

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.192>



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

李如操¹, 陈华勇^{1*}, 李光辉², 冯雨周¹, 肖兵¹, 韩金生¹, 邓昌州², 时慧琳²

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. 黑龙江省地质调查研究总院, 黑龙江哈尔滨 150036

摘要: 富克山铜钼矿是黑龙江省近年来的重大找矿成果之一。详细的野外观察和室内研究发现该矿床具有典型斑岩矿化特征。该矿床致矿斑岩为闪长玢岩, 该岩性的侵位导致其自身及围岩中的钾化、黄铁绢英岩化和晚期绿泥石-黄铁矿三期蚀变。矿化主要赋存在与黄铁绢英岩化相关的伟晶岩和花岗闪长岩中。蚀变矿化与致矿闪长玢岩枝的空间分布特征指示矿区南西向深部可能存在大规模致矿岩体。白云母族矿物 Pos2200 和绿泥石的 Pos2250 峰值研究, 二者受原岩成分影响较大, 不宜作为下一步找矿的勘查指标。白云母族 IC 值(伊利石结晶度)和绿泥石中 MnO 则主要受到温度的控制, 是寻找热液矿化中心的有力工具。该项研究表明, 蚀变矿化特征与 SWIR 分析结合将对矿床勘查起到较为重要的指示作用。

关键词: 大兴安岭; 富克山; 斑岩矿床; SWIR; 找矿勘查; 地球化学。

中图分类号: P614

文章编号: 1000-2383(2020)05-1517-14

收稿日期: 2019-05-14

Geological Characteristics and Application of Short Wavelength Infra-Red Technology (SWIR) in the Fukeshan Porphyry Copper Deposit in the Great Xing'an Range Area

Li Rucao¹, Chen Huayong^{1*}, Li Guanghui², Feng Yuzhou¹, Xiao Bing¹, Han Jinsheng¹, Deng Changzhou², Shi Huilin²

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

2. Heilongjiang Institute of Geological Survey, Harbin 150036, China

Abstract: The Fukeshan copper deposit is one of the major prospecting breakthroughs recently made in Heilongjiang Province. After detailed field work and microscopic observation, we found that this deposit has typical porphyry style characteristics. Our study shows that the diorite porphyry is the mineralization-causative porphyry. The emplacement of the diorite porphyry caused the potassic alteration, phyllic alteration and latest age chlorite-pyrite alteration in and around this porphyry. Mineralization in the Fukeshan deposit is mainly associated with phyllic alteration. Mineralization is mostly confined within diorite porphyry and granodiorite. Distribution of alteration and the causative diorite porphyry indicate that there may be a large-scale causative porphyry at depth in the southwest of the deposit. Detailed SWIR study indicates that the Pos2200 of muscovite and Pos2250 of chlorite are controlled by the composition of the original altered minerals, thus not suitable to be used as a vector for exploration. The IC

基金项目: 黑龙江省国土科研项目(No.201701); 新疆北部大型热液铜矿床蚀变矿物综合勘查标识项目(No.Y702471001)。

作者简介: 李如操(1989-), 男, 博士, 主要从事矿床地球化学研究。ORCID: 0000-0001-8756-2951。E-mail: li.ru.cao@163.com

***通讯作者:** 陈华勇, Email: huayongchen@gig.ac.cn

引用格式: 李如操, 陈华勇, 李光辉, 等, 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. 地球科学, 45(5):1517-1530.

values of muscovite group and MnO concentration in chlorite are controlled by temperature and can be used to be a vector to find the hydrothermal center at Fukeshan. This research highlights that the combination of alteration mapping and SWIR analysis can be of great help in mineral exploration.

Key words: Great Xing'an range; Fukeshan; porphyry deposit; SWIR; mineral exploration; geochemistry.

0 引言

斑岩成矿系统 (Sillitoe, 2010; 郑海涛等, 2018) 具有成矿规模巨大、品位较低、较易开采的特点, 该成矿系统是世界上最主要的 Cu-Au-Mo 金属来源之一, 为全球提供了约 75% 的 Cu、50% 的 Mo 和 20% 的 Au。随着地表矿床的减少, 隐伏矿体勘查的重要性日益突出。然而受限于埋藏深度及已有采矿活动的干扰, 传统的找矿方法对这类矿床的勘查收效不佳 (Cooke *et al.*, 2014)。近年来, 短波红外光谱 (Short Wavelength Infrared, SWIR) 技术在斑岩—浅成低温热液矿床 (章革等, 2004) 和 VMS 矿床 (陈寿波等, 2018; Huang *et al.*, 2018) 的找矿勘查方面得到了较好运用。同时, SWIR 技术在深部找矿方面也显示出较好的效果 (Yang *et al.*, 2005; Chang and Yang, 2012)。该技术快速有效, 操作简单, 对含氢氧根或含水层状硅酸盐矿物的识别和鉴定快速准确。这些矿物在斑岩矿床及相关的浅成低温热液矿床内较为发育, 因此 SWIR 技术可能在斑岩矿床勘查中有较大的应用潜力。

富克山铜钼矿位于中亚造山带东缘 (图 1), 是黑龙江省近年来重要找矿成果之一。然而, 富克山铜钼矿的基本地质特征还未见报道, 矿床内 SWIR 找矿勘查应用研究仍处于空白。本文通过详细的野外观察、钻孔编录和岩相学等工作, 根据矿物组合、空间分布及脉体穿插关系, 对富克山斑铜钼矿的矿床地质和矿化特征进行了详细观察。在此基础上, 本文对该矿床内南北 2 个交叉剖面的 6 个钻孔进行了详细的 SWIR 研究, 并结合矿床地质特征对该方法在富克山地区找矿勘查中的应用进行了评估。

1 区域地质与大地构造背景

大兴安岭位于中国东北部, 地理上北至漠河以北, 南至西拉木伦河以南, 构造上属于中亚造山带东部。该区北缘为蒙古—鄂霍次克缝合带, 向南依次出现额尔古纳断裂、得尔布干断裂、塔源—喜贵图断裂和黑河—嫩江断裂 (图 1)。上述缝合带和深大断裂将该区分割成多个地块, 由北向南分别为额

尔古纳地块、兴安地块和松嫩—张广才岭地块。富克山铜钼矿位于额尔古纳地块北部 (图 1)。

该地区的缝合带和断裂构造与该地区的构造演化历史密切相关。古生代时期, 大兴安岭地区主要受古亚洲洋构造域的影响, 因此以东西向构造为主 (图 1)。此时发育了一系列深达地幔的断裂构造, 从南到北主要为塔源—喜贵图断裂和得尔布干断裂 (邓晋福等, 2005; 陈衍景等, 2012)。在古亚洲洋发育后期, 东北地区逐渐受到古太平洋俯冲的影响, 因此在先前构造的基础上叠加了北北东向的一系列构造 (图 1)。

古生代时期, 大兴安岭地区为古亚洲洋的一部分 (陈衍景等, 2012)。古亚洲洋北部为西伯利亚板块, 南部为华北板块 (陈衍景等, 2009)。受俯冲作用影响, 该区广泛发育沟—弧—盆体系 (Chen *et al.*, 2000)。随着古亚洲洋的俯冲消减, 该区众多的微小地质体逐渐拼贴至相邻大陆弧的前锋, 直至古亚洲洋的最终闭合 (Xiao *et al.*, 2003)。古亚洲洋最终闭合时限约为二叠纪末至三叠纪初 (刘建明等, 2004), 该洋的闭合导致华北板块与蒙古地块的拼贴, 至此形成华北—蒙古联合板块 (Wang and Mo, 1995; Chen *et al.*, 2007)。华北—蒙古联合板块与西伯利亚板块之间被蒙古—鄂霍次克洋分隔, 至晚侏罗世时, 蒙古—鄂霍次克洋闭合, 西伯利亚板块与华北—蒙古板块最终拼合 (邵济安等, 1999; 胡建民等, 2004; 赵越等, 2004; 邓晋福等, 2005)。在晚侏罗世和早白垩世期间, 受太平洋板块的西向俯冲的影响, 在岩石圈减压伸展和太平洋俯冲弧后伸展叠加作用下, 导致大兴安岭地区大量花岗岩类和中酸性火山岩的发育 (邵济安等, 1999; 祁进平等, 2005; 武广等, 2006)。伴随着强烈的岩浆活动, 在该地区形成了大量的热液矿床, 如斑岩矿床、矽卡岩型矿床及浅成低温热液矿床等 (祁进平等, 2005; Chen *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2012)。晚白垩世以来, 大兴安岭地区的中酸性岩浆活动减弱, 玄武岩类开始发育 (Zorin *et al.*, 2001)。

