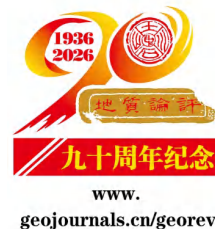


基于红外光谱技术的湘东北黄金洞 金矿床蚀变特征研究及 勘查指示意义



张创业^{1, 2)}, 周岳强³⁾, 张云飞^{1, 2)}, 吴俊³⁾, 张胜伟³⁾,
梅宵³⁾, 孙建东⁴⁾, 文志林³⁾, 刘磊^{1, 2)}

- 1) 关键矿产成矿与预测全国重点实验室, 中南大学, 长沙, 410083;
- 2) 中南大学地球科学与信息物理学院, 长沙, 410083;
- 3) 湖南省地质灾害调查监测所, 长沙, 410014;
- 4) 中国地质调查局南京地质调查中心, 南京, 210016

内容提要:位于江南造山带的湘东北地区已发现多个大型金矿床, 黄金矿产资源丰富, 是我国重要的金成矿带, 黄金洞金矿床是该区的代表性金矿床之一, 其金矿储量大, 品位高。该区金矿床的成矿过程与热液蚀变作用密切相关, 常见蚀变矿物包括绢云母、菱铁矿及蒙脱石等。短波红外光谱技术(Short wave infrared, SWIR)作为一种高效的勘查手段, 可快速识别蚀变矿物类型及其相对含量, 为利用蚀变矿物填图提供关键数据支撑。本研究基于SWIR技术, 对黄金洞金矿床202号矿脉的5个钻孔岩芯样品进行高光谱扫描分析, 共识别出10余种蚀变矿物, 其中绢云母占主导地位。通过分析绢云母的Al—OH“2200”吸收峰位值(简称“POS2200”, 变量记为 λ_{POS2200}), 揭示成矿热液pH值为中到酸性。研究发现, 矿区蚀变矿物空间分布规律显著, 自西向东呈现以下特点: λ_{POS2200} 逐渐增大, 指示矿脉热液的酸性增强; 绢云母伊利石结晶度(short wave infrared Illite Crystallinity, SWIR-IC, 变量记为 $D_{\text{SWIR-IC}}$)逐渐减小, 矿脉热液温度逐渐降低, 成矿热液沿矿脉由西向东运移。研究建立了基于 $D_{\text{SWIR-IC}}$ 的温度衰减模型, 确定了热液中心位置, 证实利用 $D_{\text{SWIR-IC}}$ 的温度衰减模型可有效追踪热液运移路径与成矿中心, 对找矿勘查具有重要指导意义。本研究为黄金洞金矿床的蚀变特征解析提供了新思路, 并为区域找矿实践提供了科学依据。

关键词:短波红外光谱; 湘东北; 蚀变矿物; 江南造山带; 勘查标志

加强黄金矿产资源的勘探开发, 提高中国在国际金融体系中的地位, 始终是维护国家经济和金融安全的重要战略手段(张文钊等, 2014; 王庆飞等, 2019; 宋明春等, 2022)。湖南省是我国重要黄金产区之一, 其省域内江南造山带已发现大型(含超大型)金矿床9个, 中型矿床20个, 小型矿床29个。累计探明金资源储量达600 t, 且多数矿床勘查深度不足500 m, 有“江南金腰带”的美誉(毛景文和李红艳, 1997; Ni Pei et al., 2015; Deng Jun and Wang Qingfei, 2016; Deng Teng et al., 2017; Xu Deru et al., 2017)。带内多个含金多金属矿床中, 均发育有显著的热液蚀变现象(Ma Wen et al., 2017; 许

可, 2022)。蚀变类型主要包括绢云母化、碳酸盐化、硅化、硫化、绿泥石化和钾化等(Groves et al., 2003; Craw et al., 2010; Goldfarb and Groves, 2015)。由这些蚀变矿物所构成的围岩蚀变带也是该区最为显著的找矿标志之一(Cox et al., 1995; Groves et al., 1998)。随着矿山生产勘探的提质发展, 传统手段划分蚀变带, 定位矿化中心、热液中心的效率低, 利用新手段, 新方法来提升效率的需求已迫在眉睫。

短波红外光谱技术(Short wave infrared, 简称“SWIR”)可以高效确定蚀变矿物类型, 划分蚀变带和寻找热液中心, 在斑岩型—浅成低温热液矿床

注: 本文为湖南省地质院科研项目重大项目(编号: HNGSTP202302), 湖南省自然科学基金资助项目(编号: 2024JJ8345)及新一轮找矿突破战略行动科技支撑项目(编号: ZKKJ202408)的成果。

收稿日期: 2025-02-20; 改回日期: 2025-07-05; 网络首发: 2025-07-20; 责任编辑: 章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2025.07.015

作者简介: 张创业, 2001年生, 硕士研究生, 地质资源与地质工程专业; Email: 3189193909@qq.com。通讯作者: 吴俊, 1987年生, 学士, 高级工程师, 主要从事矿产勘查工作; Email: 371208571@qq.com。

及火山成因块状硫化物矿床 (Volcanic-associated massive sulfide deposits, 简称“VMS”) 等热液成因矿床的矿产勘查中得到广泛应用 (Jones et al., 2005; Wang Rui et al., 2017; 张世涛等, 2017; 陈华勇等, 2019; 黄一入, 2021; 李兵院等, 2024; 王雪娜等, 2024; Zhao Hongtao et al., 2024; 张柯凡等, 2024)。短波红外光谱 (1100~2500 nm) 对矿物结构中 C—H、O—H、N—H、S—H 分子键的振动作用具有显著敏感性, 可探测出白云母、伊利石、蒙脱石和绿泥石等层状含水硅酸盐矿物 (Hunt, 1977)。短波红外光谱伊利石结晶度 (Short wave infrared Illite Crystallinity, 简称“SWIR-IC”, $D_{SWIR-IC} = \text{Depth}2200 / \text{Depth}1900$; Chang Zhaoshan et al., 2011; 杨志明等, 2012), 绢云母 Al—OH “2200 nm” 吸收位置 (简称“POS2200”, 变量记为 $\lambda_{POS2200}$; Herrmann et al., 2001; Jones et al., 2005; 郭娜等, 2018) 可用于反演成矿物化环境、定位热液/矿化中心、指示矿区成矿潜力, 从而圈定有利勘查找矿靶区 (唐楠等, 2021)。

前人已对短波红外光谱在金矿床勘查中的运用进行了很多的探索, 在胶东三山岛北部海域金矿床, 金矿化与 $\lambda_{POS2200}$ 和 $D_{SWIR-IC}$ 有着很强的相关性 (李健等, 2024); 龙门市造山带黄泥坪金矿床中 $\lambda_{POS2200} \leq 2202.5 \text{ nm}$, 且 $D_{SWIR-IC}$ 为 1.0~1.5 可作为黄泥坪矿床的勘查指标 (江宏君等, 2023)。焦家断裂带前陈蚀变岩金矿床的研究也得出相似的规律 (Zhao Hongtao et al., 2024), 即高的 $\lambda_{POS2200}$ 和 $D_{SWIR-IC}$ 对金矿体有直接的指示意义。但是在江南造山带湖南段湘东北地区这一著名金成矿区却没有进行相关的研究。

为了该地区找矿勘查工作的进一步推进, 笔者等对位于江南造山带湘东北地区的黄金洞金矿床开展了系统全面的蚀变矿化特征和 SWIR 找矿勘查研究, 综合分析短波红外光谱特征参数 (如 $D_{SWIR-IC}$ 、 $\lambda_{POS2200}$ 等) 反演成矿物化环境, 并利用 $D_{SWIR-IC}$ 跟温度强相关性的特点确定热液中心位置。本研究加强了对湘东北成矿机制的认识, 拓宽 SWIR 勘查方法的应

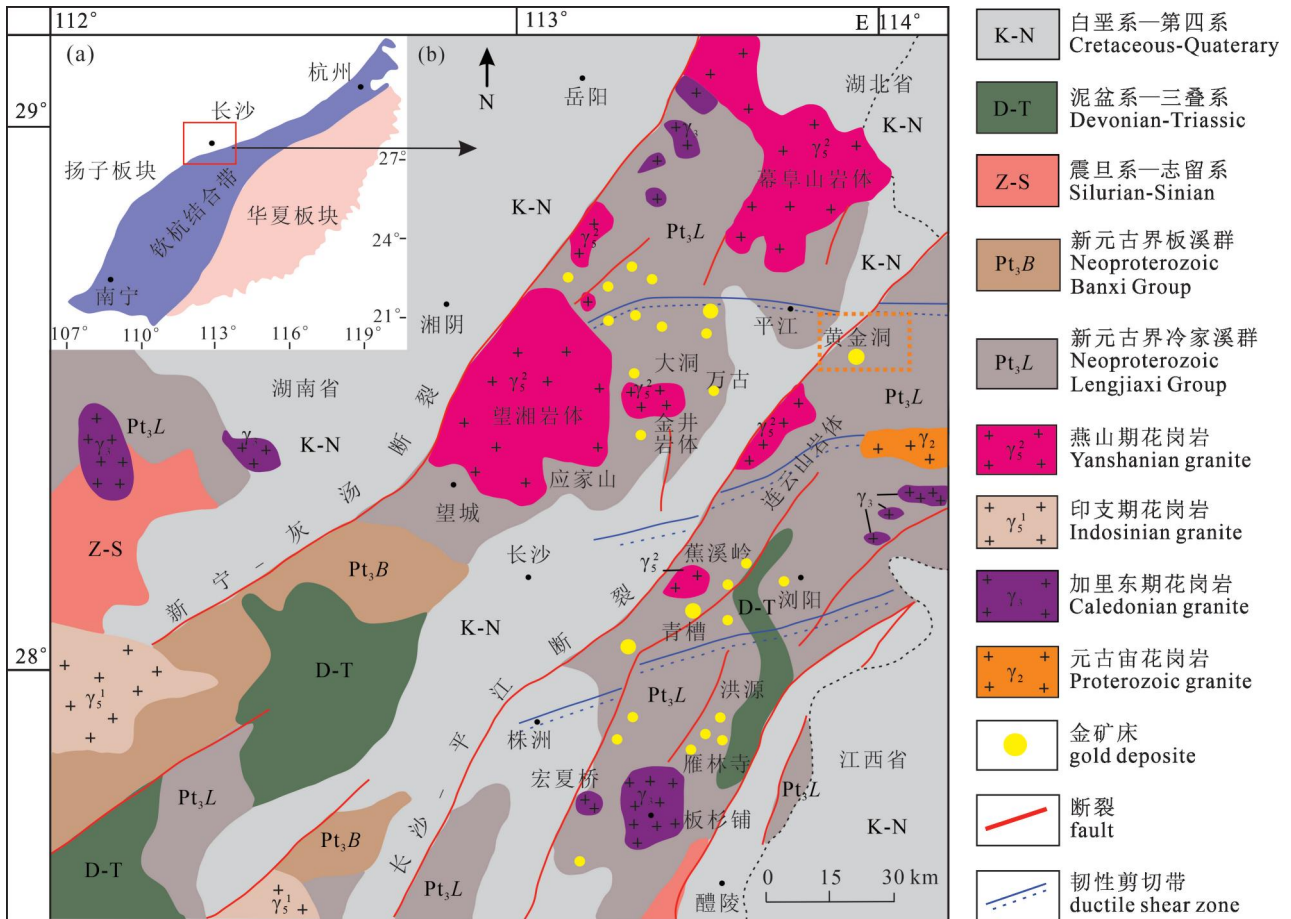


图 1 湘东北地区大地构造位置简图 (a) 和区域地质及金矿床分布图 (b) (据 Xu Deru et al., 2017;

