引用格式：蒋少涌，熊索菲，章伟，等，2026. 江南造山带东段赣北—皖南成矿带钨-锡成矿作用研究[J]. 地质力学学报，32（5）：1162−1191. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2026103

Citation: JIANG S Y，XIONG S F，ZHANG W，et al.，2026. Tungsten and tin mineralization in the northern Jiangxi–southern Anhui metallogenic belt, eastern Jiangnan Orogen, China[J]. Journal of Geomechanics，32（5）：1162−1191. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2026103

江南造山带东段赣北—皖南成矿带钨-锡成矿作用研究

蒋少涌[1,2,3]，熊索菲[1,2,3]，章　伟[1,2,3]，苏慧敏[1,2,3]，董加祥[2,3]，陈　威[4]，尹　近[4]，胡大龙[2,3]，彭宁俊[2,3]

JIANG Shaoyong[1,2,3]，XIONG Suofei[1,2,3]，ZHANG Wei[1,2,3]，SU Huimin[1,2,3]，DONG Jiaxiang[2,3]，CHEN Wei[4]，YIN Jin[4]，HU Dalong[2,3]，PENG Ningjun[2,3]

1. 中国地质大学地质过程与成矿预测全国重点实验室，湖北 武汉 430074；
2. 中国地质大学紧缺战略矿产资源协同创新中心，湖北 武汉 430074；
3. 中国地质大学资源学院，湖北 武汉 430074；
4. 湖北省地质局第四地质大队，湖北 咸宁 437000

1. *State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources*, *China University of Geosciences*, *Wuhan* 430074, *Hubei*, *China*;
2. *Collaborative Innovation Center for Strategic Critical Mineral Resources*, *China University of Geosciences*, *Wuhan* 430074, *Hubei*, *China*;
3. *School of Earth Resources*, *China University of Geosciences*, *Wuhan* 430074, *Hubei*, *China*;
4. *No.4 Geological Brigade*, *Hubei Geological Bureau*, *Xianning* 437000, *Hubei*, *China*

Tungsten and tin mineralization in the northern Jiangxi–southern Anhui metallogenic belt, eastern Jiangnan Orogen, China

Abstract: ［**Objective**］Tungsten and tin are strategic critical metals in China. The Northern Jiangxi–Southern Anhui metallogenic belt in the eastern Jiangnan Orogen is a newly recognized world-class tungsten-rich province. This study aims to supplement the traditional understanding that tungsten mineralization is solely controlled by S-type granites, clarify the differences in W-Sn mineralization related to S-, I-, and A-type granites, reveal geodynamic metallogenic mechanisms, establish regional metallogenic models, and support deep mineral exploration. ［**Methods**］Based on field geological investigations, petrographic observations, U–Pb dating of zircon and other hydrothermal minerals, molybdenite Re–Os geochronology, Sr–Nd–Hf isotopes, in-situ trace-element analysis of minerals, and fluid-inclusion data, typical deposits including Zhuxi, Dahutang, Xianglushan, Yangchuling, Dongyuan and Xiwukou were systematically compared. Metallogenic processes were analyzed under the classification of S-, I- and A-type granites, and the migration-enrichment of ore-forming materials was summarized. ［**Results**］(1) The total W resources in this belt exceed those in the Nanling metallogenic belt, with major Yanshanian metallogenic ages of 150–130 Ma. (2) S-type granites host the giant Zhuxi and Dahutang W-Cu polymetal deposits, characterized by strongly peraluminous, reduced magmas and skarn-superimposed mineralization. (3) I-type granites host medium-to-large W-Mo polymetal deposits, such as Xianglushan, Yangchuling, and Dongyuan, which formed under medium-to-high temperature conditions in weakly-peraluminous systems with porphyry-skarn mineralization; calcium for scheelite formation derives either from carbonate wall rocks or silicate-mineral (e.g, plagioclase) alteration within plutons. (4) The A-type-granite-related Xiwukou Sn-W-Rb deposit records highly

基金项目：国家自然科学基金项目（92562303）；湖北省科技厅战略科技人才项目（2024DJA031）；湖北省地质局科研项目（KJ2026-4）
This research was financially supported by the National Natural Science Foundation (Grant No. 92562303), the Huibei Provincial Department of Science and Technology Fund (Grant No. 2024DJA031), and the Scientific Research Project of the Hubei Geological Bureau (Grant No. KJ2026-4).

第一作者及通信作者：蒋少涌（1964—），男，教授，从事战略性矿产资源成矿理论与找矿勘查研究工作。Email：shyjiang@cug.edu.cn

收稿日期：2026−06−25；**修回日期**：2026−09−06；**录用日期**：2026−09−21；**网络出版日期**：2026−09−24；**责任编辑**：范二平
Received：2026−06−25；Revised：2026−09−06；Accepted：2026−09−21；Available Online：2026−09−24；Handling Editor：FAN Erping

fractionated, F-rich magmatism with the enrichment of Sn, Rb, and other rare metals. (5) A three-stage enrichment model is established: basement pre-enrichment, Mesozoic crust-mantle interaction, and magmatic fluid exsolution and unloading. Regional mineralization is likely driven by Paleo-Pacific slab rollback and lithospheric extension. (6) Four categories of deep prospecting targets, e.g. fault intersections and concealed pluton domes, are proposed. [**Conclusions**] The W-Sn mineralization in the Jiangnan Orogen is not restricted to S-type granites; S-, I- and A-type granites constitute differentiated metallogenic systems. The W-Sn-enriched meta-sedimentary rock basement of the Shuangqiaoshan Group provides primary ore-forming materials, while crust-mantle interaction supplies heat and partial components; magma differentiation and fluid evolution dominate metal precipitation. [**Significance**] This work improves the regional understanding of W-Sn metallogenesis and provides theoretical support for the deep exploration of strategic critical minerals, not only in Northern Jiangxi-Southern Anhui provinces but also in other areas with similar geological conditions.

Keywords: tungsten-tin mineralization; I-, S-, and A-type granites; basement pre-enrichment; Mesozoic crust–mantle interaction; magmatic fluid exsolution and unloading; Northern Jiangxi–Southern Anhui metallogenic belt; Jiangnan Orogen

摘　要：江南造山带东段赣北—皖南成矿带是近些年新厘定的世界级钨（W）富集区。为突破传统S型花岗岩单一控矿的认识，厘清区内S型、I型、A型花岗岩对应的钨-锡（W-Sn）成矿差异，揭示成矿动力学机制，建立区域成矿模式并服务深部勘查，文章综合运用野外地质调查、岩矿相学观察、锆石/热液矿物U-Pb测年、辉钼矿Re-Os年代学、Sr-Nd-Hf同位素分析、矿物原位微区微量元素测定以及流体包裹体分析等，系统对比朱溪、大湖塘、香炉山、阳储岭、东源、西坞口等典型矿床的地质-岩浆-热液特征，按照S型、I型、A型花岗岩分类剖析成矿作用，归纳成矿物质迁移富集过程。研究结果表明：该成矿带W资源总量已超南岭成矿带，主成矿时代集中于燕山期150～130 Ma；S型花岗岩控制朱溪和大湖塘超大型钨-铜（W-Cu）多金属矿床，为强过铝、还原岩浆体系，以矽卡岩及复合叠加矿化为特征；I型花岗岩产出香炉山、阳储岭、东源等大—中型钨-钼（W-Mo）多金属矿床，属于中—高温弱过铝质岩浆，发育斑岩-矽卡岩矿化，白钨矿钙质既可来自碳酸盐围岩，也可来自岩体中斜长石等硅酸盐矿物蚀变；A型花岗岩以西坞口锡-钨-铷（Sn-W-Rb）矿床为代表，高分异富氟，富集锡、铷等稀有金属；该成矿带遵循“基底预富集—中生代壳幔作用—岩浆流体卸载”成矿三阶段富集模式，深部动力源自古太平洋板块俯冲后撤与岩石圈伸展；该成矿带可划定出断裂交汇、隐伏岩体穹窿等4类深部找矿靶区。江南造山带钨-锡成矿并不局限于S型花岗岩，S-I-A型花岗岩可形成差异化成矿体系；双桥山群富钨、锡变质基底提供物质基础，壳幔相互作用提供热源与部分物质贡献，岩浆分异-流体演化控制金属沉淀。此研究成果完善了区域钨-锡成矿理论，可为赣北—皖南地区及其他相似地区关键矿产深部勘查提供理论依据。

关键词：钨-锡成矿；I-S-A型花岗岩；基底预富集；中生代壳幔作用；岩浆流体卸载；赣北—皖南成矿带；江南造山带

中图分类号：P313; P542　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006-6616(2026)05-1162-30

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2026103

0　引言

钨、锡(W、Sn)作为2类重要矿产，已被美国、欧盟等主要经济体列入关键矿产清单，其供应链安全已上升至国家层面(翟明国等，2019；蒋少涌等，2020)。中国W、Sn资源丰富，储量和产量长期居世界首位(陈郑辉等，2015；盛继福等，2015)。位于华南地区的南岭W-Sn成矿带资源丰富、勘查开发历史悠久，而华南地区的赣北—皖南成矿带位于江南造山带东段，是近些年来新厘定的重要W成矿带。与南岭成矿带黑钨矿与白钨矿并举不同，该成矿带W矿以白钨矿为主(华仁民等，2010；Su and Jiang, 2017；蒋少涌等，2020；Ni et al., 2023)。

江南造山带是华南大陆内部最重要的前寒武纪构造单元之一，通常指分布于扬子地块东南缘与华夏地块西北缘之间的一条中—新元古代碰撞拼贴带(王孝磊等，2017；Shu et al., 2019)，岩性主要包括中—新元古代浅变质火山-沉积岩系、新元古代花岗质岩浆岩、少量镁铁质—超镁铁质岩石以及局部保存的蛇绿岩、弧火山岩和高压变质岩等。在边界

划分上，江南造山带北西侧与扬子地块的界线相对清楚，大致沿前寒武纪地层出露区的柳州—凯里—张家界—九江—祁门—黄山一线展布，而其南东侧边界在东段通常以江山−绍兴断裂带作为扬子地块与华夏地块的重要分界（王孝磊等, 2017; Shu et al., 2019）。

江南造山带东段赣北—皖南成矿带发育有多个大型—超大型 W 多金属矿床，其储量甚至超过了南岭 W-Sn 成矿带近百年累计探获的总和（胡正华等, 2020）。随着朱溪超大型 W-Cu 矿床和大湖塘超大型 W-Cu-Mo-Sn 矿床的发现，江南造山带已成为全球顶级的 W 多金属成矿带之一，探明 W 资源量巨大（毛景文等, 2020）。该成矿带的成矿元素组合多样，包括 W-Cu、W-Mo 以及 W-Cu-Mo-Sn 等，此外还有 Sn-Pb-Zn 和 Sn-W-Rb 等组合，这与南岭 W-Sn 成矿带以独立 W 矿或 W-Sn 共生为特征有所区别。

1 江南造山带 W-Sn 多金属矿床类型

根据矿床的成因类型、元素组合、产状及赋矿围岩类型等特征，文章将江南造山带的 W-Sn 多金属矿床归为以下 3 类：①斑岩型，以阳储岭和东源大型 W-Mo 矿床为代表；②矽卡岩型，以香炉山、竹溪岭、逍遥和高家塝等大型—超大型 W 多金属矿床以及曾家垄 Sn 多金属矿床为代表；③石英脉型，以东坪超大型 W 矿床为代表。值得注意的是，该成矿带部分矿床地质特征复杂，显示出复合−叠加型特征。如大湖塘超大型 W-Cu-Mo-Sn 矿床以斑岩型（细脉浸染状）钨矿化为主体，还可见石英脉型、蚀变花岗岩型及云英岩型等矿化特征（蒋少涌等, 2015; 胡大龙, 2023; 王先广等, 2023）；而西坞口 Sn-W-Rb 矿床早期形成蚀变花岗岩型 Sn-Rb 矿体，晚期形成石英脉型 Sn-W 矿体（Wu et al., 2026）。此外，江南造山带中以 Sn 为主的矿床发育相对较少，位于江南造山带和长江中下游成矿带交接部位的彭山 Sn-Pb-Zn 多金属矿集区的曾家垄 Sn 多金属矿床是该区唯一的大型 Sn 矿（卢树东等, 2004; Xu et al., 2017）。

江南造山带中 W-Sn 成矿作用与花岗岩息息相关。依据经典岩浆岩成因分类方案（Chappell and White, 1974; Pitcher, 1997），结合江南钨矿带成矿花岗岩的岩石地球化学特征，该造山带与 W-Sn 成矿作用相关的花岗岩主要为 I 型、S 型及 A 型（图 1）。其中，与 I 型花岗岩有关的矿床主要为 W-Mo 矿床，如阳储岭和东源大型 W-Mo 矿床（Mao et al., 2017; Dong et al., 2025a）。与 S 型花岗岩有关的 W-Sn 矿床规模较大，如朱溪超大型 W-Cu 矿床（陈国华等, 2015）、大湖塘超大型 W-Cu-Mo-Sn 矿床（Huang and Jiang, 2014; 蒋少涌等, 2015）。东坪石英脉型黑钨矿床中与成矿相关的黑云母花岗岩也属于该类型的花岗岩（胡正华等, 2018）。此外，曾家垄 Sn-Pb-Zn 矿床和茅棚店 Sn 矿床被一些学者认为与 S 型花岗岩有关（Meng et al., 2022; 孙克克和陈伟, 2025）。A 型花岗岩分异程度最高，岩浆经历了极高程度的分离结晶作用形成，如西坞口 Sn-W-Rb 稀有金属矿床（陈雪锋等, 2018, 2019, 2022; Wu et al., 2026）。

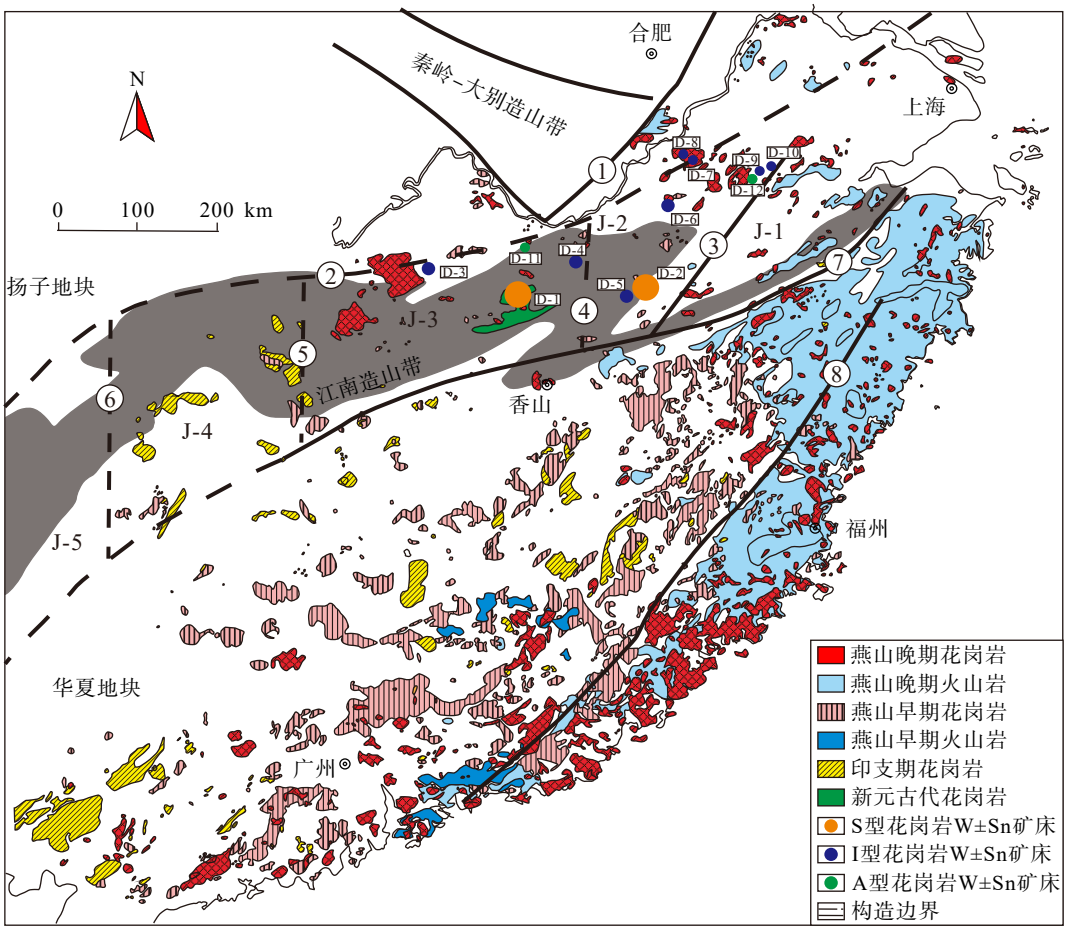
2 与 S 型花岗岩相关的 W-Sn 多金属矿床

2.1 朱溪超大型 W-Cu 矿床

朱溪 W-Cu 矿床是江南 W 矿带东段 S 型花岗岩相关 W 成矿系统的典型实例。该矿床不仅具有世界级资源规模，而且较完整地保存了深部富 W 花岗质岩浆系统、碳酸盐围岩反应和多阶段白钨矿沉淀之间的成因联系，为认识江南造山带东段晚侏罗世 W 成矿作用提供了重要约束。

朱溪矿床已达超大型规模（Chen et al., 2016; Pan et al., 2017, 2018, 2020）。矿体主要受隐伏岩体、碳酸盐岩层位、层间滑脱带和北东向构造共同控制。朱溪矿区蚀变类型完整，记录了从进矽卡岩到晚期脉体叠加的热液演化序列。早期主要为石榴石−辉石矽卡岩化，形成钙质矽卡岩和镁质矽卡岩；随后发育退矽卡岩阶段的角闪石、绿帘石、绿泥石、萤石、石英、白钨矿和硫化物组合；岩体顶部和局部裂隙中还可见云英岩化、白云母化、钠长石化、硅化。白钨矿是主要钨矿物，主要产于退矽卡岩和岩体相关蚀变带，局部见于进矽卡岩和晚期石英脉等部位；黑钨矿仅在局部深部云母石英脉或裂隙中出现（Sun et al., 2019; Yuan et al., 2019; Pan et al., 2020; Zhao et al., 2026）。

朱溪矿区晚侏罗世岩浆−热液活动具有较集中的时间范围。矿区煌斑岩锆石 U-Pb 年龄为 158 Ma（Zhang et al., 2020a），花岗闪长斑岩锆石 U-Pb 年龄为 156～153 Ma（Ouyang et al., 2025），黑云母花岗岩、白云母花岗岩和花岗斑岩锆石 U-Pb 年龄为 154～148 Ma，热液榍石、石榴石、白钨矿、黑钨矿和辉钼矿年龄与之基本一致（Pan et al., 2017, 2018;



D-1—大湖塘钨矿床；D-2—朱溪钨矿床；D-3—香炉山钨矿床；D-4—阳储岭钨矿床；D-5—塔前钨矿床；D-6—东源钨矿床；D-7—百丈岩钨矿床；D-8, 高家塝钨矿床；D-9—大邬尖钨矿床；D-10—竹溪岭钨矿床；D-11—彭山锡矿床；D-12—西坞口 W-Sn-Rb 矿床；J-1—怀玉地体；J-2—郭公地体；J-3—九岭地体；J-4—湘北地体；J-5—桂北地体；①—郴城-庐江断裂带；②—石台-九江-吉首断裂带；③—樟树墩-德兴-歙县断裂带；④—赣江隐伏断裂；⑤—汨罗-湘潭隐伏断裂；⑥—城步-永福断裂；⑦—绍兴-萍乡-祁东-全州-龙胜-永福缝合带；⑧—政和-大埔断裂带

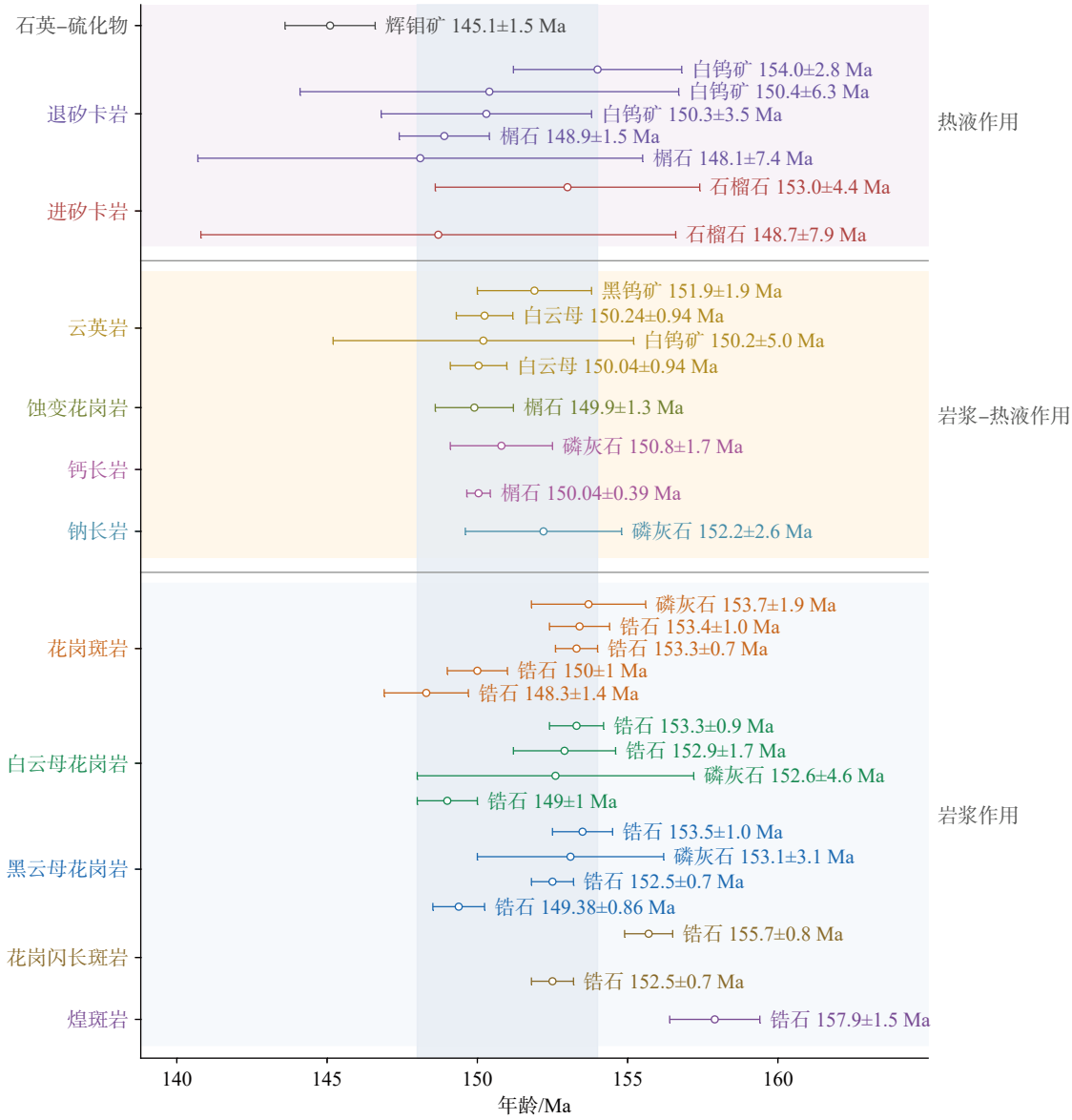
图 1　江南造山带岩浆岩及钨-锡矿床分布图（据 Su and Jiang, 2017；Shu et al., 2019 修改）