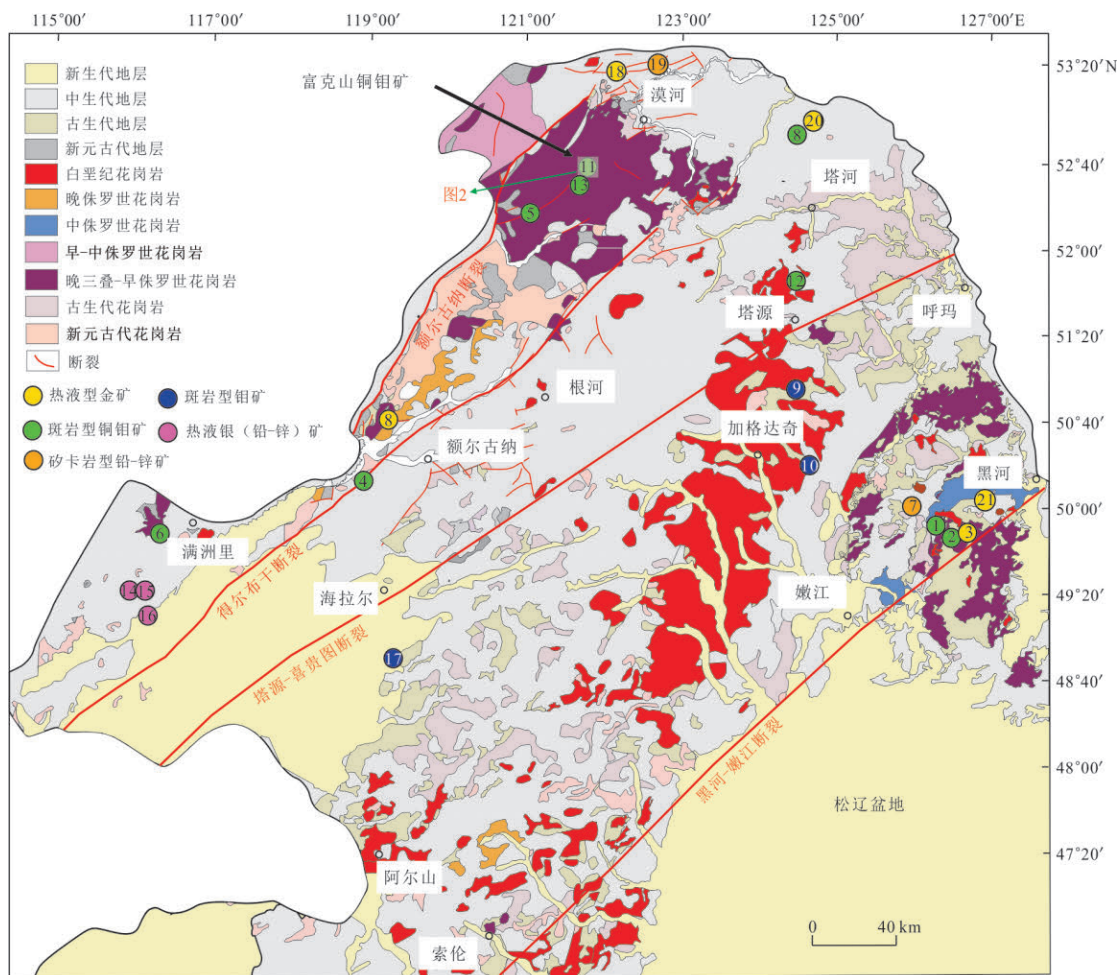


图1 大兴安岭地区地质图

Fig. 1 Geological map of the Great Xing'an range, Northeast China

据 Deng *et al.* (2019); 该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)1699号的标准地图制作, 底图无修改. 1. 多宝山铜钼矿; 2. 铜山铜钼矿; 3. 争光金矿; 4. 八大关铜钼矿; 5. 太平川铜钼矿; 6. 乌努格土山铜钼矿; 7. 三矿沟铁铜矿; 8. 二十一站铜钼矿; 9. 岔路口钼矿; 10. 大黑山铜钼矿; 11. 富克山铜钼矿; 12. 小柯勒河铜钼矿; 13. 霍洛台铜钼矿; 14. 甲乌拉银铅锌矿; 15. 查干布拉格银铅锌矿; 16. 孟恩套力盖银矿; 17. 太平沟钼矿; 18. 砂宝斯金矿; 19. 洛古河铅锌矿; 20. 宝兴沟金矿; 21. 三道湾子金矿

2 矿床地质

富克山铜钼矿目前处于勘查阶段, 储量正在评估. 已有数据显示, 富克山铜钼矿铜品位为 0.20%~1.16%, 钼品位为 0.03%~0.32%.

2.1 岩浆岩序列

矿区第四纪沉积物覆盖较为普遍, 钻孔揭露表明富克山矿床内主要为岩浆岩, 且岩性较为复杂, 表明矿床内岩浆活动频繁. 矿区分布范围最广的是伟晶岩、花岗闪长岩和花岗岩(图2). 识别出的其他岩性包括: 石英二长斑岩、二长岩、闪长玢岩、花岗斑岩、二长斑岩和少量后期脉岩(图3).

最新研究表明(Deng *et al.*, 2019), 富克山伟晶岩年龄为 192.2 ± 2.7 Ma. 成份上富克山伟晶岩

CaO、Na₂O、Fe₂O₃^T、K₂O 和 MgO 含量分别为 2.13%~2.57%、5.36%~7.31%、1.23%~1.81%、0.44%~2.67% 和 0.34%~0.45%. 该岩性富集轻稀土亏损重稀土, 球粒陨石标准化后其 La/Yb 比值在 15.48~26.60, 同时具有 Eu 的弱负异常. 此外, 该岩性还具有较高的 Sr/Y 比值和较低的 Y 和 Yb 含量. 在岩石成因判别图解中落入加厚下地壳形成的埃达克岩区域, 表明该伟晶岩的形成可能与早三叠世板块俯冲时加厚下地壳的部分熔融有关.

二长岩、二长斑岩和石英二长斑岩仅分布于矿区南部较深处(ZK4003 揭露)(图3), 且不含矿化. 基于此, 本文将矿区岩浆岩分为两组, 其一为北部主矿区岩体, 其二为矿区南侧的无矿岩体. 主矿区岩体主要包括伟晶岩(图4a)、花岗闪长岩(图4b)、

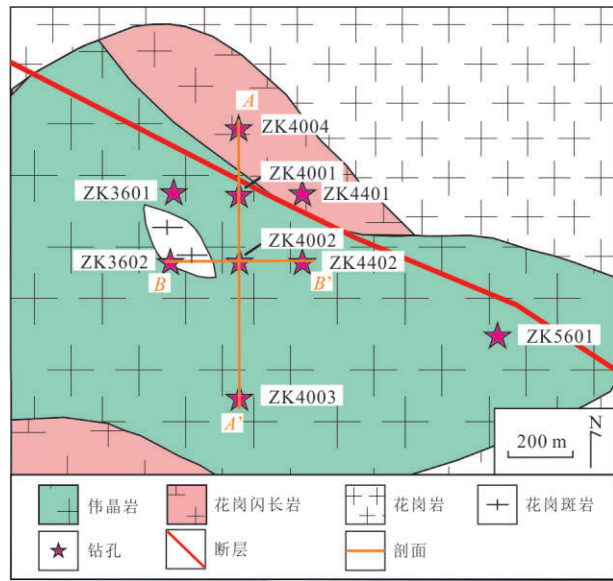


图 2 富克山矿区地质简图

Fig. 2 Geological map of the Fukeshan deposit

闪长玢岩(图 4c)和闪长岩脉(图 4d),其中闪长玢岩与矿化关系最为密切.在闪长玢岩与花岗闪长岩接触部位后者蚀变十分强烈,远离接触带时蚀变减弱(图 4e, 443~424 m),表明花岗闪长岩早于闪长玢岩.此外,由于伟晶岩在矿区分布范围最广且普遍以围岩形式存在,因此本文推测伟晶岩应早于花岗闪长岩. Deng *et al.* (2019) 的定年结果表明,伟晶岩年龄为 192.7 ± 1.9 Ma, 花岗

闪长岩年龄为 148.8 ± 0.9 Ma, 闪长玢岩年龄为 148.7 ± 0.8 Ma, 与本文观察一致.

2.2 矿体与矿石特征

富克山斑岩铜钼矿矿体的展布主要与岩性有关.铜钼矿化主要在闪长玢岩及距离闪长玢岩较近的围岩中发育.其中闪长玢岩全岩矿化,在闪长玢岩中铜钼矿化主要呈现浸染状,且钼矿化较弱.在距离闪长玢岩稍远的地方,铜钼矿化主要以脉状为主,同时钼矿化较为强烈.因此,富克山铜钼矿的铜矿化和钼矿化具有解耦的特点.此外,由于矿区闪长玢岩多为小岩枝状,因此蚀变矿化在矿床尺度的分带并不明显.

富克山斑岩铜钼矿床的矿石分为 2 种,其一是浸染状矿石(图 5a),其二是脉状矿石(图 5b~5e).浸染状矿石的主要矿物为黄铜矿和斑铜矿(图 5a),主要分布在闪长玢岩和距离闪长玢岩较近的围岩中.脉状矿石的主要矿物组合为石英—黄铜矿—黄铁矿—辉钼矿,主要分布在距离闪长玢岩较远的围岩中(图 5b~5c, 5e).从整体分布上讲,浸染状矿石的量较少,脉状矿石占主导.

