

# 江西宜春-新余地区桃源金矿床多期白钨矿的地球化学与 Sr 同位素特征及其对矿床成因的指示

李昌元<sup>1</sup>, 马盈<sup>2\*</sup>, 刘德亮<sup>2</sup>, 曾凯<sup>1</sup>, 袁启玉<sup>1</sup>, 肖丹<sup>1</sup>

1. 中国地质调查局长沙自然资源综合调查中心, 湖南长沙 410600
2. 中国地质大学(武汉)紧缺战略矿产资源协同创新中心, 资源学院, 地质过程与成矿预测全国重点实验室, 湖北武汉, 430074

**摘要:** 桃源金矿床位于江南造山带东段的萍乐拗陷带内, 是一个典型的石英脉型金矿床。目前, 关于该矿床成矿物质来源、成矿流体演化过程及成因机制的研究仍显不足, 尤其缺乏原位微区地球化学约束。本研究在野外调查与室内鉴定中识别出多期次产出的白钨矿, 其作为关键副矿物, 可为厘定金成矿过程中的流体来源、演化过程及矿床成因提供重要地球化学示踪信息。本文综合运用 CL、LA-ICP-MS 和 LA-MC-ICP-MS 等多种分析手段, 对桃源金矿床中不同阶段、不同世代白钨矿的主微量元素及 Sr 同位素组成开展系统性原位微区分析。根据矿物共生组合及结构特征, 桃源金矿床中识别出三个世代的白钨矿, 分别为: 第 I 成矿阶段石英-黄铁矿脉中具有震荡环带的 Sch-1; 第 II 成矿阶段石英-金-多金属硫化物脉中发育震荡环带并发生破碎的 Sch-2a; 以及 CL 图像呈暗色、胶结早期白钨矿的 Sch-2b。三个世代的白钨矿均呈现出中稀土富集、轻稀土和重稀土相对亏损的稀土元素配分模式, 该特征与国内外典型石英脉型金矿床中白钨矿的稀土配分模式高度一致。结合白钨矿中较高的 Na 含量及成矿流体中等盐度的特征, 表明  $\text{REE}^{3+}$  与  $\text{Na}^+$  很可能通过电价补偿机制替代  $\text{Ca}^{2+}$ , 选择性进入白钨矿晶格。Sch-1 和 Sch-2a 均显示显著的正 Eu 异常, 而 Sch-2b 则呈现微弱的负 Eu 异常, 反映成矿流体的氧逸度自早至晚逐渐升高。流体氧逸度的升高, 可能与成矿过程中大气降水的混入有关。不同世

**基金项目:** 中国地质调查局“江西宜春-新余地区金矿控矿构造和成矿规律研究”(编号: DD20230206513), 国家自然科学基金项目(No. 42302087), 中国博士后科学基金资助项目(编号: 2024M753019)。

**作者简介:** 李昌元(1979-), 男, 正高级工程师, 矿产普查与勘探专业。ORCID: 0009-0004-1535-0588. E-mail: 317975825@qq.com

**通讯作者:** 马盈(1996-), 男, 博士后, 矿产普查与勘探专业。ORCID: 0000-0001-6249-4622. E-mail: maying@cug.edu.cn

代白钨矿的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值高度均一 (0.71236–0.71301)，与经过年龄校正后的加里东期赋矿花岗岩闪长岩的 Sr 同位素组成在误差范围内基本一致，表明成矿流体中的 Sr 主要源自赋矿花岗岩闪长岩，且水岩反应过程中斜长石发生显著分解，不仅释放出 Sr，同时也提供大量 Ca，后者与热液中迁移的 W 结合，在适宜的温压条件下沉淀形成白钨矿。

**关键词：**白钨矿；微量元素；Sr 同位素；矿床成因；桃源金矿床

中图分类号：P611

收稿日期：2025-09-09

## **Geochemical and Sr Isotopic Characteristics of Multiple Scheelite Generations from the Taoyuan Gold Deposit in the Yichun-Xinyu Region, Jiangxi Province: Implications for Ore Genesis**

**Li Chang-Yuan<sup>1</sup>, Ma Ying<sup>2\*</sup>, Liu De-Liang<sup>2</sup>, Zeng Kai<sup>1</sup>, Yuan Qi-Yu<sup>1</sup>, Xiao Dan<sup>1</sup>**

1. *Changsha Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey, Hunan Changsha 410600*

2. *Collaborative Innovation Center for Exploration of Strategic Mineral Resources, School of Earth Resources, State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Hubei Wuhan 430074*

### **Abstract:**

The Taoyuan gold deposit is situated within the Pingle Depression, located in the eastern segment of the Jiangnan Orogenic Belt, and represents a typical quartz vein-type gold deposit. Current understanding of the ore-forming material sources, the evolutionary history of ore-forming fluids, and the ore genesis of the Taoyuan gold deposit remains limited—particularly with respect to high-resolution *in-situ* microanalytical geochemical constraints. Through integrated field investigation and petrographic characterization, we identified multiple generations of scheelite, a critical accessory mineral whose compositional and isotopic signatures serve as robust tracers for constraining the origin and evolution of hydrothermal fluids. *In-situ* microscale geochemical and Sr isotope analyses of

scheelite can provide novel insights into the genesis of gold deposits. This study employed a comprehensive suite of analytical techniques, including CL, LA-ICP-MS, and LA-MC-ICP-MS, to systematically investigate the major and trace element compositions and Sr isotopic characteristics of scheelite from different generations and mineralization stages within the Taoyuan gold deposit. Based on mineral assemblages and textural features, three distinct generations of scheelite have been identified: Sch-1, which exhibits oscillatory zoning and occurs in quartz-pyrite veins of the first mineralization stage; Sch-2a, characterized by oscillatory zoning and fragmentation within quartz-gold-polymetallic sulfide veins of the second mineralization stage; and Sch-2b, displaying dark CL and acting as a cementing phase for earlier-formed scheelite. All three generations of scheelite exhibit a rare earth element (REE) distribution pattern characterized by enrichment of middle REEs and relative depletion of light and heavy REEs. This pattern is highly consistent with that documented in scheelite from well-characterized quartz vein-type gold deposits worldwide. Integrated interpretation of the elevated Na concentrations in scheelite and the moderate salinity of coeval hydrothermal fluids, indicating that  $\text{REE}^{3+}$  and  $\text{Na}^+$  substitute for  $\text{Ca}^{2+}$  through an electrostatic compensation mechanism and selectively incorporate into the scheelite crystal lattice. Sch-1 and Sch-2a display pronounced positive Eu anomalies, whereas Sch-2b shows a weak negative Eu anomaly, suggesting a progressive increase in the oxygen fugacity of the ore-forming fluids from early to late mineralization stages. The observed increase in fluid oxygen fugacity is consistent with the influx of meteoric water during the late stage of mineralization. The  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios of scheelite across different generations are highly consistent (0.71236–0.71301), indistinguishable within analytical uncertainty from the age-corrected initial  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratio of the Caledonian ore-hosting granodiorite. This isotopic congruence strongly indicates that the Sr in the ore-forming fluid was predominantly derived from the granodiorite host rock. Plagioclase dissolution during hydrothermal alteration releases Sr and abundant Ca, which combines with hydrothermal  $\text{WO}_4^{2-}$  to precipitate scheelite. Water-rock interactions between deep-source ore-forming fluids and host rocks played a crucial role in the formation of scheelite.

**Keywords:** Scheelite; Trace element geochemistry; Sr isotope; Ore Genesis; Taoyuan gold deposit

## 0 引言

白钨矿是各类热液金矿床中常见的矿物,广泛存在于矽卡岩型 (Miranda et al., 2022)、岩浆热液型和变质热液型 (即造山型) 金矿床 (Sciuba et al., 2020; 雷金泽等, 2023)。在许多热液金矿床中,均报道了白钨矿与金或含金矿物紧密共生的现象,例如,澳大利亚 Mt Charlotte 金矿 (Vielreicher et al., 2016)、乌兹别克斯坦 Muruntau 金矿 (Kempe et al., 2001)、美国 Stibnite-Yellow Pine Au-Sb-W 矿集区 (Wintzer et al., 2022)、中国小秦岭金矿集区 (Li and Jiang, 2024) 和加拿大 Scheelite Dome Au-W 矿床等 (Mair et al., 2006)。白钨矿的微量元素组成丰富、结构特征复杂,为约束成矿作用过程的物理化学条件、示踪成矿流体的来源与演化、揭示金矿床成矿机制提供了新的研究视角 (Ghaderi et al., 1999; Brugger et al., 2000; 熊德信, 2006; Chen et al., 2024; Weng et al., 2024)。白钨矿的微量元素组成受替代机制、热液流体的来源、组成和物理化学条件、水-岩反应和共生矿物组合等因素控制 (Ghaderi et al., 1999; Song et al., 2014; Li et al., 2021)。对同一个矿床不同阶段、不同世代的白钨矿开展精细的结构与微量元素分析,可以为反演成矿作用过程提供重要约束,取得了非常多的成果。此外,白钨矿作为典型的富 Sr 贫 Rb 矿物,其 Sr 同位素组成基本反映了流体的同位素特征,已被广泛应用于流体来源示踪及运移路径反演研究 (Sun and Chen, 2017; Scanlan et al., 2018)。Sciuba et al. (2020) 对全球多个造山型金矿床中的白钨矿进行了微量元素分析,提出其稀土元素配分模式可用于指示含金流体的来源,并通过微量元素组成区分不同成因类型的金矿床; Weng et al. (2024) 通过对西秦岭寨上金矿床中不同世代的白钨矿开展原位微区微量元素分析,精细示踪了该矿床成矿流体氧逸度的演化过程及水岩反应特征; Li and Jiang (2024) 通过对小秦岭地区杨砦峪金矿床中不同成矿阶段的白钨矿开展微量元素与 Sr-Nd 同位素分析,认为白钨矿的 Sr、REE、Mo 和 As 含量和 Sr-Nd 同位素反映成矿流体具有变质来源,矿床可以归类为造山型金矿床。