Fig. 1　Distribution of magmatic rocks and related tungsten and tin deposits in the Jiangnan Orogen (modified after Su and Jiang, 2017; Shu et al., 2019)

D-1–Dahutang W deposit; D-2–Zhuxi W deposit; D-3–Xianglushan W deposit; D-4–Yangchuling W deposit; D-5–Taqian W deposit; D-6–Dongyuan W deposit; D-7–Baizhangyan W deposit; D-8–Gaojiabang W deposit; D-9–Dawujian W deposit; D-10–Zhuxiling W deposit; D-11–Pengshan Sn deposit; D-12–Xiwukou W-Sn-Rb deposit; J-1–Huaiyu terrane; J-2–Zhanggong terrane; J-3–Jiuling terrane; J-4–Northern Hunan terrane; J-5–Northern Guangxi terrane; ①–Tancheng–Lujiang fault zone; ②–Shitai–Jiujiang–Jishou fault zone; ③–Zhangshudun–Dexing–Shexian fault zone; ④–Ganjiang buried fault; ⑤–Miluo–Xiangtan buried fault; ⑥–Chengbu–Yongfu fault; ⑦–Shaoxing–Pingxiang–Qidong–Quanzhou–Longsheng–Yongfu suture zone; ⑧–Zhenghe–Dapu fault zone

Song et al., 2018b, 2019; Hong et al., 2022; Zhao et al., 2023, 2026; 图 2）。这种年龄关系表明，朱溪主期 W 矿化与矿区主体花岗质岩浆侵位在时间上高度一致，主期成岩-成矿作用发生于约 154～148 Ma。此时，华南构造体制处于由挤压向伸展转换的阶段，晚侏罗世发生了岩石圈伸展、软流圈上涌及幔源基性岩浆注入（Song et al., 2018b, 2022, 2023b; Zhang et al., 2020a）；早期构造挤压和北东向构造活化为岩浆及流体运移提供了通道，而随后的应力松弛、伸展转换和深部热输入则更有利于幔源岩浆上侵、富 W 地壳源区部分熔融、高分异花岗质岩浆形成及成矿流体出溶。

同位素组成研究显示，朱溪矿区不同岩浆岩存在可区分的源区差异（图 3）。较早出现的煌斑岩具有相对较低且集中的初始 $^{87}Sr/^{86}Sr$（0.7091～0.7092）和相对较高的 $\varepsilon_{Nd}(t)$（−6.48～−6.07），Nd 二阶段模式年龄为 1.47～1.44 Ga（Song et al., 2023b）。这一特征



年龄数据为各文献报道的加权平均年龄、等时线年龄或谐和年龄结果；年龄数据来源于 Pan et al.（2017, 2018）、Song et al.（2018b, 2019, 2021, 2023b）、Zhang et al.（2020a, 2020b, 2021b）、Hong et al.（2022）、Qiu et al.（2024）、Ouyang et al.（2025）、Yang et al.（2025b）和 Zhao et al.（2023, 2026）；图中蓝灰色垂直背景区域代表该区成岩成矿年龄主要区间

图 2 朱溪矿区岩浆岩中锆石和磷灰石及与成矿有关热液矿物年龄总汇

Fig. 2 Compilation of published ages for zircon and apatite from magmatic rocks and ore-related hydrothermal minerals from the Zhuxi ore district

Ages are weighted mean, isochron, or concordia ages reported by Pan et al. (2017, 2018), Song et al. (2018b, 2019, 2021, 2023b), Zhang et al. (2020a, 2020b, 2021b), Hong et al. (2022), Qiu et al. (2024), Ouyang et al. (2025), Yang et al. (2025b), and Zhao et al. (2023, 2026); The grayish-blue shaded vertical bands indicate the main age intervals of diagenesis and mineralization in the study area.

区别于成矿主体花岗岩，说明煌斑岩更可能代表深部热输入或有限组分参与成矿。花岗闪长斑岩锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 变化范围较宽（−9.9～+1.3），对应 Hf 地壳模式年龄约为 1.84～1.12 Ga（Ouyang et al., 2025），可能记录了浅部 Cu 矿化相关岩浆活动中复杂的壳幔混合信息。朱溪矿区主成矿阶段的黑云母花岗岩、白云母花岗岩和花岗斑岩整体表现出一致的同位素富集特征。3 类花岗岩的初始 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 总体为 0.706879～0.717191，$\varepsilon_{Nd}(t)$ 为−11.97～−7.26；锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 集中在−13.65～−6.20（Pan et al., 2018; Song et al., 2018b; Zhang et al., 2020b）。Nd 二阶段模式年龄主要为 1.92～1.54 Ga；锆石 Hf 地壳模式年龄集中于 2.0～1.5 Ga，指示这些花岗岩主

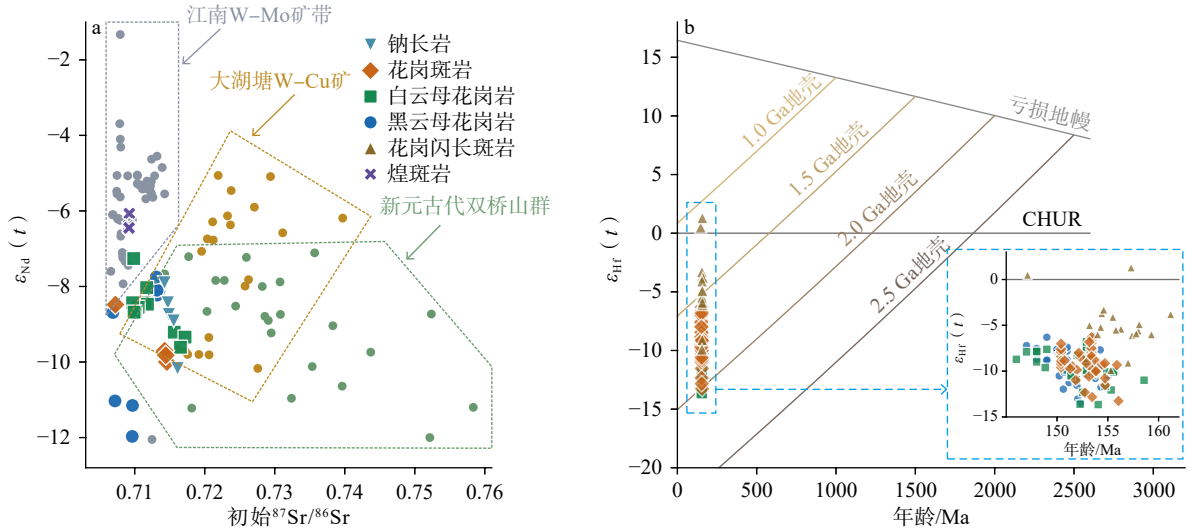


图 a 中的虚线区域分别为江南 W-Mo 矿带、大湖塘 W-Cu 矿带和新元古代双桥山群岩石的数据（Song et al. 2018b）；图 b 中 Hf 地壳演化线（1.0 Ga、1.5 Ga、2.0 Ga、2.5 Ga）据 Vervoort et al.（1999）计算；CHUR—球粒陨石均一储库（Chondritic Uniform Reservoir）；朱溪矿区 Sr-Nd-Hf 同位素数据来源于 Pan et al.（2018）、Song et al.（2018b, 2021, 2023b）、Zhang et al.（2020b）和 Ouyang et al.（2025）

a—朱溪矿区岩浆岩 Sr-Nd 同位素图解；b—朱溪矿区岩浆岩锆石 Hf 同位素图解

图 3　朱溪矿区岩浆岩 Sr-Nd-Hf 同位素组成

Fig. 3　Sr–Nd–Hf isotopic compositions of magmatic rocks from the Zhuxi ore district

(a) Sr–Nd isotope diagram of magmatic rocks in the Zhuxi ore district; (b) Hf isotope diagram of zircon from magmatic rocks in the Zhuxi ore district

The three regions with dashed outlines in panel a are data for Jiangnan W–Mo and Dahutang W–Cu magmatic rocks and Neoproterozoic strata (after Song et al. 2018b and references therein); The Hf crustal evolution lines (e.g., 1.0 Ga, 1.5 Ga, 2.0 Ga, and 2.5 Ga) in panel b are calculated after Vervoort et al. (1999), the Zhuxi Sr–Nd–Hf isotopic composition data are sourced from Pan et al. (2018), Song et al. (2018b, 2021, 2023b), Zhang et al. (2020b), and Ouyang et al. (2025).

要来源于古老变沉积地壳物质的部分熔融，双桥山群等新元古代变沉积岩是合理的候选源区。

朱溪矿区花岗岩锆石微量元素显示其具有较低 Eu 异常和较低氧逸度，表明成矿岩浆总体处于相对还原状态（Zhang et al., 2020b）。朱溪矿区花岗岩成矿性突出表现为高分异、还原性和残余熔体中挥发分及成矿元素的持续富集。花岗岩磷灰石通常富稀土元素（REE），而热液磷灰石 REE 含量降低、Y/Ho 升高，Eu 负异常明显向弱负异常或 Eu 正异常转变，并普遍表现出富 F、贫 Cl 特征（Zhang et al., 2021b; Zhang et al., 2023）。这些变化说明，随岩浆持续分异和挥发分富集，残余熔体逐步向富 F、H_2O 和 W 的岩浆-热液体系演化。Song et al.（2018a, 2021）报道的含白钨矿钙长岩和钠长岩为这一过程提供了特殊岩石学约束：钙长岩中富钙斜长石、磷灰石、榍石和白钨矿共生，钠长岩中钠长石可占 80%～97%，并伴生白钨矿、磷灰石和萤石。这些岩石的矿物组合和地球化学特征指示，朱溪矿区深部岩浆-热液系统中曾存在富 F、富 H_2O、富 W 的残余熔体-流体作用。

朱溪矿区 W-Cu 成矿作用可从岩浆热液流体的连续演化来认识。已有流体包裹体、H-O-S-Pb 同位素和多种热液矿物原位地球化学资料表明，主成矿过程大致经历了岩浆晚期流体出溶、进矽卡岩变质作用、退矽卡岩白钨矿沉淀和晚期石英-硫化物叠加 4 个阶段。富 F、富 W 的岩浆热液流体由深部高分异花岗质岩浆释放后，在碳酸盐围岩中发生持续反应、冷却、减压和局部混合，最终导致大规模白钨矿沉淀及晚期铜多金属矿化叠加（Song et al., 2018a, 2021; Yang et al., 2025a）。

围岩性质明显控制矽卡岩矿物组合：灰岩相关矽卡岩中更易形成富 Fe 的钙铁榴石-钙铁辉石组合，白云质灰岩相关矽卡岩中则发育富 Mg 的透辉石及相关镁质矿物组合（He et al., 2022; Song et al., 2024）。石榴子石以钙铝榴石-钙铁榴石固溶体为主，其 REE 和 Eu 异常变化反映了流体组成、pH 值、氧

逸度及Ca-Fe-Mg供给条件的变化(Hong et al., 2022)。W沉淀发生于退矽卡岩阶段。随着体系冷却、减压和流体−围岩反应增强，早期无水矽卡岩矿物被透闪石、阳起石、绿泥石、绿帘石等含水矿物交代，白钨矿大量形成。冷却、减压沸腾和局部流体混合共同参与了W卸载(He et al., 2022)。矽卡岩白钨矿Mo含量变化大，且REE含量和Y/Ho比值随产状变化明显，反映氧逸度、Mo供给、磷灰石等富REE矿物结晶、石榴子石溶解及碳酸盐围岩反应的共同影响(Sun et al., 2019; Yuan et al., 2019; Zhao et al., 2023; Yang et al., 2025b)。晚期石英−硫化物脉白钨矿Mo含量总体降低、Eu正异常增强，反映低温、流体开放、硫化物沉淀及局部还原增强的综合影响。

榍石、磷灰石和流体包裹体特征为退矽卡岩阶段的流体化学变化提供了独立约束。热液磷灰石REE含量降低、Y/Ho升高，Eu负异常减弱并局部转为正异常，并普遍富F、贫Cl，说明岩浆热液向低温、富F热液体系演化过程中，磷灰石结晶和流体分馏会显著改变REE及F的分配(Zhang et al., 2021b; Zhang et al., 2023)。榍石则记录了局部氧逸度波动；与Cu矿化有关的热液榍石具有较高Al、F含量和Eu正异常，并与磁黄铁矿、自然铋等还原环境矿物共生，指示含炭质碳酸盐围岩的加入可降低局部氧逸度(Song et al., 2019)。He et al.(2022)在包裹体中识别出的CH_4、N_2和HS^-等组分，也支持流体与还原性围岩发生过反应。

晚期石英−硫化物阶段反映成矿系统进一步冷却和开放。该阶段流体包裹体均一温度约为127～251℃，盐度约为1.6%～7.6 %。石英−硫化物阶段水的氧同位素($\delta^{18}O_{H_2O}$)含量下降为2.68‰～5.08‰，指示大气降水加入(Pan et al., 2020; He et al., 2022)。这一阶段流体冷却、稀释、外来水加入和硫化物沉淀，促使残余W及Cu-Pb-Zn等金属进一步卸载。硫化物$\delta^{34}S$接近0的特征说明硫主要与岩浆热液体系有关，碳氧同位素显示晚期方解石同时受到碳酸盐围岩溶解和外来流体混合影响(He et al., 2022)。

综合来看，朱溪超大型W-Cu矿床形成于深部高分异花岗质岩浆、富F-W岩浆热液流体和碳酸盐围岩强烈反应的耦合体系中。深部岩浆分异和挥发分富集提供了W及热液流体来源。进矽卡岩阶段建立了高温变质反应和Ca供给条件。退矽卡岩阶段的冷却、减压、流体−围岩反应和局部还原增强触发了大规模白钨矿沉淀。晚期外来水加入和硫化物沉淀则造成W-Cu多金属矿化的进一步叠加。

综上，朱溪超大型W-Cu矿床可概括为受构造−岩浆−围岩共同约束的S型花岗岩相关矽卡岩−复合叠加成矿模式。晚侏罗世(154～148 Ma)，在区域由挤压向伸展转换的构造背景下，双桥山群富W变沉积岩地壳物质发生部分熔融，形成强过铝、还原高分异S型花岗质岩浆，伴随少量幔源岩浆热输入，岩浆沿断裂向上侵位；岩浆演化晚期出溶富F、富W的岩浆−热液流体，流体运移至岩体与围岩碳酸盐岩接触部位，与灰岩、白云质灰岩发生强烈双交代作用，依次发育进矽卡岩、退矽卡岩热液演化序列，围岩碳酸盐为白钨矿沉淀提供主要Ca源，局部也存在岩体硅酸盐矿物(如斜长石)蚀变释放Ca的贡献。在冷却减压、流体沸腾、水−岩反应及局部还原条件共同驱动下，白钨矿大规模沉淀，形成主体矽卡岩型W矿体；晚期体系逐渐开放，大气降水混入，发生石英−硫化物叠加，形成Cu多金属矿化，局部伴生有云英岩型、蚀变花岗岩型矿化。隐伏岩体形态、碳酸盐岩层位、层间滑脱构造共同控制了巨厚似层状、透镜状矿体的空间就位，造就了朱溪超大型W-Cu共生的成矿格局。

2.2 大湖塘超大型W-Cu-Mo-Sn矿床

大湖塘超大型W-Cu-Mo-Sn矿床位于江南造山带东段，跨越江西省的武宁县、修水县和靖安县，面积约为750 km^2，W资源量达超大型，Cu资源量可观，还有一定量的Mo和Sn。该矿床可按区域划分为北部矿区、位于中部的大雾塘矿区以及南部矿区。北部矿区的代表矿段为石门寺和大岭上；中部的大雾塘矿区包含平苗、东陡崖、狮子岩、一矿带、石子墩及槽头港等矿段；南部矿区以狮尾洞、昆山和毛公洞矿段为主(项新葵等，2012; 左全狮等，2014; 蒋少涌等，2015)。石门寺矿段的矿体包括：①以白钨矿为主的细脉浸染型矿体(占北部矿区W资源量的74%，平均品位约为0.14%；项新葵等，2012)；②石英大脉型矿体，单脉延伸200～800 m、脉宽20～70 cm，脉内矿石以黑钨矿为主，伴生黄铜矿和辉钼矿等，平均品位约为1.8%；③隐爆角砾岩型矿体，呈筒状，富含Cu、Mo，赋存于似斑状黑云母花岗岩株顶部，可延伸至晋宁期黑云母花岗闪长岩内。大岭上矿段的矿化类型以细脉浸染型、石英大脉型和隐爆角砾岩型为主(蒋少涌等，2015)。大雾塘矿区成矿元素组合为W、Cu、Mo、Sn。其中Sn矿

化显著强于南、北两矿区。大雾塘矿区内发育细脉浸染型、石英大脉型、蚀变花岗岩型及云英岩型矿化(蒋少涌等, 2015)。东陡崖的云英岩型矿体 Sn 矿化局部富集，呈透镜状、团块状不连续分布，一般 Sn 矿化较 W 矿化强，Sn 品位可达 1% 以上(林黎等, 2006; 胡大龙, 2023)。南部矿区成矿元素以 W、Cu、Mo 为主，局部伴生 Sn。以石英大脉型和细脉浸染型矿化为主，局部存在蚀变花岗岩型及云英岩型矿化(蒋少涌等, 2015)。大湖塘超大型 W-Cu-Mo-Sn 矿床出露基底围岩为晋宁期黑云母花岗闪长岩，侵入岩包含燕山期各类花岗岩，呈岩株、岩枝、岩脉产出，具有“多岩性、多期次”的特点。根据北部矿区、中部矿区和南部矿区的空间展布，文章整理并汇总出近年来已报道各类岩体的成岩年龄，见表 1。

总体来看，大湖塘矿区的岩浆岩活动主要发生在晚侏罗世—早白垩世(150～130 Ma; 表 1)，并可进一步划分为晚侏罗世(150～144 Ma)与早白垩世(138～130 Ma)两期。需要注意的是，不同年龄的样品在各矿区呈现零星分布，并未显示出随空间展布的明显规律性变化。其中，晚侏罗世形成似斑状花岗岩与中—细粒黑云母花岗岩等；而早白垩世则发育中—细粒白云母花岗岩及晚期花岗斑岩等(表 1)。这些岩浆岩的形成可能与燕山中—晚期华南地区地壳大规模伸展作用所导致的岩石圈拉张减薄有关。在岩石圈减薄过程中，下部软流圈物质上涌，触发壳幔相互作用，进而促使新元古代地壳(即双桥山群变质沉积岩)发生部分熔融(黄兰椿和蒋少涌, 2013; Huang and Jiang, 2014; Mao et al., 2015; 叶海敏等, 2016; 胡大龙, 2023)。

大湖塘地区燕山期岩浆岩主要为具强过铝质属性(A/CNK>1.1)。Sr-Nd-Hf 同位素数据显示，斑状黑云母花岗岩、细粒花岗岩和花岗斑岩的初始 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 分别为 0.721～0.731、0.7196～0.7289 和 0.7153～0.7365，$\varepsilon_{Nd}(t)$ 分别为−5.06～−7.99、−6.29～−6.74、−5.09～−7.64(Huang and Jiang, 2014; Mao et al., 2015)。这些花岗岩形成源自富含 W、Cu、Sn、Ag 等金属的双桥山群泥质岩与少量砂岩的部分熔融，具有 S 型花岗岩的特征(胡大龙, 2023)。但部分学者(樊献科, 2019)认为石门寺矿段的黑云母花岗斑岩具 S-I 型过渡特征，可能与其源区具有更多的基性玄武质物质和更少的黏土质物质有关。

迄今为止，相关学者基于辉钼矿 Re-Os 定年、白云母 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 定年、白钨矿 Sm-Nd 定年、黑钨矿和锡石 U-Pb 定年等多种方法获得大湖塘矿床成矿年龄，集中分布在 150～130 Ma(表 2)，与成岩年龄区间基本一致(表 1)，以上数据显示出大湖塘矿床具有两阶段成岩与成矿特征，分别集中于 150～144 Ma 和 138～130 Ma(图 4)。

