

doi: 10.12097/gbc.2023.02.042

张博辉, 曹会, 刘翼飞, 王丰翔. 2025. 大兴安岭南段矽卡岩型铁锡矿成矿花岗岩年龄、岩石地球化学及其 U-Nb-Ta-REE 成矿远景讨论[J]. 地质通报, 44(6): 1106–1131.

Zhang Bohui, Cao Hui, Liu Yifei, Wang Fengxiang. 2025. Age and petrogeochemistry of ore-forming granites, and the metallogenic prospects of U-Nb-Ta-REE in the southern section of the Daxing'anling Mountains for skarn-type iron-tin deposits[J]. Geological Bulletin of China, 44(6): 1106–1131(in Chinese with English abstract).

大兴安岭南段矽卡岩型铁锡矿成矿花岗岩年龄、岩石地球化学及其 U-Nb-Ta-REE 成矿远景讨论

张博辉^{1,2}, 曹会³, 刘翼飞^{1*}, 王丰翔⁴

(1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 3. 阿拉善左旗珠拉黄金开发有限责任公司, 内蒙古自治区阿拉善盟阿拉善左旗 750306; 4. 河北地质大学区域地质与成矿作用重点实验室, 河北 石家庄 050031)

摘要:【研究目的】大兴安岭南段是中国北方重要的锡多金属成矿带, 黄岗和莫古吐矽卡岩型铁锡矿床是其中典型代表, 其成因与高分异的碱长花岗岩或正长花岗岩有直接的时空和成因联系, 花岗岩的岩石地球化学特征及其对找矿的意义还有待进一步研究。【研究方法】通过锆石 U-Pb 定年、全岩主量、微量和稀土元素测试和矿物学研究, 探讨成矿花岗岩的特征和对找矿的启示。【研究结果】矿物学研究发现, 成矿花岗岩样品中钠质斜长石、碱性长石、石英具有低温共结熔体结晶的特点, 且镜下可见文象结构和蠕虫状石英。锆石 U-Pb 年龄显示, 黄岗矿床碱长花岗岩结晶年龄 131.8 ± 2.0 Ma(MSWD=1.3), 大莫古吐矿床碱长花岗岩结晶年龄为 137.1 ± 1.3 Ma(MSWD=0.8), 均侵位于早白垩世。全岩主量元素显示花岗岩具有高硅(73.97%~79.05%)、高碱(7.83%~8.88%), 低钙、铁、镁、钛和磷的特征, 为准铝质—弱过铝质($A/CNK=0.93\sim 1.09$)高分异花岗岩。全岩微量和稀土元素显示, 花岗岩具有高 Rb、Th、Pb, 低 Ba、Sr、P、Ti 的特征, 稀土元素配分曲线较平坦($La_N/Yb_N=0.96\sim 12.04$), 具有强烈的负 Eu 异常($Eu/Eu^*=0.01\sim 0.03$)及弱的负 Ce 到正 Ce 异常的过渡特点($Ce/Ce^*=0.96\sim 1.56$), 微量元素配分图具有弱的四分组效应($TE_{1,3}=0.99\sim 1.14$)。成矿花岗岩中, 随着分异程度的增加, Th、U、Nb、Ta、Yb 元素富集。【结论】大兴安岭南段黄岗和莫古吐矽卡岩型铁锡矿床成矿花岗岩为早白垩世高硅高分异花岗岩, 其形成过程对 U、Sn、Nb、REE 等成矿元素具有显著的富集作用。本次年代学、矿物学和地球化学的研究结合区内地质、地球物理勘探、地球化学勘探、遥感研究进展显示, 大兴安岭南段燕山晚期分异花岗岩分布区域除具有 Sn-Pb-Zn-Ag 多金属成矿潜力外, 还具有 U-Nb-Ta-REE 的找矿潜力。

关键词: 高分异花岗岩; 大兴安岭南段; 矽卡岩型铁锡矿; 早白垩世; U-Nb-Ta-REE 找矿远景; 矿产勘查工程

创新点: 大兴安岭南段高度分异的花岗岩演化程度越高越有利于 Sn、U、Nb、Ta、REE 元素的富集成矿。

中图分类号: P59; P612; P618.44 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2025)06-1106-26

Age and petrogeochemistry of ore-forming granites, and the metallogenic prospects of U-Nb-Ta-REE in the southern section of the Daxing'anling Mountains for skarn-type iron-tin deposits

ZHANG Bohui^{1,2}, CAO Hui³, LIU Yifei^{1*}, WANG Fengxiang⁴

收稿日期: 2023-02-20; 修订日期: 2023-06-03

资助项目: 国家重点研发计划项目课题《全球战略性矿产大数据平台和预警与决策支持技术》(编号: 2021YFC2901801)、中国地质调查局项目《全球矿产资源储量动态评估》(编号: DD20221795)、中国地质调查局项目课题《大兴安岭赤峰地区铍等多金属矿调查评价》(编号: DD20221684-6)和国家自然科学基金面上项目《大兴安岭中南段高度演化的花岗岩与大规模成矿》(批准号: 41873051)联合资助

作者简介: 张博辉(1998-), 男, 在读硕士生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail: zhbbohui1030@163.com

*** 通信作者:** 刘翼飞(1981-), 男, 博士, 研究员, 从事矿床地质和矿床地球化学研究工作。E-mail: lyfsky@126.com

(1. *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*; 2. *China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China*; 3. *Inner Mongolia Xijin Mining Co., Ltd., Alxa Zuoqi, Alxa League, Autonomous Region 750306, Inner Mongolia, China*; 4. *Key Laboratory of Regional Geology and Metallogenesis, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, Hebei, China*)

Abstract: [Objective] The southern segment of the Daxing'anling Range constitutes a significant tin-polymetallic metallogenic belt in northern China. Representative deposits include the Huanggang and Mogutu skarn-type Fe-Sn systems, which exhibit direct spatio-temporal and genetic relationships with highly fractionated alkali-feldspar granites or syenogranites. Further investigation is warranted regarding petrogeochemical characteristics of these granites and their implications for mineral exploration. **[Methods]** This study explores the characteristics of the ore-forming granites and their implications for ore prospecting through zircon U-Pb dating, whole-rock major, trace and rare earth element testing, and mineralogical studies. **[Results]** The weighted average U-Pb ages obtained from zircon dating are 131.8 ± 2.0 Ma (MSWD=1.3) and 137.1 ± 1.3 Ma (MSWD=0.8), indicating that the emplacement of alkali feldspar granite in the Huanggang and Damogutu deposits occurred during the Early Cretaceous. The main elements of the whole rock show that the granite has the characteristics of high silicon (73.97%~79.05%), high alkali (7.83%~8.88%), low calcium, iron, magnesium, titanium and phosphorus, and is a metaluminous to weak peraluminous ($A/CNK=0.93\sim1.09$) highly differentiated granite. The trace and rare earth elements in the whole rock show that the granite is characterized by high Rb, Th and Pb, and low Ba, Sr, P and Ti. The rare earth element distribution map is relatively flat ($La_N/Yb_N=0.96\sim12.04$), with strong negative Eu anomaly ($Eu/Eu^*=0.01\sim0.03$) and weak negative Ce to positive Ce anomaly transition feature ($Ce/Ce^*=0.96\sim1.56$), and the trace element distribution map has weak tetrad effect ($TE_{1,3}=0.99\sim1.14$). In the ore-forming granites, elements such as Th, U, Nb, Ta and Yb are enriched with the increase of the degree of differentiation. **[Conclusions]** The metallogenic granites of the Huanggang and Mogutu skarn-type Fe-Sn deposits in the Southern Section of the Daxing'anling Mountains are Early Cretaceous high-silica highly fractionated granites, whose formation process has a significant enrichment effect on ore-forming elements such as U, Sn, Nb and REE. Combined with the research progress of regional geology, geophysical exploration, geochemical exploration and remote sensing, this study of chronology, mineralogy and geochemistry shows that the areas with Late Yanshanian differentiated granites in the Southern Section of the Daxing'anling Mountains not only have metallogenic potential for Sn-Pb-Zn-Ag polymetals, but also have prospecting potential for U-Nb-Ta-REE.

Key words: highly differentiated granite; southern section of the Daxing'anling Mountains; skarn iron-tin deposit; Early Cretaceous; prospecting potential of U-Nb-Ta-REE; mineral exploration engineering

Highlights: In the southern section of the Daxing'anling Mountains, the higher the degree of magmatic evolution in highly differentiated granites, the more conducive it is to the enrichment and mineralization of Sn, U, Nb, Ta, and REE (rare earth elements).

About the first author: ZHANG Bohui, male, born in 1998, master student, majoring in mineralogy, petrology and mineral deposits; E-mail: zbhbohui1030@163.com

About the corresponding author: LIU Yifei, male, born in 1981, Ph.D., professor, engaged in the research of ore deposit geology and ore deposit geochemistry; E-mail: lyfsky@126.com

Fund support: Supported by National Key R&D Program of China (No. 2021YFC2901801), China Geological Survey Projects (Nos. DD20221795, DD20221684-6), and National Natural Science Foundation of China (No.41873051)

大兴安岭南段位于中亚造山带东段, 地处古亚洲成矿域和滨西太平洋成矿域的交汇部位, 古生代—中生代的构造运动和岩浆活动频繁, 成矿条件优越, 是中国北方重要的锡、银、铜、铅锌多金属矿产地(毛景文等, 2013; 江思宏等, 2018)。目前已发现矿床的类型以岩浆热液脉型、矽卡岩型、斑岩型、次火山热液型为主, 岩浆热液脉型代表性矿床如维拉斯托(郑翻身等, 2006; 刘翼飞等, 2014)、白音查干(聂凤军等, 2007; 姚磊等, 2017)、毛登(刘玉强, 1996a,

b; 季根源等, 2021a, b, 2022)、大井(黄世乾等, 1986; 江思宏等, 2012), 矽卡岩型代表性矿床如黄岗(王莉娟等, 2001, 2002)、莫古吐(Yang et al., 2019; 杨朝磊等, 2019)、白音诺(张德全等, 1992)、浩布高(白大明等, 1996; 徐巧等, 2020), 斑岩型代表性矿床如边家大院(Zhai et al., 2018)、敖仑花(马星华等, 2009), 次火山热液型代表矿床如甲乌拉(潘龙驹等, 1992; 余宏全等, 2009)、查干布拉根(解成波等, 2001)。部分矿床具有大规模的锡矿化, 如白音查干、维拉斯托和

黄岗矿床,构成了中国北方重要的锡多金属矿区,其中区内黄岗和莫古吐铁锡矿床及它们的延伸矿脉,位于大兴安岭南段黄岗梁-甘珠尔庙锡多金属成矿带西南端。二者为与高分异花岗岩有关的矽卡岩型铁锡矿床,因此,高分异花岗岩的演化与矿化在成因上具有紧密的时空和成因联系,为研究高分异花岗岩与锡多金属矿化提供了良好的条件。

前人对黄岗和莫古吐铁锡矿床开展了大量工作,主要集中于以下几个方面:①矿床类型,矿体产于外接触带一侧,矿石类型以团块状、层纹状矽卡岩矿石为主,矿石结构分为自形粒状结构、半自形粒状结构及半自形—它形粒状结构,次为交代残余结构、假象结构,构造以块状构造、浸染状构造及条带状构造为主,显示出矽卡岩型矿床的典型特征(王长明等, 2007; Mei et al., 2015; 杨朝磊等, 2019);②成矿花岗岩和矿体年代学,研究显示矿床形成于早白垩世(周振华等, 2010; Zhou et al., 2012);③成矿花岗岩元素地球化学和同位素地球化学,研究显示花岗岩成因为幔源岩浆底侵使下地壳部分熔融(王莉娟等, 2002; Zhai et al., 2014);④成矿地质背景,研究认为处于伸展环境下(杨奇荻等, 2014);⑤成矿物质来源,研究认为 Sn 元素主要来源于岩浆, Fe 元素主要来源于地层(叶杰等, 2002; Zhai et al., 2014; Yang et al., 2019; 杨朝磊等, 2019; 李欢等, 2023)。本次主要对特殊的矽卡岩型铁锡矿成矿花岗岩进行研究,通过主量、微量、稀土元素和成矿元素特征分析,探究成岩特征和规律及对成矿作用的制约,进一步完善大兴安岭南段锡多金属成矿带的成岩成矿研究工作。

1 区域地质背景

研究区位于大兴安岭南段晚古生代增生造山带中,大兴安岭南段处于中亚造山带东段的兴蒙造山带上(图 1-a)。兴蒙造山带构造演化复杂,构造演化受古亚洲洋、蒙古-鄂霍茨克洋和古太平洋构造体系的叠加作用,在古亚洲洋和蒙古-鄂霍茨克洋的形成、俯冲、闭合过程中,又伴随多个微地块的碰撞、拼贴过程,发生过复杂的构造运动、岩浆活动和沉积过程。在早白垩世,受蒙古-鄂霍茨克洋和古太平洋构造体系的叠加作用,大兴安岭南段处于构造-岩浆作用鼎盛期,在继承、改造和利用古亚洲洋构造-岩浆格局的基础上,产生了一系列北东走向、东西

相间排列的断陷-火山喷发岩带和断隆-岩浆侵入岩带(图 1-b),强烈的构造-岩浆活动是该矿集区形成的重要原因(徐备等, 1997, 2014; 李锦轶等, 2009; 刘永江等, 2010; 许文良等, 2019)。

区域上出露地层主要有白垩系梅勒图组、白音高老组,侏罗系玛尼吐组、满克头鄂博组和新民组,二叠系林西组、哲斯组和大石寨组,石炭系阿木山组和本巴图组,以及锡林郭勒杂岩。锡林郭勒杂岩为区域内出露的最老岩石,由黑云斜长片麻岩、角闪斜长片麻岩、斜长角闪片岩及变粒岩夹透镜状或脉状斜长角闪岩组成。石炭系包括阿木山组和本巴图组,岩性以灰岩、粉砂岩、砂岩、板岩为主。下二叠统大石寨组岩性主要为安山岩和细碧岩;中二叠统哲斯组岩性为变质粉砂岩、钙质砂岩、大理岩、硅质岩和粉砂质板岩;上二叠统林西组岩性为粉砂岩和板岩。侏罗系玛尼吐组岩性为安山岩和火山碎屑岩;满克头鄂博组岩性为晶屑凝灰岩和凝灰质角砾岩;中侏罗统新民组岩性为粉砂岩、细砂岩和砂砾岩;白垩系梅勒图组岩性为安山岩、玄武质安山岩和火山碎屑岩;白音高老组上、下段,下段岩性主要为含角砾火山熔结凝灰岩,伴有少量流纹岩、球粒流纹岩,上段岩性为含砾晶屑凝灰岩、玄武岩、安山岩和英安岩。

区域上侵入岩包括二叠纪花岗岩类和侏罗纪—白垩纪高硅花岗岩(图 1-a),其中以侏罗纪—白垩纪高硅花岗岩为主。侏罗纪—白垩纪高硅花岗岩分布广泛,形成大量的复式岩体,常被同时代的流纹岩覆盖,岩性以黑云母二长花岗岩、黑云母碱长花岗岩和黑云母正长花岗岩斑岩等为主。

2 矿区和矿床地质

2.1 黄岗铁锡矿

黄岗铁锡矿矿区出露地层主要为下二叠统大石寨组、黄岗梁组和青凤山组,还有上二叠统、中侏罗统和上侏罗统。其主要岩性为凝灰质粉砂岩夹安山岩及大理岩。侵入岩以燕山期花岗岩岩株为主,其次有少量华力西期中—基性岩类。黄岗铁锡矿体直接产于燕山期似斑状钾长花岗岩与下二叠统大石寨组安山岩、凝灰岩和黄岗梁组大理岩、钙质砂页岩接触带的矽卡岩中。矿区矽卡岩带断续长 19 km,宽 0.2~1.5 km,呈北东向展布(图 2)。矽卡岩在纵向上分带不明显,横向由近矿到远矿依次为石

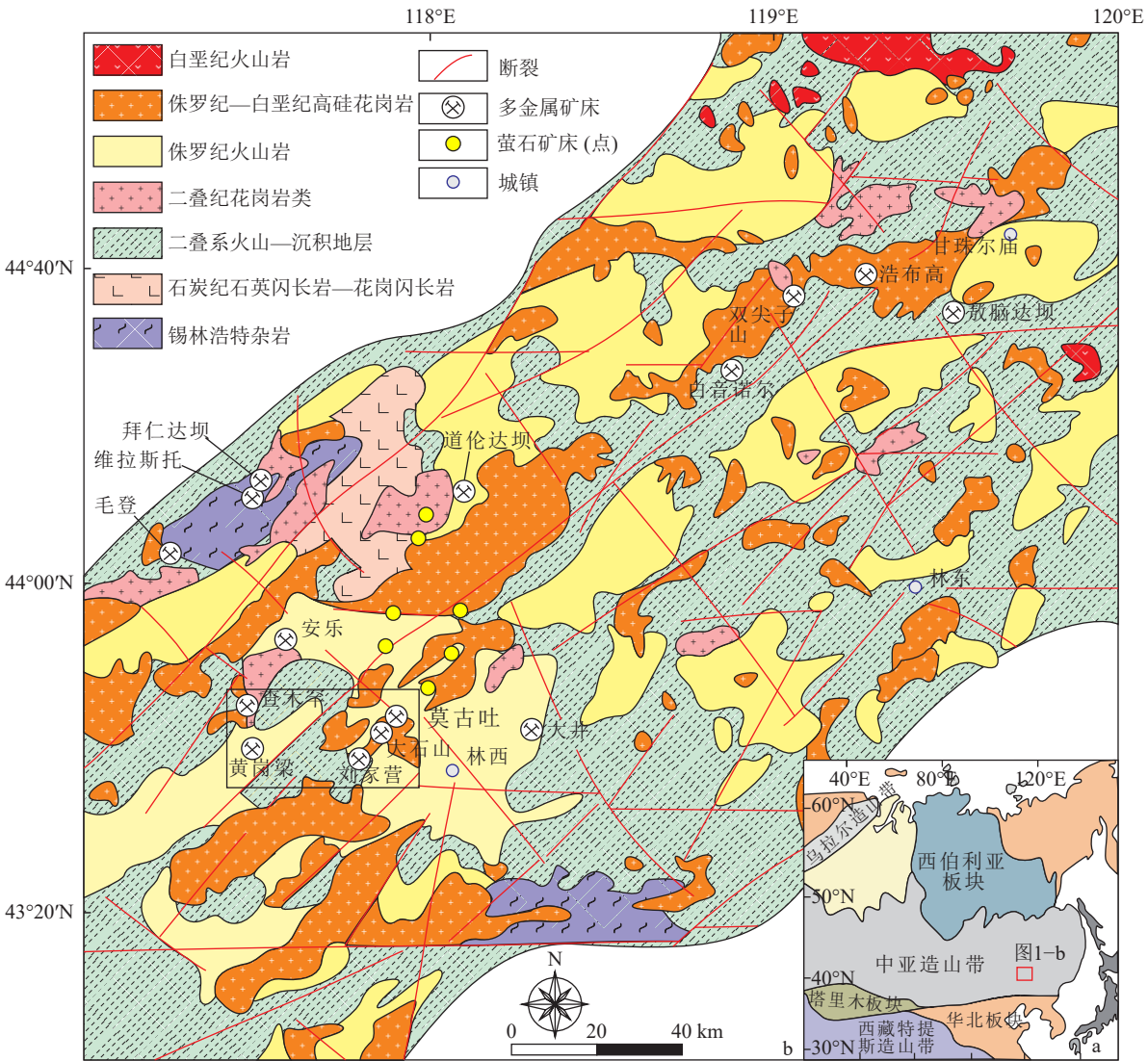


图 1 研究区大地构造背景(a)和大兴安岭南段地质图(b)(据 Liu, et al., 2016 修改)

