

doi: 10.12029/gc20230730001

栾卓然, 马国玺, 李谦谦, 吕凤军, 许立风, 安跃辉, 袁兆宪, 王丰翔, 汪海城. 2024. 太行山北段赤瓦屋铜钼矿及外围地-物-化-遥综合信息找矿靶区预测[J]. 中国地质, 51(4): 1139-1160.

Luan Zhuoran, Ma Guoxi, Li Qianqian, Lü Fengjun, Xu Lifeng, An Yuehui, Yuan Zhaoxian, Wang Fengxiang, Wang Haicheng. 2024. Characteristics of the Chiwawu Cu-Mo deposit in the northern section of Taihang Mountains and the prediction of prospecting target area using geological, geophysical, geochemical and remote integrated information[J]. Geology in China, 51(4): 1139-1160(in Chinese with English abstract).

## 太行山北段赤瓦屋铜钼矿及外围地-物-化-遥综合 信息找矿靶区预测

栾卓然<sup>1,2,3,4</sup>, 马国玺<sup>5</sup>, 李谦谦<sup>6,7</sup>, 吕凤军<sup>1,2,3</sup>, 许立风<sup>5</sup>, 安跃辉<sup>5</sup>,  
袁兆宪<sup>1,2,3,8,9,10</sup>, 王丰翔<sup>1,2,3</sup>, 汪海城<sup>11</sup>

(1. 河北省战略性关键矿产资源重点实验室, 河北石家庄 050031; 2. 河北省战略性关键矿产研究协同创新中心, 河北石家庄 050031; 3. 河北地质大学地球科学学院, 河北石家庄 050031; 4. 河北省斑岩型矿床研究重点实验室, 河北保定 071000; 5. 河北省地质工程勘察院, 河北保定 071000; 6. 河北省遥感中心, 河北石家庄 050021; 7. 河北省水文工程地质勘察院, 河北石家庄 050021; 8. Earth and Sustainability Science Research Centre School of Biological, Australia Sydney NSW 2052; 9. Earth and Environmental Sciences, Australia Sydney NSW 2052; 10. University of New South Wales, Australia Sydney NSW 2052; 11. 中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心, 北京 100055)

**摘要:**【研究目的】赤瓦屋铜钼矿位于太行山北段成矿带, 属于找矿突破战略的重点勘查区域, 目前找矿工作进入瓶颈期, 本研究对下一步找矿突破具有重要指导意义。【研究方法】本文基于对赋矿岩体、矿床地质特征、地球物理、地球化学和遥感地质的综合研究, 分析找矿标志。【研究结果】认为赤瓦屋铜钼矿与深部花岗斑岩有关, 具有斑岩型矿床的典型矿化特征, 形成于早白垩世; 研究区环形构造发育, 大型环形构造与赤瓦屋岩体及外围隐伏岩体有关, 小微型环形构造多数与隐蔽爆破角砾岩或隐伏小岩株有关; 地球化学异常及遥感蚀变异常的空间分布吻合程度高, 对矿化具有显著的控制作用; 提出了 4 个找矿靶区。【结论】在赤瓦屋岩体内部应把确定隐爆角砾岩体和隐伏花岗斑岩体的空间位置作为找矿工作的重点, 以寻找 Cu、Mo 矿为主; 外围应以 Cu、Au、Ag 多金属矿为主。

**关键词:** 铜钼矿; 综合找矿信息; 靶区预测; 太行山北段; 赤瓦屋; 河北省; 矿产勘查工程

**创新点:** 基于地质-物探-化探-遥感信息与找矿标志的综合分析, 确定了找矿靶区。

中图分类号: P618.41; P618.65 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)04-1139-22

## Characteristics of the Chiwawu Cu-Mo deposit in the northern section of Taihang Mountains and the prediction of prospecting target area using geological, geophysical, geochemical and remote integrated information

LUAN Zhuoran<sup>1,2,3,4</sup>, MA Guoxi<sup>5</sup>, LI Qianqian<sup>6,7</sup>, LÜ Fengjun<sup>1,2,3</sup>, XU Lifeng<sup>5</sup>, AN Yuehui<sup>5</sup>,  
YUAN Zhaoxian<sup>1,2,3,8,9,10</sup>, WANG Fengxiang<sup>1,2,3</sup>, WANG Haicheng<sup>11</sup>

收稿日期: 2023-07-30; 改回日期: 2023-10-04

基金项目: 国家自然科学基金(42372343)、河北省地勘基金项目(13000023P0069B410132L)及河北省自然资源厅科研项目(Z2024044)联合资助。

作者简介: 栾卓然, 男, 1987 年生, 硕士, 工程师, 主要从事资源环境遥感与矿产资源调查相关研究; E-mail: khgfdsa@sohu.com。

(1. Hebei Key Laboratory of Strategic Critical Mineral Resources, Shijiazhuang 050031, Hebei, China; 2. Hebei Province Collaborative Innovation Center for Strategic Critical Mineral Research, Shijiazhuang 050031, Hebei, China; 3. College of Earth Sciences, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, Hebei, China; 4. Hebei Key Laboratory of Study on Porphyry Deposit, Baoding 071000, Hebei, China; 5. Hebei Geological Engineering Survey Institute, Baoding 071000, Hebei, China; 6. Hebei Remote Sensing Center, Shijiazhuang 050031, Hebei, China; 7. Hebei Institute of Hydrological and Engineering Geology, Shijiazhuang 050031, Hebei, China; 8. Earth and Sustainability Science Research Centre School of Biological, NSW 2052, Sydney, Australia; 9. Earth and Environmental Sciences, NSW 2052, Sydney, Australia; 10. University of New South Wales, NSW 2052, Sydney, Australia; 11. Command Center of Natural Resource Comprehensive Survey, China Geological Survey, Beijing 100055, China)

**Abstract:** This paper is the result of mineral exploration engineering.

**[Objective]** The Chiwawu copper–molybdenum deposit is located in the northern Taihang Mountains metallogenic belt, which is one of the key exploration zones as part of the ‘Prospecting Breakthrough Strategy’ implementation. However, the mineral exploration in this deposit has entered a bottleneck stage currently. This study aims to provide new target areas for the deposit. **[Methods]** Identify exploration indicators based on a comprehensive interpretation of the geological, geophysical, geochemical, and remote sensing data of the deposit. **[Results]** The deposit was formed in the Early Cretaceous and exhibits similar mineralization characteristics to typical porphyry deposits, indicating a close association with deep–seated granite porphyry. Circular structures are widely distributed in the study area, with large circular structures associated with the Chiwawu complex and other concealed intrusions, while small to macro–sized circular structures are associated with cryptoexplosive breccias or concealed small stocks. There is a strong spatial correlation between the geochemical anomalies and alteration zones discriminated using the remote sensing data, which can serve as an effective indicator for mineralization. Four exploration target areas are delineated. **[Conclusions]** Within the Chiwawu complex, locating the cryptoexplosive breccias and concealed granite porphyry is crucial for Cu and Mo prospecting, while in the surrounding area prospecting, the focus is recommended to be on Cu, Au, and Ag.

**Key words:** Cu–Mo deposit; integrated information for mineral exploration; target area delineation; northern section of Taihang Mountain; Chiwawu; Hebei Province; mineral exploration engineering

**Highlights:** Based on the comprehensive analysis of geological, geophysical, geochemical, and remote sensing information and prospecting indicators, the prospecting target areas were predicted.

**About the first author:** LUAN Zhuoran, male, born in 1987, master, engineer, engaged in remote sensing of resources and environment and mineral resources survey; E–mail: [khgfdsa@sohu.com](mailto:khgfdsa@sohu.com).

**Fund support:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.42372343), Hebei Provincial Geological Exploration Fund (No.13000023P0069B410132L), Hebei Provincial Natural Resources Department Research Project (No.Z2024044).

## 1 引 言

太行山北段成矿带位于华北克拉通中部造山带北段,受华北克拉通岩石圈演化及岩浆–构造热事件控制明显(毛景文等, 2003, 2005; Zhu et al., 2011; 段超等, 2016; 朱日祥和孙卫东, 2021)。该成矿带目前已发现石湖大型金矿、涞源大湾大型斑岩型钼矿(马国玺, 1995)、木吉村大型斑岩型铜钼矿(马国玺, 1997; 马国玺等, 2010; 高永丰等, 2011)和安妥岭大型斑岩型钼矿床(朱凤丽和张强, 2011; 者萌等, 2014)、涞源龙门大型斑岩型钼矿(张志远

等, 2021)、秋卜洞隐蔽爆破角砾岩型银矿(孙文燕等, 2023)等数十个大中型矿产地,为华北克拉通中部最重要的矿集区,具有很大的找矿潜力(段超等, 2016)。该矿集区已被列入《河北省矿产资源总体规划(2021—2025)》和《河北省战略性矿产找矿行动实施方案(2021—2035年)》重点勘查区,对该区域的成矿作用与成矿预测的研究也受到高度关注。

赤瓦屋铜钼矿床是河北省地质工程勘查院近年在太行山北段发现,目前累计求得铜金属量 35078 t,平均品位 0.34%,钼金属量 14563 t,平均品

位 0.064%, 钨金属量 1455 t, 平均品位 0.157%, 伴生银 15 t, 平均品位 4.06 g/t, 尚难利用伴生银 30 t, 伴生镓 58 t, 平均品位 17.17 g/t, 尚难利用伴生镓 128 t, 钼矿已经达到中型规模, 其外围发现了多处金、银矿化点。目前勘查工作进入瓶颈期, 如何进一步扩大找矿前景是目前找矿工作急需解决的关键问题。本文在综合分析矿床地质特征、遥感地质特征和地球物理、地球化学特征和区域找矿标志的基础上提出了下一步勘查工作的靶区, 为进一步找矿突破提供参考和依据。

## 2 区域地质背景

### 2.1 地层

研究区位于华北克拉通中部造山带北段(Zhao et al., 2001; Liu et al., 2003)。区域地层呈现基底和盖层的二元结构(图 1)。其中基底由太古界阜平群、五台群和元古界甘陶河群组成。阜平群分布面积广, 约占 60%, 下部为深变质的麻粒岩相, 主要岩石类型为片麻岩类、二长麻粒岩、斜长角闪岩、磁铁石英岩; 中上部为中深变质岩系, 主要岩石类型为浅粒岩、变粒岩及黑云斜长片麻岩, 夹有大理岩、透闪岩。其原岩为基性火山岩、碎屑岩、镁质碳酸盐, 该岩群是重要金矿床的赋矿层位。五台群在阜平群的两侧小范围分布, 为一套绿片岩相到低角闪岩相的变质岩系。主要岩石类型有变粒岩、斜长角闪岩、片岩、片麻岩、夹大理岩、磁铁石英岩, 原岩为中基性火山碎屑岩、碳酸盐沉积建造。甘陶河群仅分布在南部西侧, 为一套低绿片岩相的轻微变质岩系, 主要岩石类型有变质砂砾岩、石英岩、千枚岩、板岩、变质火山碎屑岩、变质玄武岩等。沉积盖层为元古界和古生界的碳酸盐岩, 以及中生界的陆相火山沉积地层, 分布在北部隆起区的两侧。

### 2.2 构造

太行山北段的构造演化经历了基底形成、盖层发展与强烈活动 3 大阶段。基底形成于太古宙, 结束于早元古代, 经历了阜平、五台和吕梁运动的叠加改造, 使原火山沉积建造变形变质, 产生强烈褶皱, 构造线呈近东西向; 基底形成之后进入相对稳定的盖层发育阶段, 以垂直升降构造运动为主, 以北北西向断裂构造为主; 进入中生代以来, 该地区在后碰撞造山(190~160 Ma)、构造机制转换(~140

Ma)和岩石圈快速减薄(~120 Ma)的作用下(毛景文等, 2003)进入强烈构造-岩浆-成矿活动阶段, 铸就了本区域的构造格局, 发育北北东向、北西向、南北向、东西向四组断裂, 以北北东向最发育。其中紫荆关断裂和乌龙沟断裂呈 NNE 分布于阜平隆起的東西两侧, 属于太行山深大断裂的重要组成部分, 在太行山北段延伸上百千米, 整体走向 NE20°~30°, 控制了区域中生代岩浆的侵入和成矿作用(图 1)。

### 2.3 岩浆岩

从太古代以来, 太行山北段经历了多期次的岩浆活动(章百明等, 1996; 牛树银等, 1998; 陈超, 2013), 活动最强烈, 与铜、钼、金等成矿作用关系最密切的主要是中生代岩浆活动(牛树银等, 1998, 2002; 王霞, 2012)。麻棚、赤瓦屋、王安镇、大河南和涞源等岩体呈串珠状 NNE 向展布, 受紫荆关断裂和乌龙沟断裂带控制。可划分为 3 个侵入阶段: 早期基性程度较高, 岩石类型从辉长闪长岩到闪长岩; 第二阶段是该区域岩浆活动的主体, 以中酸性岩为主, 伴有隐蔽爆破角砾岩, 与成矿关系密切, 岩石类型为石英闪长岩到花岗岩; 晚期主要为酸性脉岩(牛树银等, 1998), 主要岩体及岩石特征见表 1。

对于太行山北段中生代大规模岩浆作用的成因受到了学界的高度关注(蔡剑辉等, 2003; 陈斌等, 2005; 陈智超等, 2007; 高永丰等, 2011; 申志超等, 2015; 张海东等, 2016), 研究认为太行山岩浆活动是受太平洋板块俯冲作用影响, 形成于弧后伸展环境, 是斑岩型矿床的有利成矿环境。

## 3 赤瓦屋铜钼矿床地质特征

### 3.1 含矿岩体特征

赤瓦屋铜钼矿产出于赤瓦屋杂岩体中, 岩体出露面积 59.3 km<sup>2</sup>, 呈同心环带状岩株产出, 与围岩呈显著侵入接触关系, 由石英闪长岩、花岗闪长岩、斑状花岗闪长岩、花岗斑岩以及具有成生联系的隐爆角砾岩组成(图 2)。

石英闪长岩分布于岩体边部, 与阜平岩群元坊岩组为明显的侵入接触关系; 花岗闪长岩分布于石英闪长岩内侧, 与外侧石英闪长岩侵入界线清楚; 斑状花岗闪长岩位于岩体中部, 近等轴状分布, 与外侧花岗闪长岩界线为渐变过渡; 花岗斑岩在地表

