

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2025.02.013

中国银矿床银的赋存状态与富集机制

赵 丽¹, 李增华^{1,2}, 杨立飞^{1*}, 陈 祺^{3,4}, 欧阳永棚^{2,3,4}, 曾闰灵^{2,3,4}, 邓 腾¹

ZHAO Li¹, LI Zeng-Hua^{1,2}, YANG Li-Fei^{1*}, CHEN Qi^{3,4}, OUYANG Yong-Peng^{2,3,4},
ZENG Run-Ling^{2,3,4}, DENG Teng¹

1. 东华理工大学铀资源探采与核遥感全国重点实验室, 江西 南昌 330013; 2. 关键矿产资源勘查与
开发江西省重点实验室, 江西 南昌 330009; 3. 江西省地质局第十地质大队, 江西 鹰潭 335001;
4. 鹰潭市紧缺及优势矿产勘查与研究重点实验室, 江西 鹰潭 335001

1. National Key Laboratory of Prospecting, Mining and Remote Sense Detecting on Uranium Resources, East China
University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China; 2. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Exploration and
Development of Critical Mineral Resources, Nanchang, 330009, Jiangxi, China; 3. The tenth Geological Brigade of
Jiangxi Geological Bureau, Yingtan 335001, Jiangxi, China; 4. Yingtan Key Laboratory of Exploration and
Research of Scarce and Advantage Minerals, Yingtan 335001, Jiangxi, China

摘要: 中国银矿床呈现一定的时空分布规律, 与区域大地构造的演化紧密相关, 按地质环境及成因类型可分为热液型(细分为脉型和层控型)、矽卡岩型、海相火山岩型、陆相火山-次火山岩型、沉积型、沉积变质型、风化淋积型及伴生型 8 类。各类型银矿床中银的赋存状态主要为独立银矿物、(次)显微包体银、离子吸附银、晶格银和有机质-银络合物, 其主要特征总结如下: 热液型银矿床银以独立银矿物为主, 晶格银次之; 海相火山岩型银矿床以独立银矿物和晶格银为主; 陆相(次)火山岩型银矿床银以独立银矿物为主; 矽卡岩型银矿床银以晶格银为主, 独立银矿物和显微包体银次之; 沉积岩型和变质岩型银矿床银以晶格银和独立银矿物为主, 少量银以有机态形式存在。银赋存状态受区域地球化学条件、成矿元素组合和成矿条件等影响。流体成分、温度、压力、酸碱度等条件是控制银富集沉淀的关键因素。流体中挥发分(F、Cl、HS⁻)有利于 Ag⁺的迁移, 温度、压力降低、pH 值升高促使银富集沉淀, 并影响银赋存状态。

关键词: 银; 赋存状态; 富集机制; 成矿作用; 中国

中图分类号: P618.52

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2025)-02-0393-14

Zhao L, Li Z H, Yang L F, Chen Q, OUYANG Y P, Zeng R L and Deng T. 2025. The Occurrence State and Enrichment Mechanism of Silver in China Silver Deposits. *South China Geology*, 41(2): 393–406.

Abstract: The research reveals that silver mineralization spans a wide geological time frame, from the Cambrian to the Neogene periods. The forms of silver occurrence in various types of silver deposits exhibit significant differences. In hydrothermal silver deposits, silver primarily occurs as independent silver minerals, with less in crystal lattice form. In marine volcanic silver deposits, silver occurs mainly as independent silver

收稿日期: 2025-04-21; **修回日期:** 2025-05-10

基金项目: 江西省自然科学基金(20224BAB203037、20232BAB213062)、鹰潭市科技计划项目(20233-185656 和 202412-28880)和关键矿产资源勘查与开发江西省重点实验室开放课题(GJKC2024KF09)

第一作者: 赵丽(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事矿床学研究工作, E-mail: 1944202608@qq.com

通讯作者: 杨立飞(1991—), 男, 博士, 讲师, 主要从事银铅锌多金属成矿理论研究, E-mail: lfyang@ecut.edu.cn

minerals and crystal lattice silver. In terrestrial volcanic-subvolcanic silver deposits, silver predominantly exists as independent silver minerals. In skarn-type silver deposits, silver is primarily in the form of crystal lattice silver, followed by independent silver minerals and microscopic inclusions. In sedimentary and metamorphic silver deposits, silver primarily occurs as crystal lattice silver and independent silver minerals, with a small portion in organic form. The forms of silver occurrence are influenced by regional geochemical conditions, combination of ore-forming elements, and ore-forming conditions. Fluids, temperature, pressure, and pH are key factors controlling the concentration and precipitation of silver. Volatile components in fluids (F , Cl , HS^-) facilitate the migration of Ag^+ , and temperature and pressure reduction, along with pH increase, promote the concentration and precipitation of silver, affecting its forms of occurrence.

Key words: silver; occurrence state; enrichment mechanism; metallogenesis; China

银(Ag)在地壳中丰度较低(0.07×10^{-6}), 是一种重要的贵金属和过渡金属。在全球范围内, 银矿资源主要呈现出与有色金属及贵金属矿床共生或伴生的特点, 而独立银矿床占比相对较少(Boyle, 1968; Wu C Y et al., 1993; 江彪等, 2020)。尽管存在单质形态的银, 但绝大多数银元素以化合物形式存在于银矿石中(张亮等, 2016; 潘昭帅等, 2024)。银赋存状态主要为独立银矿物、显微包体、亚显微包体银和类质同象银(晶格银)(周卫宁, 1994; 王静纯和简晓忠, 1996; 徐剑南, 2023)。在不同成因的银矿床中, 银的赋存状态区别明显, 主要受银的物理化学属性以及成矿条件控制。银的物理化学性质使得银和金可以形成天然的金银合金矿物, 并且可与铅、锌、铜等亲硫元素共生, 伴生于硫化物矿床。其次, 在成矿过程中, 环境条件的改变会影响银的赋存状态, 如银在热液中迁移的过程中发生沸腾作用时, 热液中的银离子会与金属阳离子通过耦合置换的方式进入载体矿物晶格中, 从而产生晶格银, 而温度的下降使银持续出溶会形成次显微包裹体银(Sharp and Buseck, 1993; 徐剑南, 2023)等。虽然前人已对银的赋存状态开展过大量的研究, 但缺乏对各类型银矿床进行对比分析, 成矿过程对赋存形式有何影响尚不明确, 限制了对银富集成矿机制的理解。

本文在全面梳理国内银矿床类型、时空分布规律的基础上, 对不同类型银矿床银的赋存状态进行了对比研究, 探讨了影响银富集的主要因素, 明确了不同成矿过程对银赋存形式的影响, 总结了银矿床成矿机制。

1 银资源概况

世界上超 80% 的银矿伴生于有色金属矿床, 尤其是铅锌矿床(奚牲, 2012; 张大权等, 2015; 张亮等, 2016; U. S. Geological Survey, 2024)。据美国地质调查局(USGS)数据统计, 截至 2023 年全球银资源总储量约为 61 万吨。主要产银的国家包括秘鲁、俄罗斯、澳大利亚、中国等, 其中前四位国家的银储量占全球总储量的 60%, 中国的银矿储量可达 72000 吨, 占全球储量的 11%(U. S. Geological Survey, 2024)。

中国的银矿资源主要集中在北部沿海、东南沿海南部以及西部内陆, 内蒙古、云南、江西、广东四省区银储量占全国近半(徐剑南, 2023)。中国的银矿基本与铜、铅、锌共伴生(王登红等, 2007; Jiang B et al., 2015; 江彪等, 2020), 极少有独立银矿床; 小型矿床的分布虽然较为广泛, 但大中型银矿床的储量贡献最大。虽然我国银资源量较大, 但大多数银矿床品位低、规模小, 且矿山生产能力有限, 导致对外依赖严重(袁丽巧, 2015), 近年数据显示对外依存度高达 50%。预计 2022 年至 2035 年, 中国银需求将持续增长, 工业领域需求增速更显著, 光伏成为主要拉动力量(潘昭帅等, 2024)。

2 银矿床主要类型

银矿床分类尚未形成统一方案, 早期研究多基于成因机制或地质环境进行分类, 并在这一思

路上展开了广泛研究。随着新类型银矿床的不断发现和地质资料的丰富,不同学者在全球或特定地区提出了多样化的分类方案(张春晖等, 2006)。国外著名地质学者通过总结矿床地质特征和分布,将银矿床主要分为四大类,即沉积岩型、海相火山岩块状硫化物型、海相沉积喷流型和岩浆热液型(Graybeal and Vikre, 2010)。

陈毓川等(2010)、江彪等(2015)和 Jiang B et al.(2015)将中国银矿床分为七大类:热液型(细分

为脉型和层控型)、矽卡岩型、海相火山沉积型、陆相火山-次火山岩型、沉积型、沉积变质型以及风化淋积型。张大权等(2015)参考李舒(1996)和张春晖等(2006)的矿床分类方案,系统总结了中国 1483 个银矿床后,基于陈毓川等(2010)的分类体系,将伴生银矿床纳入分类体系,总共归纳出八类银矿床(图 1),其中,热液型银矿占据了显著地位,已探明的资源储量占据了总银矿资源储量的 28.5%(张大权等, 2015; 江彪等, 2025)(图 2)。

