

# 华南典型钨铌钽矿床成矿年龄与成矿物理化学条件研究现状

刘乙铨

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2025年4月10日; 录用日期: 2025年5月16日; 发布日期: 2025年5月29日

## 摘要

中国是全球最大的钨资源国, 但铌、钽资源严重依赖进口。华南地区是我国钨铌钽矿床的核心富集区, 矿床分布以南岭构造带为中心, 呈现高度集群化特征。近年来, LA-ICP-MS技术的突破为揭示成矿年代与物理化学条件提供了关键支撑: 1) 成矿年龄显示多期叠加特征, 反映燕山期岩浆热液活动的阶段性演化。2) 矿物氢氧同位素研究表明流体来源由深部岩浆热液逐步混合大气降水, 成矿流体具有多源多阶段特征, 黑钨矿Fe/Mn比值环带分析表明, 成矿温度从早期高温向晚期低温过渡, 流体包裹体研究显示成矿流体成分早期岩浆热液为主, 通过氟羟基络合物迁移钨元素, 中期流体混合导致盐度下降, Fe/Mn比值分异, 晚期大气降水占比增加, 形成低盐度富Mn流体。

## 关键词

华南钨铌钽矿床, 成矿年龄, 物理化学条件

## Research Advances on Metallogenic Ages and Physicochemical Conditions of Representative W-Nb-Ta Deposits in South China

Yiquan Liu

College of Earth Science, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: Apr. 10<sup>th</sup>, 2025; accepted: May 16<sup>th</sup>, 2025; published: May 29<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

China possesses the world's largest tungsten resources but remains heavily dependent on imports

文章引用: 刘乙铨. 华南典型钨铌钽矿床成矿年龄与成矿物理化学条件研究现状[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(5): 784-796. DOI: 10.12677/ag.2025.155076

for niobium and tantalum resources. South China represents the core enrichment region for tungsten-niobium-tantalum deposits in China, with ore deposits exhibiting a highly clustered distribution pattern centered along the Nanling tectonic belt. Recent breakthroughs in LA-ICP-MS technology have provided critical insights into metallogenic chronology and physicochemical conditions: 1) Metallogenic age data reveal multi-stage superposition characteristics, reflecting the episodic evolution of Yanshanian magmatic-hydrothermal activities. 2) Hydrogen and oxygen isotope studies of minerals indicate that ore-forming fluids transitioned from deep magmatic-hydrothermal sources to mixtures with meteoric water, demonstrating a multi-source and multi-stage nature. Wolframite Fe/Mn ratio zonation analysis demonstrates a progressive transition of mineralization temperatures from early high-temperature to late low-temperature conditions. Fluid inclusion studies demonstrate that early-stage ore-forming fluids were dominated by magmatic-hydrothermal components transporting tungsten through fluoride-hydroxyl complexes. Mid-stage fluid mixing induced salinity reduction and Fe/Mn ratio differentiation. During late-stage mineralization, the increasing proportion of meteoric water contributed to the formation of low-salinity Mn-rich fluids.

## Keywords

W-Nb-Ta Deposits in South China, Metallogenic Age, Physicochemical Conditions

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

钨、铌、钽作为关键稀有金属，在国民经济建设与国防安全领域具有不可替代的战略地位。钨凭借其高熔点、高硬度、耐磨性优异及化学性质稳定等特性，铌、钽则以耐高温、抗腐蚀、超导性能突出等优势，共同构成现代工业体系的核心基础材料。三者广泛应用于高端装备制造、产业结构升级、新能源技术革新、航空航天工程及国防军工等战略性领域，对推动技术创新、保障国家安全和实现可持续发展目标发挥着不可或缺的关键作用。钨作为我国 24 种战略性矿产之一，具有重要的资源地位。根据《中国钨行业市场前景及投资机会研究报告》数据显示，我国钨矿储量约 230 万吨，占全球总储量的 52%，其中华南地区钨储量占世界总储量的 45%，被誉为“钨都” [1]。然而，长期的过度开发已导致国内众多钨矿山面临资源枯竭的危机 [2]。随着新兴产业的快速发展，市场对钨资源的需求持续攀升，尽管我国钨冶炼技术和加工产能不断提升，但钨精矿仍存在较大进口需求 [3]。与此同时，我国铌钽矿资源同样面临严峻形势：探明储量有限、伴生矿多、开采难度较大，致使铌钽精矿长期高度依赖进口。积极响应国家“危机矿山接替资源找矿专项”与“找矿突破战略行动”等重大地质勘查工程，针对赣南、赣北、滇东南、桂东北等传统钨多金属矿区，系统开展深部及外围区域的新矿体勘查研究已成为当务之急。在此背景下，亟需深化华南地区钨铌钽矿床的成矿机制研究，支撑深部找矿突破。本文聚焦华南典型钨铌钽矿床，系统综述其成矿年龄与物理化学条件的研究进展，为认识矿床成因和指导找矿实践提供理论支撑。

## 2. 矿床时空分布规律

### 2.1. 空间分布规律

我国钨矿床遍布全国各地，但主要集中分布于华南地区。华南地区钨、铌钽矿床的空间分布规律以南岭构造带为核心富集区，呈现高度集群化特征 (图 1)。

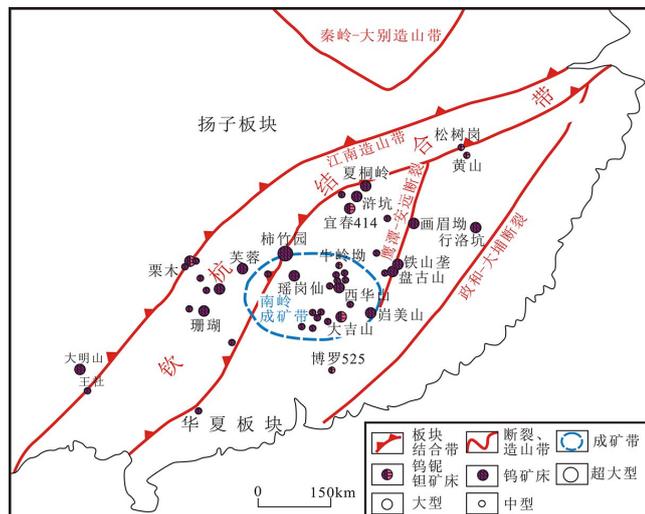


Figure 1. Distribution map of tungsten deposits and W-Nb-Ta deposits in South China

