

湖北铜绿山夕卡岩型铜铁金矿床深部矿体 地球化学勘查方法有效性分析

李莎莎^{1,2,3}, 陈华勇^{1,4*}, 张世涛¹, 孙四权⁵, 金尚刚⁶,
魏克涛⁶, 刘冬勤⁶, 程佳敏^{1,2}, 许高⁵

(1. 中国科学院 广州地球化学研究所 矿物学与成矿学重点实验室, 广东 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 广东省有色地质勘查院, 广东 广州 510080; 4. 广东省矿物物理与材料研究开发重点实验室, 广东 广州 510640; 5. 湖北省地质调查院, 湖北 武汉 430034; 6. 湖北省地质局 第一地质大队, 湖北 大冶 435100)

摘要: 铜绿山夕卡岩型铜铁金矿床是目前中国最大的夕卡岩型铜多金属矿床之一。近年来, 岩石原生晕地球化学勘查结合构造和碳酸盐围岩-岩体接触界面延伸方向进行深部隐伏矿体预测取得了成功, 新发现的X III号矿体显著增加了矿床资源量。从平面上、剖面上分别对岩石原生晕地球化学和短波红外光谱(SWIR)勘查的找矿预测结果进行对比研究发现, (1) 岩石原生晕地球化学勘查在平面上通过指示元素异常套合进行隐伏矿体预测的效果比较明显。指示元素异常的出现与元素的亲铜性、亲硫性、迁移性等特征有关, 同时也受热液蚀变作用的影响; 在剖面上, 岩石原生晕地球化学分析显示大部分元素仅富集在矿体位置, 与夕卡岩型矿床中成矿热液的流动严格受接触界面控制的规律相一致, 除I之外的元素在剖面上对找矿预测的指示作用并不显著。(2) SWIR结果在平面和剖面上均显示绿泥石的Fe-OH从围岩→接触带/矿化中心呈明显的低值→高值变化规律, 平面上能较为精确地进行矿体定位, 在垂向距离矿化中心约400 m处进入有效预测范围, 显示SWIR勘查在隐伏矿体找矿预测方面具有较好的发展潜力。

关键词: 地球化学勘查; 短波红外光谱; 原生晕; 有效性对比; 铜绿山铜铁金矿床; 湖北省

中图分类号: P595 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2020)02-0205-13

DOI: 10.19700/j.0379-1726.2020.02.006

Validity analysis of geochemical exploration methods for a deep orebody in the Tonglúshan skarn Cu-Fe-Au deposit, Hubei Province

LI Sha-sha^{1,2,3}, CHEN Hua-yong^{1,4*}, ZHANG Shi-tao¹, SUN Si-quan⁵, JIN Shang-gang⁶,
WEI Ke-tao⁶, LIU Dong-qin⁶, CHENG Jia-min^{1,2} and XU Gao⁵

1. CAS Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Guangdong Nonferrous Metal's Geological Exploration Institution, Guangzhou 510080, China;

4. Guangdong Provincial Key Laboratory of Mineral Physics and Materials, Guangzhou 510640, Guangzhou, China;

5. Geological Survey of Hubei Province, Wuhan 430034, Wuhan, China;

6. First Geological Team of Hubei Geological Bureau, Daye 435100, China

Abstract: The Tonglúshan Cu-Fe-Au deposit is one of the largest skarn copper polymetallic deposits in China. In recent years, the prediction of deep, concealed orebodies has been successful in whole-rock geochemical exploration, and the newly discovered XIII orebody has made an important contribution to the mineral resources in Tonglúshan. A comparative study between a short-wave infrared spectroscopy (SWIR) survey and whole-rock primary-halo geochemical exploration for ore prospecting on planes and sections were conducted. The findings showed that: (1) the

收稿日期(Received): 2018-12-22; 改回日期(Revised): 2019-02-18; 接受日期(Accepted): 2019-02-26

基金项目: 湖北省地质局鄂东南地区夕卡岩型-斑岩型隐伏矿床勘查标识体系研究项目(KJ2018-5); 国土资源部公益性行业科研专项经费项目(201511035)

作者简介: 李莎莎(1984-), 女, 博士, 矿床学专业。E-mail: lisa.lee00@qq.com

* 通讯作者(Corresponding author): CHEN Hua-yong, E-mail: huayongchen@gig.ac.cn; Tel: +86-20-85292708

combination of indicator element halos were effective for predicting concealed orebodies. Indicator element anomalies were related to the characteristics of chalcophile and sulfophile affinity, and the migration of elements etc., and were also affected by hydrothermal alteration. On the sectional profile, geochemical analysis of whole rock revealed that most of elements were enriched in the orebody only, as controlled by the ore-forming process of the skarn deposit. Element primary halos were not very effective for predictions (except for iodine). (2) The SWIR results showed that the Fe-OH position values (Pos2250) of chlorite exhibited an obvious trend that changed from low to high when moving from the wall rock to the contact zone/mineralization center in both plane and section profiles. The orebody position could be accurately limited in the plane view. Meanwhile, the Pos2250 values increased gradually when entering a distance of ~400 m from the mineralization center, thus indicating that the SWIR method has great potential for mineral exploration.

Key words: geochemical exploration; short-wave infrared spectroscopy; primary halo; validity comparison; Tonglūshan Cu-Fe-Au deposit; Hubei Province

0 引言

铜绿山夕卡岩型铜铁金矿床位于长江中下游鄂东南矿集区的中部,是目前中国最大的夕卡岩型铜多金属矿床之一^[1-2]。近十年来,地质工作者在前人勘查基础和接替资源勘查项目的支持下,在铜绿山矿床深部找矿取得重要突破:4#勘探线深部新发现隐伏 XIII 号厚大铜铁矿体及深部 III 和 IV 号矿体,新增 Cu 金属量 0.35 Mt、Au 金属量 13 t、铁矿石 0.29 亿 t 等^[3]。

2007 年魏克涛等^[1]提出在矿床-500 m 中段发现指示深部矿体的 Pb、Ag、Cu 原生晕异常;2011 年胡清乐等^[4]和徐荣华等^[5]根据深部构造叠加晕规律总结了铜绿山构造叠加晕模式图;2013 年魏克涛等^[6]将原生晕成果结合立体填图和矿区构造延伸方向确定找矿靶区并进行钻孔验证,在深部新发现 XIII、III 和 IV 号矿体。在这一重要发现后,2017 年张世涛等^[7]将短波红外光谱技术(SWIR)应用于铜绿山矿床的过程中发现从蚀变矿化中心向外,绿泥石 Fe-OH 吸收峰值位(Pos2250)显示高值向低值的变化趋势;2018 年刘超等^[8]通过能谱密度-面积多重分形模型对铜绿山地区 1:100000 水系沉积物的 Cu 元素数据重新分析表明 Cu 的空间分布特征可指示成矿岩体的赋存部位,为找矿勘查提供有效支撑。

尽管有如此多的勘查成果,不同的地球化学勘查方法在铜绿山矿床深部找矿勘查有效性的对比研究却较薄弱。本研究在前人勘查工作的基础上,基于对深部 XIII 号矿体详细的地球化学勘查工作,从平面-500 m 中段,以及剖面钻孔 ZK406 的原生晕地球化学和 SWIR 结果进行深入的对比分析,对两种

方法指示深部矿体的有效性进行评价,为后续的找矿勘查工作提供进一步的科学依据。

1 地质背景

铜绿山铜铁金矿床(以下简称为铜绿山矿床)位于阳新岩体的西北端,大冶复式向斜南翼与 NNE 向下陆-姜桥断裂交汇处。矿区内出露的地层主要为下三叠统大冶组海相碳酸盐岩、三叠系中下统嘉陵江组滨海相及泻湖相碳酸盐岩、白垩系下统大寺组火山岩和第四系,其中以大冶组和嘉陵江组碳酸盐岩与成矿作用最为密切^[9-10]。矿区内发育的 NNE 向构造是主要控矿构造(图 1)。致矿岩体为石英二长闪长岩和石英二长闪长玢岩,两者在岩相上呈过渡关系,且形成时代基本一致,为 141 Ma^[10]。目前已发现有 13 个矿体(I、III、IV 和 XIII 号矿体为主,深部以 XIII 号矿体为主),矿体分布主要受 NNE 和 NEE 向两组构造控制(图 2)。在空间上,矿体主要呈透镜状、似层状成群产于石英二长闪长(玢)岩与(白云质)大理岩的接触带,通常在接触带与构造破碎带交叉复合部位形成厚大的富矿体^[1,11,13]。

铜绿山矿床的围岩蚀变类型主要包括钾化(钾长石和黑云母)、钾-硅化、钾硅-黄铁矿化、绢云母化、夕卡岩化(石榴子石、透辉石和硅灰石)、退化蚀变(阳起石化、绿帘石化、金云母化、蛇纹石化、透闪石化等)、绿泥石化、碳酸盐化和黏土化(伊利石化、蒙脱石化、高岭石化、皂石化等)蚀变等^[10],由致矿岩体-蚀变矿化中心可划分为:绢云母-绿泥石-钾化带、高岭石-绿泥石-弱夕卡岩化带、皂石-绿泥石-强夕卡岩化带^[7],其中绿泥石在每个带均有发育。

