

doi: 10.12097/gbc.2022.08.022

蒙古国东北部脑明特铜矿床成矿岩体年龄、Hf 同位素、地球化学特征及其对成矿构造背景的约束

吴涛涛^{1,2,3}, 陈聪^{1,2*}, 王庆双^{1,2}, 姚远^{1,2}, 周永恒^{1,2}, 柴璐^{1,2}, 鲍庆中^{1,2}

WU Taotao^{1,2,3}, CHEN Cong^{1,2*}, WANG Qingshuang^{1,2}, YAO Yuan^{1,2}, ZHOU Yongheng^{1,2},
CHAI Lu^{1,2}, BAO Qingzhong^{1,2}

1. 中国地质调查局沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034;

2. 中国地质调查局东北地质科技创新中心, 辽宁 沈阳 110034;

3. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

1. Shenyang Center, China Geological Survey, Shenyang 110034, Liaoning, China;

2. Northeast Science & Technology Innovation Center, China Geological Survey, Shenyang 110034, Liaoning, China;

3. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

摘要: 脑明特中型铜矿床位于蒙古-鄂霍茨克缝合带中部, 是蒙古国东北部已知规模最大的铜矿床。为探究岩体与成矿的关系, 在矿床学研究的基础上, 对该矿床成矿岩体开展了锆石 U-Pb 年代学、微量元素及 Hf 同位素地球化学研究。结果显示: 成矿岩体的锆石 U-Pb 年龄为 166.3 ± 2.3 Ma 和 162.6 ± 1.6 Ma, 表明该成矿岩体应为中侏罗世晚期岩浆作用的产物; 岩石化学组成上, 成矿岩体主量元素 SiO_2 ($62.81\% \sim 66.03\%$) $> 56\%$, Al_2O_3 ($15.01\% \sim 15.77\%$) $> 15\%$, MgO ($2.06\% \sim 2.72\%$) $< 3\%$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} < 1$, 微量元素具有轻稀土元素相对富集, 重稀土元素相对亏损, Eu 异常不明显和贫 Y (含量为 $10.67 \times 10^{-6} \sim 14.05 \times 10^{-6}$, $< 18 \times 10^{-6}$)、Yb (含量为 $1.20 \times 10^{-6} \sim 1.65 \times 10^{-6}$, $< 1.9 \times 10^{-6}$), 富集 Sr (含量为 $547.6 \times 10^{-6} \sim 661.8 \times 10^{-6}$, $> 400 \times 10^{-6}$) 的特点, 表明成矿岩体具有埃达克质岩石的地球化学特征。同时, 成矿岩体具有相对较高的 $\text{Mg}^\#$ 和 Cr、Ni 含量, 与源自拆沉下地壳熔融形成的埃达克岩相似。在 Hf 同位素组成上, 该岩体具有较低的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 正值 ($0.3 \sim 4.3$) 和中-新元古代模式年龄 ($T_{\text{DM2}} = 1183 \sim 937$ Ma), 推测岩浆上升过程中混染了部分中-新元古代基底岩石组分。综合研究表明, 脑明特铜矿床成矿岩体岩浆起源于拆沉下地壳的部分熔融, 形成于中侏罗世晚期蒙古-鄂霍茨克洋闭合后的陆内伸展环境。

关键词: 脑明特铜矿床; 锆石 U-Pb 测年; 地球化学; 埃达克岩; 蒙古-鄂霍茨克洋

中图分类号: P618.41; P597 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2024)05-0726-17

Wu T T, Chen C, Wang Q S, Yao Y, Zhou Y H, Chai L, Bao Q Z. Geochronology, Hf isotope, geochemical characteristics of the metallogenic rock mass in Nomint copper deposit, Northeastern Mongolia, and its constraint on metallogenic tectonic setting. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(5): 726-742

Abstract: The Nomint medium-scale copper deposit, located in the central part of the Mongolia-Okhotsk suture zone, is the largest known copper deposit in the northeastern part of Mongolia. To explore the relationship between the rock mass and mineralization, this paper conducts zircon U-Pb chronology, trace element, and Hf isotopic geochemical research on the ore-forming rock mass of this deposit, based on mineralogical studies. The results show that the biotite granodiorite yielded zircon U-Pb ages of 166.3 ± 2.3 Ma and 162.6 ± 1.6 Ma, respectively, representing the products of the late Middle Jurassic magmatism; In the geochemical composition, the

收稿日期: 2022-08-20; 修订日期: 2022-11-01

资助项目: 中国地质调查局项目《东北亚和欧洲国际合作地质调查》(编号: DD20230130)、《中蒙俄毗邻区大型铀、铜资源基地评价》(编号: DD20190438)

作者简介: 吴涛涛(1988-), 男, 在读博士生, 高级工程师, 从事东北亚地区矿产地质调查与综合研究。E-mail: wutaotao1112@163.com

* 通信作者: 陈聪(1988-), 女, 博士, 高级工程师, 从事兴蒙造山带东段成矿规律研究。E-mail: syzxchencong@163.com

metalogenic rock mass are SiO_2 ($62.81\% \sim 66.03\%$) $> 56\%$, Al_2O_3 ($15.01\% \sim 15.77\%$) $> 15\%$, MgO ($2.06\% \sim 2.72\%$) $< 3\%$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} < 1$, trace elements are relatively enriched in LREE and relatively deficient in HREE. Eu anomaly was not obvious and Y ($10.67 \times 10^{-6} \sim 14.05 \times 10^{-6}$, $< 18 \times 10^{-6}$) and Yb ($1.20 \times 10^{-6} \sim 1.65 \times 10^{-6}$, $< 1.9 \times 10^{-6}$) were poor, and Sr enrichment ($547.6 \times 10^{-6} \sim 661.8 \times 10^{-6}$, greater than 400×10^{-6}). It indicates that the metallogenic rock mass has the geochemical characteristics of Adakite rock. In the meanwhile, the metallogenic rock mass has relatively high $\text{Mg}^\#$, Cr and Ni contents, which is similar to Adakite formed from melting of crust under subsidence. In terms of Hf isotopic composition, the pluton has a low $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ value ($0.3 \sim 4.3$) and a Mesoproterozoic model age ($T_{\text{DM2}}=1183 \sim 937$ Ma), suggesting that some Mesoproterozoic basement rock components were mixed during the magmatic rise. The comprehensive research indicates that the metallogenic rock magma of the deposit originated from partial melting of the lower crustal delamination, formed in an intracontinental extensional environment following the closure of the Mongolia-Okhotsk Ocean in the late Middle Jurassic.

Key words: Nomint copper deposit; zircon U–Pb dating; geochemistry; adakite; Mongol-Okhotsk Ocean

铜是蒙古国的优势矿产, 产出欧玉陶勒盖超大型斑岩型铜–金–钼矿床、额尔登特超大型斑岩型铜–钼矿床, 以及查干苏布尔加斑岩型铜–钼矿床、哈马格泰铜–金矿床等众多大型铜矿床。优越的成矿地质条件吸引了世界各国学者对蒙古国的基础地质、矿产地质开展调查和研究, 并取得众多成果和认识 (Badarch et al., 2002; 江思宏等, 2010a, 2019; 刘翼飞等, 2010; 李俊建等, 2015, 2016)。前人通过系统总结蒙古国铜成矿规律, 将蒙古国划分为南部与古亚洲洋构造体系有关的斑岩型和 VMS 型铜–金–钼–锌多金属成矿带和北部与蒙古–鄂霍茨克洋构造体系有关的斑岩型铜–钼–金成矿带, 并将后者进一步划分为东部三叠纪–早侏罗世斑岩型铜–钼–金成矿亚带和西部三叠纪斑岩型铜–钼成矿亚带 (江思宏等, 2019)。虽然同属与蒙古–鄂霍茨克洋构造体系有关的斑岩型铜–钼–金成矿带, 脑明特铜矿床所在的东部成矿亚带在已发现矿床规模、数量等方面远不及以额尔登特铜钼矿床 (Badarch et al., 2002) 为代表的西部成矿亚带, 同样不及同一跨境成矿带内 (李俊建等, 2016) 以乌奴格吐山铜钼矿床 (秦克章等, 1999; 陈志广等, 2008; Chen et al., 2011; Wang et al., 2015) 为代表的中国境内部分。究其原因, 一是该区地质勘查程度相对较低, 二是对已有典型矿床的研究程度极低, 制约了对该区铜矿成因的认识及成矿规律总结, 更进一步限制了该区实现铜多金属矿床找矿突破。

