

宁夏二人山银铅多金属矿短波红外勘查指示意义

朱海军¹, 苏力¹, 邱佳炜², 谷守江¹, 孙雪平¹, 刘新星², 张汐¹, 周敖日格勒³,
王彦朋¹, 张奋发¹

(1. 宁夏回族自治区地质资料馆, 宁夏 银川 750021; 2. 河北地质大学, 河北省战略性关键矿产资源重点实验室, 河北 石家庄 050031; 3. 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)

摘要: 宁夏卫宁北山多金属矿区是宁夏境内重要的金属矿产成矿区之一, 区内目前发现有金场子金矿、二人山银铅矿等多个矿床(点), 其中二人山银铅多金属矿是目前该地区最大的浅成低温热液型银铅多金属矿床。伴随着找矿的进一步推进, 亟需在找矿模型与找矿预测方面对矿区进行深入研究, 以期进一步扩大资源量。本文以二人山银铅多金属矿床作为研究对象, 利用短波红外技术(SWIR)对钻孔岩心进行扫描, 厘定岩心中蚀变矿物种类、相对含量、分布特征, 揭示蚀变矿物光谱参数变化规律与矿化强度之间的关系。研究表明, 短波红外测量得到的矿物包括绢云母族矿物、高岭石族矿物、碳酸盐类矿物、蒙脱石族矿物等, 其中绢云母族矿物和碳酸盐类矿物为钻孔的贯通矿物。在矿化段, 蚀变矿物族组合为绢云母族矿物+高岭石族矿物+少量碳酸盐类矿物。通过计算绢云母 Al—OH 光谱特征参数发现, 绢云母 Pos 2 200 nm 特征吸收峰、绢云母结晶度 IC 值与矿化具有良好的相关关系, 在矿化高品位区域内, Pos 2 200 (<2 204 nm) 和绢云母结晶度(IC 值)>2.5 的二者叠加区可作为卫宁北山地区勘查此类矿床的重要指示条件或者找矿标志。

关键词: 短波红外; 热液蚀变; 蚀变矿物; 绢云母; 二人山银铅多金属矿

中图分类号: P618.4; P575.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2025)01-0141-11

Short-wave infrared characteristics and exploration indication of the Errenshan silver-lead polymetallic deposit in Ningxia

ZHU Hai-jun¹, SU Li¹, QIU Jia-wei², GU Shou-jiang¹, SUN Xue-ping¹, LIU Xin-xing², ZHANG Xi¹,
ZHOU Aorigele³, WANG Yan-peng¹ and ZHANG Fen-fa¹

1. Geological Archives of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750021, China; 2. Key Laboratory of Strategic Critical Mineral Resources, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China; 3. MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: The Weining Beishan polymetallic mining area in Ningxia is one of the important metal mineral mineralization areas in Ningxia. At present, multiple ore deposits (points) have been discovered in the research area, including Jinchangzi gold mine and Errenshan lead silver mine. The Errenshan silver lead polymetallic deposit is a shallow low-temperature hydrothermal type and is currently the largest known silver lead polymetallic deposit in the region. With the further deepening of ore exploration in Errenshan, there is an urgent need for further

收稿日期: 2023-03-29; 接受日期: 2024-07-17; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 宁夏自然科学基金项目(2021AAC03477)

作者简介: 朱海军(1984-), 男, 学士学位, 工程师, 主要从事地质矿产勘查工作, E-mail: 406087476@qq.com; 通讯作者: 刘新星(1987-), 男, 博士, 副教授, 主要从事地质找矿工作, E-mail: liuxinxing963@163.com。

in-depth research on ore exploration models and prediction in the area, in order to further expand the resources and exploration achievements. This article takes the Errenshan silver lead polymetallic deposit as the research object, uses short wave infrared technology (SWIR) to scan the borehole core, determine the types, relative content, and distribution characteristics of altered minerals in the core, and reveal the relationship between the changes in spectral parameters of altered minerals and mineralization intensity. The shortwave infrared technology is used to measure muscovite group minerals, kaolinite group minerals, carbonate minerals, montmorillonite group minerals, etc. Sericite group minerals and carbonate minerals are the through minerals of the borehole, kaolinite, montmorillonite, chlorite and sulfate minerals are only a small amount distributed in the borehole, and the altered mineral combination in the mineralization section is sericite+kaolinite+a small amount of carbonate minerals. By calculating the characteristic parameters of sericite Al—OH spectrum, it is found that the characteristic absorption peak of sericite Pos 2 200 nm and the IC value of sericite crystallinity have a good correlation with mineralization. In high-grade mineralized areas, the overlapping area of Pos 2 200(<2 204 nm) and sericite crystallinity (IC value)>2.5 can serve as an important indicator or prospecting marker for exploring such deposits in Weining Beishan area.

Key words: short-wave infrared; hydrothermal alteration; alteration minerals; sericite; Errenshan silver lead mine polymetallic mine

Fund support: Ningxia Natural Science Foundation Project (2021AAC03477)

围岩蚀变是热液型矿床的研究重点(翟裕生等, 2011), 因其与矿体的紧密关系, 通过探究蚀变矿物类型、空间分布特征, 不仅能够加深对矿床的成因认知, 也能提高对矿体的勘查效率。而传统的对围岩蚀变的研究手段通常先进行宏观的岩相学观察, 再进行微观的实验如 EPMA、XRD 等, 存在周期长、成本高等缺点。近年来兴起的红外光谱技术具有成本低、效率高的特点, 可快速大量地识别蚀变矿物 (Laakso *et al.*, 2016; 陈华勇等, 2019; 任欢等, 2020)。红外光谱技术是利用在光谱下矿物的基团的振动引起波谱参数的变化, 利用不同的参数特征即可判别所测试的矿物种类 (Chang *et al.*, 2011)。本次研究采用的短波红外波光谱技术 (SWIR) 波段为 1 300~2 500 nm, 可以有效地识别如硅酸盐矿物 (云母、绿泥石、滑石等)、含羟基硅酸盐矿物 (高岭石等)、碳酸盐矿物等。同时可提取特征矿物的反射波谱特征, 如绢云母 Pos 2 200 (在 2 200 nm 处吸收峰位置偏移)、IC 值 (绢云母 2 200 nm 处吸收深度与 1 900 nm 处层间吸附水深度之比) 等参数反映矿物的形成环境以及指示热液中心 (连长云等, 2005; 成嘉伟等, 2023)。如今利用红外光谱技术测量提取蚀变矿物的光谱信息是目前矿床领域研究中的热点, 光谱技术已被应用于不同类型的矿床研究当中, 如斑岩型矿床 (Yang *et al.*, 2005)、浅成低温热液矿床 (Chang *et al.*, 2011)、(VMS) 火山成因块状硫化物矿床 (Jones *et al.*, 2005; Laakso *et al.*, 2016) 和

部分铁氧化物铜金矿床 (IOCG) 中 (Tappert *et al.*, 2013)。

二人山浅成低温热液型银铅多金属矿位于宁夏北部卫宁北山矿集区内, 大地构造位置属秦祁昆造山系北祁连造山带东端。在二人山地区, 以往前人研究工作主要集中在矿床成因、流体来源、成矿流体性质方面 (潘进礼等, 2013; 李刚, 2019; 邹武建等, 2021), 而在找矿模型与预测方面则处于空白阶段。为有效提高勘查效率, 指示矿化中心, 本文通过对二人山银铅多金属矿 ZK139-1、ZK139-2 钻孔岩心开展短波红外光谱测试扫描工作, 结合岩心资料, 揭示蚀变矿物组合、蚀变矿物吸收峰特征与矿化之间关系, 为二人山浅成低温热液型银铅多金属矿提供进一步勘查找矿依据。

