

doi: 10.12029/gc20220907003

蒲秀浪, 江彪, 王登红, 王成良, 王文君, 龚庆杰, 王强, 陈玮, 马文文. 2025. 内蒙古苏莫查干敖包超大型萤石矿床中铅锌多金属矿脉的发现及对找矿的指示[J]. 中国地质, 52(4): 1204–1215.

Pu Xiulang, Jiang Biao, Wang Denghong, Wang Chengliang, Wang Wenjun, Gong Qingjie, Wang Qiang, Chen Wei, Ma Wenwen. 2025. Discovery of lead–zinc polymetallic veins and its implications for prospecting in the Sumochaganaobao supergiant fluorite deposit, Inner Mongolia[J]. Geology in China, 52(4): 1204–1215(in Chinese with English abstract).

内蒙古苏莫查干敖包超大型萤石矿床中铅锌多金属矿脉的发现及对找矿的指示

蒲秀浪^{1,2}, 江彪², 王登红², 王成良³, 王文君³, 龚庆杰¹, 王强³,
陈玮³, 马文文¹

(1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 3. 内蒙古翔振矿业集团有限责任公司, 内蒙古 乌兰察布 750306)

摘要:【研究目的】苏莫查干敖包超大型萤石矿床被认为是迄今世界范围内规模最大的单一萤石矿床,而近年来坑道工程揭露了较大规模的铅锌多金属矿脉,这表明其除了萤石矿外,可能还具有巨大的金属成矿潜力。基于新发现的铅锌多金属矿脉,查明其矿石矿物发育特征,探讨其矿物组成及元素时空演化规律和矿床成因类型,为深部多金属找矿预测提供依据,为区域上同类萤石矿床的深部多金属找矿提供参考。【研究方法】基于该矿区成矿条件和矿脉地质特征,结合矿相学研究和电子探针测试,对铅锌多金属矿脉特征及成因进行了探讨。【研究结果】该铅锌多金属矿脉呈脉状、透镜状和不规则状产出,矿石矿物主要是闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、黄铜矿、毒砂等,还含少量的辉铋矿、锡石、银黝铜矿等。矿石构造以浸染状、角砾状、网脉状为主,矿物结构主要有自形—半自形粒状、骸晶状、细脉状等。根据矿脉形态、矿石矿物的组合特征,结合电子探针分析,显示该多金属矿脉由上向下具有闪锌矿—黄铁矿—黄铜矿—毒砂—方铅矿—银黝铜矿中低温矿物组合→方铅矿—闪锌矿—黄铁矿—锡石—辉铋矿中高温矿物组合的分带特征;成矿元素分布具有随成矿深度的加深,中低温成矿元素含量呈减少趋势,中高温成矿元素呈增加趋势的特征。【结论】地质特征和矿石特征显示,铅锌多金属矿脉形成早于其周围的灰白色、浅褐色细晶状萤石。综合矿体发育特点、矿石矿物特征等,该铅锌多金属矿脉显示岩浆热液成因特点;矿脉稳定的延伸及成矿元素空间变化规律暗示苏—查矿区深部可能有较大规模的铅锌多金属矿脉产出。

关键词: 铅锌多金属矿脉; 萤石矿床; 深部找矿; 矿产勘查工程; 苏莫查干敖包; 内蒙古

创新点: 基于苏莫查干敖包矿区新发现的铅锌多金属矿脉,查明其矿石矿物发育特征,揭示其矿物组成及元素时空演化规律,探讨了矿床成因类型及找矿指示意义。

中图分类号: P618.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2025)04-1204-12

Discovery of lead–zinc polymetallic veins and its implications for prospecting in the Sumochaganaobao supergiant fluorite deposit, Inner Mongolia

收稿日期: 2022-09-07; 改回日期: 2022-10-26

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20221695、DD20190379、DD20160346)联合资助。

作者简介: 蒲秀浪,男,1997年生,硕士生,主要从事矿产普查与勘探工作; E-mail: 1334501926@qq.com。

通信作者: 江彪,男,1986年生,副研究员,主要从事银多金属矿床成矿作用及区域成矿规律研究; E-mail: jiangbiao334223@163.com。

PU Xiulang^{1,2}, JIANG Biao², WANG Denghong², WANG Chengliang³, WANG Wenjun³,
GONG Qingjie¹, WANG Qiang³, CHEN Wei³, MA Wenwen¹

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. Inner Mongolia Xiangzhen Mining Group Co., Ltd., Ulanqab 750306, Inner Mongolia, China)

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

[Objective] The Sumochaganaobao supergiant fluorite deposit is considered as the largest single fluorite deposit in the world. In recent years, large-scale polymetallic veins of lead and zinc revealed by tunnel engineering, this indicates that in addition to fluorite ores, the deposit may also have great potential for metal mineralization. Based on the newly discovered lead-zinc polymetallic vein, this paper found out its ore mineral development characteristics, discussed its mineral components, spatial and temporal evolve regulation of the elements and the genetic type of the deposit, which provide a basis for the prediction of deep polymetallic prospecting and provide a reference for the deep polymetallic prospecting of similar fluorite deposits in the region. **[Methods]** Based on the metallogenic conditions of study area and geological characteristics of the veins, combined with mineralogy study and electron probe test, this paper has discussed the characteristics and genesis of polymetallic veins of lead and zinc. **[Results]** The polymetallic veins of lead and zinc are veins, lenticular and irregular. The main ore minerals are sphalerite, galena, pyrite, chalcopryrite, arsenopyrite, and a small amount of bismuth, cassiterite, silverzoesite, etc. The ore structure focus on disseminated, brecciform and reticulated vein, and the mineral structure is mainly euhedral to semi-euhedral granular, skeleton crystal and veinlike, etc. According to the characteristics of vein pattern and the ore mineral combination, combined with electron microprobe analysis, it shows the polymetallic veins by down with sphalerite-pyrite-chalcopryrite-arsenopyrite-galena-silverzoesite low temperature mineral association → galena-sphalerite-pyrite-cassiterite-bismuthinite high mineral assemblage zoning features. With the deepening of mineralization depth, the content of low temperature mineralization elements decreases, while the content of high temperature mineralization elements increases. **[Conclusions]** Features of geological and ore show that the lead-zinc polymetallic veins formed earlier than surrounding fine crystalline fluorite the which in gray, light brown color. According to the ore-body development and mineral characteristics, the lead-zinc polymetallic vein shows magmatic hydrothermal genesis. The stable extension of the veins and the spatial variation of ore-forming elements suggest that there may be large-scale lead-zinc polymetallic veins in the deep of the Su-Cha ore area.

Key words: lead-zinc polymetallic veins; fluorite deposit; deep prospecting; mineral exploration engineering; Sumochaganaobao; Inner Mongolia

Highlights: Based on the newly discovered polymetallic veins of lead and zinc in Sumochaganaobao ore area, the development characteristics of ore minerals are ascertained, the mineral composition and the temporal and spatial evolution law of elements are revealed, and the genetic types of deposits and the indicative significance of ore prospecting are discussed.

About the first author: PU Xiulang, male, born in 1997, master candidate, engaged in the study of geology and mineral resources exploration; E-mail: 1334501926@qq.com.

About the corresponding author: JIANG Biao, male, born in 1986, associate researcher, mainly engaged in the study of metallogenic process and regional metallogenic regularity of silver polymetallic deposits; E-mail: jiangbiao334223@163.com.

