



太行山北段赤瓦屋铜钼钨矿岩石地球化学、 Sr-Nd-Pb 同位素特征及地质意义

梁 婵^{1,2}, 安跃辉^{1,2}, 穆海凤^{1,2}, 康志娟³, 丁宁宁⁴, 丁照月^{1,2}

1. 河北省地质矿产勘查开发局 河北省地质工程勘察院, 河北 保定 071000;
2. 河北省斑岩型矿床研究重点实验室, 河北 保定 071000;
3. 河北省地质矿产勘查开发局 河北省地质实验测试中心, 河北 保定 071000;
4. 河北省地质矿产勘查开发局 第二地质大队, 河北 唐山 063000

摘 要: 赤瓦屋铜钼钨矿床是太行山北段南部典型斑岩矿床, 铜钼钨矿赋存于赤瓦屋岩体中心相斑状花岗闪长岩中。赤瓦屋铜钼钨矿床的含矿岩体属于高钾钙碱性系列, 随着 σ 减小, SiO_2 含量增加, CaO 、 MgO 、 Fe_2O_3 、 TiO_2 、 P_2O_5 等氧化物与 SiO_2 含量呈负相关, 表现为准铝质钙碱性 I 型花岗岩的特征。Rb、Ba、Th、U、La、Nb 出现相对亏损, 具微弱的正 Eu 异常。赤瓦屋岩体 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 平均值为 0.7068, 岩浆初始比值 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 -20.9~ -16.1, 铅同位素比值 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 平均值为 16.5, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 平均值为 15.2, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 平均值为 36.8, 表明其岩浆以下地壳为主, 混有少量地幔物质。结合区域地质背景, 认为在华北克拉通受古太平洋板块俯冲影响下, 下地壳和上地幔物质大规模重熔, 沿太行山深断裂带上侵, 最终形成了赤瓦屋铜钼钨矿床。赤瓦屋岩体及太行山北段岩浆岩带是今后找矿勘查的方向。

关键词: 铜钼钨矿床; 主、微量元素; Sr-Nd-Pb 同位素; 赤瓦屋岩体; 太行山

The Chiwawu copper-molybdenum-tungsten deposit in northern Taihang Mountains: Petrogeochemistry, Sr-Nd-Pb isotopic characteristics and geological implication

LIANG Chan^{1,2}, AN Yue-hui^{1,2}, MU Hai-feng^{1,2}, KANG Zhi-juan³, DING Ning-ning⁴, DING Zhao-yue^{1,2}

1. Hebei Geological Engineering Exploration Institute, Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration, Baoding 071000, Hebei Province, China;
2. Hebei Key Laboratory of Porphyry Deposit Research, Baoding 071000, Hebei Province, China;
3. Hebei Geological Experiment Testing Center, Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration, Baoding 071000, Hebei Province, China;
4. No. 2 Geological Brigade, Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration, Tangshan 063000, Hebei Province, China

Abstract: The Chiwawu Cu-Mo-W deposit, occurred in the central facies porphyritic granodiorite of Chiwawu rock

收稿日期: 2024-01-25; 修回日期: 2024-05-08. 编辑: 张哲.

基金项目: 河北省斑岩型矿床研究重点实验室专项资金资助项目“地球化学方法对地质找矿信息的提取”(冀科平函[2023]38号); 河北省地质矿产勘查开发局项目“王安镇岩体北缘找矿方向研究”(454-0601-YBN-JNDX); 河北省地质矿产勘查开发局项目“河北省阜平县赤瓦屋铜多金属矿普查续作”(454-0502-YBN-5AFX).

作者简介: 梁婵(1987—), 女, 高级工程师, 从事矿产勘查与斑岩型矿床研究工作, 通信地址 河北省保定市竞秀区百花东路 156 号, E-mail//2166443269@qq.com

通信作者: 安跃辉(1986—), 男, 高级工程师, 从事矿产勘查与斑岩型矿床研究工作, 通信地址 河北省保定市百花东路 156 号, E-mail//397150061@qq.com

引用格式: 梁婵, 安跃辉, 穆海凤, 康志娟, 丁宁宁, 丁照月. 太行山北段赤瓦屋铜钼钨矿岩石地球化学、Sr-Nd-Pb 同位素特征及地质意义[J]. 地质与资源, 2025, 34(4): 432-441, 431.

Liang C, An Y H, Mu H F, Kang Z J, Ding N N, Ding Z Y. The Chiwawu copper-molybdenum-tungsten deposits in northern Taihang Mountains: Petrogeochemistry, Sr-Nd-Pb isotopic characteristics and geological implication [J]. Geology and Resources, 2025, 34(4): 432-441, 431.

mass, is a typical porphyry deposit in northern Taihang Mountains, belonging to the high-K calc-alkaline series. With the decrease of σ value, the content of SiO_2 increases. The oxides such as CaO , MgO , Fe_2O_3 , TiO_2 , and P_2O_5 are negatively correlated with the SiO_2 content, showing the characteristics of quasi-aluminous calc-alkaline I-type granite. Elements of Rb, Ba, Th, U, La, and Nb are relatively depleted, with a slightly positive Eu anomaly. The $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio of Chiawu rock mass is averagely 0.7068, with the initial ratio $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ of -20.9 to -16.1, the $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratio of 16.5, the $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratio of 15.2 and the $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratio of 36.8, indicating that the magma is primarily derived from the lower crust mixed with minor mantle materials. Combined with the regional geological background, it is concluded that under the influence of subduction of Paleo-Pacific Plate, the large-scale remelting of lower crust and upper mantle materials occur in North China Craton, leading to the upward invasion along the deep fault zone of Taihang Mountains, eventually forming the Chiawu Cu-Mo-W deposit. The Chiawu rock mass and magmatic rock belt in northern Taihang Mountains are promising targets for future mineral exploration.

Key words: Cu-Mo-W deposit; major and trace element; Sr-Nd-Pb isotope; Chiawu intrusive rock; Taihang Mountains

0 引言

太行山北段岩浆岩带位于华北克拉通中部(图1a),中生代太平洋板块向欧亚板块强烈俯冲,引起华北克拉通伸展构造和岩石圈破坏^[1-6],发育北北东向为主的隆起和断陷盆地,伴有强烈的盖层褶皱和断裂变形及大规模岩浆喷发和侵入活动,成矿流体和成矿物质从深部输送到浅部,形成了大量的斑岩-夕卡岩型铜钼钨矿床^①,构成了中国东部重要的成矿单元^②。近年来,在太行山北段成矿岩浆岩带新探明木吉村斑岩铜钼矿床^[7-8]、大湾斑岩-夕卡岩铅锌矿床^[9]、安妥岭斑岩钼矿床^[5]、龙门斑岩钼矿床^[10]、野孤斑岩-夕卡岩型钼多金属矿床^[5]。随着勘查程度增加,在太行山北段岩浆岩带南部的赤瓦屋岩体周边发现多处钼矿床和金银矿床,显示太行山北段岩浆岩带具备较好的成矿地质条件^[11]。

赤瓦屋铜钼钨矿床是太行山北段南部典型斑岩矿床之一。21世纪以来,河北省地质工程勘察院开展了4期普查工作,查明了控矿构造和矿化分带,对赤瓦屋花岗质岩石开展了辉钼矿 Re-Os 同位素^[12]测年工作,显示赤瓦屋岩体形成时限在 128.7 ± 4.4 Ma,与华北克拉通中生代 130~110 Ma 成矿期相对应^[4]。然而,赤瓦屋含矿花岗质岩石的形成与中生代大规模岩浆活动之间的关系及物质来源尚需深入讨论。因此本文拟通过对赤瓦屋花岗质岩石主微量元素、Sr-Nd-Pb 同位素等地球化学分析,探讨赤瓦屋岩体的岩石成因和成矿物