1 地质概况

宁夏卫宁北山北与华北地台阿拉善地块相连, 东与华北地台鄂尔多斯地块毗邻, 位于构造活动带与稳定地块的交接部位之构造活动带边缘, 具有得天独厚的成矿地质背景和良好的成矿条件, 找矿潜力巨大。卫宁北山作为宁夏境内重要的银铁金铅矿集区, 先后发现了铜牛沟铜矿、二人山银铅多金属矿、金场子金矿等矿床。区内各类蚀变常相互叠加分布, 常见的蚀变有黄铁矿化、褐铁矿化、黄钾铁矾化、硅化、碳酸盐化, 次为毒砂化、钠长石化、高岭土

化、重晶石化、绢云母化等,多种热液型矿物密集出现,铅、锌、铜、金等元素分带现象明显(艾宁, 2014)。

二人山是卫宁北山地区内最重要的成矿区,区内断裂、褶皱构造发育,总体呈现东西向构造行迹,从而也控制了区内岩层的总体走向以及山体形态。断裂构造以逆断层为主,遍布晚古生代地层。断裂走向与地层走向基本一致,常发育褶皱两翼,不仅破坏了褶皱形态,同时也造成地层缺失。二人山银铅多金属矿位于卫宁北山区内西南部,地处大铜沟向斜南翼及新井沟-二人山背斜南翼被二人山-金场子断裂带(F_{18} 断裂带)的切割部位,矿体受 F_{18} 构造破碎带控制明显,以交代、填充的形式,产出在构造破碎带中裂隙表面及蚀变岩中(图 1)。含矿岩系主要为 F_{18} 断裂带中的构造角砾岩、蚀变钙质粉砂岩等岩

类,局部受后期热液作用有不同程度的轻微变质。主要围岩以构造角砾岩和粉砂岩为主,构造角砾岩以褐铁矿化、高岭土化和碳酸盐化为主,粉砂岩、细砂岩类以硅化和星点状的黄铁矿化为主,矿石矿物有方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、辉银矿、铜铁矿、铜蓝、斑铜矿等矿物,脉石矿物有石英、长石、方解石、白云石、黏土矿物等(邹武建等, 2021)。

二人山矿区及周围区域出露主要地层为上泥盆统老君山组(D_3l)、下石炭统前黑山组(C_1q)、下石炭统臭牛沟组(C_1c)、上石炭统土坡组(C_2t) (图 1)。前黑山组与老君山组分布在 F_{18} 断裂带切割部位。矿区的岩浆活动非常微弱,仅有脉体零星出露。主要为辉绿岩体、似斑状含石英闪长岩脉及闪长玢岩脉,但前人认为闪长玢岩本身并不含矿,仅为成矿提供热源与动力(艾宁, 2014)。

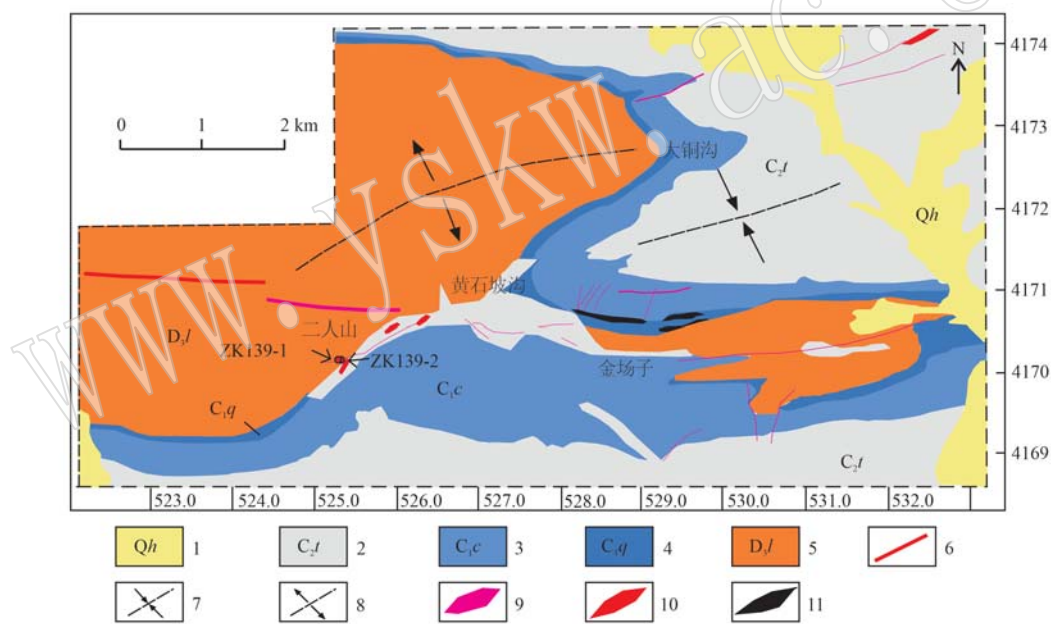


图 1 矿区地质简图(朱丹等, 2015)

Fig. 1 Geological sketch map of the mining area (Zhu Dan *et al.*, 2015)

1—第四系; 2—上石炭统土坡组; 3—下石炭统臭牛沟组; 4—下石炭统前黑山组; 5—上泥盆统老君山组; 6—断层; 7—向斜轴; 8—背斜轴; 9—闪长玢岩脉; 10—褐铁矿化带; 11—金矿体

1—Quaternary; 2—Upper Carboniferous Tupo Formation; 3—Lower Carboniferous Chouniugou Formation; 4—Lower Carboniferous Qianheishan Formation; 5—Upper Devonian Laojunshan Formation; 6—fault; 7—syncline axis; 8—anticline axis; 9—diorite porphyry vein; 10—brown iron mineralization zone; 11—gold ore body

2 样品采集与测试

本次光谱测试样品选自二人山矿区 139 号勘探线上的 ZK139-1、ZK139-2 两个代表性钻孔岩心, ZK139-1 钻孔深度为 505.5 m, ZK139-2 钻孔深度为

411.48 m。钻孔中局部可见方铅矿、闪锌矿、黄铁矿。

本次测试所选用的短波红外光谱仪为美国的 ASD 便携式地物光谱仪 FieldSpec 4 (测试范围在 350~2 500 nm)。在开展红外光谱扫描前,首先需要将钻孔岩心进行清洗晾晒和编录工作,测试前对仪器进

行校准,之后按照钻孔岩心深度逐点进行扫描。光谱扫描钻孔间隔为0.3 m,每个点采集10条波谱曲线,剔除异常波谱后求平均波谱,共得到ZK139-1、ZK139-2钻孔中2584个点点位的波谱曲线。数据记录编号为钻孔号+序号,如ZK139-1-001。波谱处理和分析工作利用澳大利亚联邦科学与工业研究组(CSIRO)研发的光谱地质师The Spectral Geologist(TSG 8.0)软件,完成矿物类型及相对含量的自动识别,对每条识别结果进行人工核查,并通过软件内置程序提取不同矿物的光谱吸收特征参数(刘新星等,

