

# 银的赋存状态及其矿物学特征研究进展

潘忠成

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2025年3月14日; 录用日期: 2025年4月15日; 发布日期: 2025年4月25日

## 摘要

银是一种在工业生产、新兴电子技术和医疗卫生领域广泛应用的贵金属资源。天然矿床中银的赋存形式复杂多样, 不同类型矿床中银元素的矿物学赋存特征差异显著, 这对矿床的勘查预测、资源评价及选冶回收工艺有着直接影响。近年来, 随着扫描电镜(SEM)、透射电镜(TEM)、电子探针(EPMA)、激光剥蚀电感耦合等离子质谱(LA-ICP-MS)等微观原位分析技术的快速发展, 关于银在矿物内部的赋存形式和微区分布特征的研究取得了较大进展。文章在总结梳理国内不同类型银矿床(包括低温热液型, 即低硫型、中硫型和高硫型, 以及矽卡岩型、斑岩型和五元素型)中银元素赋存状态研究成果的基础上, 进一步探讨银的矿物赋存特征与成矿作用的联系。同时, 分析当前研究中亟待解决的科学问题, 展望后续研究的关键方向, 为银矿床成矿理论的深化和银矿资源的高效利用提供参考。

## 关键词

银矿床, 矿物学赋存特征, 微观赋存状态, 原位分析, 成矿机制

# Research Progress on Silver Occurrence and Its Mineralogical Characteristics

Zhongcheng Pan

School of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: Mar. 14<sup>th</sup>, 2025; accepted: Apr. 15<sup>th</sup>, 2025; published: Apr. 25<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

Silver is a precious metal resource widely used in industrial production, emerging electronic technologies, and healthcare fields. The occurrence of silver in natural ore deposits is complex and diverse, and its mineralogical occurrence characteristics vary greatly among different deposit types. These differences directly affect ore deposit exploration and prediction, resource evaluation, and

beneficiation and recovery processes. In recent years, with the rapid development of micro in-situ analysis techniques such as Scanning Electron Microscopy (SEM), Transmission Electron Microscopy (TEM), Electron Probe Microanalysis (EPMA), and Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (LA-ICP-MS), significant progress has been made in the study of the occurrence forms and micro-distribution characteristics of silver within minerals. This paper summarizes and combs the research results on the occurrence of silver in different types of silver deposits in China (including low-temperature hydrothermal deposits, namely low-sulfur, medium-sulfur, and high-sulfur types, as well as skarn, porphyry, and penta-element types), and further explores the relationship between the mineral occurrence characteristics of silver and the mineralization process. At the same time, this paper analyzes the scientific problems that need to be solved urgently in current research and looks ahead to the key directions of subsequent research, providing references for the deepening of silver deposit metallogenic theory and the efficient utilization of silver ore resources.

## Keywords

Silver Deposits, Mineralogical Occurrence Characteristics, Micro-Scale Occurrence, In Situ Analysis, Ore-Forming Processes

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

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

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



Open Access

## 1. 引言

银是一种战略性贵金属资源，经济价值高，在新能源、电子工业、医疗卫生等前沿领域发挥着日益重要的作用[1]。近年来，全球经济快速增长，高科技产业迅猛发展，银的市场需求量持续攀升，进一步推进了银矿资源研究、勘查和开发工作[2]。全球热液型银矿床类型丰富、成因多样，主要有低温热液型(低硫型、中硫型和高硫型)、矽卡岩型、斑岩型和五元素型四种[3](表 1)。不同类型矿床中银的矿物学赋存特征差异明显，这直接影响矿床勘查预测的难度以及资源开发利用方式的选择。

近年来，随着扫描电镜(SEM)、透射电镜(TEM)、电子探针(EPMA)和激光剥蚀电感耦合等离子质谱(LA-ICP-MS)等高分辨率原位分析技术快速发展，不少地质学者已对银矿床开展大量研究，揭示了银在矿物内部的赋存状态和微观分布规律，深入分析了银在矿床中的富集与沉淀机制[4]。且随着我国大型-超大型银矿床的相继发现和深入研究，银元素在矿床中的时空分布规律及其控制因素，逐渐成为矿床地质学研究的重要前沿课题之一[5]。前人对银的矿物学赋存特征已开展大量研究，积累了大量资料，但缺乏系统梳理，因此总结梳理国内不同类型银矿床中银元素赋存状态研究成果，并进一步探讨银的矿物赋存特征与成矿作用的关系，为银矿床成矿理论的深化和银矿资源的高效利用提供参考具有重要意义。高分辨率原位分析技术快速发展，银在矿物内部的赋存状态和微观分布规律得到了更精细的揭示，有助于地质学者深入探索银在矿床中的富集与沉淀机制。

