

doi: [10.12097/gbc.2024.03.043](https://doi.org/10.12097/gbc.2024.03.043)

任美桥, 李真真, 许健, 徐文坦, 孙珍军, 任鹏, 赵永春, 张世昕, 赵俊兴, 张昕. 2025. 内蒙古白音乌拉钨锡矿床蚀变矿物短波红外光谱特征及铍矿化的发现[J]. 地质通报, 44(6): 1033–1047.

Ren Meiqiao, Li Zhenzhen, Xu Jian, Xu Wentan, Sun Zhenjun, Ren Peng, Zhao Yongchun, Zhang Shixin, Zhao Junxing, Zhang Xin. 2025. Short-wave infrared spectroscopy characteristics of alteration minerals and discovery of Be mineralization from Baiyinwula W–Sn deposit in Inner Mongolia[J]. Geological Bulletin of China, 44(6): 1033–1047(in Chinese with English abstract).

内蒙古白音乌拉钨锡矿床蚀变矿物短波红外光谱特征及铍矿化的发现

任美桥^{1,2}, 李真真^{1,2*}, 许健³, 徐文坦^{1,2}, 孙珍军^{1,2}, 任鹏³, 赵永春^{1,2},
张世昕^{1,2}, 赵俊兴⁴, 张昕⁴

(1. 防灾科技学院地球科学学院 河北 三河 065201; 2. 河北省地震动力学重点实验室, 河北 三河 065201; 3. 内蒙古赤峰地质矿产勘查开发有限责任公司, 内蒙古 赤峰 024005; 4. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要:【研究目的】内蒙古白音乌拉矿床位于大兴安岭南段锡银铅锌多金属成矿带, 具有良好的稀有金属找矿前景, 但在找矿勘查过程中, 一直存在热液矿化中心不明、矿床成因认识不足等问题, 影响了找矿效果。【研究方法】运用短波红外光谱技术对该矿区13个钻孔的蚀变矿物类型和相对含量进行了详细分析。【研究结果】结果表明, 矿区的主要蚀变矿物包括白云母族矿物(白云母、多硅白云母、伊利石)、绿泥石族矿物(铁绿泥石、铁镁绿泥石、镁绿泥石)、黑云母、黄玉和电气石, 同时含有少量高岭石、地开石、蒙脱石和方解石。根据蚀变矿物填图, 矿区的围岩蚀变总体可分为2个带: 中深部的强云英岩化带(石英-多硅白云母-黄玉-绿泥石-萤石±黑云母±电气石)和浅部及外围的白云母-绿泥石蚀变带(石英-绿泥石-白云母±黑云母±电气石), 强云英岩带与深部黑云母花岗岩的空间关系表明, 成矿流体来自于黑云母花岗岩, 该带也代表了本矿区的热液矿化中心。白云母族矿物的特征光谱参数显示, 强云英岩化带内Pos2200和IC值均较高, 远离该带则变低, Pos2200的增大受成矿流体成分、pH值、围岩性质及温度共同影响, 而IC值主要与热液活动的温度相关。【结论】白云母高IC值(>2)可作为白音乌拉矿区的找矿标志。短波红外光谱技术在富F且发育云英岩化的花岗岩浆-热液系统中是非常有效的勘查方法, 富F矿物黄玉的快速识别, 也可能暗示良好的锂、铍找矿潜力。该矿床以绿柱石为主的岩浆热液型铍矿化的发现, 证明短波红外光谱技术良好的应用前景, 同时也揭示了大兴安岭地区铍成矿类型的多样性, 暗示区域上良好的铍找矿潜力, 对区内稀有金属未来勘查目标和方向有一定启示意义。

关键词:白音乌拉; 短波红外光谱; 白云母族矿物; 云英岩化; 铍矿化

创新点:验证了短波红外光谱技术在富氟云英岩化系统中的高效性, 尤其是对黄玉等关键矿物的快速识别; 在白音乌拉矿床中发现以绿柱石为主的岩浆热液型铍矿化, 揭示了大兴安岭南段铍成矿类型的多样性。

中图分类号: P618.72, P627 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2025)06-1033-15

Short-wave infrared spectroscopy characteristics of alteration minerals and discovery of Be mineralization from Baiyinwula W–Sn deposit in Inner Mongolia

REN Meiqiao^{1,2}, LI Zhenzhen^{1,2*}, XU Jian³, XU Wentan^{1,2}, SUN Zhenjun^{1,2}, REN Peng³,

收稿日期: 2024-03-26; 修订日期: 2024-10-20

资助项目: 国家自然科学基金面上项目《富B锡-银铅锌成矿系统中锡与银铅锌共生富集机制研究——以内蒙古白音查干矿床为例》(批准号: 42272105)、河北省自然科学基金面上项目《大兴安岭南段白音查干锡多金属矿床中铍的赋存状态与富集机制研究》(批准号: D2023512031)、克什克腾旗银达矿业有限公司综合研究项目《内蒙古自治区白音乌拉矿区找矿潜力评价综合研究》(编号: GS2022094)

作者简介: 任美桥(2000-), 女, 在读硕士生, 资源与环境专业。E-mail: 1134468990@qq.com

*通信作者: 李真真(1984-), 女, 博士, 副教授, 从事矿床学及矿产普查与勘探的教学和科研工作。E-mail: windylizhenzhen@163.com

ZHAO Yongchun^{1,2}, ZHANG Shixin^{1,2}, ZHAO Junxing⁴, ZHANG Xin⁴

(1. China Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, Hebei, China; 2. Hebei Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Sanhe 065201, Hebei, China; 3. Chifeng Geological Mineral Exploration and Development Co., LTD, Inner Mongolia, Chifeng 024005, Inner Mongolia, China; 4. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: [Objective] Baiyinwula deposit is located in the tungsten-tin polymetallic mineralization belt in the southern section of Great Xing'an Range, which has good prospecting of rare metals. However, in the process of mineral exploration, there have been problems such as unclear hydrothermal mineralization centers and insufficient understanding of the genesis of mineral deposits, which have affected the effectiveness of mineral exploration. [Methods] In this paper, the alteration mineral types and relative contents in this deposit were analyzed by using short-wave infrared spectroscopy. [Results] The results show that the alteration minerals are dominated by muscovite, phengite, illite, chlorite, biotite, topaz and tourmaline, with small amounts of kaolinite, dickite, montmorillonite and calcite. Based on the alteration mineral mapping, two alteration zones are recognized in this deposit: a strong greisenization zone (quartz-phengite-topaz-chlorite-fluorite±biotite±tourmaline) in the middle and deep parts, and a muscovite-chlorite zone (quartz-chlorite-muscovite±biotite±tourmaline) in the shallow parts and the periphery. The spatial relationship between greisenization zone and biotite granite indicate that the hydrothermal fluids derived from the biotite granite and the strong greisenization zone represent the hydrothermal and mineralization center. The characteristic spectral parameters of white-mica group minerals show that the Pos2200 and IC values are relatively high within the strong greisenization zone, and decrease further away from the zone. The increase in Pos2200 is influenced by the composition of the ore-forming fluid, the properties of the surrounding rock, and temperature, while the IC value is mainly related to the temperature of hydrothermal fluid. [Conclusions] High IC value (>2) of muscovite can be used as indicator for prospecting in this deposit. Short wave infrared spectroscopy technology is a very effective exploration method in F-rich granitic magma hydrothermal systems with greisenization. The rapid identification of F-rich topaz may also suggest good exploration potential for Li and Be. The discovery of magmatic-hydrothermal Be mineralization dominated by Beryl in this deposit demonstrates the good application prospects of short wave infrared spectroscopy technology, and also reveals the diversity of Be mineralization types in Great Xing'an Range, implying good potential for Be exploration in the region. It has certain enlightening significance for future exploration targets and directions of rare metals in this region.

Key words: Baiyinwula; short-wave infrared spectroscopy; white-mica group minerals; greisenization; Be mineralization

Highlights: The study has demonstrated the high efficacy of short-wave infrared spectroscopy in fluorine-rich greisenized systems, particularly for the rapid identification of key minerals such as topaz. Furthermore, magmatic-hydrothermal beryllium mineralization dominated by beryl has been discovered in the Baiyinwula deposit, revealing the diversity of beryllium mineralization types in the southern section of Great Xing'an Range.

About the first author: REN Meiqiao, female, born in 2000, master candidate, mainly engaged in resources and environment study; E-mail: 1134468990@qq.com

About the corresponding author: LI Zhenzhen, female, born in 1984, Ph.D., associate professor, mainly engaged in teaching and research work in mineral deposit science, mineral survey and exploration; E-mail: windylizhenzhen@163.com

Fund support: Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42272105), Natural Science Foundation of Hebei Province (No. D2023512031), and Comprehensive research project of Keshiketeng Banner Yinda Mining Company Limited. (No.GS2022094)

大兴安岭南段是中国北方重要的多金属成矿带(王京彬等, 2005; 毛景文等, 2013; 周振华和毛景文, 2022), 带内发育多个以银-铅-锌、锡-银铅锌、铜-锡-钨等组合为主的大中型矿床, 以双尖子山银-铅-锌(Wang et al., 2019; Zhai et al., 2020)、白音查干锡-银-铅-锌(刘新等, 2017a,b; 姚磊等, 2017, 2021; 李真

真等, 2020)、大井铜-锡(王莉娟等, 2015)等大型—超大型矿床为典型代表。近年来, 随着找矿勘查工作的逐步深入, 除锡多金属矿化外, 该区还陆续发现了多个锂-铍矿床或矿化点(陈新凯和周振华, 2023), 如维拉斯托超大型锂-锡-钨-铷矿床(祝新友等, 2016; Shi et al., 2021; 杜立华等, 2025)、赵井沟铌-钽-

锂矿床(Wu et al., 2020)、那斯噶吐铍矿化点(吴浩然等, 2022)、黄岗梁铁-锡矿床深部铍矿化等(侯晓志等, 2017), 显示大兴安岭南段具有巨大的锡、钨、锂、铍等稀有金属找矿前景。这些稀有金属成矿主要与早白垩世早期高分异的花岗质岩体有关, 形成以石英脉型、云英岩型、斑岩型等为主要类型的矿化(周振华和毛景文, 2022; 陈新凯和周振华, 2023)。尤其是出露于内蒙古赤峰市西部的北大山岩体, 周围已发现维拉斯托、安乐等矿床及多个矿化点, 岩体富F和较低氧逸度的特征也显示与锡钨矿化密切的成因联系(武广等, 2021; 丁磊磊等, 2022; Yang et al., 2024)。位于北大山岩体东南部的白音乌拉矿床是近年来新发现的钨锡矿化点, 多个钻孔已揭露出呈细脉状产出的黑钨矿化和锡石矿化, 同时伴随较广泛的绢云母化、伊利石化、电气石化等热液蚀变, 显示良好的找矿前景。然而, 以往工作缺乏对蚀变矿物空间展布规律的分析, 且对矿床成因认识不足, 导致勘探方向不明, 找矿工作一直未能获得大的突破。