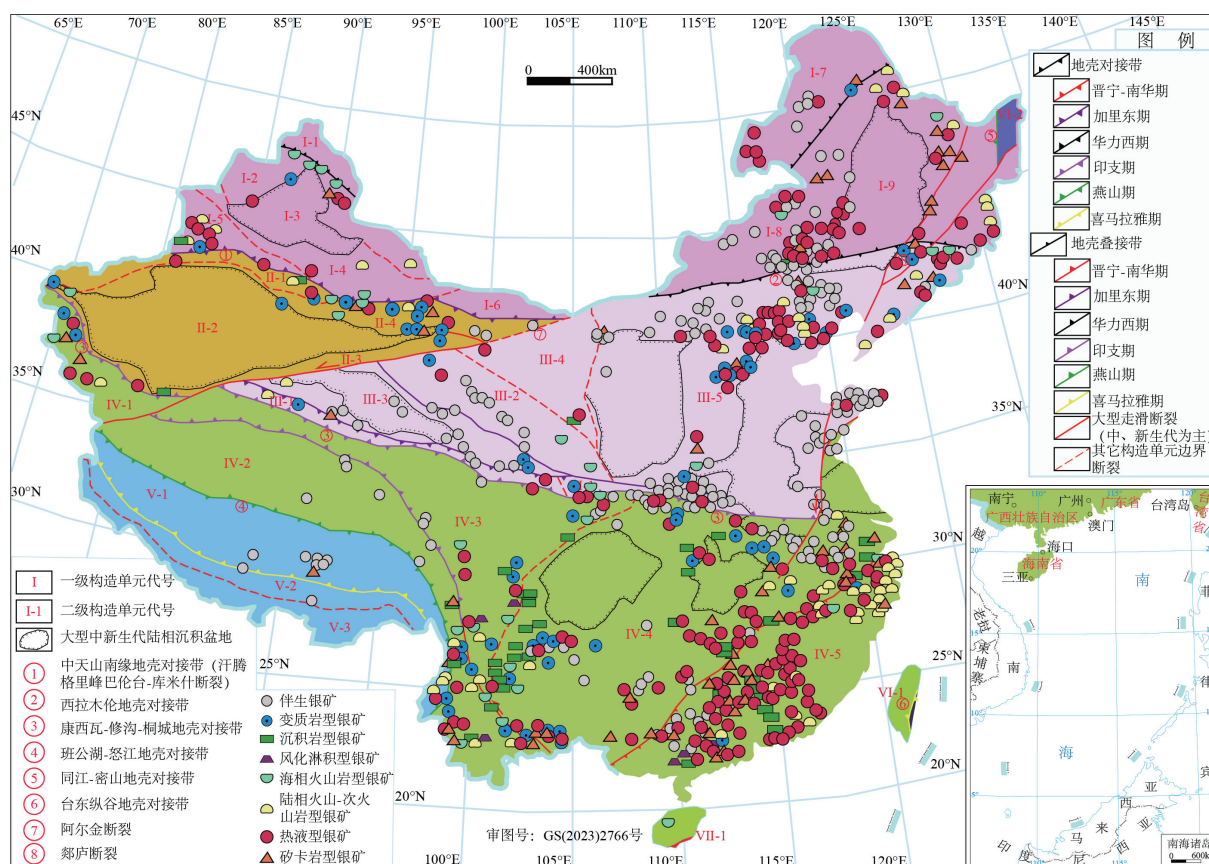


图 1 中国构造简图与典型银矿分布特征

Fig. 1 The structural diagram of China and the distribution characteristics of typical silver deposits

- I. 西伯利亚板块(含哈萨克斯坦-准噶尔亚板块):** I-1. 阿尔泰山古生代造山带; I-2. 准噶尔北缘古生代造山带; I-3. 准噶尔盆地; I-4. 北天山晚古生代造山带; I-5. 伊犁微陆块; I-6. 北山古生代造山带; I-7. 额尔古纳微陆块; I-8. 兴蒙古生代造山带; I-9. 松辽盆地; **II. 塔里木板块:** II-1. 南天山古生代造山带; II-2. 塔里木盆地(克拉通); II-3. 西昆仑晚古生代造山带; II-4. 阿尔金古生代造山带; **III. 柴达木-华北板块:** III-1. 东昆仑古生代造山带; III-2. 祁连山古生代造山带; III-3. 柴达木盆地; III-4. 阿拉善微陆块; III-5. 华北陆块(克拉通); III-6. 北秦岭新元古代—早古生代造山带; **IV. 羌塘-扬子-华南板块:** IV-1. 喀喇昆仑古生代—中生代造山带; IV-2. 羌塘微陆块; IV-3. 可可西里-巴颜喀拉中生代造山带; IV-4. 扬子陆块(克拉通); IV-5. 华南新元古代—早古生代造山带; **V. 冈瓦纳板块:** V-1. 冈底斯中生代—新生代造山带; V-2. 北喜马拉雅中—新生代造山带; V-3. 高喜马拉雅陆块(印度古陆块的一部分); **VI. 太平洋板块:** VI-1. 台东新生代造山带; VI-2. 那丹哈达岭中生代造山带; **VII. 菲律宾海板块:** VII-1. 南海陆块

据刘训等(2012)修编; 矿床数据来自张大权等(2015)、Jiang B et al.(2015, 2022)、Chen C et al.(2021)、

Cao H W et al.(2023)、王立立等(2024)、江彪等(2025)

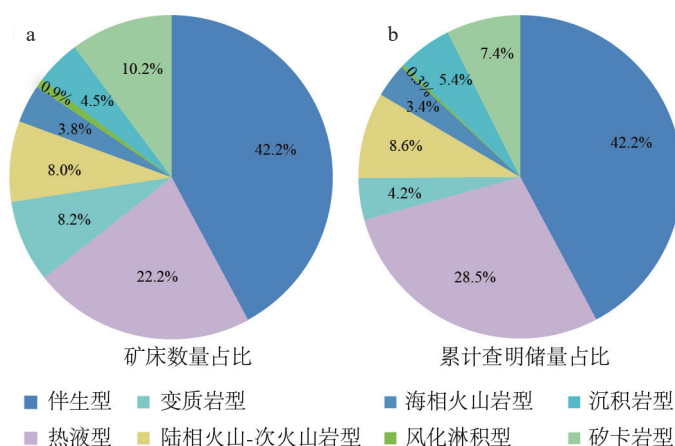


图2 中国不同类型银矿床数量占比 (a) 与累计查明资源储量占比 (b) 图

Fig. 2 The proportion of different types of silver ore deposits (a) and the proportion of cumulative identified resource reserves (b) in China

数据来自张大权等(2015)、江彪等(2020)

3 中国银矿的时空分布规律

我国银矿床在时空分布上呈现一定的规律性。在空间上,伴生银矿床多沿华北板块康西瓦-修沟-桐城和西拉木伦结合带分布,常与铅锌铜矿床伴生;热液型银矿床主要分布在羌塘-扬子-华南板块的新元古代-早古生代造山带和西伯利亚板块的东北部,呈现西少东多的分布规律;矽卡岩型银矿床主要位于华北陆块北缘东段及南岭成矿带;海相火山岩型分散于多个板块交界处,鲜少集中出现,如西伯利亚板块西北部的海相火山岩型矿床明显沿着华力西期的地壳叠接带分布;陆相火山-次火山岩型在华南板块东部较多,多集中在羌塘-扬子-华南板块的西南部 and 东北部;变质岩型矿床多沿着陆相沉积盆地边缘分布;沉积岩型矿床多在羌塘-扬子-华南板块内沿着断裂分布;风化淋积型矿床最少,仅在扬子-华南板块零星出现(图1)。

中国银矿床在时间上的分布与中国区域大地构造演化紧密相关。前人将其划分为太古宙至新生代八个关键成矿期(王静纯等, 1994),不同成矿期银矿床成矿特征呈现一定的区别(表1)。Jiang B et al.(2015)提出中生代至新生代是银矿床主要成矿期,银富集和成矿作用逐渐增强,但新生代增速减缓。

综合分析不同类型银矿床成矿时代(图3)发

现:热液型银矿床成矿时代多集中于白垩纪,较为著名的矿床如额仁陶勒盖(138.6 ± 2.3 Ma)(田京等, 2014)、二道河子(138.8 ± 1.7 Ma)(刘艳荣等, 2023a)和甲乌拉(143.1 ± 3.9 Ma)(杨梅等, 2017)。此外,还有集中于三叠纪形成的大型热液型银矿床,如青海哈日扎矿床(223 Ma)(李浩然, 2021)、黑龙江二道坎矿床(232.9 ± 2.3 Ma)(刘国卿, 2020; Yuan M W et al., 2021)、青海那更康切尔沟矿床(215 Ma)(谷子成等, 2021)等。陆相火山-次火山岩型银矿床,除冷水坑银铅锌矿床形成于白垩纪(155 Ma)(Yang L F et al., 2025)外,成矿时期多集中在侏罗纪和泥盆纪,如黑龙江多宝山(365.1 ± 2.6 Ma)(符安宗等, 2024)、银山铜铅锌矿床(175 ~ 180 Ma)(李晓峰等, 2006)、德兴市朱砂红—铜厂铜矿(171.3 ± 1.7 Ma)(肖荣等, 2016)等。矽卡岩型银矿床成矿主要集中于白垩纪,典型矿床如内蒙古二道河银铅锌矿床(130.5 ± 1.9 Ma)(杨俊声, 2021; Chen C et al., 2021)、湖南宝山矿床(160 ± 2 Ma)(丁腾等, 2016)、康家湾矿床(143 ~ 172 Ma)(陈平波等, 2023)、柿竹园矿床(140 ~ 170 Ma)(陶思源和马星华, 2022)、武山铜矿床(145 ± 4 Ma)(蒋少涌等, 2008)。海相火山岩型银矿床成矿于三叠纪较多,如白玉县呷村银多金属矿(204 ± 14 Ma)(朱维光等, 2001, 2002)、甘肃南金山金银矿床(232.7 ± 4.1 Ma)(江思宏和聂凤军, 2001)。沉积岩型银矿床和变质岩型银矿床也以三叠纪为主要成

