

淘锡坑石英脉型钨矿床找矿新突破及“台阶式”勘查模型启示*

郭淑庆¹, 赵正², 郭聪^{2**}, 李陈浩², 刘善宝², 刘战庆³

(1 崇义章源钨业股份有限公司, 江西赣州 341300; 2 中国地质科学院矿产资源研究所, 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 3 桂林理工大学地球科学学院, 广西隐伏金属矿产勘查重点实验室, 广西桂林 541004)

摘要 淘锡坑钨矿床是目前赣南地区可采规模最大的石英脉型黑钨矿矿床, 主要由宝山、棋洞、烂埂子和枫林坑矿段组成。近年通过深边勘查, 在矿区南东侧东峰矿段又取得了重要找矿突破, 新增优质黑钨矿资源量(WO_3)超1.4万吨。文章系统对比了淘锡坑各类矿体地质特征, 重点对东峰矿段I号脉带黑钨矿开展了矿物学研究, 结合矿物微区原位微量元素分析, 系统总结了石英脉内带型黑钨矿与外带型黑钨矿的地球化学差异。结果显示, 内带型黑钨矿具有更低的Zr/Hf、Nb/Ta和LREE/HREE比值, 反映其成矿热液演化程度更高, 与其更低的成矿温度相对应。东峰矿段黑钨矿由浅至深具有从外带型向内带型过渡的特征, 其深部仍具有重要找矿潜力。结合赣南地区石英脉型钨矿发育特征, 在“五层楼”模型基础上, 笔者提出了适用于石英脉型钨矿深边部找矿的“台阶式”勘查模型, 并建立了相应的勘查技术方法及黑钨矿矿物化学标志, 为矿床-矿田尺度的钨矿勘查提供了新的理论依据。

关键词 黑钨矿; 地球化学特征; 勘查模型; 淘锡坑; 东峰

中图分类号: P618.67

文献标志码: A

New breakthrough in Taoxikeng quartz-vein type tungsten deposit and implications for the "stepped" exploration model

GUO ShuQing¹, ZHAO Zheng², GUO Cong², LI ChenHao², LIU ShanBao² and LIU ZhanQing³

(1 Chongyi Zhangyuan Tungsten Co., Ltd, Ganzhou 341300, Jiangxi, China; 2 MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3 Guangxi Key Laboratory of Hidden Metallic Ore Deposits Exploration, College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China)

Abstract

The Taoxikeng (TXK) tungsten deposit in southern Jiangxi Province, is currently the largest mineable quartz-vein type wolframite deposit in the region. It mainly consists of the Baoshan, Qidong, Langengzi, and Fenglinkeng ore sections. In recent years, based on detailed exploration on the deep and side of the mining area, an important prospecting breakthrough has been made in the Dongfeng ore section at the southeast side of the TXK deposit, with newly increased resources of more than 14,000 tons of high-quality WO_3 . In this study, we systematically compare the geological characteristics of various orebodies in the TXK deposit, and focus on the mineralogy of the wolframite in the vein zone I of the Dongfeng section. Combined with in-situ trace element geo-

* 本文得到国家自然科学基金地质联合基金重点项目(编号:U2344207)、国家重点研发计划项目(编号:2022YFC2905101)、国家自然科学基金(编号:41973046)、中国地质调查局地质调查项目(编号:DD20190713)联合资助

第一作者简介 郭淑庆, 男, 1972年生, 高级工程师, 主要从事地质矿产勘查等研究工作。Email: 342274070@qq.com

** 通讯作者 郭聪, 男, 2001年生, 硕士生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。Email: 3489866572@qq.com

收稿日期 2023-09-12; 改回日期 2024-05-06。张绮玲编辑。

chemistry of wolframite, we summarize the geochemical differences between the inner zone-type and outer zone-type quartz vein wolframite. The former has lower Zr/Hf, Nb/Ta and LREE/HREE ratios, reflecting higher evolution degree of ore-forming fluids and corresponding to lower metallogenic temperature. The wolframite in Dongfeng section has the characteristics of transition from outer zone-type to inner zone-type wolframite from the shallow to the deep, indicating that it has great prospecting potential in the depth. Accordingly, in combination with the "five-floor" model of quartz vein tungsten deposits in southern Jiangxi Province, we propose a "stepped" exploration model which is suitable for deep and side prospecting of quartz-vein type tungsten deposit, and establish the corresponding exploration techniques and mineral chemical footprints of wolframite, which provides a new theoretical basis for deposit-orefield scale tungsten ore exploration.

Key words: wolframite, geochemical characteristic, exploration model, Taoxikeng, Dongfeng

赣南地处南岭成矿带东段,分布有西华山、大吉山、盘古山等诸多大型石英脉型钨矿床,享有“世界钨都”的美誉(Zhao et al., 2018; 尹政等, 2021)。然而,历经多年开采,诸如西华山、盘古山、岿美山等大型钨矿山已濒临闭坑,后备资源严重不足,勘探增储工作已迫在眉睫。前人系统总结了石英脉型钨矿的垂向分带特征,形象地提出了“五层楼”(广东有色金属地质勘探公司九三二队, 1966)和“五层楼+地下室”勘查模型(许建祥等, 2008; 王登红等, 2010),以及矿田尺度的“九龙脑”模式(赵正等, 2017),提升了勘查工作效率。然而,对于矿区外围无地表化探异常的隐伏矿勘查陷入困境,特别是多矿段、不同脉组(如NW向、SN向、NE向)共存的矿区,尚缺乏有效的勘查模型和成矿规律认识(徐敏林等, 2011; 方贵聪等, 2021)。近年来,在淘锡坑矿区沿宝山、棋洞、烂埂子矿段各组脉体收敛的南东方向,东峰矿段取得了重要找矿突破,形成了平面上多组段、垂向上不同梯级的矿化结构。本文针对该矿化结构特征进行了总结分析,以黑钨矿矿物化学为研究主线,将淘锡坑东峰脉组与宝山脉组,以及南岭地区典型石英脉型黑钨矿进行了系统对比,探讨了黑钨矿对石英脉型钨矿床成因的指示意义,建立了适用于石英脉型钨矿床-矿田尺度找矿的“台阶式”勘查模型,并提出了相应的勘查标识,对目前紧缺的石英脉型黑钨矿勘查具有重要意义。

1 矿床地质

淘锡坑矿床位于南岭成矿带东段的崇义-大余-上犹钨多金属矿集区,大地构造位置处于古华夏板块内部。矿化类型主要为石英大脉型,主矿体由宝山、棋洞、烂埂子和枫林坑4个矿段组成(图1)。其

中宝山、棋洞和烂埂子矿段位于矿区北西侧,矿化面积约2.6 km²,有编号矿脉21条,脉组平面上呈SE-NW向发散的特征。矿体按走向可分为NW向、SN向、NE向和EW向4组。矿脉总体形态由深向浅呈现出逐渐发散的特征,地表矿脉细小而密集,往下逐渐归并变厚,数量变少。枫林坑矿段位于矿区南东侧,有编号矿脉5条,矿体向深部逐渐变厚大,可延深至隐伏花岗岩顶部,该处矿段相较于宝山矿段整体矿脉赋存标高约100 m。矿区内同时发育内带型(主体赋存于花岗岩体内的钨矿化石英脉)与外带型(主体赋存于岩体外接触带围岩地层中的钨矿化石英脉)石英脉型黑钨矿矿体。两类矿体矿石矿物组成基本一致,以黑钨矿、锡石、黄铜矿、辉钼矿和黄铁矿为主;脉石矿物主要为石英、白云母、方解石、萤石、石榴子石、黄玉、绿柱石和叶腊石等。外带型矿脉可见电气石化、硅化、绢云母化、绿泥石化等蚀变类型(郭春丽等, 2007)。各矿段代表性矿体特征见表1。

东峰矿段位于淘锡坑主矿区南东,出露地层以志留系和泥盆系为主,也是矿区外带含矿石英脉的赋矿围岩(图2a)。区内构造活动强烈,褶皱、断裂构造发育,基底褶皱(泥盆系)控制着深部花岗岩体的侵入,NEE向和近EW向断裂构造控制着矿体(含矿石英脉)的产出,NE向断裂多表现为成矿后断层,对矿体具有明显的破坏作用(图2a)。矿区地表未见岩浆岩出露,钻孔在-360 m至-400 m标高已经揭露到深部隐伏花岗岩体,主要岩性为中细粒含斑黑云母花岗岩。矿脉蚀变以绢云母化、硅化和绿泥石化等为主(图3)。

