

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2023.06.005

赣北石门寺钨矿找矿预测地质模型

张志辉¹, 叶天竺¹, 祝新友², 巩小栋³, 贾文彬⁴, 熊光强⁵, 贺晓龙⁶, 胡肇捷⁶
ZHANG Zhihui¹, YE Tianzhu¹, ZHU Xinyou², GONG Xiaodong³, JIA Wenbin⁴,
XIONG Guangqiang⁵, HE Xiaolong⁶, HU Bojie⁶

1. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037;
2. 北京矿产地质研究院, 北京 100124;
3. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081;
4. 国家地质实验测试中心, 北京 100037;
5. 江西省地质矿产局物化探大队, 江西 南昌 330002;
6. 中国地质大学(北京), 北京 100083

1. Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China;
2. Beijing Institute of Geology and Mineral Resources, Beijing 100124, China;
3. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China;
4. National Research Center for Geoanalysis, Beijing 100037, China;
5. Geophysical and Geochemical Exploration Party, Jiangxi Bureau of Geology and Mineral Resources, Nanchang 330002, Jiangxi, China;
6. China University of Geosciences, Beijing 100083, China

摘要:基于勘查区找矿预测理论与方法,对赣北石门寺超大型钨矿的钨多金属成矿作用进行了系统总结。细脉浸染型矿体的成矿地质体为燕山期斑状黑云母花岗岩,石英大脉型和热液隐爆角砾岩型矿体的成矿地质体为花岗斑岩。成矿构造为近 EW 向和 NW 向断裂构造。成矿结构面明确为斑状黑云母花岗岩与花岗闪长岩接触界面,其与似伟晶岩壳的分布大体一致,控制了大规模浸染状矿化的分布;花岗斑岩及隐爆角砾岩边部的成矿结构面则控制了大规模隐爆角砾岩型矿体。成矿作用蚀变特征标志为云英岩化、硅化、钾长石化、白云母化,其中云英岩化与钨矿化关系最密切。以上述认识为基础,建立了石门寺钨矿床的“三位一体”成矿预测地质模型,为指导花岗闪长岩大面积出露地区的找矿勘查工作提供了理论支撑。

关键词:赣北; 石门寺; 钨矿; 矿产勘查工程; 找矿预测地质模型

中图分类号:P618.67 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2023)06-0921-10

Zhang Z H, Ye T Z, Zhu X Y, Gong X D, Jia W B, Xiong G Q, He X L, Hu B J. Study on geological model for prospecting prediction of Shimensi tungsten deposit in northern Jiangxi Province. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(6): 921-930

Abstract: Based on the theory and method of prospecting prediction in the exploration area, the tungsten polymetallic mineralization of Shimensi ultra-large tungsten deposit in northern Jiangxi Province is summarized systematically. The ore-forming geological body of the veinlet-disseminated orebody is porphyritic biotite granite formed in Yanshanian period, and the ore-forming geological body of the large quartz vein-type and hydrothermal cryptoexplosive breccia-type orebody is granite porphyry. The metallogenic structures are

收稿日期:2021-06-24; **修订日期:**2022-01-11

资助项目:国家自然科学基金项目《赣东北塔前-赋春推覆构造及其对超大型钨铜成矿作用的控制》(批准号:41772069)、中国地质调查局项目《老矿山找矿技术创新与示范项目》(编号:1212011220737)、《全国重要矿集区找矿预测项目》(编号:DD20160052)、《矿集区矿产调查及深部找矿预测》(编号:DD20190570)

作者简介:张志辉(1980-),男,博士,高级工程师,从事矿床学和矿产勘查学等方面的研究。E-mail: zzh1102114@126.com

nearly EW-trending and NW-trending faults. The metallogenic structural plane is the contact interface between porphyritic biotite granite and granodiorite, and it is roughly consistent with the distribution of pegmatite-like shell and controlled the distribution of large-scale disseminated orebodies. The metallogenic structural planes of the edges of granite porphyry and cryptoexplosive breccia controlled the large-scale cryptoexplosive breccia-type ore body. The iconic alterations related to mineralization include greisenization, silicification, potassium feldsphearization and muscovitization, among which greisenization is most closely related to tungsten mineralization. On the basis of the above understanding, a "trinity" geological model for prospecting and prediction of Shimensi tungsten deposit is established in this paper, which provides theoretical support for guiding the prospecting work in the large area of granodiorite.

Key words: northern Jiangxi Province; Shimensi; tungsten deposit; mineral exploration engineering; geological model for prospecting and prediction

石门寺钨矿床是中国近年来探明的一个超大型钨多金属矿床,位于江西北部九岭-鄱公山多金属成矿带(图1),累计探明钨金属量 $62\times10^4\text{ t}$,铜金属量 $34\times10^4\text{ t}$ ^①。在地质历史时期,九岭-鄱公山多金属成矿带经历了多期次的构造运动,包括古元古代扬子古克拉通、中—新元古代扬子与华夏板块的拼合—分裂、早古生代褶皱隆升、晚古生代部分裂陷和中生代的板内构造变形(杨明桂等,1994)。相应地,九岭-鄱公山多金属成矿带发育多期岩浆—成

矿作用,形成了狮尾洞钨矿、大湖塘钨矿、石门寺钨矿、香炉山钨矿、村前铜矿、曾家垅锡矿、阳储岭钨钼矿、大背坞金矿等一批锡钨铜金等多金属矿床。

前人对九岭-鄱公山成矿带开展的大量工作表明,该区基岩花岗闪长岩的成岩时代为836 Ma(张志辉等,2021),与钨矿相关的岩浆—热液活动的时代主要为110~130 Ma和140~150 Ma两个阶段(满发胜等,1988;陈柏林等,1997;张家菁等,2008;丰成友等,2012;黄兰椿等,2012;张志辉等,2020)。