2.3 蚀变与矿化

富克山矿区按蚀变矿化出现的矿物组合与穿插关系,从早到晚可分为 3 个阶段:钾化阶段、黄铁绢英岩化阶段和晚期绿泥石—黄铁矿阶段(图 6).总体上蚀变和矿化与闪长玢岩关系密切,自闪长玢

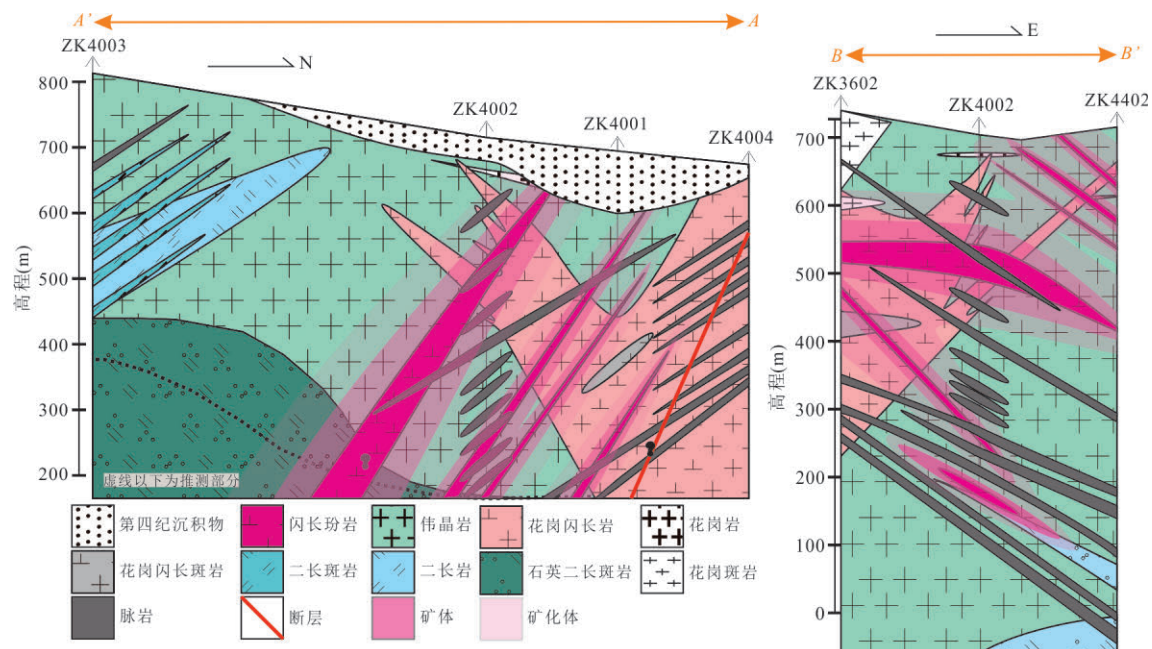


图 3 富克山矿区 A-A' 和 B-B' 剖面

Fig. 3 Geological profile of the A-A' and B-B' section in the Fukeshan deposit

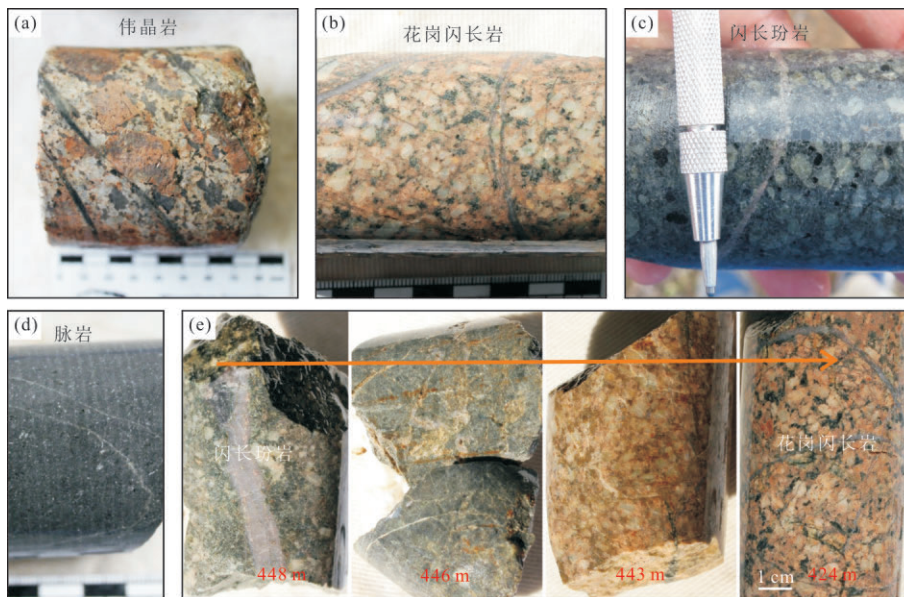


图 4 富克山矿区钻孔揭露岩浆岩种类

Fig. 4 Igneous rocks in the Fukeshan deposit

a. 伟晶岩; b. 花岗闪长岩; c. 闪长玢岩; d. 安山质脉岩; e. 闪长玢岩与花岗闪长岩接触部位样品, 箭头代表逐渐远离闪长玢岩

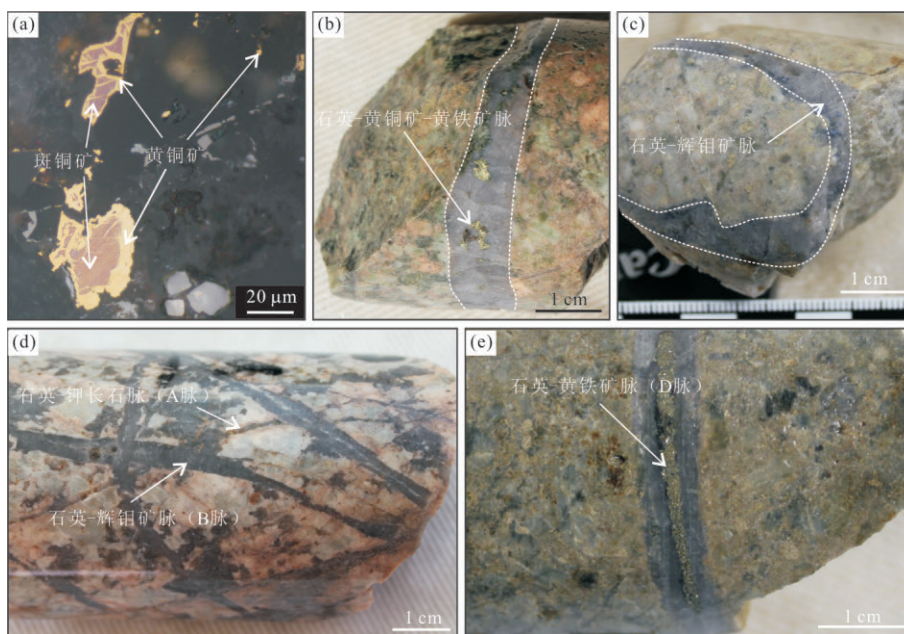


图 5 富克山斑岩铜钼矿床中矿石特征

Fig. 5 Ore mineral characteristics in Fukeshan deposit

a. 闪长玢岩中的浸染状铜硫化物; b. 花岗闪长岩中的石英-黄铜矿-黄铁矿脉; c. 蚀变花岗闪长岩中的石英-辉钼矿脉; d. 石英-辉钼矿脉 (B脉)切割早期石英-钾长石脉 (A脉); e. 石英-黄铁矿脉 (D脉)

岩向外依次出现钾化、黄铁绢英岩化和晚期黄铁矿绿泥石蚀变. 但由于矿区闪长玢岩多为小岩枝状 (图 3), 因此蚀变矿化在矿床尺度的分带并不明显. 矿区内还出现大量的晚期石膏脉, 该脉切穿矿区内多种岩性及矿化脉体 (图 7a~7b), 表明这些石膏脉应该与矿化无关.

钾化阶段: 典型的钾化蚀变多发育在闪长玢岩 (图 8a) 及距离闪长玢岩较近的围岩中 (图 5d), 主要表现为钾长石-石英-黑云母组合 (图 8a, 8b, 图 5d). 在石英脉中可以见到磁铁矿-赤铁矿-黄铁矿-黄铜矿组合 (图 8b). 钾化阶段还出现了黄铁矿-绿泥石组合, 该组合通常交代岩体中的黑云母

矿物	钾化阶段	黄铁绢英岩化阶段	晚期绿泥石-黄铁矿阶段
石英	大量	大量	大量
硬石膏	少量	少量	少量
钾长石	大量	大量	大量
黑云母	少量	少量	少量
磁铁矿	少量	少量	少量
赤铁矿	少量	少量	少量
黄铁矿	少量	少量	大量
黄铜矿	少量	少量	少量
斑铜矿	少量	少量	少量
绿泥石	少量	少量	大量
绢云母	少量	大量	大量
金红石	少量	少量	少量
辉钼矿	少量	少量	少量
黝铜矿	少量	少量	少量

图 6 富克山铜钼矿矿化期次表

Fig. 6 Alteration and mineralization paragenesis of the Fukeshan deposit

(图 8c). 斑铜矿分布比较局限, 主要在钻孔深部的闪长玢岩中, 通常以黄铜矿—斑铜矿固溶体的形式存在(图 8d, 8e). 钾化阶段总体上黄铜矿含量较低, 在闪长玢岩中主要以浸染状分布. 在闪长玢岩及较近围岩中广泛出现磁铁矿—赤铁矿—黄铜矿—斑铜矿组合(图 8b), 距离较远时该组合消失. 该阶段的石英脉中还出现少量硬石膏.