东峰矿段V101和V102矿体是矿区已控制的2个主矿体,均产于I号矿脉带中(图2b),二者近于平行产出,水平间距2~10 m。矿体以含钨石英脉形式

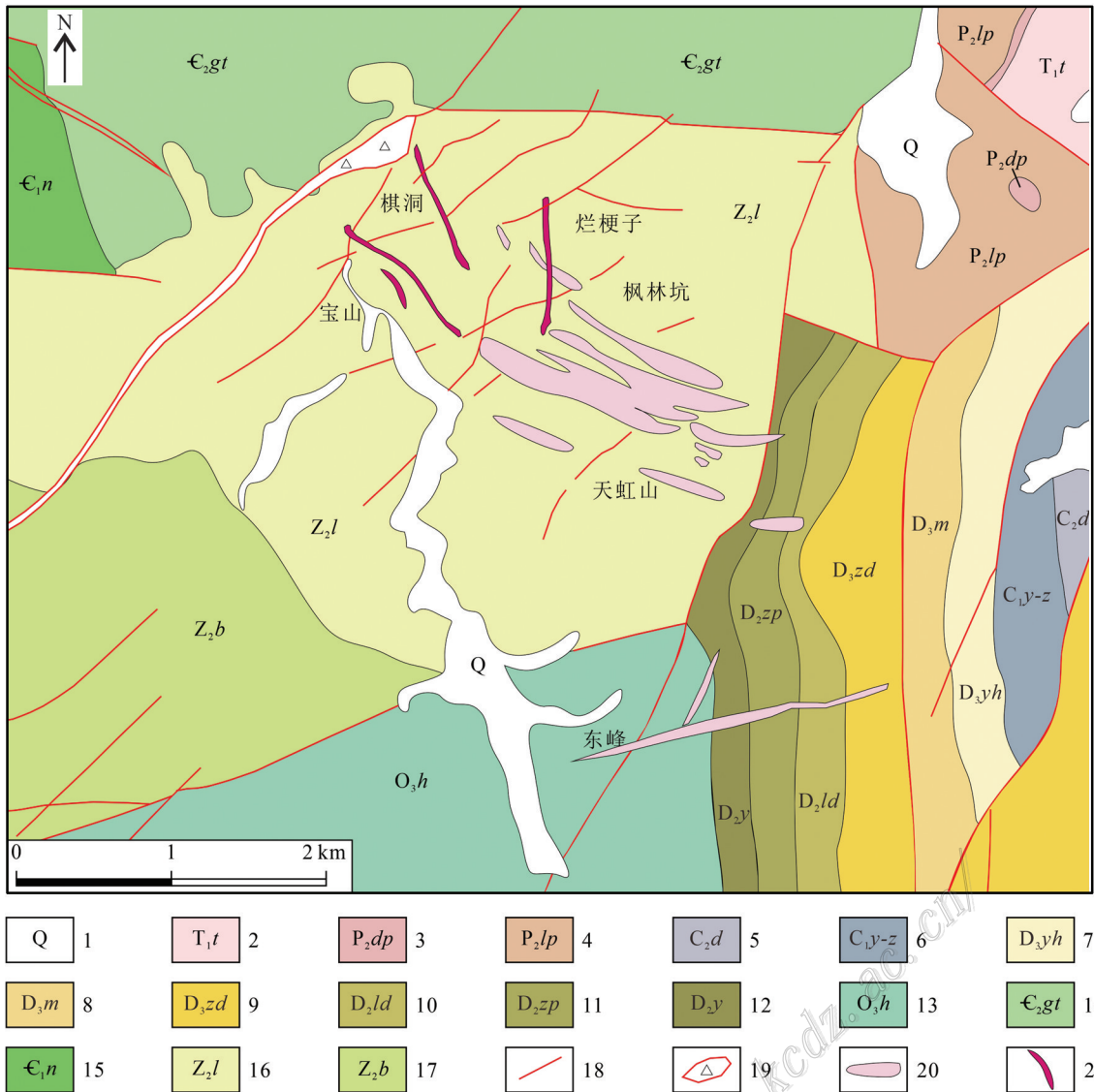


图 1 淘锡坑矿区地质图(据陈郑辉等,2006 改编)

1—第四系;2—三叠系下统铁石组;3—二叠系中统大棚组;4—二叠系中统乐平组;5—石炭系中统大浦组;6—石炭下统杨家源组、梯山组并层;7—泥盆系上统洋湖组;8—泥盆系上统麻山组;9—泥盆系上统樟东组;10—泥盆系中统罗段组;11—泥盆系中统中棚组;12—泥盆系中统云山组;13—奥陶系上统黄竹洞组;14—寒武系中统高滩组;15—寒武系下统牛角河组;16—震旦系上统老虎塘组;17—震旦系下统坝里组;18—断裂;19—断层破碎带;20—矿化标志带;21—矿化带

Fig. 1 Geological map of the Taoxikeng deposit(modified after Chen et al., 2006)

1—Quaternary; 2—Lower Triassic Tieshi Formation; 3—Middle Permian Dapeng Formation; 4—Middle Permian Leping Formation; 5—Middle Carboniferous Dapu Formation; 6—Lower Carboniferous Yangjiayuan Formation and Tishan Formation; 7—Upper Devonian Yanghu Formation; 8—Upper Devonian Mashan Formation; 9—Upper Devonian Zhangdong Formation; 10—Middle Devonian Luoduan Formation; 11—Middle Devonian Zhongpeng Formation; 12—Middle Devonian Yunshan Formation; 13—Upper Ordovician Huangzhudong Formation; 14—Middle Cambrian Gaotan Formation; 15—Lower Cambrian Niujiahe Formation; 16—Upper Sinian Tiger Formation; 17—Lower Sinian Bali Formation; 18—Fracture; 19—Fault fracture zone; 20—Mineralization sign zone; 21—Mineralized zone

赋存于矿区 NEE 向—近 EW 向的裂隙构造中,倾向北,倾角 75°~90°,局部反倾。V 101 矿体最大走向延长 675 m,最大倾斜延深 650 m。V 102 矿体最大走向延长 455 m,最大倾斜延深 700 m。石英脉形态简

单,常见尖灭再现、侧现、分枝、复合现象。地表浅部石英脉多为 0.1~10 cm 的线脉与细脉,随着深度的增加,石英脉厚度呈逐渐变大的趋势,钻孔揭露 V 101 和 V 102 矿体石英脉最大真厚度分别为 5.14 m 和

表1 淘锡坑矿床主要矿体特征

Table 1 The characteristics of main orebodies in the Taoxikeng deposit

矿段	编号	延长/m	厚度/m	延深/m	产状
宝山	V11	670	0.20~2.00	450	50°∠72°~80°
棋洞	V18	664	0.15~1.20	540	55°~65°∠80°
烂埂子	V2	682	0.18~2.10	660	272°∠83°
枫林坑	V30	788	0.25~0.91	550	18°~25°∠73°~78°
东峰	V101	675	0.10~5.14	650	85°∠75°~90°

3.50 m。矿石组成较为复杂,常见金属矿物有黑钨矿、白钨矿、闪锌矿、黄铁矿和黄铜矿,非金属矿物主要有石英、白云母、绿泥石、萤石和叶腊石(图3a~i)。矿石结构主要为交代结构、自形-半自形结构以及交代残余结构等(图3b、f、g);矿石构造主要为条带状构造、脉状构造、块状构造以及浸染状构造等。

2 样品采集及测试方法

东峰矿段位于淘锡坑主体矿段南东侧,是目前赣南地区发现的800 m以下规模最大的石英脉型黑

钨矿,显示其巨大的深部找矿潜力,同时也为石英脉型黑钨矿深部勘查模型研究提供了绝佳的场所。本次工作于东峰矿段 ZK7197 钻孔 796.37 m、ZK7194 钻孔 795.9 m、ZK7233 钻孔 527.1 m、ZK7234 钻孔和 ZK7235 钻孔 209.4 m 处各采集石英脉型黑钨矿 1 件,总计 5 件。ZK7197 中 H6 号样品和 ZK7194 中 H19 号样品中可见黑钨矿与白钨矿共生,黑钨矿常呈长柱状,2~3 cm,半自形结构,镜下可见黑钨矿被白钨矿交代的现象,被交代的黑钨矿呈交代残余结构(图3f);白钨矿呈团块状,200~800 μm,分布于黑钨矿周围(图3f)。ZK7233、ZK7234 和 ZK7235 号钻孔中钨矿体为黑钨矿矿体,黑钨矿呈自形-半自形长柱状,1~2 cm。样品信息详情见表2。

黑钨矿背散射图像(BSE)拍摄和主量元素分析在中国地质科学院矿产资源研究所电子探针实验室进行。仪器型号为日本公司生产的JXA-8230电子探针仪。测试条件为:加速电压为15 kV,电流为15 nA,束斑直径为1 μm,仪器的检测限制为0.01%~0.05%。测试元素包括WO₃、CaO、MoO₃等,采用ZAF校正法。

黑钨矿微区原位微量元素分析在国家地质实

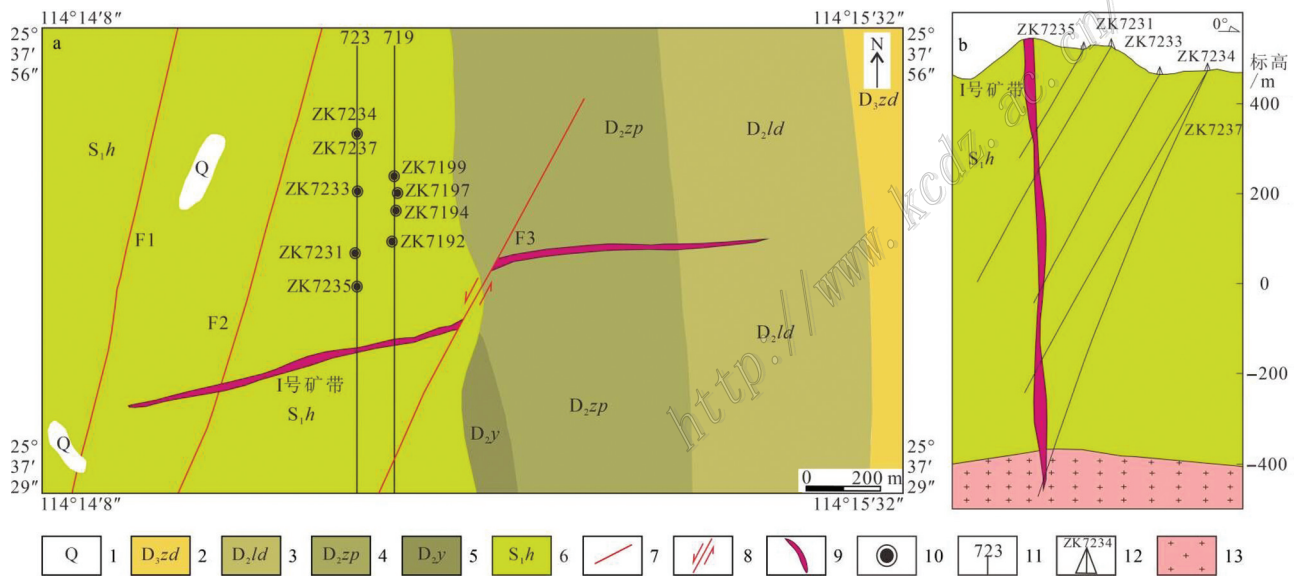


图2 东峰矿段地质图(a)及723号勘探线剖面图(b)

1—第四系;2—泥盆系上统漳东组;3—泥盆系中统罗段组;4—泥盆系中统中棚组;5—泥盆系中统云山组;6—志留系下统黄竹洞组;7—断裂;8—走滑断层;9—矿带;10—钻孔编号;11—勘探线及编号;12—钻孔及编号;13—燕山期花岗岩

Fig. 2 Geological map (a) and geologic section at exploration line No. 723 (b) of the Dongfeng ore section

1—Quaternary; 2—Upper Devonian Zhangdong Formation; 3—Middle Devonian Luoduan Formation; 4—Middle Devonian Zhongpeng Formation; 5—Middle Devonian Yunshan Formation; 6—Lower Silurian Huangzhudong Formation; 7—Fracture; 8—Strike-slip fault; 9—Ore zone; 10—Borehole numbers; 11—Prospecting line and numbers; 12—Borehole and numbers; 13—Yanshanian granite