Liu Qingquan et al., 2019 修改)

Fig. 1 Regional geological map of northeast Hunan (modified after Xu Deru et al., 2017; Liu Qingquan et al., 2019)

用范围,为区内进一步的找矿勘查提供科学依据。

1 区域地质背景

江南造山带是华南重要的金成矿带之一,新元古代由扬子板块与华夏板块碰撞结合产生(毛景文和李红艳,1997; Greentree et al., 2006; 王自强等, 2012; Xu Deru et al., 2017)。江南造山带中部湖南段包含万古(毛景文等,1997)、黄金洞、沃溪(谢焱石等,2004)等大型金矿床,是江南造山带金矿床数量最多、探明资源储量最大的一段(黄建中等, 2020)。

湘东北地区位于江南造山带雪峰弧形构造带北东段(图 1a;舒良树,2012)。区内地层主要为新元古界冷家溪群和白垩系—古近系,新元古界冷家溪群地层是最主要的赋矿地层。冷家溪群 Pt_3L 是一套巨厚的绿片岩相变质岩,最大厚度超过 2500 m,其原岩为一套主要由砂质、粉砂质和黏土质岩石组成的复理石建造。这套变沉积岩中局部地段夹有变

基性火山岩和变酸性火山岩。湘东北地区的构造格局受控于江南造山带构造体系。湘东北地区先后经历了武陵运动、加里东运动、印支运动和燕山运动等构造运动,发育有三条 NNE 向深大断裂带:新宁—灰汤断裂、长沙—平江断裂、醴陵—衡东断裂(许德如等, 2017; 柏道远等, 2023a)。

本区岩浆岩以中酸性侵入岩为主,主要为燕山早期的二长花岗岩、斜长花岗岩及花岗岩、花岗闪长岩等,其次为加里东期的花岗闪长岩及二长花岗岩类,以及武陵期的花岗闪长岩及二长岩等(图 1b; 肖拥军和陈广浩,2004; 文志林等,2016; 柏道远等, 2023b)。

2 矿床地质特征

黄金洞金矿区位于长沙—平江深大断裂的下盘,由金枚、金塘、杨山庄 3 个矿段组成。区内发育的地层为新元古界冷家溪群坪原组 (Pt_3p) 第一岩性段和第二岩性段、新元古界冷家溪群小木坪组

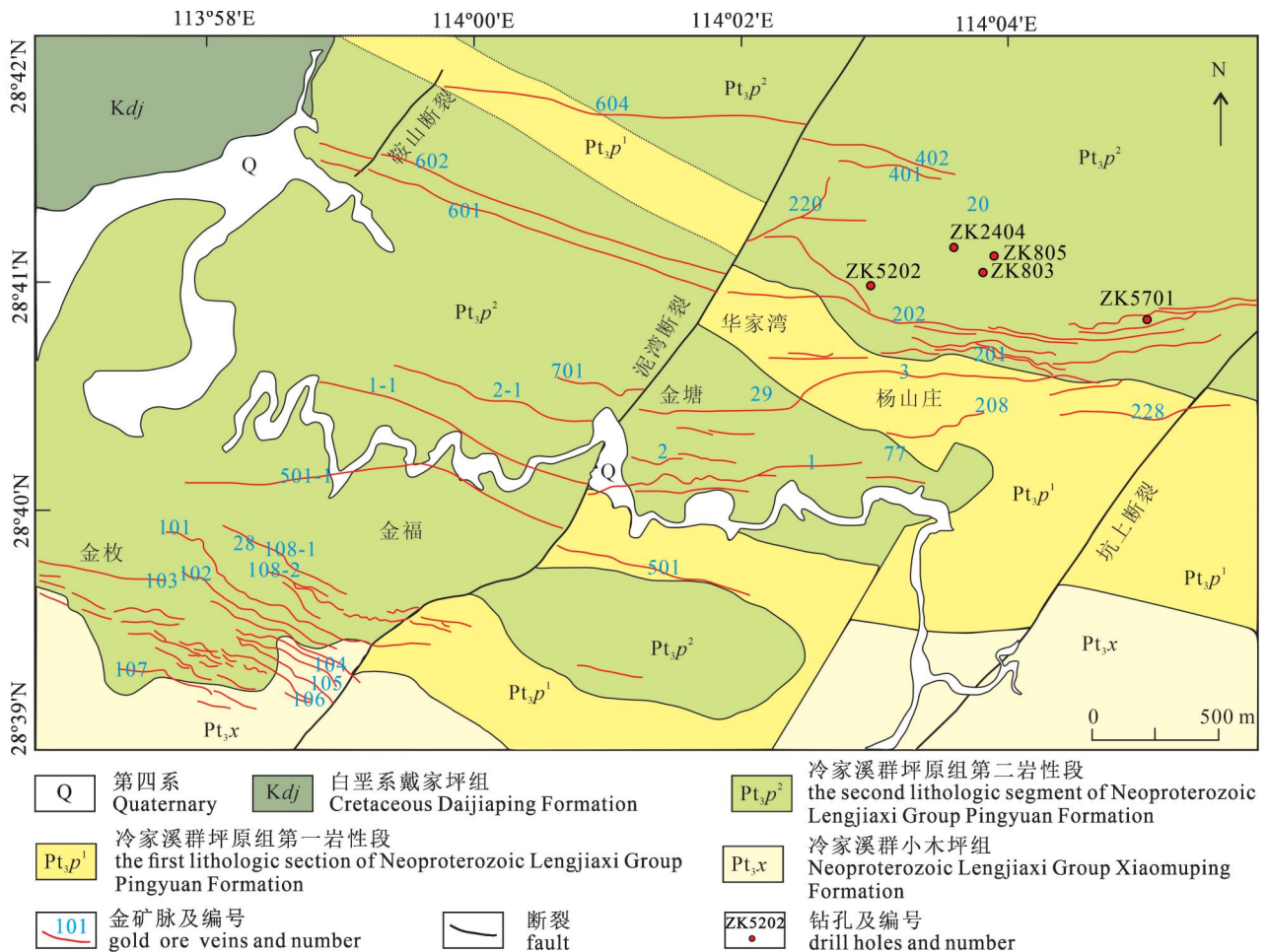


图 2 湘东北黄金洞金矿床平面地质图(据孟亚群等,2024 修改)

Fig. 2 Geological map of Huangjindong gold deposit, northeastern Hunan (after Meng Yaquin et al., 2024&)

(Pt₃x)、中生界白垩系戴家组(Kdj)以及第四系盖层。长平断裂西侧为白垩系红色砂砾岩地层,东侧为冷家溪群变质板岩。赋矿地层为冷家溪群板岩、粉砂质板岩、凝灰质板岩等。区内构造主要由近东西向—北西(西)向韧性剪切带、一系列次级断裂和北东向断裂和褶皱组成(文志林等,2016;周岳强等,2019; Zhou Yueqiang et al., 2021)。区内金矿脉产于EW—NWW断裂破碎带中,在空间上成群平行展布,产状与含矿破碎带一致(柏道远等,2023)。矿体主要赋存于新元古代冷家溪群坪原组地层中。主矿体的形态相对较稳定,主要成脉状和透镜体状产出,倾向NNE,倾角10°~60°(图3)。区内围岩蚀变多出现在破碎带两侧,破碎带中心蚀变最为强烈,向围岩方向逐渐减弱。蚀变类型有硅化、毒砂化、黄铁矿化、碳酸盐化和绿泥石化。碳酸盐化和绿泥石化多出现在破碎带内,硅化、绢云母化和毒砂—黄铁矿化则分布广泛(韩凤彬等,2010)。区内岩浆岩不发育。

3 样品采集与光谱测试拟合方法

3.1 样品及测试方法

矿区内钻孔 ZK5202、ZK2404、ZK805、ZK803、ZK5701 从西至东沿 202 号矿脉分布(图 2),且含矿段发生褪色化蚀变,颜色较浅。其中钻孔 ZK5202、ZK2404、ZK803、ZK5701 所扫描含矿段位于 202 矿脉上。对 ZK5202 样品岩芯扫描时平均间距为 5 cm,其余岩芯扫描测试平均间距约 25 cm,测得 ZK5202 钻孔有效光谱数据 1262 条,测得 ZK2404 有效光谱数据 148 条,测得 ZK805 有效光谱数据 55 条,测得 ZK803 有效光谱数据 87 条,测得 ZK5701 有效光谱数据 37 条,共计 1781 条有效光谱数据。

本次研究使用的为美国 ASD 公司(Analytical Spectral Devices, Inc.)生产的 Terra Spec 4 Hi-Res 便携式短波红外光谱仪。其光谱分辨率在 6~7 nm,测试光谱区间为 350~2500 nm。具体参数设置及操作方法可参照王旭辉等(2022)。对测试所得的光谱数据使用了澳大利亚联邦科学与工业研究组(CSIRO)研发的光谱地质师 TSG(The spectral Geologist)V. 8 软件进行自动识别解译,结合人工检查核对,最终确定识别矿物的种类。其中绢云母在 1900 nm 和 2200 nm 处的吸收峰位值(POS)和吸收峰位深度(Dep)均可通过 TSG V. 8 进行直接获取。使用 TSG V. 8 的标量(scalar)功能,还可求出绢云母类伊利石结晶度(IC),具体操作方法见杨志明等

(2012)。

3.2 断裂中热液温度与运移距离表达式推演

热液在断裂中运移达到与围岩温度平衡时,此时热液与围岩的温度传播符合牛顿冷却定律。热液以质量流量 q_m 流经断裂,环境温度为 T_E 。进行以下假设:以对流传热主导;物性参数恒定:比热容 c 、传热系数 h 不随温度变化;均匀运移:断裂规模稳定,周长 P 和横截面积 A 沿流动方向相对稳定。 x 为传输距离, T_0 热液初始温度, T_E 为环境温度。

在断裂通道中取一微元段 dx ,其能量守恒:

(1) 对流能量变化

对流输入能量: $q_m c T(x)$

对流输出能量: $q_m c T(x + dx)$

对流能量变化:

$$q_m c [T(x) - T(x + dx)] = -q_m c \frac{dT}{dx} dx$$

(2) 断裂散热损失

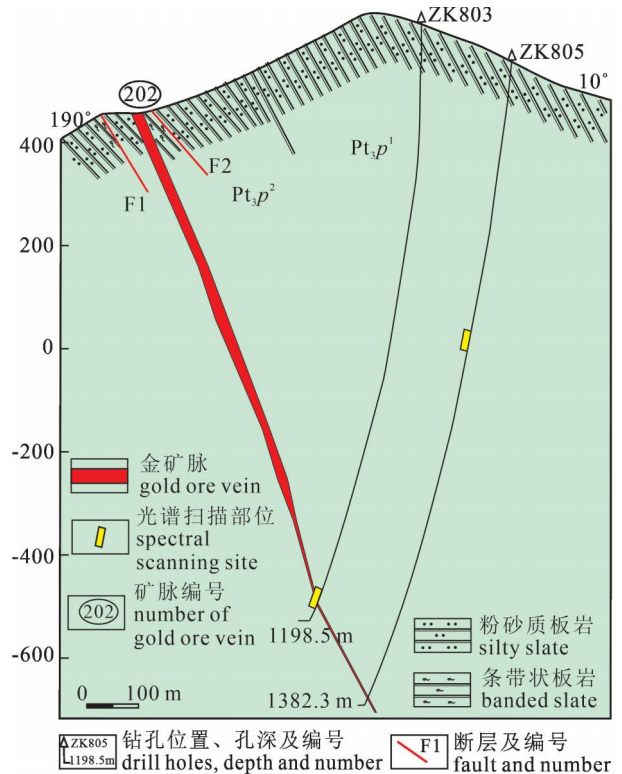


图3 湘东北黄金洞金矿床简化地质剖面图

Fig. 3 Simplified geologic cross section of Huangjindong gold deposit, northeastern Hunan
Pt₃p¹—冷家溪群坪原组第一岩性段; Pt₃p²—冷家溪群坪原组第二岩性段

Pt₃p¹—the first lithologic section of Neoproterozoic Lengjiaxi Group Pingyuan Formation; Pt₃p²—the second lithologic segment of Neoproterozoic Lengjiaxi Group Pingyuan Formation

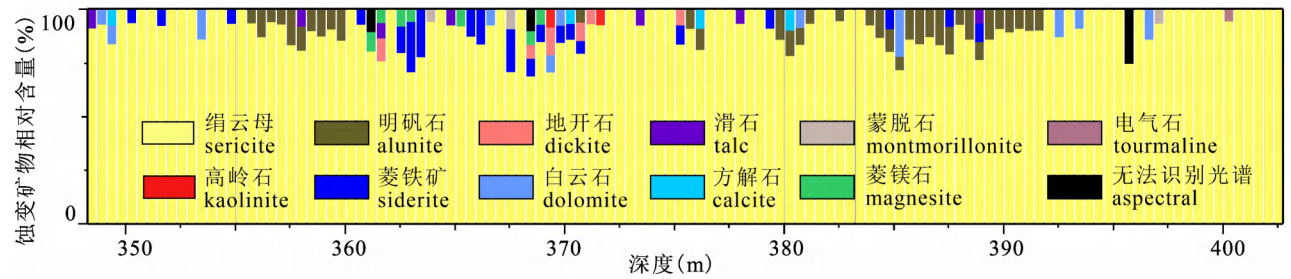


图 4 湘东北黄金洞矿区钻孔 ZK5202 蚀变矿物分布特征图

Fig. 4 Alteration mineral distribution map of drill hole ZK5202 in Huangjindong gold deposit, northeastern Hunan

根据牛顿冷却定律,散失的热量为:

$$dQ_{loss} = hP [T(x) - T_E] dx$$

(3) 稳态下,净对流能量变化等于断裂散热损失,则:

$$-q_m c \frac{dT}{dx} dx = hP [T(x) - T_E] dx$$

化简后:

$$\frac{dT}{dx} + \frac{hP}{q_m c} (T - T_E) = 0$$

即:

$$\frac{dT}{(T - T_E)} = - \frac{hP}{q_m c} dx$$

两边进行积分:

$$\int_{T_0}^T \frac{1}{(T - T_E)} dT = - \int_0^x \frac{hP}{q_m c} dx$$

得:

$$\ln \left[\frac{T - T_E}{(T_0 - T_E)} \right] = bx, \quad b = - \frac{hP}{q_m c} \quad (1)$$

指数形式解为:

$$T(x) = (T_0 - T_E) e^{bx} + T_E \quad (2)$$

对于(1)式来说,在热液源温度 T_0 明显高于环境温度 T_E 时:

$$\frac{T_E}{T_0 - T_E} \approx 0$$

$$\frac{T - T_E}{T_0 - T_E} = \frac{T}{T_0 - T_E} - \frac{T_E}{T_0 - T_E} \approx cT, \quad c = \frac{1}{T_0 - T_E}$$

则可等效为:

$$\ln [cT(X)] = bx \quad (3)$$

4 测试结果

4.1 蚀变矿物种类

本次对黄金洞矿区的 202 号矿脉的 5 个钻孔中发生褪色化蚀变的含矿段进行了短波红外光谱测试,共识别出 10 余种蚀变矿物。从多到少分别是绢云母,明矾石、叶蜡石、蒙脱石、高岭石、菱铁矿、铁白云石、方解石、滑石和地开石(图 4)。其中绢云母占绝大多数,滑石、地开石含量较少。在蚀变带中并没有表现出强烈的分带性。在不同的钻孔中,含矿段蚀变矿物种类有较大差别(表 1)。

4.2 特征参数特征

对矿区 5 个钻孔的 Al—OH 吸收峰位值 ($\lambda_{POS2200}$) 和伊利石结晶度 ($D_{SWIR-IC}$) 的测量结果进行统计,在空间上 $\lambda_{POS2200}$ 与 $D_{SWIR-IC}$ 均呈现出一定的变化规律(图 5,图 6)。各钻孔的红外光谱特征参数见表 2。 $\lambda_{POS2200}$ 主要变化区间为 2196 ~ 2210 nm, $D_{SWIR-IC}$ 变化区间很广泛,为 0.022 ~ 60.55。单一钻孔中的 $\lambda_{POS2200}$ 分布比较不均匀,在蚀变带边缘和中心并没有明显的变化。在钻孔 ZK5202 中

表 1 湘东北黄金洞矿区 202 矿脉各钻孔短波红外光谱识别出的蚀变矿物种类

Table 1 Alteration minerals identified with short wave infrared (SWIR) spectroscopy from the ore vein 202 in drill holes in Huangjindong gold deposit, northeastern Hunan

孔号	识别出的蚀变矿物
ZK5202	绢云母、明矾石、地开石、菱铁矿、方解石、铁白云石、菱镁矿、蒙脱石、滑石
ZK2404	绢云母、明矾石、高岭石、铁绿泥石、电气石、菱铁矿、石膏
ZK803	绢云母、叶蜡石、蒙脱石、高岭石、石膏、电气石
ZK805	绢云母、叶蜡石、蒙脱石、高岭石、明矾石、铁绿泥石、电气石、白云石
ZK5701	绢云母、叶蜡石、蒙脱石、高岭石、钠闪石、菱铁矿、白云石、多硅白云母、明矾石、叶蛇纹石、地开石

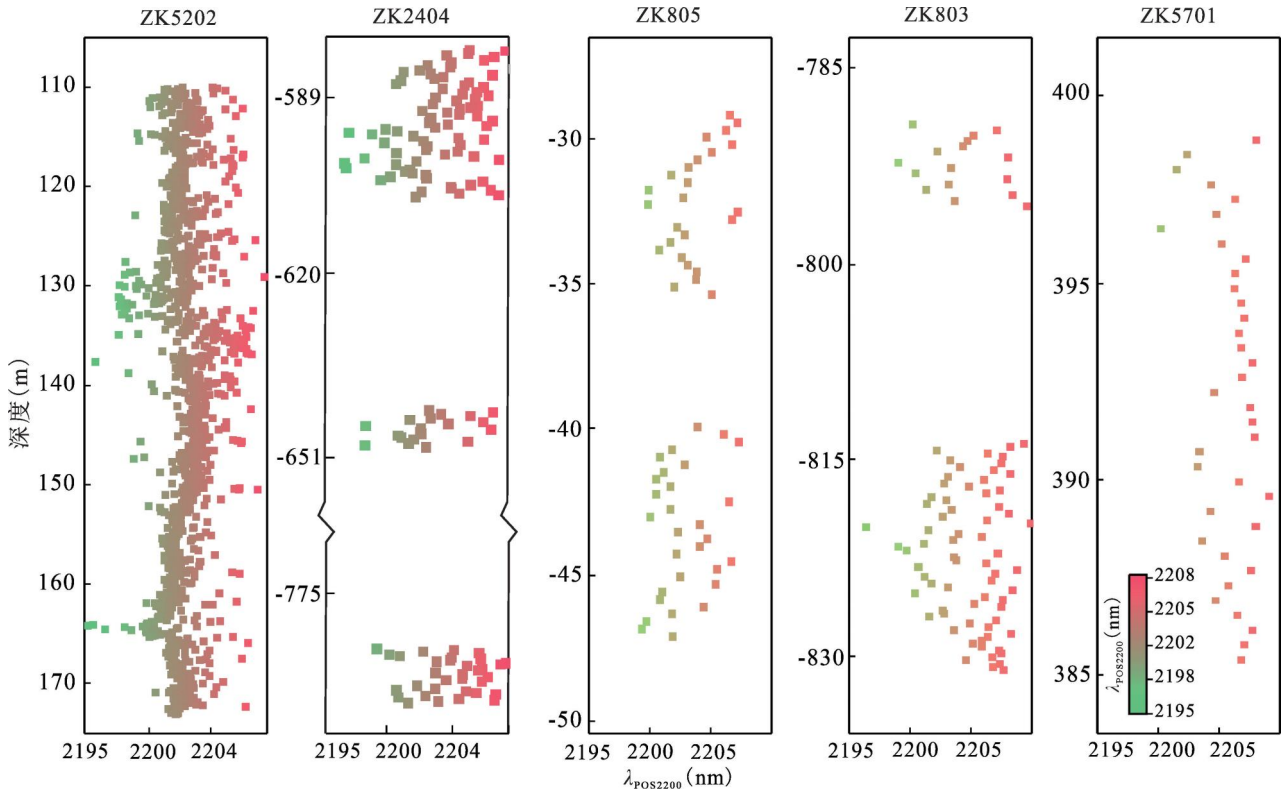


图 5 湘东北黄金洞金矿床 202 矿脉各钻孔 $\lambda_{POS2200}$ 分布图

Fig. 5 Spatial distribution map of $\lambda_{POS2200}$ values across drill holes of the ore vein 202 in Huangjindong gold deposit, northeastern Hunan

$D_{SWIR-IC}$ 从蚀变带外围到中心有一个明显的相对增大的趋势(图 6)。矿区内自西向东,各钻孔的 $D_{SWIR-IC}$ 均值逐渐减小,而 $\lambda_{POS2200}$ 均值逐渐增大。

5 讨论

5.1 绢云母特征光谱参数对成矿环境的指示

绢云母的 Al—OH“2200 nm”吸收峰位(简称“POS2200”)主要受 Tschermak(契尔马克)替换影响,即 $^{VI}Al^{3+} + ^{IV}Al^{3+} \rightleftharpoons ^{IV}Si^{4+} + ^{VI}(Fe^{2+}, Mg^{2+}, Mn^{2+})$ (Duke, 1994; Jones et al., 2005; Wang Rui et

al., 2017)。Al—OH 吸收特征波长集中在 2190 ~ 2200 nm 附近的为富 Al、Na 特征的伊利石(钠云母); Al—OH 吸收特征波长在 2200 ~ 2208 nm 之间的为富 Al、富 K 特征的白云母; Al—OH 吸收特征波长集中在 2216 ~ 2228 nm 之间的为富 Mg、Fe 和富 Si 特征的多硅白云母(Herrmann et al., 2001)。

