

绢云母短波红外光谱特征及其在矿产勘查中的应用*

毛星星¹, 彭惠娟^{1**}, 张云龙², 周琪¹, 王天瑞¹, 覃恩¹

(1 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059; 2 云南省地质矿产勘查院, 云南 昆明 650051)

摘要 蚀变矿物短波红外(SWIR)光谱特征日趋广泛地应用于矿产勘查研究中。绢云母作为热液矿床中最为发育的蚀变矿物之一,通过 SWIR 光谱技术提取其谱学特征,进而建立与矿床基础地质信息之间的相关性具有重要意义。然而,前人对于绢云母短波红外光谱特征的研究主要集中于单个矿床,缺少不同矿床间的对比。基于此,文章梳理了混合矿物光谱曲线中对单一矿物相对含量的提取方式,系统总结了温度、流体化学成分、流体 pH 值、寄主岩石、矿物结构、矿物粒度及共(伴)生矿物等因素对绢云母谱学特征空间变化规律的影响,最后,从契尔马克替换效应角度出发,分析对比了 5 种不同成因类型矿床中近端绢云母波长变化。虽然将绢云母短波红外光谱特征有效地应用于矿产勘查仍存在诸多问题,但作者相信,应用绢云母短波红外光谱特征进行矿产勘查依然具有良好的前景。

关键词 地质学;绢云母;短波红外光谱;Al-OH 平均波长;矿产勘查

中图分类号: P618.41

文献标志码: A

Short wave infrared spectrum characteristics of sericite and its application to mineral exploration

MAO XingXing¹, PENG HuiJuan¹, ZHANG YunLong², ZHOU Qi¹, WANG TianRui¹ and QIN En¹

(1 College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2 Yunnan Institute of Geology and Mineral Exploration, Kunming 650051, Yunnan, China)

Abstract

The SWIR spectral characteristics of alteration minerals are increasingly widely used in mineral exploration. Sericite is one of the most abundant alteration minerals in hydrothermal deposits. Extracting its spectral features through SWIR spectroscopy technology and establishing a correlation with the basic geological information of the deposit is of great significance. However, previous studies on the short wave infrared spectral characteristics of sericite mainly focused on a single deposit, lacking comparative studies among different deposits. Based on this, This article summarizes the extraction methods for the relative content of a single mineral in the spectral curve of mixed minerals, the influence of temperature, fluid chemical composition, fluid pH value, host rock, mineral structure, mineral grain size and associated minerals on the spatial variation of sericite spectral characteristics is systematically summarized. Finally, this paper analyzes and compares the wavelength changes of sericite near the ore body in five different genetic types of deposits. Although the effective application of sericite short wave infrared spectral characteristics to mineral exploration still has many problems to be further explored. Nevertheless, this paper believes that the application of sericite short wave infrared spectral characteristics to mineral ex-

* 本文得到国家自然科学基金(编号:41972077)和四川省科技厅应用基础研究项目(编号:2021YJ0376)共同资助

第一作者简介 毛星星,男,1995年生,硕士研究生,矿物学、岩石学、矿床学专业。Email:maoxingxing@stu.cdut.edu.cn

** 通讯作者 彭惠娟,女,1985年生,博士,副教授,从事岩浆-热液矿床成矿作用研究。Email:penghuijuan_cdut@163.com

收稿日期 2022-10-22;改回日期 2023-03-15。赵海杰编辑。

ploration still has good prospects.

Key words: geology, sericite, short wave infrared spectral, average wavelength of Al-OH, mineral exploration

近年来,短波红外(Short wavelength infrared, SWIR)光谱技术的快速发展推动了热液矿床蚀变矿物勘查指标研究及蚀变矿物时空分布规律的精细厘定(Thompson et al., 1999; 陈华勇, 2019; 张俊岭等, 2021),在斑岩型、浅成低温热液及VMS型等热液成因矿床的矿产勘查中得到广泛应用(Jones et al., 2005; Chang et al., 2011; Yang et al., 2011; 陈华勇等, 2021)。与岩相学观察、电子探针成分分析(EMPA)和X射线衍射光谱(XRD)分析相比,SWIR光谱技术具有仪器携带方便、检测成本低、用时短、检测样品无损、对细粒黏土矿物识别率高等优点(章革等, 2005; 杨志明等, 2012; 张世涛, 2018; 孙四权, 2019),因而被广泛应用于矿产勘查中。

SWIR光谱利用矿物特定官能团(H_2O 、Al-OH、Fe-OH、Mg-OH、 $[\text{CO}_3]^{2-}$ 、 $[\text{SO}_4]^{2-}$ 和 NH_4^+ 等)吸收特定频率能量,产生矿物成分和结构信息的光谱特征参数,如峰位置(Pos)、峰强度(Dep)及半高宽等(Hunt et al., 1977; Clark et al., 1990; 田丰等, 2019a)。利用典型矿物SWIR光谱特征参数进行统计学计算,建立与经济矿体的耦合关系,可快速定位热液矿化中心(Harraden et al., 2013; Guo et al., 2019; 任欢等, 2020)。前人研究表明,典型矿物SWIR特征参数变化主要受矿物化学组成、流体性质、温度等因素的控制(Herrmann et al., 2001; 杨志明等, 2012; Wang et al., 2021)。例如,绢云母族矿物的波长变化可以反映温度和矿物化学成分的变化(Herrmann et al., 2001; 杨志明等, 2012; Neal et al., 2018)。

绢云母属于含Al-OH矿物,在热液矿床中广泛发育(Yang et al., 2011)。例如,斑岩系统中绢云母蚀变可能同时存在于绢英岩化、青磐岩化和钾化蚀变带中;VMS型矿床中绢云母常与绿泥石共生(侯增谦等, 2003; Sillitoe, 2010);浅成低温热液矿床中绢云母、绿泥石、高岭石族矿物同时发育。多种蚀变矿物的共生/伴生会导致SWIR光谱特征吸收峰发生重叠,致使绢云母光谱数据难以准确解译(Clark et al., 1990)。此外,由于不同矿床地质特征的差异导致绢云母光谱参数的变化规律不尽相同。文章在前人研究的基础之上,探讨了在复杂蚀变矿物组合条件下,绢云母SWIR光谱特征参数的提取方法,并系统总结了绢云母化学成分、温度、流体pH值等因素对绢

云母SWIR光谱特征参数的影响。最后,文章从契尔马可替换角度出发,基于大数据的提炼,总结了不同类型矿床中近矿端绢云母吸收波长参数的分布差异。

1 绢云母SWIR光谱特征及含量提取

1.1 绢(白)云母混合光谱中常见矿物的SWIR光谱特征

野外测试样品通常为多种矿物混合体,矿物成分之间具有密切关联,且易受到矿物透明度或其他共生(伴生)矿物的影响,因此通过红外光谱提取单矿物含量较为复杂。如纯白云母和白云母混合其余矿物的反射光谱相比,由于少量的地开石(约15%)具有明显的1400 nm和2200 nm的双吸收峰特征,使含少量地开石的白云母的反射率产生位置和吸收强度发生明显变化,见图1。

绢云母族矿物包含了白云母、伊利石、多硅白云母、钠云母等多种矿物类型,其光谱吸收峰在2200 nm处具尖锐的Al-OH特征。此外,在2344~2440 nm附近有微弱的二次Al-OH吸收特征,也称绢云母的次Al-OH吸收特征(图2a; Hunt, 1977)。绢云母Al-OH特征吸收峰常会受到具有同一吸收峰位矿物的叠加,如高岭石族矿物2200 nm处附近出现的连续

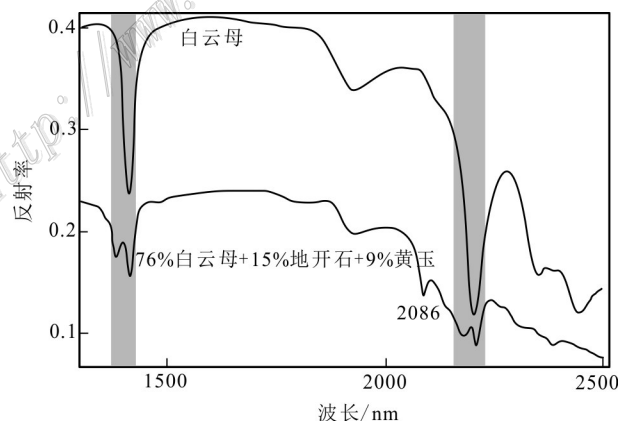


图1 纯白云母和不纯白云母(混有地开石(~15%)和黄玉(9%))的反射光谱

Fig.1 Reflection spectrum of pure muscovite and muscovite mixed with other minerals (the mixture contains about 15% dickite and 9% topaz)