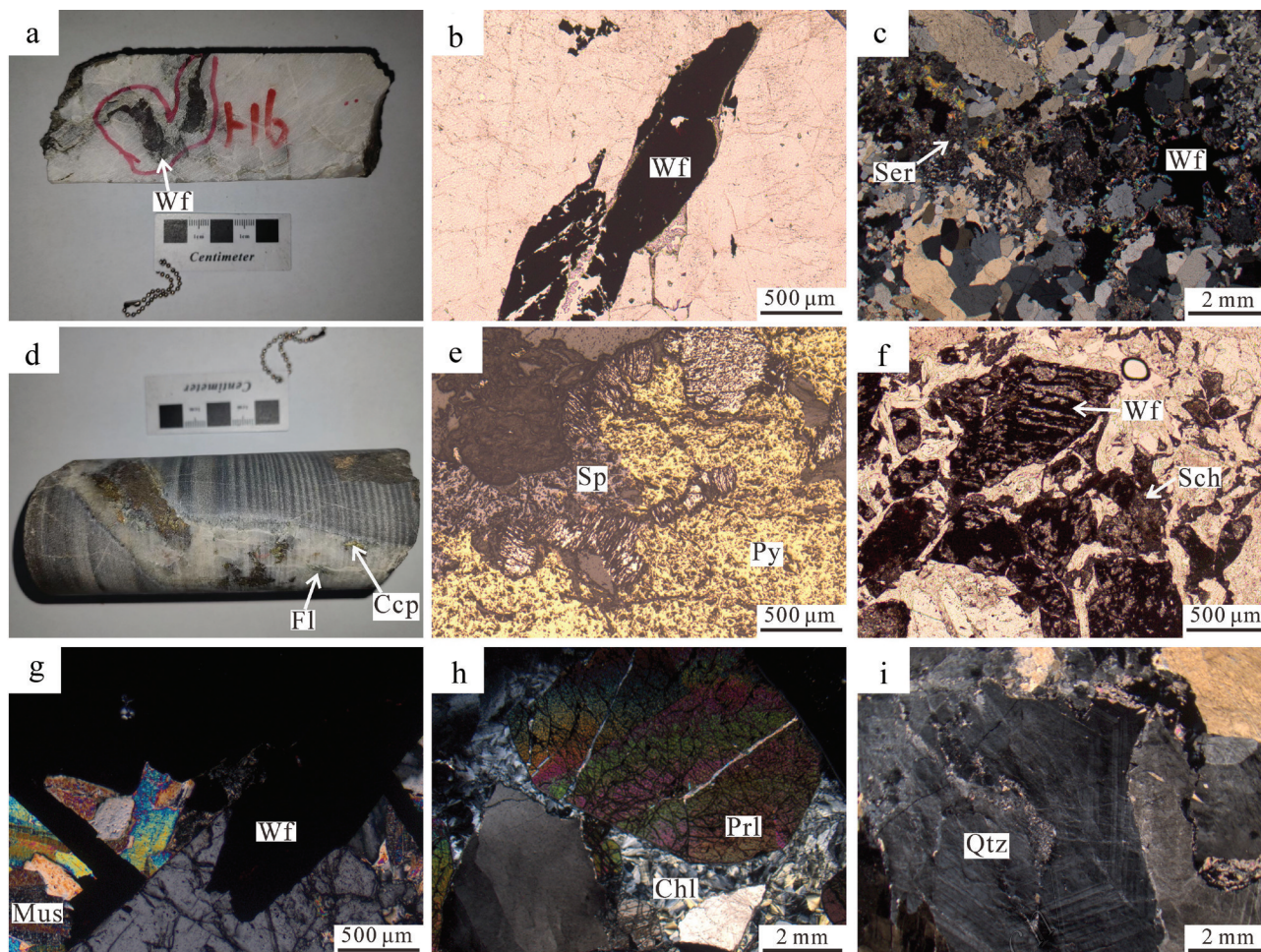


图 3 东峰矿段手标本及对应矿石照片

a. 黑钨矿-石英脉岩芯照片; b. 半自形板状黑钨矿, 单偏光; c. 黑钨矿呈浸染状分布于绢云母-石英脉中, 正交偏光; d. 萤石-硫化物-石英脉岩芯照片; e. 黄铁矿-闪锌矿物组合, 反射光; f. 白钨矿交代黑钨矿, 单偏光; g. 自形板状、尖矛状黑钨矿, 正交偏光; h. 典型绿泥石-叶腊石蚀变矿物组合, 正交偏光; i. 发育良好环带特征的他形石英颗粒, 正交偏光

Wf—黑钨矿; Ser—绢云母; Fl—萤石; Ccp—黄铜矿; Py—黄铁矿; Sp—闪锌矿; Sch—白钨矿; Mus—白云母; Prl—叶腊石; Chl—绿泥石; Qtz—石英

Fig. 3 The photos of hand specimens and corresponding ores from the Dongfeng ore section

a. Drill core with wolframite-quartz vein; b. Subhedral tabular wolframite, plane-polarized light; c. Wolframite is disseminated in sericite-quartz vein, cross-polarized light; d. Drill core with fluorite-sulfide-quartz vein; e. Assemblage of pyrite-sphalerite, reflected light; f. Wolframite is metasomatized by scheelite, plane-polarized light; g. Euhedral tabular, spear-like wolframite, cross-polarized light; h. Typical alteration assemblage of chlorite-pyrophyllite, cross-polarized light; i. Anhedral quartz grains with well-developed zoning characteristic, cross-polarized light

Wf—Wolframite; Ser—Sericite; Fl—Fluorite; Ccp—Chalcopyrite; Py—Pyrite; Sp—Sphalerite; Sch—Scheelite; Mus—Muscovite; Prl—Pyrophyllite; Chl—Chlorite; Qtz—Quartz

表 2 东峰矿段样品详情

Table 2 The details of ore samples from the Dongfeng ore section

样品编号	采样位置	矿物组合	用途
DF-7235	723 勘探线 ZK723-5 进尺 209 m 处	黑钨矿+黄铜矿+黄铁矿+萤石+石英	黑钨矿电子探针、LA-ICP-MS
DF-7233	723 勘探线 ZK723-3 进尺 527 m 处	黑钨矿+赤铁矿+绿泥石+石英	黑钨矿电子探针、LA-ICP-MS
DF-7234	723 勘探线 ZK723-4 进尺 775 m 处	黑钨矿+绿泥石+萤石+白云母+石英	黑钨矿电子探针、LA-ICP-MS
DF-7194	719 勘探线 ZK719-4 进尺 796 m 处	黑钨矿+石英	黑钨矿电子探针、LA-ICP-MS
DF-7197	719 勘探线 ZK719-7 进尺 796 m 处	黑钨矿+黄铜矿+萤石+石英	黑钨矿电子探针、LA-ICP-MS

验测试中心完成,测试方法采用激光剥蚀电感耦合等离子质谱仪(LA-ICP-MS)。使用仪器为 Thermo Element II 四极杆等离子质谱仪,激光剥蚀系统为 New Wave UP-213。实验采用 He 作为剥蚀物质的载气,激光波长 213 nm、激光束斑直径为 50 μm 、脉冲频率 10 Hz、能量 0.176 mJ、密度 23~25 J/cm^3 ,微量元素处理过程选用 NIST 610 玻璃作为外标。仪器运行条件及详细测试流程参考(Qin et al., 2020)。

3 分析结果

黑钨矿整体自形程度良好,呈单柱状、簇状集合

体(图 4a、b)、长矛状(图 4c)或板状(图 4d)产出,部分黑钨矿呈他形粒状,镜下可见明显的云英岩化现象(图 3c),多与黄铁矿、黄铜矿和闪锌矿等硫化物共生产出;垂向上由浅至深黑钨矿粒度呈增大趋势(从 DF-7235 至 DF-7197,标高依次降低),且靠近深部隐伏岩体处的黑钨矿多被白钨矿交代(图 3f)。

3.1 电子探针测试结果

东峰矿段黑钨矿化学成分分析结果列于表 3 中。黑钨矿中 $w(\text{WO}_3)$ 为 75.10%~76.11%, 平均 75.67%; $w(\text{FeO})$ 为 8.49%~12.84%, 平均 11.36%; $w(\text{MnO})$ 为 10.93%~15.44%, 平均 12.67%; FeO/MnO 比值为 0.55~1.16, 平均 0.93, $w(\text{FeO})$ 整体高于 $w(\text{MnO})$ 。

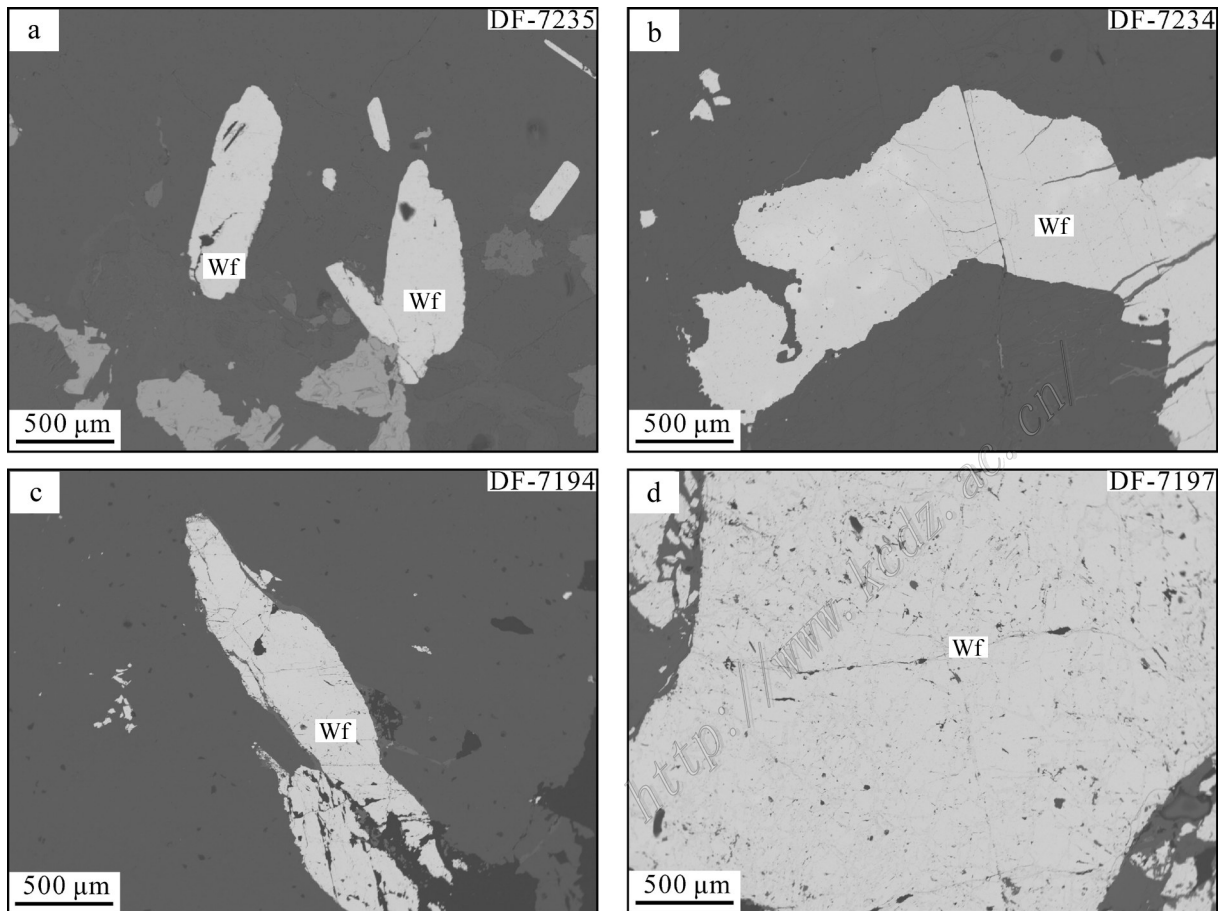


图4 东峰矿段黑钨矿显微特征

a. 浅部自形黑钨矿,呈柱状、簇状集合体产出;b. 他形黑钨矿,边缘被溶蚀成港湾状;c. 深部半自形尖矛状黑钨矿;d. 深部板状黑钨矿,粒度明显变大

Wf—黑钨矿

Fig. 4 Microscopic characters of wolframite from the Dongfeng ore section

a. Euhedral wolframite occurs as columnar and clustered aggregates in shallow part; b. Anhedral wolframite with its edge dissolved into an embayment-like shape; c. Subhedral spear-like wolframite in deep part; d. Deep tabular wolframite with its size becoming significantly larger