图 1. 华南地区钨矿床、钨铌钽矿床分布图

在赣南、湘南、粤北等区域，钨矿床密集分布，尤以赣南大余 - 崇义 - 上犹地区和盘古山区最为典型：前者在 7800 平方公里范围内集中发育 180 余处矿床(点)，平均矿床密度达每 10 平方公里 2 处，且空间上呈等距或近等距排列；后者在 11,000 平方公里范围内分布 100 余处矿床(点)，平均每 100 平方公里即有 1 处矿化点产出。南岭各成矿密集区内普遍存在“主星 - 卫星”式分布规律，即 1~2 个大型钨矿床(如西华山、大吉山)为核心，外围环绕多个中小型矿床，构成多级次矿化集群。次级成矿带如阿尔泰、松潘 - 甘孜 - 西昆仑及滇西 - 藏南成矿带虽亦有钨铌钽矿床分布，但矿床数量、规模、矿化强度均显著弱于南岭构造带，表现南岭地区作为华南钨铌钽资源核心富集区具有独特地位。

## 2.2. 时间分布规律

我国钨矿化在时间序列上可划分为六大成矿期：元古宙成矿期、加里东成矿期、海西成矿期、印支成矿期、燕山成矿期及喜马拉雅成矿期(表 1)。其中，燕山期作为我国最主要的钨矿床成矿期，其成矿作用显著强于其他时期。钨矿化时期具显著的区域性特征，具体表现为南方以燕山期成矿为主，而北方则以海西期为主导[4]。据前人系统研究[5][6]，各成矿期钨矿床类型显著不同：元古宙以石英脉型钨矿床为主，矽卡岩型次之；加里东期则完全发育石英脉型矿床；海西期与印支期矿化强度相对较弱，产出石英脉型及矽卡岩型两类矿床；至燕山期矿化活动显著增强，形成石英脉型、矽卡岩型和斑岩型等多样化矿床组合；喜马拉雅期复归为单一的石英脉型钨矿床。

Table 1. Representative tungsten deposits in China

表 1. 中国典型钨矿床时代表

成矿时期	矿床名称	矿床类型	年龄/Ma	测试方法	参考文献
元古宙	沙厂	石英脉型	1430 ± 93	黑钨矿 Sm-Nd	聂凤军, 2002 [7]
加里东期	社硐	石英脉型	437.8 ± 3.4	辉钨矿 Re-Os	陈懋弘等, 2011 [8]
海西期	国庆	石英脉型	383.3 ± 1.8	锆石 U-Pb	李文明等, 2008 [9]
	小白石头	矽卡岩型	322 ± 5	锆石 U-Pb	李鹏等, 2011 [10]

续表

印支期	仙鹅塘	石英脉型	$231.4 \pm 2.4$	白云母 Ar-Ar	刘善宝等, 2008 [11]
	南秧田	矽卡岩型	$214.1 \pm 4.3$	辉钼矿 Re-Os	冯佳睿等, 2011 [12]
	盘古山	石英脉型	$155.3 \pm 2.8$	辉钼矿 Re-Os	方贵聪等, 2014 [13]
燕山期	朱溪	矽卡岩型	$151 \pm 2$	锆石 U-Pb	李岩等, 2014 [14]
	莲花山	斑岩型	$127.5 \pm 1$	锆石 U-Pb	余振东等, 2023 [15]
喜马拉雅期	麻花坪	石英脉型	$32.06 \pm 0.11$	白云母 Ar-Ar	马骏等, 2020 [16]

我国铌钽矿化在时间序列上可划分为五个成矿期：加里东成矿期、海西成矿期、印支成矿期、燕山成矿期及喜马拉雅成矿期。从成矿类型看，过铝质岩浆系统相关的花岗岩型与花岗伟晶岩型铌钽矿床主要形成于加里东期、印支 - 燕山期及喜马拉雅期，其中印支 - 燕山期为核心成矿阶段，喜马拉雅期仅有少量矿化活动；而碱性岩浆系统相关的铌钽矿床则集中发育于海西 - 印支期[17][18]。各成矿期的典型矿床实例详见表 2。

**Table 2.** Representative of typical Nb-Ta deposits in China  
**表 2.** 中国典型铌钽矿床时代表

	矿床名称	矿床类型	年龄/Ma	测试方法	参考文献
加里东期	西港	花岗伟晶岩型	$424 \pm 5$	铌钽铁矿 U-Pb	Che <i>et al.</i> , 2019 [19]
海西期	白云鄂博	碱性岩	378	全岩 Rb-Sr	陈彪等, 2024 [20]
成矿时期	矿床名称	矿床类型	年龄/Ma	测试方法	参考文献
印支期	庙垭	碱性岩	$232.8 \pm 3.7$	铌钽铁矿 U-Pb	应元灿, 2018 [21]
	可可托海	花岗伟晶岩型	$214.9 \pm 2.1$	锆石 U-Pb	陈剑峰等, 2018 [22]
燕山期	大吉山	花岗岩型	$161.0 \pm 1.3$	辉钼矿 Re-Os	张思明等, 2011 [23]
	宜春 414	花岗岩型	160	铌钽铁矿 U-Pb	Che <i>et al.</i> , 2015 [24]
喜马拉雅期	宝华山	花岗伟晶岩型	15	白云母 Ar-Ar	李建康等, 2019 [18]

### 3. 成矿年代学研究

#### 3.1. 测试方法演进

中国的钨多金属矿床研究始于 20 世纪 20 年代，此时的成矿年代学测试技术还处于世界较低水平，可用于定年的矿物十分有限。

随着研究的不断深入，基于与钨成矿作用密切相关的矿物年龄数据来间接推断钨矿床成矿时代的研究方法逐渐被提出并应用于实践，典型测年技术包括：含矿石英脉石英流体包裹体 Rb-Sr 法[25]、含 K 矿物(云母/长石) K-Ar/Ar-Ar 法[26]、共生脉石矿物(萤石 - 方解石 - 电气石)Sm-Nd 等时线法[27][28]、含 U 矿物(锆石 - 锡石 - 金红石 - 独居石 - 磷灰石) U-Pb 同位素定年[29]以及辉钼矿 Re-Os 同位素定年[30]等。

这些方法的系统应用显著提升了钨矿床成矿年代学研究精度，然而需特别指出的是：石英、云母、长石等作为间接定年矿物，其本身几乎不含钨元素，在复杂的岩浆 - 热液成矿过程中，其结晶时序与含钨矿物沉淀阶段可能存在时差。这种潜在的非等时性可能导致获得的年龄值与真实钨成矿年龄产生偏差，

进而对成岩 - 成矿关系解析及成矿期次精细划分造成影响。

所以为获得更直接的钨矿化年龄,前人还尝试使用含钨的矿石矿物(主要为白钨矿、黑钨矿)进行 Sm-Nd 同位素定年[31],但受限于当时仪器分析技术的灵敏度较低及同位素分馏校正模型的不完善,Sm-Nd 法获得的数据误差比较大,可信度也不高。