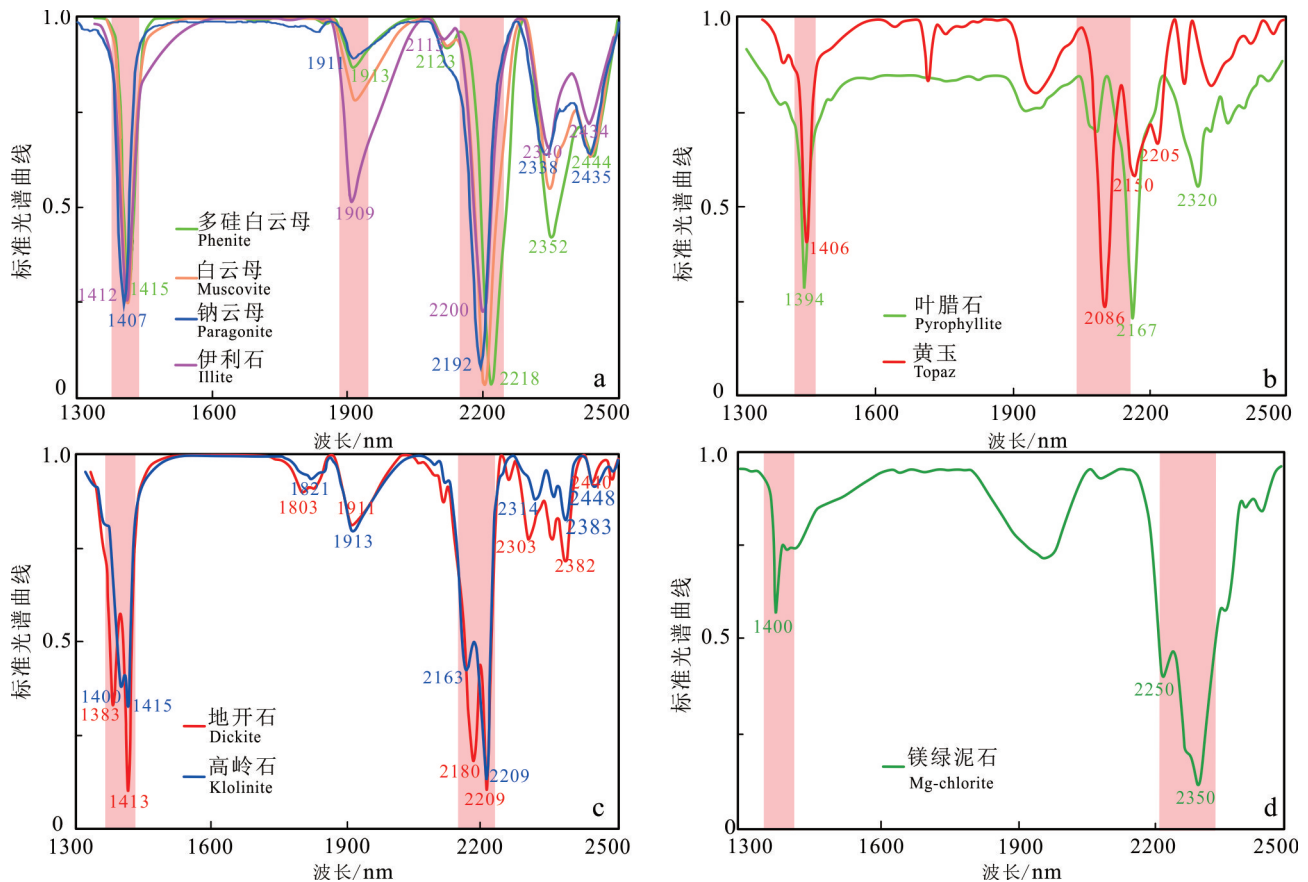


图2 常见层状硅酸盐矿物标准光谱曲线(据 Zhang et al., 2020; TSG 数据库修改)

a. 绢云母族(多硅白云母、白云母、钠云母、伊利石); b. 叶腊石和碧玉; c. 高岭石族(高岭石和地开石); d. 镁绿泥石

Fig.2 Standard spectrum curve of common layered silicate minerals (modified from Zhang et al., 2020; TSG database)

a. Sericite Group(paragonite, muscovite, phenite and illite); b. Pyrophyllite and topaz; c. Kaolin Group(kaolinite and dickite); d. Mg-chlorite

吸收峰位(图2c)。叶腊石 2167 nm 的特征吸收峰和碧玉的 2200~2300 nm 之间的次级吸收峰也会对绢云母的特征吸收峰位产生叠加(图2b)。此外,绢云母的次 Al-OH 吸收峰位常与镁绿泥石的特征吸收峰位发生叠加(图2d)。

1.2 绢云母矿物含量的提取

不同蚀变矿物的含量是有效衡量矿区内蚀变程度的指标。过去,XRD(X 射线衍射光谱)是被广泛用于单一或多矿物混合物矿物含量测定的基本手段(Bish et al., 2011)。但 XRD 的缺点是有损样品且在室内进行。目前,SWIR 光谱已被证实是测定矿物含量的有效方法(Herrmann et al., 2001; 修连存等, 2007; Mulder et al., 2013)。以往的研究主要通过提取吸收强度来标定矿物含量比例(Herrmann et al., 2001)。或是利用矿物的标准曲线以及实测曲线进行求导和叠加获取标准方差,再匹配光谱库,从而计

算矿物含量(修连存等, 2007)。然而,当复杂混合物的光谱混合效应产生的诊断特征不够明显时,则难以与光谱库中的矿物进行匹配,且选择不同的数据库得到的结果也会有所区别。Mulder 等(2013)基于混合矿物光谱的吸收行为,利用高斯优化和回归树分析的方法对矿物含量进行了预测,极大地提升了矿物含量提取的准确率,但该方法对专业人员的数学运算能力要求较高,不利于快速获取勘查目标。

基于上述方法,本次研究对云南某高硫型浅成低温热液矿床典型钻孔数据的绢云母相对含量进行了提取(表 1)。短波红外光谱数据的解译在光谱地质学家 TSG(The Spectral Geologist)软件中进行, TSG 软件具有多个功能模块,其中,Scalar 参数提取功能可对绢云母族矿物进行定量分析。TSA(The Spectral Assistance)功能可基于标准光谱库,对样品光谱数据进行处理和匹配,从而在标准光谱库中识

别最优选择,并给出匹配结果的定量评价。在不考虑特定的矿床地质背景会形成特定的矿物/矿物组合时,TSA 功能以光谱线性混合公式 $Si=aXi+bBi+cCi$ 匹配最优结果(其中 Si 为光谱分析结果, a 、 b 和 c 为矿物比例, Xi 、 Bi 和 Ci 分别为 a 、 b 和 c 单矿物标准吸收峰位)。但需要注意该方法识别出的定量评价,仅代表矿物权重,即在一个尺度范围内,矿物 1、矿物 2 和矿物 3 占比权重(表 1)。不能直接用于定量矿物相对含量,但它们之间的矿物比例关系是确定的,且混合矿物光谱为蚀变矿物组合共同形成。利用此特点,以绢云母族矿物混合高岭石族矿物为例,在计算得到混合矿物光谱吸收深度与各矿物占比权重的前提下,利用混合矿物光谱 Al-OH 吸收深度减去所得“干扰”矿物的相对含量,最终达到提取绢云母矿物含量的目的。参考公式: $Cs=d-(P \times d)$ (其中 Cs 为绢云母相对含量; d 为混合矿物光谱中 Al-OH 吸收峰深度; P 为除绢云母之外其余含 Al-OH 矿物的相对比例(权重))。相应操作都可在 TSG 软件中的 scalar 功

能完成(图 3a~d)。

综上,虽然混合矿物光谱中单一矿物含量的提取较为复杂,但综合利用多种方法对混合矿物光谱曲线中绢云母含量的提取是可行的。

2 绢云母光谱特征参数的影响因素

在岩浆热液系统中,寻找与矿化有关的热液蚀变矿物的分布和演化规律,并从中提取和发现与矿体的密切关联是有效的矿产勘查手段(陈华勇等, 2021)。绢云母光谱特征参数变化规律已被证实是有效地勘查工具(Herrmann et al., 2001; Guo et al., 2019; 2020; Yao et al., 2021)。总结前人研究发现,绢云母矿物的 SWIR 光谱特征规律常受到矿床地质特征的影响。绢云母化学成分直接影响光谱参数的变化,而温度、流体化学成分、流体 pH 值、寄主岩石和矿物结构等则通过影响绢云母化学成分而最终体现在波长的变化上。因此,绢云母光谱特征与矿化之间的经

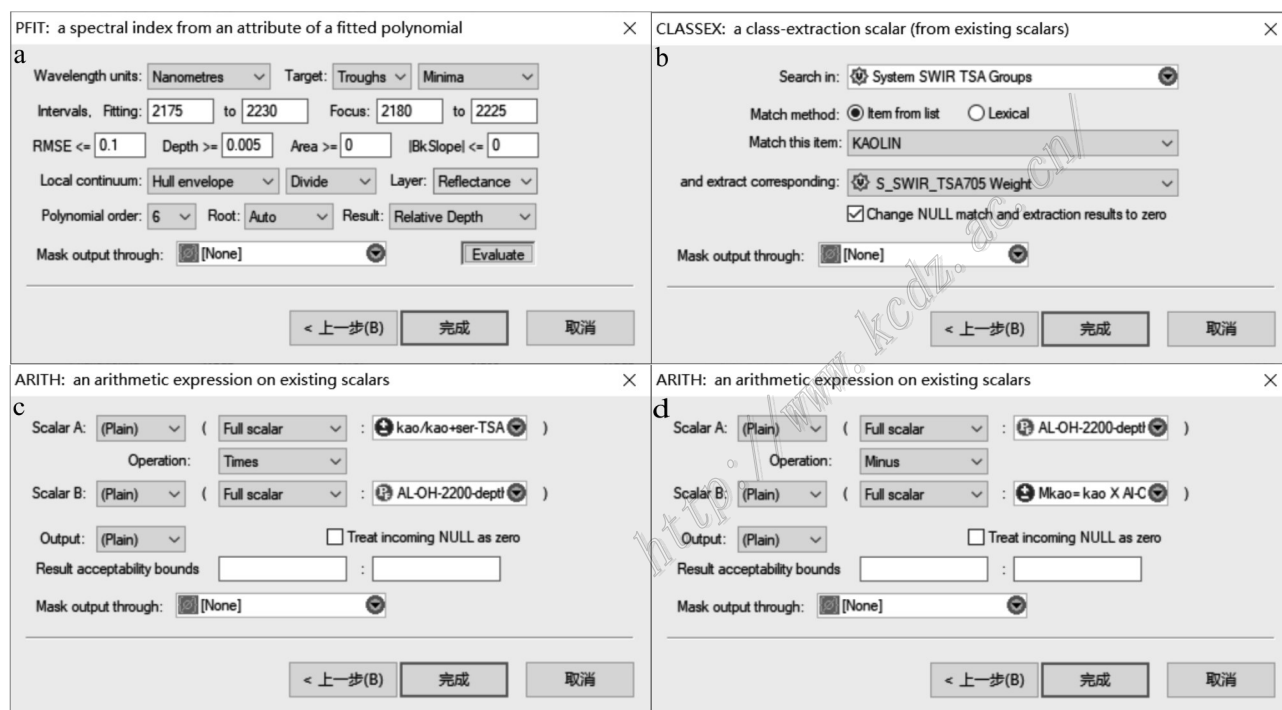


图 3 利用 scalar 功能进行参数提取(据 TSG 软件修改)

a. PFIT 提取 Al-OH 吸收深度; b. CLASSEX 提取高岭石族矿物相对比例; c. ARITH 提取高岭石族矿物相对含量; d. ARITH 提取绢云母族矿物相对含量