围岩蚀变在岩浆热液矿床中普遍发育, 其与矿体紧密伴生, 常有分带现象, 且远大于矿体的分布范围, 因此, 蚀变矿物的填图一直是热液矿床重要的找矿方法之一(陈华勇等, 2019)。近年来, 基于短波红外光谱分析技术利用蚀变矿物进行找矿勘查的方法得到了广泛应用(Herrmann et al., 2001; 连长云等, 2005; 杨志明等, 2012; 张世涛等, 2017; Zheng et al., 2022; 赵龙贤等, 2023)。相比于传统蚀变矿物填图方法, 该技术具有分析成本低、速度快、准确率高的特征。由于短波红外光谱对矿物中含有的羟基($-OH$, 如 $Al-OH$, $Mg-OH$, $Fe-OH$)、 H_2O 、 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 等基团具有特征的吸收峰, 因此可以快速有效地鉴定出含有这些基团的含水硅酸盐矿物、硫酸盐、碳酸盐类等矿物。目前, 可以利用该技术识别蚀变矿物类型和组合, 获得矿物(白云母、绿泥石、明矾石等)的特征光谱参数, 并将这些信息用于填图, 获得它们在空间上的变化规律, 进而圈定热液/矿化中心, 且已被证明是有效的(Chang et al., 2011; Harraden et al., 2013; Tang et al., 2022; Zhou et al., 2023; Hao et al., 2024)。因此, 本次研究在详细的剖面地质编录基础上, 对白音乌拉矿床进行系统的短波红外光谱分析, 查明蚀变矿物种类及空间分带特征, 确定热液/矿化中心, 并结合围岩蚀变与岩浆岩之间的联系, 分析矿

床成因, 明晰下一步找矿方向。

1 区域地质背景

大兴安岭南段的地理范围主要涵盖内蒙古东部地区, 其大地构造位于中亚造山带东段, 南北分别以索伦-西拉木伦-长春-延吉缝合带和黑河-贺根山缝合带为界, 东部以嫩江断裂为界(Liu et al., 2017, 2021)(图1-a), 区域演化史较复杂, 在古生代古亚洲洋演化的基础上, 中生代叠加了西部蒙古-鄂霍茨克洋和东部古太平洋演化的改造, 显示复合造山特征(秦克章等, 2017; 王涛等, 2022; 周建波和陈卓, 2023)。区内出露最古老的地层为锡林浩特变质杂岩(图1-b), 岩性以片麻岩、黑云母花岗片麻岩、云母片岩等为主(Shi et al., 2003), 可能是古亚洲洋演化时期古老微陆块的记录(邵济安等, 2018)。古生代地层分布广泛, 包括奥陶系—志留系、泥盆系和石炭系变质碎屑沉积岩、碳酸盐岩和火山-沉积岩, 二叠系大石寨组火山-沉积岩(Chen et al., 2023)。中生代地层覆盖于古生代地层之上, 岩性以中基性—中酸性火山-沉积岩为主。区内岩浆活动频繁, 包括与古亚洲洋俯冲及俯冲后伸展有关的晚古生代闪长岩和花岗闪长岩, 与古亚洲洋闭合有关的早—中三叠世中酸性岩体, 以及与古太平洋和蒙古-鄂霍茨克洋演化有关的早侏罗世(184~160 Ma)和晚侏罗世—早白垩世(155~120 Ma)中酸性岩体(Wu et al., 2011; Zhang et al., 2015)。

在复合造山背景下, 伴随强烈的构造-岩浆作用, 大兴安岭南段发育热液脉型、矽卡岩型、斑岩型、云英岩型等多种类型矿床, 形成了以锡、银、铜、铅锌为主, 兼有钨、锂、铍、铌钽等多种成矿金属, 且多期次的大规模成矿作用, 成矿爆发期集中于160~120 Ma(Ouyang et al., 2015; 秦克章等, 2017; 周振华和毛景文, 2022)。

2 矿床地质特征

白音乌拉矿区位于内蒙古自治区克什克腾旗政府所在地经棚镇北(350°)方向68 km处, 隶属巴彦查干苏木管辖。区内出露地层主要为中二叠统大石寨组(P_{2ds})(图2), 厚度约450 m, 岩性以安山质晶屑岩、屑凝灰岩为主, 局部夹熔岩, 还可见少量粉砂质板岩。矿区断裂构造主要呈北东—南西展布, 钻孔揭露少量构造破碎带。区内岩浆岩主要形成于晚二

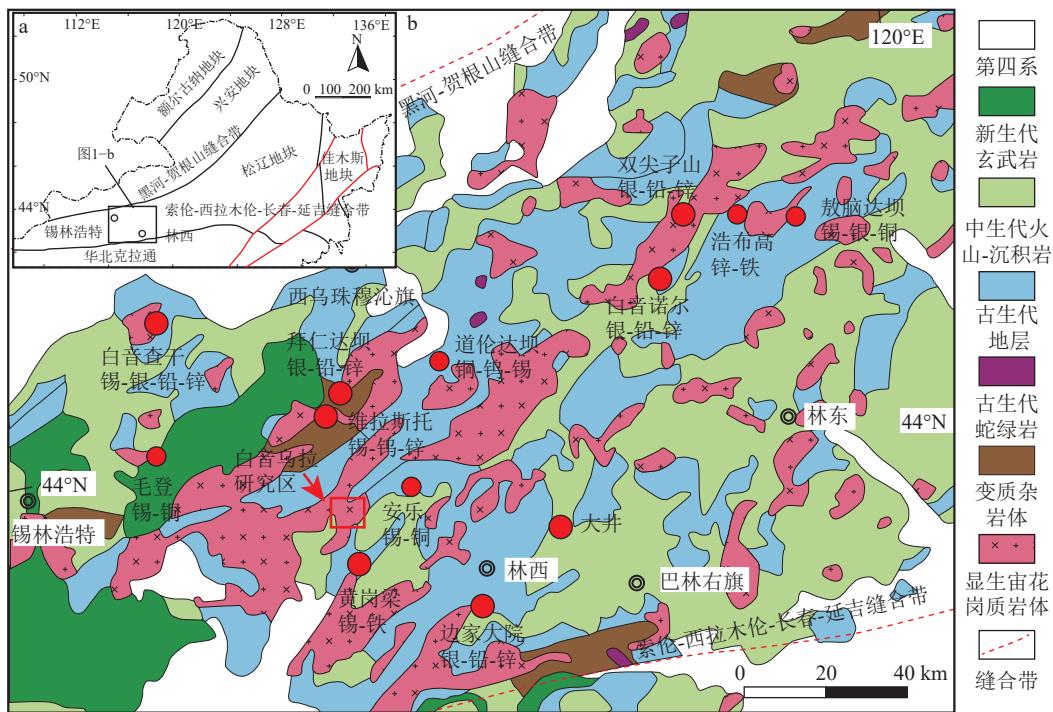


图1 大兴安岭南段地区大地构造位置图(a)和典型矿床分布图(b)(据 Li et al., 2020 修改)

Fig. 1 Geotectonic location map (a) and distribution of typical mineral deposits (b) in the southern Great Xing'an Range

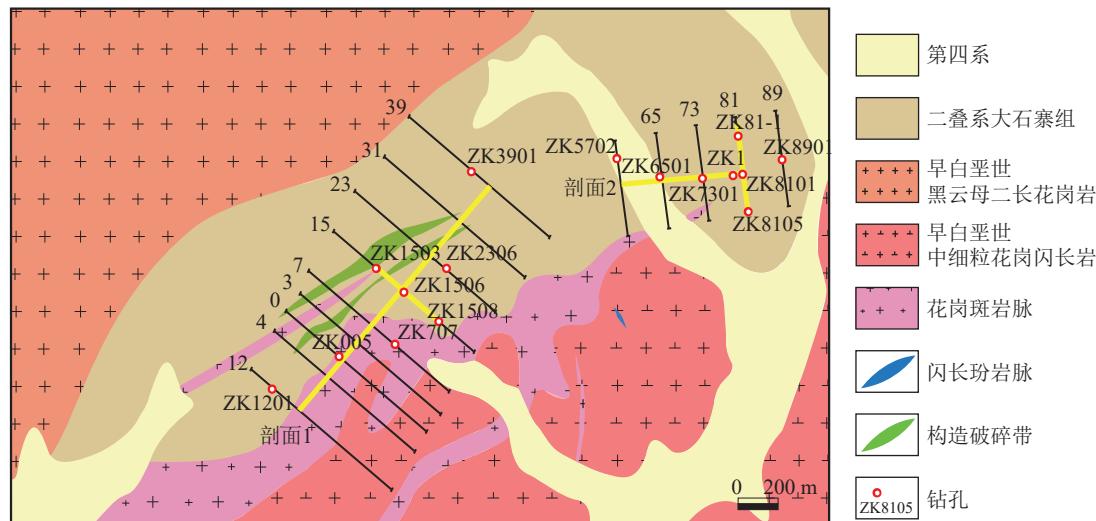


图2 大兴安岭南段白音乌拉矿区平面地质图

Fig. 2 Plane geological map of the Baiyinwula mining area in the southern Great Xing'an Range

叠世和早白垩世，其中矿区地表中部出露的花岗斑岩体和钻孔中一些花岗斑岩脉形成于晚二叠世，矿区西北和东南部大量出露的黑云母花岗岩和花岗闪长岩均形成于早白垩世(作者未发表数据)(图2)。本矿区北西部紧邻区内北大山岩体，此岩体为复式花岗岩基，岩性包括黑云母花岗岩、斑状二长花岗岩等，前人研究显示其形成于 140 Ma 左右(武广等，

2021; Yang et al., 2024)，与西北部黑云母花岗岩形成时代一致，暗示本区岩体可能是北大山岩体的一部分，同样具有良好的成矿潜力。在剖面图上，黑云母花岗岩侵位于大石寨组底部，其顶界面基本位于 1100 m 标高以下，上部地层可见大量花岗斑岩、钠长细晶岩等呈岩脉状产出，部分花岗斑岩形成于晚二叠世，钠长细晶岩和其余岩脉形成于早白垩世(作

者未发表数据)。

矿区围岩蚀变十分发育,可见硅化、绢云母化、黑云母化、电气石化、绿泥石化等(图3)。其中硅化、绢云母化(图3-a, b)分布最广,主要分布于黑云母花岗岩和花岗斑岩内,大石寨组岩石蚀变较强时,也可见片状绢云母;黑云母化和绿泥石化主要分布于大石寨组中,呈弥散状产出(图3-c, d)。矿床内还发育大量热液脉系,常见白云母/绢云母-石英±毒

砂±萤石脉(图3-e)、电气石±锡石脉(图3-f)、萤石-黄玉-黑云母脉(图3-g)和石英-黄玉±毒砂脉(图3-h, i)。矿化以锡矿化和钨矿化为主,其中地表可见到网脉状锡矿化及由电气石胶结围岩角砾形成的隐爆角砾岩,Sn品位较高,钻孔中浅部可见锡矿化呈近直立的锡石-电气石细脉产出(图3-j),相关围岩发生了强绢云母化和电气石化蚀变。钨矿化仅在钻孔中可见,赋矿围岩为地层或花岗斑岩,深部黑云母花岗岩