表 1 中国银矿床的主成矿期
Table 1 The main mineralization period of silver deposits in China

成矿期	时间	特点	实例
太古宙成矿期	>2 500±100 Ma	太古宙的阜平旋回是标志着中国大陆形成历程中的一个关键阶段,这一时期以剧烈的火山活动和显著的混合岩化作用为特点。在此背景下,该时期产生的银矿化现象主要呈伴生矿物出现在绿岩带内部的块状硫化物之中。	陕西太华群中的华阴川U-Pb-Ag矿床 红透山Ag矿床(2 760 ~ 2 884 Ma)
早元古代成矿期	2 500 ~ 1 400 Ma	该成矿期经历了两个重要的构造旋回即五台和中条,该时期产生较多的银矿化。	山西垣曲南河沟、蓖子沟、胡家峪等铜银矿床(1 690、1 641 Ma)、中条山铜矿峪斑岩型含银矿床(1 658 ~ 1 836 Ma)和甘肃金川岩浆岩型含银硫化铜镍矿床(1 526 Ma)
晚元古代成矿期	1 400 ~ 700 Ma	矿化较早元古代大量增多,出现大量变质岩型-沉积变质岩型共(伴)生银矿床。	白锡腊铜矿床、洛南银洞沟铅锌金银矿床
加里东成矿期	(550 ~ 405) ± 10 Ma	分为早、晚两期,但是晚加里东期更重要,形成大量地槽褶皱带,以海相火山岩型为主的银矿床出现在一系列地槽褶皱中。	甘肃白银厂、云南元谋朱布(400 Ma)、竹山银洞沟(391 ~ 459 Ma)、四川核桃树(413 Ma)、柴达木锡铁山(646 Ma)、小铁山(503 Ma, 411 Ma)等
海西成矿期	405 ~ 230 Ma	是形成古亚洲的主要旋回褶皱期,成矿特点是该成矿期的银矿数量和矿床类型进一步增多。	陕西分水岭(232 Ma)、湖北银洞沟(231 ± 2.0 Ma)、永吉前进(241 Ma)、嫩江多宝山(293-215 Ma)、内蒙孟恩陶勒盖(287 Ma)、陕西银洞子(342 ~ 378 Ma)、辽宁高家堡(238 ± 0.6 Ma)、黑龙江二道坎(232.9 ± 2.3 Ma)等
印支成矿期	230 ~ 195 Ma	该时期成矿作用较弱,形成的矿床数量较少	洋鸡山金银矿(205 Ma)、四平市山门银矿(225.1 Ma)、花牛山铜银矿床(195 Ma)、东昆仑东段那更银多金属矿床(219.2± 1.4 Ma)、青海哈日扎(223 Ma)、湖南康家湾(152 ~ 155 Ma)等
燕山成矿期	195 ~ 80 Ma	这一时期堪称中国滨太平洋地区构造活动最为剧烈的时段,同时也是银矿形成的主要高峰期,涵盖了绝大多数类型的银矿床。这一阶段的强烈地质活动为银元素的富集与成矿提供了极为有利的条件,使得该时期成为银矿资源形成与分布的重要历史时期。	曲江大宝山(100 ~ 166 Ma)、瑞昌武山(97-161 Ma)、江西贵溪冷水坑银铅锌铜矿(155 Ma)、江永铜山岭(89 ~ 170 Ma)、豫西铁炉坪银铅矿床(134.6 ± 1.2 Ma)、大兴安岭西坡二道河子铅锌银矿床(138.8 ± 1.7 Ma)、湖南宝山(160 ± 2 Ma)、西藏玉龙铜铅矿(38-64 Ma)、金瓜石金铜含银矿床、拉萨墨竹工卡县帮浦矿区(13.93 ± 0.87 Ma)、云南老厂(45.7 ± 3.1 Ma)、四川下寨(76.87 ± 0.63Ma)、云南白秧坪(32.8 ± 1.5 Ma)等
喜马拉雅成矿期	80±10 Ma至今	喜马拉雅旋回对金属矿床的形成作用较弱。	

注: 数据来自王静纯等(1994)、高建京等(2011)、齐有强(2015)、杨俊声(2021)、Yuan M W et al.(2021)。

矿时代,例如四平市山门银矿(225.1 Ma)([郗爱华等, 2008](#))、竹山县银洞沟银金矿(231.0±2.0 Ma)([朱峰等, 2017](#))。

综上所述,中国银矿床多形成于晚古生代至中生代,燕山期构造岩浆活动为银矿富集成矿提供了有利条件,是中国银矿形成与成矿作用的高峰期([Jiang B et al., 2015](#))。

4 银的赋存状态

银原子的外层电子排布为 4s²4p⁶4d¹⁰5s¹, 当银

原子失去其最外层的 5s¹ 电子后,其价态变为+1,此时 N 层的电子数达到 18 个,为全充满的稳定状态。这种电子排布的稳定性促使银在自然界中更倾向于以银离子(Ag⁺)的形式存在。尽管银具有过渡元素的特性,但其亲铜性大于亲铁性,这些特性决定了自然界中银主要与铜、铅、锑、铋、硫结合,呈现出硫化物、硫盐矿物的形式([周卫宁, 1994](#))。银往往与铅、锌等其他有色金属共生或伴生([王静纯和简晓忠, 1996](#)),形成了众多银铅锌矿床。前人对银的赋存状态进行了大量分析,主要

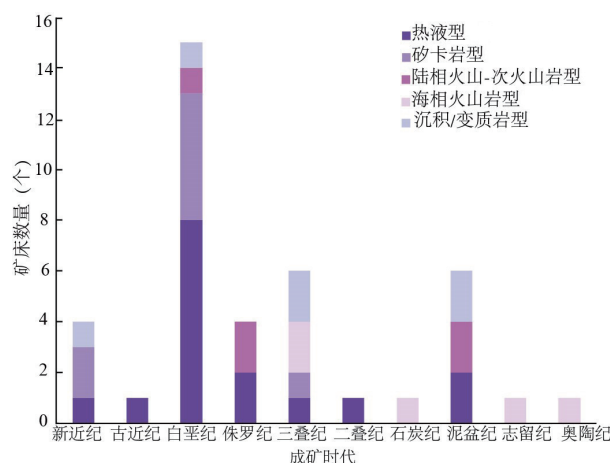


图3 中国不同成因银矿床成矿时代分布特征

Fig. 3 Distribution characteristics of different genesis silver deposits in China at different mineralization ages

数据来自张大权等(2015)、孟元库等(2018)、江彪等(2025)、孙鹏程等(2021)、陶思源等(2022)、陈公正等(2023)、陈平波等(2023)、符安宗(2024)

包括独立银矿物、晶格银、离子吸附银以及有机质-银络合物(王静纯和简晓忠 1996; 李方会等, 2014)。非晶态银在自然界中极为少见, 离子吸附态的银常赋存于地表露头、铁锰帽的矿物表面, 或在古潜水面之上的氧化带内, 被富含铁质、锰质的黏土或碳质材料所吸附(林彬等, 2013)。李壮等(2017)将银的赋存状态划分为独立银矿物、晶格银以及次显微包体银三类, 而其他学者根据银的粒径大小分为两类, 一类是可见银, 其粒径通常大于 $1\ \mu\text{m}$, 包括显微包裹体银(通常为 $1\sim 10\ \mu\text{m}$)和独立银矿物(通常大于 $10\ \mu\text{m}$); 另一类为不可见银, 其粒径通常小于 $1\ \mu\text{m}$, 包括晶格银和次显微包体银(Yi Y et al., 2017; 康明和岳长成, 2020; 刘艳荣等, 2023b; 岳秋雨等, 2023; 徐进鸿等, 2024)。晶格银指的是那些以类质同象方式存在于矿物晶格之中的银, 而次显微包体银则通常被封闭或包裹在与银矿化紧密相关的硫化物矿物内部(Sharp and Buseck, 1993), 其尺寸微小至次显微级别, 难以直接通过常规显微方式观察到(Yi Y et al., 2017; 康明和岳长成, 2020; 刘艳荣等, 2023b)。本文整合以上划分方案, 提出银赋存状态主要包括独立银矿物、(次)显微包体银、离子吸附银、晶格银和有机质-银络合物(Yi Y et al., 2017; 康明和岳长成, 2020; 刘艳荣等, 2023b)。

4.1 热液型银矿床

前人利用 SEM-EDS、EPMA、TIMA 和 LA-ICP-MS 等研究手段查明了不同矿床中银的赋存状态。在热液型银矿床中, 银的赋存状态类型有独立银矿物、显微包体银、类质同象银和吸附银。其中, 最主要的赋存状态组合为独立银矿物、显微包体银和晶格银。

