https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.303



河北邯邢地区白涧铁矿蚀变矿物红外光谱分析及 找矿研究

成嘉伟1,刘新星1,2*,张 娟1,卢克轩1,王瑛雪1,杨俊峰1,邱佳炜1

1. 河北地质大学地球科学学院,河北石家庄 050031

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

摘 要: 邯邢地区是我国重要的富铁矿矿集区之一,随着找矿深度的增加,传统的勘查手段找矿效果并不理想,亟需新的方法和理念来指导进一步的矿产勘查工作.利用红外光谱技术(SWIR+TIR)快速厘定岩心内矿物类型、相对丰度和空间分布特征,揭示主要蚀变矿物波谱参数变化规律,确定与成矿相关的信息.通过红外光谱测试,解译出二十余种矿物并划分出5个蚀变带,自岩体向围岩依次为绢云母一贫铁/铁镁绿泥石一方解石一钠长石带(蚀变带I),贫铁绿泥石一蛇纹石一透闪石一阳起石一透辉石一金云母带(蚀变带II),方解石一铁/白云石—菱铁矿带(蚀变带II),绢云母一伊利石—高岭石—蒙脱石带(蚀变带V).研究发现,越靠近矿化富集区域,绿泥石 Fe-OH2250Pos、白云石 6.45 μ mPos和11.2 μ mPos呈现降低的趋势;绢云母族矿物Al-OH2200FWHM的降低和高岭石族矿物Al-OH2170-IC的增大均指向更高温的流体环境.低 Fe-OH2250Pos的绿泥石(<2 245 nm)、低 6.45 μ mPos(<6 440 nm)且低 11.2 μ mPos(<11 250 nm)的白云石是白涧矿区有效的找矿标志;绢云母Al-OH2200FWHM的降低(30→22)和高岭石 Al-OH2170-IC的增大(0.2→2.8)能判断深部是否存在矿化系统.以上成果为白涧矿区矿产勘查工作提供科学依据,同时也为邯邢地区同类型矿床找矿工作提供新方法.

关键词:红外光谱技术;砂卡岩型铁矿;蚀变矿物;邯邢地区;地球物理.
中图分类号: P631.7
文章编号: 1000-2383(2023)04-1551-17
收稿日期:2022-04-02

Infrared Spectral Analysis and Prospecting of Alteration Minerals of Baijian Skarn-Type Iron Deposit in Han-Xing Area

Cheng Jiawei¹, Liu Xinxing^{1,2*}, Zhang Juan¹, Lu Kexuan¹, Wang Yingxue¹, Yang Junfeng¹, Qiu Jiawei¹

1. College of Earth Sciences, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China

2. Key Laboratory of Strategic Critical Mineral Resources, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China

Abstract: The Handan-Xingtai area is one of the important iron ore concentration areas in China. With the development of prospecting work, the prospecting effect of the traditional exploration technology is not ideal, new exploration methods and

作者简介:成嘉伟(1998-),男,硕士生,主要从事红外光谱找矿勘查工作.ORCID:0000-0002-9102-0685. E-mail:Chengjiawei7758258@ 163.com

* 通讯作者:刘新星, E-mail:liuxinxing963@163.com

引用格式:成嘉伟,刘新星,张娟,卢克轩,王瑛雪,杨俊峰,邱佳炜,2023.河北邯邢地区白涧铁矿蚀变矿物红外光谱分析及找矿研究.地球 科学,48(4):1551-1567.

Citation: Cheng Jiawei, Liu Xinxing, Zhang Juan, Lu Kexuan, Wang Yingxue, Yang Junfeng, Qiu Jiawei, 2023. Infrared Spectral Analysis and Prospecting of Alteration Minerals of Baijian Skarn-Type Iron Deposit in Han-Xing Area. *Earth Science*, 48(4):1551-1567.

基金项目:国家自然科学基金项目(No.41702352);国家重点研发计划青年科学家项目(No.2021YFC2900100);河北地质大学博士启动基金 (No.BQ2017012);河北省研究生创新资助项目(No.CXZZSS2022017).

prospecting concepts are urgently needed. Infrared spectroscopy (SWIR+TIR) can be used to rapidly determine the types and spatial distribution of altered minerals, the changing law of spectral characteristic parameters of altered minerals is revealed, and the information related to mineralization further determined. Through infrared spectroscopy tests, it deciphered more than 20 minerals and determined five mineral zonation, from rock mass to surrounding rock is sericite-chlorite-calcite-albite zone (alteration zone II), chlorite-serpentine-tremolite-actinite-diopside-chrysolite zone (alteration zone II), sericite-illite-calcite-dolomite-siderite zone (alteration zone II), sericite-illite-calcite-dolomite-siderite zone (alteration zone II), sericite-illite-calcite-dolomite-siderite zone (alteration zone V). The study shows that it is closer to the mineralization areas, the lower the chlorite Fe-OH2250Pos, the lower the dolomite 6.45 μ mPos and 11.2 μ mPos reflection peak. Reduction of Al-OH2200FWHM of sericite minerals and the increase of Al-OH2170-IC of kaolinite minerals reflects the hotter fluid environment. Chlorite of low Fe-OH2250pos value (<2 245 nm), dolomite of low 6.45 μ mPos value (<6 440 nm) and dolomite of low 11.2 μ mPos value (<11 250 nm) are effective prospecting sign in Baijian. The decrease of sericite Al-OH2200FWHM value(30-22) and the increase of kaolinite Al-OH2170-IC value(0.2-2.8) both can determine whether there is a mineralization system in deep. These research results provide a scientific basis for mineral exploration in the Baijian mining area, and also provide new ideas and methods for prospecting for the same type of deposits in Han-Xing area.

Key words: infrared spectroscopy; skarn-type iron deposit; altered mineral; Han-Xing area; geophysics.

0 引言

矽卡岩型矿床是我国铁、铜、钨等金属矿产及 石榴子石、辉石等非金属矿产的重要矿床类型之 一,部分砂卡岩矿床还伴生锂、铍等稀有金属和稀 土元素(赵一鸣等,1986).通过主要砂卡岩矿物(石 榴子石和辉石等)的相对丰度和化学成分能够快速 划分围岩蚀变分带并建立找矿勘查标识(Meinert et al.,2005).传统矿物岩石地球化学分析手段存在 耗时长、成本高等问题(Lampinen et al.,2018).红外 反射光谱作为一种绿色、高效、低成本的测试手段 对传统方法进行了补充,在空间上连续性的波谱数 据能够反映矿物组合及相对丰度,进而判断地表、 剖面或整个矿区尺度下流体的运移路径和演化趋 势(Thompson et al.,1999).

