

doi: 10.12029/gc20200715001

张彦生, 王亮, 高永璋. 2023. 内蒙古林西县水头萤石矿床地质特征、类型及其开发利用价值[J]. 中国地质, 50(3): 795–805.
Zhang Yansheng, Wang Liang, Gao Yongzhang. 2023. Geological characteristics, types and development and utilization value of Shuitou fluorite deposit in Linxi, Inner Mongolia[J]. Geology in China, 50(3): 795–805(in Chinese with English abstract).

内蒙古林西县水头萤石矿床地质特征、 类型及其开发利用价值

张彦生¹, 王亮², 高永璋³

(1. 内蒙古自治区有色地质勘查局一〇八队, 内蒙古赤峰 024000; 2. 中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 陕西西安 710100; 3. 中钢矿业开发有限公司, 北京 100083)

摘要:【研究目的】为了充分地开发利用内蒙古水头萤石矿, 本文对其矿床地质特征、成因及矿床类型进行了系统的分析。【研究方法】本文基于对水头萤石矿床地质特征分析、矿床成因探讨、矿石开发利用现状及潜力分析研究, 总结其矿床类型及进一步开发利用价值。【研究结果】水头萤石矿床形成于早白垩世, 矿体主要赋存于上二叠统林西组凝灰质粉砂岩中, 并严格受断裂构造控制, 矿床类型为中低温热液充填型脉状萤石矿床; 矿区保有资源/储量矿石量 1700.48 kt, CaF₂ 平均品位 62.27%, CaF₂ 资源量 1058864 t, 为大型萤石矿床。光谱分析显示矿石中有(益)用组分为 CaF₂, 矿石可浮性较好, 通过 1 次粗选、2 次扫选、4 次精选可获得 CaF₂ 品位 97.56%, 回收率 87.07% 的萤石精矿。【结论】综合以上分析表明, 水头萤石矿床为断裂控矿、中低温热液充填型脉状萤石矿床。选矿试验表明, 水头萤石矿可浮性较好, 属于易选矿石, 本矿具有很好的开发利用价值。

关键词: 萤石矿; 矿石矿物组分; 矿石质量; 工艺流程; 矿产勘查工程; 林西地区; 内蒙古

创新点: 总结水头萤石矿床地质特征及成因综述, 分析其开发利用现状及潜力, 进一步优化选矿工艺流程, 为充分合理开发利用该类型萤石矿床具有指示意义。

中图分类号: P619.21*5 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2023)03-0795-11

Geological characteristics, types and development and utilization value of Shuitou fluorite deposit in Linxi, Inner Mongolia

ZHANG Yansheng¹, WANG Liang², GAO Yongzhang³

(1. No.108 Team of Nonferrous Geological Exploration Bureau, Inner Mongolia Autonomous Region, Chifeng 024000, Inner Mongolia, China; 2. Xi'an Center of Mineral Resources Survey, China Geology Survey, Xi'an 710100, Shaanxi, China; 3. Sinosteel Group Corporation Limited, Beijing 100083, China)

收稿日期: 2020-07-15; 改回日期: 2020-08-01

基金项目: 林西县自然资源局财政项目(LZC-2019-180)资助。

作者简介: 张彦生, 男, 1967年生, 高级工程师, 主要从事勘查技术与工程专业研究; E-mail: 393454876@qq.com。

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

[Objective] The geological characteristics, genesis and deposit types of Shuitou fluorite deposit are systematically studied to fully and rationally develop and utilize its resources. **[Methods]** Based on the analysis of the geological characteristics, ore genesis and current situation of ore development–utilization, we summarized ore types and development–utilization value of Shuitou fluorite deposit. **[Results]** Shuitou large fluorite deposit was formed in the early Cretaceous, which ore bodies mainly existed in the upper Permian Linxi Formation tuffaceous siltstone. It's a fault–control, medium–low–temperature hydrothermal, fracture–filling type deposit. The reserve resources/reserves of fluorite ores are 1700.48 kt, with a CaF_2 average grade 62.27% and CaF_2 mineral content of 1058864 t. The spectral analysis shows that useful component is CaF_2 , and the ore has good floatability and belongs to the easy separation ore. Fluorite concentrate with CaF_2 grade 97.56% and recovery rate 87.07% can be obtained by one state rougher, two states scavenger and four states cleaner. **[Conclusions]** The comprehensive analysis indicate that Shuitou large fluorite deposit has good development–utilization value.

Key words: fluorite deposit; ore component; mineral quality; process flows; mineral exploration engineering; Linxi area; Inner Mongolia

Highlights: This paper summarizes the geological characteristics and genesis of Shuitou hydrothermal fluorite deposit, analyzes the status and potential of development and utilization, and further optimizes the mineral processing industry, which has an important significance for fully and reasonably developing and utilizing hydrothermal fluorite deposit.

About the first author: ZHANG Yansheng, male, born in 1967, senior engineer, mainly engaged in exploration technology and engineering; E–mail: 393454876@qq.com.

Fund support: Supported by the finance project of Linxi County Natural Resources Bureau (No.LZC–2019–180).

1 引 言

萤石是工业中氟元素的主要来源,广泛应用于航天和新能源等领域。中国萤石资源丰富,矿床繁多,资源储量大,截至2018年已查明的保有萤石资源量共计4200万t(王吉平等,2018)。近年来,随着中国氟化工产业的快速发展及萤石应用领域的不断扩展,对萤石矿的需求呈现快速增长的态势。据美国地质调查局2019年报告显示,2018年全球萤石总产量约3.1亿万t,中国、墨西哥、蒙古国三国萤石的合计产量可达世界萤石总产量的80%,分别为60%、19%、11%(USGS, 2019)。

20世纪40年代初,国内外研究学者从矿床地质特征、控矿地质条件、矿床成因以及矿床分类等多方面对萤石矿床开展了系统的研究(Möller et al., 1976; 安德烈耶娃和苏守田, 1980; 夏宏远等, 1981)。中国萤石矿床地质研究始于20世纪60年代,前期主要围绕萤石矿成矿规律及矿床成因展开(张惠堂等, 1984; 李士勤, 1985; 曹俊臣, 1986; 吴自强等, 1989; 李长江和蒋叙良, 1989)。2000年以后,在国土资源部组织下全国开展了萤石矿产资源潜力评价,建立了典型矿床预测模型和区域预测模

型,并在Ⅱ级成矿省的基础上,共划分出15个萤石矿Ⅲ级成矿区带(王吉平等,2015,2018),其中内蒙古拥有4条萤石成矿带:(1)金塔—额济纳旗萤石矿成矿带(Ⅲ F-1);(2)四子王旗—二连浩特萤石矿成矿带(Ⅲ F-3);(3)内蒙东部萤石矿成矿带(Ⅲ F-4);(4)冀北—辽西萤石矿成矿带(Ⅲ F-5)。内蒙地区已查明的萤石资源保有储量为3456.38万t,萤石资源位列全国第一(孙月君等,2018)。