2021;游富华等,2021;张忠雪等,2023)。

3 测试结果

3.1 蚀变矿物识别及分带特征

本次测试识别的蚀变矿物主要包括绢云母族(绢云母、多硅绢云母)、碳酸盐类矿物(菱铁矿、白云石、方解石、铁白云石、菱镁矿)、高岭石、蒙脱石等矿物,其中绢云母族矿物和碳酸盐类矿物为钻孔的贯通矿物,少量高岭石、蒙脱石分布于钻孔中(图2)。

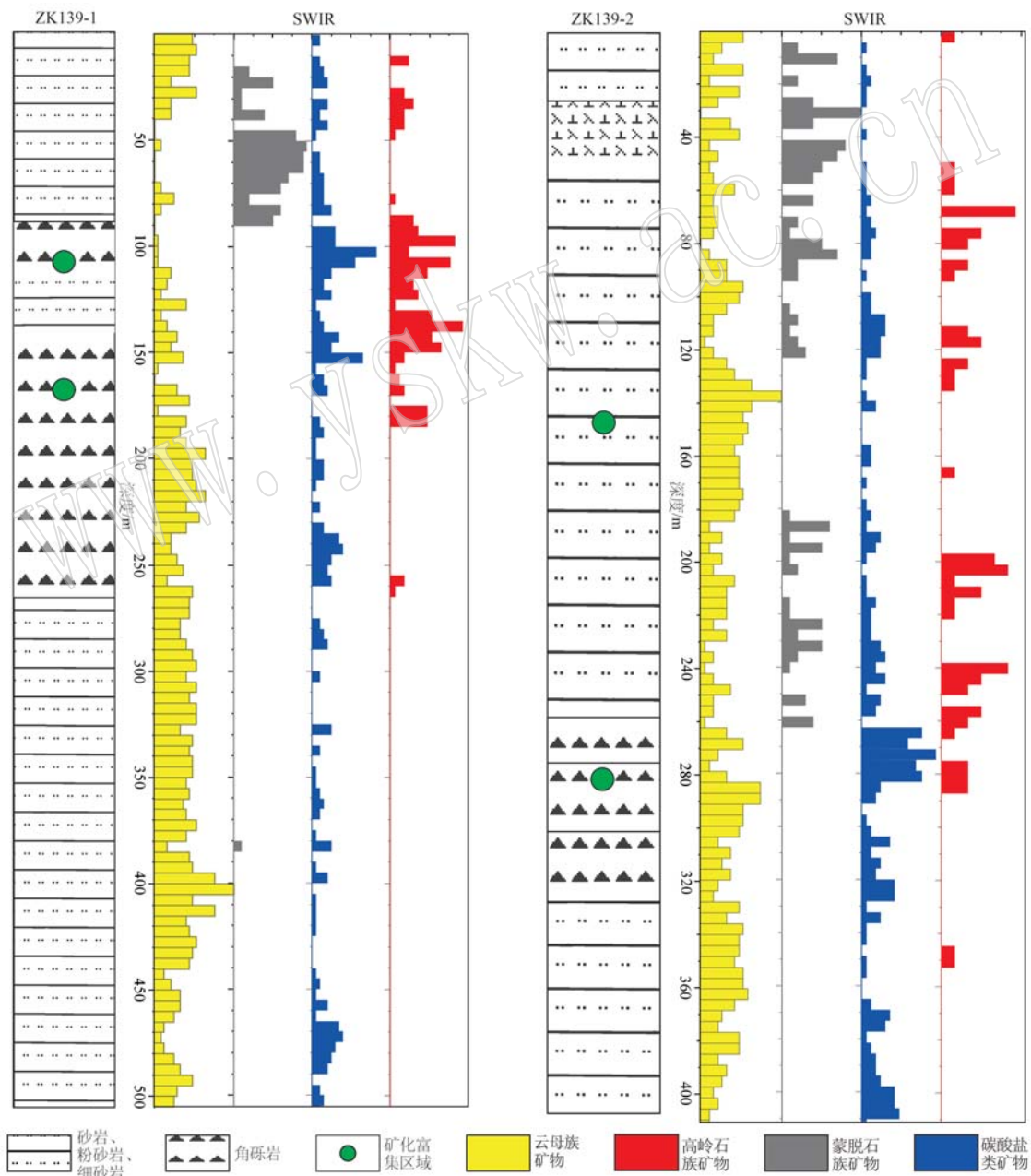


图2 ZK139-1、ZK139-2 钻孔光谱填图结果

Fig. 2 Spectral mapping results of ZK139-1 and ZK139-2 boreholes

钻孔 ZK139-1 中矿物族组合从浅到深为:蒙脱石族矿物+碳酸盐类矿物+绢云母+高岭石族矿物→绢云母族矿物+高岭石族矿物+碳酸盐类矿物→绢云母族矿物+碳酸盐类矿物。钻孔 ZK139-2 中矿物族组合从浅到深为:绢云母族矿物+碳酸盐类矿物+蒙脱石族矿物+少量高岭石族矿物→绢云母族矿物+少量高岭石族矿物+碳酸盐类矿物→绢云母族矿物+碳酸盐类矿物+高岭石族矿物+蒙脱石族矿物→绢云母族矿物+碳酸盐类矿物+高岭石族矿物。

在 ZK139-1、ZK139-2 中,将岩心编录数据与本实物中心所测地化数据结合,发现 Cu、Pb、Ag、Au 矿化主要赋存于角砾岩中,极少部分赋存于砂岩中,Cu、Pb、Ag、Au 元素未发现明显的空间分带性,出现 Cu、Pb、Ag、Au 伴生,高 Pb、Cu 则高 Ag、Au 的成矿元素富集规律(图 2)。以野外钻孔地质编录为基础,结合蚀变矿物族组合分带特征,钻孔 ZK139-1、ZK139-2 岩性与矿物族组合关系总结为:砂岩(绢云母族矿物+碳酸盐类矿物+蒙脱石族矿物)-角砾岩(绢云母族矿物+少量碳酸盐类矿物+高岭石族矿物)。可以看出:① 矿化主要位于角砾岩中;② 角砾岩矿化段内主要蚀变矿物组合以绢云母族矿物+高岭石族矿物+少量碳酸盐类矿物组合为主,蚀变类型以泥化和绢云母化为主;③ 砂岩矿化段内主要蚀变矿物族组合表现为绢云母族矿物+较少碳酸盐类矿物+高岭石族矿物。

3.2 绢云母波谱特征

对本次钻孔 ZK139-1、ZK139-2 中绢云母族矿物诊断性吸收特征 Al—OH 2 200 Pos、IC 值进行频数统计,并使用不同颜色区分不同深度下的绢云母,发现 Al—OH 2 200 Pos 主要分布于 2 200~2 208 nm 之间,IC 值分布主要集中在 3.5~6.5 之间(图 3)。

4 讨论

4.1 蚀变分带指示意义

本次测试中所解译出的二人山 139 勘探线上的钻孔 ZK139-1、ZK139-2 蚀变矿物族光谱数据在空间上的分布较为规律(图 2)。如图 2 所示,从蚀变矿物族的分布情况来看,碳酸盐类矿物近乎在全孔均有分布,但在矿化段相对含量呈减小态势。而高岭石族矿物主要出现在矿化中心,远离矿体时解译的高岭石族矿物含量逐渐减少;蒙脱石族矿物集中在钻孔中上部非成矿部位,且远离矿体有增加的态势,

