

# 钨钼矿床成矿规律及找矿远景分析研究

李贤龙

中化地质矿山总局吉林地质勘查院

DOI:10.12238/jpm.v6i6.8150

**[摘要]** 钨钼矿床是支撑现代工业体系的关键资源，其战略地位堪比稀土。随着绿色能源（如钼在光伏中应用）和高端装备的发展，保障供应链安全、开发低碳提取技术将成为未来重点。各国对钨钼资源的争夺可能重塑全球矿产格局。钨钼作为重要的战略性矿产资源，其成矿规律研究和找矿预测工作对保障资源安全具有重要意义。未来应加强多学科交叉融合，推动找矿突破。

**[关键词]** 钨钼矿床；成矿规律；找矿远景分析

## Study on the ore-forming law and prospecting prospect of tungsten-molybdenum deposits

Li xianlong

Jilin Geological Exploration Institute, China National Chemical Geological and Mining Administration

**[Abstract]** Tungsten and molybdenum deposits are key resources supporting the modern industrial system, with a strategic importance comparable to that of rare earth elements. With the development of green energy (such as the application of molybdenum in photovoltaics) and advanced equipment, ensuring supply chain security and developing low-carbon extraction technologies will be key priorities in the future. The competition for tungsten and molybdenum resources among countries could reshape the global mineral landscape. As important strategic mineral resources, research on their ore-forming mechanisms and prospecting prediction are crucial for ensuring resource security. In the future, interdisciplinary integration should be strengthened to promote breakthroughs in prospecting.

**[Key words]** tungsten and molybdenum deposits; metallogenic law; prospecting prospect analysis

### 引言

钨钼矿床作为重要的战略性矿产资源，在经济、工业、科研和国防领域具有深远的意义，具体体现在经济意义、工业应用价值、战略与国防意义以及地质与科研价值。通过加强成矿系统理论研究，完善区域成矿模型，重视共生元素综合评价，提高资源利用率，开展典型矿床深部找矿示范，建立预测指标体系，钨钼矿床是支撑现代工业体系的关键资源，其战略地位堪比稀土。随着绿色能源（如钼在光伏中应用）和高端装备的发展，保障供应链安全、开发低碳提取技术将成为未来重点。各国对钨钼资源的争夺可能重塑全球矿产格局。

### 1. 钨钼矿床的意义

#### 1.1 经济意义

(1) 高附加值资源：钨和钼属于高价值金属，全球市场需求稳定。钨精矿 ( $WO_3$ ) 和钼精矿 ( $MoS_2$ ) 是国际贸易中的重要商品，尤其在高端制造业中需求旺盛。

(2) 产业链带动效应：开发钨钼矿床可带动采矿、冶炼、加工、装备制造等上下游产业链，促进区域经济发展（如中国的赣南、河南栾川等钨钼矿集区）。

#### 1.2 工业应用价值

##### 1.2.1 钨的关键用途

钨在以下领域具有不可替代的作用：(1) 硬质合金：钨碳化物 (WC) 是制造切削工具、钻头、模具的核心材料，占全球钨消费量的 60% 以上。(2) 高温领域：钨的熔点 ( $3422^\circ C$ ) 为所有金属最高，用于航天发动机喷嘴、核聚变装置（如 ITER 项目）的等离子体 facing 材料。(3) 电子工业：钨丝用于灯泡、半导体封装，钨铜合金用作高功率电子元件散热基板。(4) 化工催化剂：钨系催化剂用于石油精炼（脱硫）、合成氨等化工过程。

#### 1.2.2 钼的关键用途

钼在以下领域具有不可替代的作用：(1) 合金添加剂：钼能显著提升钢的强度、耐腐蚀性和高温性能，用于制造石油管道、船舶、装甲钢（如军事装备）。(2) 化工催化剂：钼系催化剂用于石油精炼（脱硫）、合成氨等化工过程。(3) 新能源领域：钼是太阳能薄膜电池 (CIGS) 和锂离子电池电极材料的潜在成分。(4) 新能源领域：钼是太阳能薄膜电池 (CIGS) 和锂离子电池电极材料的潜在成分。

### 2. 钨钼矿床成矿规律

#### 2.1. 成矿地质背景

钨钼矿床主要形成于特定的构造-岩浆环境中，成矿规律

涉及多种地质过程和控矿因素：（1）主要分布于大陆板块边缘活动带和陆内造山带，主要产于大陆碰撞带（如华南钨矿带）和活动大陆边缘（如环太平洋钨矿带），古亚洲洋、特提斯和环太平洋三大成矿域均有分布；（2）与中生代（特别是燕山期）岩浆活动关系密切；（3）常位于深大断裂交汇部位或不同构造单元过渡带，深大断裂控制矿集区分布（如郯庐断裂带两侧的钨矿群）。