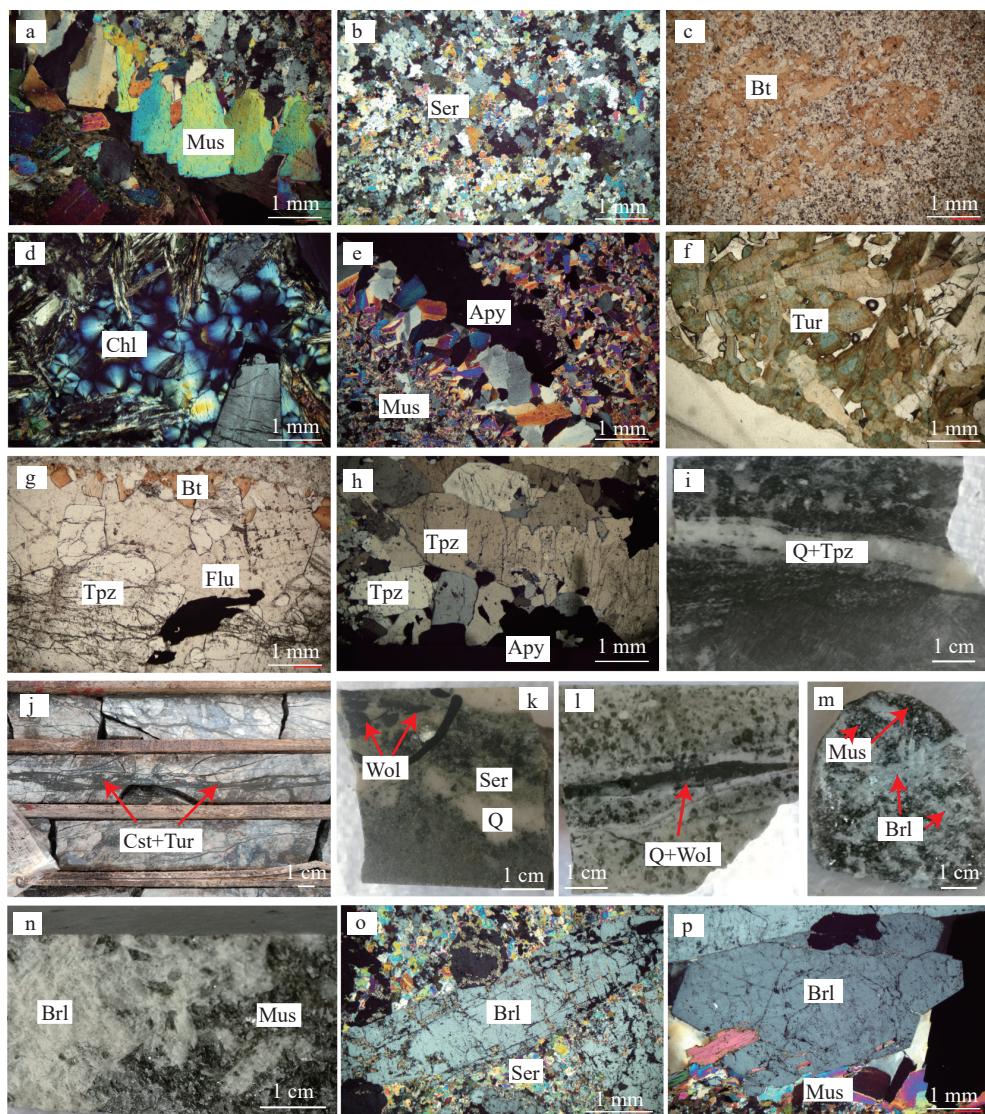


图3 白音乌拉矿区代表性蚀变矿物的手标本和显微镜下照片

Fig. 3 Hand specimens and microscopic photographs of representative alteration minerals from the Baiyinwula mining area
 a—白云母脉及石英+绢云母蚀变晕; b—花岗斑岩中弥散状硅化和绢云母化; c—大石寨组中弥散状黑云母化; d—大石寨组中绿泥石化;
 e—白云母-毒砂脉; f—电气石脉; g—石英-萤石-黄玉-黑云母脉; h—石英-黄玉-毒砂脉; i—石英-黄玉脉; j—大石寨组中的电气石-锡石网脉
 和绢云母化蚀变; k—地层中石英-绢云母-黑钨矿脉; l—花岗斑岩中石英-黑钨矿脉; m, n—绿柱石-白云母脉; o, p—显微镜下可见绿柱石与
 白云母/绢云母共生. Apy—毒砂; Brl—绿柱石; Bt—黑云母; Chl—绿泥石; Cst—锡石; Flu—萤石; Mus—白云母; Q—石英; Ser—绢云母;
 Tur—电气石; Tpz—黄玉; Wol—黑钨矿

中也可见钨矿化,其主要以近直立的石英-黑钨矿±绢云母细脉产出(图 3-k, l)。需要说明的是,由于钨锡矿化以细脉状为主,导致不同钻孔之间矿化连续性较弱,难以像大脉状矿体那样直接圈定矿体,故在剖面图上仅标注了矿化的位置和相对品位高低,未进行矿体的圈连。

本次研究还在野外识别出大量呈热液脉状产出的绿柱石(图 3-m~p),脉宽一般在 3~20 mm 之间,产状陡立,脉中矿物以石英、白云母、绿柱石、黄玉、萤石为主,有时可见黑云母、黑钨矿和自然铋。绿柱石在脉中多呈白色,少量为浅绿色,针状或长柱状产出,有时可见良好的六方柱状晶形,长度可从 200 μm 至 10 mm 不等。由于绿柱石是重要的富铍矿物($\text{Be}_3\text{Al}_2[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$),这些绿柱石脉的发现,结合多个岩石原生晕化学分析样中 Be 异常(Be 含量最高为 507×10^{-6} ,未发表数据),暗示本区具有良好的铍矿化迹象。

3 样品采集与测试方法

3.1 样品采集

本次研究按照十字剖面确定采样钻孔,具体钻孔分布位置见图 2。剖面 1 的钻孔大多数未分布在剖面线上,剖面图按照将钻孔沿投影方向投影至剖面线绘制。样品测试按照 1~5 m 间距进行测试,当蚀变不发育或无变化时,适当放宽测试间距,近矿体位置则进行加密测试。

3.2 测试方法

本次测试所用的光谱仪器为美国 Analytical Spectral Devices, Inc.(ASD)公司生产的 Terraspec。该仪器的光谱分辨率为 6~7 nm,光谱取样间距 2 nm,测试窗口为直径 2.5 cm 的圆形区域。详细

的仪器参数及注意事项参考杨志明等(2012)和 Chang et al.(2011)。测试前,对样品进行清洗和晾干,以避免样品表面的水分或杂质对测试结果的干扰,同时要避开风化面进行测试。在进行测试之前,需要对仪器进行校准,其中光谱平均设置为 200,基准白设置为 400,以进行优化和基准白操作。为保证测试数据的准确性,在测试过程中每隔 30 min 对仪器进行一次优化和基准白测量(Chang and Yang, 2012)。每个样品在不同的位置测试 2~3 个点位,通过计算几个光谱平均值,获取最终样品的光谱曲线。所有数据均运用光谱地质软件(The Spectral Geologist, TSG Version 8.0)进行分析处理,在软件自动识别的基础上,进行人工核对和筛选,并磨制代表性薄片,在显微镜下确认矿物种类与软件识别的矿物是否匹配,以保证数据的准确性。白云母族矿物的 1900 nm、2200 nm 吸收峰位和吸收峰深度,以及结晶度 IC 值($IC=2200 \text{ nm} \text{ 吸收峰深度}/1900 \text{ nm} \text{ 吸收峰深度}$)等均通过 TSG8.0 中的标量(scalar)功能求得,具体设置方法见杨志明等(2012)。

4 测试结果

4.1 蚀变矿物种类及分布特征

在 TSG 8.0 软件中,设置矿物含量>10% 时,进行矿物识别,同时,单个测试曲线最多识别出 3 种矿物。本次研究共识别 11 种矿物,在矿区分布范围较广的包括白云母(绢云母)族矿物(白云母、多硅白云母、伊利石)、绿泥石族矿物(铁绿泥石、铁镁绿泥石、镁绿泥石)、黑云母、黄玉和电气石,另有少量高岭石、地开石、蒙脱石、方解石等。典型矿物的实测光谱曲线如图 4 所示。所识别出的矿物种类与野外

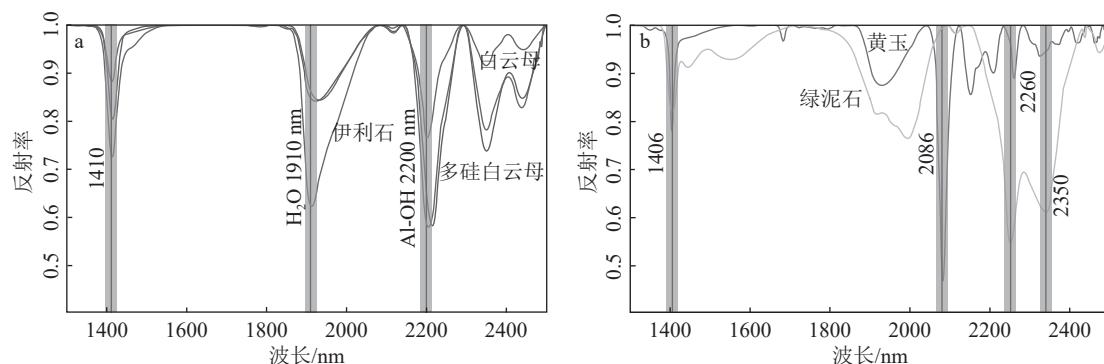


图 4 白音乌拉矿区典型蚀变矿物特征光谱曲线

Fig. 4 Characteristic spectral curves of typical alteration minerals in the Baiyinwula mining area

a—云母族矿物特征光谱曲线;b—其他矿物典型光谱曲线

观察及显微镜下观察的结果基本一致(图3)。

为查明蚀变矿物在空间上的分布规律,笔者将识别出的矿物及其相对含量标注于相应的剖面图(图5—图7)上,结果显示,电气石在剖面1和剖面2中主要分布于浅部大石寨组中;白云母族矿物全孔均十分发育,但多硅白云母主要集中于中深部;黄玉的分布与多硅白云母非常一致,集中于中深部,且与钨矿化分布的位置吻合较好;绿泥石的分布主要与岩性相关,多呈弥散状交代围岩大石寨组,在花岗斑岩和黑云母花岗岩中不发育,在剖面上的分布无明显规律;黑云母也主要分布于大石寨组中,但蚀变较弱,且在空间上无明显规律。

根据蚀变矿物的共生组合,将矿区的围岩蚀变总体上分为2个带:①中深部的强云英岩化带,矿物组合为石英-多硅白云母-黄玉-萤石±绿泥石±黑云母,在剖面图(图5—图7)中用浅红色区域圈出;②浅部及外围的白云母-绿泥石蚀变带,矿物组合为