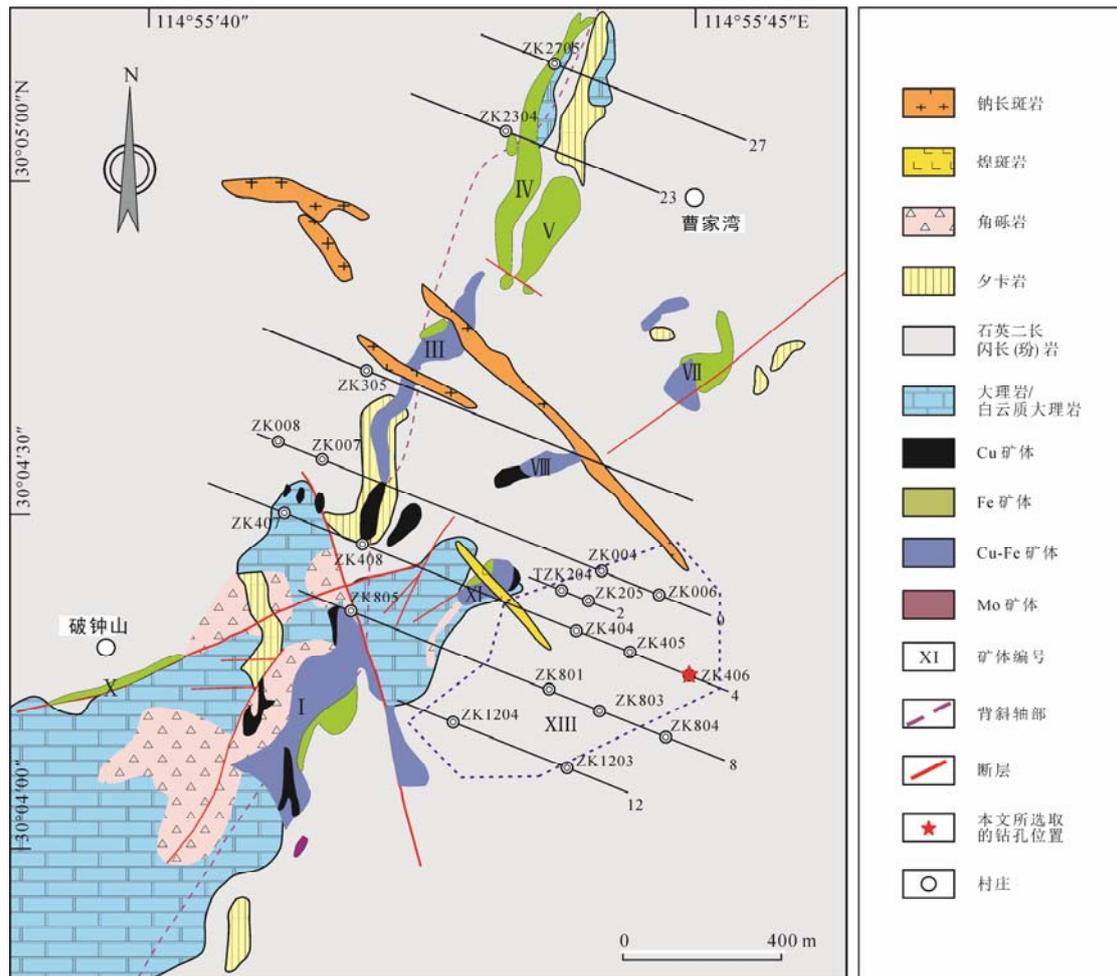


图 1 铜绿山夕卡岩型铜铁金矿床地质图(据舒全安等^[11]; Li *et al.*^[12]; 张世涛等^[7]修改)

Fig.1 Geological map of the Tonglūshan Cu-Fe-Au skarn deposit (modified after Shu *et al.*^[11], Li *et al.*^[12], and Zhang *et al.*^[7])

2 岩石原生晕与绿泥石 SWIR 方法平面预测应用

铜绿山矿床的生产勘查主要是以岩石原生晕地球化学为主, 采样主要分为平面和剖面两类。在平面上, 以典型剖面线为基础进行采样的整体布局, 基岩采样点距 20 m, 有特殊意义的地质体进行加密采样, 如正点无基岩出露, 则在其 10 m 范围内取样; 在剖面上, 主要是对钻孔岩芯为对象进行采样, 一般 5~10 m 取 1 个组合样, 对小于 5 m 范围的不同岩性也进行取样, 对部分异常地段进行重复取样检查^[3]。样品分析全部由湖北省第一地质大队实验室完成, Pb、Ag、Bi、Cu、Zn、Co、Ni、Cr、B、Mn、Ba、W、Mo、Sr 和 Be 等元素分析采用光谱近似定量分析, 各元素光谱近似定量分析检出限(灵敏度)达到扫面要求; Au 元素分析采用化学光谱法, As 元素分析采用 Ag-DDC 比色法^[3]。

张世涛等^[7]运用 SWIR 在 2017 年对铜绿山矿床中进行了有效的蚀变矿物地球化学勘查工作。所使用的仪器为湖北省地质调查院购置的美国 Analytical Spectral Devices (ASD) 公司生产的 Terra Spec。采样对象主要是钻孔岩石样品, 采样原则大约每 6~8 m/样, 在蚀变矿化比较集中的区域采取适当加密采样。在分析测试前, 需对样品进行洗净晾干, 避免矿物表面尘土或水分带来的干扰^[7]。

在深部勘查结果中, 立体填图项目在铜绿山矿床-500 m 中段、II 号矿体东南侧发现 Cu、Ag、Pb 的组合异常, 且 Cu > 200 g/t 和 Ag > 0.2 g/t 的岩石原生晕地球化学异常套合较好(图 3a), 指示其下部或旁侧存在隐伏矿体^[6]。总体来看, 铜绿山矿床具有工业价值矿床的原生岩石地球化学异常均为 Cu、Ag、Mo 的特征元素组合, 组合不全的异常一般无工业价值。结合平面上岩石原生晕地球化学异常套合位置为 NNE 向断裂与 NE 向断裂的交汇部位, 以及深部大理岩向南东方向延伸的特征, 加之 ZK401 钻

孔显示自地表向下出现微弱蚀变带-黏土化带-夕卡岩化带的分带特征,且在深部已发现黄铜矿化、斑铜矿化,综合判断其下有与夕卡岩型成矿有关的主矿带存在^[1,4,6],并进一步在接替资源勘查项目中经钻探验证新发现较大规模的 XIII 号高品位铜铁矿体^[6]。

近年发展的蚀变矿物勘查中,针对位于浅剥蚀地区的隐伏矿体使用 SWIR 技术可快速鉴定常见的低温蚀变矿物(如绢云母化、绿泥石化和黏土化)来进行蚀变矿物填图,并根据一些矿物反射光谱特征(如绿泥石、伊利石等的吸收峰位值)的系统变化定位热液或矿化中心^[14-15]。铜绿山矿床内广泛发育的绿泥

石 SWIR 测试结果显示随着接近蚀变矿化中心,绿泥石的特征吸收峰位值(Pos2250)会增加^[7]。在平面上,-500 m 中段(图 3b),绿泥石出现异常,异常区域分布在东北和北西部,少量在南部,特征吸收峰值(Pos2250)处于 2247~2249 nm 范围。该异常是因为绿泥石中富 Fe 造成,意味着在深部可能存在热液或矿化中心;在靠近热液蚀变矿化中心的-1174 m 中段(图 3c),绿泥石的分布主要集中在东南部,特征吸收峰值(Pos2250)表现为明显的高值,指示该中段更接近矿体,且异常范围与 XIII 号矿体水平投影位置基本重合。

