

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*

张柯凡^{1,2}, 郭娜^{1,2**}, 李伟³, 姚艺欣^{1,2}

(1 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059; 2 数学地质四川省重点实验室 成都理工大学, 四川 成都 610059; 3 江西省地质局第七地质大队, 江西 赣州 341000)

摘要 江西赣南地区是中国重要的多金属矿集区, 成矿潜力大, 随着矿产勘查进入深部找矿的新阶段, 传统勘查手段难以支撑, 亟需新的方法和思路进一步来指导找矿工作。文章以江西赣南地区铜岭下铜多金属矿床为例, 采用短波红外+热红外光谱技术, 结合矿物学和矿物地球化学手段, 厘定了矿区蚀变矿物组合及空间展布特征, 分析了光谱特征与矿化品位之间的关系, 探讨了铜岭下矿床中典型蚀变矿物的形成与演化过程, 构建出铜岭下矿床的光谱勘查模型。研究发现, 矿区北部 Cu-Mo 矿化分布于花岗岩体顶部, 以绢云母族矿物为找矿标志; 矿区中部 Cu-Zn 矿化处于花岗岩体侵入的地层接触带, 以绿泥石低 Pos2250 值 (<2243 nm) 以及蛇纹石和断裂特征分布为找矿标志; 矿区南部 W-Sn-Cu 矿化与石英细脉相关, 总体与蚀变矿物关系不大, 主要以岩石裂隙为找矿标志。北部钻孔 ZK9-3 和 ZK9-4 伊利石波谱 IC 值反映出岩体侵入深度大, 推测其位置距离热源中心更近; 绢云母 2200 nm 波长变化结果显示: 成矿流体可能来源于矿区北部; 矿区中部绿泥石以富镁(铁)绿泥石为主, Pos2250 值从致矿岩体到接触带附近呈由高变低的趋势。研究区成矿环境复杂, 由北向南形成了蚀变花岗岩型(Cu-Mo)-构造控制下的弱矽卡岩型(Cu-Zn)-石英脉型(W-Sn-Cu)的复合成矿体系。

关键词 短波红外光谱; 热红外光谱; 蚀变矿物; 铜岭下铜多金属矿床

中图分类号: P588.312; P618.2

文献标志码: A

Alteration and mineralization characteristics of Tonglingxia copper polymetallic deposit in Gannan based on infrared spectroscopy technology

ZHANG KeFan^{1,2}, GUO Na^{1,2}, LI Wei³ and YAO YiXin^{1,2}

(1 College of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2 Geomathematics Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 3 Seventh Geological Brigade of Jiangxi Provincial Geological Bureau, Ganzhou 341000, Jiangxi, China)

Abstract

The Gannan region in southern Jiangxi Province is a significant ore concentration area of polymetallic mineral deposits in China with high mineralization potential. As deep exploration for mineral resources progresses, traditional exploration methods prove inadequate, necessitating the urgent adoption of new methods and approaches. This study focuses on the Tonglingxia copper-polymetallic deposit in the Gannan region and employs short-wave infrared spectroscopy in conjunction with thermal infrared spectroscopy. By utilizing mineralogy and mineral geochemical methods, it establishes the composition and spatial distribution characteristics of alteration minerals

* 本文得到江西省地勘基金(编号: AH2022-0713)资助

第一作者简介 张柯凡, 男, 1998年生, 硕士研究生, 资源与环境(地质工程)专业。Email: 1879177737@qq.com

** 通讯作者 郭娜, 女, 1979年生, 教授, 主要从事高光谱地质勘查与建模研究。Email: cdu_t_guona@126.com

收稿日期 2023-10-24; 改回日期 2024-01-25。秦思婷编辑。

in the deposit area. Furthermore, it examines the relationship between spectral features and the grade of mineralization, investigates the formation and evolution process of typical alteration minerals in the Tonglingxia deposit, and constructs a spectral exploration model. The findings unfold as follows: Cu-Mo mineralization primarily occurs at the top of the granite body in the northern part of the deposit, with sericite minerals serving as exploration indicators. In the middle part of the deposit, Cu-Zn mineralization is located in the contact zone of the granite intrusive body and can be identified through low Pos2250 values (<2243 nm) of chlorite, as well as the presence of serpentine and fractures; In the southern part of the deposit, W-Sn-Cu mineralization is associated with quartz veins and demonstrates limited overall correlation with alteration minerals, indicating a predominant occurrence of mineralization infilling rock fractures. The IC values of illite spectra in drill holes ZK9-3 and ZK9-4 in the northern part indicate a greater depth of granite intrusive body, suggesting closer proximity to the heat source center. Additionally, the variation of sericite wavelength at 2200 nm on spectrum suggests that the mineralizing fluid may originate from the northern part of the deposit. Chlorite in the central part of the deposit consists mainly of magnesium-rich chlorite, and the Pos2250 value exhibits a decreasing trend from the granite intrusive body to the contact zone. The ore-forming environment in the study area is complex, resulting in a composite ore deposit system that transitions from an alteration granite type (Cu-Mo) in the North to a weak skarn type (Cu-Zn) controlled by structures and finally to a quartz vein type (W-Sn-Cu) in the South.

Keywords: shortwave infrared spectroscopy, thermal infrared spectroscopy, alteration minerals, Tonglingxia copper polymetallic deposit

赣南地区是中国 W-Sn-Cu-Ag-Pb-Mo-Bi-U-REE 等多金属成矿带的重要组成部分(吴德海等, 2019; 徐先兵等, 2021; 张熠阳等, 2022), 处于南岭东西构造带东段与武夷山隆起褶皱带西侧接壤部位, 钦杭结合带以东, 华南大陆之华夏板块中南部(图 1a), 素有“世界钨都”、“稀土王国”之称(王登红等, 2007)。区内多期次的构造岩浆运动促进了含矿流体的运移, 形成了多个以钨矿为主的多金属矿集区(刘善宝等, 2008; 方贵聪等, 2017)。近些年来, 随着前人对赣南地区进一步研究, 在各矿集区内发现了众多中小型以上规模的铜多金属矿床, 包括见龙铜钨矿、小坑铜矿、青龙山铜矿、红山铜矿等(周济元等, 1999; 苏慧敏等, 2010; 彭琳琳等, 2019; 杨斌等, 2020; 刘建伟等, 2022), 表明赣南地区寻找铜矿资源的潜力巨大。

铜作为重要的战略性有色金属, 分布广泛, 主要集中于环太平洋、特提斯-喜马拉雅、古亚洲 3 大成矿域中(John et al., 2010; 金希, 2012; 曹康等, 2014; Gao et al., 2017; Mao et al., 2018), 为全球提供了大量的铜、金、钨等资源, 备受国内外学者的青睐(Richards, 2003; Sillitoe, 2010; 张世涛等, 2017)。Gregory (2017) 利用包裹体及氢、氧同位素分析 Pebble 斑岩型铜矿床热液流体演化过程, 划分出不同的成岩成矿期次; Massawe 等(2022) 基于 McKenzie Gulch 地

区矽卡岩型铜矿床的矿物学特征, 对矿床的石榴子石+辉石开展电子探针研究, 表明该矿物组合与铜矿化关系密切, 可用于勘查矽卡岩型铜矿床; Lin 等(2020) 提出, 桑日铜矿床可利用石榴子石 U-Pb 测年的方法来确定斑岩-矽卡岩矿床的成岩年龄; 杨志明等(2012) 对浅剥蚀斑岩铜矿区进行短波红外光谱研究, 厘定了伊利石结晶度以及绢云母特征吸收峰值, 确定出矿区的热液/矿化中心。

基于蚀变矿物的红外光谱测试研究在地学领域中取得不断突破(章革等, 2004; 郭娜等, 2012; Matthew et al., 2013; Raquel et al., 2015; Scott et al., 2015; Ciobanu et al., 2016; Simpson et al., 2019;), 其中短波红外光谱(1100~2500 nm) 对矿物结构中 X-H(X=C、O、N、S) 分子键的振动作用具有显著敏感性(Hunt, 1977), 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; 而热红外光谱(6000~15 000 nm) 主要记录矿物中 Si_nO_k 、 SO_4 、 CO_3 、 PO_4 等基团振动变化特征(Christensen et al., 2000), 能够进一步有效的提取出硅酸盐(石英、辉石、石榴子石)、碳酸盐(菱铁矿、菱镁矿)、硫酸盐(硬石膏)等矿物。综上所述, 红外光谱技术可以快速识别及提取出蚀变矿物类型, 并利用典型蚀变矿物特征构建光谱勘查模型, 为下一步找矿勘查工作提供理论依据(张世涛等, 2017; 郭娜等, 2018; 陈华勇等, 2019; 黄一入, 2021)。

铜岭下铜多金属矿床处于江西省于都-赣县矿集区内(图1b),区内褶皱、构造发育,以早古生界作为基底地层,晚古生界构成上覆盖层。目前针对区内各类矿床的地质特征(曾载淋等,2011;邹长春等,2014)、年代学(方贵聪等,2017;刘翠辉等,2020;尹政等,2021)、矿物学特征(鲁麟等,2018;邬斌等,2020;岳秋雨等,2023)、成矿元素富集规律(陈毓川等,2014)、地球化学及地球物理特征(刘金兰等,2014;苏晓云等,2014)等方面都已展开了详细的研究,但区内关于蚀变矿物类型、组合分带特征以及找矿方向均不明晰。因此作者采用短波红外+热红外光谱技术为主,岩相学、地球化学测试分析手段为辅的方法,查明了研究区钻孔内蚀变矿物组合及空间展布特征、矿化元素分布规律,确定了研究区复杂的成矿类型和体系,构建出光谱勘查模型,为下一步赣南地区铜矿找矿方向提供了技术支撑。

1 地质概况

铜岭下铜多金属矿床位于江西省赣州市于都县,地理坐标为东经 $115^{\circ}30'38''\sim 115^{\circ}31'43''$,北纬 $25^{\circ}43'54''\sim 25^{\circ}44'55''$ 。矿区大地构造位置处于欧亚板块、特提斯板块以及滨太平洋板块结合部位的南岭成矿带东段(张吉涛等,2011;卢友月等,2015;李童斐,2019),介于武夷褶皱带与罗霄褶皱带之间,其东、西两侧分别与华夏板块、扬子板块相邻(图1a)。

矿区及外围出露地层较为简单,主要有寒武系、石炭系和第四系。其中,下统牛角河组石英砂岩、含碳板岩及砂质板岩构成矿区变质基底;石炭系为一套灰岩、含碳灰岩夹白云质条带状大理岩岩石组成,与细粒黑云母花岗岩呈侵入接触;第四系在区内大面积出露,包括全新统联圩组砂黏土层和更新统望高组含砾细砂层。矿区内以燕山期岩浆活动表现最为强烈,发育铁山垅复式岩体和地表出露规模不等的岩脉,岩石类型包括黑(二)云母花岗岩、云英岩化花岗岩、石英斑岩以及花岗斑岩等(李光来,2011;张文兰等,2012;郭小飞等,2022)。矿区构造以断裂构造为主,按其走向主要为NE向(F1、F3、F6、F7)和NWW向(F11、F15)(图1c)。

通过野外地质调查,在地表出露的花岗斑岩脉内发现明显的铜蓝,并圈定出多条大小不等的矿体,其类型以矽卡岩型铜多金属矿体为主,其次为石英

脉型黑钨(辉钼)矿体,局部发育斑岩型铜(钼)矿体。矽卡岩型铜多金属矿体为隐伏矿体,主要见于钻孔中部及深部,以铜矿为主,锌多金属矿为辅,矿体大多呈厚层状、厚板状赋存于石炭系黄龙组与铁山垅岩体主体接触带处,走向呈NW-SE向展布,发育视厚度为10.01 m的矽卡岩富铜锌矿层,其中Cu的平均品位为2.86%,最高可达13.7%。石英脉型黑钨(辉钼)矿体主要发育于外接触带的石炭系,少数产在花岗岩体内部,广泛分布在钻孔中下部,以黑钨(辉钼)矿石英细脉状产出为主,其形态产状主要受断裂、裂隙及破碎带控制,与赣南盘古山云英脉型钨矿体相似,同时矿体条形较多,走向总体呈NW向、近EW向展布,矿石中 WO_3 的品位最高可达0.25%,矿化显示良好,具有一定的找矿前景。斑岩型铜(钼)矿体在矿区分布较少,以区内地表出露的花岗斑岩脉内部似层状矿体为主,钻孔中铜(钼)矿体明显受容矿裂隙控制,多呈相互平行排列的矿脉组合产出,常见尖灭再现、舒缓波状、细脉相连等现象,走向呈NW向、NE向展布,矿石最高品位Mo可达0.26%。

矿石组构以气-水热液充填-交代成因为主。矿石矿物主要为黄铁矿和黄铜矿,少量的黑钨矿、闪锌矿和辉钼矿等,呈浸染状、星点状及团块状等产出;脉石矿物有石英、方解石、绿泥石、绢云母、石榴子石和萤石等,呈粒状、块状及细脉状等产出(图2a~1)。

2 样品采集与数据分析方法

本次研究基于详细的野外地质调查及钻孔岩芯编录,选取铜岭下矿区及外围的9个钻孔(ZK3-1、ZK3-2、ZK8-1、ZK8-2、ZK9-3、ZK9-4、ZK12-1、ZK20-1、ZK100-1)的全孔岩芯样品,其中针对矿化与蚀变矿物关系紧密的钻孔ZK8-1实行了0.5~1.0 m采样间距,其余钻孔均为2 m采样间距,共获得钻孔样品1251件。

样品分析主要采用短波红外+热红外光谱测量方法,辅助以显微镜下观察和矿物地球化学的电子探针分析方法。

(1) 光谱测试与分析

短波红外光谱测量选取中国中地仪器有限公司生产的便携式近红外矿物分析仪BJKF-3(光谱测量范围为1300~2500 nm);热红外光谱测量选取美国安捷伦仪器有限公司生产的便携式傅里叶变换红外光

