贤 孙德忠 刘敦一. 2001. Carius 管溶祥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.
- 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 <sup>187</sup>O<sub>s</sub> 的失耦现象[ J ]. *矿床地质* ,26( 5 ): 572-580.
- 付强 葛文胜 温长顺 李世富 李小飞 张张伟. 2010. 广西油麻坡钨钼矿床地质特征及成因探讨[ J ]. *矿床地质* ,29( 增刊 ): 183-184.
- 付强 葛文胜 温长顺 李生宝. 2014. 广西油麻坡钨钼矿床地球化学特征及成因探讨[ J ]. *矿床地质* ,33( 4 ): 785-794.
- 傅勇 韦子任. 2005. 广西陆川安垌钨钼矿床地质特征及成因探讨[ J ]. *南方国土资源* ,11( 4 ): 36-38.
- 广西壮族自治区地质矿产局. 1985. 广西壮族自治区区域地质志[ M ]. 北京:地质出版社. 137-139.
- 侯可军 李廷河 田有荣. 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[ J ]. *矿床地质* ,28( 4 ): 481-492.
- 华仁民 陈培荣 张文兰 陆建军. 2005. 论华南地区中生代 3 次大规模成矿作用[ J ]. *矿床地质* ,24( 2 ): 99-107.
- 李超 杜安道 屈文俊. 2009. 大颗粒辉钼矿 Re-Os 同位素失耦现象及 <sup>187</sup>O<sub>s</sub> 迁移模式研究[ J ]. *矿床地质* ,28( 5 ): 707-712.
- 李晓峰 冯佐海 李容森 唐专红 屈文俊 李军朝. 2009. 华南志留纪钨的矿化:白石顶钨钼锆石 SHRIMP U-Pb 年龄和辉钼矿 Re-Os 年龄证据[ J ]. *矿床地质* ,28( 4 ): 403-412.

- 李孝全, 刘文均, 郝荣才. 1994. 钦防褶皱带的形成及其地质影响[J]. 广西地质, 7(1):15-25.
- 梁新权, 李献华, 丘元禧, 杨东生. 2005. 华南印支期碰撞造山——十万大山盆地构造和沉积学证据[J]. 大地构造与成矿学, 29(1):99-112.
- 罗璋. 1990. 广西博白-岑溪断裂带地质特征与构造演化[J]. 广西地质, 3(1):25-34.
- 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[J]. 地学前缘, 11(1):45-55.
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 袁顺达, 程彦博, 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[J]. 高校地质学报, 14(4):510-526.
- 毛景文, 陈懋弘, 袁顺达, 郭春丽. 2011. 华南地区钦杭成矿带地质特征和矿床时空分布规律[J]. 地质学报, 85(5):636-658.
- 彭少梅, 符力奋, 周国强. 1995. 云开地块构造演化及片麻状花岗岩岩石的剪切深熔成因[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1-167.
- 彭松柏, 金振民, 刘云华, 付建明, 何龙清, 蔡明海, 王彦斌. 2006. 云开造山带强过铝深熔花岗岩地球化学、年代学及构造背景[J]. 地球科学, 31(1):110-120.
- 屈文俊, 杜安道. 2003. 高温密闭溶样电感耦合等离子体质谱准确测定辉钼矿铼-锆地质年龄[J]. 岩矿测试, 22(4):254-258.
- 水涛. 1987. 中国东南大陆基底构造格局[J]. 中国科学(B辑), 4:414-422.
- 王炯辉, 马星华, 李毅, 陆灿友, 陈凌云, 陈斌, 王志强. 2014. 花岗质复式岩体成因及其与 W-Mo 成矿的关系——以广西油麻坡岩体为例[J]. 地质学报, 88(7):636-658.
- 王磊, 龙文国, 周岱. 2013. 云开地区加里东期花岗岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 中国地质, 40(4):1016-1029.
- 王永磊, 王登红, 张长青, 屈文俊, 胡艳春. 2010. 广西德保铜锡矿床辉钼矿 Re-Os 同位素定年及对加里东期成矿的探讨[J]. 矿床地质, 29(5):881-889.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 54(6):775-785.
- 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[J]. 矿床地质, 28(3):227-239.
- 徐德明, 简志永, 骆学全, 张鲲, 张雪辉, 黄皓. 2015. 钦-杭成矿带主要金属矿床成矿系列[J]. 地学前缘, 22(2):7-24.
- 杨明桂, 梅勇文. 1997. 钦-杭古板块结合带与成矿带的主要特征[J]. 华南地质与矿产, 3:52-59.
- 杨明桂, 黄水保, 楼法生, 唐维新, 毛素斌. 2009. 中国东南陆区岩石圈结构与大规模成矿作用[J]. 中国地质, 36(3):528-543.
- 杨拓. 2013. 广西博白油麻坡钨钼矿床地质特征及找矿标志[J]. 矿产与地质, 27(5):381-387.
- 杨振, 王汝成, 张文兰, 储著银, 陈骏, 朱金初, 章荣清. 2014. 桂北牛塘界加里东期花岗岩及其矽卡岩型钨矿成矿作用研究[J]. 中国科学(地球科学), 44(7):1357-1373.
- 叶振广. 2005. 广西博白县三叉冲钨矿床地质特征及控矿因素[J]. 南方国土资源, 33(1):31-34.
- 章邦桐, 吴俊奇, 凌洪飞, 陈培荣. 2008. “花岗岩锆石 U-Pb 年龄能代表花岗岩侵位年龄”质疑——花岗岩锆石 U-Pb 年龄与全岩 Rb-Sr 等时线年龄对比证据[J]. 地质论评, 54(6):775-785.
- 章邦桐, 吴俊奇, 凌洪飞, 陈培荣. 2010a. 花岗岩浆侵位与结晶固化时差的研究与构造意义:以南岭骑田岭花岗岩基为例[J]. 高校地质学报, 16(1):103-118.
- 章邦桐, 吴俊奇, 凌洪飞, 陈培荣. 2010b. 南岭骑田岭花岗岩基属印支期侵位的岩浆动力学佐证:对《关于南岭花岗岩侵位年龄问题》一文的答复与讨论[J]. 高校地质学报, 16(3):397-412.
- 钟卡彬, 黄芳燕. 2007. 广西陆川县米场钨钼矿床地质特征及找矿前景[J]. 南方国土资源, 16(3):27-31.
- 周永章, 曾长育, 李红中, 安燕飞, 梁锦, 吕文超, 杨志军, 何俊国, 沈文杰. 2012. 钦杭结合带(南段)地质演化及找矿方向分析[J]. 地质通报, 31(2/3):486-491.
- 周永章, 郑义, 曾长育, 梁锦. 2015. 钦-杭成矿带综述——关于钦杭成矿带的若干认识[J]. 地学前缘, 22(2):1-6.