## 2. 银的矿物学赋存特征

### 2.1. 独立银矿物

热液型银矿床分为浅成低温热液型(高硫型、中硫型和低硫型)、矽卡岩型、斑岩型和五元素型四种，各类型矿床典型手标本矿石如图 1(a)-(f)。

**Table 1.** Characteristics of magmatic epithermal silver deposits  
**表 1.** 岩浆热液型银矿床特征表

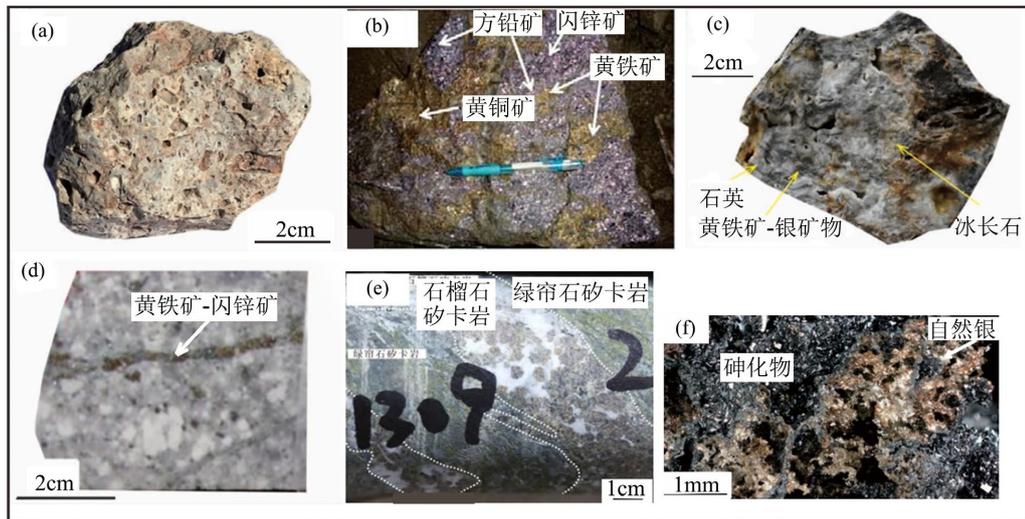
矿床类型	浅成低温热液矿床			斑岩型	矽卡岩型	五元素型
	高硫型	中硫型	低硫型			
结构构造	多孔石英、交代、块状、角砾状、侵染状	脉状、块状、角砾状	脉状、皮壳状、条纹状、叶片状	细脉侵染状、网脉状	交代、块状、侵染状、脉状	脉状
蚀变特征	硅化、明矾石化、高级泥化、铝-磷酸盐-硫酸盐矿物等	硅化、绢云母化、伊利石-水云母化、电气石化等	硅化、伊利石-水云母化、冰长石化	钾化、硅化、高级泥化、绢云母化	矽卡岩化	碳酸盐化
矿石矿物	闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、硫砷铜矿、四方硫砷铜矿、铜蓝、锡石	低铁闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、黄铁矿、黝铜矿、砷黝铜矿、辉银矿	黄铁矿、毒砂、磁黄铁矿	黄铜矿、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、毒砂、磁黄铁矿	黄铜矿、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、毒砂、磁黄铁矿、斑铜矿	自然银、自然铋、自然砷、Fe、Co、Ni 的砷化物和硫砷化物
银矿物	硫银锡矿、银-铋矿物	银-铋矿物、银-碲矿物	碲酸盐、碲化物、硒化物、硒酸盐、含贡合卤族元素矿物	银黝铜矿、银-碲矿物、硫银锡矿	黝铜矿-砷黝铜矿	自然银、Ag-Sb 合金、Ag-Au、Ag-Hg
矿石矿物含量	10vol%~90vol%	5vol%~>20vol%	一般<1vol%~2vol%	3vol%~20vol%，局部可达 80vol%	30vol%~65vol%	10vol%~80vol%
典型矿床	Cerro Rico de potosi, 玻利维亚	甲乌拉-查干布拉根, 中国; Cerro de Pasco, 秘鲁	额仁陶勒盖, 中国	Penasquito, 墨西哥; 冷水坑, 中国	二道河, 中国; Santa Eulalia, 墨西哥	Cobalt, 加拿大
参考文献	Sillitoe and Lorsonn, 1994 [6]	Simmons, 1991; [7] Hui <i>et al.</i> , 2021 [8]	秦克章, 1998 [9]	Macario, 2016 [10]; 左力艳, 2008 [11]	Megaw, 1990 [12]; 杨发亭, 2016 [13]	Kotková <i>et al.</i> , 2018 [14]