内蒙古东部萤石矿成矿带(Ⅲ F-4)是内蒙古萤石资源储量的主要分布地,水头萤石矿是该成矿带上的大型萤石矿之一。自20世纪60年代开始,先后有众多研究工作者对水头萤石矿床开展矿床成因、成矿规律、矿体预测技术方法及勘查模式等研究(曹华文等,2014;方乙等,2014;张寿庭等,2014;张伟,2014;夏炳卫等,2016;宋开瑞,2019)。截至2019年底,矿区共查明萤石矿保有资源/储量(121b+122b+333)矿石量1700.48 kt,平均品位 CaF_2 62.27%, CaF_2 资源量1058864 t。本文在综合前人研究基础上,通过水头萤石矿的区域地质背景、矿床地质特征研究,并结合选矿试验研究,分析水头萤石矿床开发利用价值,为后续合理开发利用提供相关依据。

2 区域地质背景

内蒙古林西地区分布于索伦—林西缝合带两侧,在大地构造位置上处于中亚造山带的东段(图1a),即兴蒙造山带(王亮等,2017;蒋昊原等,2020)。自晚古生代以来,兴蒙造山带经历了古亚洲洋陆缘增生演化、华北陆块陆缘增生演化的漫长过程,包括俯冲增生、碰撞造山、块体汇聚、垂向增生和区域伸展等重大地质事件(邵济安等,2010,2017;罗照华,2011;Wan et al., 2018)。受古亚洲洋成矿域和环太平洋成矿域的叠加影响,研究区内发育一系列与岩浆—构造活动相关的矽卡岩型、隐爆角砾型、热液脉型有色金属—多金属矿床及非金属矿床(Pei et al., 2017a; 王亮等, 2018; Zhang et al., 2019; Wang et al., 2020; Zhai et al., 2020)。

区域出露地层主要为二叠系黑色板岩、粉砂岩、砂岩和侏罗纪长英质火山碎屑岩、凝灰岩和流纹岩。不同方向深大断裂发育,其中北东—北北东向断裂是区域最重要的断裂带,其次级断裂多为控岩控矿断裂带,控制着区内主要矿床的空间分布。区内中生代岩浆活动频繁,石英斑岩、花岗闪长斑岩和石英脉体广泛分布(Pei et al., 2017b)。

3 矿床地质概况

3.1 矿区地层

水头萤石矿床矿区及外围出露的地层主要为下二叠统寿山沟组(P_{1ss})、下二叠统大石寨组(P_{1ds})、上二叠统林西组(P_{3l})及上侏罗统满克头鄂博组(J_3m)(图1b)。下二叠统寿山沟组(P_{1ss})及大石寨组(P_{1ds})主体为一套碎屑岩夹少量火山岩和碳酸盐岩沉积,分布在矿区中东部区域。上二叠统林西组(P_{3l})发育巨厚暗色泥页岩、粉砂岩,有机质丰度较高,在区内西部出露,地层走向北东,倾向北西,倾角 $45^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 。上侏罗统满克头鄂博组(J_3m)主要为流纹岩和火山凝灰岩,在矿区南部出露,地层总体走向北东,倾向南东,倾角 $20^{\circ}\sim 50^{\circ}$,与二叠系呈不整合接触。此外,还有第四系腐殖土、亚砂土、冲积砂砾石及残坡积堆积物,厚度 $0.8\sim 50$ m。上侏罗统满克头鄂博组(J_3m)、上二叠统林西组(P_{3l})及矿区南部出露的石英斑岩是矿区内主要赋矿围岩(图1b)。

3.2 矿区构造

矿区内的断裂构造主要分为NE向和近NS—NNE向两组。其中前者在区域内广泛分布,为主导断裂,延长几百至上千米,断裂走向一般为 $30^{\circ}\sim 70^{\circ}$,倾向北西,张性断裂,区内表现为切穿中二叠统哲斯组、中侏罗统新民组。该组断裂控制着岩浆侵入活动的同时,局部也控制着地层的展布。后者为本区的控矿断裂,属压扭性断裂,该组断裂早期被中酸性脉岩充填,而后被晚期热液贯入,形成萤石和硅质脉体,成为萤石矿床的主要控矿、容矿构造。该组断裂延长几百至上千米,走向一般为 $340^{\circ}\sim 25^{\circ}$,倾向西,局部倾向东,倾角 $65^{\circ}\sim 85^{\circ}$ 。断裂在空间上显示为雁行排列的展布特点。

3.3 矿区岩浆岩

矿区出露印支期花岗闪长岩和花岗闪长斑岩,主要分布在研究区北西部的板石房子乡北部和赛波罗沟门西部。前者锆石U—Pb加权平均年龄为 $246\sim 252$ Ma(Pei et al., 2017a),侵入体规模较小,呈岩株状产出,区内侵入于上二叠统林西组之中。岩石特征表现为灰绿色,斑状结构,基质微晶质结构。燕山期花岗闪长斑岩侵入于二叠系哲斯组、林西组以及中侏罗统新民组中。岩石呈灰白色,斑状结构、块状构造。在矿区南部为矿体的直接赋矿围岩,为区内萤石及多金属矿的形成提供了物源和热源,锆石U—Pb加权平均年龄为 (136.9 ± 1.7) Ma(裴秋明, 2018)。

4 矿体和矿化特征

4.1 矿体和矿化特征

区内广泛分别萤石矿脉(化),且矿体空间展布严格受断裂控制,自北向南依次形成北矿段(赛波罗沟门)—中矿段(水头)—南矿段(俄力木台),断续延伸达 10 km(图1b)。矿体野外露头与围岩界线清楚,地表表现为明显的脊骨状隆起。各矿段包含若干不连续的矿体,单个矿体长度一般可达 $200\sim 600$ m,呈右行雁列式展布。矿体总体走向 $340^{\circ}\sim 5^{\circ}$,倾向西,倾角 $70^{\circ}\sim 87^{\circ}$ (图2)。矿体沿走向、倾向连续性较好,未见明显的成矿后期断裂。矿体厚度 $0.67\sim 14.89$ m,厚度变化系数为 103.83% ,厚度变化不稳定,形态复杂,总体沿倾向有向深部变薄趋势,走向上矿体中间厚,向北向南变薄,局部地段矿体