黄铁绢英岩化阶段: 该阶段出现大量绢云母, 多以浸染状交代钾化阶段的钾长石(图 8a). 该阶段其他矿物主要存在于脉中(图 8f), 矿物组合主要为石英、黄铁矿、黄铜矿、辉钼矿、黝铜矿和金红石等(图 8f~8i). 黄铁绢英岩化阶段有大量的铜硫化物沉淀, 为富克山铜矿的主成矿阶段. 此外, 金红石在黄铁绢英岩化阶段大量出现(图 8g), 表明该阶段流体氧逸度依然较高. 可以观察到黄铜矿—黄铁矿—金红石脉切割钾化阶段磁铁矿的现象(图 8f~8h), 因此该阶段应晚于钾化阶段. 值得指出的是, 本阶段的绢云母大多数以浸染状交代钾化阶段的钾长

石和原生斜长石, 仅有少量的绢云母存在于石英—硫化物脉和其附近的围岩中(图 8f, 8j), 这与斑岩铜矿典型的黄铁绢英岩化有一定区别.

晚期黄铁矿—绿泥石阶段: 该蚀变阶段分布较为局限, 主要出现于距离闪长玢岩较远的部位, 代表性矿物组合为黄铁矿和绿泥石, 主要以脉状形式出现(图 8j). 由于该类脉体较少, 未观察到其切割早期脉体的现象. 该类脉体通常仅含黄铁矿和绿泥石, 与黄铁绢英岩化蚀变中含绿泥石—黄铁矿的组合有很大区别, 且分布远离致矿岩体, 推测该类脉体应晚于钾化及铜钼矿化阶段, 但也不排除其可能为青磐岩化蚀变的一部分.

3 富克山铜钼矿蚀变矿物短波红外光谱特征

富克山铜钼矿中大部分围岩为伟晶岩和花岗闪长岩, 二者广泛发育伊利石化. 但由于伟晶岩中暗色矿物较少, 且经历花岗闪长岩和闪长玢岩两期岩浆—热液活动的叠加作用, 导致绿泥石在其中不发育. 富克山斑岩矿床中的绿泥石主要集中在闪长玢岩和花岗闪长岩中. 绢云母和绿泥石等矿物的发育为短波红外光谱(SWIR)测试及其应用提供了很好的条件. 本研究选取富克山矿区南北向剖面(A-A'剖面, 由 ZK4001、ZK4002、ZK4003 和 ZK4004 组成)和东西向剖面(B-B'剖面, 由 ZK3602、ZK4002 和 ZK4402 组成), 在 2 个剖面中共采集 335 件样品, 采样密度约为 8 m/样. 本次研究所用仪器为美国 ASD 公司生产的 TerraSpec 光谱仪, 对测试所得的数据用“光谱地质师”软件进行自动解译, 之后由人工逐条核查, 以确定矿物种类. 光谱解译后的矿物主要为伊利石、白云母和绿泥石, 其他矿物由于数量太少, 空间分布十分有限, 不具有统计意义. 伊利

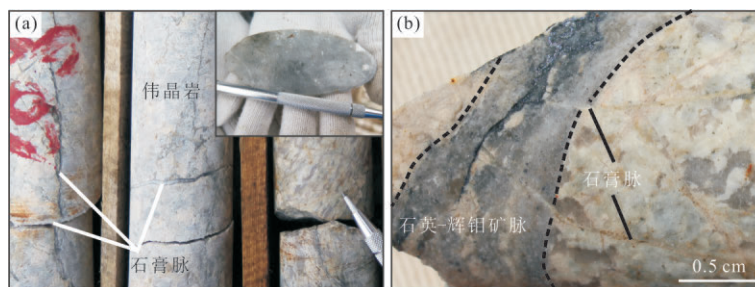


图 7 富克山铜钼矿晚期石膏脉

Fig. 7 Late stage gypsum veins at Fukeshan deposit

a. 石膏脉切割伟晶岩; b. 石膏脉切割石英辉钼矿脉

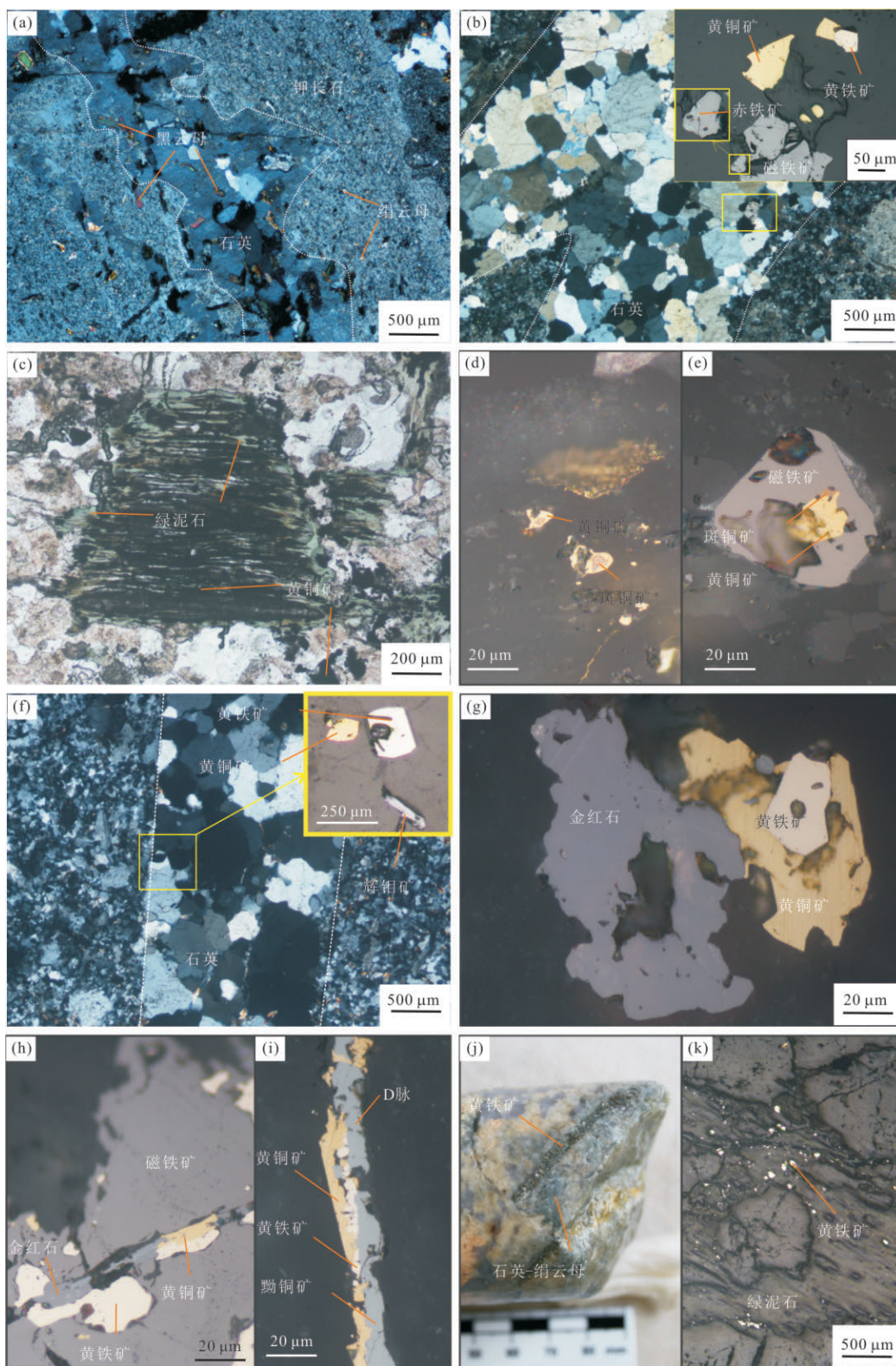


图 8 富克山铜钼矿蚀变矿化特征

Fig. 8 Photos show alteration and mineralization in the Fukeshan deposit

a. 闪长玢岩中的石英-黑云母脉;b. 岩体中的石英脉,石英脉中的矿物组合为磁铁矿-赤铁矿-黄铜矿-黄铁矿;c. 黑云母被绿泥石-黄铜矿交代;d. 浸染状黄铜矿和斑铜矿;e. 黄铜矿-斑铜矿-磁铁矿组合;f. 岩体中的石英脉,石英脉中见自形黄铁矿、辉钼矿和黄铜矿;g. 金红石-黄铁矿-黄铜矿组合;h. 钾化阶段磁铁矿颗粒被金红石-黄铜矿-黄铁矿脉切割;i. D脉(黝铜矿-黄铜矿-黄铁矿脉);j. 伟晶岩中发育的黄铁矿绢英岩化蚀变(石英-绢云母-黄铁矿脉);k. 晚期绿泥石-黄铁矿蚀变

石、白云母和绿泥石的空间分布如图 9 所示。可以看到,伊利石的分布范围最广,白云母和绿泥石的分布范围明显较小。绿泥石的分布严格受到岩性的控制,在含暗色矿物较多的岩性中(如闪长玢岩和花岗闪长岩)绿泥石比较发育,而在伟晶岩中绿泥石分布十分局限。白云母主要分布于闪长玢岩和花岗闪长岩中,在东西向剖面中可以明显看出白云母的分布与闪长玢岩关系十分密切。此外,南侧岩体中也有零星分布(图 9, ZK4003)。本文 SWIR 测试数据请见附表 1。