江南造山带位于华夏地块与扬子板块的接合部位,是世界知名的 Au、Sb、W 多金属矿产地,其 Sb 储量 > 3 Mt, W 储量 > 6 Mt, Au 储量 > 970 t (Mao et al., 2013; Li et al., 2024)。这些金多金属矿床集中分布在湖南段,在很多矿床中存在金钨共生现象,典型代表包括沃溪 Au-Sb-W 矿床 (Li et al., 2024)、杏枫山 Au-W 矿床 (娄元林等, 2024)、黄金洞 Au 矿床 (Chen et al., 2024) 和万古 Au 矿床 (Yin et al., 2025) 等。近年来,随着找矿勘查工作的不断深入,在江南造山带江西段内的萍乐拗陷带先后发现了部分脉状金矿床,这些金矿床与江南造山带湖南段在矿化蚀变特征、成矿流体特征等方面具有诸多相似性,但研究程度相对较低,金的成矿过程与成因机制研究十分薄弱,严重制约了该区金矿床的找矿突破。桃源金矿床位于萍乐拗陷带西部,该矿床金矿体主要赋存于加里东期岩体中。雷丽宏 (1994) 通过对该矿床的矿石和蚀变围岩开

展主微量元素分析,认为金矿化过程反映了K和CO<sub>2</sub>的带入以及Ca、Na和Mg的大量带出。李生明(2019)认为该矿床的成矿流体具有中低温、低盐度富CO<sub>2</sub>的特征,成矿流体早期为变质来源,后期混入了岩浆水。但总体而言,该矿床的成因和成矿过程研究十分薄弱。笔者研究团队在桃源金矿床中发现了不同阶段、不同世代的白钨矿,这些白钨矿与不同类型的含金硫化物密切共生,为探究矿床的成矿过程、流体来源与成因机制提供了新的窗口。因此,本文以桃源金矿床不同阶段、不同世代的白钨矿为突破口,在详细的岩相学研究基础上,对其开展原位微区微量元素与Sr同位素分析,以期限定成矿物质来源、约束成矿过程中物理化学条件的变化,为萍乐拗陷带脉状金矿床的成因机制研究和找矿勘查提供理论依据。

## 1 地质背景

### 1.1 区域地质

江南造山带位于华夏地块和扬子板块之间,是两者在新元古代早期碰撞拼合过程重形成的构造带(图1; Yao et al., 2019)。该造山带呈北北东向延伸的弧形构造隆起带,自显生宙以来经历了三期重要的造山作用:(1)早古生代陆内造山事件(465~380 Ma),其地质特征包括前志留纪地层与中晚泥盆世地层间的角度不整合、区域性的绿片岩相变质作用,以及大规模S型花岗岩岩浆活动和混合岩化作用(Shu et al., 2021);(2)早中生代(三叠纪)陆内造山运动(240~200 Ma),表现为大规模北西向逆冲断层和褶皱构造的形成,并伴随S型花岗岩的侵位(Wang et al., 2013);(3)晚中生代(侏罗纪-白垩纪),受古太平洋板块向欧亚大陆板块俯冲及其后续回撤的影响,华南地区发生了广泛的岩石圈伸展作用,并伴随大规模的岩浆活动(Zhou et al., 2006)。

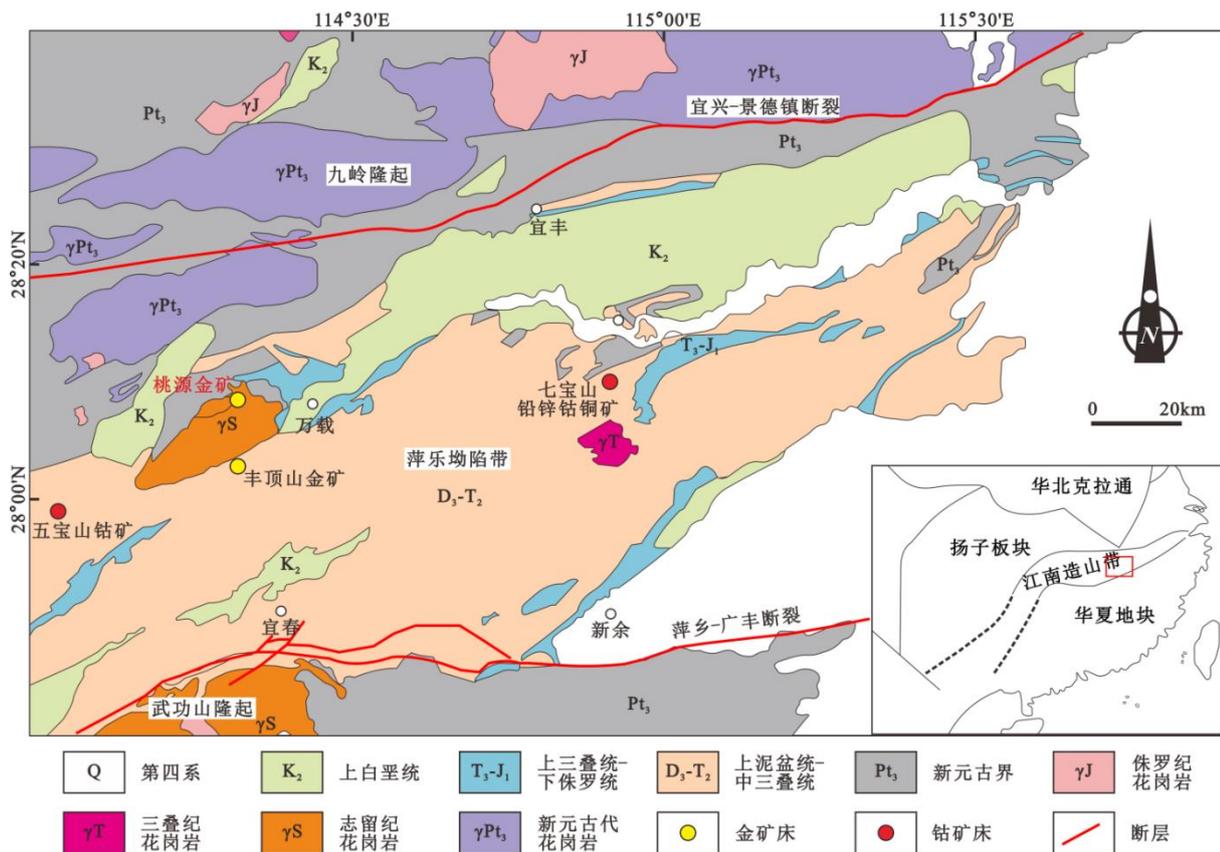


图 1 萍乐拗陷带地质简图（据赵东安等，2023）

Fig.1 Geological map of the Pingxiang-Leping depression (after Zhao et al., 2023)

萍乐拗陷带位于江南造山带东段，其西北侧以宜兴-景德镇断裂为界，与九岭隆起相邻；东北侧则通过萍乡-广丰断裂与武功山隆起相连（图 1）。拗陷带内地层发育较为完整，基底主要由前震旦纪的浅变质岩系构成，其原岩为海相泥砂质碎屑岩夹火山岩建造；盖层主要包括上古生界至三叠系的海陆交互相沉积岩以及侏罗系的陆相碎屑岩（罗喜成，2015）。萍乐拗陷带内主要发育早古生代和早中生代岩浆岩（图 1）。早古生代岩浆岩主要包括丰顶山黑云母花岗岩和黑云母花岗闪长岩（ $436 \pm 5$  Ma; Zhong et al., 2013）以及桃源黑云角闪石英闪长岩（ $409 \pm 2$  Ma; Zhong et al., 2013）；早中生代岩浆活动则以三叠纪的蒙山岩体为代表（236–217 Ma; Wei et al., 2024; 李昌元等，2025）。位于萍乐拗陷带北部的九岭隆起主要表现为新元古代和侏罗纪时期的岩浆活动（Sun et al., 2017）。

萍乐拗陷带主要分布有七宝山、五宝山、铜鼓岭等中低温热液型钴多金属矿床，以及丰顶山、吴村、余家里和小龙等微细浸染型金矿床及金矿点（杨斌等，2012; 罗喜成，2015）。此外，该区还发育赋存于加里东期桃源岩体中的桃源石英脉型金矿床，其矿化特征明显不同于其他赋存于碎屑沉积岩中的微细浸染型金矿床（雷丽宏，1994）。