Fig.3 Parameter extraction using scalar function(modified from TSG software)

a. Absorption depth of extracted Al-OH using PFIT function; b. Relative proportion of extracted kaolinite group minerals using CLASSEX function; c. Relative content of extracted kaolinite group minerals using ARITH function; d. Relative content of sericite group minerals extracted using ARITH function

表1 TSG 软件提取的绢云母相对含量

Table1 Relative content of extracted sericite using TSG function

矿物1	矿物2	矿物3	矿物1权重	矿物2权重	矿物3权重	Al-OH 吸收深度	高岭石族权重 相对比例	高岭石族矿物 相对含量	绢云母相对含量
伊利石	高岭石		0.579	0.421		0.129	0.421	0.054	0.075
Fe-绿泥石	伊利石	高岭石	0.605	0.219	0.176	0.118	0.445	0.053	0.066
钠云母	高岭石-PX		0.768	0.232		0.117	0.232	0.027	0.090
钠云母	高岭石		0.561	0.439		0.155	0.439	0.068	0.087
高岭石	钠云母		0.777	0.223		0.234	0.777	0.182	0.052
高岭石	钠云母		0.543	0.457		0.233	0.543	0.126	0.106
高岭石	Fe-绿泥石	钠云母	0.384	0.338	0.278	0.159	0.58	0.092	0.067
Fe-白云石	高岭石	钠云母	0.469	0.341	0.190	0.189	0.643	0.122	0.068
地开石	伊利石		0.577	0.423		0.158	0.577	0.091	0.067
地开石	高岭石		0.722	0.278		0.141	1	0.141	0
Fe-绿泥石	钠云母	高岭石-PX	0.48	0.294	0.226	0.131	0.435	0.057	0.074
地开石	高岭石		0.734	0.266		0.253	1	0.253	0
黄玉	地开石	钠云母	0.473	0.347	0.179	0.105	0.66	0.070	0.036
钠云母	黄玉		0.561	0.439		0.112	0	0	0.112
白云母		黄玉	0.446	0.28	0.273	0.113	0	0	0.113
地开石	白云母	黄玉	0.346	0.342	0.312	0.106	0.503	0.053	0.053
地开石	黄玉		0.833	0.167		0.171	1	0.171	0
地开石	黄玉		0.813	0.187		0.129	1	0.129	0
地开石	黄玉	钠云母	0.433	0.377	0.190	0.133	0.695	0.092	0.041
地开石	钠云母	黄玉	0.534	0.303	0.162	0.143	0.638	0.092	0.052
地开石	黄玉		0.588	0.412		0.128	1	0.128	0
黄玉	白云母	地开石	0.435	0.403	0.162	0.138	0.286	0.040	0.099
白云母	黄玉		0.54	0.46		0.122	0	0	0.122
地开石	白云母		0.661	0.339		0.164	0.661	0.108	0.056
白云母	地开石	黄玉	0.413	0.384	0.204	0.125	0.482	0.060	0.065
黄玉	白云母		0.502	0.498		0.103	0	0	0.103
地开石	明矾石		0.831	0.169		0.104	1	0.104	0
地开石	白云母		0.691	0.309		0.136	0.691	0.0941	0.042
地开石		白云母	0.663	0.17	0.166	0.164	0.799	0.131	0.033
白云母	地开石	黄玉	0.434	0.324	0.242	0.108	0.427	0.0461	0.062
地开石	黄玉	石膏	0.589	0.214	0.197	0.148	1	0.148	0
白云母	地开石	黄玉	0.417	0.375	0.208	0.114	0.474	0.0542	0.060
地开石			1			0.207	1	0.207	0
地开石	白云母		0.723	0.277		0.178	0.723	0.129	0.050
地开石	白云母		0.831	0.169		0.219	0.831	0.182	0.037
地开石	白云母		0.408	0.339	0.253	0.151	0.546	0.0823	0.068
地开石	钠云母	黄玉	0.438	0.369	0.193	0.101	0.543	0.0548	0.046
地开石	黄玉		0.641	0.359		0.177	1	0.177	0
地开石	黄玉		0.826	0.174		0.199	1	0.199	0
钠云母	黄玉		0.694	0.306		0.101	0	0	0.101
黄玉	白云母	地开石	0.4	0.328	0.271	0.122	0.453	0.055	0.067
钠云母	黄玉		0.558	0.442		0.129	0	0	0.129
钠云母	黄玉		0.598	0.402		0.131	0	0	0.131
白云母	菱铁矿		0.622	0.378		0.206	0	0	0.206
伊利石			1			0.277	0	0	0.277
白云母	高岭石-PX		0.849	0.151		0.124	0.151	0.019	0.106
伊利石	蒙脱石		0.669	0.331		0.324	0	0	0.324
伊利石	高岭石		0.666	0.334		0.267	0.334	0.089	0.178
伊利石	地开石	蒙脱石	0.439	0.29	0.271	0.265	0.398	0.105	0.160
白云母	高岭石	高岭石	0.477	0.354	0.17	0.244	0.523	0.127	0.116

验关系往往不具有普适性,在不同的矿床中表现出不同的变化规律,因此给勘查工作带来了较大的困扰。

2.1 矿物化学与物化环境

绢云母的化学组成可通过 Al-OH 键的吸收峰位 ($w\text{AlOH}$) 进行估计。波长变化集中在 2190~2200 nm 附近为富 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,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,为富 Mg、Fe 和富 Si 特征的多硅白云母(Herrmann et al., 2001)。绢云母波长的转换受控于契尔马克(Tschemak)类质同象替代,即 $\text{Si}^{iv}(\text{Mg}, \text{Fe})^{vi} \leftrightarrow \text{Al}^{iv}\text{Al}^{vi}$ (图 4a、b)。值得注意的是,钠云母不会发生显著的契尔马可取代,且 Na 与 Fe、Mg 含量呈负相关,因此钠云母八面体片中通常代替 Mg、Fe 的其他元素,包括 V、Mn、Cr 和 T(Velde, 1965)。

热液蚀变作用过程中,热液流体和围岩的化学成分、水岩比值和温度等参数的变化对绢云母化学组分具有较大影响(Laakso et al., 2016)。已有研究

表明,绢云母契尔马克替换受控于温度的影响,温度与 Al^{vi} 含量具有明显的正相关性(Duke et al., 1994; Herrmann et al., 2001)。此外,绢云母 $w\text{AlOH}$ 的变化会受到寄主岩石的影响(Guo et al., 2019)。寄主岩石往往会影响到绢云母的化学成分变化。如 Myra Falls VMS 型矿床中白云母的成分随赋矿岩性而发生变化,与相邻流纹岩相比,英安岩和安山岩中白云母的 Al-OH 吸收波长相对较长,反映了寄主岩石中较高的 Fe 和 Mg 含量,影响了白云母的化学成分(Jones et al., 2005)。同样, Tappert 等(2013)对南澳大利亚奥林匹克坝 IOCG 矿床中的含矿角砾岩和未发生角砾岩化中的多硅白云母进行成分测定,发现含矿角砾岩中的多硅白云母呈高 Al 和低 Si + Mg + Fe 的特征。相反,未发生角砾岩化中的多硅白云母呈低 Al 和高 Si + Mg + Fe 值的特征。因此,不同寄主岩石影响蚀变多硅白云母的成分,从而制约着多硅白云母波长的变化。其次,流体 pH 值也是绢云母 $w\text{AlOH}$ 变化的关键影响因素。在热液系统中,岩浆流体向上运