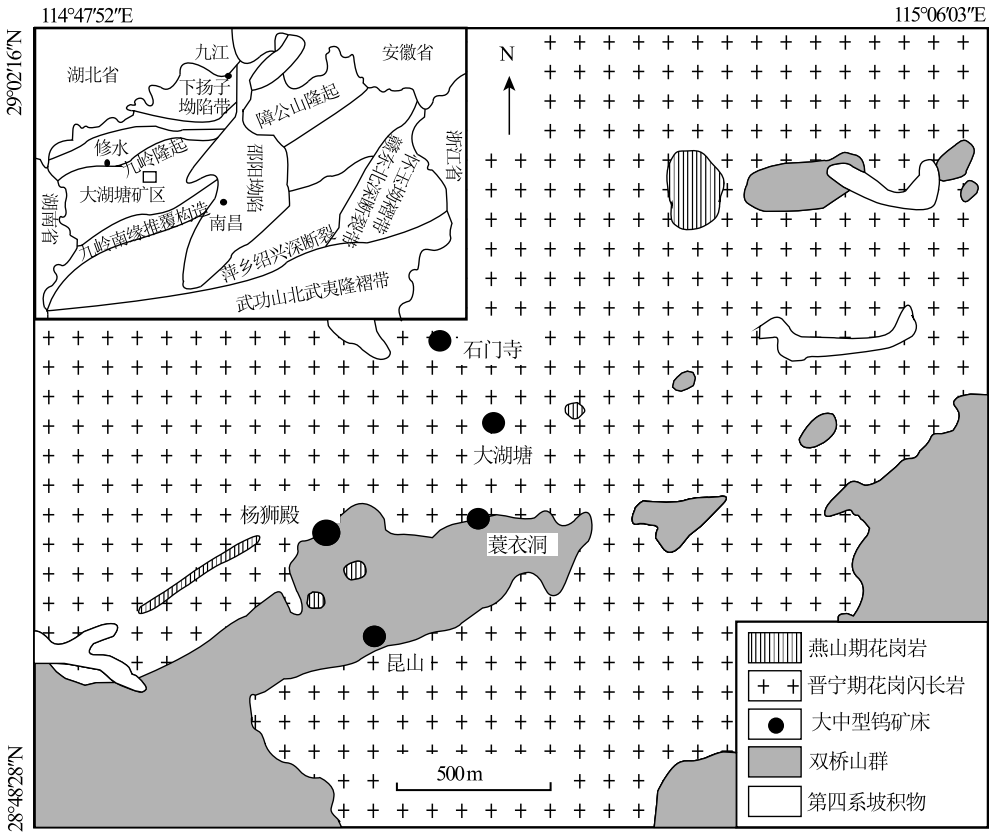


图1 江西北部石门寺钨矿床地质简图(据黄兰椿等,2012)

Fig. 1 Geological map of Dahutang tungsten deposit in northern Jiangxi Province

狮尾洞钨矿的成矿时代为 140.9 ± 3.6 Ma, 石门寺钨矿的成矿时代为 143.7 ± 1.2 Ma(丰成友等, 2012)。石门寺钨矿花岗斑岩的成岩年龄为 154.36 ± 0.83 Ma(张志辉等, 2020), 白云母花岗岩的成岩年龄为 144.2 ± 1.3 Ma(黄兰椿等, 2012)。石门寺钨矿床主要有3种矿化形式: ①似斑状花岗岩和花岗闪长岩内外接触带的细脉浸染状矿体, 以似伟晶岩壳为界, 主矿体在外接触带; ②花岗斑岩顶部的热液隐爆角砾岩型钨铜矿体; ③热液隐爆角砾岩外的石英大脉型矿体主要为钨铜矿体。根据空间分布形态, 后2种矿体的形成与花岗斑岩的关系更密切(张志辉等, 2020; Zhang et al., 2022)。

矿床学研究的主要目的, 一是发展成矿理论研究, 记录地球科学成矿物质时空变化; 二是通过已知推导未知, 通过已知的矿床特征规律研究指导找矿, 为找矿预测工作服务, 显著提升找矿的成功概率。找矿预测工作主要是运用相似类比的手段推测主矿体的空间位置, 其目的是, 在某一特定地区用最合适的工作手段去判断矿床的赋存位置、形态、规模及质量(张贻侠, 1993; 赵鹏大等, 1994; 赵鹏大, 2004; 毛景文等, 2012; 秦克章等, 2021)。矿床模型是勘查找矿预测的理论基础(毛景文等, 2009), 除认识矿床本身的作用外, 矿床模型也已成为矿产评价、矿产勘查的有效工具(裴荣富等, 2013)。矿床模型主要分为2种, 一种为描述模型, 被认为是矿床类型的理想模型; 另一种为成因模型, 主要是在矿床类型特征方面对已知和假设的地质作用做出合理的解释(莱登, 1990)。勘查区找矿预测地质模型是勘查区找矿预测理论体系的核心内容, 与传统矿床类型找矿预测模型相比, 优点在于勘查区找矿预测地质模型既包括了已揭露的矿体, 又包括了推测的矿体(叶天竺等, 2014), 对野外地质矿产勘查预测具有重要作用。本文以勘查区找矿预测理论与方法为指导, 选取赣北石门寺钨矿开展勘查区找矿预测地质模型研究, 以期对晋宁期九岭花岗闪长岩大面积出露地区的找矿突破提供理论支撑。

1 区域地质背景

区内地层主要为新元古界双桥山群和下古生界海相沉积岩。新元古界双桥山群为一套厚大的低绿片岩相浅变质岩系, 其主要为泥砂质细碎屑,

上层、下层主要为凝灰岩, 并夹有少部分细碧岩、石英角斑岩, 新元古界的 Cu、Ag、Mo 等金属元素丰度高; 下古生界主要为碳酸盐岩、碎屑岩建造, 为钨、铜的重要赋矿层位。区域岩浆岩以中元古代晚期海相细碧角斑岩建造、晋宁期的九岭大型复式花岗岩岩基及燕山期的酸性-中酸性侵入岩为主。区域构造以宜丰-景德镇断裂和修水-德安-波阳断裂为主, 这2条断裂界定了九岭隆起带。另有九岭南缘、高台山-鄣公山南东缘和德安弧形推(滑)覆构造, 并伴有铜鼓-奉新、武宁-修水、浮梁-藏湾、永修-新建等韧(脆)性剪切带发育。这些断裂及剪切带控制了区域内的岩浆和成矿作用。

区内主要矿产以钨、锡、铜和金为主, 其次为铅、锌、钼、铌、钽等。它们主要产出在九岭-鄣公山隆起带花岗岩区, 其北侧为大湖塘-云山-茅棚店-鄣公山 EW 向锡钨多金属成矿带。

2 矿床地质特征

石门寺钨矿的矿区地层主要为新元古界双桥山群上部的安乐林组和修水组, 岩浆岩主要为中新元古代黑云母花岗闪长岩, 属九岭岩基(项新葵等, 2012a), 矿区内形态呈 EW 向(图2); 其次发育晚侏罗世一早白垩世似斑状黑云母花岗岩和花岗斑岩。似斑状黑云母花岗岩以小岩株产出, 分布在矿床中部; 花岗斑岩呈脉状产出(图3)。

石门寺钨矿床的钨矿体形态以似层状、透镜状、筒状和脉状为主。金属矿物有白钨矿、黑钨矿、黄铜矿、辉钼矿, 脉石矿物为石英、方解石。矿石结构以固溶体分离结构和交代结构为主, 矿石构造主要为细脉浸染状、角砾状和脉状构造。围岩蚀变以云英岩化、黑鳞云母化、钾长石化、硅化为主, 少量碳酸盐化、绢云母化。