独立银矿物主要有辉银矿、硫锑铜银矿、深红银矿、硫砷铜银矿、银金矿、自然银等。但在不同的矿床中, 独立银矿物的类型以及含量占比有所不同。例如在二道河子矿床中, 独立银矿物主要为硫锑铜银矿, 辉银矿较少(刘艳荣等, 2023b); 西山湾羊场矿床(康明和岳长成, 2020)、董家坨矿床(杨睿娜等, 2020)、斯弄多矿床(施硕, 2018; 黄一人等, 2024)、黑龙江二道坎矿床(刘国卿等, 2020; Yuan M W et al., 2021)以及紫金山悦洋矿床(刘兰海等, 2024)中的独立银矿物以辉银矿为主; 在南当厂(贾泽晨等, 2024)矿床和哈拉胜 Ag-Pb-Zn 矿床(韩日等, 2020)中, 硫锑铜银矿和辉银矿均为主要独立银矿物。独立银矿物在矿床中常见有包裹银、粒间银、裂隙银三种嵌布形式。

显微包体银是从载银矿物中出溶形成的含银硫化物、硫盐矿物或者自然银, 属微纳米颗粒, 如自然银、硫银铋矿、辉锑银矿、辉锑银铅矿等(Sharp and Buseck, 1993; 李占轲等, 2010), 含量极少, 基本都被包裹于硫化物矿物中。

不同成矿元素组合、不同成矿阶段热液条件的改变对热液型银矿床中银的赋存状态具有明显影响。热液型矿床的成矿元素主要为 Pb-Zn-Ag±Cu±Bi 等, 热液中 Ag 和 Sb、Bi 进入硫化物(方铅矿、闪锌矿、黝铜矿等)替换金属离子(Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Cu^{2+} 等)形成晶格银(蒋柏昌等, 2015; 聂潇等, 2015), 如双尖子山矿床(吴冠斌等, 2014; 权晓莹等, 2019)和南当厂矿床(贾泽晨等, 2024)中, 前人在方铅矿中检测到较富的 Ag 和 Sb 以及少量的 Bi, 表明有少量的银矿物以类质同象的方式进入方铅矿中形成了晶格银; 此外, 在西山湾羊场矿床(康明和岳长成, 2020)中, 晶格银是由 Ag^{+} 部分置换 Cu^{+} 存在于二元铜硫化物中; 在拜仁达坝矿床中, 成矿元素组合为 Ag-Pb-Cu-Zn, 有相当含量的

Sb(Bi)存在,且 Ag^+ 与 Pb 和 Cu 在含量上呈密切正相关,因此,拜仁达坝矿床中晶格银可能是通过 Ag^+ 置换 Pb^{2+} 和 Cu^{2+} 的两种方式实现。此外,在福建紫金山悦洋矿床(刘兰海等, 2024)和黑龙江二道坎矿床(刘国卿等, 2020; Yuan M W et al., 2021)中没有或很少发现富含 Sb 和 Bi 的矿物,没有电价补偿, Ag^+ 无法进入方铅矿中形成晶格银。只有在闪锌矿中发现有少量的银且在电镜下未观测到包裹体,因此推定在闪锌矿中有晶格银的存在。富锰银多金属矿床中锰的氧化物对 Ag^+ 具有较强吸附性,形成离子吸附银,如额仁陶勒盖矿床(吕志成等, 2002)和黑龙江二道坎矿床(刘国卿等, 2020),通过氯水浸泡实验证明了矿床中的锰氧化物吸附一定的 Ag,表明 Ag 以吸附态形式存在。

4.2 矽卡岩型银矿床

与热液型银矿床相比,在矽卡岩型银矿床中的银主要以独立银矿物和晶格银为主,并伴有少量(次)显微包体银,尚未发现离子吸附态银。

在冬瓜山(文雪华, 2023)、康家湾(公凡影等, 2011)、柿竹园(吴胜华等, 2020)、甲玛(胡正华等, 2011)、二道河矿床(杨俊声, 2021)以及尕斯库勒铜金矿床(王友, 2011)中,银均以独立矿物形式存在,包括银金矿、银黝铜矿、深红银矿、硫银铋矿、辉银矿以及自然银等。该类型银矿床中独立银常以裂隙银嵌布于硫化物的裂隙、孔隙、晶隙中(王友, 2011; Chen C et al., 2021)。由于成矿元素组合或流体中组分的差异,晶格银在矽卡岩型银矿床中的载体矿物存在一定区别,如广东石寨矿床成矿元素以 Ag-Pb 为主,晶格银主要赋存在方铅矿中(南争路等, 2019);个旧卡房矿床成矿元素以 Ag-Cu-Fe-Bi 为主,晶格银主要赋存于自然铋、黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿等矿物中(李国清和张学书, 2008);而甲玛矿床以 Ag-Cu 组合为主,晶格银与铜矿物关系密切,主要赋存在黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿以及铜蓝等矿物中(胡正华等, 2011)。(次)显微包体银在矽卡岩型银矿床中主要以自然银、硫银铋矿、辉银矿等显微颗粒包裹于黄铁矿、方铅矿、黄铜矿、斑铜矿等硫化物中。

4.3 海相火山岩型银矿床

海相火山岩型银矿床中银的赋存状态主要为

独立银矿物及少量(次)显微包体银。海相火山沉积型银矿床一般形成于岛弧、裂谷构造环境,赋存于海相火山岩系中,成矿元素组合以 Ag-Pb-Cu-Au-Fe 为主,多形成于低温、氧化、酸性至中性的高硫热液流体环境中(Gill et al., 2019)。成矿流体性质改变对海相火山岩型银矿床中银赋存状态具有明显控制作用,大气降水的加入使得成矿流体温度、压力降低,促使流体中 Ag^+ 与阴离子结合形成大颗粒独立银矿物。海相火山岩型银矿床中独立银矿物主要为含硫锑铜银矿、辉银矿、银金矿以及自然银等,如在湖北银洞沟矿床(赵欣, 2022),独立银矿物常以细脉状充填于其他矿物的裂隙或粒间,亦或呈颗粒状被包裹于硫化物中;白玉县呷村富 Cu、Pb 的银矿床中的独立银矿物主要产于黝铜矿和方铅矿矿物粒间(朱裕生等, 2002);甘肃小铁山矿床(赵海军和张青草, 2020)伴生 Pb-Zn,独立银矿物则常产于闪锌矿粒间或沿方铅矿的解理产出,同时,可形成少量显微包体银包裹于黝铜矿和方铅矿等硫化物中;云南老厂矿床富 Pb,独立银矿物与富铅矿物密切相关,常与方铅矿、车轮矿、硫锑铅矿等矿物紧密共生(赵月华, 2022);因海相火山岩型银矿床中通常缺乏 Sb(Bi),因而在方铅矿中少有晶格银出现,但是在四川呷村矿床中,成矿元素组合为 Ag-Pb-Zn-Cu,极少量的 Ag^+ 与 Cu^{2+} 化学性质相似,从而直接替换 Cu^{2+} 进入黝铜矿和斑铜矿等二元铜硫化物中形成晶格银。整体上,海相火山岩型银矿床中银常以独立银矿物形式与方铅矿、黝铜矿伴生,与热液型银矿床和矽卡岩型银矿床相比,该类矿床少见晶格银形式。

4.4 陆相火山-次火山岩型银矿床

陆相火山岩-次火山岩型银矿床中银主要以独立银矿物为主,晶格银和显微包体银较少(李朝阳等, 2003)。

陆相火山-次火山岩型银矿床中独立银矿物以辉银矿、螺状硫银矿、深红银矿、硫锑铜银矿、自然银等为主,具体矿物组成与成矿阶段密切相关。成矿早阶段银含量较低,形成矿物颗粒较小的显微包体银,成矿晚阶段析出大量银,从而使得银以较大颗粒的独立矿物出现,如福建吉花矿床、

银山矿床、冷水坑银矿床中银均以独立银矿物为主(刘维阁, 1995; 卢燃等, 2012; 黄卫强等, 2022)。陆相火山岩-次火山岩型银矿床中晶格银相当少见, 只在铜厂矿床中出现, 主要赋存在黄铁矿和黄铜矿中(孙爱祥, 1996)。

陆相火山-次火山岩型银矿床成矿过程中经过火山-次火山岩岩浆活动, 火山热液分异、演化形成高温高压且含有大量成矿物质的热液, 常见的元素组合为 Ag-Pb-Zn(-Mo-Cu-Mn)。含矿热液普遍与围岩发生交代作用, 形成一系列独立银矿物, 成为该类型银矿中银的主要赋存状态。陆相火山-次火山岩型矿床中含有的 Sb 和 Bi 促进热液流体中少量 Ag^+ 与硫化物中阳离子(如 Pb^{2+} 、 Zn^{2+})发生类质同象置换形成晶格银。

4.5 沉积岩/变质岩型银矿床

沉积岩型银矿床通常与黑色页岩、碳酸盐岩以及其他有机质的沉积层共生。变质岩型银矿床是矿床在沉积作用形成后又经受了区域变质作用。沉积岩型银矿床中银主要以晶格银和独立银矿物形式存在, 少量银以(次)显微包体银、有机质-银络合物形式存在。变质岩型银矿床中银赋存形式主要以独立银矿物为主, 显微包体银次之。