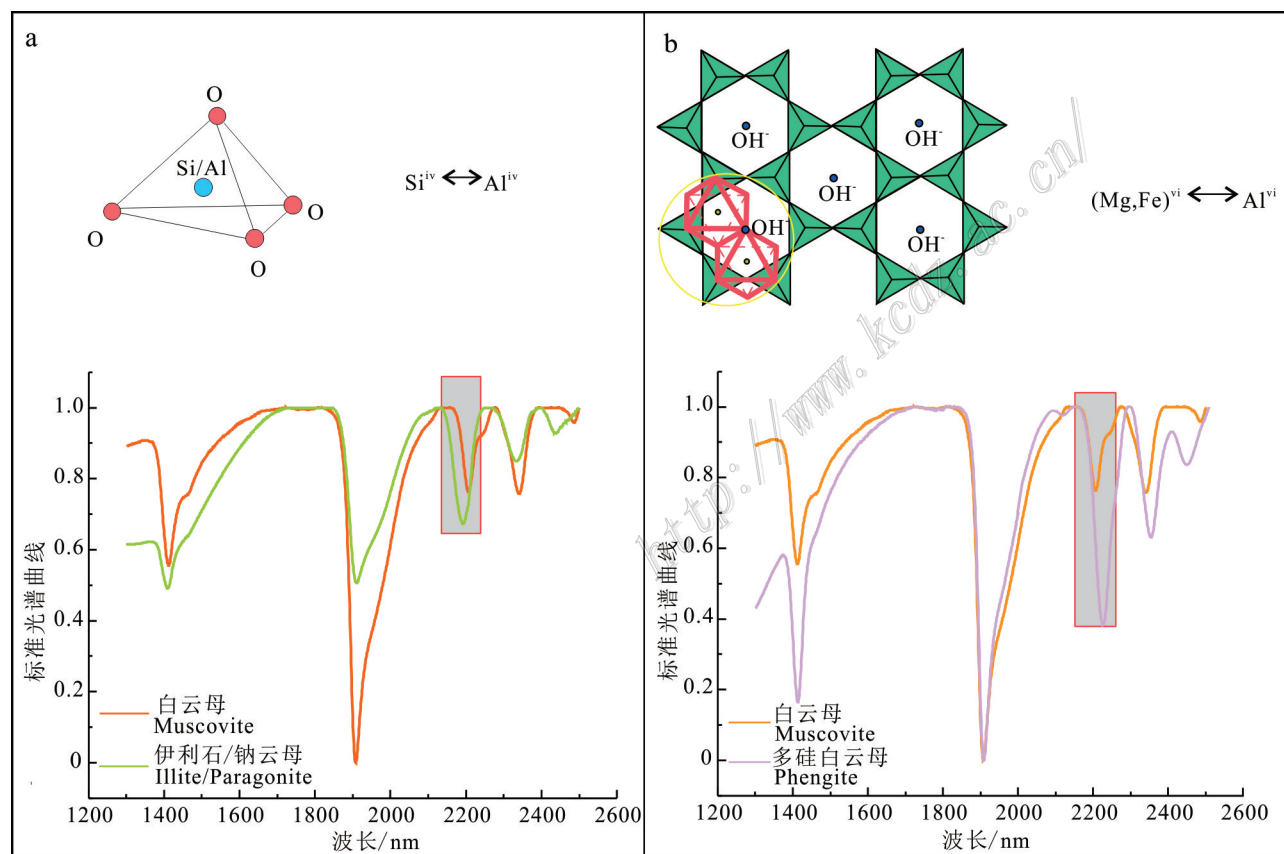


图4 绢云母四面体(a)和八面体位(b)中发生契尔马克替换导致波长发生明显变化(伊利石(钠云母)↔白云母↔多硅白云母)

Fig.4 The Tschermak substitution in the tetrahedron (a) and octahedron positions (b) of sericite leads to the obvious change of wavelength(illite(paragonite) ↔ muscovite ↔ phengite)

移的过程中随着歧化反应的进行和温度的降低,流体酸性增强,水/岩比值较高,围岩缓冲能力下降,在流体运移浅部多形成富Al的伊利石(钠云母),而在横向上,水/岩比值迅速降低,过渡至中性环境形成富Si的多硅白云母(Halley et al., 2015)。

绢云母另一重要光谱特征参数为绢云母光谱成熟度,即ISM(Illite Spectral Maturity, $SWIR-ISM = Dep2200/Dep1900$)。绢云母的光谱成熟度反映了流体温度的变化。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H₂O。同时,高H₂O含量会引起较强的1900 nm吸收,致使绢云母1900 nm吸收深度值增大。而Al的流失会使绢云母的2200 nm峰吸收强度降低,从而降低绢云母2200 nm吸收峰吸收深度,导致ISM值降低。因此,温度高时,ISM值大,温度降低,ISM值变小(杨志明等, 2012)。

绢云母光谱成熟度很大程度上受控于温度,而高温岩体的侵位及高温热液引发的脉状矿化则是引起温度变化的诱因。许超等(2017)在福建紫金山铜钼矿段的ZK327浅部400 m处发现的ISM异常高值,主要是由于其附近存在脉状矿化及后期闪长玢岩的侵位,从而造成局部蚀变较高温,形成含有较高ISM值的绢云母族矿物。李如操等(2020)研究发现也证实了大兴安岭富克山斑岩型铜-钼矿床中白云

母族的ISM值和Pos2200高值与闪长玢岩及后期岩脉密切相关。这些实例都是由于后期岩浆或热液活动而引发绢云母光谱成熟度发生变化。

2.2 矿物结构

典型矿物SWIR光谱特征参数的变化不仅体现了蚀变矿物成分变化,往往还受到矿物晶体结构的影响(杨志明等, 2012)。以绢云母和明矾石的晶体结构为例,明矾石与绢云母的层间域阳离子均为K、Na离子。以往的研究表明,明矾石中K⁺和Na⁺类质同象导致了明矾石的谱线漂移(Chang et al., 2011)。而绢云母K、Na离子的类质同象不会影响其光谱波长的变化,则是由于SWIR光谱对绢云母矿物特定官能团的识别为八面体配位的Al³⁺和OH⁻之间的结合键,含Al-OH的矿物波长发生变化主要是与OH⁻相连的阳离子拉伸振动所引起的(Hunt et al., 1979)。因此,充填于绢云母层间域中,用于补充电荷平衡的金属阳离子K⁺和Na⁺类质同象的替换,由于硅氧四面体的存在,并不会发生类似八面体中Mg²⁺、Fe²⁺等阳离子与Al³⁺相互置换而导致的阳离子(M)-OH⁻的拉伸振动,进而引起波长的变化(Scott et al., 1997;图5a)。明矾石K⁺和Na⁺的类质同象可以体现在波长的变化上,是由于其晶体结构中K⁺和或Na⁺与八面体中的Al-OH共氧(图5b),当K⁺和Na⁺发生类质同象的替换时会引起Al和OH⁻之间的键长、键强发生变化。

综上,矿物结构以及类质同象作用与其光谱的

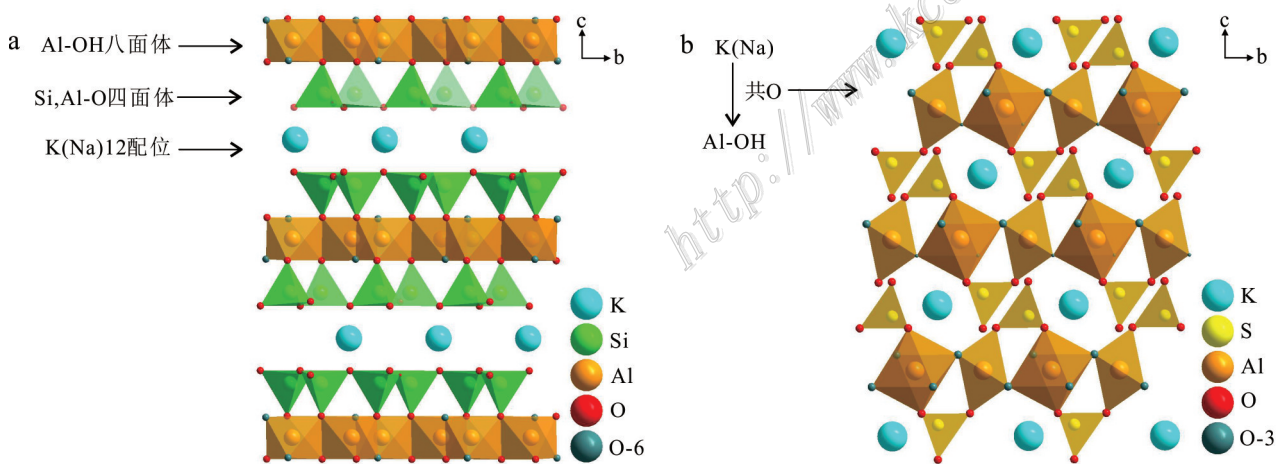


图5 绢云母晶体结构(平行于c轴)中K、Na离子的替换效应被硅氧四面体阻碍(a)和明矾石晶体结构(平行于c轴)中K、Na离子的替换引起了Al-OH键强发生变化(b)(<https://zh.mindat.org/min-207.html>)

Fig.5 The substitution effect of K and Na ions in crystal structure of sericite(parallel to c-axis) is hindered by silicon-oxygen tetrahedron(a) and the substitution of K and Na ions causes the change of Al-OH bond strength in crystal structure of alunite (parallel to c-axis) (b) (<https://zh.mindat.org/min-207.html>)

发生原理密不可分。因此,矿物晶体结构中敏感官能团的特征吸收光谱与特征活性键弯曲和伸缩的关联性,以及这些活性键相连的离子发生置换时是否会对光谱特征造成直接或间接的影响可能是解译绢云母光谱信息的重要抓手。

2.3 绢云母光谱特征的其他影响

在蚀变填图的基础上,利用典型矿物的光谱成熟度参数(特定峰位置的半高宽)来度量矿物形成环境时的温度高低以此来定位热源中心,已成为 SWIR 光谱勘查的核心内容(陈华勇等,2021)。如绢云母越接近热液环境的热源或侵入体中心,绢云母的吸收峰越窄(半高宽值越小),光谱成熟度也越高(Duba et al., 1983; Frey, 1987; 王河锦等,2007)。然而,绢云母光谱特征还会受到共生(伴生)矿物类型、矿物粒度及岩石中发育的石英-硫化物脉等因素的影响。