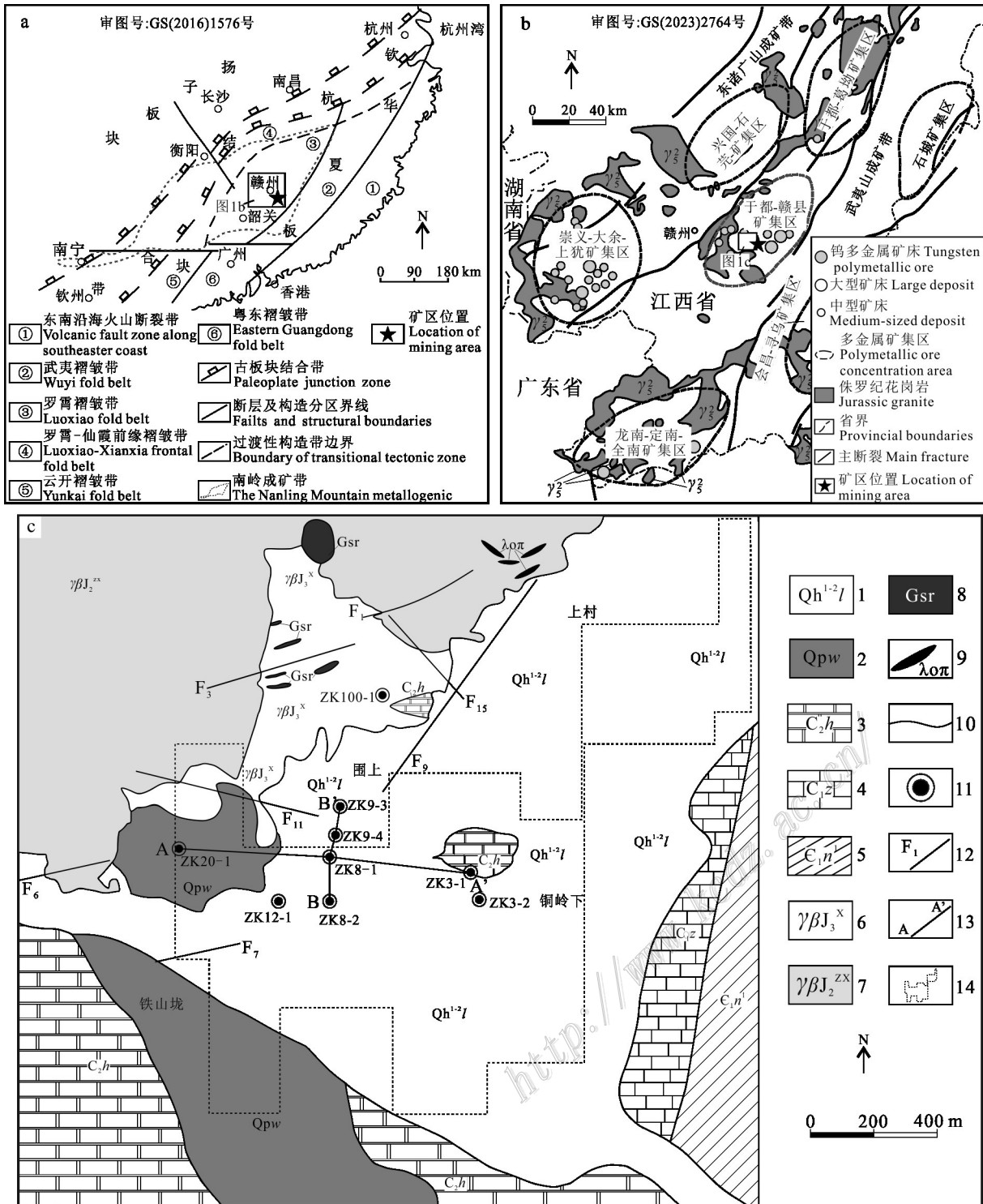


图1 铜岭下矿区大地构造位置图(a, 据赵如意等, 2020 修改)、铜岭下矿区所处矿集区(b, 据尹政等, 2021 修改)和铜岭下矿区地质简图(c)

1—第四系全新统联圩组; 2—第四系更新统望高组; 3—石炭系上统黄龙组; 4—石炭系下统梓山组; 5—寒武系下统牛角河组; 6—晚侏罗世粗粒黑(二)云母花岗岩; 7—中侏罗世中(粗)粒似斑状黑云母花岗岩; 8—云英岩化花岗岩; 9—石英斑岩脉; 10—地质界线;

11—光谱测量钻孔; 12—主要断层及编号; 13—光谱填图剖面; 14—研究区范围

Fig. 1 Geotectonic location (a, modified from Zhao et al., 2020), ore concentration area (b, modified from Yin et al., 2021) and simplified geological map of the Tonglingxia deposit (c)

1—Quaternary Holocene Lianxu Formation; 2—Quaternary Pleistocene Wanggao Formation; 3—Upper Carboniferous Huanglong Formation; 4—Lower Carboniferous Zishan Formation; 5—Lower Cambrian Niujiaohe Formation; 6—Late Jurassic fine-grained biotite (two-mica) granite; 7—Middle Jurassic medium (coarse) grained porphyritic biotite granite; 8—Granite with greisenization; 9—Quartz porphyry dyke; 10—Geological boundary; 11—Spectral measurement borehole; 12—Main faults and numbering; 13—Spectral mapping profile; 14—Scope of study area

谱分析仪 Agilent Technologies 4300 Handheld FTIR (光谱测量范围为 2500~15 500 nm)。2 种红外光谱仪器均在室内进行测样,这避免了大气辐射及天气变化的影响,并保证了样品的完整性,实现了快速、无损分析(王猛等,2023)。

在开展红外光谱测量前,先将样品洗净、晾干,避免样品表面的杂物或水分对光谱特征产生影响;选取岩石光滑、平整的新鲜面作为测试点,按照钻孔深度逐一扫描,确保不同仪器在同一位置测量。另外,在确保样品数据正常获得的前提下,对每个测试点周围 2~3 cm 范围内多测 1~3 个点,最后将所测得的光谱曲线进行归一化处理。

测量的波谱数据利用 TSG(The Spectral Geology) 光谱地质软件进行解译分析,该软件专为地质光谱解译开发,能够自动实现矿物类型的总体识别(郭娜等,2017;黄一入,2021;刘新星等,2021),并且通过该软件的 Scalar 计算平台可以提取各类蚀变矿物的波谱特征参数,用以统计与矿物地球化学等特征的相关性。

(2) 辅助测试与分析

根据野外编录以及红外光谱测试、解译结果,对典型蚀变矿物所在位置进行圈样,磨制成 35 mm×25 mm,厚 0.03 mm 的标准电子探针片。镜下鉴定工作在成都理工大学矿物实验室采用莱卡 DM2500P 偏光显微镜完成,主要针对矿物的颜色、类型及共生依存关系等进行分析。

光学显微镜下标记后的样品,在广州市拓岩检测技术有限公司利用日本 JEOL 公司生产的 JXA-iSP100 型电子探针显微分析仪(加速电压 15 kV; 电流 20 nA; 电子束斑直径 5 μm; 校正 ZAF; 温度 25℃; 湿度 55%~60%)对蚀变矿物中元素种类、含量等进行测试与分析。

3 测试与分析结果

3.1 蚀变矿物类型识别及空间分布特征

通过短波红外+热红外光谱测量,笔者确定出了矿区及外围 9 个钻孔中的蚀变矿物主要包括绢(白)云母、高岭石、蒙脱石、绿泥石、蛇纹石、石英、长石、

石榴子石和辉石等,总体以泥化矿物为主。其中,矿区北部钻孔 ZK9-3、ZK9-4、ZK100-1 蚀变矿物总体表现为绢(白)云母+蒙脱石+高岭石+石英+长石+(蛇纹石+绿泥石)的组合特征;矿区中部钻孔 ZK3-1、ZK8-1、ZK20-1 蚀变矿物总体表现为绢(白)云母+蒙脱石+蛇纹石+绿泥石+(高岭石+金云母+黑云母+长石+石榴子石+辉石)的组合特征;矿区南部钻孔 ZK3-2、ZK8-2、ZK12-1 蚀变矿物总体表现为绢(白)云母+蒙脱石+高岭石+绿泥石的组合特征。不同钻孔中的蚀变矿物具有一定的差异性,并在总体上形成了蚀变矿物组合特征变化(表 1)。

3.1.1 典型钻孔蚀变矿物分带特征

以 0.5~1.0 m 采样间距的钻孔 ZK8-1 为例,短波红外光谱测量发现绢(白)云母、绿泥石、蛇纹石和金云母等矿物。蚀变组合分带特征表现为(地表向深部):钻孔顶部(0~50 m)未发现明显蚀变,以地层岩性白云质大理岩为特征;50 m 以下发现蚀变较强,但以泥化为特征,其中,50~110 m 发现金云母+蛇纹石+高岭石的蚀变矿物组合;110~130 m 及 180~200 m 为白云质大理岩,未发生蚀变,而 130~180 m 中蛇纹石逐步退蚀变为绿泥石,形成与上层类似的金云母+蛇纹石+绿泥石蚀变矿物组合;200~250 m 退蚀变程度加剧,蛇纹石进一步转变为绿泥石,形成绿泥石+蛇纹石的矿物组合;250~280 m 仍残余少量绿泥石,形成白云母+蒙脱石+绿泥石组合,280~300 m 则完全为泥化矿物白云母+蒙脱石(图 3a)。

热红外光谱测量发现石英、菱铁矿、长石以及少量石榴子石和黑云母等矿物。热红外蚀变组合分带特征表现为(地表向深部):0~50 m 富含菱铁矿,说明该套碳酸盐地层富含 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} ;50~110 m 发现少量石榴子石,形成菱铁矿+菱镁矿+绿泥石+石榴子石组合;110~130 m 及 180~200 m 为白云质大理岩,但富含菱铁矿,130~180 m 为菱铁矿+绿泥石+黑云母组合;200~250 m 蚀变矿物与上层相同,仍为菱铁矿+绿泥石+黑云母组合;250 m 以深除泥化蚀变外,还出现少量长石,石英表现出的流体特征显著,深部钻探工程已至花岗岩岩体顶部(图 3b)。

矿体主要形成于弱矽卡岩化大理岩中,与蚀变关系密切。Cu-Zn 矿化未发现明显的空间分带性,

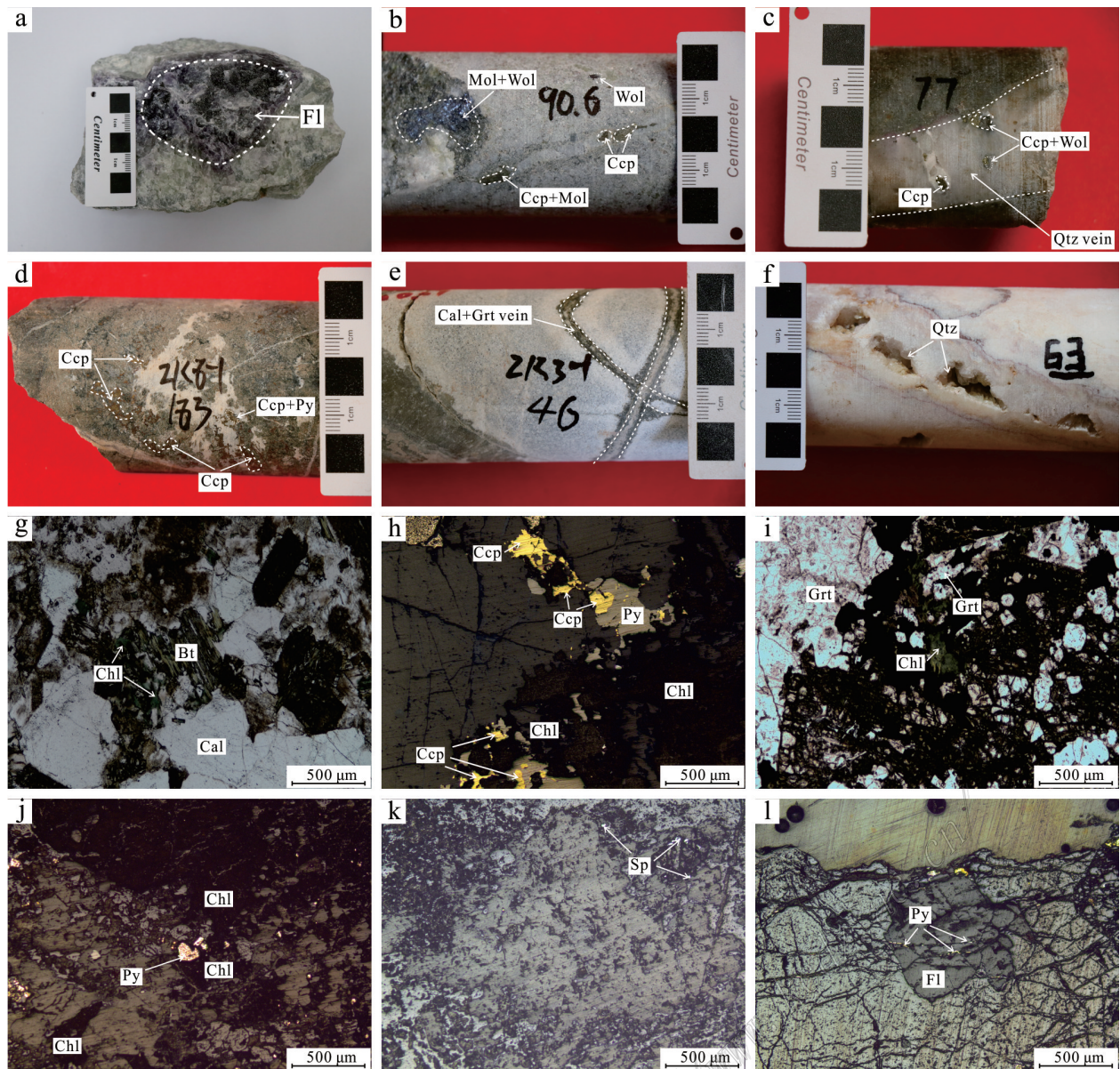


图2 铜岭下矿区矿物典型照片

a. 块状构造, 紫色萤石; b. 团块状辉钼矿+黑钨矿-黄铜矿+辉钼矿-黑钨矿-黄铜矿; c. 石英脉体中团块状黄铜矿-黄铜矿+黑钨矿; d. 砂岩中浸染状黄铜矿-星点状黄铜矿+黄铁矿; e. 含方解石+石榴子石砂岩脉体交错脉状构造; f. 晶洞构造, 由洞壁向中心生长出较完好的晶形, 含刀片状方解石; g. 黑云母发生绿泥石化; h. 浸染状构造, 他形粒状黄铜矿-黄铁矿, 黄铜矿、黄铁矿呈共边结构; i. 石榴子石绿泥石化; j. 浸染状黄铁矿被包含于绿泥石中; k. 自形粒状闪锌矿; l. 黄铁矿沿萤石裂隙呈充填结构