绢云母类矿物在 2200 nm 处吸收深度(Depth2200)与其在 1900 nm 处吸收峰深度(Depth1900)的比值,可以用来确定绢云母类矿物的短波红外伊利石结晶度($D_{SWIR-IC}$),也被称为伊利石光谱成熟度(Illite Spectral Maturity, ISM) (Chang Zhaoshan et al., 2011; 杨志明等, 2012; 毛星星等, 2023)。绢云母 $D_{SWIR-IC}$ 主要受控于温度。在高温条件下,绢云母具有最理想的配分模型;随着温度的降低,其晶格中的 Al、K 逐渐被 Si 和一些缺陷所替代,导致层间位置容纳了更多的 H_2O 。温度降低时,升高的 H_2O 含量会引起较强的 1900 nm 吸收,绢云母 1900 nm 吸收深度值增大,同时晶格中 Al 的减少会使绢云母的 2200 nm 峰吸收强度降低,导致绢云母 $D_{SWIR-IC}$

表 2 湘东北黄金洞矿区 202 矿脉各钻孔红外光谱特征参数表
Table 2 $D_{SWIR-IC}$ and $\lambda_{POS2200}$ data of the ore vein 202 in drill holes in Huangjindong gold deposit, northeastern Hunan

孔号	$D_{SWIR-IC}$ 分布区间	$D_{SWIR-IC}$ 均值	$\lambda_{POS2200}$ 分布区间 (nm)	$\lambda_{POS2200}$ 均值
ZK5202	0.022 ~ 60.55	6.38	2189.3 ~ 2210.1	2202.1
ZK2404	0.069 ~ 14.59	2.29	2184.1 ~ 2210.1	2203.4
ZK805	0.057 ~ 17.47	3.85	2199.3 ~ 2207.2	2203.2
ZK803	0.20 ~ 4.85	1.55	2192.3 ~ 2212.5	2204.7
ZK5701	0.26 ~ 3.82	1.20	2200.2 ~ 2209.1	2205.9

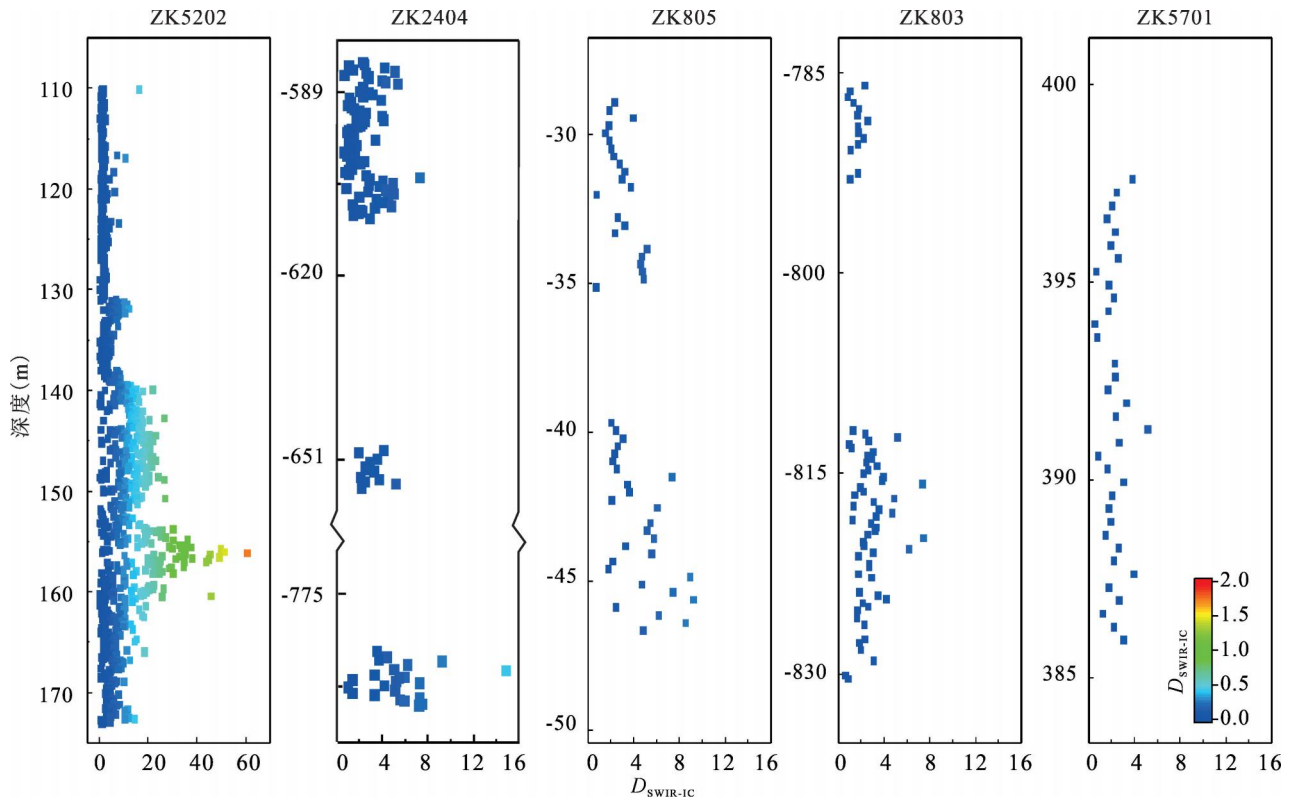


图 6 湘东北黄金洞金矿床 202 矿脉各钻孔 $D_{\text{SWIR-IC}}$ 分布图

Fig. 6 $D_{\text{SWIR-IC}}$ (short wave infrared Illite Crystallinity) distribution map by drill hole of the ore vein 202 in Huangjindong gold deposit, northeastern Hunan

降低(毛星星等,2023)。而 POS2200 对应着绢云母中的 Al—OH“2200 nm”吸收峰位,其与绢云母晶格内的 Al 含量明显的负相关(Post and Noble, 1993)。温度降低时,晶格中 Al 的减少会增高绢云母的 Al—OH 吸收峰位(λ_{POS2200} 增大)。因此,温度高时, $D_{\text{SWIR-IC}}$ 大, λ_{POS2200} 低,温度低时, $D_{\text{SWIR-IC}}$ 小, λ_{POS2200} 高(杨志明等,2012)。

热液流体的 pH 值会影响绢云母的种类,在酸性环境下形成富 Al 的钠云母和白云母,其对应的 λ_{POS2200} 较小,随着 pH 值升高接近中性会形成多硅白云母,其对应的 λ_{POS2200} 较大(田丰等,2019;唐楠等,2021)。黄金洞金矿床中位于同一矿脉的 ZK5202、ZK2404、ZK803、ZK5701 各钻孔的 λ_{POS2200} 均值有着从西往东逐渐增大的趋势,而 $D_{\text{SWIR-IC}}$ 均值有着逐渐下减小的趋势。在本次扫描含矿段岩芯中, λ_{POS2200} 的变化区间为 2196~2210 nm(图 5),多为富 Al、富 K 特征的白云母,表征相对中酸性的热液流体环境,这与前人得出的成矿流体的中酸性特征相吻合(谭华杰,2022)。在黄金洞金矿床 202 矿

脉上, λ_{POS2200} 平均值由西向东增大的趋势指示了成矿热液的酸性在由西向东逐渐减弱(图 7)。

绢云母 $D_{\text{SWIR-IC}}$ 在不同的矿床系统中变化规律呈现出一致性,即靠近热液矿化中心 $D_{\text{SWIR-IC}}$ 相对较大,而远离热液矿化中心 $D_{\text{SWIR-IC}}$ 则相对较小(杨志明等,2012; Harraden et al., 2013; 刘碧洪和刘鹤,2016)。在 ZK5202 钻孔中,蚀变带纵向上呈现越靠近蚀变带中心部位绢云母 $D_{\text{SWIR-IC}}$ 越大,越靠近边缘部位该值越小的趋势(图 6),蚀变带中心部位温度高于两侧。成矿热液沿着断裂破碎带运移,向两侧围岩扩散时,温度逐渐下降,两侧围岩蚀变强度也逐渐减小。黄金洞金矿床 202 矿脉的 $D_{\text{SWIR-IC}}$ 均值从西往东为逐渐减小的趋势(图 7),且西侧钻孔围岩褪色化蚀变规模大于东侧钻孔。可以确定黄金洞金矿床 202 矿脉上西侧成矿热液温度要明显高于东侧。

202 号矿脉近东西向呈北倾,从西侧到东侧, λ_{POS2200} 逐渐增大, $D_{\text{SWIR-IC}}$ 逐渐减小(图 7)。在 202 矿脉中,西侧成矿热液温度更高,pH 偏酸性,靠近潜在的热液中心。成矿热液主要来源于西部的变质流体,沿着 202 号矿脉由西向东运移,在这个过程中不

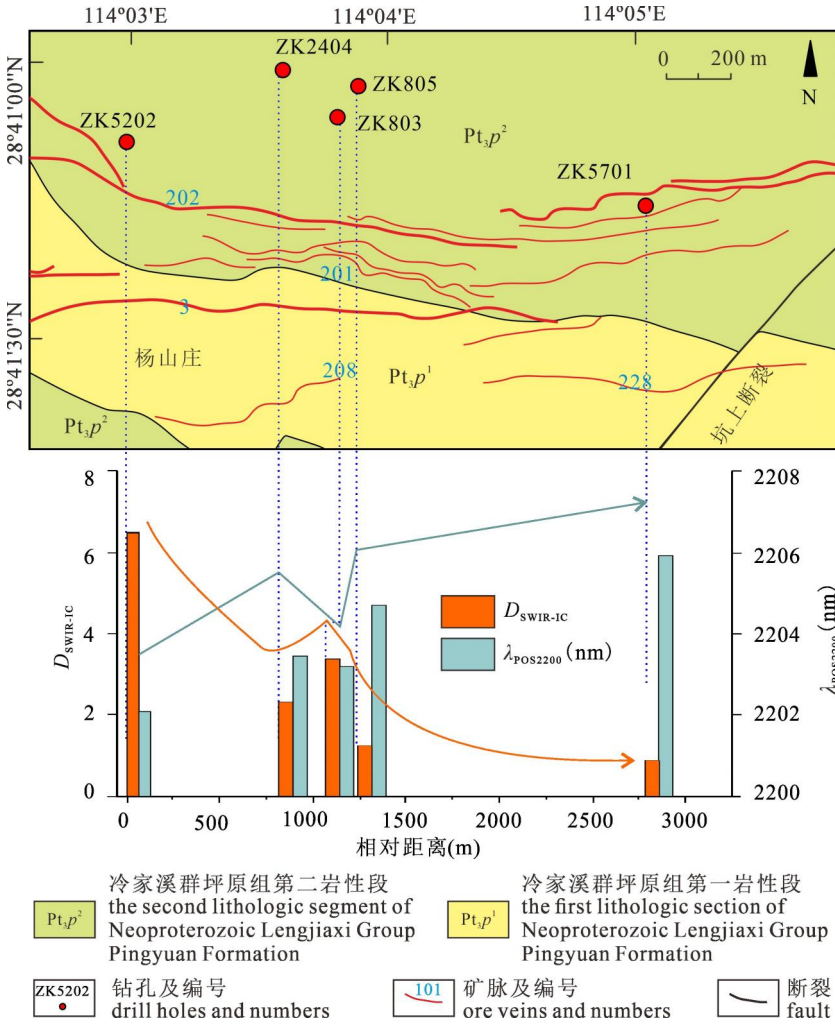


图7 湘东北黄金洞金矿床 202 矿脉 $D_{SWIR-IC}$ 及 $\lambda_{POS2200}$ 与位置关系示意图
 Fig. 7 Schematic diagram of $D_{SWIR-IC}$ and $\lambda_{POS2200}$ spatial relationships of the ore vein 202 in Huangjindong gold deposit, northeastern Hunan