实际野外测量所得到的是多种矿物的混合谱线,即“矿物混合体谱线”。当光谱仪接收矿物所反馈的信号时,常会将2个或多个邻近的“细”且“高”的矿物吸收峰自动解译为一个吸收峰值,导致数据解译发生误判。同样,研究发现含水矿物的存在会对绢云母光谱成熟度造成叠加,从而加大绢云母光谱成熟度的吸收(Wang et al., 2021),即混合谱线中利用某一矿物的特征吸收强度与 1900 nm 处的 H₂O 吸收特征强度来表征蚀变岩的含水量时也会存在叠加的问题(图 6a,b)。此外,绢云母光谱成熟度还受到矿物粒度,石英-硫化物脉及其吸收强度的影响。岩

石所含矿物粒度最粗组分的 ISM 值与岩石样品的值最接近,黏土粒径组分的 ISM 值在很大程度上减少了其他矿物的干扰,因而与伊利石的 ISM 值最接近(Wang et al., 2021)。石英-硫化物脉由于石英中伊利石含量较低,而红外对硫化物颗粒和/或晶格水和包裹体中的水不敏感,因此,石英-硫化物脉可以显著地使光谱图变平,从而降低光谱的吸收特征(Clark et al., 1999; Wang et al., 2021)。此外,绢云母吸收强度影响吸收深度的原因主要是在数据解译时误差较大而引起的,当吸收深度大于 0.1 时,人工测量的深度与 TSG 计算的深度趋于一致,当吸收深度 < 0.1 时,人工测量深度与 TSG 计算深度相差较大;差值可达 2~3 倍(Wang et al., 2021)。因此,从采样(获取光谱数据)到分析数据的这一过程应尽可能排除对所得结果的干扰因素,以获得最为可靠的光谱数据。

3 绢云母 SWIR 特征在矿产勘查中的应用

前人研究表明,利用绢云母 SWIR 光谱特征的空间变化规律来反演成矿环境,建立矿产勘查模型,已成为有效的矿产勘查手段。然而不同矿床,甚至相同类型矿床中由于其矿床地质特征的不同导致绢云母光谱特征参数常具有“局域性”规律。因此,只有综合分析影响绢云母 SWIR 光谱特征变化的因素,才能更加有效地利用其规律进行矿产勘查(杨志明等,2012; Guo et al., 2020; Wang et al., 2021; 连敦

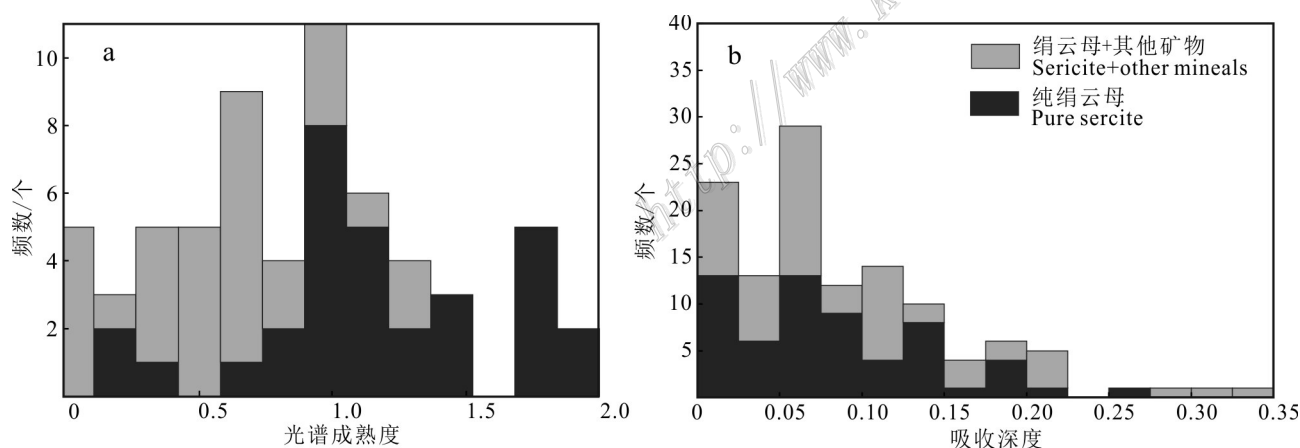


图6 绢云母样品 ISM 值(a)和 Dep2200 的频率直方图(b)

样品中含有其余含水矿物如蒙脱石,地开石,绿泥石等对绢云母吸收深度和 ISM 值造成干扰

Fig. 6 Frequency histogram of ISM(a) and Dep2200 values of sericite samples (b)

The samples contain other water-bearing minerals, such as montmorillonite, dickite, chlorite, which interfere with the absorption depth and ISM value of sericite

梅等,2020;游富华等,2021)。

3.1 利用绢云母SWIR特征变化规律研判矿床基础地质特征

矿物的成因信息对矿床的成矿机制与矿体勘查有重要的指示意义(陈光远等,1987),因此,充分利用绢云母光谱特征参数变化规律反演矿床的形成环境,可以有效的建立勘查模型。

绢云母 $w\text{AlOH}$ 变化反映了不同成因类型矿床地质特征。在总结前人研究基础上,本文从契尔马克替换角度出发,基于大数据对各类型矿床近矿端绢云母平均波长的变化规律进行了总结(图7)。由于块状硫化物矿体附近热液温度较高,导致蚀变绢云母具有高Al含量,其近矿端绢云母 $w\text{AlOH}$ 波长较短,集中在2202 nm附近。如加拿大 Nunavut 地区 VMS 型 Zn-Cu-Pb-Ag 矿床(Laakso et al., 2015)与塔斯马尼州 Rosebery 贱金属硫化物矿床中(Herrmann et al., 2001)靠近矿体的绢云母波长都趋向于短波。造山型金矿近矿端常大量发育富Fe、Mg的碳酸盐类矿物、黄铁矿等金属硫化物以及角闪石等蚀变矿物组合,指示其流体富Fe、Mg成分(王庆飞等,2019),这也导致了近矿端蚀变绢云母富Fe、Mg,具有较长(2210 nm)波长。例如,西澳 Kanowna Belle 造山型金矿床中矿化主要发育在白云母-石英脉、碳酸盐-白云母-石英脉及黄铁矿-石英-碳酸盐脉中,其流体成分与绢云母均富Fe、Mg,致使绢云母 $w\text{AlOH}$ 波长较长(Wang et al., 2017)。斑岩Cu体系中,斑岩型矿床(2202 nm)表现出了和VMS矿床近矿端绢云母波长一致的规律。这可能受斑岩型铜-钼矿床绿泥石发

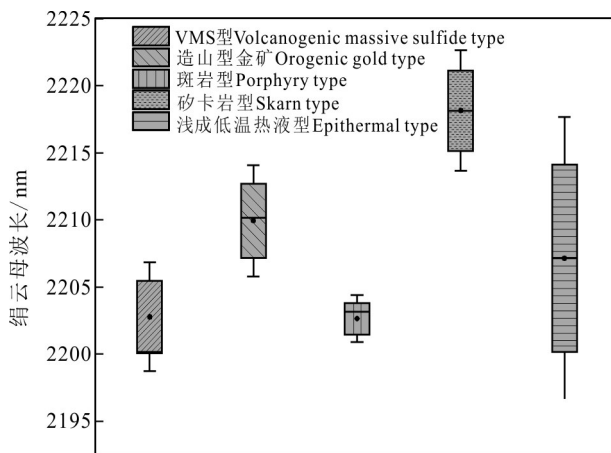


图7 不同类型矿床中近矿端绢云母平均波长
Fig.7 Average wavelength of sericite near ore body in different types of deposits

育较少(Sillitoe, 2010),从而制约了绢云母 Al^{vi} 与Fe、Mg的类质同象作用,导致近矿端的绢云母波长相对较短。如西藏尼木地区岗讲、大兴安岭北部兴安地块的富克山及西藏德明顶等斑岩型铜-钼矿床中都表现出了靠近矿体波长较短的趋势(田丰等,2019b;李如操等,2020;任欢等,2020)。矽卡岩型矿床中绢云母波长较长(2217 nm)的原因与大量发育的富Fe、Mg的碳酸盐岩围岩有关(Sillitoe, 2010)。浅成低温热液矿床近矿端绢云母波长较长(2208 nm),其主要是由于浅成低温热液矿床中流体沸腾是主要的矿质沉淀机制,而流体沸腾则导致了浅成低温热液矿床中流体温度下降(倪培等,2020),成矿流体温度的下降造成了绢云母Al含量较低。受限于研究资料的缺乏,矽卡岩型矿床和浅成低温热液型矿床造成其近矿端绢云母波长分布差异的原因还需进一步研究。