3 石门寺钨矿三维多元结构特征

3.1 成矿地质体

成矿地质体是成矿作用的根源, 包括有效的物质汇聚源、热源、成矿有效的动力源。成矿地质体研究属于找矿预测研究的核心, 在找矿预测过程中具有指示性作用(叶天竺等, 2014)。

石门寺钨矿床矿化类型以细脉浸染型、隐爆角砾岩型、石英大脉型为主。矿体与岩体规模大体一致, 长、宽、厚均可达数百米, 主要发育于成矿地质

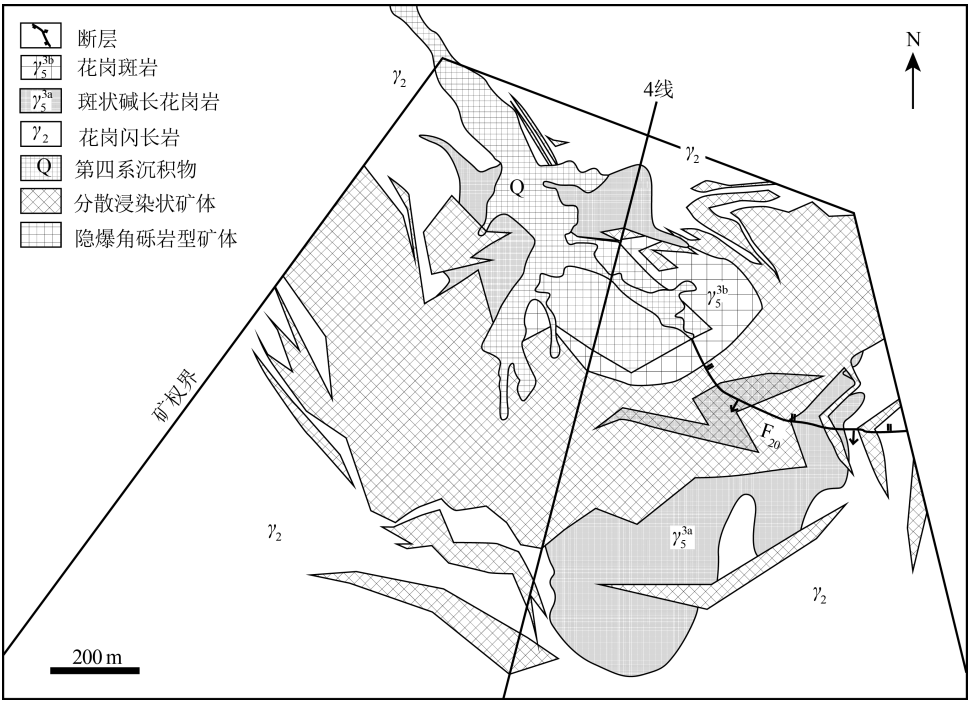


图2 石门寺钨矿床地质简图(据张志辉,2014)

Fig. 2 Geological map of Shimensi tungsten deposit

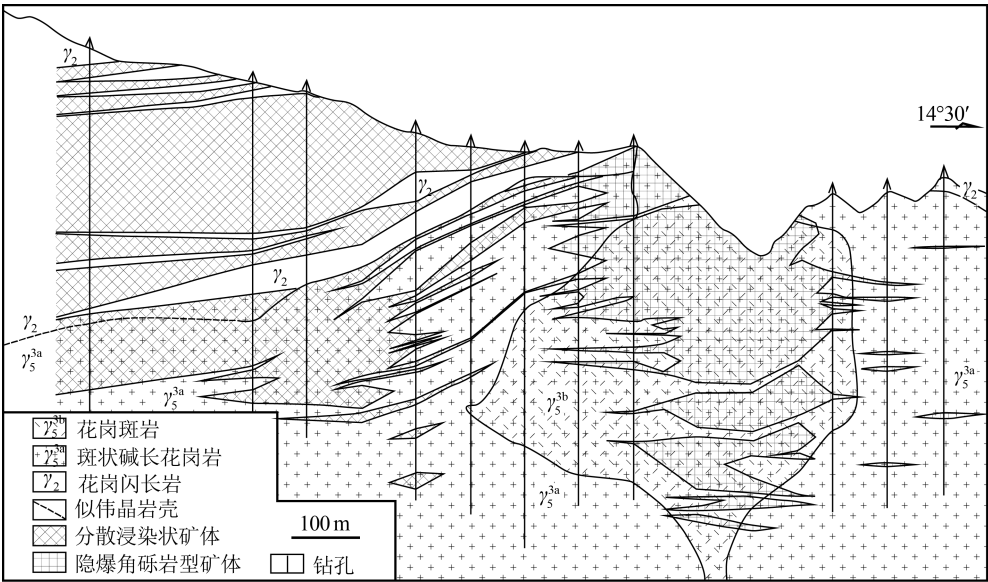


图3 石门寺钨矿 4 线地质剖面图(据张志辉等,2020)

Fig. 3 Geological section of line 4 in Shimensi tungsten deposit

体似斑状黑云母花岗岩岩体顶部接触带附近,成矿元素 W、Mo 存在垂向分带,上部富 W,下部富 Mo。细脉浸染状钨矿体:分布于似斑状黑云母花岗岩岩株与花岗闪长岩接触带内外,在似伟晶岩壳上、下分布,厚 100~500 m,接触带外的规模大于接触带内。矿石为含细脉浸染状矿化的花岗岩,局部

有少量含石英细脉。品位低,WO₃ 一般 0.5%~0.2%。晋宁期花岗闪长岩中的矿体位于似伟晶岩壳之上,其中的白钨矿、黑钨矿呈细脉浸染状分布于长石、石英粒间,有细粒长石、石英与黑钨矿、白钨矿、硫化物共生;钨矿物也可沿石英细脉分布,石英脉附近的黑云母和角闪石发生绿泥石化和白云

母化。在似伟晶岩壳之下的燕山期似斑状黑云母花岗岩矿化中,黑钨矿、白钨矿呈浸染状细脉分布于石英边部,少量黑钨矿分散于石英颗粒内,黑钨矿形成于岩浆晚期,属岩浆副矿物。黄铜矿、辉钼矿分布特点类似于钨矿物,主要分布于颗粒间。矿化形成于似斑状黑云母花岗岩岩浆作用晚期,是岩浆作用的一部分,似斑状黑云母花岗岩是赋存其中的浸染状矿化的成矿地质体。上部花岗闪长岩中的浸染状矿化,与似斑状黑云母花岗岩中的矿化范围一致,因此,成矿物质和成矿流体也来自于似斑状黑云母花岗岩岩浆。因此,燕山期似斑状黑云母花岗岩是石门寺钨矿床浸染状矿化的成矿地质体。相对晋宁期花岗闪长岩而言,矿化及其相关蚀变是后生的(图版 I),明确花岗闪长岩并非成矿地质体。通过岩体空间接触关系及似伟晶岩壳研究,结合 147.4 ± 0.6 Ma(LA-ICP-MS)的成岩年龄(Mao et al., 2014),确定该区细脉浸染型矿体的成矿地质体为似斑状黑云母花岗岩。