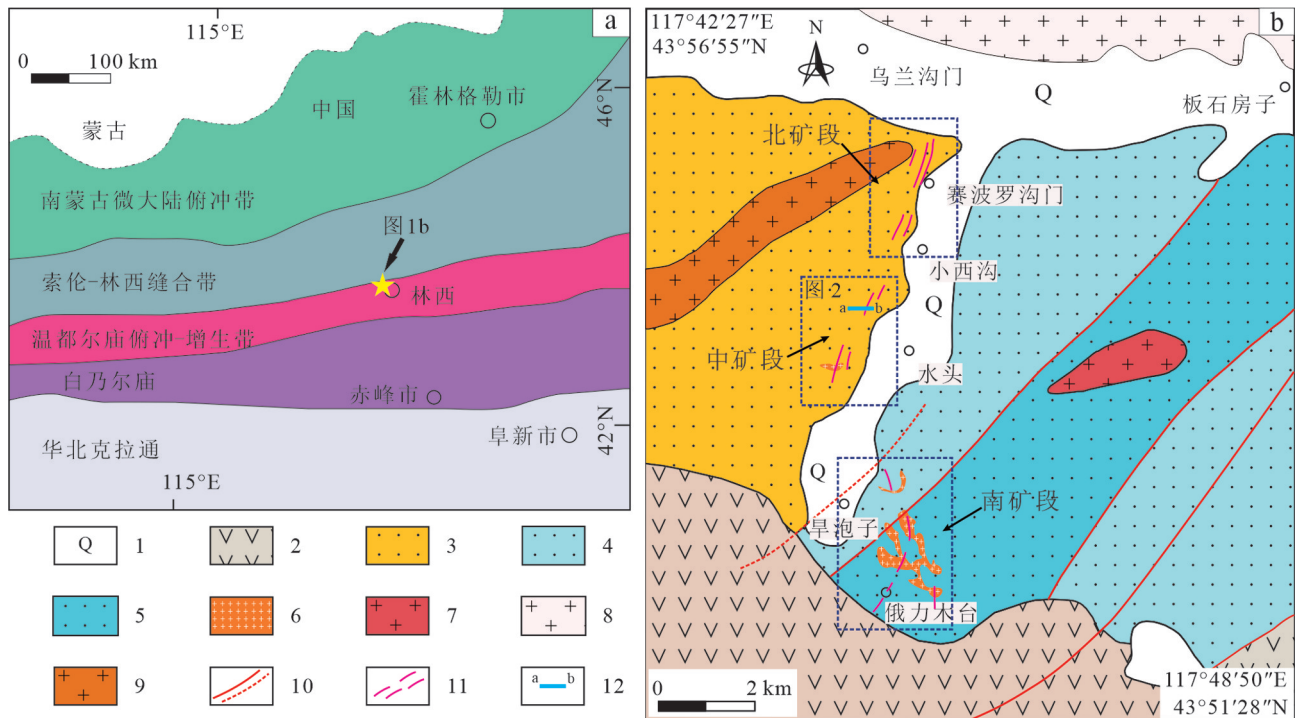


图1 林西地区大地构造位置图(a)与水头萤石矿床地质简图(b)(底图据张寿庭等, 2014修改)

1—第四系; 2—上侏罗统满克头鄂博组; 3—上二叠统林西组; 4—下二叠统大石寨组; 5—下二叠统寿山沟组; 6—俄力木台石英斑岩; 7—侏罗纪花岗岩; 8—印支期花岗岩闪长岩; 9—印支期花岗岩闪长斑岩; 10—断层/推测断层; 11—断裂; 12—勘探线

Fig. 1 Tectonic location map of Linxi area (a) and geological sketch of Shuitou fluorite deposit (b) (modified from Zhang Shouting et al., 2014)

1—Quaternary; 2—Upper Jurassic Manketou Ebo Formation; 3—Upper Permian Linxi Formation; 4—Lower Permian Dashizhai Formation; 5—Lower Permian Shoutshangou Formation; 6—Elimutai quartz porphyry; 7—Jurassic granite; 8—Indosinian granodiorite; 9—Indosinian granodiorite-porphyry; 10—Fault/presumed fault; 11—Fracture; 12—Exploration line

变厚,在矿区南部矿体的部分膨大部位,厚度可达10 m以上。不同矿体的品位变化较大,CaF₂含量在23.86%~68.71%,品位变化系数为15.59%。从垂向变化规律看,有由浅入深渐渐富的趋势,但总体变化不大,矿体品位沿走向变化不大。

4.2 矿石结构构造

本区萤石多呈紫色、翠绿色、浅绿色,少量为白色、蓝绿色、粉色;透明。以粗晶自形—半自形粒状结构(图3a~b)、细晶半自形—他形粒状结构为主(图3c~d),微晶他形粒状结构和碎裂状结构次之。

矿石构造主要有块状构造、角砾状构造、条带状构造、细脉状—网脉状构造,团块状构造、梳状构造、环带状构造、肾状—皮壳状构造、格架状—多孔蜂窝状构造次之(图4)。其中,根据角砾及胶结物组分特征差异,角砾状构造又可细分为负角砾状构造、正角砾状构造、纯角砾状构造和混角砾状构造;根据条带组分差异,条带状构造又可细分为纯条带

状构造和正条带状构造。

4.3 矿石矿物组合

对矿区矿石薄片和光片鉴定结果表明,矿石矿物主要为萤石(30%~90%),脉石矿物以石英(5%~40%)、钾长石(约5%)为主,其次是方解石、高岭石、绢云母,含有微量的黄铁矿、褐铁矿等。各矿物特征如下:

(1)萤石:颜色多为黄白色、灰黄褐色、灰紫色、浅绿色,一般呈自形、半自形和他形晶集合体,常见穿插双晶,伴有弱硅化现象。根据萤石颗粒大小可分为两种,一种为中粗粒集合体,构成块状萤石矿石,解理发育,单个晶体最大达2 cm;另一种以他形晶细小粒状,镶嵌于石英间隙内,粒度0.1~0.5 mm。

(2)石英:多为乳白色、灰白色,少为灰黑色,油质光泽。石英基本上以3种形式存在:自形—半自形晶体的石英晶簇或呈块状、脉状,多以细脉状为主,脉宽0.25~1 mm;他形晶粒状集合体,粒度0.1~

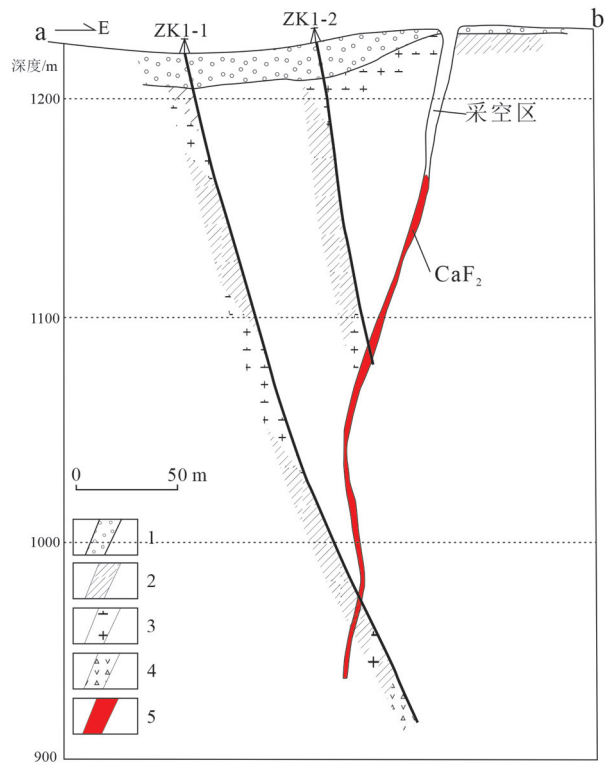


图2 水头萤石矿床1号勘探线剖面图
1—第四系;2—砂板岩;3—石英斑岩;4—矿化角砾岩;5—萤石矿体
Fig.2 Profile of exploration line No.1 of Shuitou fluorite deposit

1—Quaternary; 2—Sandstone-Slate; 3—Quartz porphyry;
4—Mineralized breccia; 5—Fluorite ore body