大湖塘超大型 W-Cu-Mo-Sn 矿床中硫化物的 S 同位素变化范围小，表现为岩浆硫特征(蒋少涌等, 2015; Song et al., 2018c)，支持成矿物质主要来源于岩浆的贡献。成矿流体研究显示，大湖塘早期成矿流体为 NaCl−H_2O−(CH_4−N_2)体系岩浆热液(Peng et al., 2018; Song et al., 2018d)，其具有富含有机碳、中—高温度(270～410°C)、中—低盐度(2.2 %～7.6 % NaCl)和低密度(0.58～0.82 g/cm^3)的特征，单个流体包裹体的激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)原位成分分析显示，早期成矿流体中含有一定量的 W、Cu、Sn 等元素，晚期成矿流体则为岩浆热液与大气降水的混合流体的特征(胡大龙, 2023)。W 矿沉淀的主要原因是流体的自然冷却和压力降低，而其他成矿元素的沉淀与流体混合及沸腾作用相关，水−岩反应能为成矿提供充足的 Ca 和 Fe 等元素(Peng et al., 2018; 胡大龙, 2023)。

综上，大湖塘超大型 W-Cu-Mo-Sn 矿床属于江南造山带与 S 型花岗岩有关的多期次、多类型复合成矿模式(图 4)。受古太平洋板块俯冲后撤引发的岩石圈伸展减薄背景控制，新元古代双桥山群富 W-Sn 的变质沉积岩发生部分熔融，形成强过铝质 S 型花岗岩，同时存在少量基性物质混入；矿区岩浆−热液活动划分为 150～144 Ma、138～130 Ma 两期重要成岩−成矿事件，多期次岩浆侵位带来持续的成矿物质与流体供给。早期岩浆演化过程中 W、Cu、Mo、Sn 等成矿元素不断向残余熔体富集，岩浆晚期出溶的岩浆热液沿断裂、裂隙系统运移，在晋宁期花岗闪长岩中以及燕山期花岗岩内形成细脉浸染型、石英大脉型、云英岩型、隐爆角砾岩型等多种矿化类型；流体冷却、压力降低主导 W 的沉淀，随后的 Cu-Mo-Sn 矿化则更多受控于流体沸腾、流体混合与水−岩反应，水−岩反应可为成矿体系提供 Ca、Fe 等关键组分，晚期成矿阶段大气降水不断混入，进一步驱动多金属硫化物沉淀。不同矿段因岩浆分异程度、围岩条件、流体演化差异，出现 W、Cu、Mo、Sn 元素的分异富集，中部大雾塘矿段 Sn 矿化显著增强。岩体形态、断裂裂隙网络、基底围岩

表 1 大湖塘 W-Cu-Mo-Sn 矿床中各类岩体定年结果

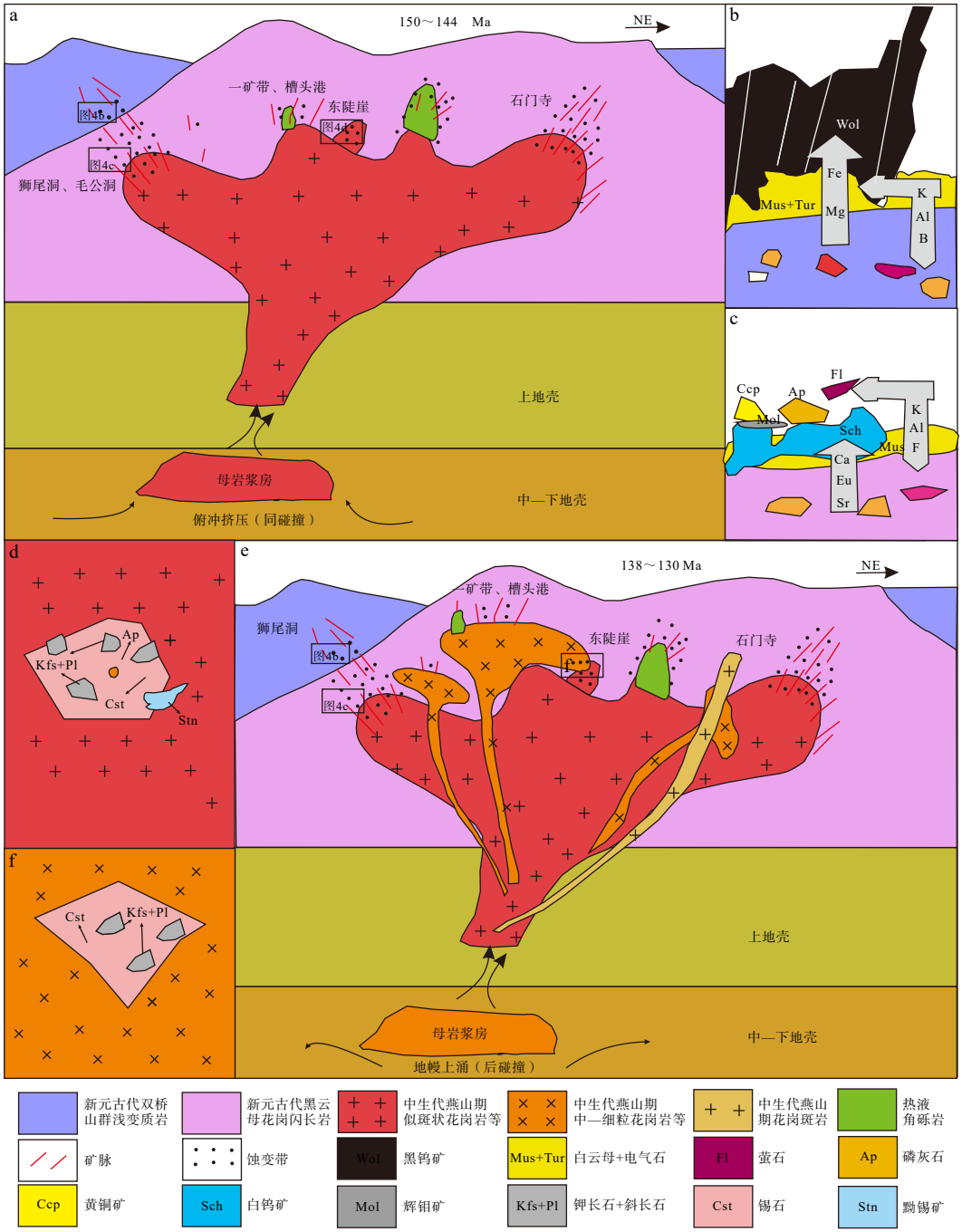
Table 1 Summary of geochronological data for various igneous rocks in the Dahutang W–Cu–Mo–Sn deposit

矿区	矿段	岩石/矿物类型	测试方法	成岩时代/Ma	数据来源
北部	石门寺	似斑状黑云母花岗岩	锆石U-Pb定年	147.4±0.6	Mao et al., 2015
北部	石门寺	似斑状黑云母花岗岩	锆石U-Pb定年	148.3±1.9	Mao et al., 2015
北部	石门寺	似斑状黑云母花岗岩	独居石U-Pb定年	150.0±0.7	叶海敏等, 2016
北部	石门寺	似斑状黑云母花岗岩	锆石U-Pb定年	147.7±7.9	李宏伟等, 2021
北部	石门寺	似斑状黑云母花岗岩	锆石U-Pb定年	138	项新葵等, 2012
北部	石门寺	细粒黑云母花岗岩	锆石U-Pb定年	146.1±0.6	Mao et al., 2015
北部	石门寺	细粒黑云母花岗岩	锆石U-Pb定年	144.7±0.5	Mao et al., 2015
北部	石门寺	细粒黑云母花岗岩	独居石U-Pb定年	149.0±1.0	叶海敏等, 2016
北部	石门寺	细粒二云母花岗岩	锆石U-Pb定年	146.6±1.4	张志辉, 2014
北部	石门寺	斑状黑云母花岗岩	锆石U-Pb定年	146.3±0.61	张志辉, 2014
北部	石门寺	白云母花岗岩	锆石U-Pb定年	146.42±0.49	张志辉, 2014
北部	石门寺	花岗斑岩	锆石U-Pb定年	146.0±0.78	项新葵等, 2015
北部	石门寺	花岗斑岩	锆石U-Pb定年	143.0±0.8	Mao et al., 2015
北部	石门寺	花岗斑岩	锆石U-Pb定年	143.1±1.2	Mao et al., 2015
北部	石门寺	花岗斑岩	锆石U-Pb定年	151.0±l.1	张志辉, 2014
北部	石门寺	花岗斑岩	独居石U-Pb定年	148.2±1.2	叶海敏等, 2016
北部	石门寺	花岗斑岩	锆石U-Pb定年	154.36±0.83	张志辉等, 2020
北部	石门寺	花岗斑岩	锆石U-Pb定年	135	项新葵等, 2012
北部	大岭上	花岗斑岩	锆石U-Pb定年	130.4±1.6	彭花明等, 2015
北部	大岭上	中—细粒白云母花岗岩	锆石U-Pb定年	133.7±0.5	Huang and Jiang, 2014
北部	大岭上	细粒二云母花岗岩	锆石U-Pb定年	130.7±1.1	Huang and Jiang, 2014
中部	平苗	中—粗粒白云母花岗岩	锆石U-Pb定年	145.7±0.6	余振东等, 2020
中部	平苗	斑状二云母花岗岩	锆石U-Pb定年	146.4	Yang et al., 2022
中部	平苗	黑云母花岗斑岩	锆石U-Pb定年	143.4	Yang et al., 2022
中部	平苗	花岗斑岩	锆石U-Pb定年	149.1±1.1	孟亚飞和蒋少涌, 2015
中部	一矿带	花岗斑岩	锆石U-Pb定年	139.0±1.2	陈茂松等, 2020
中部	一矿带	似斑状白云母花岗岩	白云母^{40}Ar-^{39}Ar定年	142.09±0.88	Song et al., 2018a
中部	一矿带	细粒白云母花岗岩	白云母^{40}Ar-^{39}Ar定年	138.79±1.75	Song et al., 2018a
中部	一矿带	细粒白云母花岗岩	白云母^{40}Ar-^{39}Ar定年	140.4±0.61	Song et al., 2018a
中部	一矿带	热液角砾岩型矿体中黑云母	黑云母^{40}Ar-^{39}Ar定年	149.2±1.1	Song et al., 2018a
中部	东陡崖	似斑状白云母花岗岩	锆石U-Pb定年	144.2±1.4	胡大龙, 2023
中部	东陡崖	中—细粒白云母花岗岩	锆石U-Pb定年	133.6±1.6	胡大龙, 2023
中部	槽头港	中—粗粒白云母花岗岩	锆石U-Pb定年	142.2±1.8	胡大龙, 2023
中部	槽头港	斑状二云母花岗岩	锆石U-Pb定年	133.5±0.8	胡大龙, 2023
中部	槽头港	似斑状黑云母花岗岩	锆石U-Pb定年	145.7±1.8	胡大龙, 2023
南部	狮尾洞	似斑状白云母花岗岩	锆石U-Pb定年	144.2±1.3	黄兰椿和蒋少涌, 2012
南部	狮尾洞	似斑状二云母花岗岩	锆石U-Pb定年	144.0±0.6	Huang and Jiang, 2014
南部	狮尾洞	斑状二云母花岗岩	锆石U-Pb定年	130.3±1.1	Huang and Jiang, 2014
南部	狮尾洞	花岗斑岩	锆石U-Pb定年	134.6±1.2	黄兰椿和蒋少涌, 2013
南部	狮尾洞	黑云母花岗斑岩	锆石U-Pb定年	143.7±2.4	褚平利等, 2019
南部	狮尾洞	细粒白云母花岗岩	白云母^{40}Ar-^{39}Ar定年	137.60±2.68	Song et al., 2018a
南部	昆山	似斑状花岗岩	锆石U-Pb定年	151.7±1.3	张明玉等, 2016
南部	毛公洞	白云母花岗岩	锆石U-Pb定年	144.5±2.2	胡大龙, 2023

表 2　大湖塘 W-Cu-Mo-Sn 矿床成矿年龄汇总

Table 2　Summary of mineralization ages of the Dahutang W–Cu–Mo–Sn deposit

序号	矿区	矿段	测试方法	成矿时代/ Ma	数据来源
1	北部	石门寺	辉钼矿Re-Os定年	143.7±1.2	丰成友等, 2012
2	北部	石门寺	辉钼矿Re-Os定年	149.6±1.4	项新葵等, 2013
3	北部	石门寺	辉钼矿Re-Os定年	139.2±1.0	Mao et al., 2013
4	北部	石门寺	辉钼矿Re-Os定年	143.9±1.0	张志辉, 2014
5	北部	石门寺	辉钼矿Re-Os定年	145.1±1.0	叶泽宇等, 2016
6	北部	石门寺	辉钼矿Re-Os定年	146.81±0.59	Song et al., 2018a
7	北部	石门寺	辉钼矿Re-Os定年	141.50±1.43	Song et al., 2018a
8	北部	石门寺	辉钼矿Re-Os定年	138.91±0.87	Song et al., 2018a
9	北部	石门寺	辉钼矿Re-Os定年	140.96±1.15	Song et al., 2018a
10	北部	石门寺	辉钼矿Re-Os定年	144.02±0.96	Song et al., 2018a
11	北部	石门寺	辉钼矿Re-Os定年	149.6±1.2	刘更更等, 2024
12	北部	石门寺	辉钼矿Re-Os定年	139.18±0.97	刘更更等, 2024
13	北部	石门寺	辉钼矿Re-Os定年	145.1±1.0	刘更更等, 2024
14	北部	石门寺	辉钼矿Re-Os定年	140.6±1.2	刘更更等, 2024
15	北部	石门寺	辉钼矿Re-Os定年	141.79±0.97	刘更更等, 2024
16	北部	石门寺	辉钼矿Re-Os定年	140.6±1.2	叶泽宇等, 2016
17	北部	石门寺	黑钨矿U-Pb定年	147.8±2.8	胡大龙, 2023
18	北部	大岭上	黑钨矿U-Pb定年	131.7±3.5	胡大龙, 2023
19	中部	一矿带	辉钼矿Re-Os定年	137.9±2.0	张勇等, 2017
20	中部	一矿带	黑钨矿U-Pb定年	149.8±3.0	胡大龙, 2023
21	中部	一矿带	黑钨矿U-Pb定年	135.4±3.7	胡大龙, 2023
22	中部	槽头港	黑钨矿U-Pb定年	135.3±4.8	胡大龙, 2023
23	中部	东陡崖	锡石U-Pb定年	136.3±3.8	胡大龙, 2023
24	中部	东陡崖	锡石U-Pb定年	145.7±7.6	胡大龙, 2023
25	中部	东陡崖	锡石U-Pb定年	146.4±5.7	胡大龙, 2023
26	中部	东陡崖	锡石U-Pb定年	144.5±5.9	胡大龙, 2023
27	南部	狮尾洞	黑钨矿U-Pb定年	134.6±4.4	胡大龙, 2023
28	南部	狮尾洞	白钨矿Sm-Nd定年	142.4±8.9	蒋少涌等, 2015
29	南部	狮尾洞	白云母^{40}Ar-^{39}Ar定年	138.63±0.85	Song et al., 2018a
30	南部	狮尾洞	辉钼矿Re-Os定年	140.9±3.6	丰成友等, 2012
31	南部	狮尾洞	辉钼矿Re-Os定年	131.96±1.34	Song et al., 2018a
32	南部	狮尾洞	辉钼矿Re-Os定年	130.42±1.92	Song et al., 2018a
33	南部	狮尾洞	辉钼矿Re-Os定年	134.80±1.58	Song et al., 2018a
34	南部	狮尾洞	辉钼矿Re-Os定年	134.75±1.22	Song et al., 2018a
35	南部	狮尾洞	辉钼矿Re-Os定年	135.16±1.22	Song et al., 2018a
36	南部	狮尾洞	辉钼矿Re-Os定年	141.07±2.37	Song et al., 2018a
37	南部	狮尾洞	辉钼矿Re-Os定年	146.97±1.13	Song et al., 2018a
38	南部	昆山	辉钼矿Re-Os定年	151.0±1.3	张明玉等, 2016
39	南部	昆山	辉钼矿Re-Os定年	150.0±1.0	张明玉等, 2016
40	南部	昆山	辉钼矿Re-Os定年	148.7±0.7	林锐华等, 2023



Wol—黑钨矿；Sch—白钨矿；Ccp—黄铜矿；Mol—辉钼矿；Cst—锡石；Stn—黝锡矿；Mus—白云母；Tur—电气石；Pl—斜长石；Kfs—钾长石；Ap—磷灰石

a—大湖塘矿床第1阶段（150～144 Ma）成矿模式图；b、c—第1阶段不同矿段的矿化特征及矿物组合；d—大湖塘矿床第2阶段（138～130 Ma）成矿模式图；e、f—第2阶段不同矿段的矿化特征及矿物组合

图4 大湖塘矿床两阶段成矿模式图（据蒋少涌等，2015；胡大龙，2023修改）

Fig. 4 Two-stage metallogenic model for the Dahutang ore deposit (modified after Jiang et al., 2015; Hu, 2023)

(a) The ore-forming model of the first stage (150–144 Ma) of the Dahutang deposit; (b and c) The mineralization characteristics and mineral assemblages of various ore sections in the first stage; (d) The ore-forming model of the second stage (138–130 Ma) of the Dahutang deposit; (e and f) The mineralization characteristics and mineral assemblages of different ore sections in the second stage

Wol–wolframite; Sch–scheelite; Ccp–chalcopyrite; Mol–molybdenite; Cst–cassiterite; Stn–stannite; Mus–muscovite; Tur–tourmaline; Pl–plagioclase; Kfs–K-feldspar; Ap–apatite

性质共同约束矿体空间分布，两阶段岩浆-热液叠加造就了大湖塘规模巨大、元素组合复杂的超大型W多金属矿集区。

3　与I型花岗岩相关的W多金属矿床

3.1　香炉山超大型W矿床

香炉山W矿床位于江西省西北部修水县，地处九江坳陷与九岭隆起的过渡部位，位于香炉山-观音堂背斜或香炉山-太阳山背斜的倾伏端及核部附近，褶皱构造对岩体就位和矿体空间展布具有明显控制作用；矿区内北东向、北北东向、北西向及近东西向断裂和层间破碎带发育，其中北东—北北东向构造既控制燕山期岩体侵位，也为成矿流体运移和矿体定位提供通道与容矿空间（王凯等，2016；Dai et al., 2018；汪国华等，2025）。

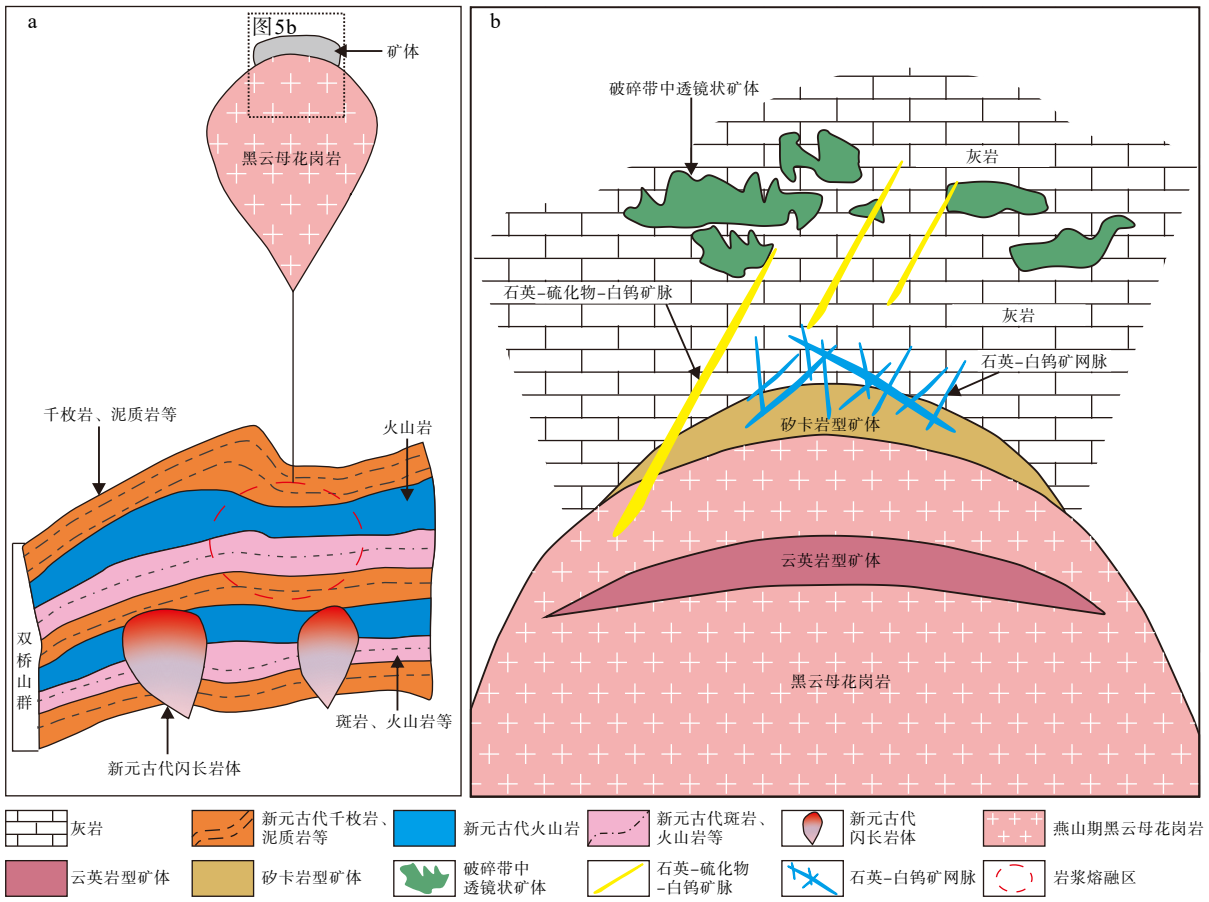
近年来在香炉山矿区外围陆续发现形坪、张天罗和大岩下等隐伏矿段，新增WO_3资源量可观，整个矿区累计探明WO_3资源量达到超大型规模。新发现隐伏矿体与隐伏黑云母花岗岩具有密切空间关系，说明深部和外围仍具有较大找矿潜力（汪国华等，2025）。矿化类型主体为矽卡岩型白钨矿化，局部伴生脉型、角岩型和云英岩型白钨矿化（图5）；香炉山矿段主矿体多赋存于黑云母花岗岩与中寒武统杨柳岗组不纯灰岩接触带的矽卡岩带中，矿体数量可达50余个，主矿体呈似层状产于岩体倾伏前缘顶部，具有厚度大、倾角缓、埋藏较浅和沿接触带连续展布的特征（张家菁等，2008；田邦生和袁步云，2008）。形坪矿段的W矿体主要呈似层状、透镜状分布于中寒武统杨柳岗组泥质灰岩与黑云母花岗岩接触带附近，而大岩下、张天罗矿段的W矿体则更多沿震旦系陡山沱组含炭质页泥岩和灯影组含炭泥质硅质岩顺层展布，表现出矽卡岩型与角岩型矿化并存的特点（高任等，2023；汪国华等，2025）。