## 1.2 矿床地质

桃源金矿床位于丰顶山岩体与桃源岩体的接触部位（图 1）。矿区内含金石英脉主要赋存于近东西向展布的破碎带中（图 1）。

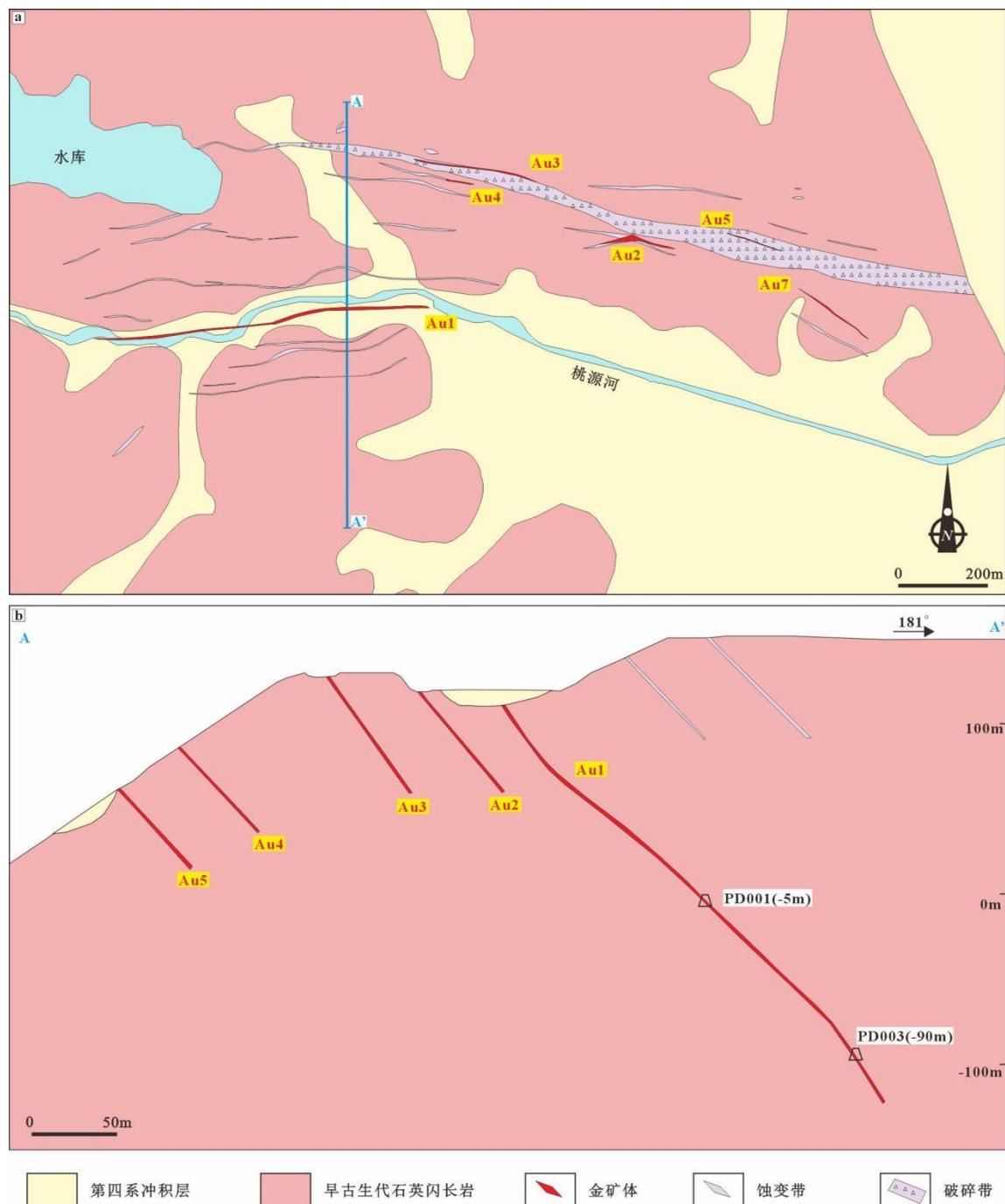


图 2 (a) 桃源金矿床矿区地质图；A-A' (b) 勘探线剖面图（李生明，2019）

Fig. 2 (a) Geological map of the Taoyuan gold deposit, and a representative cross section A-A' (b) (Li, 2019)

志留纪桃源岩体主要由中粒黑云角闪石英闪长岩组成，受构造作用影响，矿物普遍表现出弱定向排列，并叠加了后期热液蚀变作用，黄铁矿化、绢云母化和硅化等蚀变十分发育。志留纪丰顶山岩体主要岩性为黑云母花岗岩和黑云母花岗闪长岩，热液蚀变作用相对较弱。F1 断层是矿区内的主要控矿构造，走向 80°，倾向北北东至北，倾角 70-85°，地表控制长度超过 1000 米，破碎带宽度为 0.5-20 米（李生明，2019）。金矿体主要赋存于 F1 断层相关的挤压破碎带，或其两侧呈羽状排列的次级张扭性断裂中（李生明，2019）。

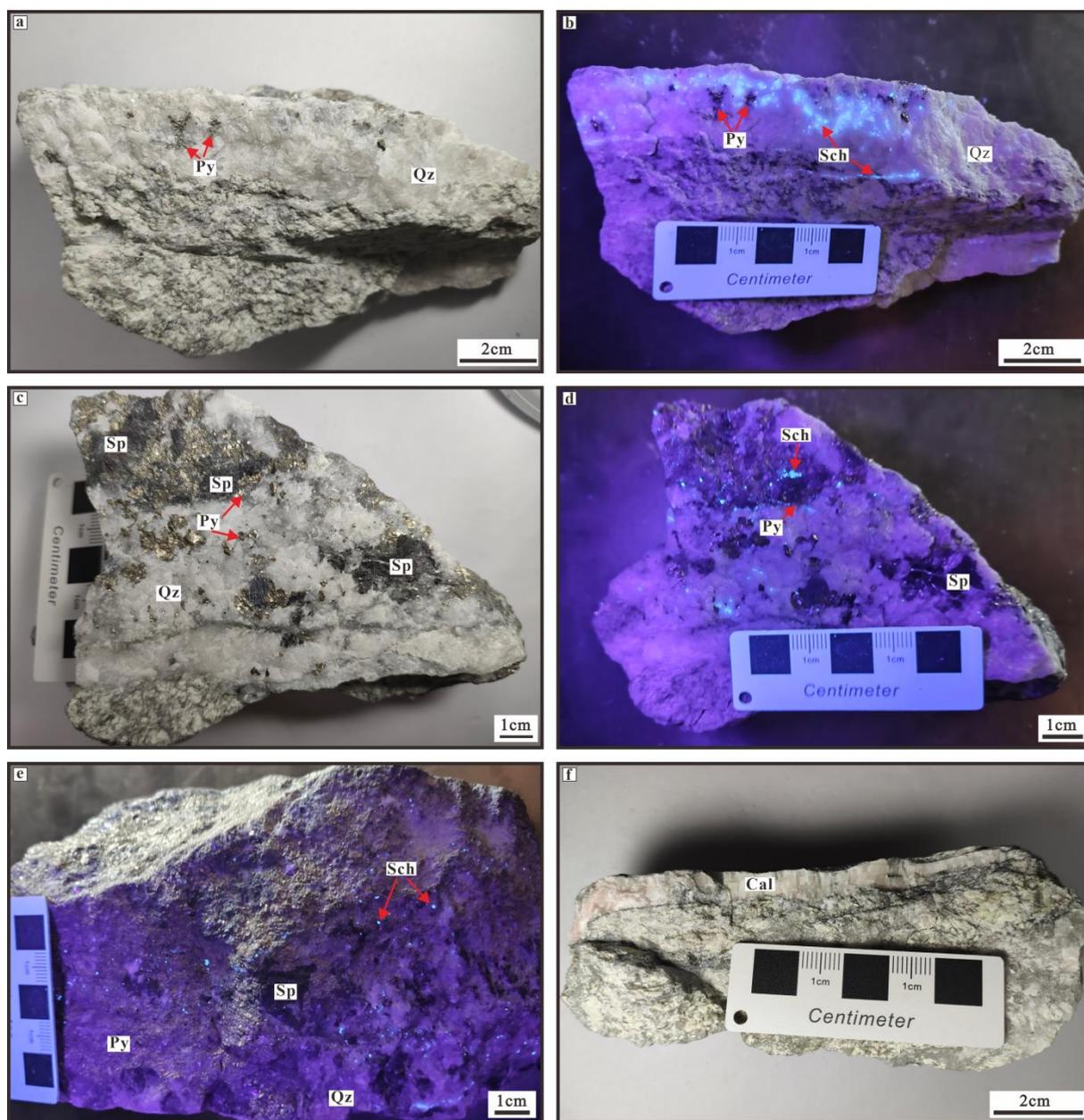


图 3 桃源金矿床典型金矿石结构与矿物组成

(a-b)第 I 阶段石英-黄铁矿脉切穿绢云母化蚀变石英闪长岩，可见白钨矿呈浸染状分布在石英脉中或呈

现状分布在石英脉和石英闪长岩的接触部位；（c-d）第 II 阶段石英-多金属硫化物型金矿石，可见白钨矿呈星点状分布其中且大多与硫化物紧密共生；（e）块状多金属硫化物金矿石，其中含有少量中细粒白钨矿；（f）第 III 阶段贫矿石英-方解石细脉

矿物缩写：Cal-方解石；Py-黄铁矿；Qz-石英；Sch-白钨矿；Sp-闪锌矿

Fig. 3 Photographs showing the mineralization and ore textures of the Taoyuan gold deposit.

桃源金矿床共发现 10 条石英脉型金矿体（编号：Au1-Au10），其中 Au1 和 Au2 为主要矿体，合计占矿床总资源量的 90% 以上。Au1 矿体主要赋存于 F1 断裂南侧的次级裂隙中，倾向南至南南东，倾角为 35-60°，局部地段较陡（图 2）。该矿体分布标高介于+105 米至-320 米之间，控制长度为 540 米，厚度为 0.09-1.56 米，平均厚度 0.72 米，金品位变化范围为 0.11-30.9 克/吨，平均品位为 4.7 克/吨。Au1 矿体的金资源量为 767 千克，占矿床总金资源量的 65%（李生明，2019）。

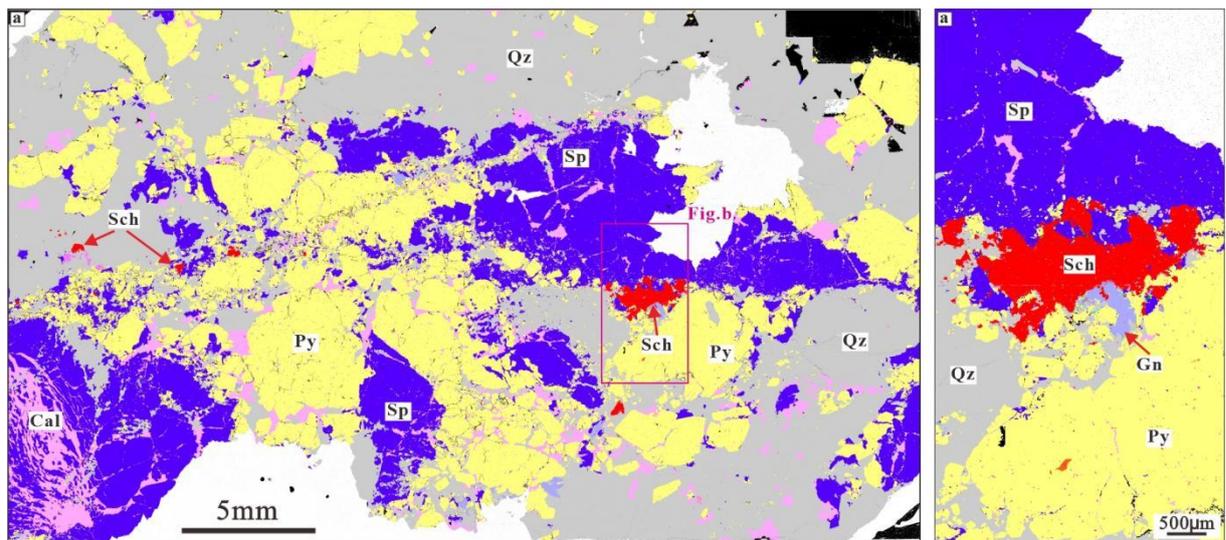


图 4 第 II 阶段石英-多金属硫化物型金矿石 TIMA 图像揭示白钨矿的赋存状态

矿物缩写：Cal-方解石；Gn-方铅矿；Py-黄铁矿；Qz-石英；Sch-白钨矿；Sp-闪锌矿

Fig. 4 TIMA mineral maps showing the occurrences of scheelite in Stage II quartz-polymetallic gold ores.