沉积岩型银矿床中的元素组合通常为 Ag-Pb-Zn(-Cu-V-Fe-Mn), 矿床富 Se 时, 会形成硒银矿和硫硒银矿及其变种独立银矿物, 如白果园矿床(李方会等, 2014)。沉积型矿床成矿过程中银矿多形成于中晚期, 以湖北白果园矿床(谭满堂等, 2013; 李方会等, 2014)为例, 当流体由氧化态向还原条件转变时, 还原环境降低了 Ag^+ 的活度, 促使银沉淀并滞留在沉积物中, 发生富集并与围岩中还原态硫结合形成大量独立银矿物, 沉积岩型银矿床中的独立银矿物包括银黝铜矿、硫锑铅银矿、深红银矿、自然银等。此外, 在白果园矿床(李方会等, 2014)中, 水化学条件的改变以及有机质的演化、分解和吸附作用能够固定一部分银, 使银与有机质中 N、O、S 等官能团络合形成以有机质-银络合物。沉积型银矿床中晶格银主要通过占据方铅矿、黄铁矿的晶格格点形式出现, 如在陕西柞水银洞子(陈在劳, 2009)和西藏扎西康矿床(林彬等, 2013)中, 银主要赋存于方铅矿中, 而兴国县白果

园矿床(李方会等, 2014)中银则主要是进入黄铁矿的晶格中。变质岩型银矿床的元素组合为 Ag-Au-Pb-Zn-Cu, 成矿流体具有低盐度、低密度、中高温特征。岩层在区域变质作用下发生重熔作用, 产生的变质热液交代围岩形成变质岩。变质岩中的成矿元素被活化并被变质热液带出, 沿着构造薄弱带运移。在流体迁移过程中, 温度压力变化缓慢, 当发生明显水岩反应或混入大气降水, 导致流体温度、成分明显变化时, 则引发变质热液中的 Ag 络合物大规模沉淀, 发育大量独立银矿物, 如河南破山矿床(张静等, 2008)和辽宁青城子矿床(李毅等, 2008)的独立银矿物主要有辉银矿、深红银矿、银金矿、螺状硫银矿、自然银等, 构成了该类型银矿中银主要赋存状态。此外, 少量银以显微包体银的形式存在于方铅矿、闪锌矿和黄铁矿等硫化物中。

5 银的富集机制

银元素的迁移、沉淀与温度及压力的降低(Ni P et al., 2015; Zhu Y N and Peng J T, 2015; 王璇等, 2016)、流体混合或沸腾作用(张德会, 1997; Wei W F et al., 2012)、相态的变化以及水岩反应等过程密切相关(Ramboz et al., 1982; Chi G X and Xue C J, 2011; 刘艳荣等, 2023b)。研究表明, 银的沉淀机制复杂多样, 是多重因素联合影响的结果(Benning and Seward, 1996; 张德会, 1997; Stefansson and Seward, 2003), 主要控制因素包括含矿热液成分、温度、压力和酸碱度等(秦克章等, 2025)。

5.1 热液成分

在岩浆热液演化初期以低挥发分的熔体为主, 随着矿物结晶析出以及物理化学条件的改变, 岩浆开始变为富水的硅酸盐熔体, 最终在演化晚期形成富水热液流体。

在地壳深部, NaCl 是成矿热液体系内占主导地位的溶解性电解质盐, 同时, CO_2 、 NH_3 、 H_2S 、F、Cl、 HS^- 等关键溶质成分在热液化学环境中不仅调节着水解反应的平衡状态, 还显著影响着 Ag^+ 的迁移(徐剑南, 2023), 如 F、Cl、 HS^- 等挥发

分可与 Ag^+ 形成络合物促进其稳定迁移, 在银成矿过程中起到重要的作用 (Roedder, 1992; Seward et al., 2014; 徐剑南, 2023)。

在成矿热液运移过程中, 大气降水的加入和不同成分的流体混合作用会导致热液的温度、盐度以及 pH 和氧逸度等条件发生改变, 从而影响 Ag 的迁移和富集沉淀 (Gammons and Barnes, 1989; Hedenquist, 1991; Stefansson and Seward, 2003; Yuan M W et al., 2019; 徐剑南, 2023)。此外, 成矿流体与围岩发生的水岩反应对成矿流体性质及组分也有明显影响, 是银富集成矿的主要控制因素, 如矽卡岩型银矿床和低温热液型银矿床 (李占轲等, 2010; 卢燃等, 2012; 回凯旋等, 2021; Zhai D G, 2023)。

5.2 热液温度和压力

热液的温度和压力是影响银迁移和沉淀的重要因素。银倾向于在最远端的晚期低温阶段沉淀 (回凯旋等, 2021)。在最初的岩浆中, 金属元素如 Pb、Zn、Ag、Cu 等以离子的形式存在于热液中, 随着温度和压力的降低, 金属离子与热液流体中的挥发分 Cl^- 一起出溶形成银的氯络合物在热液中运移 (Roedder, 1992)。当温度和压力降低至超出氯络合物稳定温压范围之后, 氯络合物会发生解体, 其释放的银离子则与热液中的 HS^- 结合形成硫氢络合物继续在热液中运移 (Seward, 1984; Ruaya and Seward, 1986; 李占轲等, 2010; 赵欣, 2022; 刘兰海等, 2024)。随着热液持续向地表迁移, 进入断裂构造时, 温度压力进一步降低, Pb、Zn 等金属离子的硫氢络合物变得不稳定, 开始解离甚至开始沉淀富集 (李占轲等, 2010; 刘艳荣等, 2023a; 徐剑南, 2023; 刘兰海等, 2024; 徐进鸿等, 2024), 此过程会析出黄铁矿、闪锌矿、方铅矿和黄铜矿等硫化物。由于银的硫氢络合物在此环境中的溶解度偏大, 因此只有少量 Ag 解离, 大部分银仍以硫氢络合物的形式在热液中迁移 (尚林波等, 2003; 徐剑南, 2023), 造成银和铅、锌的分离。在此高温条件下, 分解出的部分 Ag^+ 倾向于与 Sb (Bi) 一起置换 Pb, 在方铅矿中形成晶格银 (Foord and Shawe, 1989; 刘兰海等, 2024), 或者与热液中的其他金属离子结合形成显微包体银, 并

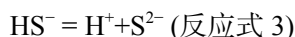
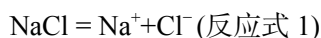
被同期沉淀的硫化物所捕获 (李占轲等, 2010)。当温度压力继续降低, 银的硫氢络合物发生大规模解离, 当热液中的 Ag^+ 达到饱和状态时, 会直接置换早期形成硫化物中的金属阳离子, 从而形成含银量较低的晶格银。同时, 热液中的银离子会交代早期硫化物, 形成颗粒较小、含量较低的显微包体银 (李壮等, 2017; 徐剑南, 2023)。随着富矿热液继续运移, 温度与压力的持续降低, 硫化物持续析出, 热液中剩余的 $\text{Ag}(\text{HS})_2^-$ 络合物迅速分解 (Gammons and Barnes, 1989; 刘艳荣等, 2023a), 导致 Ag^+ 浓度渐趋饱和, 最终与热液中残余阴离子结合, 生成颗粒较大的独立银矿物, 如辉银矿, 甚至是自然银等独立银矿物 (康明和岳长成, 2020; 赵欣, 2022; 刘艳荣等, 2023a; 徐剑南, 2023; 徐进鸿等, 2024)。其中, 自然银的出现意味着银的矿化富集沉淀过程结束 (李壮等, 2017)。

由热液流体的压力快速降低导致的沸腾作用和由热液流体的温度快速降低导致的流体冷却作用也影响银的迁移和沉淀富集 (Hedenquist, 1991; Yuan M W et al., 2019)。沸腾作用会使大量挥发性组分 (如 CO_2 、 H_2S) 进入液相, 导致液相中金属元素浓度迅速升高甚至局部达到饱和, 沸腾作用会形成显微包体银甚至是独立银矿物。冷却作用导致温度持续降低, 热液流体中络合物溶解度降低, 从而改变热液流体中银的饱和度 (张德会, 1997; Cook et al., 2009)。总之, 温度和压力主要通过影响银的迁移形式、溶解度、化学反应、赋存状态等来协同控制银的迁移、富集和沉淀, 高温高压下银在热液流体中稳定迁移, 而压力的降低使热液中挥发分逸出从而导致热液中 Ag^+ 饱和度发生变化, 温度降低改变了络合物溶解度, 使银矿物发生沉淀。

5.3 热液酸碱度

酸碱度是影响银离子迁移的另一重要因素。银离子主要以络合物的形式在多样化的热液流体中迁移 (Stefansson and Seward, 2003; Simon et al., 2008; 李敏同等, 2018; 刘国卿等, 2020; 刘艳荣等, 2023b)。在偏酸性流体中, 银主要以氯络合物形式存在, 而在偏碱性流体中则主要以硫氢络合物的形式迁移 (Seward, 1976; Ruaya and Seward,

1986; Stefansson and Seward, 2003; 尚林波等, 2004; 刘艳荣等, 2023b)。迁移过程的反应式如下:



此外, 热液流体的酸碱度同样控制着银的沉淀富集过程。在热液沿断裂构造迁移时, 由于压力骤降发生沸腾作用, 释放大二氧化碳, 使热液的 pH 值升高, 造成银的氯络合物解体, 并富集沉淀 (Seward, 1984; Ruaya and Seward, 1986; 李占轲等, 2010; 赵欣, 2022; 刘兰海等, 2024)。同时, H_2S 与 HCl 在热液流体中通过解离释放 H^+ 和 Cl^- (反应式 1、2), H^+ 在迁移过程中与围岩发生水岩反应引发诸如绢云母化、硅化以及黄铁矿化等一系列的蚀变 (张德会, 1997; 徐剑南, 2023; 刘兰海等, 2024)。该过程不断消耗 H^+ 并提高 HS^- 浓度 (反应式 2), 使得流体中的银离子与硫氢离子结合, 迁移形式由氯络合物为主演变为以硫氢络合物为主 (康明和岳长成, 2020; 刘艳荣等, 2023b; 徐剑南, 2023; 徐进鸿等, 2024)。

在成矿热液继续向上运移进入断裂构造后, 随着铅锌等金属离子的析出, 体系中 S^{2-} 浓度骤减, 推动反应式 (3) 正向进行, 热液 pH 值降低, 且温度持续降低。这一系列变化导致银的硫氢络合物稳定性减弱, 发生局部解离, 部分银离子与热液中的阴离子结合沉淀出独立银矿物 (反应式 4、5) (康明和岳长成, 2020; 刘艳荣等, 2023b)。最终, $\text{Ag}(\text{HS})_2^-$ 完全解体 $[2\text{Ag}(\text{HS})_2^- = \text{Ag}_2\text{S} + \text{H}_2\text{S} + 2\text{HS}^-]$, Gammons and Barnes, 1989] 或者分解出的 Ag^+ 离子与流体中残余 H_2S 进一步反应, 生成 Ag_2S 并释放 H^+ ($2\text{Ag}^+ + \text{H}_2\text{S} = \text{Ag}_2\text{S} \downarrow + 2\text{H}^+$, 尚林波等, 2003), 生成辉银矿 (刘艳荣等, 2023b)。

6 结论

本文通过系统总结分析中国不同类型银矿床中银的赋存状态以及富集机制, 主要取得如下认识:

(1) 银赋存状态主要与银矿床成因类型密切

相关, 热液型银矿床中银以独立银矿物为主, 晶格银次之; 海相火山岩型银矿床中银以独立银矿物和晶格银为主; 陆相火山-次火山岩型银矿床中银以独立银矿物为主; 矽卡岩型银矿床中银以晶格银为主, 独立银矿物和显微包体银次之; 沉积岩型和变质岩型银矿床中银以晶格银和独立银矿物为主, 少量银为有机态形式。此外, 银赋存状态还受区域地球化学条件、成矿元素组合和成矿条件的影响。

(2) 流体成分、温度、压力、酸碱度等条件是控制银富集沉淀的关键因素。流体中挥发分 (F 、 Cl 、 HS^-) 利于 Ag^+ 的迁移, 温度、压力降低、pH 值升高促使银富集沉淀, 并影响银的赋存状态。

参考文献:

- 陈公正, 武广, 李振祥, 杨飞, 李士辉, 易慧能, 李英雷. 2023. 内蒙古敖包特银多金属矿床成矿作用: 来自锆石和锡石 U-Pb 年龄的约束 [J]. 岩石学报, 39(6): 1771-1790.
- 陈平波, 宛克勇, 桂祁零. 2023. 湖南水口山矿田康家湾铅锌矿床地质特征及找矿思路 [J]. 矿产与地质, 37(2): 220-227.
- 陈毓川, 王登红, 李厚民, 等. 2010. 重要矿产预测类型划分方案 [M]. 北京: 地质出版社, 1-222.
- 陈在劳. 2009. 陕西柞水银洞子银多金属矿床基本地质特征 [J]. 矿产与地质, 23(6): 519-523.
- 丁腾, 马东升, 陆建军, 章荣清, 谢银财. 2016. 湖南宝山矿床花岗岩类硫-铅同位素和流体包裹体研究及其成因意义 [J]. 矿床地质, 35(4): 663-676.
- 符安宗, 李成禄, 石国明, 杨文鹏, 杨元江, 郑博, 李金明. 2024. 黑龙江多宝山地区晚泥盆世 A 型花岗斑岩年代学、地球化学特征及其地质意义 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 54(3): 811-827.
- 高建京, 毛景文, 陈懋弘, 叶会寿, 张继军, 李永峰. 2011. 豫西铁炉坪银铅矿床矿脉构造解析及近矿蚀变岩绢云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄测定 [J]. 地质学报, 85(7): 1172-1187.
- 公凡影, 李永胜, 甄世民, 巩小栋, 贾德龙, 杜泽中, 齐钊宇, 何鹏. 2011. 康家湾铅锌金银矿床地质特征 [J]. 矿物学报, 31(S1): 477-478.
- 谷子成, 龙灵利, 王玉往, 祝新友, 李顺庭, 王新雨, 童海奎, 马财, 代岩. 2021. 东昆仑那更康切沟银多金属矿床晚二叠世流纹斑岩年代学和地球化学特征研究 [J]. 矿产勘查, 12(4): 919-933.
- 韩日, 秦克章, 回凯旋. 2020. 额尔古纳南段哈拉胜 Ag-Pb-

- Zn矿床地质特征及银的赋存状态[C]. 2020年中国地球科学联合学术年会论文集(四),重庆:318.
- 胡正华,唐菊兴,丁枫,郑文宝,邓世林,杨毅,张志,王艺云,林彬,丁帅.2011.西藏甲玛铜多金属矿富银矿体地质特征、银赋存状态及富集机理研究[J]. 地球学报,32(6):668-680.
- 黄卫强,侯海峰,杜庆安,高小雷,何世军.2022.福建吉花银矿床矿石特征及银的赋存状态[J]. 矿产与地质,36(3):541-546.
- 黄一入,唐菊兴,杨宗耀,钟庆伟,张鹏.2024.西藏斯弄多银多金属矿床典中组板岩地球化学特征及地质意义[J]. 沉积与特提斯地质,44(4):710-722.
- 回凯旋,秦克章,韩日,赵俊兴,王乐,高燊,张夏楠.2021.岩浆热液型银矿床、银矿省及形成的控制因素[J]. 岩石学报,37(8):2502-2520.
- 贾泽晨,任涛,黄建国,管申进.2024.滇东南南当厂银多金属矿床银的赋存状态[J]. 矿物学报,2024,44(6):825-834.
- 江彪,陈毓川,王成辉,张大权,白鸽.2015.中国银矿床成矿系列与成矿谱系初探[J]. 矿床地质,34(6):1295-1308.
- 江彪,王登红,王岩,刘榆,黄凡,王成辉,李楠,武利文,张彤,唐增才,叶泽富,秦海燕,靳皇玉,冯德臣,缪仁谷,张荣臻.2025.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,46(1):35-51.
- 江彪,张通,王登红,陈毓川,张大权,黄崇轲,白鸽,王成辉,黄凡.2020.中国银矿床地质控矿规律及若干找矿方向[J]. 地质学报,94(1):113-126.
- 江思宏,聂凤军.2001.甘肃南金山金矿床的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 同位素年龄及其地质意义[J]. 矿物岩石地球化学通报,20(4):344-347.
- 蒋柏昌,韦银泽,刘苏桥,刘融涛,杨锋.2015.桂西那弱银金矿床矿物组合特征及银和金的赋存状态研究[J]. 矿床地质,34(4):786-800.
- 蒋少涌,李亮,朱碧,丁昕,姜耀辉,顾连兴,倪培.2008.江西武山铜矿区花岗岩闪长斑岩的地球化学和Sr-Nd-Hf同位素组成及成因探讨[J]. 岩石学报,24(8):1679-1690.
- 康明,岳长成.2020.内蒙古西山湾羊场银多金属矿床银的赋存形式及成矿机理[J]. 岩石学报,36(11):3363-3379.
- 李舒.1996.中国银矿床主要类型及矿床特征[M]. 北京:地震出版社.
- 李毅,郑吉凯,衣庆利,刘德军.2008.青城子矿田杨树金银多金属矿床地质特征及找矿方向[J]. 有色矿冶,24(4):2-4+7.
- 李壮,郎兴海,丁帅,李海峰,杨宗耀,施硕,王立强,李于海.2017.西藏斯弄多浅成低温热液型银铅锌矿床银的赋存状态研究[J]. 地球学报,38(5):687-701.
- 李朝阳,刘铁庚,叶霖,朱维光,邓海琳.2003.我国与火山岩有关的大型、超大型银矿床[J]. 中国科学(D辑:地球科学),32(S2):69-77.
- 李方会,杨刚忠,姚燕,廖宗明,刘圣德,何洪涛,田德昌.2014.湖北省兴山县白果园银钒矿床基本特征及成矿模式[J]. 资源环境与工程,28(3):246-251+256.
- 李国清,张学书.2008.个旧卡房矿田锡-铜矿床伴生金(银)矿赋存状态及其富集规律[J]. 矿产与地质,22(4):289-292+305.
- 李浩然.2021.青海柴达木盆地周缘显生宙陆相火山岩区多金属成矿作用研究[D]. 吉林大学博士学位论文,200-221.
- 李敏同,陈晓东,许远平,谢万洪,周洪兵,孙崇波,刘宏.2018.东昆仑那更康切沟银矿床银矿物特征及成矿元素沉淀机制浅析[J]. 地质论评,64(3):723-736.
- 李晓峰,陈文,毛景文,王春增,谢桂青,冯佐海.2006.江西银山多金属矿床蚀变绢云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄及其地质意义[J]. 矿床地质,25(1):17-26.
- 李占轲,李建威,陈蕾,张素新,郑曙.2010.河南洛宁沙沟Ag-Pb-Zn矿床银的赋存状态及成矿机理[J]. 地球科学,35(4):621-636.
- 林彬,唐菊兴,郑文宝,冷秋锋,王艺云,刘敏院,杨欢欢,丁帅,张立华,杨红章.2013.西藏扎西康锌多金属矿床地质特征及银的赋存状态研究[J]. 矿床地质,32(5):899-914.
- 刘训,李廷栋,耿树方,游国庆.2012.中国大地构造区划及若干问题[J]. 地质通报,31(7):1024-1034.
- 刘国卿,彭晓蕾,李津萍.2020.黑龙江省二道坎银矿床银的赋存状态及矿床成因[J]. 黄金,41(2):12-19.
- 刘兰海,陈静,周涛发,孙艺,WHITE Noel C.2024.福建紫金山矿田悦洋银多金属矿床银的赋存状态和沉淀机制[J]. 岩石学报,40(3):987-1002.
- 刘维阁.1995.银山多金属矿床伴生金银赋存状态及综合回收[J]. 新疆有色金属,(1):1-6.
- 刘艳荣,关强兵,张海东,周群军,党顺安.2023a.大兴安岭西坡二道河子铅锌矿床硫化物Rb-Sr、锆石U-Pb年龄及其对构造背景的制约[J]. 地质通报,42(11):1843-1853.
- 刘艳荣,关强兵,刘民武,闫晓儒,黄凡.2023b.大兴安岭西坡二道河子铅锌银矿床银的赋存状态、迁移形式及沉淀机制[J]. 地质学报,97(10):3363-3381.
- 卢燃,毛景文,高建京,苏慧敏,郑佳浩.2012.江西冷水坑矿田下鲍Ag-Pb-Zn矿床地质特征及银的赋存状态研究[J]. 岩石学报,28(1):105-121.