近期 LA-ICP-MS (激光剥蚀电感耦合等离子体质谱)原位微区分析技术的突破性进展,有效克服了传统体相分析中次生包裹体及热液蚀变的干扰。其微区原位分析能力(束斑直径  $\leq 30 \mu\text{m}$ )结合三维空间分辨特性,使含钨矿物(如白钨矿、黑钨矿)的原位 U-Pb 同位素定年技术能够精准解耦多期次热液叠加信号,实现钨成矿事件的时空定位解析(年龄测定精度( $2\sigma$ )普遍优于 1%)。Yang *et al.* [32]凭借该方法高空间分辨率( $< 5 \mu\text{m}$ )和低基体效应( $\text{RSD} < 0.5\%$ )的优势,成功精细解构大湖塘、东坪等超大型矿床的成矿幕次,证实华南地区早白垩世(140~130 Ma)发生了两次重要的钨矿化事件,这显著提升了深部找矿预测的科学性。目前该测年方法已发展成为年代学研究的前沿技术,在华南典型钨多金属矿床成矿年代学研究中展现出显著的优势。

### 3.2. 典型钨铋钼矿床成矿年龄

华南地区最重要的“大规模成矿”主要发生在中生代,其在时间上并非是连续成矿,而是集中在比较明确的三个时间段,即三叠纪(230~210 Ma)、侏罗纪(170~150 Ma)和白垩纪(134~80 Ma)(见附表 1)。前人的年代学数据显示,三叠纪成矿的典型代表地是栗木钨铋钼矿区,侏罗纪成矿的标志性矿床为大吉山、宜春 414 钨铋钼矿床,成矿于白垩纪则有松树岗、黄山钨铋钼矿床。栗木矿区花岗岩形成于印支晚期后造山地壳伸展减薄背景下[33],成岩时间主要在 230~210 Ma,其中与成矿密切相关的主要是第二、第三幕花岗岩[34],其成岩时间在 220~210 Ma,矿区成矿时间主要在 220~205 Ma,成岩成矿时间呈现高度一致的特征。

宜春 414、大吉山钨铋钼矿床的成岩成矿时代集中于 160~150 Ma,前者产于武功山断隆构造 - 岩浆带中 - 弱挤压区,后者位于赣南隆起构造岩浆带,属于陆陆碰撞后的产物,二者成矿皆主要与古太平洋板块向东亚大陆俯冲引发的岩浆活动有关,属侏罗纪古太平洋板块多期挤压 - 伸展动力学机制产物;

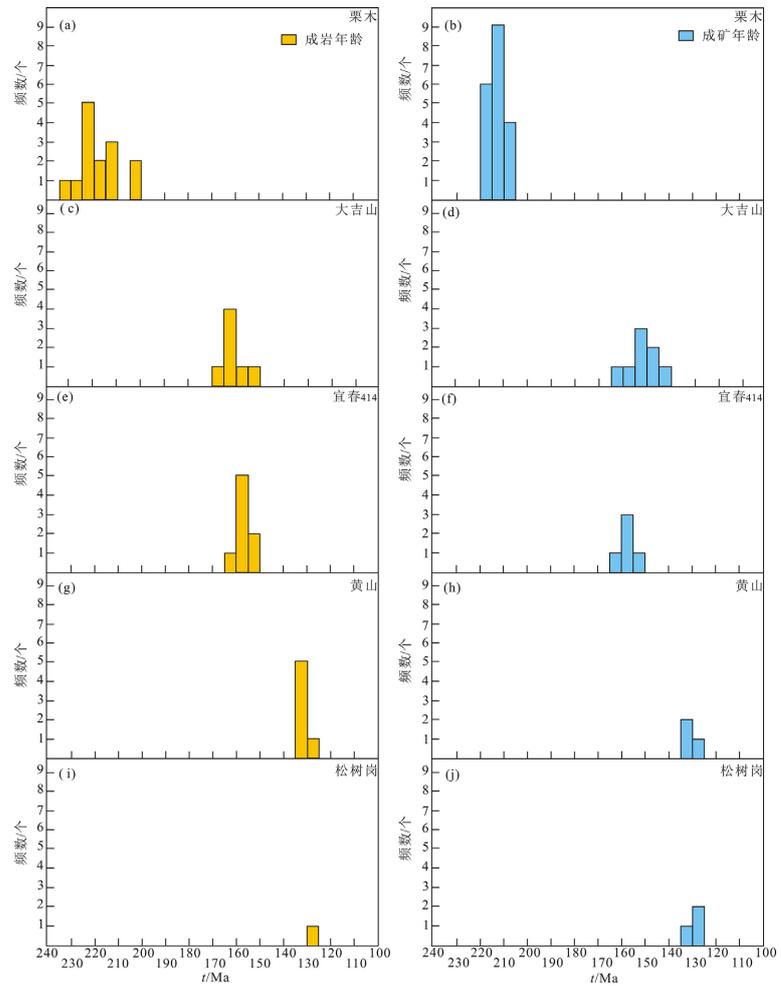
松树岗、黄山钨铋钼矿床成岩成矿集中在 130 Ma 左右,二者同属于江南隆起东段构造 - 岩浆带的弱挤压、深断裂区,成矿主要受东侧古太平洋板块俯冲和西缘新特提斯构造域的联合影响。侏罗纪至白垩纪,华南地区的成矿动力体制并非发生变化,松树岗、黄山矿床本质上仍属于古太平洋板块多期挤压 - 伸展动力学体制产物。

综上所述,上述华南地区典型的钨铋钼矿区矿床的成岩年龄与成矿年龄时差普遍小于 5 Ma (图 2),这一共性特征表明华南地区钨铋钼矿床成矿作用与花岗岩演化存在密切成因联系,其中具“五层楼 + 地下室”矿化模型(如图 3 所示)的典型矿床(如大吉山、栗木牛栏岭、栗木水溪庙),其花岗岩型钨铋钼矿体与石英脉型钨矿体成矿年龄高度相近,揭示深部岩浆分异与热液成矿之间紧密的时空成因联系。