断地发生水岩反应,温度不断下降,流体酸性减弱, $\lambda_{POS2200}$ 上升, $D_{SWIR-IC}$ 下降。

表3 湘东北黄金洞金矿床 202 矿脉 $\lambda_{POS2200}$ 、 $D_{SWIR-IC}$ 、距离、平面距离之间的相关性

Table 3 Correlation analysis between $\lambda_{POS2200}$, $D_{SWIR-IC}$, linear distance, and planar distance of the ore vein 202 in Huangjindong gold deposit, northeastern Hunan

	$\lambda_{POS2200}$	$D_{SWIR-IC}$	距离	平面距离
$\lambda_{POS2200}$	1	-0.893 *	0.961 **	0.945 *
$D_{SWIR-IC}$	-0.893 *	1	-0.884 *	-0.806
距离	0.961 **	-0.884 *	1	0.989 **
平面距离	0.945 *	-0.806	0.989 **	1

注:本相关性分析为皮尔逊相关性分析,*表示显著性P值在0.05级别(双尾,95%置信区间),相关性显著;**表示显著性P值在0.01级别(双尾,99%置信区间),相关性显著。

5.2 找矿勘查模型的建立

张柯凡等(2024)在研究赣南铜岭下铜多金属矿床时发现:钻孔 ZK9-3 和 ZK9-4 的 $D_{SWIR-IC}$ (顶→底)均出现了缓慢降低→逐渐升高的变化(0.39 → 1.67)。李健等(2024)发现三山岛北部海域金矿床在垂向空间上,浅部样品 $\lambda_{POS2200}$ (<2205 nm)和 $D_{SWIR-IC}$ (<2.0)较低,随着钻孔深度的增加, $\lambda_{POS2200}$ 和 $D_{SWIR-IC}$ (部分样品除外)均开始逐渐增加。 $D_{SWIR-IC}$ 和 $\lambda_{POS2200}$ 在空间中的变化呈现出一定的规律性,反映了成矿流体温度、pH、寄主围岩等的变化。但是已有的研究多数侧重于垂向上对比,而缺少横向上不同钻孔之间的对比。

在黄金洞金矿床中,各钻孔之间的 $\lambda_{POS2200}$ 和 $D_{SWIR-IC}$ 与空间位置具有强烈的相关性(图7,表3),尤其是 $D_{SWIR-IC}$ 与空间距离密切相关(表3)。我们以 ZK5202 的位置为原点,正东向为 A 轴正向,正北向为 Y 轴正向,确立各钻孔的位置(表4)。对于各点相对 ZK5202 的距离进行了皮尔逊相关性分析,发现 $\lambda_{POS2200}$ 与 $D_{SWIR-IC}$ 均与空间距离显著相关(显著性水平为 95%) (表3)。在黄金洞矿区,各钻孔之

表4 湘东北黄金洞金矿床各钻孔位置和 202 矿脉 $\lambda_{POS2200}$ 、 $D_{SWIR-IC}$ 数值表

Table 4 Drill holes location and $\lambda_{POS2200}$, $D_{SWIR-IC}$ values of the ore vein 202 in Huangjindong gold deposit, northeastern Hunan

孔号	5202	2404	805	803	5701
A	0	928	1230	1320	2832
Y	0	403	298	78	-350
Z	0	-767	-117	-884	313
$\lambda_{POS2200}$	2202.1	2203.4	2203.2	2204.7	2205.9
$D_{SWIR-IC}$	6.38	2.28	3.85	1.55	1.19
$\ln(D_{SWIR-IC})$	1.85	0.83	1.35	0.44	0.17
距离	0	1270	1271	1591	2871
平面距离	0	928	1232	1345	2853

注:坐标位置以钻孔 5202 为原点, $\ln(D_{SWIR-IC})$ 为 $D_{SWIR-IC}$ 值取自然对数。

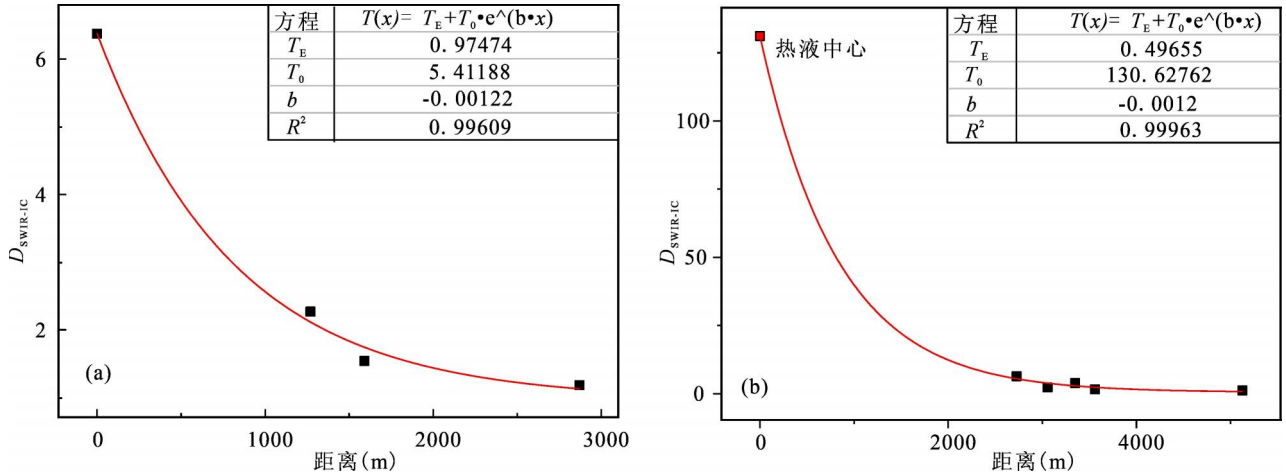


图 8 湘东北黄金洞金矿床 202 矿脉 $D_{SWIR-IC}$ 与空间距离拟合图
 Fig. 8 Fitting plots of $D_{SWIR-IC}$ values versus spatial distance for ore vein 202

in the Huangjindong gold deposit, northeastern Hunan

各钻孔的 $D_{SWIR-IC}$ 均值与扫描位置空间距离所拟合出的指数表达式与断裂中热液温度随运移距离变化的函数式 (2) ($T(x) = (T_0 - T_E) e^{bx} + T_E$) 有高度的一致性 ($R^2 > 0.99$)。 $T(x)$ 为运移 x 距离时热液的温度, T_E 为围岩环境的温度, b 为围岩导热系数, e 为自然常数, $T(x)$ 与 T_E 使用了 $D_{SWIR-IC}$ 等效替代。 A: 位于同一断裂的钻孔 ZK5202, ZK2404, ZK803, ZK5701 的 $D_{SWIR-IC}$ 均值与距离拟合结果, 距离计算以最西侧靠近热液中心的钻孔 ZK5202 为原点; B: 预测热液中心和所有钻孔的 $D_{SWIR-IC}$ 均值与距离拟合结果, 距离计算以预测热液中心位置为原点

The exponential expressions fitted between the mean $D_{SWIR-IC}$ values of boreholes and their spatial distances from scanning locations show high consistency ($R^2 > 0.99$) with the function (Equation 2, ($T(x) = (T_0 - T_E) e^{bx} + T_E$)) describing hydrothermal temperature variation along migration distance. $T(x)$ is the hydrothermal temperature at migration distance x , T_E is the temperature of the surrounding rock environment, b is the thermal conductivity coefficient of the surrounding rocks, and e is the natural constant. $D_{SWIR-IC}$ values are used as equivalents for $T(x)$ and T_E . A: Fitting results of mean $D_{SWIR-IC}$ values versus distance for boreholes ZK5202, ZK2404, ZK803, and ZK5701 along the same fracture zone. Distance calculation uses the westernmost borehole ZK5202 (closest to the hydrothermal center) as the origin. B: Fitting results of predicted hydrothermal center and mean $D_{SWIR-IC}$ values versus distance for all boreholes. Distance calculation uses the predicted hydrothermal center as the origin

间的 $D_{SWIR-IC}$ 与空间与平面距离都有着显著的相关性。热液由热液中心输送到矿脉的不同位置。热液中心的 $D_{SWIR-IC}$ 最高, 随着热液的运移温度不断降低, $D_{SWIR-IC}$ 不断下降, 与距离呈负相关。202 矿脉上的各钻孔的 $D_{SWIR-IC}$ 均值拟合出的指数函数式 (图 8A; $R^2 > 0.99$) 符合稳态条件下热液在断裂中运移时的温度—距离函数式 (2) [$T(X) = (T_0 - T_E) e^{bx} + T_E$]。 $D_{SWIR-IC}$ 值可等效代替温度来推演热液中心的位置。

故可以利用 $D_{SWIR-IC}$ 等效代替 $cT(x)$ 用 (3) $\ln[cT(x)] = bx$ 式来推测热液中心的位置。 $\ln[cT(x)]$ 与 x 为线性关系, 则 $\ln(D_{SWIR-IC})$ 与热液运移距离 x 呈线性关系, 假设线性系数为 k (该系数受 $D_{SWIR-IC}$ 等效代替 $cT(x)$ 的换算关系及温度传导系数 b 控制), 热液中心位置为 (a_0, y_0, z_0) , 热液中心处的 $D_{SWIR-IC}$ 值为 $D_{SWIR-IC0}$, 热液运移距离与 $D_{SWIR-IC}$ 符合下列表达式:

$$x = k [\ln(D_{SWIR-IC}) - \ln(D_{SWIR-IC0})]$$

在该坐标系中热液运移距离 x 为:

$$x = \sqrt{(a - a_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}$$

可得出:

$$\sqrt{(a - a_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2} =$$

$$k [\ln(D_{SWIR-IC}) - \ln(D_{SWIR-IC0})]$$

等式两边平方后得:

$$(a - a_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 =$$

$$k^2 [\ln(D_{SWIR-IC}) - \ln(D_{SWIR-IC0})]^2 \quad (4)$$

将表 4 中各钻孔中的光谱扫描位置及 $\ln(D_{SWIR-IC})$ 带入公式 (4) 后, 运用数学软件 Mathematica 求解。在所得到的 4 组解中, 有三组解包含虚数解不具有实际意义。有一组解: $a_0 = -238$, $y_0 = -859$, $z_0 = 2870$, $k = -937$, $\ln(D_{SWIR-IC0}) = 4.87$ 具有实际意义。