质来源。

1 区域地质背景

华北克拉通经历了基底形成阶段(太古宙—古元古代)、盖层发展阶段(中元古代—二叠纪)及盖层稳定阶段(三叠纪—现代)^[13]。阜平期变质表壳岩是太古宙变质结晶基底,遭受强烈区域变质和混合岩化作用。晚三叠世以后古太平洋板块向欧亚板块俯冲^[14],特别是侏罗纪中晚期,俯冲愈加强烈。在强大的俯冲作用下,刚性的欧亚板块产生数条北北东向断裂,并伴有地壳升降,使中生代前形成的构造格架再次张开活动,产生了以北北东向为主的构造断裂带。

太行山北段岩浆岩带主要由中生代中基性火山岩地层(深部矿源层)及次火山岩组成,由北往南依次为大河南、王安镇-司格庄、大峪、赤瓦屋及麻棚岩体(图1b),其展布受到太行山深断裂带控制。太行山深断裂带是主要控岩、控矿构造,为铜、钼、金、银等多金属矿的形成提供了通道和空间。

2 矿床地质概况

赤瓦屋铜钼钨矿床位于太行山北段成矿岩浆岩带南部,赋矿于赤瓦屋岩体中(图1c)。赤瓦屋岩体呈近圆形,同心环带状岩株产出,出露面积约 59.3 km²。岩体由外向内依次为边缘相石英闪长岩、过渡相花岗闪长岩和中心相斑状花岗闪长岩。岩体侵入阜平期变质

① 窦玉峰. 太行山中北段斑岩型矿床找矿靶区优选成果报告. 河北省地质工程勘察院, 2018.

② 王志敏. 太行山北段斑岩成矿带成矿规律及找矿方向研究报告. 河北省地质工程勘察院, 2022.

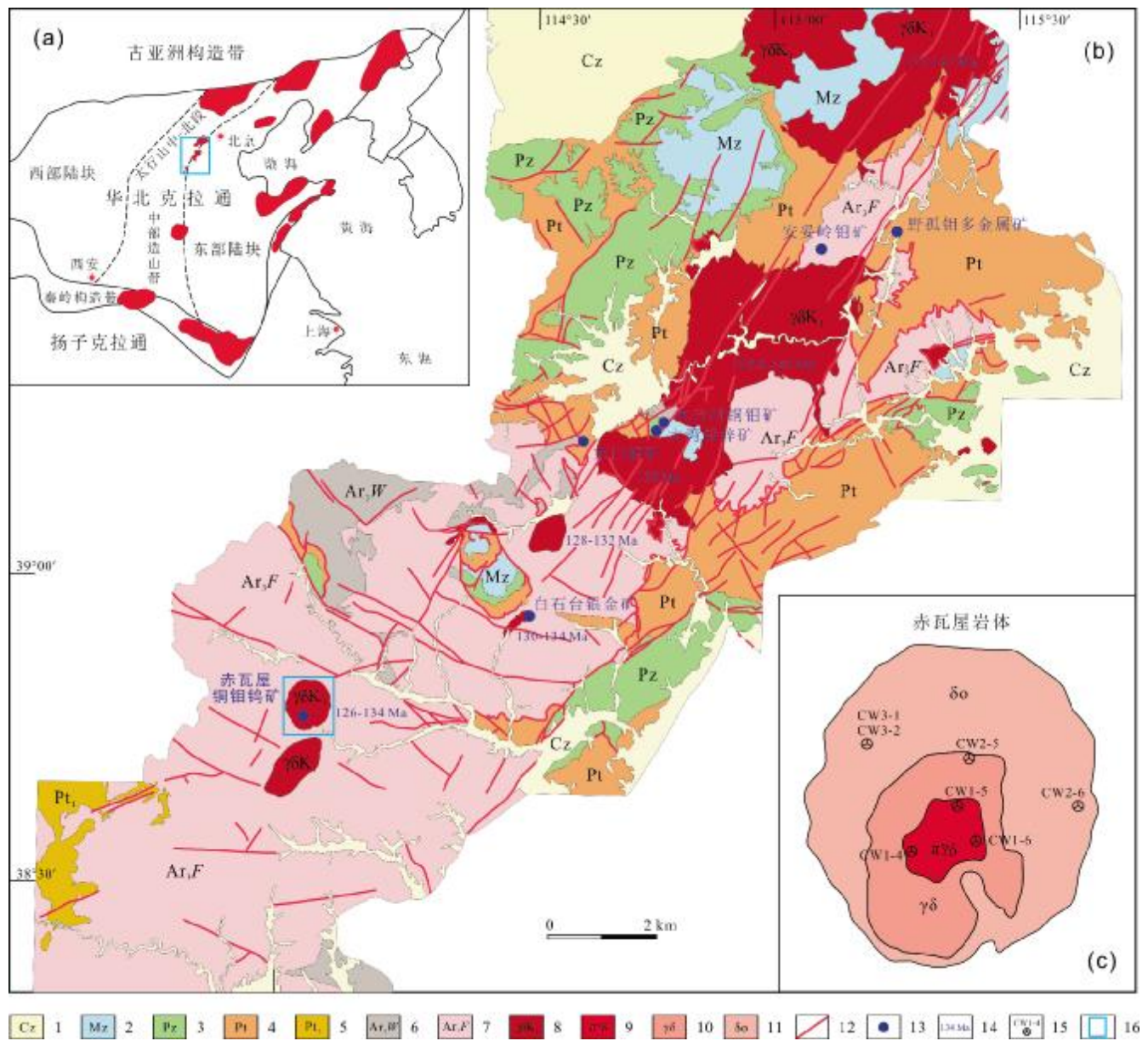


图 1 研究区构造地质图

Fig. 1 Tectonic and geological map of the study area

1—新生界(Cenozoic); 2—中生界(Mesozoic); 3—古生界(Paleozoic); 4—元古宇(Proterozoic); 5—吕梁期(Luliangian); 6—五台期(Wutaian); 7—阜平期(Fupingian); 8—燕山晚期岩体(Late Yanshanian pluton); 9—斑状花岗闪长岩(porphyritic granodiorite); 10—花岗闪长岩(granodiorite); 11—石英闪长岩(quartz diorite); 12—断层(fault); 13—矿产地(orefield); 14—同位素年龄(isotopic age); 15—样品采集位置及编号(sampling site and number); 16—研究区位置(study area)

表壳岩中, 呈明显的斜切侵入关系, 接触面均倾向围岩. 赤瓦屋岩体形成于早期白垩世, 辉钼矿 Re-Os 年龄为 $128.7 \pm 4.4 \text{ Ma}$ ^[12]. 岩体中发育的闪长玢岩、辉绿岩脉均为燕山晚期岩浆活动产物.

矿区共圈定铜钼钨 42 条矿体. 矿床铜金属量 $4.96 \times 10^4 \text{ t}$, 品位 0.20%~0.79%; 钼金属量 $2.31 \times 10^4 \text{ t}$, 品位 0.030%~0.170%; 钨金属量 $0.67 \times 10^4 \text{ t}$, 品位

0.067%~0.078%. 赤瓦屋铜钼钨矿赋矿围岩蚀变强烈, 与钾化、硅化关系密切. 成矿元素具垂向分带, 上部为铜钼矿, 下部为钼矿. 地表矿化呈透镜状零星分布, 深部为厚大矿体, 具备大型矿床找矿远景.