并且蒙脱石和高岭石几乎不同时出现。

绢云母族矿物在钻孔中均有分布,除绢云母族矿物外,碳酸盐类矿物占比最大,而高岭石化则与矿化关系密切,往往形成于矿化两侧。二人山蚀变矿物族的分布特征,推测与区内地质特征、流体活动情况密切相关。本次解译出大量的碳酸盐类矿物,其首要成因是来源于区内由海侵作用形成的陆源碎屑岩-碳酸盐岩地层(霍福臣等, 1989; 胡能高等, 1995; 毛景文等, 2005),造成解译结果中大量碳酸盐类矿物出现。其次,在研究区内,受深部构造运动以及侵入的闪长玢岩脉影响,深部酸性流体发生运移(刘志坚, 2013; 艾宁, 2014; 海连富, 2021)。由于区域地层整体富含碳酸盐,因此在运移过程中,酸性流体一方面不断溶解地层中的碳酸盐类物质,此时成矿流体包含了大量的 Ca^{2+} 、 CO_2 ,为碳酸盐化提供了充足的物源储备,同时含碳酸的水溶液也能够使原生硅酸盐矿物分解、破坏并产生新矿物和碳酸盐类矿物(申俊峰等, 2018)。解译结果中也发现了大量高岭石的存在,本身高岭石主要是由长石、硅酸盐矿物蚀变而来,是一种含水的铝硅酸盐矿物,是富铝硅酸盐矿物在酸性介质条件下风化作用或低温热液交代变化的产物,在低温热液作用下,当含 CO_2 的酸性水溶液作用于不含碱的铝硅酸盐和硅酸盐时,可引起高岭石化作用(黄思静等, 2009)。推测矿化段高岭石族极有可能是由于深部的酸性热液流体在运移时不断将围岩中的碳酸盐溶滤同时流体富集大量 CO_2 ,在含 CO_2 的酸性水溶液影响下,原有铝硅酸盐和硅酸盐矿物发生蚀变形成高岭石化。而邻近地表部位仍有少部分高岭土出现,可能为风化作用的产物。值得一提的是关于在本次解译中,高岭石主要出现在成矿周围,而蒙脱石主要出现在成矿区域外部高岭石相对含量减小的部位。前人认为二人山蒙脱石与高岭石的形成是由于矿化热液流体温度进一步降低的影响所致(刘志坚, 2013),但根据陈光远等(1987)对热液蚀变不同矿物形成环境的划分,高岭石主要是在酸性低温条件下形成,而蒙脱石则是形成于碱性低温环境下,并不属于同一形成区间内。上述提及在矿化处碳酸盐类矿物出现减少的现象,而碳酸盐矿物也是在碱性环境中形成的,因此认为在钻孔中、深部的高岭石可能是由于酸性流体蚀变原有铝硅酸盐和硅酸盐矿物而形成的,而矿化段周围的蒙脱石则是受流体温度影响形成。综上,认为绢云母+高岭石+少量碳酸盐类矿物组合可作为宁

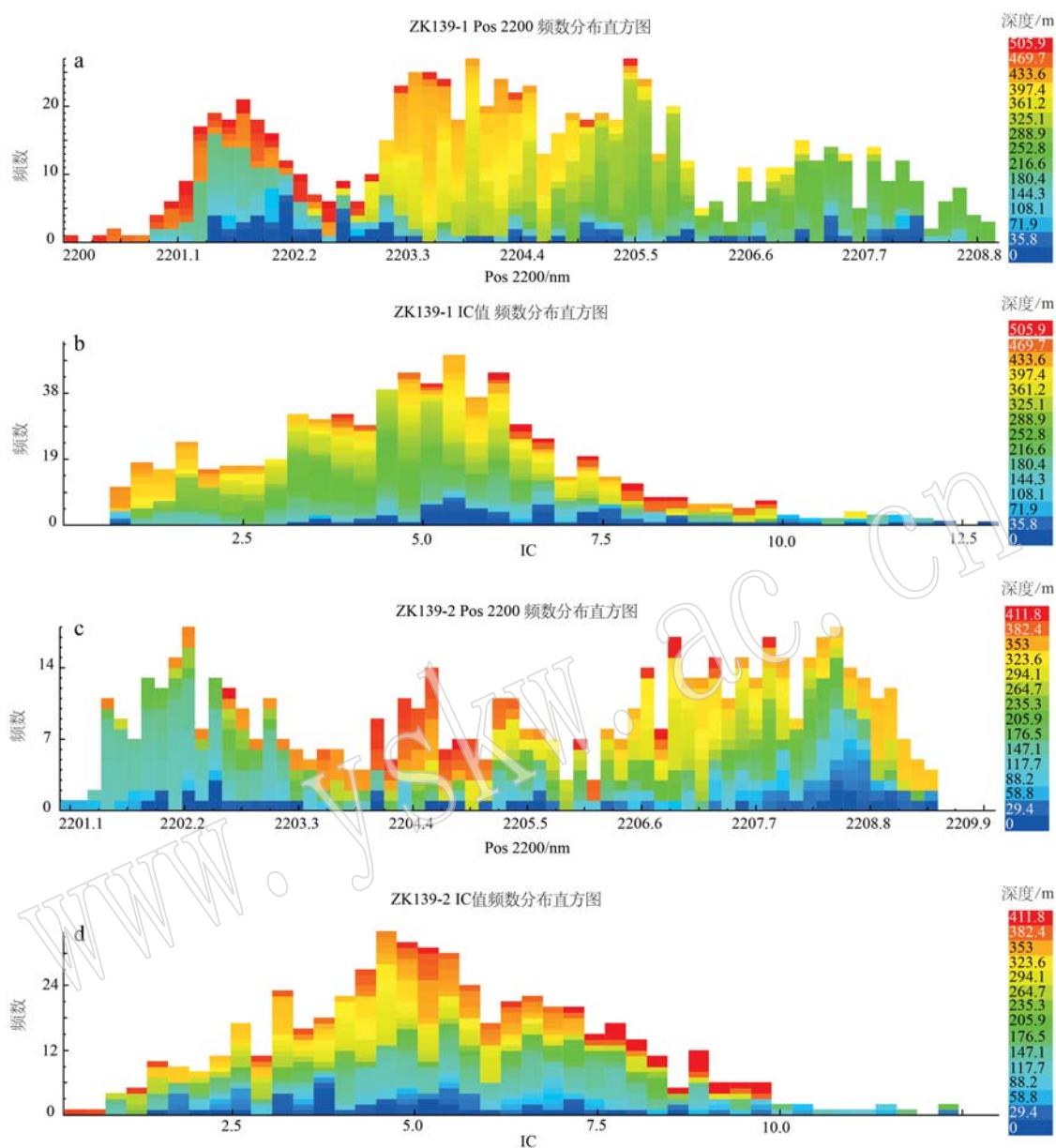


图3 钻孔中绢云母 Pos 2 200, IC 值频数分布直方图

Fig. 3 Histogram of frequency distribution of Pos 2 200 and IC value of sericite in boreholes