脑明特铜矿是近年来新发现的矿床, 是蒙古国东北部地区迄今唯一达到中型规模的铜矿床, 有望成为认识该区铜多金属成矿作用的重要窗口。鉴于该矿床研究程度较低, 且矿床成因类型尚存在斑岩

型、岩浆热液型等争议 (江思宏等, 2019; 张璟等, 2019; 邵军等, 2021), 本文在区域地质背景与矿区地质、矿体与矿石特征研究的基础上, 分析了脑明特铜矿床成矿花岗闪长岩体的锆石 U–Pb 年龄、Hf 同位素及元素地球化学特征, 限定了成矿花岗闪长岩体的成岩时代, 明确了该成矿岩体的成因类型、源区特征及成岩构造背景, 探讨了成矿花岗闪长岩体与脑明特铜成矿作用的成因联系, 为深入认识脑明特铜矿床成矿机理与成矿作用过程奠定了基础, 同时也为总结蒙古国东北部铜矿成矿规律和进一步找矿提供了理论支撑。

1 区域成矿背景

脑明特铜矿床大地构造位置位于蒙古–鄂霍茨克造山带中部 (图 1-a), 处在蒙古–外贝加尔褶皱系的 Ereen Davaa 地体中 (Badarch et al., 2002), 区域上与中国额尔古纳微陆块相连 (李俊建等, 2015)。区域出露最古老的地层以前寒武系为主, 上覆古生代和中生代地层。前寒武系主要为古–中元古界北部戈壁系、额仁达瓦系陆源沉积岩, 构成了该区的地块基底岩石。古生界主要由中上泥盆统碳酸盐岩–陆源碎屑岩、中二叠统海相磨拉石建造岩石和上二叠统–下三叠统陆相沉积岩组成。中生界主要由中侏罗统–下白垩统火山沉积岩组成。该区所属构造单元位于额尔古纳隐伏活动断裂以北, 中蒙古构造线北东端南部, 受主构造线控制, 区内断裂构造十分发育, 以北东向和北西向断裂为主。区内自古生代地槽隆起以来, 印支运动和燕山运动在该区活动强烈, 表现为强烈的火山喷发和大面积的花岗岩侵入, 伴随着呈岩株及岩脉状的花岗闪长斑岩、闪长岩玢岩等脉岩产出。

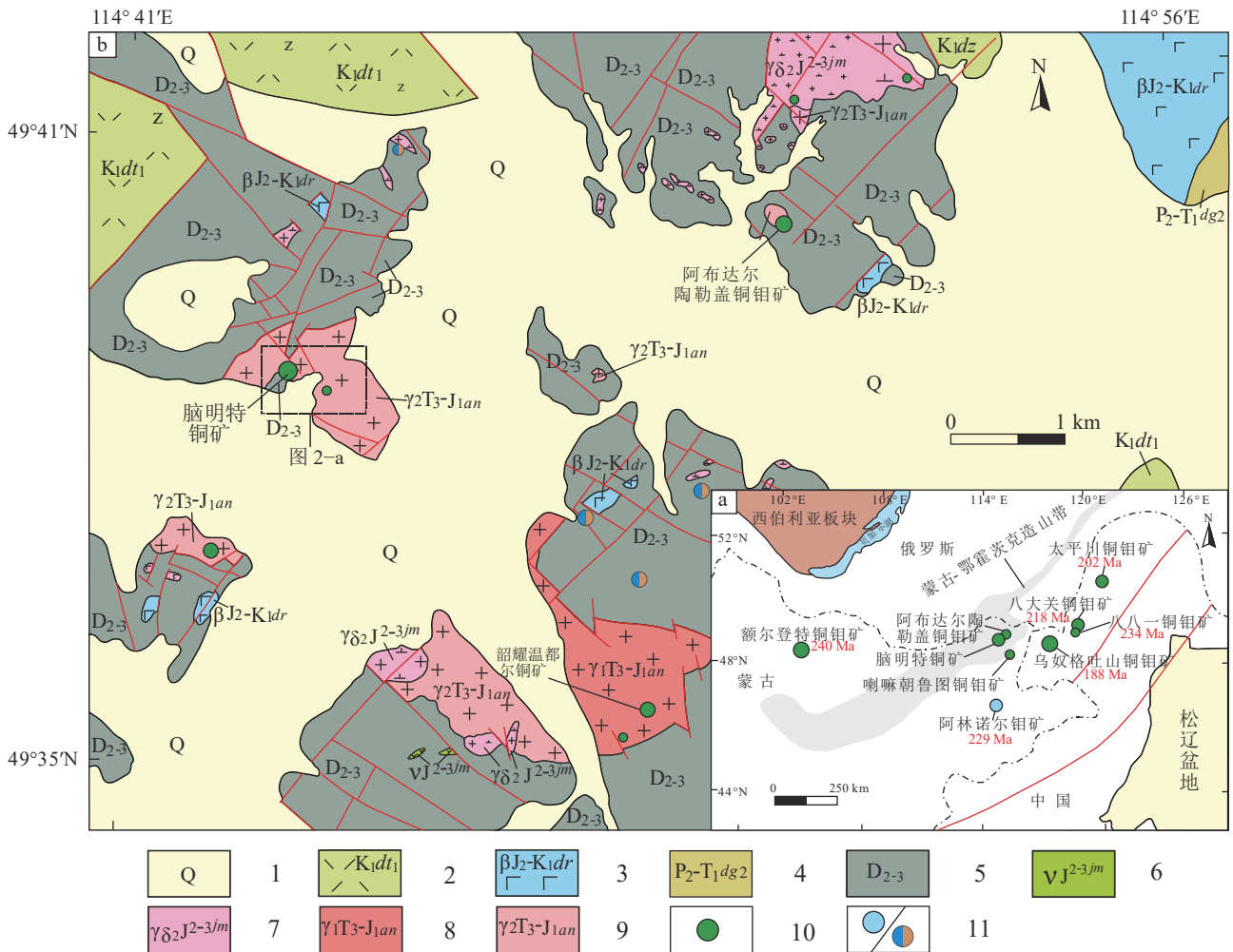


图1 脑明特铜矿大地构造位置图(a)及区域地质图(b)(图a据 Tang et al., 2016 修改, 成矿岩体年龄数据据秦克章等, 1999; 陈志广, 2010; 江思宏等, 2010a, 2018; 刘翼飞等, 2010; 侯召硬, 2014)

Fig. 1 Tectonic location map (a) and regional geological map (b) of the Nomint copper deposit

1—第四系; 2—下白垩统白音图门工组火山沉积岩; 3—中侏罗统—下白垩统多尔诺特组火山沉积岩; 4—上二叠统—下三叠统都其河组沉积岩; 5—中上泥盆统昂给尔特组碳酸盐岩—陆源碎屑岩; 6—雅拉玛构造 I 期辉长岩; 7—雅拉玛构造 II 期花岗岩; 8—阿布达尔陶勒盖构造 I 期花岗岩; 9—阿布达尔陶勒盖构造 II 期花岗岩; 10—铜矿床(点); 11—铜、铅、锌多金属矿床(点)

脑明特铜矿床位于蒙古—鄂霍茨克洋成矿带中段(江思宏等, 2019; 邵军等, 2021), 该成矿带是蒙古国重要的铅、银、铀、铜、钼、萤石等矿产资源基地, 已探明小型以上金属矿床 50 余处(邵军等, 2021), 其中, 大型矿床有多尔诺特火山岩型铀矿床(吴涛涛等, 2018)、乌兰火山热液型铅、锌、铜、钼多金属矿床(张璟等, 2014; Nie et al., 2015; 邵军等, 2021)、图木尔延敖包砂卡岩型铁、锌矿床(江思宏等, 2010b)、芒岗温都尔热液脉型银、铅、锌矿床(邵军等, 2021)等。研究区构造岩浆活动强烈, 区内发育大量铜、钼、铅、锌矿床和矿点, 具有一定规模的矿床有脑明特铜矿床、阿布达尔陶勒盖铜矿床和韶耀温都尔铜矿床

(图 1-b)。

2 矿区地质

矿区出露地层较简单(图 2-a), 除大面积分布的第四系松散堆积物外, 仅在矿区西北部出露中—上泥盆统昂给尔特组, 为赋矿花岗闪长岩体和部分矿体的直接围岩。昂给尔特组岩石类型以发生轻微角闪岩化的石英砂岩为主, 在钻孔中还可可见细粒长石二云片岩。矿区出露的侵入岩主要为燕山期花岗闪长岩, 出露面积超过矿区面积的 75%, 前人称为脑明特岩体, 为阿布达尔陶勒盖构造期第 II 侵入阶段的产物, 也是脑明特铜矿的主要赋矿岩体。