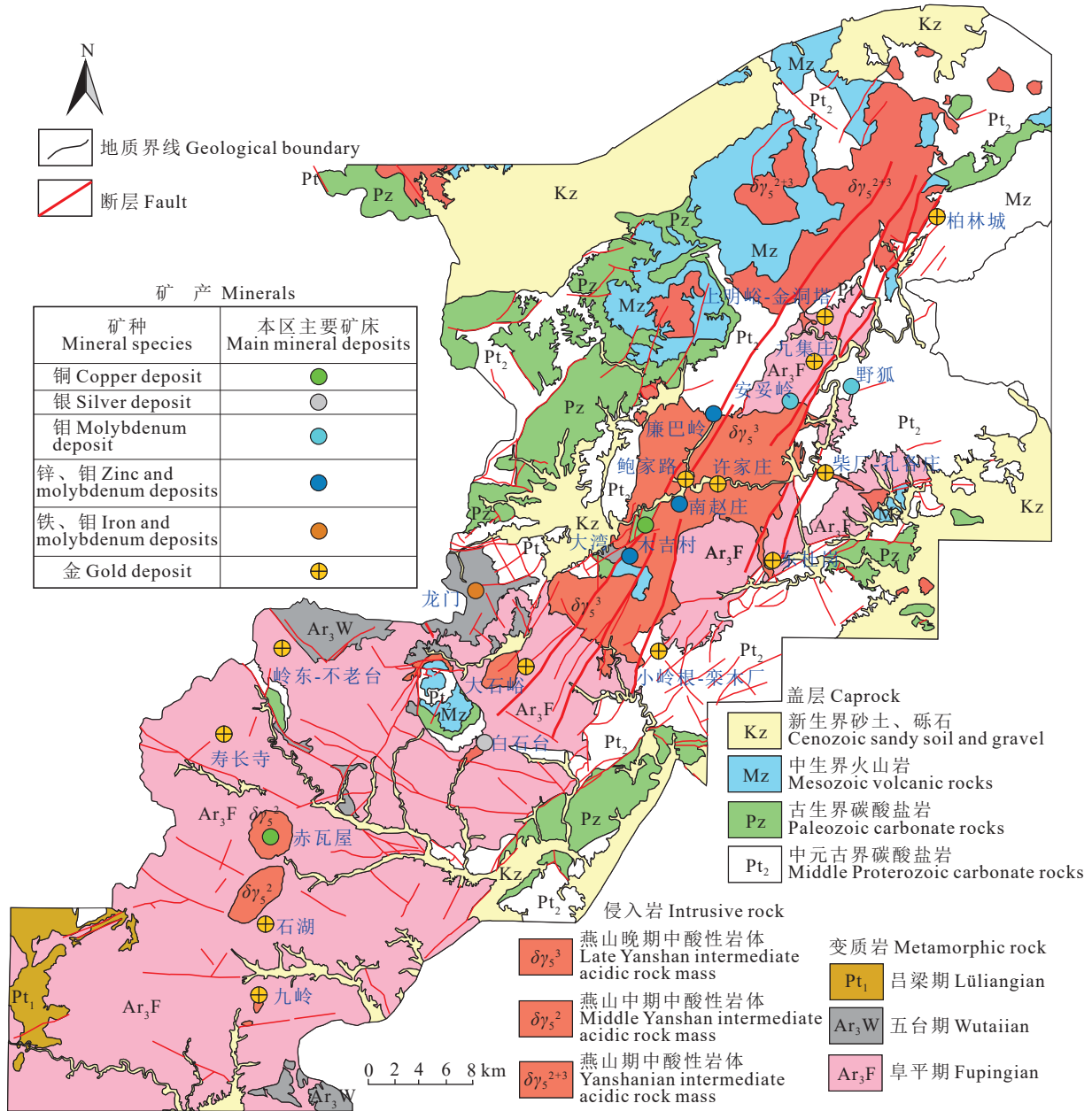


图 1 太行山北段区域地质及矿产分布图

Fig.1 Regional geology and mineral deposit distribution in the north section of Taihang Mountains

呈透镜状零星分布，深部主要见于 ZK002、ZK401 钻孔。岩石呈肉红色，斑状结构，基质为显微晶质结构，块状构造，斑晶主要为斜长石、石英和钾长石，基质主要由长英质微晶组成。钻孔中花岗斑岩局部硅化、钾化、绢云母化强烈，黄铁矿发育，呈浸染状，局部见浸染状辉钼矿化、黄铜矿化。初步认为花岗斑岩为成矿母岩。

隐爆角砾岩：地表呈南北向透镜状零星分布，深部主要见于 ZK001 孔、ZK301 孔中。岩石呈灰

色、粉色，具碎裂结构和交代结构，角砾状构造。角砾成分主要为斑状花岗闪长岩，偶见花岗斑岩，角砾多呈棱角状，次棱角状，少量呈次圆状，大小在 1~10 cm 不等，一般 2~5 cm，大部分呈长条状，排列具一定方向，多数具拼合性。角砾普遍钾化、硅化，暗色矿物黑云母化。斜长石被钾长石不均匀交代，形成迷雾状细微粒钾长石集合体，角砾间胶结物多为石英脉、黑云母细脉、少量钾长石细脉，黄铜矿、辉钼矿、黄铁矿呈细脉状分布于石英脉、黑云母细

表 1 太行山北段主要岩体特征一览

Table 1 Characteristics of main magmatic rocks in the north section of Taihang Mountains

主要岩性	围岩	面积/产状	岩石化学	成因	年龄/Ma	资料来源	
大河南	细粒石英二长岩、石英闪长岩、正长花岗岩、花岗斑岩	阜平岩群、长城系、蓟县系、青白口系、侏罗系、寒武系、奥陶系	760 km <sup>2</sup> 岩基	高钾钙碱性, 贫 Ba、Sr、高 La/Yb	I型花岗岩, 下地壳部分熔融	127~147	陈斌等, 2002; 王霞, 2012; 董明明, 2014
王安镇	辉长闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩、钾长花岗岩	阜平岩群、元古界白云岩、寒武系-奥陶系石灰岩	870 km <sup>2</sup> 岩基	高钾钙碱性, 富 Sr、高 La/Yb	I型花岗岩, 下地壳部分熔融	129~145.7	陈斌等, 2002; 王霞, 2012; 申志超等, 2015; 张海东等, 2016
麻棚	石英闪长岩、花岗闪长岩、花岗岩	阜平岩群	64.5 km <sup>2</sup> 岩株	高钾钙碱性, 富 Sr、Ba	I型花岗岩, 下地壳部分熔融	126~144	王启超等, 1995; 张萌萌, 2020; 李林林等, 2012
赤瓦屋	石英闪长岩、花岗闪长岩、斑状花岗闪长岩、花岗斑岩	阜平岩群	59.3 km <sup>2</sup> 岩株	高钾钙碱性	I型花岗岩, 下地壳部分熔融	126~139.8	夏国礼等, 2005, 2007; 李林林等, 2012; 张志远等, 2021
台峪	花岗闪长岩、花岗闪长斑岩	阜平岩群	11.6 km <sup>2</sup> 岩株	高钾钙碱性	I型花岗岩, 下地壳部分熔融	132	本文
高贡	花岗闪长斑岩、微晶钠长斑岩、花岗斑岩	长城系高于庄组阜平岩群	3 km <sup>2</sup> 岩株	高钾钙碱性	I型花岗岩, 下地壳部分熔融	130	本文

脉边部及脉中, 局部黄铜矿、黄铁矿呈团块状, 辉钼矿呈星点状分布, 角砾岩为钼铜矿的主要赋矿围岩。

赤瓦屋岩体的形成时代问题许多学者给予高度关注。夏国礼和李耀辉(2005)、夏国礼等(2007)基于全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 135.2 Ma; 刘阳等(2010)应用 SHRIMP 测年方法获得该岩体北部和西部边缘相石英闪长岩的锆石 U-Pb 年龄分别为 (134.0±5.3) Ma 和 (139.8±3.1) Ma; 李林林等(2012)获得该岩体西部边缘相石英闪长岩的 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄为 (126.4±2.4) Ma。李瑞玲等(2016)系统采集了不同相带(石英闪长岩、花岗闪长岩、斑状花岗闪长岩)和花岗闪长斑岩脉样品, 获得锆石 U-Pb 谐和年龄分别为 (134±1) Ma、(133±1) Ma、(131±2) Ma 和 (128±1) Ma。各学者给出的年龄数据基本一致, 均表明赤瓦屋岩体不同岩相形成于早白垩世。

岩体里特曼指数 2.83~3.76, 碱度指数 AR 在 2.0~3.34, 由边部向中心 K<sub>2</sub>O 含量及 K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 比值逐渐增大, FeO、MgO 含量及岩石分异指数 DI 和固结指数 SI 逐渐减小, 与太行山北段花岗岩一致, 均为中酸性高钾钙碱性花岗质岩石(陈斌等, 2002)。结合区域杂岩体岩石地球化学数据表明,

太行山北段处于远离古太平洋板片俯冲带的弧后盆地, 中生代岩浆岩的形成有可能与古太平洋板块的俯冲有关。由于太平洋动力体系的作用, 华北地区发生构造格局的转折和岩石圈减薄作用(陈斌等, 2005; 毛景文等, 2005; 高永丰等, 2011; 王霞, 2012; Dong et al., 2013; 曹冲和申萍, 2018), 导致了大规模的壳幔相互作用, 浅部形成了太行山北段两大花岗质岩基。这一构造背景和岩浆作用造就了太行山北段包括赤瓦屋铜钼矿在内的斑岩型矿床的发育(毛景文等, 2005; 王霞, 2012; 曹冲和申萍, 2018), 实质上已经形成了太行山北段斑岩型矿床成矿带。赤瓦屋岩体的岩浆分异指数(DI)为 75.04, 轻重稀土元素比值(LREE/HREE)均较高, 为 20.2, 黑云母 MgO 含量为 12.80%~14.28%, 石英 Ti 含量为 17×10<sup>-6</sup>, 全岩氧同位素 δ<sup>18</sup>O<sub>SMOW</sub> 值为 8.89‰, 暗示赤瓦屋岩体具有较大的成矿潜力(李瑞玲等, 2016)。

### 3.2 矿体特征

赤瓦屋铜钼矿床的赋矿围岩为花岗闪长岩和斑状花岗闪长岩, 隐蔽爆破角砾岩为重要容矿空间。目前圈定 Cu、Mo、W 矿体共 69 个。浅部及地表由探槽和坑道控制, 矿体走向大致呈近南北向、北东向, 倾向东或西, 倾角 60°~80°, 矿体形态呈不

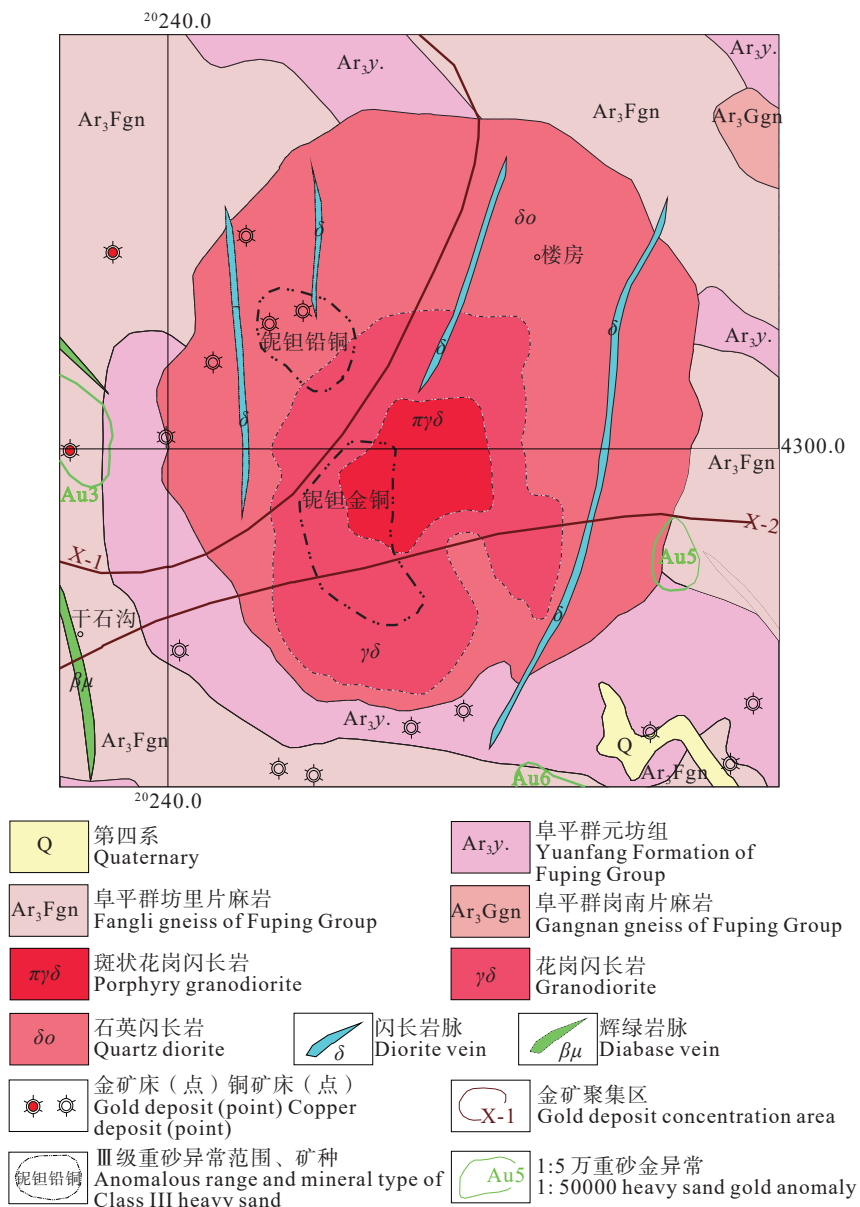


图2 赤瓦屋岩体及周边水系沉积物异常分布图  
Fig.2 Chiwawu complex and stream sediment anomalies

规则脉状和透镜状。深部由7个钻孔工程控制,矿体呈不规则似层状,局部有分支复合现象,总体产状 $90^{\circ}\angle(45^{\circ}\sim 70^{\circ})$ (图3)。主矿体长400~1200 m,斜深400~850 m,厚度0.77~38.23 m,矿体厚度变化较稳定。其中ZK301铜钼钨矿体累计厚度169.11 m(25层),深部见厚大铜钼矿体,最大连续见矿厚度38.23 m;ZK401铜钼矿体累计厚度22.80 m(14层);ZK002铜钼钨矿体累计厚度66.73 m(23层);ZK003铜钼钨矿体累计厚度63.47 m(21层)。主矿体资源量占全区近74%。

### 3.3 矿石矿物成分及结构构造

矿石可划分为氧化矿石和原生矿石两种类型,浅部均为氧化矿石,氧化深度最深达100 m。深部铜、钼矿石为原生矿石。

金属矿物主要为黄铁矿、黄铜矿、辉钼矿,白钨矿,次要矿物为磁铁矿、方铅矿、闪锌矿、赤铁矿;浅部还有孔雀石、蓝铜矿、钼华及褐铁矿。脉石矿物以石英、斜长石、钾长石为主,其次为绢云母、黑云母、角闪石等。