注释: vol%为体积百分比。

自然界中, 银可形成自然银、辉银矿、深红银矿和银黝铜矿等独立矿物[15]。浅成低温热液型矿床中, 以自然银和辉银矿最为常见, 呈显微至肉眼可见的独立矿物晶体或细小集合体形式产出, 如江西牛形坝-柳木坑多金属银矿床的银碲黝铜矿[16], 以独立矿物及显微包体形式赋存于方铅矿中(图 2(a)); 斑岩型及矽卡岩型矿床中, 自然银与辉银矿更具代表性, 它们通常与硫化物紧密共生, 反映出高温富硫流体环境对银赋存形式的显著影响, 如江西冷水坑斑岩型银铅锌矿床的银矿物以自然银形式赋存于闪锌矿中[17](图 2(b)), 而赣西蒙山矿田矽卡岩型铜银矿床的银矿物则以辉银矿形式与黄铁矿共生[18](图 2(c)); 五元素型矿床以 Ag、Co、Ni、Bi、As 元素组合为特征, 通常形成自然银或硫银矿, 如德国西南部的 Odenwald 五元素矿脉中的银矿物, 以骨骼状自然银矿与螺纹状硫银矿的天然集合体形式存在于矿脉中[19](图 2(d))。

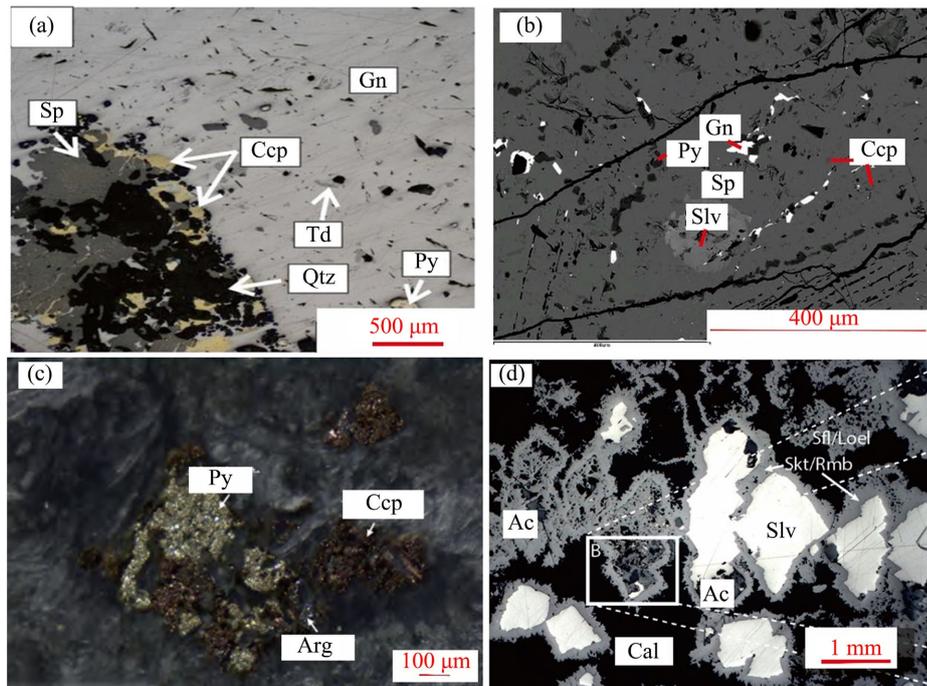
## 2.2. 伴生银矿物

多数情况下, 银以伴生矿物形式存在于其他硫化物矿物中[20], 尤其是以类质同象方式进入方铅矿、闪锌矿、黄铜矿等硫化物晶格。例如, 内蒙古哈拉胜银矿床中, 大部分银元素以类质同象形式赋存于方铅矿和闪锌矿内部[21], 增加了矿石选矿难度, 直接影响矿床综合开发效益。这种赋存状态在硫逸度较低或还原条件占优的矿床环境中较为普遍。