红外光谱技术是针对岩浆-热液类矿床中蚀 变矿物的新型研究手段,通过矿物晶格内化学键振 动后的选择性吸收在红外波段上产生诊断性波谱 特征(Clark *et al.*,1990;杨志明等,2012).现阶段在 地学领域中主要应用到可见光-近红外波段 (VNIR,400~1 250 nm)、短波红外波段(SWIR, 1 300~2 500 nm)和热红外波段(TIR,6~15 μm), 分别针对矿物中的过渡性金属离子电子跃迁、X-H (X=C、O、S、N等)分子键振动和硅氧骨架中C-O、 B-O、S-O、Si-O、P-O等基团振动有着较好的显示 特征(Hunt,1977;Clark *et al.*,1990).在蚀变矿物填 图的基础上,通过矿物组合圈定有利矿化区域,利 用典型矿物光谱特征参数指向热液矿化中心已成 为该技术的核心内容(Hauff and Cocks, 1992; Thompson *et al.*, 1999).

近年来众多学者针对斑岩型(Uribe-Mogollon and Maher, 2018; 田丰等, 2019; 任欢等, 2020)、斑 岩一矽卡岩型(陈华勇等,2019; Zhang et al., 2020)、 矽卡岩型(Huang et al., 2020; Laukamp et al., 2022)、VMS 型(Herrmann et al., 2001; Jones et al., 2005; Laakso et al., 2016)、浅成低温热液型(Guo et al., 2020)、IOCG(铁氧化物一铜金)型(Tappert et al., 2011)、伟晶岩型(Vuleta et al., 2019)、沉积型 (Lampinen et al., 2018)、油气藏(卢燕等, 2017)等矿 床进行红外光谱填图及光谱勘查指标建立工作,为 矿产勘查提供了理论依据.Lampinen et al.(2018)等 利用 Hylogger 岩心扫描仪对西澳地区 Abra 矿床岩 心开展红外光谱扫描工作,识别出大量碳酸盐类矿 物,按照矿物类型和特征波谱参数变化规律建立了 该矿区由远矿端→近矿端矿物演化序列,反演了流 体演化模式.Wang et al.(2017)对西奥东部Kanowna Belle 金矿床和 Sunrise Dam 金矿床岩心开展 SWIR 填图工作,确定了两个矿区内有效的找矿矿 物组合.结合电子探针和热力学模拟等技术解释了 不同成矿流体下白云母四面体、八面体中 Tschermak置换和层间 Na/K置换的主要影响因素.Huang et al.(2020)等利用 Hylogger 岩心扫描仪对西藏甲 玛斑岩--动卡岩型Cu-Au-Mo矿床中4个钻孔岩心 开展光谱填图工作,在矿化区域解译出大量石榴子 石,统计参数发现石榴子石特征吸收峰位值>11 540 nm时,能指示Cu矿化, <11 450 nm时,能指示 Mo矿化,特征吸收峰位值的偏移还能反映石榴子 石产出环境中氧逸度和酸碱度的变化情况.

邯邢地区是我国矽卡岩型富铁矿矿集区之一 (赵一鸣,2013),前人针对邯邢地区的控矿要素(沈 保丰等,1981;李黎明,1986)、岩浆侵位机制和成矿 模式(罗照华等,1999;郑建民等,2007)、流体演化 过程和成矿物质来源(Zhang et al., 2015)等方面进 行了详细的研究. 白涧铁矿为区域内已探明储量最 大的矽卡岩型铁矿床,具有典型的接触交代特征, 接触带中心的砂卡岩富 MgO,靠近岩体的砂卡岩相 对富Ca和Si,矿床内不发育石榴子石,以透辉石和 金云母等镁砂卡岩矿物为主(Zhang et al., 2015;文 广,2017),钠长石化是有利的找矿标识(赵一鸣, 2013). 孟贵祥等(2009) 对白涧矿区开展磁异常和重 力异常分析,认为地表强磁性、高密度、高极化率和 低电阻区域为寻找隐伏矿体的有利靶区.但随着近 年来找矿深度增加,传统地球物理勘查方法受侵入 岩体等干扰因素影响,无法准确反映深部矿化信息. 因此,亟需一种较新的、有效的技术方法指导深部 找矿工作.

本文对白涧矿区内5个钻孔岩心开展红外光谱 测试工作,目的在于通过"SWIR+TIR"波段快速厘 定岩心内蚀变矿物类型及相对丰度,结合矿区剖面 图划分围岩蚀变分带,确定能示踪矿化的矿物组合. 统计主要蚀变矿物特征波谱参数变化规律,找到与 成矿作用之间的联系,建立多矿物、多参数的光谱 找矿模型,为白涧铁矿进一步的勘查工作提供科学 依据.

1 区域地质背景及矿床地质

邯邢地区位于华北克拉通中部,太行山板内造 山带的南端(罗照华等,1999).受古西伯利亚板块、 扬子板块和太平洋板块构造运动的影响,本区基底 上形成4条近EW向的隐伏断裂,与盖层内一系列 近NS向和NNE向的断裂带共同控制本区的岩浆 活动(李黎明,1986).

太古宙古元古代赞皇群片麻岩、二长花岗岩和 钾质花岗岩构成本区结晶基底,与上覆地层呈不整 合接触.盖层依次为中元古代长城系砂岩、寒武 系一奥陶系碳酸盐岩和石炭系一三叠系泥岩、页 岩、粉砂岩及煤层(图1)(许文良和林景仟,1990). 其中,中奥陶统马家沟组、磁县组和峰峰组是本区 重要的赋矿地层,岩性主要为结晶灰岩、白云质大 理岩和白云质灰岩等,围岩内大量赋存的膏盐类物 质是成矿有利的催化剂(郑建民等,2007).受太行山 山前断裂带影响,区域内主要发育一系列NNE向、 SN向的次一级断裂和小型褶皱(张聚全等,2020). 武安断陷盆地边缘的岩体隆起部位或背斜构造核 部是磁铁矿沉淀的主要场所(沈保丰等,1981).邯邢 地区的岩浆岩自西向东由闪长岩系列过渡到正长 岩系列,与成矿关系密切的主要为闪长岩或二长岩. 前人将本区侵入岩按空间分布特征依次划分为3条 岩浆岩带,分别为西部带、中部带和东部带,具有工 业价值的铁矿床多产于中、西部带(图1)(Zhang et al.,2015).

白涧铁矿位于武安凹陷区西北缘, 綦村岩体南部, 相邻中关铁矿和西石门铁矿.2006—2010年河 北省地矿局第十一地质队对该矿区进行详查工作, 提交有上亿吨铁矿石储量, 伴生钴金属 17 000余 吨, 石膏矿 600多万吨, 证实为一大型隐伏砂卡岩型 富铁矿矿床(赵一鸣, 2013).