Fl—萤石; Qtz—石英; Cal—方解石; Grt—石榴子石; Bt—黑云母; Chl—绿泥石; Ccp—黄铜矿; Py—黄铁矿; Mol—辉钼矿; Wol—黑钨矿; Sp—闪锌矿

Fig. 2 Typical photos of minerals in the Tonglingxia mining area

a. Massive structure, purple fluorite; b. Block like molybdenite+wolframite- chalcopyrite+molybdenite-wolframite- chalcopyrite; c. Massive chalcopyrite- chalcopyrite+wolframite in quartz veins; d. Disseminated chalcopyrite-star shaped chalcopyrite+pyrite in skarn; e. Interlaced vein like structure of calcite+garnet bearing skarn veins; f. Crystal cavity structure, which grows relatively intact crystal form from the wall to the center, containing blade shaped calcite; g. Biotite undergoes chloritization; h. Disseminated structure, anhedral granular chalcopyrite-pyrite, chalcopyrite and pyrite present a co-edge structure; i. Garnet with chloritization; j. Disseminated pyrite is contained in chlorite; k. Euhedral granular sphalerite; l. Pyrite exhibits a interstitial structure along fluorite cracks

Fl—Fluorite; Qtz—Quartz; Cal—Calcite; Grt—Garnet; Bt—Biotite; Chl—Chlorite; Ccp—Chalcopyrite; Py—Pyrite; Mol—Molybdenite; Wol—Wolframite; Sp—Sphalerite

表 1 铜岭下矿区钻孔主要蚀变矿物组合

Table 1 Main alteration mineral assemblages in boreholes of the Tonglingxia mining area

钻孔号	孔深/m	钻孔中主要蚀变矿物类型
ZK3-1	210.72	绢(白)云母+蒙脱石+绿泥石+(高岭石+石榴子石+石英+长石)
ZK3-2	550.70	绢(白)云母+蒙脱石+(绿泥石+蛇纹石+高岭石)
ZK8-1	302.33	绢(白)云母+蒙脱石+蛇纹石+绿泥石+金云母+(高岭石+黑云母+石榴子石+长石)
ZK8-2	450.15	绢(白)云母+蒙脱石+绿泥石+(高岭石)
ZK9-3	152.11	绢(白)云母+蒙脱石+高岭石+石英+长石
ZK9-4	231.99	绢(白)云母+石英+长石+(蒙脱石+高岭石+绿泥石)
ZK12-1	450.15	绢(白)云母+蒙脱石+高岭石+(绿泥石)
ZK20-1	98.90	绢(白)云母+石英+蒙脱石+高岭石+(石榴子石+辉石+长石)
ZK100-1	204.43	绢(白)云母+蒙脱石+高岭石+(蛇纹石)

表现出 Cu-Zn 共存、即高 Cu 则高 Zn 的成矿元素分布规律(图 3c、d)。以野外钻孔编录资料为基础,结合钻孔蚀变矿物组合分带特征,矽卡岩化主要出现在 50~110 m 和 130~180 m,流体沿黄龙组裂隙发生接触交代作用,岩性与蚀变矿物组合分带的关系表现为:顶部矽卡岩化大理岩(绿泥石+蛇纹石+金云母)→中部矽卡岩化大理岩(绿泥石+金云母)→底部矽卡岩化大理岩(绿泥石+长石)(图 3e)。

由前述可以看出:①酸性岩浆流体沿断层或岩石裂隙等构造与黄龙组发生接触交代作用后形成矽卡岩,表现为早期石榴子石+辉石组合,但由于大气降水和地下水的影响导致温度快速下降,石榴子石蚀变形成绿泥石,辉石蚀变为蛇纹石,并进一步也转变为绿泥石,因此钻孔中可见较多绿泥石矿物,而少见矽卡岩早期的矿物;② 50~110 m 和 130~180 m 处与富镁地层形成镁质弱矽卡岩化,并可能存在断层,致使钻孔中这 2 段的蚀变相对较强,但由于热红外测得石英含量极低,说明流体活动特征极弱。同时,岩体顶部也由于大气降水和地下水的灌入发生了较强的泥化,进而形成大量蒙脱石矿物。

3.1.2 典型蚀变矿物光谱特征

(1) 蛇纹石

蛇纹石作为岩浆-热液矿床中常见的蚀变矿物之一,通常由橄榄石、辉石等矿物水热蚀变而来或由酸性热液流体与富镁碳酸盐岩经区域变质作用交代形成(袁珊,2021;周志强,2021),因其矿物晶格内不同的离子含量,蛇纹石常表现出不同的颜色(杜广鹏等,2018;郑金宇等,2021)。短波红外范围内,蛇纹石主要特征吸收峰位于 2325 nm 附近,同时,2115 nm 和 2135 nm 出现较弱的双峰,但总体是以 2325 nm 附

近的光谱吸收峰来提取蛇纹石矿物特征。从空间分布特征来看(图 3),矿区内蛇纹石与 Cu-Zn 矿化紧密依存,提取 2325 nm 附近的光谱吸收深度作为矿物的相对含量指标,与 Cu 矿化品位进行对比后发现:两者呈正相关关系(图 4a);蛇纹石在显微镜下呈纤维状集合体产出,一级灰白干涉色,具有黄色弱多色性(图 4b);矿区内典型蛇纹石的短波红外光谱曲线与标准曲线相对比,特征吸收峰位于 2334 nm 处(图 4c),朝长波方向偏移,可能是矿物晶格内离子替换的结果(郭娜等,2022)。

(2) 绿泥石

绿泥石是一种含 OH⁻的富镁、铁层状硅酸盐矿物(Chu et al., 2020),在短波红外光谱范围具有明显的吸收特征,主要位于 1910 nm、2000 nm、2250 nm 和 2350 nm,其中 2250 nm 和 2350 nm 分别对应 Fe-OH 和 Mg-OH 两个诊断特征官能团(梁树能等,2014)。研究表明,绿泥石 Fe-OH 特征吸收峰位置受其铁镁组分含量的影响,一般情况下富铁绿泥石特征吸收峰位于 2265 nm 的长波附近,而富镁绿泥石特征吸收峰则位于 2245 nm 的短波附近(汪重午等,2014;成嘉伟等,2023)。研究区的绿泥石多由石榴子石和蛇纹石退蚀变形成(图 4d、e),矿区内分布较多,尤其在蚀变较强部位,绿泥石含量更高;经短波红外光谱测量后发现,区内绿泥石 Fe-OH 特征吸收峰位置为 2243 nm,具有富镁(铁)绿泥石的特征(图 4f)。

(3) 绢(白)云母

绢云母族矿物的光谱特征主要体现在短波红外波段 2200 nm 附近的 Al-OH 吸收峰,其次在 1400 nm、2350 nm 附近存在次一级吸收峰(Duke, 1994)。在热液矿床中,绢云母族矿物通常会受热液流体的温度、pH 值以及蚀变区域压力等因素的影响,导致其

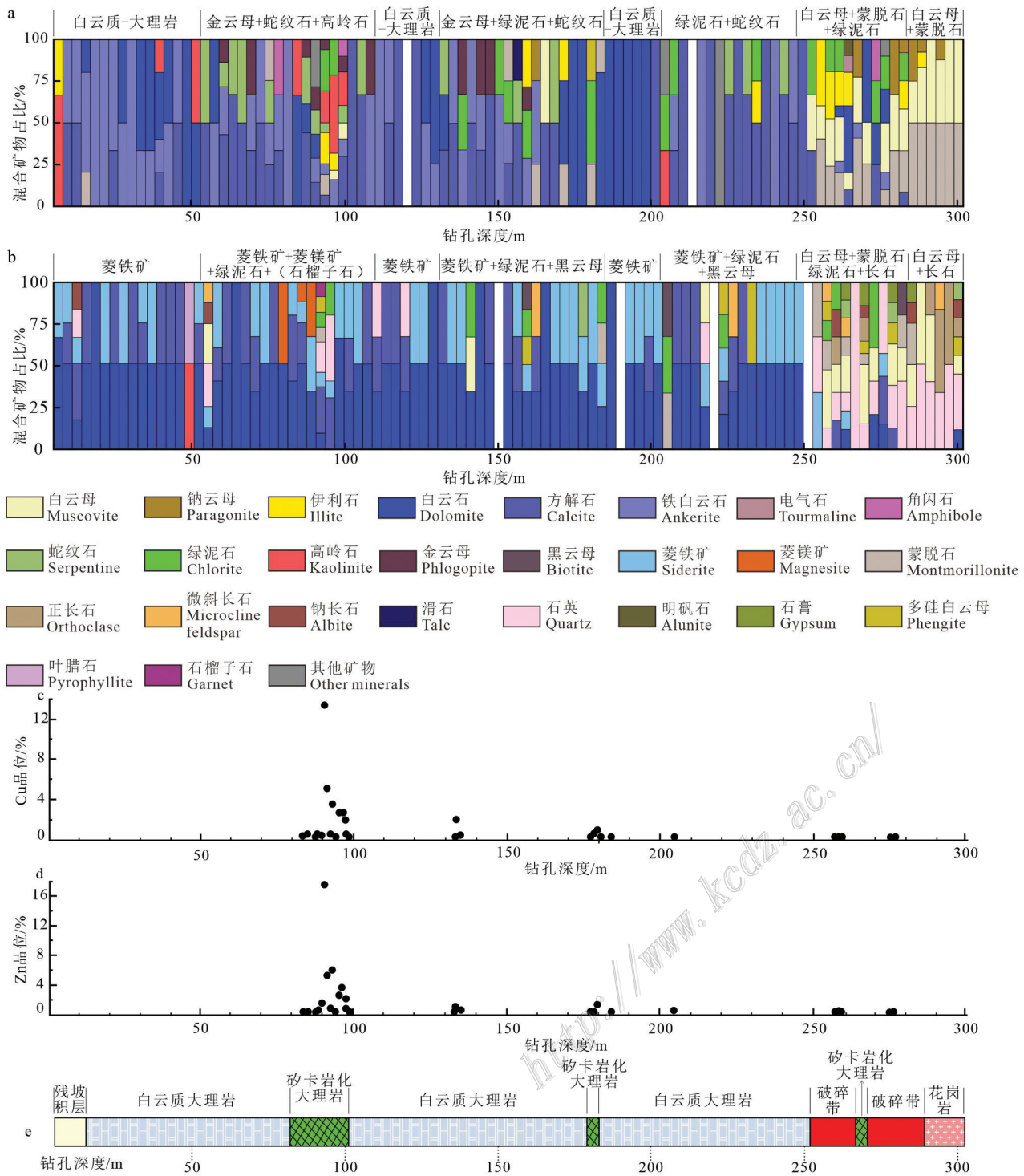


图 3 铜岭下矿区钻孔 ZK8-1 矿物蚀变分带特征

a. 短波红外蚀变矿物分布图; b. 热红外蚀变矿物分布图; c. Cu 品位-深度关系变化散点图; d. Zn 品位-深度关系变化散点图; e. 岩性分布示意图

Fig. 3 Mineral alteration zoning characteristics of borehole ZK8-1 from the Tonglingxia mining area

a. Distribution map of alteration minerals identified by short wave infrared spectrum; b. Distribution map of alteration minerals identified by thermal infrared spectrum; c. Scatter plot of Cu grade vs depth. d. Scatter plot of Zn grade vs depth; e. Schematic diagram of lithological distribution

二八面体结构常发生 $Al^{IV} \leftrightarrow Si$ 、 $Al^{VI} \leftrightarrow Fe+Mg$ 的 Tschermak 反应 (Clark et al., 1990), 在波谱中表现为在