桃源金矿床的矿石类型主要包括石英-黄铁矿脉型（图 3a-b）和石英-多金属硫化物脉型（图 3c-e, 4）。金属矿物以黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、白钨矿为主，同时可见自然金和银金矿等（图 5）。脉石矿物主要包括石英、绢云母、方解石及独居石等。矿区围岩蚀变发育良好，主要类型包括绢云母化、硅化、碳酸盐化和黄铁矿化，蚀变作用主要集中在含金石英脉两

侧 0.2-1 米的范围内。

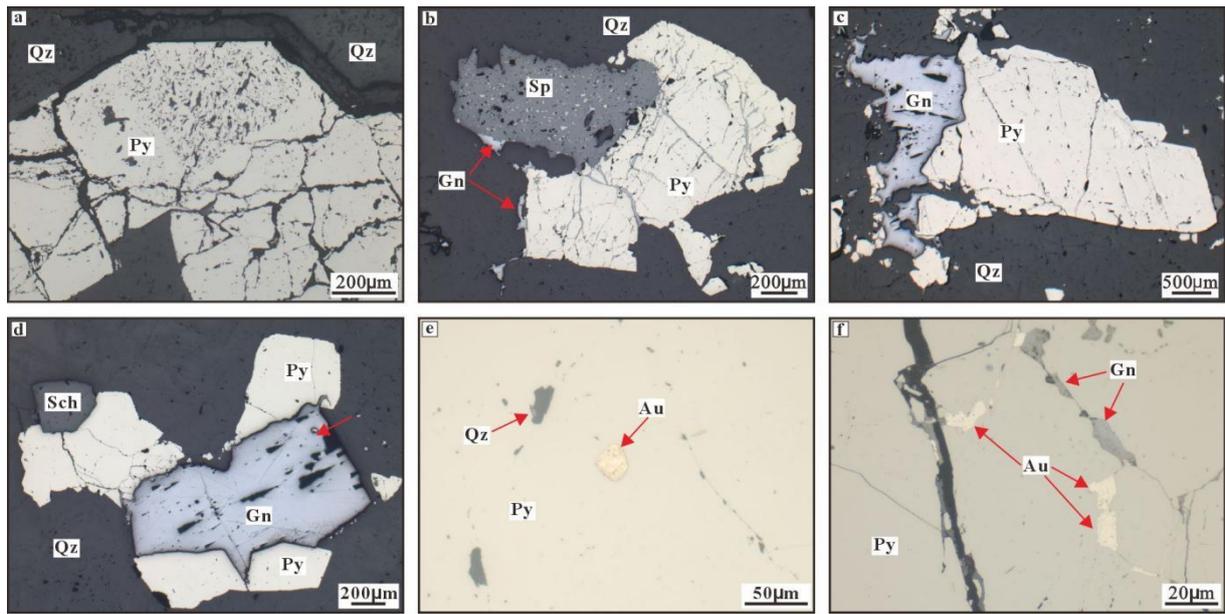


图 5 桃源金矿床不同成矿阶段硫化物的显微结构特征

(a) 第 I 阶段中粗粒黄铁矿集合体；(b) 第 II 阶段闪锌矿交代黄铁矿，黄铁矿较为破碎；(c) 第 II 阶段方铅矿交代黄铁矿；(d) 第 II 阶段黄铁矿、方铅矿、白钨矿紧密共生；(d) 第 II 阶段黄铁矿中包裹体金；(e) 自然金-方铅矿细脉充填于第 II 阶段黄铁矿的裂隙中

矿物缩写：Au-自然金；Gn-方铅矿；Py-黄铁矿；Qz-石英；Ser-绢云母；Sch-白钨矿；Sp-闪锌矿

Fig. 5 Micropetrographic characteristics of sulfide minerals from different mineralization stages at the Taoyuan gold deposit

根据矿脉之间的穿插关系及金矿石的矿物组合特征，桃源金矿床的金矿化作用可进一步划分为三个阶段（图 6）：

**石英-黄铁矿化阶段 (I)：**此阶段金矿化较弱，主要由早期热液沿破碎带充填形成宽 5-20 cm 的乳白色至灰白色石英-黄铁矿脉（图 3a-b）。该阶段的黄铁矿主要呈中粗粒状，具自形至半自形结构，以颗粒或集合体形式分布于石英脉或蚀变围岩中（图 5a）。除石英外，共生的脉石矿物还包括白钨矿、绢云母和方解石等。

**石英-多金属硫化物矿化阶段 (II)：**该阶段是桃源金矿床最主要的成金阶段。在构造应力作用下，第 I 阶段形成的石英脉发生破碎，随后被第 II 阶段的烟灰色石英-黄铁矿-方铅矿-闪锌矿-黄铜矿细脉或网脉充填（图 3c-e，图 4）。金主要以包裹金或裂隙金的形式赋存于黄铁矿中（图 5e-f）。此外，该阶段矿脉中还见有大量白钨矿，呈片状或星点状分布于石英脉内（图 3d-

e)。伴生的脉石矿物主要包括绢云母和方解石等。

**石英-方解石阶段 (III)：**该阶段基本无金矿化，且在矿区内分布较少。其主要特征是形成大量贫矿的石英-方解石脉 (图 3f)，常切割或叠加于前两个热液成矿阶段的蚀变和矿化组合之上，硫化物基本不发育。

| 矿物名称 | 第I阶段           | 第II阶段                   | 第III阶段 |
|------|----------------|-------------------------|--------|
| 石英   | —————          | —————                   | —————  |
| 钾长石  | .....          |                         |        |
| 白云母  | —————          | —————                   | .....  |
| 绿泥石  | —————          | —————                   |        |
| 方解石  | .....          | .....                   | —————  |
| 磷灰石  | ———            |                         |        |
| 黄铁矿  | —————          | —————                   | .....  |
| 黄铜矿  |                | .....                   |        |
| 闪锌矿  |                | —————                   |        |
| 方铅矿  |                | .....                   |        |
| 自然金  | .....          | .....                   |        |
| 白钨矿  | Sch-1<br>..... | Sch-2a, Sch-2b<br>..... |        |

注：————— 主要；————— 次要；..... 微量

图 6 桃源金矿床矿物生成顺序表

Fig. 6 Paragenetic sequence for the Taoyuan gold deposit.

## 2 分析方法

为查明白钨矿的赋存状态，本研究选取一件第 II 阶段含白钨矿的金矿石样品进行全自动矿物分析系统 (TIMA) 分析。TIMA 测试在中国地质大学 (武汉) 紧缺战略矿产资源协同创新中心完成，所用仪器为配备二次电子探头、背散射探头和能谱仪的 TIMA GMS 综合矿物分析仪。测试采用点阵扫描模式，加速电压 25 kV，束流 8 nA，工作距离 15 mm。具体测试方法和参数参照徐耀明等 (2025)。为进一步揭示白钨矿的内部结构特征，本研究还利用配备阴极发光 (CL) 探头的 TIMA 仪器，对不同成矿阶段的白钨矿进行了 CL 成像分析，工作电压为 15

kV, 束流为 1 nA。

白钨矿的微量元素分析在中国地质大学(武汉)紧缺战略矿产资源协同创新中心完成, 测试仪器为 Agilent 7900 型 ICP-MS 联用 ESL 193HE 型 193 nm 准分子激光剥蚀系统。测试过程中采用 32  $\mu\text{m}$  激光束斑, 剥蚀频率为 8 Hz, 能量密度为 3.5 J/cm<sup>2</sup>。实验中采用 MPI-DING 玻璃标准物质 (GOR128-G 和 StHs6/80-G; Jochum et al., 2006) 以及 NIST 610 和 612 玻璃标准物质作为外标, 用于元素含量校正。分析数据的离线处理由 ICPMSDataCal 软件完成 (Liu et al., 2010)。

白钨矿的原位微区 Sr 同位素分析在武汉上谱分析科技有限责任公司利用 LA-MC-ICP-MS 完成。所用 MC-ICP-MS 型号为 Neptune Plus, 配备 ESL 193HE 型 193 nm 准分子激光器。测试过程中采用 90  $\mu\text{m}$  激光束斑, 剥蚀频率为 8 Hz, 能量密度为 10 J/cm<sup>2</sup>。由于实验室缺乏适宜的白钨矿标准样品, 本研究采用磷灰石标准物质 Durango 和 MAD 作为未知样品, 用于监控测试数据的可靠性, 该方法亦被 Kozlik et al. (2016) 和 Weng et al. (2024) 所采用。具体实验参数及测试流程参照 Tong et al. (2016)。

### 3 分析结果

#### 3.1 白钨矿岩相学及结构特征

桃源金矿床中的白钨矿主要呈浸染状分布于第 I 阶段的石英-黄铁矿脉及第 II 阶段的石英-多金属硫化物脉中。第 I 阶段白钨矿 (Sch-1) 主要为中细粒结构 (粒径 100–800  $\mu\text{m}$ ), 呈自形至半自形粒状分布于石英脉中 (图 7a-c)。在 CL 图像中, Sch-1 显示出明显的震荡环带, 表现为亮 CL 与暗 CL 环带交替出现的特征 (图 7b-c)。第 II 阶段白钨矿 (Sch-2) 为中粗粒结构 (粒径 500–3000  $\mu\text{m}$ ), 呈它形颗粒或集合体, 常被闪锌矿、黄铁矿等硫化物包裹 (图 7d-e)。CL 图像显示, Sch-2 可进一步划分为两个世代: Sch-2a 具有较亮的 CL 图像并发育震荡环带, 该世代白钨矿多呈破碎状或角砾状, 被晚期 CL 图像较暗的 Sch-2b 所胶结 (图 7e-f)。