一般而言,IC 值越高,代表白云母族矿物结晶度越高,表明矿物形成于温度较高的部位,因此白云母族矿物的 IC 值常用来指示热液中心的存在(杨志明等, 2012)。白云母族矿物的 Pos2200 值与矿物结构中六次配位铝的含量相关。最近研究表明该值的高低与热液蚀变强度相关(Laakso *et al.*, 2016),因此有可能可以用来指示热液中心的位置从而指导找矿。

白云母族矿物的 IC 值和 Pos2200 的值以及绿泥石的 Pos2250 的值在空间上的分布如图 10 所示。白云母族的 IC 值和 Pos2200 高值显示与闪长玢岩及后期脉岩密切相关(图 10a, 10b)。此外, Pos2200 的最高值出现在南侧岩体中(图 10b)。绿泥石的 Pos2250 值多与闪长玢岩和后期脉岩相关(图 10c),与白云母族 Pos2200 值一样,绿泥石的 Pos2250 最

高值也出现在南侧岩体中(图 10c)。

此外,为研究 SWIR 特征与蚀变矿物成分的关系,本文选取状绿泥石进行了原位电子探针分析。绿泥石出现的位置多为闪长玢岩及花岗闪长岩所在部位(图 9),为了比较两种岩性中绿泥石成分的可能差别,及其可能的矿床勘查意义,两种岩性中的绿泥石均有涉及。绿泥石虽然在矿区南部(ZK4003)也部分出现(图 9),但与主体矿化较远,应该与闪长玢岩导致的绿泥石化无关。此外,2 种岩性中出现的绿泥石绝大多数为浸染状绿泥石,为交代早期黑云母形成(图 8c)。其他类型的绿泥石虽有发现,但空间分布范围过于局限(图 8k),不具有矿产勘查意义,因此本研究选取了 ZK4001 中的浸染状绿泥石为研究对象,进行了主量元素分析。分析在中国冶金地质总局山东局测试中心完成,使用的仪器为 JOEL,分析条件为 JXA-8230 型电子探针仪。具体的分析条件设置为:加速电压 15 kV,探针电流 20 nA,束斑直径 2 μm 。矿物中微量元素检出限大多在 $100 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$ 。标样为美国 SPI 公司系列标样。分析结果见图 11,数据见附表 2。结果中有一个异常点(图 11a),对应样品海拔高度为 330 m,该样品中的绿泥石为交代角闪石形成,其余样品均为交代黑云母形成。由于原矿物不同,因此下文讨论时不包含该点。我们的结果显示, MgO 与 SiO₂ 正相关, MgO 与 FeO 负相关, MgO 与 MnO 和 Al₂O₃ 的变化趋势无相关性(图 11b)。

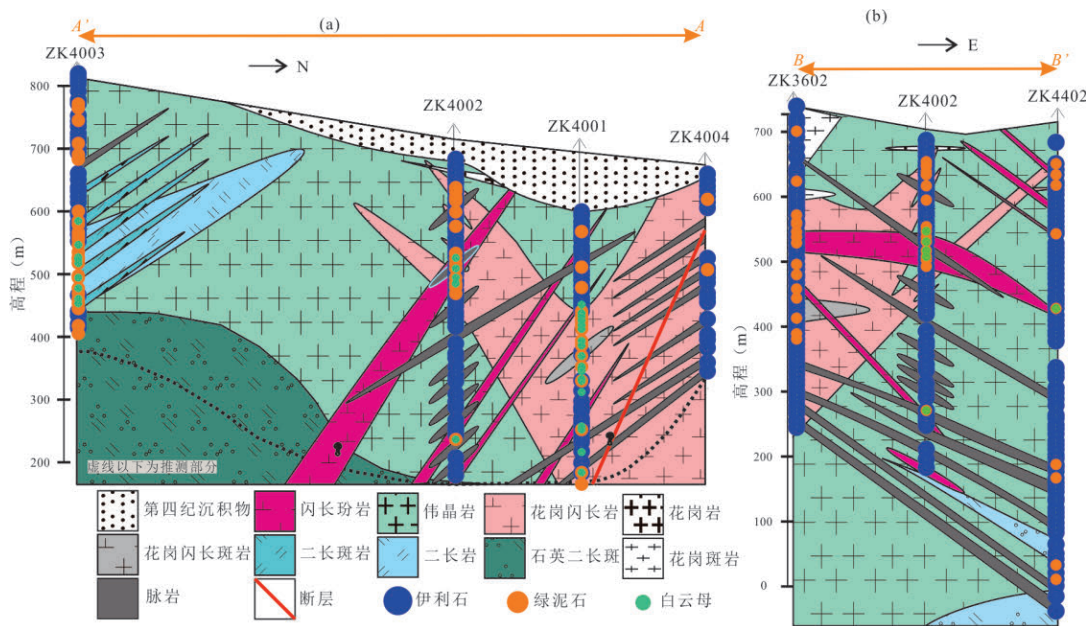


图 9 富克山铜钼矿 A-A' 和 B-B' 剖面中蚀变矿物分布

Fig. 9 The distribution of alteration minerals in the A-A' and B-B' section in the Fukeshan deposit
蓝色代表伊利石;橙色代表绿泥石;绿色代表白云母

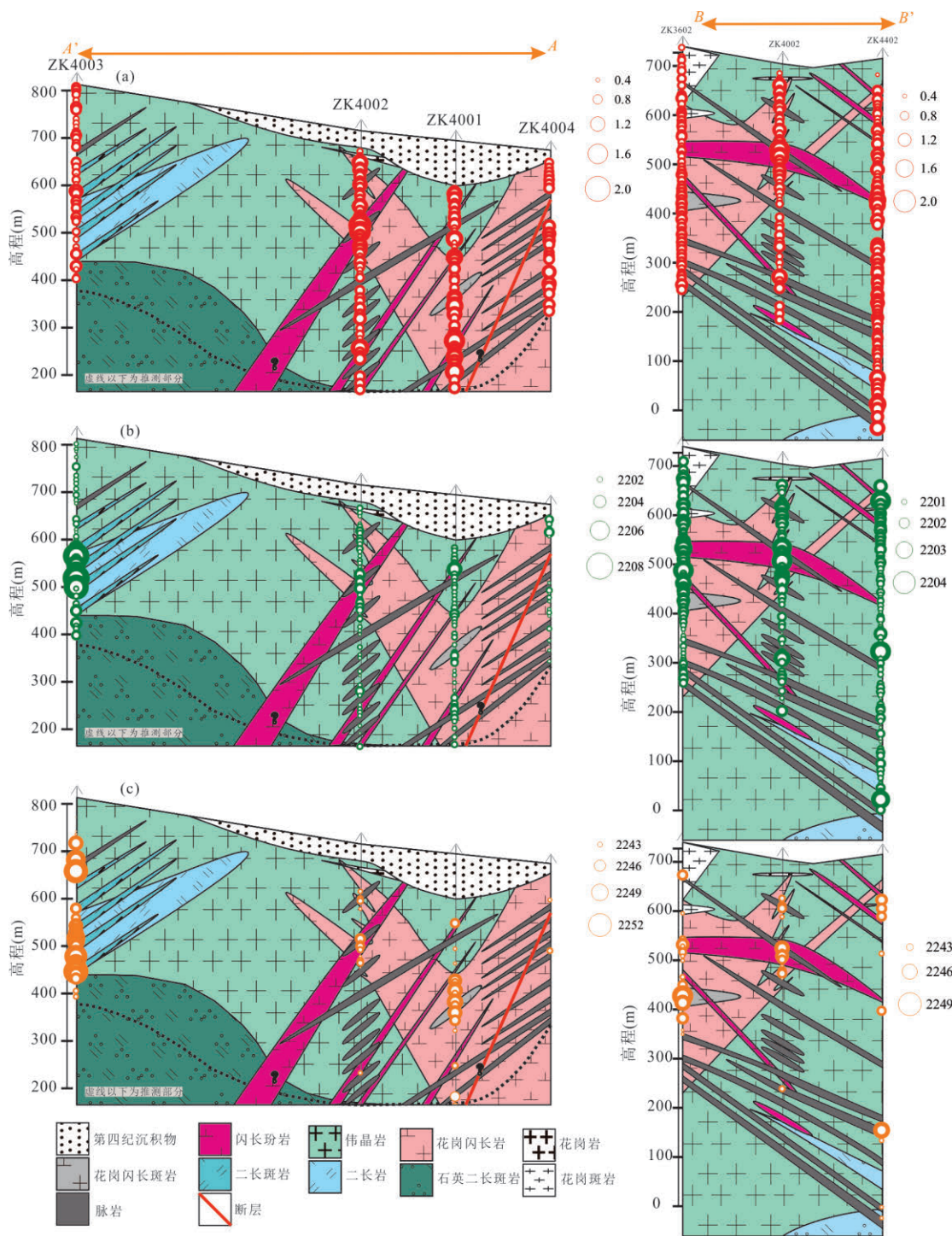


图 10 富克山铜钼矿 SWIR 空间分布特征

Fig. 10 The distribution features of SWIR spectrum parameters

a. IC 值空间变化; b. Pos2200 空间变化; c. Pos2250 空间变化

4 讨论

4.1 蚀变矿化特征及其成因类型

确定致矿斑岩对于斑岩矿床类型的确立和勘查方向有至关重要的意义.富克山铜钼矿中出现的

岩性虽然较多,相互关系也较为复杂,但分布上占主体、可能与矿化相关的主要为伟晶岩、花岗闪长岩和闪长玢岩(南部岩体出现大量二长岩类,但无任何矿化,因此可能与矿化无关),其年龄逐渐年轻.根据本文研究,富克山斑岩铜钼矿的致矿斑岩应为