白涧矿区大部分被第四系沉积物所覆盖,根据 钻孔编录揭示,地层由老到新依次为中奥陶统马家 沟组(O₂m)、磁县组(O₂c)和峰峰组(O₂f)、石炭系一 二叠系煤系地层(C₃-P₁),中奥陶统地层岩性主要 为中厚层灰岩、白云质灰岩、结晶灰岩、白云质大理 岩和白云岩,石炭系一二叠系煤系地层岩性主要为 砂岩、页岩和含煤岩系(赵一鸣,2013).

白涧铁矿及与相邻的铁矿床受区域上近NE向 断裂及褶皱控制,沿中部岩浆带方向呈串珠状分布 (赵一鸣,2013).白涧矿区内岩浆岩的侵入和矿体形 态主要受NNW向的中关一白涧背斜褶皱控制(图 2)(孟贵祥等,2009).

白涧矿区内岩浆岩埋藏较深,呈岩株状产出,包括闪长岩、二长岩和闪长玢岩.其中闪长岩与成矿关系最为密切,其锆石 U-Pb 年龄为 121.9±0.7 Ma,是燕山晚期岩浆活动的产物(赵一鸣,2013).

白涧矿区内矿体主要分为3类:①产于侵入岩 体和碳酸盐岩接触带内的矿体;②产于大理岩层间 破碎带内的矿体;③产于岩体中大理岩捕掳体内的 矿体.分别对应产于闪长岩和灰岩接触带内的Ⅱ号 矿体、大理岩层间的Ⅰ号矿体以及其他26个不具有 工业价值的小矿体(赵一鸣,2013).Ⅱ号矿体主要受 接触带构造控制,矿体厚度变化较大;Ⅰ号矿体呈 不规则透镜状产于灰岩、白云质大理岩构造破碎带





内,南北向分布近1500m,单层最大厚度达 137m,是白涧矿区主矿体(孟贵祥等,2009).

矿石矿物主要为磁铁矿,少量的赤铁矿和黄铁 矿等,脉石矿物有透辉石、透闪石、金云母、蛇纹石、 绿泥石、白云石和方解石等(郑建民等,2007).5个钻 孔内XRF数据显示磁铁矿铁含量在35%~65%之 间.矿石结构主要为自形一半自形粒状结构、他形 粒状结构和交代结构等,矿石构造主要为致密块 状、浸染状、条带状和角砾状等(孟贵祥等,2009).

矿区内主要蚀变类型包括钠长石一方柱石化、 砂卡岩化和碳酸盐化.钠长石一方柱石化主要发生 在闪长岩岩体内,形成钠长岩和钠长石化闪长岩, 受钠化影响岩体通常变为白色或灰白色,钠长石交 代岩体内斜长石和钾长石,阳起石交代岩体内角闪 石.砂卡岩化自闪长岩岩体向大理岩方向逐渐增 强,由透辉石一方柱石砂卡岩过渡为金云母一蛇纹 石砂卡岩(孟贵祥等,2009).侵位较浅的闪长玢岩附 近没有明显的砂卡岩化现象,仅出现局部的碳酸盐 化(文广,2017).

2 研究方法

本次研究工作分为室外和室内两部分.室外工 作包括:①钻孔岩心清扫、编录、拍照并挑选测试点 位;②SWIR短波红外测试、TIR热红外测试和XRF 主量元素测试.室内工作包括:①测试数据处理及 分析;②镜下核验解译结果.其中SWIR波段使用美 国 ASD(Analytical Spectral Devices)公司生产的 FieldSpec 4系列光谱仪测试,TIR波段使用美国 Agilent公司生产的4300型手持傅里叶红外光谱仪



Fig.2 Geological map of the Baijian region(modified after Hao et al., 2011)



Fig.3 The 28# profile of Baijian(modified after Wen, 2017)

测试,岩石矿物主量元素使用Olympus公司Delta系 列X射线荧光分析仪(XRF)测试.以上测试仪器的 具体参数设置及注意事项参考(杨志明等,2012;代 晶晶等,2020).

测试样品为河北内丘岩心库内保存的白涧矿 区 25-29 号 勘 探 线 ZK0818、ZK0604、ZK0606、 ZK0603和ZK0620钻孔岩心,在挑选测试样点时遵 循全孔控制、高密度覆盖和特征区加密的原则,对 蚀变显著的区域进行加密采样(0.5 m/样),而对于 蚀变较弱的远端岩体和围岩,适当降低采样密度 (1~2 m/样).为尽量减少灰尘和样品氧化所带来的 干扰,测试点尽量挑选岩心的新鲜面.3种测试仪器 分别经过 30 min、60 min、60 min 进行一次白板 矫正.

单个样点测试 5~10条数据,在 ViewSpecPro 软件内人工剔除异常谱线后计算平均谱线.波谱解 译及数据分析采用 The Spectral Geologist 软件 (TSG 8.0),第1步是通过 TSG 自带的矿物数据库 和解混算法识别混合矿物类型;第2步人工核查每 条谱线的3类解译结果,对容易混淆的矿物谱线进 行甄别;第3步通过光学显微镜以及岩心编录数据 对填图结果进行验证;第4步利用系统自带的scalar 平台统计各矿物特征波谱参数空间变化规律,并与 其他矿化信息绘制耦合性图.

3 蚀变矿物空间分布特征

3.1 光谱解译结果

红外光谱SWIR波段主要解译出绢云母族(绢 云母+伊利石)、绿泥石族(绿泥石+绿帘石)、高岭 石族(高岭石+地开石)、碳酸盐类(方解石+白云 石+菱铁矿)和闪石族(透闪石)矿物.TIR波段则主 要解译出长石(斜长石)、辉石族(透辉石)、闪石族 (透闪石)、砂卡岩类(金云母、蛇纹石)、绿泥石、镁 橄榄石、碳酸盐类(方解石、白云石)和石英等矿物 (由于热红外主要针对中高温矿物有较好识别效 果,本次TIR波段填图均只针对岩体和接触带附近 的部分岩心).通过对比发现碳酸盐类矿物和闪石族 矿物在SWIR波段和TIR波段含量基本一致,绢云 母族和高岭石族矿物仅在SWIR波段被识别,辉石 族矿物、石英和矽卡岩矿物主要在TIR波段被识别 (图4),矿物相对含量主要由特征官能团和化学键 吸收强度所决定(Clark et al., 1990).图中灰色区域 解译为未知矿物,除了受限于检测波段范围内无明 显诊断特征外,仪器对自然界某一相下混合矿物谱 线的解混失败是造成该结果的主要原因(Laukamp *et al.*,2022).需要注意的是,白涧矿区岩心在以往研 究中存在不同程度损耗,导致波谱填图存在不连续 的空白处.