隐爆角砾岩型矿体:分布于燕山期花岗岩株的中心,与花岗斑岩密切共生,分布范围与花岗斑岩一致。胶结物为石英,少量粗晶钾长石,分布于石英粒间。局部粗晶石英、云英岩与花岗斑岩过渡。因此,导致隐爆的热液流体不仅具有浆液过渡态流体的性质,也显示其来源于花岗斑岩,是花岗斑岩岩浆分异的产物。花岗斑岩为隐爆角砾岩型矿化的成矿地质体。

石英大脉型:分布在燕山期花岗斑岩顶部,范围广泛,主要呈近 EW 向和 NEE 向。石英脉矿物组合与隐爆角砾岩的胶结物相同,底部与隐爆角砾岩相接,是隐爆作用的流体沿隐爆形成的断裂充填的结果。因此,形成含钨石英脉的成矿地质体与形成隐爆角砾岩型矿化的成矿地质体相同,均为燕山期花岗斑岩。

年代学证据表明,该区与成矿有关的花岗斑岩年龄为 154~135 Ma(表 1),矿体中辉钼矿的 Re-Os 年龄为 $149.6\pm1.2\sim140.9\pm3.6$ Ma(丰成友等, 2012;项新葵等,2013),为该钨矿床的形成时代,两者与燕山期侵入岩成岩年龄大体一致(表 1)。

3.2 成矿构造和成矿结构面研究

成矿构造和成矿结构面研究直接目的是为了找矿预测。成矿构造控制了矿体的赋存空间,为成矿提供了动力来源。成矿结构面是储存矿体的显

表 1 石门寺矿床岩浆岩年龄及辉钼矿定年结果
Table 1 Summary of Shimensi magmatic age and molybdenite dating results

岩性/矿物	成岩/成矿年龄/Ma	数据来源
似斑状黑云母花岗岩	138(LA-ICP-MS)	项新葵等,2012b
似斑状黑云母花岗岩	147.4 ± 0.6 (LA-ICP-MS)	Mao et al., 2014
细粒黑云母花岗岩	144.7 ± 0.5 (LA-ICP-MS)	Mao et al., 2014
细粒黑云母花岗岩	146.1 ± 0.6 (LA-ICP-MS)	Mao et al., 2014
花岗斑岩	154.36 ± 0.83 (LA-ICP-MS)	张志辉等,2020
花岗斑岩	135(LA-ICP-MS)	项新葵等,2012a
花岗斑岩	143.0 ± 0.8 (LA-ICP-MS)	Mao et al., 2014
花岗斑岩	143.1 ± 1.2 (LA-ICP-MS)	Mao et al., 2014
辉钼矿	143.7 ± 1.2 (Re-Os)	丰成友等,2012
辉钼矿	149.6 ± 1.4 (Re-Os)	项新葵等,2013
辉钼矿	139.2 ± 1.0 (Re-Os)	Mao et al., 2013
辉钼矿	143.99 ± 0.84	未发表

性或隐性的化学及物理性质不连续的各类界面(叶天竺等,2014)。

成矿构造:石门寺钨矿床断裂构造发育,以 NW 向断裂为主,产状较陡,倾向 SW,少数 NE。F₂₀断裂为控岩控矿断裂(图 2),在石门寺钨矿床中部,热液隐爆角砾岩花岗斑岩和细粒黑云母花岗岩受 F₂₀控别,大部分位于该断裂南侧。近 F₂₀断裂的石英大脉型矿体发育,远离 F₂₀稀疏,而且, F₂₀还控制了该区细脉浸染型矿体和细(网)脉带型矿体的分布。所以,石门寺矿床成矿构造为 F₂₀(项新葵等, 2012a;2013)。

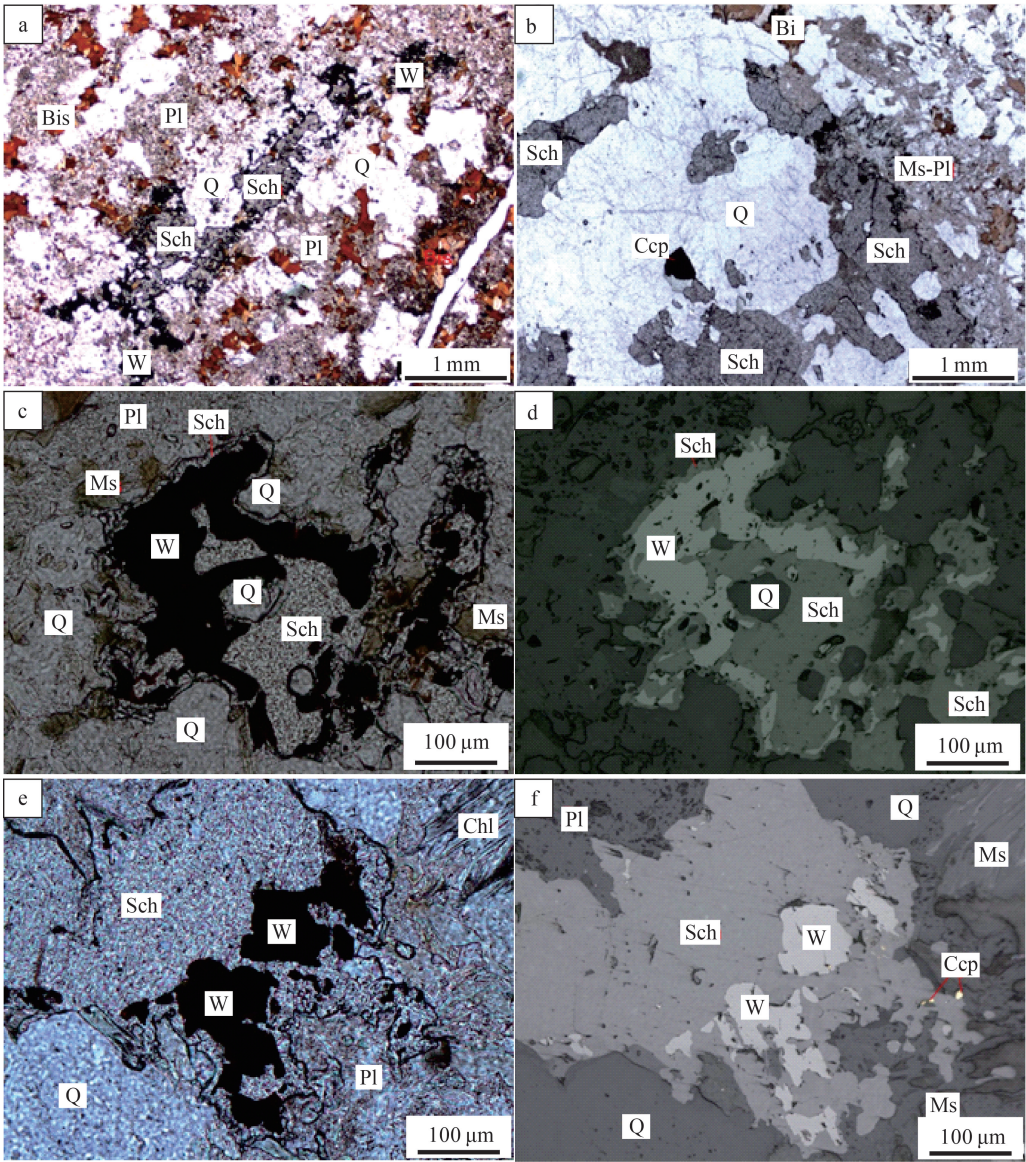
成矿结构面可分为黑云母花岗岩顶部侵入接触面和花岗斑岩顶部侵入接触面 2 种。前者产生了厚 0.5~1.5 m 的似伟晶岩壳,控制了浸染状矿化的分布;结构上,由下部黑云母花岗岩、中部似伟晶岩和上部花岗闪长岩组成,在下部形成花岗岩体型矿体,在中部似伟晶岩中形成浸染型矿体,在上部花岗闪长岩中形成后生浸染型矿体。成矿过程主要与热液作用有关,部分与浆液过渡态流体有关。晚期花岗斑岩侵入的顶部接触面控制了隐爆角砾岩型矿体,挥发分在该成矿结构面大规模聚集、发生隐爆,形成热液隐爆角砾岩型矿体;结构上,由核部的花岗斑岩、隐爆角砾岩,以及边部的黑云母花岗岩、花岗闪长岩组成,在核部形成隐爆角砾岩型矿体,在上部形成石英脉型矿体。