3 样品采集与测试

7 件样品采自赤瓦屋岩体新鲜基岩, 其中 CW1-4、

CW1-5、CW1-6 采自岩体边缘相石英闪长岩, CW2-5 采自岩体过渡相花岗闪长岩, CW3-1、CW3-2、CW3-6 采自岩体中心相斑状花岗闪长岩。

石英闪长岩: 细粒半自形粒状结构, 块状构造(图 2a)。岩石主要由斜长石、钾长石、石英、黑云母组成, 少量不透明矿物。斜长石被绢云母及白云母、方解石交代, 钾长石被绢云母、高岭土交代, 石英沿裂隙分布。黑云母呈散状分布, 被绿泥石及方解石交代。岩石轻碎裂, 沿裂隙有粗大石英充填交代(图 2b)。

花岗闪长岩: 细粒花岗结构, 块状构造(图 2c)。岩石主要由斜长石、钾长石、石英、黑云母组成, 不透明矿物少量。斜长石被绢云母及方解石、绿帘石、钾长石交代, 钾长石轻土化, 石英沿裂隙分布。黑云母呈散状分布, 被绿泥石交代。岩石轻碎裂, 沿裂隙有石英及方解石充填交代(图 2d)。

斑状花岗闪长岩: 斑状-基质微晶结构, 块状构造(图 2e)。斑晶为斜长石、钾长石、黑云母, 均为半自形晶, 杂乱分布。斜长石呈板状, 被绢云母及钾长石交代, 钾长石板状轻土化, 黑云母片状。基质为斜长石、钾长石、石英、黑云母。斜长石、钾长石轻土化; 石英呈

散状分布, 内有微晶长石分布, 包含微晶结构; 黑云母呈散状分布, 局部被绿泥石交代。岩内可见粗大石英脉及细粒花岗岩脉(图 2f)。

样品主量和微量元素分析在北京燕都中实测试技术有限公司完成。主量元素采用 X 射线荧光光谱仪分析, 仪器型号 ZSX Primus II。实验采用美国地质调查局(USGS)及中国国家岩石标准库 BCR-2 和 GBW07105 为标准样品, 主量元素的准确度误差均小于 5%。岩石微量元素使用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS) Agilent7900 进行测试, 分析结果相对误差小于 5%。

样品 Sr-Nd-Pb 同位素测试在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成, 使用 Thermo Fisher Scientific 多接收电感耦合等离子体质谱仪 Neptune Plus MC-ICP-MS 法测定。样品经过消解及同位素分离后分别测定其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值, 以 $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=8.3732$ 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7218$ 为标准进行校正。使用 Tl ($^{205}\text{Tl}/^{203}\text{Tl}=0.2387$) 对 Pb 同位素进行分馏校正。在样品测试的整个过程中, 所测定的 BHVO-1 标样和 BCR-2 标样的 Nd-Sr 同位素比值分别为: BHVO-1, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.5129\pm0.000006$ ($\pm 2\sigma$), $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.7035\pm$

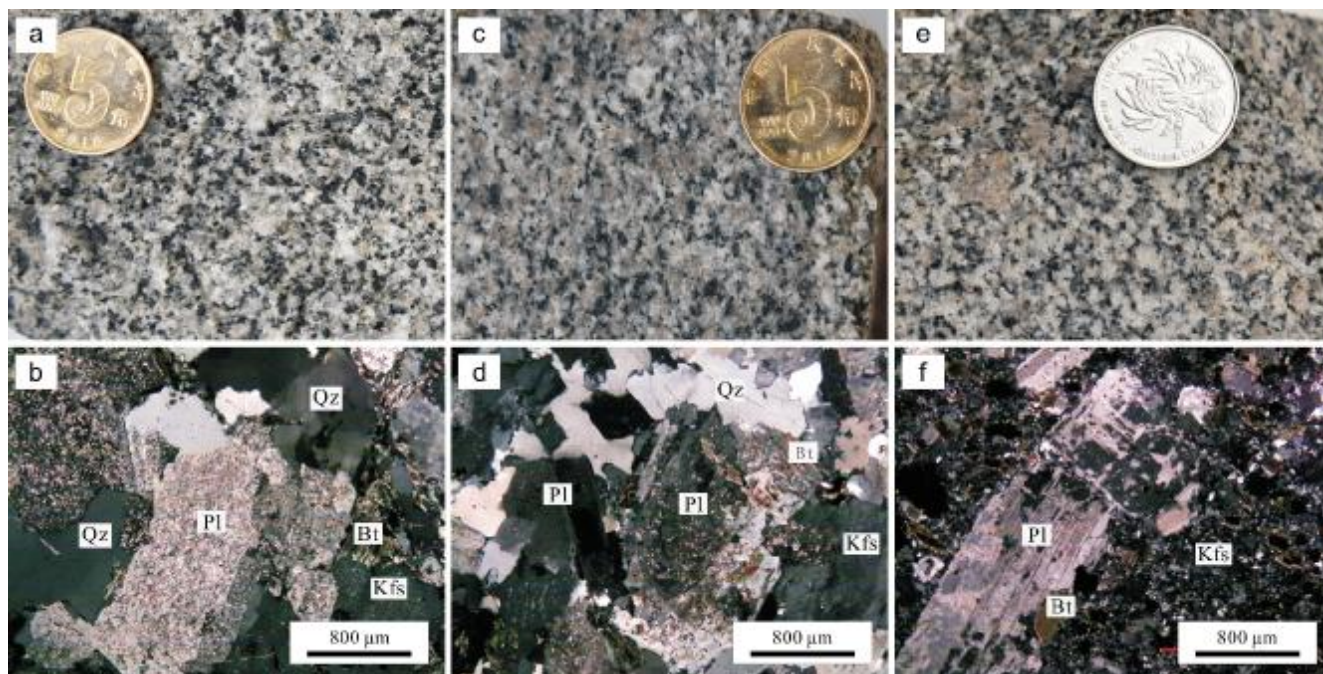


图2 赤瓦屋岩体花岗质岩石标本和显微照片

Fig. 2 Specimens and micrographs of granitic rocks from Chiawu rock mass

a, b—石英闪长岩(quartz diorite); c, d—花岗闪长岩(granodiorite); e, f—斑状花岗闪长岩(porphyrritic granodiorite); Qz—石英(quartz); Kfs—钾长石(K-feldspar); Pl—斜长石(plagioclase); Bt—黑云母(biotite)

0.000006 ($\pm 2\sigma$); BCR-2, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.5126\pm 0.000006$ ($\pm 2\sigma$), $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.7051\pm 0.000009$ ($\pm 2\sigma$).

4 分析结果

石英闪长岩、花岗闪长岩、斑状花岗闪长岩全岩分析样品测试结果列于表 1 (扫描首页 OSID 二维码可见).

