

doi: 10.12029/gc20170109

潘大鹏, 王迪, 王孝磊. 2017. 赣西北大湖塘石门寺钨矿区花岗岩的成因及其对钨矿的指示意义[J]. 中国地质, 44(1): 118-135.

Pan Dapeng, Wang Di, Wang Xiaolei. 2017. Petrogenesis of granites in Shimensi in northwestern Jiangxi Province and its implications for tungsten deposits[J]. Geology in China, 44(1): 118-135(in Chinese with English abstract).

赣西北大湖塘石门寺钨矿区花岗岩的成因及其对钨矿的指示意义

潘大鹏^{1,2} 王迪¹ 王孝磊¹

(1. 南京大学地球科学与工程学院, 内生金属矿床成矿机制国家重点实验室, 江苏 南京 210023;

2. 江西省地质矿产开发局916地质大队, 江西 九江 332100)

摘要:江西省晚中生代大湖塘钨矿是近年来中国勘查出的世界级钨矿产地之一, 位于新元古代江南造山带的东段, 地处赣北武宁、修水、靖安三县交界处。该区属于江南地块中生代钨铜钼等多金属成矿带, 大规模出露晋宁期闪长岩和燕山期花岗岩。文章对赣西北大湖塘石门寺钨矿区新元古代和燕山期的4种花岗岩进行详细的岩相学、锆石和锡石U-Pb年代学、微量元素的研究。锆石U-Pb研究结果表明, 新元古代黑云母花岗闪长岩的成岩年龄为(829.9±4.7) Ma; 燕山期云英岩化似斑状黑云母花岗岩、细粒黑云母花岗岩和云英岩化黑云母花岗斑岩的成岩年龄分别是(148.3±2.6) Ma, (145.5±3.6) Ma和(147.7±1.5) Ma, 与锡石所获得的U-Pb年龄相互吻合。主要含矿的似斑状黑云母花岗岩中锡石所含的钨含量明显高于其他燕山期花岗岩, 暗示了似斑状黑云母花岗岩岩浆中高的钨含量。锆石钛温度计表明, 燕山期的花岗岩均形成于较低的温度, 加权平均值的变化范围为734~788°C。锆石的微量元素结果表明, 似斑状黑云母花岗岩形成于较低的氧逸度环境, 更有利于形成钨矿。

关键词:燕山期; 石门寺; 锆石; 锡石; 岩浆温度; 氧逸度; 钨矿

中图分类号: P618.67; P588.12⁺1 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2017)01-0118-18

Petrogenesis of granites in Shimensi in northwestern Jiangxi Province and its implications for tungsten deposits

PAN Dapeng^{1,2}, WANG Di¹, WANG Xiaolei¹

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, Nanjing, 210023, Jiangsu, China; 2. 916 Geological Party of Jiangxi Bureau of Geology and Exploration, Jiujiang 332100, Jiangxi, China)

Abstract: The Late Mesozoic Dahutang tungsten deposit, as one of the largest tungsten deposits in the world, is a recently

收稿日期: 2016-06-29; 改回日期: 2016-12-01

基金项目: 国家重点研发计划项目子课题“华南中生代大花岗岩省形成的深部过程与成矿作用”(2016YFC0600203)和中国地质调查局地质调查项目(科【2014】04-025-024)联合资助。

作者简介: 潘大鹏, 男, 1983年生, 工程师, 硕士, 花岗岩岩石学方向; E-mail: 31520727@qq.com。

通讯作者: 王迪, 男, 1988年生, 博士, 花岗岩岩石学方向; E-mail: Edisonwangnju@gmail.com。

discovered deposit in Jiangxi Province. It is situated in border area of Wuning, Xiushui and Jing'an counties, and also located in the eastern part of the Neoproterozoic Jiangnan orogen. This area belongs to Mesozoic W-Cu-Mo polymetallic ore-forming belt in South China Block with widespread Jinningian diorites and Yanshanian granites. In this study, the authors investigated the petrography, mineralogy, zircon and cassiterite U-Pb geochronology and trace element concentrations of the Neoproterozoic and Yanshanian granitic intrusions in the Shimensi ore district. Zircon U-Pb dating results of the Neoproterozoic biotite granodiorites and Yanshanian biotite granite porphyry, greisenized fine-grained granites and greisenized biotite granite porphyry are (829.9 ± 4.7) Ma, (145.5 ± 3.6) Ma, (152.6 ± 2.0) Ma and (154.2 ± 1.7) Ma, respectively. In particular, the crystallization ages of the Yanshanian granites are consistent with the new cassiterite U-Pb age results obtained by the authors. The tungsten content in cassiterite from the ore-related fine-grained biotite granites is obviously higher than tungsten content of other Yanshanian intrusions. This implies a higher tungsten concentration in the fine-grained biotite granitic magmas. Apparent temperatures for zircon crystallization calculated by Ti-in-zircon thermometer suggest lower temperatures of Yanshanian magmas with weighted average temperature ranging from 734°C to 788°C . Trace element concentrations of zircon exhibit that fine-grained biotite granites were formed under low oxygen fugacity condition, which was favorable for the formation of tungsten ores.

Key words: Yanshanian; Shimensi area; zircon; cassiterite; magma temperatures; oxygen fugacity; tungsten ores

About the first author: PAN Dapeng, male, born in 1983, engineer, master candidates, engages in the study of petrology; E-mail: 31520727@qq.com.

About the corresponding author: WANG Di, male, born in 1988, doctor candidate, engages in the study of petrology; E-mail: Edisonwangnju@gmail.com.

Fund support: Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFC0600203) and China Geological Survey Project (No. [2014]04-025-024).

1 引言

华南以多阶段巨量陆壳物质再造为特征,岩浆岩出露面积超过 220000 km^2 ,其中大约 90%形成于中生代(陈培荣等, 2004; 丁兴等, 2005; 李献华等, 2007, 2009; Zhou et al., 2006; Sun et al., 2012)。已有大量研究成果表明,华南地区的金属成矿作用也主要发生在中生代(尤其是燕山期),是中国东部“成矿大爆发”的重要组成部分,与华南广泛的晚中生代花岗岩的形成密切相关(华仁民等, 2003)。近年来,在华南地区晚中生代的成矿勘查获得了系列重大突破,尤其是在江西北部的大湖塘地区和朱溪地区陆续勘查出超大型的钨矿,引起了广泛的关注。在赣西北大湖塘钨矿,其钨总储量可以达到 1.5 Mt,为全球范围内所发现的最大的钨矿之一(Mao et al., 2013)。对该地区的成岩成矿过程进行深入的研究对于了解华南钨多金属成矿作用的机制具有重要意义。

近年来,围绕该地区已经有一系列的进展,获取了一些成岩和成矿的时代,加深了我们对该地区成矿过程的认识。但是,目前来看,大湖塘地区的成矿与成岩过程究竟如何耦合?成矿物质由谁提

供?不同时期花岗岩之间有何联系和差异?这些关键的问题仍不清楚。在国际上,对于花岗岩有关的钨矿的形成也是花岗岩成矿研究的重要内容之一。Kempe et al. (2006)认为,钨矿的形成与演化程度较高的花岗岩有关,在岩浆演化后期体系中氧逸度的变化可能是制约钨等成矿元素的迁移富集和最终成矿的重要因素(李洁等, 2013; 韩丽等, 2016)。对于大湖塘钨矿来说,尽管前人对该地区的矿床地质特征以及矿床成因方面已开展了一些工作,但是尚未对该地区的成矿条件,尤其是氧逸度条件,进行详尽的限定。这些方面资料的缺乏制约了我们对该区成岩成矿过程的细致了解。

石门寺矿区作为大湖塘钨矿的重要组成部分,具有较好的剖面和野外现象,钻孔资料积累也较多。本次研究对石门寺地区与钨矿相关的花岗岩进行了锆石和锡石的 U-Pb 年龄及微量元素含量测试,以期限定钨矿床的形成时代以及形成条件,为今后本区乃至其他地区的花岗岩与伴生钨矿的形成提供一些有益的参考。

2 地质背景及岩体特征

大湖塘钨矿的石门寺矿区位于赣西北九岭复

式岩体的中北部,九岭—鄱公山隆起区西部的中北段,在大地构造位置处于扬子板块东南缘新元古代江南造山带中段(图1)。九岭复式岩体以新元古代(晋宁期)黑云母花岗闪长岩为主,出露面积达约2500 km²。少量燕山期花岗岩在九岭复式岩体的中部、西部和北部出露,岩性以二云母花岗岩和白云母花岗岩为主。在九岭新元古代花岗岩的西北部和西

南部局部见新元古代花岗岩侵入到新元古代双桥山群浅变质岩系中(江西省地质矿产局,1984)。

所研究的成矿区划属扬子成矿省江南地块中生代钨铜钼金银铅锌成矿带,位于长江中下游成矿带南侧。在东北长约20 km、南东宽约10 km的范围内,分布有15处大小钨铜钼矿床及矿点(图1);其中石门寺矿区以及狮尾洞、昆山、大岭上等矿区,形

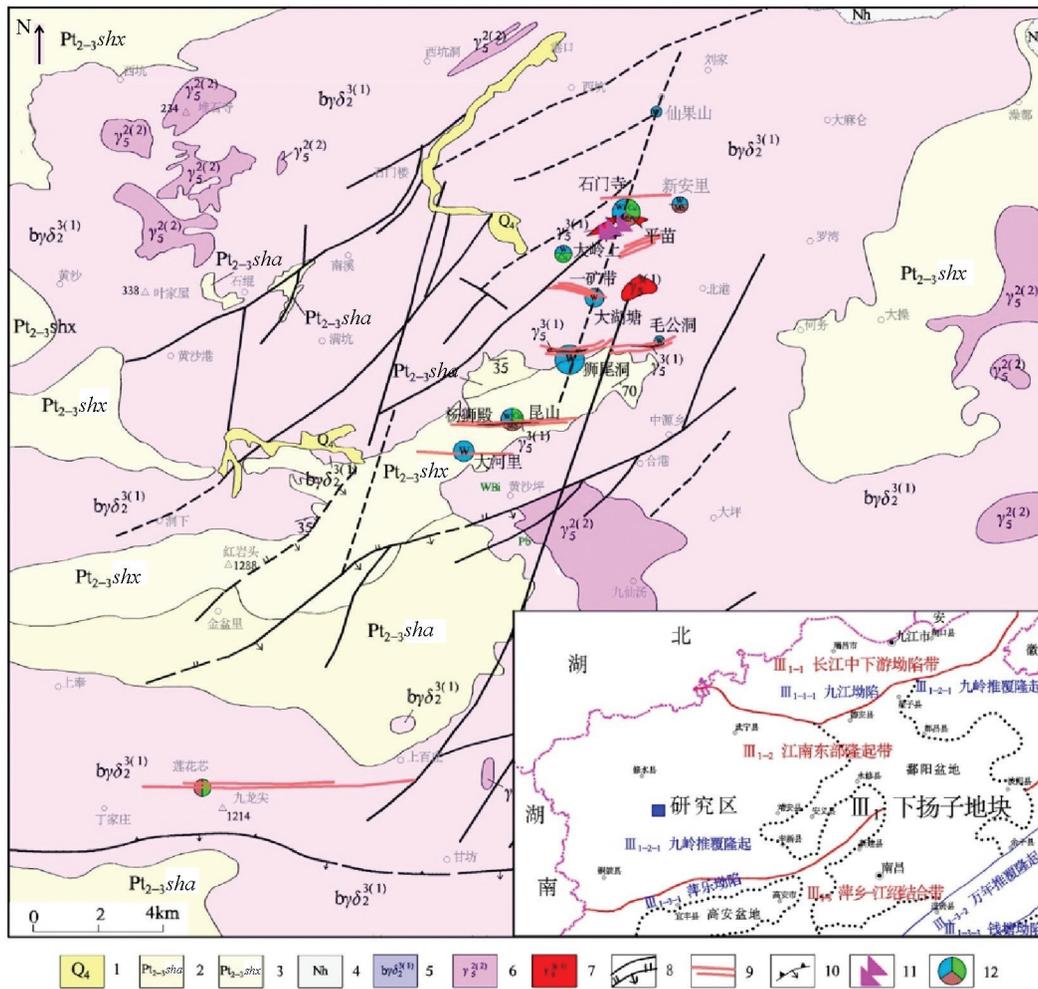


图1 赣西北钨多金属矿集区区域地质矿产略图(修改自项新葵等,2012)

- 1—第四系;2—新元古界双桥山群安乐林组;3—新元古界双桥山群修水组;4—南华系;5—晋宁晚期黑云母花岗闪长岩;6—燕山早期斑状黑云母花岗岩系列;7—燕山晚期细粒花岗岩—花岗斑岩系列;8—成矿前后断裂构造;9—成矿断裂构造;10—推覆断层;11—爆破角砾岩;12—钨铜多金属矿床(点)

Fig. 1 Geological and ore resources map of the tungsten polymetallic ore concentration area in the northwestern part of Jiangxi Province (modified from Xiang et al., 2012)

- 1—Quaternary strata; 2—Anlelin Formation of Neoproterozoic Shuangqiaoshan Group; 3—Xiushui Formation of Neoproterozoic Shuangqiaoshan Group; 4—Nanhua strata; 5—Late Jinning biotite granodiorites; 6—Early Yanshannian porphyritic biotite granites; 7—Late Yanshannian fine-grained granites—granite porphyry; 8—Faults formed before and after mineralization; 9—Faults formed during mineralization; 10—Nappe faults; 11—Exposive breccia; 12—Tungsten and copper polymetallic deposit

成了一个NNE向以钨为主,伴生铜、钼、锡、铍、铌、钽等有色和稀有金属的矿集区(项新葵等,2012)。依据前人的研究表明(黄兰椿等,2013),大湖塘钨矿主要是以细脉浸染型黑(白)钨矿、石英大脉型、蚀变花岗岩型、云英岩型及隐爆角砾岩型钨(钼、铜)矿等共生的矿床。而这些矿体在野外均与燕山期的花岗质岩石具有密切的产出关系。