3.3 成矿作用特征标志

3.3.1 矿体特征

成矿作用特征标志是找矿预测的直接标志,也

图版 I Plate I



a. 钨矿化白云母石英脉分布于花岗闪长岩中;白钨矿远多于黑钨矿;黑色为黑钨矿;透射光,单偏光;b.石英脉中的白钨矿、黄铜矿共生;c.石英脉中黑钨矿残留于白钨矿中,大部分被白钨矿交代,透射光,单偏光;d.同 c,反射光;e.石英脉中,黑钨矿残留于白钨矿中,大部分被白钨矿交代,透射光,单偏光;f.同 e,反射光。Q—石英;Ccp—黄铜矿;Ms—白云母;Sch—白钨矿;Pl—斜长石;Chl—绿泥石;W—黑钨矿;Bi—黑云母

是预测未知矿体的重要依据(叶天竺等,2014)。

石门寺钨矿共圈出约 260 个矿体。矿体主要为细脉浸染型、石英大脉型,赋存在 NEE 向强硅化挤压破碎带中,其东端被热液隐爆角砾岩截断或复合。矿体产于燕山期酸性花岗岩体上部、内外接触带,以外接触带为主(图 3),矿床的形成与燕山期花岗岩关系密切;燕山期花岗岩与晋宁期花岗闪长岩的接触带有一层似伟晶岩壳,是区内重要的找矿标志层。

3.3.2 矿石矿物特征

矿物元素组分以 WO_3 为主,Cu 次之;伴生有用元素 Ag、Mo、Sn, 稀散元素 Ga。有害元素 S、P、As、F、Zn、Bi 含量偏高,Pb 含量较低,其赋存状态均以独立矿物存在。矿区内各类型矿石中钨的赋存状态均以白钨矿、黑钨矿为主,两者合计分布率 95.5%~98.9%,钨华分布率仅 1%~4%。铜为本矿区内仅次于钨的有用组分,主要以黄铜矿、斑铜矿、黝铜矿等含铜硫化矿物形式存在。矿石中的铜以

硫化铜为主,其占有率最高 94.73%,最低 86.15%,平均 91.80%,变化较小。与其他类型的矿石相比,I 矿带花岗闪长岩型铜矿石中氧化铜的占有率偏高,这与该类型矿石出露地表广、埋藏浅和原岩结构粗、易风化相对应。Mo 是矿石中的主要伴生有用元素。主要工业矿物为白钨矿、黑钨矿、黄铜矿。

根据矿化穿切关系和空间分布关系,石门寺钨矿大体可划分出 3 个成矿阶段:①岩浆晚期阶段,成矿发生时的流体可能是浆液过渡态流体,以似伟晶岩壳为中心形成矿化。矿石矿物为白钨矿、黑钨矿、黄铜矿、辉钼矿、辉铋矿,脉石矿物为钠长石、钾长石、石英、白云母。空间上,分布于成矿系统的上部,位于伟晶岩壳的接触面分内、外接触面附近,以外接触面为主。②隐爆角砾岩阶段,与晚期的花岗斑岩有关,矿石矿物为白钨矿、黑钨矿、黄铜矿、辉钼矿、辉铋矿,脉石矿物为石英、钾长石,少量白云母、萤石、电气石。空间上,分布于整个成矿系统的底部。③石英脉阶段,矿石矿物为黑钨矿、白钨矿、辉钼矿、黄铜矿及辉铋矿,脉石矿物为石英、白云母,少量萤石及富铁锰的方解石。空间上,分布于整个隐爆角砾岩筒顶部,并切穿浸染状矿体。

3.3.3 蚀变特征

石门寺钨矿床蚀变类型:花岗闪长岩中黑鳞云母化明显,似斑状黑云母花岗岩中钾长石化明显,云英岩化、白(绢)云母化、硅化、绿泥石化相对强,蚀变强度与矿化强度正相关。

较强的蚀变为云英岩化、黑鳞云母化、白云母化、钾长石化、硅化。较弱的蚀变为绿泥石化、萤石化、绿帘石、粘土化。与钨矿化关系紧密的蚀变为云英岩化、钾长石化、硅化。黑钨矿、白钨矿成细脉浸染状分布在花岗闪长岩与云英岩化似斑状黑云母花岗岩的内外接触带。矿床中部云英岩化可见浸染状黑钨矿,黄铜矿分布于白云母集合体中。云英岩化的石英脉也可见浸染状黑钨矿,一般蚀变愈强,矿化愈强。石英大脉中微脉状白钨矿化普遍发育。