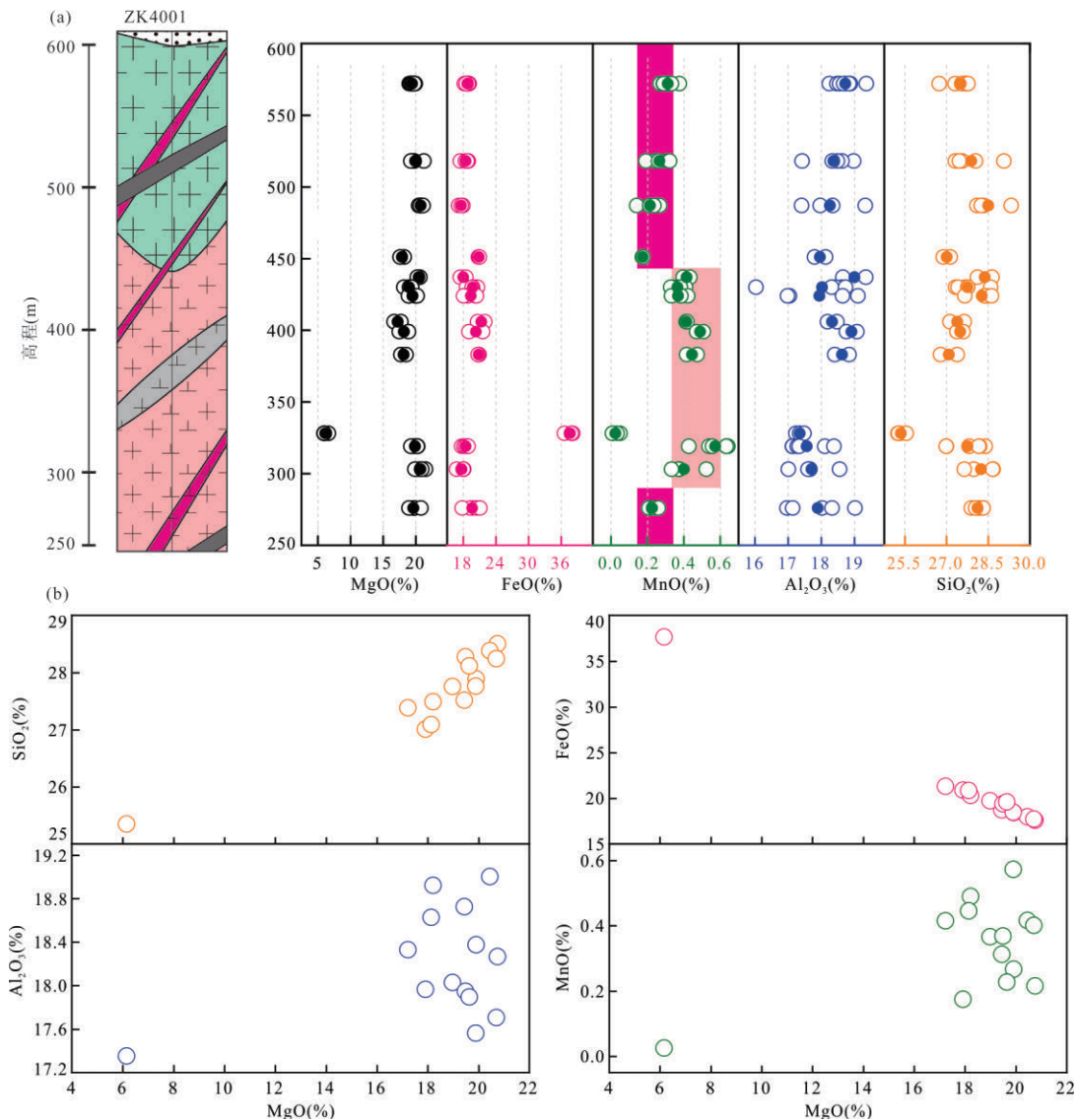


图 11 ZK4001 中绿泥石电子探针分析结果

Fig. 11 EPMA analysis results of chlorite in ZK4001

最年轻的闪长玢岩 (148.7 Ma, Deng *et al.*, 2019), 首先, 矿物组合上, 斑铜矿—黄铜矿—磁铁矿—赤铁矿高温组合主要出现于闪长玢岩中 (图 8d~8e), 在距离闪长玢岩较近的花岗闪长岩处也偶有出现, 而在伟晶岩中则未发现. 其次, 在闪长玢岩侵入花岗闪长岩时产生明显的蚀变, 且高温钾化蚀变主要集中在闪长玢岩中 (图 4e, 8a). 虽然整个矿床尺度的分带性较弱, 但从闪长玢岩向外基本依次出现钾化蚀变和绢英岩化蚀变. 这些特征表明闪长玢岩很可能作为矿化的热源和主要物质来源, 为成矿提供高温热液和成矿物质, 导致一系列蚀变及矿化. 富克山斑岩铜钼矿发育典型钾化与黄铁绢英岩化蚀变, 矿化则以石英硫化物细脉为主, 部分出现典型斑岩矿床常见的网脉状

矿化. 此外, 富克山铜钼矿还发育典型斑岩矿床中的不同类型的脉体, 如 A 脉、B 脉和 D 脉 (图 5d~5e, 图 8i). 上述现象表明, 富克山铜钼矿可能为斑岩型矿床. 最新研究表明, 富克山斑岩矿床致矿斑岩年龄在 148.7 Ma 左右, 地球化学特征显示和大洋地壳部分熔融的埃达克质岩石有亲缘性, 可能为鄂霍次克洋逐渐闭合过程中俯冲洋壳熔融的产物 (Deng *et al.*, 2019). 这种环境下容易出现高氧逸度流体, 对于斑岩成矿十分有利, 因此富克山所处的岩浆弧的构造环境也与典型的斑岩成矿环境吻合 (Sillitoe, 2010), 应为斑岩型矿床.

4.2 SWIR 特征及其勘查标识

白云母族矿物的 IC 值与其形成温度密切相关, 一般来讲, 温度越高 IC 值越大 (杨志明等, 2012). 在

富克山铜钼矿中, IC 的高值与闪长玢岩关系密切(图 10a). 因此, IC 的高值可能指示闪长玢岩及相关矿化. 值得注意的是, 在后期脉岩出现部位 IC 值也明显升高(图 10a), 这说明后期脉岩造成的局部温度升高也会明显影响白云母族的 IC 值. 但总体来说, IC 值升高且不孤立出现的地方, 一般都是闪长玢岩所在之处. 同时考虑到白云母族矿物在富克山分布很广泛(图 9), 本文认为白云母族的高 IC 值(2.0 左右)可以作为富克山铜钼矿下一步找矿勘查的 SWIR 指标. 白云母族的 $AlOH$ 吸收峰 $Pos2200$ 的值主要在 2 186~2 225 nm (Herrmann *et al.*, 2001; Pontual, 2001; Jones *et al.*, 2005; Chang and Yang, 2012). $Pos2200$ 的吸收峰波长取决于矿物结构中六次配位铝 (Al^{VI}) 的含量, Al^{VI} 越高, $AlOH$ 吸收峰波长越短. 因此, $Pos2200$ 吸收峰位值的升高表明 Al^{VI} 的降低 (Herrmann *et al.*, 2001; Pontual, 2001; Jones, 2005). 在富克山矿区, 虽然在靠近致矿斑岩的地方 $Pos2200$ 吸收峰明显升高(图 10b), 但是 $Pos2200$ 的最高值却出现在南部岩体中(图 10b). 研究表明, 当蚀变温度较高, 且附近存在含 Fe、Mg 的矿物(如黑云母、绿泥石等)时, 会促进伊利石结构内 Al^{VI} 与 Fe、Mg 的类质同象置换. 当这种作用广泛发生时, 会造成 Al^{VI} 的降低和 $Pos2200$ 吸收峰位值的升高 (Post and Noble, 1993; Duke, 1994; Laakso *et al.*, 2015; 张世涛等, 2017; 孙万龙等, 2018; 郑海涛等, 2018). 考虑到 $Pos2200$ 升高的地方一般多有绿泥石的出现(图 9), 富克山 $Pos2200$ 的升高很可能是由于 Al^{VI} 与 Fe、Mg 的类质同象置换造成的. 因此, 富克山白云母族 $Pos2200$ 值很可能受原岩成分影响, 且 $Pos2200$ 的高值在空间上并不能排他性地指向富克山铜钼矿的热液中心. 所以本文认为白云母族 $Pos2200$ 值不宜作为富克山铜钼矿的 SWIR 勘查标志.