本矿床矿化具有多期次、多阶段的特点。可分

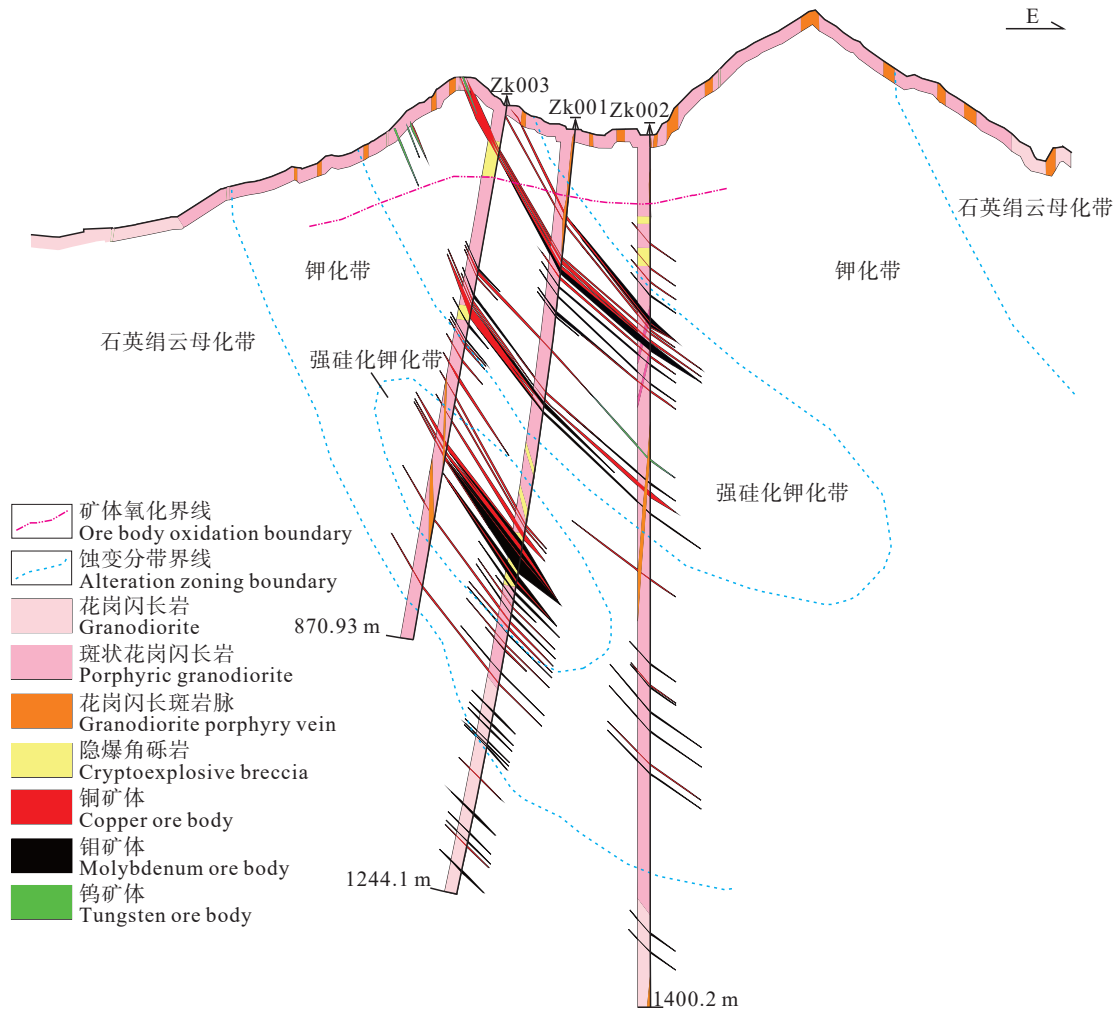


图 3 赤瓦屋矿区 0 号勘探线剖面图

Fig.3 Profile map of the prospecting line 0 of the Chiwawu deposit

为岩浆期后热液成矿期和表生作用成矿期。热液成矿期可分为 5 个成矿阶段。第一成矿阶段是伴随岩浆结晶作用的晚期热液活动的产物,特点是矿化弱、作用范围广,主要矿物组合为面状交代形成的黑云母化、钾长石和石英化,伴随的金属矿物有磁铁矿、黄铁矿和少量的辉钼矿,为前锋成矿作用;主要成矿阶段是伴随隐蔽爆破角砾岩的形成,以及之后的构造活动,形成细脉浸染状和脉状产出的辉钼矿、黄铜矿、黄铁矿化以及硅化和绢云母化以及钾化。由于构造和热液活动的脉动特点,可以进一步划分为钾长石-辉钼矿阶段和石英-黄铜矿阶段、方解石-白钨矿阶段;热液成矿作用的尾声主要为碳酸盐-绿泥石化阶段,伴随有细粒的黄铁矿产出。表生作用期主要表现为金属矿的氧化作用,伴有微弱的次生富集作用。

矿石结构主要有自形晶结构、半自形晶结构、交代结构和固溶体分离结构、包含结构以及他形粒状结构,主要取决于矿物的晶体结构、晶体化学的特性以及成矿热液的性质。黄铁矿多以自形晶,黄铜矿与白钨矿一般呈他形粒状,辉钼矿呈半自形片状结构,可见辉钼矿交代黑云母,黄铜矿交代辉钼矿的交代结构。矿石构造主要有细脉浸染状,脉状构造、块状构造、角砾状构造,蜂窝状构造等。

### 3.4 矿石化学成分

矿石主要有用组分为铜、钼、钨,伴生有用组分为银、镓。铜平均品位 0.80%,钼平均品位 0.111%,钨平均品位 0.240%,伴生铜平均品位 0.17%,伴生钼平均品位 0.039%,伴生钨平均品位 0.072%,伴生银一般含量 1.15~12.70 g/t,平均含量 4.06 g/t;伴生镓一般含量 15.9~27.2 g/t,平均含量 17.64 g/t;尚难

利用矿产资源:铜平均品位 0.28%,钼平均品位 0.043%,钨平均品位 0.097%,伴生铜平均品位 0.14%,伴生钼平均品位 0.020%,伴生钨平均品位 0.057%,伴生银品位 3.96 g/t,伴生镓品位 17.86 g/t。

成矿元素的垂向变化:前期对 ZK002、ZK003、ZK301、ZK401 四个钻孔按 10 m 采样间距(矿化段采样间距 5 m),分析元素铜、钼、金、银、铅、锌、砷、汞、铋、钨共 10 种元素。在空间分布上铜、钼的富集具有较为相近的空间关系,铜、钼异常与矿体吻合好。有明显的三个浓度分带:矿体异常、近矿异常、远矿异常。金、银元素异常变化较大,与铜、钼矿体无关联性,铅、砷、汞、铋浓度较低,无富集带。钨元素在各钻孔中具有非常一致的分布规律,在浅部富集,深部减弱,钨矿化以白钨矿为主,共生矿物主要为方解石,其形成温度较辉钼矿、黄铜矿偏低,在热液运移的稍晚期沉淀(图 4)。

### 3.5 围岩蚀变特征

赤瓦屋铜钼矿床具有典型的斑岩型矿床的蚀变特征。蚀变类型有硅化、钾化、绢云母化、绿泥石化、绿帘石化、碳酸盐化等。硅化以细网脉状以及团块状为主;钾化主要表现为钾长石化与黑云母化,也表现为细脉状及云雾团块状;绢云母化与硅化密切共生,交代斜长石现象显著。蚀变矿物组合

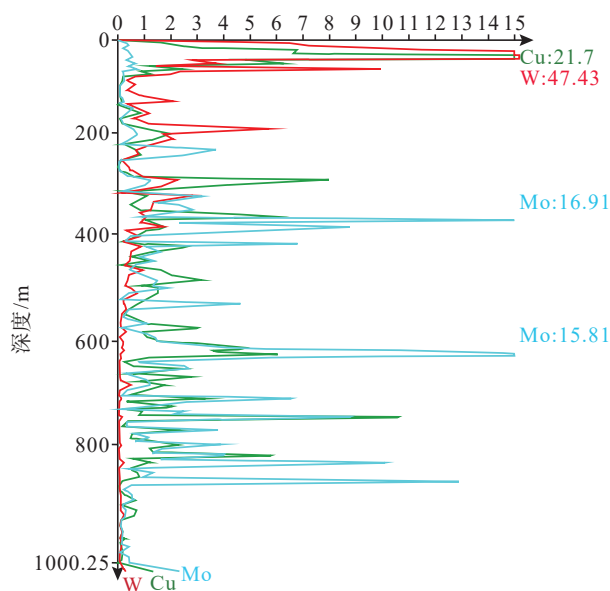


图 4 赤瓦屋 ZK801 钻孔 Cu、Mo、W  
Fig.4 Cu, Mo and W Content in the ZK801 drilling core of the Chihuawu deposit

在空间上具有明显的分带现象,可分为钾化带和石英绢云母带。钾化带依据其蚀变强度可细分为强硅化钾化带和硅化钾化带(图 3),主要取决于围岩类型,隐蔽爆破角砾岩体及其围岩裂隙通道表现出强烈的硅化作用。铜钼矿化主要分布在钾化带中。从目前勘查范围来看,钾化带的分布面积远大于石英绢云母化带。关于青磐岩化带,现有勘查报告及已发表的文献均未指出其存在。但青磐岩化带的特征矿物组合,绿泥石、绿帘石、方解石等大面积分布于矿区南部,绿泥石主要呈膜状、不规则脉状与石英、黄铁矿共生,绿帘石呈半自形粒状集合体呈细脉状产出(王雪飞, 2020)。基于此笔者认为该矿床青磐岩化带是存在的。

### 3.6 矿床成因

采集斑状花岗闪长岩体内与黄铜矿共生的辉钼矿 7 件样品,分析辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为  $(128.7 \pm 4.4)$  Ma, 确定其成矿时代为早白垩世。赤瓦屋钼铜矿床中辉钼矿 Re 的含量为  $25.9 \times 10^{-6} \sim 37.1 \times 10^{-6}$  (张志远等, 2021), 低于木吉村斑岩铜钼矿床和安妥岭钼矿床中辉钼矿的 Re 含量 ( $37.5 \times 10^{-6} \sim 252 \times 10^{-6}$ ,  $50.4 \times 10^{-6} \sim 105 \times 10^{-6}$ ) (高永丰等, 2011; 者萌等, 2014), 说明赤瓦屋铜钼矿床成矿物质来源具有壳幔混合的特征, 以壳源为主, 混入了少量幔源物质。22 件包裹体样品分析结果表明该矿床形成温度介于  $147 \sim 377^\circ\text{C}$ , 以  $230 \sim 300^\circ\text{C}$  为主, 盐度介于  $7.45\% \sim 18.04\%$  NaCl eqv., 以  $11.4\% \sim 14.5\%$  NaCl eqv. 为主, 属于中盐度流体。结合矿床结构构造、围岩蚀变和含矿斑岩体产出的构造环境, 本矿床应属于钙碱性系列的 Endako-型斑岩型铜钼矿。

## 4 遥感地质特征

### 4.1 线环构造的解译与分析

将 ETM+遥感数据中的多光谱波段数据与全色波段数据相融合, 融合后的遥感数据空间分辨率为 15 m。以融合后 ETM+742(RGB)彩色合成影像图为解译底图, 适当参考 ASTER 321(RGB)遥感影像图。依据研究区地形、地貌、遥感影像的影纹和色调等特征以及已有的地质资料等, 对该区域的构造进行了人工目视解译。结合部分野外实地验证, 共



解译出长度大于 300 m 的线性构造 171 条, 环形构造 30 个。

4.1.1 线环构造的分布特征

线性构造以北东向、北西向和近东西向为主, 少量北东东向(图 5)。北东向和北西向构造呈现出大致等间距的分布特征, 总体上显示出菱形网格状的构造格局。近东西向构造主要在研究区的北部、中部和南部有 3 个集中分布带。

环形构造对控矿具有重要的指示意义, 在野外填图工作较难发现, 而遥感解译环形构造具有独特的优势。本次工作在研究区解译出了不同等级的环形构造, 最大环形构造 C3 直径约 8 km, 小型环形构造直径约 0.5 km。其空间分布上具有显著的规律性, 主要集中分布在赤瓦屋岩体内部和研究区西南部, 即赤瓦屋岩体的西南和麻棚岩体的东北部, 具有大环套小环的特点, 小环多分布在 2 组断裂或

3 组断裂的交汇处, 总体沿北东向主干断裂 F43 和北西向主干断裂 F98 呈串珠状分布(图 5)。

4.1.2 环状构造的成因

环形构造的成因具有多样性(田淑芳和詹骞, 2013)。隐爆角砾岩与岩浆作用密切相关, 在地下隐蔽条件下产生的岩浆或气液爆发作用, 常产出在浅成超浅成中酸性斑岩体的顶部(章增凤, 1991; 高轲等, 2024), 伴随有典型的环形、放射状断裂(刘家远, 1996)。由于隐蔽爆破角砾岩体的规模较小, 岩筒横切面呈近圆形或卵圆形, 平面直径一般为几米至几十米, 面积最大可达 1 km<sup>2</sup> 左右(章增凤, 1991), 因此形成的环形构造规模也较小。

太行山北段岩浆活动的中晚期普遍伴有隐蔽爆破角砾岩(牛树银等, 1998)。不仅形成了典型的环形构造和放射状断裂, 而且成为主要控矿空间(王春天等, 2012), 如秋卜洞银矿(孙文燕等, 2023)、龙