4.1 主量元素

石英闪长岩 SiO_2 含量 60.5%~61.2%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$

为 6.98%~7.03%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 为 1.41~1.45, MgO 含量 2.66%~2.77%, Al_2O_3 含量 16.0%~16.2%, 碱度率(AR) 为 2.01~2.04%, 铝饱和度 A/NK 为 2.28~2.32, A/CNK 为 1.38~1.40. 花岗闪长岩 SiO_2 含量 67.4%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 为 7.79%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 为 1.12, MgO 含量 1.44%, Al_2O_3 含量 15.1%, 碱度率(AR)为 2.55%, 铝饱和度 A/NK 为 1.93, A/CNK 为 1.42. 斑状花岗闪长岩 SiO_2 含量 66.6%~69.0%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 为 7.64%~7.97%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 为 1.03~1.30, MgO 含量 1.22%~1.39%, Al_2O_3 含量

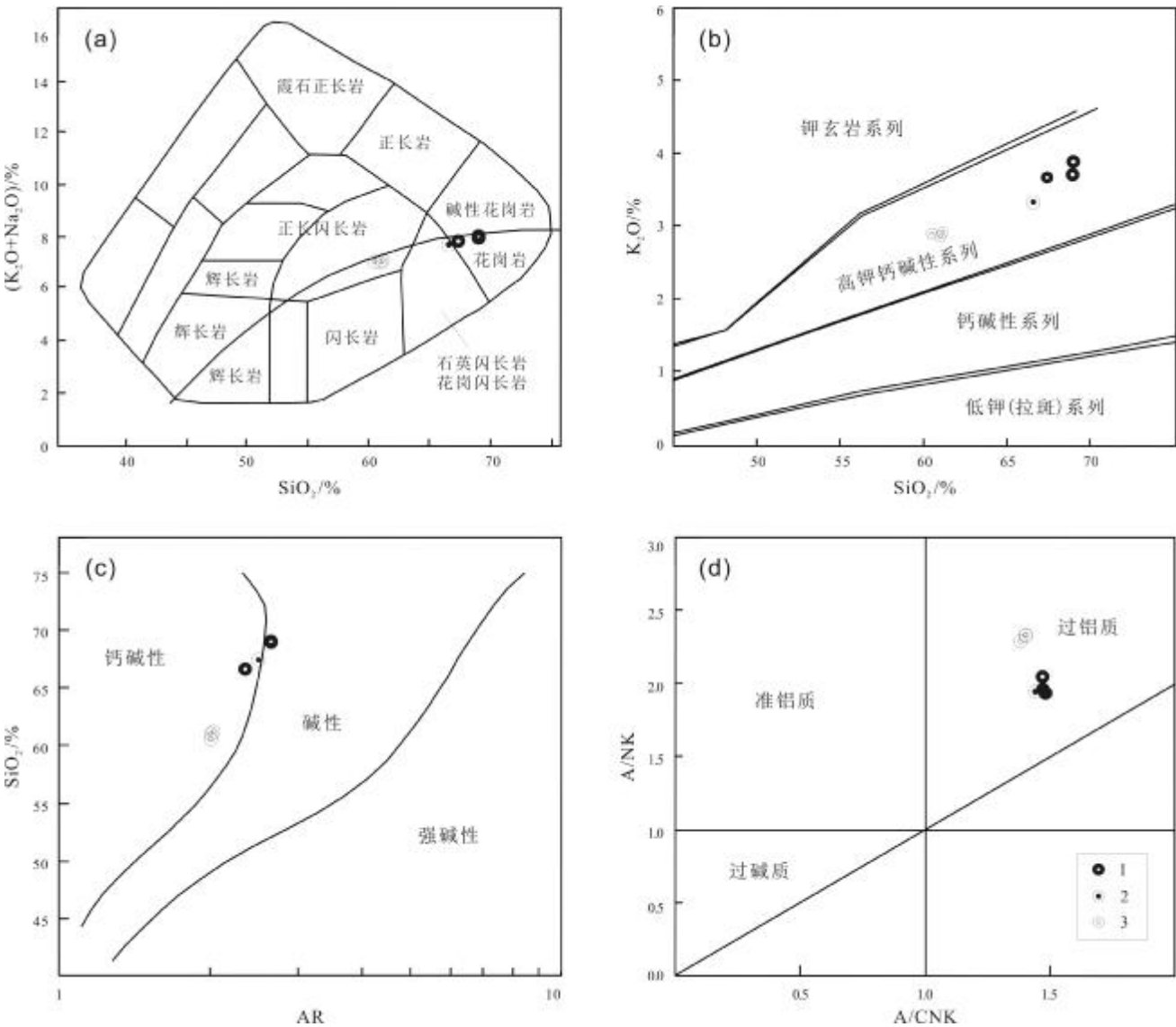


图 3 赤瓦屋花岗质岩石地球化学判别图解

(据文献[15-17])

Fig. 3 Geochemical discrimination diagram of Chiawu granitic rock

(After References [15-17])

1—斑状花岗闪长岩(porphyritic granodiorite); 2—花岗闪长岩(granodiorite); 3—石英闪长岩(quantz diorite)

14.8%~15.6%, 碱度率(AR)为 2.40%~2.69%, 铝饱和指数 A/NK 为 1.87~2.04, A/CNK 为 1.43~1.47. 从斑状花岗闪长岩—花岗闪长岩—石英闪长岩, 随 SiO_2 含量减少, 铝饱和指数增大.

主量元素显示赤瓦屋岩体属于中酸性火成岩(图 3a), 3 个岩相岩石均属于高钾钙碱性系列(图 3b), 其边缘相属钙碱性, 过渡—中心相属钙碱性—碱性(图 3c), 过铝质岩石(图 3d)继承了太行山北段燕山期富铝特征. 通过哈克图解(图 4)综合分析, 赤瓦屋岩体具有边缘相富硅钾钙镁、贫钠, 过渡相富硅钙钾、贫钠, 中心相富硅钾、贫钠镁的特征.

4.2 微量元素

石英闪长岩稀土总量 ΣREE 为 199.0×10^{-6} ~ 206.4×10^{-6} , 其 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 为 15.7~16.4, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 27.8~

28.3, 岩石属轻稀土富集型, δEu 为 1.64~1.75. 花岗闪长岩稀土总量 ΣREE 为 203.2×10^{-6} , 其 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 为 19.5, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 35.9, 岩石属轻稀土富集型, δEu 为 1.65. 斑状花岗闪长岩稀土总量 ΣREE 为 179.0×10^{-6} ~ 201.4×10^{-6} , 其 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 为 18.2~21.9, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 32.6~44.3, 岩石属轻稀土富集型, δEu 为 1.48~1.72. 从石英闪长岩—花岗闪长岩—斑状花岗闪长岩, 其稀土总量和铕异常值显示逐渐变小的趋势.

4.3 Sr-Nd 同位素特征

为了更准确探讨物质来源, 结合前人对太行山北段铁镁质岩石年龄研究结果 140 Ma^[4]作为赤瓦屋岩体的形成年龄, 参照赤瓦屋岩体在 140 Ma 的相关同位素比值, 对 Sr 进行校正. 赤瓦屋岩体边缘相石英闪长岩、过渡相花岗闪长岩和中心相斑状花岗闪长岩的