燕山早期围岩蚀变以黑鳞云母化、硅化、云英岩化为主;燕山晚期以云英岩化、白云母化、黑鳞云母化、硅化、长石化为主,其次为绿泥石化、绿帘石、萤石化、粘土化的面型蚀变和线型蚀变(刘南庆等,2016)。

3.3.4 矿床地球化学特征

(1) 石英流体包裹体特征

根据前人资料,石英大脉型矿体中含矿石英的

均一温度分布在 $147.1 \sim 316.2^{\circ}\text{C}$ 之间,主要集中在 $201.5 \sim 259.2^{\circ}\text{C}$,均值为 211.1°C ;盐度分布在 $0.88\% \sim 7.31\% \text{NaCl}_{\text{eqv}}$ 之间,均值为 $2.45\% \text{NaCl}_{\text{eqv}}$;密度在 $0.79 \sim 0.94 \text{ g/cm}^3$ 之间,均值为 0.87 g/cm^3 。成矿流体为中温、低密度、低盐度的 $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}-\text{CH}_4 \pm (\text{CO}_2, \text{N}_2)$ 体系。成矿流体演化以岩浆热液与大气降水的混合作用为主,局部发生沸腾作用(刘磊等,2016)。

似伟晶岩阶段石英中 I 型和 II 型流体包裹体的均一温度分布区间为 $171.4 \sim 346.9^{\circ}\text{C}$,盐度为 $2.57\% \sim 9.47\% \text{NaCl}_{\text{eqv}}$;黑钨矿-白钨矿-硫化物-石英阶段 I 型和 II 型流体包裹体均一温度分布区间为 $170.2 \sim 360.3^{\circ}\text{C}$,盐度为 $0.53\% \sim 5.67\% \text{NaCl}_{\text{eqv}}$;白钨矿-硫化物-石英阶段 I 型和 II 型流体包裹体均一温度分布区间为 $180.1 \sim 312.1^{\circ}\text{C}$,盐度为 $1.57\% \sim 5.41\% \text{NaCl}_{\text{eqv}}$;IV 型包裹体部分均一温度区间 $11.5 \sim 14.9^{\circ}\text{C}$,均一温度分布区间为 $289.0 \sim 314.2^{\circ}\text{C}$,盐度为 $0.41\% \sim 3.38\% \text{NaCl}_{\text{eqv}}$;硫化物-石英阶段 I 型和 II 型流体包裹体均一温度分布区间为 $168.4 \sim 287.1^{\circ}\text{C}$,盐度为 $2.07\% \sim 4.96\% \text{NaCl}_{\text{eqv}}$ 。仅在白钨矿-硫化物-石英阶段隐爆角砾岩胶结物石英脉样品中发现少量 IV 型包裹体,其固相 CO_2 熔化温度为 $-57.8 \sim -63.9^{\circ}\text{C}$,略低于纯 CO_2 包裹体的三相点温度 (-56.6°C),表明流体包裹体中除 CO_2 外还混有其他挥发性组分(Shepherd et al., 1985)。

(2) 碳-氧同位素特征

石门寺矿床方解石 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值为 $-15.92\% \sim -5.76\%$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 的变化范围为 $4.38\% \sim 20.70\%$ (阮昆等,2015;王辉等,2015),表明碳来自下地壳或上地幔。

(3) 硫同位素特征

本次获得石门寺钨矿黄铜矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围为 $-3.3\% \sim -0.5\%$,极差为 2.8% ,平均值为 -1.58% ;9 件辉钼矿样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围为 $-2.53\% \sim -1.02\%$,极差为 1.51% ,平均值为 -1.90% 。前人获得的石门寺矿床硫同位素组成的 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布于 $-3.1\% \sim -0.3\%$ 之间(项新葵等,2013;阮昆等,2015;王辉等,2015)。因此,石门寺钨矿的硫同位素变化范围较窄,表明硫同位素组成比较稳定、成矿流体中的硫来源主要是岩浆(张志辉,2014)。

表 2 石门寺钨矿床找矿预测地质模型

Table 2 List of geological models for prospecting prediction of Shimensi tungsten deposit