大湖塘矿区内燕山期花岗质岩浆活动大致可以分为3个阶段(林黎等,2006)。第一阶段以似斑状黑云母花岗岩、白云母花岗岩为主;第二阶段以细粒黑云母花岗岩和黑云母花岗斑岩为主;第三阶段为花岗斑岩(或石英斑岩)。在野外可见到,第二期黑云母花岗斑岩呈岩株状穿插入燕山期第一期

岩体中,而黑云母花岗斑岩呈脉状侵入于新元古代花岗闪长岩和燕山期第一期的似斑状黑云母花岗岩、白云母花岗岩中。

本文选取了大湖塘矿床石门寺矿段的4个样品(图2):SMS-H1采自燕山期花岗岩的围岩,即新元古代的九岭岩体,SMS-H2采自燕山期细粒黑云母花岗岩,SMS-H3采自燕山期似斑状黑云母花岗岩细粒花岗岩,为主要含矿岩体,SMS-H4为燕山期黑云母花岗斑岩。

3 岩相学特征

3.1 SMS-H1 黑云母花岗闪长岩

岩石手标本呈灰白色,中粗粒花岗结构,块状

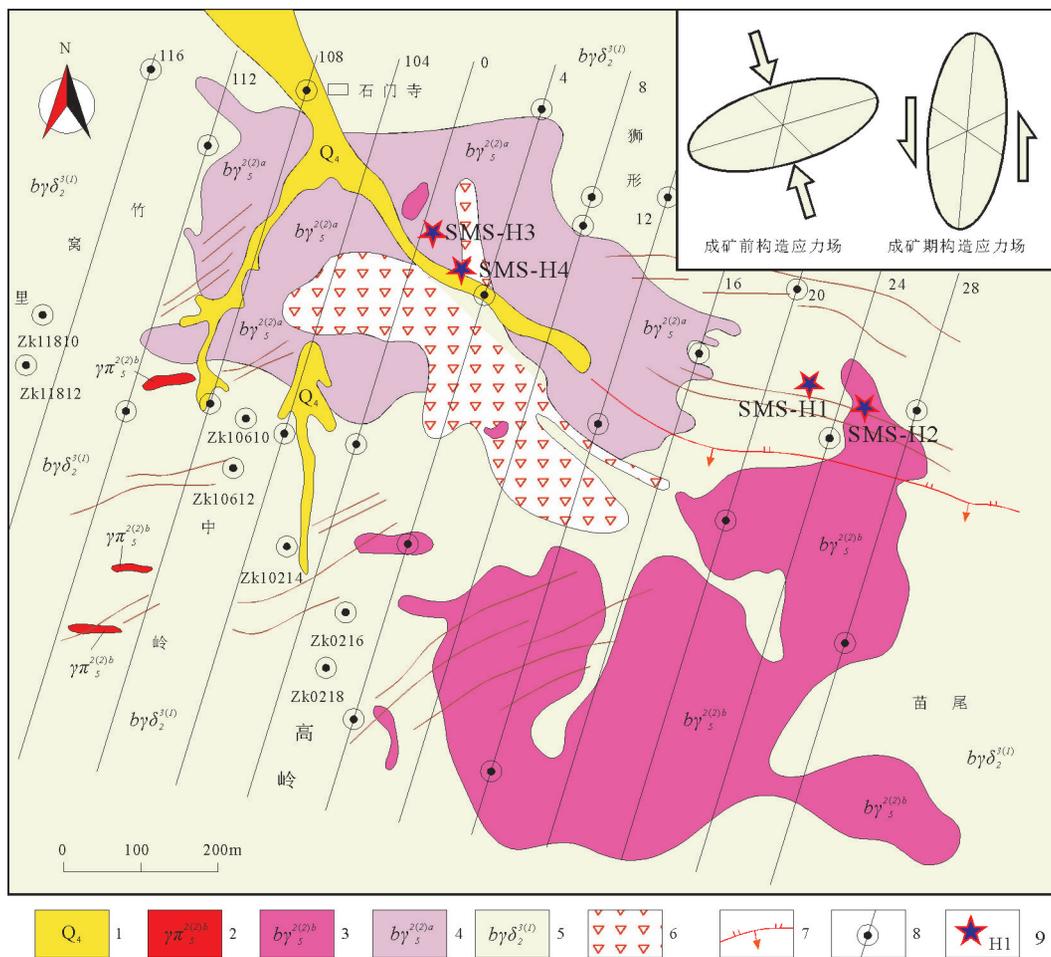


图2 石门寺矿区详细地质图(据项新葵等,2012修改)

1—第四系;2—燕山中期第二期岩体;3—燕山中期第一期岩体;4—燕山中期岩脉;5—晋宁晚期黑云母花岗闪长岩;6—热液隐爆角砾岩;7—断层;8—坑道;9—采样点

Fig.2 Geological sketch map of the Shimensi deposit (modified from Xiang et al., 2012)

1—Quaternary strata; 2—Middle Yanshanian intrusions of the second stage; 3—Middle Yanshanian intrusions of the first stage; 4—Middle Yanshanian stocks; 5—Late Jinning biotite granodrites; 6—Hydrothermal breccia; 7—Faults; 8—Tunnels; 9—Sample locations

构造,主要由斜长石(约45%)、石英(约25%)、钾长石(约15%)以及黑云母(约15%)组成,副矿物主要包括锆石、磷灰石和一些暗色不透明矿物(图3a)。黑云母具有浅褐色—褐色的多色性,晶形为自形—半自形,呈鳞片状或小团块状。部分黑云母发生蚀变,转变为白云母。半自形—自形的斜长石具有明显聚片双晶;在大的斜长石晶体中可以见到小的斜长石颗粒。钾长石主要为条纹长石,也可以见到明显的黏土化。石英呈他形,粒度相对较小。

3.2 SMS-H2 细粒黑云母花岗岩

灰白色,花岗结构,块状构造。主要造岩矿物为石英(约44%)、斜长石(约20%)、白云母(约20%)、钾长石(约4%)和黑云母(约2%),副矿物为磷灰石、黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿等(图3c)。可见较大片状白云母,半自形,发生了微弱蚀变,依据其颗

粒大小和结构,认为可能为原生白云母。部分长石具有弱绢云母化,弱泥化现象。

3.3 SMS-H3 似斑状黑云母花岗岩

岩石呈灰白色,斑状结构,块状构造,手标本上部分见少量斑晶,斑晶主要为长石和石英,镜下斑晶总含量约45%,主要由石英(约20%)、钾长石(约15%)、斜长石(约5%)和黑云母(约5%)等组成,基质主要为隐晶质的长英质物质(含量约55%)(图3b)。黑云母呈半自形—自形,具有浅褐色—褐色的多色性,部分小的黑云母作为包裹体被大的石英斑晶所包裹。斜长石斑晶可以见到明显的环带。钾长石斑晶主要为条纹长石。石英斑晶具有半自形—自形的晶形。其中副矿物主要为磷灰石、锆石。

3.4 SMS-H4 云英岩化黑云母花岗岩斑岩

浅灰色,含水时略带肉红色,似斑状结构,块状

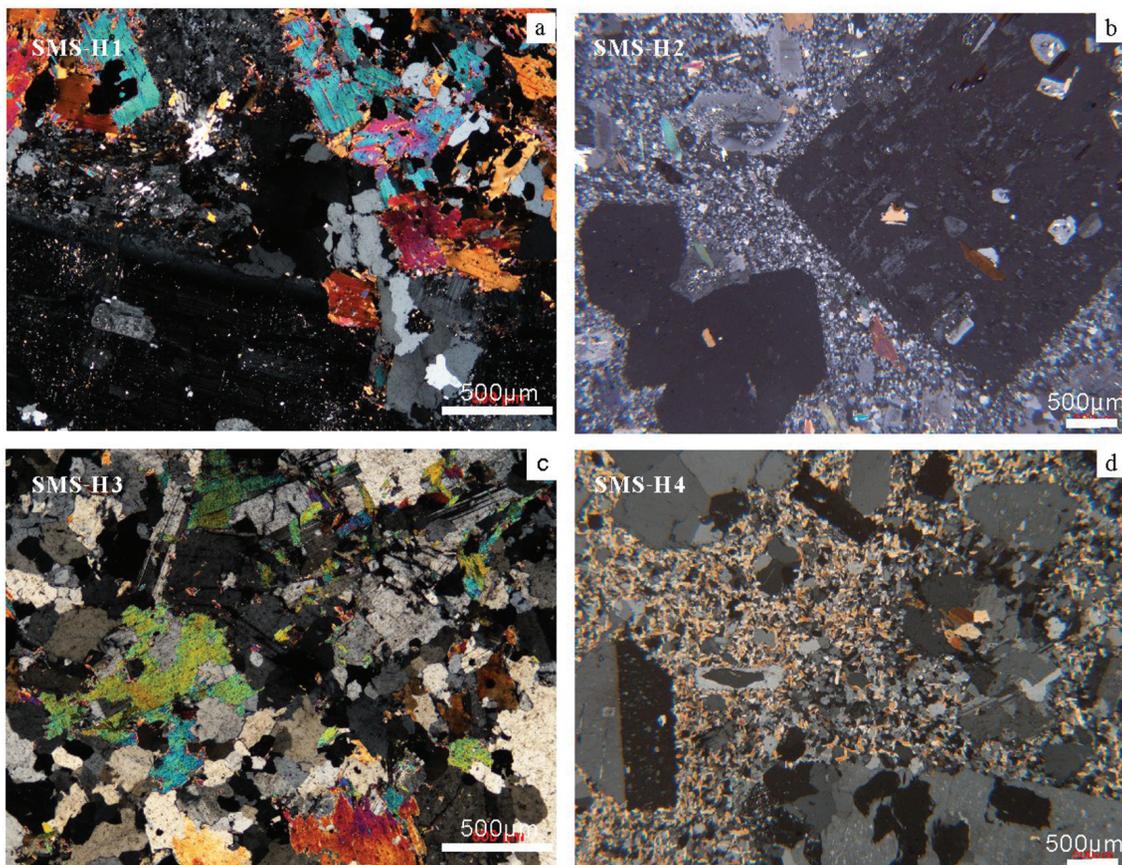


图3 石门寺地区新元古代和燕山期花岗岩的正交镜下显微照片

a—新元古代黑云母花岗岩闪长岩;b—燕山期细粒黑云母花岗岩;c—燕山期似斑状黑云母花岗岩;d—燕山期黑云母花岗岩斑岩

Fig.3 Microscopic photographs (crossed nicols) of Neoproterozoic and Yanshanian granitoids in Shimensi area

a—Neoproterozoic biotite granodiorites; b—Yanshanian fine-grained muscovite granite; c—Yanshanian biotite granite porphyry; d—Yanshanian biotite granite porphyry

构造。斑晶粒度以中细粒为主,石英(约30%)、钾长石(约15%)、斜长石(约8%)、黑云母(约2%)。基质主要是隐晶质长英质物质(约25%)和白云母(约20%)(图3d)。斑晶中钾长石主要为半自形—自形条纹长石,部分具有简单双晶,并且可以见到钾长石斑晶包裹斜长石和小的条纹长石。斜长石斑晶的粒度明显小于钾长石,整体呈半自形—自形,具有明显的聚片双晶。石英斑晶呈他形—自形,部分可见包裹黑云母。基质中的长英物质和白云母呈他形—半自形。该样品野外定名为黑云母花岗岩,实际薄片观察大部分云母都为白云母,但白云母鳞片细小(图3d),应为云英岩化所产生。

4 分析方法

岩石破碎后用人工重砂法分离出锆石,挑选晶体完好,裂隙较少的锆石样品使用环氧树脂固定制成锆石靶,抛光使锆石表面露出。进行反射光和透射光拍照,BSE图像在南京大学电子探针实验室获得,仪器型号为JXA-8800M。锆石CL图像在北京锆年领航科技有限公司获得,所用仪器为Mono CL3+型阴极荧光探头(Gatan, USA)的扫描电镜(型号为JSM6510)。

锆石、磷灰石、锡石等矿物的主量、微量元素测试及相关的定年工作均在南京大学内生金属矿床国家重点实验室完成。电子探针分析(EMPA)所用的仪器型号为JEOL 8100,测试电压为15 kV,20 nA电流,束斑大小1~2 μm 。对于氧化物的大部分元素的检测限都是优于0.02%。EPMA的数据是通过ZAF校正软件来获得的。锆石和锡石矿物的LA-ICP-MS U-Pb同位素分析和微量元素分析同时进行,所用仪器为Agilent 7500a ICP-MS和Geolas 193 nm激光器。详细的分析方法和流程见Gao et al. (2002)。测试时,激光剥蚀锆石颗粒形成气溶胶,氦气作为载气运送剥蚀掉的锆石再与氩气混合进入ICP-MS。测试频率为5 Hz,激光的束斑直径为25 μm 或32 μm 。用NIST610玻璃和KL-1作为矿物微量元素的外标,锆石的微量元素校正以 ^{29}Si 作为内标,锡石的微量元素则以 ^{118}Sn 做内标来校正锡石中的含量较低和较高的元素含量。定年时采用锆石标样GJ-1作为年龄测试的外标,其 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为(608.6 \pm 1.5) Ma (Jackson et al., 2004),锆石

标样Mud Tank(年龄为(732 \pm 5) Ma)为监控样品(Black et al., 1978)。U-Pb年代学结果计算采用软件Glitter(ver. 4.4)(Griffin et al., 2008)。普通Pb校正采用Excel程序ComPbCorr#3_15G(Andersen, 2002)。锆石、磷灰石、锡石的年代学结果和年龄谐和图使用ISOPLOT插件(ver. 2.06)完成(Ludwig, 1999)。通常采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄来代表相对年轻的(<1.0 Ga)岩石形成年龄(Black et al., 2003)。

5 分析结果

5.1 锆石U-Pb年龄

所选取的锆石都是呈透明到半透明,无色至浅黄色,呈自形至半自形。晶体呈短柱至长柱状(长宽比为1:2~1:4),粒径大多在70~200 μm 。在锆石的CL图像中(图4),大部分锆石都具有清晰的振荡环带,为典型岩浆锆石(吴元保等, 2004),极少数锆石具有全黑的CL特征,具有相对较高的U含量(>1000 $\times 10^{-6}$),其中部分高U锆石也具有较高的Th含量(>1000 $\times 10^{-6}$),这些特征可能代表为岩浆流体中形成的锆石(Shu et al., 2013)。所测的锆石年龄数据列于表1。