2190~2220 nm 之间移动 (任欢等, 2020; 郭娜等, 2018); 根据元素含量的不同, 绢云母可以进一步分

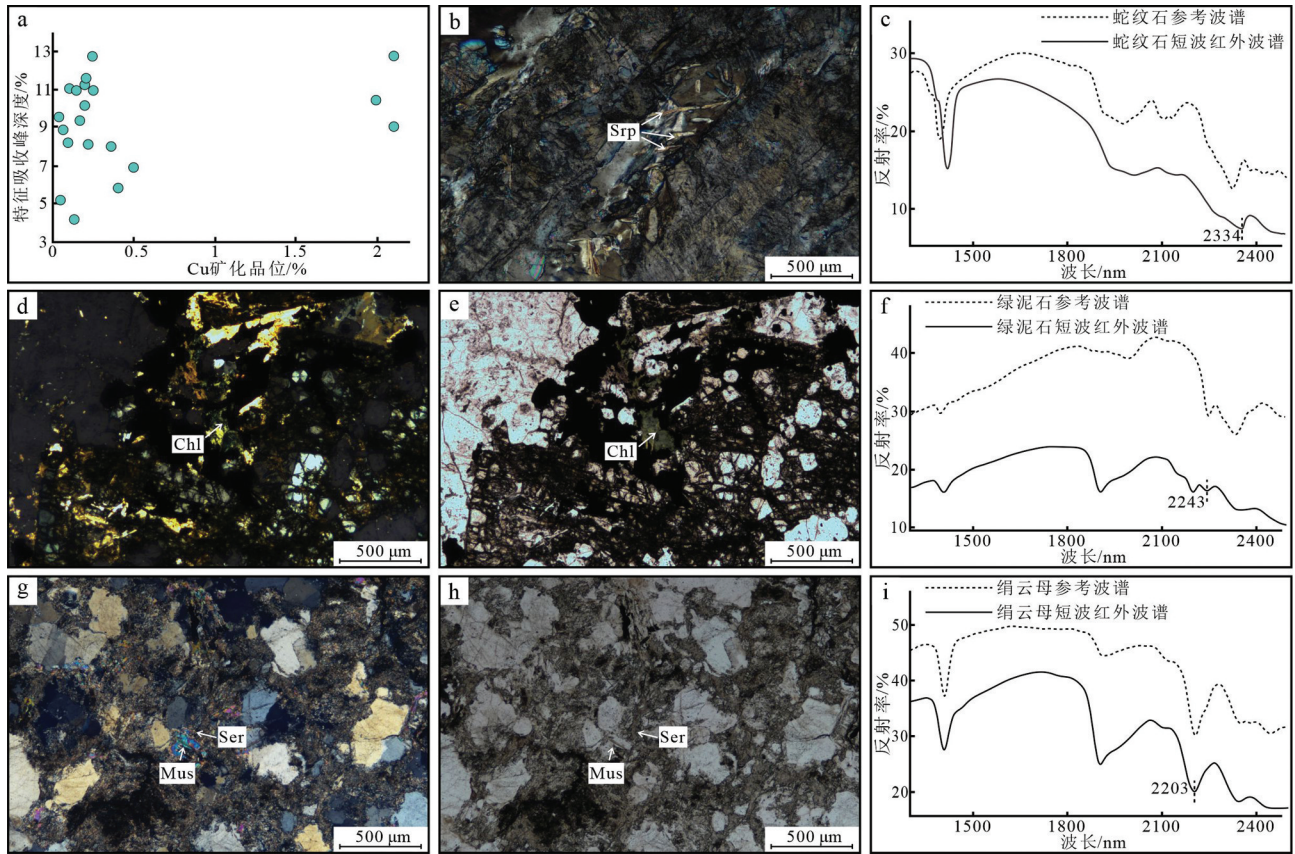


图 4 矿区与主要蚀变矿物显微镜下及光谱特征曲线图

a. 钻孔 ZK8-1 中蛇纹石 2325 nm 附近特征吸收峰深度与 Cu 品位变化散点图; b. 钻孔 ZK3-2-472 m 蛇纹石显微镜下照片; c. 钻孔 ZK3-2-472 m 蛇纹石短波红外光谱曲线; d, e. 钻孔 ZK8-1-94.5 m 绿泥石显微镜下照片; f. 钻孔 ZK8-1-94.5 m 绿泥石短波红外光谱曲线; g, h. 钻孔 ZK8-1-278 m 绢云母显微镜下照片; i. 钻孔 ZK8-1-278 m 绢云母短波红外光谱曲线

Srp—蛇纹石; Chl—绿泥石; Mus—白云母; Ser—绢云母

Fig. 4 Microscopic and spectral characteristics of main alteration minerals in the mining area

a. Scatter plot of characteristic absorption peak depth and Cu grade change near 2325 nm for serpentine in borehole ZK8-1; b. Microscopic photo of serpentine in drill hole ZK3-2-472 m depth; c. Short wave infrared spectrum of serpentine in borehole ZK3-2-472 m depth; d, e. Microscopic photos of chlorite in borehole ZK8-1-94.5 m depth; f. Short wave infrared spectrum of chlorite in borehole ZK8-1-94.5 m depth; g, h. Microscopic photo of sericite in drill hole ZK8-1-278 m depth; i. Short wave infrared spectrum of sericite in borehole ZK8-1-278 m depth

Srp—Serpentine; Chl—Chlorite; Mus—Muscovite; Ser—Sericite

为钠云母(<2198 nm 向短波附近移动)、普通绢云母(位于 2200 nm 附近)、多硅白云母(>2208 nm 向长波附近移动),其区别在于钠云母 Al、Na 含量较高,当温度、压力下降时,矿物晶格内 Si、Fe、Mg 和 Ti 含量升高(成嘉伟等,2023),逐步转变为普通绢云母和多硅白云母。以钻孔 ZK8-1 中的绢云母为例,在显微镜下呈细鳞片状集合体产出,具有二级黄绿干涉色(图 4g, h);同时,将其光谱曲线与绢云母标准曲线相比较,发现 Al-OH 吸收峰位置位于 2203 nm(图 4i),为普通绢云母,说明该钻孔的绢云母主要产于相对中低温环境。

3.2 矿区蚀变填图

以矿化中心钻孔 ZK8-1 所在的 8 勘探线(A-A')以及垂直于 8 线的 B-B' 在空间上形成一个“十字”剖面,根据红外光谱测量结果对其进行二维(图 5a, b)和三维(图 5c)精细化蚀变填图,发现区内蚀变类型主要有矽卡岩化(石榴子石、辉石、金云母和蛇纹石)、钾化(钾长石)、碳酸盐化(白云石、方解石和铁白云石)、绿泥石化、绢英岩化、高岭石化、蒙脱石化等。其中,钾化蚀变和绢英岩化多发生在矿区北部的花岗岩体和花岗斑岩脉体中,并且长石斑晶发生蚀变,形成大量蒙脱石矿物,推测受到大气降水和地

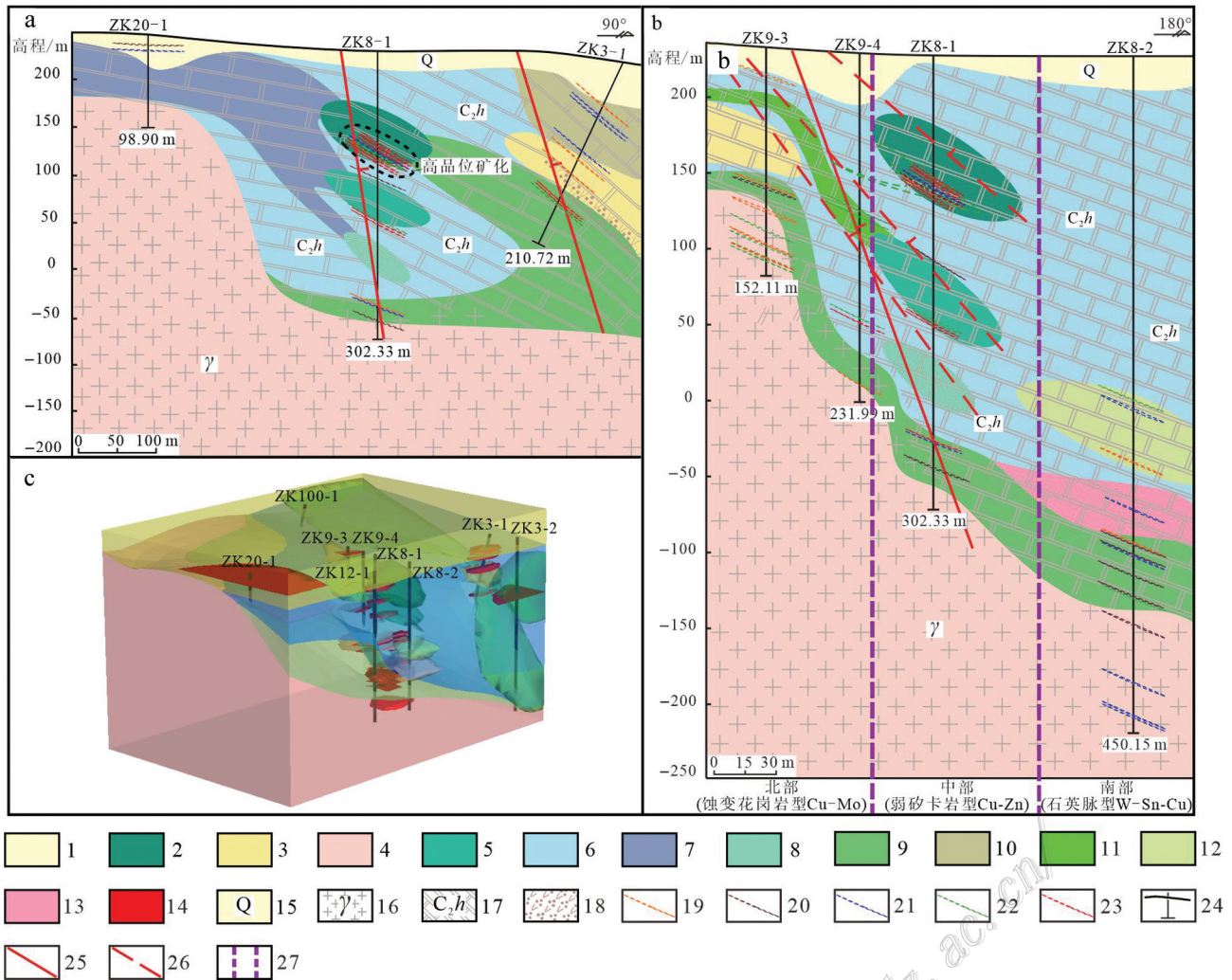


图5 铜岭下矿区二维(a、b)和三维(c)精细化蚀变填图

- 1—白云母+高岭石+石英; 2—蛇纹石+金云母+(绿泥石+高岭石); 3—白云母+石英+蒙脱石; 4—白云母+蒙脱石+石英+(高岭石+钾长石);
- 5—蛇纹石+金云母+绿泥石; 6—碳酸盐化; 7—蒙脱石+石榴子石+辉石; 8—蛇纹石+白云母+绿泥石; 9—白云母+蒙脱石+石英+绿泥石;
- 10—石英+蒙脱石+绿泥石+(石榴子石); 11—白云母+蒙脱石+石英+绿泥石+(黝帘石); 12—白云母+蒙脱石+绿泥石; 13—明矾石+白云母+高岭石; 14—三维矿体; 15—第四系残、坡积物; 16—侏罗纪花岗岩体; 17—黄龙组白云质大理岩; 18—石英斑岩; 19—钼矿体;
- 20—锡矿体; 21—钨矿体; 22—铜矿体; 23—锌矿体; 24—钻孔; 25—实测断层; 26—推测断层; 27—成矿系统分界线

Fig. 5 Fine alteration mapping of two-dimensional (a, b) and three-dimensional (c) in the Tonglingxia mining area

- 1—Muscovite+kaolinite+quartz; 2—Serpentine+phlogopite+(chlorite+kaolinite); 3—Muscovite+quartz+montmorillonite; 4—Muscovite+montmorillonite+quartz+(kaolinite+potassium feldspar); 5—Serpentine+phlogopite+chlorite; 6—Carbonation; 7—Montmorillonite+garnet+pyroxene; 8—Serpentine+muscovite+chlorite; 9—Muscovite+montmorillonite+quartz+chlorite; 10—Quartz+montmorillonite+chlorite+(garnet); 11—Muscovite+montmorillonite+quartz+chlorite+(zoisite); 12—Muscovite+montmorillonite+chlorite; 13—Alunite+muscovite+kaolinite; 14—Ore body in three dimension; 15—Quaternary residual and slope deposits; 16—Jurassic granite body; 17—Huanglong Formation dolomitic marble; 18—Quartz porphyry; 19—Molybdenum ore body; 20—Tin ore body; 21—Tungsten ore body; 22—Copper ore body; 23—Zinc ore body; 24—Drill hole;
- 25—Measured fault; 26—Inferred fault; 27—Boundary of mineralization system

下水的影响,同时,在岩体顶部与围岩接触部位形成Cu-Mo矿化,位于矿化中心钻孔ZK8-1的北部。矽卡岩化主要发生在矿区中部,矽卡岩化较弱,多由矽卡岩晚期退蚀变阶段的矿物组成,推测受到大气降

水和地下水的影响导致其矿物形成受到阻碍;在矽卡岩退蚀变阶段形成蛇纹石的过程中,Cu-Zn元素随之结晶,形成黄铜矿、闪锌矿等金属硫化物,同时,在矿化中心钻孔ZK8-1处产生了高品位矿化(Cu最

高品位 13.7%, Zn 最高品位 17.9%), 构成了弱矽卡岩型 Cu-Zn 矿化体系。岩浆期后形成了富含 SiO₂ 的热液流体并快速流经围岩裂隙带中, 进而在矿化中心钻孔 ZK8-1 的南部生成石英脉型钨(锡、铜)矿化, 主要分布于矿区南部裂隙发育的岩体与围岩接触带内的石英细脉带中, 具有石英脉型 W-Sn-Cu 成矿特征。

综上所述, 铜岭下矿区形成了一套复合成矿体系, 具体可以将其划分为(N→S)蚀变花岗岩型 Cu-Mo 矿化→弱矽卡岩型 Cu-Zn 矿化→石英脉型 W-Sn-Cu 矿化。

3.3 绿泥石 EPMA 分析结果

对区内不同深度绿泥石样品进行 EPMA 成分分析(表 2), 研究结果显示, $w(\text{SiO}_2)$ 为 24.36%~32.69%, 平均为 27.81%; $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 15.26%~20.05%, 平均为 18.08%; $w(\text{FeO})$ 为 1.45%~37.44%, 平均为 26.19%; $w(\text{MgO})$ 为 4.79%~31.36%, 平均为 13.55%。其中, 绿泥石的硅铝元素含量变化较小, 而铁镁元素含量变化较大, 推测区内普遍存在铁镁相互置换作用, 这与光谱测量结果一致。

4 讨论

4.1 光谱勘查标志的建立

光谱勘查标志建立的核心是通过矿物含量、晶格特征等在红外波段的集合显示, 反映矿物与矿化、流体之间的关系。光谱特征参数(特征吸收峰、半高宽、结晶度)正是红外波谱特征的定量化表达, 可通过求取相关参数反演矿床形成环境, 实现从矿物到矿床的理解转变(Thompson et al., 1999; 成嘉伟等, 2023)。

目前, 光谱勘查标志在各类矿床中的建立愈发成熟, 刘鹤等(2015)通过研究福建铁帽山钨矿床时提出伊利石结晶度值越高, 钨矿化作用越好; 张炎等

(2021)对遂昌金矿的绿泥石 Fe-OH 吸收峰进行提取和分析时指出, 距离矿化中心越近, 绿泥石 Fe-OH 吸收峰向长波移动。本研究提取了区内的绢云母族矿物以及矿区中部矽卡岩退蚀变矿物绿泥石, 厘定出绢云母和绿泥石的光谱特征参数, 开展了矿物波谱与铜矿化品位的相关性分析, 进而建立了研究区的光谱勘查标志。矿区南部石英脉型 W-Sn-Cu 矿化与蚀变关系不大, 本文不做讨论。