Fund support: Supported by the projects of China Geological Survey (No.DD20221695, No.DD20190379, No.DD20160346).

1 引言

苏莫查干敖包超大型萤石矿床(图 1)位于四子王旗北部地区的苏木境内,地处中蒙边界,属于内蒙古苏林赫尔—白乃庙—锡林浩特 Fe-Cu-Al-

Pb-Zn 成矿带(徐志刚等, 2008; 李俊建等, 2016), 该矿床被认为是迄今全球范围已知规模最大的单一萤石矿床(李士勤, 1985; 《中国矿床发现史·内蒙古卷》编委会, 1996; 徐少康和殷友东, 2001; 聂凤军等, 2008)。随着区域找矿突破行动的开展, 区域内新

尤陶勒盖超大型铜金矿、查干苏布尔加大型铜钼矿等大型矿床(李俊建等, 2015)。值得一提的是, 南戈壁省奥尤陶勒盖超大型斑岩型铜金矿、哈拉莫图锡(钨)矿、哈尔陶勒盖银多金属矿等大型矿床均具有一定程度的萤石矿化(聂凤军等, 2010)。因此, 这对于中国境内该区域实现找矿突破具有重要参考价值。

苏莫查干敖包矿床的发现始于 20 世纪 60 年代, 区域地质详查工作始于 1975 年, 由原内蒙古地质局区域地质测量一队在该区进行了 1:20 万区域地质测量工作, 详查区域地层、岩浆活动以及矿点, 初步估算了该萤石矿床的矿石量为 171.6×10^4 t。1980—1987 年内蒙古自治区 102 地质队对该矿床的主要矿化地段进行了地质普查、详细勘查和勘探评价, 并重新估算了矿石储量为 2000×10^4 t, 使之成为迄今世界上已知规模最大的单一萤石矿床(李士勤, 1985; 《中国矿床发现史·内蒙古卷》编委会, 1996; 聂凤军等, 2008; 许东青, 2009)。该矿区至今已有 40 余年的开采时间, 早期为露天采矿, 未见大规模金属矿化现象; 随着后期转为坑采, 采掘工程揭露了较大规模的铅锌多金属矿脉。而这一重大的新发现, 为区域实现找矿突破提供了可能。

本文基于系统详细的野外地质考察, 结合室内岩矿鉴定和电子探针测试分析, 证实了苏莫查干敖包矿区 645、670 和 700 中段新发现的多条铅锌多金属矿脉中成矿元素种类繁多, 包括铅、锌、铁、铜、锡、铋、银、锑、碲等多种元素; 矿物种类丰富, 其矿物组成主要是闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、黄铜矿、毒砂等, 还含有少量的辉铋矿、锡石、银黝铜矿、硫碲铋矿等。此外, 研究该多金属矿脉矿物组合及成矿元素的垂向分布特征, 探讨了该矿脉的成因类型, 为该矿区深部多金属找矿预测提供依据, 同时对区域上同类型萤石矿多金属找矿具有重要借鉴意义。

2 区域地质背景

苏莫查干敖包矿床大地构造上位于中亚造山带(兴蒙造山带)东段, 夹持于索伦缝合线与二连浩特—贺根山深大断裂之间(王奎等, 1991; Chen et al., 2000; Xiao et al., 2003; Xu et al., 2013)。区域内出露地层主要有前寒武系艾力格庙群变质沉积岩、

下二叠统大石寨组火山—沉积岩、上侏罗统查干诺尔组火山岩、上白垩统沉积岩和第四系沉积物。其中, 下二叠统大石寨组为一套海相酸性—中酸性火山—沉积碎屑岩及碳酸盐岩建造, 呈北东方向展布, 总厚度大于 9.4 km(许东青等, 2009)。区域上经历强烈且多期构造活动, 褶皱和断裂带较发育。其中, 褶皱主要发生在加里东期和印支期, 表现为北东东向线性紧闭褶皱, 构成了区域构造的主体, 而断裂主要发生在印支期与燕山期。区域发育各个地质时代的中酸性侵入岩体, 主要呈岩基、岩株和岩群状侵入大石寨组火山—沉积岩、上侏罗统查干诺尔组火山岩中(聂凤军等, 2008)。自二叠纪起, 兴蒙造山带进入内陆造山过程, 发育强烈且频繁的构造、岩浆活动, 一系列构造运动和多期次岩浆成矿作用的叠加, 为包括苏莫查干敖包矿床在内的区域成矿提供了有利的成矿空间与丰富的物质基础(芮宗瑶等, 1994; 翟裕生等, 1999)。

3 矿床地质及多金属矿脉特征

3.1 矿床地质

苏莫查干敖包矿区出露地层主要是下二叠统大石寨组和第四系沉积物(图 1b)。下二叠统大石寨组是区域萤石矿床的主要赋矿围岩, 岩性以流纹斑岩、凝灰岩、凝灰熔岩、碳泥质板岩、大理岩和灰岩为主。苏莫查干敖包矿区大石寨组岩性以“顶板”的碳泥质板岩和“底板”的流纹斑岩为主。区内发育加里东晚期、海西期以及燕山期的侵入岩(许东青, 2009), 广泛发育石英脉、闪长玢岩脉和辉绿玢岩脉(聂凤军等, 2008; 许东青, 2009)。在矿区西北侧出露与萤石成矿关系极为密切的早白垩世卫境花岗岩体(锆石 U—Pb 年龄为 (138 ± 4) Ma, 聂凤军等, 2009), 岩体主要由中细粒似斑状花岗岩、钾长花岗岩和细粒花岗岩组成, 以岩基产出, 呈北北东方向展布。矿区的控矿构造是苏莫查干敖包压扭性断层, 为大石寨组第二岩性段(流纹斑岩)和第三岩性段(碳泥质板岩、透镜状灰岩)的层间断裂带(图 1b)。

苏莫查干敖包萤石矿体产出规模和几何形态完全受控于苏莫查干敖包压扭性断层, 整体上呈北东向展布, 局部呈反“S”型和“V”型(李士勤, 1985; 聂凤军等, 2008), 表现为品位稳定且连续性好的特

点,萤石成矿呈多期次多阶段的特征(聂凤军等, 2008; 许东青等, 2009)。矿区围岩蚀变以高岭土化为主,还发育矽卡岩化、硅化、绿泥石化、黄铁矿化、磁黄铁矿化、大理岩化等。该矿区脉石矿物主要有石英、方解石等,金属矿物主要有磁铁矿、黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、毒砂和锡石(聂凤军等, 2008; 许东青等, 2009)。

3.2 多金属矿脉特征

本次工作首次以苏莫查干敖包矿区井下 645、670 和 700 中段工程揭露的铅锌多金属矿脉为研究对象。645 和 670 中段的厚大萤石矿体内部均发育有约 1 m 宽的灰黑色富铅锌的多金属矿脉(图 2)。新发现的铅锌多金属矿脉与萤石主矿体均受控于苏莫查干敖包断裂带,萤石矿体充填于断裂带中,厚度随断裂带矿带变化于数米至 40 m,铅锌多金属矿脉呈脉状产于萤石矿体中,局部破碎。645 和 670 中段的铅锌矿脉与萤石矿体走向、倾向一致,为北东走向、北西倾向。中段 645 揭露的多金属矿脉宽大于 1 m,倾角约为 60°。中段 670 揭露较大的矿