Wf—Wolframite

$w(\text{WO}_3)$ 与 $w(\text{FeO})$ 、 FeO/MnO 比值之间呈现出一定的正相关(图 5a、d), 与 $w(\text{MnO})$ 呈现出一定的负相关(图 5b), $w(\text{MnO})$ 与 $w(\text{FeO})$ 之间呈现出明显的负相关(图 5c)关系。

3.2 LA-ICP-MS 测试结果

东峰矿段黑钨矿微量元素如表 4。黑钨矿的 $w(\text{Nb})$ 为 $196.75 \times 10^{-6} \sim 5595.69 \times 10^{-6}$, 平均 2224.46×10^{-6} ; $w(\text{Ta})$ 为 $3.37 \times 10^{-6} \sim 1121.74 \times 10^{-6}$, 平均 457.47×10^{-6} ,

Nb、Ta 含量由浅至深表现出急剧增加的特征。随着 Nb 含量的增加, Y、Sr、Zr 等元素含量也逐渐增加, 而 Ga 却呈现降低的趋势(图 6)。

稀土元素含量总体表现为重稀土元素富集、轻稀土元素亏损的“左倾式”(图 7a), 其中从外带型黑钨矿至内带型黑钨矿可见明显的 LREE/HREE 比值的降低(图 7b)。东峰黑钨矿的总稀土元素含量 $\sum \text{REE}$ 为 $2.71 \times 10^{-6} \sim 253.76 \times 10^{-6}$, LREE 为 $0.15 \times$

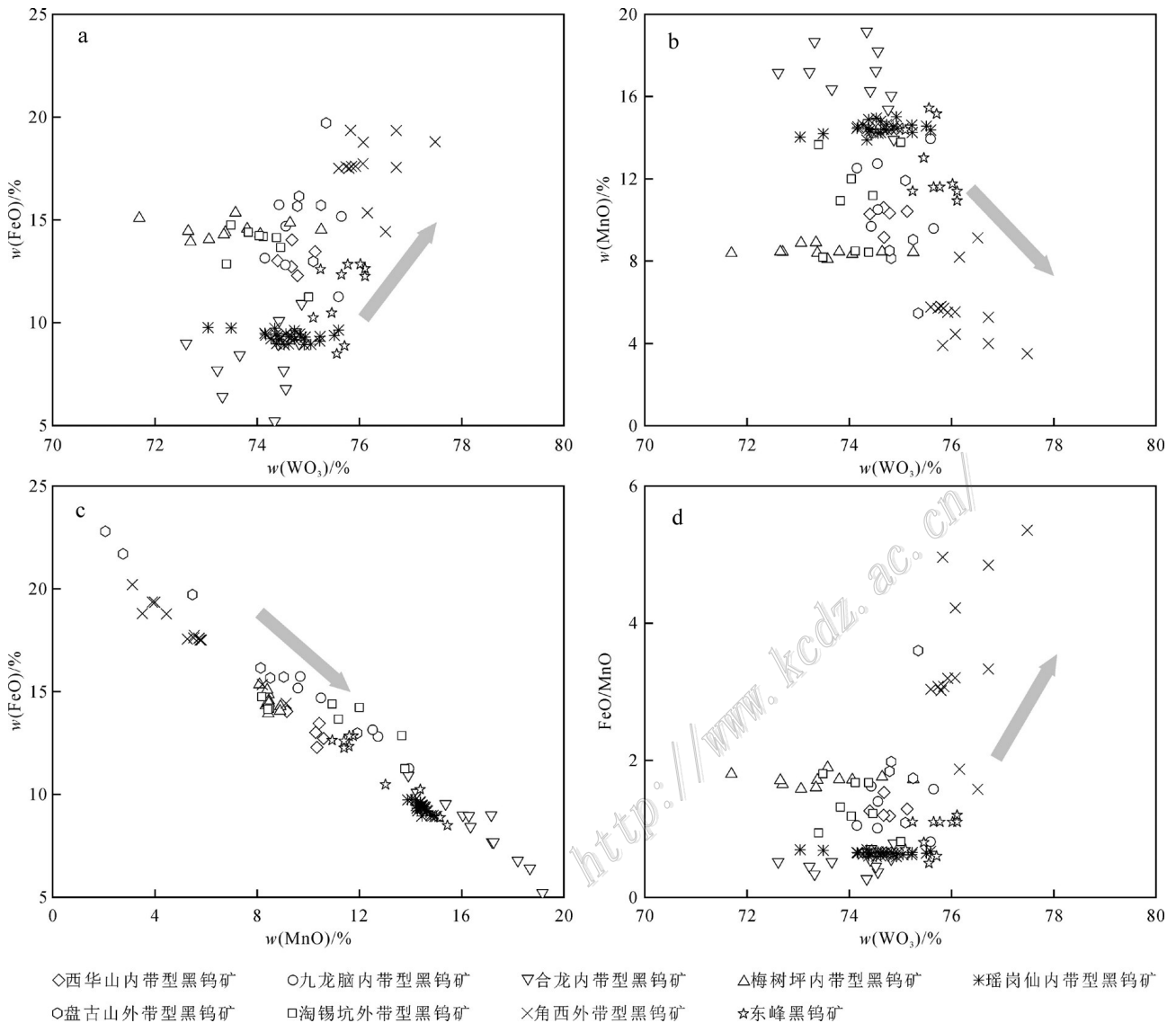


图 5 不同矿床黑钨矿 $w(\text{FeO})$ - $w(\text{WO}_3)$ (a)、 $w(\text{MnO})$ - $w(\text{WO}_3)$ (b)、 $w(\text{FeO})$ - $w(\text{MnO})$ (c) 和 FeO/MnO - $w(\text{WO}_3)$ (d) 相关性图解(西华山数据引自吴永乐等, 1987; 九龙脑数据引自王少轶等, 2017; 合龙数据引自尹政等, 2021; 梅树坪数据引自王浩洋等, 2017; 瑶岗仙数据引自 Deng et al., 2019; 盘古山数据引自方贵聪, 2014; 淘锡坑数据引自谢星等, 2017; 角西数据引自 Wang et al., 2023)

Fig. 5 Diagrams of $w(\text{FeO})$ versus $w(\text{WO}_3)$ (a), $w(\text{MnO})$ versus $w(\text{WO}_3)$ (b), $w(\text{FeO})$ versus $w(\text{MnO})$ (c) and FeO/MnO versus $w(\text{WO}_3)$ (d) of wolframite from different deposits (data are quoted from Wu et al., 1987; Wang S Z et al., 2017; Yin et al., 2021; Wang H Y et al., 2017; Deng et al., 2019; Fang, 2014; Xie et al., 2017; Wang et al., 2023, respectively)

表3 东峰矿段黑钨矿主量元素测试结果(w(B)/%)

Table 3 Major elements of wolframite in Dongfeng ore section (w(B)/%)

样号	脉体	标高/m	FeO	CaO	WO ₃	MgO	MoO ₃	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Rb ₂ O	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	总和
DF-7235-1		343	10.48	0.042	75.46	0.045	0.011	13.02	0.031	0.009	0	0	0.004	0.156	99.26
DF-7235-2			10.24	0.004	75.10	0.017	0	14.38	0	0.003	0	0.014	0	0.061	99.82
DF-7233-1		-12	8.87	0	75.71	0.027	0	15.16	0	0.014	0.033	0	0.063	0	99.87
DF-7233-2			12.63	0.02	76.11	0.013	0.002	10.93	0	0	0	0	0.042	0	99.75
DF-7234-1	I号脉带	-200	12.84	0.011	76.02	0	0.077	11.75	0.067	0.008	0	0.064	0	0	100.84
DF-7234-2			12.33	0.033	75.65	0.009	0	11.59	0.028	0.001	0.036	0.096	0.034	0	99.81
DF-7194-1		-238	12.83	0.014	75.77	0	0.02	11.60	0.053	0	0.037	0.05	0	0.011	100.38
DF-7194-2			12.26	0.013	76.11	0	0.03	11.40	0	0.02	0.027	0.05	0	0.011	99.92
DF-7197-1		-272	8.49	0	75.56	0	0	15.44	0	0.002	0.037	0.096	0.073	0	99.69
DF-7197-2			12.59	0.026	75.24	0	0.018	11.40	0.006	0	0	0	0	0	99.28

表4 东峰矿段黑钨矿微量元素测试结果(w(B)/10⁻⁶)Table 4 Trace elements of wolframite in Dongfeng ore section (w(B)/10⁻⁶)