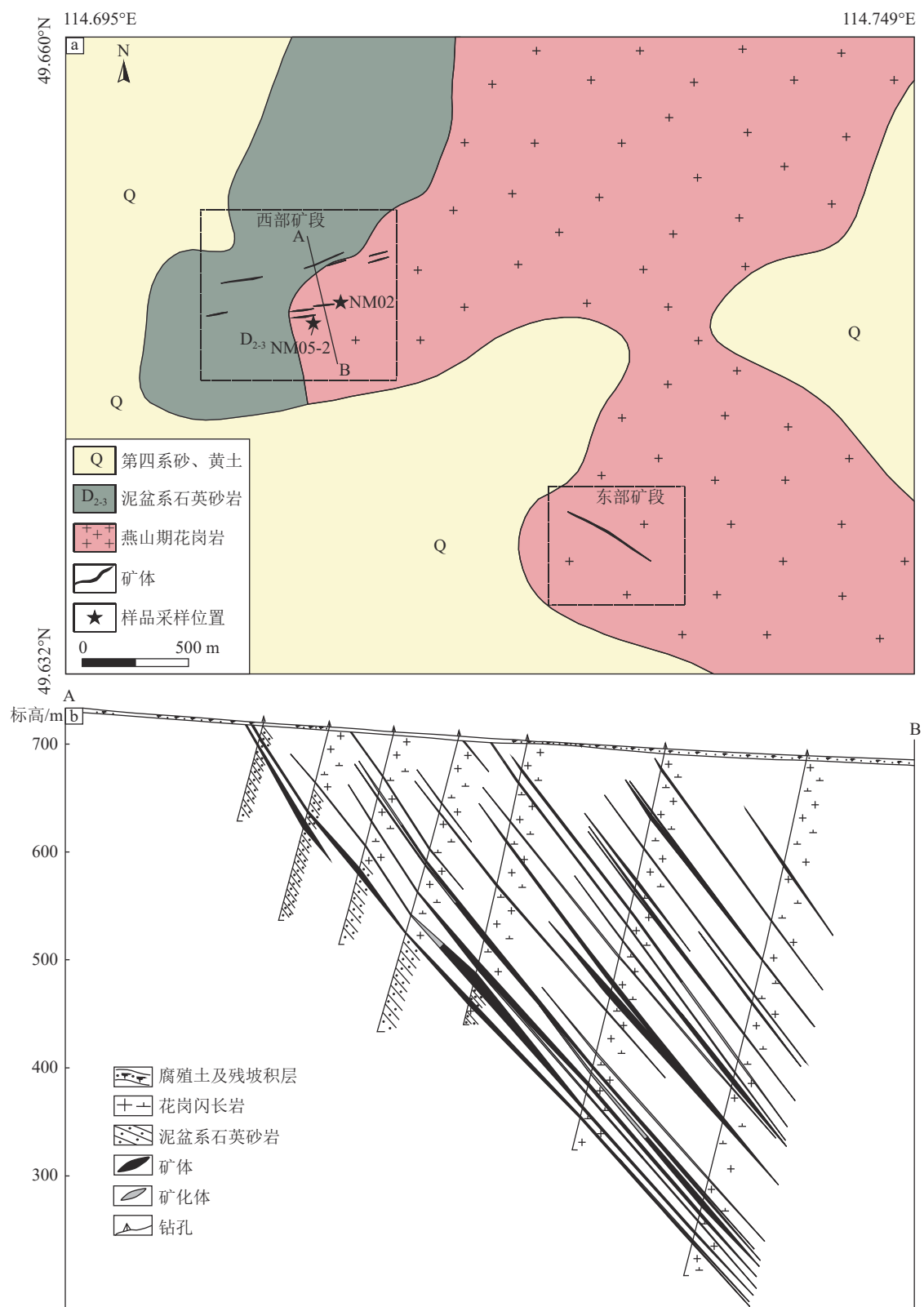


图 2 脑明特铜矿床地质简图(a)及 11 勘探线剖面 (b)

Fig. 2 Geological diagram (a) and profile of No.11 exploration line (b) of the Nomint copper deposit

矿区构造以断裂构造为主,主要为北东向和北西向,分属沙不苏里构造体系(北东向)和乌思奇一度乞果力断裂系统(北西向)。其中,北西向断裂表现为构造裂隙带和角砾岩带,局部被石英硫化物矿脉充填,发育 Cu、Au、Ag 矿化。而在矿区西部,两组断裂交会叠加,形成近东西向次一级断裂构造,控制了矿(化)体的空间分布(图 2-b)。

3 矿体及矿石特征

3.1 矿体特征

脑明特铜矿床主要赋存在花岗闪长岩和石英砂岩地层中,受近东西向次一级断裂构造及岩石裂隙控制,呈脉状、细脉浸染状及网脉状产出。目前已发现矿体 25 条,分为西部和东部 2 个矿段,其中西部矿段圈定 22 条铜矿体,东矿段圈定 3 条工业铜矿体(图 2-a)。

西部矿段由于地表覆盖较厚,无原生矿体出露,但可见许多沿 $75^{\circ} \sim 85^{\circ}$ 近北东向呈带状断续分布的古采坑,古采坑出露规模总体长约 1 km,宽逾 300 m。在部分土层较薄部位的槽探中可见原生矿体,但受地表氧化淋滤作用影响,矿石贫化严重,多数低于 Cu 最低工业品位要求。仅少数矿(化)体延伸到地表,大部分矿(化)体隐伏在地下一定深度范围内,矿化带分布规模与地表古采坑分布特征一样,其中单条矿体长度为 100 ~ 1000 m。西部矿段矿体呈密集网脉状平行分布,产状较陡(约 52°),倾向南东;且集中分布在 07 ~ 17 勘探线之间,向东、西两侧勘探线矿体数量明显减少,其中 11 勘探线矿体出露最好,累计发现 17 条工业矿体和若干条矿化体,见矿最大垂深为 456.4 m(图 2-b)。

东部矿段发现的 3 条铜矿体分别为 1-1 号、1-2 号和 1-3 号。其中,1-1 号矿体长 470 m,平均厚度为 1.17 m, Cu 平均品位为 0.71%; 1-2 号矿体长 380 m,平均厚度为 1.46 m, Cu 平均品位为 0.81%; 1-3 号矿体长 390 m,平均厚度为 3.03 m, Cu 平均品位为 0.76%。

3.2 矿石矿物组合特征

矿石矿物主要有黄铁矿、黄铜矿、辉钼矿、辉铋矿、方铅矿、菱铁矿、黝铜矿等。脉石矿物主要有石英、碱长石、钠长石、黑云母、绿泥石、白云石、方解石等。矿石结构主要包括他形、半自形及自形粒状结构(图 3-a)、交代残余结构(图 3-b)、镶边结构、文象结构、碎裂结构等。根据矿石中矿物集合体形

态、大小、空间结合关系等特征,将矿石构造分为斑杂状构造、脉状构造,其次为条带状构造、浸染状构造及角砾状构造。

3.3 围岩蚀变特征

矿区围岩蚀变主要发育在花岗闪长岩体内,石英砂岩地层蚀变较弱。蚀变类型主要有钠长石化、钾长石化、硅化、绢云母化、碳酸盐化、绿泥石-绿帘石化、粘土化、高岭土化等。其中,硅化分布最广泛、延续时间长,与矿化关系最密切,主要表现为不规则条带、细脉状、网脉状等;钠长石化多呈不规则条带状,从矿体向两侧逐渐减弱;钾长石化在花岗闪长岩体的破碎带附近发育,可见肉红色的钾长石细脉,脉宽 5 mm ~ 20 cm。整体看,受多阶段成矿作用影响,各阶段不同的蚀变类型相互叠加,导致围岩蚀变分带在平面上不明显,但在总体趋势上,蚀变强度具有下部强、上部弱,中心强、两侧及边部弱的特征。

4 样品特征和测试方法

4.1 样品采集及其岩相学特征

本次工作在控制主矿体的地表探槽(东经 $114^{\circ}42'31.96''$ 、北纬 $49^{\circ}38'53.5''$)中采集了黑云母花岗闪长岩样品(图 4-a),在 ZK001 钻孔(东经 $114^{\circ}42'19.68''$ 、北纬 $49^{\circ}37'00.47''$)中采集了黑云母花岗闪长岩(图 4-c,d)样品,具体采样位置见图 2-a。