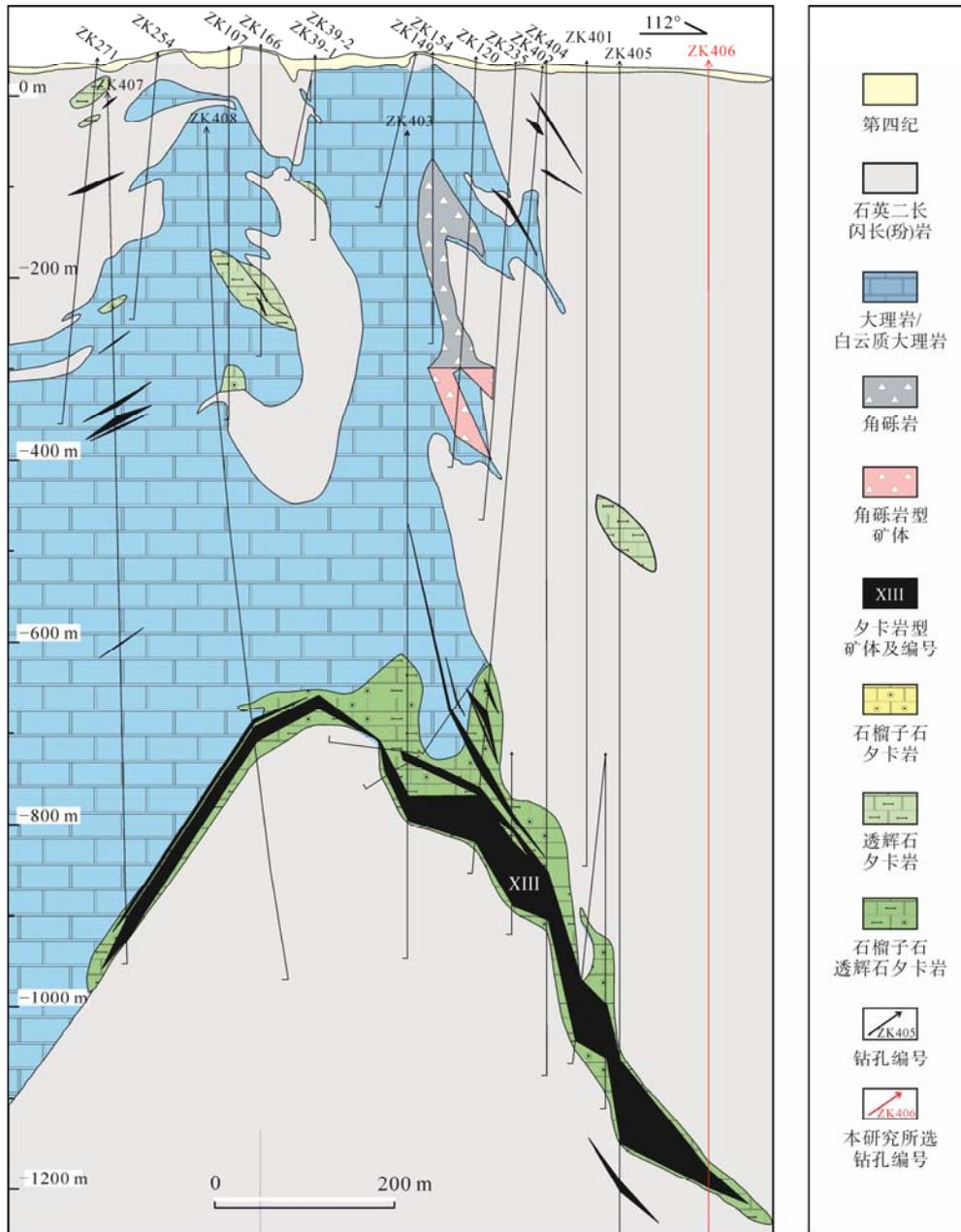


图 2 铜绿山铜铁金矿床 4 号勘探线地质剖面图(据文献[7]修改)

Fig.2 Geological map of section-line 4# in the Tonglushan Cu-Fe-Au deposit (modified after reference [7])

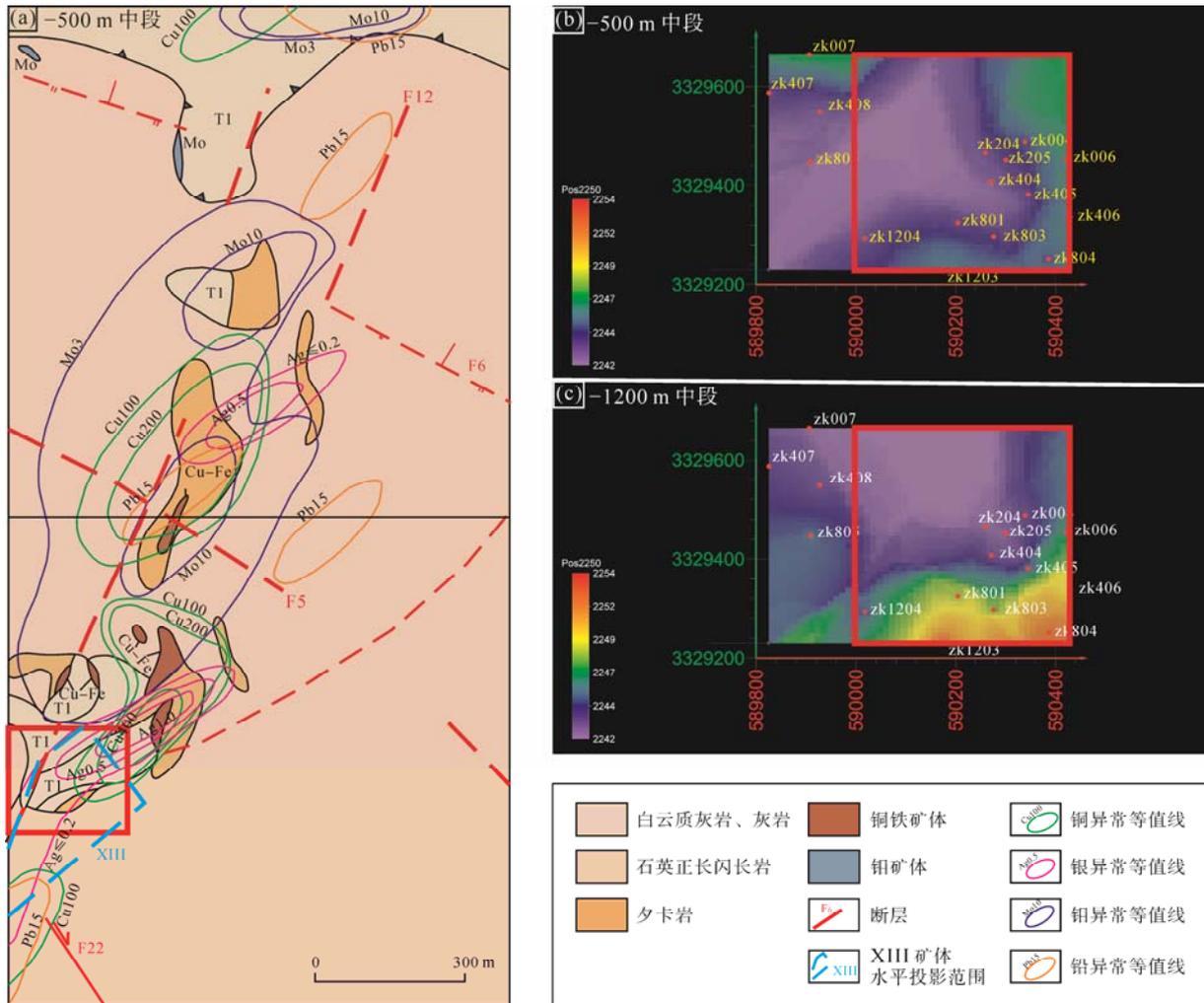


图 3 铜绿山矿床-500 m 中段岩石地球化学异常图(a)、-500 m 中段(b)和 1174m 平面(c) 绿泥石 SWIR 变化规律图(a-引自文献[1]; b、c-本次研究)

Fig.3 Geochemistry anomalies at a depth of 500 m (a), and SWIR anomalies at a depth of 500 m (b) and 1174 m (c) in the Tonglue Mountain Cu-Fe-Au deposit (a: modified after reference [1]; b, and c: this study)

3 全岩地球化学与绿泥石 SWIR 特征剖面变化规律

深部勘查验证钻孔 ZK406 (深约 1500 m)位于铜绿山矿床 4#勘探线的东部(图 2), 整孔岩性组成简单(图 4), 从浅部到深部依次为石英二长闪长(玢)岩—石榴子石/透辉石夕卡岩—XIII 号矿体—石榴子石/透辉石夕卡岩—石英二长闪长(玢)岩, 矿体受岩体与大理岩接触带及复合其上的断裂控制, 其形态、产状随接触带位置不同而变化^[3,7]。

ZK406 岩石地球化学分析共 15 个元素(Cu、Pb、Zn、Au、Ag、W、Mo、Bi、As、Hg、Sb、Ni、Sr、Ba 和 I), 在地球化学热力图(图 5)中,Cu、Pb、Zn、Au、Ag、Hg、As、Sb、Bi、W、Ni 和 I 在矿体(孔

深约 1200 m)处为高值; Ba 和 Sr 则从孔深约 1150 m 处随着靠近矿体而减少, 在矿体处达到最低值; Mo 在孔深 0~500 m 范围内局部富集, 而后含量平稳无变化。

ZK406 单元元素含量中(图 6), 大部分元素在矿体位置(孔深 1200 m)的含量表现为极高-高值, 远高于两旁的夕卡岩和岩体。在浅部岩体中 Cu、Pb 和 Au 在孔深 0~600 m 也出现富集现象, 但 Zn、Ag、Hg、As、Sb 和 Bi 除矿体位置外并无明显变化; I 在 ZK406 中随着靠近矿体中心含量具有明显增加; W 在矿体周围及上方时(孔深 600~1200 m)含量出现升高, Mo 在本钻孔无异常变化。此外, Sr 和 Ba 与矿体的距离呈较弱的负相关关系, 即接近矿体元素含量呈降低趋势, 并在矿体处达到最低值; Ni 在靠近矿体的部位含量升高, 但在矿体处元素含量总体表现为降低, 局部表现为升高。