3.2 绢云母契尔马克替换对矿产勘查的启示

已有研究表明,绢云母契尔马克替换($\text{Si}^{\text{iv}}(\text{Mg}, \text{Fe})^{\text{vi}} \leftrightarrow \text{Al}^{\text{iv}}\text{Al}^{\text{vi}}$)是绢云母 $w\text{AlOH}$ 发生“漂移”的主要影响因素(Duke et al., 1994)。绢云母契尔马克替换对温度、流体成分、寄主岩石成分以及其他物理-化学条件变化都非常敏感(Duke et al., 1994; Han et al., 2018; Xiao et al., 2021; Wang et al., 2021)。例如,福建紫金山铜钼矿段北东向AA'剖面在距离矿化中心底部存在的大面积的青磐岩化(含Fe、Mg的绿泥石和绿帘石矿物含量丰富)促进了绢云母族矿物中 Al^{iv} 与 $(\text{Mg}, \text{Fe})^{\text{vi}}$ 之间的类质同象替换,造成矿物内的 Al^{iv} 含量降低以及Fe、Mg含量的升高导致绢云母 $w\text{AlOH}$ 出现异常高值(许超等,2017)。在鄂东南矿集区,铜绿山铜-金-铁矿床中的白云母族Pos2200异常高值(>2212 nm)指示了伴随着矽卡岩化及成矿作用的进行,大量的Fe、Mg等物质通过热液交代作用在热液矿化的中-晚阶段和退化蚀变阶段形成了富Fe、Mg等成分的矿物(如石榴子石、透辉石、绿帘石、金云母等)(陈华勇,2021)。同样,许多斑岩型矿床如印尼Batu Hijau斑岩铜金矿床,因含Fe、Mg、Al的碳酸盐岩发育较少而限制了青磐岩化的发育。这些寄主岩不仅限制了青磐岩化蚀变带的发育,而且制约了绢云母的契尔马克交换,使绢云母不能作为有效指示矿物(Han et al., 2018; Neal et al., 2018)。Wang等(2021)在对黑龙江省争光中硫型浅成低温热液矿床中的 $w\text{AlOH}$ 变化规律进行厘定时发现较高的 $w\text{AlOH}$ 集中在深部,而在浅部出现的 $w\text{AlOH}$ 异常高值是火山角砾岩与玄武安山岩熔岩围岩渗透率的

表 2 不同矿床类型中近矿端绢云母平均波长

Table 2 Average wavelength of sericite near ore body in different type of deposits

矿床类型	矿区	近矿端绢云母波长平均值/nm	资料来源
斑岩型铜-钼±金矿床	福建紫金山	2208	许超等, 2017
	大兴安岭富克山	2208	李如操等, 2020
	新疆土屋斑岩	2204	连长云等, 2005a; 2005b
	西藏念村矿区	2198	杨志明等, 2012
	西藏德明顶	2201	任欢等, 2020
	西藏甲玛	2203	郭娜等, 2019
	斑岩 Cu 矿床	2203	Harraden et al., 2013
	西藏尼木地区岗讲斑岩	2205	田丰等, 2019b
	西藏铁格陇南	2201	唐楠等, 2021
	Highland Valley 斑岩铜矿	2195	Lypaczewski et al., 2020
	三山岛北部海域金矿	2206	宋英昕等, 2017
	石湖金矿	2198	Yao et al., 2021
造山型金矿	西奥 Sunrise Dam	2210	Wang et al., 2018
	Kanowna Belle 金矿床	2200	Wang et al., 2017
	Khan Altai 金矿床	2210	Iderbat et al., 2020
	老湾沟金矿热液	2217	Xiao et al., 2021
	胶东金矿	2212	赵利青等, 2008
VMS 型矿床	伊佐克湖 Zn-Cu-Pb-Ag VMS 矿床	2203	Laakso et al., 2015
	Myra Falls VMS 矿床	2198	Jones et al., 2005
	东天山红海铜锌矿床	2200	黄健瀚等, 2017
	新疆阿舍勒铜锌矿床	2205	游富华等, 2021
	Rosebery	2195	Herrmann et al., 2001
	McLeod 火山成因块状硫化物矿床	2200	Ross et al., 2019
	阿根廷火山岛 Arroyo Rojo VMS 矿床	2220	Biel et al., 2012
矽卡岩型	塔克斯火山带火山成因块状硫化物矿床	2200	Hinchey et al., 2011
	铜绿山	2221	陈华勇等, 2021
浅成低温热液型	鸡冠嘴	2215	陈华勇等, 2021
	斯弄多低硫型矿床	2200	郭娜等, 2019
	争光中硫型矿床	2214	Wang et al., 2021

不同引起的, 渗透率的升高增强了流体与岩石的相互作用, 使富铁流体的流量增加, 从而提高 $w\text{AlOH}$ 值。

上述结果表明, 虽然契尔马克替换是绢云母光谱特征空间变化规律的主要影响因素。然而, 在解译绢云母光谱特征的同时, 需要进一步深入考虑流体组分的影响。因为流体组分的变化常常影响着绢云母的成分, 继而影响绢云母光谱特征参数。流体的组分往往是复杂多变的, 就算是来源于相同原始储层的流体, 在蒸汽加热或蒸汽冷凝的过程中, 其组成也可能会发生很大的变化 (Arnórsson et al., 2007)。在后期的水岩反应中, 由于围岩类型的差异, 也会改变流体成分。热液成因矿床中矿化的发生往往是多期流体共同作用的结果, 利用绢云母波长变化反演流体期次需要更加谨慎, 因为绢云母波长发生跨越式变化时往往代表了至少两期或更多期次的流体叠

加, 而光谱测试结果往往只代表最后一期甚至不是最后一期流体的产物。目前成矿流体组分对光谱参数影响的研究仍存在争议, 这可能与利用天然样品研究成矿流体组分演化较困难有关。未来, 实验岩石学手段也许能有效弥补此研究的不足。其次, 勘查标识的提取也主要针对于已知矿体的矿床开展研究, 导致赋矿岩体和致矿岩体对于光谱参数的影响研究也极为有限, 且目前的研究也主要局限于赋矿岩体和致矿岩体岩性及岩石地球化学特征的研究 (李莎莎等, 2018)。因此, 在今后的勘查工作中需要大量全面系统性的相关实验和理论研究成果来支撑绢云母谱学标型的科学可靠性。

综上, 绢云母光谱特征空间变化规律需要与实际的矿床特征相结合。最新的研究发现, 绢云母的地球化学特征可以作为斑岩型矿化的指示矿物, 即

矿化系统和无矿系统的绢云母 Zn、Cr、B、Ti、Sn 和 Cs 成分存在显著差异(Urbe-Mogollon et al., 2020)。作者认为绢云母 SWIR 波谱变化规律在今后的矿产勘查工作中具有良好地应用前景。

4 结 论

(1) 虽然对于混合矿物光谱中单一矿物含量的提取较为复杂,但综合利用多种方法对混合矿物光谱曲线中绢云母含量的提取是可行的。其中 TSG 软件中在 TSA 自动识别功能下利用混合矿物光谱吸收深度进行简单计算的方法较为有效和便捷。

(2) 绢云母 SWIR 光谱特征空间变化规律主要受绢云母化学成分的影响,而寄主岩石类型、温度、流体化学成分、流体 pH 值等因素会通过改变绢云母契尔马克替换,间接影响绢云母 SWIR 光谱特征。同时,其光谱特征还会受到矿物粒度、石英-硫化物脉及共生(伴生)矿物等因素的干扰。

(3) 绢云母谱学特征空间变化在不同矿床表现不同的变化规律,利用大数据手段收集不同类型矿床中近矿端绢云母波长变化规律可以有效研判矿床基础地质信息。此外,契尔马克替换可作为绢云母光谱特征空间变化规律影响因素的主要着手点。

致 谢 成文过程得到了中科遥感集团杨凯博士和中国科学院广州地球化学研究所陈华勇研究员及肖兵副研究员的帮助,感谢审稿专家对本文的宝贵意见,在此由衷感谢!

References

- Arnórsson S, Stefánsson A and Bjarnason J O. 2007. Fluid-fluid interactions in geothermal systems[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 65: 259-312
- Bish D L and Plötze M. 2011. X-ray powder diffraction with emphasis on qualitative and quantitative analysis in industrial mineralogy[C]. *Industrial Mineralogy*, EMU Notes in Mineralogy. 35-76.
- Biel C, Subías I, Acevedo R D, Yusta I and Velasco F. 2012. Mineralogical, IR-spectral and geochemical monitoring of hydrothermal alteration in a deformed and metamorphosed Jurassic VMS deposit at Arroyo Rojo, Tierra del Fuego, Argentina[J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 35: 62-73.
- Chen G Y, Sun D S and Yin H A. 1987. Genetic mineralogy and prospecting mineralogy[M]. Chongqing: Chongqing Publishing House (in Chinese).
- Clark R N, King T V V, Klejwa M, Swayze G A and Vergo N. 1990. High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals[J]. *Journal of Geophysical Research*, 95(B8): 12653-12680.
- Clark R N. 1999. Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy[A]. *Manual of Remote Sensing*, Remote Sensing for Earth Sciences[C]. New York: John Wiley and Sons.
- Chang Z S, Hedenquist J W, White N C, Cooke D R, Roach M, Deyell C L, Garcia J J, Gemmell J B, McKnight S and Cuison A L. 2011. Exploration tools for linked porphyry and epithermal deposits: Example from the mankayan intrusion-centered Cu-Au district, Luzon, Philippines[J]. *Econ. Geol.*, 106(8): 1365-1398.
- Chen H Y, Zhang S T, Chu G B, Zhang Y, Cheng J M, Tian J and Han J S. 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): 3629-3643(in Chinese with English abstract).
- Chen H Y, Xiao B and Zhang S T. 2021. Identification system of altered minerals exploration[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- Duba D and Williams-Jones A E. 1983. The application of illite crystallinity, organic matter reflectance, and isotopic techniques to mineral exploration: A case study in southwestern Gaspé, Quebec[J]. *Econ. Geol.*, 78:1350-1363.
- Duke E F. 1994. Near infrared spectra of muscovite, Tschermak substitution, and metamorphic reaction progress: Implications for remote sensing[J]. *Geology*, 22(7): 621-624.
- Feng Y Z, Xiao B, Li R C, Deng C Z, Han J S, Wu C, Li G H, Shi H L and Lai C K. 2019. Alteration mapping with short wavelength infrared (SWIR) spectroscopy on Xiaokelehe porphyry Cu-Mo deposit in the Great Xing'an Range, NE China: Metallogenic and exploration implications[J]. *Ore Geology Review*, 112: 103062.
- Guo N, Shi W X, Huang Y R, Zheng L, Tang N, Wang C and Fu Y. 2018. Alteration mapping and prospecting model construction in the Tiegelongnan ore deposit of the Duolong ore concentration area, northern Tibet, based on short-wave infrared technique[J]. *Geological Bulletin*, 37(2): 446-457(in Chinese with English abstract).
- Guo N, Guo W B, Liu D, Huang Y R, Zheng L and Guo Y N. 2019. Alteration zoning model associated with Tibetan Sinongduo epithermal deposit, the continental volcanic areas of Gangdise metallogenic belt[J]. *Journal of Petrology*, 35(3):833-848(in Chinese with English abstract).
- Guo N, Cudahy T, Tang J and Tong Q. 2019. Mapping white mica alteration associated with the Jiama porphyry-skarn Cu deposit, central Tibet using field SWIR spectrometry[J]. *Ore Geology Reviews*, 108: 147-157
- Guo N, Guo W B, Shi W X, Huang Y R, Guo Y N and Lian D M. 2020. Characterization of illite clays associated with the Sinongduo low sulfidation epithermal deposit, Central Tibet using field SWIR spectrometry[J]. *Ore Geology Reviews*, 120: 103228.
- Herrmann W, Blake M, Doyle M, Huston D, Kamprad J, Merry N and