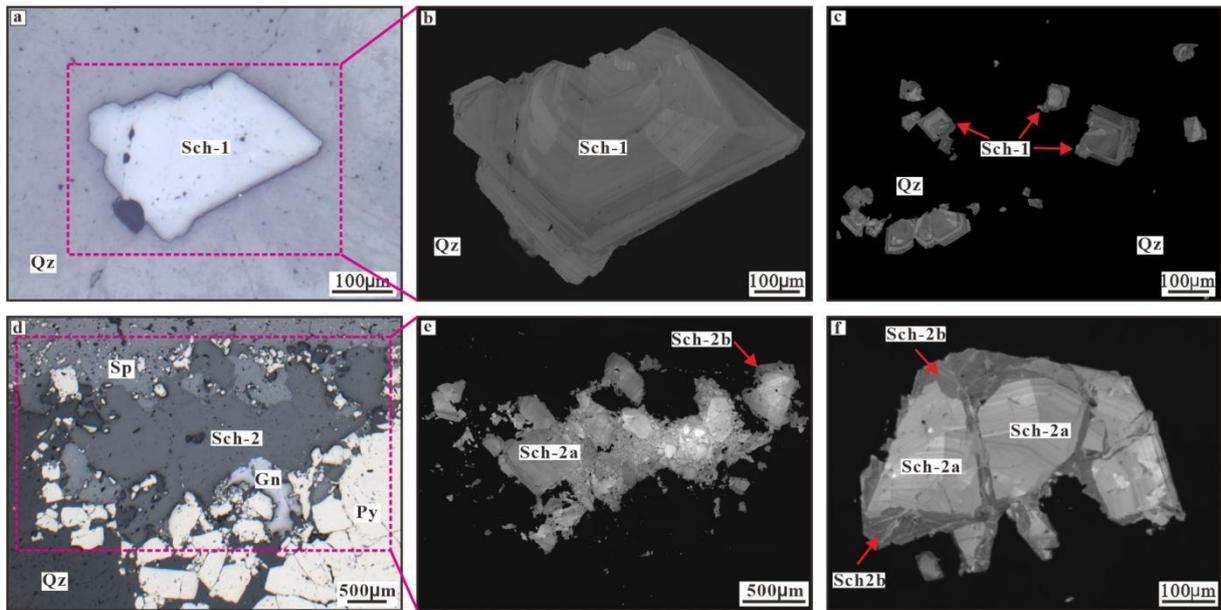


图 7 桃源金矿床不同世代白钨矿显微结构特征

(a-c)第 I 阶段石英-黄铁矿脉中发育震荡环带的 Sch-1; (d-e)第 II 阶段石英-多金属硫化物脉中白钨矿与闪锌矿、方铅矿和黄铁矿等硫化物紧密共生, CL 图像揭示发育震荡环带早期白钨矿 (Sch-2a) 发生破碎, 后期被暗色的白钨矿 (Sch-2b) 胶结

矿物缩写: Gn-方铅矿; Py-黄铁矿; Qz-石英; Sch-白钨矿; Sp-闪锌矿

Fig. 7 Micropetrographic characteristics of different scheelite generations from the Taoyuan gold deposit.

### 3.2 白钨矿的微量元素组成

桃源金矿床不同世代白钨矿的微量元素组成见附表 1。分析结果显示, 该矿床白钨矿中 Sr、Y、Na、REE 和 Pb 元素含量相对较高, 其余微量元素含量普遍较低。Sch-1 和 Sch-2a 具有相对较高的 Sr 含量, 其含量范围分别为  $360-1891 \times 10^{-6}$  (平均值为  $891 \times 10^{-6}$ ) 和  $533-1353 \times 10^{-6}$  (平均值为  $866 \times 10^{-6}$ ), 而晚期的 Sch-2b Sr 含量较低, 为  $585-790 \times 10^{-6}$  (平均值为  $654 \times 10^{-6}$ )。相比之下, Sch-1 和 Sch-2a 的 Na 含量较低, 分别为  $<0.1 - 57 \times 10^{-6}$  (平均值为  $20 \times 10^{-6}$ ) 和  $<0.1 - 58 \times 10^{-6}$  (平均值为  $20 \times 10^{-6}$ ), 而 Sch-2b 的 Na 含量相对较高, 为  $19-193 \times 10^{-6}$  (平均值为  $66 \times 10^{-6}$ )。不同世代的白钨矿中 Nb 含量均较低 ( $<5.2 \times 10^{-6}$ ), Mo 含量也普遍较低 ( $<5.6 \times 10^{-6}$ )。

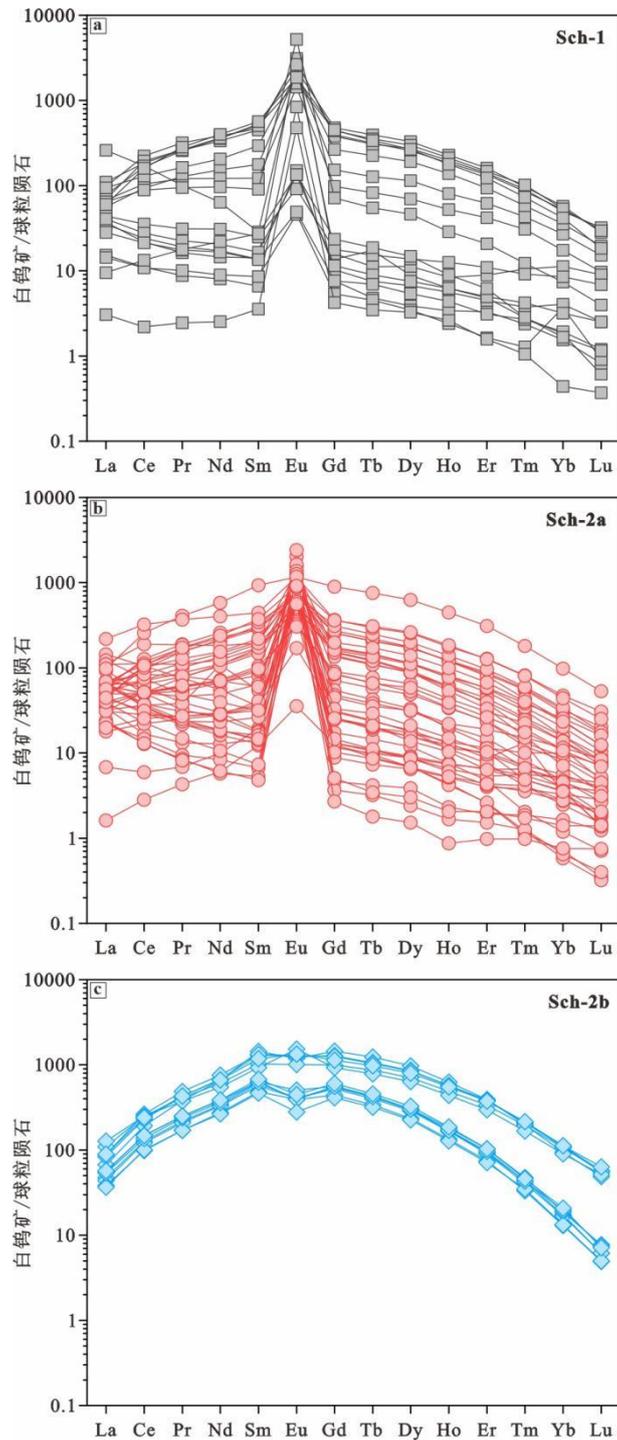


图 8 桃源金矿床白钨矿稀土元素球粒陨石标准化配分曲线

(球粒陨石数据来自 McDonough and Sun, 1995)

Fig. 8 Chondrite-normalized rare earth element (REE) patterns for different scheelite generations from the Taoyuan gold deposit.

桃源金矿床不同世代白钨矿的稀土元素含量变化较大, 分别为 Sch-1 ( $22-811 \times 10^{-6}$ , 平均:

339×10<sup>-6</sup>), Sch-2a (15–1171×10<sup>-6</sup>, 平均: 239×10<sup>-6</sup>) 和 Sch-2b (474–1493×10<sup>-6</sup>, 平均: 339×10<sup>-6</sup>)。不同世代白钨矿的稀土元素配分模式均为向上拱起的中稀土 (MREE) 富集型 (图 8), 其中尤其以 Sch-2b 最为显著。Sch-1 和 Sch-2a 均具有强烈的正 Eu 异常, 其 Eu/Eu\* 值分别为 3.4–224 (平均 35) 和 1.3–366 (平均 43), 而 Sch-2b 具有负 Eu 异常或微弱的正 Eu 异常 (Eu/Eu\* = 0.64–17, 平均 0.90)。

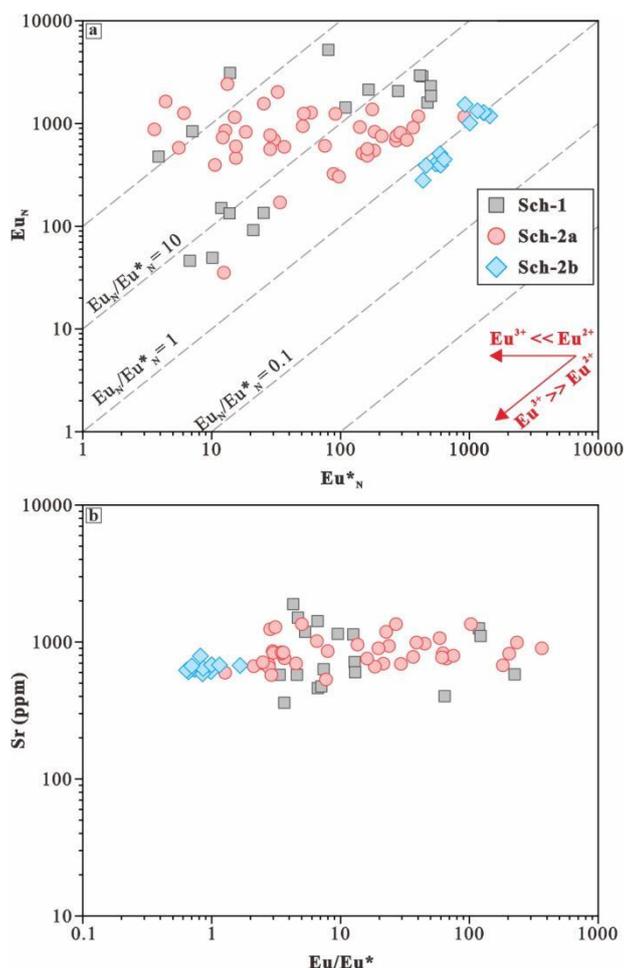


图 9 桃源金矿床白钨矿  $Eu_N$  vs.  $Eu^*_N$  (a) 和  $Sr$  vs.  $Eu/Eu^*$  (b) 协变图解

Fig. 9 Covariant diagrams of  $Eu_N$  vs.  $Eu^*_N$  (a) and  $Sr$  vs.  $Eu/Eu^*$  (b) of scheelite.