脉宽度小于 1 m,倾角为 30°,该中段还揭露有约 1 m 长的铅锌矿脉(图 2)。700 中段揭露的多金属矿脉宽度约 5 cm,走向和倾向与 645 和 670 中段近一致。根据揭露部分的多金属矿脉形态特征,推测 645、670 和 700 中段的多金属矿脉在空间上具有延伸关系,向深部具有较大延伸。

此外,铅锌多金属矿脉的上边部约 1 m 处发育透镜状灰岩和矽卡岩(图 3a),二者不与铅锌多金属矿脉直接接触,其产状与铅锌多金属矿脉基本一致,厚约 20 cm,延伸方向长约 2 m,局部可见铅锌矿化的矽卡岩,铅锌矿呈浸染状分布于矽卡岩中。

4 样品与测试分析

本次研究测试所用的矿石样品采自于苏莫查干敖包矿区井下中段的铅锌多金属矿脉。采自 645 中段的矿石整体呈灰黑色(图 3b),块状构造,矿物自形程度较高,以自形—半自形、脉状结构为主,主要矿物有闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、萤石等。采自 670 中段的矿石(图 3c),角砾状构造,灰白色半透明

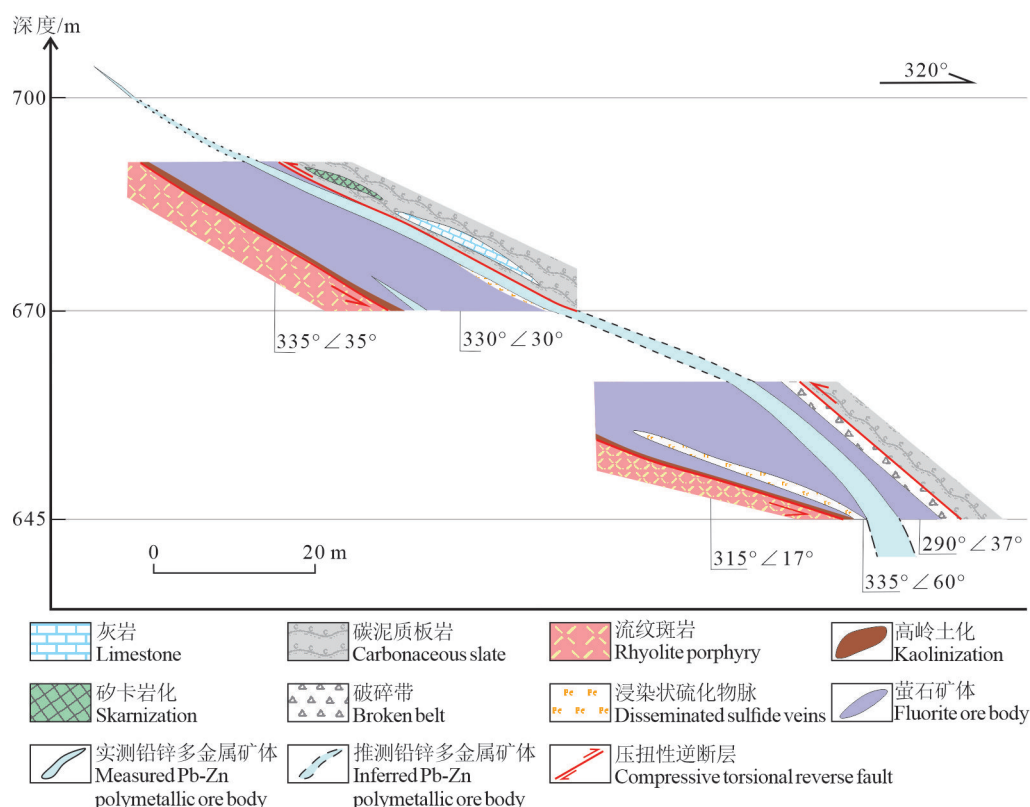


图 2 苏莫查干敖包矿区 645、670 和 700 中段铅锌多金属矿脉剖面示意图

Fig.2 Schematic diagram of lead-zinc polymetallic vein profile in middle 645, 670 and 700 of Sumochaganaobao ore area