注释：(a) 玻利维亚 Cerro Rico de potosi 高硫型银锡矿床多孔石英[3]；(b) 中国内蒙古甲乌拉中硫型浅成低温热液铅锌银矿床磁铁矿 - 黄铁矿 - 方铅矿 - 闪锌矿矿石[22]；(c) 中国内蒙古额仁陶勒盖低硫型浅成低温热液矿床石英 - 冰长石 - 黄铁矿 - 银矿物矿石[13]；(d) 墨西哥 Penasquito 斑岩型银金铅锌矿床细脉状黄铁矿 - 闪锌矿矿石[10]；(e) 中国内蒙古二道河砂卡岩型银铅锌矿床石榴石 - 绿帘石砂卡岩[23]；(f) 德国 Winttichen 五元素矿床树突状自然银 - 砷化物矿石[24]。

Figure 1. Typical hand specimen ore of magmatic epithermal silver deposits  
图 1. 岩浆热液型银矿床典型手标本矿石



注释：(a) 江西牛形坝 - 柳木坑多金属银矿床的银铋黝铜矿；(b) 江西冷水坑斑岩型银铅锌矿床闪锌矿中的自然银；(c) 赣西蒙山矿田砂卡岩型铜银矿床的辉银矿；(d) 德国 Odenwald 五元素矿脉的骨骼状自然银与螺旋状硫银矿。其中：Ccp-黄铜矿；Gn-方铅矿；Py-黄铁矿；Qtz-石英；Sp-闪锌矿；Td-银铋黝铜矿；Slv-自然银；Arg-辉银矿；Ac-硫银矿；Cal-方解石。

Figure 2. Photograph of the independent mineral silver  
图 2. 独立矿物银的镜下照片

### 3. 银的微观赋存状态与分析技术进展

近年来, 银的赋存状态研究从宏观矿物学观察向微观尺度深入。随着高分辨率显微分析技术的快速发展, 银元素在矿物内部的微区分布特征及其矿物学意义得到了更精细的揭示。目前, 扫描电子显微镜(SEM)、透射电子显微镜(TEM)、电子探针(EPMA)以及激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)等先进原位分析技术在银矿研究中广泛应用[4] [25]-[29], 推动银在矿物中赋存状态的研究进入新的阶段。

SEM 和 TEM 技术已成为矿物学研究中揭示矿物内部微观结构的重要手段[30] [31]。通过高分辨率成像, 可在纳米至微米尺度直观呈现银矿物的赋存形态和微结构特征, 揭示纳米尺度银颗粒的形成与聚集机制。研究发现, 浅成低温热液型矿床的超高品位银矿石中, 银硫化物常以纳米尺度颗粒自组织聚集[25], 这可能是银元素高效富集的重要原因。利用 TEM 晶格分析技术, 还能进一步揭示热液环境下银硫化物晶体结构的演化细节, 证实银沉淀过程复杂多样。

电子探针(EPMA)在银的微观赋存状态研究中不可或缺, 它不仅能高效、准确地对矿物相进行原位定量分析, 还能精确测定银在矿物中的微区含量和空间分布规律[28]。以斑岩型和矽卡岩型银矿床研究为例, EPMA 分析表明, 银广泛以类质同象形式赋存在方铅矿、闪锌矿和黄铜矿等矿物中, 且银含量变化与矿床流体演化密切相关。此外, EPMA 技术在矿物生长、交代作用及矿物形成序列研究中也发挥关键作用, 有助于深入理解银矿床成矿过程。

激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)是一种高灵敏度、高空间分辨率的微量元素分析方法[29], 在银矿赋存状态研究中优势明显。利用该技术可对矿物内部超微量银元素进行原位定量分析, 突破了传统分析方法在微区银元素低含量检测方面的瓶颈。研究显示, 闪锌矿、方铅矿中的银元素在微区尺度分布不均, 反映出矿床流体性质变化和矿物晶体生长环境的复杂性, 为揭示银元素在矿床中的迁移、富集和沉淀机制提供了重要信息。