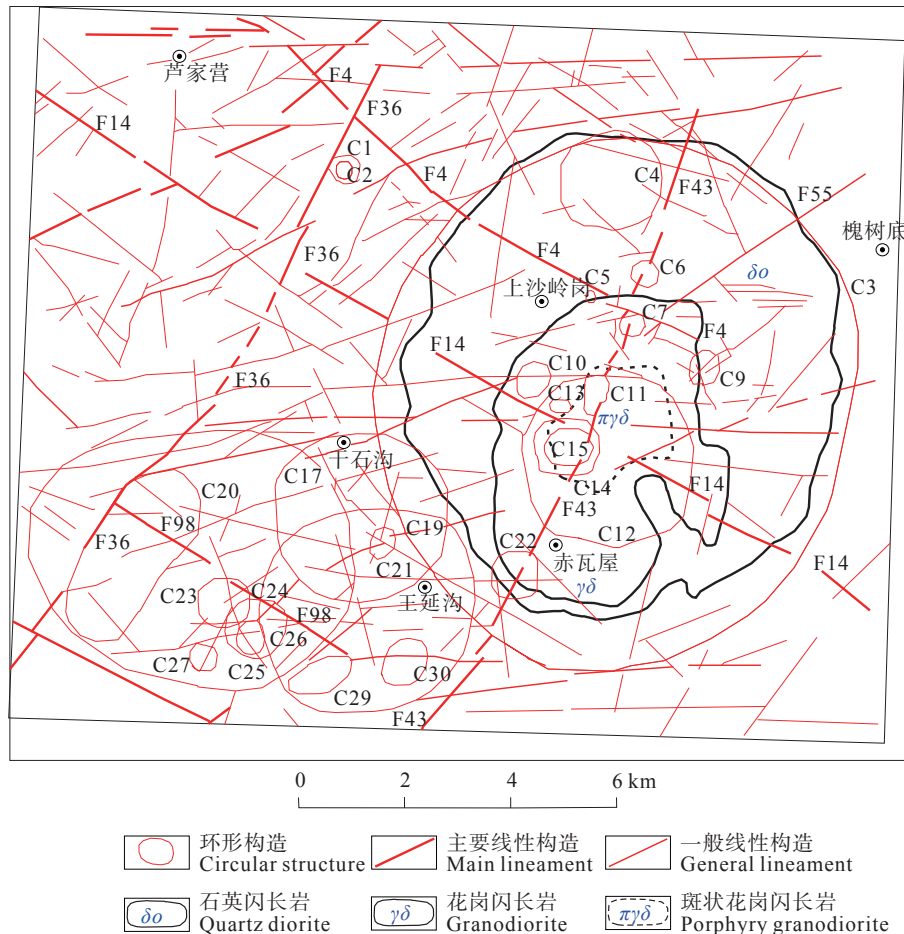


图 5 赤瓦屋一带高分遥感线环构造解译图  
Fig.5 Linear and circular structures detected using high-resolution remote sensing data in the Chiwawu deposit

门钼矿床(张志远等, 2021)。此外, 黑崖沟岩体东侧的南辛庄、岭东岩南部的马南梁及北部的水泉、谢地等发现多个隐蔽爆破角砾岩构造, 呈岩筒状产出, 呈北东向带状产出, 长约 35 km, 宽 5~8 km。

结合本区域地质背景与特征, 笔者认为研究区环形构造的形成主要与岩浆侵入活动及次火山活动有关。其中大型环状构造与侵入体或隐伏侵入体有关, 而小型环状构造与隐蔽爆破角砾岩有关。C3 环的分布与赤瓦屋岩体的边界高度吻合, 属于侵入体型环形构造。C12 环形构造的分布范围基本与花岗闪长岩的分布范围一致, 花岗闪长岩与赤瓦屋岩体的边缘相石英闪长岩呈显著的侵入接触关系(王雪飞, 2020), 因此在影像上能够显示出环形构造的特征, 或者是由于主要在深部产出的花岗斑岩体(钻孔 ZK002、ZK401 见到, 地表零星出露)的侵入作用形成。而研究区西南王延沟附近的 C17、C18、C19、C20 可能是由隐伏岩体侵入作用的产物, 而且笔者在野外验证时发现了侵入岩体的局部露头, 从区域重力负场圈闭带的特征也说明这几个环形构造可能是隐伏岩体的产物(吴云霞等, 2021)。

如前所述, 赤瓦屋岩体内部有多处隐蔽爆破角

砾岩, 地表呈南北向透镜状零星分布, 深部主要见于 ZK001 孔和 ZK301 孔。结合区域上岩浆活动普遍伴有隐蔽爆破角砾岩, 因此推测赤瓦屋岩体内部(C5-C15)及外围的(C1、C2、C20-C30)小型及微型环状构造的成因可能与隐蔽爆破作用的关系最为密切, 或者与伴随爆破作用的超浅成隐伏斑岩体有关。

#### 4.2 蚀变遥感异常特征

利用 Landsat 遥感影像提取羟基和铁染蚀变异常信息。首先提取解译区内影响蚀变遥感异常的植被、水体等主要因素。分别利用归一化植被指数增强植被信息, 建立去植被干扰掩膜, 去植被干扰掩膜切割阈值为 0.463~0.608; 利用 5 波段建立去水体干扰掩膜, 去水体干扰掩膜切割阈值为 1783~1820; 利用工作区坡度数据建立去除第四系干扰掩膜, 去第四系干扰掩膜切割阈值为 19.665~20.182。把上述所建立的去各种干扰因素掩膜合并, 利用主成分变换提取铁染异常和羟基异常。在提取异常后通过间距为 500 m 的网格化统计研究区内的蚀变异常信息。再通过样条化插值得出研究区蚀变异常浓集信息强度图(图 6)。

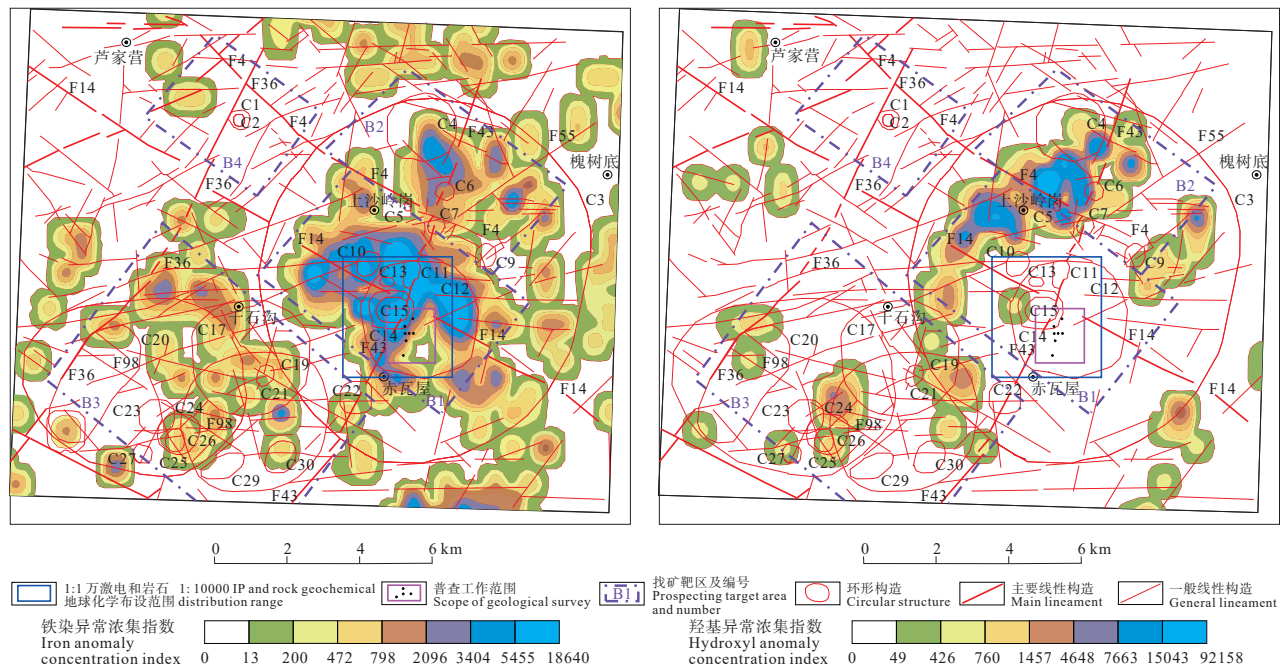


图 6 遥感蚀变异常与找矿靶区图

a—铁染异常; b—羟基异常

Fig.6 Alteration zones detected using remote sensing data and the delineated prospecting target areas

a—Iron alteration anomaly; b—Hydroxyl alteration anomaly

羟基异常浓集区主要集中在赤瓦屋西北部的夏庄东北部一带,沿环形构造内部边缘分布。在杨树沟南部、张家庄东北部也有少量集中分布,杨树沟南部异常浓集区与三个小型环形构造交点吻合,张家庄东北部异常浓集区与北北东向线性构造和环形构造交点吻合。其余,赤瓦屋东南部线环构造交点处也有少量分布。与斑岩型矿床有关的绢英岩化带和青磐岩化带往往在遥感影像上显示为羟基异常信息(陈琪等, 2021; 赵志芳等, 2022; 刘磊等, 2022; 王聪聪等, 2023; 白龙洋等, 2024), 本次工作在野外验证表明, 羟基异常分布区域见到了绿泥石及绿帘石及方解石矿物组合, 这与普查工作区西南部出现大面积绿泥石、绿帘石矿物组合的实际相符, 进一步说明本矿床青磐岩化带是存在的。

铁染异常浓集区主要集中在赤瓦屋环形构造内部, 有两个浓集中心, 其一位于岩体的中部, 与 C10-C15 小微型环形构造范围高度一致, 且面积大, 浓集程度高, 总体呈北西向展布。另一个分布与 C4-C7 小型环形构造的分布一致。其次在赤瓦屋岩体的西南部干石沟一带也有较大范围的铁染异常分布, 空间上与 C19-C30 环形构造的分布区域一致。位于岩体中心的大面积高浓度铁染异常, 与地表矿化体及由黄铁矿氧化形成的“火烧皮”在空间分布上高度吻合。因此遥感铁染异常具有很好的找矿指示意义。

## 5 地球化学及地球物理特征

### 5.1 地球化学特征

对于地球化学异常的圈定, 传统的方法是选取  $X+2S_0$  ( $X$ : 均值,  $S_0$ : 标准差) 作为异常下限, 来确定地球化学异常, 为了使地球化学数据服从正态分布, 往往需要先删除地球化学数据集里面的极高值和极低值, 再计算地球化学数据的均值和方差; 但是这些极值对于矿产勘查具有重要的意义。而基于多重分形理论所定义的奇异性指数  $\Delta\alpha$  (Cheng, 1999) 可以用来度量异常的局部标度性 (scaling) 和奇异性 (singularity)。由此而发展的局部奇异性分析方法已用于多尺度地球化学局部异常的圈定和奇异性程度的度量。奇异性指数不需要对数据做人为的删减预处理, 而且有效降低了岩体高背景、系统背景差异的影响, 并且强化了低背景区的弱异

常(成秋明, 2007, 2011; 成秋明等, 2009)。

本文应用奇异指数异常圈定的方法对研究区 1:20 万水系沉积物数据处理, 圈定了相关元素的异常(图 7)。结果表明伴随赤瓦屋岩体的侵入, 隐蔽爆破角砾岩的形成以及相关的热液活动, 形成了较为典型的地球化学异常, 在空间分布上与环形构造、杂岩体(或隐伏岩体)、隐爆角砾岩具有较好的吻合性。

Cu、Zn、Au、Ag 与 W、Mo 在空间分布上具有显著的分带性, W、Mo 奇异指数异常富集区域主要分布在赤瓦屋岩体的中南部, 与 C1-C15 环形构造的范围基本吻合, 向南延伸至 C3 环; Cu、Zn、Au、Ag 奇异指数异常富集区分布在 W、Mo 的外围。Cu 在赤瓦屋岩体的西北部亏损区域, 奇异指数异常富集区主要分布在异常区西南部, 与西南环形构造密集区范围吻合; Zn 在 Mo、W 富集区出现亏损, 向外逐渐富集, 在赤瓦屋岩体的西北奇异指数异常富集程度最高, 位于 C1、C2 环形构造及 F36、F4 的交互区域; Ag 与 Zn 的异常富集区非常相似, 但亏损区域主要在岩体的西北, 与 Cu 基本一致; Au 的奇异指数异常富集区分布在岩体的西北、东南、西南三个区域, 基本以 C3 环形构造即岩体边界为富集中心。

对勘查区 10 km<sup>2</sup> 范围内 Mo、W、Bi、Cu、Zn、Pb、Au、Ag、B、As、Sb、Hg 这 12 种元素进行 1:10000 岩石地球化学测量结果表明: W、Cu、Mo、Bi 元素变化系数大于 1, 为强分异型元素, 具有极其显著的富集矿化趋势; Ag 元素变化系数在 1~0.5, 属弱分异型元素, 其他元素变化系数小于 0.5, 在测区分布相对均匀。Cu 元素虽浓集克拉克值在 0.96, 与全省岩石克拉克值相当, 但变化系数达到 1.106, 同样具备成矿的参数特征。

本文应用奇异性指数异常圈定方法圈定了岩石地球化学异常图(图 8)。显示, Cu、Mo、W、Au、Hg、Sd、Pb、Ag 元素的空间分布与环形构造及线性构造具有显著的对对应性。充分说明矿化与环状构造与线型构造的密切关系。按变化系数由大到小排列为 W、Cu、Mo、Bi、Ag、B、As、Au、Sb、Zn、Pb、Hg, 同样反映 W、Cu、Mo、Bi 具有富集成矿的指示意义。

### 5.2 地球物理特征

太行山北段 1:20 万、1:10 万航磁测量已经

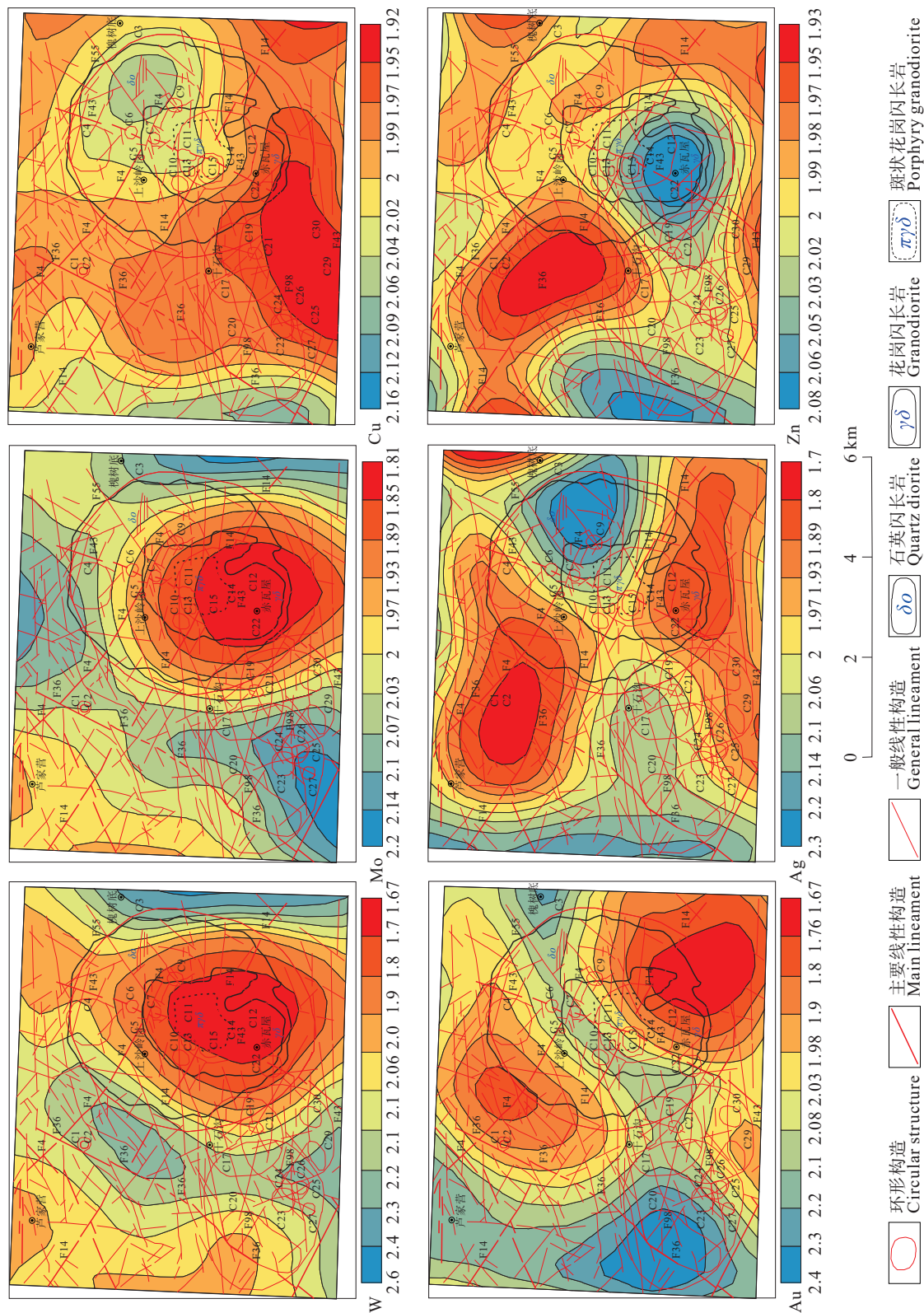


图7 地球化学 W、Mo、Cu、Au、Ag、Zn 元素奇异指数异常图  
 Fig.7 Distribution of singularity index for W, Mo, Cu, Au, Ag, and Zn