## 4. 成矿物理化学条件研究

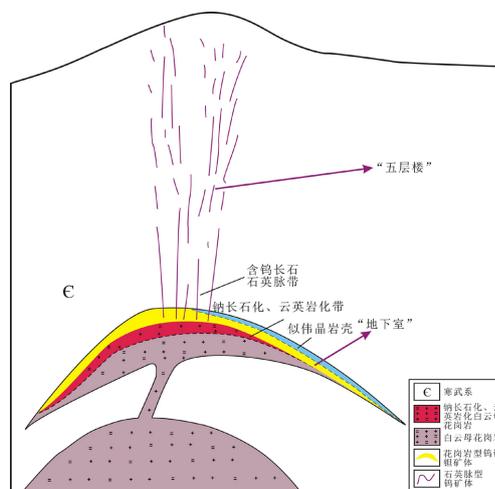
### 4.1. 测试方法演进

钨铋钼矿床的成矿物理化学条件研究,作为解析成矿物质迁移、富集与沉淀动态过程的关键研究手段,不仅能够系统揭示成矿作用机制与演化规律,还可通过构建成矿环境参数模型(如温度 - 压力 - 流体组成),为深部找矿靶区预测与勘查工程优化提供科学依据,是衔接矿床成因理论与资源勘查实践的核心方法。其方法论体系经历了从传统技术到现代多学科融合的演进。传统研究主要依托流体包裹体显微测温与成分分析,系统测定成矿温度 - 压力参数及流体物理化学属性(如盐度、挥发分组成);通过氢 - 氧同



**Figure 2.** Histogram of rock-forming and mineralization ages for typical W-Nb-Ta deposits in South China

**图 2.** 华南地区典型钨铌钽矿床成岩成矿年龄频数直方图



**Figure 3.** Schematic diagram of mineralization zoning model for "five floors + basement"

**图 3.** “五层楼 + 地下室” 矿化分带模型示意图

位素示踪技术( $\delta D$ - $\delta^{18}O$ )解析成矿流体来源(岩浆水、大气降水或变质流体);基于热力学相平衡模拟(如 PHREEQC 软件)定量刻画成矿元素的溶解-迁移-沉淀动力学过程。这些技术已形成标准化流程,数据的可信度与可重复性较强,但分析结果依赖群体性统计,对矿物生长过程的物理化学条件及多期流体事件叠加等关键信息难以捕捉,无法模拟出真实地质系统成矿演化过程。当前研究模式已进一步拓展至:运用高精度微区分析技术(电子探针显微分析 EPMA、激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)解析矿物生长环带成分变化规律(如黑钨矿 Fe/Mn 比值分带),示踪成矿流体成分的时空演化规律;结合热力学-动力学耦合数值模拟(如 COMSOL 多物理场平台),构建温度-压力-化学势协同演化的成矿系统模型,可预测元素迁移-沉淀机制,并依托多物理场耦合模型(流体流动-热传导-化学反应耦合)动态重建成矿系统的温度-压力-流体演化过程[56]。这种研究模式可实现矿物微米级成分成像,直接关联矿物生长史与流体成分波动,突破传统“均一化”分析局限,对典型钨多金属矿床成矿过程精细解析、成矿机理创新性研究、成矿动力学重建起着重要作用,是当前钨多金属矿床研究的核心方法。

## 4.2. 研究现状

前人对华南地区钨铋钼矿床进行了较多研究,揭示成矿流体具有多源、多阶段演化特征。

1) 成矿流体来源:华南地区钨铋钼矿床的成矿流体主要与中生代花岗岩岩浆活动密切相关。LA-ICP-MS 微区分析表明,早期成矿阶段以深源岩浆热液为主,表现为低  $^{87}Sr/^{86}Sr$  比值和富集  $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $F^-$ 、 $Cl^-$  等离子及  $CO_2$  挥发分。如栗木金竹源、水溪庙的氢氧同位素研究显示,花岗岩型钨铋钼矿体的石英包裹体同位素投点均落入岩浆水范围,表明早期岩浆成矿阶段成矿流体为岩浆热液。类似地,江西大湖塘超大型白钨矿床的成矿流体从燕山期花岗岩中萃取钨元素,形成以白钨矿为主的矿化[57]。成矿晚期阶段普遍存在大气降水混合现象,如江西大吉山钨铋钼矿床的石英、黑钨矿氢氧同位素研究显示,氢同位素( $\delta D$  值)向大气降水线方向漂移,同时氧同位素( $\delta^{18}O$  值)随流体混合比例和温度变化发生分馏,表明成矿流体主体来源于花岗岩浆,并在成矿后期受到大气降水混入的影响。围岩对成矿流体的物质组成具有重要影响。LA-ICP-MS 技术揭示,含矿热液通过蚀变作用(如斜长石绢云母化、钠长石化)从围岩中萃取  $Ca^{2+}$ 、 $Fe^{2+}$ 、 $Mn^{2+}$  等元素,为白钨矿( $CaWO_4$ )和黑钨矿( $(Fe, Mn)WO_4$ )的形成提供关键物质基础。例如,大湖塘矿床的成矿流体从晋宁期黑云母花岗岩中获取钙质,促进白钨矿沉淀。

(2) 温度-压力-成分演化:华南地区钨铋钼矿床的成矿温度具有显著的多阶段性特征。早期高温阶段( $>400^\circ C$ )以岩浆热液为主导,形成矽卡岩矿物(如石榴子石、透辉石)及黑钨矿的初始沉淀,这与黑钨矿主要产于高温热液石英脉及其云英岩化围岩中的地质特征一致[58]。中期中温阶段( $300^\circ C \sim 400^\circ C$ )伴随大气降水混合,盐度降低,Fe/Mn 比值波动触发硫化物(如辉钼矿、黄铜矿)的局部富集;晚期低温阶段( $<300^\circ C$ )以低盐度大气降水为主,形成富锰黑钨矿及石英-方解石脉。成矿压力主要受岩浆侵位深度与构造背景控制。矽卡岩型矿床早期高压阶段( $100 \sim 300$  MPa)对应于深部岩浆房环境(侵位深度 3~8 km),形成致密石榴子石-透辉石组合;中晚期压力逐渐降低( $50 \sim 100$  MPa),伴随断裂活动与流体减压,黑钨矿、白钨矿等金属矿物逐渐发生沉淀,由此形成石英脉型钨矿床成矿压力普遍较低( $<100$  MPa) [58]。成矿流体成分早期以富  $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $F^-$ 、 $Cl^-$  及  $CO_2$  的岩浆热液为主,通过氟羟基络合物(如  $H_2WO_4F^-$ )迁移钨元素;中期流体混合导致盐度下降(NaCl-H<sub>2</sub>O 体系),Fe/Mn 比值分异;晚期大气降水占比增加,形成低盐度富 Mn 流体,并伴随硫化物(方铅矿、闪锌矿)沉淀[58]。