0.4 mm;呈脉状石英常穿插在粒状集合体中。萤石集合体中常镶嵌粒度0.16~0.45 mm的石英细脉,细脉宽1~5 mm。

(3)长石:以钾长石为主,呈自形晶、半自形晶。长石与石英紧密镶嵌,蚀变强烈。绝大多数长石已蚀变为高岭土、绢云母。

(4)方解石:灰白色,半透明状,在萤石矿体中多以团块状产出或晚阶段以独立脉状产出。

(5)黄铁矿:呈自形晶,粒度0.1~0.15 mm,有时氧化为褐铁矿,产于石英细脉中。

4.4 围岩蚀变

区内矿体围岩蚀变比较强,但分布范围严格受构造控制,其他地段围岩蚀变很弱。与矿化关系比较密切的围岩蚀变有硅化、萤石化、碳酸盐化、绿泥石化、黄铁矿化、高岭土化等,近地表由于氧化可见褐铁矿化,应为黄铁矿矿化所致。

硅化:包括围岩中的细脉—网脉状硅化和浸染

状硅化两种,浸染状硅化主要表现为局部岩石变得坚硬。由于强烈的硅化,围岩抗风化能力高,在地表常表现为脊状隆起,是区内重要的找矿标志。

萤石化:矿区萤石颜色多样,包括白色、黄褐色、灰紫色等,与石英、长石等构成脉状或细脉状、网脉状。围岩中的细脉—网脉状萤石矿化产于硅质裂隙,由于其品位较低(CaF_2 品位一般为5%~15%),一般构不成工业矿体,但可作为本区萤石矿的主要找矿标志。

碳酸盐化:主要以细脉形式沿围岩中的裂隙产出,产于矿体的外围或顶部,是成矿作用晚期的产物。

绿泥石化:矿区的绿泥石化主要局限于构造蚀变带中,产于萤石矿脉的两侧,尤其是边部表现最为明显,是构成矿体边部片理化带的主体成分。局部蚀变强烈,原岩的矿物组成和结构没有保留,绿泥石化使矿化边部蚀变带的岩石颜色变成墨绿色。

褐铁矿化:主要发育在地表岩石及矿石的裂隙面中,应是黄铁矿风化产物。

高岭土化:以白色粉末状、土状分布在矿体边缘及附近,主要在地表常见,常见长石被高岭石交代现象。

5 矿床成因探讨

5.1 成矿流体来源

前人研究表明(曾昭法,2013;曾昭法等,2013;张寿庭等,2014),水头地区萤石包裹体均一温度变化范围在126~350℃,主要集中在160~200℃,这个区间代表了该矿床成矿流体的最佳温度。水头萤石矿的流体包裹体的盐度变化范围为0.18%~3.17% NaCl_{eq} ,主要集中在0.6%~1.8% NaCl_{eq} ,变化范围极窄,这反映出该矿床成矿流体在物质组分和物理化学状态上的相似性,成矿流体为中—低温、低盐度的成矿流体。成矿流体为低密度流体,密度集中在0.90~0.95 g/cm^3 ;压力体系应该为静水压力体系,压力主要集中于 $5 \times 10^5 \sim 40 \times 10^5$ Pa。流体中富含一定量的 H_2 和 C_2H_6 等还原性气体,显示萤石是在偏还原的环境中沉淀的。上述特征表明该区萤石矿的成矿流体有大气降水的加入,成矿流体主要是大气降水为主要来源的混合流体。

5.2 成矿时代分析

裴秋明(2018)选择矿区中矿段主阶段紫色块状

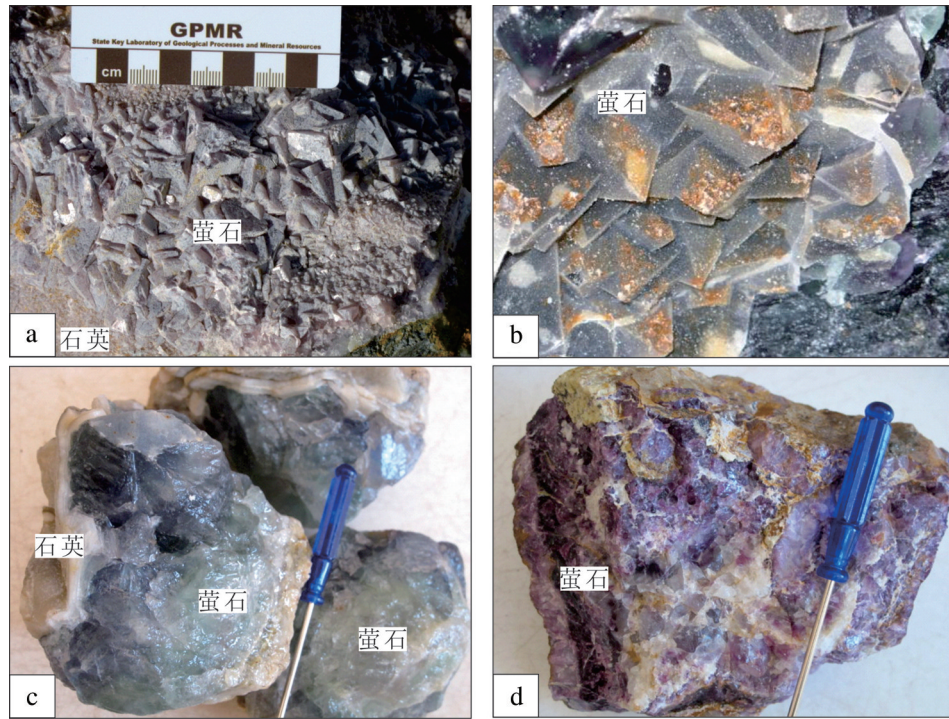


图3 萤石矿颜色与矿石结构

a—紫色萤石立方体自形结构；b—蓝绿色萤石三角八面体自形结构；c—蓝绿色萤石半自形结构；d—紫色萤石半自形结构

Fig.3 Color and ore structure of the fluorite ore

a—Purple fluorite cubic self-shaped structure; b—Blue-green fluorite triangular octahedral self-shaped structure; c—Blue-green fluorite semi-automorphic structure; d—Purple fluorite semi-automorphic structure