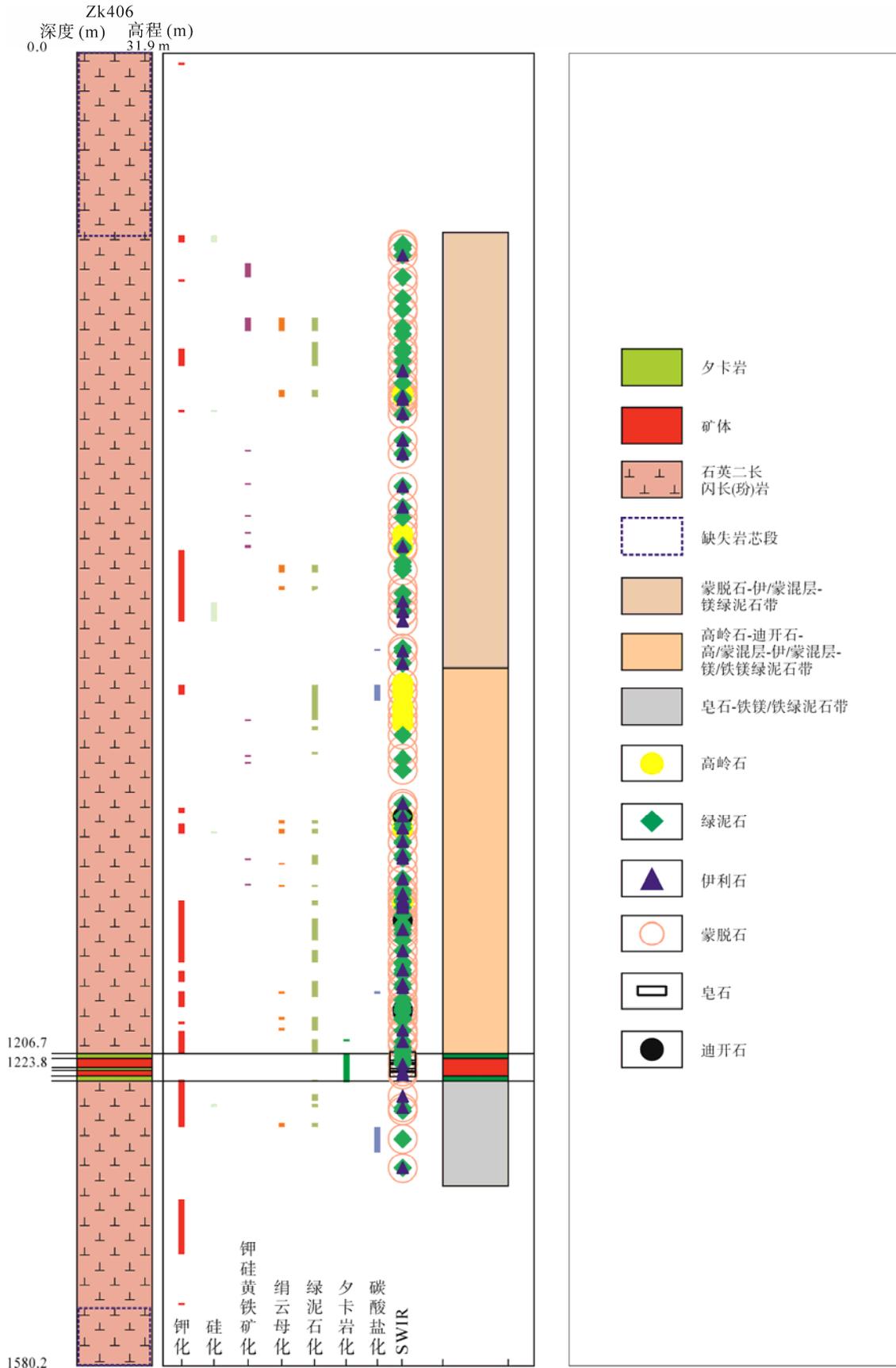


图 4 铜绿山矿床 ZK406 蚀变分带和 SWIR 结果分布图(本研究)

Fig.4 Alteration zone and SWIR results of ZK406 in the Tonglūshan Cu-Fe-Au deposit (this study)

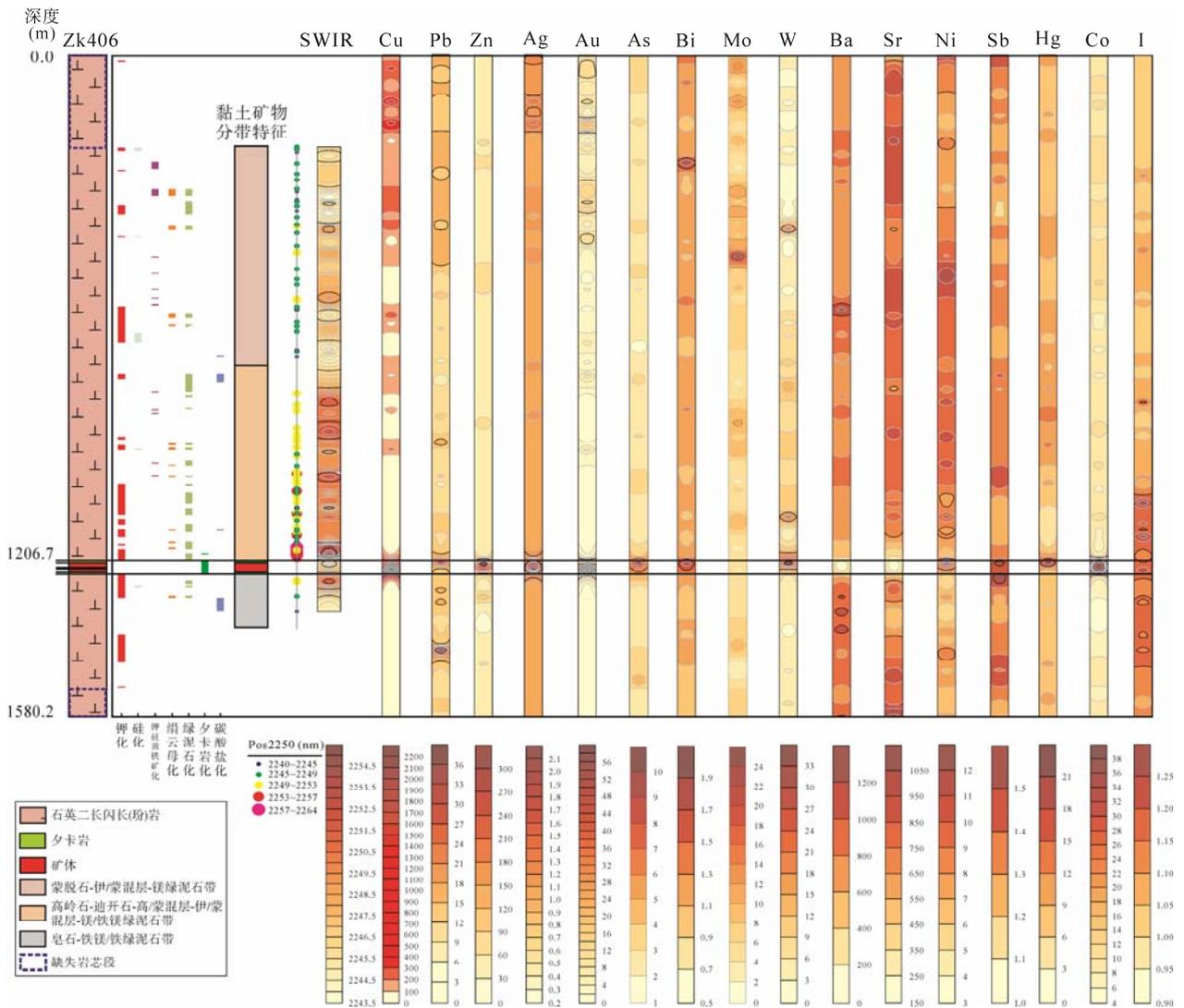


图 5 铜绿山铜铁金矿床 ZK406 柱状图、SWIR 结果及单元素岩石地球化学热力图 (钻孔岩石地球化学数据引自文献[3])

Fig.5 SWIR and single element rock geochemical thermo-diagrams of ZK406 in the Tonglushan Cu-Fe-Au deposit (element data from reference [3])

ZK406 绿泥石 SWIR 热力图(图 5)显示, 绿泥石特征吸收峰位值(Pos2250)在孔深 800 m 处开始随着靠近矿体而增大, 并在紧靠矿体的夕卡岩化带达到最大值。绿泥石 Pos2250 值与距矿体的距离(m)投图(图 7)则显示, 两者具有较好的负相关关系。