Fig. 1 Tectonic background (a) and geological (b) maps of the southern section in the Daxing'anling Mountains

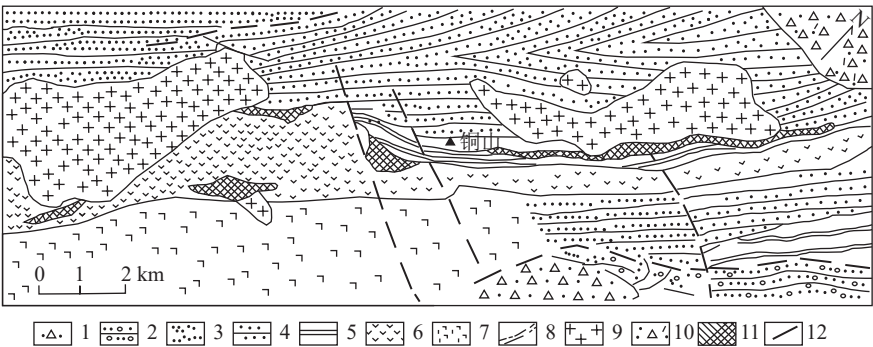


图 2 黄岗矿区地质简图(据王莉娟等, 2001 修改)

Fig. 2 Geological sketch map of Huanggang mine area

1—上侏罗统凝灰角砾岩; 2—中侏罗统砂砾岩; 3—林西组砂板岩; 4—黄岗梁组凝灰质粉砂岩; 5—黄岗梁组大理岩; 6—大石寨组安山岩; 7—大石寨组细碧岩; 8—青凤山组板岩; 9—正长(碱长)花岗岩; 10—英安斑岩; 11—含矿砂卡岩; 12—断层

榴子石矽卡岩-辉石榴子石矽卡岩-石榴子石辉石矽卡岩和辉石矽卡岩。矽卡岩带中矿体分为 7 个矿段,已知矿体有 110 个,大者长 1475 m,厚数十米;小者长 10 m,厚仅几米,主要呈似层状、透镜状产于矽卡岩和矽卡岩化安山岩中。隐伏岩体顶面凸凹处常是铁锡矿体富集部位,而凹槽的局部隆起处,往往有锌、铜硫化物聚集。该矿床矿物成分较复杂,已发现 40 多种矿物,矿石构造以浸染状为主,此外为致密块状。金属矿物以磁铁矿、锡石、闪锌矿、黄铜矿、毒砂为主,辉铜矿、斑铜矿、辉钼矿、方铅矿次之。非金属矿物以石榴子石、透辉石为主,角闪石、云母、绿泥石、绿帘石、石英、萤石、方解石次之。锡石是锡的主要载体矿物,主要出现在湿矽卡岩和高温热液阶段。磁铁矿主要产于矽卡岩中,局部富集成工业矿体,在其他火山岩围岩中呈微细粒浸染状分布。

2.2 莫古吐铁锡矿

莫古吐(或称大莫古吐)铁锡矿矿区出露的地层除第四系残坡积层外,主要为中二叠统哲斯组,岩性

以钙质砂岩为主,是矿床的主要赋矿围岩。岩层总体走向 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$,倾向南东,倾角 $40^{\circ}\sim 80^{\circ}$,为单斜岩层,地层最深处距地表 100 m,最浅处 20 m,呈残留体覆盖在莫古吐岩体之上。矿区内出露的侵入岩主要为燕山期花岗岩,岩性以黑云母正长花岗岩为主,岩石呈浅肉红色、灰白色,中细粒花岗结构,块状构造,矿物成分为正长石、斜长石、石英及少量黑云母,副矿物则以锆石、钛铁矿等为主,岩石中发育晶洞构造及伟晶结构,晶洞内可见萤石、电气石等矿物,显示岩浆具有高 F、高 B、水饱和的特征。矿区内褶皱构造为褶皱的一翼,走向 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$,倾向南东,倾角 70° ,由哲斯组钙质砂岩组成。断裂构造以北东向为主,与岩层产状一致,属于层间断裂,延长 500 m 左右,宽 0.5~5.7 m,南西端走向 10° ,向北东延长逐渐转向 50° 左右,出露于矿体下盘,矿体与矽卡岩受其控制,活动频繁,成矿后仍有活动,局部矿体被压碎,为压扭性质。矿区内共发现 1 条铁锡矿体,主要赋存在外接触带内,受断裂构造控制明显,呈北东向展布(图 3)。

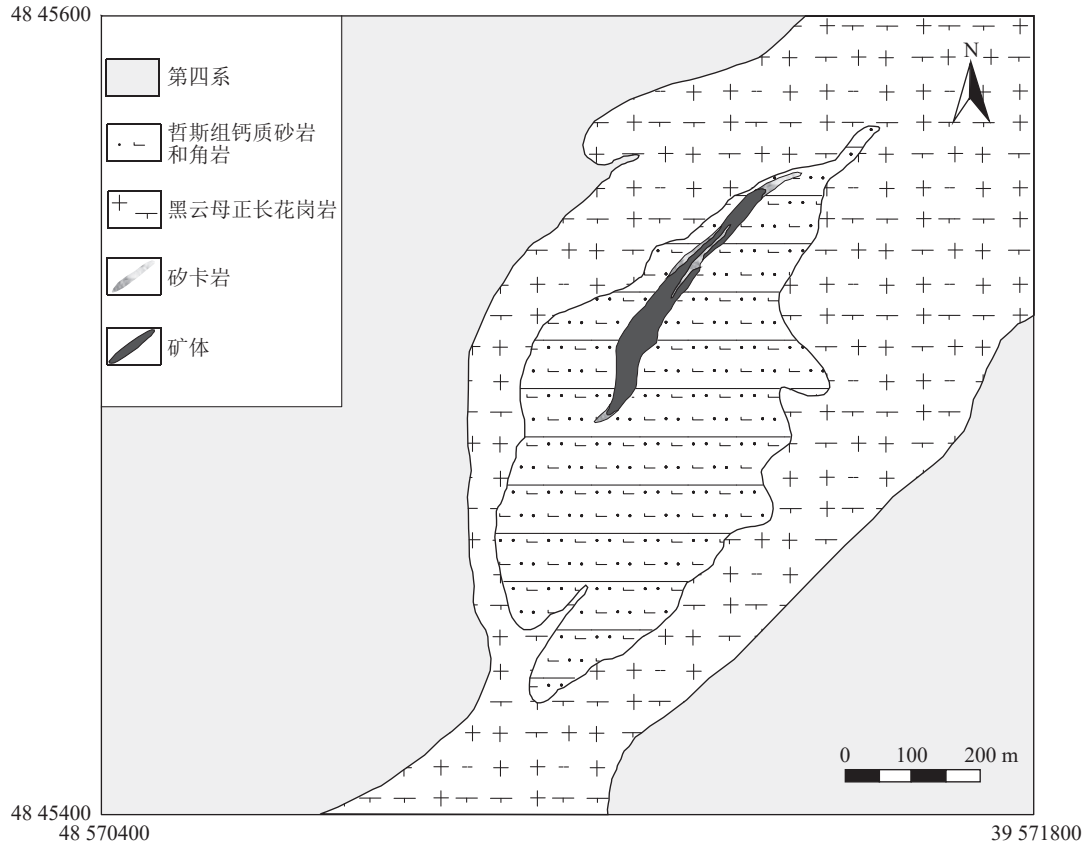


图 3 莫古吐矿区地质简图(据杨朝磊等,2019 修改)

Fig. 3 Geological sketch map of Mogutu mine area

3 样品采集与矿物学研究

3.1 样品采集

黄岗和莫古吐铁锡矿成矿花岗岩的野外产出整体为北东走向, 呈岩株状产出。本次研究共采集样品 20 件, 样品较新鲜, 部分样品具有轻微的蚀变。其中 5 件样品产自黄岗铁锡矿矿区内部, 7 件样品产自黄岗铁锡矿外围; 6 件样品产自莫古吐铁锡矿矿区内部, 4 件样品产自莫古吐铁锡矿南西方向的延伸矿脉大石山铁锡矿矿区。

3.2 矿物学研究

样品野外定名为二长花岗岩或正长花岗岩, 室

内镜下观察发现斜长石均为钠质斜长石, 长石中钙质长石含量很低($<5\%$), 野外定名可能存在偏差。野外岩性描述: 岩石为淡黄色, 块状构造, 粗粒结构, 组成矿物为石英(约 30%)、碱性长石(条纹长石, 约 40%)和斜长石(约 30%), 次要矿物主要为黑云母(约 5%), 故野外定名为二长花岗岩。显微镜观察结果显示, 长石主要为条纹长石和斜长石, 斜长石均为钠质斜长石, 部分样品存在轻微的蚀变, 部分斜长石的核心有轻微的泥化特征, 副矿物主要为锆石、磷灰石、榍石等; 斜长石主要为发育钠长石律双晶及密集聚片双晶的钠质斜长石, 呈半自形板状结构, 轻微高岭土化、绢云母化(图 4-a); 条纹长石呈近半自形板

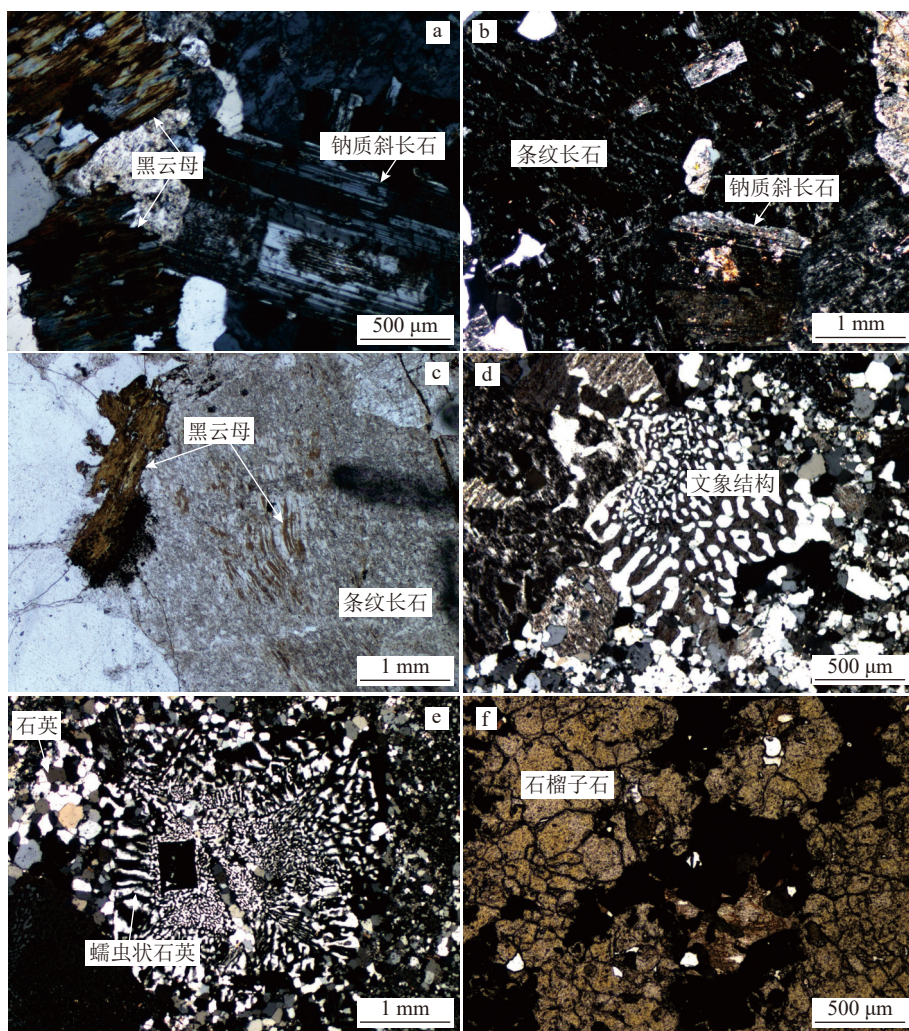


图 4 黄岗和莫古吐花岗岩岩相学照片(图 a、b、d、e 拍摄于正交偏光, 图 c、f 拍摄于单偏光)

Fig. 4 Petrographic photos of Huanggang and Mogutu granites

a—莫古吐 MGT16-6 碱长花岗岩; b—莫古吐 MGT16-3 碱长花岗岩, 条纹长石内部有钠质斜长石碎片和黑云母残晶; c—莫古吐 MGT16-3 碱长花岗岩, 条纹长石内部和边部有自形程度较好的黑云母; d—黄岗 HG16-1 碱长花岗岩, 具有文象结构; e—黄岗 HG16-1 碱长花岗岩, 具有文象结构, 边部有蠕虫状石英; f—莫古吐砂卡岩

状结构, 条纹结构明显(图 4-b, c); 石英呈他形粒状, 粒内轻微的波状消光, 发育少量裂隙; 黑云母呈片状, 多色性明显, 浅黄褐色、褐色。根据镜下观察结果和花岗岩 QAP 图(图 5), 岩石定名应为黑云母碱长花岗岩或黑云母正长花岗岩。

本次镜下观察发现, 黄岗和莫古吐成矿花岗岩具有典型的文象结构和蠕虫状石英(图 4-d, e), 表明在岩浆结晶过程中石英、钠长石、条纹长石是低温共结岩浆结晶的产物。在石英、钠质斜长石和条纹长石中产出有自形的黑云母(图 4-a~c), 表明在岩浆岩演化过程中较早阶段有黑云母结晶, 显示这些花岗岩浆具有较高的水逸度。前人研究发现, 该区域产出有晶洞花岗岩, 晶洞中也含有电气石和萤石, 显示这些花岗岩经历了流体的饱和与出溶, 并且富含 F 和 B(王莉娟等, 2001; 陈缘等, 2021), 显示黄岗铁锡矿的成因可能与富 F 的流体有关。上述特征显示, 这些花岗岩属于直接成矿的花岗岩。

4 分析测试方法与结果

根据样品的野外分布和岩相学特征, 对具有代

表性的样品 HG16-3 与 MGT16-1 进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年测试, 所有样品均进行了全岩主量、微量和稀土元素测试分析。

4.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年

4.1.1 测试方法

岩石样品破碎至合适粒度, 经人工淘洗、分选后在双目镜下挑选出自形程度较好的锆石颗粒, 用环氧树脂固定、制靶。锆石靶由北京中科矿研检测技术有限公司制备, 直径 25 mm, 厚 5 mm。经透射光、反射光和阴极发光照相, 观察、选择合适的锆石单矿物测试点位。锆石 U-Pb 定年和微量元素原位成分分析测试工作在中国地质科学院矿产资源研究所成矿作用与资源评价重点实验室同时完成, 采用单点激光剥蚀等离子质谱方式, 激光剥蚀系统为 RESOLUTIONS-155 型 193 nm 准分子激光系统。U-Pb 定年数据分析前用锆石 GJ-1 调试仪器, U、Th 含量以锆石 M127 为外标进行校正, 测试流程见侯可军等(2009); 锆石微量元素含量利用 SRM610 作为外标、Si 作内标的方法进行定量计算。分析数据的离线处理

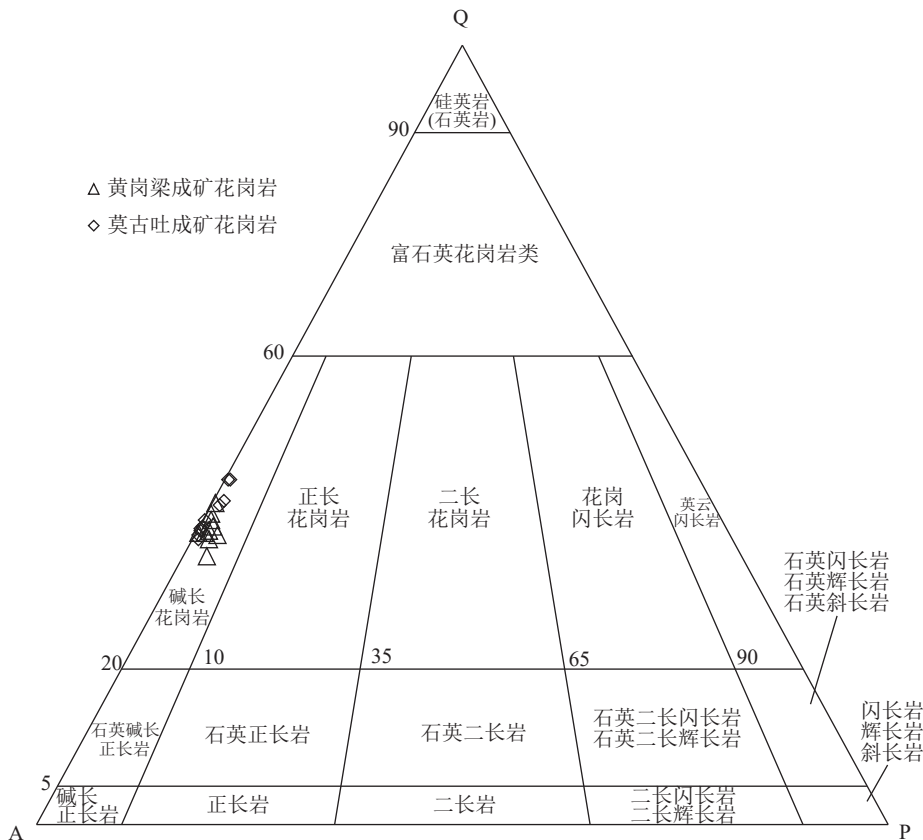


图 5 黄岗和莫古吐矿床成矿花岗岩 QAP 图解

Fig. 5 QAP diagram of ore-forming granites in Huanggang and Mogutu deposits

采用软件 ICPMSDataCal4.3 完成(Liu et al., 2008), 运用 Isoplot3.0 程序计算、绘制锆石年龄谐和图。

4.1.2 测试结果

本次进行定年的锆石选自碱长花岗岩 HG16-1 和 MGT16-3, 锆石形态完整, 表现为较清晰的岩浆振荡环带, 表明为岩浆锆石, 因此锆石年龄可以代表黄岗和莫古吐成矿花岗岩成岩年龄。