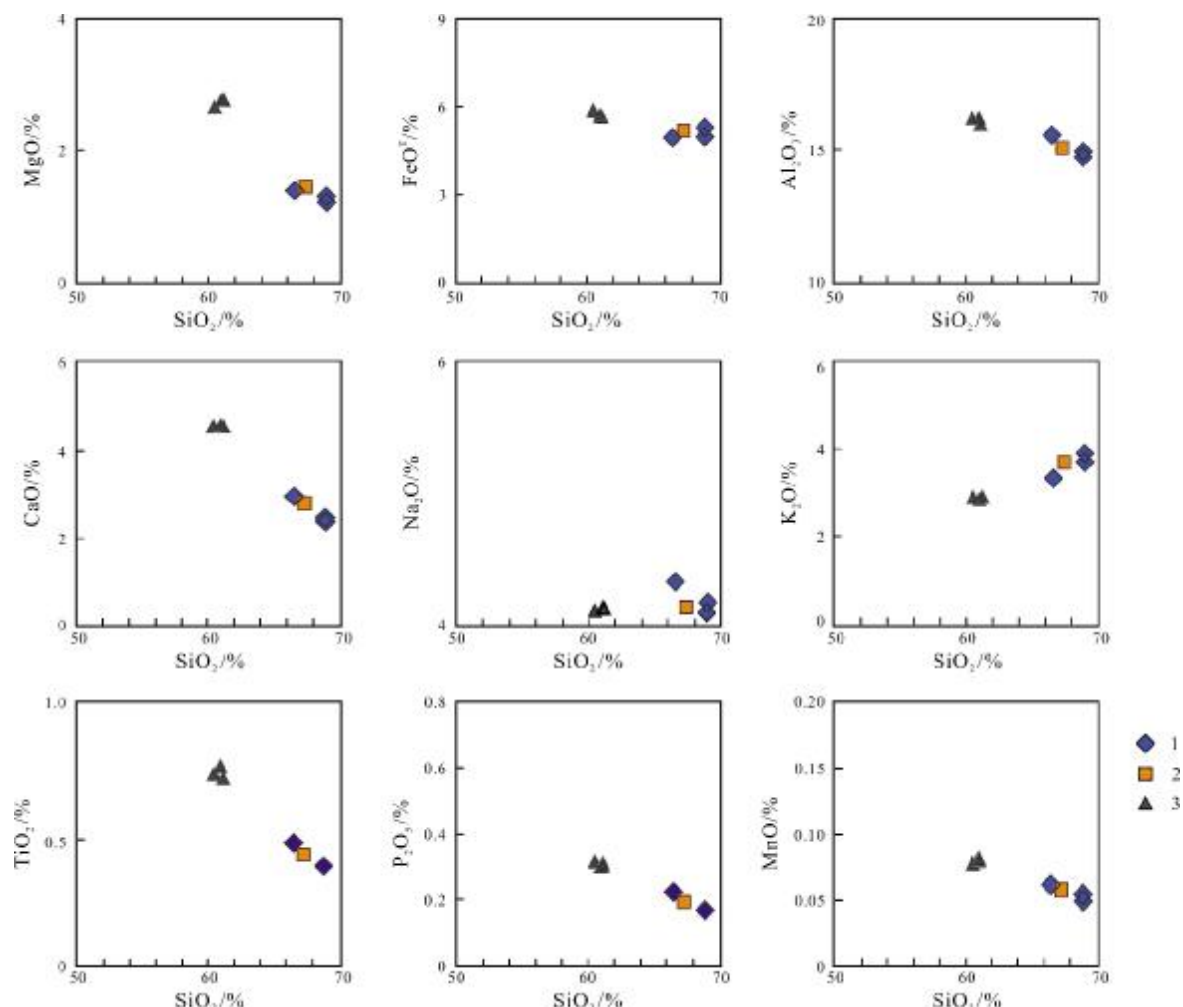


图 4 赤瓦屋中酸性侵入岩哈克图解

Fig. 4 Harker diagram of Chiawu acid-intermediate intrusive rock

1—斑状花岗闪长岩(porphyritic granodiorite); 2—花岗闪长岩(granodiorite); 3—石英闪长岩(quartz diorite)

同位素组成分析和相关计算结果列于表 2。Sr、Nd、Pb 等同位素对地幔地球化学和深部作用过程的时间示踪和源区示踪方面具有明显指示性^[18-20]。赤瓦屋岩体⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 在 0.7064~0.7070 之间,平均值为 0.7068,属壳幔混源型。¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 比值为 0.5116~0.5118,略低于原始地幔现代值(0.5126), $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为-20.9~ -16.1,平均值为-18.3。岩浆属于壳幔混合熔融体,岩浆初始比值较低说明岩浆来源于地壳的重融。

4.4 Pb 同位素特征

赤瓦屋岩体的铅同位素比值比较集中(表 3),²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 平均值为 16.5,²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 平均值为 15.2,²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 平均值为 36.8。由于岩石一般含有一定量的 U、Th,对 Pb 同位素组成有一定影响,故需要对 Pb 同位素组成进行校正^[19]。校正后的 Pb 同位素比值略有一定程度的降低,²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 平均值为 16.4,²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 平均值为 15.2,²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 平均值为 36.6, Th/U 介于

3.91~4.15 之间。

5 讨论

赤瓦屋岩体的 3 个岩相具有相同的矿物组合,均为斜长石、钾长石、石英、黑云母,且具有相同的矿物成分。从中性的石英闪长岩到酸性的花岗闪长岩、斑状花岗闪长岩,矿物成分在结构和比例呈现渐变特点,并无清晰的岩性界限。里特曼指数 σ 值为 2.38~2.79,随着 σ 减小,SiO₂ 含量增加,显示了岩体同化混染硅铝质的结果。但石英闪长岩-花岗闪长岩-斑状花岗闪长岩矿物组合中伴随岩浆分异作用 σ 值变化范围不大,同时 SiO₂ 含量(60.50%~68.96%)显示较低的分异程度,说明是岩浆在较稳定的环境中结晶分异的结果。碱度率 AR 在 2.01~2.69 之间,氧化物 CaO、MgO、Fe₂O₃、TiO₂、P₂O₅ 与 SiO₂ 含量呈负相关,K₂O 与 SiO₂ 含量呈正相关。铝饱和指数 A/CNK 集中于 1.38~1.47。

表 2 赤瓦屋岩体 Sr-Nd 同位素组成
Table 2 Sr-Nd isotope compositions of Chiwawu rock mass

样品号	岩性	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	Std err	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	Std err	(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _i	(¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd) _i	$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$
CW1-4	斑状花岗闪长岩	0.7064	0.000011	0.5116	0.000007	0.7060	0.5115	-20.9
CW1-5	斑状花岗闪长岩	0.7070	0.000018	0.5118	0.000008	0.7064	0.5117	-16.1
CW1-6	斑状花岗闪长岩	0.7068	0.000015	0.5116	0.000011	0.7062	0.5116	-19.3
CW2-5	花岗闪长岩	0.7068	0.000011	0.5117	0.00001	0.7064	0.5116	-17.9
CW3-1	石英闪长岩	0.7070	0.000012	0.5117	0.00001	0.7067	0.5116	-18.0
CW3-2	石英闪长岩	0.7069	0.000021	0.5117	0.000007	0.7066	0.5116	-17.8
CW3-6	石英闪长岩	0.7069	0.000019	0.5117	0.000006	0.7066	0.5116	-17.9

注: $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = [({}^{143}\text{Nd}/{}^{144}\text{Nd})_{\text{Measured}} / ({}^{143}\text{Nd}/{}^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} - 1] \times 10^4$, Measured 为实际测得的样品值;CHUR 为球粒陨石值,本研究选取的 CHUR 值为 ⁸⁷Rb/⁸⁶Sr = 0.0847, ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 0.7045, ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd = 0.1967, ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd = 0.5126(据文献[8])。

表 3 赤瓦屋岩体铅同位素组成
Table 3 Pb isotope compositions of Chiwawu rock mass

样品号	岩性	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	μ	ω	Th/U	$\Delta\alpha$	$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$	(²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb) _i	(²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb) _i	(²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb) _i
CW1-4	斑状花岗闪长岩	16.3	15.2	36.5	9.03	36.5	3.91	-50.4	-7.37	-22.1	16.2	15.2	36.2
CW1-6	斑状花岗闪长岩	16.4	15.2	36.6	9.01	36.8	3.96	-44.8	-7.05	-17.0	16.3	15.2	36.4
CW2-5	花岗闪长岩	16.5	15.2	36.8	9.04	37.1	3.97	-39.2	-5.48	-5.48	16.3	15.2	36.5
CW3-6	石英闪长岩	16.8	15.3	37.4	9.06	38.9	4.15	-24.9	-3.13	-3.13	16.6	15.3	37.2