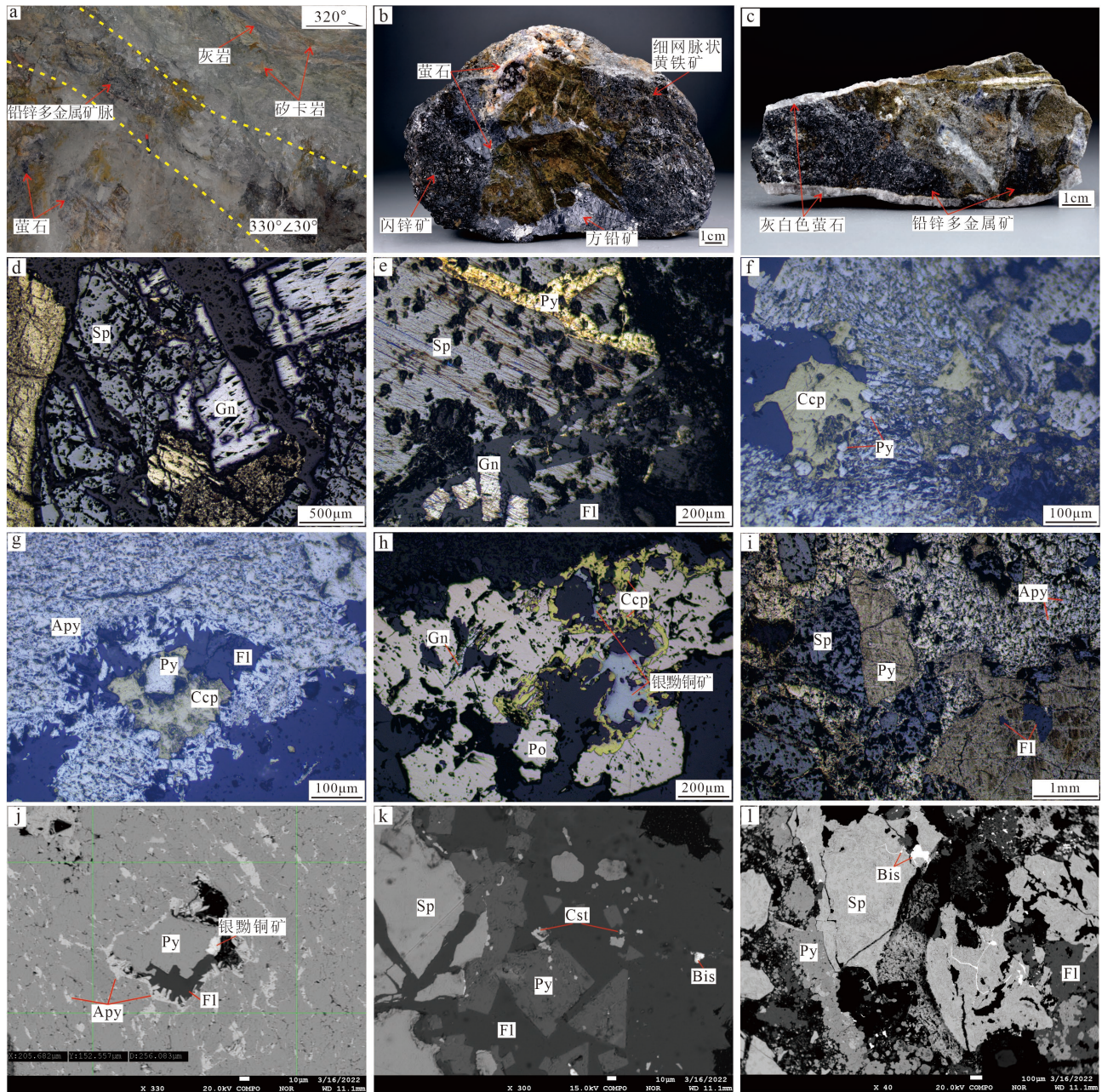


图 3 苏莫查干敖包矿区 645、670 和 700 中段揭露的多金属矿脉特征

a—670 揭露的铅锌矿脉局部图; b—方铅矿呈立方体晶形; c—灰白色萤石穿切黄铁矿; d—骸晶状方铅矿; e—黄铁矿脉状穿切闪锌矿; f—网脉状黄铜矿; g—骸晶状黄铁矿; h—银黝铜矿; i—多期次黄铁矿; j—骸晶状银黝铜矿; k—星点状锡石; l—辉铋矿; Apy—毒砂; Bis—辉铋矿; Ccp—黄铜矿; Cst—锡石; Fl—萤石; Gn—方铅矿; Po—磁黄铁矿; Py—黄铁矿; Sp—闪锌矿

Fig.3 Characteristics of polymetallic veins exposed in middle 645, 670 and 700 of Sumochaganaobao ore area

a—670 local map of exposed lead-zinc veins; b—Galena in cubic crystal form; c—Gray white fluorite cut through pyrite; d—Skeleton crystalline galena; e—Pyrite vein cut sphalerite; f—Reticulated chalcopyrite; g—Skeletal crystalline pyrite; h—Silver tetrahedrite; i—Multiple stages of secondary pyrite; j—Skeleton crystal silver tetrahedrite; k—Cassiterite; l—Bismuthinite; Apy—Arsenopyrite; Bis—Bismuthinite; Ccp—Chalcopyrite; Cst—Cassiterite; Fl—Fluorite; Gn—Galena; Po—Pyrrhotite; Py—Pyrite; Sp—Sphalerite

的后期萤石沿裂隙侵入并呈皮壳状包裹铅锌矿石或呈网脉状胶结铅锌多金属矿石, 矿物以半自形—他形结构为主, 主要矿物有闪锌矿、黄铁矿、黄铜

矿、萤石等。

选择本次野外采集的矿石样品的合适部位制备薄片, 在显微镜下完成矿物特征鉴定和矿物的

圈点等工作。电子探针成分分析在中国地质科学院矿产资源研究所自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室利用配备有 4 道/5 道波谱仪的 JEOL JXA-8230/ JXA-iHP200F 电子探针完成。薄片在上机测试之前先均匀镀上厚度约 20 nm 的碳膜,详细的电子探针分析流程见 Yang et al.(2022)。测试工作条件为:加速电压 15 kV,加速电流 20 nA,束斑直径 5 μm。使用天然矿物或合成氧化物作为标样。所有测试数据均进行了 ZAF 校正处理,结果见表 1。

5 主要矿石矿物特征

依据野外地质特征,结合室内矿石矿物鉴定与电子探针分析结果(表 1),新发现的铅锌多金属矿脉中主要的金属矿物有闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、黄铜矿、毒砂等,还有少量的锡石、辉铋矿、银黝铜矿、硫碲铋矿等矿物;非金属矿物有萤石、石英、方解石等。矿石构造主要有块状构造、网脉状构造、浸染状构造、角砾状构造等。矿物结构以自形—半自形粒状、骸晶、细脉状为主。

该矿脉主要金属矿物的矿物学特征如下:方铅矿呈铅灰色,具金属光泽,晶形完好,立方体形态,粒度大小为 2~8 mm(图 3b),镜下呈自形—半自形

结构,发育典型的“倒三角”结构(图 3d),呈骸晶状被萤石胶结(图 3e)。闪锌矿呈灰黑色—褐色,弱金属光泽,粒度大小 2~5 mm(图 3b~c),镜下呈半自形—他形结构,黄铁矿呈脉状穿插闪锌矿(图 3e)。黄铜矿呈网脉状胶结半自形—他形结构的黄铁矿(图 3f)。早期黄铁矿呈自形—半自形结构,呈骸晶被黄铜矿交代(图 3g)。毒砂主要呈自形—半自形结构,菱形晶体,或多晶体的集合体(图 3g)。磁黄铁矿呈他形结构,交代黄铜矿(图 3h、i)。银黝铜矿呈他形—骸晶结构,部分被黄铜矿交代(图 3h),或发育在黄铁矿和萤石的边部(图 3j)。锡石呈他形结构,粒度约为 10 μm,主要呈星点状分布在萤石、黄铁矿中,亦可见分布于闪锌矿边部(图 3k)。辉铋矿呈他形—细脉状,充填于闪锌矿裂隙中(图 3l)。

方铅矿的电子探针测试结果(表 1)显示,其主要元素 S 的含量平均值为 13.47%,Pb 的含量平均值为 85.88%;还含有少量的 Cd、Ag、Fe 等元素,与 Pb 可能为类质同象替代。此外,有少量的 Cu、Te 等元素在部分样品中检出。

闪锌矿的电子探针测试结果(表 1)显示,其主要元素 S 含量介于 32.69%~35.11%,平均值为 33.83%,Zn 含量介于 43.48%~55.37%,平均值为 50.57%。此外,Fe 含量介于 9.85%~18.91%,平均值

表 1 苏莫查干敖包矿区铅锌矿脉矿石主要金属矿物电子探针分析结果(%)

Table 1 Electron probe analysis results of main metal minerals of lead-zinc vein in Sumochaganaobao ore area (%)