## 2.2. 岩浆岩条件

（1）钨矿：与高分异 S 型花岗岩密切相关（ $\text{SiO}_2 > 72\%$ ， $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} > 1.5$ ）

（2）钼矿：多与 I 型或 A 型花岗岩有关（如斑岩型钼矿与高钾钙碱性系列）

（3）典型岩体：华南的复式花岗岩体、克萊麦克斯型石英二长岩

## 2.3. 矿床类型及特征

### 2.3.1 矽卡岩型钨钼矿床

最常见（如中国柿竹园钨钼矿），与中酸性岩体（花岗岩类）侵入碳酸盐岩（灰岩、大理岩）接触带有关，形成高温热液交代矿。具有三种特征（1）形成于中酸性岩体与碳酸盐岩接触带；（2）典型矿物组合：白钨矿、辉钼矿、石榴子石、透辉石；（3）规模大、品位高，是重要的工业类型。

### 2.3.2 石英脉型钨钼矿床（黑钨矿）

主要具有以下三种特征：（1）发育于岩体内部或围岩裂隙中；（2）以黑钨矿、辉钼矿为主要矿石矿物；（3）常呈现“五层楼”式垂向分带特征。

### 2.3.3 斑岩型钼（钨）矿床

与高氧化态、富碱的斑岩系统相关，成矿流体源于岩浆分异。（1）与高钾钙碱性花岗岩斑岩有关；（2）具典型的面状蚀变分带；（3）规模大但品位相对较低。

### 2.3.4 云英岩型钼矿床

花岗岩顶部蚀变带内，钨钼共生。

### 2.3.5 成矿时代分布

（1）时间分布：全球主成矿期为中生代（180-80Ma），尤其燕山期，如中国华南、新生代如美洲斑岩钼矿；多期叠加例如华南部分矿床经历加里东期预富集+燕山期主成矿。中国东部以燕山期（140-90Ma）为主，部分矿床存在多期成矿叠加现象。

（2）空间分布：区域分带为钨矿常位于岩体顶部或外接触带，钼矿更靠近岩体内部（如斑岩系统）；矿化垂向分带为上部钨（黑钨矿）-深部钼（辉钼矿），或反向（取决于流体演化）。

### 2.3.6 成矿物质来源

钨钼矿的成矿物质来源多样，主要与地壳和地幔的岩浆活动、流体作用以及地壳物质的再循环密切相关。以下是其成矿物质的主要来源及形成过程：

（1）钨钼主要来源于地壳重熔型花岗岩：钨(W)和钼(Mo)

常与高演化（高分异）的 S 型或 A 型花岗岩相关。这些花岗岩通常由地壳物质（如富钨钼的沉积岩或变质岩）部分熔融形成。岩浆演化晚期，富挥发分（F、Cl、B 等）的流体携带钨钼元素，在岩体顶部或围岩中沉淀成矿。典型矿床如华南地区的石英脉型黑钨矿矿床（如江西西华山）、矽卡岩型白钨矿矿床（如湖南柿竹园）。

（2）幔源岩浆贡献：部分钼矿床（如斑岩型钼矿）可能与壳幔混源岩浆有关。例如，俯冲带环境下，地幔楔部分熔融形成的岩浆携带钼，与地壳物质混合后成矿（如美国 Climax 钼矿）。

（3）地壳流体萃取：成矿流体以岩浆水为主，后期有大气水混入。（1）变质流体作用，钨钼可能源自富有机质或黏土质的沉积岩（如黑色页岩），在区域变质或接触变质过程中被热液流体活化萃取，形成层控型或脉状矿床（如德国 Erzgebirge 的钨矿床）。（2）热液循环系统作用，大气降水或建造水在地下循环过程中，淋滤围岩中的钨钼，在构造有利部位（如断裂、褶皱）沉淀成矿（如某些低温热液矿床）。