4.1.1 绢云母族矿物勘查标志

绢云母 Al-OH 波长(Pos2200)的变化主要由于温度差异而导致 Al、Na 等元素含量不同(杨志明等, 2012), Scott 等(2015)也指出 pH 值是影响其波谱位移的重要因素。另外, 压力也是不可忽视的重要因素(Jones et al., 2005), 郭娜等(2022)提出 2200 nm 附近白云母波谱特征既可指示温度变化, 又可指示 pH 值、压力、矿物晶格元素比及矿物含水量变化。因此作者采用 2200 nm 附近 Al-OH 波长来反演研究区成矿流体温度变化, 进而判断成矿流体的运移轨迹和深部流体来源。Guo 等(2019)利用绢云母 Pos2200 确定出甲玛斑岩-矽卡岩型矿床的热液中心。另外, 伊利石作为绢云母族矿物的一种, 与绢云母主要的区别在于温度和压力下降后, 矿物晶格间含水量会增加, 从而 1900 nm 处的吸收峰深度(Dep1900)增强, 结晶度(IC=Dep2200/Dep1900)降低, 因此, 伊利石结晶度常被作为温度变化参数(Chang et al., 2011; 田丰等, 2019)。

笔者选取矿区北部绢云母族矿物较多的钻孔 ZK9-3 和 ZK9-4 进行研究, 通过统计和分析钻孔中绢云母 Pos2200 值以及伊利石 IC 值, 发现绢云母 Pos2200 值变化区间为 2200~2210 nm(图 6a), 波谱 IC 值变化区间为 0.39~1.67(图 7); 同时, 提取矿区中部和南部钻孔 ZK8-1、ZK8-2 绢云母 Pos2200 值, 对区内成矿流体运移轨迹进行反演(图 8)。

表 2 区内绿泥石矿物 EPMA 分析结果(w(B)/%)

Table 2 EPMA analysis results of chlorite minerals from the mining area (w(B)/%)

样品编号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	总和
ZK3-1-110	31.06	0	17.49	18.64	0.17	20.32	0.13	0.02	0.03	0.22	88.08
ZK3-2-302	26.68	0	15.75	31.82	0.67	10.85	0.04	0	0	0.05	85.86
ZK8-1-94.5	25.48	0	19.91	33.50	2.81	6.15	0.09	0.02	0.02	0.22	88.20
ZK8-1-139	26.69	0.02	15.26	25.99	1.84	14.39	0.16	0.01	0.02	0.54	87.92
ZK8-1-159.5	27.15	0	16.51	29.13	0.24	13.51	0.09	0	0	0.09	86.72
ZK8-1-204	25.03	0.04	19.87	33.45	2.11	7.34	0.05	0	0.02	0.01	87.92
ZK8-1-222.5	24.36	0.01	19.95	37.44	0.74	4.79	0.38	0.02	0.01	0.06	87.76
ZK8-2-235	28.72	0	16.53	26.69	2.52	12.38	0.47	0.01	0.02	0.09	87.43
ZK8-2-330	32.69	0.08	19.48	1.45	0.02	31.36	0.27	0	0.01	0.16	85.52
ZK8-2-346	27.21	0.01	20.05	23.84	0.15	14.40	0.25	0	0.02	0.20	86.13

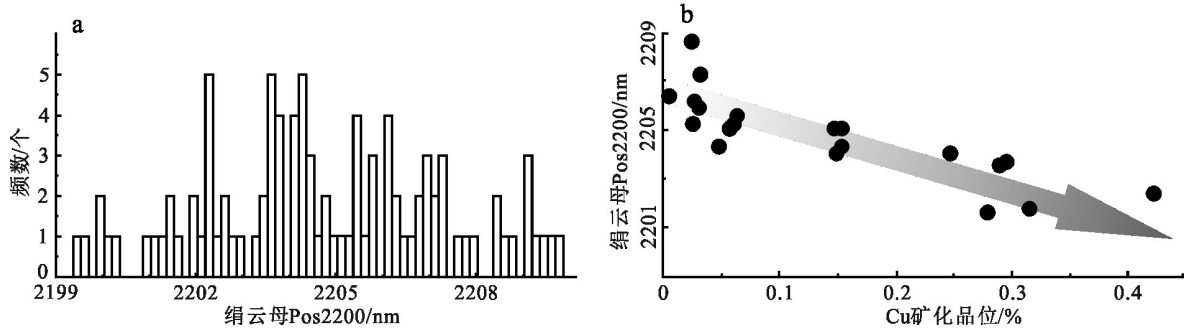


图6 矿区北部绢云母Pos2200统计图(a)和ZK9-3绢云母Pos2200与铜矿化变化散点图(b)

Fig. 6 Statistical diagram of sericite Pos2200 in the northern part of the mining area (a) and scatter plot of sericite Pos2200 vs copper grade in drill hole ZK9-3 (b)

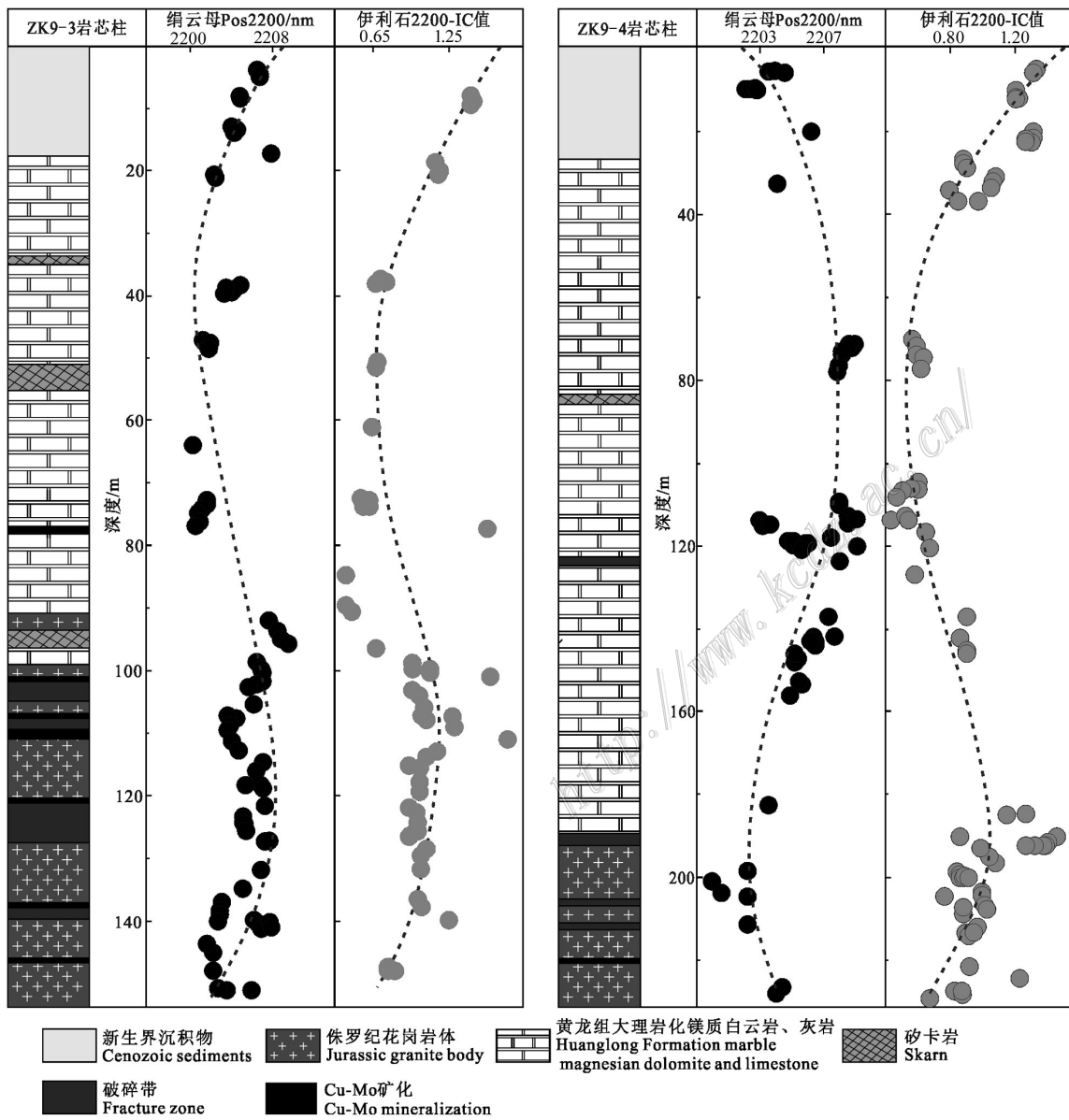


图7 矿区北部绢云母Pos2200和伊利石IC值变化示意图

Fig. 7 Schematic diagram of sericite Pos2200 and illite IC value changes in the northern part of the mining area

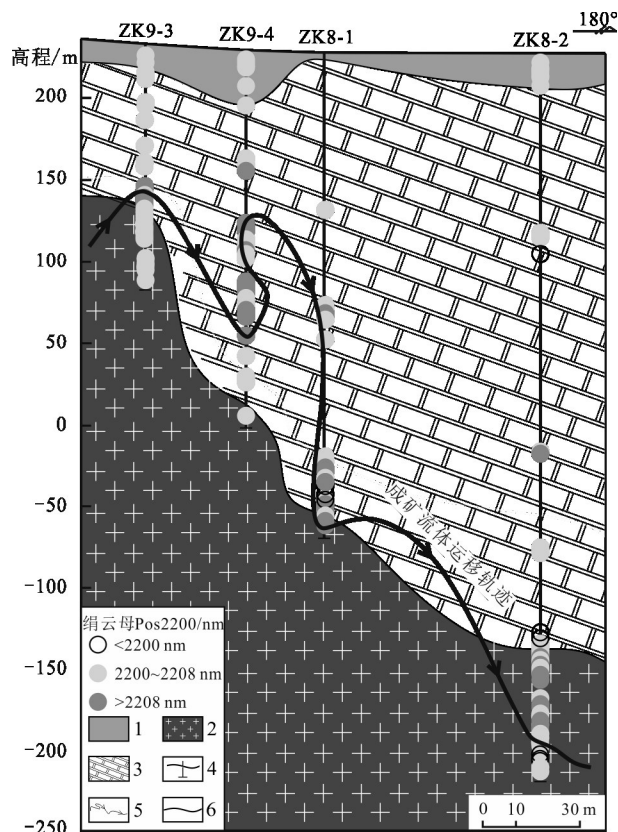


图8 成矿流体运移光谱反演示意图

1—新生界沉积物;2—侏罗纪花岗岩体;3—黄龙组大理岩;4—钻孔;5—成矿流体运移轨迹;6—地质界线

Fig. 8 Schematic diagram of spectral inversion of ore-forming fluid migration

1—Cenozoic sediments; 2—Jurassic granite body; 3—Huanglong Formation marble; 4—Drill hole; 5—Migration trail of ore-forming fluids; 6—Geological boundary

由光谱解译图(图7,图8)可以看出:①矿区北部以普通绢云母为主,存在少量多硅白云母,缺少钠云母,其中钻孔ZK9-3的绢云母与Cu-Mo共存且含量较多,多发育于岩体顶部,推测金属元素可能来源于岩浆流体;钻孔ZK9-4的绢云母分布于白云质大理岩中,含量较少,属于后期蚀变产物,矿化较弱;②钻孔ZK9-3和ZK9-4的波谱IC值(顶→底)均出现了缓慢降低→逐渐升高的变化(0.39→1.67),指示深部伊利石矿物含水量较浅部少很多;③钻孔ZK9-3→ZK9-4→ZK8-1→ZK8-2高Pos2200值的绢云母矿物含量相对增多(北→南),指示矿区南部温度相对较低,推测成矿流体可能来源于矿区北部,具有由北向南运移的特征。

选取矿化程度较好且集中的钻孔ZK9-3,笔者

将该钻孔中Cu矿化与绢云母Pos2200进行比较,发现二者呈负相关(图6b),Cu矿化多集中于2204~2207 nm附近。

4.1.2 绿泥石矿物勘查标志

绿泥石分子式通常为 $Y_3[Z_4O_{10}](OH)_2 \cdot Y_3(OH)_6$, Y由 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 和 Al^{3+} 等金属阳离子构成,Z主要是Al和Si。其中,Al、Si组成4次配位,Mg、Fe组成6次配位。当岩浆演化和温度发生变化时,绿泥石矿物中会出现广泛的类质同象置换,形成不同类型的绿泥石(汪重午等,2014)。热液矿床中的大多含镁的蚀变矿物(阳起石、蒙脱石和金云母等矿物)会对绿泥石Mg-OH吸收峰(Pos2350)产生影响,导致其出现误差,因此,本文选用Fe-OH吸收峰(Pos2250)来反映绿泥石光谱特征变化。通过对铜岭下矿区中部绿泥石丰度较高的2个钻孔(ZK3-1和ZK8-1)进行Pos2250值的统计和分析,发现绿泥石Pos2250值变化区间为2240.6~2254.0 nm。矿区中绿泥石由深部黑云母花岗岩蚀变而来(图2g)、围岩接触带附近热液流体交代形成以及少量矽卡岩矿物退蚀变形成3部分(图2i)。矿区中部花岗岩体中绿泥石Pos2250值大多处于2247 nm(>2245 nm)附近,以铁镁绿泥石为主,蚀变接触带中及矽卡岩退蚀变带中的绿泥石Pos2250值则大多处于2243 nm(<2245 nm)附近,以镁铁绿泥石为主,Pos2250值从致矿岩体到接触带附近呈由高变低的趋势(图9)。

以钻孔富矿程度为依据,将90 m和144 m分别作为钻孔ZK8-1和ZK3-1的矿化富集中心,计算含绿泥石样品波谱变化与该中心的距离(图9),发现绿泥石波长变化与矿化距离呈正相关,认为低Pos2250值(波长<2243 nm)可以作为矿区中部找矿的一项重要指标。