- 吕志成,张培萍,段国正,郝立波,董广华.2002.内蒙古额仁陶勒盖银矿床锰矿物的矿物学初步研究[J].矿物岩石,22(1):1-5.
- 孟元库,马士委,许志琴,陈希节,马绪宣.2018.冈底斯带甲玛矿区花岗斑岩类年代学、地球化学及岩石成因[J].地球科学,43(4):1142-1171.
- 南争路,梁金龙,毛世东,冼源宏.2019.广东石寨铅锌多金属矿地质特征及元素赋存状态[J].东华理工大学学报(自然科学版),42(1):37-44.
- 聂潇,尹京武,陈浦浦,王梦亚,闫星光,张寿庭.2015.河南栾川赤土店西沟铅锌银矿床中银矿物的赋存状态及成矿机理探讨[J].矿物岩石地球化学通报,34(1):184-190.
- 潘昭帅,张照志,车东,张涛,张兰英,杨巍.2024.中国银矿资源特征及新能源背景下需求分析[J].中国地质,51(5):1554-1569.
- 齐有强,胡瑞忠,李晓峰,冷成彪,刘燊,武丽艳,刘瑞.2015.江西冷水坑 Ag-Pb-Zn 矿田闪锌矿矿物化学特征及赋矿铁锰碳酸盐层成因背景制约[J].矿物学报,35(2):136-146.
- 秦克章,韩日,回凯旋,李真真,阚靖,王乐,高燊,赵俊兴.2025.中国银矿床类型、时空分布与找矿远景[J].岩石学报,41(2):383-415.
- 权晓莹,刘春花,孙洪军,王丰翔.2019.内蒙双尖子山 Pb-Zn-Ag 矿床金属矿物学研究及银的富集机理[J].地质学报,2019,93(9):2308-2329.
- 尚林波,樊文苓,邓海琳.2003.热液中银、铅、锌共生分异的实验研究[J].矿物学报,23(1):31-36.
- 尚林波,樊文苓,胡瑞忠,邓海琳.2004.热液中铅、锌、银共生分异的热力学探讨[J].矿物学报,24(1):81-86.
- 施硕.2018.西藏斯弄多浅成低温热液型银铅锌矿床银的赋存状态研究[D].成都理工大学硕士学位论文.
- 孙爱祥.1996.江西铜厂铜矿床伴生金银的赋存状态及其分布规律[J].地质与勘探,32(1):29-32.
- 孙鹏程,李超,周利敏,屈文俊,王登红,高兰,李伟,李欣蔚,赵鸿,杜安道.2021.云南金顶铅锌矿成矿时代厘定:来自沥青 Re - Os 同位素证据[J].地球科学,46(12):4247-4259.
- 谭满堂,丁振举,姚书振,宫勇军.2013.鄂西白果园银钨矿床地球化学特征与成矿作用[J].地质科技情报,32(2):50-57.
- 陶思源,马星华.2022.湖南柿竹园超大型 W-Sn-Mo-Bi 矿床研究进展与主要科学问题[J].矿物学报,42(6):793-806.
- 田京,李进文,王润和,刘文,向安平,康永建,郭志军,董旭舟.2014.内蒙古额仁陶勒盖地区侵入岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地球化学特征[J].中国地质,41(4):1092-1107.
- 王登红,应立娟,王成辉,陈郑辉,许建祥,曾载淋,陈毓川,徐珏,白鸽.2007.中国贵金属矿床的基本成矿规律与找矿方向[J].地学前缘,14(5):71-81.
- 王静纯,陈民扬,肖孟华.1994.中国银矿床的时空分布[J].华北地质矿产杂志,9(1):111-116.
- 王静纯,简晓忠.1996.银的赋存特征研究[J].有色金属矿产与勘查,5(2):89-93.
- 王立立,陈祺,曾闰灵,欧阳永棚,李增华,杨立飞.2024.江西省冷水坑斑岩型矿床控矿地质体三维地质特征[J].华南地质,40(3):504-518.
- 王璇,王旭东,袁顺达,江雨彤,何薇.2016.赣南荡坪石英脉型黑钨矿床成矿流体研究[J].矿物岩石地球化学通报,35(3):534-539.
- 王友.2011.西藏革吉县尕尔穷铜金矿床矿石特征研究[D].成都理工大学硕士学位论文.
- 文雪华.2023.安徽铜陵冬瓜山铜矿床主成矿元素及伴生金银的赋存状态研究[J].四川地质学报,43(2):243-246.
- 吴冠斌,刘建明,曾庆栋,刘铭涛,孙华山,尹占文,尹潇.2014.内蒙古双尖子山铅锌银矿床银的赋存状态及其指示意义[J].地学前缘,21(5):105-115.
- 吴胜华,孙冬阳,李军.2020.柿竹园和香炉山 W 多金属矿床中硫化物微量元素特征:来自原位 LA-ICP-MS 分析[J].岩石学报,36(1):245-256.
- 郝爱华,蔡元峰,葛玉辉,孙国胜,李碧乐.2008.四平山门 Cu-Ni 矿化辉长岩体锆石 LA-ICP-MS 年龄及其地质意义[J].矿床地质,27(1):57-63.
- 奚牲.2012.中外银矿资源现状分析[J].世界有色金属,(6):60-63.
- 肖荣,李晓峰,王翠云,韦星林,白艳萍.2016.江西德兴地区朱砂红斑岩铜矿成岩成矿年代学特征及其地质意义[J].地球科学与环境学报,38(1):55-65.
- 徐剑南.2023.热液体系中银的赋存状态及其迁移机制研究——以华北克拉通南缘中河银铅锌矿床为例[D].中国地质大学(武汉)博士学位论文.
- 徐进鸿,吴承泉,张正伟,姜玉平,胡书礼,郑超飞,李溪遥,靳子茹.2024.豫西铁炉坪银铅矿床银的赋存状态和富集机制研究[J].矿物岩石地球化学通报,43(2):352-371.
- 杨梅,孙景贵,王忠禹,赵世峰,刘晨,冯洋洋,任泽宁.2017.大兴安岭西坡甲乌拉铜银铅锌矿床富碱花岗斑岩的成因及其地质意义:锆石 U-Pb 定年和地球化学特征[J].吉林大学学报(地球科学版),47(2):477-496.
- 杨俊声.2021.内蒙古二道河铅锌银多金属矿床成岩成矿