香炉山矿区的岩浆活动主要集中于130～125 Ma早白垩世阶段（杨世文等，2020；Yang et al., 2021）。其中燕山晚期黑云母花岗岩可分为任家山、高湖和太阳山等岩体，具有粗粒似斑状、细粒等不同岩相，其在地表表现为不同出露体，但在深部可能具有一定连通性或同源关系（王凯等，2016；Dai et al., 2018；赵文和张怀瑾，2022；汪国华等，2025）。香炉山矿段矽卡岩矿石中辉钼矿Re-Os加权平均年龄为125.5±0.7 Ma，云英岩矿石中白云母$^{40}Ar/^{39}Ar$坪年龄为122.8±0.78 Ma，表明岩浆侵位、矽卡岩成矿和云英岩化热液活动在时间上高度耦合，均属于早白垩世晚燕山期构造-岩浆-热液事件（Dai et al., 2018）。汪国华等（2025）对张天罗矿段隐伏黑云母花岗岩进行锆石和独居石U-Pb定年，获得$^{206}Pb/^{238}U$加权平均年龄分别为127.2±2.0 Ma、125.4±0.9 Ma、125.5±2.1 Ma和125.4±0.9 Ma，说明外围隐伏花岗岩与已知香炉山矿段黑云母花岗岩属于同一期或近同期早白垩世岩浆活动产物。

香炉山黑云母花岗岩具有高硅、富碱、弱—强过铝质、低Fe_2O_3/FeO的特征，并富集K、Rb、Th、U、Pb，亏损Ba、Sr、P、Ti，稀土元素配分曲线整体右倾且具明显Eu负异常，表明其为高分异、还原性的含W I型花岗岩，具备形成大型—超大型W矿床的成矿潜力（Feng et al., 2018；汪国华等，2025）。其强过铝质、高Rb/Ba、高Rb/Sr及Nb-Ta-Y特征表明其壳源富黏土物质且具有板内伸展环境属性（Feng et al., 2018；Li et al., 2020；赵文和张怀瑾，2022）。Hf同位素也支持以壳源为主的成因认识：Dai et al.（2018）报道香炉山黑云母花岗岩锆石$\varepsilon_{Hf}(t)$为−5.7～−3.1，二阶段Hf模式年龄为1363～1218 Ma；Li et al.（2020）获得香炉山花岗岩锆石$\varepsilon_{Hf}(t)$为−6.9～−4.1，平均约为−5.4±0.7，指示岩浆主要来源于中元古代—新元古代地壳物质。

矿化类型上，香炉山矿区以接触带矽卡岩型白钨矿化为主，外围大岩下、张天罗等矿段则表现为角岩型白钨矿化与顺层矿体更加发育。这说明香炉山矿田并非单一接触带矽卡岩系统，而是一个由隐伏花岗岩、接触带、层间破碎带和不同钙质-硅质-泥质围岩共同控制的复合型岩浆热液成矿系统（孔凡斌等，2021；高任等，2023；汪国华等，2025）。矿物组合方面，赵文和张怀瑾（2022）指出香炉山矽卡岩矿物以钙铁辉石、钙铝榴石为主，并有少量晚期锰铝榴石-铁铝榴石；白钨矿主要发育于矽卡岩晚期网脉中，呈他形粒状且贫Mo，这些特征指示香炉山属于还原型矽卡岩W矿床。

成矿流体来源方面，S同位素和白钨矿稀土元素模拟结果均支持岩浆热液流体为主。黄铜矿和磁黄铁矿$\delta^{34}S$分别为1.0‰～4.2‰和3.0‰～5.2‰，具有典型岩浆硫特征（赵文和张怀瑾，2022）。H-O同位素指示香炉山成矿流体并非单一岩浆水，而是岩浆水与大气降水的混合流体；其氧化物阶段石英δD为−67.9‰～−78.0‰、$\delta^{18}O_{H_2O}$为−3.3‰～0.7‰，石英—硫



a—香炉山钨矿床岩浆作用与成矿示意图（据戴盼，2018 修改）；b—香炉山钨矿床矿化空间展布模式图（据吴胜华等，2014 修改）

图 5 香炉山钨矿成矿模式简图

Fig. 5 Schematic metallogenic model for the Xianglushan W deposit

(a) Schematic model illustrating magmatism and mineralization of the Xianglushan tungsten deposit (modified after Dai, 2018); (b) Spatial distribution model of mineralization types of the Xianglushan tungsten deposit (modified after Wu et al., 2014)

化物阶段 δD 为−64.6‰～−66.4‰、$\delta^{18}O_{H_2O}$为−7.5‰～−0.3‰，显示大气降水在氧化物阶段已经加入，并在石英−硫化物阶段混合比例接近 40%（高任等，2023）。

香炉山白钨矿沉淀主要受岩浆热液与围岩之间的交代反应、流体混合、温度降低、pH 值升高、氧逸度变化及钨络合物稳定性降低等因素共同控制。早白垩世区域伸展背景下，新元古代地层熔融形成富 W 岩浆，岩浆上侵并分异出富 W 热液，随后与不断加入的大气降水混合，使流体 $\delta^{18}O$ 降低、pH 值增大、温度降低并破坏 W 络合物稳定性，释放出的 WO_4^{2-}与围岩中的 Ca^{2+}结合，最终在接触带、层间破碎带和有利层位中沉淀为白钨矿（图 5；高任等，2023）。

综上，香炉山超大型 W 矿床为早白垩世伸展背景下与高分异 I 型花岗岩相关的还原型复合型白钨矿成矿模式（吴胜华等，2014；戴盼，2018）。受古太平洋板块俯冲后撤的区域构造动力学驱动，中元古代—新元古代富 W 地壳物质发生部分熔融，形成弱—强过铝质、还原性 I 型黑云母花岗岩，岩浆沿背斜核部、倾伏端及北东—北北东向断裂通道上侵就位；岩浆结晶分异过程中 W 元素不断富集，后期分异出富 W 岩浆热液。成矿流体以岩浆热液为主体，演化过程中不断混入大气降水，流体混合、降温、pH 值升高共同破坏 W 络合物稳定性；钙质主要来自寒武系杨柳岗组不纯灰岩等碳酸盐围岩，在接触带发生矽卡岩化形成矽卡岩型主矿体。同时，层间破碎带、含炭质硅−泥质围岩为流体运移和矿质沉淀提供有利空间，发育角岩型、云英岩型、脉−网脉型等多类型矿化，构成夕卡岩−角岩−云英岩−脉和网脉多位一体的成矿系统。背斜构造、断裂系统、隐伏花岗岩穹窿与不同岩性围岩的组合共同控制矿体产出位置与规模，外围隐伏岩体与层间破碎带的耦合也为矿区深部及外围进一步找矿提供重要

依据（Dai et al., 2018; Li et al., 2020; 高任等, 2023; 汪国华等, 2025）。

3.2 阳储岭大型 W-Mo 矿床

阳储岭斑岩型 W-Mo 矿床位于江南造山带中的赣北地区，于 1977—1984 年间被江西省地矿局九一六地质队所发现，是中国最早确定的斑岩型 W-Mo 矿床（刘家远和吴郭泉, 1988），也是中国少有的与 I 型花岗岩有关的大型 W-Mo 矿床（Mao et al., 2017）。该区域基底主要出露新元古代双桥山群，岩性以浅变质的板岩、粉砂质板岩及变余砂岩为主（Mao et al., 2017）。矿区发育有东西向的 F1 断裂和 F2 断裂、东北向 F3 断裂以及北北东向 F4 断裂和 F5 断裂。这 3 组断裂及其伴生的紧闭型褶皱共同控制矿区内的构造格架，其中东北向断裂的走向与花岗岩体侵位方向高度一致，而近东西向断裂则直接控制着斑岩体的侵位空间（张玉学, 1982; 曾庆权等, 2019）。

矿区出露的岩浆岩种类较多，出露面积约 3 km^2，主要由花岗闪长岩体和二长花岗斑岩体两部分组成，还可见花岗闪长岩斑岩和花岗斑岩（曾庆权等, 2019; 徐裕敏等, 2023）。在矿区南部还形成了含矿的李公岭隐爆角砾岩筒。阳储岭斑岩型钨钼矿体绝大多数赋存于二长花岗斑岩体中，仅少量分布于花岗闪长岩接触带及李公岭隐爆角砾岩筒内，主要可见细脉浸染型、网脉型和角砾状矿化产出（Dong et al., 2025b, 2026; Xiong et al., 2025）。矿石矿物为白钨矿和辉钼矿，此外还含有黄铁矿、磁黄铁矿、钛铁矿、磁铁矿等金属矿物以及石英、钾长石、斜长石、方解石等非金属矿物。

Mao et al.（2017）测定二长花岗岩和花岗闪长岩的锆石 U-Pb 年龄分别为 143.8 ± 0.5 Ma 和 149.8 ± 0.6 Ma。Song et al.（2023a）获得二长花岗斑岩及其内部发育的暗色微粒包体（MMEs）的年龄分别为 149.7 ± 1.1 Ma 和 148.7 ± 1.3 Ma。Yin et al.（2025）发现区内存在 5 次高钾钙碱性岩浆活动，由早到晚依次形成了黑云母二长花岗岩（143.9 ± 0.8 Ma）、细粒黑云母花岗闪长岩（142.8±0.8 Ma）、黑云母花岗闪长斑岩（144.2±0.7 Ma）、粗粒花岗闪长岩（143.6～143.0 Ma）以及成矿后的花岗斑岩（143.3±0.9 Ma）。

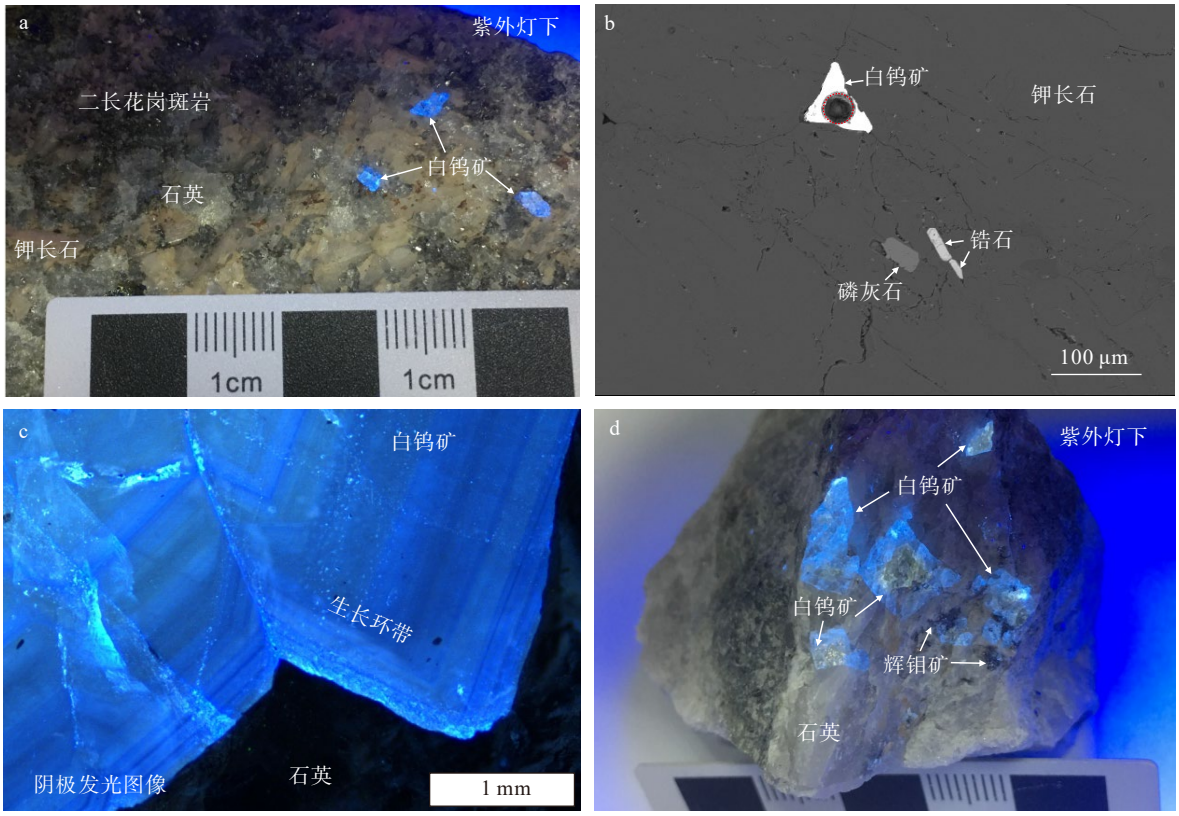
Mao et al.（2017）对花岗闪长岩和二长花岗斑岩的地球化学数据进行了分析，结果表明两者均表现出高硅、过铝质（A/CNK=1.01～1.08）的特征，P_2O_5 含量为 0.12%～0.17% 且与 SiO_2 呈负相关，初始 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 高（0.7104～0.7116）、低的负 $\varepsilon_{Nd}(t)$（−5.05～−5.67）以及均一的 $\varepsilon_{Hf}(t)$（−1.39～−2.17），相对富集大离子亲石元素（LILE）而亏损高场强元素（HFSE），属于高度分异的 I 型花岗岩。郑瑜林等（2022）研究认为花岗闪长岩与二长花岗斑岩均属于典型的壳源 I 型花岗岩，二长花岗斑岩是岩浆持续分离结晶的产物，其演化程度高是钨大规模富集的关键前提。Song et al.（2023a）发现 W-Mo 矿化主要发生在含有丰富镁铁质岩脉和 MMEs 的二长花岗斑岩内；MMEs 中的针状磷灰石以及形成时间相似的单颗粒锆石，均表明基性和长英质熔体发生了混合；此外，斜长石斑晶具有振荡环带，其结构和成分特征显示，阳储岭地区的岩浆系统中可能存在多次基性岩浆的注入；全岩 Sr-Nd 同位素数据和锆石 Hf-O 同位素数据分析表明成矿岩体含 60%～70% 的富集地幔组分和 30%～40% 的古老地壳组分。

已有学者研究认为阳储岭 W-Mo 矿床成矿物质来源于壳幔混源（Mao et al., 2017; 曾庆权等, 2019）。新元古代双桥山群的浅变质岩系整体具有明显的 W 元素富集特征，被视为区域中 W 多金属矿床的关键矿源层（毛景文等, 2020）。Mao et al.（2017）对辉钼矿进行 Re-Os 同位素测定获得了 146.4±1.0 Ma 的成矿年龄。曾庆权等（2019）对辉钼矿也进行了 Re-Os 同位素测定，获得了 143.3±2.0 Ma 的模式年龄和 145.4±1.0 Ma 的等时线年龄。上述年龄可以表明阳储岭 W-Mo 矿床形成的时间为 146～143 Ma。Song et al.（2023a）认为 W 来源于上地壳变质沉积岩的熔融，壳幔混合机制促使含矿岩浆具有较高的氧逸度，从而使得阳储岭矿床呈现氧化型 W 系统；而对于 Mo 成矿作用，则认为 Mo 矿化与镁铁质岩脉及暗色微粒包体关系密切，强调了基性岩浆的贡献。

阳储岭 W-Mo 矿床的形成经历了岩浆演化过程中金属元素初步富集与成矿流体中金属元素富集沉淀的过程。郑瑜林等（2022）研究发现二长花岗斑岩中黑云母的形成环境氟富集程度显著高于花岗闪长岩中的黑云母，岩浆流体应该经历了极高程度的分异与演化。在强烈的结晶分异驱动下，挥发份（F 和 Cl）以及成矿元素（W 和 Mo）得以从大体积的早期花岗闪长岩浆中源源不断地向晚期小体积的二长花岗斑岩体中迁移，并发生成矿元素的富集。此外，二长花岗斑岩中热液黑云母具有异常高的 Mg 含量，表现出与经典斑岩型铜矿类似的特征（张玉学, 1982）。

Xiong et al.（2025）和 Dong et al.（2025b, 2026）通

过白钨矿和磷灰石矿物指针，利用原位微区主微量元素−同位素技术，精细刻画了阳储岭斑岩型W-Mo矿床的形成过程。该矿床存在3个世代的白钨矿（Sch1、Sch2和Sch3）：Sch1以浸染状赋存于二长花岗斑岩和花岗斑岩中（图6a、6b），形成于早期岩浆热液中。Sch2颗粒富含Mo，出现在二长花岗斑岩内的石英−白钨矿脉±方解石中（图6c）；Sch2环带结构中存在显著的元素分布差异，说明成矿流体中元素浓度存在波动，暗示有外来流体的加入；Sch3是热液成矿主阶段的产物，存在于石英−白钨矿±辉钼矿±黄铁矿细脉中（图6d），形成于开放的流体体系。W矿体的主要围岩二长花岗斑岩中斜长石溶解为白钨矿的形成提供了钙质来源，其反应式为：$3CaAl_2Si_2O_8$（斜长石）$+2K^+ \rightarrow 2KAlSi_3O_8$（钾长石）$+Ca^{2+}+2CaO+2Al_2O_3$，这也解释了白钨矿与钾长石常常共生的现象（图6a、6b；Xiong et al., 2025）。



a—二长花岗斑岩内发蓝色荧光的白钨矿（紫外灯下）；b—背散射图像显示花岗斑岩内星点状白钨矿颗粒（红色虚线圈为白钨矿原位微区微量元素分析所留下）；c—矿脉内荧光特征的大颗粒白钨矿（直径>1 cm）显示出复杂的黄色—蓝色荧光特征（阴极发光条件下）；d—白钨矿显示出生长环带特征（紫外灯下）

图6 江西阳储岭W-Mo矿床中不同类型白钨矿的典型照片（Xiong et al., 2025）

Fig. 6 Representative images of different types of scheelite from the Yangchuling W–Mo deposit, Jiangxi Province (Xiong et al., 2025)

(a) Scheelite disseminated in monzogranite porphyry, showing blue fluorescence under ultraviolet (UV) light; (b) Backscattered electron image of disseminated, fine-grained scheelite coexisting with zircon, apatite, and K-feldspar in granite porphyry; the red circle represents the micro-area of in situ trace element analysis of scheelite; (c) A large scheelite grain (>1 cm in diameter) from an ore vein, showing complex yellow-to-blue cathodoluminescence; (d) Scheelite showing growth zoning under UV light

李公岭角砾岩筒内部存在的六类氟磷灰石均表现出高F（2.62%～3.88%）和低Cl（<0.20%）的特征。从成矿早期至晚期，热液磷灰石中REE与F含量呈现系统性降低的趋势，这记录了富F流体在角砾岩化、云英岩化及钨矿沉淀过程中的逐步消耗，表明F元素在促进岩浆分异与W迁移中扮演了关键角色（Dong et al., 2025b）。热液磷灰石的原位U-Pb定年结果为147.5±4.8 Ma，这表明该角砾岩筒的形成与阳储岭矿区的岩浆活动和成矿作用密切相关。在李公岭角砾岩筒中白钨矿类型更复杂，主要包括赋存于云英岩内、角砾岩中和热液脉中。稀土元素与Sr同位素特征表明，云英岩内白钨矿代表早期岩浆−

热液阶段，指示成矿流体最初主要来源于岩浆；角砾岩内白钨矿具有明显的正铕（Eu）异常，表明强烈的水-岩反应导致斜长石分解并释放 Eu，从而影响了成矿流体组成；热液脉中白钨矿微量元素的显著差异记录了多期流体脉冲、压力释放、水-岩反应、溶解-再沉淀及晚期大气降水混合等复杂的流体演化过程（Dong et al., 2026）。

综上，阳储岭大型 W-Mo 矿床属于壳幔混源 I 型花岗岩控制的斑岩型氧化 W-Mo 成矿模式。在晚侏罗世古太平洋板块俯冲后撤的伸展构造背景下，发生富集地幔与新元古代双桥山群变沉积岩熔融形成的岩浆混合作用，形成高钾钙碱性、弱过铝质的二长花岗斑岩等 I 型含矿岩体，多次基性岩浆注入带来地幔物质输入，提升岩浆氧逸度，构建氧化型钨钼成矿系统。岩浆结晶分异过程中 F、Cl 等挥发分持续富集，驱动 W、Mo 成矿元素向晚期小体积斑岩岩浆迁移汇聚；岩浆演化晚期出溶富金属热液，在斑岩体内部裂隙网络发生多批次流体脉冲活动。成矿所需钙质主要来源于岩体中斜长石的蚀变分解，无需大规模外部碳酸盐围岩供给，依次形成多个世代白钨矿；李公岭隐爆角砾岩筒记录了流体超压、角砾岩化的成矿过程，角砾岩内部发生强烈水-岩反应，造成 Eu 等元素活化迁移，后期有外来流体与大气降水参与流体演化。断裂构造控制斑岩体与角砾岩筒的空间就位，岩体内部密集裂隙网为钨钼矿质沉淀提供主要容矿空间，最终形成以细脉-浸染状为主体的斑岩 W-Mo 矿体，壳幔物质混源、多次流体脉冲与岩体内部水-岩反应共同制约了阳储岭大型 W-Mo 矿床的形成。