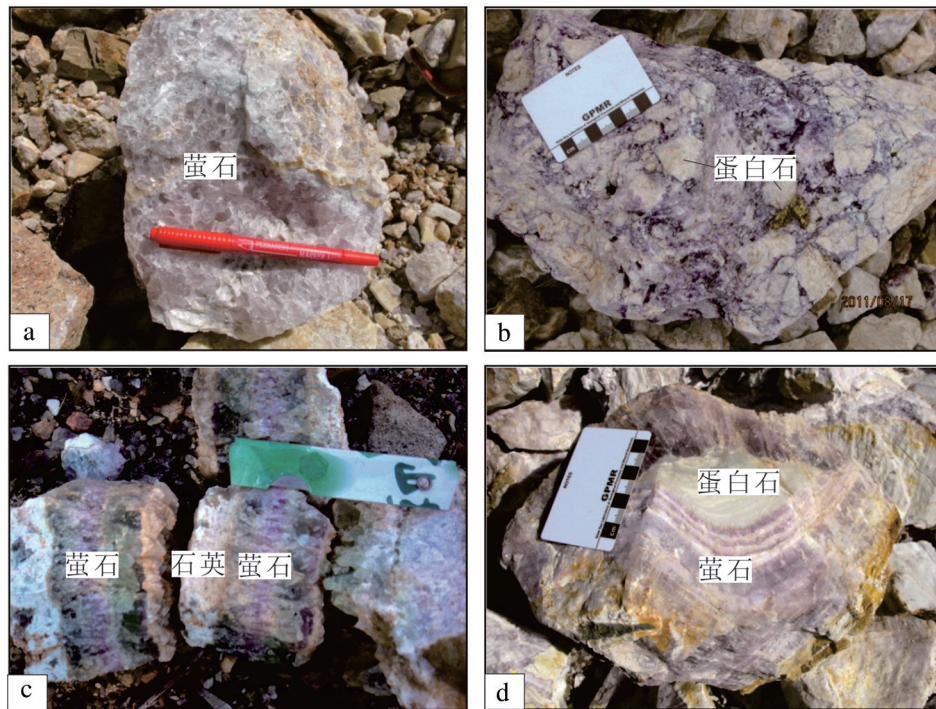


图4 萤石矿的矿石构造

a—块状构造；b—角砾状构造；c—梳状、条带状构造；d—环带状构造

Fig.4 Ore structure in the fluorite deposit

a—Block structure; b—Breccia structure; c—Comb and strip structure; d—Ring and band structure

萤石,利用同位素 Sm-Nd 测年获得等时线年龄为 (132±11) Ma,且矿区南段出露的石英斑岩锆石 U-Pb 年龄为 (136.9±1.7) Ma,表明水头萤石矿床成矿时代为早白垩世。Ouyang et al.(2015)对大兴安岭中南部岩浆岩及主要金属矿床的年龄进行统计分析,结果表明,大兴安岭南段地区大型成岩和成矿事件的年龄主要集中在 145~120 Ma,且成矿作用略晚于成岩时代。宋开瑞(2019)总结林西地区萤石矿床与多金属矿床成矿年龄(图 5),其中金属矿床成矿年龄介于 130~145 Ma,属于早白垩世;林西地区萤石矿床年龄则集中于 132~137 Ma,与该地区金属矿床主成矿时代基本一致。上述年代学证据表明,林西地区萤石成矿作用与燕山期频繁的岩浆-构造关系密切,同属于大兴安岭南段早白垩世成矿高峰的一部分。

5.3 矿床成因探讨

根据水头萤石矿床成矿地质背景、控矿地质特征,结合成矿时代、成矿流体特征分析,认为水头萤石矿床形成于早白垩世,为大兴安岭南段地区燕山期频繁构造-岩浆-热液活动的产物,区域燕山期石英斑岩为成矿提供了物质来源与热源。成矿流体温度介于 126~350℃,主要集中在 160~200℃,成矿流体有大气降水的加入,主要是以大气降水为主要来源的混合流体。通过比对矿石-围岩稀土元素(曹华文等,2014),认为 F 元素主要来源于深部岩浆热液,Ca 元素主要来源于火山-沉积地层,水岩反应是导致萤石沉淀的主要机制(张寿庭等,2014),矿床类型为断裂控矿、中低温热液充填型脉状萤石矿床。

6 矿石的开发利用现状及潜力

6.1 矿石的化学成分分析

6.1.1 全矿分析

根据光谱半定量分析、化学全分析结果(表 1,表 2),矿石的化学成分主要为 CaF₂、SiO₂,其次为 Al₂O₃、Fe₂O₃、FeO、CaO、MgO、K₂O、Na₂O、P₂O₅等。

截至 2019 年底,共查明萤石矿保有资源/储量(121b+122b+333)矿石量 1700.48 kt,平均品位 CaF₂ 62.27%,CaF₂ 矿物量 1058864 t,矿床资源/储量规模为大型 90^①。

6.1.2 矿石的有益有害组分

矿体矿石的主要有益组份为 CaF₂,矿体平均品位 62.27%。根据单工程平均品位计算结果,CaF₂ 含

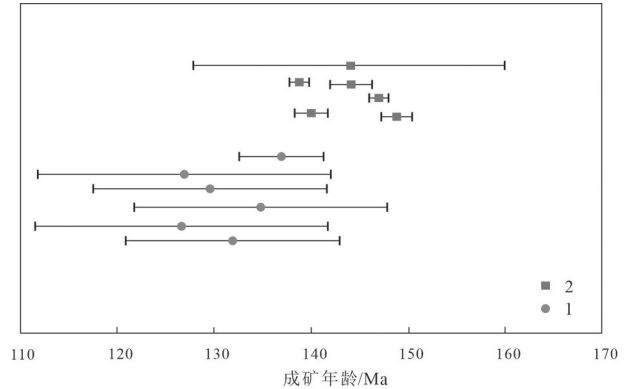


图 5 林西地区多金属矿床与萤石矿床年龄图谱(据宋开瑞,2019)

1—金属矿成矿年龄;2—萤石矿成矿年龄

Fig. 5 Ore-forming age of metal-fluorite deposits in Linxi area (after Song Kairui, 2019)

1—Ore-forming age of metal deposits; 2—Ore-forming age of fluorite deposits

表 1 矿石光谱半定量分析

Table 1 The chemical results of semiquantitative spectrometric analysis

元素	As	Co	B	Sb	Ge	Pb	Sn	Ga	W	Cr
含量/10 ⁻⁶	0.52	1.24	1.24	0.22	0.11	2.25	5.43	0.65	0.36	2.42
元素	In	Ni	Bi	Mo	V	Cd	Cu	Zn	Ag	Be
含量/10 ⁻⁶	0.01	0.14	0.23	0.10	20.08	0.01	4.69	9.66	0.04	0.22

注:测试单位:内蒙古自治区有色地质勘查局一〇八队实验室;测试范围:>3%;检验环境:温度 24°,湿度 52%RH。

量 23.86%~68.71%,品位变化系数为 15.59%,有用组分分布均匀。矿体品位沿走向总体变化不大,局部地段品位稍高。根据矿石组合分析结果(表 3),矿石有害组分为 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、CaO、MgO、S、P 等,其中 SiO₂ 含量 5.34%~38.36%,平均 36.88%; Al₂O₃: 0.70%~2.19%,平均 1.75%; Fe₂O₃: 0.85%~3.14%,平均 2.61%; CaO: 0.36%~7.13%,平均 1.63%; MgO: 0.92%~5.88%,平均 5.84%; S: 0.02%~0.11%,平均 0.06%; P: 0.02%~0.07%,平均 0.04%; Pb: 0.00%~0.04%,平均 0.03%; Zn: 0.01%~0.09%,平均 0.06%。有害组分含量变化不大,且均低于有害杂质的要求,矿石质量稳定。

6.1.3 矿石中有害化学组分赋存状态

矿石有害化学组分主要包括 SiO₂、S、Fe₂O₃ 和 CaO。SiO₂ 主要呈脉状或集合体状的乳白色石英脉或玉髓蛋白质、暗色含铁石英脉、胶状硅质岩等;由于上述杂质均呈团块状,所以经手选后大部分即可

表2 化学全分析结果(%)

Table 2 The chemical results of complete chemical analysis (%)