### 3.3 白钨矿的原位微区 Sr 同位素组成

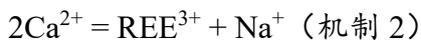
桃源金矿床不同世代白钨矿的 LA-MC-ICP-MS Sr 同位素组成见附表 2。结果显示, 桃源金矿床不同世代的白钨矿具有相似的 Sr 同位素组成, 其中, Sch-1 的  $^{87}Sr/^{86}Sr$  值介于 0.71243–0.71301, 平均为 0.71270; Sch-2a 的  $^{87}Sr/^{86}Sr$  值介于 0.71236–0.71285, 平均为 0.71262; Sch-2b 的  $^{87}Sr/^{86}Sr$  值介于 0.71248–0.71290, 平均为 0.71267。

## 4 讨论

### 4.1 白钨矿稀土元素替代机制

研究表明,白钨矿中稀土元素配分模式可能受以下因素控制:(1)不同的耦合替代机制(Ghaderi et al., 1999);(2)成矿流体的组成(Li et al., 2021);以及(3)共生含钙矿物的沉淀(Song et al., 2014)。桃源白钨矿主要与石英和硫化物紧密共生,尽管在第 I 和第 II 阶段的石英脉中可见少量方解石,但其多充填于石英晶体空隙之间,沉淀时间明显晚于白钨矿。因此,本研究认为共生含钙矿物的沉淀对桃源白钨矿稀土元素配分模式的影响较为有限。桃源金矿床白钨矿具有典型的“上拱”型中稀土富集配分模式(图 8),该模式常见于脉状 Au 或 Au-W 矿床中,典型实例包括西澳 Kalgoorlie-Norseman、Mt. Charlotte 和 Drysdale 等太古宙金矿床(Ghaderi et al., 1999; Brugger et al., 2000)、瑞典 Björkdal 金矿床(Roberts et al., 2006)、加拿大 Canadian Malartic 和 Val-d'Or 金矿床(Sciuba et al., 2020)、云南大坪金矿床(熊德信等, 2006)、小秦岭杨砦峪金矿床(Li and Jiang, 2024)、以及江南造山带的沃溪 Au-Sb-W 和万古 Au 矿床(彭建堂等, 2005; Yin et al., 2025)。上述矿床的共同特征表明,白钨矿中稀土元素的分配主要受晶体化学因素控制(Ghaderi et al., 1999; Yin et al., 2025)。

一般而言,稀土元素主要通过以下三种机制进入白钨矿晶格(Ghaderi et al., 1999):



如果以替代机制 1 为主导,白钨矿应该具有较高的 Nb 含量,其 Nb 的总含量应该与 REE+Y 接近,但桃源金矿床不同世代白钨矿的 Nb 含量均很低( $<5.2 \times 10^{-6}$ ),表明机制 1 不太可能是主要的稀土元素替代机制。根据戈尔德施密特类质同象原则,具有相近离子半径和电子构型的微量元素可以替代矿物晶格中的主量元素。在白钨矿中, $\text{Ca}^{2+}$ 呈八次配位(离子半径 1.12Å)。对于机制 2, $\text{Na}^{+}$ 提供电荷平衡(离子半径 1.18Å),由此计算出 REE 平均离子半径为 1.06Å 时最适合 Na-REE 耦合进入  $\text{Ca}^{2+}$  的晶格空位。由此可知,离子半径更接近 1.06Å 的 MREE 更容易通过机制 2 进入白钨矿晶格,而离子半径偏离 1.06Å 的 LREE 和 HREE 则不易进入白钨矿

晶格。因此，Na-REE 耦合替代机制 2 主导的情况下，白钨矿主要富集 MREE 而亏损 LREE 和 HREE，这与桃源金矿床的情况十分类似。对于机制 3，Ca 空位的出现，导致离子半径对稀土进入白钨矿晶格的约束可以忽略不计，各个 REE<sup>3+</sup> 离子在白钨矿中相对独立，REE 之间不发生二次分配，因此，白钨矿将继承流体的稀土配分模式。而桃源金矿床的赋矿地质体，即加里东期的桃源岩体和丰顶山岩体均富集 LREE 亏损 HREE，这与桃源白钨矿富集 MREE 的特征截然不同。因此，机制 3 不是桃源金矿床控制 REE 替代 Ca 进入白钨矿晶格的主导机制。

综上所述，桃源白钨矿中的稀土元素主要通过 Na-REE 耦合替代 Ca 的方式进入白钨矿晶格。通常情况下，富集 MREE 的稀土元素配分模式常见于金矿床中的白钨矿 (Ghaderi et al., 1999; Weng et al., 2024)，反映了成矿流体中较高的 Na<sup>+</sup> 活性，富 Na<sup>+</sup> 流体中，受晶体化学控制，稀土元素可通过  $2Ca^{2+} = REE^{3+} + Na^{+}$  的耦合置换机制进入白钨矿晶格。对于桃源金矿床而言，白钨矿中相对较高的 Na 含量以及成矿流体的中等盐度特征 (约 11.3 wt% NaCl) 为该置换机制提供了有力支持 (李生明, 2019)。

## 4.2 白钨矿 Eu 异常的成因

稀土元素中，Eu 因其可同时以 Eu<sup>3+</sup> 和 Eu<sup>2+</sup> 两种价态存在而具有特殊性。在高氧逸度条件下，Eu 主要以 Eu<sup>3+</sup> 形式存在，而在相对还原环境中则以 Eu<sup>2+</sup> 为主。因此，Eu 异常被广泛认为是反映热液体系氧化还原状态的重要地球化学指标 (Ghaderi et al., 1999; Sun and Chen, 2017)。研究表明，白钨矿中 Eu 异常的强弱可能受以下因素控制：(1) 成矿流体中 Eu<sup>3+</sup>/Eu<sup>2+</sup> 比值；(2) 流体氧逸度；(3) 成矿流体本身的 Eu 异常特征；(4) 流体与围岩之间的相互作用 (Ghaderi et al., 1999; Brugger et al., 2000; 李博等, 2024)。由于 Eu<sup>2+</sup> 与 Ca<sup>2+</sup> 具有相同的电价，且离子半径相近，因此在白钨矿中 Eu<sup>2+</sup> 比 Eu<sup>3+</sup> 更容易进入晶格 (Ghaderi et al., 1999; 彭建堂等, 2005; Yuan et al., 2019)。因此，当白钨矿中 Eu<sup>2+</sup> 含量较高 (Eu<sup>3+</sup> << Eu<sup>2+</sup>) 时，通常表现为正 Eu 异常；反之，若 Eu<sup>3+</sup> 占比较高，则可能出现负 Eu 异常 (Brugger et al., 2000)。Ghaderi et al. (1999) 提出，可通过球粒陨石标准化的 Eu 含量 (Eu<sub>N</sub>) 与理论 Eu<sub>N</sub>\* 值 (Eu<sub>N</sub>\* = (Sm<sub>N</sub> × Gd<sub>N</sub>)<sup>1/2</sup>) 之间的关系来判断白钨矿中 Eu 的价态变化。当以 Eu<sup>3+</sup> 为主时，Eu<sub>N</sub> 与 Eu<sub>N</sub>\* 呈正相关；而以 Eu<sup>2+</sup> 为主时，二者之间无明显相关性。如图 9a 所示，桃源矿床中 Sch-1 和 Sch-2a 的 Eu 主要以 +2 价形式存在，而 Sch-2b 中则以 +3 价为主。因此，Sch-1 和 Sch-2a 的正 Eu 异常表明其形成于还原性较强的热液环境，流体中以 Eu<sup>2+</sup> 为主；而具有弱负 Eu 异常的 Sch-2b 则形成于氧逸度较高的条件下，此时流体中 Eu<sup>3+</sup> 含量较高。该认识与前人关于造山型金矿床 (Weng et al., 2024)、与

侵入岩有关的金矿床 (Ghaderi et al., 1999)、斑岩型钨矿 (Sun and Chen, 2017) 以及矽卡岩型钨矿 (Zhao et al., 2023) 中白钨矿 Eu 异常成因的研究结果相一致。而流体氧逸度的升高可能是由于在成矿过程中混入了大气降水, 这也得到了成矿流体 H-O 同位素组成的支持 (李生明, 2019)。根据 Phillips et al. (2010) 的热力学模拟, 在大多数脉状金矿床形成的温度-pH 范围内, 氧逸度升高会破坏  $\text{Au}(\text{HS})_2^-$  络合物的稳定性, 从而促使金快速沉淀。正如前文所述, 桃源金矿床的金矿化主要发生在第 II 阶段, 且多数自然金充填于黄铁矿裂隙中 (图 5f)。结合 Sch-2b 的较晚沉淀时间, 本文推测, 成矿热液体系氧逸度的升高可能是桃源金矿床中金沉淀的关键机制。热液体系氧逸度升高促进金的沉淀, 被认为是甘肃大桥 (Wu et al., 2019)、福建何宝山 (Ma et al., 2022) 以及澳大利亚 Eastern 和 Kanowna Belle (Hodkiewicz et al., 2009; Sugiono et al., 2022) 等大型金矿床成矿作用的关键机制之一。

此外, 也有研究表明, 围岩中的斜长石发生热液蚀变会释放 Sr 和 REE (其中 Eu 以  $\text{Eu}^{2+}$  为主) 进入流体, 导致流体中 Sr 和  $\text{Eu}^{2+}$  的富集, 进而影响白钨矿的 Sr 含量和 Eu 异常 (Brugger et al., 2008; Peng et al., 2018)。因此, 如果桃源白钨矿 (Sch-1 和 Sch-2a) 中的正 Eu 异常来源于赋矿花岗岩中斜长石的蚀变分解, Sr 含量和 Eu 异常 ( $\text{Eu}/\text{Eu}^*$ ) 应该具有正相关关系。然而, 如图 9b 所示, 二者并没有明显的正相关关系, 因此, 流体-围岩相互作用不太可能是造成桃源白钨矿 Eu 异常的主导机制。