### （4）壳幔相互作用

俯冲带物质循环：大洋板块俯冲过程中，沉积物或蚀变洋壳释放的含钨钼流体上升至地幔楔，引发部分熔融，形成含钨钼岩浆（如安第斯山脉的斑岩型钼矿）。

### （5）表生富集作用

与沉积再富集，原生钨钼矿经风化剥蚀后，可能在沉积盆地中富集形成砂或沉积型矿床（较少见，但某些钼可能富集于黑色页岩中）。

## 3.找矿远景分析

钨钼矿床的找矿远景分析需综合地质、地球物理、地球化学及遥感等多学科信息，建立多参数预测模型。以下从关键控制因素、预测方法、远景区分级及典型实例等方面系统阐述。

### 3.1 找矿标志

钨钼矿床的找矿标志有地质标志、地球化学标志以及地球物理标志。

#### 3.1.1 地质标志

- （1）中生代中酸性岩体出露区；
- （2）岩体与碳酸盐岩接触带；
- （3）区域性断裂构造交汇部位；
- （4）石英脉群发育地区。

#### 3.1.2 地球化学标志

- （1）W、Mo、Bi、Sn 等元素组合异常；
- （2）异常规模大、强度高、分带明显，原生晕轴向分带特征明显。

#### 3.1.3 地球物理标志

- （1）高磁、低阻异常区；
- （2）重力梯度带附近；
- （3）隐伏岩体顶突部位。

#### 3.1.4 找矿预测标志总结

综合以上，钨钼矿找矿预测标志分为五大类，如下表。

表1 钨钼矿找矿预测标志分类表

| 标志类型 | 钨矿典型特征    | 钼矿典型特征      |
|------|-----------|-------------|
| 构造   | 碰撞带、深断裂   | 斑岩铜钼矿带、裂谷环境 |
| 岩浆岩  | 高分异花岗岩    | 石英二长岩-花岗闪长岩 |
| 蚀变   | 云英岩化、矽卡岩化 | 钾化-绢英岩化-泥化  |
| 矿物组合 | 黑钨矿+锡石+毒砂 | 辉钼矿+黄铁矿+黄铜矿 |
| 地球化学 | W-Sn-Bi异常 | Mo-Cu-Au异常  |

钨钼矿的找矿需综合“地质+地球化学+地球物理”方法，重点关注：（1）高演化花岗岩+矽卡岩/云英岩蚀变\*\*→钨钼矿靶区。（2）斑岩系统+钾化-绢英岩化分带→钼矿靶区。（3）W-Mo-Cu-Sn-Bi 地球化学异常→矿化线索。

### 3.2. 远景区带划分

根据中国地质背景，可划分以下重要远景区：（1）南岭成矿带：以石英脉型和矽卡岩型钨矿为主；（2）东秦岭成矿带：大型-超大型钼矿床集中区；（3）赣东北-浙西成矿带：钨钼多金属矿床发育；（4）大兴安岭-燕山成矿带\*\*：斑岩-矽卡岩型钨钼矿床。

### 3.3 深部找矿前景

现有矿床深部普遍存在第二富集带（1）隐伏岩体顶部是重要找矿方向；（2）500-1500m 深度范围具有较大潜力。

### 3.4 技术方法组合

#### 3.4.1 地球化学标志即高精度地球化学测。

地球化学标志法将钨钼矿分为三类标志，如下表。

表2 高精度地球化学测量标准表

| 指标    | 钨矿异常阈值                  | 钼矿异常阈值    | 钨钼矿异常阈值                |
|-------|-------------------------|-----------|------------------------|
| 原生晕   | W>30ppm                 | Mo>20ppm  | W-Mo-Bi-Be四元素叠加        |
| 次生晕   | Sn>15ppm                | Cu>100ppm | 元素水平分带（内带W/Mo→外带As/Sb） |
| 流体包裹体 | CO <sub>2</sub> >25vol% | 盐度>30wt%  | 沸腾包裹体群（均一温度差>50℃）      |

#### 3.4.2 高分辨率地球物理探测（CSAMT、SIP等）

高精度磁测即岩体接触带 $\Delta T$ 正负交替场（梯度>50nT/m）；低阻体（<300 $\Omega\cdot m$ ）与高极化率（>15%）耦合区；剩余重力负异常（-0.5~-2.0mGal）指示隐伏岩体。

#### 3.4.3 遥感蚀变信息提取

ASTER 数据提取羟基（2.20 $\mu m$ ）与铁染（0.85 $\mu m$ ）复合异常；环形构造（直径3-8km）与线性构造密度>5条/km<sup>2</sup>。

#### 3.4.4 三维地质建模与成矿预测

剩余重力负异常（-0.5~-2.0mGal）指示隐伏岩体，构建“岩体形态-构造格架-矿体定位”耦合模型（如 Micromine 软件），重点预测岩体顶部500-1500m“黄金找矿段”。