矿物种类	编号元素	Se	As	Pb	S	Te	Sb	Cu	Zn	Fe	Co	Ag	Bi	Au	Cd	Total
方铅矿	645-09-1	0.00	0.00	86.49	13.66	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.03	0.10	0.00	0.00	0.17	100.53
	645-09-2	0.00	0.00	85.95	13.18	0.05	0.00	0.01	0.00	0.04	0.00	0.05	0.00	0.00	0.39	99.65
	645-09-3	0.00	0.00	85.19	13.56	0.04	0.13	0.00	0.00	0.02	0.00	0.07	0.00	0.00	0.36	99.36
闪锌矿	645-09-1	0.02	0.00	0.03	33.94	0.00	0.00	0.00	43.52	17.74	0.03	0.00	0.00	0.00	0.52	99.40
	645-09-2	0.00	0.00	0.23	35.11	0.01	0.00	0.00	43.48	18.91	0.02	0.00	0.02	0.00	0.43	98.23
	645-09-3	0.00	0.05	0.15	33.51	0.03	0.00	0.25	50.34	13.64	0.00	0.00	0.00	0.00	0.64	98.65
	670-09-1	0.02	0.00	0.08	32.69	0.00	0.00	0.00	53.70	11.92	0.04	0.00	0.00	0.01	0.37	98.85
	670-11-1	0.00	0.00	0.00	33.41	0.02	0.04	0.00	55.37	9.85	0.10	0.00	0.00	0.08	0.46	99.31
	670-11-2	0.00	0.00	0.07	34.27	0.00	0.00	0.00	54.58	10.45	0.07	0.00	0.00	0.00	0.37	99.81
	670-13	0.05	0.00	0.05	33.87	0.00	0.01	1.15	53.01	10.77	0.15	0.00	0.00	0.04	0.53	99.73
黄铁矿	645-09-1	0.00	2.43	0.00	51.37	0.00	0.19	0.08	0.00	45.07	0.07	0.32	0.00	0.05	0.02	99.62
	645-09-2	0.00	4.07	0.06	50.04	0.04	0.09	0.00	0.03	45.34	0.05	0.02	0.00	0.00	0.00	99.75
	645-09-3	0.00	2.21	0.12	51.61	0.00	0.15	0.00	0.01	45.7	0.09	0.00	0.00	0.01	0.01	99.90
	670-10-3	0.02	3.32	0.18	50.72	0.00	0.03	0.02	0.07	46.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	100.51
	670-11-1	0.00	0.69	0.00	53.09	0.04	0.03	0.14	0.10	46.09	0.04	0.00	0.00	0.00	0.01	100.23
	670-11-3	0.00	1.10	0.21	52.42	0.00	0.00	0.05	0.05	45.82	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	99.72
	670-13	0.00	0.00	0.00	53.39	0.02	0.04	0.07	0.03	46.5	0.09	0.00	0.00	0.00	0.02	100.15
黄铜矿	670-11-1	0.00	0.00	0.02	34.99	0.00	0.00	33.82	0.08	30.31	0.05	0.00	0.00	0.02	0.00	99.32
辉铋矿	670-11-2	0.00	0.00	0.00	18.32	0.06	0.02	0.03	1.74	0.33	0.00	0.00	81.99	0.00	0.17	102.69
碲硫铋矿	670-11-2	0.00	0.00	0.00	17.34	4.13	0.00	0.00	0.00	0.03	0.06	0.00	78.31	0.00	0.09	99.99
毒砂	670-13	0.00	42.51	0.17	21.58	0.00	0.48	0.19	0.00	36.36	0.07	0.00	0.00	0.00	0.02	101.38
银黝铜矿	670-13	0.00	1.50	0.04	24.69	0.00	27.46	29.34	6.44	1.12	0.17	8.56	0.02	0.04	0.70	100.74

为 13.33%, Fe 和少量的 Cd、Co 等元素与 Zn 可能为类质同象替代。还有少量的 Cu、Pb、Co、Cd、Te 等元素在部分样品中检出。

黄铁矿的电子探针测试结果显示(表 1), 其主量元素 S 含量介于 50.04%~53.39%, 平均值为 51.81%, Fe 含量介于 45.07%~46.50%, 平均值为 45.80%。Pb、Co 与 Fe 可能为类质同象替代, As 与 S 为类质同象。黄铁矿为岛状硫化物矿物, 理想状态下 Fe 和 S 的值分别为 46.55% 和 53.45%, S/Fe=2, 但实际中 S/Fe 原子比值通常不等于 2, 当 S/Fe<2 时称为硫亏损, S/Fe>2 称为铁亏损(雷万彬等, 2017; 孙雨沁等, 2020; 张然等, 2022)。该矿区井下中段揭露的铅锌矿脉中黄铁矿的 Fe 和 S 含量均低于理论值, S/Fe 比值为 1.87, 表现为硫亏损。

6 讨论

6.1 矿物的时空演化

矿物的时空演化规律, 包括了矿物的生成顺序和空间分布特征。研究矿物分带特征的同时, 成矿元素分带特征的研究也不可忽略。苏莫查干敖包矿区深部发现的铅锌多金属矿脉中的矿物种类和成矿元素种类较为丰富, 研究其矿物(组合)和元素(组合)以及矿化类型在时空上的分布规律, 对矿区深部找矿预测具有重要意义。

6.1.1 矿物生成顺序

据该铅锌多金属矿脉矿石的矿相学特征显示, 含方铅矿和闪锌矿的矿石被无色透明或灰白色的细粒状萤石呈脉状灌入, 矿石结构较为破碎(图 3b), 结合野外铅锌多金属矿脉与萤石矿体之间的关系, 推测铅锌矿脉成矿早于其周围的灰白色、浅褐色的细晶状萤石成矿。铅锌多金属矿石中见闪锌矿改造方铅矿, 方铅矿呈粒状零星分布在闪锌矿中, 黄铁矿、黄铜矿呈细网脉状胶结闪锌矿(图 3b)。灰白色细粒状的萤石脉状切割黄铁矿、黄铜矿(图 3c)。该矿区发育多期黄铁矿, 宏观上, 早期黄铁矿呈团块状、片状等形态产出; 矿相学特征表现为早期黄铁矿呈自形—半自形结构, 后期黄铁矿呈他形—网脉状结构充填或胶结早期黄铁矿(图 3i)。综合矿石特征和矿物学特征, 本文认为该铅锌多金属矿脉的矿物生成顺序为: 方铅矿→闪锌矿→团块状或片状黄铁矿→锡石、辉铋矿→磁黄铁矿→银黝铜矿、

黄铜矿→毒砂→细网脉状黄铁矿→灰白色细粒状萤石。

6.1.2 垂向上矿物和元素的变化规律

对比 645 和 670 中段不同深度所揭露的多金属矿脉特征, 矿物组合分带明显。较浅部的 670 中段的矿石矿物, 以闪锌矿为主, 共(伴)生含铜、银等为特点, 具有闪锌矿—黄铁矿—黄铜矿—毒砂—方铅矿—银黝铜矿等中低温矿物组合, 矿石中仅局部可见方铅矿。矿石以块状、网脉状、角砾状为主, 矿物晶形以半自形—他形结构为主。而较深部的 645 中段的矿石矿物, 以方铅矿为主, 共伴生锌、铋等为特点, 具有方铅矿—闪锌矿—黄铁矿—锡石—辉铋矿等中高温矿物组合, 矿石以块状、浸染状构造为主, 矿物晶形较好, 以自形结构为主。

对比 645 和 670 中段黄铁矿、闪锌矿的电子探针结果(表 1)表明, 黄铁矿中的 As、Sb、Co、Ag、Au 等元素的平均含量表现为 645 中段高于 670 中段, 而 Zn、Fe、Cu、Se、Pb、S、Te 等元素的平均含量则表现为 645 中段低于 670 中段。闪锌矿中 Pb、Fe、Bi、Cd、As、S 等元素的平均含量表现为 645 中段高于 670 中段水平, Zn、Cu、Co、Sb、Au 等元素的平均含量则要低于 670 中段, 其中 Au、Sb 只在 670 中段检出。由于 Zn、Pb、As 为矿脉主要矿物闪锌矿、方铅矿、毒砂的成矿元素; Bi 为辉铋矿的成矿元素; Cu 除了是黄铜矿的成矿元素外, 还参与形成矿脉中主要银矿物银黝铜矿。综上可知, 该矿脉的成矿元素在垂向上的分布特征为: 随成矿深度的加深, 中低温成矿元素含量呈减少趋势, 中高温成矿元素呈增加趋势。