目前, 多种原位微区分析技术联用成为银赋存状态研究的新趋势。通过 SEM、TEM、EPMA 与 LA-ICP-MS 技术的组合应用, 研究人员可同时获取矿物结构、微区赋存状态和精确的定量分析数据。这种综合分析方法提高了数据精度和可靠性, 为系统揭示银矿床成矿过程的多尺度特征提供了重要支持, 也为银矿物沉淀机制研究和资源精细化开发利用奠定了基础。

### 4. 银赋存状态与成矿机制的关系

银的赋存状态记录了矿床形成过程中成矿流体的物理化学特征, 从微观角度反映了矿床形成和演化的复杂地质作用。因此, 深入分析银在不同矿床中的赋存状态与成矿机制的内在联系, 对理解银矿床成矿过程、预测找矿靶区具有重要意义。

不同成因类型矿床中银的赋存形式差异较大。浅成低温热液型矿床中, 银多以自然银、辉银矿、深红银矿和银黝铜矿等独立矿物形式产出, 表明银元素在相对低温、低压条件下更易形成独立矿物相。以兴蒙造山带的双尖子山超大型银矿床为例, 银元素主要以辉银矿和自然银形式存在, 其赋存特征与低温热液环境中硫化物纳米颗粒的聚集沉淀及银离子快速结晶作用密切相关[32]。

斑岩型和矽卡岩型矿床与浅成低温热液型矿床关联紧密[33]。相比之下, 斑岩型及矽卡岩型矿床中, 银更多以类质同象方式进入方铅矿、闪锌矿和黄铜矿等硫化物矿物晶格, 只有少部分以银黝铜矿等独立矿物形式存在。这是因为斑岩与矽卡岩矿床形成于相对高温、高压的岩浆热液系统, 在高温岩浆演化早期, 银元素难以独立沉淀, 更倾向于以微量元素形式分散在硫化物中。这种赋存特点体现了岩浆分异、流体硫逸度变化等因素对银元素迁移和富集过程的控制作用。

五元素型银矿床的银赋存状态独具特点。银元素在这类矿床中通常呈脉状产出, 可赋存在沉积岩、不整合面、基底岩石中; 成矿温度变化大(150℃~450℃), 流体多具有高盐度、高氧化(超过赤铁矿-磁铁

矿缓冲对)的特征[34]。这类矿床常与大规模伸展背景有关,与基性侵入岩在时空上关系密切。

此外,沉积热液型(如 SEDEX 和 MVT 型)矿床的银赋存状态也有其特点。银元素在这些矿床中常与方铅矿、闪锌矿紧密共生,以高度分散的类质同象形式赋存[35]。这类矿床多形成于盆地构造背景下,有机质参与或硫酸盐还原反应对银元素的迁移、富集和沉淀起到重要促进作用,使得银的赋存状态更为隐蔽。

从成矿机制角度看,银的赋存状态是特定成矿环境中温压条件、流体组分和氧化还原条件等多种因素共同作用的结果。在浅成低温热液体系中,银的沉淀主要受流体沸腾、混合以及快速降温等因素控制;在岩浆热液环境下,银的赋存状态则更多受岩浆结晶分异演化和硫逸度变化的制约。区域地质构造背景对银的赋存状态也有重要影响,如在兴蒙造山带和秦岭-东昆仑地区,中酸性岩浆活动频繁,银多以独立矿物形式出现;而在稳定的盆地环境(如 SEDEX 或 MVT 矿床)中,银更倾向于以类质同象形式存在于硫化物矿物中。这表明区域地质构造环境是银赋存状态的重要控制因素之一。

## 5. 存在问题与展望

近年来,银的赋存状态研究虽取得了显著进展,但仍存在若干亟待解决的关键科学问题:

(1) 不同类型银矿床银赋存状态的系统对比研究不足。目前,大量研究聚焦于单个矿床或某一类型矿床中银的赋存特征,缺乏跨矿床类型的系统性对比研究。因此,有必要开展不同成因类型银矿床中银的微观赋存特征及形成机制的综合研究,以揭示不同地质背景对银赋存状态的控制规律。