样品 HG16-1 共 19 颗锆石测试数据有效。除 8 个远离谐和线(3, 5, 6, 7, 11, 12, 14, 17)和 2 个年龄异常值(1, 4)外, 其余 9 个锆石的 U 含量范围为 $1098 \times 10^{-6} \sim 4081 \times 10^{-6}$, Th 含量范围为 $400 \times 10^{-6} \sim 1045 \times 10^{-6}$, Pb 含量范围为 $29 \times 10^{-6} \sim 101 \times 10^{-6}$, Th/U 值范围为 0.17~0.44(表 1)。锆石年龄总体较稳定, 在一致曲线中接近一致, 且集中分布, 较谐和, 给出的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 131.8 ± 2.0 Ma(MSWD=1.3), 显示该组锆石结晶于早白垩世(图 6-a)。

样品 DMG16-3 共测试 22 颗锆石。除 4 个远离谐和线(2, 13, 18, 19)和 3 个年龄异常值(5, 14, 16)外, 其余 15 个锆石的 U 含量范围为 $194 \times 10^{-6} \sim 2042 \times 10^{-6}$, Th 含量范围为 $65 \times 10^{-6} \sim 695 \times 10^{-6}$, Pb 含量范围为 $5 \times 10^{-6} \sim 56 \times 10^{-6}$, Th/U 值范围为 0.29~0.72(表 1)。锆石年龄总体较稳定, 在一致曲线中接近一致, 且集中分布, 较谐和, 给出的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 137.1 ± 1.3 Ma(MSWD=0.80), 显示该组锆石结晶于晚侏罗世—早白垩世(图 6-b)。

4.2 全岩主量、微量和稀土元素测试

4.2.1 测试方法

岩石样品清洁、粉碎(200 目以下)后, 在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成全岩主量和微量元素分析测试工作。主量元素测试采用 X 射线荧光光谱法(XRF), 使用仪器为 Axiosm AX 型 X 射线荧光光谱仪, 根据标准岩石样品监控氧化物的分析误差小于 1%。微量和稀土元素测试分析采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS), 使用的仪器为 ElementXR 等离子体质谱仪, 根据标准岩石样品监控分析误差小于 5%。

4.2.2 测试结果

本次研究采集的 20 件碱性长石花岗岩样品的全岩主量、稀土和微量元素分析结果见表 2。主量元素测试分析结果显示, 碱长花岗岩 SiO_2 含量为 73.97%~79.05%, Al_2O_3 含量为 11.07%~13.04%, Na_2O 含量为 2.24%~4.37%, K_2O 含量为 4.07%~6.04%, CaO 含量为 0.11%~1.16%, TFeO 含量为 0.51%~2.42%, 含镁指数为 0.02~0.11(含镁指数= $\text{MgO}/(\text{MgO}+\text{TFeO})$), A/CNK 值为 0.93~1.18(铝饱和指数 $\text{A/CNK}=(\text{Al}_2\text{O}_3/101.94)/((\text{CaO}/56.08)+(\text{Na}_2\text{O}/61.982)+(\text{K}_2\text{O}/94.2))$)。CIPW 标准矿物计算显示 Q+Ab+Or 含量在 92.38%~97.46% 之间, 分异指数 DI 值为 92.38~97.46。主量元素显示, 碱长花岗岩均具有高硅, 贫钙、镁、铁、铝特征, 以及富碱、相对高钾、低钠和较

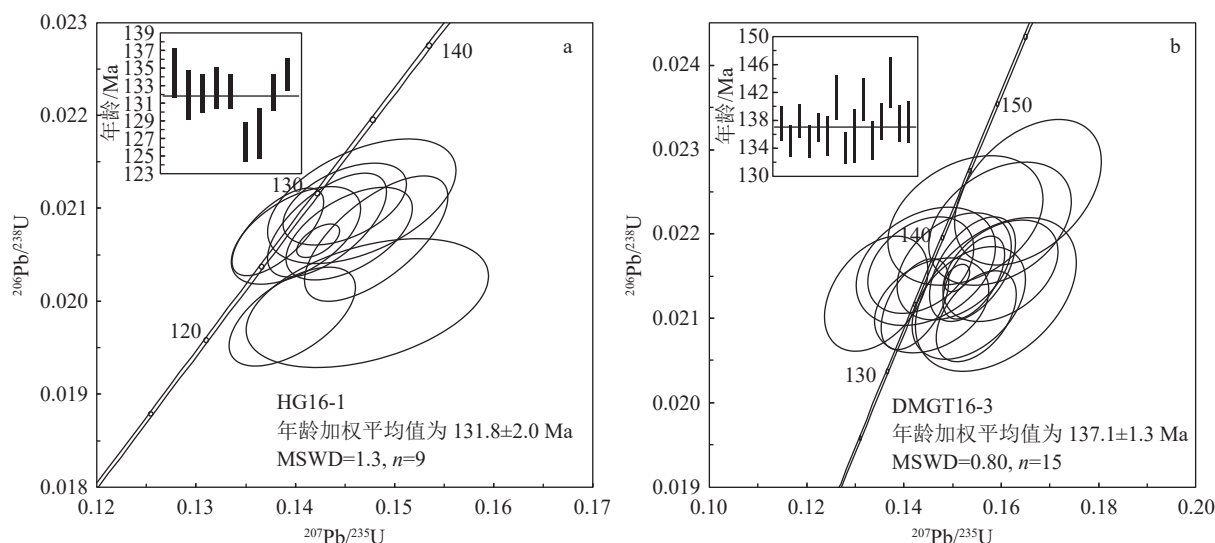


图 6 黄岗(a)和莫古吐(b)成矿花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 谐和年龄图和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值图

Fig. 6 LA-ICP-MS zircon U-Pb concordant age and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age-weighted average diagrams of Huanggang (a) and Mogutu (b) ore-forming granites

表 1 黄岗和莫古吐成矿花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 测年分析数据

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb dating analysis data of Huanggang and Mogutu metallogenic granites

测点号	含量/ 10^{-6}		Th/U	同位素比值				年龄/Ma			
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
HG16-1											
HG16-1-1	3186	2381	1.34	0.2721	0.0111	0.0257	0.0005	244	9	164	3
HG16-1-2	701	4081	0.17	0.1467	0.0063	0.0211	0.0004	139	6	134	3
HG16-1-3	1239	5410	0.23	0.1921	0.0101	0.0196	0.0002	178	9	125	1
HG16-1-4	888	3742	0.24	0.2581	0.0091	0.0253	0.0003	233	7	161	2
HG16-1-5	1205	4762	0.25	0.1931	0.0059	0.0208	0.0004	179	5	133	2
HG16-1-6	1180	2818	0.42	0.1784	0.0043	0.0241	0.0004	167	4	153	3
HG16-1-7	1906	2981	0.64	0.2908	0.0156	0.0249	0.0005	259	12	159	3
HG16-1-8	1500	4053	0.37	0.2612	0.0084	0.0219	0.0003	236	7	139	2
HG16-1-9	733	1829	0.40	0.1482	0.0048	0.0207	0.0004	140	4	132	3
HG16-1-10	400	1099	0.36	0.1401	0.0043	0.0207	0.0003	133	4	132	2
HG16-1-11	758	2065	0.37	0.1755	0.0101	0.0197	0.0004	164	9	126	3
HG16-1-12	846	1928	0.44	0.1432	0.0040	0.0208	0.0004	136	4	133	2
HG16-1-13	869	2060	0.42	0.1383	0.0030	0.0207	0.0003	131	3	132	2
HG16-1-14	830	1986	0.42	0.1590	0.0058	0.0218	0.0004	150	5	139	2
HG16-1-15	1046	2541	0.41	0.1397	0.0042	0.0198	0.0004	133	4	127	2
HG16-1-16	660	1604	0.41	0.1473	0.0081	0.0200	0.0005	139	7	128	3
HG16-1-17	792	1765	0.45	0.1597	0.0049	0.0224	0.0004	150	4	143	3
HG16-1-18	1219	1938	0.63	0.1454	0.0042	0.0207	0.0003	138	4	132	2
HG16-1-19	604	1520	0.40	0.1450	0.0041	0.0210	0.0003	137	4	134	2
MGT16-3											
MGT16-3-1	301	867	0.35	0.1598	0.0078	0.0216	0.0004	151	7	138	3
MGT16-3-2	590	1019	0.58	0.1956	0.0083	0.0222	0.0005	181	7	141	3
MGT16-3-3	300	1015	0.29	0.1423	0.0046	0.0212	0.0004	135	4	135	2
MGT16-3-4	135	305	0.44	0.1435	0.0072	0.0216	0.0004	136	6	138	2
MGT16-3-5	233	771	0.30	0.2351	0.0084	0.0203	0.0003	214	7	130	2
MGT16-3-6	120	365	0.33	0.1457	0.0078	0.0212	0.0004	138	7	135	2
MGT16-3-7	431	1335	0.32	0.1544	0.0042	0.0215	0.0003	146	4	137	2
MGT16-3-8	107	195	0.55	0.1343	0.0070	0.0213	0.0004	128	6	136	3
MGT16-3-9	117	275	0.42	0.1526	0.0105	0.0222	0.0005	144	9	141	3
MGT16-3-10	695	2042	0.34	0.1549	0.0054	0.0210	0.0004	146	5	134	2
MGT16-3-11	324	450	0.72	0.1589	0.0109	0.0213	0.0006	150	10	136	4
MGT16-3-12	125	305	0.41	0.1597	0.0097	0.0221	0.0005	150	8	141	3
MGT16-3-13	67	157	0.43	0.1820	0.0160	0.0243	0.0005	170	14	155	3
MGT16-3-14	158	377	0.42	0.1533	0.0077	0.0212	0.0004	145	7	135	3
MGT16-3-15	656	339	1.93	1.1225	0.0523	0.0247	0.0005	764	25	157	3
MGT16-3-16	151	230	0.66	0.1503	0.0078	0.0216	0.0004	142	7	138	3
MGT16-3-17	72	140	0.52	0.1997	0.0149	0.0238	0.0006	185	13	151	4
MGT16-3-18	150	350	0.43	0.6214	0.0474	0.0239	0.0006	491	30	152	4
MGT16-3-19	134	362	0.37	0.1655	0.0100	0.0225	0.0006	155	9	143	4
MGT16-3-20	206	379	0.54	0.1541	0.0058	0.0216	0.0004	145	5	138	3
MGT16-3-21	65	194	0.34	0.1445	0.0095	0.0216	0.0005	137	8	138	3
MGT16-3-22	1085	2402	0.45	0.1985	0.0065	0.0231	0.0003	184	6	147	2

表 2 黄岗和莫古吐成矿花岗岩主量、微量和稀土元素组成

Table 2 Composition of major, trace and rare earth elements in the metallogenic granites of Huanggang and Mogutu

元素	HGT16-1	HGT16-2	HGT16-3	HGT16-4	HGT16-5	HG16-1	HG16-2	HG16-3	HG16-4	HG16-5
	碱长花岗岩	碱长花岗岩	碱长花岗岩	正长花岗岩	正长花岗岩	碱长花岗岩	碱长花岗岩	碱长花岗岩	碱长花岗岩	碱长花岗岩
SiO ₂	76.22	76.14	77.37	74.65	76.08	79.05	77.38	73.97	74.69	74.52
TiO ₂	0.07	0.09	0.05	0.10	0.06	0.07	0.06	0.19	0.18	0.18
Al ₂ O ₃	12.31	12.36	12.12	12.75	12.11	12.13	12.38	13.04	12.70	12.73
Fe ₂ O ₃	0.69	0.88	0.71	0.63	0.77	0.01	0.01	0.84	0.82	0.60
FeO	1.08	1.07	1.29	1.33	1.25	0.53	0.50	1.66	1.44	1.68
MnO	0.06	0.07	0.07	0.07	0.08	0.04	0.03	0.07	0.07	0.06
MgO	0.06	0.06	0.04	0.10	0.05	0.04	0.02	0.16	0.17	0.18
CaO	0.45	0.44	0.28	0.65	0.35	0.11	0.25	0.35	0.24	0.37
Na ₂ O	3.85	3.91	3.88	3.98	3.63	3.95	4.37	3.36	3.12	3.37
K ₂ O	4.49	4.56	4.52	4.56	4.58	4.10	4.07	4.55	4.87	4.88
P ₂ O ₅	-	-	-	0.02	-	-	-	0.04	0.04	0.04
烧失量	0.16	0.14	0.26	0.27	0.23	0.24	0.19	0.78	0.68	0.56
总计	99.45	99.73	100.60	99.11	99.20	100.30	99.27	99.01	99.02	99.17
H ₂ O ⁺	0.44	0.58	0.58	0.82	0.88	0.78	0.42	1.38	1.24	1.12
TF ₂ O	1.70	1.86	1.93	1.90	1.94	0.54	0.51	2.42	2.18	2.22
A/CNK	1.03	1.02	1.03	1.01	1.05	1.09	1.03	1.18	1.17	1.11
A/NK	1.10	1.09	1.08	1.11	1.11	1.11	1.07	1.25	1.22	1.18
F	0.07	0.11	0.03	0.20	0.07	0.02	0.12	0.08	0.03	0.10
Li	12.40	9.84	10.40	26.40	14.50	33.50	41.50	146.00	54.00	33.70
Be	5.76	6.19	3.89	6.29	8.66	1.37	1.64	5.24	4.83	4.89
Sc	1.91	2.03	1.96	2.52	1.90	1.26	1.34	3.37	3.37	3.34
V	0.85	0.98	0.93	2.80	0.67	0.85	0.63	5.78	6.39	5.64
Mn	386	492	507	563	575	256	229	518	472	442
Co	0.74	0.82	0.96	1.23	1.06	0.59	0.48	1.97	2.12	1.81
Ni	1.59	2.65	2.36	1.74	2.16	2.05	2.12	2.14	2.20	2.03
Cu	5.17	4.21	5.26	3.79	4.47	5.71	7.38	7.82	5.46	6.60
Zn	49.20	43.30	38.50	30.20	43.40	28.40	35.00	70.30	52.20	49.20
Ga	23.10	22.20	23.80	23.00	24.20	27.40	25.90	24.40	23.80	23.40
As	11.80	7.96	12.90	10.60	16.40	259.00	5.53	30.80	19.80	16.90
Mo	1.96	1.96	3.27	1.95	2.15	0.51	1.32	1.58	0.56	0.52
Ag	0.11	0.12	0.14	0.04	0.09	0.05	0.05	0.10	0.01	0.03
Cd	0.13	0.12	0.16	0.05	0.22	0.05	0.07	0.17	0.12	0.15
In	0.08	0.07	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06
Cs	2.75	4.67	1.48	23.90	2.28	2.47	1.98	8.17	5.23	4.28
W	1.82	1.68	3.24	1.25	2.62	4.16	1.90	2.60	4.76	2.38
Tl	0.66	0.52	0.72	1.13	0.82	2.21	1.90	2.28	2.20	1.85
Pb	20.90	19.50	17.30	18.90	24.30	26.60	25.60	41.70	39.50	30.70
Bi	0.31	0.15	1.06	0.13	0.14	10.80	7.67	2.78	15.80	5.10
Rb	165	163	148	255	198	161	181	208	250	237
Ba	111.0	157.0	30.6	274.0	47.3	109.0	12.7	355.0	347.0	336.0
Th	35.00	27.50	43.10	29.20	38.00	9.59	24.50	26.80	24.40	26.60

续表 2-1

元素	HGT16-1	HGT16-2	HGT16-3	HGT16-4	HGT16-5	HG16-1	HG16-2	HG16-3	HG16-4	HG16-5
	碱长花岗岩	碱长花岗岩	碱长花岗岩	正长花岗岩	正长花岗岩	碱长花岗岩	碱长花岗岩	碱长花岗岩	碱长花岗岩	碱长花岗岩
U	7.72	8.86	18.10	10.50	7.08	4.57	4.32	4.45	4.40	4.53
Ta	2.20	2.28	3.81	3.41	4.13	1.95	2.14	1.67	1.73	1.73
Nb	20.90	21.50	33.90	28.10	31.40	19.10	21.30	16.50	17.20	17.00
Sr	17.60	18.50	7.87	42.00	9.78	11.20	4.97	60.10	57.90	62.00
Zr	178	133	173	167	138	158	140	203	198	213
Hf	9.99	5.66	9.37	6.90	7.58	7.73	7.25	7.41	7.28	7.79
La	31.40	33.70	16.90	39.30	25.70	3.96	4.58	54.80	25.00	37.00
Ce	73.60	74.80	48.20	86.00	63.60	8.18	11.60	116.00	77.80	93.90
Pr	9.72	9.67	8.11	10.70	8.61	0.95	1.90	14.00	5.98	8.86
Nd	38.10	38.30	36.80	41.90	34.90	3.53	9.85	53.20	22.80	33.70
Sm	8.93	8.49	10.60	9.24	8.84	0.83	3.88	10.70	4.97	6.85
Eu	0.17	0.22	0.10	0.36	0.11	0.05	0.05	0.60	0.43	0.48
Gd	7.79	7.10	9.51	7.55	7.49	0.76	4.82	8.17	4.66	5.73
Tb	1.38	1.19	1.73	1.33	1.29	0.15	0.90	1.35	0.92	1.06
Dy	7.93	6.88	10.10	7.85	7.34	0.99	5.74	7.11	6.09	6.62
Ho	1.66	1.41	2.05	1.61	1.48	0.24	1.26	1.38	1.36	1.47
Er	4.53	3.82	5.51	4.47	4.01	0.83	3.49	3.48	4.00	4.17
Tm	0.72	0.59	0.86	0.72	0.65	0.15	0.54	0.53	0.65	0.68
Yb	4.38	3.59	5.20	4.58	4.07	1.04	3.32	3.17	4.08	4.24
Lu	0.66	0.55	0.79	0.72	0.62	0.18	0.51	0.47	0.64	0.67
Y	39.90	34.30	46.00	39.50	35.20	4.82	29.60	25.20	28.00	31.80
ΣREE	230.87	224.61	202.46	255.83	203.91	26.66	82.04	300.20	187.40	237.20
ΣLREE	161.92	165.18	120.71	187.50	141.76	17.50	31.86	249.30	137.00	180.80
ΣHREE	68.95	59.43	81.75	68.33	62.15	9.16	50.18	50.86	50.40	56.44
ΣLREE/ΣHREE	2.35	2.78	1.48	2.74	2.28	1.91	0.63	4.90	2.72	3.20
Eu/Eu*	0.06	0.09	0.03	0.13	0.04	0.19	0.04	0.20	0.27	0.23
TE ₁₃	1.04	1.02	1.07	1.03	1.05	1.01	0.99	1.03	1.14	1.07