由于闪锌矿中微量元素的含量变化可以指示其成矿温度。例如, 高温条件下所形成的闪锌矿颜色较深, 且 Fe、Mn 等元素较为富集(邹志超等, 2012), 即 Fe 与 Mn 的含量随成矿温度的升高而增加。645 中段闪锌矿中 Fe 的平均含量为 16.76%, 显著高于 670 中段闪锌矿中 Fe 的平均含量 10.75%, 由此表明 645 中段的成矿温度要高于 670 中段的成矿温度。因此, 随着成矿深度的加深, 成矿温度呈现升高趋势。综上所述, 该铅锌多金属矿脉的矿物组合和元素在垂向上的分布特征显示, 该铅锌多金属矿脉向深部具有较大延伸, 暗示该矿区深部可能具有中高温隐伏矿体的产出。

6.2 矿床成因探讨

依据野外的宏观地质特征看,在苏莫查干敖包矿区北西侧约 5 km 处出露岩体(图 1b),该岩体是前人认为与萤石成矿关系密切的卫境岩体(聂凤军等, 2008; 许东青, 2009),整体呈浅肉红色,球形风化,岩性为中粗粒钾长花岗岩、似斑状钾长花岗岩,局部见灰黑色闪长岩捕虏体。此外,本次野外工作中还详细考察了矿区内多个钻孔揭露的隐伏岩体,岩体整体呈肉红色,岩性为中粗粒钾长花岗岩或似斑状钾长花岗岩。对比矿区外围出露岩体和矿区内揭露的隐伏岩体的岩石学特征较为相似。因此,推测矿区内钻孔揭露的隐伏岩体可能是卫境岩体的组成部分。然而,本文首次发现的铅锌多金属矿脉与矿区隐伏岩体及矿区北西的卫境岩体的成因联系尚不清楚,有待进一步研究。

另外,矿区及外围的石英脉无论是否含矿,均区域性出现,顺层或穿切地层呈不同方向均有发育;围岩蚀变发育,尤其以下盘的流纹斑岩硅化、绿泥石化较为明显。该铅锌多金属矿脉,不论是矿石矿物还是脉石矿物均以不均一、不规则的粒状、骸晶、细脉状结构等为特点,表现为热液成因的交代或充填特征。此外,多金属矿脉呈现 Pb、Zn、Cu、Sn、Ag、Bi、Sb 等多元素成矿特点,也展现出岩浆热液型矿床常见的多元素组合特点。

6.3 找矿指示

萤石与多金属矿的共伴生是常见事实,尽管未引起足够重视。国内已发现并查明与铅、锌、钨、锡、铁、稀土伴生的萤石矿床 40 多处(王吉平等, 2015; 王茂原等, 2022)。近年来,随着区域地质和找矿勘查工作的深入,苏莫查干敖包矿区所在的区域内已先后发现了如白云鄂博超大型铁铌稀土矿、东井村铜多金属矿、白乃庙铜矿以及西里庙锰矿等多金属矿床,其中,白云鄂博矿床伴生的萤石矿规模巨大,表明该区域具有良好的成矿条件和扩矿潜力,尤其在与萤石共伴生的金属矿方面。苏莫查干敖包萤石矿床新发现的与萤石共伴生的铅锌多金属矿脉,其矿脉主要呈脉状、透镜状和不规则状产出,成矿元素主要为 Pb、Zn、Fe 和少量的 Cu,伴生有 Sn、Bi、Co、Te、Sb、Ag 和极少量的 Au。以闪锌矿-方铅矿-黄铁矿-黄铜矿-毒砂-锡石-辉铋矿-银黝铜矿等矿物组合为特征,该矿脉显示典型岩浆

热液成因特征。该铅锌多金属矿脉的地质特征和成因类型与柿竹园钨锡钼铋等多金属伴生萤石矿(黄惠兰等, 2013; Han et al., 2020)、桃林铅锌伴生萤石矿(康博等, 2015)、黄沙坪铅锌钨伴生萤石矿(李欢等, 2023)等矿床类似。因此,推测苏莫查干敖包萤石矿床深部可能有较大规模的铅锌矿脉产出。苏莫查干敖包萤石矿床新发现的较大规模的铅锌多金属矿脉将对区域上同类型萤石矿床深部多金属找矿具有重要借鉴意义。

此外,矿区内矽卡岩化尤其发育,已控制矽卡岩长度大于 500 m(向矿区南西仍有延续),厚度为 0.5~5 m,且具多金属矿化,有的元素含量已达工业矿石标准,例如铜(Cu)最高品位为 0.97%,锡(Sn)最高品位为 0.28%^①。因此,该矿区不排除有矽卡岩型金属矿体的可能。

7 结论

(1)初步查明新发现的铅锌多金属矿脉呈脉状、透镜状和不规则状产出,矿物种类较为复杂,主要有闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、黄铜矿、毒砂等,次为辉铋矿、锡石、银黝铜矿、硫碲铋矿等。矿石构造以浸染状、角砾状、网脉状为主,矿物以自形—半自形粒状、骸晶、脉状结构为主。

(2)根据铅锌多金属矿脉形态、矿石矿物组合等特征,结合电子探针分析,显示该多金属矿脉由上至下具有明显的分带特征,具体表现为:从上部的闪锌矿-黄铁矿-黄铜矿-毒砂-方铅矿-银黝铜矿等中低温矿物组合,逐渐过渡为下部的方铅矿-闪锌矿-黄铁矿-锡石-辉铋矿等中高温矿物组合。成矿元素的分布特征与矿物组合分带相吻合:随着成矿深度的增加,中低温成矿元素的含量呈减少趋势,而中高温成矿元素的含量则呈增加趋势。

(3)新发现的多金属矿脉从 700 中段至 645 中段均有揭露,且厚度较为稳定,延深上未见明显尖灭,结合矿物组合和成矿元素的垂向演化规律,显示该矿脉向深部可能具有较大延伸,且随着深度的增加,相对高温的成矿元素呈增加趋势,该矿床深部可能具有较大的多金属找矿潜力。

(4)矿区围岩蚀变、新发现的铅锌多金属矿脉的矿石类型、矿物组合及复杂的多金属元素组合等特征,均显示出典型的岩浆热液成因特点,但铅锌

多金属矿脉与矿区隐伏岩体及矿区北西的卫境岩体的成因联系尚需深入研究。

注释

① 乌兰察布市国土资源局. 2007. 内蒙古自治区四子王旗苏莫查干敖包矿区 21~04 勘探线萤石矿资源储量核实报告 [R]. 1-74.

References

Bai Yan. 2020. Geological Characteristics and Structural Ore Control Regularity of Fluorite Deposits in the Northern Siziwangqi of Inner Mongolia, China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1-143 (in Chinese with English abstract).

Chen B, Jahn B, Wilde S, Xu B. 2000. Two contrasting Paleozoic magmatic belts in northern Inner Mongolia, China: Petrogenesis and tectonic implications[J]. *Tectonophysics*, 328(1/2): 157-182.

Editorial Committee of Discovery History of Mineral Deposits for the volume of Inner Mongolian Autonomous Region. 1996. The Discovery History of Mineral Deposits of China Volume of Inner Mongolian Autonomous Region[M]. Beijing: Geological Press, 199-202 (in Chinese).

Han B B, Shang P Q, Gao Y Z, Jiao S, Yao C M, Zou H, Li M, Wang L, Zheng H Y. 2020. Fluorite deposits in China: Geological features, metallogenic regularity, and research progress[J]. *China Geology*, 3(3): 473-489.

Hou Hui, Huang Menghui. 2016. Geological geophysical and geochemical characteristics of Dongjingcun Copper-gold polymetallic deposit in Siziwang Qi, Inner Mongolia Autonomous Region and its prospecting significance[J]. *Western Resources*, (1): 130-132 (in Chinese).