从镜下照片来看,闪长岩岩体内主要发生绢云 母化、绿泥石化和钠长石化(图5a,5g),角闪石等暗 色矿物边部被钠长石所交代,可观察到少量磁铁矿 (图5h).在侵入岩体与马家沟组灰岩的接触带附近 主要发生砂卡岩化,内砂卡岩带主要产出透辉石磁 铁矿,通常磁铁矿交代残余透辉石,二者界限比较 明显(图5b,图5i),外砂卡岩带磁铁矿主要与蛇纹 石、透闪石等镁质砂卡岩矿物密切共生(图5j,图 5k).在磁县组和峰峰组地层中解译出大量碳酸盐类 矿物,结合镜下观察主要为方解石和白云石(图 5d),层间破碎带矿体赋存在磁县组地层内,通常被 晚阶段形成的赤铁矿和方解石所交代(图51).在远 离热液蚀变中心的石炭系一三叠系地层中,主要形 成大量低温的绢云母、蒙脱石和高岭石等黏土矿物 (图5e).

3.2 围岩蚀变分带

通过和钻孔编录数据对比,以及手标本和镜下 岩相学观察,基本证实了红外光谱解译结果的准确 性.值得注意的是,除了钠长石和矽卡岩矿物,大量 黏土矿物在SWIR波段被识别出,且强成矿区域往 往富集有大量的绿泥石(图4).在红外光谱填图的 基础上,本文提取含量大于10%(识别出的总矿物 数为1)的矿物,按照主要矿物组合划分围岩蚀变 分带.

以ZK0818为例,根据特征官能团提取出8类主要矿物,按照矿物组合自岩体向围岩依次划分为绢 云母-贫铁/铁镁绿泥石-方解石-钠长石带(蚀 变带 I),贫铁绿泥石-蛇纹石-透闪石-阳起 石-透辉石-金云母带(蚀变带 II),方解石-铁/ 白云石-菱铁矿带(蚀变带 II),绢云母-伊利石-方解石-白云石-菱铁矿带(蚀变带 N),绢云母-伊利石-高岭石-蒙脱石带(蚀变带 V)(图 6).其 中蚀变带 II 内是主要赋矿区域,该带内的矿物组合 是重要的找矿标志.

4 讨论

红外光谱特征是岩石矿物类型、晶体结构和化 学成分在红外波段上的集成显示,光谱特征参数可





以反映矿物的相对含量、离子置换和结晶程度,连续性的波谱参数偏移可以指示矿物的产出环境(氧 逸度、PH、温度和压力等),进一步推演成矿流体演

化趋势.通过绘制nm→m、矿物→矿床(综合维度+ 不同尺度)的参数统计图,建立有效的(光谱参数+ 矿物组合)找矿勘查模型是该技术的核心内容



图 5 白涧蚀变矿物镜下照片

Fig.5 Photographs of alteration minerals in Baijian Ser. 绢云母; Chl. 绿泥石; Di. 透辉石; Phl. 金云母; Tr. 透闪石; Ab. 钠长石; Amp. 角闪石; Cc. 方解石; Dol. 白云石; Mnt. 蒙脱石; Ill. 伊利石; Mt. 磁铁矿; Hem. 赤铁矿; Py. 黄铁矿. a. 斜长石发生绢云母化, 角闪石发生绿泥石化; b. 内砂卡岩带透辉石; c. 磁铁矿与金云母和透闪石共 生; d. 碳酸盐化; e. 绢云母化+蒙脱石化+伊利石化; f. 绿泥石化; g~h. 斜长石和角闪石发生钠长石化, 析出磁铁矿; i. 内砂卡岩带透辉石和 磁铁矿; j~k. 磁铁矿和蛇纹石、透闪石共生; l. 磁铁矿被赤铁矿和方解石交代

(Thompson et al., 1999;陈华勇等, 2019).

蚀变矿物光谱勘查模型的本质是通过多种矿 物波谱参数圈定有利矿化范围.因此,在建立勘查 指标时需要满足以下几点:①测试点位在该段岩心 中具有代表性;②目标矿物在钻孔解译结果中数据 量充足;③同类型矿物在矿化区和非矿化区内具有 明显成分差异,通常表现为特征吸收位置偏移较大. 由于蚀变矿物光谱勘查模型属于统计性变化规律, 无法保证在所有钻孔岩心、坑道或地表都保持良好 的规律性(卢燕等,2017).

基于以上条件,本文对含量相对丰富的绿泥

石、绢云母、高岭石和碳酸盐类矿物特征波谱参数 进行统计,暗色云母(金云母和黑云母)、闪石族矿 物、辉石族矿物和石英有效数据点均少于20个,本 文不做讨论.

绿泥石在SWIR波段有两处明显的吸收特征, 由两个含羟基的基团组合形成,主要受矿物晶格中 (Mg/Mg+Fe)比以及Al和Ca含量影响,在2248~ 2263 nm和2331~2356 nm范围变化,为了方便描述,通常将这两处吸收位置定义为Fe-OH2250Pos 和Mg-OH2350Pos(Pos为标准谱带上光谱吸收峰 极值处所对应的波长数)(Jones *et al.*, 2005).当绿



图 6 ZK08180 初组合分佈 Fig.6 Mineral assemblage zoning of ZK0818

泥石八面体片中 Fe^{2+} 含量增加时,绿泥石发生贫铁 绿泥石→镁铁绿泥石→铁绿泥石的转变,相应地 Fe-OH2250Pos 和 Mg-OH2350Pos 逐渐向长波方 向移动(Cloutier *et al.*, 2021).

在 砂 卡 岩 矿 床 研 究 中,由于 绿 泥 石 Mg-OH2350Pos会受到镁质矿物(金云母、阳起石、 镁质碳酸盐)的影响,因此常用Fe-OH2250Pos来反 映绿泥石化学成分变化情况(Jones *et al.*,2005).白 润 岩 心 内 绿 泥 石 Fe-OH2250Pos 变 化 区 间 为 2 240~2 262 nm,闪长岩岩体内部绿泥石吸收位置 在 2 248~2 258 nm之间,以镁铁绿泥石和铁镁绿泥 石为主;在接触带及附近的马家沟组地层中绿泥石 吸收位置在 2 240~2 250 nm之间,以镁绿泥石为 主;磁县组地层和峰峰组地层中基本未识别出绿泥 石,这是由于该范围存在大量的绢云母族和高岭石 族矿物,通过观察谱线发现 2 200 nm 和 2 170 nm 附 近 的 Al-OHDep 强 吸 收 特 征 对 绿 泥 石 Fe-OH2250Dep产生了很强的掩盖(Dep为标准化 谱带上的光谱吸收深度),解混系统通常定性为绢 云母、高岭石或蒙脱石(图5e,图5f);石炭系一三叠 系地层中出现少量吸收位置在2258~2262 nm之 间的绿泥石,以铁绿泥石为主,是热液活动末期远 端岩石中零散的黑云母或角闪石蚀变而成.在矿化 较为集中且绿泥石丰度较高的ZK0604和ZK0606 内,分别将950m和720m处定为矿化富集中心(岩 心内矿化相对富集区域),换算每个绿泥石样点与 矿化富集中心之间的距离,并与Fe-OH2250Pos吸 收峰位值进行投图,发现二者具有很好的相关性, 成矿作用越强的区域绿泥石Fe-OH吸收峰位值越 低,以富镁绿泥石为主(图7).