夏二人山-黄石坡沟银铅多金属矿床的蚀变矿物族找矿标型。

4.2 绢云母族矿物勘查指示意义

红外光谱特征不仅能够反映矿物相对含量,利用垂向上连续性的蚀变矿物光谱特征变化,能够对矿物的形成环境做出有效指示,进而对成矿热液流体运移进行反演(Thompson *et al.*, 1999)。绢云母族矿物能够在地质作用中指示出温度、压力的变化,也能指示出流体运移方向(梁树能等, 2012)。绢云母是常见的热液蚀变矿物之一,红外光谱中对绢云

母族矿物的解译主要依靠在 2 200 nm 附近的 Al—OH 吸收特征以及在 2 345 nm 附近次级吸收特征(Clark *et al.*, 1990)。影响绢云母在 Pos 2 200 nm 吸收特征主要是受到绢云母矿物中 Al^{VI} 配位含量影响,绢云母 Al^{VI} 含量较高,此时绢云母结构层间距离较小,光谱上表现为 Al—OH 2 200 Pos 向短波方向偏移;如果 Si、Fe、Mg 和 Ti 与晶格中 Al 发生 Tschermak 置换,使得其中 Al^{VI} 含量减小,光谱上表现为 2 200 nm 处吸收峰极值(Al—OH 2 200 Pos)向长波偏移(王旭辉等, 2022)。控制绢云母 Al^{VI} 配位含量

的影响因素往往与温度、压力、pH 值相关。因此,利用这些矿物 Al—OH 吸收峰位置的变化结合矿化特征可以用来反演成矿流体的物理化学条件。另外通过计算绢云母矿物结晶度 Dep2 200(Al—OH 吸收深度)和 Dep1 900(层间吸附水深度),利用二者比值可以有效指示绢云母族矿物的结晶程度、温度(王旭辉等, 2022)。目前利用绢云母光谱特征建立找矿指标已经成为地学研究领域的热点问题之一,被广泛应用在斑岩型、矽卡岩型、斑岩-矽卡岩型、浅成低温热液型、VHSM 型矿床的找矿实践中(杨志明等, 2012; Guo *et al.*, 2020; 刘新星等, 2021; 成嘉伟等, 2023)。

本次对二人山银铅多金属矿床钻孔 ZK139-1、

ZK139-2 中解译出大量绢云母族矿物(普通白云母、多硅白云母)。将绢云母波谱变化与矿化品位进行比对(品位数据来源于宁夏地质资料馆测试数据),如图 4 与图 5 所示,在矿化段与非矿化段绢云母 Pos 2 200 形成在矿化高品位区域内(ZK139-1 中 60~130 m、160~200 m, ZK139-2 中 130~160 m、260~280 m、290~330 m、360~400 m)的 2 200 Pos 值出现较显的波动特征(高-低-高)。绢云母结晶度(IC 值)在矿化高品位区域内(ZK139-1 中 60~130 m、160~200 m, ZK139-2 中 130~160 m、260~280 m、290~330 m、360~400 m)的 IC 值主要表现为低-高-低的波动特征。

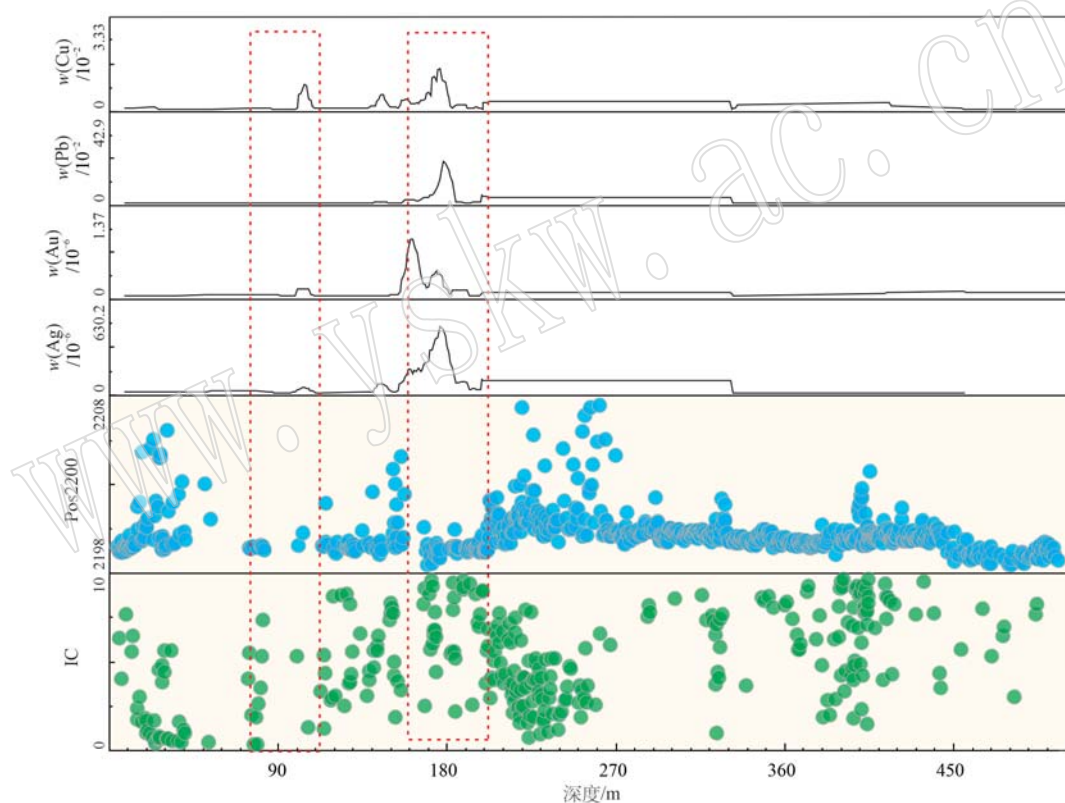


图 4 ZK139-1 绢云母 Al—OH 2 200 Pos、IC 值与矿化之间关系

Fig. 4 Relationship between ZK139-1 sericite Al—OH 2 200 Pos, IC value and mineralization

将 ZK139-1、ZK139-2 中绢云母 Pos 2 200 与 IC 值提取,计算矿化部位与绢云母之间的相对距离,如图 6 所示,ZK139-1、ZK139-2 中 Pos 2 200 在矿化段主要集中在 2 200~2 204 nm 之间,而 IC 值主要集中在 2.5~8 之间。

从绢云母 Pos 2 200 的分布情况来看(图 4、图 5),在矿化阶段如 ZK139-1 的 170~190 m 段绢云母吸收特征具有低 Pos 2 200(<2 204)、高 IC(>2.5)

的规律,此时绢云母含量 Al^{VI} 升高,结晶度较好,绢云母四面体和八面体中富含 Al,结构层以小半径的 Na^+ 为主,表明该绢云母形成时环境温度较高,结晶度较好。而在矿化段外侧,如 130~150 m 段、200~220 m 段,绢云母则以高 Pos 2 200、低 IC 值的特征出现,绢云母在形成时环境温度较低,结构层中掺杂了 H_2O 、Si、Fe、Mg 等发生类质同象替代,使得绢云母结晶度降低。通过统计 ZK139-1、ZK139-2 中绢云母