(2) 银在微观尺度上的赋存机制研究较为薄弱。近年来,银在纳米尺度上的赋存形态及沉淀机制研究逐渐兴起,但成果较为零散,对银矿物在纳米至亚微米尺度上的晶体结构、赋存状态与形成机制的研究还不够深入。因此,加强银赋存状态的纳米尺度研究,是未来揭示银矿物精细形成机制的重要方向。

## 6. 结论

银的赋存状态研究在矿物学特征、微观尺度分析、成矿机制关系等方面已取得显著进展,但仍存在亟待解决的问题。未来研究应重点加强不同类型银矿床赋存状态的系统对比,深入开展银在纳米至微米尺度上的微观赋存机制研究,探索银赋存状态与矿物学特征、成矿条件的关系。通过引入先进的原位分析技术和多学科交叉研究方法,有望揭示银矿形成与赋存状态的普适规律,完善银矿成矿理论体系,为银资源的高效选冶回收提供更科学、可靠的理论支持。

## 参考文献

- [1] 张亮, 杨卉, 冯安生, 等. 全球银矿资源概况及供需分析[J]. 矿产保护与利用, 2016(5): 44-48.
- [2] 江彪, 王登红, 王岩, 等. 中国银矿成矿规律与百年勘查成果及新一轮找矿突破行动建议——《中国矿产地质志·银矿卷》研编[J]. 地球学报, 2025, 46(1): 35-51.
- [3] 回凯旋, 秦克章, 韩日, 等. 岩浆热液型银矿床、银矿省及形成的控制因素[J]. 岩石学报, 2021, 37(8): 2502-2520.
- [4] 周伟, 张嘉升, 祁晓鹏, 等. X 射线衍射和 TIMA 研究陕南镇巴地区富锂黏土岩的矿物组成及锂的赋存状态[J]. 岩矿测试, 2024, 43(1): 76-86.
- [5] 秦克章, 韩日, 回凯旋, 等. 中国银矿床类型、时空分布与找矿远景[J]. 岩石学报, 2025, 41(2): 383-415.
- [6] Sillitoe, R.H. and Lorson, R.C. (1994) Epithermal Gold-Silver-Mercury Deposits at Paradise Peak, Nevada; Ore Controls, Porphyry Gold Association, Detachment Faulting, and Supergene Oxidation. *Economic Geology*, **89**, 1228-1248. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.89.6.1228>
- [7] Simmons, S.F. (1991) Hydrologic Implications of Alteration and Fluid Inclusion Studies in the Fresnillo District, Mexico; Evidence for a Brine Reservoir and a Descending Water Table during the Formation of Hydrothermal Ag-Pb-Zn Ore-bodies. *Economic Geology*, **86**, 1579-1601. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.86.8.1579>
- [8] Hui, K., Qin, K., Li, Z., Wang, F., Gao, S., Han, R., et al. (2021) The Linkage between the Jiawula-Chaganbulagen Ag-