4 讨论

4.1 岩石原生晕地球化学勘查的找矿指示

长江中下游地区是我国夕卡岩铜矿床的主要分布地区, 在这些夕卡岩铜矿床内, 平面上常形成具有明显水平分带的原生晕, 即自火成岩—接触带—外围碳酸盐类岩石, 指示元素大体呈 Mo→Cu、

Ag→Ag、Mn、Pb、As 的异常套合分带序列^[16]。在铜绿山矿床-500 m 中段(图 3a)的勘查结果与此结论相一致, 且异常范围大于-500m 中段的矿体和夕卡岩出露面积。铜绿山矿床在水平分带上元素组合异常明显的同时, 在剖面上, 胡清乐等^[4]总结铜绿山矿床剖面原生晕分布中异常组分的浓度带围绕矿体呈同心带状展布: Hg、As、Ag、Pb 和 I 为前缘指示元素, 异常分布在矿体的上部和前缘; Cu、Au 和 Zn 为矿体的近矿晕指示元素, 异常与矿体规模基本一致; Bi、Mo 和 W 为尾晕指示元素, 异常分布于矿体尾部。然而, 在验证深部矿体的钻孔 ZK406 中并未能较好地体现该原生晕分布规律, 可能是受单孔指示效果的制约。

据前人^[2,7,10,17-20]对铜绿山矿床成因机制的研究, 成

矿作用主要发生在(140.3±1.1) Ma~(137.3±2.4) Ma^[2,17], 在热液作用过程可分为岩浆-热液期和表生期2个期次, 成矿作用主要发生在岩浆-热液期中, 该期又可分为夕卡岩阶段、退化蚀变阶段、氧化物阶段、硫

化物阶段和碳酸盐阶段^[7]。Zhao *et al.*^[19]对铜绿山矿床的成矿流体进行研究时则将岩浆-热液期分为4个阶段: 夕卡岩阶段、退化蚀变阶段、石英-硫化物阶段和碳酸盐阶段。

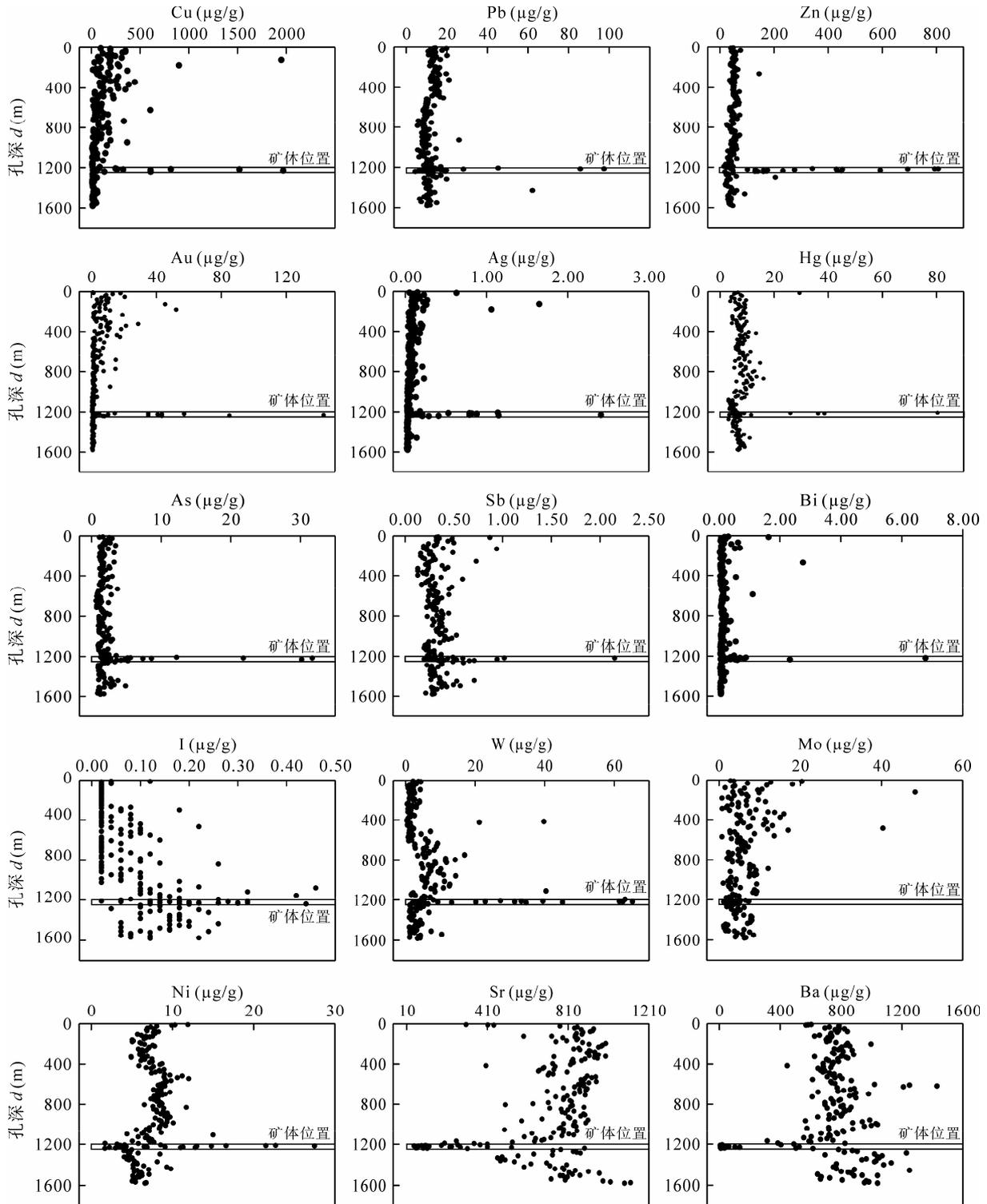


图6 铜绿山铜铁金矿床 ZK406 全岩单元素含量分布图(数据引自文献[3])

Fig.6 Single element content distribution map of ZK406 in the Tonglushan Cu-Fe-Au deposit
(The x-axis is the element content ($\mu\text{g/g}$), and the y-axis is the drill hole depth (m). The data are from reference [3])

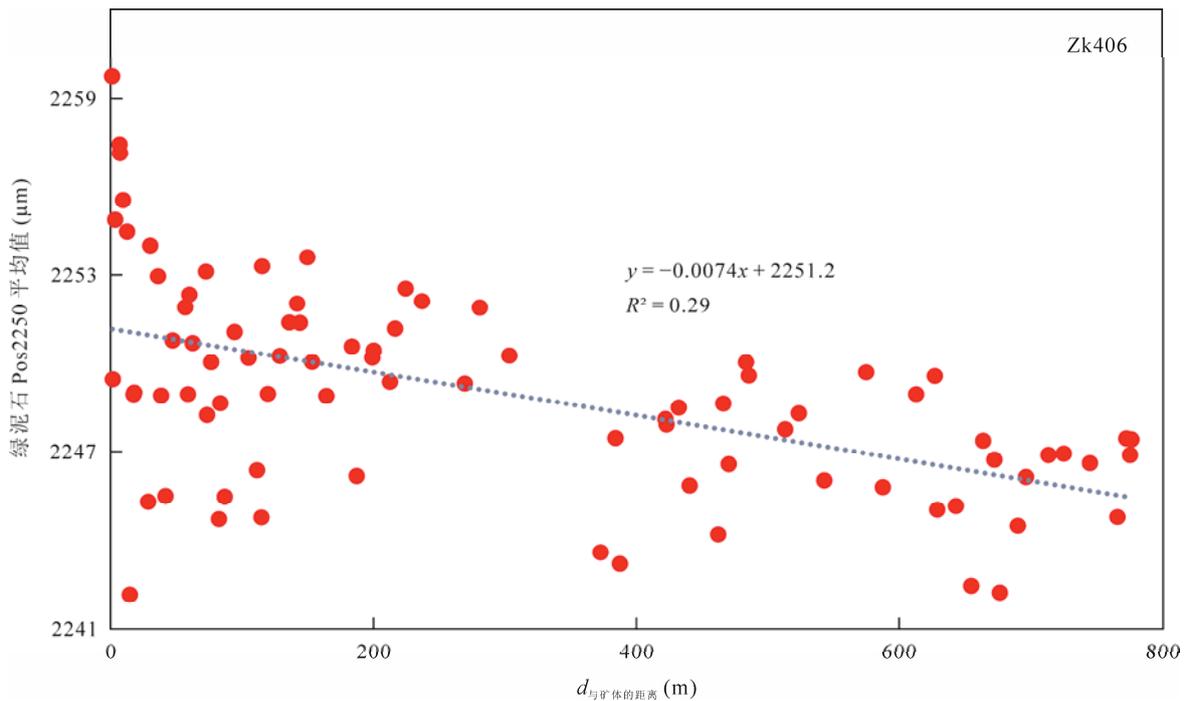


图 7 铜绿山铜铁金矿床 ZK406 绿泥石 Pos2250 值与矿体距离关系图(本研究)