绿泥石具有典型的 $FeOH$ 吸收峰, 该吸收峰位于 2 250 nm 附近(2 235~2 265 nm) (Herrmann and Blake, 2001; Jones *et al.*, 2005). 绿泥石的 $FeOH$ 吸收峰波长主要受其矿物中的 Fe 和 Mg 的比例控制, 波长与绿泥石的 Fe 含量呈正相关关系 (Yang and Huntington, 1996; Pontual, 2001; Thompson *et al.*, 2009). 本文结果也表明 Fe 含量与 $Pos2250$ 吸收峰的正相关关系(图 12a), 但同时, IC 值所代表的温度与 $Pos2250$ 峰值并无明显相关性(图 12b). 这表明, 在富克山铜钼矿中, 温度并不是控制绿泥石成

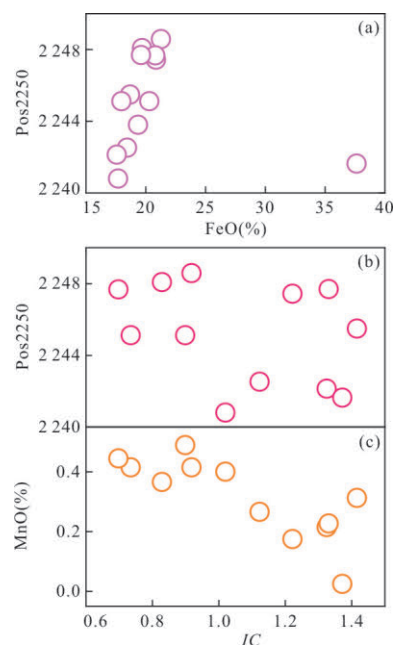


图 12 ZK4001 中绿泥石成分与 SWIR 特征值的关系

Fig. 12 The relationship between composition of chlorite and SWIR spectrum in ZK4001

a. $Pos2250$ 与 FeO 相关图; b. $Pos2250$ 与 IC 值相关图; c. MnO 含量与 IC 值相关图

分中 Fe 含量的主要因素. 因此, 本文认为绿泥石成分及其表现出的 $Pos2250$ 峰值特征很可能受绿泥石蚀变的原岩矿物成分影响, 而且矿区绿泥石的分布范围比较有限, 所以, 绿泥石 $Pos2250$ 值在富克山并不能很好地指示热液中心的存在.

除了上述指标之外, 本文发现白云母族 IC 值与绿泥石中 Mn 含量呈明显的负相关关系(图 12c). 这可能因为 Mn 是低温元素, 因此在高温环境下容易迁移而不会被绿泥石捕获所导致的. IC 值与 Mn 的负相关关系表明, Mn 在绿泥石中的含量很可能主要受到温度的控制, 而周围物质成分对其影响较小. 如图 11 所示, 致矿闪长玢岩中发育的绿泥石 MnO 含量明显低于其在外围花岗闪长岩中的含量, 分界值约为 0.3%. 这表明绿泥石中 Mn 含量(如 MnO 低于 0.3%)可作为富克山矿体(或致矿岩体)的勘查标识之一.

4.3 富克山斑岩铜钼矿勘查方向指示

根据本文从蚀变矿化特征及其分布的研究, 富克山斑岩铜钼矿的找矿勘查重点在于正确判断致矿闪长玢岩的延伸方向. 就目前已经获得的数据等信息, 本文认为致矿闪长玢岩的根部应位于矿区南西方向的较深部位. 首先, 从钻孔编录填图结果来看, 闪长玢岩的分布范围南部和西部偏多, 向矿区

北部和东部其出现范围明显变小(图 3)。由此可基本判断闪长玢岩的主体应该位于矿区的南西方向。此外,在目前主矿体(闪长玢岩主岩枝及其周边)的较深部位仍分布有多处闪长玢岩,而更浅部位则没有出现(图 3),这表明闪长玢岩的根部(主岩体)很可能位于目前已经发现的闪长玢岩(岩枝)的下部。此外,闪长岩脉年龄为 144.9 Ma (Deng *et al.*, 2019),是矿床内部最晚的岩浆活动(致矿闪长玢岩年龄为 148.7 Ma; Deng *et al.*, 2019)。闪长岩脉虽然与断层的倾角相近,但矿区可见闪长岩脉被断层扰动的现象,表明断层活动晚于闪长岩脉。更为可能的情况是,在矿床尺度内存在一条软弱带,该软弱带是岩脉侵入或断层活动的有利部位。在该软弱带上,闪长玢岩首先侵位,后来闪长岩脉侵位(侵位时的倾角度稍有不同)。最后断层沿着该软弱带活动,导致闪长岩脉的破裂。总体来看,富克山已经发现的闪长玢岩规模较小,多为小岩枝状,因此本文认为目前已发现的闪长玢岩可能只是其在浅部的延伸,而主体很可能位于矿区南西西方向的深部。其次,从 SWIR 研究结果来看,伊利石 IC 的高值与闪长玢岩的出现位置也可以较好地指示闪长玢岩的分布。从 IC 值的空间分布来看,南部较高,向北明显降低(图 10a)。在东西向剖面上,IC 的高值集中在 ZK4002 上,也与钻孔揭露的闪长玢岩的分布情况一致。综合以上信息,本文认为致矿的闪长玢岩很可能是从矿区南西方向的深部向北东方向浅部侵位,因此,南西方向的深部应为下一步找矿勘查的重点。

5 结论

富克山矿区岩浆侵位历史较为复杂,致矿斑岩为较晚侵位的闪长玢岩。富克山铜钼矿的矿床地质特征,蚀变矿化特征和构造环境表明该矿床为典型的斑岩型矿床。闪长玢岩的侵位导致了其自身及围岩中的钾化、黄铁绢英岩化和晚期绿泥石—黄铁矿化蚀变。白云母族 IC 值和绿泥石中 MnO 含量可以作为富克山铜钼矿下一步的勘查标识。而白云母族 Pos2200 和绿泥石 Pos2250 峰位值在富克山地区不宜作为勘查标识。综合研究表明矿区南西方向的深部可能存在较大规模的致矿岩体。

致谢:本文野外工作得到黑龙江省地矿局地质研究所特别是周向斌高工的热情帮助,特此致谢!

附表见本刊官网(<http://www.earth-science.net>)。

References

- Chang, Z.S., Yang, Z.M., 2012. Evaluation of Inter-Instrument Variations among Short Wavelength Infrared (SWIR) Devices. *Economic Geology*, 107:1479–1488.
- Chen, S.B., Huang, B.Q., Li, C., et al., 2018. Alteration and Mineralization of the Yuhai Cu Deposit in Eastern Tianshan, Xinjiang and Applications of Short Wavelength Infra-Red (SWIR) in Exploration. *Earth Science*, 43(9): 2911–2928 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.156>
- Chen, Y. J., Chen, H. Y., Liu, Y. L., et al., 2000. Progress and Records in the Study of Endogenetic Mineralization during Collisional Orogenesis. *Chinese Science Bulletin*, 45(1): 1–10. <https://doi.org/10.1007/bf02884893>
- Chen, Y. J., Chen, H. Y., Zaw, K., et al., 2007. Geodynamic Settings and Tectonic Model of Skarn Gold Deposits in China: An Overview. *Ore Geology Reviews*, 31(1–4): 139–169. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2005.01.001>
- Chen, Y.J., Zhai, M.G., Jiang, S.Y., et al., 2009. Significant Achievements and Open Issues in Study of Orogenesis and Metallogenesis Surrounding the North China Continent. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11):2695–2726 (in Chinese with English abstract)
- Chen, Y.J., Zhang, C., Li, N., et al., 2012. Geology of the Mo Deposits in Northeast China. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(5): 1223–1268 (in Chinese with English abstract)
- Chen, Y. J., Zhang, C., Wang, P., et al., 2017. The Mo Deposits of Northeast China: A Powerful Indicator of Tectonic Settings and Associated Evolutionary Trends. *Ore Geology Reviews*, 81: 602–640. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.04.017>
- Cooke, D. R., Baker, M., Hollings, P., et al., 2014. New Advances in Detecting the Distal Geochemical Footprints of Porphyry Systems—Epidote Mineral Chemistry as a Tool for Vectoring and Fertility Assessments. In: Kelley, K. D., Golden, H. C., eds., *Building Exploration Capability for the 21st Century*. Society of Economic Geologists, New York.
- Deng, C. Z., Sun, D. Y., Han, J. S., et al., 2019. Late-Stage Southwards Subduction of the Mongol–Okhotsk Oceanic Slab and Implications for Porphyry CuMo Mineralization: Constraints from Igneous Rocks Associated with the Fukeshan Deposit, NE China. *Lithos*, 326/327: 341–357. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.12.030>
- Deng, J.F., Zhao, G.C., Su, S.G., et al., 2005. Structure Overlap and Tectonic Setting of Yanshanorogenic Belt