石英-绿泥石-白云母±黑云母±电气石,在剖面图(图5—图7)中未做标记。剖面图上同时标记了目前钻探所明确的锡-钨矿化位置,以及本次研究发现的绿柱石脉位置,可见以黄玉和多硅白云母为典型代表性矿物的强云英岩化带与钨-铍矿化具有良好的对应关系。

4.2 白云母族矿物特征光谱参数特征

白云母族矿物在短波红外光的照射下,会在2200 nm和1900 nm附近出现特征吸收峰,分别由白云母结构中的Al-OH和H₂O造成,这2个位置的吸收峰分别称之为“2200 nm吸收峰位(Pos2200)”和“1900 nm吸收峰位(Pos1900)”,相应的吸收峰深度称为“2200 nm吸收峰深度(Dep2200)”和“1900 nm吸收峰深度(Dep1900)”。同时,伊利石Dep2200与Dep1900的比值通常被称为伊利石结晶度(illite crystallinity, IC)(杨志明等,2012)或伊利石成熟度(illite spectral maturity, ISM)(Doublier et al., 2010)。

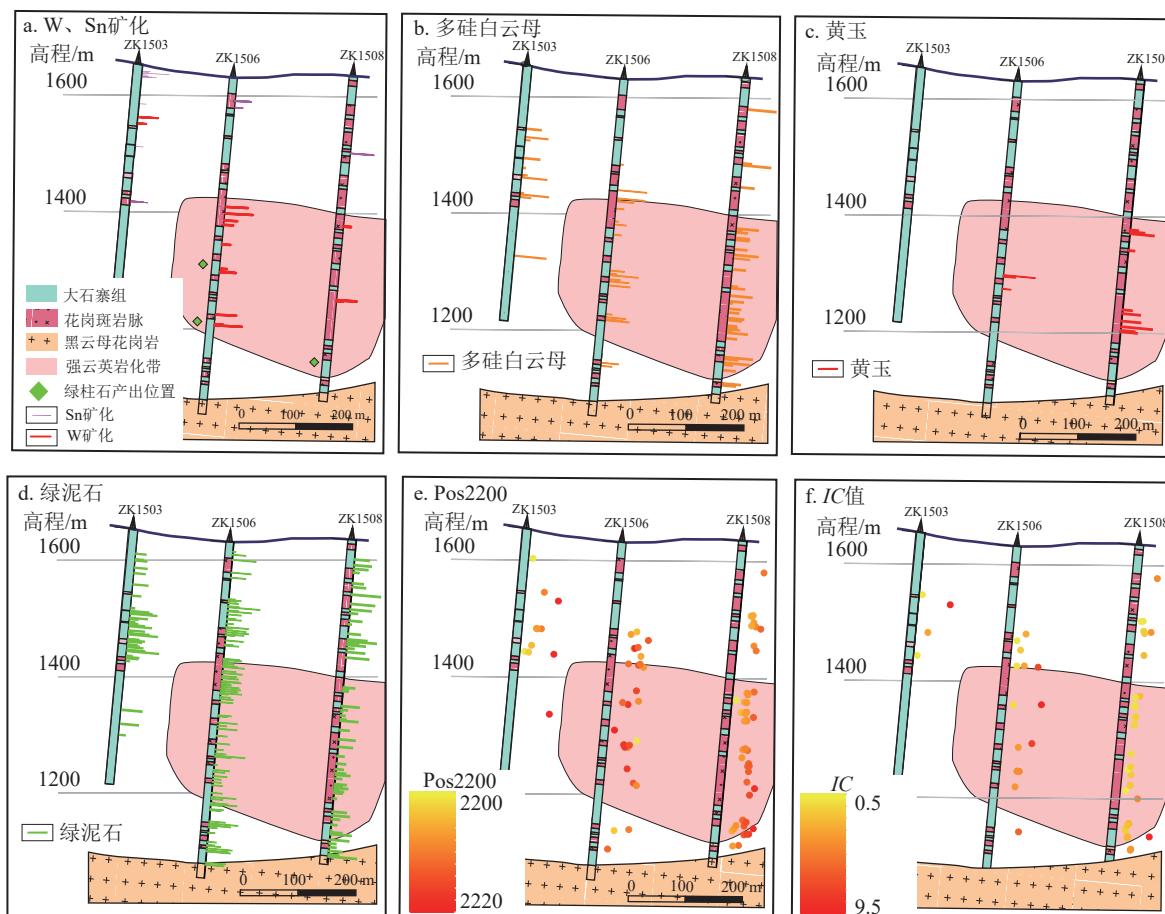


图5 15线剖面矿化、蚀变矿物及伊利石特征光谱参数填图

Fig. 5 Filled-in spectral parameters of mineralization, alteration minerals and illite characteristics of the 15-line profile

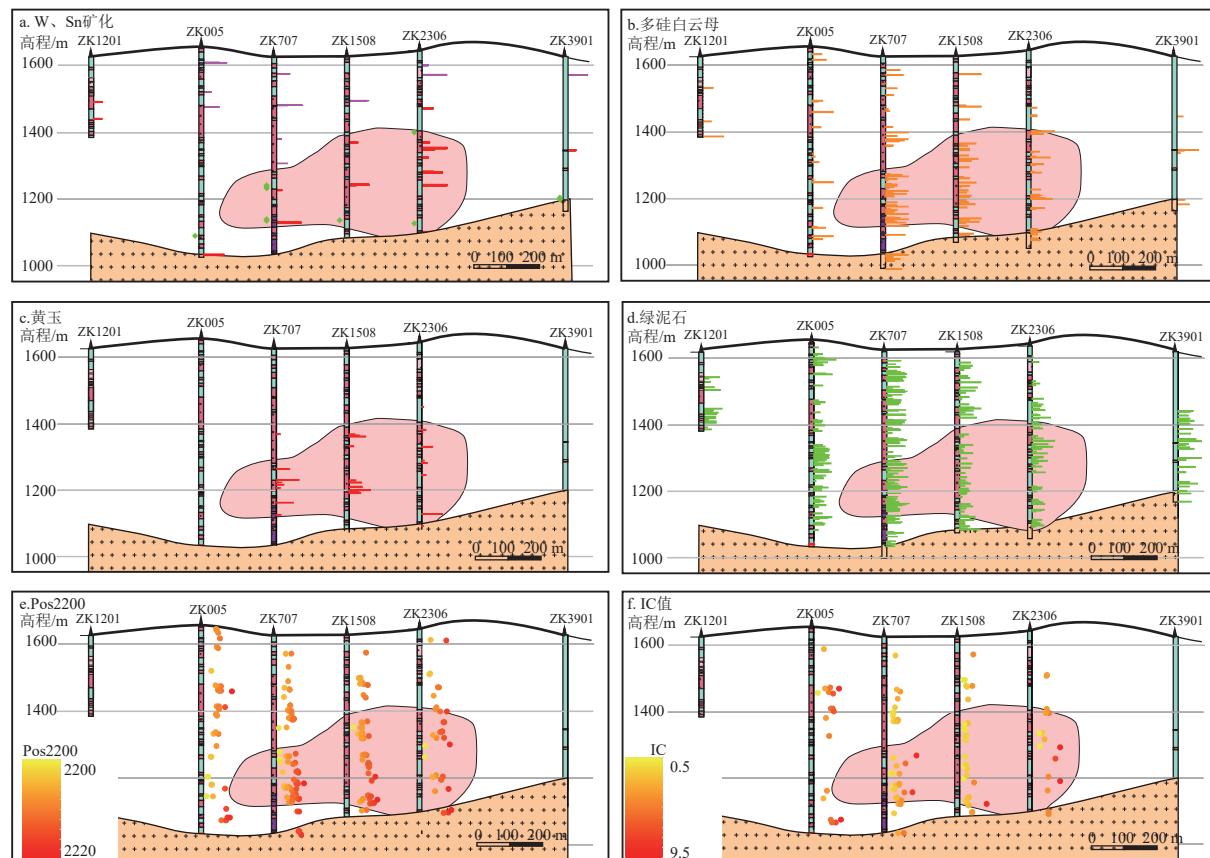


图 6 剖面 1 剖面矿化、蚀变矿物及伊利石特征光谱参数填图

Fig. 6 Filling of mineralization, alteration minerals and characteristic spectral parameters of illite in profile 1 section

本次研究对矿区普遍发育的白云母族矿物开展了上述特征光谱参数的提取, 白云母族矿物的 Pos2200 分布于 2200~2219 nm 之间, 主要集中于 2206~2215 nm(图 8-a), Dep2200 分布于 0.1~0.7 之间, 主要集中于 0.2~0.5。由于 Pos1900 和 Dep1900 是由矿物中的 H₂O 引起, 所以当与白云母族矿物共生的蚀变矿物中存在绿泥石、高岭石、蒙脱石等含水矿物时, 这 2 个参数反映的是混合矿物造成的叠加峰的情况, 而非仅仅是白云母族矿物的特征参数, 因此, 在计算伊利石结晶度 IC 值时, 本文仅选择所测样品中含有白云母族矿物的数据, 最终获得本区伊利石 IC 值分布于 0.6~9.5 之间, 集中于 1.0~4.0 之间(图 8-b)。在剖面图(图 5—图 7)上可明显看出, 在钻孔中深部的强云英岩化带内, Pos2200 明显向长波方向偏移, IC 值相应升高。

5 讨 论

5.1 对成矿热液中心和矿床成因的启示

在岩浆-热液成矿系统中, 基于短波红外光谱技

术的蚀变矿物组合填图及典型矿物的光谱特征参数变化研究, 已被广泛应用于斑岩型、矽卡岩型、VMS、浅成低温热液等矿床类型的找矿勘查中, 尤其是利用白云母族矿物的 2200 nm 吸收峰位和结晶度的变化规律来指示热液/成矿中心, 被证实是有效的勘查方法(杨志明等, 2012; Laakso et al., 2015; 陈华勇等, 2019; Wang et al., 2021)。

本次工作利用 SWIR 技术获得的蚀变矿物类型和含量进行填图, 结果显示, 深部黑云母花岗岩的上部发育厚 100~300 m 的强云英岩化蚀变带, 以大量出现多硅白云母和发育黄玉为典型特征, 再向外向上, 白云母族矿物变少, 蚀变不连续, 以绢云母+绿泥石组合为主。大量研究显示, 在与花岗岩有关的钨、锡、锂、铍等稀有金属矿产中, 含黄玉的云英岩常发育在花岗岩顶部和上部围岩中。通常花岗岩中出现黄玉、萤石等富 F 矿物, 说明大量挥发组分 F 的存在, 在岩浆演化过程中, F 可有效降低岩浆固相线温度, 使岩浆演化更充分, 同时使 W、Sn、Li、Be 等不相容金属元素在岩浆晚期高度富集, 从而有利于成