### 4.3 成矿物质来源

桃源白钨矿具有较低的 Rb 含量 ( $<1 \times 10^{-6}$ ) 和较高的 Sr 含量, 由  $^{87}\text{Rb}$  衰变产生的  $^{87}\text{Sr}$  可忽略不计。因此, 通过 LA-MC-ICP-MS 测定获得的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值可近似代表白钨矿的初始 Sr 同位素组成。桃源金矿床中不同世代白钨矿的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值较为均一, 集中于 0.71236–0.71301 之间, 表明成矿过程中 Sr 的来源保持稳定。为约束成矿物质来源及其与围岩之间的关系, 本文收集了桃源金矿床赋矿围岩 (即丰顶山岩体和桃源岩体) 的 Sr 同位素组成数据。由于缺乏合适的定年矿物, 前人尚未对桃源金矿床开展系统的年代学研究。统计资料显示, 江南造山带在显生宙以来主要经历了加里东期 (~402 Ma)、印支期 (~235 Ma) 和燕山期 (~142–130 Ma) 三期大规模脉状金多金属矿化事件 (Ni et al., 2015; Zhang et al., 2019; Li et al., 2023)。考虑到桃源金矿床的形成时代应晚于其赋矿围岩——桃源岩体的侵位年龄 (409 Ma), 本文参考 400 Ma、235 Ma 和 140 Ma 三个时间点, 重新计算了丰顶山岩体和桃源岩体的 Sr 同位素组成 (Zhong et al., 2013), 以进行对比分析。计算结果如下: (1) 在 400 Ma 时, 丰顶山黑云母花岗岩和

桃源花岗闪长岩的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值分别为 0.71085–0.71322 和 0.70954–0.70996; (2) 在 235 Ma 时, 分别为 0.71490–0.71658 和 0.71198–0.71292; (3) 在 140 Ma 时, 分别为 0.71612–0.71987 和 0.71338–0.71370。若桃源金矿形成于加里东期, 其白钨矿的 Sr 同位素组成与丰顶山岩体基本一致; 若形成于印支期或燕山期, 则更接近桃源花岗闪长岩的 Sr 同位素特征。因此, 无论桃源金矿形成于哪个时期, 其成矿流体中的 Sr 均可来源于赋矿花岗岩。桃源金矿床含矿石英脉的  $\delta\text{D}$  值为–82.3‰至–55.4‰,  $\delta^{18}\text{O}$  流体值为 2.9‰至 4.0‰, 与典型的岩浆–热液流体特征高度一致 (李生明, 2019)。此外, 该矿床中含金黄铁矿的  $\delta^{34}\text{S}$  值集中在 3.6‰至 4.0‰之间, 与岩浆硫特征相符 (李生明, 2019)。因此, 深源 (可能为岩浆热液) 含金流体在上升过程中通过水–岩反应不断萃取赋矿花岗岩中的 Sr, 并与围岩达到 Sr 同位素平衡, 可以很好地解释桃源金矿床中不同世代白钨矿相对均一的 Sr 同位素组成。类似的机制也用于解释新西兰 Otago 地区片岩中 Au-W 矿床 (Scanlan et al., 2018)、乌兹别克斯坦 Muruntau 金矿床 (Kempe et al., 2001)、圭亚那 Omai 金矿床 (Voicu et al., 2000) 以及江南造山带万古、黄金洞和包金山金矿床中白钨矿的 Sr 同位素组成 (Chen et al., 2024; Yin et al., 2025; 鲁玉龙等, 2025)。在此过程中, 花岗闪长岩中的斜长石发生分解, 不仅释放 Sr, 同时还释放大量 Ca, 后者与热液流体所携带的 W 发生反应, 为白钨矿的形成提供了有利条件。

## 5 结论

(1) 桃源金矿床中白钨矿的稀土配分模式以中稀土 (MREE) 富集为显著特征, 稀土元素在白钨矿中的分配主要受控于  $2\text{Ca}^{2+} = \text{REE}^{3+} + \text{Na}^{+}$  的耦合替代机制。

(2) 从早期到晚期, 白钨矿 (Sch-1 和 Sch-2a→Sch-2b) 的 Eu 异常由显著的正异常逐渐转变为微弱的负异常, 指示成矿流体氧逸度呈逐渐升高的趋势。结合自然金主要产出于黄铁矿裂隙中的地质特征, 本文认为流体氧逸度的升高是导致金沉淀的关键机制。

(3) 不同世代的白钨矿具有相近的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值, 且与经年龄校正后的赋矿花岗岩的 Sr 同位素组成基本一致, 表明深源成矿流体在迁移过程中与赋矿围岩发生了显著的水–岩反应, 该过程在白钨矿的形成中起到了重要作用。

## 附件

附表 1 江西桃源金矿床不同世代白钨矿 LA-ICP-MS 微量元素组成 ( $\times 10^{-6}$ )

附表 2 江西桃源金矿床不同世代白钨矿 LA-MC-ICP-MS Sr 同位素组成

### 参考文献

- Brugger, J., Etschmann, B., Pownceby, M., et al., 2008. Oxidation state of europium in scheelite: Tracking fluid-rock interaction in gold deposits. *Chemical Geology*, 257: 26–33, <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.08.003>
- Brugger, J., Lahaye, Y., Costa, S., et al., 2000. Inhomogeneous distribution of REE in scheelite and dynamics of Archaean hydrothermal systems (Mt. Charlotte and Drysdale gold deposits, Western Australia). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 139: 251–264, <https://doi.org/10.1007/s004100000135>
- Chen, Z.Y., Zhang, L., Sun, X.W., et al., 2024. Tungsten mineralization in the Huangjindong gold deposit, southern China: Insights from scheelite texture, in-situ trace elements and Sr isotope compositions. *Ore Geology Reviews*, 166: 105960, <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2024.105960>
- Ghaderi, M., Palin, J.M., Campbell, I.H., et al., 1999. Rare earth element systematics in scheelite from hydrothermal gold deposits in the Kalgoorlie-Norseman region, Western Australia. *Economic Geology*, 94: 423–438, <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.94.3.423>.
- Hodkiewicz, P.F., Grove, D.I., Davidson, G.J., et al., 2009. Influence of structural setting on sulphur isotopes in Archean orogenic gold deposits, Eastern Goldfields Province, Yilgarn, Western Australia. *Mineralium Deposita*, 44: 129–150, <https://doi.org/10.1007/s00126-008-0211-5>.
- Jochum, K.P., Stoll, B., Herwig, K., et al., 2006. MPI-DING reference glasses for in situ microanalysis: New reference values for element concentrations and isotope ratios. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 7: Q02008, <https://doi.org/10.1029/2005GC001060>.
- Kempe, U., Belyatsky, B.V., Krymsky, R.S., et al., 2001. Sm-Nd and Sr isotope systematics of scheelite from the giant Au(±W) deposit Muruntau (Uzbekistan): implications for the age and sources of Au mineralization. *Mineralium Deposita*, 36: 379–392, <https://doi.org/10.1007/s001260100156>
- Kozlik, M., Gerdes, A., Raith, J.G., 2016. Strontium isotope systematics of scheelite and apatite from the Felbertal tungsten deposit, Austria-results of in-situ LA-MC-ICP-MS analysis. *Mineralogy and Petrology*, 110: 11–27. <https://doi.org/10.1007/s00710-015-0416-0>
- Lei, J.Z., Zhang, Y., Shi, C.H., et al., 2023. Geochemical characteristics of scheelite from Xingfengshan Au-W deposit in Xiangzhong metallogenic belt: Implications on ore genesis. *Mineral Deposits*, 42: 618–638 (in Chinese with English abstract).

- Lei, L.H., 1994. The geochemistry feature of Taoyuan gold deposit of Wanzhai in Jiangxi Province. *Natural Science Journal of the Graduates, Sun Yat-Sen University*, 15: 35–39 (in Chinese with English abstract).
- Li, B., Zou, S.H., Xu, D.R., et al., 2024. Research progresses on trace elements in scheelite and their applications for genesis of deposits. *Geotectonica et Metallogenia*, 203, 1344–1365 (in Chinese with English abstract).
- Li, C.Y., Ma, Y., Liu, D.L., et al., 2025. Characteristics, Age, and Exploration Significance of Polymetallic Mineralized Skarns in the Super-Large Shizhushan Wollastonite Deposit in the Yichun-Xinyu Area of Jiangxi Province. *Earth Science*, 50, 2925–2936 (in Chinese with English abstract).
- Li, S.M., 2019. Characteristics of ore-forming fluids in Taoyuan gold deposit, Wanzi, Jiangxi (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu (in Chinese with English abstract).
- Li, W., Xie, G.Q., Cook, N.J., et al., 2021. Tracking dynamic hydrothermal processes: Textures, in-situ Sr-Nd isotopes, and trace-element analysis of scheelite from the Yangjiashan vein-type W deposit, South China. *American Mineralogist*, 106: 1987–2002, <https://doi.org/10.2138/am-2021-7677>
- Li, W., Xie, G.Q., Mao, J.W., et al., 2023. Precise age constraints for the Woxi Au-Sb-W deposit, South China. *Economic Geology*, 118: 509–516, <https://doi.org/10.5382/econgeo.4971>
- Li, W.T., Jiang, S.Y., 2024. Unveiling the connection between lode gold mineralization and the metamorphic core complex evolution from the large Yangzhaiyu gold deposit, North China Craton. *GSA Bulletin*, 136: 4947–4964, <https://doi.org/10.1130/B37424.1>
- Liu, Y.S., Gao, S., Hu, Z.C., et al., 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons of mantle xenoliths. *Journal of Petrology*, 51: 537–571, <https://doi.org/10.1093/petrology/egp082>
- Luo, X.C., 2015. The analysis of Xiaolong gold metallogenic characteristics in Jiangxi province and regional metallogenic potential of the micro disseminated deposits (Dissertation). Nanchang: East China Institute of Technology (in Chinese with English abstract).
- Lou, Y.L., Liu, X.H., Zeng, H., et al., 2023. Genesis of Xingfengshan Au-W deposit in central Hunan Province: constraints from hydrothermal apatite U-Pb dating and in situ S isotopes. *Earth Science*, 49: 4265–4277 (in Chinese with English abstract).
- Lu, Y.L., Zhang, Q.S., Wang, P., et al., 2025. The mechanism of gold-tungsten paragenesis and separation in the Baojinshan gold (tungsten) deposit, Hunan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 41, 1977–1998 (in Chinese with English abstract), <https://doi.org/10.18654/1000-0569/2025.06.08>
- Mair, J.L., Goldfarb, R.J., Johnson, C.A., et al., 2006. Geochemical constraints on the genesis of the Scheelite dome