Huang Huilan, Tan Jing, Li Fang. 2013. Physicochemical characteristics and indicative significance of fluorite in Shizhuyuan polymetallic deposit in Hunan Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(S1): 106-108 (in Chinese).

Kang Bo, Yan Zhiqiang, Li Lianyu. 2015. Metallogenic model and prospecting criteria of Taolin lead-zinc deposit in Xianglin city, Hunan Province[J]. *Resource Environment and Engineering*, 29(2): 160-163, 172 (in Chinese with English abstract).

Lei Wanshan, Zhang Yanfei, Li Yajian, Liu Yajian. 2017. Typomorphic characteristics of Au bearing pyrites from Luyuangou altered gold deposit, western Henan Province[J]. *Earth Science Frontiers*, 24(2): 176-185 (in Chinese with English abstract).

Li Huan, Wang Chong, Zhu Dapeng, Jiang Weicheng. 2023. Metallogenic environment of skarn-type and vein-type Pb-Zn ore body in the Huangshaping deposit and its implications of deep deposit exploration[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 33(2): 630-651 (in Chinese with English abstract).

Li Junjian, Tang Wenlong, Fu Chao, Chen Zheng, Orolmaa Demberel, Oyuntuya Namsraijavyn, Delgersaikhan Adiya, Enkhbat

Tserendash, Dang Zhicai, Zhao Zelin, Zhang Feng, Ren Junping, Zhao Lijun. 2016. The division of metallogenic belts in Sino-Mongolian border area[J]. *Geological Bulletin of China*, 35(4): 461-487 (in Chinese with English abstract).

Li Junjian, Zhang Feng, Ren Junping, Tang Wenlong, Fu Chao, Chen Zheng, Li Chengdong, Zhao Lijun, Feng Xiaoxi, Dang Zhicai, Zhao Zelin, Liu Xiaoxue, Tomurtogoo Onongyn, Delgersaikhan Adiya, Enkhbat Tserendash, Altankhundaga Batsaikhan, Dorjsuren Byambaadash, Batbayar Jargalsaikhan. 2015. Tectonic units in China-Mongolia border area and their fundamental characteristics[J]. *Geological Bulletin of China*, 34(4): 636-662 (in Chinese with English abstract).

Li Shiqing. 1985. Extra-large sedimentary fluorite deposits formed by volcanism[J]. *Geology and Exploration*, 21(1): 30-31 (in Chinese).

Lü Jia. 2019. Metallogenic Conditions and Genesis of the Dongjingcun Copper-gold Polymetallic Deposit in Siziwang Banner, Inner Mongolia[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1-80 (in Chinese with English abstract).

Nie Fengjun, Jiang Sihong, Bai Daming, Hou Wanrong, Liu Yifei. 2010. Types and temporal-spatial distribution of metallic deposits in Southern Mongolia and its neighboring areas[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 31(3): 267-288 (in Chinese with English abstract).

Nie Fengjun, Jiang Sihong, Zhang Yi, Liu Yan, Hu Peng. 2004. Geological features and origin of porphyry copper deposits in China-Mongolia border region and its Neighboring areas[J]. *Mineral Deposits*, 23(2): 176-189 (in Chinese with English abstract).

Nie Fengjun, Xu Dongqing, Jiang Sihong, Liu Yan. 2008. Geological features and origin of Sumoqagan Obo super-large independent fluorite deposit, Inner Mongolia[J]. *Mineral Deposits*, 27(1): 1-13 (in Chinese with English abstract).

Nie Fengjun, Xu Dongqing, Jiang Sihong, Zhang Yi, Liu Yan, Hu Peng. 2009. Zircon SHRIMP U-Pb dating on rhyolite samples from the Xilimiao Group occurring in the Su-Cha (Sumoqagan Obo) fluorite district, Inner Mongolia[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 83(4): 496-504 (in Chinese with English abstract).

Rui Zongyao, Shi Lindao, Fang Ruheng. 1994. *Geology of Non-ferrous Metal Deposits in the Northern Margin of the North China Block and Adjacent Areas*[M]. Beijing: Geological Press, 1-576 (in Chinese).

Shen Cunli, Su Hongwei, Wang Shouguang. 2004. Regional metallogenic characteristics of Cu deposit in Inner Mongolia[J]. *Northwest Geology*, 37(3): 44-50 (in Chinese with English abstract).

Shi Zhiqiang. 2015. Analysis of integrated exploration results of fluorite ore in Xilimiao-Sumochaganaobao area, Siziwang Qi, Inner Mongolia Autonomous Region[J]. *Inner Mongolia Science Technology and Economy*, (9): 54-55 (in Chinese).