3) 氧逸度:华南钨铋钼矿床的形成与多期次构造-岩浆活动密切相关。研究表明,华南造山带自早古生代至中生代经历了多次陆内造山运动,伴随大规模岩浆活动,导致古老地层中的 W、Nb、Ta 元素通过热液作用进一步富集于加里东期至燕山早期的花岗岩中。这些岩浆热液活动为成矿流体提供了物质基础,并塑造了流体的氧化还原条件。不同矿床的流体地球化学研究表明,成矿流体的氧化还原状态受控

于流体来源、成分及迁移-沉淀过程。以江西大湖塘超大型钨矿床为例,成矿流体富含  $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $F^-$ 、 $Cl^-$  等离子及  $CO_2$  挥发,钨以氟羟基硫络合物形式迁移。当流体运移至浅部构造裂隙时,压力骤降导致  $CO_2$  逸出,引发络合物分解,钨酸根与钙结合形成白钨矿。这一过程中,  $CO_2$  的逸度变化显著影响流体的氧化还原状态,高  $CO_2$  分压维持了还原环境下的络合物稳定性,而压力降低后的氧化条件则促进了沉淀[57]。  $CO_2$ 、 $F^-$ 、 $Cl^-$  等挥发分在维持流体还原性中起关键作用。类似地,湘南瑶岗仙钨矿床的流体包裹体分析显示,其成矿流体以地下水为主,混合少量热液,  $\delta^{18}O$  和  $\delta D$  同位素特征表明流体可能经历了大气降水与深部岩浆流体的混合,氧化还原条件的转变由流体运移路径中的围岩与流体相互作用和构造活动驱动[59]。又如滇东南荒田钨矿床产于石英脉与围岩接触界限的白钨矿具贫 Mo 元素特征,其晶体核部-边部皆存在 Mo 含量异常高的现象,表明成矿流体总体呈还原性,但受流体-围岩作用影响,成矿过程氧逸度出现了无规则波动[60],这一现象揭示,成矿流体与围岩的交代作用可引发氧化还原条件的动态调整,具体表现为流体-围岩相互作用通过物质交换(如离子迁移、挥发分逸出)及矿物相变(如蚀变反应),直接或间接调控体系的氧化还原状态,进而影响成矿元素的迁移-沉淀行为。

综上所述,华南钨多金属矿床的成矿流体主要来源于岩浆热液,成矿晚期多遭受大气降水的混入,在流体演化过程中, pH 值、温度、Eh 值均呈下降趋势,但可能会受到交代作用和大气降水混入的影响发生无序波动或逆势升高。

## 5. 结论

综合上文所述得到以下主要认识,华南钨铋钼矿床成矿作用具有多期叠加特征,集中分布于中生代燕山期,成矿与花岗岩演化具密切成因联系。空间上,矿床以南岭构造带为中心呈集群化产出,形成“主星-卫星”式分布规律。成矿事件与古太平洋板块俯冲引发的多期挤压-伸展动力体制直接相关。成矿流体来源以深部岩浆热液为主,晚期叠加大气降水混合。成矿流体的物理化学条件受控于流体来源、成分及迁移-沉淀过程。

## 参考文献

- [1] Sheng, J., Liu, L., Wang, D., *et al.* (2015) A Preliminary Review of Metallogenic Regularity of Tungsten Deposits in China. *Acta Geologica Sinica—English Edition*, **89**, 1359-1374. <https://doi.org/10.1111/1755-6724.12533>
- [2] Feng, M., Feng, Z., Kang, Z., Fu, W., Qing, Y., Hu, R., *et al.* (2019) Establishing an Indosinian Geochronological Framework for Episodic Granitic Emplacement and W-Sn-Nb-Ta Mineralization in Limu Mining District, South China. *Ore Geology Reviews*, **107**, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.02.012>
- [3] 左更, 崔楠楠, 李晓杰, 等. 我国优势金属矿产行业问题分析与保供建议——以钨、铋、稀土为例[J]. 中国国土资源经济, 2022, 35(10): 11-17, 38.
- [4] 盛继福, 陈郑辉, 刘丽君, 等. 中国钨矿成矿规律概要[J]. 地质学报, 2015, 89(6): 1038-1050.
- [5] 崔中良, 郭钢阳, 赵剑星, 等. 中国钨矿床研究现状及进展[J]. 河北地质大学学报, 2019, 42(1): 27-36.
- [6] 夏庆霖, 汪新庆, 刘壮壮, 等. 中国钨矿成矿地质特征与资源潜力分析[J]. 地学前缘, 2018, 25(3): 50-58.
- [7] 聂凤军, 江思宏, 白大明, 等. 北京密云沙厂环斑花岗岩杂岩体黑钨矿钨-铋同位素研究[J]. 地质论评, 2002, 48(1): 29-33.
- [8] 陈懋弘, 莫次生, 黄智忠, 等. 广西苍梧县社洞钨钼矿床花岗岩类锆石 LA-ICP-MS 和辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 2011, 30(6): 963-978.
- [9] 李文明, 赵国斌, 全守村, 等. 内蒙古北山发现国庆钨矿床[J]. 矿床地质, 2008, 27(1): 122.
- [10] 李鹏, 吕新彪, 陈超, 等. 新疆东天山小白石头黑云母花岗岩年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. 地质与勘探, 2011, 47(4): 543-554.
- [11] 刘善宝, 王登红, 陈毓川, 等. 赣南崇义-大余-上犹矿集区不同类型含矿石英中白云母  $40Ar/39Ar$  年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 2008, 82(7): 932-940.
- [12] 冯佳睿, 毛景文, 裴荣富, 等. 滇东南老君山地区印支期成矿事件初探——以新寨锡矿床和南秧田钨矿床为例