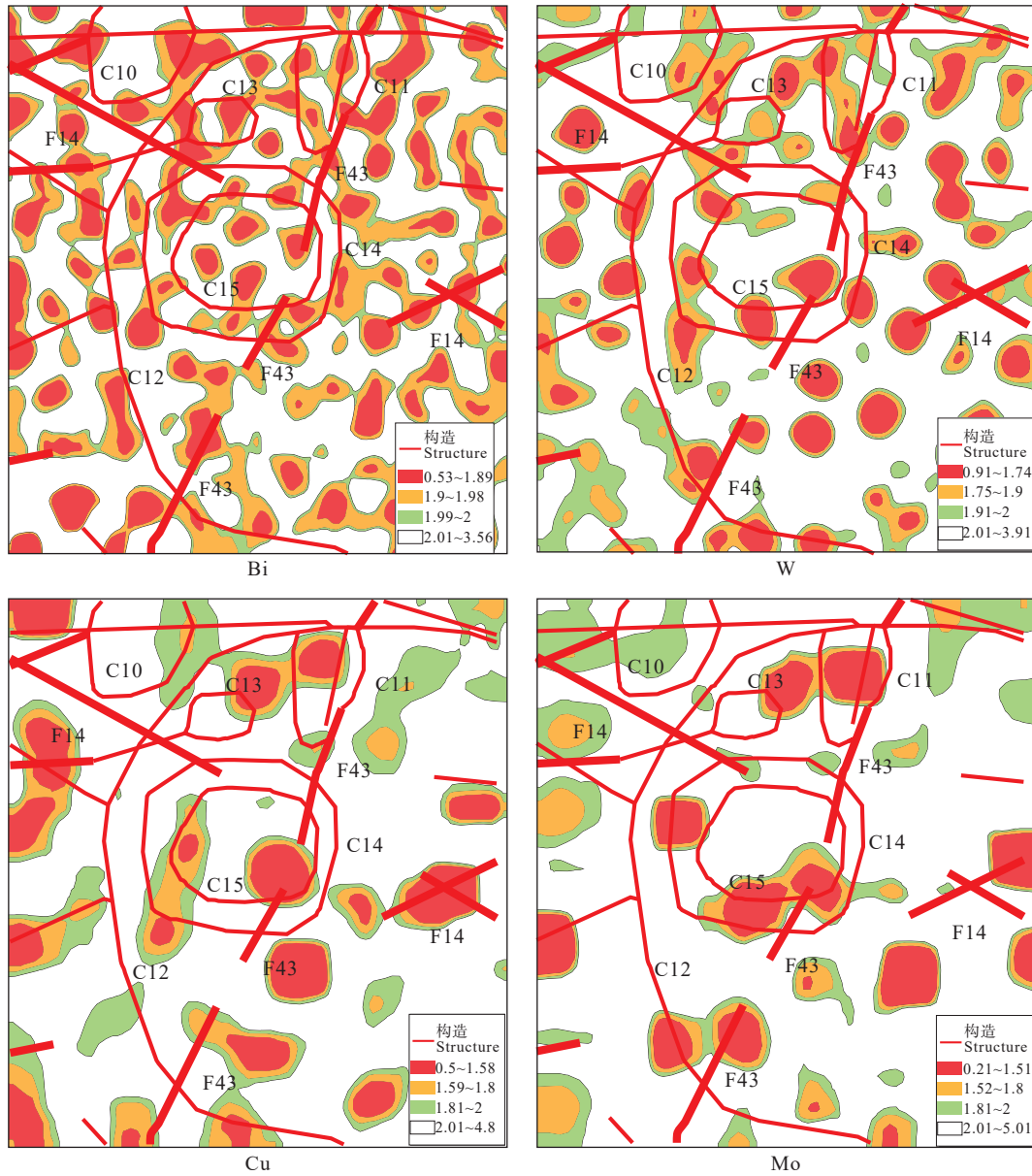


图 8 奇异指数异常与线环构造关系图

Fig.8 Spatial correlation between the singularity index of Bi, W, Cu and Mo and the linear-circular structures

全部覆盖, 1 : 5 万高精度航磁测量也已完成, 近年又完成了 1 : 2.5 万高精度航磁测量。太行山北段航磁异常总体呈北东向展布, 与紫荆关构造岩浆带的展布方向吻合, 岩体与隐伏岩体均显示为正异常, 中酸性岩类磁异常一般在 200~600 nT, 阜平群变质岩系一般为低正异常 100 nT 左右; 盖层一般为负异常。在 1 : 2.5 万航磁异常图中赤瓦屋岩体为显著的正异常, 强度一般在 200~1000 nT, 与岩体的展布形态高度一致, 而且从岩体边缘到中心异常呈

环带分布, 反映出了岩性的分带性, 边缘石英闪长岩为高异常区, 花岗闪长岩分布区域异常降低, 一般在 139~200 nT, 而在斑状花岗闪长岩区域异常增高在 200~800 nT, 但仍低于边缘相的异常值。在每一异常环带中又分布有若干局部异常高值区。在  $\Delta T$  化极等值线图 and  $\Delta T$  一阶、二阶导数等值线图中也显示出类似的分布特征, 即整体呈环形异常, 其中分布多处局部异常的特征。在一阶、二阶导数等值线异常图中正异常范围明显向外延展, 特别是在

岩体的北西和南东两个方向明显,在二阶导数异常等值线图中,岩体的边界和围岩的界线趋于模糊(魏云飞等,2021)。这种特征反映赤瓦屋岩体的外围存在与其相连的隐伏岩体,而且范围较大,与南部的麻棚岩体相连。在岩体内部不同岩性中的局部异常很可能是隐爆角砾岩体、隐伏斑岩体或者矿体所致。

研究区及外围 1:20 万、1:10 万重力异常测量结果表明,重力异常的展布亦呈北东向、北北东向,中酸性岩体出露区域均为明显的负异常区域,而且异常较为平缓,盖层区域多数为正异常区域。赤瓦屋岩体与南部麻棚岩体在 1:10 万重力异常图中均在同一个重力负场圈闭带内,该圈闭带整体呈椭圆状,约 16 km×28 km,在岩体出露区域布格重力异常呈宽缓状,在岩体外围呈较为密集的梯级带(图 9)。这异常特征和磁异常均反映出,两个岩体在深部相连,而且在外围有于其相连的隐伏岩体

存在。

在勘查区完成的 1:10000 激电测量,面积 3.83 km<sup>2</sup>。以  $\eta_s \geq 2.0\%$  圈定的激电异常,异常完整成片,形态不规则,与矿化蚀变带分布及化探异常范围基本吻合;以极化率 2.5% 为下限圈定异常 6 处(图 10),极化率高值区域位于异常东南部,异常西部及南部为高电阻区域,其中, D1 异常面积大,峰值高,为矿区内主要异常。

激电剖面与测井结果显示,激电异常与矿化(体)在空间上具有明显的对应关系。在矿化井段多呈低阻高极化特征,其余段呈中高阻低极化特征,矿体分布与极化率异常基本吻合。

## 6 区域找矿标志

### 6.1 地质找矿标志

构造找矿标志。太行山北段已知铜、钼、金等金属矿产严格受构造控制,且具有明显的规律性。

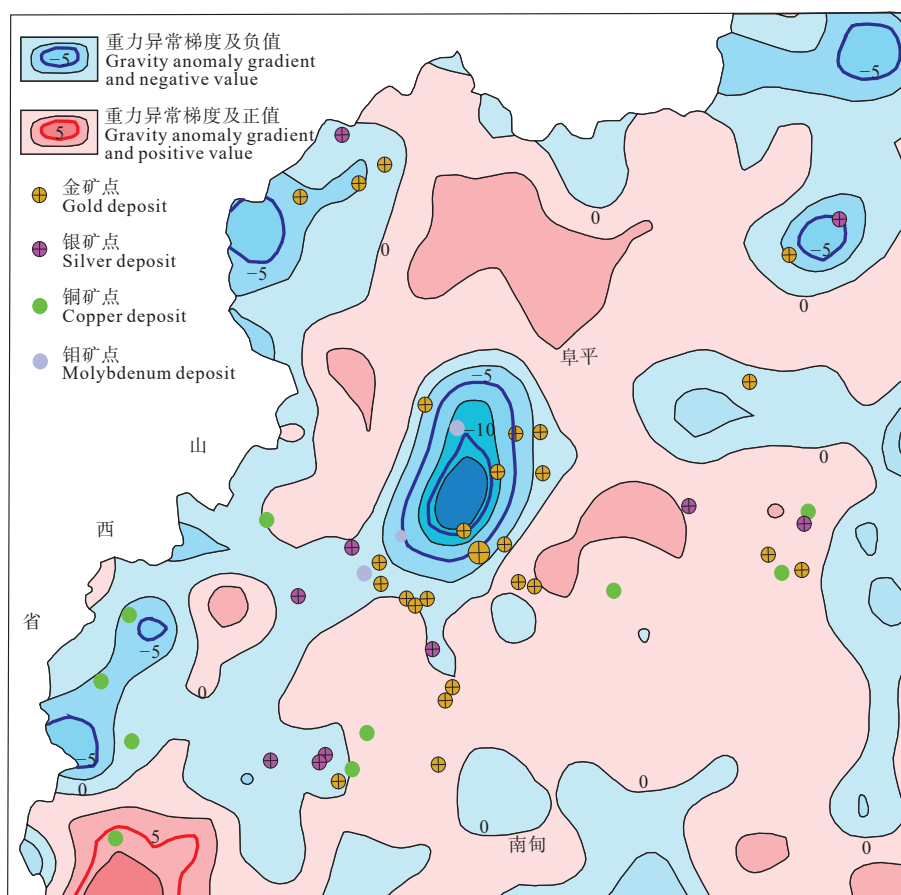


图 9 区域布格重力异常与矿床分布图

Fig.9 Distribution of regional Bouguer gravity anomalies and deposits

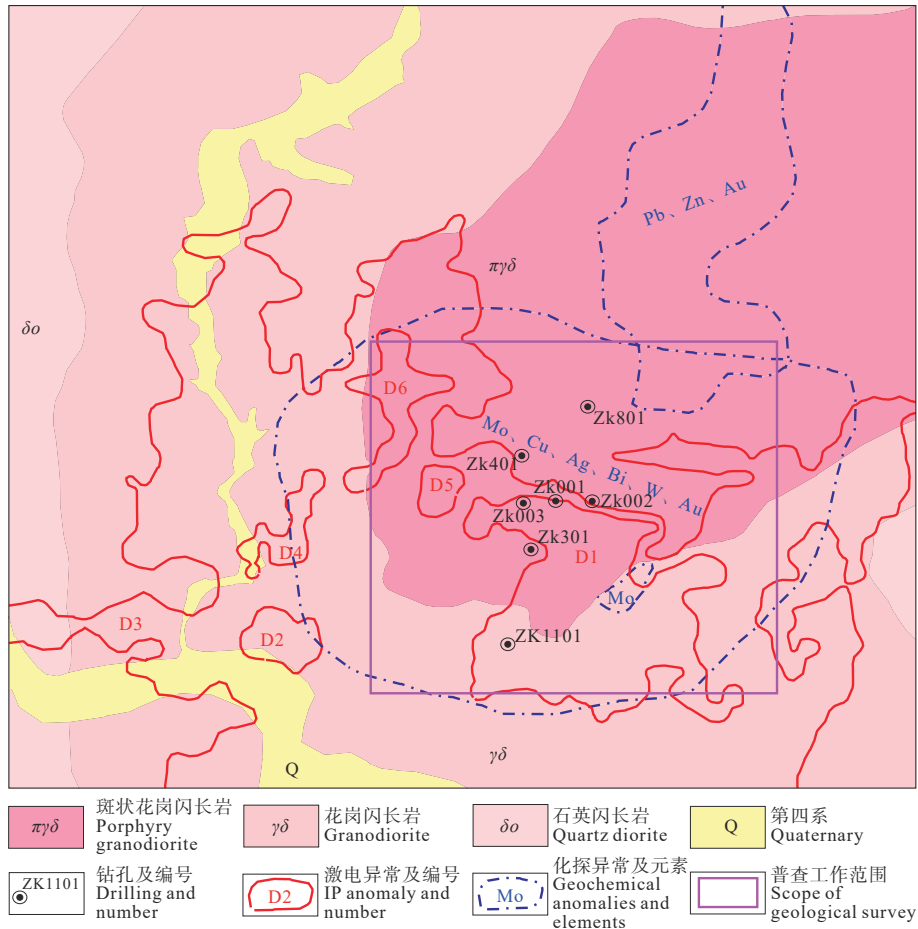


图 10 勘查区激电及岩石地球化学异常图

Fig.10 Induced polarization anomalies and rock geochemical anomalies in the study area

区域北北东向的乌龙沟——上黄旗大断裂,即控制了区域燕山期岩浆活动的分布,也是重要的导矿构造。与其相伴生的北东向、北北东向和北西向的次级断裂构造是重要的控矿构造,也是最显著的找矿标志;另一种重要的标志是隐蔽爆破角砾岩伴生的环形和放射状断裂构造,或者古火山活动伴生的构造。