注: μ 为 ²³⁸U/²⁰⁴Pb 测定值, ω 为 ¹⁸²Hf/¹⁶⁴Hf 测定值, α 、 β 、 γ 为样品测定值; $\Delta\alpha = [\alpha/\alpha_{\text{m}(t)} - 1] \times 1000$, $\Delta\beta = [\beta/\beta_{\text{m}(t)} - 1] \times 1000$, $\Delta\gamma = [\gamma/\gamma_{\text{m}(t)} - 1] \times 1000$; $\alpha_{\text{m}(t)}$ 、 $\beta_{\text{m}(t)}$ 、 $\gamma_{\text{m}(t)}$ 为时间 t 时的地幔值,按 $\mu = 7.8$ 的似单阶段增长线进行计算。

P_2O_5 在过铝质熔体中具有高的溶解性,随着 SiO_2 、Ba、Rb 增加, P_2O_5 降低,均表现为过铝质钙碱性 I 型花岗岩的特征。全岩的 Na 低,显示源区不含或含少量角闪石,Ca、Mg 高显示岩体演化过程中混入硅酸盐矿物,黑云母、石英贡献 Si、Al 组分。

原始地幔蛛网图(图 5a)和稀土元素球粒陨石标准化分布型式图(图 5b)显示,石英闪长岩、花岗闪长岩、斑状花岗闪长岩具有相似的演化趋势,不相容元素均有不同程度的富集,特别是 Rb、Ba、Th、U、La、Nb 出现相对亏损,右倾分配模式,具微弱的正 Eu 异常。

通常 Th/U、Nb/Ta 的比值在岩浆形成中变化微弱或基本不变,因此用以指示岩浆源区特征。根据 Rudnick et al.^[22] 原始地幔 Th/U 为 4,地壳中 Th/U 为 3.8~6,与壳源相关的岩浆 Nb/Ta 为 11~12,与幔源相关的岩浆 Nb/Ta 为 17.5 ± 2 。赤瓦屋岩体的 Th/U 值为 3.91~4.15,Nb/Ta 值为 14.55~23.21(均值 18.60),显示幔源岩浆的特征。Rb/Sr 比值(0.05~0.11)介于上地壳(0.32)与下地壳(0.05)之间,显示在岩浆形成过程中有壳源物质参与。

赤瓦屋岩体 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 平均值为 0.7068,岩浆初始比值 $\varepsilon_{Nd}(t) < 0$, 铅同位素 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 、 $^{207}Pb/^{204}Pb$ 和 $^{208}Pb/^{204}Pb$ 比值较集中,岩浆初始比值较低,说明岩浆具有地壳的重融特征。在($^{87}Sr/^{86}Sr$)- $\varepsilon_{Nd}(t)$ 关系图(图 6)上,

赤瓦屋中酸性侵入岩样品与北太行地区中酸性岩样品投点区域基本一致,具有华北克拉通古老下地壳与基性岩特征,表明其岩浆形成不仅有古老下地壳还有深源基性岩浆。铅同位素 μ 值为 9.01~9.06,变化范围小,属低放射性成因铅,同时介于原始地幔(7.80)与地壳(9.81)铅值之间^①并且更趋于地壳,说明赤瓦屋岩体物质大部分源于地壳。铅同位素构造模式演化曲线所有样品均落在再活化克拉通构造背景区(图 7),显示出以下地壳铅为主的特征。

6 结论

赤瓦屋铜钨矿床位于太行山北段南部,太行山岩浆岩带发现了一系列大型 Cu-Mo-Pb-Zn-W 矿床。

赤瓦屋岩体形成于早白垩世^[11-12],与第三大规模成矿期^[1-4]一致。中生界强烈频繁的构造运动中,上地幔富钾岩浆于深部向上运移,于下地壳类似中基性火山岩地层(深部矿源层)大规模重熔,产生同熔型花岗质岩浆。经过一定程度的黑云母、长石、石英的结晶分异,先形成边缘石英闪长岩。斜长石结晶后,随着温度下降,熔体中富钾和温度利于钾长石增长,钾长石在斜长石的残晶或晶体上结晶。在中生代构造运动中,花岗质岩浆沿太行山深断裂多次上侵。岩体侵位的早期断裂和由于岩体上侵形成的顶张裂隙,为成矿热液活

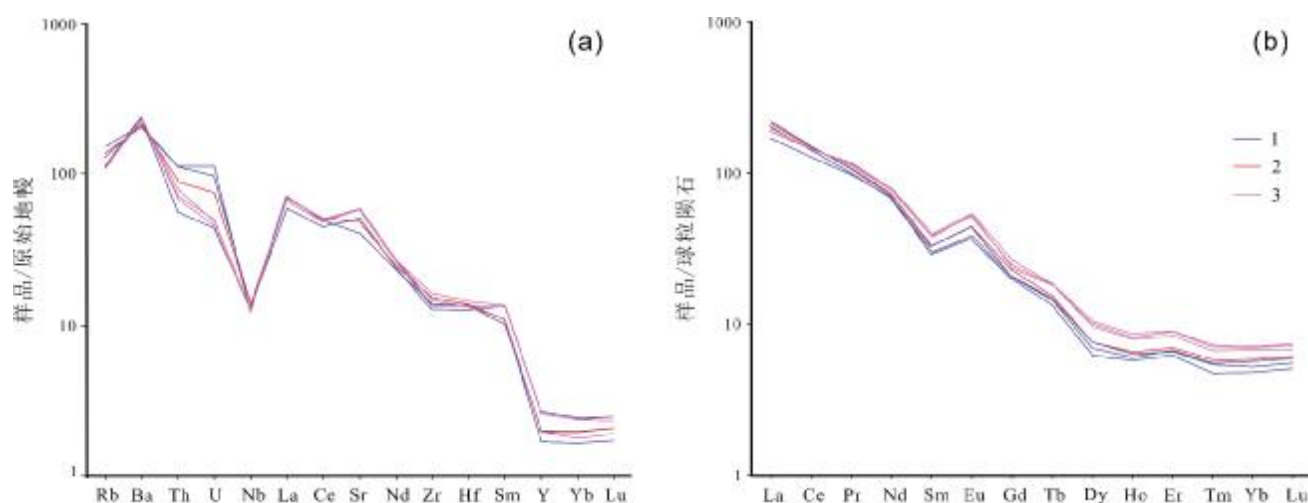


图 5 赤瓦屋岩体花岗质岩石微量元素蛛网图和稀土元素分布型式图

Fig. 5 Primitive mantle-normalized trace element spidergram and chondrite-normalized REE patterns of granitic rocks in Chiawu rock mass 1—斑状花岗闪长岩(porphyritic granodiorite); 2—花岗闪长岩(granodiorite); 3—石英闪长岩(quartz diorite); 原始地幔标准化数值和球粒陨石标准化数值据文献[21](Primitive mantle-normalized value and chondrite-normalized value from Reference [21])

①河北省地质矿产局综合研究地质大队. 河北省中酸性岩体地质特征及其与成矿关系的研究. 1990.