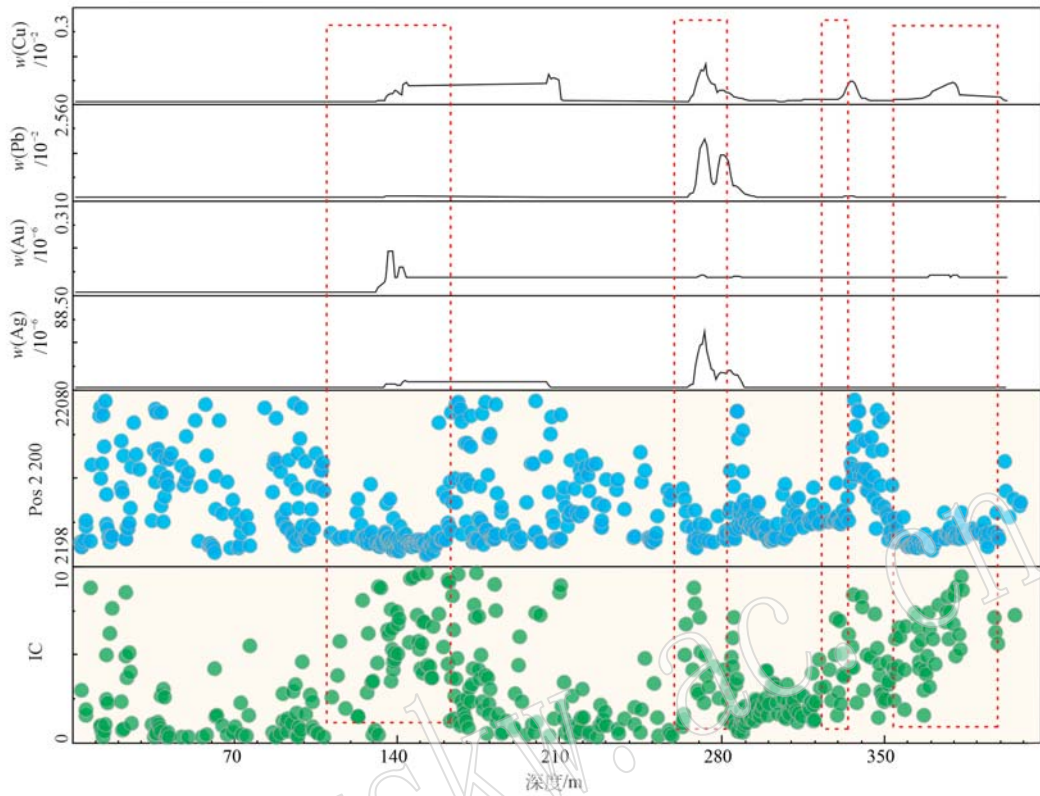


图5 ZK139-2 绢云母 Al—OH 2 200 Pos、IC 值与矿化之间关系

Fig. 5 Relationship between ZK139-2 sericite Al—OH 2 200 Pos, IC value and mineralization

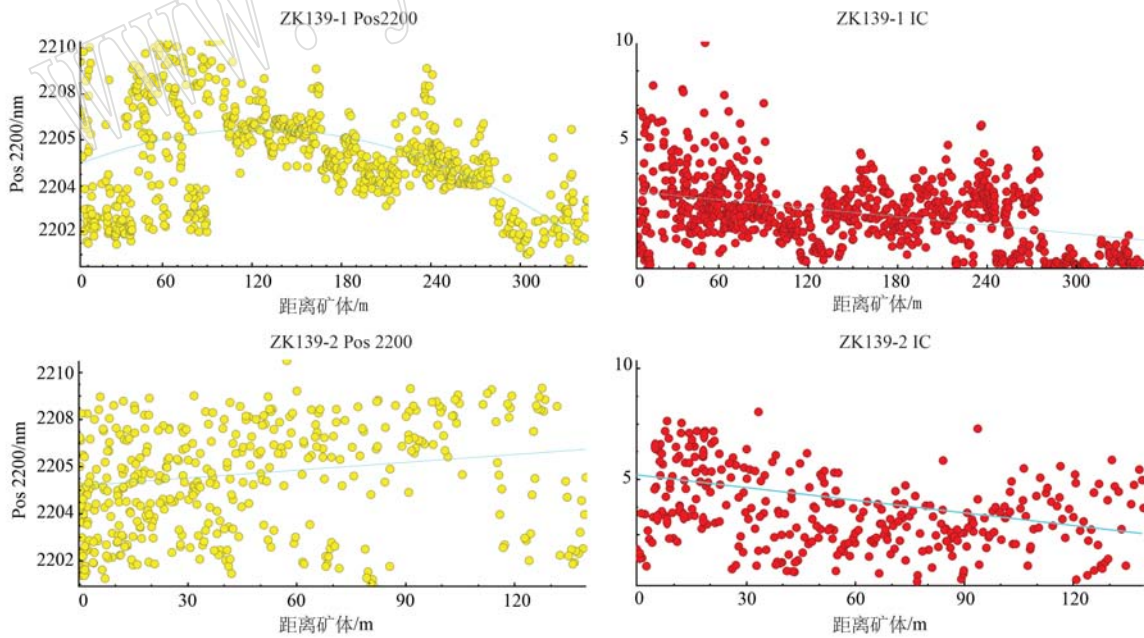


图6 ZK139-1、ZK139-2 绢云母的 Al—OH 2 200 Pos、IC 值与矿化之间的相对距离

Fig. 6 Relative distance between ZK139-1, ZK139-2 sericite Al—OH 2 200 Pos, IC value and mineralization

Pos 2 200、IC 值分布特征发现,矿化中心环境温度较高,但在极短的距离内发生了快速降温、减压的情

况。这与前人对研究区矿物沉淀机制的观点相同,刘志坚(2013)、邹武建等(2021)等认为研究区矿体

沉淀机制主要由于热液流体接触到大气降水后发生减压、沸腾的反应,使得流体中S离子的络合物如(Pb、Au、Ag、Cu)所处环境发生改变,使得成矿物质析出,并导致了进一步的围岩蚀变,因此判断绢云母Pos 2 200(<2 204)IC高值(>2.5)的叠加区可作为二人山浅成低温热液型银铅矿指示矿化的标志。

在ZK139-1、ZK139-2的Pos 2 200、IC值分布特征来看,虽然受到热液侵入的影响,在矿化与非矿化之间出现较显的波动特征,出现了多个巡回现象。但总体而言,Pos 2 200 nm在垂向上随着深度增大而减小,IC值则随之增大而增大,图3对钻孔中绢云母Pos 2 200、IC值以及深度进行统计,发现代表浅部的蓝、绿等色主要存在Pos 2 200高值区(>2 205 nm),而代表深部的黄、红二色主要出现在低值之间(<2 204 nm)。伴随深度的增加,绢云母IC值随着深度增大而减小,代表浅部的蓝、绿等色主要存在IC低值区内(<5),而代表深部的黄、红二色主要出现在IC高值区内(>5),因此推测深部具有隐伏岩提供热源的存在。前人推测二人山银铅多金属矿床为中低温浅成热液型,而浅成低温热液型矿床往往在空间上组成一个完整的成矿系统,浅成低温热液型矿床作为整个系统最浅部、最远端,往往与周围的矿床以及深部的侵入岩体构成一个完整的成矿系统,例如福建紫金山浅成低温型金矿床与周边的碧田浅成低温热液金银矿床以及深部的中寮斑岩铜矿构成一个浅成低温热液-斑岩成矿系统。在卫宁北山地区,二人山银铅多金属矿、金场子金矿、大铜沟铜矿以及前人提及的深部隐伏岩体极有可能构成一个完整的成矿系统,具有较大找矿潜力(刘志坚, 2013; 朱丹等, 2015)。