- 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[J]. *Econ. Geol.*, 96: 939-955.
- Hunt G R. 1977. Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared[J]. *Geophysics*, 42(3): 501-513.
- Hunt G R and Ashley R P. 1979. Spectra of altered rocks in the visible and near infrared[J]. *Econ. Geol.*, 74(7): 1613-1629.
- Hou Z Q, Han F, Xia L Q, Zhang Q L, Qu X M, Li Z Q, Bie F L, Wang L Q, Yu J J and Tang S H. 2003. Modern and ancient submarine hydrothermal mineralization-taking some volcanic massive sulfide deposits as examples[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Hinchev J G. 2011. Visible/infrared spectroscopy (VIRS) of volcanogenic massive sulphide hydrothermal alteration products, Tulks Volcanic Belt, Central Newfoundland: An additional exploration technique[R]? In Current Research: Newfoundland and Labrador Department of Natural Resources, Geological Survey; Report 11-1; Newfoundland and Labrador Department of Natural Resources, Geological Survey: St. John's, NL, Canada, 97-108.
- Harraden C L, McNulty B A, Gregory M.J and Lang J R. 2013. Short-wave infrared spectral analysis of hydrothermal alteration associated with the Pebble porphyry copper-gold-molybdenum deposit, Iliamna, Alaska[J]. *Econ. Geol.*, 108: 483-494.
- Halley S, Dilles J H and Tosdal R M. 2015. Footprints: Hydrothermal alteration and geochemical dispersion around porphyry copper deposits[C]. *Society of Economic Geologists Newsletter*, 100: 12-17.
- Han J S, Chu G B, Chen H Y, Hollings P, Sun S Q and Chen M. 2018. Hydrothermal alteration and short wavelength infrared (SWIR) characteristics of the Tongshankou porphyry-skarn Cu-Mo deposit, Yangtze craton, Eastern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 101: 143-164.
- Huang J H. 2017. Geochemistry of altered minerals in VMS deposit: A case study of Red Sea Cu-Zn deposit in East Tianshan[D]. Supervisor: Cheng H Y. University of Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English abstract).
- Iderbat K, Ganbat M, Densmaa N, Khashgerel B E, Dashbaatar D O and Kavalieris I. 2021. Geology, mineralization and short-wave infrared alteration mapping of the Khan Altai Au deposit, Mongolia[J]. *Resource Geology*, 71: 226-241.
- Jones S, Herrmann W and 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[J]. *Econ. Geol.*, 100(2): 273-294.
- LI S S, Chen H Y and Wang Li M. 2019. Initial approach to establish the identification criteria system for exploration of porphyry Cu deposits[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 43(5): 991-1009.
- Lian C Y, Zhang G and Yuan C H. 2005a. Application of SWIR reflectance spectroscopy to Pulang porphyry copper ore district, Yunnan Province[J]. *Mineral Deposits*, 24(6): 621-637(in Chinese with English abstract).
- Lian C Y, Zhang G, Yuan C H and Yang K. 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: 483-495(in Chinese with English abstract).
- Laakso K, Benoit R, Jan M, Peter H, Peter W M, Maloley J R, Harris and Derek M R. 2015. Application of airborne, laboratory, and field hyperspectral methods to mineral exploration in the Canadian Arctic: Recognition and characterization of volcanogenic massive sulfide-associated hydrothermal alteration in the Izok Lake deposit area, Nunavut, Canada[J]. *Econ. Geol.*, 110: 925-941.
- Laakso K, Peter J M, Rivard B and White H P. 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]. *Econ. Geol.*, 111: 1223-1239.
- Li R C, Chen H Y, Li G H, Feng Y Z, Xiao B, Han J S, Deng C Z and Shi H L. 2020. Geological characteristics and application of short wavelength infra-red technology (SWIR) in the Fukeshan porphyry copper deposit in the Great Xing' an range area[J]. *Earth Science*, 45(5): 1517-1530(in Chinese with English abstract).
- Lian D M, Guo N, Hu Z H, Long T J, Yuan S and Mi M W J. 2020. Relationship between spectral characteristics of sericite and mineral composition and mineralization of Zhuxi copper-tungsten deposit in Jiangxi[J]. *China Tungsten Industry*, 35(5): 20-34(in Chinese with English abstract).
- Lypaczewski P, Rivard B, Lesage G, Byrne K, D'Angelo M and Lee R G. 2020. Characterization of mineralogy in the Highland Valley porphyry Cu district using hyperspectral imaging, and potential applications[J]. *Minerals*, 10: 473.
- Mulder V L, Plötze M, Bruin S D, Schaepman M E, Mavris C, Kokaly R F and Egli M. 2013. Quantifying mineral abundances of complex mixtures by coupling spectral deconvolution of SWIR spectra (2.1~2.4 μ m) and regression tree analysis[J]. *Geoderma*, 207-208: 279-290.
- Neal L C, Wilkinson J J, Mason P J and Chang Z S. 2018. Spectral characteristics of propylitic alteration minerals as a vectoring tool for porphyry copper deposits[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 184: 179-198.
- Ni P, Chi Z and Pan J Y. 2020. An integrated investigation of ore-forming fluid evolution in porphyry and epithermal deposits and their implication on exploration[J]. *Earth Science Frontiers*, 27(2): 60-78(in Chinese with English abstract).
- Ross P, Bourke A, Schnitzler N and Conly A G. 2019. Exploration vectors from near infrared spectrometry near the McLeod volcanogenic massive sulfide deposit, Matagami district, Québec[J]. *Econ. Geol.*, 114(4):613-638.
- Ren H, Zheng Y Y, Wu S, Zhang X, Ye J W and Chen X D. 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).
- Scott K M and Yang K. 1997. Spectral reflectance studies of white micas[R]. CSIRO Exploration and Mining Report 439R, Sydney, Australia.
- Sillitoe R H. 2010. Porphyry copper systems[J]. *Econ. Geol.*, 105:3-41.
- Song Y X. 2017. Short wave infrared spectral characteristics of alteration minerals of gold deposit in the Northern Sea of Sanshandao and its implications for deep prospecting[J]. *Golden Science and Technology*, 25(3): 54-60(in Chinese with English abstract).
- Sun S Q. 2019. Geochemical study of altered minerals in the ore concentration area of Southeast Hubei and its exploration application[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- Thompson A J B, Hauff P L and Robitaille A J. 1999. Alteration mapping in exploration: Application of short-wave infrared (SWIR) spectroscopy[J]. *SEG Newsletter*, 39(3): 16-27.
- Tappert M C, Rivard B, Giles D, Tappert R and Mauger A. 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.
- Tian F, Leng C B, Zhang X C, Tian Z D, Zhang W and Guo J H. 2019. Application of short wavelength infrared technique in exploration of mineral deposits: A review[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 38(3): 634-642(in Chinese with English abstract).
- Tian F, Leng C B, Zhang X C, Tian Z D, Zhang W and Guo J H. 2019. Application of short-wave infrared spectroscopy in Gangjiang porphyry Cu-Mo deposit in Nimu ore field, Tibet[J]. *Earth Science*, 44(6): 2143-2154(in Chinese with English abstract).
- Tang N, Lin B, Li Y B, Wang Y Y and Li J J. 2021. Application of short-wavelength infrared spectroscopy in porphyry-epithermal system: A case study of Tiegelongnan super-large copper(gold) deposit, Tibet[J]. *Journal of Geology*, 95(8): 2613-2627(in Chinese with English abstract).
- Uribe-Mogollon C and Maher K C. 2020. White mica geochemistry: Discriminating between barren and mineralized porphyry systems[J]. *Econ. Geol.*, 115: 325-354.
- Velde B. 1965. Phengite micas: Synthesis, stability and natural occurrences[J]. *American Journal of Science*, 263: 886-913.
- Wang H J, Tao X F and Rahn M. 2007. Some aspects of illite crystallinity and its applications in low temperature metamorphism[J]. *Earth Science Frontiers*, 14(1): 151-156(in Chinese with English abstract).
- Wang R, Cudahy T, Laukamp C, Walshe J L, Bath A, Yuan M, Young C, Roache T J, Jenkins A, Roberts M, Barker A and Laird J. 2017. White mica as a hyperspectral tool in exploration for the sunrise dam and Kanowna belle gold deposits, western Australia[J]. *Econ. Geol.*, 112: 1153-1176.
- Wang R, Jeon H and Evans N J. 2018. Archean hydrothermal fluid modified zircons at Sunrise Dam and Kanowna Belle gold deposits, western Australia: Implications for post-magmatic fluid activity and ore genesis[J]. *American Mineralogist*, 103: 1891-1905.
- Wang Q F, Deng J, Zhao H S, Yang L, Ma Q Y and Li H J. 2019. Review on orogenic gold deposits[J]. *Earth Science*, 44(6): 2155-2186(in Chinese with English abstract).
- Wang L, Percival J B, Hedenquist J W, Hattori K and Qin K. 2021. Alteration mineralogy of the Zhengguang epithermal Au-Zn deposit, Northeast China: Interpretation of shortwave infrared analyses during mineral exploration and assessment[J]. *Econ., Geol.* 116: 389-406.
- Xiu L C, Zheng Z Z, Yu Z K, Huang J J, Yin L, Wang M J, Zhang Q N, Huang B, Chen C X, Xiu T J and Lu S. 2007. mineral analysis technology application with near infrared spectroscopy in identifying alteration mineral[J]. *Journal of Geology*, 81(11): 1584-1590 (in Chinese with English abstract).
- Xiu L C, Zheng Z Z, Yu Z K, Huang J J, Yin L, Wang M J, Zhang Q N, Huang B, Chen C X, Xiu T J and Wu P. 2009. Study on method of measuring altered minerals in rocks with near-infrared spectrometer[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 28(6): 519-523(in Chinese with English abstract).
- Xu C, Chen H Y, White N C, Qi J P, Zhang L J, Zhang S and Duan G. 2017. Alteration and mineralization of Xinan Cu-Mo ore deposit in Zijinshan ore field, Fujian Province, and application of short wavelength infrared technology (SWIR) to exploration[J]. *Mineral Deposita*, 36(5): 1013-1038(in Chinese with English abstract).
- Xiao B, Chu G and Feng Y Z. 2021. Short-wave infrared (SWIR) spectral and geochemical characteristics of hydrothermal alteration minerals in the Laowangou Au deposit: Implications for ore genesis and vectoring[J]. *Ore Geology Reviews*, 139:104463
- Yang K, Huntington J F, Gemmell J B and Scott K M. 2011. Variations in composition and abundance of white mica in the hydrothermal alteration system at Hellyer, Tasmania, as revealed by infrared reflectance spectroscopy[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 108(2): 143-156
- Yang Z M, Hou Z Q, Yang S S, Qu H C, Li Z Q and Liu Y F. 2012. Application of short-wavelength infrared (SWIR) technique in exploration of poorly eroded porphyry Cu deposit: A case study of Niancun ore district, Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 31(4): 699-717 (in Chinese with English abstract).
- Yao Y Z, Zhu Y C, Liu J C and Li W Q. 2021. Footprints of ore fluid pathway and implications to mineral exploration in the Shihu gold deposit, North China: Evidence from short wave infrared spectroscopy of illitic alteration rocks[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 229: 106833.
- You F H, Jiang J J, Zhang J Z and Lai X D. 2021. Application of short-wave infrared technique in exploration of Ashele Cu-Zn deposit in Xinjiang[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 40(5): 1010-1022 (in Chinese with English abstract).
- Zhang G, Lian C Y and Wang R S. 2005. Application of the portable infrared mineral analyser (PIMA) in mineral mapping in the Qulong copper prospect, Mozhuogongka County, Tibet[J]. *Geological Bulletin of China*, 24(5): 480-484(in Chinese with English abstract).
- Zhao L Q, Deng J, Yuan H T and Li X Y. 2008. Short wavelength infra-