元素	MGT16-1	MGT16-2	MGT16-3	MGT16-4	MGT16-5	MGT16-6	DSS16-1	DSS16-2	DSS16-3	DSS16-4
	碱长花岗岩	正长花岗岩	碱长花岗岩	正长花岗岩	碱长花岗岩	碱长花岗岩	碱长花岗岩	碱长花岗岩	碱长花岗岩	碱长花岗岩
SiO ₂	75.91	77.58	75.15	77.20	78.75	77.30	75.50	76.10	76.10	76.00
TiO ₂	0.08	0.07	0.08	0.06	0.05	0.08	0.06	0.05	0.06	0.05
Al ₂ O ₃	12.28	11.82	12.95	11.07	11.31	11.96	12.20	12.50	12.10	12.40
Fe ₂ O ₃	0.23	0.01	0.22	0.01	0.01	0.01	0.32	0.39	0.22	0.02
FeO	1.56	0.93	0.83	1.15	0.72	1.09	1.42	1.11	1.59	1.36
MnO	0.08	0.06	0.08	0.07	0.04	0.07	0.07	0.07	0.09	0.06
MgO	0.06	0.05	0.07	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05	0.04	0.04
CaO	0.54	0.54	0.52	1.16	0.23	0.49	0.55	0.39	0.58	0.43
Na ₂ O	3.85	3.02	2.84	2.24	2.44	2.97	3.62	3.79	3.71	3.84
K ₂ O	4.28	5.05	6.04	5.59	5.54	5.19	4.65	4.58	4.36	4.55
P ₂ O ₅	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
烧失量	0.30	0.29	0.41	0.52	0.17	0.27	0.42	0.36	0.40	0.40
总计	99.18	99.43	99.20	99.13	99.32	99.50	98.90	99.50	99.30	99.10

续表2-2

元素	MGT16-1	MGT16-2	MGT16-3	MGT16-4	MGT16-5	MGT16-6	DSS16-1	DSS16-2	DSS16-3	DSS16-4
	碱长花岗岩	正长花岗岩	碱长花岗岩	正长花岗岩	碱长花岗岩	碱长花岗岩	碱长花岗岩	碱长花岗岩	碱长花岗岩	碱长花岗岩
H ₂ O ⁺	0.98	0.74	0.98	0.90	0.74	0.80	0.88	1.00	0.98	0.86
TFeO	1.77	0.94	1.03	1.16	0.73	1.10	1.71	1.46	1.79	1.38
F	0.27	0.2	0.25	0.67	0.057	0.18	0.29	0.18	0.3	0.21
A/CNK	1.03	1.04	1.07	0.93	1.08	1.05	1.02	1.05	1.02	1.03
A/NK	1.12	1.13	1.16	1.14	1.13	1.14	1.11	1.12	1.12	1.10
Li	24.60	16.20	23.30	55.80	25.10	22.90	25.10	18.80	31.60	23.30
Be	7.35	9.90	4.64	3.78	4.60	5.97	6.31	5.85	9.26	5.94
Sc	2.13	1.96	2.11	1.45	1.20	1.50	1.66	1.54	1.54	1.58
V	1.14	1.84	2.54	1.71	1.10	1.81	1.01	0.90	0.80	0.78
Mn	562	431	574	524	310	504	534	458	625	387
Co	1.12	0.81	1.19	0.97	0.74	0.96	1.08	0.92	1.15	0.76
Ni	2.05	2.20	2.69	2.61	1.42	2.35	2.21	2.11	2.14	1.50
Cu	5.49	11.90	21.90	11.40	9.30	14.30	7.02	3.71	5.56	2.43
Zn	18.80	48.50	99.30	34.80	33.90	54.10	12.90	11.80	29.50	15.10
Ga	26.60	19.60	20.50	18.30	17.60	20.30	26.10	27.20	27.10	27.00
As	12.50	121.00	55.30	50.60	85.80	66.70	7.80	37.10	28.00	24.80
Mo	0.83	0.28	0.51	0.39	0.22	0.51	0.83	0.87	3.17	0.29
Ag	0.02	0.03	0.05	0.02	0.05	0.03	0.03	0.03	0.09	0.00
Cd	0.05	0.13	0.19	0.10	0.08	0.08	0.05	0.08	0.25	0.05
In	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Cs	9.92	7.02	9.94	7.48	7.26	7.47	8.39	10.9	7.16	9.12
W	3.8	2.21	1.55	2.97	1.81	2.49	4.82	10.5	6.63	2.59
Tl	2.07	2.18	2.4	2.39	2.43	2.26	2.14	2.35	2.22	2.32
Pb	32	26.8	26.4	26.1	27.2	29	34	30.8	48.6	31.9
Bi	0.13	17.4	34	6.2	16.7	7.37	0.06	0.06	0.07	0.05
Rb	425	275	331	302	297	286	427	453	445	461
Ba	37.3	65.1	390	81.6	76.2	78.9	38.1	30.3	14.2	18.4
Th	56.8	55.8	17	42.6	41.2	52.9	62.6	44.8	58.4	57.2
U	9.22	5.95	2.26	4.91	3.02	4.69	12.2	5.44	11	8.58
Ta	5.29	2.24	1.89	3.58	2.68	3.73	4.47	4.02	5.53	4.28
Nb	41.9	13.3	11.9	21.4	16.4	19.5	39.6	34.9	41.3	34.9
Sr	13.1	23.4	47.6	23.5	22	23.5	11.9	11.1	10.4	10.7
Zr	115.0	116.0	69.1	98.1	67.1	160.0	161.0	90.7	138.0	121.0
Hf	8.06	6.64	3.57	6.16	4.14	8.13	9.81	6.54	9.15	8.6
La	70.7	25.7	20.4	28.4	15.8	31.6	41.2	36.5	49.6	34.8
Ce	160	61.6	45	63.7	35.8	71.9	93.7	83.2	111	80.9
Pr	18.7	7.7	5.22	7.76	4.14	8.2	11.8	10.2	14	10.2
Nd	63.4	30.6	19.5	27.3	14.7	28.6	44.5	38.1	52.9	39.2
Sm	13	8.65	4.56	5.45	3.12	5.81	11	9.4	13.3	9.66
Eu	0.12	0.17	0.47	0.18	0.15	0.17	0.09	0.07	0.05	0.05
Gd	10.9	9.08	4.06	4.64	2.79	5.18	10.5	9.06	12.8	9.34
Tb	2.03	1.82	0.73	0.83	0.53	0.97	2.07	1.82	2.61	1.86
Dy	12.4	11.5	4.64	5.38	3.37	6.15	13.3	11.8	16.8	11.8
Ho	2.76	2.51	1	1.25	0.76	1.39	3.03	2.69	3.84	2.69
Er	8.21	7.41	2.9	3.92	2.25	4.14	8.9	8.21	11.5	8.08
Tm	1.42	1.24	0.49	0.7	0.38	0.73	1.51	1.42	2	1.39
Yb	9.28	7.77	3.06	4.74	2.43	4.77	9.66	9.19	13	9.02
Lu	1.48	1.2	0.48	0.78	0.38	0.76	1.49	1.42	2.02	1.42
Y	78.4	68.1	26.8	40	18.3	36.4	85.6	77.3	97.4	79.4
ΣREE	452.80	245.05	139.31	195.03	104.90	206.77	338.35	300.38	402.82	299.81
ΣLREE	325.92	134.42	95.15	132.79	73.71	146.28	202.29	177.47	240.85	174.81
ΣHREE	126.88	110.63	44.16	62.24	31.19	60.49	136.06	122.91	161.97	125.00
ΣLREE/ΣHREE	2.57	1.22	2.15	2.13	2.36	2.42	1.49	1.44	1.49	1.40
Eu/Eu*	0.03	0.06	0.33	0.11	0.16	0.09	0.03	0.02	0.01	0.02
TE ₁₃	1.07	1.07	1.04	1.03	1.06	1.06	1.05	1.06	1.05	1.05

注: TE₁₃值指示岩石的熔体-流体相互作用强度 (Irber et al., 1999)。主量元素含量单位为%, 微量和稀土元素含量单位为10⁻⁶

高的分异指数的特点。

在 SiO_2 - K_2O 图解 (图 7-a) 中, 黄岗和莫古吐成矿花岗岩投点全部落入高钾钙碱性岩石区域; 在 A/NK - A/CNK 图解 (图 7-b) 中, $\text{A/CNK}=0.94\sim 1.18$, $\text{A/NK}=1.07\sim 1.25$, 表现出弱过铝质特征。样品 HG16-3、HG16-4、HG16-5 的 A/CNK 值分别为 1.18、1.17 和 1.11 (表 2), 高于弱过铝质界线值 1.1, 可能与样品的轻微蚀变有关。显微镜观察显示, 这 3 个样品具有轻微的绢云母化, 绢云母为强过铝质矿物, 但本次采集的碱长花岗岩中富铝矿物为黑云母, 镜下观察未见白云母、堇青石、石榴子石等富铝矿物。因此, 尽管轻微的蚀变使这 3 个样品的铝饱和指数发生偏移, 但矿物学特征和地球化学行为与其余成矿花岗岩均一致, 能够反映成矿花岗岩的总体特征, 为准铝质—弱过铝质花岗岩, 少量样品 $\text{A/CNK}>1.1$ 可能与风化作用形成的绢云母有关。

主量元素协变图解 (图 8) 显示, 黄岗和莫古吐成矿花岗岩具有高硅花岗岩的特征 ($\text{SiO}_2>73\%$)。主量元素的演化主要体现为 SiO_2 的增加与 Al_2O_3 和 TFeO 的减少。 MgO 、 MnO 、 TiO_2 、烧失量 (H_2O) 虽然均随 SiO_2 含量的增加而减少, 但是这些元素含量较少。因此, 花岗岩的岩浆演化主要受到黑云母、钛铁矿等基性矿物分异的影响, 同时, 这些基性矿物中 MnO 和 MgO 含量也较高, 因此 MnO 和 MgO 总体也随着 SiO_2 含量的增加而减少 (图 8)。 CaO 含量与 SiO_2 含量之间具有负相关性, 可能是长石分异作用的结果, 但是 Na_2O 和 K_2O 与 SiO_2 含量的变化规律

并不明显, 可能是因为花岗岩岩浆演化到晚期时, 已经经历了充分的分异, 此时熔体相的主要成分接近 Q-Ab-Or 共结体系的氧化物组成 (高 SiO_2 、富 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$), 具有共结熔体的特征, 因此石英和碱性长石几乎等比例结晶, 但 CaO 可能分配在钠质斜长石中被逐渐分离 (Clemens, 1997)。

稀土元素测试结果显示 (表 2), 黄岗和莫古吐成矿花岗岩稀土元素总含量 (ΣREE) 为 $26.7\times 10^{-6}\sim 452.8\times 10^{-6}$, 集中分布在 $200\times 10^{-6}\sim 300\times 10^{-6}$; 轻稀土元素总含量 (ΣLREE) 为 $17.5\times 10^{-6}\sim 325.9\times 10^{-6}$, 集中分布在 $100\times 10^{-6}\sim 200\times 10^{-6}$; 重稀土元素总含量 (ΣHREE) 为 $9.2\times 10^{-6}\sim 162.0\times 10^{-6}$, 集中分布在 $50\times 10^{-6}\sim 150\times 10^{-6}$, LREE/HREE 值为 $0.63\sim 4.90$ 。 $\text{Eu}/\text{Eu}^*=0.01\sim 0.33$, 表现出明显的负 Eu 异常; $\text{Ce}/\text{Ce}^*=0.96\sim 1.56$, 表现出弱负 Ce 异常向弱正 Ce 异常的过渡特点。球粒陨石标准化稀土元素配分图 (图 9-a) 中可见, 样品 HG16-1 与样品 HG16-2 配分曲线区别于区域样品的“右倾式”, 具有“海鸥式”, 原始地幔标准化微量元素蜘蛛网图中也具有低的 La 、 Ce 值, 表现为轻稀土元素含量低的特点, 这可能与较高的演化程度有关。随着演化进行, 独居石、磷灰石等富轻稀土元素的矿物结晶分离, 剩余熔体中的轻稀土元素含量会不断降低。因此, 样品 HG16-1 与样品 HG16-2 花岗岩的成岩熔体可能经历了比其他花岗岩熔体更程度的演化。

岩体微量元素组成特征 (表 2; 图 9-b) 显示, 黄岗和莫古吐成矿花岗岩中 Ba 、 Nb 、 Sr 、 P 、 Ti 相对亏

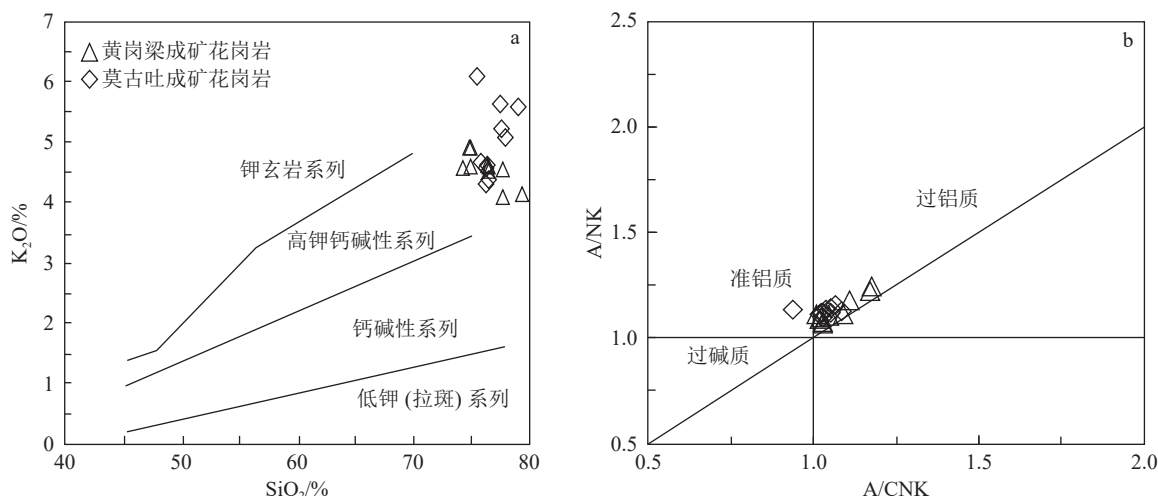


图 7 黄岗和莫古吐成矿花岗岩 SiO_2 - K_2O 图解 (a, 底图据 Peccerillo et al., 1976) 和 A/CNK - A/NK 图解 (b, 底图据 Papu et al., 1989)

Fig. 7 SiO_2 - K_2O (a) and A/CNK - A/NK (b) diagrams of Huanggang and Mogutu ore-forming granites

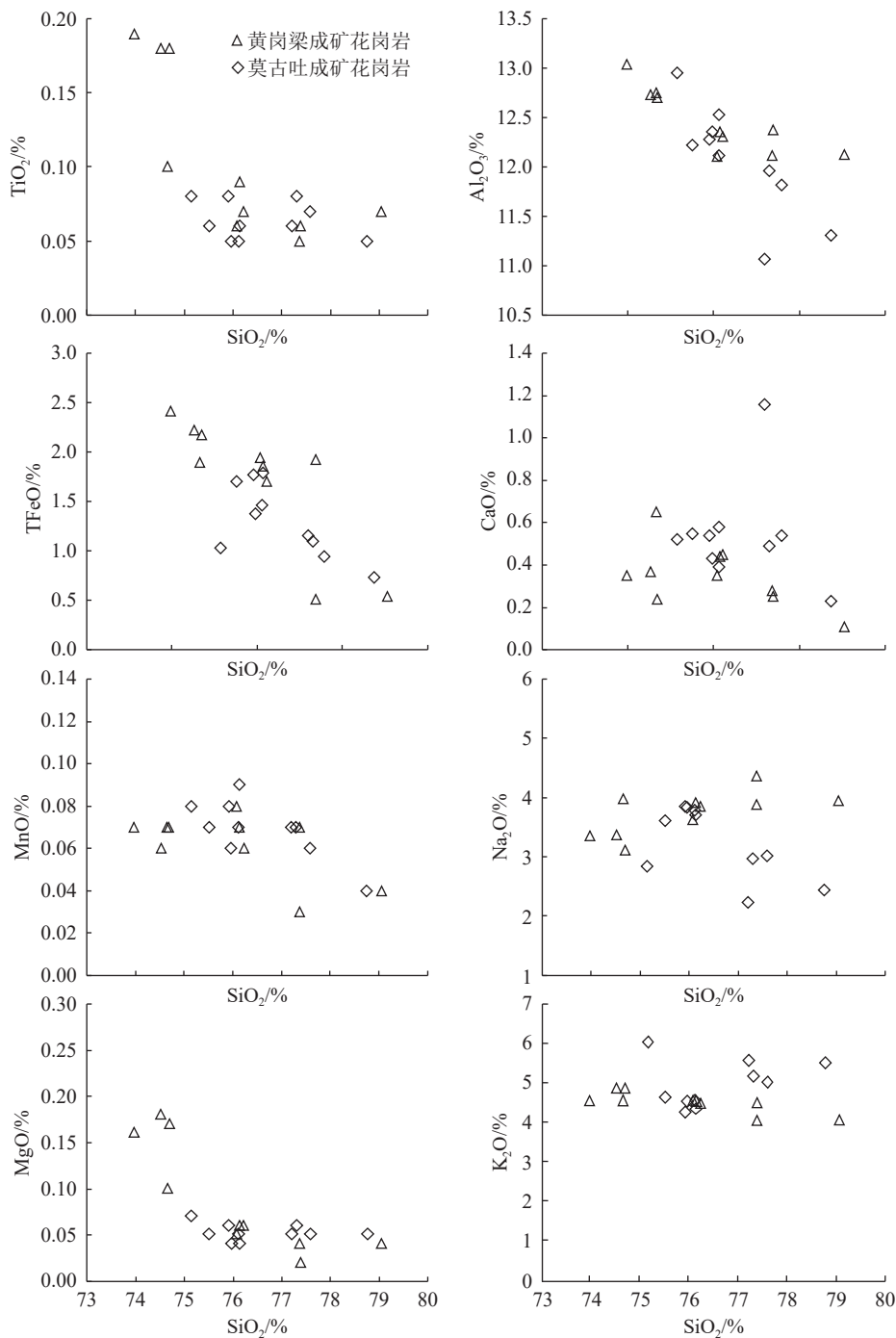


图 8 黄岗和莫古吐成矿花岗岩协变图解

Fig. 8 Covariant diagrams of ore-forming granites in Huanggang and Mogutu deposits