这种变化趋势与张世涛等(2017)在铜绿山砂 卡岩型铁铜金矿床研究中认为的富铁绿泥石更接 近矿化富集区域的结论相反.控制绿泥石产出条件 的因素主要是温度和压力,影响绿泥石成分的因素



Fig.7 Sketch geological map showing chlorite 2250Pos absorption position from Baijian

主要是蚀变母岩物质和热液流体中Fe、Mg等元素 含量(Laakso et al., 2016). 前人研究发现白涧矿区 闪长岩岩体内普遍遭受钠化蚀变,蚀变强度自岩体 向接触带方向逐渐增强,这导致斜长石、角闪石和 黑云母等矿物中的Fe元素被大量置换进热液流体, 具体表现为矿物出现不同程度的"钠化亮边"(图 5g,图5h)(孟贵祥等,2009).因此,随着钠化程度的 增强,绿泥石主要蚀变母岩物质黑云母和角闪石中 Fe含量逐渐降低,这导致绿泥石八面体中(Mg/ Mg+Fe)值增大,表现在波谱上为Fe-OH2250Pos 向短波方向偏移.通常情况下,伴随着流体中的铁 质不断富集,当温度下降、压力降低时,磁铁矿带附 近产出的绿泥石应当以富Fe绿泥石为主,但是在白 涧矿区岩心内却表现为绿泥石 Fe-OH2250Pos进一 步向短波方向移动,说明Fe元素并没有随着交代作 用进入绿泥石矿物晶格(图7).这是由于白涧矿区 中奥陶统地层下伴生有膏(盐)岩类物质,膏(盐)岩 层提供了大量的 SO⁴⁻, 使成矿流体中的 Fe²⁺被氧 化,产生的H⁺则被周围的碳酸盐岩快速吸收(文广, 2017).多方面因素影响下,流体中的铁质在极短的 时间内完成了卸载,当温度继续下降至绿泥石产出 区间时,热液流体内Fe²⁺依然处于相对匮乏的状态.

总结来说,绿泥石作为一种中低温热液蚀变矿物,在白涧矿区岩心内均有分布.中奥陶统磁县组 及上覆地层中绿泥石吸收特征被含量更多、吸收强 度更大的绢云母族矿物和高岭石族矿物所掩盖,在 填图结果中未显示.闪长岩和接触带附近马家沟组 地层中的绿泥石受强烈钠化蚀变和膏(盐)岩类物 质影响,自岩体向接触带方向Fe含量逐渐降低,表 现为Fe-OH2250Pos向短波方向移动.初步分析认 为绿泥石Fe-OH特征吸收峰位值(2250Pos< 2245 nm)是白涧矿区有效的示矿标志.

绢云母族矿物在SWIR波段2200 nm附近有一 处极强的吸收特征,在2 350 nm、2 450 nm 和 2 170 nm 附近有次一级吸收特征(Duke, 1994). 受 温度、压力、氧化还原等条件影响,绢云母常发生 Tschermark 置换(Al^N⇔Si=Al^N⇔Fe+Mg)和层间 Na⁺+Ca²⁺⇔K⁺置换(Clark *et al.*, 1990). 为了方便 描述,通常将最大吸收位置定义为Al-OH2200Pos, 高温高压条件下绢云母结晶程度较好,四面体和八 面体中富含A1,层间空隙小,以小半径的Na⁺为主, 在波谱上表现为Al-OH吸收峰靠近短波方向;随着 温度、压力的降低,绢云母晶格中Al含量减少,Si、 Fe、Mg 和 Ti 含 量 升 高,在波谱上表现为 Al-OH2200nm 处吸收峰向长波方向偏移 (Wang et al., 2017).因此,根据Al(主要)以及其他 元素含量将绢云母划分为3种类型:钠云母 (2200Pos<2 198 nm)、普通白云母(2200Pos 在 2 198~2 208 nm) 和 多 硅 白 云 母 (2200Pos> 2 208 nm) (Uribe-Mogollon and Maher, 2018). 伊 利石属于绢云母族矿物的一种,与绢云母最大的区 别在于当温度、压力下降后,大量H₂O进入层间离

子置换后产生的空位,这导致水分子特征吸收峰强度1900Dep出现明显的增强,因此伊利石也被称为水云母,其结晶度IC(2200Dep/1900Dep)常被作为有效的环境温度指示参数(Duba and Williams-Jones,1983).

由于绢云母和伊利石在波形上较为相似且集 中产于钻孔的中上部,本文不分别进行讨论,并采 用另一个受层间水影响较小的矿物结晶度参数 Al-OH2200FWHM进行统计(FWHM为标准谱带 上一半吸收深度处的峰宽值),通常绢云母形成环 境温度越高,相应的特征吸收峰峰形越尖锐,半高 宽值(FWHM)越小(修连存等,2007).

挑选绢云母族矿物相对丰度最高的 ZK0818钻 孔,针对绢云母族矿物 Al-OH2200Pos 和 Al-OH2200FWHM进行统计.绢云母主要在中奥 陶统磁县组中部及上覆地层内(钻孔内 0~450 m) 被识别出,Al-OH2200Pos 变化范围为2200~ 2212 nm,以普通白云母和多硅白云母为主,缺少 钠云母,说明绢云母主要产于中低温环境,矿物晶 格内Tschermark置换程度较高;Al-OH2200 FWHM变化区间为20~30,越靠近钻孔深部的绢 云母半高宽值越低,说明靠近岩体的绢云母晶型更 好,反映了更高温的环境(图8).

高岭石族矿物在SWIR波段受Al-OH影响在 2 207 nm附近和2 160~2 170 nm之间有两处特征 吸收峰,一般为了与绢云母族矿物作区分,采用 2 160~2 170 nm范围内的次一级吸收峰进行统计, 定义为Al-OH2170Pos(Clark *et al.*,1990).高岭石 族矿物结晶度(SWIR-IC)通过2 170 nm处的吸收 深度与1 900 nm处水分子吸收深度做比求得(IC= 2170Dep/1900Dep)(陈华勇等,2019).



图 8 ZK0818绢云母 Al-OH2200FWHM 和高岭石 Al-OH2170-IC 变化示意图 Fig.8 Sketch showing of ZK0818 sericite Al-OH2200 FWHM and kaolinite Al-OH2170-IC

对 ZK0818 钻孔内的高岭石 Al-OH2170Pos 和 SWIR-IC 进行统计.高岭石主要在中奥陶统峰峰组 中上部及石炭系-三叠系地层中(0~240 m)被识别 出,Al-OH2170Pos 变化区间为2164~2174 nm, SWIR-IC 变化区间为0.15~2.80,统计发现越靠近 岩体的高岭石,特征吸收峰位置向短波方向移动, 相应地 SWIR-IC 呈增大的趋势.