- [J]. 矿床地质, 2011, 30(1): 57-73.
- [13] 方贵聪, 陈毓川, 陈郑辉, 等. 赣南盘古山钨矿床锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄及其意义[J]. 地球学报, 2014, 35(1): 76-84.
- [14] 李岩, 潘小菲, 赵苗, 等. 景德镇朱溪钨(铜)矿床花岗斑岩的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其与成矿关系探讨[J]. 地质论评, 2014, 60(3): 693-708.
- [15] 余振东, 谭荣, 曹慧青, 等. 赣北莲花山钨锡矿集区中细粒白云母花岗岩成因——来自锆石 U-Pb 同位素和元素地球化学的约束[J]. 地质通报, 2023, 42(12): 2084-2095.
- [16] 马骏, 陶琰, 何德锋, 等. 云南麻花坪钨铍矿成矿年龄及流体包裹体特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2020, 39(2): 223-232.
- [17] 蔡肖, 宋扬, 王登红, 等. 国外重要铌钽矿床分布规律及成矿地质特征[J]. 矿物学报, 2013, 33(S2): 193-194.
- [18] 李建康, 李鹏, 王登红, 等. 中国铌钽矿成矿规律[J]. 科学通报, 2019, 64(15): 1545-1566.
- [19] Che, X., Wang, R., Wu, F., Zhu, Z., Zhang, W., Hu, H., *et al.* (2019) Episodic Nb-Ta Mineralisation in South China: Constraints from *in Situ* LA-ICP-MS Columbite-Tantalite U-Pb Dating. *Ore Geology Reviews*, **105**, 71-85. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.11.023>
- [20] 陈彪, 贾晓琪, 魏威, 等. 内蒙古白云鄂博矿床年代学特征及其地质意义[J]. 地质科技通报, 2024, 43(1): 63-73.
- [21] 应元灿. 湖北庙垭碳酸岩杂岩体年代学和地球化学特征及成岩成矿过程[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 中国地质大学, 2018.
- [22] 陈剑锋, 张辉, 张锦煦, 等. 新疆可可托海 3 号伟晶岩脉锆石 U-Pb 定年、Hf 同位素特征及地质意义[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(9): 1832-1844.
- [23] 张思明, 陈郑辉, 施光海, 等. 江西省大吉山钨矿床辉钼矿铼-钨同位素定年[J]. 矿床地质, 2011, 30(6): 1113-1121.
- [24] Che, X., Wu, F., Wang, R., Gerdes, A., Ji, W., Zhao, Z., *et al.* (2015) *In Situ* U-Pb Isotopic Dating of Columbite-Tantalite by LA-ICP-MS. *Ore Geology Reviews*, **65**, 979-989. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.07.008>
- [25] Rossman, G.R., Weis, D. and Wasserburg, G.J. (1987) Rb, Sr, Nd and Sm Concentrations in Quartz. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **51**, 2325-2329. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(87\)90286-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(87)90286-9)
- [26] Yin, J., Kim, S.J., Lee, H.K. and Itay, T. (2002) K-Ar Ages of Plutonism and Mineralization at the Shizhuyuan W-Sn-Bi-Mo Deposit, Hunan Province, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, **20**, 151-155. [https://doi.org/10.1016/s1367-9120\(01\)00036-0](https://doi.org/10.1016/s1367-9120(01)00036-0)
- [27] 赵葵东, 蒋少涌. 金属矿床的同位素直接定年方法[J]. 地学前缘, 2004, 11(2): 425-434.
- [28] 彭建堂, 符亚洲, 袁顺达, 等. 热液矿床中含钙矿物的 Sm-Nd 同位素定年[J]. 地质论评, 2006, 52(5): 662-667.
- [29] 万建军, 王安东, 丁宁, 等. 钨矿床成矿年代学的直接测定和间接测定[J]. 矿床地质, 2014, 33(S1): 963-964.
- [30] 杜安道, 屈文俊, 王登红等. 辉钼矿亚晶粒范围内 Re 和 187Os 的失耦现象[J]. 矿床地质, 2007, 26(5): 572-580.
- [31] Fryer, B.J. and Taylor, R.P. (1984) Sm-Nd Direct Dating of the Collins Bay Hydrothermal Uranium Deposit, Saskatchewan. *Geology*, **12**, 479-482. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1984\)12<479:sddot>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1984)12<479:sddot>2.0.co;2)
- [32] Yang, S., Lou, F., Xu, C., Feng, C., Cao, S., Xu, D., *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. *Ore Geology Reviews*, **141**, Article ID: 104598. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104598>
- [33] 张怀峰, 陆建军, 王汝成, 等. 广西栗木矿区牛栏岭岩体印支期年龄的厘定及其意义[J]. 高校地质学报, 2013, 19(2): 220-232.
- [34] 潘知博, 冯梦, 秦亚, 等. 广西栗木锡多金属矿区锆石和锡石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 2023, 42(3): 481-505.
- [35] Huang, W., Wu, J., Liang, H., Zhang, J., Ren, L. and Chen, X. (2020) Ages and Genesis of W-Sn and Ta-Nb-Sn-W Mineralization Associated with the Limu Granite Complex, Guangxi, China. *Lithos*, **352**, Article ID: 105321. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.105321>
- [36] 娄峰, 伍静, 陈国辉. 广西栗木泡水岭印支期岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质通报, 2014, 33(7): 960-965.
- [37] 张怀峰, 陆建军, 王汝成, 等. 广西栗木大岐岭隐伏花岗岩的成因及其构造意义: 岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学和 Nd-Hf 同位素制约[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(5): 901-918.
- [38] Ouyang, L., Huang, W., Wu, J., Mavrogenes, J., Liao, J., Zhang, J., *et al.* (2025) Cassiterite Features and Lifespan of Limu Granite Ta-Nb-Sn-W Ore-Forming System in Guangxi, South China. *Journal of Geochemical Exploration*, **273**,

Article ID: 107696. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2025.107696>