损, Rb、Th、Zr、Yb 相对富集, 表明岩浆经历了显著的斜长石、正长石、磷灰石和钛铁矿分异。Zr 含量较高, 可能与岩浆具有较高形成温度有关, 锆石饱和温度计(Watson et al., 1983)显示岩浆形成的温度可能在 723~822℃ 之间, 锆石饱和温度计算公式为:

$$T_{\text{Zr}} = 12900 / [2.95 + 0.85M + \ln(496000 / \text{Zr}_{\text{melt}})]$$

式中: T 为绝对温度; M 为全岩的 (Na+K+2Ca)/(Al×Si) 摩尔数(计算中, 令 Si+Al+Fe+Mg+Ca+Na+K+P=1(摩尔分数)); Zr_{melt} 为熔体中 Zr 含量(Watson et al., 1983)。锆石在花岗质岩石中是副矿物, 可用全岩的 Zr 含量近似代表熔体中的 Zr 含量。

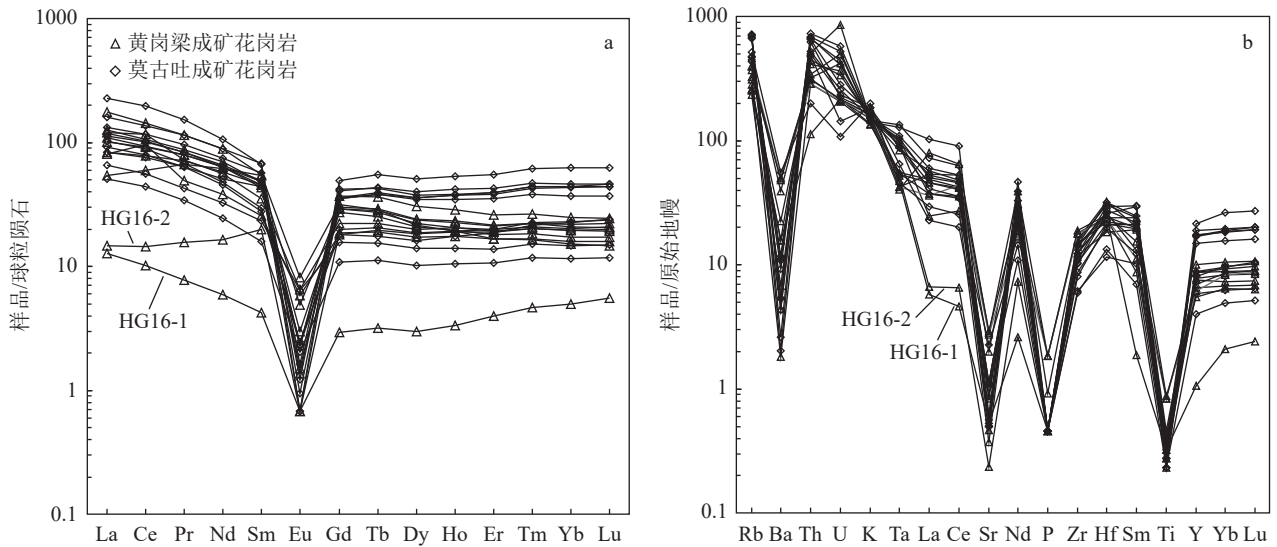


图9 黄岗和莫古吐成矿花岗岩球粒陨石标准化稀土元素配分图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)
(标准化值 Sun et al., 1989)

Fig. 9 Chondrite-normalized REE distribution patterns (a) and primitive mantle-normalized spider diagram (b) of ore-forming granites in Huanggang and Mogutu deposits

5 讨论

5.1 成岩时代

岩浆岩的形成与构造运动密不可分,大兴安岭南段位于古亚洲洋、蒙古-鄂霍茨克洋、古太平洋构造作用重叠带,经历了古亚洲洋的闭合、蒙古-鄂霍茨克洋的闭合和古太平洋的俯冲作用,形成了一系列时间段的岩浆活动,前人对大兴安岭南段矿床形成时代与构造背景的关系进行了大量研究。本次进行定年的锆石来自碱长花岗岩 HG16-1 和 MGT16-3,岩浆锆石的形成年龄基本代表黄岗和莫古吐成矿花岗岩成岩年龄,为 131.8~137.1 Ma,为早白垩世,在大兴安岭南段锡多金属成矿带的成岩时间 150~120 Ma 内(江思宏等, 2018),与区内黄岗-甘珠尔庙成矿分区内其余锡多金属矿床的成岩年龄基本一致(杨奇荻等, 2014; 顾玉超等, 2025),可能和区内其他矿床形成经历了相同的大地构造活动,即与蒙古-鄂霍茨克洋和古太平洋构造体系叠加有关(徐备等, 1997, 2014; 李锦轶等, 2009; 刘永江等, 2010; 许文良等, 2019)。

5.2 成矿花岗岩分类

花岗岩的分类方法较多,其中字母分类法自提出后被广泛应用,应用最多的是 I 型和 S 型的划分,以及代表碱性、无水 and “非造山”的 A 型花岗岩。根

据原岩的不同,花岗岩可分为火成岩来源的 I 型花岗岩、沉积岩来源的 S 型花岗岩,以及地幔来源的 M 型花岗岩 (King et al., 2001)。根据其定义, S 型花岗岩的原岩经历了一定程度风化作用,因此花岗岩中 Al 与 (Ca + Na + K) 的摩尔比 ($A/CNK > 1.1$) 显著高于火成岩为原岩的 I 型花岗岩,常常含有富铝矿物堇青石、石榴子石和白云母,且地球化学特征表现出强过铝质。此外,由于 S 型花岗岩具有较高的 Al_2O_3 含量,导致分馏的 S 型熔体中 P 元素的溶解度会增加 (King et al., 1997)。全岩主量元素分析数据显示,黄岗和莫古吐成矿花岗岩全岩 P_2O_5 含量极低 (低于检出限, $< 0.01\%$),且在野外和镜下均未见堇青石、白云母或石榴子石,铝饱和指数主要为弱过铝质 ($A/CNK < 1.18$),有 2 件黑云母花岗岩样品的 A/CNK 约为 1.18,可能与长石的绢云母化有关。因此,黄岗和莫古吐成矿花岗岩具有弱过铝质的 I 型花岗岩特征。

Loiselle and Wones (1979) 指出 A 型花岗岩是一种有富碱、“无水”的特征和“非造山”的构造意义,具有相对高钾质、高 $TFeO/(TFeO + MgO)$ 值、富集 Zr 等高场强元素的特征。黄岗和莫古吐成矿花岗岩显示富碱 ($K_2O + Na_2O = 7.83\% \sim 8.88\%$)、高 $TFeO/(TFeO + MgO)$ 值 (0.92 ~ 0.98)、富集 Rb、Th、Zr、Yb 等高场强元素 (图 9-b),因此也具有 A 型花

岗岩特征。

Frost et al.(2001) 提出了一种“纯化学”的花岗岩分类方法,用于分类的 3 个变量为 $\text{TFeO}/(\text{TFeO} + \text{MgO})$ 值、MALI 指数(即 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO}$ 值)、 A/CNK 指数。 $\text{SiO}_2 - \text{TFeO}/(\text{TFeO} + \text{MgO})$ 判别图解(图 10-a)显示,黄岗和莫古吐成矿花岗岩落入铁质花岗岩区域,较高的 $\text{TFeO}/(\text{TFeO} + \text{MgO})$ 值反映出伸展环境下,相对无水的、还原性质的岩浆源区。在 $\text{SiO}_2 - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO})$ 图解(图 10-b)中,成矿花岗岩落入钙-碱性—碱-钙性范围中,结合其 K_2O 含量(4.07% ~ 6.04%),表明花岗岩物质来源有地幔物质的参与。成矿花岗岩 A/CNK 指数显示其为准铝质—弱过铝质。因此,在 Forst et al.(2001) 的分类方案中,黄岗和莫古吐地区的铁锡矿成矿花岗岩属于碱-钙性至钙-碱性的铁质花岗岩,反映出花岗岩经历了较强的岩浆分异过程。

根据以上字母分类法,成矿花岗岩同时具有 I 型和 A 型花岗岩特点,但是高度分异演化的 I 型、A 型花岗岩主量元素及矿物相趋于共结点,具有相似的地球化学、矿物学特征(King et al., 1997, 2001)。这是因为,经历了高度演化岩浆分异作用的残余熔浆固相线温度大大降低,在最终的岩浆—热液过渡体系中发生强烈的熔体—流体作用,致使岩体中主、微量元素地球化学行为发生了很大变化(吴福元等, 2007),因此较难区分。根据 Frost et al.(2001) 提出的分类方法,成矿花岗岩为碱-钙性至钙-碱性的铁质花岗岩,表现出较强的岩浆分异过程。为此,以下内容通过探讨其分异演化特征来对成矿花岗岩进一步

分类。

前人对大兴安岭南段广泛发育的晚侏罗世—早白垩世花岗岩成因类型有不同的认识,多数研究认为其属于 A 型花岗岩(邵济安等, 2010),包括白音查干矿床的石英斑岩(姚磊等, 2017)、巴尔哲地区的钠长石花岗岩和钠闪石花岗岩(杨武斌等, 2011)、边家大院矿床的碱长花岗岩(A1 型)(王喜龙等, 2014)、黄岗矿床的钾长花岗岩和花岗斑岩(A1 型)(周振华等, 2010)、德勒哈达地区的钾长花岗岩(A2 型)(王金芳等, 2018a)、石匠山地区的二长花岗岩(A2 型)(王金芳等, 2018b)、努和特地区的正长花岗岩(A2 型)(王金芳等, 2017)、毛登矿床的斑状花岗岩(A2 型)(季根源等, 2022)等;少数属于 I 型花岗岩,如维拉斯托矿床石英斑岩(Liu et al., 2016)。另外,杨奇获等(2014)认为甘珠尔庙地区早白垩世花岗岩为 I-A 过渡型。虽然对花岗岩类型观点不完全一致,但研究者一致认为大兴安岭南段晚侏罗世—早白垩世花岗岩经历了高分异演化作用。

本次研究的样品中虽未发现锂云母、锂辉石、透锂长石、萤石、黄玉、电气石和磷灰石等高分异花岗岩特征矿物,但全岩微量元素分析显示,成矿花岗岩 Li 含量较高($9.84 \times 10^{-6} \sim 146 \times 10^{-6}$, 平均 32.45×10^{-6}),且前人研究发现该区域内产出有晶洞花岗岩,晶洞中也含有电气石和萤石,表明黄岗和莫古吐成矿花岗岩经历了长时间的岩浆分异演化(杨朝磊等, 2021)。此外,成矿花岗岩矿相学和主量元素特征显示,其矿物组成以石英、条纹长石和富钠斜长石为主,含有较少的暗色矿物,分异指数 DI 值为 92.4 ~

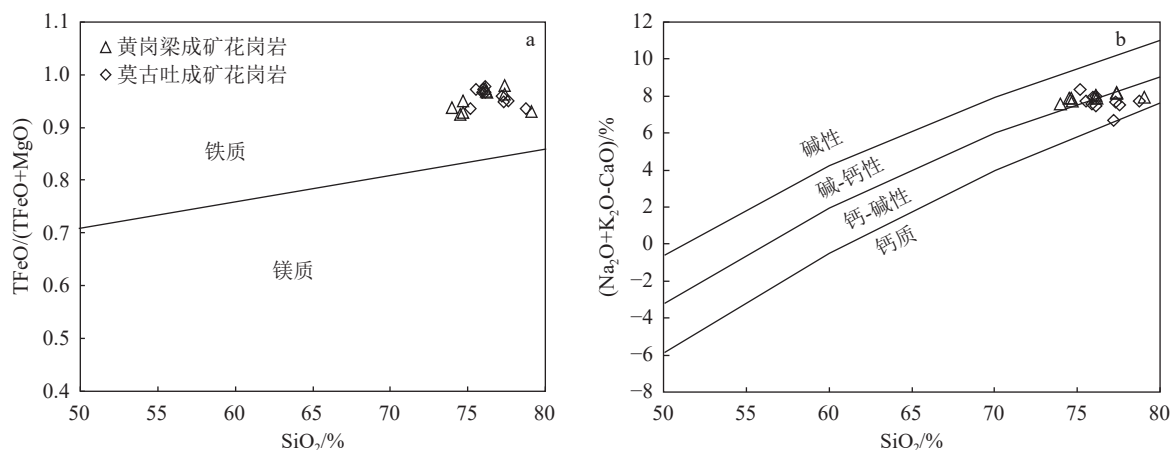


图 10 $\text{SiO}_2 - \text{TFeO}/(\text{TFeO} + \text{Mg})$ (a)和 $\text{SiO}_2 - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO})$ (b)判别图解(底图据 Frost et al., 2001)

Fig. 10 $\text{SiO}_2 - \text{TFeO}/(\text{TFeO} + \text{Mg})$ (a) and $\text{SiO}_2 - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO})$ (b) discriminant diagrams

97.5, 表明经历过强烈的岩浆分异作用。

关于高分异花岗岩的识别, 吴福元等(2017)进行了详细探讨, 对 Whalen et al.(1987) 总结的 $10000\text{Ga}/\text{Al}=2.6$ 与 $\text{Zr}=250 \times 10^{-6}$ 可作为 A 型与其他类型花岗岩分界的研究提出了新的认识。吴福元等(2017)认为在 $(10000\text{Ga}/\text{Al})-\text{Zr}$ 图解中, A 型花岗岩的演化趋势是从 A 型花岗岩区向高分异花岗岩区演化, I 型和 S 型花岗岩在分异过程中则是相反的(吴福元等, 2017)。(10000Ga/Al)–Zr 图解(图 11-a)显示, 黄岗和莫古吐成矿花岗岩样品点均落于 A 型花岗岩和分异的 I 型或 S 型花岗岩交界区, 但对同时代、同处大兴安岭南段的北大山和维拉斯托花岗岩、毛登花岗岩进行投点, 发现大兴安岭南段花岗岩类样品总体演化趋势表现为分异的 I/S 型花岗岩。前文讨论已表明成矿花岗岩不属于 S 型花岗岩, 因此按照该分类, 成矿花岗岩应为分异的 I 型花岗岩。在吴福元等(2017)的高分异花岗岩划分标准(图 11-b)中, 黄岗和莫古吐成矿花岗岩具有低的 Zr/Hf 和 Nb/Ta 值, 属于暗色矿物含量低($DI=(92.4 \sim 97.5)$)、经历过强烈岩浆分异作用的高分异花岗岩。

此外, 对于花岗岩分异程度的定量分析, Irber et al.(1999)研究发现, 稀土四分组效应与花岗岩的演化具有很强的相关性, 强烈的熔体-流体效应可以得到较强的四分组效应。黄岗和莫古吐成矿花岗岩 $\text{TE}_{1,3}$ 值为 $0.99 \sim 1.14$, 平均为 1.05 (表 2), 表现出一般程度的四分组效应, 表明成矿花岗岩经历了熔体-流体相互作用, 具有一定的分异程度。

综上, 按照字母分类法, 成矿花岗岩同时具有 A 型和 I 型花岗岩特征; 按照 Frost et al.(2001) 提出的“纯化学”分类法, 成矿花岗岩为碱-钙性至钙-碱性的铁质花岗岩, 经历了较强的岩浆分异过程; 前人研究显示, 高度分异的 A 型和 I 型花岗岩的主量元素及矿物相趋于共结点, 具有相似的地球化学、矿物学特征(King et al., 1997, 2001), 较难区分。因此, 笔者依据吴福元等(2017)和 Irber et al. (1999) 关于分异花岗岩的分类研究, 认为黄岗和莫古吐成矿花岗岩为高度分异的 I 型花岗岩。

5.3 成矿花岗岩岩浆分异探讨

黄岗和莫古吐成矿花岗岩都属于分异型花岗岩, 主量和微量元素地球化学特征显示, 成矿花岗岩具有较高的分异指数 DI (平均值为 94.95), 与岩石薄片镜下观察结果一致, 表明花岗岩中暗色矿物含量很少; 在 Harker 图解(图 8)中, 主量元素含量与 SiO_2 含量呈负相关性; 微量元素蜘蛛图(图 9-b)中成矿花岗岩富集 Rb、Th、Nd、Sm、Zr、Hf, 亏损 Eu、Ba、Sr、P、Nb、Ti, 都说明岩体经历了一系列的矿物分离过程。

Ba、Rb 作为强不相容元素, 主要以类质同像形式替代云母或钾长石中的 K, 但是 Rb 在云母和钾长石中的替代比在角闪石中更容易; Sr 主要替代斜长石中的 Ca, 也可一定程度替代钾长石中的 K; 磷灰石、榍石(富 Ti 矿物)结晶分离可导致花岗岩中 Nb、Ta、Ti 和 P 的亏损(Tiepolo et al., 2000; Pfänder et al., 2007; Stepanov et al., 2014)。

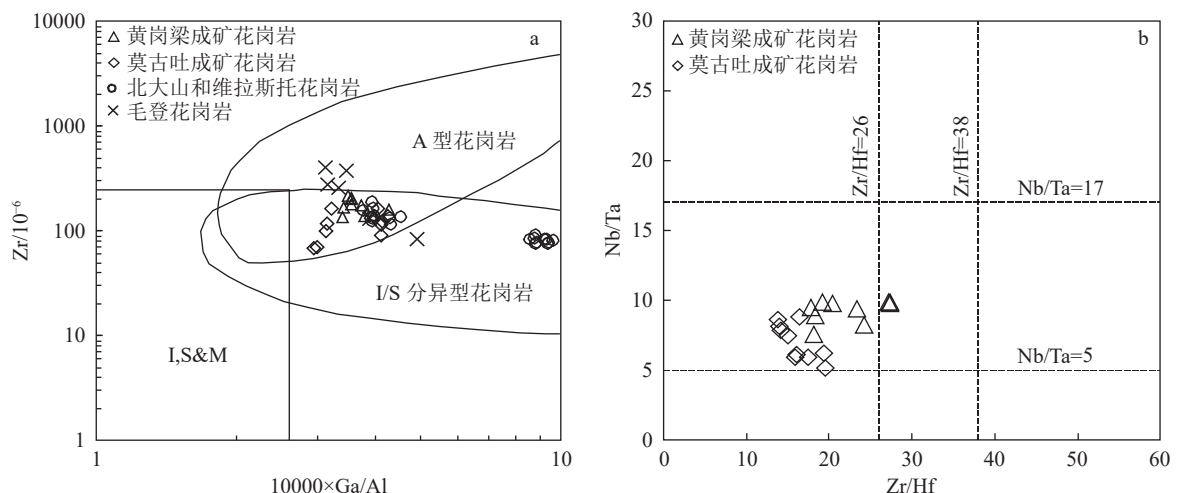


图 11 高分异花岗岩判别图解(判别界线据 Whalen et al., 1987; 吴福元等, 2017; 图 a 数据据武广等, 2021; 季根源等, 2022)