3.3　东源大型 W-Mo 矿床

东源 W-Mo 矿床位于安徽省南部祁门县东源地区，是皖南地区目前发现的代表性大型斑岩型 W-Mo 矿床之一（Zhang et al., 2021a）。

矿区出露地层以新元古界牛屋组为主，岩性主要包括砂岩、岩屑砂岩、砂质板岩、千枚岩、泥岩、粉砂质板岩等低级变质碎屑岩组合。这些围岩靠近岩体处普遍发生角岩化，说明含矿岩体侵位后产生明显热接触变质作用。东源矿区位于区域性祁门断裂及其派生断裂控制的构造-岩浆活动区内，断裂和节理裂隙极为发育（Wang et al., 2017）。东源 W-Mo 矿床出露东源、江家和西源 3 个黑云母花岗岩小岩珠，其北部发育有数 10 条煌斑岩脉。W-Mo 矿体主要赋存于斑岩体内部、煌斑岩及其与围岩地层接触带附近（杜玉雕等, 2011a, 2011b; 傅建真等, 2011; Dong et al., 2025a）。矿区外接触带以角岩化最为显著，岩体内部则发育钾长石化、硅化、绢云母化、白云母化、绿泥石化、碳酸盐化、黄铁矿化等蚀变。钾长石化代表斑岩系统中心部位 500～600°C 的高温自交代或自蚀变作用，而硅化、绢云母化、绿泥石化和碳酸盐化应属于较晚阶段（傅建真等, 2011; Wang et al., 2017）。

东源黑云母花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 148.6±1.8～146±1 Ma，锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 143.5±0.7 Ma，辉钼矿 Re-Os 年龄为 146.4±2.3 Ma，岩体侵位与辉钼矿成矿几乎同期，均形成于晚侏罗世（秦燕等, 2010; 周翔等, 2011; Zhang et al., 2021a）。地球化学上，东源含矿岩体具有高 SiO_2、Al_2O_3、K_2O 和较高 K_2O/Na_2O，A/CNK 为 0.97～1.02，整体表现为高钾钙碱性、准铝质—弱过铝质或弱过铝质 I 型花岗岩特征。其具有较高 Sr、Ba 含量，低 Y、Yb，弱 Eu 负异常，富集轻稀土元素和大离子亲石元素，亏损高场强元素；高 Sr/Y 和 $(La/Yb)_N$、低 Y 和 Yb 也表明其具有埃达克质地球化学特征，可能与加厚下地壳部分熔融有关（王德恩等, 2011; 周洁等, 2015; Zhang et al., 2021a）。东源岩体经历了明显分离结晶作用。Zhang et al.（2021a）指出，CaO、Al_2O_3 与 SiO_2 呈负相关，Sr-Ba、Eu 负异常、V-Th 以及 Nb、Ta、Ti、P 负异常共同表明岩浆演化过程中发生了钾长石、黑云母、钛铁矿或榍石、磷灰石等矿物的分离结晶。东源黑云母花岗岩黑云母成分落在或低于 Ni-NiO 缓冲线附近，说明岩浆氧逸度较低。低氧逸度可能有利于 W 从岩浆向热液流体中释放（Zhang et al., 2021a）。东源岩体锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 为 –6.4～–0.7，二阶段 Hf 模式年龄为 1601～1243 Ma，Nd 模式年龄为 1695～1379 Ma，指示源区主要为中元古代—新元古代地壳物质（Zhang et al., 2021a）。

东源矿床中矿石矿物以白钨矿和辉钼矿为主，伴有黄铁矿、磁黄铁矿等硫化物，矿体主要呈细脉浸染状、浸染状及网脉状（Zhang et al., 2021a; Dong et al., 2025a）。傅建真等（2011）指出，东源矿体主要受斑状黑云母花岗岩岩体顶部和浅部强蚀变带控制，岩体内部裂隙和石英细脉极其发育，形成密集平行细脉群和纵横交错的网脉带，是白钨矿和辉钼矿沉淀的重要空间。东源矿床流体 $\delta^{18}O$ 为 –0.50‰～3.10‰，δD 为 –85‰～–66‰，黄铁矿 $\delta^{34}S$ 为 2.6‰～5.8‰，说明流体主要为岩浆水与大气降水混合（杜玉雕等，

2011a）。Wang et al.（2017）通过石英流体包裹体研究识别出水−炭质包裹体、纯水包裹体、纯 CO_2 包裹体和晚期次生水溶液包裹体，认为水−炭质包裹体代表原始岩浆流体，晚期水溶液包裹体代表大气降水，其余包裹体代表与蚀变和矿化密切相关的演化岩浆流体。流体演化过程中存在流体不混溶和 CO_2 逸散；CO_2 逸散导致 pH 值升高，而斜长石蚀变和钾长石−绢云母沉淀释放 Ca^{2+}，从而促进白钨矿沉淀。

成矿物质来源方面，多数学者认为 W、Mo 等成矿物质与含矿花岗质岩浆密切相关，但存在壳幔混合或少量幔源贡献。周翔等（2011）根据辉钼矿这 Re 含量为 22.02×10^{-6}～98.09×10^{-6}，认为成矿物质具有壳幔混合来源特征。杜玉雕等（2011b）对江家和西源矿段 S、Pb 同位素研究表明，$\delta^{34}S$ 变化范围较窄，说明 S 与岩浆作用密切相关，可能源自花岗闪长斑岩；Pb 同位素显示成矿物质整体具有下地壳来源特征，并表现出壳幔混合特点。白钨矿微量元素研究进一步揭示了成矿流体演化过程。聂利青等（2018）发现东源白钨矿具有明显核−边结构，核部亏损 Mo、Nb、Ta 而富集 REE，边部则相反；并据此认为成矿流体氧逸度逐渐升高，流体富集 F 挥发分且 F 含量逐渐增加，同时成矿物质可能有幔源组分加入。Dong et al.（2025a）将东源白钨矿划分为产于斑状黑云母花岗岩中的白钨矿（Sch_A、Sch_B、Sch_C）和产于煌斑岩中的白钨矿（Sch_a、Sch_b），认为最早形成的白钨矿 Sch_A 的 REE 配分与斑状黑云母花岗岩相似，说明其直接继承了寄主花岗岩的 REE 特征（图 7）；另外，一些呈现复杂结构的白钨矿形成过程中的地球化学特征记录了存在多次成矿流体的注入。白钨矿 V-As 与 Eu 异常记录的氧逸度趋势一致，V-As 关系可能作为白钨矿氧逸度变化的潜在指示指标。

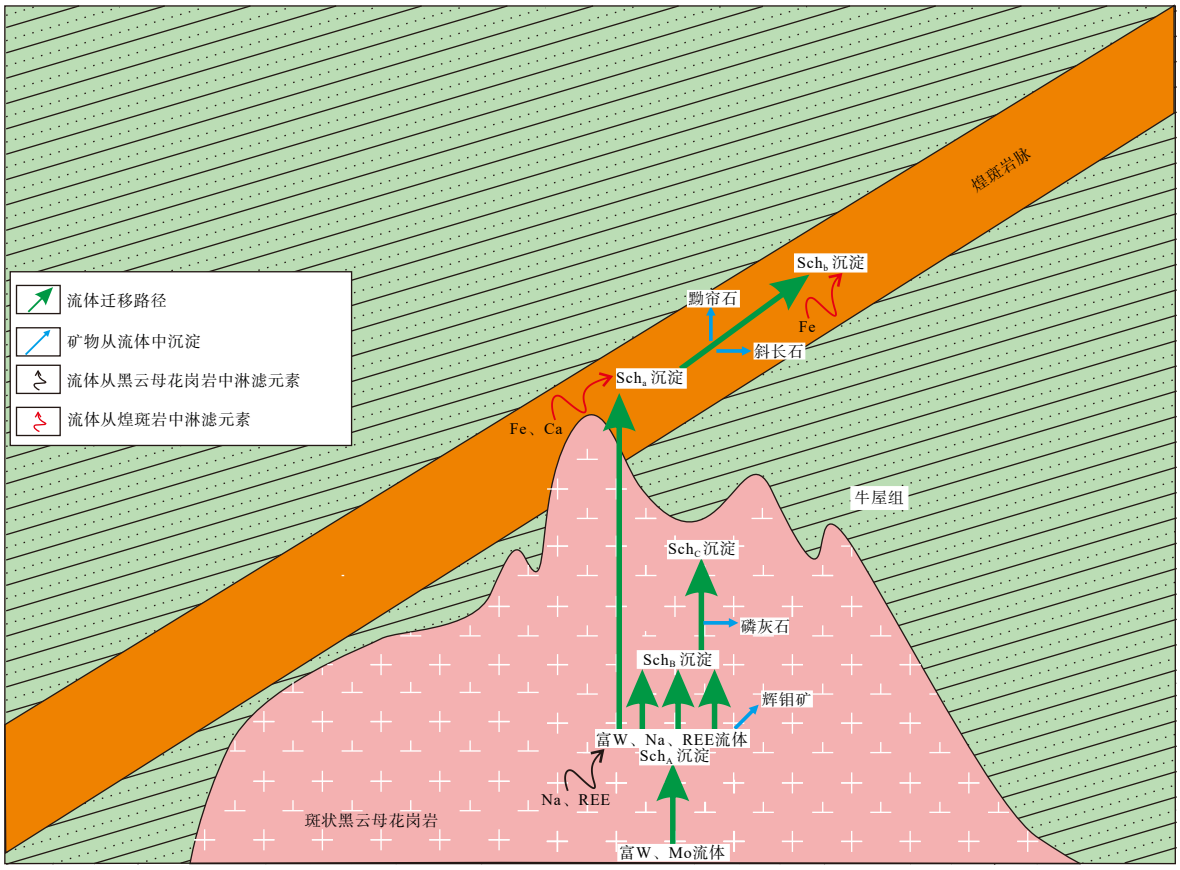
关于钙来源和白钨矿沉淀机制，Wang et al.（2017）明确指出，在缺乏碳酸盐围岩的花岗质岩体中，斜长石分解是白钨矿成矿的关键；斜长石蚀变及钾长石、绢云母沉淀过程中 K/Na 降低并释放 Ca 元素，CO_2 逸散造成 pH 值升高，两者共同促进白钨矿沉淀。Dong et al.（2025a）进一步指出，东源白钨矿形成所需 Ca 元素主要来自斑状黑云母花岗岩中钙质斜长石的绢云母化，以及煌斑岩中角闪石等铁镁矿物的黑云母化；不同围岩显著影响成矿流体演化路径和物理化学性质。

综上，东源大型 W-Mo 矿床为加厚地壳部分熔融形成的 I 型花岗岩相关斑岩型 W-Mo 成矿模式（图 7）。晚侏罗世，受古太平洋板块俯冲后撤引发的区域构造−热事件驱动，中元古代—新元古代加厚地壳发生部分熔融，形成高钾钙碱性、准铝—弱过铝质的 I 型黑云母花岗岩；岩浆经历显著的结晶分异作用，W、Mo 成矿元素与 H_2O、F、CO_2 等挥发分不断向残余熔体富集，后期出溶岩浆热液，流体持续聚集，压力升高引发水力破裂，在斑岩体内部形成密集脉网，发生多旋回、多批次的成矿流体注入。该矿床缺少大规模碳酸盐围岩，成矿所需的 Ca 元素主要由斑岩体中斜长石绢云母化以及煌斑岩中角闪石等铁镁矿物蚀变分解提供；成矿流体发生不混溶作用、CO_2 逸散促使体系 pH 值升高，叠加水−岩反应，驱动多世代白钨矿与辉钼矿沉淀，形成细脉浸染状、网脉状矿体。成矿晚期岩浆流体与大气降水发生混合，进一步改变流体物理化学条件。区域断裂构造控制含矿斑岩与煌斑岩脉的就位，岩体顶部裂隙系统、煌斑岩与围岩接触带共同构成主要的流体运移与矿质沉淀空间，源区物质、多旋回流体演化以及不同围岩介质的水−岩反应共同约束东源斑岩型钨钼矿床的成矿全过程。

4 与 A 型花岗岩相关的 Sn-W 多金属矿床

江南造山带与 A 型花岗岩相关的 Sn-W 多金属矿床产出不多，文章以西坞口 Sn-W-Rb 矿床为例来说明其成矿特征及成因。西坞口 Sn-W-Rb 矿床隶属于江南造山带东段，位于安徽省宁国市以南约 40 km。该矿区于 1975 年普查时被识别为热液脉型 W-Sn 矿床，至 2018 年通过深部勘查新圈定出 Rb 矿化体。西坞口 Sn-W-Rb 矿床区出露地层序列完整，自老至新依次为休宁组粉砂岩、南沱组含砾砂岩、蓝田组条带状泥质灰岩及皮园村组硅质页岩（陈雪锋等，2018）。区内断裂构造可划分为 3 组：北东向、东西向与北西西向。其中，北东向 F3 断裂为控矿的最主要断裂，走向 30°～60°，倾向南东；东西向与北西西向断裂为成矿后断裂（陈雪锋等，2022）。花岗斑岩为成矿岩体，整体呈岩株状侵位于休宁组地层之中，地表露头较少，深部岩体规模较大。

矿区 Rb、Sn、W 矿化呈现清晰的空间分带：Ⅰ类 Rb 矿体透镜状赋存于花岗斑岩内部，多硅白云母为主要矿物，体积占比可达 70% 以上，Rb 平均品位约为 0.25%；Ⅱ类 Rb 矿体分布于岩体顶部与地



Sch$_A$—产于石英–钾长石脉中的白钨矿；Sch$_B$—产于石英–绢云母–钾长石脉中的白钨矿；Sch$_C$—最晚期白钨矿，穿切早期 Sch$_A$ 和 Sch$_B$；Sch$_A$、Sch$_B$ 和 Sch$_C$ 及其相关脉体和矿化均产于斑状黑云母花岗岩中。Sch$_a$—产于石英–黑云母–白云母–黄铁矿–黄铜矿脉中的白钨矿；Sch$_b$—产于石英–白云母–斜长石–黝帘石–黄铁矿脉中的白钨矿；Sch$_a$ 和 Sch$_b$ 及其相关脉体和矿化均产于煌斑岩中

图 7　东源斑岩型 W-Mo 矿床成因模式图（据 Dong et al., 2025a 修改）

Fig. 7　Genetic model of the Dongyuan porphyry W–Mo deposit (modified after Dong et al., 2025a)

Sch$_A$ denotes scheelite in quartz–K-feldspar veins, Sch$_B$ denotes scheelite in quartz–sericite–K-feldspar veins, and Sch$_C$ represents the latest-stage scheelite that crosscuts the earlier Sch$_A$ and Sch$_B$; these scheelites and their associated veins and mineralization occur in porphyritic biotite granite. Sch$_a$ denotes scheelite in quartz–biotite–muscovite–pyrite–chalcopyrite veins, whereas Sch$_b$ denotes scheelite in quartz–muscovite–plagioclase–epidote–pyrite veins; these scheelites and their associated veins and mineralization occur in lamprophyre.

层接触带，多硅白云母含量大于 55%，Rb 平均品位约为 0.21%，2 类矿体叠加使矿区 Rb 资源量达到大型规模（陈雪锋等，2018，2022）。Sn 矿化包含蚀变花岗岩型与石英脉型 2 类。W 矿以石英脉型黑钨矿脉为主，赋存于外围地层的裂隙系统，与 Rb 矿体基本独立、无明显重叠。围岩蚀变明显，岩体内部以云英岩化、硅化为主，与 W-Sn 矿化关系密切；向外侧及接触带依次发育萤石化、黄玉化，远端地层以绿泥石化、绢云母化等中—低温蚀变为主。

花岗斑岩是西坞口 Sn-W-Rb 矿床的成矿母岩，相关学者通过锆石与独居石原位 U-Pb 定年、全岩地球化学及锆石 Hf 同位素等方法，揭示了花岗斑岩的岩浆作用与岩石成因。陈雪锋等（2019）通过锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年获得花岗斑岩的加权平均年龄为 141.7±1.0 Ma。全岩主微量元素分析显示，其具有高 SiO_2（74.29%～76.25%）、富碱、贫钙镁的特征，岩石系列为高钾钙碱性，化学类型归属为准铝质—弱过铝质。REE 组成偏低、轻重稀土分异弱，Eu 负异常显著（Eu/Eu*=0.02～0.28）。富集 Rb、Th、U 等大离子亲石元素，亏损 Ba、Sr、P、Ti 等高场强元素，反映了强烈的长石分离结晶作用。利用锆石 Ti 温度计计算的原始岩浆结晶温度约为 735.4℃，结合 Y/Nb（1.3～2.8，平均为 2.2），判别花岗斑岩属于 A 型花岗岩。锆石原位 Hf 同位素测试结果显示，$\varepsilon_{Hf}(t)$ 介于−6.7～−1.3，对应的二阶段 Hf 模式年龄为 1613～1273 Ma，该同位素组成与区域新元古代上溪

群浅变质岩的特征高度吻合，表明成岩物质主要来源于古老变质基底的部分熔融，幔源物质贡献有限（陈雪锋等，2019）。Wu et al.（2026）识别出2期岩浆活动，早期斑状花岗岩形成于139.9±1.0 Ma，晚期斑状黑云母花岗岩形成于129.0± 0.7 Ma，这2期岩体地球化学特征也表现出A型花岗岩的特征。

Wu et al.（2026）通过开展锆石、独居石、锡石、黑钨矿的U-Pb定年测试结果显示，蚀变花岗岩中独居石年龄为129.3±0.8 Ma，花岗岩型Sn矿的锡石年龄为128.9±1.3 Ma，与成矿期斑状黑云母花岗岩的侵位年龄（129.0±0.7 Ma）在误差范围内一致，表明Rb、Sn的早期矿化与岩浆侵位、蚀变作用同步发生，属于岩浆−热液过渡阶段的产物；后期热液流体沿断裂构造向围岩运移沉淀，分别形成126.4±1.5 Ma与125.5±2.0 Ma两期石英脉型W-Sn矿化。

从区域构造背景来看，该套花岗质岩浆形成于古太平洋板块俯冲回撤引发的陆内伸展环境：软流圈地幔上涌带来的热源触发了新元古代浅变质基底的部分熔融，初始岩浆沿断裂通道向上侵位，并在浅部岩浆房经历强烈的分离结晶作用，最终形成高分异的富F花岗斑岩，为Rb、Sn、W成矿提供了充足的物质与流体来源，其中晚期岩浆活动与Sn、W、Rb的大规模成矿作用在时间上高度耦合。成矿作用贯穿岩浆晚期至热液阶段，129～126 Ma为西坞口Sn-W-Rb矿床的主成矿期，这与晚期岩浆活动时间高度耦合（Wu et al., 2026）。

西坞口Sn-W-Rb矿床的成矿过程可分为3个阶段：第1阶段为岩浆分异与预富集，初始花岗质岩浆具有较高的Rb背景，伴随斜长石、钾长石、黑云母晶出并消耗Sr、Ba等，而Li、Rb、Sn、W在残余熔体中富集，为后续成矿提供物质基础；第2阶段为岩浆−热液过渡与Rb-Sn主成矿阶段，挥发分F的升高促使层状硅酸盐矿物形成，岩体内外部形成Ⅰ类、Ⅱ类Rb矿体，锡石在蚀变作用中沉淀；第3阶段为热液运移与W-Sn成矿，富金属热液沿断裂向围岩运移并在裂隙中沉淀出石英脉型黑钨矿与锡石矿化。

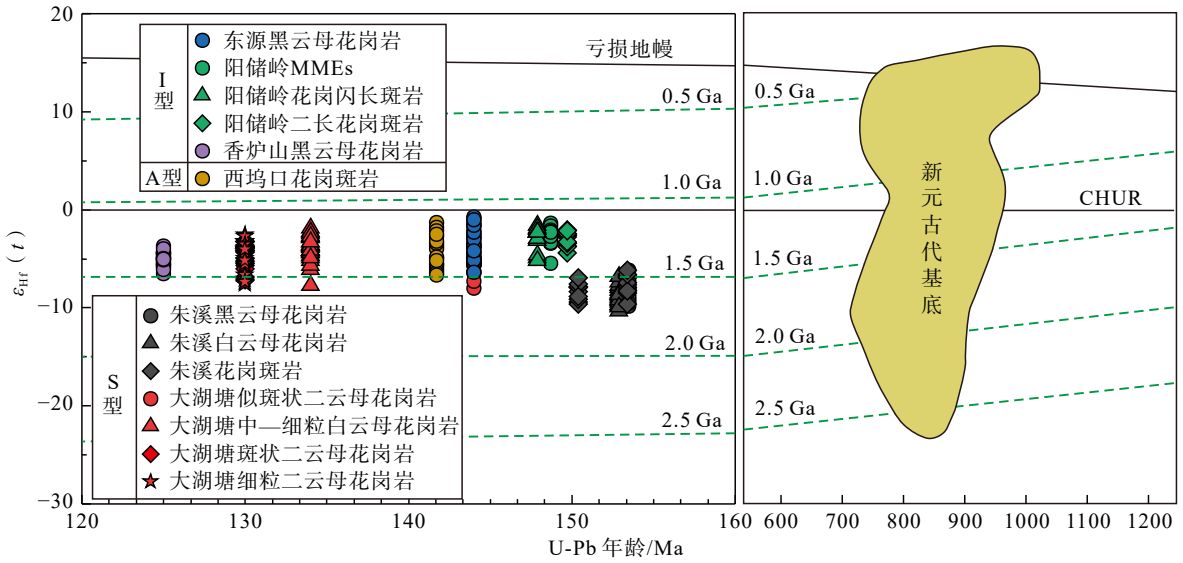
5 主要认识、关键科学问题与研究展望

5.1 W-Sn成矿物质来源再认识

近年来W矿床研究的一个重要进展是对“成矿物质来源”的认识由传统的单一壳源模型（Xu and Zhu, 1986; Romer and Kroner, 2016），逐渐转向富W地壳源区预富集、壳幔相互作用和挥发分参与共同控制的综合模型（Holwell et al., 2019; Jiang et al., 2020; Wu et al., 2024; Yang et al., 2025a）。传统观点认为，W矿床主要与壳源高分异花岗岩有关，成矿金属主要来自变沉积岩或古老地壳部分熔融。这一认识适用于南岭和江南W矿带中大量S型花岗岩相关矿床。最新研究（Yang et al., 2025a）也表明尽管许多含W花岗岩具有明显壳源同位素特征，地幔仍可能通过提供热量、挥发分和部分深源组分参与W的再循环和成矿过程。此外，洋壳俯冲相关伸展环境比陆陆碰撞、后碰撞伸展和陆内裂谷环境更有利于强烈W成矿；在这一过程中，地幔可提供热量，并促进俯冲板片释放He-Ar-Hg-F等挥发分进入地壳岩浆源区（Yang et al., 2025a）。