找矿模型要素	主要标志		花岗岩型矿体
成矿地质背景	大地构造背景	挤压后伸展	
成矿地质体	围岩	晋宁期黑云母花岗岩闪长岩,为巨量白钨矿形成提供 Ca^{+}	
	岩体形态、产状、规模	岩株、岩枝,顶部接触面平缓,面积小于 3 km^2	
	形成时代	燕山期	
	岩性与岩石类型	碱长花岗岩、似斑状黑云母花岗岩、花岗斑岩,属于 S 型花岗岩(张志辉等,2020; Zhang et al., 2022)	
	岩石化学	高硅、过铝质、高钾钙碱性,富集大离子亲石元素、亏损高场强元素,轻稀土元素富集、明显的负 δEu 异常	
	同位素地球化学	似斑状黑云母花岗岩 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = -5.3 \sim -2.6$;花岗斑岩 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = -23.6 \sim -2.9$	
	副矿物	磷灰石、电气石、榍石、金红石、锡石等	
	矿体空间位置	斑状黑云母花岗岩岩体顶部及外接触带附近,300~800 m(项新葵等,2017)	
成矿构造与成矿结构面特征	控矿构造系统	区域构造控制岩体,隐爆裂隙控制石英细脉和石英脉, F_{20} 为成矿构造	
成矿作用特征标志研究	矿体就位部位	似斑状黑云母花岗岩的顶部接触带似伟晶岩壳;花岗斑岩的顶部接触带似斑状黑云母花岗岩上部	
	蚀变类型	云英岩化、钾化、黑云母化	
成矿分带及典型矿物组合	蚀变分带	分带不明显	
	成矿分带	上 W 下 Mo	
	矿化组合	W、Cu、Mo	
	矿化类型	花岗岩体型、隐爆角砾岩型、石英脉型	
	矿体形态	细脉浸染状钨矿:分布于斑状黑云母花岗岩岩株与花岗闪长岩接触带内外,在似伟晶岩壳上、下分布,厚 100~500 m,接触带外的规模大于接触带内。矿石为含细脉浸染状矿化花岗岩,局部有少量含矿石英细脉。品位低, WO_3 一般为 0.5%~0.2%	
		隐爆角砾岩型矿体:分布于燕山期花岗岩株的中心,与花岗斑岩密切共生,分布范围与花岗斑岩一致。胶结物为石英,少量粗晶钾长石,分布于石英粒间。局部粗晶石英、云英岩与花岗斑岩过渡	
		含钨石英脉:分布于燕山期花岗斑岩顶部,范围广泛,主要呈近 EW 向,NEE 向。石英脉矿物组合与隐爆角砾岩的胶结物相同,底部与隐爆角砾岩相边,是隐爆作用的流体沿隐爆形成的断裂充填的结果	
		岩浆晚期阶段:成矿发生时的流体可能为浆液过渡态流体,以似伟晶岩壳为中心在两侧发生矿化。主要矿石矿物:白钨矿、黑钨矿、黄铜矿、辉钼矿、辉铋矿,主要脉石矿物为(钠长石+钾长石)、石英、白云母	
	矿物组合与成矿阶段	隐爆角砾岩阶段:与晚期的花岗斑岩有关,分布于浸染状矿体的中部。主要矿石矿物为白钨矿、黑钨矿、黄铜矿、辉钼矿、辉铋矿,主要脉石矿物为石英、钾长石,少量白云母,少量萤石	
		石英脉阶段:主要矿石矿物为黑钨矿、白钨矿、辉钼矿、黄铜矿、辉铋矿,主要脉石矿物为石英、白云母,少量萤石、富铁锰的方解石	
成矿流体性质及流体包裹体特征	成矿流体性质	浆液过渡态流体, $\text{NaCl-H}_2\text{O-CO}_2$ 体系	
	包裹体特征	熔流包裹体,气-液包裹体	
	流体物理化学参数	似伟晶岩阶段石英均一温度 $171.4 \sim 346.9^\circ\text{C}$,盐度为 2.57%~9.47% NaCleqv ;黑钨矿-白钨矿-硫化物-石英阶段均一温度 $170.2 \sim 360.3^\circ\text{C}$,盐度为 0.53%~5.67% NaCleqv ;	
		白钨矿-硫化物-石英阶段均一温度 $180.1 \sim 312.1^\circ\text{C}$,盐度为 1.57%~5.41% NaCleqv ;硫化物-石英阶段均一温度 $168.4 \sim 287.1^\circ\text{C}$,盐度为 2.07%~4.96% NaCleqv	
金属的迁移和沉淀机制	金属迁移富集	稳定同位素特征	
		$\delta^{34}\text{S} = -3.3\text{‰} \sim -0.5\text{‰}$	
金属的迁移和沉淀机制	金属迁移富集	F、B、Li 等挥发分促进岩浆的液态分异,有利于 W、Mo、Sn 等金属物质进入富挥发份相	
		迁移形式:W 以 WO_4^{2-} 、 HWO_4^- 、 H_2WO_4 形式迁移;Mo 以 MoO_4^{2-} 、 HMoO_4^- 、 H_2MoO_4 形式迁移。Cu 主要以 Cl 络合物形式迁移,部分以气相形式迁移	

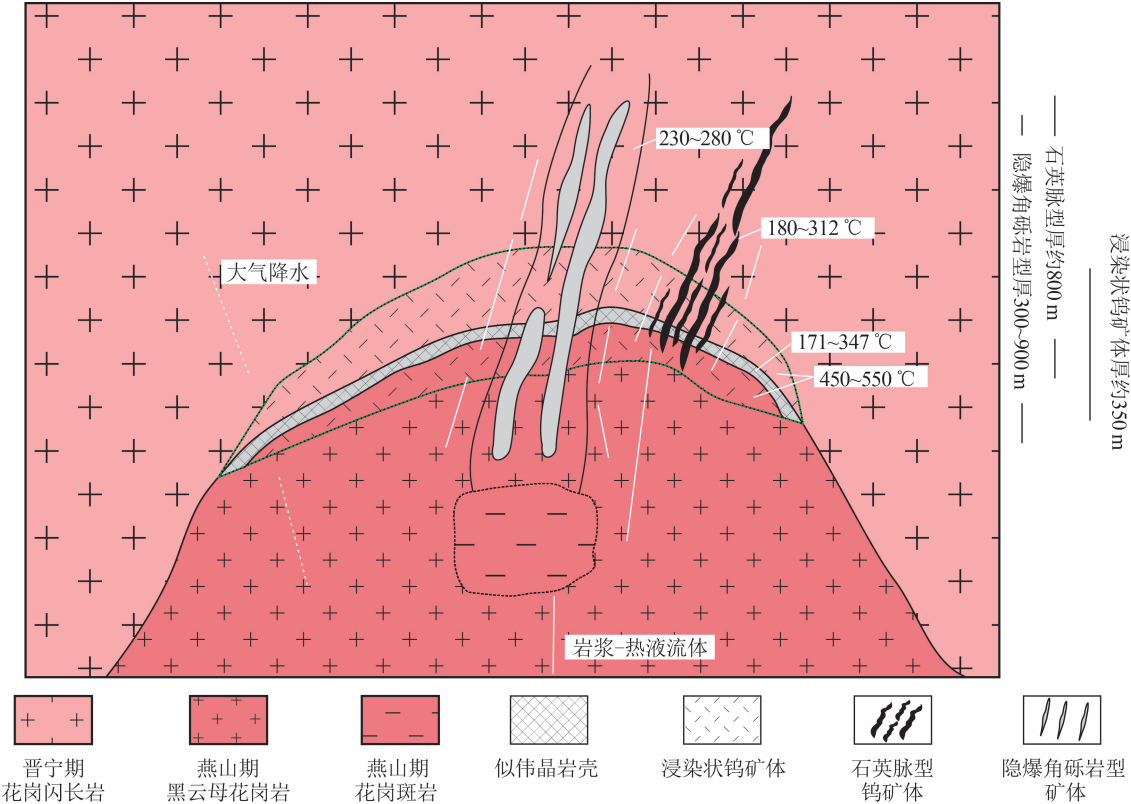


图 4 石门寺钨矿床“三位一体”找矿预测地质模型

Fig. 4 "Trinity" prospecting prediction geological model of Shimensi tungsten deposit

(4) 铅同位素特征

石门寺矿床²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb、²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb、²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 的比值分别为 17.794~18.625(平均值为 18.217,极差为 0.831)、15.549~15.708(平均值为 15.621,极差为 0.159)、37.579~38.715(平均值为 38.427,极差为 1.136),反映出上地壳铅和造山带铅的特征(张志辉,2014);矿石矿物的铅同位素组成与矿区燕山期岩体的造岩矿物(钾长石、斜长石)一致,说明成矿物质主要来自燕山期岩浆。