Fig. 11 Diagrams for distinguishing highly differentiated granites

岩浆分异过程会导致某些元素或元素比值的富集和亏损。Zr、Hf 主要富集在锆石中, Zr 饱和后的锆石分离结晶会使 Zr、Hf、Zr/Hf 降低(Watson et al., 1983; 武广等, 2021)。由图 11 可知, 黄岗和莫古吐成矿花岗岩的全岩 Zr 含量和 Zr/Hf 值随 SiO_2 含量增多而减小(图 12), 说明岩浆中 Zr 饱和, 低的 Zr 含量和 Zr/Hf 值反映岩浆演化经历了锆石分离结晶。

武广等(2021)应用瑞利分馏模型, 结合岩体中的微量元素含量及实验测定的相关元素在不同矿物相和熔体之间的分配系数进行定量模拟, 用于岩体岩浆分异作用过程判别, 本次在其研究的基础上对黄岗和莫古吐成矿花岗岩进行投图(图 13)。Sr-Ba(图 13-a)、Eu/Eu*-Ba(图 13-b)、Sr-Rb/Sr(图 13-c)和 Rb-Ba(图 13-d)显示, 岩体 Sr、Ba、Eu 的强烈亏损, 以及 Rb 的富集主要是由钾长石和斜长石的结晶分异作用造成的。 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ -Sc/Yb(图 12-e)显示, 黑云母是结晶分离的主要矿物之一, La-(La/Yb)_N图解(图 13-f)显示, 稀土元素的变化主要受独居石、褐帘石、磷灰石等副矿物的结晶分异影响较大, 这也与微量元素蜘蛛网图(图 9-b)中 Nb、Ta、Ti 和 P 的亏损特征相符。

黄岗和莫古吐成矿花岗岩稀土元素特征显示, $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 值随 Rb 含量上升、Eu/Eu* 值下降而逐渐降低(图 14)。也就是说, 轻、重稀土元素的分异是逐渐变小的, 而不是扩大, 这可能与岩浆分异过程中, 磷灰石和独居石的轻稀土元素分配系数更大有

关, 它们分异以后, 重稀土元素富集、轻稀土元素相对亏损, 造成 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 值降低, 暗示其为成矿花岗岩与小部分粒间熔体分离以后结晶的结果。

综上, 黄岗和莫古吐成矿花岗岩地球化学特征及岩浆演化趋势表明它们均属于分异型花岗岩, 岩浆演化过程中经历了碱性长石、石英、黑云母, 以及独居石、褐帘石、磷灰石等副矿物分异作用。

5.4 高分异花岗岩成矿远景

普遍认为高分异花岗岩具有成矿专属性, 这类花岗岩中分异最彻底的端元在矿床学界又被称为稀有金属或稀有元素花岗岩, 伴生矿产主要为稀有金属和稀土元素矿产(吴福元等, 2007)。在岩浆演化程度研究中, 笔者利用黄岗和莫古吐铁锡矿成矿花岗岩的演化程度与各元素的协变图解(图 15), 用 Eu/Eu* 值表示分离结晶的程度, Eu/Eu* 值越小表示岩浆演化越靠后期。从协变图解可以看出, 随着 Eu/Eu* 值下降, Th、U、Nb、Ta、Yb 均具有不同程度的富集趋势。其中 Rb 随 Eu/Eu* 下降变化不明显, Th、U、Nb、Ta、Yb 与 Eu/Eu* 呈明显的负相关, 表明随岩浆演化, U、Th、Nb、Ta、Yb 出现明显富集。Th、U、Nb、Ta、Rb、Yb 是铅锌矿化、铀钍矿化、铌钽矿化、Rb 矿化、重稀土矿化的主要矿化元素, Th、U、Nb、Ta、Rb、Yb 与 Eu/Eu* 协变图解(图 15)能够反映成矿元素随花岗岩演化的富集倾向。表明随岩浆演化, 有铀钍矿化、铌钽矿化和重稀土矿化趋势, 其中重稀土矿化趋势也与前文所述的轻、重稀土元素随岩浆

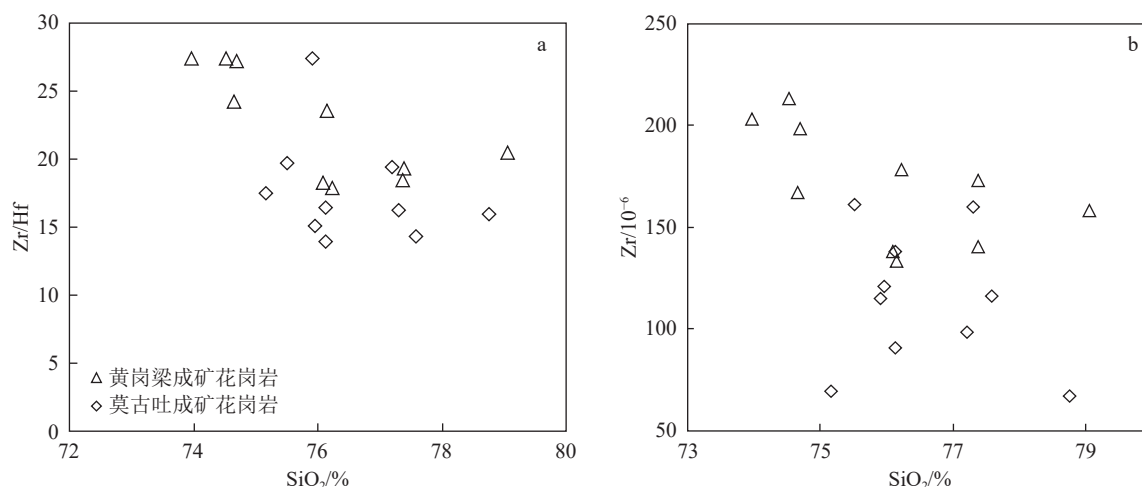


图 12 黄岗和莫古吐成矿花岗岩 SiO_2 -Zr/Hf(a)和 SiO_2 -Zr 协变图(b)

Fig. 12 SiO_2 -Zr/Hf (a) and SiO_2 -Zr (b) covariant diagrams of ore-forming granites in Huanggang and Mogutu deposits

演化分异程度减小相符(图 14)。表明黄岗和莫古吐成矿花岗岩的高度岩浆分异演化对 U、Th、Nb、Ta、HREE 的富集有利,对铀钍矿化、铌钽矿化和重稀土矿化较有利。因此,大兴安岭南段高分异的花岗岩可能与 U-Nb-Ta-REE 成矿远景有重要联系。

为进一步研究花岗岩与 U-Nb-Ta-REE 成矿远景的关系,笔者结合找矿实践,收集了前人利用物探、遥感、化探等手段成功的找矿发现(表 3)。

大兴安岭南段炒米房地区开展的铀矿勘查工作

中,通过 1:1 万伽玛能谱测量,在区内圈定出 1 处铀异常晕和 1 处钍异常晕:铀异常晕位于玄武岩与花岗岩接触带,2033 号异常点判定为铀异常;钍异常晕位于工作区北部花岗岩中(于兵等, 2022)。铀矿化赋存在不整合面附近的汉诺坝组盖层中,该不整合面由燕山期花岗岩与上覆的新近系汉诺坝组组成,铀矿化呈层状,延伸较远且与不整合面大体平行,这表明花岗岩为铀矿化提供了重要的物质来源和赋存空间,两者在成矿过程中紧密相关。如在钻

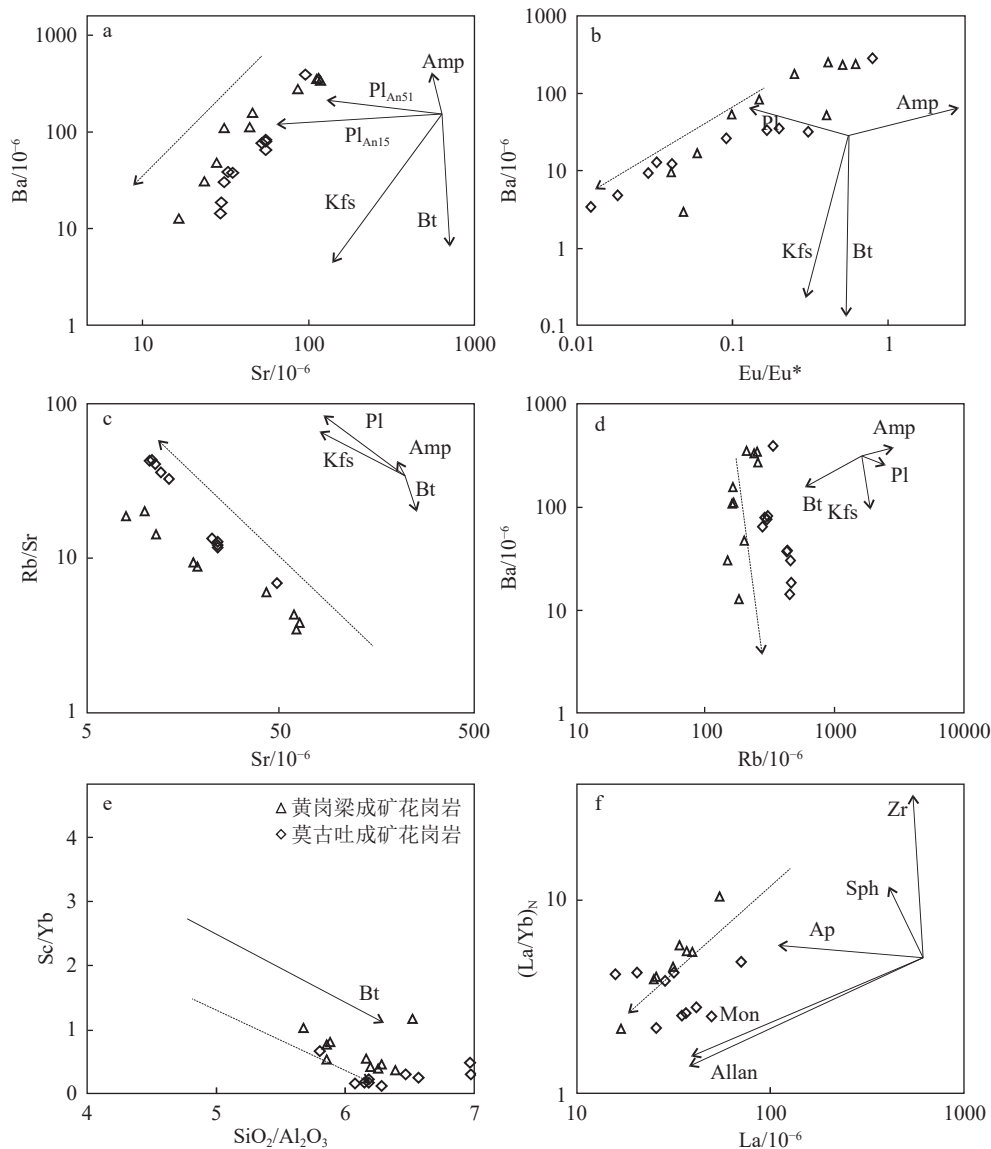
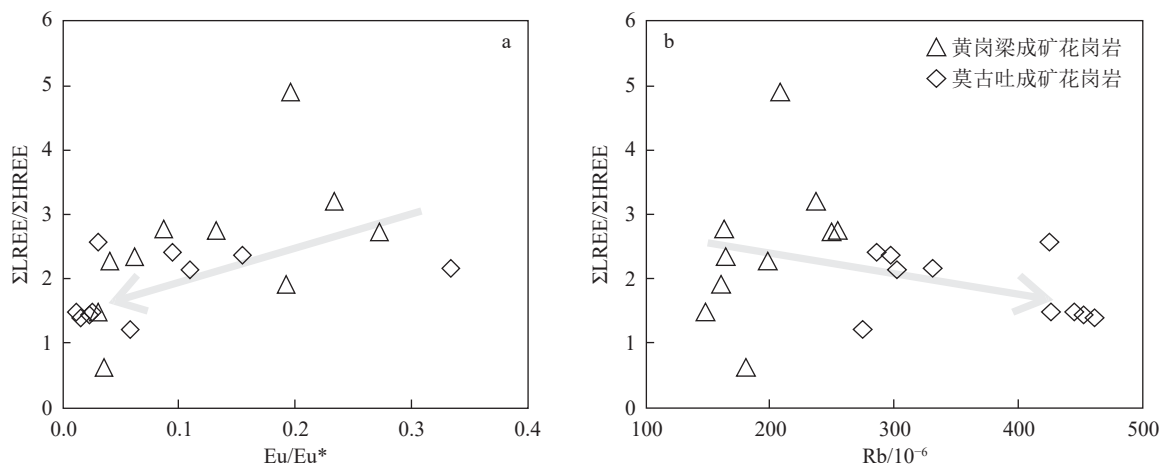


图 13 黄岗和莫古吐成矿花岗岩岩浆分异判别图解(底图据 Blundy and Shimizu, 1991; Ewart et al., 1994; Wu et al., 2003; Janoušek et al., 2004; Yang et al., 2012; Zhang et al., 2013)

Fig. 13 Crystal differentiation discrimination diagrams of ore-forming granites in Huanggang and Mogutu deposits

Auan—褐帘石; Amp—角闪石; Ap—磷灰石; Bt—黑云母; kfs—钾长石; Mon—独居石;
Pl_{An15}—斜长石 (An=15); Pl_{An51}—斜长石 (An=51); Sph—榍石; Zr—锆石

图 14 黄岗和莫古吐成矿花岗岩 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 值与 Eu/Eu^* 、Rb 协变图解Fig. 14 Covariant diagrams of $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ values vs. Eu/Eu^* and Rb of ore-forming granites in Huanggang and Mogutu deposits

孔 ZK01 中, 铀工业矿体产于黑云母花岗岩不整合面上的玄武岩盖层中, 直接证明了这种关系。通过伽玛能谱测量, 在研究区内圈定出 1 处钍异常晕, 位于工作区北部的花岗岩中, 且 $\text{Th}/\text{U} > 10$ 。这清晰地显示出钍异常晕与花岗岩在空间上的高度重合, 说明花岗岩是钍异常的重要载体, Th 元素在花岗岩中相对富集。该区内的成矿花岗岩为黑云母花岗岩, 从地层关系看, 侵入上侏罗统满克头鄂博组, 又被新近系汉诺坝组玄武岩不整合覆盖, 这种地层的侵入和覆盖关系明确了黑云母花岗岩的形成时代为晚侏罗世, 与黄岗和莫古吐铁锡矿成矿花岗岩的形成时代早白垩世相近。炒米房地区位于大兴安岭南段, 处于古生代古亚洲构造域与中生代滨西太平洋构造域转换叠加区域, 黄岗和莫古吐地区同样受这两大构造域影响, 古亚洲洋闭合、板块碰撞及滨西太平洋构造域的伸展、俯冲作用, 在这几个地区均引发岩浆上侵, 形成具有相似构造背景的花岗岩。本次研究显示, 高硅高分异花岗岩在形成过程中, 成矿元素能够得到较大程度的富集, 随着花岗岩侵入碳酸盐岩围岩, 花岗岩浆快速降温结晶, 花岗岩岩浆中的成矿热液强烈饱和并从中萃取成矿元素, 成矿热液在运移过程中与碳酸盐岩围岩发生化学反应形成砂卡岩, 促使成矿元素沉淀形成砂卡岩型矿化。黄岗和莫古吐铁锡矿成矿花岗岩对 U、Th、Nb、Ta、HREE 等元素也表现出富集作用, 尽管目前只发现了锡铁钨矿化, 外围的 U、Th、Nb、Ta、HREE 矿化同样值得重视。本区域的其他岩体, 如炒米房地区的

黑云母花岗岩在结晶分异过程中也可能对 U、Th、Nb、Ta、HREE 等元素的富集起到重要作用, 为铀等矿化提供条件。

大兴安岭南段黄岗地区开展的综合遥感、物探、化探等多源信息研究中, 通过主成分分析、波段比值等技术, 成功提取出铁染、羟基和硅化蚀变信息(荆凤, 2005)。借助 ArcGIS 平台对遥感、地质、物探、化探、矿产等多源数据进行综合分析, 发现矿化蚀变异常主要分布在二叠纪林西组及围岩与花岗岩体的接触带, 这暗示花岗岩与周围地层的相互作用可能促进了成矿元素的迁移和富集。化探信息显示, Cu、Pb、Zn、Sn 元素对矿化异常有指示作用。该研究中 Sn 的矿化异常与黄岗和莫古吐铁锡矿的 Sn 可能都是受高分异花岗岩与围岩作用的影响而富集。文中虽然未提及 U、Nb、Ta、REE 元素, 但可推测在相似地质条件下, 这些元素的地球化学异常可能与黄岗和莫古吐铁锡矿成矿花岗岩相似, 与 U-Nb-Ta-REE 成矿存在某种联系。荆凤(2005)研究的黄岗地区, 与成矿相关的花岗岩为燕山期花岗岩, 与本次研究的成矿花岗岩属于同一构造背景下时代相近的花岗岩, 遥感和化探综合指示的找矿远景区也进一步验证了大兴安岭南段经历分离结晶的花岗岩对 U-Nb-Ta-REE 成矿的指示意义。

吕耿毅等(2025)通过野外地质调查及分析岩体、已有矿床、矿化蚀变的关系, 提出了大兴安岭南段找矿靶区。研究指出, 后卜河—马场地区银铜子-青根沟矿带、小大川-后卜河矿带和羊场-馒头沟矿