上述新认识对江南W矿带具有直接启示。岩石学相平衡模拟表明，单纯的双桥山群变沉积岩熔融难以产生大湖塘矿床这一典型S型花岗岩的原始岩浆，在H_2O为3%、压力和温度为1.0 GPa、900℃以及FMQ（铁橄榄石−磁铁矿−石英缓冲体系）的氧逸度条件下，大湖塘晚中生代花岗岩的原始岩浆需要双桥山群变沉积岩和变玄武岩以8∶2的比例的混合物部分熔融才能产生（刘冰琪等，2023）。锆石$\varepsilon_{Hf}(t)$/U-Pb年龄图（图8）显示，江南造山带不同类型中生代花岗岩总体具有负$\varepsilon_{Hf}(t)$特征，$\varepsilon_{Hf}(t)$主要分布于−10～0，对应两阶段Hf模式年龄约为2.0～1.2 Ga，明显落入新元古代基底演化范围。这表明研究区不同类型花岗岩均主要来源于新元古代增生地壳或古老地壳物质的重熔，新生幔源物质贡献不同。S型花岗岩（如大湖塘和朱溪花岗岩）具有较低的$\varepsilon_{Hf}(t)$（−10～−3），对应较老的Hf模式年龄（2.0～1.6 Ga），反映其主要来源于长期演化的古老沉积地壳或变质基底重熔；相比之下，I型花岗岩（如东源、阳储岭和香炉山花岗岩）$\varepsilon_{Hf}(t)$相对较高（−7～0），对应较年轻的模式年龄（1.6～1.2 Ga），表明其源区中包含一定比例的新元古代增生地壳物质，具有较年轻的壳源特征。西坞口A型花岗岩的$\varepsilon_{Hf}(t)$也主要集中于负值区间，与I型花岗岩相近，说明其虽然形成于伸展背景，但源区仍以新元古代地壳物质为主，而非直接来源于亏损地幔。

总体而言，不同类型花岗岩虽然成因类型存在差异，但锆石Hf同位素均未表现出明显的亏损地幔



MMEs—暗色微粒包体；CHUR—球粒陨石均一储库

朱溪矿床数据收集自 Pan et al.（2018）；大湖塘矿床数据收集自 Huang and Jiang（2014）；东源矿床数据收集自 Zhang et al.（2021a）；阳储岭矿床数据收集自 Song et al.（2023a）；香炉山矿床数据收集自 Li et al.（2020）；西坞口矿床数据收集自陈雪峰等（2019）

图 8　江南造山带 W-Sn 矿床花岗岩锆石 U-Pb 年龄-ε_{Hf}（t）图

Fig. 8　Zircon U-Pb age-$\varepsilon_{Hf}(t)$ diagram of W–Sn deposits in the Jiangnan Orogen

MMEs–mafic microgranular enclaves; CHUR–chondritic uniform reservoir

Data for the following deposits are from the respective sources: Zhuxi deposit–Pan et al. (2018); Dahutang deposit–Huang and Jiang (2014); Dongyuan deposit–Zhang et al. (2021a); Yangchuling deposit–Song et al. (2023a); Xianglushan deposit–Li et al. (2020); Xiwukou deposit–Chen et al. (2019).

特征，而是共同指示赣东北中生代岩浆作用主要受控于新元古代增生地壳的重熔，并不同程度继承了古老基底物质。这说明新元古代增生地壳不仅是区域中生代花岗岩岩浆的重要物质来源，也是 W 等稀有金属富集的重要载体，为区域大规模 W-Cu-Mo 成矿提供了有利的物质基础。

因此，江南 W 矿带 W-Sn 成矿物质来源可以概括为：①新元古代江南造山带基底中的 W、Sn、Mo、Cu 等元素预富集；②中生代古太平洋板块俯冲-后撤引起的壳幔相互作用和岩浆底侵，触发富 W 地壳部分熔融，变沉积岩和变玄武岩不同比例的熔融可能是 S 型，I 型花岗岩类 W 矿床不同地球化学性质岩浆岩产生的原因；③岩浆分异和岩浆热液出溶，将 W、Sn 等金属从熔体转移到流体中，并通过流体-围岩反应形成矿体。这种认识比传统“壳源高分异花岗岩直接成矿”模型更加完整，也更适合解释江南钨矿带中 S 型、I 型和 A 型花岗岩均可成矿的事实。

5.2　W-Sn 成矿物理化学条件解析

近年 W-Sn 矿床成矿物理化学条件的研究已从宏观流体包裹体温压盐度，进一步深入到矿物微区结构、原位微量元素、氧逸度、pH 值、Ca 来源、挥发分和水-岩反应过程。白钨矿、石英、磷灰石、云母和长石等矿物的原位成分已经成为恢复成矿流体演化的重要载体。

对于江南钨矿带而言，白钨矿微区结构和微量元素研究尤其重要。Dong et al.（2025a）对东源矿床多阶段白钨矿研究表明，白钨矿 REE 进入晶格主要受 $2Ca^{2+}$⇌$REE^{3+}+Na^{+}$ 替代机制控制，不同世代白钨矿记录了成矿流体的多次注入和演化；白钨矿 Eu 异常与 V、As 等变价元素协同变化指示成矿流体氧逸度的波动变化。这一认识表明，江南钨矿带白钨矿化不是一次简单沉淀事件，而是多批次流体输入、流体演化和矿物自沉淀共同作用的结果。

白钨矿沉淀还强烈受 Ca 来源和 pH 值变化控制。传统矽卡岩型钨矿中，Ca 主要来自碳酸盐围岩；但东源等斑岩型 W-Mo 矿床缺乏典型大规模碳酸盐围岩，最新研究指出其 Ca 可来自斑状黑云母花岗岩中钙质斜长石的绢云母化，以及煌斑岩中角闪石等铁镁矿物的黑云母化。Dong et al.（2025a）明

确指出，不同寄主岩显著影响成矿流体演化路径和物理化学性质，水−岩反应是东源矿床多阶段白钨矿沉淀的关键过程。这对江南钨矿带斑岩型W矿床具有重要意义，即白钨矿成矿不一定要求外部碳酸盐围岩大量供Ca，岩体内部斜长石分解和铁镁矿物蚀变同样可以提供Ca源。

从流体成矿动力学角度看，江南钨矿带斑岩型矿床的成矿过程还受控于岩浆流体多阶段出溶和水力破裂。Wu et al.(2019)提出东源斑岩型W-Mo矿床的多旋回成矿模式：岩浆首先在岩体顶部结晶，使下部残余岩浆H_2O过饱和；出溶流体在已结晶顶部与下部岩浆界面聚集，流体压力升高导致上覆岩体破裂并形成第1期脉网；随着岩浆−结晶岩界面向下迁移，这一过程反复发生，最终形成多个嵌套于岩体内部的多旋回W矿体。该模式将“岩浆结晶界面迁移—流体超压—水力破裂—脉网充填”联系起来，是近年来斑岩型钨矿床成矿过程研究的重要进展。

因此，江南钨矿带W-Sn矿床的物理化学条件应从以下几个方面理解：W矿化尤其是白钨矿化通常需要富钨岩浆热液、适宜氧逸度、F等络合剂、Ca供给、pH值升高和强烈水−岩反应；Sn矿化则更依赖高分异、富F-B-Li、较还原的酸性残余熔体−流体体系。二者既可在同一岩浆系统中表现为时间演化关系，也可因花岗岩类型、围岩岩性和流体条件不同而形成不同矿种组合。

5.3 花岗岩类型与W-Sn成矿专属性

花岗岩类型是认识W-Sn成矿专属性的重要基础。传统认识中，大型W-Sn矿床多与壳源高分异S型花岗岩有关，尤其是南岭地区的石英脉型黑钨矿和云英岩型锡矿。然而，江南钨矿带近年的研究表明，W成矿并不局限于S型花岗岩体系，I型甚至弱分异I型花岗岩也可以形成大型—超大型W-Mo、W-Cu和W多金属矿床，如东源、阳储岭、逍遥、上金山、高家塝和竹溪岭等。与A型花岗岩相关的W-Sn-Nb-Ta多金属矿床。因此，花岗岩类型与W-Sn成矿专属性应从S型、I型和A型3个端元分别讨论。

S型花岗岩是江南造山带W-Sn成矿最重要的岩浆类型之一，通常具有壳源、高分异、强过铝质和富F、B、Li、Rb、Cs等挥发分及不相容元素的特征，Eu、Ba、Sr、Ti显著亏损，可见稀土元素四分组效应，最有利于形成W、Sn-W和Sn多金属矿床。与S型花岗岩有关的典型矿床包括赣北大湖塘W-Cu-Mo矿床、朱溪W-Cu矿床、以及东坪W矿床等。其中，黑云母花岗岩阶段多与白钨矿或W-Mo矿化关系密切，而更晚期、更高分异的二云母花岗岩、白云母花岗岩和云英岩化体系则更有利于Sn及Sn-W多金属矿化。S型花岗岩具有较低的岩浆形成温度，全岩Zr饱和温度主要为641～778 ℃，平均为649～778 ℃，锆石饱和温度为564～755℃，锆石Ti温度计平均为684～725 ℃，整体反映其来源于低温壳源重熔体系。与此同时，S型花岗岩锆石氧逸度普遍较低，平均氧逸度为−27.7～−14.6，对应ΔFMQ(FMQ缓冲体系的氧逸度差值)平均值为−7.58～0.76，显示其形成于相对还原的岩浆环境(黄兰椿和蒋少涌，2012, 2013; 蒋少涌等，2015, 2020)。

I型花岗岩传统上多被认为与Cu、Mo、Au等成矿有关，但江南W矿带的研究表明，I型或弱分异I型花岗岩同样可以形成大型W多金属矿床。该类花岗岩多为花岗闪长岩、花岗闪长斑岩、二长花岗斑岩或黑云母花岗岩，常表现为准铝质—弱过铝质、高钾钙碱性和中等分异特征，其成矿专属性主要表现为斑岩型、斑岩−矽卡岩型或矽卡岩型W-Mo-Cu多金属矿化。I型花岗岩整体具有更高的岩浆温度，全岩Zr饱和温度平均为781～800 ℃，明显高于S型花岗岩，锆石Ti温度计平均达776～786 ℃，表明其形成于相对高温、富水的岩浆体系。锆石氧逸度也整体高于S型花岗岩，平均为−15.6～−15.2，对应ΔFMQ值接近FMQ缓冲线(−0.30～−0.14)，反映其具有相对氧化的岩浆性质，这与岛弧型I型花岗岩富水、高氧逸度的岩浆特征相一致(Wu et al., 2019)。典型矿床包括香炉山W矿床、皖南东源W-Mo矿床、赣北阳储岭W-Mo矿床、皖南逍遥W多金属矿床、上金山W-Mo矿床、高家塝W-Mo矿床和竹溪岭W-Mo-Ag矿床等。常伴有Cu、Pb、Zn等多金属共生矿化，其成矿元素组合特征与S型花岗岩成矿体系存在差异(Su et al., 2018)。

A型花岗岩通常形成于伸展或板内构造背景，具有高温、富碱、富F、较高Fe/Mg及富集高场强元素的特征。与S型和I型花岗岩相比，A型花岗岩并非江南W矿带大型白钨矿床的主要成矿母岩，但其强分异和富挥发分特征有利于Sn、Nb-Ta、Li-Rb-Cs、REE等稀有金属富集，局部可形成Sn-W或W-Sn-稀有金属复合矿化(陈雪锋等，2019; Wu et al., 2026)。A型花岗岩则表现出最高的岩浆温度，全

岩 Zr 饱和温度平均达到 836 ℃，锆石饱和温度和锆石 Ti 温度计平均值分别约为 804 ℃ 和 699 ℃。其锆石氧逸度也相对较高，平均约为−12.2，ΔFMQ 平均值为+2.06，表明形成于高温、较高氧逸度的伸展构造背景。典型实例包括江西彭山 Sn 多金属矿田以及皖南青阳—黄山一带晚白垩世 A 型花岗岩相关的 Sn 稀有金属成矿潜力区。

5.4　深部过程与成矿预测

近年矿床学研究最值得重视的前沿，是从单个矿床的成因解释转向深部过程、构造背景和多尺度成矿预测。全球尺度研究显示，W 成矿最有利的背景不是简单的陆内伸展，而是富 W 源区与洋壳俯冲相关伸展环境的耦合。在俯冲相关伸展过程中，板片脱水释放挥发分，地幔提供热量和 He、Ar 等深源挥发分，这些挥发分沿断裂通道进入地壳岩浆源区，并促进含矿花岗岩的高度分异；未来钨矿预测应结合 Nd-Hf 同位素填图、区域地球化学异常和大数据/人工智能模型进行（Yang et al., 2025a）。

上述认识与江南成矿带的区域地质特征高度吻合。江南成矿带发育于江南造山带及其东延部位，位于长江中下游 Cu 多金属成矿带南侧，具有明显的北东向构造−岩浆−成矿带展布，其总资源量巨大。江南成矿带皖南和赣北地区已发现 20 余个斑岩型和矽卡岩型矿床，石英脉型 W-Mo-Sn-Cu 矿床，以及若干 W-Sn 相关的矿化点，成矿时代集中于 150～130 Ma，显示出巨大的成矿潜力和找矿前景。

从深部过程看，江南 W 矿带可以理解为“新元古代富 W 基底—中生代古太平洋板块俯冲/回撤—壳幔相互作用—岩浆分异—岩浆热液成矿”的结果。新元古代江南造山作用形成了富 W、Sn、Mo、Cu 等成矿元素的浅变质沉积−火山岩基底；中生代古太平洋板块俯冲与回撤造成岩石圈伸展、软流圈上涌和岩浆底侵，诱发富 W 基底部分熔融；随后岩浆在浅部岩浆房中发生分离结晶、挥发分富集和流体出溶，最终在岩体穹窿、接触带、层间破碎带、矽卡岩带和裂隙脉网中形成 W-Sn-Mo-Cu 多金属矿化。Zhang et al.（2021a）提出，江南成矿带中与 W 有关的花岗质岩石形成于古太平洋板块回撤触发的压缩−伸展转换环境。

在成矿预测方面，江南成矿带应从传统的“找花岗岩、找蚀变、找矿化露头”转向“深部岩浆系统—构造通道—岩体穹窿—围岩反应界面”的综合预测。王先广等（2023）提出江西 W-Sn 成矿可划分江南和南岭 2 条成矿带，并建立与燕山期 I 型中酸—弱酸性斑岩有关的 Cu-W-Au-Mo 成矿亚系列以及与 S 型酸性花岗岩有关的 W-Sn-Mo-Ag 成矿亚系列，同时提出“异常指方向、标志定靶区、主攻新类型”的预测思路，以及“脉面层体”就矿找矿法和“关键控矿要素识别+地球化学元素示踪+地球物理三维反演+钻探”的综合勘查技术组合。

结合最新研究进展，江南成矿带未来 W 矿找矿预测可重点关注 4 类靶区（蒋少涌等，2020；毛景文等，2020；Ni et al., 2023；王先广等，2023）。①具有 1.8～1.2 Ga 或新元古代富 W 基底同位素信号、W-Sn-Mo-Cu 地球化学异常和燕山期花岗质岩浆叠加的地区，这类地区代表富金属源区与中生代热事件的耦合部位。②北东—北北东向深断裂、断裂交汇部位和岩体穹窿顶部，因为这些部位是岩浆上侵、流体聚集和水力破裂的关键空间。③隐伏花岗质岩体顶部及内外接触带，尤其是斑岩型脉网、矽卡岩、角岩化带和层间破碎带叠加部位。④长江中下游 Cu 多金属带与江南成矿带之间的过渡区，这里可能发育由 Cu-Mo 系统向 W-Mo-Cu 系统过渡的隐伏斑岩−矽卡岩型矿床。

以新元古代富 W 基底为物质基础，以古太平洋板块俯冲−回撤导致的壳幔相互作用为深部驱动，以燕山期花岗质岩浆房分异和挥发分富集为直接成矿机制，以岩体穹窿、断裂裂隙、接触带、层间破碎带和硅钙界面为矿体定位空间。这一新认识不仅能够解释大湖塘、朱溪、阳储岭、东源、香炉山、东坪等不同类型矿床的共生关系，也可为江南成矿带深部和外围寻找隐伏 W-Sn-Mo-Cu 多金属矿床提供理论依据。

5.5　存在问题与研究展望

近些年的相关研究尽管对江南造山带东段赣北—皖南 W-Sn 成矿带岩浆−热液成矿作用已经取得诸多重要认识，但仍有若干关键科学问题存在争议，有待后续多手段约束来加以综合研究。

（1）基底预富集的定量贡献问题仍缺少直接约束。虽然学者们普遍认为双桥山群新元古代变质基底是 W、Sn 的重要物源层，但基底地层 W、Sn 元素预富集是原生沉积形成，还是新元古代造山期变质、流体改造造成的次生富集尚难以区分。现阶段多数研究依靠全岩地球化学与同位素示踪，缺少变质岩中 W、Sn 赋存状态、微区原位的直接证据；同时，基底预富集、幔源热/物质输入、壳幔混合三者

之间的物质贡献占比大多为定性判断，缺少定量模型限定。不同矿床之间S-I-A型花岗岩源区差异，是源区物质组成不同，还是部分熔融条件（温度、压力、水含量、氧逸度）差异主导，仍存在不同学术认识。

（2）白钨矿−黑钨矿的转换机制与锡矿相对匮乏的控制因素尚未厘清。江南W矿带以白钨矿占绝对优势，仅局部出现黑钨矿和锡矿化。同一成矿系统内部白钨矿、黑钨矿产出的时空转变究竟受岩浆氧逸度、流体pH值、硫逸度控制，还是由Ca活度的主导？不同矿床得到的认识并不统一。同为富W基底背景，相较于南岭成矿带，江南造山带Sn矿床数量少、规模有限，这是由源区Sn初始含量、部分熔融程度造成的还是由岩浆−热液演化过程中Sn的迁移−沉淀行为差异造成的，尚未形成统一解释；该区A型花岗岩为何仅形成Sn-W-Rb稀有金属矿化，而难以形成超大规模Sn矿床，也值得进一步剖析。

（3）流体成矿动力学过程的精细演化仍存在不确定性。现有流体包裹体、矿物地球化学大多记录的是成矿期或主成矿阶段信号，而岩浆期—岩浆晚期和岩浆−热液过渡阶段的原始流体直接记录相对较为缺乏。富F-H_2O岩浆中W、Sn的迁移形式，F、Cl挥发分在不同类型花岗岩体系中对金属活化、迁移的差异控制，还需要更多高温高压实验与原位观测数据的支撑。斑岩体系多旋回成矿模式中，岩浆−结晶界面迁移、水力破裂、流体脉冲的时间尺度以及其与矿物记录的成矿年龄如何匹配，年龄数据的误差范围内是否真正代表多期流体事件，部分矿床仍存在解释空间。白钨矿钙质来源分为围岩碳酸盐分解与岩体硅酸盐蚀变2类，但二者在同一个矿床内部的相对贡献如何定量区分，目前手段仍然有限。

（4）区域动力学背景的不同假说有待进一步甄别。主流观点将150～130 Ma大规模W-Sn成矿归因于古太平洋板块俯冲后撤、岩石圈伸展，但也有观点强调陆内造山、板内岩石圈拆沉的贡献。燕山期多期岩浆−成矿事件究竟是板片俯冲远程效应主导，还是受先存江南造山带古老断裂构造再活化的控制？深部壳幔相互作用是以提供热量为主，还是同时带入可观成矿金属与挥发分？不同模型各有证据，尚不能完全排他。区域上为什么巨量W成矿集中局限在赣北—皖南狭小范围，而江南造山带其他段落成矿强度显著降低？其控制机制还缺少大尺度综合对比分析。

（5）隐伏矿床勘查理论向找矿勘查实践转化仍存在瓶颈。文章提出断裂交汇、隐伏岩体穹窿等4类找矿靶区，但如何利用Nd-Hf同位素填图、物化探异常，有效区分“有矿岩体”和无矿高分异花岗岩，识别含矿岩浆系统与非成矿花岗岩的判别标志，仍然是勘查实际中的难点。很多隐伏岩体地表露头极少，地表蚀变、化探弱异常难以直接指示深部巨量矿化，成矿潜力评价指标还需要更多经钻探验证的矿床数据进行校准。

上述科学问题的解决，需要结合高温高压实验、矿物原位微区分析、高精度多矿物联合定年、大尺度同位素填图等手段，同时配合深部勘查钻探成果，开展多学科交叉研究，从而不断完善江南W-Sn成矿理论，实现找矿突破。

作者贡献声明：蒋少涌负责全文构思、撰写、和修改；熊索菲负责阳储岭和大湖塘数据收集、整理，撰写；章伟负责朱溪数据收集、整理，撰写；苏慧敏负责图件收集、整理，撰写和修改；董加祥负责香炉山和东源数据收集、整理，撰写；陈威，尹近，胡大龙，彭宁俊参与了部分矿床的研究及数据整理、图件编制。所有作者均阅读并同意稿件的提交和发表。

Author's Contributions: JIANG Shaoyong was responsible for full-text writing and revision; XIONG Suofei performed data collection, processing, and writing for the Yangchuling and Dahutang deposits; ZHANG Wei carried out data collection, processing, and writing for the Zhuxi deposit; SU Huimin contributed to figure collection, processing, manuscript writing, and revision. DONG Jiaxiang completed data collection, processing, and writing for the Xianglushan and Dongyuan deposits; CHEN Wei, YIN Jin, HU Dalong, and PENG Ningjun participated in research, data processing, and figure compilation for individual deposits. All authors have read and approved the submission and publication of this manuscript.