笔者综合研究认为:①铜岭下矿区蚀变强度总体较弱,以泥化蚀变为主;②热红外测量结果显示石英含量较低,说明硅化较弱,流体活动不强(图3b);③伊利石波谱IC值反映出北部钻孔深部仍为花岗岩体,由于钻孔深度较小,说明北部剥蚀程度大,岩体侵入深度大,推测该位置距离热源中心更近,绢云母波长变化指出研究区成矿流体可能来源于矿区北部;④绿泥石矿物来源于不同成因组成,其中大量镁(铁)绿泥石与黄龙组相关,不能指示矿化蚀变阶段;虽然短波绿泥石对矿化具有一定指示性,但受断裂影响,导致绿泥石波长变化不具有连续性,因此预测矿体位置困难,仅可以作为一项找矿指

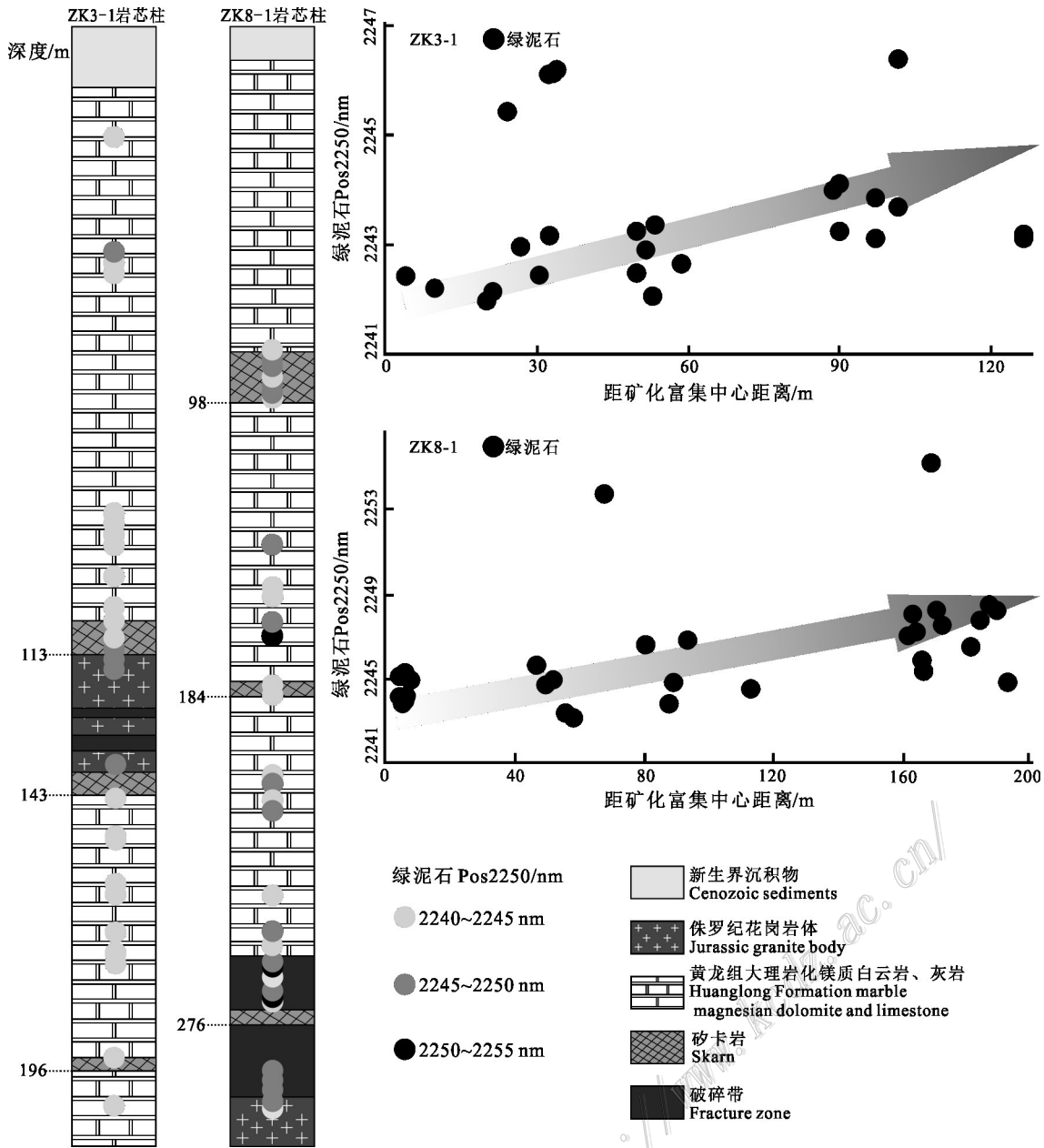


图9 矿区中部绿泥石 Pos2250 变化示意图

Fig. 9 Schematic diagram of changes in Pos2250 of chlorite in the central mining area

标;⑤ 退蚀变形成绿泥石的阶段也是矿化减弱的阶段,因此矿区内弱砂卡岩型 Cu-Zn 矿体连续性不强,矿化总体较弱;⑥ 郭娜等(2022)认为镁质砂卡岩型铜矿体大量形成的阶段与辉石蛇纹石化阶段吻合,因此, Cu 矿体大量赋存于蛇纹石蚀变带中,而蛇纹石蚀变为绿泥石的阶段,矿体则逐渐尖灭。研究区钻孔 ZK8-1 中富矿体恰好是赋存于蛇纹石蚀变带中,但其他钻孔中未见相似矿体,笔者认为区内辉石至蛇纹石化阶段,大气降水和地下水的大量

进入,导致该阶段本应形成大量 Cu 矿体的形成环境被破坏,而钻孔 ZK8-1 矿化相对较好的原因推测可能是构造的影响,交错的断裂或岩石节理恰好提供了一个相对封闭的环境,使其受到大气降水和地下水的影响较少。

4.2 光谱勘查模型构建

基于蚀变-矿化关系、矿物空间分布特征,结合矿区构造环境,笔者认为铜岭下矿床具有蚀变花岗岩型 Cu-Mo 矿化-弱砂卡岩型 Cu-Zn 矿化-石英脉型

W-Sn-Cu矿化的复合成矿系统典型特征(图10)。

通过光谱勘查模型(图10)可以看出:①矿区以北形成蚀变花岗岩型Cu-Mo矿化,找矿标志为绢云母族矿物,波谱表现为2200 nm附近的典型吸收峰特征。流体上升过程中,温压逐渐降低,花岗岩体顶部长石蚀变为绢云母,同时产生早期的Mo-Cu矿化;热液流体进一步演化形成大量绢云母,产生大量Cu矿化;但由于区内剥蚀程度强,导致仅见岩体顶部残余矿体。②矿区中部为构造影响下的弱矽卡岩型Cu-Zn矿化,其中绿泥石低Pos2250值(<2243 nm)以及蛇纹石的大量出现对矿化具有一定指示作用。区内断裂及岩石裂隙等构造发育,热液流体沿构造通道活动,并与黄龙组发生接触交代作用,形成矽卡岩,但由于构造不但为流体提供了运移通道,同时也为大气降水的入渗和地下水的渗透提供了便利的流动环境。受区域丰富地下水资源及气候条件等因素的干扰,矽卡岩形成阶段严重受大气降水和地下水

混合影响,导致形成Cu矿体的重要阶段被破坏。因此,区内矿体规模较小、矿化程度较差。③南部区域形成了石英脉型W-Sn-Cu矿化,由于光谱主要指示矿物特征,而该类型矿体与矿物分布无显著相关性,主要受区域成矿背景影响,与岩石裂隙构造发育程度相关,因此对该类型矿体无法用光谱指示。

5 结论

(1) 通过对铜岭下矿区ZK8-1等9个钻孔开展红外光谱测量工作,发现区内蚀变强度总体较弱,以泥化蚀变为主,同时,石英含量低,说明区内流体活动不强。矿区北部Cu-Mo矿化主要分布于花岗岩体顶部,以绢云母族矿物为找矿标志;矿区中部Cu-Zn矿化处于花岗岩体侵入的地层接触带,以绿泥石低Pos2250值(<2243 nm)以及蛇纹石大量出现和断裂构造的分布为找矿标志;矿区南部W-Sn-Cu矿化与

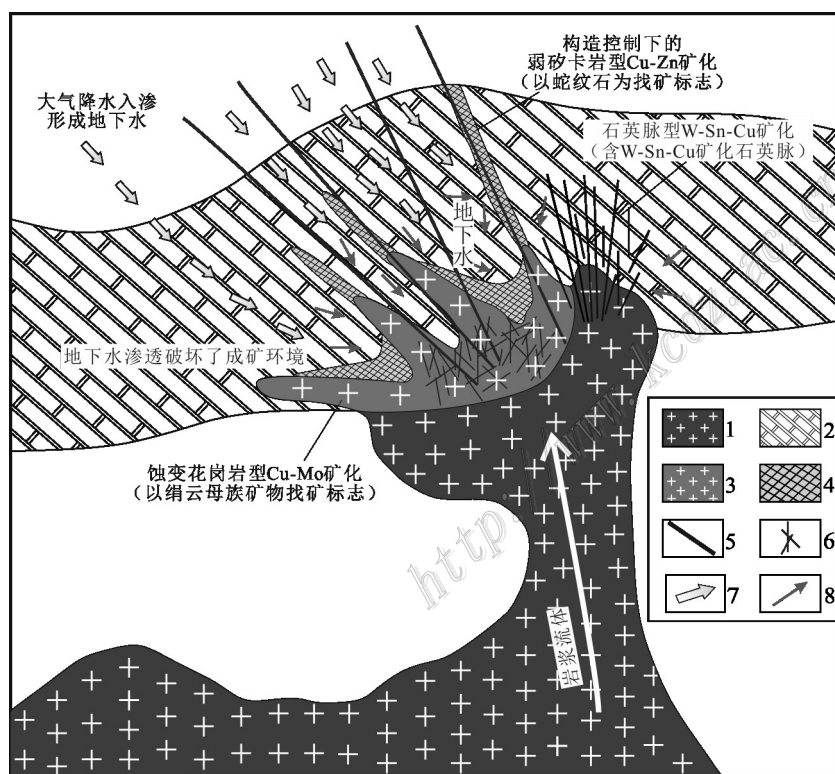


图10 铜岭下型铜多金属矿床成矿模型(据段召艳等,2021修改)

1—侏罗纪花岗岩;2—黄龙组大理岩;3—含Cu-Mo矿化蚀变花岗岩;4—含Cu-Zn矿化矽卡岩及退蚀变带;5—断层构造;6—裂隙构造;
7—大气降水;8—地下水

Fig. 10 Schematic Metallogenic Model of the Tonglingxia Type Copper Polymetallic Deposit (modified from Duan et al., 2021)
1—Jurassic granite; 2—Huanglong Formation marble; 3—Cu-Mo mineralized-altered granite; 4—Cu-Zn mineralized skarn and retrograde alteration zone; 5—Fault structure; 6—Fissure structure; 7—Meteoric water; 8—Groundwater

石英细脉相关,以岩石裂隙为找矿标志。

(2) 伊利石波谱IC值反映出北部钻孔ZK9-3和ZK9-4岩体侵入深,推测该位置距离热源中心更近,绢云母波长变化指示出研究区成矿流体可能来源于矿区北部,同时,钻孔ZK9-3绢云母Pos2200值与其Cu矿化呈负相关,且Cu矿化多集中于2204~2207 nm附近。

(3) 矿区中部绿泥石Pos2250值从致矿岩体到接触带附近呈由高变低的趋势,同时,Pos2250值与矿化富集中心距离呈正相关,但波长变化不具有连续性,预测矿体位置较为困难。辉石至蛇纹石化阶段,大气降水的入渗和地下水的渗透破坏了矿体的形成环境,至绿泥石退蚀变阶段,矿体逐渐尖灭,仅在交错的断裂或岩石节理形成相对封闭的环境中产生少量富矿体。

(4) 研究区成矿环境复杂,由北向南形成了蚀变花岗岩型(Cu-Mo)-构造控制下的弱矽卡岩型(Cu-Zn)-石英脉型(W-Sn-Cu)的复合成矿体系。

致谢 在野外工作中得到江西省地质局第七地质大队李伟高级工程师、连敦梅硕士的帮助,数据处理得到姚艺欣硕士的技术支持,文章修改得到郭娜教授的宝贵意见,在此致以衷心的感谢!此外,感谢审稿专家对本文的评论和提出的修改意见。

References

- Cao K, Xu J F, Chen J L, Huang X X and Ren J B. 2014. Origin of porphyry intrusions hosting superlarge Pulang porphyry copper deposit in Yunnan Province: Implications for metallogenesis[J]. *Mineral Deposits*, 33(2): 307-322(in Chinese with English abstract).
- Chang Z S, Hedenquist J W, White N C, Cooke D R, Roach M, Deyell C L, Garcia J J, Gemmill 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]. *Economic Geology*, 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 Y C, Wang D H, Xu Z G and Huang F. 2014. Outline of regional metallogeny of ore deposits associated with the Mesozoic magmatism in South China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 38(2): 219-229(in Chinese with English abstract).
- Cheng J W, Liu X X, Zhang J, Lu K X, Wang Y X, Yang J F and Qiu J W. 2023. Infrared spectral analysis and prospecting of alteration minerals of Baijian skarn-type iron deposit in Hanxing area[J]. *Earth Science*, 48(4): 1551-1567(in Chinese with English abstract).
- Christensen P R, Bandfield J L, Hamilton V E, Howard D A, Lane M D, Piatek J L, Ruff S W and Stefanov W L. 2000. A thermal emission spectral library of rock-forming minerals[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 105: 9735-9739.
- Chu G B, Zhang S T, Zhang Xiao B, Xiao B, Han J S, Zhang Y, Cheng J M and Feng Y Z. 2020. Chlorite chemistry of Tongshankou porphyry-related Cu-Mo-W skarn deposit, eastern China: Implications for hydrothermal fluid evolution and exploration vectoring to concealed orebodies[J]. *Ore Geology Reviews*, 122: 103531-103548.
- Ciobanu C L, Kontonikas C A, Cook N J, Kamenetsky V S, Mauger A J and Ehrig K. 2016. Alteration at the Olympic Dam IOCG-U deposit: Insights into distal to proximal feldspar and phyllosilicate chemistry from infrared reflectance spectroscopy[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 63(8): 959-972.
- Clark R N, King T V V, Klejwa M, Swayze G A and Vergo N J. 1990. High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals[J]. *Journal of Geophysical Research*, 95(B8): 12653.
- Du G P, Lu B Q, Peng J and Wang X. 2018. Correlation of Raman spectroscopy and coloration of serpentine cat's eye from Sichuan Province[J]. *Journal of East China University of Science and Technology(Science Technology Edition)*, 44(1): 70-74(in Chinese with English abstract).
- Duan Z Y, Dong T, Du B, Cao X M, Dong H G, Li B and Song X F. 2021. Characteristics of porphyry-hydrothermal mineralization and prospecting prediction of the Donglufang Cu-Mo deposit in the Shangri-La area, northwestern Yunnan Province[J]. *Geology and Exploration*, 57(4): 837-851(in Chinese with English abstract).
- 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.
- Fang G C, Chen Y C, Zhao Z and Chen Z H. 2017. Metallogenic model of Yudu-Ganxian W-polymetallic ore-concentrated area in South Jiangxi Province[J]. *Geological Review*, 63(Supp.): 215-216(in Chinese with English abstract).
- Gao X and Meng J Y. 2017. The source of ore-forming fluids and materials in the Tongchanggou Mo-Cu deposit, northwestern Yunnan, China: Constrains from skarn mineralogy and stable isotopes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(7): 2161-2174.
- Gregory M J. 2017. A fluid inclusion and stable isotope study of the Pebble porphyry copper-gold-molybdenum deposit, Alaska[J]. *Ore Geology Reviews*, 80: 1279-1303.
- Guo N, Guo K, Zhang T T, Liu T H, Hu B and Wang C W. 2012. Hydrothermal alteration distribution model of the Jima copper-polymetallic deposit based on shortwave technique[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 33(4): 641-653(in Chinese with English abstract).