- 作用[D]. 中国地质大学(武汉)博士学位论文,77-87.
- 杨睿娜,纵瑞,杨东潮.2020.豫西董家塄银矿床银的赋存状态研究[J]. 矿床地质,39(3):486-500.
- 袁丽巧.2015.中国银矿资源特点及潜力分析[J]. 地质论评,61(S1):577-578.
- 岳秋雨,翟德高,赵刚,赵青青,贺根文,刘家军.2023.江西牛形坝-柳木坑银金多金属矿床银矿物与银的赋存状态[J]. 矿物学报,43(3):311-324.
- 张静,杨艳,鲁颖怀,陈衍景,万守全,马宏卫.2008.河南破山银矿床地质地球化学特征及成因研究[J]. 中国地质,35(6):1220-1229.
- 张亮,杨卉芄,冯安生,赵军伟,谭秀民.2016.全球银矿资源概况及供需分析[J]. 矿产保护与利用,(5):44-48.
- 张春晖,李景春,刘斌.2006.中国银矿床分类[J]. 地质与资源,15(3):238-240.
- 张大权,江彪,王登红,王成辉,陈毓川,白鸽.2015.中国银矿的资源特征及成矿规律概要[J]. 地质学报,89(6):1008-1025.
- 张德会.1997.成矿流体中金属沉淀机制研究综述[J]. 地质科技情报,16(3):54-59.
- 赵欣.2022.湖北银洞沟银矿床银的赋存状态及成矿机理[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文,27-59.
- 赵海军,张青草.2020.小铁山多金属矿床伴生金银赋存状态研究[J]. 甘肃冶金,42(6):97-100.
- 赵月华.2022.云南个旧老厂锡铜多金属矿床地球化学特征及找矿意义[D]. 中国地质大学(武汉)博士学位论文,105-110.
- 周卫宁.1994.中国主要伴(共)生银矿床银的赋存状态研究[J]. 矿产与地质,8(4):233-244.
- 朱峰,李文博,胡传胜.2017.南秦岭银洞沟银金矿床矿相学与成矿时代[J]. 矿物学报,37(4):386-394.
- 朱维光,李朝阳,邓海琳,张文兰,侯国富,许远平,李金忠,李静.2002.呷村银多金属块状硫化物矿床银的赋存状态[J]. 矿床地质,21(4):399-407.
- 朱维光,李朝阳,邓海琳.2001.四川西部呷村银多金属矿床硫铅同位素地球化学[J]. 矿物学报,21(2):219-224.
- 朱裕生,刘亚玲,宋国耀.2002.我国银矿床的时空分布及演化规律[J]. 矿床地质,21(S1):326-329.
- Benning L G, Seward T M. 1996. Hydrosulphide complexing of Au (I) in hydrothermal solutions from 150–400 °C and 500—1500 bar[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(11): 1849-1871.
- Boyle R. 1968. Geochemistry of silver and its deposits, with notes on geochemical prospecting for the element[M]. Geological survey of Canada.
- Cao H W, Pei Q M, Yu X, Santosh M, Li G M, Zhang L K, Zou H, Dong L, Gao K, Dai Z W, Ai J B, Lan S S, Xiang F, Cao A B. 2023. Discovery of the large-scale Eocene Xiwu Pb-Zn-Ag deposit in the Tethyan Himalaya: Geochronology, geochemistry, and C-H-O-S-Pb-Sr-Nd isotopes[J]. *Gondwana Research*, 124: 165-187.
- Chen C, Lv X B, Gun M S, Yang J S. 2021. Metallogenic chronology and tectonic setting of the Erdaohé Pb-Zn-Ag deposit in Inner Mongolia, NE China: Constraints from sphalerite Rb-Sr dating, zircon U-Pb dating, and Hf isotope analysis[J]. *Ore Geology Reviews*, 134: 104067.
- Chi G X, Xue C J. 2011. An overview of hydrodynamic studies of mineralization[J]. *Geoscience Frontiers*, 2(3): 423-438.
- Cook N J, Ciobanu C L, Mao J W. 2009. Textural control on gold distribution in As-free pyrite from the Dongping, Huangtuliang and Hougou gold deposits, North China Craton (Hebei Province, China)[J]. *Chemical Geology*, 264(1-4): 101-121.
- Foord E E, Shawe D R., Daniel R. 1989. The Pb-Bi-Ag-Cu-(Hg) chemistry of galena and some associated sulfosalts; a review and some new data from Colorado, California and Pennsylvania[J]. *Canadian Mineralogist*, 27(3): 363-382.
- Gammons C H, Barnes H L. 1989. The solubility of Ag₂S in near-neutral aqueous sulfide solutions at 25 to 300 °C[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(2): 279-290.
- Gill S B, Piercey S J, Layne G D, Piercey G. 2019. Sulphur and lead isotope geochemistry of sulphide minerals from the Zn-Pb-Cu-Ag-Au Lemarchant volcanogenic massive sulphide (VMS) deposit, Newfoundland, Canada[J]. *Ore Geology Reviews*, 104: 422-435.
- Graybeal F T, Vikre P G. 2010. A Review of Silver-Rich Mineral Deposits and Their Metallogeny[M]. Society of Economic Geologists Special Publication.
- Hedenquist J W. 1991. Boiling and dilution in the shallow portion of the Waiotapu geothermal system, New Zealand[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(10): 2753-2765.
- Jiang B, Wang D H, Chen Y C, Zhang T, Pu X L, Ma W W, Wang Y, Wu G, Wu L W, Zhang T, Li X J, Yan J, Zuo Y S, Sun H J, Li Z Y. 2022. Classification, metallogenesis and exploration of silver deposits in Daxing'anling of

- Inner Mongolia and its adjacent areas[J]. *China Geology*, 5(4): 595-613.
- Jiang B, Zhang D Q, Wang D H, Wang C H, Chen Y C, Bai G. 2015. A Preliminary Review of Metallogenic Regularity of Silver Deposits in China[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 89(3): 1002-1020.
- Ni P, Wang X D, Wang G G, Huang J B, Wang T G. 2015. An infrared microthermometric study of fluid inclusions in coexisting quartz and wolframite from Late Mesozoic tungsten deposits in the Gannan metallogenic belt, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 65: 1062-1077.
- Ramboz C, Pichavant M, Weisbrod A. 1982. Fluid immiscibility in natural processes: Use and misuse of fluid inclusion data II. Interpretation of fluid inclusion data in terms of immiscibility[J]. *Chemical Geology*, 37(1-2): 29-48.
- Roedder E. 1992. Fluid inclusion evidence for immiscibility in magmatic differentiation[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(2): 5-20.
- Ruaya J R, Seward T M. 1986. The stability of chlorozinc (II) complexes in hydrothermal solutions up to 350 °C [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 50(5): 651-661.
- Seward T M, Williams-Jones A E, Migdisov A A. 2014. The Chemistry of Metal Transport and Deposition by Ore-Forming Hydrothermal Fluids[J]. *Treatise on Geochemistry*, Elsevier: 29-57.
- Seward T M. 1976. The stability of chloride complexes of Silver in hydrothermal solutions up to 350 °C[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 40(11): 1329-1341.
- Seward T M. 1984. The formation of lead (II) chloride complexes to 300 °C: A spectrophotometric study[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(1): 121-134.
- Sharp T G, Buseck P R. 1993. The distribution of Ag and Sb in galena: Inclusions versus solid solution[J]. *American Mineralogist*, 78(1-2): 85-95.
- Simon A C, Pettke T, Candela P A, Piccoli P M. 2008. The partitioning behavior of silver in a vapor-brine-rhyolite melt assemblage[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(6): 1638-1659.
- Stefansson A, Seward T M. 2003. Experimental determination of the stability and stoichiometry of sulphide complexes of silver(I) in hydrothermal solutions to 400[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(7): 1395-1413.
- U. S. Geological Survey. 2024. Mineral commodity summaries 2024[R]. Virginia, U. S. Geological Survey, 1-200.
- Wei W F, Hu R Z, Bi X W, Peng J T, Su W C, Song S Q, Shi S H. 2012. Infrared microthermometric and stable isotopic study of fluid inclusions in wolframite at the Xihuashan tungsten deposit, Jiangxi province, China[J]. *Mineralium Deposita*, 47(6): 589-605.
- Wu C Y, Bai G, Xu L M. 1993. Types and distribution of silver ore deposits in China[J]. *Mineralium Deposita*, 28(4): 223-239.
- Yang L F, Liu Z R, Li Z H, Ouyang Y P, Chen Q, Du B, Zhang R B, Zhang H J, Luo C W, Guo J. 2025. The Lengshuikeng porphyry type Ag-Pb-Zn-Cd deposit: Insights from magmatism-mineralization timing sequence, chemical composition and in-situ Pb isotope of sulfide[J]. *Ore Geology Reviews*, 177: 106460.
- Yi Y, Pi D H, Jiang S Y. 2017. Occurrence, source and enrichment mechanism of silver in black shale-hosted Baiguoyuan Ag-V ore deposit, Hubei Province, China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 183: 79-87.
- Yuan M W, Li L, Li C L, Li S R, Santosh M, Alam M, Hou Z Q. 2021. The genesis of bitumen and its relationship with mineralization in the Erdaokan Ag-Pb-Zn deposit from the Great Xing' an Range, northeastern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 139: 104464.
- Yuan M W, Li L, Li S R, Li C L, Santosh M, Alam M, Bao X B. 2019. Mineralogy, fluid inclusions and S-Pb-H-O isotopes of the Erdaokan Ag-Pb-Zn deposit, Duobaoshan metallogenic belt, NE China: Implications for ore genesis[J]. *Ore Geology Reviews*, 113: 103074.
- Zhai D G. 2023. Fluid-rock interactions leading to the formation of the epithermal Ag-Pb-Zn veins: A perspective of thermodynamic modeling[J]. *Fundamental Research*, 3(4): 570-578.
- Zhu Y N, Peng J T. 2015. Infrared microthermometric and noble gas isotope study of fluid inclusions in ore minerals at the Woxi orogenic Au-Sb-W deposit, western Hunan, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 65: 55-69.