- Pb-Zn and Adjacent Porphyry Mo-Cu Mineralization, Inner Mongolia, Northeast China. *Ore Geology Reviews*, **134**, Article ID: 104153. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104153>
- [9] 秦克章. 额尔古纳南段中生代斑岩-次火山岩-浅成低温 Cu、Mo、Pb、Zn、Ag 成矿系统[J]. 矿床地质, 1998, 17(增1): 201-202.
- [10] Macario, R.R. (2016) Metallogensis of the Peñasquito Polymetallic Deposit: A Contribution to the Understanding of the Magmatic Ore System. University of Nevada, 1-310.
- [11] 左力艳. 江西冷水坑斑岩型银铅锌矿床成矿作用研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质科学院, 2008.
- [12] Megaw, P. (1990) Geology and Geochemistry of the Santa Eulalia Mining District, Chihuahua, Mexico. University of Arizona, 1-461.
- [13] 杨发亭. 大兴安岭中段二道河银多金属矿床地质特征及找矿预测[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2016.
- [14] Kotková, J., Kullerud, K., Šrein, V., Drábek, M. and Škoda, R. (2017) The Kongsberg Silver Deposits, Norway: Ag-Hg-Sb Mineralization and Constraints for the Formation of the Deposits. *Mineralium Deposita*, **53**, 531-545. <https://doi.org/10.1007/s00126-017-0757-1>
- [15] 郑榕芬. 河南省熊耳山沙沟银铅锌矿床地质特征、矿物组合及银的富集规律研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2006.
- [16] 岳秋雨. 江西牛形坝-柳木坑银金多金属矿床银矿物组成与矿床成因研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2023.
- [17] 承斯. 江西冷水坑银铅锌矿下鲍矿区闪锌矿的矿物学特征研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2011.
- [18] 况二龙, 朱俊, 李凡顺, 等. 赣西蒙山矿田石山铜银矿床地质特征及找矿意义[J]. 能源研究与管理, 2024, 16(4): 178-184.
- [19] 张帅. 内蒙古红水泉铅锌银矿矿石矿物特征及银的赋存状态研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2019.
- [20] Burisch, M., Gerdes, A., Walter, B.F., Neumann, U., Fettel, M. and Markl, G. (2017) Methane and the Origin of Five-Element Veins: Mineralogy, Age, Fluid Inclusion Chemistry and Ore Forming Processes in the Odenwald, SW Germany. *Ore Geology Reviews*, **81**, 42-61. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.10.033>
- [21] 孙振江, 张福江. 内蒙古哈拉胜铅-锌、银矿床地质特征及其构造控矿机理探讨[J]. 矿产与地质, 2009, 23(1): 27-31.
- [22] 李铁刚. 内蒙古甲乌拉-查干布拉克银铅锌矿田成矿作用[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2016.
- [23] 张波, 张守刚, 宋宗维, 等. 内蒙古二道河银铅锌矿矿区岩体锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素及成矿过程探讨[J]. 岩石学报, 2021, 37(12): 3849-3868.
- [24] Scharrer, M., Kreissl, S. and Markl, G. (2019) The Mineralogical Variability of Hydrothermal Native Element-Arsenide (Five-Element) Associations and the Role of Physicochemical and Kinetic Factors Concerning Sulfur and Arsenic. *Ore Geology Reviews*, **113**, Article ID: 103025. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103025>
- [25] Chai, M., Williams-Jones, A.E., Fu, W., Li, J. and Xu, C. (2024) The Hyper-Enrichment of Silver through the Aggregation of Silver Sulfide Nanoparticles. *Nature Communications*, **15**, Article No. 10245. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-54726-9>
- [26] 郭琦. 银同位素分析方法及在多金属矿床中的应用[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京大学, 2018.
- [27] 朱原峰, 董戈, 刘茜, 等. 银同位素在行星和地球科学中的研究进展[J]. 地球科学, 2021, 46(12): 4390-4404.
- [28] 陈德进. 金属矿鉴定中电子探针分析技术的应用研究[J]. 中国金属通报, 2024(5): 207-209.
- [29] 柯于球, 郑腾飞, 张兆雪, 等. 激光剥蚀电感耦合等离子体质谱法与薄层色谱法联用技术研究进展[J]. 中国无机分析化学, 2025: 1-23.
- [30] 金伟国, 尹烁, 王庆飞, 等. FIB-TEM 解析微生物铀矿化: 以松辽盆地海力锦砂岩型铀矿为例[J]. 现代地质, 2024: 1-20.
- [31] 孙雄, 薛晓辉, 胡琳, 等. 扫描电镜下龙马溪组页岩储集空间特征研究——以滇东北 XY1 井为例[J]. 矿产与地质, 2025(1): 152-159.
- [32] 权晓莹. 内蒙双尖子山超大型 Pb-Zn-Ag 矿床成岩成矿作用研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2019. .
- [33] 徐剑南. 热液体系中银的赋存状态及其迁移机制研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2022.
- [34] Staude, S., Werner, W., Mordhorst, T., Wemmer, K., Jacob, D.E. and Markl, G. (2011) Multi-Stage Ag-Bi-Co-Ni-U and

- 
- Cu-Bi Vein Mineralization at Wittichen, Schwarzwald, SW Germany: Geological Setting, Ore Mineralogy, and Fluid Evolution. *Mineralium Deposita*, **47**, 251-276. <https://doi.org/10.1007/s00126-011-0365-4>
- [35] Beaudoin, G. and Sangster, D.F. (1992) A Descriptive Model for Silver-Lead-Zinc Veins in Clastic Metasedimentary Terranes. *Economic Geology*, **87**, 1005-1021. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.87.4.1005>