样品SMS-H1共分析29个点,其Th和U的含量分别为62 $\times 10^{-6}$ ~465 $\times 10^{-6}$,44 $\times 10^{-6}$ ~653 $\times 10^{-6}$,Th/U比值为0.22~2.10。除了一个点外,所有的测试点都落在谐和线上(图4a)。最老的一颗锆石(SMS-H1-23)的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 的年龄为(2338 \pm 22) Ma。另2个锆石分析点也给出较为谐和的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为(857 \pm 11) Ma和(867 \pm 11) Ma。其余26个岩浆锆石的测试点的加权平均年龄为(829.9 \pm 4.7) Ma ($n=26$, MSWD=0.37),可以认为该年龄能够代表该岩体的结晶年龄。与钟玉芳等(钟玉芳等, 2006)所测得的新元古代九岭岩体的年龄一致。

样品SMS-H2一共分析28个测试点,其Th和U的含量分别为26 $\times 10^{-6}$ ~841 $\times 10^{-6}$,41 $\times 10^{-6}$ ~2559 $\times 10^{-6}$,Th/U比值为0.10~1.44。所有的分析点都落在谐和线上(图4b)。除了最老的一颗锆石点(SMS-H2-11)的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 的年龄为(1310 \pm 83) Ma,余下的测试点都可以分为2个组。较老的一组由20颗锆石分析点组成,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的加权平均值的年龄为(805.8 \pm 5.5) Ma (MSWD=0.66);另一组由7个锆石分析点组成,其中3个点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的年龄分布在

表1 九岭石门寺矿段花岗岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄结果

Table 1 Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating result of granitoids in Shimensi, Jiuling area

分析点	Th/ 10^{-6}	U/ 10^{-6}	Th/U	同位素比值					同位素年龄/Ma						
				$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
SMS-H1 新元古代花岗岩闪长岩															
SMS-H1-02	70	44	1.59	0.0674	0.0020	1.27	0.04	0.1371	0.0023	849	62	834	16	828	13
SMS-H1-04	270	128	2.10	0.0673	0.0025	1.27	0.05	0.1366	0.0026	847	79	831	21	825	15
SMS-H1-05	74	78	0.96	0.0665	0.0027	1.24	0.05	0.1351	0.0025	823	86	819	22	817	14
SMS-H1-06	237	211	1.13	0.0675	0.0020	1.25	0.04	0.1349	0.0021	852	63	825	17	816	12
SMS-H1-07	213	282	0.75	0.0663	0.0013	1.24	0.02	0.1360	0.0018	817	42	821	11	822	10
SMS-H1-08	188	151	1.24	0.0684	0.0011	1.36	0.02	0.1440	0.0019	879	33	871	10	867	11
SMS-H1-09	78	206	0.38	0.0667	0.0018	1.25	0.03	0.1360	0.0021	830	59	824	15	822	12
SMS-H1-11	129	220	0.59	0.0670	0.0018	1.26	0.03	0.1366	0.0021	838	56	829	15	825	12
SMS-H1-12	62	193	0.32	0.0668	0.0014	1.27	0.03	0.1382	0.0019	832	44	834	12	835	11
SMS-H1-13	115	56	2.05	0.0670	0.0023	1.28	0.04	0.1381	0.0025	837	74	835	19	834	14
SMS-H1-14	199	121	1.64	0.0669	0.0022	1.27	0.04	0.1376	0.0023	833	70	831	18	831	13
SMS-H1-15	372	273	1.36	0.0670	0.0011	1.28	0.02	0.1390	0.0019	837	35	838	10	839	11
SMS-H1-16	166	220	0.76	0.0664	0.0012	1.25	0.03	0.1365	0.0020	820	40	823	11	825	11
SMS-H1-17	465	326	1.43	0.0669	0.0015	1.27	0.03	0.1379	0.0021	833	46	833	13	833	12
SMS-H1-18	356	184	1.94	0.0667	0.0016	1.26	0.03	0.1369	0.0021	829	50	827	14	827	12
SMS-H1-19	81	113	0.72	0.0670	0.0017	1.29	0.03	0.1391	0.0022	839	54	839	15	839	12
SMS-H1-20	105	337	0.31	0.0668	0.0011	1.27	0.02	0.1380	0.0020	831	36	833	10	834	11
SMS-H1-21	71	244	0.29	0.0668	0.0009	1.27	0.02	0.1380	0.0019	832	29	833	9	833	10
SMS-H1-22	70	316	0.22	0.0666	0.0014	1.25	0.03	0.1362	0.0021	824	44	824	12	823	12
SMS-H1-23	222	238	0.93	0.1494	0.0019	7.93	0.12	0.3853	0.0052	2338	22	2223	13	2101	24
SMS-H1-24	75	312	0.24	0.0678	0.0023	1.31	0.04	0.1397	0.0026	862	71	848	19	843	15
SMS-H1-25	164	209	0.78	0.0670	0.0023	1.27	0.04	0.1370	0.0026	837	74	830	19	828	14
SMS-H1-26	133	401	0.33	0.0673	0.0016	1.26	0.03	0.1361	0.0022	846	49	829	14	823	12
SMS-H1-27	200	422	0.47	0.0669	0.0019	1.26	0.04	0.1371	0.0024	834	62	830	17	828	13
SMS-H1-28	139	419	0.33	0.0669	0.0015	1.27	0.03	0.1374	0.0022	834	47	831	13	830	12
SMS-H1-29	62	222	0.28	0.0673	0.0013	1.32	0.03	0.1421	0.0020	848	40	854	11	857	11
SMS-H1-30	133	653	0.20	0.0677	0.0014	1.30	0.03	0.1394	0.0021	859	44	846	13	841	12
SMS-H1-31	49	219	0.22	0.0672	0.0015	1.30	0.03	0.1397	0.0020	845	48	844	13	843	12
SMS-H1-32	92	292	0.32	0.0684	0.0018	1.30	0.04	0.1379	0.0023	882	56	846	16	833	13
SMS-H2 燕山期黑云母花岗岩斑岩															
SMS-H2-01	92	230	0.40	0.0670	0.0018	1.23	0.03	0.1337	0.0021	838	59	817	15	809	12
SMS-H2-02	204	234	0.87	0.0688	0.0016	1.27	0.03	0.1338	0.0020	893	49	832	13	810	11
SMS-H2-03	105	163	0.64	0.0511	0.0052	0.16	0.02	0.0222	0.0007	246	232	147	13	141	5
SMS-H2-04	101	635	0.16	0.0668	0.0013	1.23	0.03	0.1340	0.0019	832	41	816	11	811	11
SMS-H2-05	95	349	0.27	0.0665	0.0015	1.23	0.03	0.1344	0.0020	823	48	816	13	813	11
SMS-H2-06	53	394	0.14	0.0670	0.0014	1.25	0.03	0.1350	0.0020	839	45	822	12	816	11
SMS-H2-07	149	258	0.57	0.0495	0.0033	0.16	0.01	0.0229	0.0005	173	153	148	9	146	3
SMS-H2-08	37	284	0.13	0.0666	0.0023	1.25	0.04	0.1356	0.0025	826	74	821	19	820	14
SMS-H2-09	148	307	0.48	0.0666	0.0020	1.25	0.04	0.1360	0.0023	824	63	822	17	822	13
SMS-H2-10	247	172	1.44	0.0493	0.0036	0.16	0.01	0.0229	0.0006	160	167	147	10	146	3
SMS-H2-11	370	713	0.52	0.0848	0.0035	2.56	0.10	0.2191	0.0045	1310	83	1289	30	1277	24
SMS-H2-13	841	1728	0.49	0.0494	0.0016	0.17	0.01	0.0255	0.0004	166	77	162	5	162	3
SMS-H2-14	101	310	0.33	0.0669	0.0033	1.26	0.06	0.1370	0.0030	833	107	829	28	828	17
SMS-H2-15	269	239	1.12	0.0477	0.0060	0.15	0.02	0.0231	0.0009	82	253	143	16	147	5
SMS-H2-16	179	623	0.29	0.0658	0.0017	1.20	0.03	0.1318	0.0021	799	55	798	15	798	12
SMS-H2-18	140	312	0.45	0.0659	0.0022	1.21	0.04	0.1326	0.0022	803	72	803	18	803	13
SMS-H2-19	97	681	0.14	0.0656	0.0012	1.19	0.02	0.1311	0.0019	794	40	794	11	794	11
SMS-H2-20	67	185	0.36	0.0657	0.0015	1.18	0.03	0.1305	0.0020	796	50	792	13	791	11
SMS-H2-21	26	41	0.64	0.0645	0.0047	1.19	0.08	0.1344	0.0039	756	157	798	38	813	22
SMS-H2-22	35	259	0.13	0.0655	0.0034	1.19	0.06	0.1316	0.0029	791	112	796	28	797	17
SMS-H2-23	270	470	0.57	0.0662	0.0021	1.18	0.04	0.1296	0.0022	812	69	792	18	786	13
SMS-H2-24	47	278	0.17	0.0656	0.0022	1.21	0.04	0.1337	0.0024	795	72	804	19	809	14
SMS-H2-25	132	364	0.36	0.0660	0.0020	1.20	0.04	0.1326	0.0023	805	65	802	17	802	13
SMS-H2-27	106	176	0.60	0.0660	0.0021	1.21	0.04	0.1333	0.0022	807	67	807	17	806	13
SMS-H2-28	29	287	0.10	0.0476	0.0012	0.18	0.00	0.0276	0.0004	79	60	169	4	175	3
SMS-H2-30	823	2559	0.32	0.0496	0.0030	0.19	0.01	0.0274	0.0007	176	137	174	9	174	4
SMS-H2-31	447	1955	0.23	0.0666	0.0018	1.21	0.03	0.1323	0.0022	824	56	806	15	801	12
SMS-H2-31	111	520	0.21	0.0666	0.0018	1.21	0.03	0.1323	0.0022	824	56	806	15	801	12

续表1

分析点	Th/ 10^{-6}	U/ 10^{-6}	Th/U	同位素比值						同位素年龄/Ma					
				$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
SMS-H3 燕山期云英岩化细粒黑云母花岗岩															
SMS-H3-1	85	417	0.20	0.0670	0.0019	1.24	0.04	0.1346	0.0023	839	61	820	16	814	13
SMS-H3-2	728	1661	0.44	0.0498	0.0019	0.19	0.01	0.0275	0.0005	187	90	176	6	175	3
SMS-H3-3	49	469	0.10	0.0662	0.0016	1.22	0.03	0.1336	0.0021	812	53	809	14	809	12
SMS-H3-4	86	248	0.35	0.0670	0.0018	1.28	0.04	0.1392	0.0022	837	58	839	16	840	13
SMS-H3-5	333	349	0.95	0.0491	0.0020	0.16	0.01	0.0239	0.0004	152	96	152	6	152	3
SMS-H3-6	39	462	0.08	0.0674	0.0014	1.29	0.03	0.1386	0.0021	850	45	840	13	837	12
SMS-H3-7	58	382	0.15	0.0663	0.0021	1.23	0.04	0.1346	0.0024	815	67	814	18	814	13
SMS-H3-8	2111	2385	0.89	0.0527	0.0028	0.17	0.01	0.0240	0.0005	317	122	163	8	153	3
SMS-H3-10	225	337	0.67	0.0664	0.0016	1.16	0.03	0.1266	0.0020	820	51	782	13	769	11
SMS-H3-11	153	232	0.66	0.0678	0.0021	1.30	0.04	0.1391	0.0024	861	66	845	18	839	14
SMS-H3-12	62	162	0.38	0.0679	0.0026	1.26	0.05	0.1344	0.0026	867	82	827	21	813	15
SMS-H3-13	149	1544	0.10	0.0484	0.0034	0.17	0.01	0.0251	0.0006	120	156	157	10	160	4
SMS-H3-14	254	401	0.63	0.0668	0.0019	1.20	0.04	0.1308	0.0022	830	62	802	16	792	12
SMS-H3-15	97	185	0.53	0.0659	0.0021	1.22	0.04	0.1343	0.0023	804	69	810	18	812	13
SMS-H3-17	81	657	0.12	0.0467	0.0026	0.15	0.01	0.0237	0.0005	31	121	144	7	151	3
SMS-H3-19	266	437	0.61	0.0666	0.0014	1.25	0.03	0.1357	0.0020	825	45	822	12	820	12
SMS-H3-22	49	64	0.77	0.0484	0.0128	0.16	0.04	0.0245	0.0019	118	446	154	36	156	12
SMS-H3-23	174	810	0.21	0.0488	0.0033	0.15	0.01	0.0229	0.0006	138	152	146	9	146	4
SMS-H3-24	596	1082	0.55	0.0492	0.0040	0.16	0.01	0.0230	0.0006	156	182	147	11	147	4
SMS-H3-25	254	387	0.66	0.0487	0.0028	0.15	0.01	0.0230	0.0005	135	129	146	7	147	3
SMS-H3-26	108	345	0.31	0.0667	0.0014	1.24	0.03	0.1343	0.0020	828	46	817	13	813	11
SMS-H3-29	495	1393	0.36	0.0495	0.0026	0.19	0.01	0.0281	0.0006	173	122	178	8	178	4
SMS-H3-30	114	208	0.55	0.0489	0.0038	0.15	0.01	0.0227	0.0006	142	173	144	10	144	4
SMS-H3-31	219	246	0.89	0.0489	0.0036	0.16	0.01	0.0231	0.0006	142	168	147	10	147	4
SMS-H4 燕山期云英岩化黑云母花岗斑岩															
SMS-H4-01	188	3514	0.05	0.0492	0.0015	0.16	0.01	0.0242	0.0004	156	73	154	4	154	3
SMS-H4-02	84	443	0.19	0.0490	0.0041	0.15	0.01	0.0222	0.0007	147	190	142	11	142	4
SMS-H4-03	95	292	0.33	0.0489	0.0033	0.16	0.01	0.0236	0.0006	143	152	150	9	151	4
SMS-H4-04	178	4098	0.04	0.0492	0.0017	0.17	0.01	0.0246	0.0004	157	81	157	5	157	3
SMS-H4-05	181	3603	0.05	0.0481	0.0035	0.16	0.01	0.0240	0.0007	103	162	150	10	153	4
SMS-H4-06	653	427	1.53	0.0491	0.0026	0.16	0.01	0.0236	0.0005	155	122	151	7	150	3
SMS-H4-07	229	466	0.49	0.0491	0.0029	0.15	0.01	0.0228	0.0005	150	132	145	8	145	3
SMS-H4-08	185	2465	0.08	0.0482	0.0029	0.16	0.01	0.0238	0.0006	110	134	149	8	152	4
SMS-H4-09	351	536	0.65	0.0669	0.0018	1.27	0.03	0.1375	0.0022	835	56	832	15	831	12
SMS-H4-10	14649	2724	5.38	0.0483	0.0029	0.16	0.01	0.0242	0.0006	113	135	151	8	154	4
SMS-H4-11	238	3612	0.07	0.0489	0.0036	0.16	0.01	0.0233	0.0006	142	165	148	9	148	4
SMS-H4-12	246	220	1.12	0.0488	0.0072	0.15	0.02	0.0229	0.0010	138	298	145	19	146	7
SMS-H4-13	664	3683	0.18	0.0494	0.0043	0.16	0.01	0.0230	0.0008	167	196	148	11	146	5
SMS-H4-15	105	194	0.54	0.1108	0.0027	4.74	0.12	0.3105	0.0048	1813	45	1775	21	1743	24
SMS-H4-16	137	3364	0.04	0.0472	0.0021	0.15	0.01	0.0231	0.0005	58	98	142	6	147	3
SMS-H4-17	219	427	0.51	0.0673	0.0018	0.74	0.02	0.0802	0.0013	847	57	565	12	497	8
SMS-H4-18	312	2800	0.11	0.0502	0.0012	0.18	0.00	0.0260	0.0004	205	59	168	4	165	3
SMS-H4-19	132	635	0.21	0.0768	0.0027	0.77	0.03	0.0728	0.0014	1115	72	580	15	453	8
SMS-H4-20	317	996	0.32	0.0489	0.0051	0.15	0.02	0.0227	0.0008	142	231	144	13	145	5
SMS-H4-21	52	290	0.18	0.0675	0.0014	1.28	0.03	0.1374	0.0020	854	44	836	13	830	12
SMS-H4-22	154	4285	0.04	0.0489	0.0025	0.15	0.01	0.0229	0.0005	143	116	146	7	146	3
SMS-H4-23	232	4452	0.05	0.0479	0.0023	0.15	0.01	0.0232	0.0005	96	107	145	6	148	3
SMS-H4-24	263	196	1.34	0.0495	0.0067	0.15	0.02	0.0220	0.0009	173	277	142	17	141	6
SMS-H4-26	721	339	2.13	0.0484	0.0032	0.15	0.01	0.0227	0.0006	121	150	143	9	145	4
SMS-H4-27	184	3475	0.05	0.0486	0.0024	0.15	0.01	0.0229	0.0005	129	114	145	7	146	3
SMS-H4-28	144	3234	0.04	0.0488	0.0021	0.15	0.01	0.0226	0.0005	139	99	144	6	144	3
SMS-H4-29	367	739	0.50	0.0484	0.0031	0.15	0.01	0.0230	0.0005	121	144	145	8	147	3
SMS-H4-30	244	3167	0.08	0.0476	0.0022	0.15	0.01	0.0233	0.0005	80	103	144	6	148	3