岩相学研究表明,黑云母花岗闪长岩主要由石英、斜长石、黑云母等矿物组成;其中,石英含量约为 30%,他形粒状,粒径 0.4 ~ 1 mm;斜长石含量约为 55%,自形板状,见聚片双晶、环带结构,部分表面发生绢云母化,粒径 1 ~ 5.2 mm;黑云母含量约为 15%,呈片状。此外,该岩体局部发育暗色包体,大多呈椭圆形、不规则状等形态,大小在 0.5 ~ 20 cm 之间,岩性为中细粒似斑状黑云母角闪石石英闪长岩(图 4-b)。石英闪长岩包体呈深灰色,具似斑状结构,块状构造;似斑晶主要为斜长石,含量约 25%,自形板状,可见环带结构和聚片双晶,粒径 2.4 ~ 4 mm,基质主要由斜长石(35%)、石英(10%)、角闪石(18%)和黑云母(12%)组成。

4.2 锆石 U-Pb 定年

2 件花岗闪长岩样品(NM02-1 和 NM05-2)的锆石单矿物分选、制靶和照相工作均在北京锆年领航科技有限公司完成。锆石 U-Pb 定年工作在吉林大

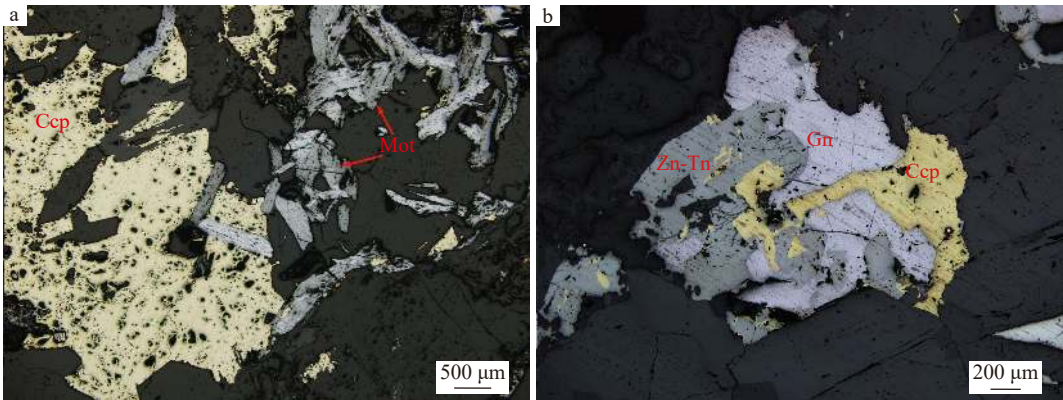


图 3 脑明特铜矿床矿石显微镜下照片

Fig. 3 Microscopic photos of ores in the Nomint copper deposit

a—黄铜矿、辉钼矿显微镜下照片; b—黄铜矿交代锌砷黝铜矿。Ccp—黄铜矿; Mot—辉钼矿; Gn—方铅矿; Zn-Tn— 锌砷黝铜矿

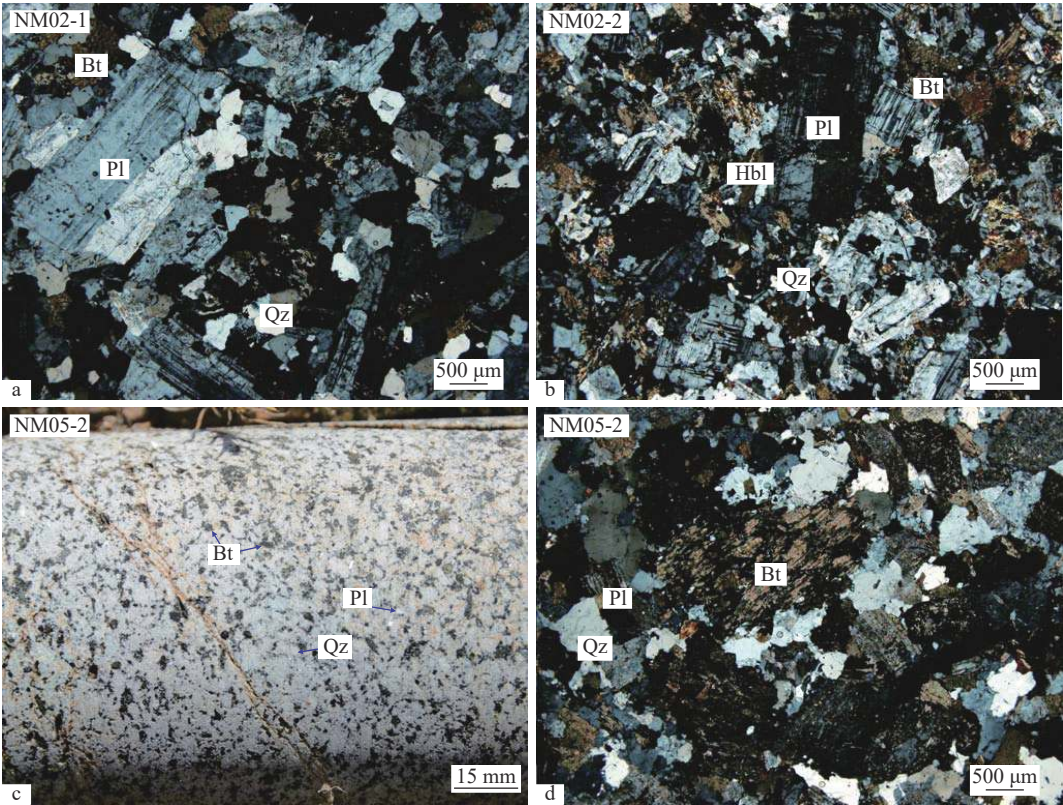


图 4 脑明特铜矿床花岗闪长岩及包体岩心和显微照片

Fig. 4 Photograph and microscopic photos of the surrounding rocks in the Nomint copper deposit

a—黑云母花岗闪长岩显微镜下照片; b—中细粒似斑状黑云母角闪石英英闪长岩包体显微镜下照片; c—黑云母花岗闪长岩钻孔岩心照片; d—黑云母花岗闪长岩显微镜下照片。Qz—石英; Pl—斜长石; Bt—黑云母; Hbl—角闪石

学东北亚矿产资源评价自然资源部重点实验室完成。激光剥蚀系统为德国 COMPEX 公司生产的 GeoLasPro 型 193nm ArF 准分子激光器, 与激光器联用的是 Agilent 7900 型 ICP-MS 仪器, 具体实验测试过程见 Yuan et al. (2005), 采用 Glitter 和 Isoplot

软件进行同位素比值和年龄计算, 普通铅校正校正方法见 Anderson (2002)。

4.3 锆石原位 Lu-Hf 同位素

2 件花岗闪长岩样品(NM02-1 和 NM05-2)的锆石原位 Lu-Hf 同位素分析测试在北京锆年领航科技

有限公司完成,主要利用激光剥蚀多接收器电感耦合等离子体质谱仪(LA-MC-ICP-MS)。激光进样系统为澳大利亚 ASI(美国应用光谱)公司的 Resolution SE 193nm 准分子激光剥蚀系统,分析系统为美国 Thermofisher 公司的多接收等离子体质谱仪(NEPTUNE plus)。激光剥蚀的斑束直径一般为 38 μm ,能量密度为 7~8 J/cm²,频率为 10 Hz,激光剥蚀物质以高纯氦为载气送入 Neptune Plus(MC-ICPMS),接收器配置与溶液进样方式相同。¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 值采用 ¹⁷⁹Hf/¹⁷⁷Hf = 0.7325 进行指数归一化校正。

4.4 全岩主量和微量元素测试

本文共挑选 8 件新鲜、无或弱蚀变的中细粒黑云母花岗闪长岩(NM02-1-1、NM02-1-2、NM02-1-3、NM02-1-4、NM02-1-5、NM05-2-1、NM05-2-2 和 NM05-2-3)样品进行全岩地球化学分析,样品分析在自然资源部东北矿产资源监督检测中心完成。其中,主量元素采用玻璃熔片大型 X 射线荧光光谱法(XRF)分析完成,分析精度和准确度高于 5%,微量和稀土元素采用 ICP-MS 分析完成,分析精度和准确度优于 10%。