Fig.7 Chlorite Pos2250 value versus distance from the orebody in ZK406 at the Tonglūshan Cu-Fe-Au deposit (this study)

成矿流体的 NaCl-H₂O 体系从高温、高盐的夕卡岩阶段(> 550 °C, > 66.57%)逐渐演化至退化蚀变阶段(405~567 °C, 48.43%~55.15%)后, 过渡到中温的石英-硫化物阶段(240~350 °C, 4.96%~50.75%), 这一阶段的沸腾作用和混合大气水对 Cu 沉淀起着重要的控制作用, 最后是低温低盐的碳酸盐阶段(174~284 °C, 1.57%~4.03%)^[19]。在稳定同位素方面, 石英-硫化物阶段中石英的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{K}}$ (平均值 4.98‰)比夕卡岩阶段稍低, 指示着流体主要来源于岩浆, 该结果与长江中下游的其他一些矿床相一致; 黄铜矿和黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ (0.71‰~3.81‰, 平均值 2.0‰)显示铜绿山矿床中 S 的来源为同源, 推测为岩浆来源^[20]。

结合成矿元素地球化学特征, Cu、Pb、Zn 和 Ag 等具有强亲硫性。Cu 主要呈独立矿物或以类质同像形式赋存于硫化物中生成硫化物或含硫盐矿物, 是盲矿预测中最直接、最重要的成矿指示元素; Ag 作为亲铜元素和亲硫元素, 与 Pb 和 Zn 等类质同像大量存在于 PbS 中, 并可随 Pb、Zn、Cd、Bi 和 Cu 等元素一起迁移; Pb 和 Zn 具有亲硫性, 主要以硫化物形式存在^[21]。在热液成矿过程中, 由于 Cu 的沉淀温度比 Pb 和 Ag 高, 在经历石英-硫化物阶段的成矿流体沸腾和混合大气水过程后, Cu 更趋向形成于深部和矿化中心, Pb 和 Ag 则趋向于浅部和外围^[22]。其次, 矿体中富含磁铁矿, 说明成矿流体具有较高的氧逸

度, 而高氧逸度有利于 Cu 和 Au 等亲铜元素在岩浆熔体中以硫酸盐的形式高度富集, 同时能够阻止其在岩浆结晶中早期进入到硅酸盐矿物中, 使其作为不相容元素在熔体中富集^[23-24]。因而 ZK406 成矿元素和亲铜元素的高异常或低异常主要表现在矿体位置, 其他部位的元素含量基本稳定, 表明富含成矿及相关元素的热液流体主要集中在矿体位置, 符合夕卡岩型矿体严格受控于大理岩与岩体接触界面的成矿规律。除此之外, Cu、Pb、Au 和 Ag 在 ZK406 浅部(孔深 0~600 m)较富集, 可能与浅部岩体较靠近上部的夕卡岩接触界面和 XI 号角砾岩型矿体有关, 而发育较多的含铜硫化物脉导致岩体中的成矿元素含量较高。

石英-硫化物阶段除对成矿元素的沉淀起着关键作用外, 对其他微量元素也起到一定的控制作用。I 和 W 在矿体附近具有含量升高的变化趋势, 从其物理化学性质可知, I 具有强挥发性, 卤族元素的原子半径在同周期元素中最小, 并且极容易形成阴离子, 化学性质活泼; I 在高温下易以气体 I₂ 形式迁移, 在蒸气压较大时从成矿热液的金属络合物中释放出来的 I 易形成气态沿断裂迁移; 低温时易形成 I⁻ 存在于水溶液中; I 还可与亲硫亲铁元素(如 Cu、Ag、Hg 和 Pb 等)结合形成稳定化合物进入矿物晶格, 与 F⁻ 和 Cl⁻ 等进行类质同像替代^[21-22]。在成矿作用

过程中, I 与许多金属形成易挥发、易溶的络合物进行迁移和富集, 而后早期流体沸腾使 I 从络合物中释放并气化成 I_2 , 通过断裂由渗流、扩散和相等方式继续向上或两侧迁移, 在矿体上方及附近形成卤素的原生晕并迁移至距离矿体较远的部位, 因而靠近矿体 I 元素具有增高的现象; 到了晚期, 随着成矿流体的温度、盐度及压力等因素的下降, I 则溶于水溶液中, 由于 I 与岩石结合并不紧密, 以弱吸附形式存在于岩石矿物间隙之中, 岩石毛细水中以活性 I (碘化物离子) 形式存在^[21-22], 因而在远离矿体的部位 I 元素表现出较低的含量。再者, W 在夕卡岩及外围岩体部位(孔深 600~1200 m) 含量有升高的变化趋势, 这是因为夕卡岩型矿床形成过程中岩体和碳酸盐围岩接触产生大量的 CO_2 ^[25], 而在高温高压的热液中, 高浓度的 CO_2 不仅使亲氧的 W 在溶液中含量增高, 也让 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 和 Ca^{2+} 等沉淀剂在溶液中保持稳定, 对 W 的迁移起着重要作用^[22]。

Ni、Sr 和 Ba 则表现出与 I 和 W 相反的变化趋势。Ni 具有强亲硫、亲铁双重性的特征, 易富集在硫化物中, Ni 大量富集于以块状硫化物为主的矿体中; 通常, Ni 主要来自于岩浆热液, 而靠近矿体的部位是岩体和碳酸盐围岩的接触界线, 因此导致 Ni 含量升高^[22]。与此同时, Ni 在矿体部位出现负异常是由于矿体除了以块状硫化物的形式产出外, 还以浸染状、脉状矿石为主, 该类型矿石中 Ni 含量因硫化物含量减少而降低。部分 Ni 含量的极低值可能与流体沸腾和淋滤作用有关, 成矿热液与围岩作用形成夕卡岩的同时活化带走矿物晶格中的 Ni 导致在矿体附近出现极低值^[22], 故在远离矿体的部位出现 Ni 含量逐步升高的变化。

Sr 和 Ba 元素在 ZK406 的矿体部位表现为强的负异常, 与矿体的距离呈弱负相关关系, 可能与矿体主要发育硫化物而缺少富含钙或钾的矿物有关。根据元素特征, Sr 与 Ca 的离子半径相近, Ba 与 K 的离子半径相近, Sr 主要与 Ca 形成类质同像, 而 Ba 较多地与 K 出现异价类质同像^[22]。在接触变质作用中, 较高的温度使 Sr 和 Ba 产生更明显的迁移, 并与 Ca 和 K 形成类质同像在围岩中富集^[22], 造成在矿体及浅部硫化物发育部位出现 Sr 和 Ba 元素降低而在矿体旁侧的围岩富集的现象。

综上所述, 铜绿山岩石原生晕地球化学勘查方法根据元素本身性质和迁移能力的特征, 结合矿床类型、剖面断裂走向、大理岩延伸方向和蚀变变化

趋势, 预测异常套合部位的深部或旁侧存在与夕卡岩型成矿有关的主矿带存在。虽然该方法成功预测了隐伏矿体的存在, 但并不能较准确地指示隐伏矿体的方位, 隐伏矿体的产出位置与指示元素套合位置存在偏差(尤其在剖面上)。因而, 岩石原生晕地球化学勘查方法在区域找矿中是一种重要的普查手段, 考虑到引起元素变化的多解性及定位误差, 在矿床尺度找矿预测上仍存在一定的局限性。

4.2 SWIR 勘查方法与全岩原生晕方法的对比

SWIR 即短波红外光谱技术作为一种新开发的勘查方法, 近年来在矿产勘查中也取得了一定的成果。该技术在快速鉴定含羟基、硫酸盐及碳酸盐等热液蚀变矿物进行蚀变矿物填图的同时也能利用特征矿物反射光谱的系统变化直接定位热液或矿化中心^[7,15,26-31]。如 2011 年 Chang *et al.*^[28] 发现在菲律宾 Lepanto 高硫型浅成低温热液矿床的明矾石特征吸收峰位值(Pos1480)与侵入体的距离呈反比关系; 2012 年杨志明等^[15] 发现在西藏念村斑岩矿区的伊利石结晶度和 Al-OH 的特征吸收峰位值与热液或蚀变矿化中心关系密切; 2016 年 Laakso *et al.*^[29] 发现加拿大 Izok Lake 块状硫化物矿床富 Al 的绢云母和富 Mg 的黑云母/绿泥石可有效指示矿化中心; 2017 年许超等^[30] 在紫金山斑岩型矿床发现伊利石的结晶度和特征吸收峰从矿化中心到外围有从高到低的变化趋势; 2018 年 Neal *et al.*^[31] 发现 Batu Hijau 的绿泥石特征吸收峰位值的变化与 $Mg/(Mg+Fe)$ 值有关, 并且两者在距离主矿体 1.6 km 处进入高值范围。