- [39] 杨锋, 李晓峰, 冯佐海, 等. 栗木锡矿云英岩化花岗岩白云母  $40\text{Ar}/39\text{Ar}$  年龄及其地质意义[J]. 桂林工学院学报, 2009, 29(1): 21-24.
- [40] 楼法生, 沈渭洲, 王德滋, 等. 江西武功山穹隆复式花岗岩的锆石 U-Pb 年代学研究[J]. 地质学报, 2005(5): 636-644.
- [41] 李胜虎. 华南典型花岗岩型稀有金属矿床的成矿机制与找矿模式研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
- [42] 王雪娜. 黄山 Nb-Ta 与宜春 Ta-Nb 矿床成矿元素差异性富集的控制因素研究[D]: [硕士学位论文]. 抚州: 东华理工大学, 2023.
- [43] 左梦璐. 江西雅山与大吉山两类稀有金属花岗岩成矿差异性研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
- [44] 易先奎, 李晓峰, 王翠云, 等. 江西雅山和下桐岭钨矿床辉钨矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. 华南地质与矿产, 2015, 31(4): 384-390.
- [45] 孙恭安, 史明魁, 张宏良, 等. 大吉山花岗岩体岩石学、地球化学及成矿作用的研究[C]//南岭地质矿产科报告集. 武汉: 中国地质大学出版社, 1985.
- [46] 蒋国豪, 胡瑞忠, 谢桂青, 等. 江西大吉山钨矿成矿年代学研究[J]. 矿物学报, 2004(3): 253-256.
- [47] 张文兰, 华仁民, 王汝成, 等. 江西大吉山五里亭花岗岩单颗粒锆石 U-Pb 同位素年龄及其地质意义探讨[J]. 地质学报, 2004(3): 352-358.
- [48] Liu, F., Che, X., Hu, H., Zhang, W. and Lu, J. (2019) New Nb-Ta Mineralization Age of the Dajishan W-Nb-Ta Deposit in Jiangxi Province, South China. *Acta Geologica Sinica—English Edition*, **93**, 485-486. <https://doi.org/10.1111/1755-6724.13835>
- [49] 李华芹, 刘家齐, 魏林. 热液矿床流体包裹体年代学研究及其地质应用[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- [50] 张文兰, 华仁民, 王汝成, 等. 赣南大吉山花岗岩成岩与钨矿成矿年龄的研究[J]. 地质学报, 2006(7): 956-962.
- [51] Zhou, J., Jiang, Y., Xing, G., Zeng, Y. and Ge, W. (2013) Geochronology and Petrogenesis of Cretaceous A-Type Granites from the NE Jiangnan Orogen, SE China. *International Geology Review*, **55**, 1359-1383. <https://doi.org/10.1080/00206814.2013.774199>
- [52] Xiang, Y., Yang, J., Chen, J. and Zhang, Y. (2017) Petrogenesis of Lingshan Highly Fractionated Granites in the Southeast China: Implication for Nb-Ta Mineralization. *Ore Geology Reviews*, **89**, 495-525. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.06.029>
- [53] 江小强. 江西黄山铌钽矿床成矿岩体地球化学特征及成因分析[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2020.
- [54] 黄定堂. 灵山岩体演化特征及其与稀有金属的成矿关系[J]. 地质与勘探, 2003(4): 35-40.
- [55] 刘涛. 赣东北灵山岩体岩浆-热液演化与铌钽成矿机制研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 中国地质大学, 2023.
- [56] 范欣, 易楠, 许顺芳, 等. 岩浆热液矿床数值模拟研究——以个旧高松矿田为例[C]//2019 年中国地球科学联合学术年会论文集(二十八). 武汉: 中国地质大学(武汉), 2019: 22.
- [57] 江媛媛, 江丽. 江西大湖塘钨矿床钨成矿机制研究[J]. 自然科学, 2016, 4(1): 22-27.
- [58] 朱习君. 我国钨矿床研究现状[J]. 四川地质学报, 2011, 31(4): 428-434.
- [59] 于志峰. 湖南瑶岗仙和锡田钨矿床成矿流体演化特征与成矿模式研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
- [60] 周瑞辉, 林木森, 吴久芳, 等. 滇东南荒田钨矿床成矿流体来源及演化: 来自白钨矿地球化学特征的约束[J]. 地质通报, 2023, 42(10): 1728-1744.

## 附录

Table A1. Table of rock-forming and mineralization ages for typical W-Nb-Ta deposits in South China

表 A1. 华南地区典型钨铌钽矿床成岩成矿年龄表

矿床	矿体(岩体)	类型	测试方法	年龄(Ma)	参考文献
栗木泡水岭	花岗岩		锆石 U-Pb 定年	230.8 ± 0.63	Feng M <i>et al.</i> , 2019 [2]
栗木泡水岭	花岗岩		锆石 U-Pb 定年	227.7 ± 4.5	Huang <i>et al.</i> , 2020 [35]
栗木泡水岭	花岗岩		锆石 U-Pb 定年	222 ± 5	娄峰等, 2014 [36]
栗木泡水岭	花岗岩		锆石 U-Pb 定年	210 ± 4	娄峰等, 2014 [36]
栗木大岐岭及牛栏岭	花岗岩	成岩年龄	锆石 U-Pb 定年	224.8 ± 1.6	张怀峰等, 2013 [37]
栗木大岐岭及牛栏岭	花岗岩		锆石 U-Pb 定年	223.6 ± 1.7	张怀峰等, 2013 [37]
栗木鱼菜	花岗岩		锆石 U-Pb 定年	222.7 ± 1.2	Feng M <i>et al.</i> , 2019 [2]
栗木老虎头	花岗岩型钨锡铌钽矿体		锆石 U-Pb 定年	216.3 ± 1.7	潘知博等, 2023 [34]
栗木老虎头	花岗岩		锆石 U-Pb 定年	202.9 ± 3.8	Huang <i>et al.</i> , 2020 [35]
栗木水溪庙	花岗岩		锆石 U-Pb 定年	203.1 ± 3.0	Huang <i>et al.</i> , 2020 [35]
栗木牛栏岭	石英脉型钨锡矿体		锡石 U-Pb 定年	215.5 ± 3.5	Ouyang <i>et al.</i> , 2025 [38]
栗木牛栏岭	花岗岩型钨锡铌钽矿体	成矿年龄	铌钽铁矿 U-Pb 定年	212.7 ± 1.1	Ouyang <i>et al.</i> , 2025 [38]
栗木金竹源	花岗岩型钨锡铌钽矿体		锡石 U-Pb 定年	219.6 ± 1.5	潘知博等, 2023 [34]
栗木金竹源	花岗岩型钨锡铌钽矿体		铌钽铁矿 U-Pb 定年	217 ± 2	Che <i>et al.</i> , 2019 [24]
栗木三个黄牛	石英脉型钨锡矿体		白云母 Ar-Ar 定年	213.7 ± 1.1	Huang <i>et al.</i> , 2020 [35]
栗木三个黄牛	石英脉型钨锡矿体		白云母 Ar-Ar 定年	209.2 ± 2	Feng M <i>et al.</i> , 2019 [2]
栗木老虎头	石英脉型钨锡矿体		白云母 Ar-Ar 定年	214.1 ± 1.9	杨峰等, 2009 [39]
栗木老虎头	石英脉型钨锡矿体		锡石 U-Pb 定年	210.0 ± 4.9	潘知博等, 2023 [34]
栗木老虎头	石英脉型钨锡矿体		白云母 Ar-Ar 定年	208.0 ± 1.0	Huang <i>et al.</i> , 2020 [35]
栗木老虎头	石英脉型钨锡矿体		白云母 Ar-Ar 定年	205.2 ± 0.7	Feng M <i>et al.</i> , 2019 [2]
栗木水溪庙	花岗岩型钨锡铌钽矿体	成矿年龄	铌钽铁矿 U-Pb 定年	219 ± 3	Che <i>et al.</i> , 2019 [24]
栗木水溪庙	石英脉型钨锡矿体		白云母 Ar-Ar 定年	210 ± 1.5	Feng M <i>et al.</i> , 2019 [2]
栗木水溪庙	石英脉型钨锡矿体		白云母 Ar-Ar 定年	208.4 ± 1.2	Huang <i>et al.</i> , 2020 [35]
栗木水溪庙	石英脉型钨锡矿体		锡石 U-Pb 定年	210.7 ± 1.5	潘知博等, 2023 [34]
宜春 414	二云母花岗岩	成岩年龄	锆石 U-Pb 定年	161 ± 1 Ma	楼法生等, 2005 [40]
宜春 414	二云母花岗岩		锆石 U-Pb 定年	155.88 ± 0.6 Ma	李胜虎, 2015 [41]