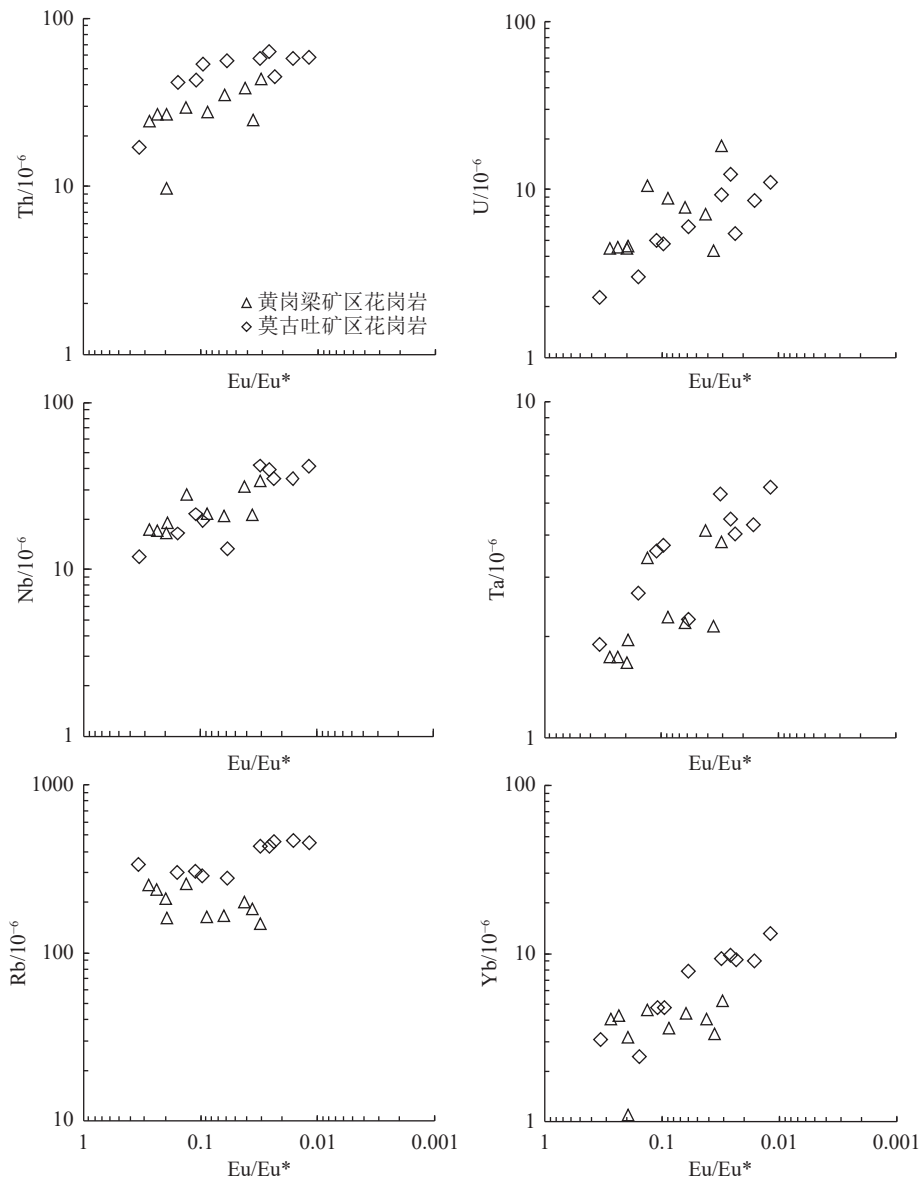


图 15 黄岗和莫古吐成矿花岗岩成矿元素 Pb、U、Th、Ta、Rb、Yb 与 Eu/Eu^* 值协变图解

Fig. 15 Covariation diagram of Pb, U, Th, Ta, Rb, Yb values to Eu/Eu^* values of ore-forming granites in Huanggang and Mogutu deposits

带 3 条成矿带, 分布在燕山晚期胡都格绍荣高演化岩体的内外接触带中。并且, 后卜河银铅锌矿床的北部和东部大面积铁锰帽分布地区具有较好的找矿前景, 除铜、铅、锌、银外, 还具有钼、锡、萤石等矿产的找矿前景。燕山晚期胡都格绍荣岩体岩性主要为黑云母花岗岩、细粒斑状黑云母花岗岩、黑云母花岗岩斑岩等, 具有与黄岗和莫古吐铁锡矿成矿花岗岩相近的成岩年龄和地球化学特征, 其成岩年龄为 $129.9 \pm 1.4 \text{ Ma}$ ($MSWD=0.91$), 富集 U、Th、Rb、Cs 和 LREE 元素(李鹏川等, 2016)。这表明, 大兴安岭南

段不同区域的成矿作用可能受相似的地质过程控制, 即燕山晚期岩浆活动形成的花岗岩及其分异演化在区域成矿中起到了关键作用。

此外, 区域上, 大兴安岭地区也有其他与花岗质岩浆有关的矿床, 例如 701 小型铀矿和维拉斯托矿床。701 铀矿中潜火山岩亚型赋矿岩性为花岗斑岩(李长华等, 2018); 维拉斯托矿床矿体下部的石英斑岩和矿区南侧北大山花岗岩基有高于上地壳平均含量的 Rb 元素(刘翼飞等, 2014); 坤都冷—西哲里木地区早白垩世钠铁闪石花岗岩的稀有稀土金属成矿

表 3 大兴安岭南段物探、遥感、化探等手段下的找矿发现

Table 3 Mineral exploration discoveries obtained through geophysical exploration, remote sensing, geochemical exploration and other means in the southern segment of the Daxing'anling Mountains

区域/矿种	主要技术手段	成矿花岗岩特征	成矿花岗岩与矿的关系	资料来源
炒米房地区铀矿	物探	燕山期黑云母花岗岩、花岗斑岩等	铀矿化赋存在不整合面附近, 与燕山期花岗岩有关, 钍矿化为与燕山期花岗岩中	于兵等, 2022
黄岗地区铜、锡、铅、锌、银多金属矿	遥感	燕山期花岗岩	有色金属成矿与燕山期含锡中-酸性花岗岩浆侵入于二叠系含锡多金属地层有关	荆凤, 2005
后卜河-马场地区钼、锡、铜、铅、锌、银多金属矿	野外地质调查	燕山晚期高演化的黑云母花岗岩、细粒斑状黑云母花岗岩和黑云母花岗斑岩	矿产围绕燕山晚期胡都格绍荣岩体分布, 岩体内部和不同距离外发育不同类型矿化	吕耿毅等, 2025
黄岗和莫古吐矿区铁锡矿, 具有铀矿、铌钽矿、重稀土矿找矿潜力	地球化学、矿物学研究	燕山期高分异的碱长花岗岩或正长花岗岩	黄岗和莫古吐铁锡矿矿体产于燕山期花岗岩与地层接触带矽卡岩中	本文

过程经历了源区富集、岩浆分异演化富集及热液交代富集 3 个阶段, 最终导致 Nb 和 REE 元素富集成矿(田丽, 2024)。全国范围内, 相对于研究区大兴安岭南段, 中国华南地区稀有金属花岗岩矿床的研究较多, 例如雅山粟木和宜春铌钽矿矿床(李洁等, 2013; 杨泽黎等, 2014)、大吉山钨-锡-铌-钽矿床(华仁民等, 2007)、灵山松树岗钽铌矿(龙细友等, 2021)等, 前人研究显示这些矿床成矿均与高度演化的花岗岩有关。这些研究表明, 大兴安岭南段地区除大量产出的钨-锡-银-锌多金属矿床外, 也具有寻找铀矿、铌钽矿、稀土等矿产的潜力。

物探研究也表明, 炒米房地区的燕山晚期花岗岩有铀矿的找矿潜力(于兵等, 2022); 遥感和化探研究显示, 黄岗地区, 燕山期花岗岩浆和二叠系接触部位为锡矿找矿远景区(荆凤, 2005); 前人野外地质调查显示, 后卜河—马场地区的胡都格绍荣高演化岩体内外接触带中具有钼、锡的找矿潜力, 且胡都格绍荣高演化岩体有富集 U、Th、Rb、Cs 和轻稀土元素的特征(吕耿毅等, 2025)。空间位置上, 炒米房地区位于黄岗和莫古吐铁锡矿南部约 200 km 处, 后卜河—马场地区、黄岗地区与黄岗-莫古吐铁锡矿同处于黄岗-甘珠尔庙成矿带, 均属于大兴安岭南段; 时间关系上, 均为燕山期花岗岩类。因此, 笔者认为, 大兴安岭南段燕山晚期的花岗岩尤其是高度分异演化花岗岩的分布区域, 可能为 U-Nb-Ta-REE 的找矿远景区。

6 结 论

(1)黄岗成矿花岗岩成岩年龄为 131.8 ± 2.0 Ma,

为早白垩世; 莫古吐成矿花岗岩成岩年龄为 137.1 ± 1.3 Ma, 为早白垩世。黄岗和莫古吐花岗岩成岩年龄与研究区锡多金属矿床成矿时代一致, 应为 150~120 Ma。

(2)黄岗和莫古吐成矿花岗岩发育文象结构, 且在蚀变的碱性长石中有蠕虫状石英, 表明具有最低温共熔结晶特点, 主量、微量和稀土元素显示具有高硅、富碱和较高的分异指数, 富集 Rb、Th、Nd、Sm、Zr、Hf、Ta, 亏损 Ba、Sr、P、Nb、Ti, 轻、重稀土元素分异较小, 并具有较小的 Nb/Ta 值、Zr/Hf 值和较大的 Rb/Sr 值、稀土元素四分组效应、强烈负 Eu 异常和较高的结晶温度, 指示黄岗和莫古吐成矿花岗岩为高分异花岗岩。

(3)大兴安岭南段燕山晚期的花岗岩尤其是高度分异演化花岗岩的分布区域, 可能有 U-Nb-Ta-REE 的找矿潜力。

致谢: 宋经纬在本文资料搜集提供了帮助, 在此表示由衷的感谢; 同时感谢审稿专家给出的建设性意见。

References

Bai D M, Liu G H. 1996. Discussion on the comprehensive geophysical-geochemical prospecting model of the Haobugao Pb-Zn-Cu-Sn deposit[J]. Nonferrous Metals Mineral Exploration, (6): 42-48(in Chinese with English abstract).
Blundy J D, Shimizu N. 1991. Trace element evidence for plagioclase recycling in calc-alkaline magmas[J]. Earth and Planetary Science Letters, 102(2): 178-197.
Chen Y, Han Y, Xu B, et al. 2021. Geochemical characteristics and genesis of red fluorite from the Huanggangliang Fe-Sn deposit in Inner Mongolia[J]. Acta Petrologica Sinica, 37(12): 3869-3879(in Chinese

- with English abstract).
- Clemens J D. 1997. Petrogenesis and experimental petrology of granitic rocks[J]. *Mineralogical Magazine*, 61(1): 149–150.
- Ewart A, Griffin W L. 1994. Application of proton-microprobe data to trace-element partitioning in volcanic rocks[J]. *Chemical Geology*, 117(1): 251–284.
- Frost B R, Barnes C G, Collins W J, et al. 2001. A geochemical classification for granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 42(11): 2033–2048.
- Gu Y C, Chen R Y, Du J Y, et al. 2025. Petrogenesis and tectonic implications of the Early Cretaceous syenogranite in Huanggangliang area, southern Great Hinggan Range: Evidence from zircon U–Pb ages, petrogeochemistry and Sr–Nd–Pb isotopes[J]. *Geological Bulletin of China*, 44(1): 91–116.
- Hou K J, Li Y H, Tian Y R. 2009. In-situ Zircon U–Pb Dating by LA–MC–ICP–MS[J]. *Mineral Deposits*, 28(4): 481–492(in Chinese with English abstract).
- Hua R M, Zhang W L, Gu S Y, et al. 2007. Comparison between REE granite and W - Sn granite in the Nanling region, South China, and their mineralizations[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2321–2328(in Chinese with English abstract).
- Huang S Q, Lin D F, Yan R X, et al. 1986. The Dajing Sn–Ag–Cu Deposit and Its Genesis[J]. *Geology and Exploration*, (6): 28–32(in Chinese with English abstract).
- Irber W. 1999. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(3): 489–508.
- Janoušek V, Finger F, Roberts M, et al. 2004. Deciphering the petrogenesis of deeply buried granites: whole-rock geochemical constraints on the origin of largely undepleted felsic granulites from the Moldanubian Zone of the Bohemian Massif[J]. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 95: 141–159.
- Ji G Y, Jiang S H, Zhang L S, et al. 2021a. Petrogenetic and metallogenic significance of the Alubaoge Mountain pluton in the Maodeng mining area, Southern Da Hinggan Mountains: Mineralogical evidence from zircon, hornblende and biotite[J]. *Mineral Deposits*, 40(3): 449–474(in Chinese with English abstract).
- Ji G Y, Jiang S H, Li G F, et al. 2021b. Magmatic constraints on mineralization of the Maodeng Sn–Cu Deposit in Southern Da Hinggan Mountains: Geochronological, geochemical and Sr–Nd–Pb isotopic evidence[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 45(4): 681–704(in Chinese with English abstract).
- Ji G Y, Jiang S H, Zhang L S, et al. 2022. Petrogenetic age and geochemical characteristics of highly fractionated alkali-feldspar granite in Maodeng, Southern Da Hinggan Mountains[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 38(3): 855–882(in Chinese with English abstract).
- Jiang S H, Liang Q L, Liu Y F, et al. 2012. Zircon U–Pb ages of the magmatic rocks occurring in and around the Daingeo Cu–Ag–Sn polymetallic deposit of Inner Mongolia and constrains to the ore-forming age[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2): 495–513(in Chinese with English abstract).
- Jiang S H, Zhang L L, Liu Y F, et al. 2018. Metallogeny of Xing–Meng Orogenic Belt and some related problems[J]. *Mineral Deposits*, 37(4): 671–711 (in Chinese with English abstract).
- King P L, White A J, Chappell B W, et al. 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia[J]. *Journal of Petrology*, 38(3): 371–391.
- King P L, Chappell B W, Allen C M, et al. 2001. Are A-type granites the high-temperature felsic granites? Evidence from fractionated granites of the Wangrah Suite[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48(4): 501–514.
- Li C H, Wu Y Q, Wang S C, et al. 2018. Metallogenic conditions and prospect prediction of volcanic-type uranium deposits in the central-southern Da Hinggan Mountains[J]. *Uranium Geology*, 34(6): 329–336(in Chinese with English abstract).
- Li H, Wu J H, Sun W B, et al. 2023. Research Progress and Prospect of Cu–Sn Composite Mineralization[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 97(1): 262–279(in Chinese with English abstract).
- Li J, Huang X L. 2013. Magmatic Evolution and Ta–Nb Enrichment Mechanism of the Yashan Granite in Jiangxi Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(12): 4311–4322(in Chinese with English abstract).
- Li J Y, Zhang J, Yang T N, et al. 2009. Crustal tectonic division and evolution of the Southern North Asia Orogenic Belt and adjacent areas[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 39(4): 584–605(in Chinese with English abstract).
- Liang X J, Qiao L. 1991. Experimental study on metasomatite and iron ore in volcanic rocks[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, (4): 300–314,385(in Chinese with English abstract).
- Liu Y F, Fan Z Y, Jiang H C, et al. 2014. Porphyry–hydrothermal vein-type metallogenic system in the Weilasituo–Bairendaba area, Inner Mongolia[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 88(12): 2373–2385(in Chinese with English abstract).
- Liu Y F, Jiang S H, Bagas L. 2016. The genesis of metal zonation in the Weilasituo and Bairendaba Ag–Zn–Pb–Cu–(Sn–W) deposits in the shallow part of a porphyry Sn–W–Rb system, Inner Mongolia, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 75: 150–173.
- Liu Y J, Zhang X Z, Jin W, et al. 2010. Late Paleozoic regional tectonic evolution in Northeast China[J]. *Geology in China*, 37(4): 943–951(in Chinese with English abstract).
- Liu Y Q. 1996a. Geology and genesis of the Maodeng Sn–Cu deposit in Inner Mongolia[J]. *Mineral Deposits*, (2): 133–143(in Chinese with English abstract).
- Liu Y Q. 1996b. Metallogenic zoning and genetic discussion of the Maodeng Sn–Cu deposit[J]. *Mineral Deposits*, (4): 31–42(in Chinese with English abstract).
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, et al. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA–ICP–MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 257(1/2): 34–43.
- Long X Y, Chen Z Q, Liu Z J, et al. 2021. Comparative analysis of metallogenic characteristics between the 414 and Songshugang Ta–Nb deposits in Yashan, Jiangxi[J]. *Journal of East China University of Technology (Natural Science Edition)*, 44(3): 239–248(in Chinese with English abstract).
- Loiselle M C, Wones D R. 1979. Characteristics and origin of anorogenic