本次计算拟合为基于小样本的探索性分析, 在统计意义上有可能过拟合。热液中心 $a_0 = -238$, y_0

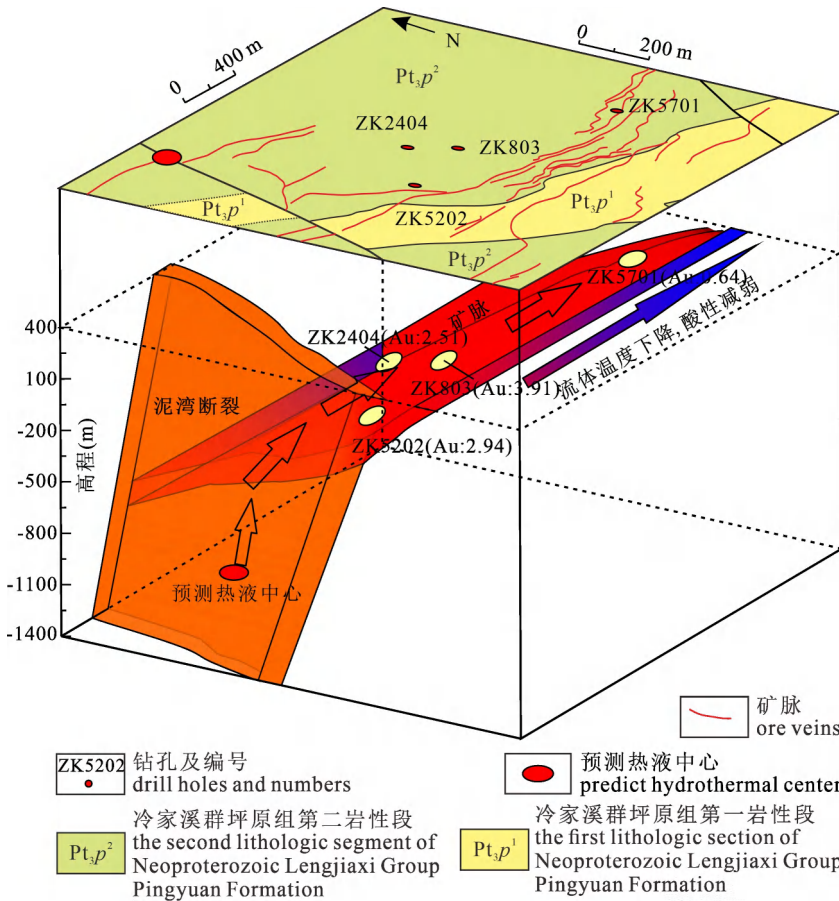


图9 湘东北黄金洞金矿床 202 矿脉热液立体运移示意图

Fig. 9 3D hydrothermal fluid migration model of the ore vein 202 in Huangjindong gold deposit, northeastern Hunan

= -859, $z_0 = 2870$ 的位置只考虑了直线传播的情况, 可结合 $\ln(D_{SWIR-IC}) = 4.87$ 根据实际的断裂分布情况进行修正。

202 号矿脉位于黄金洞矿区杨山庄矿段。黄金洞金矿区杨山庄矿段的容矿构造主要为向北倾斜的 NWW 向—EW 向层间剪切断裂(局部与层面小角度相交)(肖拥军和陈广浩, 2004; 柏道远等, 2023), 包括 202 号矿脉在内的多数矿脉均受这类断裂控制, 断裂整体近东西向延伸, 北北东倾向。可以确定矿脉的热液中心位于 202 矿脉的西侧(图 9), 该位置恰好为矿区内深大断裂——泥湾断裂。热液运移可能的路径为: 热液从泥湾断裂向上运移, 在泥湾断裂地下与 202 断裂交汇处, 热液传向 202 断裂, 由西往东运移。结合实际断裂情况认为, 热液中心修正后位于 ($a_0 = -238, y_0 = -859, z_0 = -2150$), $D_{SWIR-IC0} = 131$, 断裂交汇处为 ($a = -238, y = -859, z = -400$)。以此路径计算热液运输距离并拟合得到与初始拟合

一致的温度传导参数 ($b = -0.0012$) (图 8b)。(2) 式中的 b 为温度衰减系数, 表现了在设定断裂条件下的热液与围岩的热传导衰减速率。本次计算所得热液中心与其他钻孔中的 $D_{SWIR-IC}$ 值进行拟合所得到的温度衰减系数是一致的, 此热液中心位置有较高的参考价值。

综上, 含矿热液从泥湾断裂向上运移, 在泥湾断裂与 202 断裂交汇处, 热液在 202 断裂由西往东运移, 这个过程中温度逐渐降低, 随着水岩反应的进行, 热液酸性减弱(图 9)。热液沿泥湾断裂构造向上运移, 在 202 断裂上横向由西往东运移, 浅部温压降低、岩性变化或流体混合等环境突变使金属沉淀富集形成矿体。

6 结论

(1) 红外光谱伊利石结晶度 ($D_{SWIR-IC}$) 可作为勘查指标, 可高效指示成矿热液运移路径, 预测热液中心位置。本研究基于温度衰减模型 ($D_{SWIR-IC}$ 随距离呈指数衰减), 约束了热液中心位置, 运移路径为从泥湾断裂向上运移, 在泥湾断裂与 202 断裂交汇处, 热液在 202 断裂由西往东运移。

(2) 对黄金洞金矿床蚀变岩石的短波红外光谱测量, 识别出绢云母、明矾石、菱铁矿、铁白云石、方解石、滑石、叶蜡石、蒙脱石、高岭石、地开石等 10 种含羟基官能团蚀变矿物。短波红外光谱测量能够清楚的识别出黄金洞地区蚀变岩的矿物种类和相对含量。

(3) 黄金洞金矿床绢云母 Al—OH 吸收峰位值 ($\lambda_{POS2200}$) 和绢云母伊利石结晶度 ($D_{SWIR-IC}$) 对成矿流体温度及 pH 具有明确的指示意义。202 矿脉从西往东 $D_{SWIR-IC}$ 有着减小的趋势, 推测 202 矿脉西侧成矿流体温度更高, 热液中心可能在西侧; 202 矿脉从西往东 $\lambda_{POS2200}$ 逐渐增大, 绢云母 $\lambda_{POS2200}$ 主要变化区间为 2196~2210 nm, 指示 pH 更接近于中性。

致谢: 章雨旭研究员阅读全文并提出了专业的意见。对论文结构、学术规范及语言表达的精准建议, 极大提升了文章的逻辑严谨性与表述清晰度。在此谨表谢意!

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

柏道远, 李彬, 江华军, 曾广乾, 魏方辉, 文春华. 2023a. 湘东北黄金洞金矿区构造变形序列及控矿构造属性. 地质通报, 42(10): 1~23.

柏道远, 文春华, 黄建中, 李彬, 周芳春, 张立平, 陈虎, 陈剑锋, 陈旭. 2023b. 湘东北幕阜山地区中生代构造—岩浆特征及其对稀有金属伟晶岩的控制. 地质论评, 69(3): 855~880.

陈华勇, 张世涛, 初高彬, 张宇, 程佳敏, 田京, 韩金生. 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.

郭娜, 刘栋, 唐菊兴, 郑龙, 黄一入, 史维鑫, 伏媛, 唐楠, 王成. 2018. 基于短波红外技术的蚀变矿物特征及勘查模型——以斯弄多银铅锌矿床为例. 矿床地质, 37(3): 556~570.

韩凤彬, 常亮, 蔡明海, 刘孙决, 张诗启, 陈艳, 彭振安, 徐明. 2010. 湘东北地区金矿成矿时代研究. 矿床地质, 29(3): 9.

黄建中, 孙骥, 周超, 陆文, 肖荣, 郭爱民, 黄革非, 谭仕敏, 陆含涛. 2020. 江南造山带(湖南段)金矿成矿规律与资源潜力. 地球学报, 41(2): 230~252.

黄一入. 2021. 矽卡岩矿物的热红外光谱特征研究及其勘查模型. 导师: 唐菊兴. 成都: 成都理工大学博士学位论文: 1~110.

江宏君, 陈华勇, 王朋, 高政伟, 纪冬平, 吴宝鹏, 程博兴, 冯雨周, 焦宏剑, 王义忠. 2023. 龙门山造山带北段黄泥坪金矿床蚀变矿化特征与 SWIR 勘查应用研究. 大地构造与成矿学, 47(6): 1291~1306.

李兵院, 郭娜, 支立佳, 杨文文, 谢周, 王潇, 魏德贤. 2024. 基于红外光谱技术的内蒙古达赉矿区蚀变地质填图及其勘查指示意义. 地质学报, 98(2): 623~635.

李健, 宋明春, 王昌伟, 王润生, 雷鸣, 崔庆意, 李杰, 李世勇. 2024. 胶东三山岛断裂带金矿床蚀变矿物勘查标识. 黄金科学技术, 32(5): 749~767.

刘碧洪, 刘鹤. 2016. 内蒙古干珠尔善德银铅锌矿床的短波红外光谱研究. 地质与勘探, 52(4): 703~711.

孟亚群, 李伟, 毛景文, 吴圣刚, 陈孝刚, 阴芳圆等. 2024. 沉积黄铁矿微量元素和硫同位素组成对黄金洞金矿床的成因约束. 矿床地质, 43(4): 935~950.

毛景文, 李红艳. 1997. 江南古陆某些金矿床成因讨论. 地球化学, 26(5): 71~81.

毛景文, 李延河, 李红艳, 王登红, 宋鹤彬. 1997. 湖南万金矿床幔流流体成矿的氩同位素证据. 地质论评, 43(6): 646~649.

毛星星, 彭惠娟, 张云龙, 周琪, 王天瑞, 覃恩. 2023. 绢云母短波红外光谱特征及其在矿产勘查中的应用. 矿床地质, 42(3): 646~659.

舒良树. 2012. 华南构造演化的基本特征. 地质通报, 31(7): 1035~1053.

宋明春, 杨立强, 范宏瑞, 于学峰, 丁正江, 张永文, 邱昆峰, 李杰, 张良, 王斌, 李世勇. 2022. 找矿突破战略行动十年胶东金矿成矿理论与深部勘查进展. 地质通报, 41(6): 903~935.

谭华杰. 2022. 江南造山带湘东北地区金矿床成矿作用及成因研究. 导师: 邵拥军, 刘清泉. 长沙: 中南大学博士学位论文: 1~181.

唐楠, 林彬, 李玉彬, 王艺云, 李佳俊. 2021. 短波红外光谱技术在斑岩—高硫化型浅成低温热液矿床中的应用——以西藏铁格隆南超大型铜(金)矿床为例. 地质学报, 95(8): 2613~2627.