- in Yanshan Era. *Geotectonica et Metallogenia*, 105:157—165 (in Chinese with English abstract)
- Duke, E. F., 1994. Near Infrared Spectra of Muscovite, Tschermak Substitution, and Metamorphic Reaction Progress: Implications for Remote Sensing. *Geology*, 22(7): 621. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1994\)0220621:nisomt>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1994)0220621:nisomt>2.3.co;2)
- Herrmann, W., Blake, M., Doyle M., et al., 2001. Short Wavelength Infrared (SWIR) Spectral Analysis of Hydrothermal Alteration Zones Associated with Base Metal Sulfide Deposits at Rosebery and Western Tharsis, Tasmania, and Highway-Reward, Queensland. *Economic Geology*, 96(5): 939—955. <https://doi.org/10.2113/96.5.939>
- Hu, J.M., Liu, X.W., Zhao, Y., et al., 2004. On Yanshan Intraplate Orogen: An Example from Taiyanggou area, Lingyuan, Western Liaoning Province, Northeast China. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 255—271 (in Chinese with English abstract).
- Huang, J. H., Chen, H. Y., Han, J. S., et al., 2018. Alteration Zonation and Short Wavelength Infrared (SWIR) Characteristics of the Honghai VMS Cu-Zn Deposit, Eastern Tianshan, NW China. *Ore Geology Reviews*, 100: 263—279. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.02.037>
- Jones, S., Herrmann, W., Gemmill, J. B., 2005. Short Wavelength Infrared Spectral Characteristics of the HW Horizon: Implications for Exploration in the Myra Falls Volcanic-Hosted Massive Sulfide Camp, Vancouver Island, British Columbia, Canada. *Economic Geology*, 100(2): 273—294. <https://doi.org/10.2113/100.2.273>
- Laakso, K., Peter, J. M., Rivard, B., et al., 2016. Short-Wave Infrared Spectral and Geochemical Characteristics of Hydrothermal Alteration at the Archean Izok Lake Zn-Cu-Pb-Ag Volcanogenic Massive Sulfide Deposit, Nunavut, Canada: Application in Exploration Target Vectoring. *Economic Geology*, 111(5):1223—1239. <https://doi.org/10.2113/econgeo.111.5.1223>
- Laakso, K., Rivard, B., Peter, J. M., et al., 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. *Economic Geology*, 110(4): 925—941. <https://doi.org/10.2113/econgeo.110.4.925>
- Li, N., Chen, Y. J., Ulrich, T., et al., 2012. Fluid Inclusion Study of the Wunugetu Cu-Mo Deposit, Inner Mongolia, China. *Mineralium Deposita*, 47(5): 467—482. <https://doi.org/10.1007/s00126-011-0384-1>
- Liu, J.M., Zhang, R., Zhang, Q.Z., 2004. The Regional Metallogeny of Da Hinggan Ling, China. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 269—277 (in Chinese with English abstract).
- Pontual, S., 2001. Implementing Field-Based and Hy Logging Spectral Datasets in Exploration and Mining. AusSpec International, Unpublished Manual.
- Post, J. L., Noble, P. N., 1993. The Near-Infrared Combination Band Frequencies of Dioctahedral Smectites, Micas, and Illites. *Clays and Clay Minerals*, 41(6): 639—644. <https://doi.org/10.1346/ccmn.1993.0410601>
- Qi, J. P., Chen, Y. J., Pirajno, F., 2005. Geological Characteristics and Tectonic Setting of the Epithermal Deposits in the Northeast China. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 25(2): 47—59 (in Chinese with English abstract).
- Shao, J.A., Zhang, L.Q., Mou, B.L., 1999. Magmatism in the Mesozoic Extending Orogenic Process of Da Hinggan MTS. *Earth Science Frontiers*, 6(4): 339—346 (in Chinese with English abstract).
- Sillitoe, R. H., 2010. Porphyry Copper Systems. *Economic Geology*, 105(1): 3—41. <https://doi.org/10.2113/gsec-ongeo.105.1.3>
- Sun, W.L., Peng, S.X., Bai, J.K., et al., 2018. Fluid Inclusions and Geochronology of Wulunbulake Copper Deposit in Xinjiang. *Earth Science*, 43(12):4475—4489 (in Chinese with English abstract).
- Thompson, A., Scott, K., Huntington, J., et al., 2009. Mapping Mineralogy with Reflectance Spectroscopy: Examples from Volcanogenic Massive Sulfide Deposits. *Reviews in Economic Geology*, 16:25—40.
- Wang, H. Z., Mo, X. X., 1995. An Outline of the Tectonic Evolution of China. *Episodes*, 18(1/2): 6—16. <https://doi.org/10.18814/epiiugs/1995/v18i1.2/003>
- Wu, G., Chen, Y.J., Sun, F.Y., et al., 2006. Geological Characteristics and Tectonic Settings of Gold Deposits in the Central Segment of the Mongolia-Okhotsk Metallogenic Belt. *Mineral Deposits*, 25(S1): 51—54 (in Chinese with English abstract)
- Xiao, W. J., Windley, B. F., Hao, J., et al., 2003. Accretion Leading to Collision and the Permian Solonker Suture, Inner Mongolia, China: Termination of the Central Asian Orogenic Belt. *Tectonics*, 22(6): 00—00. <https://doi.org/10.1029/2002tc001484>
- Yang, K., Huntington, J., 1996. Spectral Signatures of Hydrothermal Alteration in the Metasediments at Dead

- Bullock Soak, Tanami Desert, Northern Territory. *Australian Journal of Earth Sciences*, 25:257.
- Yang, K., Lian, C., Huntington, J. F., et al., 2005. Infrared Spectral Reflectance Characterization of the Hydrothermal Alteration at the Tuwu Cu-Au Deposit, Xinjiang, China. *Mineralium Deposita*, 40(3): 324–336. <https://doi.org/10.1007/s00126-005-0479-7>
- Yang, Z.M., Hou, Z.Q., Yang, Z.S., et al., 2012. Application of Short Wavelength Infrared (SWIR) Technique in Exploration of Poorly Eroded Porphyry Cu District: A Case Study of Niancun Ore District, Tibet. *Mineral Deposits*, 31(4): 699–717 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G., Lian, C.Y., Yuan, C.H., 2004. Application of SWIR Reflectance Spectroscopy to Identify the Alteration Minerals in the Pulang Porphyry Copper Ore District, Yunnan Province. *Earth Science Frontiers*, 11(4): 460–460 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S.T., Chen, H.Y., Zhang, X.B., et al., 2017. Application of Short Wavelength Infrared (SWIR) Technique to Exploration of Skarn Deposit: A Case Study of Tonglvshan Cu-Fe-Au Deposit, Edongnan (Southeast Hubei) Ore Concentration Area. *Mineral Deposits*, 36(6): 1263–1288 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y., Xu, G., Zhang, S.H., et al., 2004. Yanshanian Movement and Conversion of Tectonic Regimes in East Asia. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 319–328 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, H.T., Zheng, Y.Y., Xu, J., et al., 2018. Zircon U-Pb Ages and Petrogenesis of Ore-Bearing Porphyry for Qingcaoshan Porphyry Cu-Au Deposit, Tibet. *Earth Science*, 43(8): 2858–2874 (in Chinese with English abstract).
- Zorin, Y. A., Zorina, L. D., Spiridonov, A. M., et al., 2001. Geodynamic Setting of Gold Deposits in Eastern and Central Trans-Baikal (Chita Region, Russia). *Ore Geology Reviews*, 17(4): 215–232. [https://doi.org/10.1016/s0169-1368\(00\)00015-9](https://doi.org/10.1016/s0169-1368(00)00015-9)
- 陈衍景, 翟明国, 蒋少涌, 2009. 华北大陆边缘造山过程与成矿研究的重要进展和问题. *岩石学报*, 25:3–34.
- 陈衍景, 张成, 李诺, 等, 2012. 中国东北铜矿床地质. *吉林大学学报(地球科学版)*, 42:1223–1268.
- 邓晋福, 赵国春, 苏尚国, 等, 2005. 燕山造山带燕山期构造叠加及其大地构造背景. *大地构造与成矿学*, 29:3–11.
- 胡健民, 刘晓文, 赵越, 等, 2004. 燕山板内造山带早期构造变形演化: 以辽西凌源太阳沟地区为例. *地学前缘*, 11(3): 255–271.
- 刘建明, 张锐, 张庆洲, 2004. 大兴安岭地区的区域成矿特征. *地学前缘*, 11(1): 269–277.
- 祁进平, 陈衍景, Pirajno, F., 2005. 东北地区浅成低温热液矿床的地质特征和构造背景. *矿物岩石*, 25(2): 47–59.
- 邵济安, 张履桥, 牟保磊, 1999. 大兴安岭中生代伸展造山过程中的岩浆作用. *地学前缘*, 6:339–346.
- 孙万龙, 彭素霞, 白建科, 等, 2018. 新疆乌伦布拉克铜矿流体包裹体特征及含矿岩体年代学. *地球科学*, 43(12): 4475–4489
- 武广, 陈衍景, 孙丰月, 等, 2006. 蒙古-鄂霍茨克成矿带中段金矿床地质特征及构造背景. *矿床地质*, 25(S1): 51–54.
- 杨志明, 侯增谦, 杨竹森, 等, 2012. 短波红外光谱技术在浅剥蚀斑岩铜矿区勘查中的应用: 以西藏念村矿区为例. *矿床地质*, 31(4): 699–717.
- 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. *地学前缘*, 11:460–460.
- 张世涛, 陈华勇, 张小波, 等, 2017. 短波红外光谱技术在矽卡岩型矿床中的应用: 以鄂东南铜绿山铜铁金矿床为例. *矿床地质*, 36(6): 1263–1288.
- 郑海涛, 郑有业, 徐净, 等, 2018. 西藏青草山斑岩铜金矿床含矿斑岩锆石 U-Pb 年代学及岩石成因. *地球科学*, 43(8): 2858–2874.
- 赵越, 徐刚, 张拴宏, 等, 2004. 燕山运动与东亚构造体制的转变. *地学前缘*, 11(3): 319–328.
- 郑海涛, 郑有业, 徐净, 等, 2018. 西藏青草山斑岩铜金矿床含矿斑岩锆石 U-Pb 年代学及岩石成因. *地球科学*, 43(8):336–352.

附中文参考文献

陈寿波, 黄宝强, 李琛, 等, 2018. 新疆东天山玉海铜矿蚀变