碳酸盐类矿物的光谱特征主要由 CO_3^{2+} 在红外 波段内以4种振动模式相互叠加产生(Clark *et al.*, 1990),在SWIR波段2330 nm 附近有一个明显的吸 收峰,在TIR波段6.35~6.55 μ m和11.1~11.3 μ m 有两处明显的反射峰(Lampinen *et al.*,2018;代晶晶 等,2020).按照碳酸盐成分不同,特征吸收峰和反射 峰会有一定偏差,例如白云石在TIR波段的两处反 射峰在6.45 μ m和11.2 μ m 附近,方解石则在6.5 μ m 和11.31 μ m 附近(代晶晶等,2020).

挑选填图结果中碳酸盐矿物相对丰富的 ZK0604和ZK0606钻孔,分别统计白云石(6.45μm、 11.2 μm)和方解石(6.5 μm、11.31 μm)的特征反射 峰位值.将 ZK0604 钻孔 950 m和 ZK0606 钻孔 720 m定为矿化富集中心(岩心内矿化相对富集区 域),分析每个样点到矿化富集中心之间的距离与 波谱参数和Fe元素含量之间的相关性.

在 ZK0604 和 ZK0606 中, 白云石特征反射峰 6.45 μ mPos 和 11.2 μ mPos 变化区间为6400~ 6480 nm 和 11130~11270 nm,方解石特征反射峰 6.5 μ mPos 和 11.3 μ mPos 变化区间为6450~ 6520 nm 和 11220~11340 nm.统计发现越靠近矿 化作用较强的区域,白云石6.45 μ mPos 和 11.2 μ mPos呈现降低的趋势,相应位置的Fe元素含 量逐渐升高(图9a,9c,10a,10c),且两处特征反射 峰位值具有正相关性(图9e,10e).方解石 6.5 μ mPos向矿化富集区域呈现降低的趋势, 11.3 μ mPos则呈现升高的趋势(图9b,9d,10b, 10d),两处特征反射峰位值具有负相关性(图9f, 10f).波谱发生偏移主要由矿物自身成分所决定,以



Fig.9 Sketch showing carbonate minerals reflect position in ZK0604



1563



Fig.10 Sketch showing carbonate minerals reflect position in ZK0606

上规律可能表明白云石特征反射峰位值 6.45 μmPos和11.2μmPos受同一类元素丰度影响同 时发生偏移,而方解石反射峰位值6.5 μmPos和 11.3 μmPos则受不同类元素丰度的影响出现相反 的趋势.相比较来看,ZK0606钻孔内的波谱参数变 化规律较ZK0604钻孔更明显,相关性也更高,这可 能是由于ZK0606钻孔内主要是产于磁县组的层间 破碎带内矿体,ZK0604钻孔内主要是产于马家沟组 的接触带矿体,距离岩体较远的层间破碎带内矿体 附近的碳酸盐矿物波谱受中高温矿物影响较小,因 此呈现出更好的规律性.

综上所述,白涧矿区钻孔内绢云母族矿物 Al-OH2200FWHM自地表至钻孔500m处由30下 降至22,高岭石族矿物Al-OH2170-IC自地表至钻 孔280m处由0.2上升到2.8,说明钻孔深部产出的 绢云母和高岭石结晶度更高,反映了向深部流体温 度呈现升高的趋势.尽管这两组参数与矿化没有直 接的联系,但可以作为深部是否存在热液蚀变中心 的判别依据.绿泥石特征吸收峰Fe-OH2250Pos的 低值(<2245 nm)是有效的示矿指标,磁县组及上 覆地层中绿泥石吸收特征被含量更多的 Al-OH 类 矿物所掩盖,但闪长岩和接触带附近马家沟组灰岩 中的绿泥石越靠近矿化富集区域,Fe-OH2250Pos 呈降低的趋势.碳酸盐类矿物在白涧矿区广泛分 布,越靠近矿化富集区域,白云石特征反射峰峰值 6.45 μmPos 和 11.2 μmPos 呈现降低的趋势,结合两 处反射特征的相关性图(图 9e, 10e),笔者认为低 6.45 µmPos 值 (<6 440 nm) 且 低 11.2 µmPos 值 (<11 250 nm)的白云石是有效的找矿标志;方解石 特征反射峰位值 6.5 µmPos 和 11.3 µmPos 随着 Fe 元素含量的升高出现一定的变化,但整体相关性较 低,无法作为白涧矿区的光谱找矿指标.将绿泥石 特征吸收峰位值和白云石特征反射峰位值进行整 合,建立白涧矿区多矿物、多参数的光谱勘查模型



Fig.11 The altered mineral spectral exploration model from the Baijian skarn-type iron deposit

(图11),为接下来的找矿勘查工作提供科学依据.

5 结论

(1)通过对白涧矿区ZK0818等5个钻孔岩心开展红外光谱测试工作,成功解译出绿泥石、钠长石和角闪石等二十余种矿物.按照矿物组合自岩体向围岩划分出5条带,依次为绢云母-贫铁/铁镁绿泥石-面岩划分出5条带,依次为绢云母-贫铁/铁镁绿泥石-面岩划分出5条带,依次为绢云母-贫铁/铁镁绿泥石-蛇纹石-药解石-钠长石带(蚀变带Ⅰ),贫铁绿泥石-蛇纹石-透闪石-阳起石-透辉石-金云母带(蚀 变带Ⅱ),方解石-铁/白云石-菱铁矿带(蚀变带 Ⅲ),绢云母-伊利石-方解石-白云石-菱铁矿 带(蚀变带Ⅳ),绢云母-伊利石-高岭石-蒙脱石 带(蚀变带Ⅴ).其中蚀变带Ⅱ内是主要赋矿区域,该 带内矿物组合可以作为直接的找矿标志.

(2) 绢云母族矿物 Al-OH2200FWHM 的降低 和高岭石族矿物 Al-OH2170-IC 的增大都反映了矿 物形成时更高温的流体环境,对深部是否存在热液 蚀变中心具有一定的指示作用.低Fe-OH2250Pos (<2245 nm)的绿泥石、低6.45 μmPos(<6440 nm) 且低11.2 μmPos(<11250 nm)的白云石是有效的 找矿标志.多矿物、多参数的光谱勘查模型为白涧 矿区深部矿产勘查工作提供一定的科学依据.