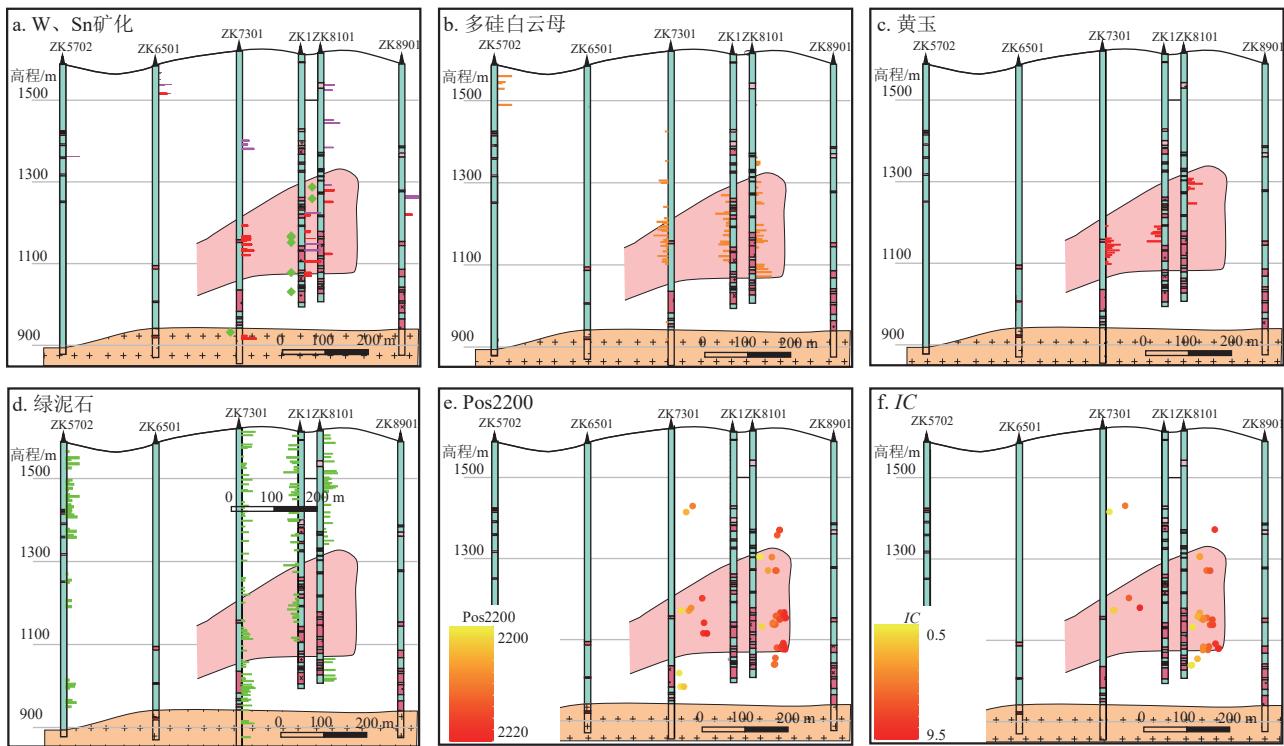


图 7 剖面 2 剖面矿化、蚀变矿物及伊利石特征光谱参数填图

Fig. 7 Filling of mineralization, alteration minerals and characteristic spectral parameters of illite in profile 2 profile

矿; 富含黄玉的云英岩形成于富F酸性流体与花岗质岩石强烈相互作用, 同时可伴随大量金属的沉淀, 在岩体顶部和上部形成大规模矿体(胡受奚等, 2004; Launay et al., 2023)。因此, 高分异花岗岩成矿系统中含黄玉云英岩的出现, 不仅是本系统良好成矿标志的体现, 而且代表了热液流体高度活动的场所, 也是重要的热液成矿中心, 例如中国华南柿竹园、茅坪等大量钨锡多金属矿床中云英岩均是重要的矿体类型(Mao et al., 2019; 倪培等, 2023)。因此, 本次研究所圈定的强云英岩化带应该代表了本矿区的热液成矿中心, 而其下伏的黑云母花岗岩是成矿岩体。黑云母花岗岩顶部发育数米的细粒花岗岩和似伟晶岩, 这一类似的岩石在南岭地区与钨锡矿化有关的花岗岩顶部也常发育。吴福元等(2023)认为, 细粒黑云母花岗岩是岩体高度演化的产物, 似伟晶岩是矿化花岗岩的重要岩石学标志。因此, 白音乌拉矿床应属于与黑云母花岗岩有关的岩浆热液矿床, 成矿与云英岩化密切相关。

本矿区白云母族矿物的特征光谱参数也显示一定的规律: 白云母 Pos2200 和 IC 值在强云英岩化带内有变高趋势, 远离此带, 在白云母-绿泥石化带内则变低。前人研究显示, 白云母 Pos2200 的变化主要由 Al^{VI}

与 $(\text{Mg}, \text{Fe})^{\text{VI}}$ 的相互替代引起, Al^{VI} 较高时, Pos2200 偏向短波方向, $(\text{Mg}, \text{Fe})^{\text{VI}}$ 较高时, Pos2200 则偏向长波方向, 且流体的温度和成分、围岩性质、氧化还原条件、pH 值等均会影响 Pos2200 值(Duke et al., 1994; Herrmann et al., 2001; Wang et al., 2021; 毛星星等, 2023)。例如, 块状硫化物型矿床和部分斑岩型矿床近矿端 Pos2200 较小, 这是由于近矿部位热液温度较高, 导致白云母中 Al 含量增加所致(Yang et al., 2005; 杨志明等, 2012; Zheng et al., 2022)。但部分造山型金矿、热液脉状矿床和斑岩型矿床近矿端白云母 Pos2200 值较大, 与成矿流体较富 Fe、Mg 密切相关(Laakso et al., 2015; 许超等, 2017; 王庆飞等, 2019)。对脉状金矿床的研究显示, pH 值的增加有利于 Fe 和 Mg 替代 Al, 并形成较大的 Pos2200, 近矿端 Pos2200 的增加也暗示流体从酸性向中性的转变, 促使氧逸度降低和黄铁矿发生沉淀(Hao et al., 2024; Zhao et al., 2024)。本矿床中白云母显示靠近热液中心 Pos2200 值明显增大的趋势, 但 Pos2200 与 IC 值之间缺乏明显的正相关性(图 8-c), 暗示温度变化可能不是影响 Pos2200 飘移的主要因素。围岩性质可会对 Pos2200 产生明显影响, 由于矿区大石寨组岩性以安山质火山岩为主, 当

其被蚀变时,必然导致大量 Fe 和 Mg 进入流体中,而使成矿流体富 Fe 和 Mg,进而有利于白云母中 Fe 和 Mg 更多地替代 Al,导致 Pos2200 增大。矿区大量发育富 Fe 和 Mg 的绿泥石、电气石,以及少量黑云母等蚀变矿物,也均为流体富 Fe 和 Mg 的证据。虽然 pH 值的增加与 Pos2200 有相关性,但白云母族矿物在矿区广泛发育,pH 值的变化对 Pos2200 的影响较难判断。总体上,本矿床近热液中心 Pos2200 明显增高可能是由成矿流体成分、围岩性质、温度甚至流体 pH 值共同影响所致,此指标不能较准确反映成矿系统内温度梯度的变化,可能不适用于热液中心的判定。

白云母 IC 值变化与其形成的温度直接相关(杨志明等,2012)。在高温条件下,白云母具有最接近理想的配比成分,随着温度的降低,其晶格中的 Al、K 逐渐被 Si 和一些缺陷替代,导致层间位置容纳了更多的 H₂O,同时也使 Al 流失。高的 H₂O 含量会引起较强的 1900 nm 吸收,使 1900 nm 吸收深度值增大,而 Al 流失会使白云母 2200 nm 吸收强度降低,因此,温度低时,IC 值相应会变小,温度高时,IC 值较大(杨志明等,2012)。本矿区白云母 IC 值总体显示在浅部白云母-绿泥石带较低,而在深部强云英岩带内较高的特征,暗示强云英岩带形成时温度更高,外围的白云母-绿泥石形成温度更低,这与地质事实相符,即钨锡矿中云英岩化一般形成于岩浆热液流体早期高温阶段。在本次测试的强云英岩化带内,大量白云母的 IC 值>2。基于此,本文将高 IC 值(>2)作为白音乌拉矿区热液成矿中心的找矿标志。

SWIR 技术揭示的蚀变矿物分带和白云母 IC 值的分布规律表明,白音乌拉矿床是较典型的岩浆热液型钨锡铍多金属矿床,成矿流体起源于隐伏的黑云母花岗岩,成矿与含黄玉的强云英岩化蚀变有关。这些成矿特征与南岭地区与花岗岩有关的钨锡矿非常相似(蒋少涌等,2020;倪培等,2023),但矿体特征有一定差异,南岭钨矿以“五层楼”式脉状矿体为典型特征(许建祥等,2008),靠近成矿岩体部位大脉状矿体发育而远离岩体为细脉带和线脉带矿化。本矿床靠近岩体的云英岩化带内暂未发现大脉状矿体,揭露的矿体几乎均呈近直立产出的细脉。矿化特征的差异可能与成矿岩体侵位的深度较大有关,在静岩压力较大时可能很难形成大脉状矿体,而形成平行发育的密集细脉状矿化。本次研究显示,成

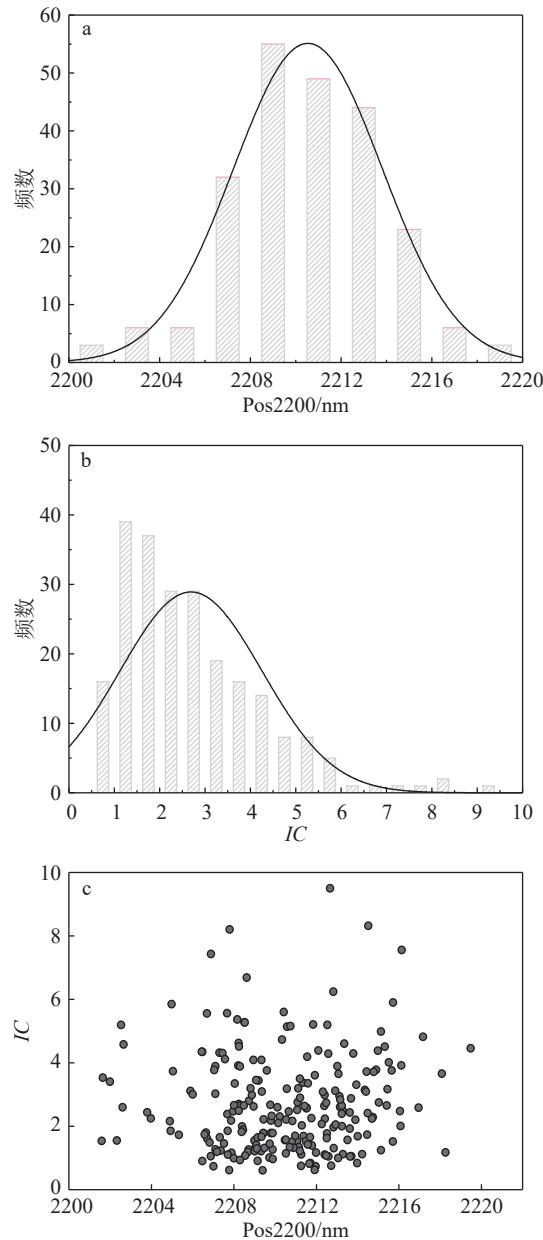


图 8 白音乌拉矿区白云母族矿物特征光谱参数 Pos2200、IC 值及 Pos2200 与 IC 相关性统计图

Fig. 8 Statistical graph of characteristic spectral parameters Pos2200, IC values and correlation between Pos2200 and IC for white mica group minerals in the Baiyinwula mining area