岩体找矿标志。目前太行山北段已发现的矿床、矿点(矿化点)均与小型的中酸性岩体相关联,并且多数伴有隐蔽爆破角砾岩(表 2),是该区域的重要找矿标志。

围岩蚀变标志。围岩蚀变是最直接的找矿标志,区内木吉村、安妥岭、野孤、秋卜洞等矿床都具有典型的斑岩型矿床蚀变矿物组合与分带特征。钾化、石英绢云母化、青磐岩化普遍发育,石湖金矿也具有典型的黄铁绢英岩化,绿泥石化、绿帘石化、

硅化等典型的热液蚀变矿物组合(表 2)。

### 6.2 物探找矿标志

通过航磁异常在太行山北段寻找变质岩型和矽卡岩型铁矿中起到了显著的效果,同时在寻找隐伏岩体及构造分析中也起到了作用。已知铜、钼、金、银等金属矿产地与磁异常的空间分布耦合关系,也具有较为显著的规律性。矿床主要分布在正异常中,而且在磁异常的边缘较多,或在正负异常的交接处,例如龙门钼矿、安妥岭钼矿位于高正此异常的边缘部,木吉村、石湖金矿位于正负磁异常的交接部位。这一规律表明,这些矿床主要受岩浆活动控制,且与小型或隐伏岩体有关。因此,正异常的边缘及正负异常的交接部位可作为该区域重要的间接找矿标志。

在太行山北段布格重力异常的负异常区域主要是中酸性岩体或隐伏岩体的分布区域。已知铜、钼、金等多金属矿床、矿点主要分布在重力负异常

表 2 太行山北段主要矿床特征简表

Table 2 Characteristics of main deposits in the north section of Taihang Mountains

矿床名称	矿床类型	赋矿围岩	成生岩体	矿体形态	矿物组份	围岩蚀变	矿床规模	成矿年龄	资料来源
石湖金矿	石英脉型	阜平群团泊口组黑云斜长片麻岩	麻棚岩体及中酸性脉岩	脉状, 薄板状, 透镜状	黄铁矿、方铅矿、闪锌矿	硅化、绢云母化、黄铁绢英岩化和绿泥石化	大型	130 Ma	陈超等, 2009; 李青等, 2013
木吉村铜矿	斑岩型-矽卡岩型	古生界灰岩和中上元古界白云岩、燧石条带白云岩为主	来源杂岩体、闪长玢岩	多为厚大不规则透镜体	黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、辉钼矿、磁铁矿、少量辉银矿、硫钴矿、白钨矿等	强硅化带、钾化带、石英绢云母化带青磐岩化带、矽卡岩化	铜大型, 钼中型	144~139 Ma	马国玺, 1997; 马国玺等, 2010; 高永丰等, 2011; 申志超等, 2015
大湾锌钼矿	斑岩型-矽卡岩型	古生界灰岩和中上元古界白云岩、燧石条带白云岩	燕山期司徒庄杂岩体流纹斑岩	透镜状、似层状、脉状及不规则状	黄铜矿、黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、辉钼矿、斑铜矿、自然金、自然银	斑岩型热液蚀变和接触交代变质	钼大型, 铜大型, 伴生银大型, 伴生镉大型	流纹斑岩140 Ma (Rb-Sr) 辉钼矿137 Ma (Re-Os)	马国玺, 1995; 张立敏, 2013
龙门钼矿	斑岩型	黑云斜长片麻岩、花岗斑岩、闪长岩	闪长岩、花岗斑岩、花岗闪长岩	似层状、透镜状、不规则囊状	辉钼矿、黄铁矿、磁铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿	钾化带、石英绢云母化带、青磐岩化带	大型矿床	辉钼矿136.5 Ma (Re-Os) 花岗斑岩137 Ma	张志远等, 2021
安妥岭钼矿	斑岩型矿床	矿区东部岩体与地层接触部位的隐爆角砾岩	安妥岭岩体花岗闪长斑岩、二长花岗斑岩、斑岩	脉状、透镜状、似层状	辉钼矿、黄铁矿、黄铜矿、黝铜矿、磁黄铁矿、方铅矿、闪锌矿	钾化、石英绢云母化、青磐岩化	大型矿床	辉钼矿147.8 Ma (Re-Os)	朱凤丽和张强, 2011; 张道忠, 2012; 胡瑞刚等, 2013
秋卜洞银矿	隐蔽爆破角砾岩型及断裂充填型	隐爆角砾岩体、霏细岩	麻棚岩体外围老爷庙岩体, 霏细岩、石英斑岩脉	脉状或厚大透镜体状	黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、自然银、自然金、辉银矿、硫银锡矿	青磐岩化带、钾化带、绢英岩化带	大型矿床	黄铁矿101.9 Ma (Rb-Sr); 110 Ma	曹文托和侯建荣, 2018; 孙文燕等, 2023
白石台银矿	隐蔽爆破角砾岩型、斑岩型热液脉型银多金属矿床	隐爆角砾岩、微晶钠长岩、花岗闪长岩等麻岩	高贡岩体、台峪岩体, 微晶钠长岩	脉状, 局部有分枝复合现象	黄铁矿, 方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、自然金、辉银矿、银金矿、辉钼矿、磁黄铁矿	钾化、石英绢云母华、青磐岩化	银中型, 镉中型, 金小型, 铜、铅、锌小型	137 Ma	本文; 赵伟明, 2018
廉巴岭铅、锌、银矿	中高温浅成热液矿床	主要围岩为白云岩, 少数矿化体在花岗闪长岩	王安镇杂岩体边缘, 花岗闪长岩、细晶花岗岩脉	透镜状或串珠状、囊状、瘤状	闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、黄铜矿、雌黄铁矿和毒砂	矽卡岩化为主, 滑石化、重晶石化、硅化、碳酸盐化、绿泥石化, 绿帘石化, 绢云母化	中型矿床	成矿密切相关细晶花岗岩脉锆石U-Pb年龄(126±10) Ma	马国玺, 1999; 吴继莲, 2014
南赵庄铅锌矿	接触交代(矽卡岩)矿床	寒武系灰岩和奥陶系冶里大理岩化白云岩	王安镇杂岩体, 斑状石英二长岩	瘤状、囊状、网脉状、枝杈状、透镜状	镜铁矿、闪锌矿、方铅矿、穆铁矿、黄铁矿、黄铜矿、	矽卡岩化为主, 绿泥石化、硅化、碳酸盐化、滑石化	中型矿床	150 Ma	赵雪朋和宾金来, 2012
野狐钼矿	斑岩-矽卡岩型铜钼矿床	碳酸盐岩、灰岩、碎屑岩	大河南、王安镇两大杂岩体、野狐岩体	细脉状、网脉状、浸染状、角砾状	辉钼矿、黄铁矿、石英、斜长石、黑云母	蚀变较弱	钼(大)型、铜、铅、锌小型	(146.88±2.65) Ma	张道忠, 2012



区, 占 75%, 特别是重力负异常梯级带, 其余分布在靠近负异常区接近重力 0 值的正异常区的边缘地带, 在正异常区域的内部高正异常区几乎没有出现矿床或矿点(图 8)。由此可见重力负异常区及接近重力 0 值的正异常区也是该区域的重要间接找矿标志。

### 6.3 化探找矿标志

1:20 万水系沉积物测量在太行山北段铜钼金等多金属找矿工作中起到了巨大的作用, 是最直接的找矿标志。目前在太行山北段已发现的矿床、矿点、矿化点几乎全部与圈定的异常区相吻合。一般斑岩及矽卡岩型铜、钼矿床的异常组合在空间上具有较显著的分带特征, 从高温元素 W、Mo、Bi 等元素到中低温元素 Cu、Pb、Zn、Au、Ag、Hg 等, 如木吉村斑岩型铜矿、龙门斑岩型钼矿等; 石英脉型或蚀变破碎带型矿床蚀变异常元素组合以 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、Cd、Hg、Sb 为主, 如石湖金矿、石湖岩金多金属矿; 而与隐伏岩体相关的热液型矿床, 异常元素组合也以中低温元素为主。

### 6.4 遥感找矿标志

基于高分一号、ETM+、Aster 多元遥感信息, 对区域线环构造、遥感蚀变异常等信息与矿床、矿点、矿化点空间耦合关系的综合分析表明: 断裂构造的交汇处、小型环形构造与已知矿床、矿点矿化点具有高度的空间吻合性, 据 56 个矿点统计说明, 90% 以上分布在小型环形构造、线状构造交汇处或附近; 遥感蚀变异常也是热液型矿床的直接找矿标志, 如石湖金矿分布在 OLI 数据提取铁染异常密度等值线高值区处、羟基异常密度等值线高值区边缘。

## 7 找矿靶区分析

对研究区域的地质、化探、物探、遥感等多种信息进行综合分析, 可确定 4 个找矿靶区(图 6), 下一步工作重点应该寻找与成矿密切相关的隐伏花岗岩岩体与隐蔽爆破角砾岩体。

### 7.1 B1 靶区

位于岩体中, 该区域包括了 1:10000 岩石地球化学与激电异常区, 在 1:20 万水系沉积物奇异常指数异常图中, 包含了 Mo、W 异常富集区, 与遥感铁染异常高浓集区范围基本吻合, 中小型环形构造和放射状断裂发育, 地表及钻孔见到了隐蔽爆破角

砾岩, 该区域是成矿条件最佳区域。该区域下步找矿工作应该寻找隐伏花岗岩岩体和隐爆角砾岩筒主体, 以实现找矿突破。如前所述, 在钻孔和地表零星见到花岗岩, 并具有浸染状矿化的特征, 初步认为花岗岩为成矿母岩。但目前工作程度并未发现花岗岩的主体。隐蔽爆破角砾岩体一般形成于斑岩体的顶部(章增凤, 1991), 且是重要的成矿空间, 因此寻找隐蔽爆破角砾岩筒的主体对确定成矿斑岩体的位置具有重要的指示意义。隐爆角砾岩筒在空间上有显著的分布特征和规律, 隐蔽爆破角砾岩筒的外侧伴随有震碎带、环状、放射状断裂、裂隙构造体系, 震碎带内侧以震碎角砾岩与隐蔽爆破角砾岩逐渐过渡的演变规律(章增凤, 1991; 刘家远, 1992, 1996), 隐蔽爆破角砾岩在爆破程度、角砾大小、角砾成分组合关系等方面也呈现出分带性和递变性规律(刘家远, 1992, 1996)。本矿床发现的角砾岩未显示分带性, 角砾大小一般在 5 cm, 最大仅 10 cm。依据这些特征说明目前发现的隐爆角砾岩非主体, 仅是角砾岩的分支体(脉)。依据遥感解译赤瓦屋岩体内的环形构造 C12、C13、C14、C15, 伴有较为典型的放射状断裂, 应该为隐伏花岗岩岩体及隐爆角砾岩筒的指示构造。基于上述分析, 建议该区域下步工作应在现有勘查区的西北部, 围绕 C14、C15 环形构造区域布置工程。

### 7.2 B2 靶区

该靶区位于赤瓦屋岩体的东北柳树凹一带, 高分遥感解译的北西向 F4 和北东向 F55 以及北东向的 F43 等多组断裂在此区域相交; 小型环形构造 C4 位于靶区的北部, 以及微型环形构造 C5、C6、C7、C8、C9 位于 F43 断裂或两侧分布, 该区域在 1:2.5 万航磁异常中存在多个形状不等的局部磁异常, 且在一阶、二阶导数等值线图中也显示出多处不同形态的局部异常(魏云飞等, 2021), 这些特征均表明是深部不同地质体的存在, 预示深部隐蔽爆破角砾岩和花岗岩岩体存在的可能性非常高, 也间接指示深部有隐伏矿体的存在; 遥感蚀变异常显示该区域为铁染异常与羟基异常分布区域; 该靶区南部属于 Mo、W 奇异指数异常区域, 北部跨越 Au、Ag 异常。在该靶区的北部应该以寻找 Au、Ag 矿为主, 南部应寻找 Mo、Wu 矿为主。

### 7.3 B3 靶区

位于赤瓦屋岩体外围西南, 区内主要出露阜平

岩群元坊岩组和阜平岩群坊里片麻岩。该区域有 C17~C30 共 13 个环形构造以及密集的线状构造, 而且伴随的放射状断裂非常显著。结合该区域重力异常特征, 在 1:50 万重力异常中, 处于赤瓦屋—榆树坪北东向负场圈闭梯度带内, 在 1:10 万重力异常中也处于负异常梯级带中。在 1:2.5 万航磁  $\Delta T$  化极等值线图和一阶、二阶导数等值线图中该区域均显示为磁异常延伸部分, 而且展布方向为北西向, 与构造及成串展布的环形构造一致。说明该区域具有隐伏岩体和隐爆角砾岩的可能性较高。该区域遥感蚀变铁染异常和羟基异常显著, 而且该区域处于 1:20 万水系沉积物奇异指数异常 Cu、Zn、Ag 及 Au 异常区域。在该区域已发现多个金矿化点。综合各种信息分析该靶区深部应该有隐伏岩体或者隐蔽爆破角砾岩体, 应该寻找 Cu、Au、Ag 矿。

#### 7.4 B3 靶区

位于赤瓦屋岩体外围西北方, 出露地层阜平岩群坊里组片麻岩。该区域同样处在 1:10 万重力异常的负异常梯级带中。在 1:2.5 万航磁  $\Delta T$  化极等值线图和一阶、二阶导数等值线图中该区域均为弱正异常区域, 与出露岩体部分磁异常具有显著的过渡关系, 且呈北向延伸, 预示该区域深部也是赤瓦屋岩体隐伏延伸部分, 结合 C1 和 C2 小型环形构造, 该区域有隐爆角砾岩的可能性也非常高。在 1:20 万水系沉积物奇异指数异常图中, 该区域有富集程度较高的 Au、Ag、Zn 异常和相对较弱的 Cu 异常, 而且与 C1 和 C2 小型环形构造的空间位置具有较高的吻合度, 异常区域受北西向的 F4 和 F14 以及北东向的 F36 控制。在该区域有可能找到隐蔽爆破角砾岩型的 Au、Ag 矿。

## 8 结 论

(1) 赤瓦屋岩体为中酸性高钾钙碱性花岗质岩石, 形成于白垩纪早期, 赤瓦屋铜钼矿化与深部隐伏花岗斑岩有关, 矿化体主要赋存在隐爆角砾岩及斑状花岗闪长岩中, 具有细脉浸染状构造和蚀变分带特征, 属于钙碱性系列的 Endako-型斑岩型铜钼矿。