- Guo N, Huang Y R, Zheng L, Tang N, Fu Y and Wang C. 2017. Short wave infrared mineral distribution characteristics and prospecting model of high sulfur low sulfur epithermal deposits: Taking Tiegelongnan (Rongna ore block) and Silongduo deposits in Xizang as examples[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 38(5): 767-778(in Chinese with English abstract).
- Guo N, Liu D, Tang J X, Zheng L, Huang Y R, Shi W X, Fu Y, Tang N and Wang C. 2018. Characteristics of alteration minerals and prospecting model revealed by shortwave infrared technique: Take Sinongduo Ag-Pb-Zn deposit as an example[J]. *Mineral Deposits*, 37(3): 556-570(in Chinese with English abstract).
- Guo N, Tom C, Tang J X and Tong Q X. 2019. Mapping white mica alteration associated with the Jiama porphyry-skarn Cu deposit, Central Xizang using field SWIR spectrometry[J]. *Ore Geology Reviews*, 108: 147-157.
- Guo N, Wang X G, Hu Z H, Liu X X, Long T J, Yuan S, Lian D M and Wei D X. 2022. Spectral introductions of typical minerals during the periods of skarn formation and evolution at Zhuxi tungsten polymetallic deposit in Jiangxi Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 38(4): 1219-1236(in Chinese with English abstract).
- Guo X F, Wang Q L and Jing Y H. 2022. Raman spectroscopic study of zircon from metallogenic granite of Tieshanlong tungsten mine[J]. *China Tungsten Industry*, 37(2): 9-15+34(in Chinese with English abstract).
- Huang Y R. 2021. Thermal infrared spectral characteristics of skarn minerals and their exploration models[D]. Supervisor: Tang J X. Chengdu: Chengdu University of Technology. 1-110(in Chinese with English abstract).
- Hunt G R. 1977. Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared[J]. *Geophysics*, 42(3): 501-513.
- Jin X. 2012. Quantitative geochemical prediction and evaluation of continental sandstone Cu deposits in the Chuxiong basin, Yunnan Province[D]. Supervisor: Zeng J N and Ma Z D. Wuhan: China University of Geosciences. 1-70(in Chinese with English abstract).
- John D A, Ayuso R A, Barton M D, Blakely Richard J, Bodnar R J, Dilles J H, Gray F, Graybeal F T, Mars J C, McPhee D K, Seal R R, Taylor R D and Vikre P G. 2010. Porphyry copper deposit model[J]. *US Geological Survey Scientific Investigations Report*, 5070-B: 169.
- Jones S, Herrmann W and Gemmel J B. 2005. Short wavelength infrared spectral characteristics of the HW Horizon: Implications for exploration in the Myra falls volcanic-hosted massive sulfide camp, Vancouver Island, British Columbia, Canada[J]. *Economic Geology*, 100: 273-294.
- Li G L. 2011. Evolution of yanshanian granites and tungsten mineralization in Gannan and neighboring areas[D]. Supervisor: Chen P R and Hua R M. Nanjing: Nanjing University. 1-160(in Chinese with English abstract).
- Li T F. 2019. Multi scale spatial distribution characteristics and resource potential analysis of hydrothermal tungsten polymetallic deposits in the Nanling Mountain metallogenic belt[D]. Supervisor: Xia Q L. Beijing: China University of Geosciences. 1-131(in Chinese with English abstract).
- Liang S N, Gan F P, Yan B K, Wei H Y and Xiao C C. 2014. A study on the relationship between the composition and spectral feature parameters in chlorite[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 34(7): 1763-1768(in Chinese with English abstract).
- Lin B, Chen L, Liu Z Y, Tang J X, Zou B and He W. 2020. Constraints on the geochronology of porphyry-skarn copper deposit from U-Pb dating of garnet: A case study of the Sangri copper deposit, Xizang[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(10): 2883-2892.
- Liu C H, Yang B, Chen Z H, Tan Y, Lu J and Mo H H. 2020. U-Pb and Re-Os isotopic dating of the Zhangjiadi molybdenite polymetallic deposit in Xingguo County, southern Jiangxi Province: Constraint on petrogenic and metallogenetic ages[J]. *Geology in China*, 47(1): 258-260(in Chinese with English abstract).
- Liu H, Ma Y, Ren H and Liu B H. 2015. Short wave infrared spectroscopy study on surrounding rock alteration of the Tiemaoshan Mo deposit in Fujian Province[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 35(2): 221-228(in Chinese with English abstract).
- Liu J L, Zhao B, Wang W Y, Li J G, Feng X L, Zhou X P and Wang Y P. 2014. Using gravity and magnetic data to study the distribution characteristics of granites and faults in the Yudu-Ganxian ore concentration area of the Nanling Mountain[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(4): 658-668(in Chinese with English abstract).
- Liu J W, Pan S Y, Lu S Y, Peng S T and Huang L. 2022. Geological characteristics and genesis of the Xiaokeng Cu deposit in Gannan[J]. *World Nonferrous Metals*, 612(24): 39-41(in Chinese with English abstract).
- Liu S B, Wang D H, Chen Y C, Li J K, Ying L J, Xu J X and Zeng Z L. 2008. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of muscovite in different types of ore bearing quartz in the Chongyi-Dayu-Shangyou ore concentration area of southern Jiangxi and their geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(7): 932-940(in Chinese with English abstract).
- Liu X X, Zhang H, Zhang J, Shi W X, Zhang X L, Cheng J W and Lu K X. 2021. A study on alteration mineral assemblages and mineralization characteristics of a Wunugetushan porphyry Cu-Mo deposit in Inner Mongolia, China, based on infrared spectroscopy[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 40(1): 121-133(in Chinese with English abstract).
- Lu L, Liang T, Chen Z H, Wang D H, Zhao Z and Chen W. 2018. The type of bismuth minerals in the Niuxingba-Liumukeng Au-Ag-Pb-Zn polymetallic deposit, Jiangxi Province and its geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 92(3): 560-574(in Chinese with English abstract).
- Lu Y Y, Fu J M, Cheng S B and Ma L Y. 2015. Division of tungsten tin ore prospecting prospects in the Nanling Mountain metallogenic belt[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 35(S1): 907(in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Xie G Q, Yuan S D, Liu P, Meng X Y, Zhou Z H and Zheng W. 2018. Current research progress and future trends of porphyry-skarn copper and granite-related tin polymetallic deposits in the

- Circum Pacific metallogenic belts (Article)[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(9): 2501-2517.
- Massawe R J R and Lentz D R. 2022. Skarn formation and Cu-Ag mineralization in the McKenzie Gulch area, northern New Brunswick, Canada: Implication for the applications of mineral chemistry in exploration for porphyry copper and skarn deposits[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 238: 106965.
- Matthew R S, Joshua L B, Edward A C and Melissa S R. 2013. Hydrated silica on Mars: Combined analysis with near-infrared and thermal-infrared spectroscopy[J]. *Icarus*, 223(2): 633-648.
- Peng L L, Dai L T, Yuan Z C and Lu G A. 2019. Application of CSAMT method in the exploration of Qinglongshan copper mine in Jiangxi Province[J]. *Mineral Exploration*, 10(5): 1173-1178(in Chinese with English abstract).
- Raquel S C, Carlos M D F, Raimundo N N V, Caetano J, Lena V, Soares M, Teodoro I R A, Bruno L, Cleyton C C and Carlos M E M. 2015. A study of the hydrothermal alteration in Paleoproterozoic volcanic centers, São Félix do Xingu region, Amazonian Craton, Brazil, using short-wave infrared spectroscopy[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 304: 324-335.
- 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 Cu-Mo deposit in Xizang[J]. *Earth Science*, 45(3): 930-944(in Chinese with English abstract).
- Richards J P. 2003. Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation[J]. *Economic Geology*, 98(8): 1515-1533.
- Scott H, John H D and Richard M T. 2015. Footprints: Hydrothermal alteration and geochemical dispersion around porphyry copper deposits[J]. *SEG newsletter*, 100: 12-17.
- Sillitoe R H. 2010. Porphyry copper systems[J]. *Economic Geology*, 105(1): 3-41.
- Simpson M P and Christie A B. 2019. Hydrothermal alteration mineralogical footprints for New Zealand epithermal Au-Ag deposits[J]. *New Zealand Journal of Geology & Geophysics*, 62(4): 483-512.
- Su H M, Xie G Q, Sun J, Zhang C S and Cheng Y B. 2010. Zircon U-Pb dating for the granite prophyries in Hongshan prophyry copper deposit and Tongkenzhang porphyry molybdenum deposits in East Jiangxi Province and their significance[J]. *Journal of Rock Sciences*, 26(3): 819-829(in Chinese with English abstract).
- Su X Y, Guo C L, Chen Z Y, Zhao Z, Guo N X and Zhao Z. 2014. Zircon U-Pb age, geochemistry and mineralization prospective of the Caledonian Doushui granitic pluton in southern Jiangxi Province[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 38(2): 334-346(in Chinese with English abstract).
- 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 Discovery*, 39(1): 1-27.
- 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, Xizang[J]. *Earth Science*, 44(6): 2143-2154(in Chinese with English abstract).
- Wang C W, Guo N, Guo K and Zhang T T. 2014. Characteristics of the chlorite alteration in the porphyry-skarn deposit based on short-wavelength infrared technology: A case study of the Jiama copper-polymetallic deposit in Xizang[J]. *Geology and Exploration*, 50(6): 1137-1146(in Chinese with English abstract).
- Wang D H, Ying L J, Wang C H, Chen Z H, Xu J X, Zeng Z L, Chen Y C, Xu J and Bai G. 2007. Basic patterns of metallogenesis of precious metal deposits in China and vectors for prospecting[J]. *Earth Science Frontiers*, 14(5): 71-81(in Chinese with English abstract).
- Wang M, Liu X X, Li J K, Zhou F C, Li P, Zhang J, Cheng J W and Qiu J W. 2023. Study on the characteristics of the infrared spectral and exploration application of Renli granite pegmatite type rare metal deposit in northern Hunan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 39(7): 2101-2116(in Chinese with English abstract).
- Wu B, Wang R C, Li G L and Liao Y X. 2020. Mineralogy and fluid inclusion study of the Anqiantan tungsten deposit in southern Jiangxi Province[J]. *Journal of Nanjing University(Natural Science)*, 56(6): 788-799(in Chinese with English abstract).
- Wu D H, Pan J Y, Xia F, Huang G W, Zhong F J, Lai J, Qi J M and Liu Y L. 2019. Characteristics and source significance of rare earth elements geochemistry of fluorite from Shangjiao uranium deposit in southern Jiangxi Province[J]. *Chinese Rare Earths*, 40(2): 14-27(in Chinese with English abstract).
- Xu X B, Liang C H, Chen J J and Xu Y D. 2021. Fundamental geological features and metallogenic geological backgrounds of Nanling tectonic belt[J]. *Earth Science*, 46(4): 1133-1150(in Chinese with English abstract).
- Yang B, Liu C H, Zhao L, Lu J, Mo H H and Tan Y. 2020. Fluid characteristics and genetic mechanism of Jianlong Cu-W deposit in Jiangxi Province[J]. *China Tungsten Industry*, 35(5): 70-78(in Chinese with English abstract).
- Yang Z M, Hou Z Q, Yang Z 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 district: A case study of Niancun ore district, Xizang[J]. *Mineral Deposits*, 31(4): 699-717(in Chinese with English abstract).
- Yin Z, Zhao Z, Tao J L, Wu S H, Li H W, Gan J W, Chen W and Li X W. 2021. Deposit geology, geochronology and metallogenic model of Helong W deposit in southern Jiangxi Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(5): 1531-1552(in Chinese with English abstract).
- Yuan S. 2021. Spectral characteristics of altered minerals in the Zhuxi tungsten copper deposit in Jiangxi and their significance for ore exploration[D]. Supervisor: Guo N. Chengdu: Chengdu University of Technology. 1-61(in Chinese with English abstract).
- Yue Q Y, Zhai D G, Zhao G, Zhao Q Q, He G W and Liu J J. 2023. The compositions of silver-bearing minerals and the occurrence of silver in the Niuxingba-Liumukeng silver-gold polymetallic deposit, Jiangxi Province, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 43(3): 311-324(in Chinese with English abstract).
- Zeng Z L, Zhang Y Z, Chen Z H, Chen Y C, Zhu X P, Tong Q Q,