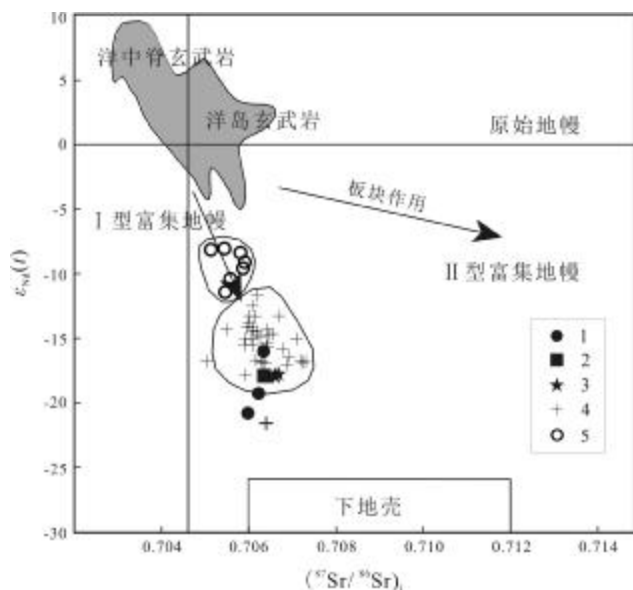


图6 太行山中生代岩浆岩与赤瓦屋岩体的Sr-Nd同位素图解
Fig. 6 The Sr-Nd isotope diagram of Mesozoic magmatic rocks in Taihang Mountains and Chiwawu rock mass

1—赤瓦屋斑状花岗闪长岩 (Chiwawu porphyritic granodiorite); 2—赤瓦屋花岗闪长岩 (Chiwawu granodiorite); 3—赤瓦屋石英闪长岩 (Chiwawu quartz diorite); 4—太行山北段中酸性岩 (acid-intermediate rock in northern Taihang Mountains); 5—太行山北段基性岩 (basic rock in northern Taihang Mountains); 中酸性岩、基性岩数据据文献 [23-25] (Data of acid-intermediate and basic rocks from References [23-25])

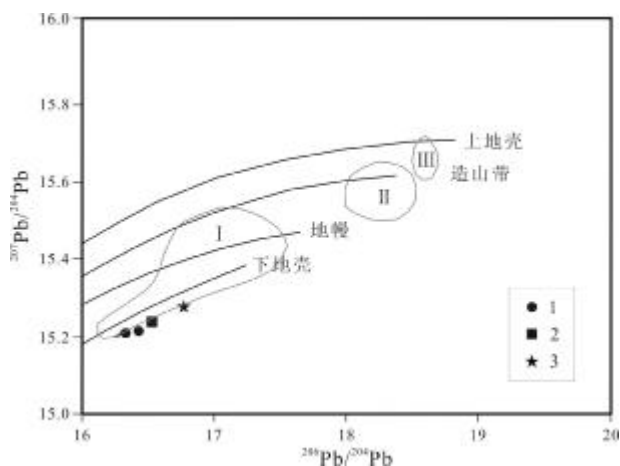


图7 赤瓦屋岩体铅同位素构造模式图解
(据文献[26])

Fig. 7 Tectonic model of Pb isotope in Chiwawu rock mass
(After Reference [26])

I—再活化克拉通 (reactivated craton); II—再活化古老造山带 (reactivated ancient orogenic belt); III—大陆碰撞带 (continental collision zone); 1—斑状花岗闪长岩 (porphyritic granodiorite); 2—花岗闪长岩 (granodiorite); 3—石英闪长岩 (quartz diorite)

动提供了通道和空间. 由于节理密集, 裂隙带及角砾岩发育. 当含矿热液上侵, 由于岩体中空隙节理裂隙较多, 对含矿热液起到阻滞作用, 有用组分在不同条件下发生堆积, 最终形成了赤瓦屋铜钼钨矿床.

赤瓦屋铜钼钨矿床赋矿围岩蚀变强烈, 具有蚀变范围广、多阶段、多期次叠加、不同分带的特点, 依据蚀变矿物组合可分为钾化硅化带和石英绢云母化带 2 个蚀变带, 反映了由早到晚, 从高温到低温的热液活动. 钾化、硅化与节理裂隙密切相关, 沿岩石节理裂隙钾化、硅化, 主要表现为钾长石、石英呈条带状、细脉状, 不规则分布, 多组节理裂隙交汇处钾长石、石英呈团块状, 微裂隙形成网脉状硅质条带, 常伴生有黄铁矿化、磁铁矿化、辉钼矿化、黄铜矿化.

综合分析表明, 稳定的华北克拉通在中生代遭到破坏, 构造体制转换和壳幔物质交换, 使华北克拉通古老下地壳发生部分熔融, 经历快速侵位, 冷却结晶的地质过程 [7], 有利于分异作用进行. 结晶分异过程中含矿流体的参与, 使亲硫元素铜、钼、钨等在残余热液中富集并将所携带的有用组分在不同的条件下堆积, 最终形成了赤瓦屋铜钼钨矿床. 本研究进一步为太行山中生代的这次构造-岩浆-成矿事件的岩浆起源提供新的证据. 太行山北段岩浆岩带南部的花岗质岩体找矿潜力较大.

参考文献 (References):