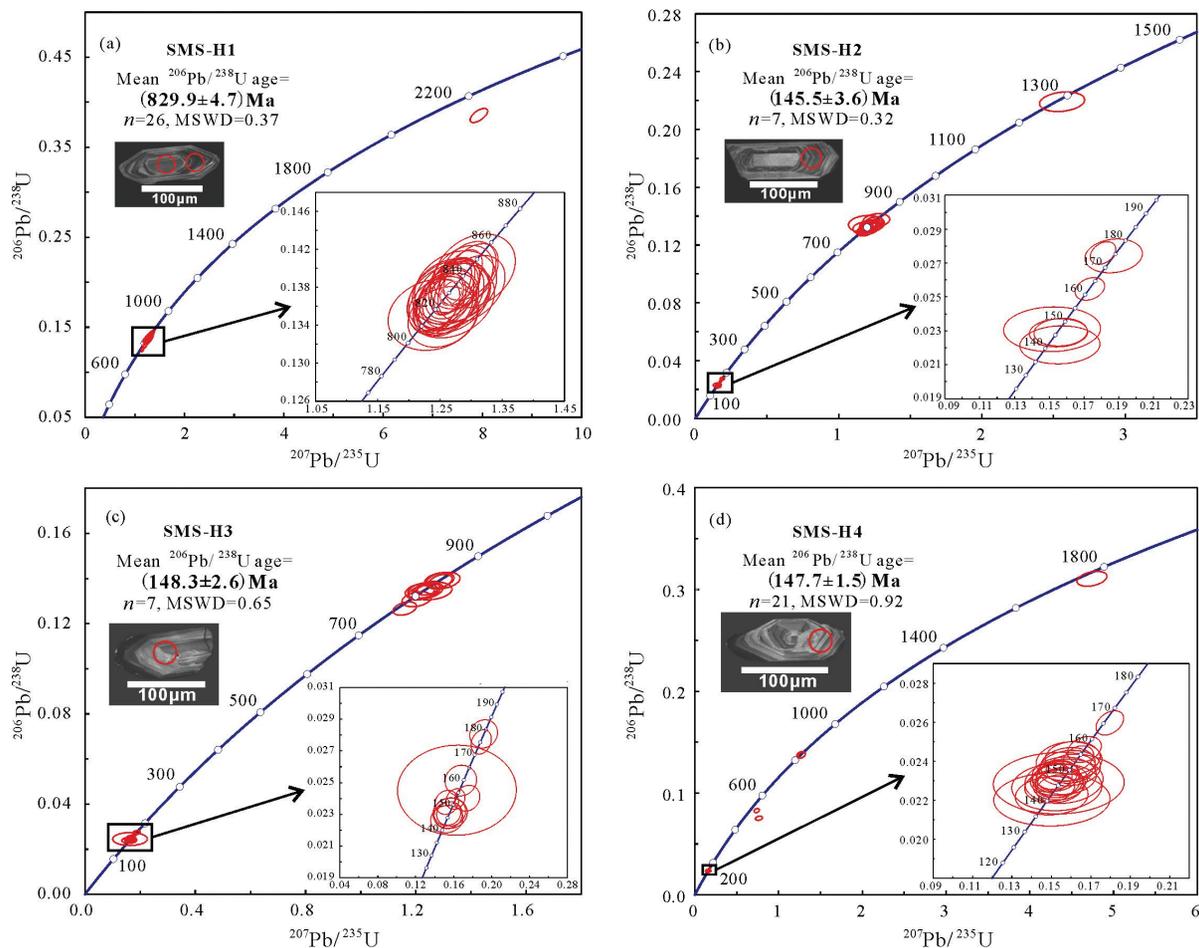


图4 大湖塘新元古代和燕山期花岗岩样品的锆石U-Pb年龄图和代表性锆石CL图像

Fig.4 Zircon U-Pb age and representative cathodoluminescence (CL) images of Neoproterozoic and Yanshannian granitoids in Dahutang area

162~175 Ma,最年轻且连续的4个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的加权平均值的年龄为 (145.5 ± 3.6) Ma (MSWD=0.32)。该最年轻的加权平均值的年龄(约146 Ma)可以代表细粒黑云母花岗岩岩体形成的年龄。

样品SMS-H3一共分析24个测试点,Th/U比值为0.08~0.89。所有的年龄分析点都落在谐和线上(图4c),并且也明显可以分成2组:其中一组由较老的12个年龄分析点组成,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的年龄变化范围从769 Ma到840 Ma;另一组由余下12个较年轻的分析点组成,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的年龄分布在144~178 Ma,其中最年轻且谐和的7个锆石分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均值年龄为 (148.3 ± 2.6) Ma (MSWD=0.70)。该年龄也代表了似斑状黑云母花岗岩岩体的结晶年龄。

样品SMS-H4一共分析26个测试点,Th/U比

值的范围为0.05~2.13。除了2个稍不谐和的点,其余的锆石分析点都落在了谐和线上(图4d)。这2个不谐和点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 的年龄为 (847 ± 57) Ma和 (1115 ± 72) Ma。3个年龄较老的锆石分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄范围在830~1743 Ma。其余23个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄较为一致,其加权平均值年龄为 (147.7 ± 1.5) Ma (MSWD=0.56)。该年龄代表了黑云母花岗岩斑岩岩体的形成年龄。

5.2 锡石U-Pb年龄

本次锡石的U-Pb定年结果列于表2。石门寺黑云母花岗岩SMS-H2中的锡石进行了15个点的U-Pb同位素分析。在谐和图解上得到了较好的下交点的年龄(图5a),为 (153 ± 25) Ma($n=11$, MSWD=1.05),该年龄结果误差较大,不过总体上与该样品所获得的锆石年龄 (145.5 ± 3.6) Ma大体相当。

表2 九岭石门寺矿段燕山期花岗岩 LA-ICP-MS 锡石 U-Pb 年龄结果

Table 2 Cassiterite LA-ICP-MS U-Pb dating result Yanshannian granitoids in Shimensi, Jiuling area

分析点	同位素比值						同位素年龄/Ma					
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
SMS-H2	燕山期黑云母花岗岩斑岩											
SPH2-1	0.618	0.133	10.00	1.58	0.12	0.02	4552	281	2435	146	715	107
SPH2-2	0.785	0.118	18.34	1.81	0.17	0.02	4896	198	3008	95	1009	117
SPH2-3	0.428	0.157	3.40	1.08	0.06	0.01	4010	460	1505	249	362	67
SPH2-4	0.176	0.088	0.57	0.27	0.02	0.00	2613	654	458	173	150	25
SPH2-5	0.718	0.143	13.44	1.86	0.14	0.02	4768	259	2711	131	820	120
SPH2-6	0.288	0.249	1.46	1.16	0.04	0.01	3405	940	914	477	233	81
SPH2-7	0.237	0.079	1.19	0.37	0.04	0.00	3099	452	795	174	231	26
SPH2-8	0.646	0.351	12.22	4.84	0.14	0.05	4615	618	2622	371	829	298
SPH2-9	0.674	0.165	5.80	1.01	0.06	0.01	4676	314	1946	152	390	67
SPH2-10	0.333	0.434	1.14	1.27	0.02	0.02	3633	1229	771	604	158	104
SPH2-13	0.644	0.175	6.14	1.12	0.07	0.01	4610	344	1996	159	431	87
SPH2-15	0.803	0.845	10.14	5.74	0.09	0.08	4928	1003	2448	523	565	484
SMS-H3	云英岩化燕山期细粒黑云母花岗岩											
SPH3-1	0.226	0.075	0.90	0.27	0.03	0.00	3025	450	653	146	184	25
SPH3-2	0.152	0.019	0.53	0.06	0.03	0.00	2370	200	435	41	162	9
SPH3-3	0.230	0.047	0.86	0.15	0.03	0.00	3049	294	628	84	172	17
SPH3-4	0.106	0.027	0.35	0.09	0.02	0.00	1740	403	308	64	154	12
SPH3-5	1.007	0.469	9.21	2.32	0.07	0.03	5247	531	2359	231	414	160
SPH3-6	1.155	0.363	20.35	3.66	0.13	0.04	5439	378	3108	174	776	202
SPH3-7	0.309	0.064	1.23	0.22	0.03	0.00	3513	289	815	100	184	20
SPH3-8	0.360	0.055	1.44	0.17	0.03	0.00	3750	216	907	72	185	18
SPH3-9	0.136	0.031	0.45	0.09	0.02	0.00	2179	346	380	64	154	15
SPH3-11	0.432	0.112	2.48	0.50	0.04	0.01	4025	340	1265	145	263	43
SPH3-12	0.048	0.021	0.16	0.07	0.02	0.00	83	800	148	59	152	11
SPH3-14	0.757	0.173	4.21	0.64	0.04	0.01	4843	292	1677	126	255	44
SPH3-15	0.190	0.055	0.66	0.17	0.03	0.00	2739	409	514	103	161	21

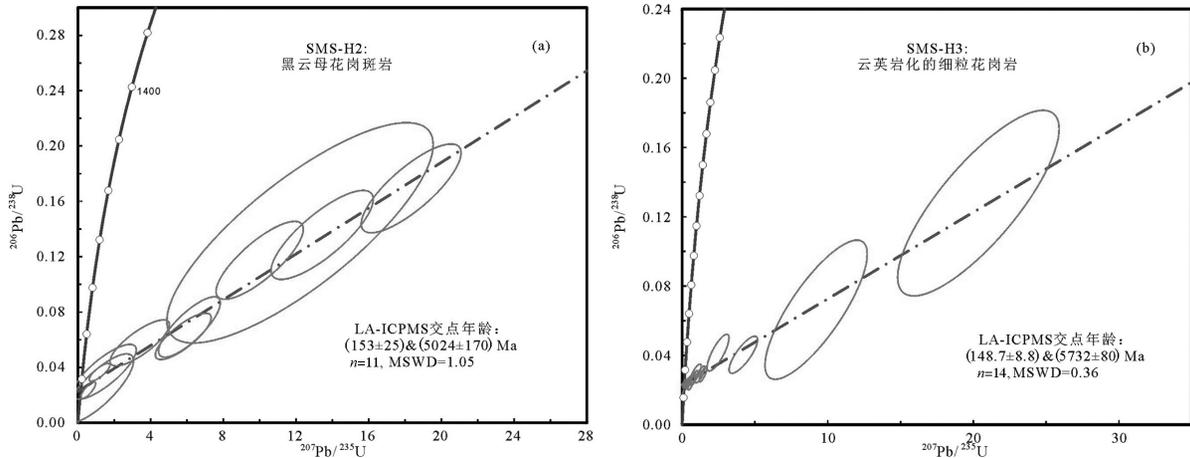


图5 九岭石门寺地区燕山期花岗岩中锡石 LA-ICPMS U-Pb 定年结果

a—黑云母花岗岩斑岩(SMS-H2); b—云英岩化花岗岩(SMS-H3)