5 结语

(1) 宁夏二人山银铅多金属矿钻孔ZK139-1、ZK139-2短波红外光谱解译出蚀变矿物族有绢云母族、碳酸盐族、高岭石族矿物、蒙脱石族,其中以绢云母族矿物相对含量最多,岩性与矿物组合关系总结为:砂岩(绢云母族矿物+碳酸盐族矿物+蒙脱石族矿物)-角砾岩(绢云母族矿物+少量碳酸盐类矿物+高岭石族矿物)。矿化主要位于角砾岩中,而矿化段内主要蚀变矿物组合以绢云母族矿物+高岭石族矿物+少量碳酸盐类矿物组合为主,蚀变类型以泥化和绢云母化为主;矿化段绢云母族矿物+高岭石族矿物+

少量碳酸盐类的矿物组合可作为重要的找矿标志。

(2) 钻孔ZK139-1、ZK139-2的光谱测试结果显示,绢云母Pos 2 200 nm在垂向上随着深度增大而减小,IC值则随着深度增大而增大,根据此规律推测深部具有隐伏岩提供热源的存在。

(3) 钻孔ZK139-1、ZK139-2中绢云母族矿物诊断性吸收特征Al—OH 2 200Pos主要分布于2 197~2 210 nm之间,Al—OH 2 200-IC主要分布在1~9之间,Pos 2 200在矿化高品位区域内主要表现为<2 204 nm,同时IC值主要>2.5,认为Al—OH 2 200Pos与绢云母结晶度(IC值)叠加区可作为寻找二人山式银铅多金属矿床的找矿标志。

References

- Ai Ning. 2014. Studies on the Geochemical and Geological Characteristics of Weiningbeishan Jingchangzi Gold Deposit[D]. Xi'an: Northwest University (in Chinese with English abstract).
- Chang Z S, Hedenquist J W, White N C, et al. 2011. Exploration tools for linked porphyry and epithermal deposits: Example from the mankayan intrusion-centered Cu-Au district, Luzon, Philippines[J]. *Economic Geology*, 106(8): 1 365~1 398.
- Chen Guangyuan, Sun Daisheng and Yin Hui'an. 1988. Genetic Mineralogy and Exploration Mineralogy[M]. Chongqing: Chongqing Publishing House(Second Edition), 1~880(in Chinese).
- Chen Huayong, Zhang Shitao, Chu Gaobing, et al. 2019. The short wave infrared(SWIR) spectral characteristics of alteration minerals and applications for ore exploration in the typical skarn-porphyry deposits, Edong ore district, eastern China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(12): 3 629~3 643(in Chinese with English abstract).
- Cheng Jiawei, Liu Xinxing, Zhang Juan, et al. 2023. Infrared spectral analysis and prospecting of alteration minerals of baijian skarn-type iron deposit in Han-Xing area[J]. *Earth Science*, 48(4): 1 551~1 567(in Chinese with English abstract).
- Clark R N, King T V V, Klejwa M, et al. 1990. High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 95(B8): 12 653~12 680.
- Guo N, Guo W B, Shi W X, et al. 2020. Characterization of illite clays associated with the Sinongduo low sulfidation epithermal deposit, Central Tibet using field SWIR spectrometry[J]. *Ore Geology Reviews*, 120: 103 228.
- Hai Lianfu, Liu Anlu, Tao Rui, et al. 2021. Source of fluid and genesis

- of jinchangzi gold deposit in weiningbeishan, Ningxia; Evidence from fluid inclusions and C-H-O isotopes[J]. *Earth Science*, 46(12): 4 274~4 290 (in Chinese with English abstract).
- Hu Nenggao and Yang Jiayi. 1995. Geochemical characteristics of the Helanshan group metamorphic rocks[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 15(1): 104~110 (in Chinese with English abstract).
- Huang Sijing, Huang Keke, Feng Wenli, *et al.* 2009. Mass exchanges among feldspar, kaolinite and illite and their influences on secondary porosity formation in clastic diagenesis—A case study on the Upper Paleozoic, Ordos Basin and Xujiahe Formation, Western Sichuan Depression[J]. *Geochimica*, 38(5): 498~506 (in Chinese with English abstract).
- Huo Fuchen, Pan Xingshi, You Guolin, *et al.* 1989. Introduction to Geology of Ningxia[M]. Beijing: Science Press(in Chinese with English abstract).
- Jones S, Herrmann W and Gemmill J B. 2005. Short wavelength infrared spectral characteristics of the HW horizon; Implications for exploration in the Myra Falls volcanic-hosted massive sulfide camp, Vancouver Island, British Columbia, Canada[J]. *Economic Geology*, 100(2): 273~294.
- Laakso K, Peter J M, Rivard B, *et al.* 2016. Short-wave infrared spectral and geochemical characteristics of hydrothermal alteration at the Archean Izok Lake Zn-Cu-Pb-Ag volcanogenic massive sulfide deposit, Nunavut, Canada: Application in exploration target vectoring[J]. *Economic Geology*, 111(5): 1 223~1 239.
- Li Gang. 2019. Summary of the mineralization characteristics of Errenshan-Huangshi Pogou polymetallic ore mineralization and the origin of ore deposits, Zhongwei City, Ningxia[J]. *Neijiang Technology*, 40(1): 70~71(in Chinese with English abstract).
- Lian Changyun, Zhang Ge, Yuan Chunhua, *et al.* 2005. Application of SWIR reflectance spectroscopy in mapping of hydrothermal alteration minerals: A case study of the Tuwu porphyry copper prospect, Xinjiang[J]. *Geology in China*, 32(3): 483~495 (in Chinese with English abstract).
- Liang Shuneng, Gan Fuping, Yan Bokun, *et al.* 2012. Relationship between composition and spectral feature of muscovite[J]. *Remote Sensing For Land & Resources*, (3): 111~115 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xinxing, Zhang Hong, Zhang Juan, *et al.* 2021. A study on alteration mineral assemblages and mineralization characteristics of a Wunugetushan porphyry copper-molybdenum deposit in Inner Mongolia, China, based on infrared spectroscopy[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 40(1): 121~133(in Chinese with English abstract).
- Liu Zhijian. 2013. Metallogenic Characteristics of Weiningbeishan Au-Pb-Ag Polymetallic Deposit in Ningxia Province[D]. Chengdu University of Technology(in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Zhang Zuoheng, *et al.* 2005. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 169~188 (in Chinese with English abstract).
- Pan Jinli, Wang Donggang, Ma Ruiyun, *et al.* 2013. Analysis on the geological characteristics and metallogenic conditions of lead silver polymetallic deposit in Erren Mountain[J]. *Western China Science and Technology*, 12(10): 24~25, 31(in Chinese with English abstract).
- Ren Huan, Zhen Youye, Wu Song, *et al.* 2020. Short wavelength infrared characteristics and indications of exploration of the Demingding copper-molybdenum deposit in Tibet[J]. *Earth Science*, 45(3): 930~944(in Chinese with English abstract).
- Shen Junfeng, Li Shengrong, Du Baisong, *et al.* 2018. Minerals alteration and typomorph in gold deposit and their implications for prospecting[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 37(2): 157~167(in Chinese with English abstract).
- Tappert M C, Rivard B, Giles D, *et al.* 2013. The mineral chemistry, near-infrared, and mid-infrared reflectance spectroscopy of phengite from the Olympic Dam IOCG deposit, South Australia[J]. *Ore Geology Reviews*, 53: 26~38.
- Thompson A J B, Hauff P L and Robitaille A J. 1999. Alteration mapping in exploration: Application of short-wave infrared (SWIR) spectroscopy[J]. *Society of Economic Geologists Newsletter*, 39: 1~13.
- Wang Xuhui, Duan Shigang, Sun Peng, *et al.* 2022. Shortwave infrared spectroscopy analysis and prospecting indication of hydro thermal alteration of Waigang silver polymetallic deposit in Zhejiang, China [J]. *Mineral Deposits*, 41(1): 174~188(in Chinese with English abstract).
- Yang K, Lian C, Huntington J F, *et al.* 2005. Infrared spectral reflectance characterization of the hydrothermal alteration at the Tuwu Cu-Au deposit, Xinjiang, China[J]. *Mineralium Deposita*, 40(3): 324~336.
- Yang Zhiming, Hou Zengqian, Yang Zhusen, *et al.* 2012. Application of short wavelength infrared(SWIR) technique in exploration of poorly eroded porphyry Cu district: A case study of Niancun ore district, Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 31(4): 699~717(in Chinese with English abstract).