#### 3.4.5 综合探测

“地-物-化-遥”四位一体：mermaid、graph TD, A[区域地质填图]→B[高精度磁测+IP], B→C[土壤地球化学剖面], C→D[钻孔原生晕验证], D→E[三维矿体建模]。

### 3.5 找矿远景控制要素

#### 3.5.1 岩浆岩专属性质

（1）钨矿：高分异花岗岩（DI>90, Rb/Sr>10），如华南的“钨锡花岗岩”。

（2）钼矿：高钾钙碱性斑岩（K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O>2, Mo 背景值>5ppm），如斑岩钼矿的钾长石化带。

（3）岩体形态：陡倾接触带（倾角>60°）和岩突部位成矿概率提升40%以上。

#### 3.5.2 构造组合特征：

（1）三级构造体系：深大断裂（导矿）+次级断裂（配矿）+微裂隙（容矿）。

（2）优选区域：不同方向断裂交汇区（如NW向与NE向

断裂交叉部位）。

#### 3.5.3 围岩条件：

（1）钨矿：碳酸盐岩（矽卡岩化带宽>200m）或富铝泥质岩（云英岩化）。

（2）钼矿：火山机构（爆破角砾岩筒）或渗透性砂岩（热液脉型）。

#### 3.5.4 远景区分级标准

远景区根据成矿概率将其分成A、B和C三大类，如下表所示。

表3 远景区分级依据表

| 等级 | 地质依据             | 地球化学异常              | 成矿概率   |
|----|------------------|---------------------|--------|
| A类 | 岩体分异指数>95+多层矽卡岩  | W>50ppm且具垂向分带       | >70%   |
| B类 | 断裂交汇+围岩蚀变带宽>100m | Mo>30ppm伴Cu-Pb-Zn异常 | 40-70% |
| C类 | 单一控矿因素+弱蚀变       | 孤立W/Mo异常无分带         | <30%   |

#### 3.5.5 典型矿集区对比分析

（1）华南钨矿带（赣南-湘东）

控矿因素：燕山期复式岩体+碳酸盐岩层间滑脱构造。找矿模型：“五层楼”垂直分带（岩体内云英岩→外接触带石英脉）。新发现：深部隐伏岩体顶部“钨锡窗”（埋深800-1500m）。

（2）东秦岭钼矿带

控矿因素：走滑断裂控制的斑岩-矽卡岩成矿系统。突破方向：岩体倾伏端钼矿体延伸（如金堆城深部新增储量2.8Mt）。

（3）中亚成矿域（哈萨克斯坦）

特色类型：钨钼-稀有金属碱性岩相关矿床。识别标志：钠长石化+霓石化碱性蚀变组合。

## 4. 结论及建议

（1）钨钼作为重要的战略性矿产资源，其成矿规律研究和找矿预测工作对保障资源安全具有重要意义。未来应加强多学科交叉融合，推动找矿突破。

（2）加强成矿系统理论研究，完善区域成矿模型。钨钼矿的成矿物质以壳源为主（尤其是钨），部分钼可能涉及幔源贡献。成矿过程依赖于岩浆分异、流体活化和构造控矿的三重机制，而源区的初始富集（如古陆块基底）是矿床形成的物质基础。

（3）加强深部勘探，提高隐伏矿体定位精度，传统浅部资源枯竭，需突破3000米以深成矿预测技术（如AI+地球物理建模）。

（4）重视共生元素综合评价，提高资源利用率共生资源利用，综合回收矽卡岩型矿床中的萤石、铋、稀土（如柿竹园矿床）。

（5）提升绿色采矿技术，减少选矿废水（含砷、氟污染）、推广原位浸出（如微生物提钼）。

（6）开展典型矿床深部找矿示范，建立预测指标体系。

## 【参考文献】

王浩洋, 赵正, 陈伟, 周辉, 陈振宇, 侯可军, 李超. 江西梅树坪钨钼矿床地质、成岩成矿时代与找矿方向[J]. 地学前缘. 2017, 24(5).

[2] 孙海微. 新疆哈密市椭圆山钨矿地质特征及找矿标志[J]. 中国金属通报. 2020, (2).

[3] 肖剑, 王勇, 洪应龙, 等. 西华山钨矿花岗岩地球化学特征及与钨成矿的关系[J]. 东华理工大学学报(自然科学版). 2009, (1).