Fig.5 LA-ICPMS U-Pb ages of cassiterite from Yanshannian granitoids in Shimensi, Jiuling area

a—biotite granite porphyry (SMS-H2); b—greisenized fine-grained granite (SMS-H3)

似斑状黑云母花岗岩 SMS-H3 中的锡石同样进行了 15 个点的年代学分析, 其下交点的年龄为 (148.7±8.8) Ma (n=14, MSWD=0.36) (图 5b)。该年龄与 SMS-H3 中锆石所获得的 U-Pb 年龄 (148.3±2.6) Ma 在误差范围内一致。

5.3 锆石微量元素特征

依据锆石所测得的年龄, 我们可以将其划分为

岩浆锆石以及捕获/继承锆石。岩浆锆石的年龄代表了岩体所形成的年龄。所测得的锆石微量数据列于表 3。

石门寺地区新元古代花岗闪长岩(SMS-H1)中锆石 U、Th 含量分别为 $44 \times 10^{-6} \sim 653 \times 10^{-6}$ 和 $62 \times 10^{-6} \sim 465 \times 10^{-6}$, 相应的 Th/U 比值为 0.22~2.10, 大部分都大于 0.4, 这与岩浆锆石的特征一致 (Hoskin et al.,

表3 九岭石门寺矿段燕山期花岗岩锆石微量元素分析结果

Table 3 Trace element concentrations of zircon of Yanshannian granitoids in Shimensi Jiuling area

Sample	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Yb	Lu	Ti	$T_{\text{Ti-in-zrc}}/^{\circ}\text{C}$	2σ	REE/ 10^{-6} (Ce/Ce)*	
SMS-H2 燕山期黑云母花岗岩																		
SMS-H2-01	0.01	2.68	0.05	1.25	3.29	0.33	28.3	12.3	162	69	318	674	123	6.52	729	27	1393	27.8
SMS-H2-02	0.01	6.75	0.27	4.32	11.5	1.77	72.9	26.3	322	120	511	940	161	9.22	759	21	2178	36.2
SMS-H2-03	0.01	7.93	0.09	1.48	4.28	0.98	20.4	7.0	76	28	107	222	38.6	1.86	632	54	513	77.0
SMS-H2-04	0.01	0.80	0.08	1.41	5.76	0.13	51.6	25.1	349	141	655	1442	249	15.7	810	22	2920	5.82
SMS-H2-05	0.01	2.95	0.02	0.51	2.04	0.14	19.3	10.9	138	43.0	156	252	43.0	3.02	667	38	668	66.2
SMS-H2-06	0.002	0.41	0.04	0.89	2.93	0.12	31.9	15.8	210	80.3	360	749	138	5.02	707	25	1589	11.7
SMS-H2-07	0.04	6.73	0.09	2.06	5.72	1.01	23.6	6.93	68.1	23.7	99.1	198	35.8	13.3	794	28	470	27.8
SMS-H2-08	0.01	0.35	0.04	0.52	2.22	0.13	25.3	12.5	165	64.0	290	654	120	5.21	710	27	1334	4.93
SMS-H2-09	0.02	2.26	0.11	1.53	5.47	0.41	40.0	16.8	225	94.2	436	886	166	12.5	788	20	1874	11.9
SMS-H2-10	0.01	9.82	0.29	4.97	12.7	0.97	49.3	13.1	105	25.9	78.9	83.3	12.2	11.7	782	20	397	38.0
SMS-H2-11	0.00	6.74	0.07	0.70	3.60	0.08	22.3	9.50	120	47.6	215	409	75.3	3.90	687	28	911	22.6
SMS-H2-13	0.04	8.67	0.22	5.20	16.1	1.17	89.0	31.3	339	116	475	884	154	8.99	757	22	2120	22.1
SMS-H2-15	0.07	17.2	0.16	3.06	5.94	1.38	27.9	7.75	208	86.7	19.9	71.0	118	20.6	810	19	362	41.0
SMS-H2-16	0.01	2.51	0.05	0.93	5.23	0.44	41.3	18.6	254	101	469	942	171	4.82	704	22	2006	29.8
SMS-H2-18	0.05	3.45	0.09	2.27	5.98	0.64	42.3	16.9	217	88.9	411	836	156	10.3	770	19	1781	12.8
SMS-H2-19	0.01	0.73	0.04	0.98	3.81	0.16	41.9	22.4	334	143	701	1543	290	2.65	657	29	3080	9.33
SMS-H2-20	0.03	0.50	0.07	0.98	4.53	0.07	34.6	15.8	208	86.7	400	782	143	11.8	783	20	1676	2.77
SMS-H2-21	0.02	8.98	0.05	0.66	1.33	0.59	7.81	2.85	33.2	12.8	61	145	30.4	7.59	742	20	304	72.8
SMS-H2-22	0.23	0.71	0.10	1.38	2.93	0.10	28.6	12.8	163	57.5	239	435	78.6	4.90	705	32	1021	1.16
SMS-H2-23	0.02	2.60	0.15	3.26	10.8	0.40	84.3	33.9	445	175	791	1482	268	5.56	715	33	3297	12.1
SMS-H2-24	0.00	0.55	bdl	0.40	2.46	0.07	26.9	14.5	212	88.7	414	800	142	5.60	716	24	1701	
SMS-H2-25	0.04	1.01	0.14	2.86	7.61	0.12	55.5	23.0	292	111	480	889	156	7.72	744	27	2018	3.14
SMS-H2-27	0.01	0.39	bdl	0.44	2.07	0.10	17.9	9.23	124	47.3	222	528	97.7	bdl			1050	
SMS-H2-28	0.05	6.83	0.39	6.95	16.2	1.78	102	35.8	362	115	454	878	138	5.85	720	38	2116	11.5
SMS-H2-30	0.02	14.8	0.05	0.74	2.92	1.69	22.1	9.06	113	44.7	212	499	88.7	bdl			1009	102
SMS-H2-31	0.97	4.30	0.90	8.81	13.2	0.22	66.6	30.1	409	156	694	1417	222	8.46	752	32	3023	1.11
SMS-H3 燕山期似斑状黑云母花岗岩																		
SMS-H3-1	0.03	1.17	0.06	1.03	5.41	0.15	40.7	18.8	251	99.3	455	1023	163	5.64	717	24	2059	6.99
SMS-H3-2	0.08	11.5	0.22	3.91	12.6	1.18	68.5	23.9	267	89.1	353	689	105	11.7	782	20	1625	21.4
SMS-H3-3	0.03	0.44	0.01	0.51	3.79	0.10	28.4	14.6	193	72.9	322	733	120	3.27	673	34	1489	9.10
SMS-H3-4	0.02	2.26	0.07	1.31	4.79	0.26	33.5	14.5	199	82.0	388	863	148	6.07	723	26	1737	16.5
SMS-H3-5	0.01	13.4	0.25	3.36	7.20	2.45	35.8	12.7	139	52.2	229	534	90.1	6.36	727	25	1119	73.1
SMS-H3-6	0.01	0.39	0.04	0.36	2.28	0.05	21.6	13.1	191	75.9	349	808	128	2.68	658	36	1590	6.96
SMS-H3-7	0.01	0.49	0.06	0.61	3.77	0.08	34.6	16.4	222	86.7	392	886	138	3.30	674	37	1781	6.95
SMS-H3-8	0.53	18.8	0.70	7.34	8.90	1.08	46.9	17.1	216	81.9	357	683	120	7.38	740	48	1560	7.45
SMS-H3-10	0.00	17.2	0.10	3.11	9.96	1.06	59.5	22.3	276	104	435	857	131	14.6	803	23	1917	39.0
SMS-H3-11	0.19	13.7	0.10	1.32	2.63	0.49	15.0	5.92	82.7	35.0	171	439	82.0	6.17	724	31	849	24.5
SMS-H3-12	0.002	2.01	0.05	1.51	3.75	0.30	23.4	11.4	154	61.9	286	651	112	6.75	732	36	1307	43.9
SMS-H3-13	0.05	1.22	0.16	2.26	8.11	0.45	57.5	23.4	254	83.0	335	628	105	4.58	699	42	1498	3.30
SMS-H3-14	0.01	1.54	0.11	2.31	5.77	0.15	36.0	15.7	203	72.4	296	568	84.2	4.23	693	28	1286	13.0
SMS-H3-15	0.02	1.96	0.06	1.59	5.99	0.82	36.5	14.6	183	71.3	311	658	113	6.87	733	26	1398	13.8
SMS-H3-17	0.01	2.26	0.06	0.83	1.28	0.54	5.32	1.89	24.6	10.6	54.3	175	35.0	2.08	640	42	311	22.7
SMS-H3-19	0.04	3.70	0.41	8.32	16.9	0.93	89.5	31.9	379	138	585	1155	189	8.43	751	22	2597	7.44
SMS-H3-22	0.02	3.05	0.07	1.78	3.06	0.24	10.8	1.76	13.1	2.44	7.19	10.3	1.29	15.9	812	24	55.1	17.8
SMS-H3-23	0.04	3.60	0.14	2.42	6.93	0.52	29.1	6.84	49.4	9.49	22.3	21.6	2.68	6.88	733	26	155	11.4
SMS-H3-24	0.00	21.7	0.14	2.90	8.84	1.40	46.5	16.6	199	72.0	310	625	100	6.57	729	32	1404	52.9
SMS-H3-25	0.07	14.7	0.07	1.53	4.75	1.03	22.3	8.00	88.5	30.5	127	260	45.7	3.56	679	30	604	51.1
SMS-H3-26	0.09	1.13	0.13	3.36	9.90	0.27	67.9	27.5	349	126	537	1085	175	6.47	728	30	2382	2.6
SMS-H3-27	0.02	8.49	0.08	1.31	4.63	0.73	39.2	18.1	254	104	478	1016	184	14.9	805	23	2108	47.8
SMS-H3-29	0.00	5.00	0.16	2.71	8.81	1.00	63.8	23.3	247	79.4	311	550	93.3	8.32	750	19	1385	70.6
SMS-H3-30	0.23	7.54	0.14	2.46	3.31	1.53	20.1	7.49	80.8	26.1	92.8	146	25.0	10.1	767	26	413	10.3
SMS-H3-31	0.03	10.37	0.26	3.89	8.55	2.53	39.9	12.8	144	49.5	204	394	69.6	4.92	705	28	939	26.7
SMS-H4 燕山期云英岩化黑云母花岗岩斑岩																		
SMS-H4-01	41.7	89.8	10.4	44.5	16.4	0.93	73.5	36.7	454	152	629	1075	174	bdl			2798	1.04
SMS-H4-02	0.01	6.93	bdl	0.32	1.45	0.42	7.42	3.14	38	14	60	147	26	3.38	675	26	304	
SMS-H4-03	0.02	1.33	0.15	2.86	6.60	0.46	63.3	18.5	220	79	334	657	107	2.95	665	41	1473	5.60
SMS-H4-04	1.99	7.69	0.73	5.00	9.24	0.44	78.3	37.0	433	143	576	1124	153	6.81	733	37	2569	1.54
SMS-H4-05	0.21	2.20	0.10	1.75	7.76	0.46	70.1	32.9	387	129	528	1022	144	4.47	697	33	2326	3.61
SMS-H4-06	0.09	35.2	1.14	21.0	34.0	8.49	122	30.6	243	58.8	178	241	35.7	4.73	702	27	1009	26.1
SMS-H4-07	0.01	6.32	0.10	2.44	6.64	0.84	30.7	11.4	123	41.4	172	335	54.5	5.71	718	24	784	49.6
SMS-H4-08	0.63	2.65	0.27	1.87	7.83	0.50	65.3	28.1	318	103	423	775	121	5.77	718	38	1846	1.56
SMS-H4-09	0.01	9.37	0.22	3.94	8.72	1.15	64.5	24.5	307	117	512	1005	168	10.8	774	21	2222	51.6

续表3

Sample	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Yb	Lu	Ti	$T_{Ti\ in\ zrc}/^{\circ}C$	$2\sigma\ REE/10^6\ (Ce/Ce)^*$		
	/10 ⁻⁶																	
SMS-H4-11	0.32	2.00	0.19	2.20	9.03	0.54	79.5	36.4	408	130	529	1027	144	9.93	766	50	2367	1.97
SMS-H4-12	0.04	11.6	0.19	4.19	9.85	2.04	37.4	10.9	101	29.1	105	170	26.1	4.82	704	26	508	31.8
SMS-H4-13	0.19	7.43	0.25	2.86	8.49	0.67	59.2	26.5	335	121	537	1080	181	4.91	705	38	2359	8.33
SMS-H4-15	0.03	6.82	0.07	1.77	5.70	0.64	39.2	15.5	198	77.4	351	721	123	15.3	808	18	1541	40.0
SMS-H4-16	0.18	2.24	0.17	1.31	6.30	0.47	62.2	32.9	405	132	562	965	152	3.11	669	56	2321	3.14
SMS-H4-17	0.01	19.6	0.08	1.38	3.30	0.42	20.2	7.53	86.6	31.6	147	354	63.7	6.96	734	20	735	175
SMS-H4-18	0.00	3.14	0.10	2.10	7.41	0.69	55.6	26.4	339	130	591	1264	217	5.85	720	22	2636	269
SMS-H4-19	0.17	2.64	0.16	3.10	5.38	0.49	32.9	12.5	155	58.2	263	643	110	10.6	773	30	1287	3.86
SMS-H4-20	0.01	3.39	0.17	3.24	10.6	0.50	50.6	16.7	172	56.3	234	435	75.0	9.19	759	19	1058	20.1
SMS-H4-21	bdl	0.43	0.02	0.78	3.38	0.07	28.1	13.7	194	78.4	373	765	137	3.67	682	25	1594	
SMS-H4-22	0.32	2.52	0.21	1.46	7.89	0.58	69.8	36.9	452	150	617	1099	172	6.71	731	35	2610	2.37
SMS-H4-23	6.68	14.7	1.85	10.5	12.3	0.65	79.1	41.1	493	163	646	1148	171	14.6	803	33	2788	1.01
SMS-H4-24	0.04	11.4	0.39	7.68	11.79	1.99	41.1	11.2	109	35.4	138	247	43.6	12.7	790	18	660	23.6
SMS-H4-26	0.22	35.6	1.01	13.1	23.1	3.95	85.6	25.1	253	81.5	321	562	90.2	9.60	763	25	1495	18.3
SMS-H4-27	1.08	8.51	1.09	7.29	10.3	0.89	70.1	32.6	383	126	513	952	143	8.35	750	23	2250	1.90
SMS-H4-28	0.25	1.18	0.05	0.69	6.01	0.44	60.3	31.0	376	127	521	902	149	4.38	696	38	2175	2.55
SMS-H4-29	0.00	15.7	0.14	2.71	8.09	1.01	40.9	14.4	158	55.8	236	443	81.8	7.47	741	27	1057	160.9
SMS-H4-30	0.12	1.99	0.12	2.06	9.05	0.53	80.0	35.4	396	131	531	929	151	8.80	755	20	2267	4.00