5 测试结果

5.1 锆石 U-Pb 年龄

锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年测试数据见表 1,锆石谐和图见图 5。2 件花岗闪长岩样品的锆石形态特征相似,多呈自形一半自形柱状,长宽比在 1.5:1~3:1 之间,锆石结晶较好,均可见典型的岩浆振荡环带。2 件样品的 Th/U 值均在 0.38~0.93 之间,表明这些锆石均为岩浆成因锆石(Belousova et al., 2002),其年龄加权平均值可代表岩体的成岩。NM02-1 样品分析了 21 个有效数据点,其中 20 个测点的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄值介于 160~173 Ma 之间,²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄加权平均值为 166.3 $\pm$ 2.3 Ma(MSWD=1.15),另有 1 个测点的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄为 182 $\pm$ 5 Ma,应该为岩浆上侵过程中捕获的锆石年龄。NM05-2 样品分析了 28 个有效数据点,²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄值介于 156~172 Ma 之间,²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄加权平均值为 162.6 $\pm$ 1.6 Ma(MSWD=0.72)。

5.2 锆石原位 Lu-Hf 同位素特征

锆石原位 Lu-Hf 同位素分析结果见表 2,进行

Hf 同位素计算时利用同一锆石分析点测定的 U-Pb 年龄。样品 NM02-1 和 NM05-2 的锆石 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 值分别为 0.282708~0.282773 和 0.282682~0.282794,对应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分别为 +1.4~+3.6 和 +0.6~+4.3,二阶段模式年龄($T_{\text{DM}2}$)分别为 1127~984 Ma 和 1183~937 Ma。

5.3 主量元素

8 件花岗闪长岩样品的主量元素测试结果见表 3。主量元素方面,样品的 SiO₂ 含量为 62.81%~66.03%,Al₂O₃ 含量为 15.01%~15.77%,Na₂O 含量为 3.67%~4.58%,K₂O 含量为 2.94%~4.05%,CaO 含量为 2.69%~3.14%,MgO 含量为 2.06%~2.72%,全碱(Na₂O+K₂O)含量为 7.25%~7.95%,总体表现为中硅、富钠的特征;在 TAS 图解中,花岗闪长岩落入花岗闪长岩与石英二长岩分界位置(图 6-a),与薄片鉴定结果基本一致。花岗闪长岩碱度率指数(AR)在 2.29~2.58 之间,里特曼指数 σ 介于 2.58~2.75 之间,这与 SiO₂-K₂O 关系图(图 6-b)中岩石落于高钾钙碱性系列区域的投点结果一致,表明该花岗闪长岩属于高钾钙碱性岩石。花岗闪长岩铝饱和指数 A/CNK 在 0.92~1.00 之间,在 A/CNK-A/NK 关系图中岩石落入准铝质区域(图 6-c),显示出该岩体为准铝质岩石。

5.4 稀土和微量元素

8 件花岗闪长岩样品的稀土和微量元素测试结果见表 3。脑明特成矿花岗闪长岩稀土元素总量(ΣREE)在 98.63×10^{-6} ~ 171.15×10^{-6} 之间,LREE/HREE 值为 9.15~15.16,(La/Yb)_N 值为 10.28~19.38,总体呈现轻稀土元素相对富集、重稀土元素相对亏损的特点。在球粒陨石标准化配分图解中,曲线呈“右倾型”,Eu 异常不明显($\delta\text{Eu} = 0.76 \sim 1.04$)(图 7-a;表 3)。

由微量元素蛛网图可见,花岗闪长岩样品明显富集 Rb、K、Ba 等大离子亲石元素和 Th、U、La 等元素,亏损 Nb、P、Ti 等高场强元素(图 7-b;表 3)。另外,岩石具有较低的 Sm/Nd 值(0.14~0.19,均值 0.16)、Rb/Sr 值(0.18~0.24,均值 0.20)和 Rb/Ba 值(0.18~0.29,均值 0.20),以及较高的 K/Rb 值(185.37~271.09,均值 232.03)。

6 讨论

6.1 花岗闪长岩形成时代及其与成矿关系

截至目前,尚未有脑明特铜矿床同位素年代学

表 1 脑明特铜矿床花岗闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 分析数据

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb isotopic data of granodiorite in the Nomint copper deposit

测点号	Th/10 ⁻⁶	U/10 ⁻⁶	Th/U	同位素原子比率						同位素年龄/Ma									
				²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	1σ
样品NM02-1																			
NM02-1-01	180	262	0.69	0.05133	0.00276	0.18094	0.0098	0.02557	0.00067	0.00831	0.00027	256	77	169	8	163	4	167	5
NM02-1-02	151	214	0.71	0.05074	0.00304	0.1873	0.01124	0.02678	0.00072	0.00908	0.0003	229	89	174	10	170	5	183	6
NM02-1-03	109	171	0.64	0.05416	0.00386	0.18848	0.01334	0.02525	0.00072	0.00908	0.00035	378	108	175	11	161	5	183	7
NM02-1-04	132	195	0.68	0.04959	0.00311	0.18187	0.01141	0.02661	0.00072	0.00838	0.00029	176	94	170	10	169	5	169	6
NM02-1-07	128	228	0.56	0.04791	0.00268	0.17953	0.01012	0.02719	0.00071	0.00871	0.00029	95	79	168	9	173	4	175	6
NM02-1-08	110	154	0.72	0.05069	0.00364	0.18238	0.01304	0.0261	0.00073	0.00873	0.00033	227	113	170	11	166	5	176	7
NM02-1-10	348	536	0.65	0.04981	0.00222	0.19617	0.00892	0.02857	0.00073	0.01031	0.00028	186	60	182	8	182	5	207	6
NM02-1-11	378	407	0.93	0.05322	0.00298	0.18531	0.01043	0.02526	0.00067	0.00785	0.00024	338	80	173	9	161	4	158	5
NM02-1-12	208	289	0.72	0.05408	0.00421	0.18753	0.01448	0.02516	0.00074	0.00825	0.00034	374	121	175	12	160	5	166	7
NM02-1-13	76	128	0.59	0.05094	0.00412	0.18311	0.01469	0.02608	0.00077	0.00868	0.00038	238	128	171	13	166	5	175	8
NM02-1-15	153	244	0.63	0.05435	0.00329	0.19414	0.01177	0.02591	0.00071	0.00867	0.0003	386	87	180	10	165	4	174	6
NM02-1-16	115	177	0.65	0.05283	0.00366	0.19441	0.0134	0.0267	0.00075	0.00846	0.00032	322	106	180	11	170	5	170	6
NM02-1-19	215	272	0.79	0.04897	0.00281	0.17906	0.01033	0.02652	0.00071	0.00787	0.00025	146	84	167	9	169	4	158	5
NM02-1-20	185	262	0.71	0.05422	0.00424	0.19262	0.01493	0.02577	0.00076	0.00742	0.00031	380	121	179	13	164	5	149	6
NM02-1-21	139	197	0.70	0.04859	0.0034	0.17728	0.0124	0.02646	0.00074	0.00839	0.0003	128	106	166	11	168	5	169	6
NM02-1-22	179	266	0.67	0.05475	0.00303	0.19417	0.0108	0.02572	0.00069	0.0084	0.00027	402	77	180	9	164	4	169	5
NM02-1-23	113	178	0.64	0.05198	0.00398	0.18063	0.01375	0.0252	0.00072	0.00799	0.00032	285	122	169	12	160	5	161	6
NM02-1-24	112	179	0.63	0.05073	0.00366	0.18208	0.01307	0.02603	0.00074	0.00813	0.00031	229	113	170	11	166	5	164	6
NM02-1-27	122	177	0.69	0.05153	0.00362	0.18335	0.01283	0.02581	0.00073	0.00777	0.00029	265	109	171	11	164	5	156	6
NM02-1-28	86	136	0.64	0.05271	0.00423	0.18695	0.01487	0.02572	0.00076	0.0081	0.00034	316	127	174	13	164	5	163	7
NM02-1-30	96	152	0.63	0.05239	0.00359	0.19356	0.0132	0.02679	0.00075	0.00863	0.00032	302	104	180	11	170	5	174	6
样品NM05-2																			
NM05-2-01	164	204	0.81	0.05248	0.00315	0.18782	0.01127	0.02595	0.00069	0.00815	0.00026	306	88	175	10	165	4	164	5
NM05-2-02	107	171	0.63	0.05515	0.00398	0.19749	0.01415	0.02597	0.00074	0.00923	0.00036	418	109	183	12	165	5	186	7
NM05-2-03	110	176	0.63	0.05358	0.00363	0.19356	0.01307	0.0262	0.00072	0.00837	0.00031	353	103	180	11	167	5	168	6
NM05-2-04	179	264	0.68	0.04942	0.00301	0.18418	0.01124	0.02703	0.00072	0.00884	0.00028	168	91	172	10	172	5	178	6
NM05-2-05	118	150	0.79	0.05003	0.00377	0.17261	0.01292	0.02502	0.00071	0.00755	0.00028	196	118	162	11	159	4	152	6