- [1] 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 等. 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, 2005, 21(1): 169-188.
Mao J W, Xie G Q, Zhang Z H, et al. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings[J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(1): 169-188.
- [2] 李聪颖, 廖仁强. 斑岩型钼矿床的形成机制与地球化学过程[J]. 岩石学报, 2020, 36(1): 77-84.
Li C Y, Liao R Q. Formation mechanism and geochemical process of porphyry molybdenum deposits[J]. Acta Petrologica Sinica, 2020, 36(1): 77-84.
- [3] 邓晋福, 莫宣学, 赵海玲, 等. 中国东部燕山期岩石圈-软流圈系统大灾变与成矿环境[J]. 矿床地质, 1999, 18(4): 309-315.
Deng J F, Mo X X, Zhao H L, et al. The Yanshanian lithosphere-aesthenosphere catastrophe and metallogenic environment in east China [J]. Mineral Deposits, 1999, 18(4): 349-356.
- [4] 毛景文, 张作衡, 余金杰, 等. 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), 2003, 33(4): 289-299.
- Mao J W, Zhang Z H, Yu J J, et al. Geodynamic settings of Mesozoic large-scale mineralization in North China and adjacent areas: Implication from the highly precise and accurate ages of metal deposits [J]. *Science in China (Series D)*, 2003, 33(4): 289-299. (in Chinese)
- [5] 么丝嘉, 王宏伟, 耿建珍, 等. 华北克拉通辽宁兴城玄武岩脉 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *地质与资源*, 2024, 33(3): 291-299, 279. DOI: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2024.03.003.
- Yao S J, Wang H W, Geng J Z, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb age of basalt dikes in Xingcheng of Liaoning, North China Craton: Geologic implications [J]. *Geology and Resources*, 2024, 33(3): 291-299, 279. DOI: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2024.03.003.
- [6] 鞠楠, 施璐, 杨高, 等. 华北板块北缘东段稀有-稀土成矿作用综述 [J]. *地质与资源*, 2024, 33(4): 537-550. DOI: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2024.04.008.
- Ju N, Shi L, Yang G, et al. Rare metal and rare earth element mineralization in the eastern section of the north margin of North China Plate: A review [J]. *Geology and Resources*, 2024, 33(4): 537-550. DOI: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2024.04.008.
- [7] 段超, 毛景文, 谢桂青, 等. 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*, 2016, 90(2): 250-266.
- Duan C, Mao J W, Xie G Q, et al. 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*, 2016, 90(2): 250-266.
- [8] 曲凯, 董国臣, 李胜荣, 等. 太行山木吉村斑岩铜(钼)矿床岩石地球化学、Sr-Nd-Pb 同位素特征及其地质意义[J]. *现代地质*, 2014, 28(3): 449-460.
- Qu K, Dong G C, Li S R, et al. Lithogeochemistry and Sr-Nd-Pb isotopic characteristics of Mujicun porphyry Cu-Mo deposit in Taihang Mountains and their significances [J]. *Geoscience*, 2014, 28(3): 449-460.
- [9] 田林, 张志远, 王志敏, 等. 河北涞源大湾锌钼矿床锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. *矿床地质*, 2021, 40(6): 1214-1229.
- Tian L, Zhang Z Y, Wang Z M, et al. Zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating of Dawan Zn-Mo deposit in Laiyuan County of Hebei Province and its geological significance [J]. *Mineral Deposits*, 2021, 40(6): 1214-1229.
- [10] 张志远, 王志敏, 丁照月, 等. 河北省涞源县龙门斑岩型钼矿床锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. *矿床地质*, 2021, 40(3): 403-418.
- Zhang Z Y, Wang Z M, Ding Z Y, et al. Zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating of Longmen porphyry molybdenum deposit in Laiyuan County of Hebei Province and its geological significance [J]. *Mineral Deposits*, 2021, 40(3): 403-418.
- [11] 李林林, 韩宝福, 苗国均, 等. 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*, 2012, 31(3): 289-306.
- Li L L, Han B F, Miao G J, et al. Geochronology, emplacement depth and tectonic implications of the Mapeng-Chiwawu granitic pluton in Fuping complex of the Taihang Mountains [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2012, 31(3): 289-306.
- [12] 张志远, 王文浩, 丁照月, 等. 太行山北段河北阜平县赤瓦屋铜钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其对找矿的指示[J]. *地质通报*, 2021, 40(9): 1522-1529.
- Zhang Z Y, Wang W H, Ding Z Y, et al. 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*, 2021, 40(9): 1522-1529.
- [13] 朱炳泉. 地球科学中同位素体系理论与应用——兼论中国大陆壳幔演化 [M]. 北京: 科学出版社, 1998: 225-226.
- Zhu B Q. Theory and application of isotope system in geosciences: The evolution of crust and mantle in China continent [M]. Beijing: Science Press, 1998: 225-226. (in Chinese)
- [14] 王瑜, 孙立新, 周丽云, 等. 燕山运动与华北克拉通破坏关系的讨论 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2018, 48(5): 521-535.
- Wang Y, Sun L X, Zhou L Y, et al. Discussion on the relationship between the Yanshanian movement and cratonic destruction in North China [J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2018, 48(5): 521-535.
- [15] Wilson M. Igneous petrogenesis: A global tectonic approach [M]. Springer Dordrecht, 1989: 13-34.
- [16] Peccerillo A, Taylor S R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1976, 58(1): 63-81.
- [17] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1989, 101(5): 635-643.
- [18] 李玉春, 李彬, 陈静, 等. 东昆仑拉陵灶火矿区花岗闪长岩 Sr-Nd-Pb 同位素特征及其地质意义[J]. *矿物岩石*, 2013, 33(3): 110-115.
- Li Y C, Li B, Chen J, et al. Sr-Nd-Pb isotopic characteristics of ore-bearing granodiorites from Lalingzaohuo deposit and its geological significance [J]. *Mineralogy and Petrology*, 2013, 33(3): 110-115.
- [19] 麦地娜·努尔太, 尼加提·阿布都逊, 木合塔尔·扎日, 等. 中天山卡瓦布拉克杂岩带中-基性岩的成因及其构造意义: 元素地球化学和 Sr-Nd-Pb 同位素约束 [J]. *现代地质*, 2017, 31(6): 1147-1156.
- Madina N, Nijat A, Muhtar Z, et al. Petrogenesis and tectonic implications of intermediate basic rocks from Kawabulak complex in Central Tianshan: Constraints from elemental geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopes [J]. *Geoscience*, 2017, 31(6): 1147-1156.

- characteristics of indium in the Luotuoshan sulfur polymetallic deposit, Henan Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2023, 97(8): 2547–2562.
- [35] 陈程, 赵太平. 岩浆-热液系统中铜的成矿作用[J]. *矿床地质*, 2021, 40(2): 206–220.
- Chen C, Zhao T P. Metallogenesis of indium in magmatic hydrothermal system[J]. *Mineral Deposits*, 2021, 40(2): 206–220.
- [36] 朱笑青, 张乾, 何玉良, 等. 富铜及贫铜矿床成矿流体中铜与锡铅锌的关系研究[J]. *地球化学*, 2006, 35(1): 6–12.
- Zhu X Q, Zhang Q, He Y L, et al. Relationships between indium and tin, zinc and lead in ore-forming fluid from the indium-rich and -poor deposits in China[J]. *Geochimica*, 2006, 35(1): 6–12.
- [37] 李新, 李香资, 权知心, 等. 内蒙古索家沟银铅锌矿床伴生稀散金属镉、镓的富集特征研究[J]. *矿产与地质*, 2022, 36(3): 535–540.
- Li X, Li X Z, Quan Z X, et al. Enrichment characteristics of associated rare metal Cd and Ga in Suojiagou Ag-Pb-Zn deposit in Inner Mongolia [J]. *Mineral Resources and Geology*, 2022, 36(3): 535–540.
- [38] 唐利, 张寿庭, 曹华文, 等. 河南栾川三道沟铅锌银矿床成矿流体地球化学特征[J]. *现代地质*, 2014, 28(2): 359–368.
- Tang L, Zhang S T, Cao H W, et al. Geochemical features of ore-forming fluids of the Sandaogou Pb-Zn-Ag deposit in Luanchuan County, Henan Province[J]. *Geoscience*, 2014, 28(2): 359–368.
- [39] 陈衍景, 李晶, Pirajno F, 等. 东秦岭上官金矿流体成矿作用: 矿床地质和包裹体研究[J]. *矿物岩石*, 2004, 24(3): 1–12.
- Chen Y J, Li J, Pirajno F, et al. Hydrothermal metallogeny of the Shanggong gold deposit, East Qinling: Studies on ore geology and fluid inclusion geochemistry[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2004, 24(3): 1–12.
- [40] 焦天龙, 李进文, 郭向国, 等. 内蒙古二道河铅锌银矿床成矿流体、物质来源及成因探讨[J]. *中国地质*, 2024, 51(2): 426–442.
- Jiao T L, Li J W, Guo X G, et al. Discussion on the ore-forming fluids, materials sources and genesis of Erdaohe Pb-Zn-Ag deposit, Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 2024, 51(2): 426–442.

(上接第 441 页/Continued from Page 441)

- [20] 叶枫, 董国臣, 任建勋, 等. 山西黄榆沟岩体锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. *现代地质*, 2021, 35(3): 787–797.
- Ye F, Dong G C, Ren J X, et al. Zircon U-Pb geochronology, geochemical characteristics and geological significance of Huangyugou intrusion, Shanxi Province[J]. *Geoscience*, 2021, 35(3): 787–797.
- [21] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1989, 42(1): 313–345.
- [22] Rudnick R L, Gao S. Composition of the continental crust [C]// Holland H D, Turekian K K. *Treatise on Geochemistry*. 2nd ed. Elsevier, Amsterdam, 2014: 1–51. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-095975-7.00301-6>.
- [23] Chen B, Zhai M G, Shao J A. Petrogenesis and significance of the Mesozoic North Taihang complex: Major and trace element evidence [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2003, 46(9): 941–953.
- [24] Chen B, Jahn B M, Arakawa Y, et al. Petrogenesis of the Mesozoic intrusive complexes from the southern Taihang Orogen, North China Craton: Elemental and Sr-Nd-Pb isotopic constraints[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2004, 148(4): 489–501.
- [25] Chen B, Tian W, Zhai M G, et al. 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*, 2005, 21(1): 13–24.
- [26] Zartman R E, Doe B R. Plumbotectonics: The model[J]. *Tectonophysics*, 1981, 75(1/2): 135–162.