在铜绿山矿床, 2017 年张世涛等^[7] 通过对矿床中的蚀变矿物进行系统的 SWIR 研究发现, 从矿化中心到外围, 绿泥石由铁/镁绿泥石转变为镁绿泥石, Fe-OH 特征吸收峰值(Pos2250)显示出从高值到低值的变化趋势。本研究发现, 在平面上绿泥石在-500 m 中段和-1174 m 主矿体处(ZK406 矿体位置平面)也表现出同样的变化趋势, 其变化区域与 XIII 号矿体的水平投影范围相一致。在-500 m 中段(图 3b), NW 和 NE 方向出现绿泥石 Pos2250 值异常可能是受浅部相邻矿体的影响而引起的, SE 和正 S 向出现局部绿泥石 Pos2250 值异常暗示在深部可能存在隐伏矿体, 且隐伏矿体位置与异常变大的位置相近; -1174 m 主矿体处绿泥石 Pos2250 高值异常区与 XIII 号矿体深(尾)部所在位置一致对应; 在剖面上, ZK406 的绿泥石 Pos2250 值从孔深约 800 m 处开始随着接近矿

体而变大, 指示在距离矿体约 400 m 处进入隐伏矿体的预测范围。Pos2250 值的大小跟绿泥石中的 Fe 含量呈正比关系^[32]是由于成矿流体沿着控矿构造流动的过程中, 在岩浆-热液早期的夕卡岩阶段和退化蚀变阶段首先形成富 Fe 的磁铁矿和石榴子石, 而后夕卡岩或热液矿化中心的富 Fe 绿泥石主要通过交代磁铁矿或石榴子石形成, 远端致矿岩体或夕卡岩化带中的绿泥石则相对富 Mg, 因此绿泥石的成分主要受热液流体和围岩成分的控制^[10], 已有较多的研究成果验证了该解释(如 Alwin-Valley-Bethlehem 斑岩型铜钼矿床^[33]、Myra Falls 状硫化物矿床^[34]、大冶铜山口斑岩-夕卡岩型铜钼矿床^[35]等)。

铜绿山矿床矿体的形态和分布严格受岩体与大岩岩接触带及复合其上的断裂控制的同时, 在平面上岩石原生晕地球化学勘查能显示矿体周围发育明显的水平分带异常, 异常元素组合可预测隐伏矿体及其大概位置; SWIR 勘查则根据绿泥石 Pos2250 值及不同平面的系统变化趋势预测隐伏矿体, 其中高异常区与隐伏矿体位置耦合。在剖面上, 岩石原生晕地球化学勘查结果与铜绿山矿床的成因类型表现出一致性, 显示异常的元素或部位能与实际的矿体或地质情况相对应, 但在预测方面效果不够明显, 仅个别元素显示出较强的变化规律; 相比之下, SWIR 勘查在平面和剖面上均能从铜绿山矿床广泛发育的特征蚀变矿物绿泥石 Pos2250 值等来预测距离矿体的远近, 尤其在剖面上能从距离矿体约 400 m 开始即观察到绿泥石 Pos2250 值逐渐增大, 进而对隐伏矿体进行有效预测。因而我们建议, 在区域上使用岩石原生晕地球化学勘查的基础上可以进一步结合 SWIR 分析, 后者可能更适合于在矿区尺度内利用所发育的特征蚀变矿物确定热液蚀变或矿体中心。

5 结 论

(1) 岩石原生晕地球化学勘查通过平面上的指示元素组合异常套合进行隐伏矿体预测。指示元素异常与元素亲铜性、亲硫性和迁移性等特征有关, 受热液蚀变作用的影响; 在剖面上, 岩石原生晕地球化学分析显示亲铜元素、亲硫元素等仅富集在矿体位置, 与夕卡岩型矿床中成矿热液的流动严格受接触界面的控制而使成矿元素集中沉淀于接触带部位的规律相一致, I、Ni、Sr 和 Ba 的富集或亏损可能为热液蚀变作用的结果。在找矿预测上除 I 之外, 其

他元素剖面上的指示作用稍显薄弱。

(2) SWIR 结果在平面和剖面上均能显示绿泥石的 Fe-OH 特征吸收峰值(Pos2250)从围岩到接触/矿化中心呈明显的低到高变化规律, 在垂向上距离矿化中心约 400 m 处即进入有效预测范围, 显示 SWIR 勘查在找矿预测工作方面具有较大的发展潜力。

本工作得到湖北省地质调查院和湖北省地质局第一地质大队领导的大力支持, 周涛发教授和许德如教授对本文提出了宝贵的建设性意见使得文章质量得以提高, 在此一并致以感谢。

参考文献(References):

- [1] 魏克涛, 李享洲, 张晓兰. 铜绿山铜铁矿床成矿特征及找矿前景[J]. 资源环境与工程, 2007, 21(增刊): 41-56.
Wei Ke-tao, Li Xiang-zhou, Zhang Xiao-lan. The characteristics of Tonglushan copper-iron deposit and its prospecting future [J]. Resour Environ Eng, 2007, 21(suppl): 41-56 (in Chinese with English abstract).
- [2] 谢桂青, 赵海杰, 赵财胜, 李向前, 侯可军, 潘怀军. 鄂东南铜绿山矿田砂卡岩型铜铁金矿床的辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 2009, 28(3): 227-239.
Xie Gui-qing, Zhao Hai-jie, Zhao Cai-sheng, Li Xiang-qian, Hou Ke-jun, Pan Huai-jun. Re-Os dating of molybdenite from Tonglushan ore district in southeastern Hubei Province, middle-lower Yangtze River belt and its geological significance [J]. Mineral Deposits, 2009, 28(3): 227-239 (in Chinese with English abstract).
- [3] 湖北省地质局第一地质大队. 湖北省大冶市铜录山铜矿接替资源勘查(深部普查)报告[R]. 大冶: 湖北省地质局第一地质大队, 2010: 1-115.
The First Geological Brigade of Hubei Geological Bureau. The continued resources exploration report of Tonglushan copper deposit, Daye, Hubei Province [R]. Daye: The First Geological Brigade of Hubei Geological Bureau, 2010: 1-115 (in Chinese).
- [4] 胡清乐, 金尚刚, 魏克涛, 黄志辉, 朱建东, 张国胜. 湖北大冶铜绿山矿田深部找矿工作进展及下步找矿方向[J]. 资源环境与工程, 2011, 25(3): 182-187.
Hu Qing-le, Jin Shang-gang, Wei Ke-tao, Huang Zhi-hui, Zhu Jian-dong, Zhang Guo-sheng. Deep prospecting progress and further prospecting direction of Tonglushan orefield in Daye City, Hubei Province [J]. Resour Environ Eng, 2011, 25(3): 182-187 (in Chinese with English abstract).
- [5] 徐荣华, 胡清乐, 阮启林, 黄智辉, 杨世平. 综合找矿方法在鄂东南危机矿山接替资源勘查中的应用[J]. 矿产与地质, 2011, 25(4): 280-285.
Xu Rong-hua, Hu Qing-le, Yuan Qi-lin, Huang Zhi-hui, Yang Shi-ping. Application of comprehensive prospecting method in succeeding mineral resource exploration in exhausting mines of southeast Hubei Province [J]. Mineral Resour Geol, 2011, 25(4): 280-285 (in Chinese with English abstract).