- Zheng B H and Zhou Y. 2011. Geological characteristics and metallogenic epoch of Pangushan W-Bi(Te) ore deposit in Yudu County, Jiangxi Province[J]. *Mineral Deposits*, 30(5): 949-958(in Chinese with English abstract).
- Zhang G, Lian C Y and Yuan C H. 2004. Application of PIMA in mineral identification of Pulang porphyry copper mine in Yunnan[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(4): 460(in Chinese with English abstract).
- Zhang J T, Luo Z E, Tang Y M, Luo S C, Zhou D L, Tang C H and Bao J L. 2011. Analysis of ore body characteristics of Shixingling tin deposit in Dayishan area of the Nanling Mountain metallogenic belt and its ore prospecting significance[J]. *Low Carbon World*, 11(5): 117-118, 121(in Chinese with English abstract).
- Zhang S T, Chen H Y, Zhang X B, Zhang W F, Xu C, Han J S and Chen M. 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[J]. *Mineral Deposits*, 36(6): 1263-1288(in Chinese with English abstract).
- Zhang W L, Hua R M, Wang R C, Xie L and Che X D. 2012. SHRIMP zircon U-Pb dating of metallogenic granites from the Tieshanlong tungsten mine in Gannan[J]. *Mineral Deposits*, 31(Supp.): 633-634(in Chinese with English abstract).
- Zhang Y, Duan S G, Liu H L, Yang C D, Chen S L and Chen Z S. 2021. Short wavelength infrared spectral analysis of hydrothermal alteration associated with Suichang gold polymetallic deposit in Zhejiang, China[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 43(6): 978-996(in Chinese with English abstract).
- Zhang Y Y, Zhong F J, Pan J Y, Xia F, Qi J M, Li H D and Liu W Q. 2022. Petrogenesis and its relationship with uranium mineralization of diabase in Huangsha uranium ore-field, South Jiangxi Province[J]. *Earth Science*, 47(1): 206-223(in Chinese with English abstract).
- Zhao R Y, Wang D H, Chen Y C, Leng C B, Qin J H and Zhao C H. 2020. Geological characteristics, metallogeny and geospatial mineralization model of uranium in the Nanling metallogenic belt[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(1): 149-160(in Chinese with English abstract).
- Zhou J Y, Cui B F and Chen S Z. 1999. Geology, geochemistry and genesis of the Hongshan porphyry cryptoexplosive breccia type copper deposit in Huichang, Jiangxi[J]. *Acta Geologica Sinica*, 73(1): 94-95(in Chinese with English abstract).
- Zheng J Y, Liu Y G, Chen T, Chen Q, Li M Y and Xu X. 2021. Spectral characteristics of blue serpentine jade[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 41(2): 643-647(in Chinese with English abstract).
- Zhou Z Q. 2021. Serpentinization and alteration of ultrabasic rocks and evolution of layered silicate minerals[D]. Supervisor: Liu A P and Sun H J. Mianyang: Southwest University of Science and Technology. 1-63(in Chinese with English abstract).
- Zou C C, Xiao K, Zhou X P, Li J G, Zhao B, Xiang B, Sun S W, Wang Z B, Huang B and Yin D J. 2014. Response characteristics of ultrasonic imaging logging in the NLS-1 of the scientific drilling in the Yudu-Ganxian ore district and their implications for deep mineral prospecting[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(4): 676-685(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 曹康, 许继峰, 陈建林, 黄肖潇, 任江波. 2014. 云南普朗超大型斑岩铜矿床含矿斑岩成因及其成矿意义[J]. *矿床地质*, 33(2): 307-322.
- 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.
- 陈毓川, 王登红, 徐志刚, 黄凡. 2014. 华南区域成矿和中生代岩浆成矿规律概要[J]. *大地构造与成矿学*, 38(2): 219-229.
- 成嘉伟, 刘新星, 张娟, 卢克轩, 王瑛雪, 杨俊峰, 邱佳伟. 2023. 河北邯邢地区白洞铁蚀变矿物红外光谱分析及找矿研究[J]. *地球科学*, 48(4): 1551-1567.
- 杜广鹏, 卢保奇, 彭景, 王旭. 2018. 四川蛇纹石猫眼的拉曼光谱及其颜色相关性[J]. *华东理工大学学报(自然科学版)*, 44(1): 70-74.
- 段召艳, 董涛, 杜斌, 曹晓民, 董红国, 李冰, 宋旭峰. 2021. 滇西北香格里拉东炉房铜铅矿床斑岩-热液成矿特征及找矿预测[J]. *地质与勘探*, 57(4): 837-851.
- 方贵聪, 陈毓川, 赵正, 陈郑辉. 2017. 赣南于都-赣县钨多金属矿集区成矿模式[J]. *地质论评*, 63(增): 215-216.
- 郭娜, 郭科, 张婷婷, 刘廷晗, 胡斌, 汪重午. 2012. 基于短波红外勘查技术的西藏甲玛铜多金属矿热液蚀变矿物分布模型研究[J]. *地球学报*, 33(4): 641-653.
- 郭娜, 黄一入, 郑龙, 唐楠, 伏媛, 王成. 2017. 高硫-低硫化浅成低温热液矿床的短波红外矿物分布特征及找矿模型——以西藏铁格隆南(荣那矿段)、斯弄多矿床为例[J]. *地球学报*, 38(5): 767-778.
- 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[J]. *矿床地质*, 37(3): 556-570.
- 郭娜, 王先广, 胡正华, 刘新星, 龙沱江, 袁珊, 连敦梅, 魏德贤. 2022. 赣东北地区矽卡岩典型矿物形成与演化的光谱证据: 以朱溪钨多金属矿为例[J]. *岩石学报*, 38(4): 1219-1236.
- 郭小飞, 王庆龙, 荆一洪. 2022. 铁山垅钨矿成矿花岗岩锆石拉曼光谱研究[J]. *中国钨业*, 37(2): 9-15+34.
- 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[D]. 导师: 唐菊兴. 成都: 成都理工大学. 1-110.
- 金希. 2012. 云南楚雄盆地陆相砂岩型铜矿地球化学定量预测与评价[D]. 导师: 曾键年, 马振东. 武汉: 中国地质大学. 1-70.
- 李光来. 2011. 赣南及邻区燕山期花岗岩演化与钨成矿作用[D]. 导师: 陈培荣, 华仁民. 南京: 南京大学. 1-160.
- 李童斐. 2019. 南岭成矿带热液型钨多金属矿床多尺度空间分布特征与资源潜力分析[D]. 导师: 夏庆霖. 北京: 中国地质大学. 1-131.
- 梁树能, 甘甫平, 闫柏琨, 魏红艳, 肖晨超. 2014. 绿泥石矿物成分与

- 光谱特征关系研究[J]. 光谱学与光谱分析, 34(7): 1763-1768.
- 刘翠辉, 杨斌, 陈郑辉, 谭友, 鲁捷, 莫火华. 2020. 赣南兴国县张家地钼多金属矿床 U-Pb 和 Re-Os 同位素定年: 对成岩成矿时代的限定[J]. 中国地质, 47(1): 258-260.
- 刘鹤, 马宇, 任宏, 刘碧洪. 2015. 福建铁帽山钼矿床围岩蚀变的短波红外光谱学研究[J]. 矿物学报, 35(2): 221-228.
- 刘建伟, 潘世语, 鲁诗阳, 彭蜀涛, 黄磊. 2022. 赣南小坑铜矿床地质特征及成因探讨[J]. 世界有色金属, 612(24): 39-41.
- 刘金兰, 赵斌, 王万银, 李建国, 冯旭亮, 周新鹏, 王云鹏. 2014. 利用重磁资料研究南岭于都-赣县矿集区花岗岩与断裂分布特征[J]. 地质学报, 88(4): 658-668.
- 刘善宝, 王登红, 陈毓川, 李建康, 应立娟, 许建祥, 曾载淋. 2008. 赣南崇义-大余-上犹矿集区不同类型含石英中白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 82(7): 932-940.
- 刘新星, 张弘, 张娟, 史维鑫, 张新乐, 成嘉伟, 卢克轩. 2021. 基于红外光谱技术研究内蒙古乌奴格吐山斑岩铜钼矿蚀变和矿化特征[J]. 岩矿测试, 40(1): 121-133.
- 卢友月, 付建明, 程顺波, 马丽艳. 2015. 南岭成矿带钨锡矿找矿远景区划分[J]. 矿物学报, 35(增): 907.
- 鲁麟, 梁婷, 陈郑辉, 王登红, 赵正, 陈伟. 2018. 江西牛形坝-柳木坑金银铅锌多金属矿床钼矿物类型及指示意义[J]. 地质学报, 92(3): 560-574.
- 彭琳琳, 戴林太, 袁钟池, 卢国安. 2019. CSAMT 法在江西青龙山铜矿勘查中的应用[J]. 矿产勘查, 10(5): 1173-1178.
- 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.
- 苏慧敏, 谢桂青, 孙嘉, 张承帅, 程彦博. 2010. 江西铜坑嶂钼矿和江山铜矿含矿斑岩锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 岩石学报, 26(3): 819-829.
- 苏晓云, 郭春丽, 陈振宇, 赵正, 郭娜欣, 赵芝. 2014. 赣南加里东期陡水岩体的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其稀土含矿性探讨[J]. 大地构造与成矿学, 38(2): 334-346.
- 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斑岩铜-钼矿床中的应用[J]. 地球科学, 44(6): 2143-2154.
- 汪重午, 郭娜, 郭科, 张婷婷. 2014. 基于短波红外技术的斑岩-矽卡岩型矿床中绿泥石蚀变分布特征研究: 以西藏甲玛铜多金属矿为例[J]. 地质与勘探, 50(6): 1137-1146.
- 王登红, 应立娟, 王成辉, 陈郑辉, 许建祥, 曾载淋, 陈毓川, 徐珏, 白鸽. 2007. 中国贵金属矿床的基本成矿规律与找矿方向[J]. 地学前缘, 14(5): 71-81.
- 王猛, 刘新星, 李建康, 周芳春, 李鹏, 张娟, 成嘉伟, 邱佳炜. 2023. 湘北仁里花岗岩伟晶岩型稀有金属矿床红外光谱特征研究及勘查应用[J]. 岩石学报, 39(7): 2101-2116.
- 郭斌, 王汝成, 李光来, 廖益萱. 2020. 赣南安前滩钨钼矿物学及流体包裹体研究[J]. 南京大学学报(自然科学), 56(6): 788-799.
- 吴德海, 潘家永, 夏菲, 黄广文, 钟福军, 赖静, 祁家明, 刘院龙. 2019. 赣南上窰钼矿床萤石稀土元素地球化学特征及其源区意义[J]. 稀土, 40(2): 14-27.
- 徐先兵, 梁承华, 陈家驹, 徐亚东. 2021. 南岭构造带基础地质特征与成矿地质背景[J]. 地球科学, 46(4): 1133-1150.
- 杨斌, 刘翠辉, 赵磊, 鲁捷, 莫火华, 谭友. 2020. 江西见龙铜钼矿床成矿流体特征及成因机制[J]. 中国钨业, 35(5): 70-78.
- 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.
- 尹政, 赵正, 陶建利, 吴胜华, 李宏伟, 甘加伟, 陈伟, 李小伟. 2021. 赣南合龙钨钼矿床地质、成岩成矿时代与成矿模式[J]. 岩石学报, 37(5): 1531-1552.
- 袁珊. 2021. 江西朱溪钨铜矿床蚀变矿物光谱特征及找矿指示意义[D]. 导师: 郭娜. 成都: 成都理工大学. 1-61.
- 岳秋雨, 翟德高, 赵刚, 赵青青, 贺根文, 刘家军. 2023. 江西牛形坝-柳木坑银金多金属矿床银矿物与银的赋存状态[J]. 矿物学报, 43(3): 311-324.
- 曾载淋, 张永忠, 陈郑辉, 陈毓川, 朱祥培, 童启荃, 郑兵华, 周瑶. 2011. 江西省于都县盘古山钨钼(碲)矿床地质特征及成矿年代学研究[J]. 矿床地质, 30(5): 949-958.
- 张吉栋, 罗招恩, 唐勇明, 罗仕长, 周得林, 唐朝晖, 鲍俊力. 2011. 南岭成矿带大义山地区狮形岭锡矿矿体特征分析及其找矿指示意义[J]. 低碳世界, 11(5): 117-118, 121.
- 张世涛, 陈华勇, 张小波, 张维峰, 许超, 韩金生, 陈冕. 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矿床为例[J]. 矿床地质, 36(6): 1263-1288.
- 张文兰, 华仁民, 王汝成, 谢磊, 车旭东. 2012. 赣南铁山垅钨矿成矿花岗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年[J]. 矿床地质, 31(增): 633-634.
- 张炎, 段士刚, 刘汉仑, 杨成栋, 陈升立, 陈宰松. 2021. 浙江遂昌金多金属矿床热液蚀变短波红外光谱分析[J]. 地球科学与环境学报, 43(6): 978-996.
- 张耀阳, 钟福军, 潘家永, 夏菲, 祁家明, 李海东, 刘文泉. 2022. 赣南黄沙钼矿区辉绿岩成因及其与钼成矿关系[J]. 地球科学, 47(1): 206-223.
- 章革, 连长云, 元春华. 2004. PIMA 在云南普朗斑岩铜矿矿物识别中的应用[J]. 地学前缘, 11(4): 460.
- 赵如意, 王登红, 陈毓川, 冷成彪, 秦锦华, 赵晨辉. 2020. 南岭成矿带钼矿地质特征、成矿规律与全位成矿模式[J]. 地质学报, 94(1): 149-160.
- 郑金宇, 刘云贵, 陈涛, 陈倩, 李梦阳, 徐行. 2021. 蓝色蛇纹石玉的谱学特征[J]. 光谱学与光谱分析, 41(2): 643-647.
- 周济元, 崔炳芳, 陈世忠. 1999. 江西会昌红山斑岩-隐爆角砾岩型铜矿床地质、地球化学及成因[J]. 地质学报, 73(1): 94-95.
- 周志强. 2021. 超基性岩蛇纹石化蚀变与层状硅酸盐矿物演化作用[D]. 导师: 刘爱平, 孙红娟. 绵阳: 西南科技大学. 1-63.
- 邹长春, 肖昆, 周新鹏, 李建国, 赵斌, 项彪, 孙少伟, 汪振斌, 黄波, 尹道谨. 2014. 于都-赣县矿集区科学钻探 NLS-D-1 孔超声波成像测井响应特征及其深部找矿意义[J]. 地质学报, 88(4): 676-685.