Sun Yuqin, Yu Xuefeng, Shan Wei, Xiong Yuxin, Zhang Yan, Chi

- Naijie, Shu Lei, Li Min, Cheng Wei. 2020. Mineralization characteristics and modes of occurrence of gold minerals at the depth of 3000 meters in Jiaojia fault zone, Jiaodong Peninsula[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 41(6): 919–937 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jiping, Shang Pengqiang, Xiong Xianxiao, Yang Huiyan, Tang Yao. 2015. Metallogenic regularities of fluorite deposits in China[J]. *Geology in China*, 42(1): 18–32 (in Chinese with English abstract).
- Wang Kui, Liu Xueya, Li Mianyi. 1991. Plate Tectonics between Cathaysia and Angaraland in China[M]. Beijing: Peking University Press, 74–91 (in Chinese with English abstract).
- Wang Maoyuan, Xiong Wenliang, Zhang Lijun, Chen Da. 2022. Comprehensive utilization status of associated fluorite resources in rare earth tailings[J]. *Rare Earth*, 43(3): 23–33 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shouguang, Huang Zhanqi, Su Xinxu, Shen Cunli, Hu Fengxiang. 2004. A notable metallogenic belt striding across the border between China and Mongolia–South Gobi–Dongwuqi copper–polymetallic metallogenic belt[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 249–255 (in Chinese with English abstract).
- Xiao W J, Brian F W, Hao J, Zhai M G. 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the Central Asian orogenic belt[J]. *Tectonics*, 22(6): 2–20.
- Xu B, Charvet J, Chen Y, Zhao P, Shi G Z. 2013. Middle Paleozoic convergent orogenic belts in western Inner Mongolia (China): Framework, kinematics, geochronology and implications for tectonic evolution of the Central Asian orogenic belt[J]. *Gondwana Research*, 23(4): 1342–1364.
- Xu Dongqing. 2009. Geological Setting, Features and Origin of the Sumochagan Obo Super-large Fluorite Mineralized District[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 1–171 (in Chinese with English abstract).
- Xu Dongqing, Nie Fengjun, Qian Mingping, Liu Yan, Yun Fei, Zhang Wanyi. 2009. REE geochemistry and genesis of Sumochagan Obo superlarge fluorite deposit[J]. *Mineral Deposits*, 28(1): 1192–1196 (in Chinese with English abstract).
- Xu Shaokang, Yin Youdong. 2001. Geological outline of single fluorite ore deposit in China[J]. *Chemical Mineral Geology*, (3): 134–140 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhigang, Chen Yuchuan, Wang Denghong, Chen Zhenghui, Li Houmin. 2008. Division Scheme of Metallogenic Zones in China[M]. Beijing: Geological Press, 1–138 (in Chinese).
- Yang S Y, Jiang S Y, Mao Q, Chen Z Y, Rao C, Li X L, Li W C, Yang W Q, He P L, Li X. 2022. Electron probe microanalysis in geosciences: Analytical procedures and recent advances[J]. *Atomic Spectroscopy*, 43: 186–200.
- Zhai Yusheng, Deng Jun, Li Xiaobo. 1999. Regional Mineralogy[M]. Beijing: Geological Press, 186–261 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Ran, Xiao Zhibin, Fu Chao, Fu Shixing, Zhu Shaomng. 2022. Genetic mineralogical characteristics and geological significance of gold minerals and gold bearing pyrite of Xinli Gold deposit in Jiaodong Area[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 41(6): 997–1006 (in Chinese with English abstract).
- Zou Zhichao, Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Ye Lin, Wu Liyan, Feng Caixia, Tang Yongyong. 2012. Trace element geochemistry of the Liziping Pb–Zn deposit, the Lanping Basin, Northwest Yunnan Province, China[J]. *Geochimica*, 41(5): 482–496 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 白彦. 2020. 内蒙古四子王旗北部萤石矿床地质特征与构造控矿规律[D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 1–143.
- 侯晖, 黄蒙辉. 2016. 内蒙古自治区四子王旗东井村铜金多金属地质物化探特征及其找矿意义[J]. *西部资源*, (1): 130–132.
- 黄惠兰, 谭靖, 李芳. 2013. 湖南柿竹园多金属矿床中萤石的物理化学特征及指示意义[J]. *地质学报*, 87(S1): 106–108.
- 康博, 颜志强, 李恋宇. 2015. 湖南省临湘市桃林铅锌矿成矿模式及找矿标志[J]. *资源环境与工程*, 29(2): 160–163, 172.
- 雷万杉, 张严飞, 刘亚剑, 刘锦明. 2017. 豫西陆院沟蚀变岩型金矿床黄铁矿标型研究[J]. *地学前缘*, 24(2): 176–185.
- 李欢, 王冲, 朱大鹏, 蒋维诚. 2023. 黄沙坪矽卡岩型和脉状铅锌矿成矿环境及其对深部找矿的指示[J]. *中国有色金属学报*, 33(2): 630–651.
- 李俊建, 唐文龙, 付超, 陈正, Orolmaa Demberel, Oyuntuya Namsrajavyn, Delgersaikhan Adiya, Enkhbat Tserendash, 党智财, 赵泽霖, 张锋, 任军平, 赵丽君. 2016. 中蒙边界地区成矿区带划分[J]. *地质通报*, 35(4): 461–487.
- 李俊建, 张锋, 任军平, 唐文龙, 付超, 陈正, 李承东, 赵丽君, 冯晓曦, 党智财, 赵泽霖, 刘晓雪, Tomurtogoo Onongyn, Delgersaikhan Adiya, Enkhbat Tserendash, Altankhundaga Batsaikhan, Dorjsuren Byambaadash, Batbayar Jargalsaikhan. 2015. 中蒙边界地区构造单元划分[J]. *地质通报*, 34(4): 636–662.
- 李士勤. 1985. 火山作用形成的特大型沉积萤石矿床[J]. *地质与勘探*, 21(1): 30–31.
- 吕佳. 2019. 内蒙古四子王旗东井村铜金多金属矿床成因探讨[D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 1–80.
- 聂凤军, 江思宏, 白大明, 侯万荣, 刘翼飞. 2010. 蒙古国南部及邻区金属矿床类型及其时空分布特征[J]. *地球学报*, 31(3): 267–288.
- 聂凤军, 江思宏, 张义, 刘妍, 胡朋. 2004. 中蒙边境及邻区斑岩型铜矿床地质特征及成因[J]. *矿床地质*, 23(2): 176–189.
- 聂凤军, 许东青, 江思宏, 刘妍. 2008. 内蒙古苏莫查干敖包特大型萤石矿床地质特征及成因[J]. *矿床地质*, 27(1): 1–13.
- 聂凤军, 许东青, 江思宏, 胡朋. 2009. 内蒙古苏莫查干敖包萤石矿区流纹岩锆石 SHRIMP 定年及地质意义[J]. *地质学报*, 83(4): 496–504.
- 芮宗瑶, 施林道, 方如恒. 1994. 华北陆块北缘及邻区有色金属矿床地质[M]. 北京: 地质出版社, 1–576.

- 沈存利, 苏宏伟, 王守光. 2004. 内蒙古铜矿床区域成矿特征初步研究[J]. *西北地质*, 37(3): 44–50.
- 石志强. 2015. 内蒙古自治区四子王旗西里庙—苏莫查干敖包地区萤石矿整装勘查成果分析[J]. *内蒙古科技与经济*, (9): 54–55.
- 孙雨沁, 于学峰, 单伟, 熊玉新, 张岩, 迟乃杰, 舒磊, 李敏, 程伟. 2020. 胶东焦家断裂带 3000 m 深部矿化特征及金矿物赋存状态[J]. *地球学报*, 41(6): 919–937.
- 王吉平, 商朋强, 熊先孝, 杨辉艳, 唐尧. 2015. 中国萤石矿床成矿规律[J]. *中国地质*, 42(1): 18–32.
- 王奎, 刘雪亚, 李锦轶. 1991. 中国华夏与安加拉古陆间的板块构造[M]. 北京: 北京大学出版社, 74–91.
- 王茂原, 熊文良, 张丽军, 陈达. 2022. 稀土尾矿中伴生萤石资源综合利用现状[J]. *稀土*, 43(3): 23–33.
- 王守光, 黄占起, 苏新旭, 沈存利, 胡凤翔. 2004. 一条值得重视的跨国境成矿带—南戈壁—东乌旗铜多金属成矿带[J]. *地学前缘*, 11(1): 249–255.
- 许东青. 2009. 内蒙古苏莫查干敖包超大型萤石矿化区形成环境、地质特征及成矿机理研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 1–171.
- 许东青, 聂凤军, 钱明平, 刘妍, 云飞, 张万益. 2009. 苏莫查干敖包超大型萤石矿床的稀土元素地球化学特征及其成因意义[J]. *矿床地质*, 28(1): 1192–1196.
- 徐少康, 殷友东. 2001. 我国单一萤石矿床地质概要[J]. *化工矿产地质*, (3): 134–140.
- 徐志刚, 陈毓川, 王登红, 陈郑辉, 李厚民. 2008. 中国成矿区带划分方案[M]. 北京: 地质出版社, 1–138.
- 翟裕生, 邓军, 李晓波. 1999. 区域成矿学[M]. 北京: 地质出版社, 186–261.
- 张然, 肖志斌, 付超, 付世兴, 朱昭明. 2022. 胶东地区新立金矿中金矿物和载金黄铁矿成因矿物学特征及地质意义[J]. *岩矿测试*, 41(6): 997–1006.
- 《中国矿床发现史·内蒙古卷》编委会. 1996. 中国矿床发现史——内蒙古卷[M]. 北京: 地质出版社, 199–202.
- 邹志超, 胡瑞忠, 毕献武, 叶霖, 武丽艳, 冯彩霞, 唐永永. 2012. 滇西北兰坪盆地李子坪铅锌矿床微量元素地球化学特征[J]. *地球化学*, 41(5): 482–496.