Sample	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	W
	/10 ⁻⁶															
SMS-H2 燕山期黑云母花岗岩																
SPH2-1	490	602	40.1	89.6	6.90	0.12	6.50	7.25	21.2	4.43	2.43	0.04	3.65	1.19	1079.66	5736.20
SPH2-2	331	657	39.5	18.8	11.0	2.03	55.1	7.33	9.38	0.48	1.19	0.13	2.05	3.70	316.25	4645.56
SPH2-5	1760	2618	203	87.1	17.8	2.31	52.8	4.47	4.86	1.36	0.84	0.40	3.34	1.93	600.48	31704.39
SPH2-6	3.86	18.8	4.38	2.91	11.9	1.02	10.0	6.67	1.87	0.65	9.16	3.87	1.91	3.32	625.94	5918.84
SPH2-7	1642	5045	307	65.0	14.0	2.00	14.0	13.5	4.38	0.57	12.1	0.83	14.32	0.39	2361.10	92601.27
SPH2-11	289799	580076	66796	257143	53212	13039	38957	6164	37190	7370	22064	3967	30012	4487	bdl	bdl
SPH2-12	1593	bdl	1963	2395	26.3	2.55	67.3	9.63	58.1	12.2	46.0	4.58	22.82	4.01	bdl	bdl
SPH2-13	1373	1028	94	53.5	38.1	5.55	58.8	4.11	10.6	6.43	12.4	3.20	6.65	2.20	11122.90	20477.88
SPH2-15	529	1293	97	31.0	5.70	7.70	54.2	5.56	2.69	5.53	2.17	1.65	2.16	8.37	84.03	bdl
SMS-H3 燕山期似斑状黑云母花岗岩																
SPH3-1	3421	1847	87.5	59.2	73.9	22.0	58.4	6.51	25.4	7.43	43.2	4.10	77.5	20.9	4314	19457
SPH3-2	12738	12408	2598	1128	9.60	5.90	34.5	4.44	2.16	2.52	12.4	5.04	38.7	2.67	5686	461396
SPH3-3	61032	1718	74220	40500	73.9	11.0	423	19.4	33.8	7.63	9.04	5.07	23.1	9.24	9277	356433
SPH3-6	68413	124777	24717	7721	32.1	1.69	91.5	8.14	17.8	9.87	19.8	3.90	19.5	2.41	7050	220122
SPH3-7	6044	4317	373	245	17.6	5.06	11.1	13.5	15.7	2.90	12.8	5.84	35.6	9.86	5424	7108
SPH3-8	1430	4288	345	17.9	bdl	6.88	41.9	13.4	4.45	10.4	3.52	2.58	2.29	10.1	7522	430273
SPH3-9	75828	24035	27392	10012	8.47	4.77	233	7.69	4.50	5.79	5.13	4.31	16.5	14.5	10366	493133
SPH3-11	24421	78700	4735	2423	45.3	39.3	63.1	14.3	3.30	1.36	4.39	9.09	66.4	11.6	6835	40693
SPH3-14	80890	95481	27331	8378	7.90	3.90	108	9.35	2.24	4.41	1.41	2.26	29.4	3.62	6361	153989
SPH3-15	473	4463	107	25.3	9.22	2.79	27.6	7.98	15.6	1.19	2.16	5.67	3.18	8.04	5118	202353

注: bdl代表检测限之下。

2003)。

而燕山期黑云母花岗岩(SMS-H2)中岩浆锆石U、Th含量分别为 $163 \times 10^{-6} \sim 258 \times 10^{-6}$ 和 $105 \times 10^{-6} \sim 269 \times 10^{-6}$,相应的Th/U比值为0.64~1.44,均大于0.4,表明为岩浆锆石的特征。锆石稀土总量为 $362 \times 10^{-6} \sim 513 \times 10^{-6}$,在球粒陨石标准化配分模式图上(图6a),表现为较强的HREE富集和LREE的亏损,同时具有明显的Ce的正异常($Ce/Ce^*=27 \sim 77$),也是与典型的岩浆锆石的特征相吻合。而岩体中所含的捕获/继承锆石在球粒陨石标准化配分模式图上(图6a)具有更高的REE含量($304 \times 10^{-6} \sim 3080 \times 10^{-6}$,大部分都大于 1000×10^{-6}),显示出弱到明显的Ce的正异常($Ce/Ce^*=1.1 \sim 226$)。

似斑状黑云母花岗岩(SMS-H3)中岩浆锆石的U、Th含量分别为 $64 \times 10^{-6} \sim 2385 \times 10^{-6}$ 和 $49 \times 10^{-6} \sim$

2111×10^{-6} ,相应的Th/U比值为0.10~0.95。岩浆锆石的稀土总量范围为 $155 \times 10^{-6} \sim 1560 \times 10^{-6}$,平均为 806×10^{-6} 。在球粒陨石标准化分模式图上(图6b),同样表现出HREE富集和LREE亏损的特点,明显的Ce的正异常($Ce/Ce^*=7.5 \sim 529$);而岩体中的捕获/继承锆石具有与该岩体的岩浆锆石相似的稀土元素配分,但更高的REE元素总量($849 \times 10^{-6} \sim 2382 \times 10^{-6}$,平均为 1548×10^{-6}),以及较为明显的Ce的正异常($Ce/Ce^*=2.6 \sim 390$)。

黑云母花岗岩(SMS-H4)中岩浆锆石的U、Th含量分别为 $292 \times 10^{-6} \sim 4098 \times 10^{-6}$ 和 $84 \times 10^{-6} \sim 653 \times 10^{-6}$,相应的Th/U比值为0.04~1.53。岩浆锆石具有更高的稀土含量($660 \times 10^{-6} \sim 2636 \times 10^{-6}$,平均为 1803×10^{-6})。在球粒陨石标准化分模式图上(图6c),同样表现出HREE富集和LREE亏损的特点,具有弱至

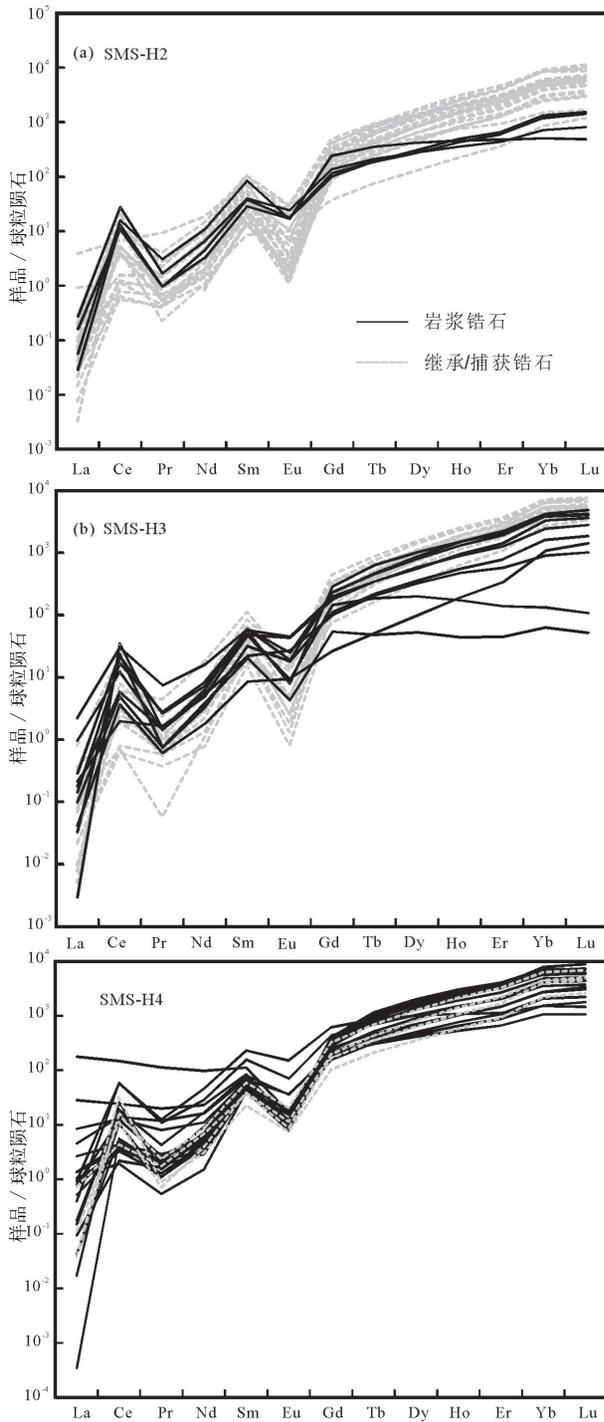


图6 九岭石门寺燕山期花岗岩中锆石稀土元素球粒陨石标准化图解;球粒陨石标注值(据McDonough & Sun, 1995)
Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns of zircons from Yanshannian granitoids in Shimensi, Jiuling area (chondrite values after McDonough & Sun, 1995)

明显的Ce的正异常($Ce/Ce^*=1.0\sim 268$);而岩体中的捕获/继承锆石具有相对低的REE元素总量($735\times$

$10^{-6}\sim 2222\times 10^{-6}$,平均为 1476×10^{-6}),以及较为明显的Ce的正异常($Ce/Ce^*=3.9\sim 175$)。

总的来说,这3个燕山期的岩体中的岩浆锆石均HREE富集和LREE亏损的特点,同时具有不同程度Ce的正异常。从黑云母花岗岩到似斑状黑云母花岗岩再到黑云母花岗斑岩,其岩浆锆石的稀土元素的总量逐渐升高。

5.4 锡石微量元素特征

石门寺地区燕山期的黑云母花岗岩和似斑状黑云母花岗岩的锡石微量元素分析结果见表4。

黑云母花岗岩(SMS-H2)中锡石的U、Th含量分别是 $37\times 10^{-6}\sim 667\times 10^{-6}$ 和 $0.82\times 10^{-6}\sim 7.77\times 10^{-6}$,Th/U比值为0.002~0.06。REE含量变化范围为 $0.59\times 10^{-6}\sim 11.0\times 10^{-6}$ 。在球粒陨石标准化稀土配分曲线表现为更加富集MREE的特征(图7a)。该类锡石中含有低的W含量,变化范围为 $10.1\times 10^{-6}\sim 1869\times 10^{-6}$,均值为 341×10^{-6} 。

似斑状黑云母花岗岩(SMS-H3)中锡石的U、Th含量变化更大,分别是 $281\times 10^{-6}\sim 9142\times 10^{-6}$ 和 $1.00\times 10^{-6}\sim 15.1\times 10^{-6}$,Th/U比值为0.001~0.02。其具有更高的REE含量,变化范围为 $4.07\times 10^{-6}\sim 1626\times 10^{-6}$ 。在球粒陨石标准化稀土配分曲线表现更加富集LREE的特征(图7b)。而该样品中的锡石含有更高W含量,变化范围为 $83.7\times 10^{-6}\sim 3494\times 10^{-6}$,均值为 915×10^{-6} 。

6 讨论

6.1 岩体的形成时代

大湖塘矿区燕山期岩浆岩的黑云母K-Ar同位素年龄在134~150 Ma(林黎等,2006),而黄兰椿和蒋少涌(2013)通过锆石U-Pb定年的方法,测试大湖塘钨矿似斑状白云母花岗岩的形成年龄为(144.2±1.3) Ma。同时,丰成友等(2012)通过测试大湖塘钨矿床辉钼矿Re-Os同位素年龄为(143.7±1.2) Ma。而项新葵等(2012)通过测试石门寺辉钼矿Re-Os同位素年龄为(149.6±1.2) Ma。可见关于大湖塘地区的燕山期岩浆岩年龄仍然存在争议。通过我们此次的锆石及锡石U-Pb定年的结果,获得了燕山期黑云母花岗岩的年龄为(145.5±3.6) Ma,而似斑状黑云母花岗岩的形成年龄为(148.3±2.6)

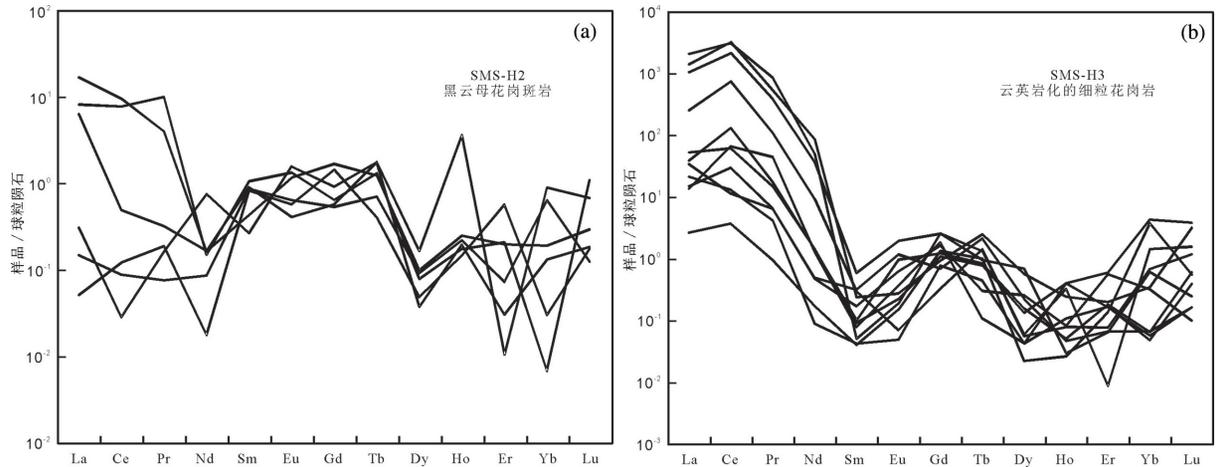


图7 九岭石门寺地区燕山期花岗岩中锡石稀土元素球粒陨石标准化图解
(球粒陨石标准值据 McDonough & Sun, 1995)