矿中心即位于成矿岩体上部约 300 m 范围的强云英岩化带内,成矿潜力较好,只是矿区现有的直立钻孔不利于揭示可能的矿化,下一步建议采用倾斜钻孔穿透蚀变带,能更有效地控制产状近直立的潜在矿体。

5.2 铍矿化的发现及区域找矿意义

短波红外光谱技术在快速准确识别蚀变矿物方

面优势巨大, 针对斑岩型、浅成低温热液型等热液蚀变非常发育且有一定分带的矿床开展蚀变填图可有效帮助定位热液中心, 但目前在热液型钨锡多金属矿床当中的应用还较少。研究显示, 钨锡多金属矿床普遍发育云英岩化(石英+白云母/绢云母组合), 且云英岩化过程中围岩渗透度增高和强水岩反应过程对矿质沉淀至关重要, 云英岩带也成为了重要的含矿带(Lecumberri-Sanchez et al., 2017; Launay et al., 2023)。本次研究显示, 短波红外光谱技术对云英岩带的识别非常有效, 尤其能够准确识别与石英极易混淆的标志性矿物黄玉。黄玉的出现表明成矿系统非常富F, 暗示相关的成矿岩体也具有富F且演化程度较高的特征, 这类岩浆热液成矿系统不仅有利于钨锡成矿, 更高的演化程度也有利于锂铍等成矿, 其中铍常以绿柱石为主, 赋存于以白云母-黄玉-萤石为主的云英岩带内(Barton and Yong, 2002; 李建康等, 2017; 侯占德等, 2023)。例如湖南柿竹园钨-锡-钼-铋多金属矿中的伴生铍即产于细网脉云英岩中(毛景文等, 1996)。虽然利用短波红外光谱不能直接识别绿柱石, 但可以快速准确地圈定含黄玉云英岩化带, 并提示在勘查时, 不仅要注意钨锡矿化的存在, 还需要特别注意可能存在的铍和锂矿化。正是在这一指导思想下, 本次在野外发现了粒度非常细且呈白色的绿柱石脉。总体上, 以绿柱石为主的铍矿化呈热液脉状产于花岗岩体上部约300 m范围内, 铍矿化与钨矿化在空间上密切相伴, 总体显示W-Be共生的特点; 铍矿化的矿物组合以石英-绿柱石-白云母-黄玉-萤石±电气石最典型, 其次为绿柱石-钠长石-白云母-萤石, 成矿与云英岩化密切相关。本次发现的铍矿化具有岩浆热液型矿化的特征(饶灿等, 2025)。

白音乌拉矿床钨-铍矿化的成矿岩体与紧邻矿区的北大山岩体应为同一岩体, 两者岩性和形成时代(作者未发表数据)均一致。前人研究显示, 北大山岩体黑云母花岗岩属于高钾钙碱性强过铝质、高分异I型花岗岩, 其中磷灰石和黑云母均富集F, 此外岩体氧逸度也较低(<FMQ), 表明北大山岩体具有良好的锡成矿能力(武广等, 2021; 丁磊磊等, 2022; Yang et al., 2024)。与石英脉型铍矿相关的花岗岩通常属于准铝质—过铝质、高钾钙碱性系列, 岩浆富F、B等挥发分, 且具较高的分异程度, Be与W、Sn元素性质相似, 易在富F、B等挥发分的过铝性花

岗质岩浆中聚集, 并有F⁻、Cl⁻等配体参与下, 在岩浆演化晚期进入热液体系, 在花岗质岩浆房上方合适的构造位置形成热液充填的石英脉型铍矿床(李建康等, 2017; 饶灿等, 2022)。本区铍矿化的发现表明北大山岩体不仅是区域锡成矿母岩, 还具有良好的铍成矿潜力, 因此将来在北大山岩体周边进行锡、钨等勘查时, 还要留意是否可能存在共生的铍矿化, 且利用短波红外光谱进行识别填图, 可能是这类矿床找矿勘查的有效方法。

大兴安岭南段地区是中国重要的锡银多金属成矿带(Mao et al., 2019; Zhao et al., 2019; 李真真等, 2019), 近年来在锡矿找矿方面取得了重大突破, 而且, 随着关键金属找矿勘查的兴起, 区内也陆续探明了多个锂-铍-铌-钽矿床或矿化点(陈新凯和周振华, 2023)。由于大兴安岭地区分布着大量高硅、富碱中酸性火山岩地层, 且有东山湾、重石山等火山岩型钨锡铍矿床(矿化点), 因此, 火山岩型铍矿一直被认为是本区最重要的铍矿勘查目标(李晓峰等, 2022; 饶灿等, 2022)。此外, 近年来大兴安岭南段还有其他类型的铍矿化被发现, 如那斯噶吐和台莱花铍矿化均以绿柱石为主, 呈热液脉状产于云英岩化带内, 共生矿物包括石英、白云母、萤石、锡石等, 形成时代约为140 Ma, 属于岩浆热液型铍矿化(孙艺等, 2012; 吴浩然等, 2022)。黄岗铁-锡矿中发现的铍矿化属于矽卡岩型, Be主要呈类质同象形式赋存于海蓝宝石、符山石和日光榴石中(侯晓志等, 2017), 但难以开发利用。本次研究发现的白音乌拉铍矿化属于岩浆热液型, 且与钨矿化共生, 暗示本类型的铍矿化也是区内重要的成矿类型, 应当加以重视, 本次发现也进一步证明了大兴安岭地区良好的铍成矿潜力, 对未来勘查目标、方法和方向有一定启示意义。

6 结 论

(1)根据短波红外光谱识别出的蚀变矿物共生组合, 可将白音乌拉矿区的围岩蚀变总体上分为2个带: 中深部的强云英岩化带, 矿物组合为石英-多硅白云母-黄玉-绿泥石-萤石±黑云母±电气石; 浅部及外围的白云母-绿泥石蚀变带, 矿物组合为石英-绿泥石-白云母±黑云母±电气石, 强云英岩化带代表了热液矿化中心。

(2)本矿区的白云母族矿物在靠近热液矿化中

心时 Pos2200 和白云母 IC 值均明显变高, 远离矿化中心明显变低, Pos2200 的增高可能受成矿流体成分、围岩性质、温度甚至流体 pH 值共同影响, 高 IC 值则与较高的热液温度有关, 高 IC 值(>2)可作为白音乌拉矿区勘查该类矿床的找矿标志。

(3) 短波红外光谱技术可以快速圈定与钨锡多金属成矿密切相关的含黄玉云英岩化带, 可作为本类型矿床有效的勘查手段。

(4) 白音乌拉矿床的铍矿化属于以绿柱石为主的岩浆热液型矿化, 并显示 W–Be 共生的特点, 本矿区铍矿化的发现证明大兴安岭地区铍成矿类型的多样性, 也暗示区域上良好的铍找矿潜力, 对未来勘查目标、方法和方向均有一定启示意义。

致谢: 野外工作得到防灾科技学院胡永强和孙庆达同学, 内蒙古赤峰地质矿产勘查开发有限责任公司崔秀琦、苏天津和宋志勇高级工程师, 以及内蒙古克什克腾旗银达矿业相关工作人员的大力协助; 成文过程中, 中南大学张宇教授提供了建设性意见, 在此一并表示衷心的感谢。

References

- Barton M D, Yong S. 2002. Non–pegmatitic deposits of beryllium: Mineralogy, geology, phase equilibria and origin[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 50(1): 591–691.
- Chang Z S, Hedenquist J W, White N C, et al. 2011. Exploration tools for linked porphyry and epithermal deposits: Example from the Mankayan intrusion–centered Cu–Au district, Luzon, Philippines[J]. *Economic Geology*, 106: 1365–1398.
- Chang Z S, Yang Z M. 2012. Evaluation of inter–instrument variations among Short Wavelength Infrared (SWIR) devices[J]. *Economic Geology*, 107(7): 1479–1488.
- Chen H Y, Zhang S T, Chu G B, et al. 2019. The short wave infrared (SWIR) spectral characteristics of alteration 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 Z, Zhou J B, Li G Y, et al. 2023. The nature and spatial–temporal evolution of suture zones in Northeast China[J]. *Earth–Science Reviews*, 241: 104437.
- Chen X K, Zhou Z H. 2023. Deposit types, metallogenesis and resource prospect of Li–Be–Nb–Ta deposits in the Great Xing'an Range[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 39(7): 1973–1991 (in Chinese with English abstract).
- Ding L L, Mao Q G, Wang Y W. 2022. Comparison on the Characteristics of Cassiterite–Bearing and Barren Granites in the Beidashan Region, Southern Great Xing'an Range[J]. *Earth Science*, 47(9): 3371–3388 (in Chinese with English abstract).
- Doublier M P, Roache A, Potel S. 2010. Application of SWIR spectroscopy in very low-grade metamorphic environments: A comparison with XRD methods[J]. *Geological Survey of Western Australia*, 7: 61.
- Du L H, Huang Y, Gao X, et al. 2025. Characteristics of strong reducing metallogenic porphyry and its constraints on the genesis of the rare metal–tin–polymetallic deposit in Weilasituo, Inner Mongolia[J]. *Geological Bulletin of China*, 44(4): 633–648 (in Chinese with English abstract).
- Duke E F. 1994. Near infrared spectra of muscovite, Tschermark substitution, and metamorphic reaction progress: Implications for remote sensing[J]. *Geology*, 22(7): 621–624.
- Hao J Y, Duan L A, Zhang Y, et al. 2024. Machine learning on white mica short–wave infrared (SWIR) spectral data in the Tengjia Au deposit, Jiaodong peninsula (Eastern China): A prospecting indicator for lode gold deposits[J]. *Ore Geology Reviews*, 173: 106230.
- Harraden C L, McNulty B A, Gregory M J, et al. 2013. Shortwave infrared spectral analysis of hydrothermal alteration associated with the Pebble porphyry copper–gold–molybdenum deposit, Iliamna, Alaska[J]. *Economic Geology*, 108: 483–494.
- 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[J]. *Economic Geology*, 96: 939–955.
- Hou X Z, Liu Z N, Han W, et al. 2017. The occurrence state of tin and beryllium in polymetallic ore from Huanggangliang area, Hexigten County, Inner Mongolia, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 37(6): 807–812 (in Chinese with English abstract).
- Hou Z D, Zhao Z, Liu Z J, et al. 2023. Metallogenetic regularity and prospecting direction of granite related Li–Be–Nb–Ta deposit in the Nanling region, South China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 39(7): 1950–1972 (in Chinese with English abstract).
- Hu S X, Ye Y, Fang C Q. 2004. Petrology of accounted altered rocks and its significance in finding minerals[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Jiang S Y, Zhao K D, Jiang H, et al. 2020. Spatiotemporal distribution, geological characteristics and metallogenic mechanism of tungsten and tin deposit in China: An overview[J]. *Chin Sci Bull.*, 65: 3730–3745 (in Chinese with English abstract).
- 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[J]. *Economic Geology*, 110: 925–941.
- Launay G, Branquet Y, Sizaret S, et al. 2023. How greisenization could trigger the formation of large vein–and–greisen Sn–W deposits: A numerical investigation applied to the Panasqueira deposit[J]. *Ore Geology Reviews*, 153: 105299.
- Lecumberri–Sanchez P, Vieira R, Heinrich C A, et al. 2017. Fluid–rock interaction is decisive for the formation of tungsten deposits[J]. *Geology*, 45: 579–582.
- Li J K, Zou T R, Wang D H, et al. 2017. A review of beryllium metallogenetic regularity in China[J]. *Mineral Deposits*, 36(4): 951–978 (in Chinese with English abstract).