利益冲突声明：本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。

Conflict of Interests: All authors declare no conflict of interests.

References

CHAPPELL B W, WHITE A J R, 1974. Two contrasting granite types[J].

Pacific Geology, 8: 173-174.

CHEN G H, SHU L S, SHU L M, et al., 2016. Geological characteristics and mineralization setting of the Zhuxi tungsten (copper) polymetallic deposit in the Eastern Jiangnan Orogen[J]. Science China Earth Sciences, 59(4): 803-823.

CHEN M S, XIANG X K, ZHAN G L, et al., 2020. Geochronology, geochemical characteristics of the post-mineralization Late Yanshanian granite porphyry and its constraints for the terminal of the metallogeny in the No. 1 ore belt of the Dahutang district[J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 43(5): 401-416. (in Chinese with English abstract)

CHEN X F, FAN Y, YU J H, et al., 2018. First discovery of the rubidium deposit in the Jiangnan uplift (Anhui segment) and its significance[J]. Mineral Deposits, 37(6): 1349-1354. (in Chinese)

CHEN X F, FAN Y, YU J H, et al., 2019. Zircon U-Pb dating and Lu-Hf isotopes of the ore-associated porphyry in the Xiwukou Rb deposit, Jiangnan Uplift Belt (Anhui Province), SE China[J]. Acta Petrologica Sinica, 35(12): 3797-3810. (in Chinese with English abstract)

CHEN X F, FAN Y, ZHOU T F, et al., 2022. The Xiwukou Rb deposit in the Jiangnan uplift belt, Ningguo City, Anhui Province: Rb occurrence and ore-forming mechanisms[J]. Earth Science Frontiers, 29(1): 65-80. (in Chinese with English abstract)

CHEN Z H, WANG D H, SHENG J F, et al., 2015. The metallogenic regularity of tin deposits in China[J]. Acta Geologica Sinica, 89(6): 1026-1037. (in Chinese with English abstract)

CHU P L, DUAN Z, LIAO S B, et al., 2019. Petrogenesis and tectonic significances of Late Mesozoic granitoids in the Dahutang area, Jiangxi Province: constraints from zircon U-Pb dating, mineral-chemistry, geochemistry and Hf isotope[J]. Acta Geologica Sinica, 93(7): 1687-1707. (in Chinese with English abstract)

DAI P, 2018. The mineralization of the Xianglushan skarn W deposit, Jiangxi Province[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences. (in Chinese with English abstract)

DAI P, MAO J W, WU S H, et al., 2018. Multiple dating and tectonic setting of the Early Cretaceous Xianglushan W deposit, Jiangxi Province, South China[J]. Ore Geology Reviews, 95: 1161-1178.

DONG J X, PAN X F, JIANG S Y, et al., 2025a. Texture and geochemistry of multi-stage hydrothermal scheelite in the Dongyuan porphyry-type W-Mo deposit, South China: implications for the ore-forming process and fluid metasomatism[J]. American Mineralogist, 110(12): 1977-1995.

DONG J X, XIONG S F, JIANG S Y, et al., 2025b. Origin of Ligongling ore-bearing breccia pipe in the Yangchuling porphyry W-Mo deposit, South China: constraints from apatite chemistry and U-Pb dating[J]. Ore Geology Reviews, 183: 106697.

DONG J X, XIONG S F, JIANG S Y, et al., 2026. Multi-stage scheelite geochemistry constrains the genesis of tungsten mineralization at the Ligongling breccia pipe in the Yangchuling porphyry system, South China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 287: 108091.

DU Y D, YU X Q, LIU J J, et al., 2011a. Characteristics of ore-forming fluids and sources of ore-forming materials in the Dongyuan W-Mo deposit, southern Anhui Province[J]. Geology in China, 38(5): 1334-1346. (in Chinese with English abstract)

DU Y D, YU X Q, ZHOU X, et al., 2011b. The composition of sulfur and lead isotope and the source of metallogenic material from Xiyuan and Jiangjia ore blocks in the Dongyuan W-Mo deposit in Southern Anhui Province[J]. Geoscience, 25(5): 861-868. (in Chinese with English abstract)

FAN X K, 2019. Study on metallogenic mechanism of the giant Dahutang tungsten polymetallic orefield in Jiangxi Province, China[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences. (in Chinese with English abstract)

FENG C Y, ZHANG D Q, XIANG X K, et al., 2012. 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)

FENG C Y, WANG H, XIANG X K, et al., 2018. Late Mesozoic granite-related W-Sn mineralization in the northern Jiangxi region, SE China: a review[J]. Journal of Geochemical Exploration, 195: 31-48.

FU J Z, XU S F, WANG M H, et al., 2011. Geologic features and ore-controlling factors of Dongyuan tungsten and molybdenum deposit, Anhui Province[J]. Mineral Exploration, 2(5): 501-511. (in Chinese with English abstract)

GAO R, ZHANG M H, WANG G H, et al., 2023. Stable isotopic geochemistry of the Xianglushan tungsten deposit in the Jiangnan tungsten metallogenic belt[J]. Acta Mineralogica Sinica, 43(4): 501-511. (in Chinese with English abstract)

HE X L, ZHANG D, DI Y J, et al., 2022. Evolution of the magmatic-hydrothermal system and formation of the giant Zhuxi W-Cu deposit in South China[J]. Geoscience Frontiers, 13(1): 101278.

HOLWELL D A, FIORENTINI M, MCDONALD I, et al., 2019. A metasomatized lithospheric mantle control on the metallogenic signature of post-subduction magmatism[J]. Nature Communications, 10(1): 3511.

HONG J X, ZHANG H Y, LI D F, et al., 2022. In situ LA-ICP-MS U-Pb geochronology and geochemical characteristics of garnet from the Zhuxi skarn W-Cu deposit, South China[J]. Ore Geology Reviews, 140: 104577.

HU D L, 2023. Petrogenesis and ore genetic mechanism of Dahutang W-Cu polymetallic deposit in Northern Jiangxi Province, China[D]. Wuhan: China University of Geosciences. (in Chinese with English abstract)

HU Z H, LOU F S, LI Y M, et al., 2018. Geochrology, geochemistry and petrogenesis of ore-related granite in the Dongping tungsten deposit in Wuning County, Jiangxi Province[J]. Earth Science, 43(S1): 243-263. (in Chinese with English abstract)

HU Z H, WANG X G, CHEN Y C, et al., 2020. Metallogenic regularity in Jiangnan metallogenic of tungsten belt (Jiangxi Section)[J]. China Tungsten Industry, 35(5): 10-19. (in Chinese with English abstract)

HUA R M, LI G L, ZHANG W L, et al., 2010. A tentative discussion on differences between large-scale tungsten and tin mineralizations in South China[J]. Mineral Deposits, 29(1): 9-23. (in Chinese with English abstract)

HUANG L C, JIANG S Y, 2012. 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)

HUANG L C, JIANG S Y, 2013. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of the tungsten-bearing porphyritic granite in the Dahutang tungsten deposit, Jiangxi Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 29(12): 4323-4335. (in Chinese with English abstract)

HUANG L C, JIANG S Y, 2014. Highly fractionated S-type granites from the giant Dahutang tungsten deposit in Jiangnan Orogen, Southeast China: geochronology, petrogenesis and their relationship with W-mineralization[J]. Lithos, 202-203: 207-226.

JIANG S Y, PENG N J, HUANG L C, et al., 2015. Geological characteristic and ore genesis of the giant tungsten deposits from the Dahutang ore-concentrated district in northern Jiangxi Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 31(3): 639-655. (in Chinese with English abstract)

JIANG S Y, ZHAO K D, JIANG H, et al., 2020. Spatiotemporal distribution, geological characteristics and metallogenic mechanism of tungsten and tin deposits in China: an overview[J]. Chinese Science Bulletin, 65(33): 3730-3745. (in Chinese with English abstract)

KONG F B, WEN R T, QU Y C, et al., 2021. Metallogenic geological characteristics and ore-controlling factors of hornstone scheelite in the periphery of Xianglushan, Jiangxi Province[J]. China Tungsten Industry, 36(3): 11-18. (in Chinese with English abstract)

LI H W, ZHAO Z, CHEN Z Y, et al., 2021. Genetic relationship between the two-period magmatism and W mineralization in the Dahutang ore-field, Jiangxi Province: evidence from zircon geochemistry[J]. Acta Petrologica Sinica, 37(5): 1508-1530. (in Chinese with English abstract)

LI X Y, ZHANG J R, LAI C K, 2020. Comparison of magma oxygen fugacity and zircon Hf isotopes between Xianglushan tungsten-bearing granite and late Yanshanian granites in Jiangxi Province, South China[J]. Minerals, 10(2): 106.

LIN L, ZHAN G L, YU X P, 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 R H, YIN Q Q, XIANG X K, et al., 2023. Molybdenite Re-Os isotopic age of the Kunshan Mo-W-Cu polymetallic deposit in the Jiangxi Province and its evolution of metallogenic geodynamics[J]. Geology in China, 50(4): 1176-1187. (in Chinese with English abstract)

LIU B Q, Yu J H, Jiang W, et al., 2023. Geochemistry of the meta-sedimentary rocks of the Shuangqiaoshan Group and their genetic link to tungsten mineralization in northern Jiangxi, South China[J]. Acta Geologica Sinica, 97(2): 433-447. (in Chinese with English abstract)

LIU G G, WU Y C, WEI W F, et al., 2024. The Re-Os isotopic dating of molybdenite from the Shimensi tungsten-copper polymetallic deposit in the northern Jiangxi and its geological significance[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 43(1): 192-210. (in Chinese with English abstract)

LIU J Y, WU G Q, 1988. Porphyry tungsten deposits and their ore-forming granites[J]. Journal of Hebei College of Geology, 11(2): 47-58. (in Chinese with English abstract)

LU S D, WANG S L, GAO W L, et al., 2004. Study on metallogenic characteristics and genesis of Sn, Pb and Zn polymetallic deposits in Penshan region, Jiangxi Province[J]. Journal of East China Institute of Technology, 27(3): 201-208. (in Chinese with English abstract)

MAO J W, XIONG B K, LIU J, et al. , 2017. Molybdenite Re/Os dating, zircon U-Pb age and geochemistry of granitoids in the Yangchuling porphyry W-Mo deposit (Jiangnan tungsten ore belt), China: implications for petrogenesis, mineralization and geodynamic setting[J]. Lithos, 286-287: 35-52.

MAO J W, WU S H, SONG S W, et al., 2020. The world-class Jiangnan tungsten belt: geological characteristics, metallogeny, and ore deposit model[J]. Chinese Science Bulletin, 65(33): 3746-3762. (in Chinese with English abstract)

MAO Z H, CHENG Y B, LIU J J, et al., 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.

MAO Z H, LIU J J, MAO J W, et al., 2015. 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, 28(2): 816-836.

MENG X, ZHANG D Y, ZHANG R Q, et al., 2022. Geochronology and geochemical characteristics of ore-forming granite in Maopengdian Sn deposit, northern Jiangxi Province[J]. Ore Geology Reviews, 149: 105098.

MENG Y F, JIANG S Y, 2015. Chronology, geochemistry and ore-forming significance of the granite porphyry in the Pingmiao section of the Dahutang W Deposit, Jiangxi[J]. Acta Mineralogica Sinica, 35(S1): 715-716. (in Chinese)

NI P, PAN J Y, HAN L, et al., 2023. Tungsten and tin deposits in South China: temporal and spatial distribution, metallogenic models and prospecting directions[J]. Ore Geology Reviews, 157: 105453.

NIE L Q, ZHOU T F, WAGN F Y, et al., 2018. Scheelite trace element compositions from Anhui Dongyuan porphyry deposit: implications for tungsten mineralization[J]. Mineral Deposits, 37(6): 1237-1246. (in Chinese with English abstract)

OUYANG Y P, HOU Z Q, HE X L, et al., 2025. Geochronological, geochemical and isotopic constraints on the genesis of Cu mineralization in the giant Zhuxi W-Cu deposit, South China[J]. Ore Geology Reviews, 184: 106767.

PAN X F, HOU Z Q, LI Y, et al., 2017. Dating the giant Zhuxi W-Cu deposit (Taqian-Fuchun Ore Belt) in South China using molybdenite Re-Os and muscovite Ar-Ar system[J]. Ore Geology Reviews, 86: 719-733.

PAN X F, HOU Z Q, ZHAO M, et al. , 2018. Geochronology and geochemistry of the granites from the Zhuxi W-Cu ore deposit in South China: implication for petrogenesis, geodynamical setting and mineralization[J]. Lithos, 304-307: 155-179.

PAN X F, HOU Z Q, ZHAO M, et al., 2020. Fluid inclusion and stable isotope constraints on the genesis of the world-class Zhuxi W(Cu) skarn deposit in South China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 190: 104192.

PENG H M, YUAN Q, LI Q Y, et al., 2015. U-Pb ages, Hf isotope of zircons from biotite granite porphyry in Dalingshang tungsten deposite, Northwestern Jiangxi, and relations to the W-Cu mineralization[J]. Geological Review, 61(5): 1089-1098. (in Chinese with English abstract)

PENG N J, JIANG S Y, XIONG S F, et al., 2018. Fluid evolution and ore genesis of the Dalingshang deposit, Dahutang W-Cu ore field, northern Jiangxi Province, South China[J]. Mineralium Deposita, 53(8): 1079-1094.

PITCHER W S, 1997. The nature and origin of granite[M]. 2nd ed. London: Chapman & Hall: 1-387.

QIN Y, WANG D H, WU L B, et al., 2010. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the mineralized porphyry in the Dongyuan W deposit in Anhui Province and its geological significance[J]. Acta Geologica Sinica, 84(4): 479-484. (in Chinese with English abstract)

QIU Z H, SONG S W, MAO J W, et al., 2024. Multiple stages of skarnization in the world-class Zhuxi scheelite skarn deposit, South China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 261: 105980.

ROMER R L, KRONER U, 2016. Phanerozoic tin and tungsten mineralization-tectonic controls on the distribution of enriched protoliths and heat sources for crustal melting[J]. Gondwana Research, 31: 60-95.

SHENG J F, CHEN Z H, LIU L J, et al., 2015. Outline of metallogeny of tungsten deposits in China[J]. Acta Geologica Sinica, 89(6): 1038-1050. (in Chinese with English abstract)

SHU L S, WANG J Q, YAO J L, 2019. Tectonic evolution of the eastern Jiangnan region, South China: new findings and implications on the assembly of the Rodinia supercontinent[J]. Precambrian Research, 322: 42-65.

SONG S W, MAO J W, XIE G Q, et al. , 2018a. The formation of the world-class Zhuxi scheelite skarn deposit: implications from the petrogenesis of scheelite-bearing anorthosite[J]. Lithos, 312-313: 153-170.

SONG S W, MAO J W, ZHU Y F, et al. , 2018b. Partial-melting of fertile metasedimentary rocks controlling the ore formation in the Jiangnan porphyry-skarn tungsten belt, South China: a case study at the giant Zhuxi W-Cu skarn deposit[J]. Lithos, 304-307: 180-199.

SONG S W, MAO J W, XIE G Q, et al., 2019. In situ LA-ICP-MS U-Pb geochronology and trace element analysis of hydrothermal titanite from the giant Zhuxi W (Cu) skarn deposit, South China[J]. Mineralium Deposita, 54(4): 569-590.

SONG S W, MAO J W, XIE G Q, et al., 2021. Petrogenesis of scheelite-bearing albitite as an indicator for the formation of a world-class scheelite skarn deposit: a case study of the Zhuxi tungsten deposit[J]. Economic Geology, 116(1): 91-121.

SONG S W, MAO J W, XIE G Q, et al., 2022. Deciphering deep-seated, highly fractionated, and reduced granitic magma systems associated with world-class scheelite skarn ores: a case study of the Zhuxi deposit, South China[J]. Ore Geology Reviews, 149: 105084.

SONG S W, MAO J W, ROMER R L, et al., 2023a. The petrogenesis of the Yangchuling porphyry W-Mo deposit, South China, an oxidized tungsten systems[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 178(7): 39.

SONG S W, MAO J W, ZHANG Z C, et al. , 2023b. Lamprophyre magmatism triggering the formation of the Zhuxi granites related to the world-largest scheelite skarn deposit in South China[J]. Lithos, 444-445: 107106.

SONG S W, MAO J W, ROMER R L, et al., 2024. Hosts of Sn in reduced deep-seated W skarn systems: a case study on the world-class scheelite skarn deposit, Zhuxi, South China[J]. Mineralium Deposita, 59(7): 1433-1454.

SONG W L, YAO J M, CHEN H Y, et al., 2018c. A 20 m. y. long-lived successive mineralization in the giant Dahutang W-Cu-Mo deposit, South China[J]. Ore Geology Reviews, 95: 401-407.

SONG W L, YAO J M, CHEN H Y, et al., 2018d. Mineral paragenesis, fluid inclusions, H-O isotopes and ore-forming processes of the giant Dahutang W–Cu–Mo deposit, South China[J]. Ore Geology Reviews, 99: 116-150.

SU H M, JIANG S Y, 2017. A comparison study of tungsten-bearing granite and related mineralization in the northern Jiangxi-southern Anhui provinces and southern Jiangxi Province in South China[J]. Science China Earth Sciences, 60(11): 1942-1958.

SU Q W, MAO J W, WU S H, et al. , 2018. Geochronology and geochemistry of the granitoids and ore-forming age in the Xiaoyao tungsten polymetallic skarn deposit in the Jiangnan Massif tungsten belt, China: implications for their petrogenesis, geodynamic setting, and mineralization[J]. Lithos, 296-299: 365-381.

SUN K K, CHEN B, DENG J, 2019. Ore genesis of the Zhuxi supergiant W-Cu skarn polymetallic deposit, South China: evidence from scheelite geochemistry[J]. Ore Geology Reviews, 107: 14-29.

SUN K K, CHEN W, 2025. Biotite in highly evolved granite from the Zengjialong Sn ore deposit, China: insights into magma source and evolution[J]. Acta Geologica Sinica, 99(3): 760-777. (in Chinese with English abstract)

TIAN B S, YUAN B Y, 2008. Geological characteristics and prospecting criteria of Xianglushan tungsten deposit, Northwestern Jiangxi Province[J]. Geological Journal of China Universities, 14(1): 114-119. (in Chinese with English abstract)

VERVOORT J D, PATCHETT P J, BLICHERT-TOFT J, et al., 1999. Relationships between Lu-Hf and Sm-Nd isotopic systems in the global sedimentary system[J]. Earth and Planetary Science Letters, 168(1-2): 79-99.

WANG D E, ZHOU X, YU X Q, et al., 2011. SHRIMP zircon U-Pb dating and characteristics of Hf isotopes of the granodiorite porphyries in the Dongyuan W-Mo ore district, Qimen area, southern Anhui[J]. Geological Bulletin of China, 30(10): 1514-1529. (in Chinese with English abstract)

WANG G H, ZHOU T, GAO J F, et al., 2025. Geochronology and geochemical characteristics of the concealed biotite granite in the giant Xianglushan tungsten deposit, Northwestern Jiangxi Province, China, and their geological significance[J]. Geotectonica et Metallogenia, 49(4): 989-1002. (in Chinese with English abstract)

WANG K, LI F, FAN D B, 2016. Analysis the structure-fluid-ore forming system of the Xianglushan skarn tungsten deposit in Xiushui, Jiangxi Province[J]. China Tungsten Industry, 31(2): 1-5. (in Chinese with English abstract)

WANG X G, CAO S H, GONG L X, et al., 2023. Tungsten-tin polymetallic

metallogenic series and prospecting in Jiangxi Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 44(5): 916-932. (in Chinese with English abstract)

WANG X L, ZHOU J C, CHEN X, et al., 2017. Formation and evolution of the Jiangnan orogen[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 36(5): 714-735. (in Chinese with English abstract)

WANG Y Y, VAN DEN KERKHOF A, XIAO Y L, et al., 2017. Geochemistry and fluid inclusions of scheelite-mineralized granodiorite porphyries from southern Anhui Province, China[J]. Ore Geology Reviews, 89: 988-1005.

WU K Y, GAO X Y, HOU Q, et al., 2026. Magmatic–hydrothermal mineralization processes in the Xiwukou Sn–W–Rb deposit, Jiangnan orogenic belt: constraints from multi-mineral U–Pb geochronology[J]. Mineralium Deposita, 61: 1467-1487

WU S H, WANG X D, XIONG B K, 2014. Fluid inclusion studies of the Xianglushan skarn tungsten deposit, Jiangxi Province, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 30(1): 178-188. (in Chinese with English abstract)

WU S H, SUN W D, WANG X D, 2019. A new model for porphyry W mineralization in a world-class tungsten metallogenic belt[J]. Ore Geology Reviews, 107: 501-512.

WU S H, MAO J W, HETHERINGTON C J, 2024. The production of parallel world-class W and Cu metallogenic belts linked to an asymmetric slab window[J]. GSA Bulletin, 136(9-10): 3850-3860.