取样位置	样品编号	CaF ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	CaO*	MgO
北矿段	QH1	45.33	25.62	1.73	2.13	0.34	0.013	0.007	5.26	1.48
北矿段	QH2	90.35	3.12	0.86	0.73	0.98	0.005	0.006	0.64	0.62
取样位置	样品编号	BaSO ₄	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	S	Pb	Zn	As	H ₂ O
中矿段	QH1	0.12	0.0010	0.0100	0.0120	0.02	0.02	0.03	0.0002	1.50
中矿段	QH2	0.14	0.0021	0.0120	0.0110	0.03	0.01	0.04	0.0001	1.00

注:CaO*为钙总量。

剔除。S主要赋存于黄铁矿等硫化物之中,其硫化物以浸染状、局部呈星散状分布于石英细脉中,一般含量极少,故不影响矿石质量;而含量超出指标的,其黄铁矿多呈团块状,而且多分布在深部,通过手选也可剔除。Fe₂O₃主要赋存于含锰赤铁矿、褐铁矿中,其铁矿物多呈浸染状赋存于矿石中,局部呈细脉状或集合体状产出,后者通过手选也可以剔除。CaO主要以星点状方解石赋存于萤石晶粒或其集合体之间,少量以方解石脉或结晶灰岩角砾产出,除了呈星点状者以外,余者均可手选予以剔除。

综上所述,矿石中主要有有害杂质,大部均以集合体或具一定粒度的块状产出,一般经手选即可提高矿石质量。矿石类型为石英-萤石型矿石为主的冶金工业用普通萤石矿,易选。

6.2 矿床共(伴)生矿产综合评价

矿体中矿石矿物为萤石,脉石矿物为石英、长石、高岭土、绢云母、方解石,含有微量的黄铁矿、褐铁矿等。根据光谱分析、化学全分析、组合样品分析结果矿石中有(益)用组分为CaF₂,其他伴生组分(元素)为SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、CaO、MgO、S、P、Pb、Zn、As等,其中SiO₂:3.12%~38.36%、Al₂O₃:0.70%~2.19%、Fe₂O₃:0.73%~3.14%、CaO:0.36%~7.13%、

MgO:0.62%~5.88%、S:0.02%~0.11%、As:0.00005%~0.0002%、P:0.011%~0.07%、Pb:0.00%~0.04%、Zn:0.001%~0.09%,目前经济技术条件下无综合利用价值。故本矿床属单一组分的萤石矿床。对矿区矿石、围岩进行了放射性检查,矿区放射性含量低,无工业价值。

6.3 矿石放射性评价

围岩岩性主要为凝灰质粉砂岩,其地表计量当量率变化范围在0.10~0.23 μSv/h。岩心内凝灰质粉砂岩计量当量率变化范围在0.05~0.12 μSv/h。公众照射评价的剂量限值执行:年有效剂量不超过5 mSv,换算成单位小时的计量则为0.57 μSv/h。经过对比,围岩放射性强度均小于《放射卫生基本标准》(GB 4792-84)中的要求。围岩中的有益组分为CaF₂,有害组分As含量0.0002%、S含量0.001%,对选矿影响可以忽略不计。围岩蚀变带内CaF₂含量检测显示,CaF₂含量0.93%~13.48%,在近矿体处蚀变较强,CaF₂含量稍高,越远离矿体蚀变逐渐减弱,CaF₂含量减少。

对萤石矿石的照射量率进行了统计,萤石矿石γ总量最大值2.59 nC/(kg·h),最小值1.60 nC/(kg·h),平均值2.00 nC/(kg·h)。经换算得到:萤石矿石

表3 组合样分析结果表(%)

Table 3 The chemical results of compound samples (%)

采样位置	样品编号	CaF ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	S	P	Pb	Zn
北矿段	ZH1	45.12	36.54	1.84	2.08	1.52	5.79	0.02	0.04	0.02	0.02
	ZH2	52.35	37.21	1.65	3.14	1.74	5.88	0.10	0.03	0.00	0.01
	平均值	48.74	36.88	1.75	2.61	1.63	5.84	0.06	0.04	0.01	0.02
中矿段	ZH3	85.69	8.12	0.98	1.02	0.36	1.07	0.11	0.07	0.04	0.06
	ZH4	91.12	5.34	0.70	0.85	0.64	0.92	0.06	0.02	0.03	0.04
	平均值	88.41	6.73	0.84	0.94	0.50	1.00	0.09	0.05	0.04	0.05
南矿段	ZH5	49.58	38.36	1.62	1.72	7.06	1.27	0.02	0.03	0.03	0.08
	ZH6	53.56	32.18	2.19	1.78	7.13	1.35	0.06	0.06	0.04	0.09
	平均值	51.57	35.27	1.91	1.75	7.10	1.31	0.04	0.05	0.04	0.09

的计量当量率在0.06~0.10 $\mu\text{Sv/h}$ 。

6.4 矿石工业利用性能评价

水头矿区萤石矿矿石矿物为萤石,脉石矿物为石英、长石、高岭土、绢云母、方解石,含有微量的黄铁矿、褐铁矿等。矿石的化学成分主要为 CaF_2 、其次为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 S 、 P 等,除主要组分 CaF_2 外,其他伴生组分均未达到工业利用指标,属于单一组分的萤石矿床。根据矿石性质,采用浮选工艺分选该矿石。通过选矿试验,推荐磨矿细度为200目含量占80%比较适宜;矿浆温度为25℃;碳酸钠最佳用量取2000 g/t,维持矿浆pH值在8.5左右;用水玻璃作抑制剂,确定水玻璃用量为1000 g/t;用油酸作捕收剂,油酸用量为120 g/t,通过1粗选、2次扫选、4次精选获得萤石精矿。取得了较理想的技术指标。

通过试验研究,可得到如下技术指标:萤石精矿产率49.32%, CaF_2 品位97.56%,回收率87.07%。尾矿产率50.68%, CaF_2 品位14.10%,回收率12.93%。

6.5 样品代表性及选矿工艺流程的选择

矿石类型以萤石型为主,采样方法为全巷法。样品采自矿区内深部坑道工程,接近并低于矿区平均品位,样品代表性较好。选矿试验前,在选矿样品中挑选具有代表性的矿石,对矿石的矿物成分、矿石结构等进行岩矿鉴定,为选矿试验提供依据。

萤石矿石主要回收有用组分为 CaF_2 ,其他伴生组分均未达到综合回收利用指标。根据矿石性质,采用浮选工艺分选该矿石。选矿试验主要从磨矿细度、矿浆温度、碳酸钠用量、水玻璃用量、捕收剂用量方面进行条件试验,确定最佳工艺条件。并进行了综合开路试验和闭路试验。原矿在磨矿细度200目占80%的条件下经1次粗选、2次扫选、4次精选得到萤石精矿。

选矿试验结果以及矿山选矿工艺指标表明水头矿区萤石矿石可浮性较好,属于易选矿石。

7 结 论

(1)水头萤石矿为一大型矿床,共查明萤石矿保有资源/储量(121b+122b+333)矿石量1700.48 kt,平均品位 CaF_2 62.27%, CaF_2 资源量1058864 t。萤石矿体严格受断裂构造控制,主要以脉状和透镜状赋