续表 1

测点号	Th/ 10^{-6}	U/ 10^{-6}	Th/U	同位素原子比率						同位素年龄/Ma					
				$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
NM05-2-07	111	193	0.57	0.05057	0.00354	0.17685	0.01234	0.02536	0.0007	0.00804	0.00031	221	110	165	11
NM05-2-09	111	179	0.62	0.05052	0.00337	0.18254	0.01216	0.0262	0.00071	0.00821	0.0003	219	104	170	10
NM05-2-10	163	240	0.68	0.05068	0.00315	0.1827	0.01137	0.02614	0.0007	0.00789	0.00027	226	94	170	10
NM05-2-11	175	300	0.58	0.05117	0.00288	0.17585	0.00994	0.02493	0.00065	0.00804	0.00027	248	82	164	9
NM05-2-12	101	169	0.60	0.05077	0.0036	0.18565	0.0131	0.02652	0.00074	0.00861	0.00033	230	111	173	11
NM05-2-13	119	208	0.57	0.05591	0.01082	0.19727	0.03731	0.02559	0.00129	0.00906	0.00091	449	329	183	32
NM05-2-14	246	279	0.88	0.05271	0.00358	0.18089	0.01224	0.02489	0.00069	0.00813	0.00027	316	104	169	11
NM05-2-15	210	314	0.67	0.05301	0.00279	0.19005	0.0101	0.026	0.00067	0.00804	0.00025	329	74	177	9
NM05-2-16	123	191	0.64	0.05118	0.00347	0.18644	0.0126	0.02642	0.00072	0.00891	0.00032	249	105	174	11
NM05-2-17	169	230	0.74	0.04951	0.0031	0.17512	0.01098	0.02566	0.00068	0.00838	0.00028	172	95	164	9
NM05-2-18	120	313	0.38	0.05432	0.00502	0.18729	0.01707	0.02501	0.00077	0.00827	0.00043	384	150	174	15
NM05-2-19	206	293	0.70	0.05167	0.00292	0.17826	0.01013	0.02502	0.00065	0.00766	0.00025	271	83	167	9
NM05-2-20	169	227	0.75	0.05364	0.00627	0.19071	0.02191	0.02579	0.0009	0.0077	0.00047	356	195	177	19
NM05-2-21	181	277	0.65	0.05085	0.00029	0.17599	0.01011	0.02511	0.00065	0.00856	0.00027	234	85	165	9
NM05-2-22	192	293	0.66	0.05251	0.00281	0.18255	0.00983	0.02521	0.00065	0.00837	0.00026	308	76	170	8
NM05-2-23	124	290	0.43	0.0515	0.00514	0.17932	0.01763	0.02525	0.0008	0.0102	0.00056	263	164	167	15
NM05-2-24	148	289	0.51	0.05058	0.00302	0.1773	0.01061	0.02543	0.00067	0.00788	0.00028	222	90	166	9
NM05-2-25	166	229	0.72	0.05365	0.006	0.18174	0.02	0.02457	0.00083	0.00764	0.00046	356	186	170	17
NM05-2-26	144	217	0.66	0.05104	0.00322	0.18102	0.01143	0.02573	0.00068	0.0085	0.00029	243	97	169	10
NM05-2-27	165	254	0.65	0.05246	0.00276	0.18577	0.00985	0.02569	0.00066	0.0081	0.00027	306	74	173	8
NM05-2-28	160	214	0.75	0.05472	0.00433	0.19163	0.01501	0.0254	0.00074	0.00834	0.00036	401	123	178	13
NM05-2-29	76	137	0.55	0.05663	0.00656	0.1917	0.02181	0.02456	0.00086	0.00826	0.00051	477	191	178	19
NM05-2-30	162	226	0.72	0.05466	0.00324	0.1937	0.01152	0.02571	0.00068	0.00867	0.00029	398	86	180	10

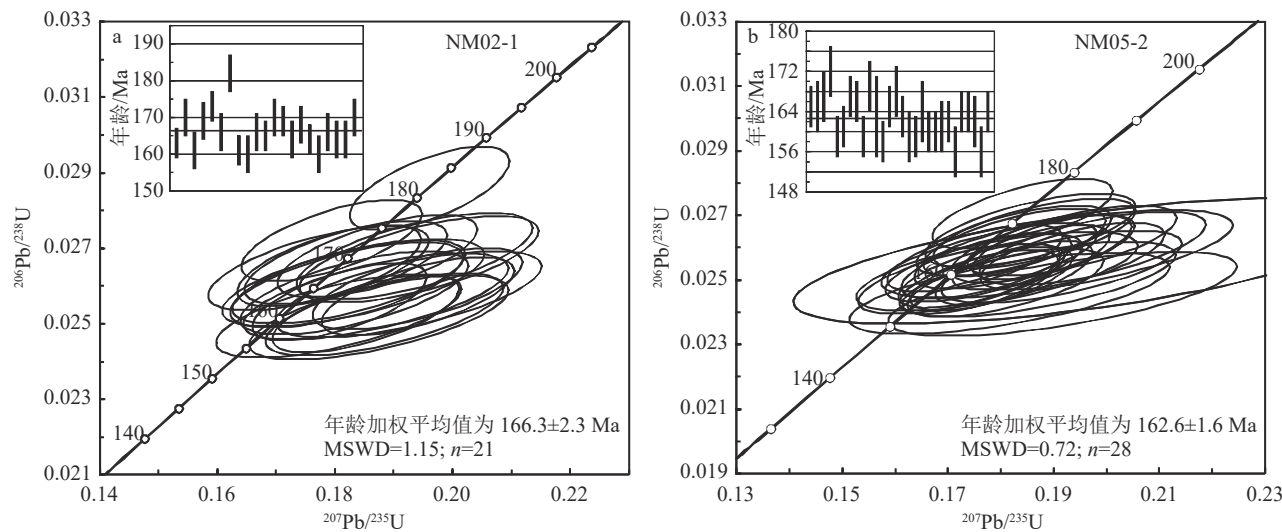


图 5 脑明特铜矿床花岗闪长岩锆石年龄谐和图

Fig. 5 Zircon U-Pb concordia diagrams for the granodiorite in the Nomint copper deposit

表 2 脑明特铜矿床花岗闪长岩原位 Lu-Hf 同位素分析数据

Table 2 Zircon in-situ Lu-Hf isotope data of the granodiorite in the Nomint copper deposit