组分	DF-7197-1	DF-7197-2	DF-7197-3	DF-7197-4	DF-7235-1	DF-7235-2	DF-7235-3
Li	0.34	0.03	0.13	0.17	0.02	0.05	0.04
Be	0.15	0.05	0.10	0.00	0.03	0.03	0.09
Sc	54.94	31.79	36.95	32.41	35.71	33.24	43.26
V	0.63	0.44	0.54	0.47	0.73	0.79	1.09
Cr	0.52	1.06	0.28	0.44	0.00	0.00	0.00
Co	1.00	0.93	0.93	0.90	0.89	0.71	0.82
Ni	0.10	0.03	0.09	0.10	0.04	0.00	0.00
Cu	2.79	0.00	0.00	0.00	0.01	0.10	0.07
Zn	138.95	183.65	172.66	161.98	121.56	117.56	110.90
Ga	2.23	2.29	2.36	2.20	2.45	2.64	2.89
Rb	0.27	0.05	0.04	0.03	0.00	0.00	0.04
Sr	30.66	9.11	0.18	0.10	0.23	0.20	0.07
Y	175.88	89.65	105.34	98.37	0.31	0.38	0.50
Zr	67.63	57.64	69.23	51.05	10.53	8.74	19.21
Nb	5595.69	2676.42	3666.09	2957.35	249.38	196.75	229.51
Cs	0.06	0.03	0.03	0.03	0.01	0.05	0.01
Ba	1.62	0.29	0.17	0.17	0.21	0.05	0.04
La	1.11	0.47	0.05	0.01	0.01	0.00	0.00
Ce	1.44	0.37	0.15	0.05	0.01	0.00	0.01
Pr	0.20	0.06	0.05	0.03	0.06	0.00	0.00
Nd	1.07	0.45	0.45	0.56	0.00	0.01	0.03
Sm	4.05	1.94	2.58	1.93	0.08	0.11	0.14
Eu	0.49	0.09	0.04	0.02	0.01	0.02	0.00
Gd	10.17	5.71	6.54	6.11	0.04	0.06	0.08
Tb	5.08	2.59	2.78	2.81	0.03	0.04	0.05
Dy	46.53	24.18	26.43	26.57	0.24	0.36	0.39
Ho	10.40	5.59	5.95	5.90	0.07	0.07	0.12
Er	42.26	20.74	23.57	23.49	0.33	0.42	0.56
Tm	10.34	5.35	5.81	5.99	0.11	0.14	0.21
Yb	103.60	54.97	62.59	62.21	1.47	1.74	2.83
Lu	17.03	9.21	10.77	10.39	0.26	0.34	0.49
Hf	8.90	10.93	15.47	9.64	0.74	0.56	1.42
Ta	1121.74	364.77	908.37	791.46	3.42	3.37	9.14
Pb	1.10	0.46	0.32	0.35	0.19	0.18	0.14
Bi	0.19	0.11	0.05	0.05	0.01	0.02	0.02
Th	0.72	0.29	0.44	0.52	0.32	0.23	0.30
U	33.84	7.40	11.49	11.06	0.37	0.76	1.96

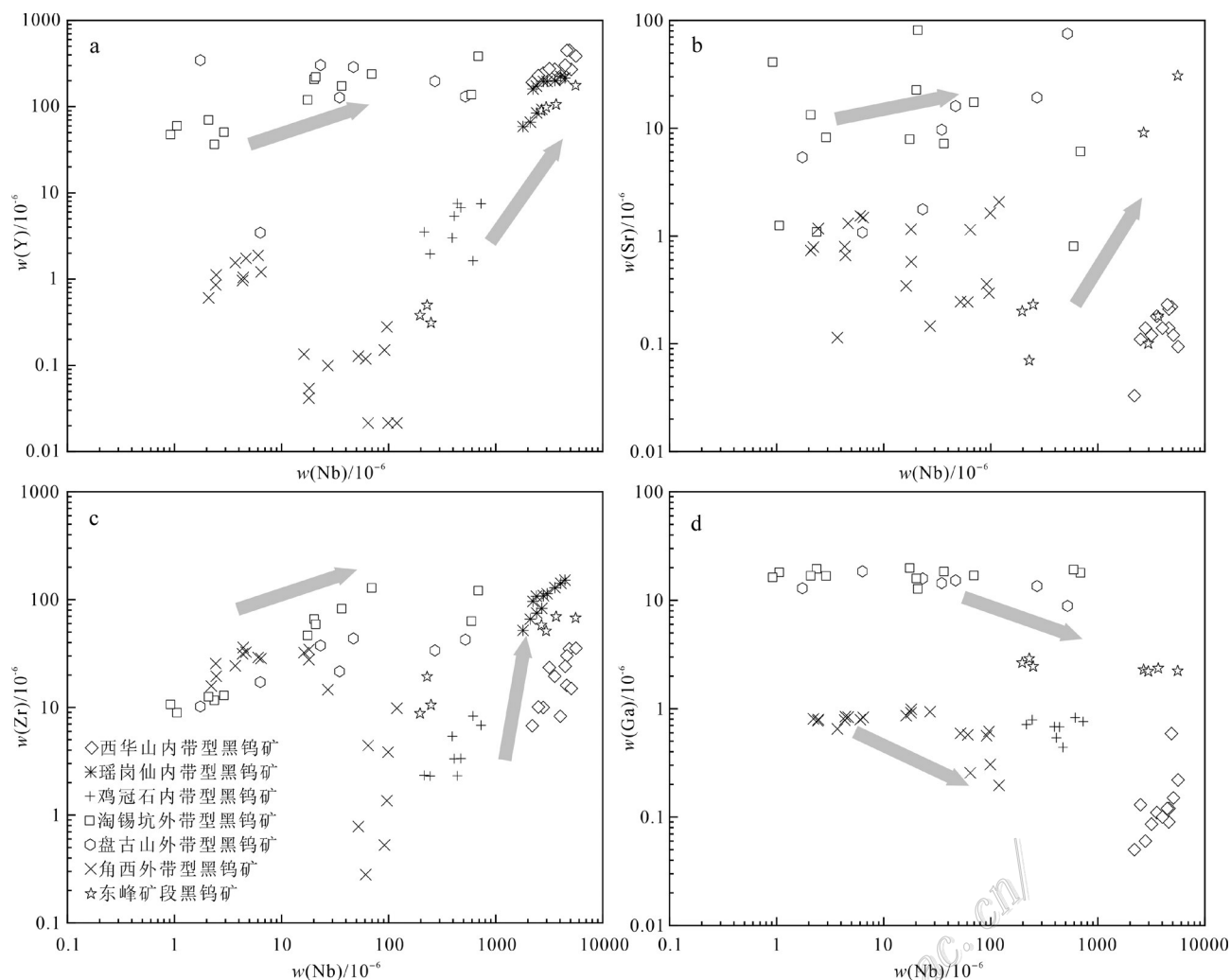


图 6 不同矿床黑钨矿 $w(\text{Y})$ (a)、 $w(\text{Sr})$ (b)、 $w(\text{Zr})$ (c) 和 $w(\text{Ga})$ (d) 随 $w(\text{Nb})$ 变化图解 (西华山数据引自 Yang et al., 2019; 瑶岗仙数据引自 Deng et al., 2019; 鸡冠石数据引自熊峥嵘等, 2021; 淘锡坑数据引自黑欢, 2017; 盘古山数据引自于萍, 2012; 角西数据引自 Wang et al., 2023)

Fig. 6 Diagrams showing the changes of $w(\text{Y})$ (a), $w(\text{Sr})$ (b), $w(\text{Zr})$ (c) and $w(\text{Ga})$ (d) along with $w(\text{Nb})$ of wolframite from different deposits (data are quoted from Yang et al., 2019; Deng et al., 2019; Xiong et al., 2021; Hei, 2017; Yu, 2012; Wang et al., 2023, respectively)

10^{-6} ~ 8.36×10^{-6} , HREE 为 2.53×10^{-6} ~ 245.40×10^{-6} , LREE/HREE 比值为 0.02~0.07, 整体表现为明显的负 Eu 异常, 黑钨矿球粒陨石标准化曲线表现为明显的重稀土元素富集, 轻稀土元素亏损的“左倾式”特点(图 7a)。其中, DF-7235 样品的黑钨矿稀土元素含量普遍较低(2.71×10^{-6} ~ 4.93×10^{-6}), 镜下观察可见其发育有绢云母、绿泥石等热液蚀变矿物(图 3c), 绢云母易于富集 LREE, 绿泥石则倾向于吸收 HREE(林德松等, 1991), 因此, 蚀变过程中热液流体可能交代黑钨矿并将其中的稀土元素带入新形成的矿物中。

4 讨论

4.1 黑钨矿地球化学对石英脉型钨矿勘查的指示

常温常压下, 黑钨矿由 FeWO_4 和 MnWO_4 两端员组分呈完全类质同象混合, 其中的 Fe、Mn 含量对成矿温度具有指示作用。部分学者认为, 高温条件下生成的黑钨矿 Fe 含量高, 随着温度降低, Fe 含量降低而 Mn 含量逐渐升高(李逸群等, 1991; 谢星等, 2017)。于萍(2012)指出浅层矿床中的黑钨矿成分呈两级分型, 而深成矿床中的黑钨矿成分表现为

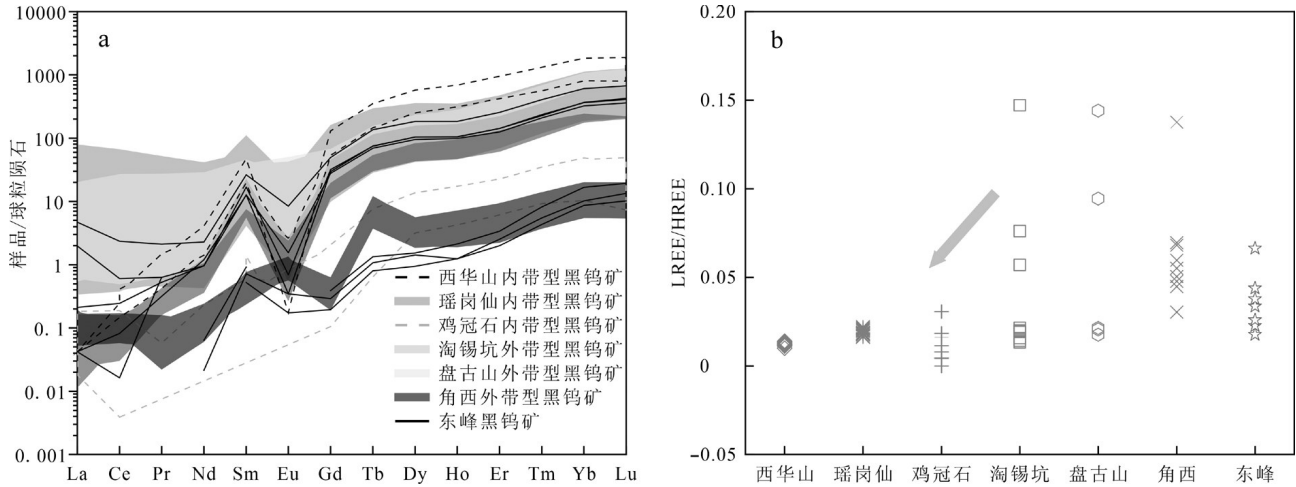


图7 黑钨矿稀土元素球粒陨石配分模式(a)和LREE/HREE(b)图解(数据来源与图6相同)

Fig. 7 Chondrite-standardized REEs distribution patterns (a) and LREE/HREE (b) diagrams of wolframite (data source is the same as in Fig.6)

中间聚集型。本文系统对比了内带型和外带型石英脉型黑钨矿中Fe、Mn成分,结果显示,内带型黑钨矿整体成分偏向钨锰矿端员,而外带型黑钨矿整体偏向钨铁矿端员,表明内带型黑钨矿成矿温度整体

低于外带型黑钨矿(图8)。东峰矿段黑钨矿成分与区域上九龙脑矿床、淘锡坑宝山矿段、盘古山矿床等彼此间呈连续变化关系,指示其可能整体为同一次构造-岩浆-成矿事件的产物。与此同时,石