(2) 研究区 1:2.5 万航磁异常和 1:10 万重力异常均显示赤瓦屋岩体外围仍然有与其相连接的

隐伏岩体, 环形构造发育, 多数伴有放射状断裂, 大型环形构造与赤瓦屋岩体及外围隐伏岩体有关; 小型环形构造多数与隐蔽爆破角砾岩或隐伏小岩株有关, 对矿化具有显著的控制作用, 1:20 万地球化学异常及遥感蚀变异常的空间分布与其吻合程度高, 综合分析认为该区域下步工作应在现有勘查区的西北部, 围绕 C14、C15 环形构造区域布置工程。

(3) 综合分析控矿岩体、矿化蚀变特征、遥感地质特征和物化探等信息, 提出了 4 个找矿靶区。

## References

- Bai Longyang, Dai Jingjing, Wang Nan, Li Baolong, Liu Zhibo, Li Zhijun, Chen Wei. 2024. Extraction of mineral alteration information and mineralization prospecting analysis based on GF-5 hyperspectral in Zhule-Mangla, Tibet[J]. *Geology in China*, 51(3): 995-1007 (in Chinese with English abstract).
- Cai Jianhui, Yan Guohan, Chang Zhaoshan, Wang Xiaofang, Shao Hongxiang, Chu Zhuyin. 2003. Petrological and geochemical characteristics of the Wanganzhen complex and discussion on its genesis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 19(1): 81-92 (in Chinese with English abstract).
- Cao Chong, Shen Ping. 2018. Advances and problems in study of porphyry molybdenum deposits[J]. *Geological Review*, 64(2): 477-497 (in Chinese with English abstract).
- Cao Wentuo, Hou Jianrong. 2018. Genetic type analysis of Qiubudong silver deposit in Pingshan County, Hebei[J]. *Mineral Resources and Geology*, 32(3): 409-415 (in Chinese with English abstract).
- Chen Bin, Tian Wei, Zhai Mingguo, Arakawa Y. 2005. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of the Mesozoic magmatism in the Taihang Mountains and other places of the North China craton, with implications for petrogenesis and geodynamic setting[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 13-24 (in Chinese with English abstract).
- Chen Bin, Zhai Mingguo, Shao Jian. 2002. Genesis and significance of Mesozoic batholith in the northern Taihang Mountains: Geochemical evidence of major and trace elements[J]. *Science in China (Series D)*, 32(11): 896-907 (in Chinese).
- Chen Chao, Niu Shuyin, Wang Baode, Sun Aiqun, Ma Baojun, Wang Wenwen, Gao Yincang. 2009. A tentative discussion on ore-forming material sources and mineralization of the Shihu gold deposit in western Hebei Province[J]. *Geology in China*, 36(6): 1340-1349 (in Chinese with English abstract).
- Chen Chao. 2013. Research on Tectonic Ore-controlling Role of Structure in the Middle-north Section of the Taihang Mountains[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1-123(in Chinese with English abstract).
- Chen Qi, Zhao Zhifang, Jiang Qigang, Xia Jisheng, Sun Tao, Zeng Shihui. 2021. Extraction of mineralization alteration information from ASTER and Sentinel-2A remote sensing fusion data in the

- Pulang copper mine of Yunnan Province[J]. *Geology and Exploration*, 57(4): 728–738. (in Chinese with English abstract).
- Chen Zhichao, Chen Bin and Tian Wei. 2007. Zircon U–Pb ages, Hf isotopic compositions and geological significance: A case study of Mesozoic batholiths and mafic enclaves in North Taihang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 295–306 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Q M. 1999. Markov processes and discrete multifractals[J]. *Mathematical Geology*, 31(4): 455–469.
- Cheng Qiuming. 2007. Singular mineralization processes and mineral resources quantitative prediction: new theories and methods[J]. *Earth Science Frontiers*, 14(5): 42–53 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Qiuming. 2011. Singularity modeling of geo-anomalies and recognition of anomalies caused by buried sources[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 36(2): 307–316 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Qiuming, Zhao Pengda, Chen Jianguo, Xia Qinglin, Chen Zhijun, Zhang Shengyuan, Xu Deyi, Xie Shuyun, Wang Wenlei. 2009. Application of singularity theory in prediction of tin and copper mineral deposits in Gejiu District, Yunnan, China: Weak information extraction and mixing information decomposition[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(2): 232–242 (in Chinese with English abstract).
- Dong G C, Santosh M, Li S R, Shen J F, Mo X X, Scott S, Qu K, Wang X. 2013. Mesozoic magmatism and metallogenesis associated with the destruction of the North China Craton: Evidence from U–Pb geochronology and stable isotope geochemistry of the Mujicun porphyry Cu–Mo deposit[J]. *Ore Geology Reviews*, 53: 434–445.
- Dong Mingming. 2014. The Research of Geochemistry, Geochronology and Petrogenesis of DaHeNan Rock Mass in Hebei Province [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1–61 (in Chinese with English abstract).
- Duan Chao, Mao Jingwen, Xie Guiqing, Chen Zhikuan, Ma Guoxi, Wang Zhimin, Chen Tao, Li Wei. 2016. Zircon U–Pb geochronological and Hf isotope study on Tiaojishan volcanic formation, Mujicun, North Taihang Mountain and implications for regional metallogeny and magmatism[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(2): 250–266 (in Chinese with English abstract).
- Gao Ke, Song Yang, Liu Zhibo, Yang Huanhuan, Lin Bin, Li Faqiao. 2024. Constraints on metallogenic age from cryptoexplosive breccia in Naruo Cu (Au) deposit, Xizang[J]. *Geology in China*, 51(2): 385–398. (in Chinese with English abstract).
- Gao Yongfeng, Wei Ruihua, Hou Zengqian, Ma Guoxi, Zhao Rongsheng, Chen Zhikuan, Wu Jinluan, Peng Yuxuan, Gao Ming. 2011. Mujicun porphyry copper mineralization: Response to Mesozoic thinning of lithosphere in North China Craton[J]. *Mineral Deposits*, 30(5): 890–902 (in Chinese with English abstract).
- Hu Ruigang, Chen Guning, Zhang Xiao, Cheng Liang. 2013. Geological characteristics and mineralization model of the Antuoling porphyry type molybdenum deposit[J]. *Modern Mining*, 29(9): 62–64 (in Chinese).
- Li Linlin, Han Baofu, Miao Guojun, Shu Guiming, Chen Jiafu, Yang Jinhui, Yang Yueheng, Zhang Yanbin. 2012. Geochronology, emplacement depth and tectonic implications of the Mapeng–Chiwawu granitic pluton in Fuping Complex of the Taihang Mountains[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(3): 289–306 (in Chinese with English abstract).
- Li Qing, Li Shengrong, Zhang Xiubao, Zhang Linjie, Zhao Yi, Zhao Fuwang, Liu Yang. 2013. Thermoelectric coefficient of pyrite from the Xishimen gold deposit in Lingshou County, Hebei Province and its prospecting significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(4): 542–553 (in Chinese with English abstract).
- Li Ruiling, Duan Chao, Chen Zhikuan, Li Wei, Zhang Zhiyuan. 2016. Zircon U–Pb age of granitoid from the Chiwawu Cu–W occurrence Northern Taihang Mountain and its implications[J]. *Geology in China*, 43(5): 1761–1770 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jiayuan. 1992. A new type of gold deposit worth attention—explosion rock tube porphyry gold deposit[J]. *Precious Metals Geology*, 1(2): 148–152 (in Chinese).
- Liu Jiayuan. 1996. Magmatic crypto–explosion structures and noble–nonferrous metals mineralization[J]. *Xinjiang Geology*, (3): 238–246 (in Chinese with English abstract).
- Liu Lei, Pu Xiaonan, Hong Jun, Zhang Huishan, YASIR Shaheen khalil. 2022. Alteration information extraction and ore–prospecting prediction using ASTER remote sensing data in Saindak deposit, Pakistan[J]. *Geological Review*, 68(6): 2381–2395 (in Chinese with English abstract).
- Liu S W, Pan Y M, Xie Q L, Zhang J, Li Q G. 2003. Archean geodynamics in the Central Zone, North China Craton: Constraints from geochemistry of two contrasting series of granitoids in the Fuping and Wutai complexes[J]. *Precambrian Research*, 130(1): 229–249.
- Liu Yang, Li Chengming, Mu Yiqing, Sun He, Huang Feixin, Zheng Jie. 2010. Zircon SHRIMP U–Pb age of Chiwawu granite complex and its implication in the Northern Taihang Mountain[J]. *Geology and Exploration*, 46(3): 442–447 (in Chinese with English abstract).
- Ma Guoxi. 1995. Geological characteristics of Dawan Zn–Mo deposit of Laiyuan, Hebei Province[J]. *Journal of Geology and Mineral Resources North China*, 10(1): 64–76 (in Chinese with English abstract).
- Ma Guoxi. 1997. Geological characteristics and metallogenic model of copper deposit at muji village of Laiyuan County, Hebei Province[J]. *Journal of Geology and Mineral Resources North China*, 12(1): 54–68 (in Chinese with English abstract).
- Ma Guoxi. 1999. Geological characteristics and prospecting direction of Lianbaling lead zinc deposit in Laiyuan County, Hebei Province[J]. *Hebei Geological Mineral Information*, (2): 10–17 (in Chinese with English abstract).
- Ma Guoxi, Chen Zhikuan, Chen Lijing, Ma Xiaofeng, Ma Jinhu, Ti Yunsheng, Dou Yufeng. 2010. Geological characteristics of Mujicun copper(molybdenum) deposit[J]. *Mineral Deposits*, 29(6):

- 1101–1111 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Zhang Zuoheng, Li Xiaofeng, Wang Yitian, Zhang Changqing, Li Yongfeng. 2005. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 169–188 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Zhang Zuoheng, Yu Jinjie, Wang Yitian, Niu Guigui. 2003. Geodynamics of Mesozoic large-scale mineralization in North China and its adjacent areas—background: Enlightenment from precise dating of metal deposits[J]. *Science in China (Series D)*, 33(4): 289–299 (in Chinese).
- Niu Shuyin, Sun Aiqun, Wang Baode, Li Hongyang, Hou Quanlin, Hu Yajun, Wang Jianping. 2002. Mineralization of Fuping mantle branch structures in the north section of Taihangshan Mountain[J]. *Geological Survey and Research*, (3/4): 221–232(in Chinese with English abstract).
- Niu Shuyin, Sun Aiqun, Xu Chuanshi, Yuan Wanming, Li Rui, Luo Dianwen. 1998. Study on metallogenic regularity of gold deposits in the northern section of Taihang Mountains[J]. *Journal of Geology and Mineral Resources North China*, 13(1): 5–63 (in Chinese).
- Shen Zhichao, Hou Zengqian, Chen Zhikuan, Li Qiuyun, Zhou Yumou, Wang Zhimin. 2015. Molybdenite Re–Os isotopic dating and zircon SHRIMP U–Pb and Hf isotopic compositions of the Mujicun porphyry deposit[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 34(4): 526–538 (in Chinese with English abstract).
- Sun Wenyan, Yang Chengdong, Xue Jianling, Li Shengrong, Zhang Xueyi. 2023. Study on breccia body characteristics and element migration during the metallogenetic process of Qiubudong silver deposit in Pingshan County, Hebei Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 42(6): 1013–1034.
- Tian Shufang, Zhan Qian. 2013. *Remote Sensing Geology*[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Wang Chuntian, Wu Jinluan, Ma Jinhu, Zhang Wenyi, Dou Yufeng. 2012. Molybdenum resource characteristics and prospecting direction in the northern section of Taihang Mountains[J]. *West–China Exploration Engineering*, 24(5): 151–154 (in Chinese).
- Wang Congcong, Chen Chuan, Li Yunpeng, Wang Zhichun, Gao Yihang, Gao Lingling, Li Shunda. 2023. Hyperspectral remote sensing alteration characteristics of the Paergangtagexi porphyry copper deposit in Eastern Tianshan Mountains and their indicative significance for prospecting[J]. *Geology and Exploration*, 59(6): 1171–1181 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qichao, Ma Junliang, Zhang Jianzhong. 1995. Geochemical characteristics and genesis of mapeng goldfield bordering Lingshou and Fuping, Hebei, China[J]. *Geochimica*, 24(1): 56–68 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xia. 2012. *Mesozoic Magmatism and Related Metallogenesis in Northern Taihang Mountains*[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1–80 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xuefei. 2020. Study on the Application of the Synthetic Geophysics–geochemical Methods in the Exploration of Chiwawu Copper–polymetallic Deposit in Baoding County, Hebei Province[D]. Changchun: Jilin University, 1–90 (in Chinese with English abstract).
- Wei Yunfei, Chai Quan, Zhang Yunpeng. 2021. Application of 1 : 25,000 high precision aeromagnetic data in delineating a semi-concealed rock mass in Hebei Province[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 18(2): 194–198 (in Chinese with English abstract).
- Wu Jilian. 2014. *Geological Features and Their Genetic of Lianbaling Pb–Zn Deposit in the North of Taihangshan*[D]. Xi'an: Chang'an University, 1–71(in Chinese with English abstract).
- Wu Yunxia, Lü Fengjun, Luan Zhuoran, Wang Shijie, Liu Xinxing, Feng Xianhui, Deng Jie. 2021. Analysis of the concealed rock mass and ore-search prospect in the Chengnanzhuang area in the middle section of the Taihang Mountains[J]. *Geology and Exploration*, 57(2): 315–324 (in Chinese with English abstract).
- Xia Guoli, Li Yaohui. 2005. Genetic type and tectonic environment analysis of Yanshanian intrusive rocks in the northern section of Taihang Mountains[J]. *Hebei Geological and Mineral Information*, (1): 8(in Chinese).
- Xia Guoli, Pan Hongru, Hu Xingmin. 2005. On the relation between the domelike volcanics and Au–Pb–(Zn) mineralization in Shuangjingzi, northern Hebei Province[J]. *North China Geology*, (2): 94–99 (in Chinese with English abstract).
- Xia Guoli, Zhang Jiaqi, Yang Jinjing. 2007. Preliminary discussion on relationship between archean metamorphic pluton and gold deposits in Fuping, Hebei Province[J]. *Geology and Exploration*, 41(4): 46–50 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Baiming, Ma Guoxi, Bi Fuke, Zhao Guoliang. 1996. Magmatism associated metallogenic series and metallogenetic model of the main metallogenic zones in Hebei[J]. *Journal of Geology and Mineral Resources North China*, 11(3): 19–21, 27–28 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Daozhong. 2012. Metallogenetic conditions of the antuoling molybdenum(copper) deposit in Hebei Province and its prospecting potential[J]. *Geology and Exploration*, 48(1): 85–92 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Haidong, Liu Jianchao, Wang Jinya, Zhang Sunan, Hu Bo, Wang Dequan, Han Song. 2016. Petrology, geochronology and geochemistry characteristics of Wang'anzen complex in the northern Taihang Mountain and their geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(3): 727–745 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Limin. 2013. Geological characteristics and peripheral exploration direction of the Laiyuan Dawan zinc molybdenum deposit[J]. *West–China Exploration Engineering*, 25(11): 111–114 (in Chinese).
- Zhang Mengmeng. 2020. *Petrogenesis and Solidification Condition of Early Cretaceous Mapeng Pluton in the North Taihang Mountain*[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1–99 (in Chinese with English abstract).