续表

宜春 414	二云母花岗岩		锆石 U-Pb 定年	157.4 ± 1.5 Ma	王雪娜, 2023 [42]	
宜春 414	二云母花岗岩		锆石 U-Pb 定年	158.0 ± 1.8 Ma	左梦璐, 2016 [43]	
宜春 414	含锂白云母花岗岩		锆石 U-Pb 定年	156.0 ± 0.4 Ma	左梦璐, 2016 [43]	
宜春 414	黄玉锂云母花岗岩	成矿年龄	铌钽铁矿 U-Pb 定年	160.0 ± 1.0 Ma	Che <i>et al.</i> , 2015 [24]	
宜春 414	黄玉锂云母花岗岩		辉钼矿 Re-Os 定年	150.6 ± 5.1 Ma	李胜虎, 2015 [41]	
宜春 414	黄玉锂云母花岗岩		铌钽锰矿 U-Pb 定年	158.0 ± 1.0 Ma	Che <i>et al.</i> , 2015 [24]	
宜春 414	石英脉型钨矿体		辉钼矿 Re-Os 定年	156.0 ± 2.8 Ma; 156.0 ± 2.4 Ma	易先奎等, 2015 [44]	
大吉山	黑云母花岗岩	成岩年龄	全岩 Rb-Sr 定年	167 ± 1 Ma	孙恭安等, 1985 [45]	
大吉山	黑云母花岗岩		黑云母 K-Ar 定年	160.3 ± 3 Ma 164.2 ± 3.5 Ma	蒋国豪等, 2004 [46]	
大吉山	二云母花岗岩		全岩 Rb-Sr 定年	161 Ma	孙恭安等, 1985 [45]	
大吉山	二云母花岗岩		白云母 K-Ar 定年	160.6 ± 2.8 Ma	蒋国豪等, 2004 [46]	
大吉山	矿化白云母花岗岩		全岩 Rb-Sr 定年	159 ± 5 Ma	孙恭安等, 1985 [45]	
大吉山	矿化白云母花岗岩		锆石 U-Pb 定年	151.7 ± 1.6 Ma	张文兰等, 2004 [47]	
大吉山	花岗岩型钨铌钽体		铌钽矿颗粒 U-Pb 定年	149.9 ± 1.7 Ma	Liu <i>et al.</i> , 2019 [48]	
大吉山	石英脉型钨矿体	成矿年龄	流体包裹体 Rb-Sr 定年	150.9 ± 2.4 Ma	张思明等, 2012 [23]	
大吉山	石英脉型钨矿体		辉钼矿 Re-Os 定年	161 ± 1.3 Ma	张思明等, 2012 [23]	
大吉山	石英脉型钨矿体		白云母 K-Ar 定年	152.6 ± 2.3 Ma; 158.1 ± 2.8 Ma	蒋国豪等, 2004 [46]	
大吉山	石英脉型钨矿体		流体包裹体 Rb-Sr 定年	150.4 ± 8 Ma	李华芹等, 1993 [49]	
大吉山	石英脉型钨矿体		白云母 Ar-Ar 定年	144 147 Ma	张文兰等, 2006 [50]	
大吉山	矿化白云母花岗岩			锆石 U-Pb 定年	151.7 ± 1.6 Ma	张文兰等, 2004 [47]
大吉山	花岗岩型钨铌钽体			铌钽矿颗粒 U-Pb 定年	149.9 ± 1.7 Ma	Liu <i>et al.</i> , 2019 [48]
大吉山	石英脉型钨矿体	成矿年龄	流体包裹体 Rb-Sr 定年	150.9 ± 2.4 Ma	张思明等, 2012 [23]	
大吉山	石英脉型钨矿体		辉钼矿 Re-Os 定年	161 ± 1.3 Ma	张思明等, 2012 [23]	
大吉山	石英脉型钨矿体		白云母 K-Ar 定年	152.6 ± 2.3 Ma; 158.1 ± 2.8 Ma	蒋国豪等, 2004 [46]	
大吉山	石英脉型钨矿体		流体包裹体 Rb-Sr 定年	150.4 ± 8 Ma	李华芹等, 1993 [49]	
大吉山	石英脉型钨矿体		白云母 Ar-Ar 定年	144 147 Ma	张文兰等, 2006 [50]	
黄山	中粗粒花岗岩			锆石 U-Pb 定年	130.6 ± 2.1	Zhou <i>et al.</i> , 2013 [51]
黄山	中粗粒花岗岩			锆石 U-Pb 定年	133.9 ± 1.0	Xiang <i>et al.</i> , 2017 [52]
黄山	中粗粒花岗岩	成岩年龄	锆石 U-Pb 定年	129.0 ± 1.4	江小强, 2020 [53]	
黄山	细粒花岗岩		锆石 U-Pb 定年	133.7 ± 1.1	Xiang <i>et al.</i> , 2017 [52]	
黄山	细粒花岗岩		锆石 U-Pb 定年	132.8 ± 1.0	Xiang <i>et al.</i> , 2017 [52]	
黄山	细粒花岗岩		锆石 U-Pb 定年	133.6 ± 2.5	Xiang <i>et al.</i> , 2017 [52]	

续表

黄山	细粒花岗岩		铌钽铁矿 U-Pb	$130.0 \pm 1.0$	Che <i>et al.</i> , 2015 [24]
黄山	伟晶岩	成矿年龄	铌钽锰矿 U-Pb	$130.0 \pm 1.0$	Che <i>et al.</i> , 2019 [19]
黄山	伟晶岩		铌钽锰矿 U-Pb	$129.0 \pm 1.0$	Che <i>et al.</i> , 2019 [19]
松树岗	隐伏花岗岩	成岩年龄	黑云母 K-Ar 定年	124~131	黄定堂, 2003 [54]
松树岗	伟晶岩		铌钽铁矿 U-Pb	$130 \pm 2$	Che <i>et al.</i> , 2019 [19]
松树岗	伟晶岩	成矿年龄	铌钽铁矿 U-Pb	$129 \pm 1$	Che <i>et al.</i> , 2019 [19]
松树岗	云英岩化花岗岩		黑钨矿 U-Pb	$128 \pm 1$	刘涛, 2023 [55]