- intrusion-related gold deposit, Tombstone gold belt, Yukon, Canada. *Economic Geology*, 101, 523–553, <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.101.3.523>
- Mao, J.W., Cheng, Y.B., Chen, M.H., 2013. Major types and time-space distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their geodynamic settings. *Mineralium Deposita*, 48: 267–294, <https://doi.org/10.1007/s00126-012-0446-z>
- Miranda, A.C.R., Beaudoin, G., Rottier, B., 2022. Scheelite chemistry from skarn systems: implications for ore-forming processes and mineral exploration. *Mineralium Deposita*, 57: 1469–1497, <https://doi.org/10.1007/s00126-022-01118-y>
- Ni, P., Wang, G.G., Chen, H., et al., 2015. An Early Paleozoic orogenic gold belt along the Jiang-Shao Fault, South China: Evidence from fluid inclusions and Rb-Sr dating of quartz in the Huangshan and Pingshui deposits. *Journal of Asian Earth Sciences*, 103: 87–102, <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2014.11.031>
- Peng, J.T., Hu, R.Z., Zhao, J.H., et al., 2005. Rare earth element (REE) geochemistry for scheelite from the Woxi Au-Sb-W deposit, western Hunan. *Geochimica*, 34, 115–122 (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. *Mineralium Deposita*, 53: 1079–1094, <https://doi.org/10.1007/s00126-018-0796-2>
- Roberts, S., Palmer, M.R., Waller, L., 2006. Sm-Nd and REE characteristics of tourmaline and scheelite from the Björkdal gold deposit, Northern Sweden: evidence of an intrusion-related gold deposit?. *Economic Geology*, 101, 1415–1425, <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.101.7.1415>
- Scanlan, E.M., Scott, J.M., Wilson, V.J., et al., 2018. In situ  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  of scheelite and calcite reveals proximal and distal fluid-rock interaction during orogenic W-Au mineralization, Otago Schist, New Zealand. *Economic Geology*, 113, 1571–1586, <https://doi.org/10.5382/econgeo.2018.4603>
- Sciuba, M., Beaudoin, G., Grzela, D., et al., 2020. Trace element composition of scheelite in orogenic gold deposits. *Mineralium Deposita*, 55, 1149–1172. <https://doi.org/10.1007/s00126-019-00913-4>
- Shu, L.S., Yao, J.L., Wang, B., et al., 2021. Neoproterozoic plate tectonic process and Phanerozoic geodynamic evolution of the South China block. *Earth-Science Reviews*, 216: 103596, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103596>
- Song, G.X., Qin, K.Z., Li, G.G., et al., 2014. Scheelite elemental and isotopic signatures: Implications for the genesis of skarn-type W-Mo deposits in the Chizhou area, Anhui province, eastern China. *American Mineralogist*, 99, 303–317, <https://doi.org/10.2138/am.2014.4431>

- Sugiono, D., LaFlamme, C., Thebaud, N., et al., 2022. Fault-induced gold saturation of a single auriferous fluid is a key process for orogenic gold deposit formation. *Economic Geology*, 117, 1405–1414, <https://doi.org/10.5382/econgeo.4923>
- Sun, K.K., Chen, B., 2017. Trace elements and Sr-Nd isotopes of scheelite: implications for the W-Cu-Mo polymetallic mineralization of the Shimensi deposit, South China. *American Mineralogist*, 102: 1114–1128, <https://doi.org/10.2138/am-2017-5654>
- Tong, X.R., Liu, Y.S., Hu, Z.C., et al., 2016. Accurate determination of Sr isotopic compositions in clinopyroxene and silicate glasses by LA-MC-ICP-MS. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 40: 85–99, <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2015.00315.x>
- Vielreicher, N.M., Groves, D.I., McNaughton, N.J., 2016. The giant Kalgoorlie gold field revisited. *Geoscience Frontiers*, 7: 359–374. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.07.006>
- Voicu, G., Bardous, M., Stevenson, R., et al., 2000. Nd and Sr isotope study of hydrothermal scheelite and host rocks at Omai, Guiana Shield: implications for ore fluid source and flow path during the formation of orogenic gold deposits. *Mineralium Deposita*, 35: 302–314, <https://doi.org/10.1007/s001260050243>
- Wang, Y.J., Fan, W.M., Zhang, G.W., et al., 2013. Phanerozoic tectonics of the South China block: Key observations and controversies. *Gondwana Research*, 23: 1273–1305. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.02.019>
- Weng, G.M., Liu, J.J., Carranza, E.J.M., et al., 2024. Scheelite texture and geochemistry as a recorder of nature and timing of metallogenesis: an example from the Zhaishang Au-Sb-W deposit, western Qinling, central China. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 179: 14, <https://doi.org/10.1007/s00410-023-02090-0>
- Wintzer, N.E., Schmitz, M.D., Gillerman, V.S., et al., 2022. U-Pb Scheelite Ages of Tungsten and Antimony Mineralization in the Stibnite-Yellow Pine District, Central Idaho. *Economic Geology*, <https://doi.org/10.5382/econgeo.4953>
- Wu, Y.F., Li, J.W., Evans, K., et al., 2018. Ore-forming processes of the Daqiao epizonal orogenic gold deposit, West Qinling Orogen, China: Constraints from textures, trace elements, and sulfur isotopes of pyrite and marcasite, and raman spectroscopy of carbonaceous material. *Economic Geology*, 113: 1093–1132, <https://doi.org/10.5382/econgeo.2018.4583>
- Xiong, D.X., Sun, X.M., Shi, G.Y., et al., 2006. Trace elements, rare earth elements (REE) and Nd-Sr isotopic compositions in scheelites and their implications for the mineralization in Daping gold mine in Yunnan province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 22: 733–741 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Y.M., Jiang, S.Y., Saiken, W.M.T.H., et al., 2025. Copper and cobalt elements occurrence state and ore-forming

- physicochemical conditions of Baiyangping Cu-Co deposit in Lanping, Yunnan Province, Southwest China. *Acta Petrologica Sinica*, 41: 2600–2615, <https://doi.org/10.18654/1000-0569/2025.08.04> (in Chinese with English abstract)
- Yang, B., Dong, G.C., Mo, X.X., et al., 2012. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 39: 372–378 (in Chinese with English abstract).
- Yao, J.L., Cawood, P.A., Shu, L.S., et al., 2019. Jiangnan orogen, South China: A 970–820 Ma Rodinia margin accretionary belt. *Earth-Science Reviews*, 196: 102872, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.05.016>
- Yin, F.Y., Li, W., Xie, G.Q., et al., 2025. Genesis of the Wangu Au deposit in the Jiangnan orogenic belt: Constraints from texture, trace element, and in-situ Sr isotope of scheelite. *Ore Geology Reviews*, 176: 106375, <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2024.106375>
- 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. *Ore Geology Reviews*, 102: 1114–1128, <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.05.003>
- Zhang, L., Yang, L.Q., Groves, D.I., et al., 2019. An overview of timing and structural geometry of gold, gold-antimony and antimony mineralization in the Jiangnan Orogen, southern China. *Ore Geology Reviews*, 115: 103173, <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103173>
- 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. *American Mineralogist*, 108: 1781–1793. <https://doi.org/10.2138/am-2022-8495>
- Zhong, Y.F., Ma, C.Q., Zhang, C., et al., 2013. Zircon U-Pb Age, Hf isotopic compositions and geochemistry of the Silurian Fengdingshan I-type granite Pluton and Taoyuan mafic-felsic Complex at the southeastern margin of the Yangtze Block. *Journal of Asian Earth Sciences*, 74: 11–24. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jseas.2013.05.025>
- Zhou, X.M., Sun, T., Shen, W.Z., et al., 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: a response to tectonic evolution. *Episodes*, 29: 26–33. <http://dx.doi.org/10.18814/epiiugs/2006/v29i1/004>
- 李博, 邹少浩, 许德如, 等. 2024. 白钨矿中微量元素的研究进展及其在矿床成因方面的应用. *大地构造与成矿学*, 48: 1344–1365.
- 李昌元, 马盈, 刘德亮, 等. 2025. 江西宜春-新余地区石竹山超大型硅灰石矿区中多金属矿化矽卡岩的特征、形成年代及其找矿意义. *地球科学*, 50: 2925–2936.
- 李生明. 2019. 江西万载桃源金矿床成矿流体特征研究 (硕士学位论文). 成都: 成都理工大学.
- 雷丽宏. 1994. 江西万载桃源金矿床地球化学特征. *中山大学研究生学刊自然科学版*, 15: 35–39.

- 雷金泽, 张宇, 时承华, 等. 2023. 湘中成矿带杏枫山 Au-W 矿床白钨矿特征及地质意义. 矿床地质, 42: 618–638.
- 娄元林, 刘贤红, 曾昊, 等. 2024. 湘中杏枫山金钨矿床成因: 热液磷灰石 U-Pb 定年和原位 S 同位素制约. 地球科学, 49: 4265–4277.
- 罗喜成. 2015. 江西省小龙金矿成矿特征及区域微细浸染型金矿成矿潜力分析 (硕士学位论文). 南昌: 东华理工大学.
- 鲁玉龙, 张求识, 王鹏, 等. 2025. 湖南包金山金 (钨) 矿床金、钨共生-分离机制. 岩石学报, 41: 1977–1998.
- 彭建堂, 胡瑞忠, 赵军红, 等. 2005. 湘西沃溪金锑钨矿床中白钨矿的稀土元素地球化学. 地球化学, 34: 115–122.
- 熊德信, 孙晓明, 石贵勇, 等. 2006. 云南大坪金矿白钨矿微量元素、稀土元素和 Sr-Nd 同位素组成特征及其意义. 岩石学报, 22: 733–741.
- 徐耀明, 蒋少涌, 吾木提汗·赛肯, 等. 2025. 云南兰坪白秧坪铜钴矿床成矿元素赋存状态及其沉淀的物理化学条件. 岩石学报, 41: 2600–2615.
- 杨斌, 董国臣, 莫宣学, 等. 2012. 赣西萍乐凹陷带卡林型金矿的构造控矿特征. 成都理工大学学报 (自然科学版), 39: 372–378.