- [6] 魏克涛, 冯毓华, 黄智辉, 张晓兰. 找矿靶区综合信息预测在已知矿山深部找矿中的应用[J]. 资源环境与工程, 2013, 27(增刊): 134-136.
Wei Ke-tao, Feng Yu-hua, Huang Zhi-hui, Zhang Xiao-lan. Application of comprehensive information prediction of prospecting target area in deep prospecting of known mines [J]. Resour Environ Eng, 2013, 27(suppl): 134-136 (in Chinese with English abstract).
- [7] 张世涛, 陈华勇, 张小波, 张维峰, 许超, 韩金生, 陈冕. 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[J]. 矿床地质, 2017, 36(6): 1263-1288.
Zhang Shi-tao, Chen Hua-yong, Zhang Xiao-bo, Zhang Wei-feng, Xu Chao, Han Jin-sheng, Chen Mi. Application of short wavelength infrared (SWIR) technique to exploration of skarn deposit: A case of study of Tonglvshan Cu-Fe-Au deposit, Edongnan (southeast Hubei) ore concentration area [J]. Mineral Deposits, 2017, 36(6): 1263-1288(in Chinese with English abstract).
- [8] 刘超, 李程, 柯于富, 任际周. 鄂东南铜绿山地区 Cu 元素地球化学分布特征分析[J]. 物探化探计算技术, 2018, 40(2): 248-254.
Liu Chao, Li Cheng, Ke Yu-fu, Ren Ji-zhou. Geochemical distribution analysis of Cu in Edongnan region [J]. Comput Tech Geophys Geochem Explor, 2018, 40(2): 248-254 (in Chinese with English abstract).
- [9] 刘继顺, 马光, 舒广龙. 湖北铜绿山矽卡岩型铜铁矿床中隐爆角砾岩型金(铜)矿体的发现及其找矿前景[J]. 矿床地质, 2005, 24(5): 527-536.
Liu Ji-shun, Ma Guang, Shu Guang-long. Discovery of crytoexplosive breccia type Cu (-Au) orebodies in Tonglvshan skarn-type Cu-Fe deposit of Hubei Province and ore-searching vista [J]. Mineral Deposits, 2005, 24(5): 527-536 (in Chinese with English abstract).
- [10] 张世涛. 湖北铜绿山铜铁金矿床岩浆演化、蚀变矿物特征及勘查应用[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2018.
Zhang Shi-tao. Magmatic evolution, alteration mineral characteristics and application to exploration in the Tonglvshan Cu-Fe-Au deposit, Hubei Province, China [D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [11] 舒全安, 陈培良, 程建荣. 鄂东铁铜矿产地质[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1992: 1-532.
Shu Quan-an, Chen Pei-liang, Cheng Jian-rong. The Geology of Iron and Copper Deposits in Eastern Hubei Province, China [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1992: 1-532 (in Chinese with English abstract).
- [12] Li J W, Deng X D, Zhou M F, Liu Y S, Zhao X F, Guo J L. Laser ablation ICP-MS titanite U-Th-Pb dating of hydrothermal ore deposits: A case study of the Tonglvshan Cu-Fe-Au skarn deposit, SE Hubei Province, China [J]. Chem Geol, 2010, 270: 56-67.
- [13] 赵一鸣, 林文蔚. 中国夕卡岩矿床[M]. 北京: 地质出版社, 2012: 1-411.
Zhao Yi-ming, Lin Wen-wei. Skarn Deposits of China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012: 1-411 (in Chinese).
- [14] 章革, 连长云, 王润生. 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, 2005, 24(5): 480-484.
Zhang Ge, Lian Chang-yun, Wang Run-sheng. Application of the portable infrared mineral analyser (PIMA) in mineral mapping in the Qulong copper prospect, Mozhugongka County, Tibet [J]. Geol Bull China, 2005, 24(5): 480-484 (in Chinese with English abstract).
- [15] 杨志明, 侯增谦, 杨竹森, 曲焕春, 李振清, 刘云飞. 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, 2012, 31(4): 699-717.
Yang Zhi-ming, Hou Zeng-qian, Yang Zhu-sen, Qu Huan-chun, Li Zhen-qing, Liu Yun-fei. Application of short wavelength infrared (SWIR) technique in exploration of poorly eroded porphyry Cu district: A case study of Niancun ore district, Tibet [J]. Mineral Deposits, 2012, 31(4): 699-717 (in Chinese with English abstract).
- [16] 刘英俊, 邱德同. 勘查地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 1-376.
Liu Ying-jun, Qiu De-tong. Exploration Geochemistry [M]. Beijing: Science Press, 1987: 1-376 (in Chinese).
- [17] Xie G Q, Mao J W, Zhao H J, Wei K T, Jin S G, Pan H J, Ke Y F. Timing of skarn deposit formation of the Tonglvshan ore district, southeastern Hubei Province, Middle-Lower Yangtze River Valley metallogenic belt and its implications [J]. Ore Geol Rev, 2011, 43: 62-77.
- [18] 赵海杰, 毛景文, 向君峰, 周振华, 魏克涛, 柯于富. 湖北铜绿山矿床石英闪长岩的矿物学及 Sr-Nd-Pb 同位素特征[J]. 岩石学报, 2010, 26(3): 768-784.
Zhao Hai-jie, Mao Jing-wen, Xiang Jun-feng, Zhou Zhen-hua, Wei Ke-tao, Ke Yu-fu. Mineralogy and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of quartz diorite in Tonglvshan deposit, Hubei Province [J]. Acta Petrol Sinica, 2010, 26(3): 768-784 (in Chinese with English abstract).
- [19] Zhao H J, Xie G Q, Wei K T, Ke Y F. Mineral compositions and fluid evolution of the Tonglvshan skarn Cu-Fe deposit, SE Hubei, east-central China [J]. Int Geol Rev, 2012, 54(7): 737-764.
- [20] 赵海杰, 谢桂青, 魏克涛, 柯于富. 湖北大冶铜绿山铜铁矿矽卡岩矿物学及碳氧硫同位素特征[J]. 地质论评, 2012, 58(2): 379-395.
Zhao Hai-jie, Xie Gui-qing, Wei Ke-tao, Ke Yu-fu. Skarn mineral and stable isotopic characteristics of Tonglvshan Cu-Fe deposit in Hubei Province [J]. Geol Rev, 2012, 58(2): 379-395 (in Chinese with English abstract).
- [21] 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 王鹤年, 储同庆, 张景荣. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1984: 1-517.
Liu Ying-jun, Cao Li-ming, Li Zhao-lin, Wang He-nian, Chu Tong-qing, Zhang Jing-rong. Elemental Geochemistry [M]. Beijing: Science Press, 1984: 1-517 (in Chinese).
- [22] 刘英俊, 曹励明. 元素地球化学导论[M]. 北京: 地质出版

- 社, 1987: 1–273.
- Liu Ying-jun, Cao Li-ming. Introduction to Elemental Geochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987: 1–273 (in Chinese).
- [23] Sun W D, Liang H Y, Ling M X, Zhan M Z, Ding X, Zhang H, Yang X Y, Li Y L, Ireland T R, Wei Q R, Fan W M. The link between reduced porphyry copper deposits and oxidized magmas [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2013, 103: 263–275.
- [24] Sun W D, Huang R F, Li H, Hu Y B, Zhang C C, Sun S J, Zhang L P, Ding X, Li C Y, Zartman R E, Ling M X. Porphyry deposits and oxidized magmas [J]. *Ore Geol Rev*, 2015, 65(1): 97–131.
- [25] 翟裕生, 姚书振, 蔡克勤. 矿床学(第三版). 北京: 地质出版社, 2011: 1–398.
- Zhai Yu-sheng, Yao Shu-zhen, Cai Ke-qin. *Mineral Deposits* [M]. 3rd ed. Beijing: Geological Publishing House, 2011: 1–398 (in Chinese).
- [26] Yang K, Lian C, Huntington J F, Peng Q, Wang Q. Infrared spectral reflectance characterization of the hydrothermal alteration at the Tuwu Cu-Au deposit, Xinjiang, China [J]. *Mineral Deposita*, 2005, 40: 324–336.
- [27] Thompson A J, Scott K, Huntington J, Yang K. Mapping mineralogy with reflectance spectroscopy: Examples from volcanogenic massive sulfide deposits [J]. *Rev Econ Geol*, 2009, 16: 25–40.
- [28] Chang Z S, Hedenquist J W, White N C, Cooke D R, Roach M, Deyell C L, Garcia J, Gemmell J B, McKnight S, Cuisson A L. Exploration tools for linked porphyry and epithermal deposits: Example from the Mankayan intrusion-centered Cu-Au district, Luzon, Philippines [J]. *Econ Geol*, 2011, 106(8): 1365–1398.
- [29] Laakso K, Peter J M, Rivard B, White H P. 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*, 2016, 111: 1223–1239.
- [30] 许超, 陈华勇, White N, 祁进平, 张乐骏, 张爽, 段甘. 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*, 2017, 36(5): 1013–1038.
- Xu Chao, Chen Hua-yong, White N, Qi Jin-ping, Zhang Le-jun, Zhang Shuang, Duan Gan. Alteration and mineralization of the southwest Cu-Mo ore deposit, Zijinshan orefield, Fujian Province and the application of Short Wavelength Infrared (SWIR) in exploration [J]. *Mineral Deposits*, 2017, 36(5): 1013–1038 (in Chinese with English abstract).
- [31] Neal L C, Wilkinson J J, Mason P J, Chang Z S. Spectral characteristics of propylitic alteration minerals as a vectoring tool for porphyry copper deposits [J]. *J Geochem Explor*, 2018, 184A: 179–198.
- [32] Jones S, Herrmann W, Gemmell J B. 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*, 2005, 100: 273–294.
- [33] Jimenez T R A. Variation in hydrothermal muscovite and chlorite composition in the Highland Valley porphyry Cu-Mo district, British Columbia, Canada [D]. Vancouver: The University of British Columbia, 2011.
- [34] Jones S, Herrmann W, Gemmell J B. Short wavelength infrared spectral characteristics of the HW Horizon: Implication for exploration in the Myra Falls volcanic-hosted massive sulfide camp, Vancouver Island, British Columbia, Canada [J]. *Econ Geol*, 2005, 100(2): 273–294.
- [35] Han J S, Chu G B, Chen H Y, Hollings P, Sun S Q, Chen M. Hydrothermal alteration and short wavelength infrared (SWIR) characteristics of the Tongshankou porphyry-skarn Cu-Mo deposit, Yangtze craton, Eastern China [J]. *Ore Geol Rev*, 2018, 101: 143–164.