4 找矿预测地质模型

石门寺钨矿床主要矿化类型为细脉浸染型、石英脉型、热液隐爆角砾岩型等。细脉浸染型矿体主要分布于成矿地质体燕山期黑云母花岗岩顶部,全岩低品位矿化,WO₃ 含量为 0.15%~0.4%,石英大脉型和热液隐爆角砾岩型矿体成矿地质体为花岗斑岩,石英脉一般不进入同阶段成矿花岗岩,在岩体外侧延深达数百米。基于以上分析,本文构建了石门寺钨矿床“三位一体”找矿预测地质模型(表 2;图 4)。

该模型的建立为晋宁期花岗闪长岩大面积出露地区的找矿工作提供了思路 and 方向。本文认为应该首先寻找热液隐爆角砾岩,开展系统的矿床地质观察,确定成矿作用中心,并寻找碱长花岗岩,在此基础上寻找细脉浸染型矿体和石英大脉型矿体。利用此模型可以迅速寻找相同类型的矿床。

5 结 论

- (1)石门寺钨矿床成矿地质体:细脉浸染型矿体主要为燕山期斑状黑云母花岗岩,石英大脉型和热液隐爆角砾岩型矿体为花岗斑岩。
- (2)成矿构造:近 EW 向和 NNW 向断裂构造控制石英矿脉的分布。成矿结构面:①燕山期似斑状黑云母花岗岩顶部接触面,控制似伟晶岩壳和大规模浸染状矿化的分布。②燕山期花岗斑岩顶部接触面,控制大规模隐爆角砾岩型矿体。
- (3)成矿作用蚀变特征标志:云英岩化、钾长石化、硅化、白云母化,云英岩化与钨矿化关系密切。黑钨矿多呈浸染状、白钨矿多呈微脉浸染状散布在云英岩化似斑状黑云母花岗岩和花岗闪长岩内外

接触面中。

致谢:江西省地质矿产勘查开发局九一六大队项新葵教授级高工、刘永红高工对石门寺钨矿床的野外工作给予了大量帮助,审稿专家对文章提出了诸多宝贵建议,在此一并表示感谢。

注释

①詹国年,汪石林,汪克信,等.江西省武宁县大湖塘北区钨矿资源储量核实报告[R].2012.

参考文献

Mao Z H,Cheng Y B,Liu J J. 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, 2013, (53): 422-433.

Mao Z H, Liu J J, Mao J W, et al. Geochronology and geochemistry of granitoids related to the giant Dahutang tungsten deposit, middle Yangtze River region, China: Implications for petrogenesis, geodynamic setting, and mineralization [J]. Gondwana Research, 2014, 28 (2): 816-836.

Shepherd T J, Ranbin A H, Alderton D H M. A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies[M]. Glasgow: Blackie, 1985: 1-239.

Zhang Z H, Zhang D, Xiang X K, et al. Geology and mineralization of the supergiant Shimensi granitic-type W-Cu-Mo deposit (1.168 Mt) in northern Jiangxi, South China: A Review [J]. China Geology, 2022, 5: 510-527.

陈柏林,董法先,王平安,等.江西大背坞金矿床成因探讨[J].江西地质.1997,(3): 8-16.

丰成友,张德全,项新葵,等.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,2012,28(12): 3858-3868.

黄兰椿,蒋少涌.江西大湖塘钨矿床似斑状白云母花岗岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及成因研究[J].岩石学报.2012,28(12): 3887-3900.

莱登 J W. 火山成因块状硫化物矿床第一部分: 描述模型[J]. 国外矿床地质, 1990, (1): 77-83.

刘南庆,秦润君,尹青青,等.赣北大湖塘钨铜多金属矿集区特征与成矿作用模式[J].地质论评,2016,62(5): 1225-1240.

刘磊,严冰,魏文凤,等.赣北石门寺钨矿床石英大脉型矿体流体包裹体特征及其研究意义[J].矿物岩石,2016,36(3): 44-52.

满发胜,王小松.阳储岭斑岩型钨钼矿床同位素地质年代学研究[J].矿产与地质,1988,(4): 61-67.

毛景文,谢桂青,程彦博,等.华南地区中生代主要金属矿床模型[J].地质论评,2009,55(3): 347-354.

毛景文,张作衡,裴荣富.中国矿床模型[M].北京:地质出版社,2012: 1-560.

裴荣富,梅燕雄,瞿泓滢,等.矿床类型模型的地质构造背景、成矿环境和容矿岩石组合[J].中国地质,2013,40(1): 31-42.

秦克章,赵俊兴,范宏瑞,等.试论主要类型矿床的形成深度与最大延深垂幅[J].地质前缘,2021,28(3): 271-294.

阮昆,潘家永,曹豪杰,等.大湖塘石门寺钨矿床碳、氧、硫同位素研究[J].矿物岩石,2015,35(1): 57-62.

王辉,丰成友,李大新,等.赣北大湖塘钨矿成岩成矿物质来源的矿物学和同位素示踪研究[J].岩石学报,2015,31(3): 725-739.

项新葵,陈茂松,詹国年,等.赣北石门寺矿区钨多金属矿床成矿地质条件[J].地质找矿论丛,2012a,27(2): 143-155.

项新葵,刘显沐,詹国年.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,2012b,33(3): 141-151.

项新葵,王朋,孙德明,等.赣北石门寺钨多金属矿床辉钨矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J].地质通报,2013,32(11): 1824-1831.

项新葵,王朋,詹国年,等.赣北石门寺超大型钨多金属矿床地质特征[J].矿床地质,2013,32(6): 1171-1187.

项新葵,尹青青,詹国年,等.江西大湖塘北区石门寺矿段钨矿成矿条件与找矿预测[J].吉林大学学报(地球科学版),2017,47(3): 645-658.

杨明桂,王昆.江西省地质构造格架及地壳演化[J].江西地质,1994,(4): 239-251.

叶天竺,吕志成,庞振山,等.勘查区找矿预测理论与方法[M].北京:地质出版社,2014: 1-703.

张家菁,梅玉萍,王登红,等.赣北香炉山白钨矿床的同位素年代学研究及其地质意义[J].地质学报,2008,(7): 927-931.

张贻侠.矿床模型导论[M].北京:地震出版社,1993.

张志辉.江西武宁县大湖塘钨多金属矿田成矿作用研究[D].中国地质大学(北京)博士学位论文,2014.

张志辉,张达,贺晓龙,等.江西九岭杂岩体中黑云母花岗闪长岩年龄及对扬子和华夏板块碰撞拼合时间限定[J].中国地质,2021,48(5): 1562-1579.

张志辉,胡攀捷,张达,等.赣北石门寺花岗斑岩锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学、Hf 同位素特征及其对成矿的制约[J].地质通报,2020,39(8): 1267-1284.

赵鹏大,胡旺亮,李紫金.矿床统计预测[M].北京:地质出版社,1994.

赵鹏大.定量地学方法及应用[M].北京:高等教育出版社,2004.