References

- Chen, H. Y., Zhang, S. T., Chu, G. B., 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. Acta Petrologica Sinica, 35(12): 3629-3643(in Chinese with English abstract).
- Clark, R. N., King, T. V. V., Klejwa, M., et al., 1990. High Spectral Resolution Reflectance Spectroscopy of Minerals. Journal of Geophysical Research, 95(B8): 12653. https://doi.org/10.1029/jb095ib08p12653
- Cloutier, J., Piercey, S. J., Huntington, J., 2021. Mineralogy, Mineral Chemistry and SWIR Spectral Reflec-

tance of Chlorite and White Mica. *Minerals*, 11(5): 471. https://doi.org/10.3390/min11050471

- Dai, J.J., Zhao, L.X., Jiang, Q., et al., 2020. Review of Thermal-Infrared Spectroscopy Applied in Geological Ore Exploration. Acta Geologica Sinica, 94(8): 2520-2533(in Chinese with English abstract).
- Duba, D., Williams-Jones, A. E., 1983. The Application of Illite Crystallinity, Organic Matter Reflectance, and Isotopic Techniques to Mineral Exploration: A Case Study in Southwestern Gaspe, Quebec. *Economic Geology*, 78 (7): 1350-1363. https://doi. org/10.2113/gsecongeo.78.7.1350
- Duke, E. F., 1994. Near Infrared Spectra of Muscovite, Tschermak Substitution, and Metamorphic Reaction Progress: Implications for Remote Sensing. *Geology*, 22(7): 621-624. https://doi. org/10.1130/0091-7613(1994) 0220621: nisomt>2.3.co;2
- 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. Ore Geology Reviews, 120: 103228. https://doi. org/10.1016/j. oregeorev.2019.103228
- Hao, J.J., Shen, J.H., Zhao, X.W., et al., 2011. REE Geochemistry of Baijian Iron Deposit in Shahe City, Hebei Province. *Geoscience*, 25(3): 545-552 (in Chinese with English abstract).
- Hauff, P., Cocks, T., 1992. Short Wave Infrared Spectroscopy Techniques Applied to Exploration: Emphasis on Alteration Mineralogy. *Contributions of the Economic Geology Research Unit*, 44: 72-74. https://doi.org/ 10.1016/j.oregeorev.2020.103516
- Herrmann, W., Blake, M., Doyle, M., et al., 2001. Short Wavelength Infrared (SWIR) Spectral Analysis of Hydrothermal Alteration Zones Associated with Base Metal Sulfide Deposits at Rosebery and Western Tharsis, Tasmania, and Highway-Reward, Queensland. *Economic Geology*, 96(5): 939–955. https://doi. org/10.2113/ 96.5.939
- Huang, Y. R., Guo, N., Tang, J. X., et al., 2020. Garnet Characteristics Associated with Jiama Porphyry–Skarn Cu Deposit 1# Skarn Orebody, Tibet, Using Thermal Infrared Spectroscopy. *Minerals*, 11(1): 5. https://doi. org/10.3390/min11010005
- Hunt, G. R., 1977. Spectral Signatures of Particulate Minerals in the Visible and near Infrared. *Geophysics*, 42(3): 501-513. https://doi.org/10.1190/1.1440721
- Jones, S., Herrmann, W., Gemmell, 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. *Economic Geology*, 100(2): 273-294. https://doi. org/10.2113/gsecongeo.100.2.273

- 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. *Economic Geology*, 111(5): 1223–1239. https://doi.org/10.2113/econgeo.111.5.1223
- Lampinen, H. M., Laukamp, C., Occhipinti, S. A., et al., 2018. Mineral Footprints of the Paleoproterozoic Sediment-Hosted Abra Pb-Zn-Cu-Au Deposit Capricorn Orogen, Western Australia. Ore Geology Reviews, 104: 436-461. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.11.004
- Laukamp, C., LeGras, M., Montenegro, V., et al., 2022. Grandite-Based Resource Characterization of the Skarn-Hosted Cu-Zn-Mo Deposit of Antamina, Peru. *Mineralium Deposita*, 57(1): 107–128. https://doi. org/ 10.1007/s00126-021-01047-2
- Li, L.M., 1986. On the Controlling Factors of Ore-Forming Structure of Hanxing Iron Deposit. *Geology and Prospecting*, 22(4): 1–11 (in Chinese with English abstract).
- Lu, Y., Yang, K., Xiu, L.C., 2017. Identification of Hydrocarbon and Clay Minerals Based on Near–Infrared Spectroscopy and Its Geological Significance. *Geological Bulletin of China*, 36(10): 1884–1891(in Chinese with English abstract).
- Luo, Z. H., Deng, J. F., Han, X. Q., 1999. Characteristics of Magmatic Activity and Orogenic Process of Taihang Intraplate Orogenic. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Meinert, L. D., Dipple, G. M., Nicolescu, S., 2005. World Skarn Deposits. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 299-336.https://doi.org/10.5382/AV100.11
- Meng, G.X., Yan, J.Y., Lü, Q.T., et al., 2009. Application of Deep Detecting Technology in Hanxing Subtype Iron Deposits and an Integrated Prospecting Model: A Case Study of Baijian Iron Deposit. *Mineral Deposits*, 28 (4): 493-502(in Chinese with English abstract).
- Ren, H., Zheng, Y.Y., Wu, S., et al., 2020. Short– Wavelength Infrared Characteristics and Indications of Exploration of the Demingding Copper–Molybdenum Deposit in Tibet. *Earth Science*, 45(3): 930–944(in Chi-

nese with English abstract).

- Shen, B.F., Zhai, A.M., Li, Z.H., et al., 1981. The Analysis of Geological Conditions for Mineralization of the Iron Deposits of Han-Xing Subtype in Southern Hepei. *Acta Geologica Sinica*, 55(2): 127-138, 164(in Chinese with English abstract).
- Tappert, M., Rivard, B., Giles, D., et al., 2011. Automated Drill Core Logging Using Visible and near-Infrared Reflectance Spectroscopy: A Case Study from the Olympic Dam Iocg Deposit, South Australia. *Economic Geol*ogy, 106(2): 289-296. https://doi.org/10.2113/econgeo.106.2.289
- Thompson, A. J. B., Hauff, P. L., Robitaille, A. J., 1999.
 Alteration Mapping in Exploration: Application of Short-Wave Infrared (SWIR) Spectroscopy. SEG Discovery, (39): 1-27. https://doi.org/10.5382/segnews.1999-39. fea
- Tian, F., Leng, C.B., Zhang, X.C., et al., 2019. Application of Short-Wave Infrared Spectroscopy in Gangjiang Porphyry Cu-Mo Deposit in Nimu Ore Field, Tibet. *Earth Science*, 44(6): 2143-2154(in Chinese with English abstract).
- Uribe-Mogollon, C., Maher, K., 2018. White Mica Geochemistry of the Copper Cliff Porphyry Cu Deposit: Insights from a Vectoring Tool Applied to Exploration. *Economic Geology*, 113(6): 1269-1295. https://doi. org/10.5382/econgeo.2018.4591
- Vuleta, S., LeGras, M., Smith, R. E., et al., 2019. Characterising Lithium Host Minerals within the Lateritic Duricrust, Greenbushes, Western Australia. ASEG Extended Abstracts, (1): 1-2. https://doi. org/10.1080/ 22020586.2019.12073086
- Wang, R., Cudahy, T., Laukamp, C., et al., 2017. White Mica as a Hyperspectral Tool in Exploration for the Sunrise Dam and Kanowna Belle Gold Deposits, Western Australia. *Economic Geology*, 112(5): 1153-1176. https://doi.org/10.5382/econgeo.2017.4505
- Wen, G., 2017. The Mechanisms and Key Factors in Forming High-Grade Iron Skarn Deposits in Handan-Xingtai District, North China Craton (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan(in Chinese with English abstract).
- Xiu, L.C., Zheng, Z.Z., Yu, Z.K., et al., 2007. Mineral Analysis Technology Application with near Infrared Spectroscopy in Identifying Alteration Mineral. Acta Geologica Sinica, 81(11): 1584-1590(in Chinese with English abstract).
- Xu, W.L., Lin, J.Q., 1990. The Magmatic Evolution of Hb-