- Li Z Z, Qin K Z, Zhao J X, et al. 2019. Basic characteristics, research progresses and prospects of Sn–Ag–base metal metallogenic system[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(7): 1979–1998 (in Chinese with English abstract).
- Li Z Z, Qin K Z, Pei B, et al. 2020. Mineralogical features of tourmaline in Baiyinchagan Sn–Ag–Pb–Zn deposit, southern Great Xing'an Range, and its implications for magmatic–hydrothermal evolution[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36(12): 3797–3812 (in Chinese with English abstract).
- Li X F, Wu F Y, Wei X L, et al. 2022. Metallogenic potential and prospecting prospect of volcanic–hosted beryllium–uranium deposit in eastern China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 38(7): 1861–1878 (in Chinese with English abstract).
- Lian Y C, Zhang G, Yuan C H, et al. 2005. Application of short–wave infrared spectrometry mineralogical measurement technology in hydrothermal alteration mineral mapping—A case study of the Toiya porphyry copper deposit[J]. *Geology in China*, 32(3): 483–495 (in Chinese with English abstract).
- Liu X, Wang J B, Zhu X Y, et al. 2017a. Mineralization process of the Baiyinchagan tin polymetallic deposit in Inner Mongolia I: Metallic mineral assemblage and metallogenic mechanism[J]. *Mineral Exploration*, 8(6): 967–980 (in Chinese with English abstract).
- Liu X, Li X G, Zhu X Y, et al. 2017b. Mineralization process of the Baiyinchagan tin polymetallic deposit in Inner Mongolia II: Chronology of ore–bearing porphyry, geochemical characteristics and geological implications of the granite porphyry[J]. *Mineral Exploration*, 8(6): 981–996 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y J, Li W M, Feng Z W, et al. 2017. A review of the Paleozoic tectonics in the eastern part of Central Asian Orogenic Belt[J]. *Gondwana Research*, 43: 123–148.
- Liu Y J, Li W M, Ma Y F, et al. 2021. An orocline in the western Central Asian orogenic belt[J]. *Earth Science Reviews*, 221: 103808.
- Mao J W, Li H Y, B Guy, et al. 1996. Geology and mineralization of Kakizhuyuan silica–dacite-type W–Sn–Mo–Bi deposits, Hunan, China[J]. *Mineral Deposits*, 15(1): 1–15 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Zhou Z H, Wu G, et al. 2013. Metallogenic regularity and minerogenetic series of ore deposits in Inner Mongolia and adjacent areas[J]. *Mineral Deposits*, 32(4): 716–730 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Ouyang H G, Song S W, et al. 2019. Geology and metallogeny of tungsten and tin deposits in China[J]. *Economic Geology*, SEG Special Publications, 22: 411–482.
- Mao X X, Peng H J, Zhang Y L, et al. 2023. Short wave infrared spectrum characteristics of sericite and its application to mineral exploration[J]. *Mineral Deposits*, 42(3): 646–659 (in Chinese with English abstract).
- Ni P, Pan J Y, Han L, et al. 2023. Large-scale granite–related tungsten and tin mineralization in South China: Temporal and spatial distribution, metallogenic models and exploration[J]. *Acta Geologica Sinica*, 97(11): 3497–3544 (in Chinese with English abstract).
- Ouyang H G, Mao J W, Zhou Z H, et al. 2015. Late Mesozoic metallogeny and intracontinental magmatism, southern Great Xing'an Range, Northeastern China[J]. *Gondwana Research*, 27(3): 1153–1172.
- Qin K Z, Zhai M G, Li G M, et al. 2017. Links of collage orogenesis of multiblocks and crust evolution to characteristic metallogenesis in China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(2): 305–325 (in Chinese with English abstract).
- Rao C, Wang R C, Che X D, et al. 2022. Metallogenic mechanism and prospect of key metal beryllium[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 38(7): 1848–1860 (in Chinese with English abstract).
- Rao C, Wang R C, Che X D, et al. 2025. Discovery of hydrothermal beryllium deposit in the Changshan area of Northwest Zhejiang Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 44(1): 33–41 (in Chinese with English abstract).
- Shao J A, Tian W, Tang K D, et al. 2018. Preliminary discussion on the role of microcontinental blocks in the evolution of the Central Asian orogenic belt: taking the Xilinhaote microcontinental block as an example[J]. *Earth Science Frontiers*, 25(4): 1–10 (in Chinese with English abstract).
- Shi G H, Liu D Y, Zhang F Q, et al. 2003. SHRIMP U–Pb zircon geochronology and its implications on the Xilin Gol complex, Inner Mongolia, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 48(24): 2742–2748.
- Shi R Z, Zhao J X, Noreen J E, et al. 2021. Temporal–spatial variations in Li–Fe mica compositions from the Weilasituo Sn–polymetallic deposit (NE China): Implications for deposit–scale fluid evolution[J]. *Ore Geology Reviews: Journal for Comprehensive Studies of Ore Genesis and Ore Exploration*, 134(1): 104132.
- Sun Y Y, Seccombe P K, Yang K. 2001. Application of short–wave infrared spectroscopy to define alteration zones associated with the Elura zinc–lead–silver deposit, NSW, Australia[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 73: 11–26.
- Sun Y, Lai Y, Shu Q H. 2012. Study on the relationship between the degree of magma crystallization and the mineralization of Be by magmatic fluids—Taking the example of Tailai granite–type Be–Ta deposits in the southern section of the Daxing'anling Mountains[J]. *Mineral Deposits*, 31(S1): 345–346 (in Chinese with English abstract).
- Tang N, Qin Z P, Li Y B, et al. 2022. Mineralogical characteristics and short–wave infrared spectra of chlorite as indicators of hydrothermal centers: A case study of the gaint porphyry copper–molybdenum deposit at Qulong, Tibet[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 96(2): 490–505.
- Wang J B, Wang Y W, Wang L J, et al. 2001. Tin–polymetallic mineralization in the southern part of the Da Hinggan Mountains, China[J]. *Resource Geology*, 51(4): 283–291.
- Wang J B, Wang Y W, Wang L J. 2005. Tin polymetallic mineralization series in the southern setion of Great Xing'an Range[J]. *Geology and Prospecting*, 41(6): 18–23 (in Chinese with English abstract).
- Wang L J, Wang J B, Wang Y W, et al. 2015. Metallogenic mechanism of fluid and prospecting forecast of Dajing Sn–Cu polymetallic deposit, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(4): 991–1001 (in Chinese with English abstract).
- Wang L, Percival J B, Hedenquist J W, et al. 2021. Alteration mineralogy of the Zhengguang epithermal Au–Zn deposit, Northeast China: Interpretation of shortwave infrared analyses during mineral exploration and assessment[J]. *Economic geology and the bulletin of the Society of Economic Geologists*, 116(2): 389–406.

- Wang L, Qin K Z, Song G X, et al. 2019. A review of intermediate sulfidation epithermal deposits and subclassification[J]. *Ore Geology Reviews*, 107: 434–456.
- Wang Q F, Deng J, Zhao H S, et al. 2019. Review on Orogenic Gold Deposits[J]. *Earth Science*, 44(6): 2155–2186(in Chinese with English abstract).
- Wang T, Zhang J J, Li S, et al. 2022. Distinctive spatial-temporal evolution of Late Paleozoic to Mesozoic magmatic systems in Northeast Asia: Evidences for identification of the extent and superposition of multiple plate tectonic regimes[J]. *Earth Science Frontiers*, 29(2): 28–44 (in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Sun D Y, Ge W C, et al. 2011. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(1): 1–30.
- Wu F Y, Guo C L, Hu F Y, et al. 2023. Petrogenesis of the highly fractionated granites and their mineralizations in Nanling Range, South China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 39(1): 1–36(in Chinese with English abstract).
- Wu G, Liu R L, Chen G Z, et al. 2021. Mineralization of the Weilasituo rare metal–tin–polymetallic ore deposit in Inner Mongolia: Insights from fractional crystallization of granitic magmas[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(3): 637–664 (in Chinese with English abstract).
- Wu H H, Huang H, Zhang Z C, et al. 2020. Geochronology, geochemistry, mineralogy and metallogenetic implications of the Zhaojinggou Nb–Ta deposit in the northern margin of the North China Craton, China[J]. *Ore Geology Review*, 125: 103692.
- Wu H R, Yang H, Ge W C, et al. 2022. Formation age and genesis of the Nasigatu greisen-type beryllium mineralization in the southern Great Xing'an Range: Monazite chronological and geochemical evidence[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 38(7): 1915–1936 (in Chinese with English abstract).
- Xu C, Chen H Y, Noel W, et al. 2017. Alteration and mineralization of Xinan Cu–Mo ore deposit in Zijinshan orefield, Fujian Province, and application of short wavelength infra-red technology (SWIR) to exploration[J]. *Mineral Deposits*, 36(5): 1013–1038 (in Chinese with English abstract).
- Xu J X, Zeng Z L, Wang D H, et al. 2008. New type of tungsten ore in Gannan and the “five-story + basement” mineral search model[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(7): 880–887 (in Chinese with English abstract).
- Yang F, Wu G, Chen G Z, et al. 2024. Petrogenesis and implications for tin mineralization of the Beidashan granitic pluton, southern Great Xing'an Range, NE China: Constraints from whole-rock and accessory mineral geochemistry[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 259: 105883.
- Yang K, Lian C, Huntington J F, et al. 2005. Infra red spectral reflectance characterization of the hydrothermal alteration at the Tuwu Cu–Au deposit Xinjiang China[J]. *Mineralium Deposita*, 40: 324–336.
- Yang S Y, Jiang S Y, Zhao K D, et al. 2015. Tourmaline as a recorder of magmatic–hydrothermal evolution: An in situ major and trace element analysis of tourmaline from the Qitianling batholith, South China[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 170(5/6): 42.
- 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[J]. *Mineral Deposits*, 31(4): 699–717 (in Chinese with English abstract).
- Yao L, Lü Z C, Ye T Z, et al. Zircon U–Pb age, geochemical and Nd–Hf isotopic characteristics of quartz porphyry in the Baiyinchagan Sn polymetallic deposit, Inner Mongolia, southern Great Xing'an Range, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(10): 3183–3199 (in Chinese with English abstract).
- Yao L, Lü Z C, Ye T Z, et al. 2021. Geological and Sr–Nd–S–Pb isotopic constraints on the genesis of the Baiyinchagan tin polymetallic deposit, southern Great Xing'an Range, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(6): 1731–1748 (in Chinese with English abstract).
- Zhai D G, Williams-Jones A E, Liu J J, et al. 2020. The Genesis of the Giant Shuangjianzishan Epithermal Ag–Pb–Zn Deposit, Inner Mongolia, Northeastern China[J]. *Economic Geology*, 115(1): 101–128.
- 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[J]. *Mineral Deposits*, 36(6): 1263–1288 (in Chinese with English abstract).
- Zhang X H, Yuan L L, Xue F H, et al. 2015. Early Permian A-type granites from central Inner Mongolia, North China: Magmatic tracer of post-collisional tectonics and oceanic crustal recycling[J]. *Gondwana Research*, 28(1): 311–327.
- Zhao C, Qin K Z, Song G X, et al. 2019. Early Palaeozoic high–Mg basalt–andesite suite in the Duobaoshan porphyry Cu deposit NE China: Constraints on petrogenesis, mineralization, and tectonic setting[J]. *Gondwana Research*, 71: 91–116.
- Zhao H T, Zhang Y, Xu Y B, et al. 2024. Machine learning model for deep exploration: Utilizing short wavelength infrared (SWIR) of hydrothermal alteration minerals in the Qianchen gold deposit, Jiadong Peninsula, Eastern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 168: 106060.
- Zhao L X, Dai J J, Lin B, et al. 2023. Short-wave–thermal infrared spectra characteristics of altered minerals from the Jiamu 3000m deep borehole in Tibet[J]. *Acta Geologica Sinica*, 97(4): 1342–1359 (in Chinese with English abstract).
- Zheng S L, Wu S, Zheng Y Y, et al. 2022. Identifying potential porphyry copper mineralization at the Zhu’nuo ore–cluster district in western Gangdese, southern Tibet: Insights from shortwave infrared (SWIR) spectrometry and geochemical anomalies[J]. *Ore Geology Reviews*, 151: 105202.
- Zhou Y, Chen S Z, Li L M, et al. 2023. Mapping hydrothermal alteration of the Au–Cu deposits in the Zhenghe magmatic–hydrothermal mineralization system, SE China, using short wavelength infrared (SWIR) reflectance spectroscopy[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 244: 107113.
- Zhou Z H, Chen Z. 2023. Assembly processes in the eastern Northern Orogenic Belt and implications for the spatiotemporal transition of major tectonic domains in Northeast Asia[J]. *Science China Earth Sciences*, 66(11): 2648–2652 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Z H, Mao J W. 2022. Metallogenetic patterns and ore deposit model of the tin polymetallic deposits in the southern segment of Great Xing'an Range[J]. *Earth Science Frontiers*, 29(1): 176–199 (in Chinese with English abstract).