Fig.7 Chondrite-normalized REE patterns of cassiterite from Yanshannian granitoids in Shimensi, Jiuling area
(chondrite values after McDonough & Sun, 1995)

表4 九岭石门寺矿段燕山期花岗岩中锡石微量元素数据(10⁻⁶)

Table 4 Trace element concentrations of cassiterite from Yanshannian granitoids in Shimensi, Jiuling area

Sample	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Yb	Lu	W
SMS-H2														
H2-02	1.96	4.80	0.93	0.07	0.16	0.08	0.13	0.05	0.02	0.01	0.03	0.00	0.03	10.7
H2-04	0.07	0.02	0.02	0.35	0.04	0.09	0.18	0.06	0.04	0.20	0.00	0.15	0.02	116
H2-07	0.01	0.08	0.02	0.01	0.12	0.03	0.29	0.01	0.01	0.01	0.09	0.00	0.00	1869
H2-11	0.04	0.05	0.01	0.04	0.13	0.04	0.11	0.03	0.02	0.01	0.01	0.10	0.00	10.4
H2-14	1.52	0.30	0.03	0.08	0.14	0.02	0.12	0.06	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00	10.1
H2-15	4.03	5.90	0.38	0.08	0.06	0.07	0.34	0.05	0.02	0.01	0.03	0.03	0.01	28.3
SMS-H3														
H3-01	12.7	38.2	1.40	0.67	0.01	0.01	0.22	0.03	0.03	0.02	0.03	0.01	0.00	715
H3-03	3.58	18.6	0.61	0.23	0.05	0.07	0.14	0.08	0.06	0.00	0.01	0.01	0.00	3494
H3-04	5.05	8.05	0.39	0.04	0.01	0.00	0.16	0.02	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01	1204
H3-05	251	1320	36.4	17.0	0.09	0.11	0.51	0.03	0.17	0.00	0.01	0.10	0.01	2436
H3-07	9.32	80.5	1.63	0.66	0.02	0.06	0.25	0.03	0.04	0.00	0.03	0.01	0.02	1028
H3-08	496	1909	79.2	23.4	0.01	0.01	0.52	0.05	0.01	0.02	0.00	0.23	0.04	193
H3-10	8.17	7.07	0.61	0.22	0.03	0.04	0.33	0.01	0.06	0.00	0.09	0.05	0.00	83.7
H3-12	60.4	459	10.1	4.30	0.04	0.00	0.07	0.05	0.01	0.00	0.01	0.11	0.03	193
H3-13	0.64	2.29	0.09	0.08	0.01	0.01	0.27	0.04	0.01	0.00	0.02	0.62	0.01	19.7
H3-14	332	1994	49.9	40.1	0.04	0.02	0.19	0.09	0.14	0.01	0.03	0.06	0.08	439
H3-15	3.27	40.9	4.17	0.60	0.01	0.02	0.37	0.00	0.01	0.02	0.10	0.70	0.10	258

Ma, 黑云母花岗斑岩的结晶年龄为(147.7±1.5) Ma。结合已有的年龄资料来看,大湖塘地区的燕山期花岗岩的形成时代分布在144~150 Ma,成矿时代也与成岩时代在误差范围内一致,说明该期的成矿作用与燕山期的花岗质岩浆作用密切相关。而本期花岗质岩浆作用可能在高SiO₂(>70%)的阶段持续了约5 Ma,这个较长的岩浆演化过程加速了岩浆的分异演化,可能是成矿条件得以实现的一个重

要条件。

6.2 岩浆温度(锆石 Ti 温度计)

锆石 Ti 温度计也已经得到广泛应用(Watson et al., 2005)。锆石结晶温度($T_{Ti-in-zrc}(^{\circ}C)$)是通过锆石中的Ti含量来计算得到的(Watson et al., 2006)。结果在表3中显示。通过计算所获得的黑云母花岗岩中岩浆锆石的温度为632~810^oC,其加权平均值的温度为(788±70)^oC,然而捕获/继承的锆石温度为

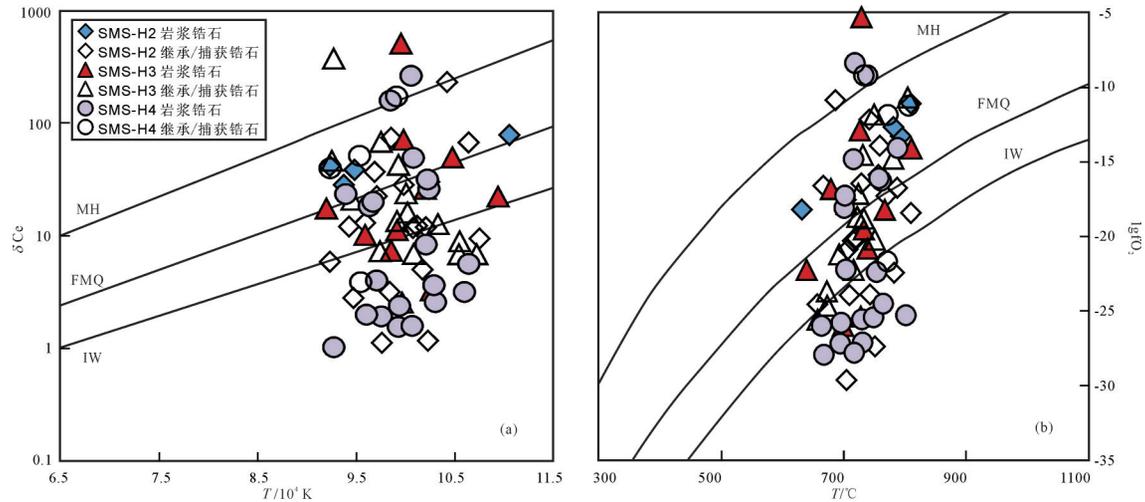


图8 温度- δCe 异常图解(a)及温度-氧逸度图解(b)(据 Qiu et al., 2013 修改)

Fig.8 Temperature versus δCe diagram (a) and temperatures versus oxygen fugacity (b) (modified from Qiu et al., 2013)

657~810 °C。而似斑状黑云母花岗岩的岩浆锆石从 640°C 变化至 812°C, 其加权平均值的温度为 (734±34)°C, 而其捕获/继承的锆石温度为 658~803°C。燕山期最晚一期的黑云母花岗斑岩的岩浆锆石计算所得的温度变化范围为 665~803°C, 其加权平均值的温度为 (736±16)°C, 然而捕获或继承的锆石温度为 734~808°C。

总的来说, 这些燕山期岩浆锆石中所包裹的新元古代或更老的锆石核部在温度上基本保持不变, 而燕山期花岗岩的温度则在早期(黑云母花岗岩阶段)稍高, 到晚期(白云母花岗岩和黑云母花岗斑岩)时明显下降。这与正常的岩浆演化过程是吻合的, 也说明了大湖塘这些不同阶段所形成的花岗质岩浆作用很可能是同一个岩浆房在较长时间的随着岩浆演化在不同阶段结晶的结果。基于这样的认识, 我们可以通过研究岩浆的条件来示踪成矿过程。

6.3 岩浆氧逸度

岩浆的氧逸度对于许多金属成矿作用起到了非常重要的作用。韩丽等(2016)指出钨的最终成矿作用与体系中的氧逸度变化相关。而对于岩浆中氧逸度的计算方式前人做了大量的研究工作, 包括测定锆石中的 Ce 异常值 (Ballard et al., 2002; Trail et al., 2012); 磷灰石中 Mn 含量 (Miles et al., 2014); 黑云母中的 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 的比值 (Wones et al., 1965) 等。由于锆石是一种普遍存在的常见副矿物, 尤其是在花岗质岩石中更加常见。同时, 它具

有较好的抗风化能力, 不容易受到后期作用而扰动 (Cherniak et al., 2001)。因此, 本次研究主要针对锆石中的 $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ 的比值来估算体系中的氧逸度。依据 Trail et al. (2012) 最近提出来计算岩浆熔体氧逸度的经验公式:

$$\ln\left(\frac{\text{Ce}^*}{\text{Ce}^*}\right)_D = (0.1156 \pm 0.0050) \times \ln(f_{\text{O}_2}) + \frac{13860 \pm 708}{T} - 6.125 \pm 0.484$$

此处 f_{O_2} 是氧逸度; T 是开尔文温度; Ce 异常则可以用以下公式进行估算:

$$\left(\frac{\text{Ce}}{\text{Ce}^*}\right) \approx \left(\frac{\text{Ce}}{\text{Ce}^*}\right)_{\text{CHUR}} = \frac{\text{Ce}_N}{\sqrt{\text{La}_N \cdot \text{Pr}_N}}$$

我们对石门寺地区的 3 种不同的燕山期花岗岩进行了氧逸度比值计算, 计算结果见表 4。由于花岗岩样品中部分点具有不真实的异常低的氧逸度, 如在图 8 中落在 IW 之下, 可能为比较低的 Ce 异常及其误差所造成的, 因此在此处进行了排除。细粒黑云母花岗岩 (SMS-H2) 中岩浆锆石氧逸度值 ($\log f_{\text{O}_2}$) 为 -11.1 ~ -18.2, 平均值为 -13.8, 大部分落在 FMQ 和 HM 之间 (图 8); 而捕获/继承的新元古代锆石氧逸度 ($\log f_{\text{O}_2}$) 在 -13.9 ~ -29.7, 平均值为 -20.2, 相对岩浆锆石的氧逸度值更低。似斑状黑云母花岗岩 (SMS-H3) 中岩浆锆石氧逸度值 ($\log f_{\text{O}_2}$) 范围在 -5.4 ~ -22.3, 平均值为 -16.5, 大部分落在 IW 和 MH 之间 (图 8); 而其中的捕获/继承的新元古代锆石氧逸度 ($\log f_{\text{O}_2}$) 值为 -14.6 ~ -25.4, 均值为 -21.2, 同样明显

小于岩浆锆石的氧逸度。黑云母花岗斑岩(SMS-H4)的岩浆锆石氧逸度值($\log f_{O_2}$)为-8.4~-16.3,平均值为-14.3,出去异常点后,大部分落在MH和IW之间;而捕获/继承的新元古代锆石仅获得一颗锆石的氧逸度,其 $\log f_{O_2}$ 值为-11.9,并不具有统计意义。由此可见,与主要成矿相关的似斑状黑云母花岗岩(SMS-H3)的岩浆锆石的氧逸度明显低于其他2种花岗岩中岩浆锆石氧逸度值($\log f_{O_2}$)。因此,低的氧逸度可能是形成本区W矿的重要原因。

6.4 成矿作用模式

此次研究工作中发现,燕山期3种含矿花岗岩中锡石含较高的钨含量(细粒黑云母花岗岩的均值为 341×10^{-6})。对于其主要含矿的似斑状黑云母花岗岩中锡石所含钨含量的均值甚至可达 3494×10^{-6} 。其所对应的岩浆中的钨含量也具有很高的值。同时,结合前人对大湖塘地区的含矿花岗岩进行了Sr-Nd-Hf同位素研究,认为其原岩可能为其下覆的元古宙双桥山群(黄兰椿等,2013)。刘英俊等(1982)获得的双桥山群中的钨含量可以达到 11.82×10^{-6} ,明显比平均地壳更为富集。而原岩在形成岩浆的过程中,部分岩浆过程(如部分熔融作用),都会导致不相容的成矿元素如(W、Sn)进一步富集(Lamarão et al., 2012; Li et al., 2014)。

Zhang et al. (2016)也认为氧逸度主要控制岩浆中的金属元素迁移到成矿流体中的能力。前人的研究表明,在相对还原的条件下,钨呈现出亲铁性,并且随着还原作用越强,其在金属相中的富集程度也越高(Sylvester, 1998)。而与主要成矿相关的白云母花岗岩其所获得的氧逸度($\log f_{O_2}$)最低,说明在ca. 153 Ma时岩浆中的氧逸度发生了改变,这使得钨更容易从岩浆发生迁移,转移到成矿流体中。成矿流体在与碳酸盐岩的接触带发生反应,与 Ca^{2+} 离子结合形成白钨矿。

在148.3 Ma时,元古代的双桥山群发生部分熔融,形成似斑状黑云母花岗岩,并初步富集钨元素。由于该黑云母花岗岩岩浆具有较低的氧逸度,其更有利于岩浆中的钨进一步富集且更有利于进入成矿流体中。随后,在147.7 Ma时,黑云母花岗斑岩以岩株的形式侵入于先形成的白云母花岗岩中。在145.5 Ma时,细粒黑云母花岗岩侵入于似斑状黑云母花岗岩中。由于最后一个期次的岩浆(细粒

黑云母花岗岩)的氧逸度升高,相对不利于钨的富集以及降低了钨元素迁移到成矿流体中的能力,使得其形成钨矿的能力降低。这可能是石门寺矿区燕山期岩浆W成矿的主要机制。

7 结 论

(1)赣西北石门寺地区新元古代花岗闪长岩的成岩年龄为ca. 830 Ma,而燕山期细粒黑云母花岗岩的年龄为145.5 Ma,似斑状黑云母花岗岩的形成年龄为148.3 Ma,黑云母花岗斑岩的结晶年龄为147.7 Ma。本区的主成矿时代在148 Ma左右。

(2)大湖塘地区的燕山期花岗质岩浆从早期到晚期,温度有降低的趋势,似斑状黑云母花岗岩中岩浆温度的加权平均值的温度为 788°C ;细粒黑云母花岗岩的岩浆温度为 734°C ;黑云母花岗斑岩的岩浆温度为 736°C 。相对应的,锡石中钨的含量也从似斑状黑云母花岗岩中的均值为 915×10^{-6} 降低到细粒黑云母花岗岩中的均值为 341×10^{-6} 。

(3)岩浆中低的氧逸度可能与岩体中钨的成矿作用相关。相对于燕山期的细粒黑云母花岗岩和黑云母花岗斑岩,与主要成矿作用的似斑状黑云母花岗岩具有更低的氧逸度,暗示了岩浆的氧逸度降低,导致钨迁移到成矿流体中,并与 Ca^{2+} 结合形成白钨矿。

致谢:实验工作得到了南京大学武兵工程师以及周登赞的帮助,谨此一并表示诚挚的感谢!