样号	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2 σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2 σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2 σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	2 σ	T_{DM}/Ma	T_{DM2}/Ma	$f_{\text{Lu/Hf}}$
NM02-1-01	163.0	0.028551	0.000271	0.000768	0.000020	0.282773	0.000015	0.282771	0.0	3.5	4.1	0.5	675	984	-0.98
NM02-1-05	174.0	0.026670	0.000877	0.000733	0.000034	0.282754	0.000019	0.282752	-0.6	3.1	3.8	0.7	701	1021	-0.98
NM02-1-07	173.0	0.025006	0.000167	0.000633	0.000007	0.282732	0.000016	0.282730	-1.4	2.3	2.8	0.5	731	1071	-0.98
NM02-1-09	179.0	0.042516	0.000641	0.001274	0.000009	0.282719	0.000019	0.282714	-1.9	1.9	2.6	0.7	762	1102	-0.96
NM02-1-10	182.0	0.039680	0.001165	0.001129	0.000046	0.282766	0.000017	0.282762	-0.2	3.6	4.2	0.6	692	992	-0.97
NM02-1-13	166.0	0.022921	0.000253	0.000625	0.000014	0.282759	0.000019	0.282757	-0.4	3.1	3.8	0.7	692	1013	-0.98
NM02-1-15	165.0	0.037019	0.000929	0.001121	0.000037	0.282732	0.000024	0.282728	-1.4	2.1	2.9	0.8	740	1079	-0.97
NM02-1-16	170.0	0.024285	0.000084	0.000615	0.000005	0.282769	0.000017	0.282767	-0.1	3.5	4.1	0.6	679	989	-0.98
NM02-1-18	168.0	0.027220	0.000390	0.000696	0.000009	0.282708	0.000017	0.282706	-2.2	1.4	2.0	0.6	765	1127	-0.98
NM02-1-20	164.0	0.028825	0.000251	0.000763	0.000006	0.282743	0.000016	0.282741	-1.0	2.5	3.1	0.6	718	1052	-0.98
NM02-1-21	168.0	0.023757	0.000358	0.000646	0.000015	0.282770	0.000021	0.282768	-0.1	3.5	4.3	0.7	678	988	-0.98
NM02-1-24	166.0	0.020249	0.000263	0.000645	0.000019	0.282717	0.000017	0.282715	-2.0	1.6	2.2	0.6	752	1109	-0.98
NM02-1-26	167.0	0.025653	0.000276	0.000699	0.000007	0.282735	0.000015	0.282733	-1.3	2.3	2.8	0.5	727	1067	-0.98
NM02-1-28	164.0	0.025670	0.000314	0.000810	0.000009	0.282740	0.000018	0.282738	-1.1	2.4	3.0	0.6	722	1059	-0.98
NM02-1-30	170.0	0.024162	0.000278	0.000717	0.000016	0.282751	0.000018	0.282749	-0.8	2.9	3.5	0.6	706	1030	-0.98
NM05-2-01	165.0	0.021241	0.000231	0.000620	0.000012	0.282735	0.000021	0.282733	-1.3	2.3	3.0	0.7	726	1068	-0.98
NM05-2-06	161.0	0.031830	0.000917	0.001048	0.000038	0.282737	0.000023	0.282734	-1.2	2.2	3.0	0.8	731	1068	-0.97
NM05-2-07	161.0	0.021574	0.000942	0.000705	0.000023	0.282751	0.000018	0.282749	-0.7	2.7	3.3	0.6	705	1035	-0.98
NM05-2-08	180.0	0.042887	0.000954	0.001323	0.000049	0.282682	0.000021	0.282678	-3.2	0.6	1.4	0.7	815	1183	-0.96
NM05-2-10	166.0	0.024341	0.000228	0.000861	0.000015	0.282772	0.000025	0.282769	0.0	3.5	4.4	0.9	679	987	-0.97
NM05-2-12	169.0	0.023700	0.000279	0.000636	0.000005	0.282746	0.000017	0.282744	-0.9	2.7	3.3	0.6	710	1040	-0.98
NM05-2-14	158.0	0.028052	0.000759	0.000971	0.000030	0.282748	0.000019	0.282745	-0.8	2.5	3.2	0.7	714	1045	-0.97
NM05-2-16	168.0	0.024090	0.000473	0.000653	0.000006	0.282749	0.000020	0.282747	-0.8	2.8	3.5	0.7	707	1035	-0.98
NM05-2-17	163.0	0.023434	0.000132	0.000835	0.000004	0.282794	0.000030	0.282792	0.8	4.3	5.3	1.1	646	937	-0.97
NM05-2-18	159.0	0.023084	0.000467	0.000655	0.000012	0.282721	0.000018	0.282719	-1.8	1.6	2.2	0.6	746	1104	-0.98
NM05-2-21	160.0	0.023320	0.000298	0.000640	0.000016	0.282717	0.000019	0.282715	-1.9	1.5	2.2	0.7	751	1112	-0.98
NM05-2-24	162.0	0.019048	0.000123	0.000536	0.000007	0.282724	0.000017	0.282722	-1.7	1.8	2.4	0.6	740	1095	-0.98
NM05-2-25	156.0	0.022032	0.000483	0.000686	0.000020	0.282743	0.000019	0.282741	-1.0	2.3	3.0	0.7	717	1057	-0.98
NM05-2-27	164.0	0.026007	0.000303	0.000728	0.000019	0.282750	0.000020	0.282748	-0.8	2.7	3.4	0.7	707	1036	-0.98
NM05-2-30	164.0	0.023850	0.000394	0.000776	0.000019	0.282696	0.000021	0.282694	-2.7	0.8	1.6	0.8	784	1158	-0.98

表 3 脑明特铜矿床花岗闪长岩主量、微量和稀土元素分析结果

Table 3 Compositions of major, trace and rare earth elements of the granodiorite in the Nomint copper deposit

元素	NM02-1-1	NM02-1-2	NM02-1-3	NM02-1-4	NM02-1-5	NM05-2-1	NM05-2-2	NM05-2-3
SiO ₂	65.20	66.03	64.36	64.11	63.27	62.81	64.60	65.09
TiO ₂	0.52	0.52	0.52	0.54	0.51	0.62	0.55	0.54
Al ₂ O ₃	15.10	15.01	15.20	15.38	15.32	15.54	15.77	15.72
Fe ₂ O ₃	1.49	1.24	1.51	1.75	1.40	0.97	0.52	0.86
FeO	3.13	3.01	2.55	2.63	3.00	4.84	3.67	3.49
MnO	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.09	0.05	0.08
MgO	2.21	2.16	2.68	2.38	2.72	2.66	2.26	2.06
CaO	3.01	2.98	2.78	2.90	3.14	2.97	3.05	2.69
Na ₂ O	4.30	4.22	3.67	3.84	3.79	4.31	4.58	4.47
K ₂ O	3.56	3.73	4.05	3.80	3.69	2.94	2.94	3.21
P ₂ O ₅	0.14	0.14	0.14	0.15	0.14	0.17	0.14	0.15
烧失量	1.05	1.06	2.29	2.27	2.59	1.78	1.50	1.63
总计	99.75	100.14	99.79	99.80	99.63	99.68	99.64	99.98
Na ₂ O+K ₂ O	7.86	7.95	7.72	7.64	7.49	7.25	7.52	7.68
K ₂ O/Na ₂ O	0.83	0.88	1.10	0.99	0.97	0.68	0.64	0.72
Mg [#]	46.80	48.24	54.97	50.21	53.23	45.37	49.35	46.21
σ	2.75	2.72	2.72	2.7	2.68	2.59	2.58	2.63
AR	2.53	2.58	2.38	2.44	2.36	2.29	2.33	2.43
A/NK	1.38	1.37	1.46	1.47	1.50	1.51	1.47	1.45
A/CNK	0.92	0.92	0.98	0.98	0.96	0.99	0.97	1.00
DI	74.33	75.22	73.36	73.31	71.12	68.41	72.15	73.97
C/%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	0.00	0.27
Rb	123.9	123.7	124.0	119.5	123.4	131.0	131.8	124.9
Sr	646.4	661.8	641.9	653.4	650.8	595.6	547.6	600.6
Ba	620	643	663	657	663	560	453	569
Th	16.39	15.93	16.79	15.44	16.05	14.91	23.47	20.67
U	4.68	5.04	5.96	2.52	4.01	4.93	7.95	5.37
Nb	7.61	6.32	6.59	7.22	7.12	8.01	6.50	6.11
Ta	0.77	0.98	1.15	0.74	0.82	0.85	1.02	0.75
Zr	135	131	130	130	131	144	150	137
Hf	2.75	2.59	2.97	2.83	2.97	4.05	6.14	4.56
Co	12.55	12.74	11.49	10.30	11.77	18.19	14.33	14.59
Ni	32.82	33.03	29.64	30.06	33.71	41.42	34.16	32.38
Cr	61.0	73.4	68.6	82.7	76.6	84.4	69.9	72.0
V	69.94	66.03	69.46	71.42	69.72	82.36	65.78	72.18
Li	16.30	16.44	12.53	11.99	12.79	18.30	18.01	16.86
Cs	6.23	6.05	6.57	6.37	6.76	13.78	12.01	12.59
Be	2.00	2.04	1.94	1.87	1.90	2.32	3.13	2.50
Ga	20.4	19.9	19.7	20.1	20.0	22.0	21.8	21.5
Cu	67.8	57.7	54.6	49.1	184.7	522.8	527.2	260.6
Pb	13.0	14.8	15.5	16.9	16.0	18.2	12.6	26.9
Zn	16.8	15.2	17.7	22.0	20.3	35.9	28.4	31.6