存。矿体主体沿N-S方向不连续分布,长约10 km。矿物组成简单,脉石矿物为萤石、矿石矿物主要为石英和方解石。

(2)水头矿床属单一组分的萤石矿床,矿石的化学成分主要为 CaF_2 、 SiO_2 ,其次为 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 FeO 、 CaO 、 MgO 、 K_2O 、 Na_2O 、 P_2O_5 等。矿体矿石的主要有益组份为 CaF_2 ,矿石有害组分为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 S 、 P 等。大部有害杂质以集合体或具有一定粒度的块状产出,矿石类型为石英-萤石型矿石为主的冶金工业用普通萤石矿。

(3)通过1次粗选、2次扫选、4次精选获得萤石精矿,并得到如下技术指标:萤石精矿产率49.32%, CaF_2 品位97.56%,回收率87.07%。尾矿产率50.68%, CaF_2 品位14.10%,回收率12.93%。选矿试验表明,水头萤石矿石可浮性较好,属于易选矿石,具有很好的开采价值。

注释

① 褚继柱, 腾淑兰, 耿文彪, 褚宗男, 赵凯龙, 2018. 内蒙古自治区林西县水头矿区萤石矿生产勘探报告[R]. 赤峰:林西县金源矿业开发有限公司.

Reference

- Ahiipeeba H H, Su Shoutian. 1980. The significance of fluorite characterization in the search for hydrothermal uranium mineralization related to terrestrial volcanic formation[J]. *Uranium Geology*, (3): 36-39 (in Chinese with English abstract).
- Cao Huawen, Zhang Shouting, Gao Yongzhang, Zeng Zhaofa, Gao Feng, Wang Guangkai, Zou Hao. 2014. REE geochemistry of fluorite from Linxi fluorite deposit and its geological implications, Inner Mongolia Autonomous Region[J]. *Geochimica*, 43(2): 131-140 (in Chinese with English abstract).
- Cao Junchen. 1986. Classification and geochemical characteristics of stratabound fluorite deposits in China[J]. *Mineral Resources and Geology*, 6(1): 27-36 (in Chinese with English abstract).
- Fang Yi, Zhang Shouting, Zou Hao, Zhang Peng, Zeng Zhaofa, Gao Feng. 2014. Comprehensive exploration method for fluorite deposits in grasslands covered area: A case study of the Saiboluogoumen fluorite deposit in Linxi, Inner Mongolia, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition)*, 41(1): 94-101 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Haoyuan, Zhao Zhidan, Zhu Xinyou, Yang Shangsong, Jiang Binbin, Yang Chaolei, Mao Chunwei. 2020. Characteristics and metallogenic significance of granite porphyry and pyroxene diorite

- in the Bianjiadayuan Pb–Zn–Ag polymetallic deposit, Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 47(2): 450–471 (in Chinese with English abstract).
- Li Changjiang, Jiang Xuliang. 1989. Strontium isotope geochemistry of fluorite deposits in Wuyi–Dongyang area, Zhejiang Province[J]. *Mineral Deposits*, 8(3): 65–74 (in Chinese with English abstract).
- Li Keqin. 1985. Extremely large sedimentary fluorite deposit formed by volcanism[J]. *Geology and Prospecting*, 28(1): 30–31 (in Chinese with English abstract).
- Luo Zhaohua. 2011. The spatial–temporal structure and metallogenic prediction system of magmatic metallogenic system evolution[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, (S1): 505–506 (in Chinese with English abstract).
- Möller P, Parekh P P, Schneider H J. 1976. The application of Tb/Ca–Tb/La abundance ratios to problems of fluorite genesis[J]. *Mineralium Deposita*, 11(1): 111–116.
- Ouyang H, Mao J W, Zhou Z H, Su H M. 2015. Late Mesozoic metallogeny and intracontinental magmatism, southern Great Xing'an Range, northeastern China[J]. *Gondwana Research*, 27(3): 1153–1172.
- Pei Qiuming. 2018. A Study on Metallogenetic Regularity and Prognosis of Concealed Ore Body in Southern Great Xing'an Range, Northeastern China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Pei Q M, Zhang S T, Santosh M, Cao H W, Zhang W, Hu X K, Wang L. 2017a. Geochronology, geochemistry, fluid inclusion and C, O and Hf isotope compositions of the Shuitou fluorite deposit, Inner Mongolia, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 83: 174–190.
- Pei Q M, Zhang S T, Hayashi K, Cao H W, Li D, Tang L, Hu X K, Li H X, Fang D R. 2017b. Permo–Triassic granitoids of the Xing'an–Mongolia segment of the Central Asian Orogenic Belt, Northeast China: Age, composition, and tectonic implications[J]. *International Geology Review*, 79: 1–23.
- Shao Jian, Mou Baolei, Zhu Huizhong, Zhang Luqiao. 2010. Deep source and background of Mesozoic metallogenic materials in the middle and southern part of The Greater Hinggan Mountains[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 26(3): 649–656 (in Chinese with English abstract).
- Shao Jian, Wang You, Tang Juxing. 2017. A reflection on the Xarmoron tectonomagmatic belt, Inner Mongolia, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(10): 3002–3010 (in Chinese with English abstract).
- Song Kairui. 2019. Metallogenetic Relationship and Prospecting Significance between Fluorite Deposits and Lead–Zinc–Silver Polymetallic Deposits in the Linxi area, Inner Mongolia[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Sun Yuejun, Lai Bo, Liu Hejun. 2018. Evaluation of Fluorite Resource Potential in Inner Mongolia[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press (in Chinese).
- USGS. 2019. Mineral Commodity Summaries[R]. United States Geological Survey.
- Wan L, Lu C D, Zeng Z X, Mohammed A S, Liu Z H, Dai Q Q, Chen K L. 2018. Nature and significance of the late Mesozoic granitoids in the southern Great Xing'an range, eastern Central Asian Orogenic Belt[J]. *International Geology Review*, 61(5): 584–606.
- Wang Jiping, Shang Pengqiang, Xiong Xianxiao, Yang Huiyan, Tao Yao. 2015. Metallogenetic regularities of fluorite deposits in China[J]. *Geology in China*, 42(1): 18–32 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jiping, Zhu Yannong, Zhu Jinbing, Li Jing, Shang Pengqiang, Xiong Xianxiao. 2018. Prediction model and resource potential assessment of fluorite deposits in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 25(3): 172–178 (in Chinese with English abstract).
- Wang L, Tang L, Zhang S T, Santosh M, Pei Q M, Cao H W, Liu F G. 2020. Genesis of the Yujiadian F–Pb–Zn–Ag deposit, Inner Mongolia, NE China: Constraints from geochemistry, fluid inclusion, zircon geochronology and stable isotopes[J]. *Ore Geology Reviews*, 122: 103528.
- Wang Liang, Pei Qiuming, Cao Huawen, Zhao Yu, Song Kairui, Sun Bowei, Fang Yi. 2018. Characteristics of ore–forming fluids and genesis of Xiaobeigou fluorite deposit in Linxi area, Inner Mongolia[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 38(2): 189–198 (in Chinese with English abstract).
- Wang Liang, Zhang Shouting, Pei Qiuming, Cao Huawen, Huxinkai. 2017. Geochemical signatures and petrogenesis significance of biotite from the Triassic granite in Linxi area, Inner Mongolia, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science edition)*, 44(2): 205–215 (in Chinese with English abstract).
- Wu Ziqiang, Xie Congzhi, Yin Changping, Wang Sufen. 1989. *Geology and Exploration of Fluorite Deposits in China*[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Xia Bingwei, Cao Huawen, Pei Qiuming, Yang Bing, Wu Zonglin, Xu Teng, Han Shuhe. 2016. Exploration of fluorite deposit by the combination of VLF–EM and EH4 on shallow–covered area[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 36(2): 228–233 (in Chinese with English abstract).
- Xia Hongyuan, Liang Shuyi, Shuai Dequan. 1981. Fluorite characteristics and mineralization distribution of huangshamai tungsten deposit in southern Jiangxi Province[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology: (Z1)*: 117–123 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Zhaofa. 2013. *Geochemical Characteristics and Genesis of Fluorite Deposit in Linxi area, Inner Mongolia*[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Zeng Zhaofa, Cao Huawen, Gao Feng, Gao Yongzhao, Zou Hao, Li Dong. 2013. Fluid inclusion study of fluorite deposits in Linxi region, Inner Mongolia[J]. *Geochimica*, 42(1): 73–81 (in Chinese