- granites[J]. *Geol Soc Am Abstr With Progr*, 11: 468.
- Lyu G Y, Fu G Q, Li Y X, et al. 2025. Geological characteristics and prospecting prospects of mineralization in the Houbuhe-Machang area of the southern section of the DaHingganLing[J]. *World Nonferrous Metals*, (2): 56–58(in Chinese with English abstract).
- Ma X H, Chen B. 2009. Geological characteristics, geochemistry of ore-bearing porphyry and zircon Hf isotopes of the Aolunhua Mo deposit in Inner Mongolia[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 29(S1): 19–20(in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Zhou Z H, Wu G, et al. 2013. Metallogenic regularity and metallogenic series of deposits in Inner Mongolia and adjacent areas[J]. *Mineral Deposits*, 32(4): 716–730(in Chinese with English abstract).
- Mei W, Lü X B, Cao X F, et al. 2015. Ore genesis and hydrothermal evolution of the Huanggang skarn iron-tin polymetallic deposit, southern Great Xing'an Range: Evidence from fluid inclusions and isotope analyses[J]. *Ore Geology Reviews*, 64: 239–252.
- Nie F J, Wen Y W, Zhao Y Y, et al. 2007. Geological characteristics and prospecting direction of the Baiyinchagan Ag-polymetallic mineralization area in Inner Mongolia[J]. *Mineral Deposits*, (2): 213–220(in Chinese with English abstract).
- Papu D, Maniar P M, Piccoli P. 1989. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101: 635–643.
- Peccerillo A, Taylor S R. 1976. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63–81.
- Pan L J, Sun E S. 1992. Geological characteristics of the Jiawula Ag-Pb-Zn deposit in Inner Mongolia[J]. *Mineral Deposits*, (1): 45–53(in Chinese with English abstract).
- Pfänder J A, Münker C, Stracke A, et al. 2007. Nb/Ta and Zr/Hf in ocean island basalts—Implications for crust–mantle differentiation and the fate of Niobium[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 254(1): 158–172.
- Stepanov A S, Mavrogenes J A, Meffre S, et al. 2014. The key role of mica during igneous concentration of tantalum[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 167(6): 1–8.
- Shao J A, Mu B L, Zhu H Z, et al. 2010. Deep sources and settings of Mesozoic metallogenic materials in the central–southern Da Hinggan Mountains[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(3): 649–656(in Chinese with English abstract).
- She H Q, Li H H, Li J W, et al. 2009. Metallogenic regularity and prospecting direction of Cu–Pb–Zn–Au–Ag polymetallic deposits in the central–northern Da Hinggan Mountains, Inner Mongolia[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 83(10): 1456–1472(in Chinese with English abstract).
- Sun S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313–345.
- Tian L. 2024. Early Cretaceous magmatism and its constraints on rare and rare earth metal mineralization in Kunduleng-Xizhelimu area, Southern Great Xing'an Range[D]. Doctoral Dissertation of Jilin University: 111–119 (in Chinese with English abstract).
- Tiepolo M, Vannucci R, Oberti R, et al. 2000. Nb and Ta incorporation and fractionation in titanian pargasite and kaersutite: crystal–chemical constraints and implications for natural systems[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 176(2): 185–201.
- Wang C M, Zhang S T, Deng J, et al. 2007. Sedex origin of stratiform skarn in the Huanggangliang Sn–Fe–polymetallic deposit, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, (5): 409–417(in Chinese with English abstract).
- Wang J F, Li Y J, Li H Y, et al. 2017. LA–ICP–MS zircon U–Pb age and geological significance of Early Cretaceous A–type granite in Nuhete, Xiwuqi, Inner Mongolia[J]. *Geological Bulletin of China*, 36(8): 1343–1358(in Chinese with English abstract).
- Wang J F, Li Y J, Li H Y, et al. 2018a. Formation age of Early Cretaceous A–type granite in Deleha, Xiwuqi, Inner Mongolia: Evidence from zircon U–Pb dating[J]. *Geology in China*, 45(1): 197–198(in Chinese with English abstract).
- Wang J F, Li Y J, Li H Y, et al. 2018b. Zircon U–Pb age and tectonic setting of Late Jurassic–Early Cretaceous A–type granite in Shijiashan, Xiwuqi, Inner Mongolia[J]. *Geological Bulletin of China*, 37(Z1): 382–396(in Chinese with English abstract).
- Wang L J, Wang J B, Wang Y W, et al. 2001. Fluid–melt inclusions in fluorite from the Huanggangliang skarn–type Fe–Sn deposit and their implications for genesis[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, (2): 287(in Chinese with English abstract).
- Wang L J, Wang J B, Wang Y W, et al. 2002. Rare earth element geochemistry of the Huanggangliang skarn–type Fe–Sn deposit, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, (4): 575–584(in Chinese with English abstract).
- Wang X L, Liu J J, Zhai D G, et al. 2014. Isotope geochemical characteristics and source of metallogenic materials of the Bianjiadayuan Ag–polymetallic deposit, Linxi, Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 41(4): 1288–1303(in Chinese with English abstract).
- Watson E B, Harrison T M. 1983. Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2): 295–304.
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. 1987. A–type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407–419.
- Wu F Y, Jahn B M, Wilde S A, et al. 2003. Highly fractionated I-type granites in NE China (I): Geochronology and petrogenesis[J]. *Lithos*, 66(3/4): 241–273.
- Wu F Y, Li X H, Yang J H, et al. 2007. Some issues in granite genetic research[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217–1238(in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Liu X C, Ji W Q, et al. 2017. Identification and study of highly fractionated granites[J]. *Science China Earth Sciences*, 60(7): 1129–1149(in Chinese with English abstract).
- Wu G, Liu R L, Chen G Z, et al. 2021. Metallogenesis of the Weilasituo rare metal–Sn–polymetallic deposit, Inner Mongolia: Insights from fractional crystallization of granitic magma[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(3): 637–664(in Chinese with English abstract).
- Xie C B, Liu M. 2001. Geological characteristics and genetic type of the Chaganbulagen Ag–Pb–Zn (Au) deposit[J]. *Global Geology*, (1): 25–29(in Chinese with English abstract).

- Xu B, Chen B. 1997. Structure and evolution of the Middle Paleozoic Orogenic Belt between the North China and Siberian Plates in Northern Inner Mongolia[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 40(3): 227–232(in Chinese with English abstract).
- Xu B, Zhao P, Bao Q Z, et al. 2014. Preliminary division of Pre-Mesozoic tectonic units in the Xingmeng Orogenic Belt[J]. Acta Petrologica Sinica, 30(7): 1841–1857(in Chinese with English abstract).
- Xu Q, Tang G, Zou T, et al. 2020. Metallogenic system and target prediction of the Haobugao Sn-polymetallic ore field in Balinzuoqi, Southern Da Hinggan Mountains[J]. Geology and Exploration, 56(2): 265–276(in Chinese with English abstract).
- Xu W L, Sun C Y, Tang J, et al. 2019. The basement properties and tectonic evolutionary process of the Xingmeng Orogenic Belt[J]. Earth Science, 44(5): 1620–1646(in Chinese with English abstract).
- Yang C L, Yang S S, Zhu X Y, et al. 2019. Geological characteristics and genetic type of the Mogutu Fe–Sn deposit, Inner Mongolia[J]. Mineral Exploration, 10(3): 467–480(in Chinese with English abstract).
- Yang J H, Peng J T, Zhao J H, et al. 2012. Petrogenesis of the Xihuashan Granite in Southern Jiangxi Province, South China: Constraints from Zircon U–Pb Geochronology, Geochemistry and Nd Isotopes[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 86(1): 131–152.
- Yang Q D, Guo L, Wang T, et al. 2014. Ages, petrogenesis, provenance and tectonic settings of two phases of Late Mesozoic granites in the Ganzhuo Temple area, Central–Southern Da Hinggan Mountains[J]. Acta Petrologica Sinica, 30(7): 1961–1981(in Chinese with English abstract).
- Yang W B, Su W C, Liao S P, et al. 2011. Melt and melt–fluid inclusions in the Baerzhe alkaline granite: Insights into magma–hydrothermal transition[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(5): 1493–1499(in Chinese with English abstract).
- Yang Z L, Qiu J S, Xing G F, et al. 2014. Petrogenesis and evolution of the Yashan granite pluton in Yichun, Jiangxi, and their constraints on mineralization[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 88(5): 850–868(in Chinese with English abstract).
- Yang Z L, Zou T, Zhu X Y, et al. 2021. Chronology and geochemistry of Mogutu granite in Inner Mongolia and its effect of crustal extension and thinning[J]. Geology in China, 48(1): 247–263 (in Chinese with English abstract).
- Yao L, Lyu Z C, Ye T Z, et al. 2017. Zircon U–Pb ages, geochemistry and Nd–Hf isotopes of quartz porphyry from the Baiyinchagan Sn–polymetallic deposit, Southern Da Hinggan Mountains, Inner Mongolia, and their geological significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 33(10): 3183–3199(in Chinese with English abstract).
- Ye J, Liu J M, Zhang A L, et al. 2002. Petrological evidence for sedex mineralization: Examples from the Huanggang and Dajing deposits in Southern Da Hinggan Mountains[J]. Acta Petrologica Sinica, (4): 585–592, 609–610(in Chinese with English abstract).
- Yu B, Wang C D, Yu H L, et al. 2022. Application of comprehensive geophysical survey to uranium prospecting in the Chaomifang area, Southern Da Hinggan Mountains[J]. Geology and Exploration, 58(5): 1070–1081(in Chinese with English abstract).
- Zhai D G, Liu J J, Zhang H Y, et al. 2014. S–Pb isotopic geochemistry, U–Pb and Re–Os geochronology of the Huanggangliang Fe–Sn deposit, Inner Mongolia, NE China[J]. Ore Geology Reviews, 59: 109–122.
- Zhai D G, Liu J J, Zhang H Y, et al. 2018. A magmatic-hydrothermal origin for Ag–Pb–Zn vein formation at the Bianjiadayuan deposit, inner Mongolia, NE China: Evidences from fluid inclusion, stable (C–H–O) and noble gas isotope studies[J]. Ore Geology Reviews, 101: 1–16.
- Zhang D H, Wei J H, Fu L B, et al. 2013. Formation of the Jurassic Changboshan–Xieniqishan highly fractionated I - type granites, northeastern China: Implication for the partial melting of juvenile crust induced by asthenospheric mantle upwelling[J]. Geological Journal, 50(2): 122–138.
- Zhang D Q, Lei Y F, Luo T Y, et al. 1992. Mineralization Zoning and ore–fluid flow direction of the Baiyinnuoer Pb–Zn deposit[J]. Mineral Deposits, (3): 203–212(in Chinese with English abstract).
- Zheng F S, Cai H J, Zhang Z F. 2006. Discovery and prospecting significance of the super-large Bairendaba–Weilastuo Ag–Pb–Zn deposit, Inner Mongolia[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 30(1): 13–20,25(in Chinese with English abstract).
- Zhou Z H, Lyu L S, Feng J R, et al. 2010. Molybdenite Re–Os ages of the Huanggang skarn-type Sn–Fe deposit, Inner Mongolia, and their geological significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 26(3): 667–679(in Chinese with English abstract).
- Zhou Z H, Mao J W, Peter L. 2012. Geochronology and isotopic geochemistry of the A-type granites from the Huanggang Sn–Fe deposit, southern Great Hinggan Range, NE China: Implication for their origin and tectonic setting[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 49: 272–286.

附中文参考文献

- 白大明, 刘光海. 1996. 浩布高铅锌铜锡矿床地物化综合找矿模式探讨[J]. 有色金属矿产与勘查, (6): 42–48.
- 陈缘, 韩禹, 许博, 等. 2021. 内蒙古黄岗梁铁锡矿床中红色萤石的地球化学特征及成因探讨[J]. 岩石学报, 37(12): 3869–3879.
- 顾玉超, 陈仁义, 杜继宇, 鞠楠. 2025. 大兴安岭南段黄岗梁地区早白垩世正长花岗岩成因及构造启示: 锆石 U–Pb 年龄、岩石地球化学和 Sr–Nd–Pb 同位素证据[J]. 地质通报, 44(1): 91–116.
- 华仁民, 张文兰, 顾晟彦, 等. 2007. 南岭稀土花岗岩、钨锡花岗岩及其成矿作用的对比[J]. 岩石学报, 23(10): 2321–2328.
- 侯可军, 李延河, 田有荣. 2009. LA–MC–ICP–MS 锆石微区原位 U–Pb 定年技术[J]. 矿床地质, 28(4): 481–492.
- 黄世乾, 林达富, 晏汝逊, 等. 1986. 大井锡–银–铜矿床及其成因[J]. 地质与勘探, (6): 28–32.
- 江思宏, 梁清玲, 刘翼飞, 等. 2012. 内蒙古大井矿区及外围岩浆岩锆石 U–Pb 年龄及其对成矿时间的约束[J]. 岩石学报, 28(2): 495–513.
- 江思宏, 张莉莉, 刘翼飞, 等. 2018. 兴安造山带成矿规律及若干科学问题[J]. 矿床地质, 37(4): 671–711.
- 荆凤. 2005. 内蒙古大兴安岭南段多金属成矿带遥感多源信息综合研究[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文: 50–60.
- 季根源, 江思宏, 张龙升, 等. 2021a. 大兴安岭南段毛登矿区阿鲁包格山岩体成岩成矿意义 — 锆石、角闪石和黑云母矿物学证据[J]. 矿床地质, 40(3): 449–474.

- 季根源, 江思宏, 李高峰, 等. 2021b. 大兴安岭南段毛登 Sn-Cu 矿床岩浆作用对成矿制约: 年代学、地球化学及 Sr-Nd-Pb 同位素证据[J]. 大地构造与成矿学, 45(4): 681-704.
- 季根源, 江思宏, 张龙升, 等. 2022. 大兴安岭南段毛登高分异碱长花岗岩成岩时代与地球化学特征[J]. 岩石学报, 38(3): 855-882.
- 李长华, 吴燕清, 王世成, 等. 2018. 大兴安岭中南段火山岩型钼矿成矿条件及远景预测[J]. 铀矿地质, 34(6): 329-336.
- 李欢, 吴经华, 孙文博, 等. 2023. 铜锡复合成矿研究进展与展望[J]. 地质学报, 97(1): 262-279.
- 李洁, 黄小龙. 2013. 江西雅山花岗岩岩浆演化及其 Ta-Nb 富集机制[J]. 岩石学报, 29(12): 4311-4322.
- 李锦轶, 张进, 杨天南, 等. 2009. 北亚造山区南部及其毗邻地区地壳构造分区与构造演化[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 39(4): 584-605.
- 李鹏川, 刘正宏, 李世超, 等. 2016. 内蒙古巴林右旗胡都格绍荣岩体的年代学、地球化学、Hf 同位素特征及构造背景[J]. 地球科学, 41(12): 1995-2007.
- 刘翼飞, 樊志勇, 蒋胡灿, 等. 2014. 内蒙古维拉斯托-拜仁达坝斑岩-热液脉状成矿体系研究[J]. 地质学报, 88(12): 2373-2385.
- 刘永江, 张兴洲, 金巍, 等. 2010. 东北地区晚古生代区域构造演化[J]. 中国地质, 37(4): 943-951.
- 刘玉强. 1996a. 内蒙古毛登锡铜矿床地质及成因[J]. 矿床地质, (2): 133-143.
- 刘玉强. 1996b. 毛登锡铜矿床成矿分带及其成因讨论[J]. 矿床地质, (4): 31-42.
- 龙细友, 陈正钱, 刘志军, 等. 2021. 江西雅山 414 和灵山松树岗钼铌矿成矿特征对比分析研究[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 44(3): 239-248.
- 吕耿毅, 富广全, 李永新, 等. 2025. 大兴安岭南段后卜河-马场地区成矿地质特征及其找矿前景分析[J]. 世界有色金属, (2): 56-58.
- 马星华, 陈斌. 2009. 内蒙古敖伦花钼矿床地质特征、含矿斑岩地球化学及锆石 Hf 同位素研究[J]. 矿物学报, 29(S1): 19-20.
- 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.
- 聂风军, 温银维, 赵元艺, 等. 2007. 内蒙古白音查干银多金属矿化区地质特征及找矿方向[J]. 矿床地质, (2): 213-220.
- 潘龙驹, 孙恩守. 1992. 内蒙古甲乌拉银铅锌矿床地质特征[J]. 矿床地质, (1): 45-53.
- 邵济安, 牟保磊, 朱慧忠, 等. 2010. 大兴安岭中南段中生代成矿物质的深部来源与背景[J]. 岩石学报, 26(3): 649-656.
- 余宏全, 李红红, 李进文, 等. 2009. 内蒙古大兴安岭中北段铜铅锌金银多金属矿床成矿规律与找矿方向[J]. 地质学报, 83(10): 1456-1472.
- 田丽. 2024. 大兴安岭南段坤都冷—西哲里木地区早白垩世岩浆作用及对稀有稀土金属成矿的制约[D]. 吉林大学博士学位论文: 111-119.
- 王长明, 张寿庭, 邓军, 等. 2007. 内蒙古黄岗梁锡铁多金属矿床层状夕卡岩的喷流沉积成因[J]. 岩石矿物学杂志, (5): 409-417.
- 王金芳, 李英杰, 李红阳, 等. 2017. 内蒙古西乌旗努和特早白垩世 A 型花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质通报, 36(8): 1343-1358.
- 王金芳, 李英杰, 李红阳, 等. 2018a. 内蒙古西乌旗德勒哈达早白垩世 A 型花岗岩形成时代: 锆石 U-Pb 定年证据[J]. 中国地质, 45(1): 197-198.
- 王金芳, 李英杰, 李红阳, 等. 2018b. 内蒙古西乌旗匠山晚侏罗世-早白垩世 A 型花岗岩锆石 U-Pb 年龄及构造环境[J]. 地质通报, 37(Z1): 382-396.
- 王莉娟, 王京彬, 王玉往, 等. 2001. 黄岗梁夕卡岩型铁锡矿床萤石中流体-熔融包裹体及对矿床成因研究的意义[J]. 地质学报, (2): 287.
- 王莉娟, 王京彬, 王玉往, 等. 2002. 内蒙黄岗梁矽卡岩型铁锡矿床稀土元素地球化学[J]. 岩石学报, 18(4): 575-584.
- 王喜龙, 刘家军, 翟德高, 等. 2014. 内蒙古林西边家大院银多金属矿床同位素地球化学特征及成矿物质来源探讨[J]. 中国地质, 41(4): 1288-1303.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报, 23(6): 1217-1238.
- 吴福元, 刘小驰, 纪伟强, 等. 2017. 高分异花岗岩的识别与研究[J]. 中国科学: 地球科学, 47(7): 745-765.
- 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.
- 解成波, 刘明. 2001. 查干布拉根银铅锌(金)矿床地质特征及成因类型[J]. 世界地质, (1): 25-29.
- 徐备, 陈斌. 1997. 内蒙古北部华北板块与西伯利亚板块之间中生代造山带的结构及演化[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), (3): 227-232.
- 徐备, 赵盼, 鲍庆中, 等. 2014. 兴蒙造山带前中生代构造单元划分初探[J]. 岩石学报, 30(7): 1841-1857.
- 徐巧, 唐果, 邹滔, 等. 2020. 大兴安岭南段巴林左旗浩布高锡多金属矿田成矿系统与靶区预测[J]. 地质与勘探, 56(2): 265-276.
- 许文良, 孙晨阳, 唐杰, 等. 2019. 兴蒙造山带的基底属性与构造演化过程[J]. 地球科学, 44(5): 1620-1646.
- 杨朝磊, 杨尚松, 祝新友, 等. 2019. 内蒙古莫古吐铁锡矿床地质特征及成因类型[J]. 矿产勘查, 10(3): 467-480.
- 杨朝磊, 邹滔, 祝新友, 等. 2021. 内蒙古莫古吐花岗岩年代学、地球化学与地壳伸展-减薄作用[J]. 中国地质, 48(1): 247-263.
- 杨奇荻, 郭磊, 王涛, 等. 2014. 大兴安岭中南段甘珠尔庙地区晚中生代两期花岗岩的时代、成因、物源及其构造背景[J]. 岩石学报, 30(7): 1961-1981.
- 杨武斌, 苏文超, 廖思平, 等. 2011. 巴尔哲碱性花岗岩中的熔体和熔体-流体包裹体: 岩浆-热液过渡的信息[J]. 岩石学报, 27(5): 1493-1499.
- 杨泽黎, 邱检生, 邢光福, 等. 2014. 江西宜春雅山花岗岩体的成因与演化及其对成矿的制约[J]. 地质学报, 88(5): 850-868.
- 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.
- 叶杰, 刘建明, 张安立, 等. 2002. 沉积喷流型矿化的岩石学证据——以大兴安岭南段黄岗和大井矿床为例[J]. 岩石学报, (4): 585-592, 609-610.
- 于兵, 王常东, 余弘龙, 等. 2022. 综合物探测量在大兴安岭南段炒米房地区铀矿勘查中的应用[J]. 地质与勘探, 58(5): 1070-1081.
- 张德全, 雷蕴芬, 罗太阳, 等. 1992. 白音诺铅锌矿床矿化分带及矿液流向[J]. 矿床地质, (3): 203-212.
- 郑翻身, 蔡红军, 张振法. 2006. 内蒙古拜仁达坝维拉斯托超大型银铅锌矿的发现及找矿意义[J]. 物探与化探, (1): 13-20, 25.
- 周振华, 吕林素, 冯佳睿, 等. 2010. 内蒙古黄岗夕卡岩型锡铁矿床辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 26(3): 667-679.