田丰, 冷成彪, 张兴春, 田振东, 张伟, 郭剑衡. 2019. 短波红外光谱技术在西藏尼木地区岗班岩铜—钼矿床中的应用. 地球科学, 44(6): 2143~2154.

王庆飞, 邓军, 赵鹤森, 杨林, 马麒麟, 李华健. 2019. 造山型金矿研究进展: 兼论中国造山型金成矿作用. 地球科学, 44(6): 2155~2186.

王旭辉, 段士刚, 孙鹏, 翟世达, 张炎. 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. 矿床地质, 41(1): 174~188.

王雪娜, 许超, 赵骏峰, 陈华勇. 2024. 福建紫金山矿田浸铜湖 Cu—Mo 矿床蚀变矿化特征及短波红外光谱勘查应用研究. 大地构造与成矿学, 48(6): 1~24.

王自强, 高林志, 丁孝忠, 黄志忠. 2012. “江南造山带”变质基底形成的构造环境及演化特征. 地质论评, 58(3): 401~413.

王志林, 邓腾, 董国军, 邹凤辉, 许德如, 王智琳, 林柯, 陈根文. 2016. 湘东北万金矿床控矿构造特征与控矿规律研究. 大地构造与成矿学, 40(2): 281~294.

肖拥军, 陈广浩. 2004. 湘东北大洞—万古地区金矿构造成矿定位机制的初步研究. 大地构造与成矿学, 28(1): 38~44.

谢焱石, 谭凯旋, 陈广浩. 2004. 湘西沃溪金锑钨矿床含金石英脉的分形生长动力学. 地质论评, 50(4): 440~447.

许德如, 邹凤辉, 宁灼陶, 邓腾, 王智琳, 陈根文, 张建岭, 董国军. 2017. 湘东北地区地质构造演化与成矿响应探讨. 岩石学报, 33(3): 695~715.

许可. 2022. 江南造山带黄金洞金矿蚀变岩型矿石成矿机制研究. 导师: 陈华勇. 南昌: 华东理工大学硕士学位论文: 1~68.

杨志明, 侯增谦, 杨竹森, 曲焕春, 李振清, 刘云飞. 2012. 短波红外光谱技术在浅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.

张柯凡, 郭娜, 李伟, 姚艺欣. 2024. 基于红外光谱技术的赣南铜岭下铜多金属矿床蚀变及矿化特征研究. 矿床地质, 43(02): 339~358.

张世涛, 陈华勇, 张小波, 张维峰, 许超, 韩金生, 陈觅. 2017. 短波红外光谱技术在矽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.

张文钊, 卿敏, 牛翠祎, 王科强, 黄辉, 王美娟. 2014. 中国金矿床类型、时空分布规律及找矿方向概述. 矿物岩石地球化学通报, 33(5): 721~732.

周岳强, 许德如, 董国军, 王智琳, 蔡建新, 颜志强, 李荫中. 2019. 湖南长沙—平江断裂带构造演化及其控矿作用. 东华理工大学学报(自然科学版), 42(3): 201~208.

Bai Daoyuan, Li Bin, Jiang Huajun, Zeng Guangqian, Wei Fanghui, Wen Chunhua. 2023a&. Deformation sequences and the attributes of ore-controlling structures in the Huangjindong gold mining area in northeast Hunan Province. Geological Bulletin, 42(10): 1~23.

Bai Daoyuan, Wen Chunhua, Huang Jianzhong, Li Bin, Zhou Fangchun, Zhang Liping, Chen Hu, Chen Jianfeng, Chen Xu. 2023&. Mesozoic tectono—magmatic characteristics and their control on rare metal pegmatites in Mufushan area, northeastern Hunan. Geological Review, 69(3): 855~880.

Chang, Zhaoshan, Hedenquist J W, White N C, Cooke D R, Roach M, Deyell C L, Garcia J J, Gemmel J B, McKnight S, Cuisson L A, 2011. Exploration tools for linked porphyry and epithermal deposits: Example from the Mankayan intrusion-centered Cu—Au district, Luzon, Philippines. Economic Geology, 106(8): 1365~1398.

Chen Huayong, Zhang Shitao, Chu Gaobin, Zhang Yu, Cheng Jiamin, Tian Jing, Han Jinsheng. 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.
- Cox R, Lowe D R, Cullers R L. 1995. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(14): 2919~2940.
- Craw D, Upton P, Yu Bingsheng, Horton T, Chen Yuegao. 2010. Young orogenic gold mineralisation in active collisional mountains, Taiwan. *Mineralium Deposita*, 45(7): 631~646.
- Deng Jun, Wang Qingfei. 2016. Gold mineralization in China: Metallogenic provinces, deposit types and tectonic framework. *Gondwana Research*, 36: 219~274.
- Deng Teng, Xu Deru, Chi Guoxiang, Wang Zhilin, Jiao Qianqian, Ning Juntao, Dong Guojun, Zou Fenghui. 2017. Geology, geochronology, geochemistry and oregensis of the Wangu gold deposit in northeastern Hunan Province, Jiangnan Orogen, South China. *Ore Geology Reviews*, 88: 619~637.
- Duke E F. 1994. Near infrared spectra of muscovite, Tschermak substitution, and metamorphic reaction progress; Implications for remote sensing. *Geology*, 22(7): 621~624.
- Goldfarb R J., Groves D I. 2015. Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time. *Lithos*, 233: 2~26.
- Greentree M R, Li Zhengxiang, Li Xianhua, Wu Huaichun. 2006. Late Mesoproterozoic to earliest Neoproterozoic basin record of the Sibao orogenesis in western South China and relationship to the assembly of Rodinia. *Precambrian Research*, 151(1~2): 79~100.
- Groves D I, Goldfarb R J, Gebre M M, Hagemann S G, Robert F. 1998. Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore geology reviews*, 13(1~5): 7~27.
- Groves D I, Goldfarb R J, Robert F, Hart C J. 2003. Gold deposits in metamorphic belts: overview of current understanding, outstanding problems, future research, and exploration significance. *Economic geology*, 98(1): 1~29.
- Guo Na, Liu Dong, Tang Juxing, Zheng Long, Huang Yiru, Shi Weixin, Fu Yuan, Tang Nan, Wang Cheng. 2018&. Characteristics of alteration minerals and prospecting model revealed by shortwave infrared technique: Take Sinongduo Ag—Pb—Zn deposit as an example. *Mineral Deposits*, 37(3): 556~570.
- Han Fengbin, Chang Liang, Cai Minghai, Liu Sunyang, Zhang Shiqi, Chen Yan, Peng Zhen'an, Xu Ming. 2010&. Ore-forming epoch of gold deposits in northeastern Hunan. *Mineral Deposits*, 29(3): 9.
- Harraden C L, McNulty B A, Gregory M J, Lang J R. 2013. Shortwave infrared spectral analysis of hydrothermal alteration associated with the Pebble porphyrycopper—gold—molybdenum deposit, Iliamna, Alaska. *Economic Geology*, 108(3): 483~494.
- Herrmann W, Blake M, Doyle M, Huston D, Kamprad J, Merry N, Pontual S. 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.
- Huang Jianzhong, Sun Ji, Zhou Chao, Lu Wen, Xiao Rong, Guo Aimin, Huang Gefei, Tan Shimin, Wei Hantao. 2020&. Metallogenic Regularity and Resource Potential of Gold Deposits of Hunan Area in the Jiangnan Orogenic Belt, South China. *Acta Geoscientica Sinica*, 41(2): 230~252.
- Huang Yiru. 2021&. Study on thermal infrared spectral characteristics of skarn minerals and their exploration models. Chengdu. Dissertation submitted to Chengdu University of Technology for doctoral degree. 1~110
- Hunt G R. 1977. Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. *Geophysics*, 42(3): 501~513.
- Jones Sarah, Herrmann Walter, Gemmill J. Bruce. 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.
- Jiang Hongjun, Chen Huayong, Wang Peng, Gao Zhengwei, Ji Dongping, Wu Baopeng, Cheng Boxing, Feng Yuzhou, Jiao Hongjian, Wang Yizhong. 2023&. Alteration, Mineralization and Applications of Short Wavelength Infra-Red (SWIR) Technique in the Huangniping Au Deposit in Northern Longmenshan Orogenic Belt. *Tectonics and Metallogeny*, 47(6): 1291~1306.
- Li Bingyuan, Guo Na, Zhi Lijia, Yang Wenwen, Xie Zhou, Wang Xiao, Wei Dexian. 2024&. Alteration mapping and exploration indications based on SWIR and TIR spectroscopy in Dasi, Inner Mongolia. *Acta Geologica Sinica*, 98(2): 623~635.
- Li Jian, Song Mingchun, Wang Changwei, Wang Runsheng, Lei Ming, Cui Qingyi, Li Jie, Li Shiyong. 2024&. Exploration Indicators of Altered Minerals of Gold Deposits in the Sanshandao Fault Zone, Jiaodong Peninsula. *Gold Science and Technology*, 32(5): 749~767.
- Liu Bihong, Liu He. 2016&. Short-Wave Infrared Spectroscopy Study on Wall Rock Alteration of the Ganzhuershande Silver—Lead—Zinc Deposit in Inner Mongolia. *Geology and Prospecting*, 52(4): 703~711.
- Liu Qingquan, Shao Yongjun, Chen Mei, Algeo Thomas J., Li Huan, Dick Jeffrey M., Wang Cheng, Wang Wenshu, Li Zhiqi, Liu Zhongfa. 2019. Insights into the genesis of orogenic gold deposits from the Zhengchong gold field, northeastern Hunan Province, China. *Ore Geology Reviews*, 105: 337~355.
- Ma Wen, Deng Teng, Xu Deru, Chi Guoxiang, Li Zenghua, Zhou Yueqiang, Dong Guojun, Wang Zhilin, Zou Shaohao, Qian Qian, Guo Shichao. 2021. Geological and geochemical characteristics of hydrothermal alteration in the Wangu deposit in the central Jiangnan Orogenic Belt and implications for gold mineralization. *Ore Geology Reviews*, 139, 104479: 0169~1368
- Mao Jingwen, Li Hongyan. 1997&. Discussion on the genesis of the gold deposits in the Jiangnan ancient land. *Geochimica*, 26(5): 71~81.
- Mao Jingwen, Li Yanhe, Li Hongyan, Wang Denghong, Song Hebin. 1997. Helium isotopic evidence on metalgenesis of mantle fluids in the Wangu glod deposit, Hunan province. *Geological Review*, 43(6): 646~649.
- Meng Yaqun, Li Wei, Mao Jingwen, Wu Shenggang, Chen Xiaogang, Yin Fangyuan. 2024&. Trace elements and sulfur isotopic composition of sedimentary pyrite on con-straining ore genesis of Huangjindong gold deposit. *Mineral Deposits*, 43(4): 935~950.
- Mao Xingxing, Peng Huijuan, Zhang Yunlong, Zhou Qi, Wang Tianrui, Qin En. 2023&. Short wave infrared spectrum characteristics of sericite and its application to mineral exploration. *Mineral Deposits*, 42(3): 646~659.
- Ni Pei, Wang Guoguang, Chen Hui, Xu Yingfeng, Guan Shenjin, Pan Junyi, Li Lin. 2015. An Early Paleozoic orogenic gold belt along the Jiang—Shao Fault, south China: Evidence from fluid inclusions and Rb-Sr dating of quartz in the Huangshan and Pingshui deposits. *Journal of Asian Earth Sciences*, 103: 87~102.
- Post J L. Noble P N. 1993. The near-infrared combination band frequencies of dioctahedral smectites, micas, and illites. *Clays and*