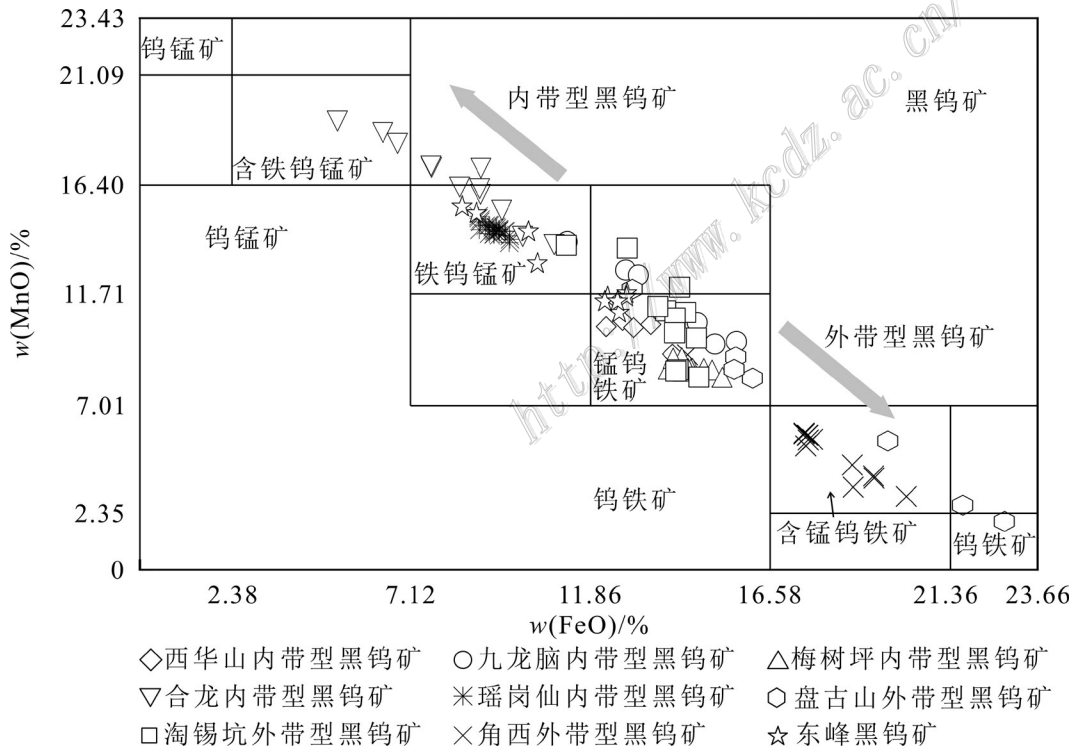


图8 黑钨矿 MnO、FeO 比值投点图(底图据李逸群等,1991;数据来源与图5相同)

Fig. 8 Ratio diagram of MnO versus FeO of wolframite (base map after Li et al., 1991; data source is the same as in Fig.5)

英脉内带型与外带型黑钨矿微量元素、稀土元素对比研究表明, 内带型黑钨矿整体具有比外带型黑钨矿更低的 Zr/Hf、Nb/Ta 和 LREE/HREE 比值(图 7b、图 9a、b), 内带型黑钨矿整体热液演化程度更高, 这与鲁麟等(2015)对不同类型黑钨矿稀土元素的研究结果一致。西华山等典型花岗岩内带型黑钨矿床与盘古山等外带型黑钨矿床成矿花岗岩结晶温度相近($\sim 730^{\circ}\text{C}$)(Zhao et al., 2022), 但内带型黑钨矿成矿温度总体低于外带型(图 8), 表明前者成矿热液经历了更充分的演化, 这与石英脉型钨矿床普遍存在

的矿物逆向分带特征相对应。如樟东坑-九龙脑石英脉型钨矿床(王少轶等, 2017)和合龙石英脉型钨矿床(尹政等, 2021), 成矿流体明显经历了多阶段热液脉冲及逆向分带的演化过程。淘锡坑宝山矿段(谢星等, 2017)与东峰矿段黑钨矿中 $x[\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mn})]$ (Fe、Mn 分别代表黑钨矿中 Fe 与 Mn 的 apfu 值, 即每个化学式单位中原子数量的比例) 比值由深至浅均呈现出“先增加后降低”的特征(图 10), 推测两者经历了多阶段的成矿热液演化过程, 表现为热液先下至上运移, 并可能经历了热液回流。另外, Nb、Ta

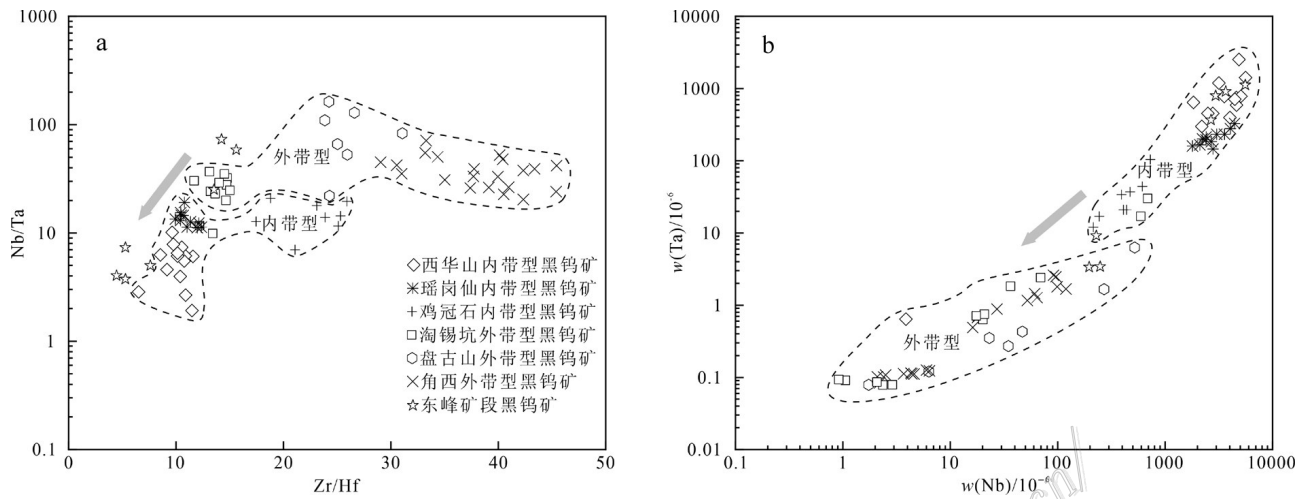


图 9 黑钨矿 Nb/Ta-Zr/Hf(a) 和 Ta-Nb(b) 图解(数据来源与图 6 相同)

Fig. 9 Nb/Ta vs Zr/Hf (a) and Ta vs Nb (b) diagrams of wolframite (data source is the same as in Fig.6)

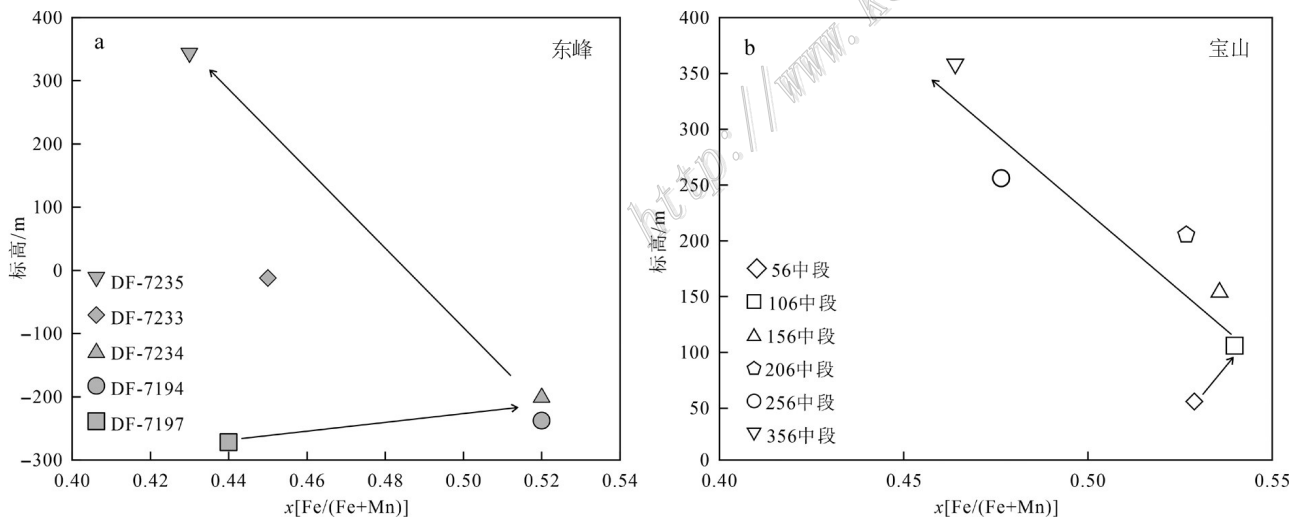


图 10 东峰矿段(a)与宝山矿段(b)黑钨矿 x 值与标高的关系(宝山数据引自谢星等, 2017)

Fig. 10 Relationship between the x -values of wolframite and elevation in the Dongfeng ore section (a) and the Baoshan ore section (b) (data of the Baoshan ore section are quoted from Xie et al., 2017)

等元素易呈类质同象形式进入黑钨矿晶格中,距离岩体愈近的黑钨矿,其Nb、Ta含量愈高(Xiong et al., 2017)。内带型黑钨矿的Nb、Ta含量明显高于外带型黑钨矿(图9b),这不仅体现在不同矿床的黑钨矿间,同一矿床也表现出相似的特征:东峰矿段由浅至深,黑钨矿的Nb、Ta含量迅速增加,表明其深部仍具有花岗岩体内脉带型黑钨矿的找矿潜力。

岩浆演化晚期,轻稀土元素优先进入含矿熔体,而重稀土元素则趋于在成矿流体中富集(Reed et al., 2000),故黑钨矿中稀土元素的含量变化,可以反映其成矿热液来源特征。东峰矿段与宝山矿段黑钨矿稀土元素配分模式曲线相似,整体都表现为重稀土元素富集,轻稀土元素亏损的“左倾式”特征和明显的负Eu异常(图7a),指示两者源于深部同一花岗质岩浆。两处黑钨矿中Y、Sr、Zr、Ga等元素随Nb含量的增加也同样呈现出增加或降低的特征(图6)。淘锡坑矿区含石英脉厚度、延长、延伸等特征与东峰I号矿带基本相似(表1),两者矿物组合和蚀变类型也大体相同。上述特征表明淘锡坑宝山矿段与东峰矿段黑钨矿为同一岩浆热液成矿系统的产物。