English abstract).

Zhu X Y, Zhang Z H, Fu X, et al. 2016. Geological and geochemical characteristics of the Weilasituo Sn-Zn deposit, Inner Mongolia[J]. Geology in China, 43(1): 188–208 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈华勇, 张世涛, 初高彬, 等. 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.
- 陈新凯, 周振华. 2023. 大兴安岭锂-铍-铌-钽等关键金属矿床类型、成矿规律与资源展望[J]. *岩石学报*, 39(7): 1973–1991.
- 丁磊磊, 毛启贵, 王玉往, 等. 2022. 大兴安岭南段北大山含锡石与不含锡石花岗岩特征对比[J]. *地球科学*, 47(9): 3371–3388.
- 杜立华, 黄宇, 高雄, 等. 2025. 内蒙古维拉斯托稀有金属-锡多金属矿床强还原性成矿斑岩特征及其对矿床成因的约束[J]. *地质通报*, 44(4): 633–648.
- 侯晓志, 刘占宁, 韩炜, 等. 2017. 内蒙古克什克腾旗黄岗梁多金属矿锡、铍的赋存状态[J]. *矿物学报*, 37(6): 807–812.
- 侯占德, 赵正, 柳振江, 等. 2023. 南岭花岗岩区锂铍铌钽成矿规律与找矿方向[J]. *岩石学报*, 39(7): 1950–1972.
- 胡受奚, 叶瑛, 方长泉. 2004. 交代蚀变岩岩石学及其找矿意义[M]. 北京: 地质出版社.
- 蒋少涌, 赵葵东, 姜海, 等. 2020. 中国钨锡矿床时空分布规律、地质特征与成矿机制研究进展[J]. *科学通报*, 65(33): 3730–3745.
- 李建康, 邹天人, 王登红, 等. 2017. 中国铍矿成矿规律[J]. *矿床地质*, 36(4): 951–978.
- 李真真, 秦克章, 赵俊兴, 等. 2019. 锡-银多金属成矿系统的基本特征、研究进展与展望[J]. *岩石学报*, 35(7): 1979–1998.
- 李真真, 秦克章, 裴斌, 等. 2020. 大兴安岭南段白音查干Sn-Ag-Zn-Pb矿床电气石矿物学特征及对岩浆-热液演化过程的启示[J]. *岩石学报*, 36(12): 3797–3812.
- 李晓峰, 吴福元, 韦星林, 等. 2022. 中国东部火山岩型铍铀矿床成矿潜力与找矿远景[J]. *岩石学报*, 38(7): 1861–1878.
- 连长云, 章革, 元春华, 等. 2005. 短波红外光谱矿物测量技术在热液蚀变矿物填图中的应用——以土屋斑岩铜矿床为例[J]. *中国地质*, 32(3): 483–495.
- 刘新, 李学刚, 祝新友, 等. 2017a. 内蒙古白音查干锡多金属矿床成矿作用研究Ⅱ: 成矿花岗斑岩年代学、地球化学特征及地质意义[J]. *矿产勘查*, 8(6): 981–996.
- 刘新, 王京彬, 祝新友, 等. 2017b. 内蒙古白音查干锡多金属矿床成矿作用研究Ⅰ: 金属矿物组合及其成因机制[J]. *矿产勘查*, 8(6): 967–980.
- 毛景文, 李红艳, Guy B, 等. 1996. 湖南柿竹园矽卡岩-云英岩型W-Sn-Mo-Bi矿床地质和成矿作用[J]. *矿床地质*, 15(1): 1–15.
- 毛景文, 周振华, 武广, 等. 2013. 内蒙古及邻区矿床成矿规律与成矿系列[J]. *矿床地质*, 32(4): 716–730.
- 毛星星, 彭惠娟, 张云龙, 等. 2023. 绢云母短波红外光谱特征及其在矿产勘查中的应用[J]. *矿床地质*, 42(3): 646–659.
- 倪培, 潘君屹, 韩亮, 等. 2023. 华南与花岗岩有关大规模钨锡成矿作用的时空分布、成矿模式及找矿方向[J]. *地质学报*, 97(11): 3497–3544.
- 秦克章, 翟明国, 李光明, 等. 2017. 中国陆壳演化、多块体拼合造山与特色成矿的关系[J]. *岩石学报*, 33(2): 305–325.
- 饶灿, 王汝成, 车旭东, 等. 2022. 关键金属铍的成矿机制与找矿前景[J]. *岩石学报*, 38(7): 1848–1860.
- 饶灿, 王汝成, 车旭东, 等. 2025. 浙西北常山地区新发现热液型铍矿[J]. *地质通报*, 44(1): 33–41.
- 邵济安, 田伟, 唐克东, 等. 2018. 初论微陆块在中亚造山带演化中的作用: 以锡林浩特微陆块为例[J]. *地学前缘*, 25(4): 1–10.
- 孙艺, 赖勇, 舒启海. 2012. 岩浆结晶程度与岩浆流体Be成矿关系研究——以大兴安岭南段台来花花岗岩型Be-Ta矿床为例[J]. *矿床地质*, 31(S1): 345–346.
- 王京彬, 王玉往, 王莉娟. 2005. 大兴安岭南段锡多金属成矿系列[J]. *地质与勘探*, (6): 18–23.
- 王莉娟, 王京彬, 王玉往, 等. 2015. 内蒙古大井锡铜多金属矿床流体成矿机理及外围找矿预测[J]. *岩石学报*, 31(4): 991–1001.
- 王庆飞, 邓军, 赵鹤森, 等. 2019. 造山型金矿研究进展: 兼论中国造山型金成矿作用[J]. *地球科学*, 44(6): 2155–2186.
- 王涛, 张建军, 李舢, 等. 2022. 东北亚晚古生代—中生代岩浆时空演化: 多重板块构造体制范围及叠合的鉴别证据[J]. *地学前缘*, 29(2): 28–44.
- 武广, 刘瑞麟, 陈公正, 等. 2021. 内蒙古维拉斯托稀有金属-锡多金属矿床的成矿作用: 来自花岗质岩浆结晶分异的启示[J]. *岩石学报*, 37(3): 637–664.
- 吴福元, 郭春丽, 胡方泱, 等. 2023. 南岭高分异花岗岩成岩与成矿[J]. *岩石学报*, 39(1): 1–36.
- 吴浩然, 杨浩, 葛文春, 等. 2022. 大兴安岭南段那斯嘎吐云英岩型铍矿化的形成时代和成因探讨: 独居石年代学和地球化学证据[J]. *岩石学报*, 38(7): 1915–1936.
- 许建祥, 曾载淋, 王登红, 等. 2008. 赣南钨矿新类型及“五层楼+地下室”找矿模型[J]. *地质学报*, 82(7): 880–887.
- 许超, 陈华勇, Noel W, 等. 2017. 福建紫金山矿田西南铜钼矿段蚀变矿化特征及SWIR勘查应用研究[J]. *矿床地质*, 36(5): 1013–1038.
- 杨志明, 侯增谦, 杨竹森, 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[J]. *矿床地质*, 31(4): 699–717.
- 姚磊, 吕志成, 叶天竺, 等. 2017. 大兴安岭南段内蒙古白音查干Sn多金属矿床石英斑岩的锆石U-Pb年龄、地球化学和Nd-Hf同位素特征及地质意义[J]. *岩石学报*, 33(10): 3183–3199.
- 姚磊, 吕志成, 叶天竺, 等. 2021. 大兴安岭南段白音查干Sn多金属矿床成因: 矿床地质特征及Sr-Nd、S、Pb同位素证据[J]. *岩石学报*, 37(6): 1731–1748.
- 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[J]. *矿床地质*, 36(6): 1263–1288.
- 赵龙贤, 代晶晶, 林彬, 等. 2023. 西藏甲玛3000m深钻蚀变矿物短波-热红外光谱特征[J]. *地质学报*, 97(4): 1342–1359.
- 周振华, 毛景文. 2022. 大兴安岭南段锡多金属矿床成矿规律与矿床模型[J]. *地学前缘*, 29(1): 176–199.
- 周建波, 陈卓. 2023. 北方造山带东段聚合过程及其对东北亚三大构造域时空转换的启示[J]. *中国科学: 地球科学*, 53(11): 2682–2686.
- 祝新友, 张志辉, 付旭, 等. 2016. 内蒙古赤峰维拉斯托大型锡多金属矿的地质地球化学特征[J]. *中国地质*, 43(1): 188–208.