- You Fuhua, Jiang Jiaojiao, Zhang Jinzhang, *et al.* 2021. Application of short wave infrared technique in exploration of Ashele Cu-Zn deposit in Xinjiang[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 40(5): 1 010~1 022(in Chinese with English abstract).
- Zhai Yusheng, Yao Shuzhen and Cai Keqin. 2011. *Mineral Deposit*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 123~135(in Chinese).
- Zhang Zhongxue, Dai Jingjing, Wang Xianguang, *et al.* 2023. Shortwave infrared characteristics of muscovite from giant Shimensi tungsten deposit in northern Jiangxi Province and implication to exploration[J]. *Mineral Deposits*, 42(1): 116~127(in Chinese with English abstract).
- Zhu Dan, Liu Tianyou and Dai Xiaoqiang. 2015. Processing and inversion of gravity and magnetic data in Jinchangzi-Errenshan rock in the North Mountain of Weining Area, Ningxia[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 12(6): 766~771(in Chinese with English abstract).
- Zou Wujian, Wang Donggang and Wang Zhongyu. 2021. Geochemical characteristics and evolution of ore-forming fluids for the Errenshan Ag-Pb Deposit in Ningxia[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 41(2): 322~325(in Chinese with English abstract).
- 艾 宁. 2014. 宁夏卫宁北山金场子金矿床地质与地球化学研究[D]. 西安: 西北大学.
- 陈光远, 孙岱生, 殷辉安, 等. 1987. 成因矿物学与找矿矿物学[M]. 重庆: 重庆出版社.
- 陈华勇, 张世涛, 初高彬, 等. 2019. 鄂东南矿集区典型矽卡岩-斑岩矿床蚀变矿物短波红外(SWIR)光谱研究与勘查应用[J]. *岩石学报*, 35(12): 3 629~3 643.
- 成嘉伟, 刘新星, 张 娟, 等. 2023. 河北邯邢地区白洞铁矿蚀变矿物红外光谱分析及找矿研究[J]. *地球科学*, 48(4): 1 551~1 567.
- 海连富, 刘安璐, 陶 瑞, 等. 2021. 宁夏卫宁北山金场子金矿床流体来源及矿床成因: 来自流体包裹体和 C-H-O 同位素证据[J]. *地球科学*, 46(12): 4 274~4 290.
- 胡能高, 杨家喜. 1995. 贺兰山群变质岩的地球化学特征[J]. *矿物学报*, 15(1): 104~110.
- 黄思静, 黄可可, 冯文立, 等. 2009. 成岩过程中长石、高岭石、伊利石之间的物质交换与次生孔隙的形成: 来自鄂尔多斯盆地上古生界和川西凹陷三叠系须家河组的研究[J]. *地球化学*, 38(5): 498~506.
- 霍福臣, 潘行适, 尤国林, 等. 1989. 宁夏地质概论[M]. 北京: 科学出版社.
- 李 刚. 2019. 宁夏中卫市二人山-黄石坡沟多金属矿矿化特征及矿床成因总结[J]. *内江科技*, 40(1): 70~71.
- 连长云, 章 革, 元春华, 等. 2005. 短波红外光谱矿物测量技术在热液蚀变矿物填图中的应用——以土屋斑岩铜矿床为例[J]. *中国地质*, 32(3): 483~495.
- 梁树能, 甘甫平, 闫柏锟, 等. 2012. 绢云母矿物成分与光谱特征的关系研究[J]. *国土资源遥感*, (3): 111~115.
- 刘新星, 张 弘, 张 娟, 等. 2021. 基于红外光谱技术研究内蒙古乌奴格吐山斑岩铜铅矿蚀变和矿化特征[J]. *岩矿测试*, 40(1): 121~133.
- 刘志坚. 2013. 宁夏卫宁北山金、铅、银多金属矿成矿地质特征[D]. 成都理工大学.
- 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 等. 2005. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景[J]. *岩石学报*, 21(1): 169~188.
- 潘进礼, 汪栋刚, 马瑞赞, 等. 2013. 二人山银铅多金属矿地质特征及成矿条件分析[J]. *中国西部科技*, 12(10): 24~25, 31.
- 任 欢, 郑有业, 吴 松, 等. 2020. 西藏德明顶铜铅矿床短波红外光谱特征及勘查指示意义[J]. *地球科学*, 45(3): 930~944.
- 申俊峰, 李胜荣, 杜柏松, 等. 2018. 金矿床的矿物蚀变与矿物标型及其找矿意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 37(2): 157~167.
- 王旭辉, 段士刚, 孙 鹏, 等. 2022. 浙江外岗银多金属矿床热液蚀变短波红外光谱分析及找矿指示[J]. *矿床地质*, 41(1): 174~188.
- 杨志明, 侯增谦, 杨竹森, 等. 2012. 短波红外光谱技术在浅剥蚀斑岩铜矿区勘查中的应用——以西藏念村矿区为例[J]. *矿床地质*, 31(4): 699~717.
- 游富华, 蒋姣姣, 张锦章, 等. 2021. 短波红外光谱技术在新疆阿舍勒铜矿床勘查中的应用[J]. *岩石矿物学杂志*, 40(5): 1 010~1 022.
- 翟裕生, 姚书振, 蔡克勤. 2011. *矿床学*[M]. 北京: 地质出版社, 123~135.
- 张忠雪, 代晶晶, 王先广, 等. 2023. 赣北石门寺超大型钨矿床绢云母短波红外特征及其勘查指示意义[J]. *矿床地质*, 42(1): 116~127.
- 朱 丹, 刘天佑, 代小强. 2015. 宁夏卫宁北山金场子-二人山岩体重磁资料处理解释[J]. *工程地球物理学报*, 12(6): 766~771.
- 邹武建, 汪栋刚, 王忠禹, 等. 2021. 宁夏二人山银铅矿床成矿流体地球化学特征及演化[J]. *四川地质学报*, 41(2): 322~325.