Diorite Series of Yanshan Stage in Han-Xing District, China—The Amphibole-Dominated Fractional Crystallization. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 20(3): 259-264(in Chinese with English abstract).

- Yang, Z.M., Hou, Z.Q., Yang, Z.S., 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. *Mineral Deposits*, 31(4): 699-717(in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. Q., Li, S. R., Santosh, M., et al., 2015. Mineral Chemistry of High-Mg Diorites and Skarn in the Han-Xing Iron Deposits of South Taihang Mountains, China: Constraints on Mineralization Process. Ore Geology Reviews, 64: 200-214. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.07.007
- Zhang, J.Q., Liang, X., Yan, L.N., et al., 2020. The Mineralogical Records of Magmatic Process: Cases from Mesozoic Intrusive Rocks in the Handan-Xingtai Region. *Earth Science Frontiers*, 27(5): 70-87(in Chinese with English abstract).
- Zhang, S.T., Chen, H.Y., Zhang, X.B., et al., 2017. Application of Short Wavelength Infrared (SWIR) Technique to Exploration of Skarn Deposit: A Case Study of Tonglüshan Cu-Fe-Au Deposit, Edongnan (Southeast Hubei) Ore Concentration Area. *Mineral Deposits*, 36 (6): 1263-1288(in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. T., Chu, G. B., Cheng, J. M., et al., 2020. Short Wavelength Infrared (SWIR) Spectroscopy of Phyllosilicate Minerals from the Tonglushan Cu-Au-Fe Deposit, Eastern China: New Exploration Indicators for Concealed Skarn Orebodies. Ore Geology Reviews, 122: 103516. https://doi. org/10.1016/j. oregeorev.2020.103516
- Zhao, Y. M., 2013. Main Genetic Types and Geological Characteristics of Iron-Rich Ore Deposits in China. *Mineral Deposits*, 32(4): 686-705 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y.M., Lin, W.W., Bi, C.S., et al., 1986. Basic Geological Characteristics of Skarn Deposits of China. Acta Geoscientica Sinica, 7(3): 59-87(in Chinese with English abstract).
- Zheng, J.M., Xie, G.Q., Chen, M.H., et al., 2007. Pluton Emplacement Mechanism Constraint on Skarn Deposit: A Case Study of Skarn Fe Deposits in Handan-Xingtai Area. *Mineral Deposits*, 26(4): 481-486(in Chinese with English abstract).

1567

附中文参考文献

- 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.岩石学报,35(12):3629-3643.
- 代晶晶,赵龙贤,姜琪,等,2020.热红外高光谱技术在地质 找矿中的应用综述.地质学报,94(8):2520-2533.
- 郝俊杰,莘建宏,赵新卫,等,2011.河北省沙河市白涧铁矿 床稀土元素地球化学特征.现代地质,25(3):545-552.
- 李黎明, 1986. 论邯邢式铁矿成矿构造控制因素. 地质与勘 探, 22(4): 1-11.
- 卢燕,杨凯,修连存,2017.基于近红外光谱技术的烃类与 粘土矿物识别及其地质意义.地质通报,36(10): 1884-1891.
- 罗照华,邓晋福,韩秀卿,1999. 太行山造山带岩浆活动及其 造山过程反演.北京;地质出版社.
- 孟贵祥, 严加永, 吕庆田, 等, 2009. 邯邢式铁矿深部探测技 术及综合找矿模式研究: 以河北省沙河市白涧铁矿床 为例. 矿床地质, 28(4): 493-502.
- 任欢,郑有业,吴松,等,2020.西藏德明顶铜钼矿床短波红 外光谱特征及勘查指示意义.地球科学,45(3): 930-944.
- 沈保丰, 翟安民, 李增慧, 等, 1981. 冀南邯邢式铁矿成矿地 质条件分析. 地质学报, 55(2): 127-138, 164.
- 田丰,冷成彪,张兴春,等,2019.短波红外光谱技术在西藏 尼木地区岗讲斑岩铜一钼矿床中的应用.地球科学,

44(6): 2143-2154.

- 文广,2017. 邯邢地区砂卡岩富铁矿床形成机理及关键控制 因素(博士学位论文).武汉:中国地质大学.
- 修连存,郑志忠,俞正奎,等,2007.近红外光谱分析技术在 蚀变矿物鉴定中的应用.地质学报,81(11):1584-1590.
- 许文良,林景仟,1990. 邯邢地区燕山期角闪闪长岩系的岩 浆演化:角闪石占主导的矿物分离结晶作用.长春地质 学院学报,20(3):259-264.
- 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. 矿床地质,31(4):699-717.
- 张聚全,梁贤,闫丽娜,等,2020. 岩浆作用过程的矿物记录: 以邯邢地区中生代侵入岩为例. 地学前缘,27(5): 70-87.
- 张世涛, 陈华勇, 张小波, 等, 2017. 短波红外光谱技术在砂 卡岩型矿床中的应用: 以鄂东南铜绿山铜铁金矿床为 例. 矿床地质, 36(6): 1263-1288.
- 赵一鸣, 2013. 中国主要富铁矿床类型及地质特征. 矿床地 质, 32(4): 686-705.
- 赵一鸣,林文蔚,毕承思,等,1986.中国砂卡岩矿床基本地 质特征.中国地质科学院院报,7(3):59-87.
- 郑建民,谢桂青,陈懋弘,等,2007. 岩体侵位机制对矽卡岩 型矿床的制约:以邯邢地区矽卡岩铁矿为例. 矿床地 质,26(4):481-486.