- red Spectral analysis of alteration zone in the Taishang gold deposit[J]. *Geology and Prospecting*, 44(5): 58-63(in Chinese with English abstract).
- Zhang S T, Chu G B, Cheng J M, Zhang Y, Tian J, Li J P, Sun S Q and Wei K T. 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[J]. *Ore Geology Reviews*, 122: 103516.
- Zhang J L and Chen H Y. 2021. Preliminary study on mineral exploration indicator system[A]. *Proceedings of the First National Mineral Exploration Conference*[C]. Hefei: The First national ore exploration conference[C](in Chinese).
- ### 附中文参考文献
- 陈光远, 孙岱生, 殷辉安. 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, 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[J]. *岩石学报*, 35(12): 3629-3643.
- 陈华勇, 肖兵, 张世涛. 2021. 蚀变矿物勘查标识体系[M]. 北京: 科学出版社.
- 郭娜, 史维鑫, 黄一入, 郑龙, 唐楠, 王成, 伏媛. 2018. 基于短波红外技术的西藏多龙矿集区铁格隆南矿床荣那矿段及其外围蚀变填图-勘查模型构建[J]. *地质通报*, 37(2): 446-457.
- 郭娜, 郭文铂, 刘栋, 黄一入, 郑龙, 郭亚楠. 2019. 冈底斯成矿带陆相火山岩区浅成低温热液矿床蚀变分带模型——以西藏斯弄多矿床为例[J]. *岩石学报*, 35(3): 833-848.
- 侯增谦, 韩发, 夏林圻, 张绮玲, 曲晓明, 李振清, 别风雷, 王立全, 余金杰, 唐绍华. 2003. 现代与古代海底热水成矿作用——以若干火山成因块状硫化物矿床为例[M]. 北京: 地质出版社.
- 黄健瀚. 2017. VMS矿床蚀变矿物地球化学——以东天山红海铜锌矿床为例[D]. 导师: 陈华勇. 北京: 中国科学院大学.
- 连长云, 章革, 元春华. 2005a. 短波红外光谱矿物测量技术在普朗斑岩铜矿区热液蚀变矿物填图中的应用[J]. *矿床地质*, 24(6): 621-637.
- 连长云, 章革, 元春华, 杨凯. 2005b. 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.
- 李莎莎, 陈华勇, 汪礼明. 2019. 关于建立斑岩型铜矿床勘查标识体系的初步探讨[J]. *大地构造与成矿学*, 43(5): 991-1009.
- 李如操, 陈华勇, 李光辉, 冯雨周, 肖兵, 韩金生, 邓昌州, 时慧琳. 2020. 大兴安岭地区富克山斑岩铜钼矿床地质特征与SWIR勘查应用[J]. *地球科学*, 45(5): 1517-1530.
- 连敦梅, 郭娜, 胡正华, 龙沱江, 袁珊, 米玛旺久. 2020. 江西朱溪铜钨矿床绢云母光谱特征与矿物成分、矿化的关系研究[J]. *中国钨业*, 35(5): 20-34.
- 倪培, 迟哲, 潘君屹. 2020. 斑岩型和浅成低温热液型矿床成矿流体与找矿预测研究: 以华南若干典型矿床为例[J]. *地学前缘*, 27(2): 60-78.
- 任欢, 郑有业, 吴松, 张心, 叶吉文, 陈雪冬. 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[J]. *地球科学*, 45(3): 930-944.
- 宋英昕. 2017. 胶东三山岛北部海域金矿床蚀变矿物短波红外光谱特征及其对深部找矿的启示[J]. *黄金科学技术*, 25(3): 54-60.
- 孙四权. 2019. 鄂东南矿集区蚀变矿物地球化学研究及其勘查应用[M]. 北京: 科学出版社.
- 田丰, 冷成彪, 张兴春, 田振东, 张伟, 郭剑衡. 2019a. 短波红外光谱技术在矿床勘查中的应用[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 38(3): 634-642.
- 田丰, 冷成彪, 张兴春, 田振东, 张伟, 郭剑衡. 2019b. 短波红外光谱技术在西藏尼木地区岗讲斑岩铜-钼矿床中的应用[J]. *地球科学*, 44(6): 2143-2154.
- 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[J]. *地质学报*, 95(8): 2613-2627.
- 王河锦, 陶晓凤, Rahn M. 2007. 伊利石光谱成熟度及其在低温变质研究中若干问题的讨论[J]. *地学前缘*, 14(1): 151-156.
- 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[J]. *地球科学*, 44(6): 2155-2186.
- 修连存, 郑志忠, 俞正奎, 黄俊杰, 殷靛, 王弥建, 张秋宁, 黄宾, 陈春霞, 修铁军, 陆帅. 2007. 近红外光谱分析技术在蚀变矿物鉴定中的应用[J]. *地质学报*, 81(11): 1584-1590.
- 修连存, 郑志忠, 俞正奎, 黄俊杰, 陈春霞, 殷靛, 王弥建, 张秋宁, 黄宾, 修铁军, 吴萍. 2009. 近红外光谱仪测定岩石中蚀变矿物方法研究[J]. *岩矿测试*, 28(6): 519-523.
- 许超, 陈华勇, Noel W, 祁进平, 张乐骏, 张爽, 段甘. 2017. 福建紫金山矿田西南铜钼矿段蚀变矿化特征及SWIR勘查应用研究[J]. *矿床地质*, 36(5): 1013-1038.
- 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, 赖晓丹. 2021. 短波红外光谱技术在新疆阿舍勒铜钼矿床勘查中的应用[J]. *岩石矿物学杂志*, 40(5): 1010-1022.
- 章革, 连长云, 王润生. 2005. 便携式短波红外矿物分析仪(PIMA)在西藏墨竹工卡县驱龙铜矿区矿物填图中的应用[J]. *地质通报*, 24(5): 480-484.
- 赵利青, 邓军, 原海涛, 李晓英. 2008. 台上金矿床蚀变带短波红外光谱研究[J]. *地质与勘探*, 44(5): 58-63.
- 张俊岭, 陈华勇. 2021. 找矿勘查标识体系研究初探[A]. 首届全国矿产勘查大会论文集[C]. 合肥: 首届全国矿产勘查大会.