- with English abstract).
- Zhai D G, Williams-Jones A E, Liu J J, Selby D, Voudouris P C, Tombros S, Li K, Li P L, Sun H J. 2020. The genesis of the giant Shuangjianzishan epithermal Ag-Pb-Zn Deposit, Inner Mongolia, Northeastern China[J]. *Economic Geology*, 115(1): 101-128.
- Zhang H Y, Zhai D G, Liu J J, Li P L, Li K, Sun H J. 2019. Fluid inclusion and stable (H-O-C) isotope studies of the giant Shuangjianzishan epithermal Ag-Pb-Zn deposit, Inner Mongolia, NE China[J]. *Ore Geology Reviews*, 115: 103170.
- Zhang Huitang, Yang Gendong, Zhang Cunwei. 1984. Discussion on the characteristics and genesis of fluorite deposit in Wuyi area[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science edition)*, 24(1): 16-25 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Shouting, Cao Huawen, Zhen Luo, Ma Ying, Fang Yi, Zhou Hao. 2014. Characteristics of ore-forming fluids and mineralization process of the Shuitou fluorite deposit in Linxi, Inner Mongolia autonomous region[J]. *Earth Science Frontiers*, 21(5): 31-40 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wei. 2014. Vertical Zoning Characteristics and Prediction of Fluorite Deposits in Linxi Region, Inner Mongolia[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 安德烈耶娃, 苏守田. 1980. 萤石的标型特征对寻找陆相火山建造有关的热液铀矿化的意义[J]. *放射性地质*, (3): 36-39.
- 曹华文, 张寿庭, 高永璋, 曾昭法, 高峰, 王光凯, 邹灏. 2014. 内蒙古林西萤石矿床稀土元素地球化学特征及其指示意义[J]. *地球化学*, 43(2): 131-140.
- 曹俊臣. 1986. 中国层控萤石矿床分类及某些成矿地球化学特征[J]. *矿产与地质*, 6(1): 27-36.
- 方乙, 张寿庭, 邹灏, 张鹏, 曾昭法, 高峰. 2014. 浅覆盖区萤石矿综合勘查方法研究——以内蒙古林西赛波沟门萤石矿为例[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 41(1): 94-101.
- 蒋昊原, 赵志丹, 祝新友, 杨尚松, 蒋斌斌, 杨朝磊, 茅椿伟. 2020. 内蒙古边家大院铅锌银矿床花岗岩斑岩及辉石闪长岩特征及对成矿的指示[J]. *中国地质*, 47(2): 450-471.
- 李长江, 蒋叙良. 1989. 浙江武义—东阳地区萤石矿床的铍同位素地球化学研究[J]. *矿床地质*, 8(3): 65-74.
- 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*, 28(1): 30-31.
- 罗照华. 2011. 岩浆成矿系统演化的时空结构与成矿预测体制[J]. *矿物学报*(S1): 505-506.
- 裴秋明. 2018. 大兴安岭南段萤石矿成矿规律及隐伏-半隐伏矿体预测[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 邵济安, 牟保磊, 朱慧忠, 张履桥. 2010. 大兴安岭中南段中生代成矿物质的深部来源与背景[J]. *岩石学报*, 26(3): 649-656.
- 邵济安, 王友, 唐菊兴. 2017. 有关内蒙古西拉木伦带古生代—早中生代构造环境的讨论[J]. *岩石学报*, 33(10): 3002-3010.
- 宋开瑞. 2019. 内蒙古林西地区萤石矿与银多金属矿成矿关系及找矿意义[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 孙月君, 赖波, 刘和军. 2018. 内蒙古自治区萤石矿资源潜力评价[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 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.
- 王吉平, 朱颜农, 朱敬宾, 李敬, 商朋强, 熊先孝. 2018. 中国萤石矿预测评价模型与资源潜力分析[J]. *地学前缘*, 25(3): 172-178.
- 王亮, 裴秋明, 曹华文, 赵玉, 宋开瑞, 孙伯为, 方乙. 2018. 内蒙古林西地区小北沟萤石矿床成矿流体特征及矿床成因探讨[J]. *桂林理工大学学报*, 38(2): 189-198.
- 王亮, 张寿庭, 裴秋明, 曹华文, 胡昕凯. 2017. 内蒙古林西三叠纪花岗岩中黑云母地球化学特征及成岩意义[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 44(2): 205-215.
- 吴自强, 谢从智, 殷昌平, 王素芬. 1989. 中国萤石矿床地质与勘查[M]. 北京: 地质出版社.
- 夏炳卫, 曹华文, 裴秋明, 杨冰, 武宗林, 许腾, 韩术合. 2016. VLF-EM和EH4在浅覆盖区萤石矿床勘查中的应用——以林西水头萤石矿区为例[J]. *桂林理工大学学报*, 36(2): 228-233.
- 夏宏远, 梁书艺, 帅德权. 1981. 赣南黄沙脉钨矿床的萤石特征和成矿分布[J]. *矿物岩石*(Z1): 117-123.
- 曾昭法. 2013. 内蒙古林西地区萤石矿床地球化学特征与成因探讨[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 曾昭法, 曹华文, 高峰, 高永章, 邹灏, 李冬. 2013. 内蒙古林西地区萤石矿床流体包裹体研究[J]. *地球化学*, 42(1): 73-81.
- 张惠堂, 杨耕东, 张存威. 1984. 试论武义地区萤石矿床特征及其成因[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 24(1): 16-25.
- 张寿庭, 曹华文, 郑砾, 马莹, 方乙, 邹灏. 2014. 内蒙古林西水头萤石矿床成矿流体特征及成矿过程[J]. *地学前缘*, 21(5): 31-40.
- 张伟. 2014. 内蒙古林西地区萤石矿床垂向分带特征与找矿预测[D]. 北京: 中国地质大学(北京).