- Zhang Zengfeng. 1991. General features and genetic mechanism of crypto-ex-plusive breccias[J]. Geological Science and Technology Information, 10(4): 1-5 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhiyuan, Wang Wenhao, Ding Zhaoyue, An Yuehui, Wang Zhimin, Chen Zhikuan, Xie Guiqing. 2021. Molybdenite Re-Os isochron age of the Chiwawu Mo-Cu deposit in Fuping County, Hebei Province in northern Taihang Mountains and its prospecting significance[J]. Geological Bulletin of China, 40(9): 1522-1529 (in Chinese with English abstract).
- Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A, Sun M. 2001. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: lithological, geochemical, structural and P-T path constraints and tectonic evolution[J]. Precambrian Research, 107(1): 45-73.
- Zhao Weiming. 2018. Characteristics of Baishitai Silver Polymetallic Deposit in Fuping Hebei Province and Its Mineralization and Enrichment Law[D]. Changchun: Jilin University, 1-61(in Chinese with English abstract).
- Zhao Xuepeng, Bin Jinlai. 2012. Geological characteristics of Nanzhaozhuang lead zinc mine in Laiyuan County, Hebei Province[J]. West-China Exploration Engineering, 24(11): 109-110, 114 (in Chinese).
- Zhao Zhifang, Zhang Xinle, Chen Qi, Zhang Ruisi, Li Wenchang, Cao Xiaomin. 2022. Mapping of alteration minerals and prospecting potential analysis of Pulang porphyry copper deposit: Evidence from remote sensing data of Ziyuan-102D satellite[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 42(1): 17-29 (in Chinese with English abstract).
- Zhe Meng, Hu Jianzhong, Zhou Wei, Ding Haiyang. 2014. Geological characteristics and molybdenite Re-Os isotopic dating of Antuoling molybdenum deposit in Hebei Province[J]. Geoscience, 28(2): 339-347 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Fengli, Zhang Qiang. 2011. Surrounding rock altered characteristics of Antuoling porphyry Mo deposit, Hebei Province[J]. Jilin Geology, 30(2): 52-56 (in Chinese with English abstract).
- Zhu R X, Chen L, Wu F Y, Liu J L. 2011. Timing, scale and mechanism of the destruction of the North China Craton[J]. Science China Earth Sciences, 54(6): 789-797.
- Zhu Rixiang, Sun Weidong. 2021. The big mantle wedge and decratonic gold deposits[J]. Scientia Sinica (Terra), 51(9): 1444-1456 (in Chinese).
- 曹文托, 侯建荣. 2018. 河北省平山县秋卜洞银矿床成因类型分析[J]. 矿产与地质, 32(3): 409-415.
- 陈斌, 田伟, 翟明国, 荒川洋二. 2005. 太行山和华北其它地区中生代岩浆作用的锆石 U-Pb 年代学和地球化学特征及其岩浆成因和地球动力学意义[J]. 岩石学报, 21(1): 15-26.
- 陈斌, 翟明国, 邵济安. 2002. 太行山北段中生代岩基的成因和意义: 主要和微量元素地球化学证据[J]. 中国科学 (D 辑: 地球科学), 32(11): 896-907.
- 陈超, 牛树银, 王宝德, 孙爱群, 马宝军, 王文学, 高银仓. 2009. 冀西石湖金矿成矿物质来源及成矿作用探讨[J]. 中国地质, 36(6): 1340-1349.
- 陈超. 2013. 太行山中北段构造控矿作用研究[D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 1-123.
- 陈琪, 赵志芳, 姜琦刚, 夏既胜, 孙涛, 曾诗卉. 2021. 基于 ASTER 与 Sentinel-2A 融合数据的云南普朗铜矿化蚀变信息提取[J]. 地质与勘探, 57(4): 728-738.
- 陈智超, 陈斌, 田伟. 2007. 太行山北段中生代岩基及其包体锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素性质及其地质意义[J]. 岩石学报, 23(2): 295-306.
- 成秋明. 2007. 成矿过程奇异性与矿产预测定量化的新理论与新方法[J]. 地学前缘, 14(5): 42-53.
- 成秋明. 2011. 地质异常的奇异性度量与隐伏源致矿异常识别[J]. 地球科学 (中国地质大学学报), 36(2): 307-316.
- 成秋明, 赵鹏大, 陈建国, 夏庆霖, 陈志军, 张生元, 徐德义, 谢淑云, 王文磊. 2009. 奇异性理论在个旧锡铜矿产资源预测中的应用: 成矿弱信息提取和复合信息分解[J]. 地球科学 (中国地质大学学报), 34(2): 232-242.
- 董明明. 2014. 河北省大河南岩体的岩石地球化学、年代学及其成因探讨[D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 1-61.
- 段超, 毛景文, 谢桂青, 陈志宽, 马国玺, 王志敏, 陈焘, 李伟. 2016. 太行山北段木吉村髻髻山组安山岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征及其对区域成岩成矿规律的指示[J]. 地质学报, 90(2): 250-266.
- 高轲, 宋扬, 刘治博, 杨欢欢, 林彬, 李发桥. 2024. 西藏拿若铜 (金) 矿床隐爆角砾岩对成矿时代的约束[J]. 中国地质, 51(2): 385-398.
- 高永丰, 魏瑞华, 侯增谦, 马国玺, 赵荣升, 陈志宽, 吴金乱, 彭玉旋, 高明. 2011. 木吉村斑岩铜矿成矿作用: 华北克拉通中生代岩石圈减薄的响应[J]. 矿床地质, 30(5): 890-902.
- 胡瑞刚, 陈谷宁, 张晓, 成亮. 2013. 安妥岭斑岩型钼矿地质特征及成矿模式[J]. 现代矿业, 29(9): 62-64.
- 李林林, 韩宝福, 苗国均, 舒桂明, 陈家富, 杨进辉, 杨岳衡, 张艳斌. 2012. 太行山阜平杂岩中麻棚-赤瓦屋岩体的时代、侵位深度及构造意义[J]. 岩石矿物学杂志, 31(3): 289-306.
- 李青, 李胜荣, 张秀宝, 张林杰, 赵毅, 赵夫旺, 刘洋. 2013. 河北省灵寿县西石门金矿黄铁矿热电性标型及其找矿意义[J]. 地质学报, 87(4): 542-553.
- 李瑞玲, 段超, 陈志宽, 李伟, 张志远. 2016. 太行山北段赤瓦屋铜钼矿化区花岗岩岩石的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 中国地质, 43(5): 1761-1770.
- 刘家远. 1992. 一种值得重视的新类型金矿床——爆破岩筒型斑岩金矿床[J]. 贵金属地质, 1(2): 148-152.

## 附中文参考文献

- 白龙洋, 代晶晶, 王楠, 李宝龙, 刘治博, 李志军, 陈伟. 2024. 基于 GF-5 卫星的西藏珠勒—芒拉地区矿物蚀变信息提取及找矿前景分析[J]. 中国地质, 51(3): 995-1007.
- 蔡剑辉, 阎国翰, 常兆山, 王晓芳, 邵宏翔, 储著银. 2003. 王安镇岩体岩石地球化学特征及成因探讨[J]. 岩石学报, 19(1): 81-92.
- 曹冲, 申萍. 2018. 斑岩型钼矿床研究进展与问题[J]. 地质论评, 64(2): 477-497.

- 刘家远. 1996. 岩浆隐蔽爆破构造与贵重、有色金属成矿[J]. 新疆地质, 14(3): 238-246.
- 刘磊, 蒲小楠, 洪俊, 张辉善, YASIR Shaheen Khalil. 2022. 巴基斯坦山达克矿区 ASTER 遥感数据蚀变信息提取及找矿预测[J]. 地质论评, 68(6): 2381-2395.
- 刘阳, 李程明, 穆一青, 孙赫, 黄费新, 郑杰. 2010. 太行山北段赤瓦屋岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其意义[J]. 地质与勘探, 46(3): 442-447.
- 马国玺. 1995. 河北涞源大湾锌铅矿床地质特征[J]. 华北地质矿产杂志, 10(1): 64-76.
- 马国玺. 1997. 河北省涞源县木吉村铜矿地质特征及成矿模式[J]. 华北地质矿产杂志, 12(1): 54-68.
- 马国玺. 1999. 河北省涞源县钼巴岭铅锌矿地质特征及找矿方向[J]. 河北地质矿产信息, (2): 10-17.
- 马国玺, 陈志宽, 陈立景, 马晓凤, 马金虎, 提云生, 窦玉峰. 2010. 木吉村铜(钼)矿床地质特征[J]. 矿床地质, 29(6): 1101-1111.
- 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 李晓峰, 王义天, 张长青, 李永峰. 2005. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景[J]. 岩石学报, 21(1): 171-190.
- 毛景文, 张作衡, 余金杰, 王义天, 牛宝贵. 2003. 华北及邻区中生代大规模成矿的地球动力学背景: 从金属矿床年龄精测得到启示[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 33(4): 289-299.
- 牛树银, 孙爱群, 王宝德, 李红阳, 侯泉林, 胡亚军, 王建平. 2002. 太行山北段阜平幔枝构造成矿作用研究[J]. 地质调查与研究, (3/4): 221-232.
- 牛树银, 孙爱群, 许传诗, 袁万明, 李瑞, 罗殿文. 1998. 太行山北段金矿成矿规律研究[J]. 华北地质矿产杂志, 13(1): 5-63.
- 申志超, 侯增谦, 陈志宽, 李秋耘, 周玉谋, 王志敏. 2015. 河北木吉村斑岩铜矿辉钼矿 Re-Os 定年、成矿斑岩锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素组成研究[J]. 岩石矿物学杂志, 34(4): 526-538.
- 孙文燕, 杨成栋, 薛建玲, 李胜荣, 张学义. 2023. 河北平山县秋卜洞银矿角砾岩体特征与成矿过程元素迁移规律[J]. 地质通报, 42(6): 1013-1034.
- 田淑芳, 詹睿. 2013. 遥感地质学[M]. 北京: 地质出版社.
- 王春天, 吴金乱, 马金虎, 张文毅, 窦玉峰. 2012. 太行山北段铜矿资源特征及找矿方向[J]. 西部探矿工程, 24(5): 151-154.
- 王聪聪, 陈川, 李云鹏, 王智纯, 高一航, 高玲玲, 李顺达. 2023. 东天山帕尔岗塔格西斑岩铜矿高光谱遥感蚀变特征及其对找矿的指示意义[J]. 地质与勘探, 59(6): 1171-1181.
- 王启超, 马俊良, 张建中. 1995. 河北省灵寿阜平接壤地带麻棚金矿田的地球化学特征及矿床成因[J]. 地球化学, 24(1): 56-68.
- 王霞. 2012. 太行山北段中生代岩浆作用与成矿[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 1-80.
- 王雪飞. 2020. 综合物化探方法在河北保定赤瓦屋铜多金属矿区勘查中的应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 1-90.
- 魏云飞, 柴泉, 张云鹏. 2021. 1: 2.5 万高精度航磁在圈定河北某半隐伏岩体上的应用[J]. 工程地球物理学报, 18(2): 194-198.
- 吴继莲. 2014. 北太行山连巴岭铅锌矿床地质特征及成因研究[D]. 西安: 长安大学, 1-71.
- 吴云霞, 吕凤军, 栾卓然, 王世杰, 刘新星, 冯现辉, 邓捷. 2021. 太行山中段城南庄一带隐伏岩体及找矿前景分析[J]. 地质与勘探, 57(2): 315-324.
- 夏国礼, 李耀辉. 2005. 太行山北段燕山期侵入岩成因类型及构造环境分析[J]. 河北地质矿产信息, (1): 8.
- 夏国礼, 潘洪儒, 胡醒民. 2005. 冀北双井子穹状火山与银铅(锌)矿化的关系[J]. 地质调查与研究, (2): 94-99.
- 夏国礼, 张家奇, 杨进京. 2007. 河北阜平地区太古宙变质深成岩与金矿的关系初探[J]. 地质与勘探, 41(4): 46-50.
- 张道忠. 2012. 河北省安妥岭铜(钼)矿成矿条件与找矿远景研究[J]. 地质与勘探, 48(1): 85-92.
- 张海东, 刘建朝, 王金雅, 张苏楠, 胡波, 王得权, 韩松. 2016. 太行山北段王安镇杂岩体岩石学、年代学、地球化学特征及地质意义[J]. 岩石学报, 32(3): 727-745.
- 张立敏. 2013. 涞源大湾锌铅矿床地质特征及外围找矿方向[J]. 西部探矿工程, 25(11): 111-114.
- 张萌萌. 2020. 北太行中生代麻棚岩体的成因及其冷却固结条件[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 1-99.
- 张志远, 王文浩, 丁照月, 安跃辉, 王志敏, 陈志宽, 谢桂青. 2021. 太行山北段河北阜平县赤瓦屋铜矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其对找矿的指示[J]. 地质通报, 40(9): 1522-1529.
- 章百明, 马国玺, 毕伏科, 赵国良. 1996. 河北主要成矿区带与岩浆作用有关的矿床成矿系列及成矿模式[J]. 华北地质矿产杂志, 11(3): 19-21, 27-28.
- 章增凤. 1991. 隐爆角砾岩的特征及其形成机制[J]. 地质科技情报, 10(4): 1-5.
- 赵伟明. 2018. 河北阜平白石台银多金属矿床特征及矿化富集规律研究[D]. 长春: 吉林大学, 1-61.
- 赵雪朋, 宾金来. 2012. 河北省涞源县南赵庄铅锌矿地质特征[J]. 西部探矿工程, 24(11): 109-110, 114.
- 赵志芳, 张新乐, 陈琪, 张瑞丝, 李文昌, 曹晓民. 2022. 普朗斑岩型铜矿区矿化蚀变特征矿物填图及找矿潜力分析: 来自资源一号 02D 遥感卫星的证据[J]. 沉积与特提斯地质, 42(1): 17-29.
- 者萌, 胡建中, 周伟, 丁海洋. 2014. 河北省安妥岭铜矿床地质特征及辉钼矿 Re-Os 同位素年龄[J]. 现代地质, 28(2): 339-347.
- 朱凤丽, 张强. 2011. 河北省安妥岭斑岩型铜矿床围岩蚀变特征[J]. 吉林地质, 30(2): 52-56.
- 朱日祥, 孙卫东. 2021. 大地幔楔与克拉通破坏型金矿[J]. 中国科学: 地球科学, 51(9): 1444-1456.