4.2 石英脉型钨矿的“台阶式”勘查模型

以往石英脉型黑钨矿找矿思路多为从地表出露的线脉带或细脉带往下追索薄脉带、大脉带和根脉带,即“五层楼”和“五层楼+地下室”等勘查模型(广东有色金属地质勘探公司九三二队, 1966;王登红等, 2010),由浅至深矿脉垂向分带依次为锡石+黑钨矿→黑钨矿+锡石+黄铜矿+黄铁矿→黑钨矿+白钨矿+锡石+方铅矿+闪锌矿→黑钨矿+黄铜矿+黄铁矿+辉钼矿→黑钨矿+白钨矿+黄铜矿(Zhao et al., 2021)。然而,对于矿区外围,找矿思路尚不明朗。东峰矿段DF-7197样品黑钨矿的Nb、Ta含量显著高于DF-7235样品的,前者采样位置位于后者北侧(图2a),结合矿区723号勘探线剖面图可知,DF-7235样品所处矿脉下方岩体揭露标高为-400 m(图2b),而DF-7197采自标高-272 m处,其较高的Nb、Ta含量表明已受下方岩体影响,因此隐伏岩体标高至少高于-272 m,故能大致推断隐伏岩体为由南向北侵位。徐敏林等(2006)指出淘锡坑北西矿段(宝山、棋洞、烂埂子)-枫林坑、西坑口-滴水寨两个地段隐伏岩体隆起顶面标高为+50 m~-160 m,整体呈现出由南向北侵位的特征;刘战庆等(2016)通过淘锡坑深部不同方位岩体与围岩接触面产状特征研究同样判断岩

浆侵位方向为由南东向北西。上述分析表明,东峰矿段至淘锡坑矿段深部岩体皆呈由南至北侵位特征,且由南至北岩突标高呈上升趋势:东峰矿段钻孔揭露的隐伏岩突标高-400 m左右,宝山矿段V11矿脉下部岩突标高为56 m。与此同时,崇余犹地区重力的解译资料显示其深部为大片“岩海”,宝山与东峰附近均显示出明显的重力负异常和磁性正异常(赵正等, 2017)。因此,两者为深部岩浆由南向北侵位形成的不同热中心,黑钨矿地球化学、矿物组合和蚀变特征等同样支持上述观点,两者分属同一隐伏花岗岩岩体的不同“台阶”。此外,两处矿段垂向上矿石矿物分带差别较大,淘锡坑北区四处矿段石英脉从上至下整体表现为锡石-黑钨矿带→黑钨矿-黄铜矿带→黑钨矿-辉钼矿带(图11),矿区深部还见有一些萤石-辉锑矿-方解石等低温矿物组合,表现为典型的“逆向分带”特征(赵一鸣等, 2004)。东峰矿段从上至下表现为黄铜矿-黄铁矿-黑钨矿带→黑钨矿-赤铁矿带→黑钨矿-白钨矿带,为“正向分带”特征(图11)。

综合赣南地区石英脉型钨矿地质特征(矿化分带、金属矿物组合)以及矿物化学参数等指标,建立了适用于矿床-矿田尺度的石英脉型钨矿的“台阶式”勘查模型(图11)。即以已知脉组为出发点,应用多种物化探方法,确定岩体侵位方向,沿已知岩突向相邻处下一“台阶”追索重力低异常、化探异常与断裂构造叠加区,有望探获外围新的钨矿化脉组。通过新发现脉组黑钨矿Zr、Hf、Nb、Ta等元素变化特征研究,有利于进一步确定深部找矿前景。以淘锡坑矿床为例,地球物理信息表明,淘锡坑矿床深部岩体由南向北侵位,其南侧东峰矿段地表构造发育,钨锡化探异常明显,东峰矿段与宝山矿段黑钨矿成矿受控于同一隐伏岩体,但分属同一岩体的不同“台阶”。更有意义的是,东峰ZK7197钻孔揭露的I号脉带真厚约5 m,是目前赣南地区发现的800 m以下规模最大的石英脉型黑钨矿,其深部找矿潜力巨大,黑钨矿地球化学同样证实了上述观点。最后,再以东峰矿段为出发点,运用上述流程判断其南东侧是否同样存在隐伏岩突(图11问号部分)等有利成矿中心,将是未来勘查工作的重点所在。

5 结论

(1) 淘锡坑矿区新发现的东峰脉组中黑钨矿矿

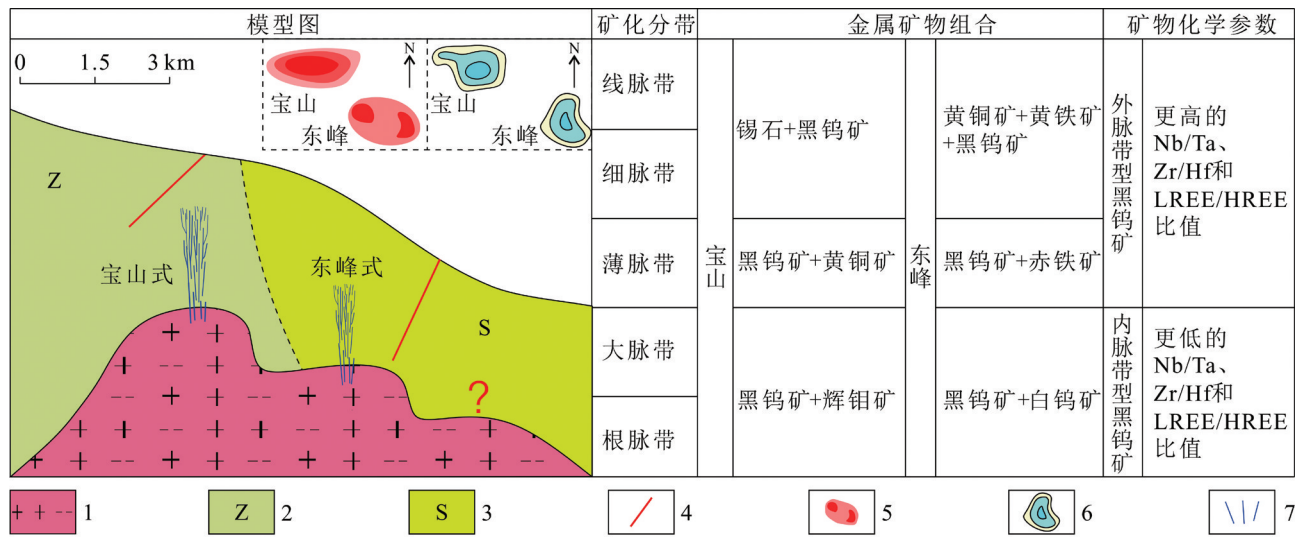


图 11 淘锡坑矿床“台阶式”勘查模型图

1—黑云母花岗岩; 2—震旦系; 3—志留系; 4—断层; 5—W、Sn 化探异常; 6—布格重力异常; 7—石英脉型黑钨矿

Fig. 11 The "stepped" exploration model of the Taoxikeng deposit

1—Biotite granite; 2—Sinian; 3—Silurian; 4—Fault; 5—Geochemical anomaly of tungsten and tin; 6—Bouguer gravity anomaly; 7—Quartz vein-type wolframite

物学、地球化学及蚀变特征等与宝山主矿段一致, 指示淘锡坑矿区多组段的石英脉型钨矿为同一岩浆热液成矿系统的产物, 进一步证明淘锡坑成矿花岗岩为南东向北西侵位。

(2) Zr/Hf、Nb/Ta 和 LREE/HREE 比值能有效指示石英脉型钨矿化结构特征, 内带型黑钨矿更低的 Zr/Hf、Nb/Ta 和 LREE/HREE 比值, 反映其热液演化程度更高, 一般具有更低的成矿温度。

(3) 综合赣南地区石英脉型钨矿地质特征, 建立了适用于石英脉型钨矿床-矿田尺度的“台阶式”勘查模型, 即应用各类物化探方法, 确立岩体侵位方向, 沿已知岩突向相邻处下一“台阶”追索重力低异常、化探异常与断裂构造叠加区, 有望探获外围新的钨矿化脉组。

References

Chen Z H, Wang D H, Qu W J, Chen Y C, Wang P A, Xu J X, Zhang J J and Xu M L. 2006. Geological characteristics and mineralization age of the Taoxikeng tungsten deposit in Chongyi County, southern Jiangxi Province, China[J]. Geological Bulletin of China, 25(4): 496-501(in Chinese with English abstract).
 Deng X D, Luo T, Li J W and Hu Z C. 2019. Direct dating of hydrothermal tungsten mineralization using in situ wolframite U-Pb chronology by laser ablation ICP-MS[J]. Chemical Geology, 515:

94-104.

Fang G C. 2014. The magmatism-hydrothermalism-mineralization study of Pangushan tungsten deposit in South Jiangxi Province[D]. Supervisor: Chen Y C. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences. 183p(in Chinese with English abstract).
 Fang G C, Wang D H, Feng Z H, Fu W, Kang Z Q, Wu J X, Zhao Y B, Tong Q Q and Yang M. 2021. The fan-like distribution of ore veins in the quartz-vein type tungsten deposits in South China and its prospecting significance[J]. Geotectonica et Metallogenia, 45 (3): 523-533(in Chinese with English abstract).
 Guo C L, Wang D H, Chen Y C, Wang Y B, Chen Z H and Liu S B. 2007. Precise zircon SHRIMP U-Pb and quartz vein Rb-Sr dating of Mesozoic Taoxikeng tungsten polymetallic deposit in southern Jiangxi[J]. Mineral Deposits, 26(4): 432-442(in Chinese with English abstract).
 Hei H. 2012. Geological characteristics and mineralization of Taoxikeng tungsten deposit in southern Jiangxi(dissertation for doctoral degree)[D]. Supervisor: Liang T. Xi'an: Chang'an University. 106p (in Chinese with English abstract).
 Li Y Q and Yan X Z. 1991. Mineralogy of tungsten deposits in Nanling and Neighbouring area, China[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press(in Chinese).
 Lin D S and Yang B. 1991. Study on the REE litho geochemistry of the Yinshan deposit at Dexing, Jiangxi Province[J]. Mineral Resources and Geology, 24(5): 349-356(in Chinese with English abstract).
 Liu Z Q, Liu S B, Liang T, Wang D H, Pei R F, Liang L J, Zhang S D, Liu X L, Peng Y X and Zhong X Y. 2016. Structural analysis of Jiulongnao orefield in Nanling area: A case study on Taoxikeng