XIANG X K, LIU X M, ZHAN G N, 2012. Discovery of Shimensi superlarge tungsten deposit and its prospecting significance in Dahutang area, Jiangxi Province[J]. Resources Survey & Environment, 33(3): 141-151. (in Chinese with English abstract)

XIANG X K, WANG P, SUN D M, et al., 2013. Re-Os isotopic age of molybdeinte from the Shimensi tungsten polymetallic deposit in northern Jiangxi Province and its geological implications[J]. Geological Bulletin of China, 32(11): 1824-1831. (in Chinese with English abstract)

XIANG X K, YIN Q Q, SUN K K, et al., 2015. Origin of the Dahutang syn-collisional granite-porphyry in the middle segment of the Jiangnan orogen: zircon U-Pb geochronologic, geochemical and Nd-Hf isotopic constraints[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 34(5): 581-600. (in Chinese with English abstract)

XIONG S F, JIANG S Y, PI D H, et al., 2025. Magmatic-hydrothermal ore-forming processes and metal enrichment mechanisms of the large Yangchuling porphyry W-Mo mineralizing system in South China[J]. GSA Bulletin, 137(7-8): 3409-3428.

XU B, JIANG S Y, LUO L, et al., 2017. Origin of the granites and related Sn and Pb–Zn polymetallic ore deposits in the Pengshan district, Jiangxi Province, South China: constraints from geochronology, geochemistry, mineral chemistry, and Sr–Nd–Hf–Pb–S isotopes[J]. Mineralium Deposita, 52(3): 337-360.

XU K Q, ZHU J C, 1986. Tin/tungsten-bearing granites in South China and their metallogenetic relations[J]. Bulletin of the Geological Society of Malaysia, 20: 579-599.

XU Y M, 2019. Intrusive characteristics of the tungsten molybdenum ore body in yangzhuling, Duchang County, Jiangxi Province[J]. World Nonferrous Metals, 44(21): 66-67. (in Chinese with English abstract)

XU Y M, WANG T C, WANG W F, et al., 2023. Genesis of Yanshanian magmatic rocks in Yangchuling tungsten polymetallic deposits in the eastern Jiangnan Orogenic Belt[J]. China Tungsten Industry, 38(2): 8-21. (in Chinese with English abstract)

YANG J H, WU J H, ZHOU M F, et al., 2025a. Mantle contributions to global tungsten recycling and mineralization[J]. Communications Earth & Environment, 6(1): 510.

YANG S W, LOU F S, DING P X, et al., 2020. Mesozoic magmatism and tungsten mineralization in Northern Jiangxi[J]. China Tungsten Industry, 35(5): 53-60. (in Chinese with English abstract)

YANG S W, LOU F S, XU C, et al., 2022. Two significant quartz-wolframite-veining mineralization events in the Jiangnan Orogen, South China: constraints from *in-situ* U–Pb dating of wolframite in the Dongping and Dahutang W-(Cu-Mo) deposits[J]. Ore Geology Reviews, 141: 104598.

YANG Y S, PAN X F, HOU Z Q, et al., 2021. Redox states and protoliths of Late Mesozoic granitoids in the eastern Jiangnan Orogen: implications for W, Mo, Cu, Sn, and (Au) mineralization[J]. Ore Geology Reviews, 134: 104038.

YANG Y S, PAN X F, LIU B S, et al., 2025b. Newly discovered veinlet-disseminated type scheelite mineralization in the deep-seated biotite monzogranite from the giant Zhuxi deposit: implications for source and evolution of ore-forming fluid[J]. Ore Geology Reviews, 177: 106451.

YE H M, ZHANG X, ZHU Y H, 2016. In-situ monazite U-Pb geochronology of granites in Shimensi tungsten polymetallic deposit, Jiangxi Province and its geological significance[J]. Geotectonica et Metallogenia, 40(1): 58-70. (in Chinese with English abstract)

YE Z Y, ZHANG Z Y, PAN X F, et al., 2016. A study of the relationship of W-Cu-Mo mineralization features of the Shimensi ore district in northern Dahutang, Jiangxi Province[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 35(3): 457-468. (in Chinese with English abstract)

YIN Q Q, TANG J X, DAI J J, et al. , 2025. Zircon records water-fluxed melting in origin of W-rich magma: insights from the Yangchuling porphyry W-Mo deposit, South China[J]. Lithos, 514-515: 108197.

YU Z D, XIANG X K, TAN R, et al., 2020. Zircon U-Pb chronology, geochemistry and geological significance of coarse muscovite granite in Pingmiao mining area of Dahutang, North Jiangxi[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 50(5): 1505-1517. (in Chinese with English abstract)

YUAN L L, CHI G X, WANG M Q, et al., 2019. Characteristics of REEs and trace elements in scheelite from the Zhuxi W deposit, South China: implications for the ore-forming conditions and processes[J]. Ore Geology Reviews, 109: 585-597.

ZENG Q Q, HU Z H, WANG X G, et al., 2019. Geochronology of the Yangchuling tungsten-molybdenum depoist in Duchang County, Jiangxi Province[J]. Geology in China, 46(4): 841-849. (in Chinese with English abstract)

ZHAI M G, WU F Y, HU R Z, et al., 2019. Critical metal mineral resources: current research status and scientific issues[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 33(2): 106-111. (in Chinese with English abstract)

ZHANG A P, SUN T, TAN S C, et al., 2021a. Geochronology, geochemistry

and oxidation state of the Dongyuan biotite granite in the Jiangnan tungsten ore belt: implications for the I-type granite-related W mineralization[J]. Ore Geology Reviews, 133: 104080.

ZHANG J J, MEI Y P, WANG D H, et al., 2008. Isochronology study on the Xianglushan scheelite deposit in North Jiangxi Province and its geological significance[J]. Acta Geologica Sinica, 82(7): 927-931. (in Chinese with English abstract)

ZHANG M Y, FENG C Y, LI D X, et al., 2016. Geochronological study of the Kunshan W-Mo-Cu deposit in the Dahutang area, Northern Jiangxi Province and its geological significance[J]. Geotectonica et Metallogenia, 40(3): 503-516. (in Chinese with English abstract)

ZHANG W, JIANG S Y, GAO T S, et al., 2020a. Constraints on the petrogenesis and metallogenic setting of lamprophyres in the world-class Zhuxi W-Cu skarn deposit, South China[J]. Minerals, 10(7): 642.

ZHANG W, JIANG S Y, GAO T S, et al., 2020b. The effect of magma differentiation and degassing on ore metal enrichment during the formation of the world-class Zhuxi W-Cu skarn deposit: evidence from U-Pb ages, Hf isotopes and trace elements of zircon, and whole-rock geochemistry[J]. Ore Geology Reviews, 127: 103801.

ZHANG W, JIANG S Y, OUYANG Y P, et al., 2021b. Geochronology and textural and compositional complexity of apatite from the mineralization-related granites in the world-class Zhuxi W-Cu skarn deposit: a record of magma evolution and W enrichment in the magmatic system[J]. Ore Geology Reviews, 128: 103885.

ZHANG X N, PAN J Y, LEHMANN B, et al., 2023. Diagnostic REE patterns of magmatic and hydrothermal apatite in the Zhuxi tungsten skarn deposit, China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 252: 107271.

ZHANG Y, PAN J Y, MA D S, et al., 2017. Re–Os molybdenite age of Dawutang tungsten ore district of northwest Jiangxi and its geological significance[J]. Mineral Deposits, 36(3): 749-769. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Y X, 1982. Geological characteristics and origin of Yangchuling porphyry W-Mo-deposit[J]. Geochimica, 11(2): 122-132. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Z H, 2014. Research on metallization of the Dahutang tungsten multimetal field, Jiangxi Province, China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). (in Chinese with English abstract)

ZHANG Z H, HU B J, ZHANG D, et al., 2020. Zircon U-Pb age, geochemistry and Hf isotope characteristics of Shimensi granite porphyry in northern Jiangxi Province and its constraint on mineralization[J]. Geological Bulletin of China, 39(8): 1267-1284. (in Chinese with English abstract)

ZHAO M, HOU Z Q, ZENG R L, et al., 2026. Geochemistry and geochronology of wolframite and scheelite from the Zhuxi W(Cu) polymetallic deposit, South China[J]. Ore Geology Reviews, 193: 107304.

ZHAO Q Q, ZHAI D G, HONG J X, et al., 2023. Scheelite U-Pb geochronology and trace element geochemistry fingerprint W mineralization in the giant Zhuxi W deposit, South China[J]. American Mineralogist, 108(9): 1781-1793.

ZHAO W, ZHANG H J, 2022. Geochemical characteristics of skarn minerals and causative granites of the Xianglushan tungsten skarn deposit, Jiangxi, South China[J]. Acta Petrologica Sinica, 38(2): 483-494. (in Chinese with English abstract)

ZHENG Y L, ZHAO Z, ZHANG C Q, et al., 2022. Genetic relationship between the two-period magmatism and tungsten mineralization in the Yangchuling deposit, Jiangxi Province: evidence from biotite geochemistry[J]. Acta Petrologica Sinica, 38(2): 495-512. (in Chinese with English abstract)

ZHOU J, GE W Y, JIANG Y H, et al., 2015. Petrochemistry and mineralogy of Dongyuan tungsten-bearing pluton in eastern Jiangnan orogen[J]. Geochimica, 44(2): 117-130. (in Chinese with English abstract)

ZHOU X, YU X Q, WANG D E, et al., 2011. Characteristics and geochronology of the W, Mo-bearing granodiorite porphyry in Dongyuan, southern Anhui[J]. Geoscience, 25(2): 201-210. (in Chinese with English abstract)

ZUO Q S, ZHANG P, ZHOU C J, 2014. Basic characteristics of Yanshanian magmatic rocks and its implication for mineralization in Dahutang ore-concentrated area of Jiangxi[J]. Mineral Resources and Geology, 28(5): 519-526. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

陈国华，舒良树，舒立旻，等，2015. 江南东段朱溪钨(铜)多金属矿床的地质特征与成矿背景[J]. 中国科学：地球科学，45(12)：1799-1818.

陈茂松，项新葵，占岗乐，等，2020. 大湖塘矿集区一矿带燕山晚期成矿后花岗斑岩年代学、地球化学特征及对成矿结束时间的约束[J]. 东华理工大学学报(自然科学版)，43(5)：401-416.

陈雪锋，范裕，庾江华，等，2018. 江南隆起带(安徽段)首次发现铷矿床及其意义[J]. 矿床地质，37(6)：1349-1354.

陈雪锋，范裕，庾江华，等，2019. 江南隆起带(安徽段)西坞口铷矿床岩浆岩锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素特征研究[J]. 岩石学报，35(12)：3797-3810.

陈雪锋，范裕，周涛发，等，2022. 江南隆起带安徽宁国西坞口矿床铷的赋存状态及其成矿机制研究[J]. 地学前缘，29(1)：65-80.

陈郑辉，王登红，盛继福，等，2015. 中国锡矿成矿规律概要[J]. 地质学报，89(6)：1026-1037.

褚平利，段政，廖圣兵，等，2019. 江西大湖塘中生代花岗岩的成因与构造指示意义：年代学、矿物化学、地球化学与 Lu-Hf 同位素制约[J]. 地质学报，93(7)：1687-1707.

戴盼，2018. 江西香炉山矽卡岩型钨矿成矿作用[D]. 北京：中国地质科学院.

杜玉雕，余心起，刘家军，等，2011a. 皖南东源钨钼矿成矿流体特征和成矿物质来源[J]. 中国地质，38(5)：1334-1346.

杜玉雕，余心起，周翔，等，2011b. 皖南东源钨钼矿床西源和江家矿段硫、铅同位素组成及成矿物质来源研究[J]. 现代地质，25(5)：861-868.

樊献科，2019. 江西大湖塘超大型钨多金属矿田成矿机制研究[D]. 北京：中国地质科学院.

丰成友，张德全，项新葵，等，2012. 赣西北大湖塘钨矿床辉钼矿 Re-Os 同位素定年及其意义[J]. 岩石学报，28(12)：3858-3868.

傅建真，徐生发，汪明辉，等，2011. 安徽东源钨钼矿床地质特征及控矿因素[J]. 矿产勘查，2(5)：501-511.

高任，张明华，汪国华，等，2023. 江南钨矿带香炉山钨矿床稳定同位素地球化学示踪[J]. 矿物学报，43(4)：501-511.

胡大龙，2023. 赣北大湖塘钨铜多金属矿床成岩成矿作用及成因机

制研究[D]. 武汉：中国地质大学.

胡正华，楼法生，李永明，等，2018. 江西武宁县东坪钨矿床中与成矿有关的岩浆岩年代学、地球化学及岩石成因[J]. 地球科学，43(S1)：243-263.

胡正华，王先广，陈毓川，等，2020. 江南钨矿带(江西段)成矿规律[J]. 中国钨业，35(5)：10-19.

华仁民，李光来，张文兰，等，2010. 华南钨和锡大规模成矿作用的差异及其原因初探[J]. 矿床地质，29(1)：9-23.

黄兰椿，蒋少涌，2012. 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，28(12)：3887-3900.

黄兰椿，蒋少涌，2013. 江西大湖塘富钨花岗斑岩年代学、地球化学特征及成因研究[J]. 岩石学报，29(12)：4323-4335.

蒋少涌，彭宁俊，黄兰椿，等，2015. 赣北大湖塘矿集区超大型钨矿地质特征及成因探讨[J]. 岩石学报，31(3)：639-655.

蒋少涌，赵葵东，姜海，等，2020. 中国钨锡矿床时空分布规律、地质特征与成矿机制研究进展[J]. 科学通报，65(33)：3730-3745.

孔凡斌，温润涛，屈亚灿，等，2021. 江西香炉山外围角岩型白钨矿成矿地质特征及控矿因素分析[J]. 中国钨业，36(3)：11-18.

李宏伟，赵正，陈振宇，等，2021. 江西大湖塘矿田两期岩浆作用与钨成矿的关系：来自锆石矿物地球化学的证据[J]. 岩石学报，37(5)：1508-1530.

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.

林锐华，尹青青，项新葵，等，2023. 江西昆山钼钨铜多金属矿床辉钼矿Re-Os年代及其对成矿地球动力学演化的启示[J]. 中国地质，50(4)：1176-1187.

刘冰琪，于津海，蒋威，等，2023. 赣北双桥山群变沉积岩的地球化学特征及与钨多金属成矿的关系[J]. 地质学报，97(2)：433-447.

刘更更，吴颖宸，魏文凤，等，2024. 赣北石门寺钨铜多金属矿床辉钼矿Re-Os同位素年龄及其地质意义[J]. 矿物岩石地球化学通报，43(1)：192-210.

刘家远，吴郭泉，1988. 斑岩钨矿床及其成矿花岗岩[J]. 河北地质学院学报，11(2)：47-58.

卢树东，汪石林，高文亮，等，2004. 江西彭山锡铅锌多金属矿床成矿特征与成因浅析[J]. 东华理工学院学报，27(3)：201-208.

毛景文，吴胜华，宋世伟，等，2020. 江南世界级钨矿带：地质特征、成矿规律和矿床模型[J]. 科学通报，65(33)：3746-3762.

孟亚飞，蒋少涌，2015. 江西大湖塘超大型钨矿床平苗矿段花岗斑岩的年代学和地球化学及成矿意义[J]. 矿物学报，35(S1)：715-716.

聂利青，周涛发，汪方跃，等，2018. 安徽省东源斑岩型钨矿床白钨矿原位微量元素特征及其指示意义[J]. 矿床地质，37(6)：1237-1246.

彭花明，袁琪，李秋耘，等，2015. 赣西北大岭上钨矿黑云母花岗斑岩锆石U-Pb年龄、Hf同位素及其与W、Cu矿化的关系[J]. 地质论评，61(5)：1089-1098.

秦燕，王登红，吴礼彬，等，2010. 安徽东源钨矿含矿斑岩中的锆石SHRIMP U-Pb年龄及其地质意义[J]. 地质学报，84(4)：479-484.

盛继福，陈郑辉，刘丽君，等，2015. 中国钨矿成矿规律概要[J]. 地质学报，89(6)：1038-1050.

孙克克，陈伟，2025. 江西曾家垄锡矿高分异花岗岩黑云母地球化学组成：对岩浆源区和演化过程的记录[J]. 地质学报，99(3)：760-777.

田邦生，袁步云，2008. 赣西北香炉山钨矿床地质特征与找矿标志[J]. 高校地质学报，14(1)：114-119.

王德恩，周翔，余心起，等，2011. 皖南祁门地区东源钨钼矿区花岗闪长斑岩SHRIMP锆石U-Pb年龄和Hf同位素特征[J]. 地质通报，30(10)：1514-1529.

汪国华，周腾，高剑峰，等，2025. 赣西北香炉山超大型钨矿床黑云母花岗岩年代学、地球化学特征及其成矿意义[J]. 大地构造与成矿学，49(4)：989-1002.

王凯，李峰，范敦宾，2016. 江西香炉山钨矿床构造-流体-成矿系统浅析[J]. 中国钨业，31(2)：1-5.

王先广，曹圣华，龚良信，等，2023. 江西钨锡多金属矿床成矿系列与找矿[J]. 地球学报，44(5)：916-932.

王孝磊，周金城，陈昕，等，2017. 江南造山带的形成与演化[J]. 矿物岩石地球化学通报，36(5)：714-735.

吴胜华，王旭东，熊必康，2014. 江西香炉山矽卡岩型钨矿床流体包裹体研究[J]. 岩石学报，30(1)：178-188.

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.

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

项新葵，尹青青，孙克克，等，2015. 江南造山带中段大湖塘同构造花岗斑岩的成因：锆石U-Pb年代学、地球化学和Nd-Hf同位素制约[J]. 岩石矿物学杂志，34(5)：581-600.

徐裕敏，2019. 江西省都昌县阳储岭钨钼矿岩体侵入特征及找矿指导意义浅析[J]. 世界有色金属，44(21)：66-67.

徐裕敏，王天晨，王文锋，等，2023. 江南造山带东段阳储岭钨多金属矿床燕山期岩浆岩成因[J]. 中国钨业，38(2)：8-21.

杨世文，楼法生，丁沛勋，等，2020. 赣北中生代岩浆作用与钨成矿特征[J]. 中国钨业，35(5)：53-60.

叶海敏，张翔，朱云鹤，2016. 江西石门寺钨多金属矿床花岗岩独居石U-Pb精确定年及地质意义[J]. 大地构造与成矿学，40(1)：58-70.

叶泽宇，张智宇，潘小菲，等，2016. 江西大湖塘北段石门寺钨铜钼矿化关系研究[J]. 岩石矿物学杂志，35(3)：457-468.

余振东，项新葵，谭荣，等，2020. 赣北大湖塘平苗矿段白云母花岗岩锆石U-Pb年代学、地球化学及地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版)，50(5)：1505-1517.

曾庆权，胡正华，王先广，等，2019. 江西省都昌县阳储岭钨钼矿年代学研究[J]. 中国地质，46(4)：841-849.

翟明国，吴福元，胡瑞忠，等，2019. 战略性关键金属矿产资源：现状与问题[J]. 中国科学基金，33(2)：106-111.

张家菁，梅玉萍，王登红，等，2008. 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，82(7)：927-931.

张明玉，丰成友，李大新，等，2016. 赣北大湖塘地区昆山W-Mo-Cu矿床侵入岩锆石U-Pb、辉钼矿Re-Os年代学及地质意义[J]. 大地构造与成矿学，40(3)：503-516.

张勇，潘家永，马东升，等，2017. 赣西北大雾塘钨矿区地质特征及Re-Os同位素年代学研究[J]. 矿床地质，36(3)：749-769.

张玉学，1982. 阳储岭斑岩钨钼矿床地质地球化学特征及其成因探

讨[J]. 地球化学, 11(2): 122-132.
张志辉, 2014. 江西武宁县大湖塘钨多金属矿田成矿作用研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
张志辉, 胡擘捷, 张达, 等, 2020. 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, 39(8): 1267-1284.
赵文, 张怀瑾, 2022. 江西香炉山钨矿床矽卡岩矿物和成矿花岗岩地球化学特征及其指示意义[J]. 岩石学报, 38(2): 483-494.
郑瑜林, 赵正, 张长青, 等, 2022. 江西阳储岭两期岩浆活动与钨成矿作用的关系: 来自黑云母地球化学的证据[J]. 岩石学报, 38(2): 495-512.
周洁, 葛伟亚, 姜耀辉, 等, 2015. 江南造山带东段东源含钨岩体的岩石化学、矿物学特征研究[J]. 地球化学, 44(2): 117-130.
周翔, 余心起, 王德恩, 等, 2011. 皖南东源含 W、Mo 花岗闪长斑岩及成矿年代学研究[J]. 现代地质, 25(2): 201-210.
左全狮, 章平, 周才坚, 2014. 江西大湖塘矿集区燕山期岩浆岩基本特征及其与成矿的关系[J]. 矿产与地质, 28(5): 519-526.

获奖者简历：

蒋少涌，教授，博士生导师，矿床学和地球化学专业。2015 年获第十四次李四光地质科学奖科研奖，曾获国家杰出青年科学基金项目资助。现任中国地质大学（武汉）紧缺战略矿产资源省部共建协同创新中心主任。长期从事矿床学和同位素地球化学方面的教学与科研工作。发表包括 *Nature*、*Geology*、*Economic Geology* 在内的第一作者/通讯作者 SCI 论文 320 余篇；入选 Elsevier 地球与行星科学中国高被引学者榜单（2014 至今）。主持基金委杰出青年基金项目、创新群体基金项目、科技部 973 项目和重点研发计划项目等多个国家级项目。获教育部自然科学奖一等奖 3 次。担任 *Journal of Earth Science* 和《地球科学》执行主编；*Journal of Geochemical Exploration*、*Canadian Journal of Earth Sciences*、*Terra Nova* 国际 SCI 刊物副主编。