References:

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 192: 59-79.
- Ballard J R, Palin, M J, Campbell I H. 2002. Relative oxidation states of magmas inferred from Ce (IV)/Ce (III) in zircon: Application to porphyry copper deposits of northern Chile[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 144(3): 347-364.
- Black L P, Gulson B L. 1978. The age of the Mud Tank carbonatite, Strangways Range, Northern Territory[J]. *BMR Journal of Australian Geology and Geophysics*, 3: 227-232.
- Black L P, Kamo S L, Allen C M, Aleinikoff J N, Davis D W, Korsch R J, Foudoulis C. 2003. TEMORA 1: a new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology[J]. *Chemical Geology*, 200(1/2): 155-170.
- Chen Peirong, Zhou Xinmin, Zhang Wenlan, Li Huimin, Fan Chunfang, Sun Tao, Chen Weifeng, Zhang Min. 2004. Origin of Early Yanshanian syenite-granitic complexes in eastern Nanling region and its implication[J]. *Science in China(Series D)*, 34(6):

- 493–503(in Chinese).
- Cherniak D J, Watson E B. 2001. Pb diffusion in zircon[J]. *Chemical Geology*, 172(1): 5–24.
- Ding Xing, Chen Peirong, Chen Weifeng, Huang Hongye, Zhou Xinmin. 2005. LA–ICPMS U–Pb dating of zircon from Weishan granite in Hunan[J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 37: 606–616(in Chinese).
- Feng Chengyou, Zhang Dequan, Xiang Xinkui, Li Daxin, Qu Hongyin, Liu Jiannan, Xiao Ye. Re–Os isotopic dating of molybdenite from the Dahutang tungsten deposit in northwestern Jiangxi Province and its geological implication[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(12): 3858–3868(in Chinese with English abstract).
- Gao Shan, Liu Xiaomin, Yuan Honglin, Hattendorf B, Günther D, Chen Liang, Hu Shenhong. 2002. Determination of forty two major and trace elements in USGS and NIST SRM glasses by laser ablation– inductively coupled plasma– mass spectrometry[J]. *Geostandards Newsletter*, 26(2):181–196.
- Griffin W L, Powell W J, Pearson N J, O’Reily S Y. 2008. GLITTER: data reduction software for laser ablation ICP–MS[M]// Sylvester, P. (ed.). *Laser Ablation– ICP– MS in the Earth Sciences: Mineralogical Association of Canada Short Course Series*, 40: 204–207.
- Han Li, Huang Xiaolong, Li Jie, He Pengli, Yao Junming. 2016. Oxygen fugacity variation recorded in apatite of the granite in the Dahutang tungsten deposit, Jiangxi Province, South China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(3): 746– 758 (in Chinese with English abstract).
- Hoskin P W, Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1):27–62.
- Hua Renmin, Chen Peirong, Zhang Wenlan, Liu Xiaodong, Lu Jianjun, Lin Jinfu, Yao Junming, Qi Huawen, Zhang Zhanshi, Gu Shengyan. 2003. Ore–forming system in Mesozoic and Cenozoic in South China [J]. *Science in China(Series D)*, 33(44): 335–343(in Chinese).
- Huang Lanchun, Jiang Shaoyong. 2013. Zircon U–Pb geochronology, geochemistry and petrogenesis of the porphyric– like muscovite granite in the Dahutang tungsten deposit, Jiangxi Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(12): 3887– 3900 (in Chinese with English abstract).
- Jackson S E, Pearson N J, Griffin W L, Belousova E A. 2004. The application of laser ablation– inductively coupled plasma– mass spectrometry to in situ U– Pb zircon geochronology[J]. *Chemical Geology*, 211: 47–69.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Jiangxi Province. 1984. *Regional geology of Jiangxi Province*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–273 (in Chinese with English Abstract).
- Kempe U, Wolf D. 2006. Anomalously high Sc contents in ore minerals from Sn–W deposits: possible economic significance and genetic implications[J]. *Ore Geology Reviews*, 28(1): 103–122.
- Lamarão C N, Pinho S C C, de Paiva A L, Galarza, M A. 2012. Mineralogy and geochemistry of the Paleoproterozoic, tin– mineralized Bom Jardim granite of the Velho Guilherme Suite, eastern Amazonian craton[J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 38: 159–173.
- Li Xianhua, Li Wuxian, Li Zhenxian. 2007. Re–discussion on genetic type of Nanling granitoid and its tectonic significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 52(9): 981–991(in Chinese).
- Li Xianhua, Li Wuxian, Wang Xuance, Li Qiuli, Liu Yu, Tang Guoqiang. 2009. Role of mantle– derived magma in genesis of early Yanshanian granites in the Nanling Range, South China: in situ zircon Hf– O isotopic constraints[J]. *Science in China(series D)*, 39(7): 872–887(in Chinese).
- Li Jie, Zhong Junwei, Yu Yang, Huang Xiaolong. 2013. Insights on magmatism and mineralization from micas in the Xihuashan granite, Jiangxi Province, South China [J]. *Geochimica*, 42(5): 393–404 (in Chinese with English abstract).
- Lin Li, Zhan Gangle, Yu Xiaoping. 2006. Geological characteristics and ore– search prospect of Dahutang tungsten (tin) orefield in Jiangxi[J]. *Resources Survey & Environment*, 27(1): 25– 32 (in Chinese with English abstract).
- Lin Li, Yu Zhongzhen, Luo Xiaohong, Ding Shaohui. 2006. The Metallogenic Prognosis of Dahutang Tungsten Ore Field in Jiangxi [J]. *Journal of East China Institute of Technology*, z1: 139–142(in Chinese with English abstract).
- Liu Yingjun, Li Zhaolin, Ma Dongsheng. 1982. Geochemical research of tungsten formation in South China[J]. *Science in China(B series)*, 10: 939–950 (in Chinese).
- Li Zhenzhen, Qin Kezhang, Li Guangming, Ishihara Shunso, Jin Luying, Song Guoxue, Meng Zhaojun. 2014. Formation of the giant Chalukou porphyry Mo deposit in northern Great Xing’an Range, NE China: Partial melting of the juvenile lower crust in intra–plate extensional environment[J]. *Lithos*, 202: 138–156.
- Ludwig K R. 1999. *User’s Manual for Isoplot/Ex Version 2.06: a Geochronological Toolkit for Microsoft Excel*, vol. 1a (Special Publication) [M]. Geochronology Center, Berkeley, 1–49.
- Mao Zhihao, Cheng Yanbo, Liu Jianjun, Yuan Shunda, Wu Shenghua, Xiang Xinkui, Luo Xiaohong. 2013. Geology and molybdenite Re– Os age of the Dahutang granite– related veinlets– disseminated tungsten ore field in the Jiangxin Province, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 53: 422–433.
- Miles A J, Graham C M, Hawkesworth C J, Gillespie M R, Hinton R W, Bromiley G D, EMMAC. 2014. Apatite: A new redox proxy for silicic magmas?[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 132: 101–119.
- McDonough W F, Sun S S. 1995. The composition of the Earth[J]. *Chemical Geology*, 120: 223–253.
- Qiu Junting, Yu Xinqi, Santosh M, Zhang Dehui, Chen Shuaiqi, Li

- Pengju. 2013. Geochronology and magmatic oxygen fugacity of the Tongcun molybdenum deposit, northwest Zhejiang, SE China[J]. *Mineralium Deposita*, 48(5): 545–556.
- Shu Xujie, Wang Xiaolei, Sun Tao, Chen Weifeng, Shen Weizhou. 2013. Crustal formation in the Nanling Range, South China Block: Hf isotope evidence of zircons from Phanerozoic granitoids[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 74: 210–224.
- Sun Weidong, Yang Xiaoyong, Fan Weiming, Wu Fuyuan. 2012. Mesozoic large scale magmatism and mineralization in South China: Preface[J]. *Lithos*, 150: 1–5.
- Sylvester P J. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites[J]. *Lithos*, 45(1): 29–44.
- Trail D, Watson E B, Tailby N D. 2012. Ce and Eu anomalies in zircon as proxies for the oxidation state of magmas[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 97: 70–87.
- Watson E B, Harrison T M. 2005. Zircon thermometer reveals minimum melting conditions on earliest Earth[J]. *Science*, 308(5723): 841–844.
- Watson E B, Wark D A, Thomas J B. 2006. Crystallization thermometers for zircon and rutile[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 151(4): 413–433.
- Wones D R, Eugster H P. 1965. Stability of biotite—experiment theory and application[J]. *American Mineralogist*, 50: 1228–1272.
- Wu Yuanbao, Zhen Yongfei. 2004. Genesis of zircon and its constraint on interpretation of U–Pb age[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 544–569(in Chinese).
- Xiang Xinkui, Liu Xianmu, Zhan Guonian. 2012. Discovery of Shimensi super-large tungsten deposit and its prospecting significance in Dahutang area, Jiangxi Province[J]. *Resources Survey & Environment*, 33(3): 141–151 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wei, Lentz D R, Thorne K G, McFarlane C. 2016. Geochemical characteristics of biotite from felsic intrusive rocks around the Sisson Brook W–Mo–Cu deposit, west-central New Brunswick: An indicator of halogen and oxygen fugacity of magmatic systems[J]. *Ore Geology Reviews*, 77: 82–96.
- Zhong Yufang, Ma Changqian, She Zhenbing, Lin Guangchun, Xu Haijin, Wang Renjing, Yang Kunguang, Liu Qiang. 2006. SHRIMP U–Pb Zircon geochronology of the Jiuling granitic complex batholith in Jiangxi Province[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(6): 685–691 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Xinmin, Sun Tao, Shen Weizhou, Shu Liangshu, Niu Yaoling. 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution[J]. *Episode*, 29(1): 26–21.

附中文参考文献

- 陈培荣, 周新民, 张文兰, 李惠民, 范春芳, 孙涛, 陈卫锋, 张敏. 2004. 南岭东段燕山早期正长岩-花岗岩杂岩的成因和意义[J]. *中国科学(D辑)*, 34(6): 493–503.
- 丁兴, 陈培荣, 陈卫锋, 黄宏业, 周新民. 2005. 湖南沩山花岗岩中锆石 LA-ICPMS U–Pb 定年: 成岩启示和意义[J]. *中国科学(D辑)*, 35(7): 606–616.
- 丰成友, 张德全, 项新葵, 李大新, 瞿泓莹, 刘建楠, 肖晔. 2012. 赣西北大湖塘钨矿床辉钨矿 Re–Os 同位素定年及其意义[J]. *岩石学报*, 28(12): 3858–3868.
- 韩丽, 黄小龙, 李洁, 贺鹏丽, 姚军明. 2016. 江西大湖塘钨矿花岗岩的磷灰石特征及其氧逸度变化指示[J]. *岩石学报*, 2016, 32(3): 746–758.
- 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 刘晓东, 陆建军, 林锦富, 姚军明, 戚华文, 张展适, 顾晟彦. 2003. 华南中新世与花岗岩类有关的成矿系统[J]. *中国科学(D辑)*, 33(4): 335–343.
- 黄兰椿, 蒋少涌. 2013. 江西大湖塘富钨花岗岩斑岩年代学、地球化学特征及成因研究[J]. *岩石学报*, 29(12): 4323–4335.
- 江西省地质矿产局. 1984. 江西省区域地质志[M].北京: 地质出版社, 1–273.
- 李献华, 李武显, 李正祥. 2007. 再论南岭燕山早期花岗岩的成因类型与构造意义[J]. *科学通报*, 52(9): 981–991.
- 李献华, 李武显, 王选策, 李秋立, 刘宇, 唐国强. 2009. 幔源岩浆在南岭燕山早期花岗岩形成中的作用: 锆石原位 Hf–O 同位素制约[J]. *中国科学(D辑)*, (7): 872–887.
- 李洁, 钟军伟, 于洋, 黄小龙. 2013. 赣南西华山花岗岩的云母成分特征及其对岩浆演化与成矿过程的指示[J]. *地球化学*, 42(5): 393–404.
- 林黎, 占岗乐, 喻晓平. 2006. 江西大湖塘钨(锡)矿田地质特征及远景分析[J]. *资源调查与环境*, 27(1): 25–32.
- 林黎, 余忠珍, 罗小洪, 丁少辉. 2006. 江西大湖塘钨矿田成矿预测[J]. *东华理工学院学报*, 3(增): 139–14.
- 刘英俊, 李兆麟, 马东升. 1982. 华南含钨建造的地球化学研究[J]. *中国科学B辑*, 10: 939–950.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U–Pb 年龄解释的制约[J]. *科学通报*, 49(16): 1589–1604.
- 项新葵, 刘显沐, 詹国年. 2012. 江西省大湖塘石门寺矿区超大型钨矿的发现及找矿意义[J]. *资源调查与环境*, 33(3): 141–151.
- 钟玉芳, 马昌前, 余振兵, 林广春, 续海金, 王人镜, 杨坤光, 刘强. 2006. 江西九岭花岗岩类复式岩基锆石 SHRIMP U–Pb 年代学[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2006, 30(6): 685–691.