- Clay Miner, 41: 639~644.
- Shu Liangshu. 2012&. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block. *Geological Bulletin of China*, 31 (7): 1035~1053.
- Song Mingchun, Yang Liqiang, Fan Hongrui, Yu Xuefeng, Ding Zhengjiang, Zhang Yongwen, Qiu Kunfeng, Li Jie, Zhang Liang, Wang Bin, Li Shiyong. 2022&. Current progress of metallogenic research and deep prospecting of gold deposits in the Jiaodong Peninsula during 10 years for Exploration Breakthrough Strategic Action. *Geological Bulletin of China*, 41(6): 903~935.
- Tan Huajie. 2022&. Gold metallogenesis in northeastern Hunan Province, Jiangnan Orogen: A case study on the Xiaojianshan gold deposit. Changsha: Dissertation submitted to Central South University for doctoral degree. 1~181.
- Tang Nan, Lin Bin, Li Yubin, Wang Yiyun, Li Jiajun. 2021&. Application of short-wavelength infrared spectroscopy in porphyry—epithermal system; a case study of Tiegelongnan super-large copper (gold) deposit, Tibet. *Acta Geologica Sinica*, 95 (8): 2613~2627.
- Tian Feng, Leng Chengbiao, Zhang Xingchun, Tian Zhendong, Zhang Wei, Guo Jianheng. 2019&. Application of Short-Wave Infrared Spectroscopy in Gangjiang Porphyry Cu-Mo Deposit in Nimu Ore Field, Tibet. *Earth Science*, 44(6): 2143~2154.
- Wang Qingfei, Deng Jun, Zhao Hesen, Yang Lin, Ma Qiyi, Li Huajian. 2019&. Review on Orogenic Gold Deposits. *Earth Science*, 44 (6): 2155~2186.
- Wang Rui, Cudahy Tom, Laukamp Carsten, Walshe John L., Bath Adam, Mei Yuan, Young Carl, Roache Tony J., Jenkins Andrew, Roberts Malcolm, Barker Andrew, Laird Jamie. 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.
- Wang Xuhui, Duan Shigang, Sun Peng, Zhai Shida, Zhang Yan. 2022. Hydrothermal alteration SWIR spectroscopy analysis and prospecting indicators of the Waigang Ag—polymetallic deposit in Zhejiang. *Mineral Deposits*, 41(1): 174~188.
- Wang Xuena, Xu Chao, Zhao Junfeng, Chen Huayong. 2024&. Alteration and Mineralization of the Jintonghu Cu—Mo Deposit in the Zijinshan Ore District, Fujian and Applications of Short Wavelength Infra-red (swir) Spectrometry for Exploration. *Geotectonica et Metallogenia*, 48(6): 1~24.
- Wang Ziqiang, Gao Linzhi, Ding Xiaoquan, Huang Zhizhong. 2012. Tectonic Environment of the Metamorphosed Basement in the Jiangnan Orogen and Its Evolutional Features. *Geological Review*, 58(3): 401~413.
- Wen Zhilin, Deng Teng, Dong Guojun, Zou Fenghui, Xu Deru, Wang Zhilin, Lin Ge, Chen Genwen. 2016&. Characteristics of Ore-controlling Structures of Wangu Gold Deposit in Northeastern Hunan Province. *Geotectonica et Metallogenia*, 40(2): 281~294.
- Xiao Yongjun, Chen Guanghao. 2004&. Preliminary study on the tectono—metallogenic orientation mechanism of the Dadong—Wangu gold deposit zone, northeastern Hunan province. *Geotectonica et Metallogenia*, 28(1): 38~44.
- Xie Yanshi, Tan Kaixuan, Chen Guanghao. 2004. Fractal Growth Dynamics of Auriferous Quartz Veins in the Woxi Au—Sb—W Deposit, Western Hunan Province, China. *Geological Review*, 50 (4): 440~447
- Xu Deru, Zou Fenghui, Ning Juntao, Deng Teng, Wang Zhilin, Chen Genwen, Zhang Jianling, Dong Guojun. 2017&. Discussion on geological and structural characteristics and associated metallogeny in northeastern Hunan Province, South China. *Acta Petrologica Sinica*, 33(3): 695~715.
- Xu Deru, Deng Teng, Chi Guoxiang, Wang Zhilin, Zou Fenghui, Zhang Junling, Zou Shaohao. 2017. Gold mineralization in the Jiangnan Orogenic Belt of South China: Geological, geochemical and geochronological characteristics, ore deposit-type and geodynamic setting. *Ore Geology Reviews*, 88: 565~618.
- Xu Ke. 2022&. Genesis of altered slate type ores in the Huangjindong gold deposit, Jiangnan Orogenic Belt, South China. Mentor: Xu Deru. Master's Degree Paper: 1~68.
- Yang Zhiming, Hou Zengqian, Yang Zhusheng, Qu Huanchun, Li Zhenqing, Liu Yunfei. 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.
- Zhang Kefan, Guo Na, Li Wei, Yao Yixin. 2024&. Alteration and mineralization characteristics of Tonglingxia copper polymetallic deposit in Gannan based on infrared spectroscopy technology. *Mineral Deposits*, 43(2): 339~358.
- Zhang Shitao, Chen Huayong, Zhang Xiaobo, Zhang Weifeng, Xu Chao, Han Jinsheng, Chen Mi. 2017&. Application of short wavelength infrared (SWIR) technique to exploration of skarn deposit: A case study of Tonglvshan Cu—Fe—Au deposit, Edongnan (southeast Hubei) ore concentration area. *Mineral Deposits*, 36(6): 1263~1288.
- Zhang Wenzhao, Qing Min, Niu Cuiwei, Wang Keqiang, Huang Hui, Wang Meijuan. 2014&. An Overview on Type, Spatial—temporal Distribution and Prospecting of Gold Deposits in China. *Bulletin of Mineralogy, Petrology, and Geochemistry*, 33(5): 721~732.
- Zhao Hongtao, Zhang Yu, Xu Yanbo, Shao Yongjun, Chen Xiaoyan, Hao Jiayao, Zhao Lianjie, Shen Hongjie, Wang Xu. 2024. Machine learning model for deep exploration: Utilizing short wavelength infrared (SWIR) of hydrothermal alteration minerals in the Qianchen gold deposit, Jiaodong Peninsula, Eastern China. *Ore Geology Reviews*, 168: 106060.
- Zhou Yueqiang, Xu Deru, Dong Guojun, Wang Zhilin, Cai Jianxin, Yan Zhiqiang, Li Yinzong. 2019. Structural Evolution of the Changsha—Pingjiang Fault Zone and Its Controlling on Mineralization. *Journal of East China University of Technology*, 42 (3): 201~208.
- Zhou Yueqiang, Xu Deru, Dong Guojun, Chi Guoxiang, Deng Teng, Cai Jianxin, Ning Juntao, Wang Zhilin. 2021. The role of structural reactivation for gold mineralization in northeastern Hunan Province, South China. *Journal of Structural Geology*, 145: 104306.

Acknowledgements: This study is the research achievement supported by the Major Project of the Scientific Research Program of Hunan Geological Institute (No. HNGSTP202302), the Hunan Natural Science Foundation Project (No. 2024JJ8345), and the Science and Technology Support Project for the New Round of Prospecting Breakthrough Strategic Action (No. ZKKJ202408).

Short wave infrared (SWIR) spectral characteristics of alteration minerals and applications for ore exploration in Huangjindong orogenic gold deposit, northeastern Hunan

ZHANG Chuangye^{1,2)}, ZHOU Yueqiang³⁾, ZHANG Yunfei^{1,2)}, WU Jun³⁾, ZHANG Shengwei³⁾,
MEI Xiao³⁾, SUN Jiandong⁴⁾, WEN Zhilin³⁾, LIU Lei^{1,2)}

- 1) *State Key Laboratory of Critical Mineral Research and Exploration, Central South University, Changsha, 410083;*
- 2) *School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha, 410083;*
- 3) *Hunan Geological Hazard Investigation and Monitoring Institute, Changsha, 410014;*
- 4) *Nanjing Geological Survey Center, China Geological Survey, Nanjing, 210016*

Objectives: The northeastern Hunan region within the Jiangnan Orogen hosts multiple large gold deposits, constituting a significant gold metallogenic belt in China with abundant gold resources. The Huangjindong Gold Deposit, a representative deposit in this area, features substantial reserves and high-grade mineralization. Gold mineralization in this district is closely associated with hydrothermal alteration, with common alteration minerals including sericite, siderite, and montmorillonite. As an efficient exploration technique, short wave infrared (SWIR) spectroscopy enables rapid identification of alteration mineral assemblages and their relative abundances, providing critical data support for alteration mineral mapping.

Methods: Based on short wave infrared spectroscopy (SWIR), this study conducted hyperspectral scanning analyses on core samples from five drill holes in the ore vein of the Huangjindong Gold Deposit. By identifying the spectral characteristics of alteration minerals and analyzing the absorption peak position (POS2200) and crystallinity (IC value) of sericite, the spatial patterns of alteration minerals in the mining area were revealed.

Results: More than 10 main alteration minerals were identified, with sericite being the dominant one. The λ_{POS2200} values of sericite mainly range from 2196 to 2210 nm, and the $D_{\text{SWIR-IC}}$ values range from 0.05 to 1.96. The mean λ_{POS2200} and $D_{\text{SWIR-IC}}$ values of sericite in alteration zones from different drill holes show a gradually increasing trend from west to east.

Conclusions: Research reveals significant spatial distribution patterns of alteration minerals across drill holes from west to east; The λ_{POS2200} value of sericite progressively increases, indicating enhanced acidity of vein-forming hydrothermal fluids; concurrently, sericite illite crystallinity ($D_{\text{SWIR-IC}}$) gradually decreases, demonstrating declining fluid temperatures and confirming west-to-east migration of ore-forming fluids along the vein. A temperature attenuation model based on $D_{\text{SWIR-IC}}$ was established, pinpointing the hydrothermal center. This validates the model's efficacy in tracing hydrothermal pathways and locating mineralization centers, providing critical guidance for mineral exploration. The study offers novel insights for interpreting alteration signatures at the Huangjindong gold deposit and delivers a scientific foundation for regional prospecting strategies.

Keywords: short wave infrared spectroscopy; northeastern Hunan; alteration minerals; orogenic gold deposit; exploration indicators

First author: ZHANG Chuangye, born in 2001, master's student, is majoring in geological resources and geological engineering; Email: 3189193909@qq.com

Corresponding author: WU Jun, born in 1987, senior engineer, is mainly engaged in mineral exploration; Email: 371208571@qq.com

Manuscript received on: 2025-02-20; Accepted on: 2025-07-05; Published online on: 2025-07-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2025.07.015

Edited by: ZHANG Yuxu