- tungsten deposit[J]. *Earth Science Frontiers*, 23(4): 148-165(in Chinese with English abstract).
- No. 932 Team, Guangdong Nonferrous Metals Geological Exploration Company. 1966. How do we search, evaluate and explore quartz vein type tungsten deposits with the "five floors" rule[J]. *Geology and Exploration*, 2(5): 15-19(in Chinese).
- Qin J H, Wang D H, Li C, Chen Y C and Cai F C. 2020. The molybdenite Re-Os isotope chronology, in situ scheelite and wolframite trace elements and Sr isotope characteristics of the Chuankou tungsten ore field, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 126: 103756.
- Reed M J, Candela P A and Piccoli P M. 2000. The distribution of rare earth elements between monzogranitic melt and the aqueous volatile phase in experimental investigations at 800 degrees Celsius and 200 MPa[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 140(2): 251-262.
- Wang D H, Tang J X, Ying J J, Chen Z H, Hu J X, Zhang J J, Li S R and Ceng Z L. 2010. Application of "Five levels + basement" model for prospecting deposits into depth[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 40(4): 733-738(in Chinese with English abstract).
- Wang H Y, Zhao Z, Chen W, Zhou H, Chen Z Y, Hou K J and Li C. 2017. Geological characteristics, rock forming and ore-forming age and prospecting of Meishuping tungsten-molybdenum deposit in Jiangxi[J]. *Earth Science Frontiers*, 24(5): 109-119(in Chinese with English abstract).
- Wang S Y, Zhao Z, Fang G C, Ouyang X, Chen Z Y and Hou K J. 2017. Mineralogical and geochronological characteristics of the Zhang (Dongkeng) Jiu (Longnao) tungsten polymetallic deposit, southern Jiangxi Province, and its geological implications[J]. *Earth Science Frontiers*, 24(5): 120-130(in Chinese with English abstract).
- Wang Y, He C K, Tang J X, Huizenga J M, Wang L Q and Lang X H. 2023. Metal source and hydrothermal evolution of the Jiaoxi quartz vein-type tungsten deposit (Tibet): Insights from textural and compositional variations of wolframite and scheelite[J]. *American Mineralogist*, 108(7): 1258-1274.
- Wu Y L, Mei Y W, Liu P C, Cai C L and Lu T Y. 1987. *Geology of the Xihuashan tungsten ore field*[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese with English abstract).
- Xie X, Liang T, Lu L, Zhao Z, Chen Z H, Chen W and Ding M. 2017. Chemical composition and crystal texture of the Pangushan and Taoxikeng wolframite in southern Jiangxi and its indication significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(4): 876-895(in Chinese with English abstract).
- Xiong Y Q, Shao Y J, Zhou H D, Wu Q H, Liu J P, Wei H T, Zhao R C and Cao J Y. 2017. Ore-forming mechanism of quartz-vein-type W-Sn deposits of the Xitian district in SE China: Implications from the trace element analysis of wolframite and investigation of fluid inclusions[J]. *Ore Geology Reviews*, 83: 152-173.
- Xiong Z R, Li X N, Qi C and Xiong Y Q. 2021. Geochronology of cassiterite and trace element compositions of wolframite: Constraints to the ore genesis of Jiguanshi tungsten deposit, eastern Hunan Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(3): 769-780(in Chinese with English abstract).
- Xu J X, Zeng Z L, Wang D H, Chen Z H, Liu S B, Wang C H and Ying L J. 2008. A new type of tungsten deposit in southern Jiangxi and the new model of "Five Floors+basement" for prospecting[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(7): 880-887(in Chinese with English abstract).
- Xu M L, Feng W D, Zhang F T, Li J D and Luo X H. 2006. Metallogenic characteristics of Taoxikeng wolfram deposit, Chongyi[J]. *Resources Survey & Environment*, 27(2): 159-163(in Chinese with English abstract).
- Xu M L, Qi F Y, Zhao L and Zhong L. 2011. Study on ore-forming granite body of Taoxikeng large-scale tungsten deposit in Chongyi, Jiangxi Province[J]. *Resources Survey & Environment*, 32(2): 120-128(in Chinese with English abstract).
- Yang J H, Zhang Z, Peng J T, Liu L and Leng C B. 2019. Metal source and wolframite precipitation process at the Xihuashan tungsten deposit, South China: Insights from mineralogy, fluid inclusion and stable isotope[J]. *Ore Geology Reviews*, 102965.
- Yin Z, Zhao Z, Tao J L, Wu S H, Li H W, Gan J W, Chen W and Li X W. 2021. Deposit geology, geochronology and metallogenic model of Helong W deposit in southern Jiangxi Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(5): 1531-1552(in Chinese with English abstract).
- Yu P. 2012. The research on the mineralogical characteristics of tungsten deposit in Pangushan, JiangXi[D]. Supervisor: Liang T. Xi'an: Chang'an University. 183p(in Chinese with English abstract).
- Zhao P L, Chu X, Williams-Jones A E, Mao J W and Yuan S D. 2022. The role of phyllosilicate partial melting in segregating tungsten and tin deposits in W-Sn metallogenic provinces[J]. *Geology*, 50(1): 121-125.
- Zhao Y M and Wu L S. 2004. *Metallogeny of the major ore deposits in China*[M]. Beijing: Geological Publishing House. 13-62(in Chinese).
- Zhao Z, Wang D H, Chen Y C, Liu S B, Fang G C, Liang T, Guo N X, Wang S Y, Wang H Y, Liu Z Q, Zeng Z L, Ding M, Chen W and Zhou X P. 2017. "Jiulongnao metallogenic model" and the demonstration of deep prospecting: The extended application of "Five levels + Basement" exploration model[J]. *Earth Science Frontiers*, 24(5): 8-16(in Chinese with English abstract).
- Zhao Z, Liu C, Guo N X, Zhao W W, Wang P A and Chen Z H. 2018. Temporal and spatial relationships of granitic magmatism and W mineralization: Insights from the Xingguo orefield, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 95: 945-973.
- Zhao Z, Fu T Y, Gan J W, Liu C, Wang D H, Sheng J F, Li W B, Wang P A, Yu Z F and Chen Y C. 2021. A synthesis of mineralization style and regional distribution and a proposed new metallogenic model of Mesozoic W-dominated polymetallic deposits in South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 133: 104008.

附中文参考文献

- 陈郑辉, 王登红, 屈文俊, 陈毓川, 王平安, 许建祥, 张家菁, 许敏林. 2006. 赣南崇义地区淘锡坑钨矿的地质特征与成矿时代[J]. 地质通报, 25(4): 496-501.
- 方贵聪. 2014. 赣南盘古山钨矿床岩浆-热液-成矿作用研究[D]. 导师: 陈毓川. 北京: 中国地质科学院. 183页.
- 方贵聪, 王登红, 冯佐海, 付伟, 康志强, 吴家旭, 赵云彪, 童启荃, 杨明. 2021. 华南石英脉型钨矿床扇状成矿的规律及其找矿意义[J]. 大地构造与成矿学, 45(3): 523-533.
- 广东有色金属地质勘探公司九三二队. 1966. 我们是怎样用“五层楼”规律寻找、评价和勘探黑钨石英脉矿床的[J]. 地质与勘探, 2(5): 15-19.
- 郭春丽, 王登红, 陈毓川, 王彦斌, 陈郑辉, 刘善宝. 2007. 赣南中生代淘锡坑钨矿区花岗岩锆石 SHRIMP 年龄及石英脉 Rb-Sr 年龄测定[J]. 矿床地质, 26(4): 432-442.
- 黑欢. 2012. 赣南地区淘锡坑钨矿床地质特征及成矿作用研究(硕士论文)[D]. 导师: 梁婷. 西安: 长安大学. 106页.
- 李逸群, 颜晓钟. 1991. 中国南岭及邻区钨矿床矿物学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 林德松, 杨斌. 1991. 江西银山矿床岩石稀土地球化学研究[J]. 矿产与地质, 24(5): 349-356.
- 刘战庆, 刘善宝, 梁婷, 王登红, 裴荣富, 梁力杰, 张树德, 刘小林, 彭瑜勋, 钟先源. 2016. 南岭九龙脑矿田典型矿床构造解析: 以淘锡坑钨矿床为例[J]. 地学前缘, 23(4): 148-165.
- 王登红, 唐菊兴, 应立娟, 陈郑辉, 许建祥, 张家菁, 李水如, 曾载淋. 2010. “五层楼+地下室”找矿模型的适用性及其对深部找矿的意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 40(4): 733-738.
- 王浩洋, 赵正, 陈伟, 周辉, 陈振宇, 侯可军, 李超. 2017. 江西梅树坪钨钼矿床地质、成岩成矿时代与找矿方向[J]. 地学前缘, 24(5): 109-119.
- 王少轶, 赵正, 方贵聪, 欧阳翔, 陈振宇, 侯可军. 2017. 赣南樟(东坑)-九(龙脑)钨多金属矿床矿物学、年代学特征及其地质意义[J]. 地学前缘, 24(5): 120-130.
- 吴永乐, 梅勇文, 刘鹏程, 蔡常良, 卢同衍. 1987. 西华山钨矿地质[M]. 北京: 地质出版社.
- 谢星, 梁婷, 鲁麟, 赵正, 陈郑辉, 陈伟, 丁明. 2017. 赣南盘古山和淘锡坑黑钨矿化学成分和晶体结构及指示意义[J]. 地质学报, 91(4): 876-895.
- 熊峥嵘, 李信念, 祁程, 熊伊曲. 2021. 锡石年代学和黑钨矿微量元素对湘东鸡冠石钨矿床的成因约束[J]. 岩石学报, 37(3): 769-780.
- 徐敏林, 冯卫东, 张凤荣, 李江东, 罗仙华. 2006. 崇义淘锡坑钨矿成矿地质特征[J]. 资源调查与环境, 27(2): 159-163.
- 徐敏林, 漆富勇, 赵磊, 袁良. 2011. 江西崇义淘锡坑大型钨矿床成矿花岗岩体研究[J]. 资源调查与环境, 32(2): 120-128.
- 许建祥, 曾载淋, 王登红, 陈郑辉, 刘善宝, 王成辉, 应立娟. 2008. 赣南钨矿新类型及“五层楼+地下室”找矿模型[J]. 地质学报, 82(7): 880-887.
- 尹政, 赵正, 陶建利, 吴胜华, 李宏伟, 甘加伟, 陈伟, 李小伟. 2021. 赣南合龙钨矿床地质、成岩成矿时代与成矿模式[J]. 岩石学报, 37(5): 1531-1552.
- 于萍. 2012. 江西盘古山钨矿矿物学特征研究[D]. 导师: 梁婷. 西安: 长安大学. 83页.
- 赵一鸣, 吴良士. 2004. 中国主要金属矿床成矿规律[M]. 北京: 地质出版社. 123-163.
- 赵正, 王登红, 陈毓川, 刘善宝, 方贵聪, 梁婷, 郭娜欣, 王少轶, 王浩洋, 刘战庆, 曾载淋, 丁明, 陈伟, 周新鹏. 2017. “九龙脑成矿模式”及其深部找矿示范: “五层楼+地下室”勘查模型的拓展[J]. 地学前缘, 24(5): 8-16.