续表 3

元素	NM02-1-1	NM02-1-2	NM02-1-3	NM02-1-4	NM02-1-5	NM05-2-1	NM05-2-2	NM05-2-3
K/Rb	238.42	250.01	271.09	263.72	248.45	186.08	185.37	213.07
La	20.89	25.29	32.99	32.45	30.16	27.72	42.96	32.97
Ce	37.84	43.29	61.58	60.16	52.43	48.68	72.63	57.47
Pr	4.91	5.47	7.81	7.55	6.34	5.96	8.36	6.91
Nd	20.31	21.02	30.75	29.73	24.56	23.31	31.12	26.69
Sm	3.80	3.79	4.96	4.65	3.79	3.97	4.46	4.27
Eu	1.17	1.18	1.37	1.30	1.16	1.14	1.03	1.15
Gd	3.11	3.15	3.87	3.61	3.12	3.27	3.82	3.52
Tb	0.47	0.45	0.52	0.47	0.42	0.47	0.50	0.49
Dy	2.51	2.32	2.53	2.32	2.05	2.53	2.40	2.53
Ho	0.47	0.42	0.47	0.42	0.37	0.49	0.46	0.49
Er	1.29	1.27	1.33	1.20	1.05	1.41	1.34	1.41
Tm	0.22	0.21	0.23	0.20	0.18	0.26	0.24	0.25
Yb	1.46	1.31	1.46	1.34	1.20	1.65	1.59	1.67
Lu	0.20	0.19	0.21	0.19	0.17	0.25	0.24	0.24
Y	13.25	12.24	12.40	11.22	10.67	14.05	13.01	14.21
ΣREE	98.63	109.34	150.07	145.58	126.99	121.11	171.15	140.04
LREE	88.92	100.03	139.46	135.84	118.44	110.78	160.56	129.46
HREE	9.72	9.31	10.61	9.74	8.55	10.33	10.59	10.59
LREE/HREE	9.15	10.74	13.14	13.94	13.86	10.72	15.16	12.23
La _N /Yb _N	10.28	13.82	16.19	17.42	18.06	12.03	19.38	14.18
δEu	1.04	1.04	0.95	0.97	1.03	0.97	0.76	0.90
δCe	0.92	0.90	0.94	0.94	0.93	0.93	0.94	0.93

注: A/NK=Al₂O₃/(Na₂O+K₂O) (分子比), A/CNK=Al₂O₃/(Na₂O+K₂O+CaO) (分子比), DI为分异指数。主量元素含量单位为%, 微量和稀土元素含量单位为10⁻⁶

研究的报道。为限定脑明特铜矿床成岩成矿时代, 本文对脑明特铜矿床成矿花岗闪长岩进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年。定年结果显示, 2 件花岗闪长岩样品的锆石 U-Pb 年龄加权平均值分别为 166.3±2.3 Ma 和 162.6±1.6 Ma, 表明脑明特铜矿床成矿花岗闪长岩形成于中侏罗世。

由前文矿床地质特征研究结果可知, 脑明特铜矿体主要呈脉状、网脉状赋存在中侏罗世花岗闪长岩内, 部分矿体延伸至昂给尔特组石英砂岩内, 受近东西向次一级断裂构造、构造角砾岩及岩石内裂隙控制明显; 矿化不仅充填在围岩裂隙中, 还呈细脉浸染状分布在裂隙两侧的蚀变花岗闪长岩体内, 且厚度较大; 另外, 成矿花岗闪长岩体内蚀变作用十分强烈, 广泛发育硅化、钠长石化、钾长石化、绢云母-水云母化、碳酸盐化等蚀变。同时成矿花岗闪长岩具有较高的 Cu 含量, 本次分析的新鲜、无或弱蚀变的花岗闪长岩的 Cu 平均含量为 215.6×10⁻⁶, 远高于地

壳中 Cu 的含量 63×10⁻⁶(黎彤, 1976)。综上, 笔者认为, 脑明特铜矿的成矿花岗闪长岩与脑明特铜矿的形成密切相关, 可能并非仅作为赋矿岩体。由此进一步推测, 脑明特铜矿可能也形成于中侏罗世。

脑明特铜矿床的成因类型存在斑岩型(江思宏等, 2019)或岩浆热液型(张璟等, 2019; 邵军等, 2021)之争。该矿床所处的蒙古-鄂霍茨克造山带中段发育众多斑岩型铜矿, 与之毗邻的中国境内产出大量斑岩型矿床, 其中乌奴格吐山铜-钼矿床二长花岗斑岩形成于 188.3±0.6 Ma(秦克章等, 1999), 八大关铜-钼矿床石英闪长斑岩形成于 217.6±2.6 Ma(侯召硕, 2014), 八八一铜-钼矿床成矿斑岩形成于 234.4±0.6 Ma(江思宏等, 2018), 太平川铜-钼矿床成矿花岗闪长斑岩形成于 202±5.7 Ma(陈志广等, 2010), 蒙古国境内与蒙古-鄂霍茨克造山带中段有关的阿林诺尔钼矿床成矿花岗岩形成于 229±2.2 Ma(刘翼飞等, 2010), 而与蒙古-鄂霍茨克造山带西

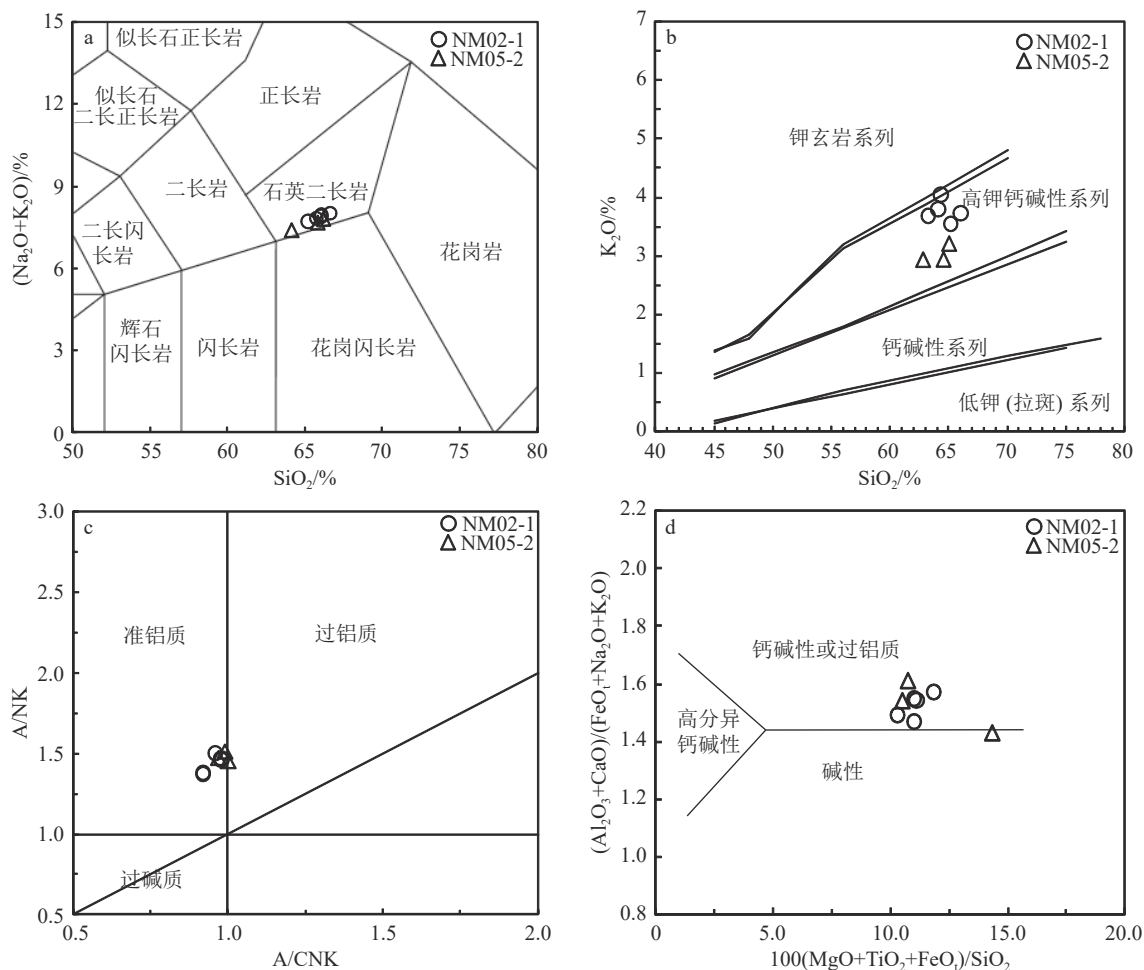


图 6 脑明特铜矿床花岗闪长岩 SiO_2 -($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)(a)、 SiO_2 - K_2O (b)、 A/CNK - A/NK (c) 及高分异花岗岩判别图解(d) (a 底图据 Middlemost, 1994; b 底图据 Peccerillo et al., 1976; c 底图据 Maniar et al., 1989; d 底图据 Sylvester, 1989)

Fig. 6 SiO_2 -($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) (a), SiO_2 - K_2O (b), A/CNK - A/NK (c) and highly fractionated granite discrimination (d) diagrams of the granodiorite in the Nomint copper deposit

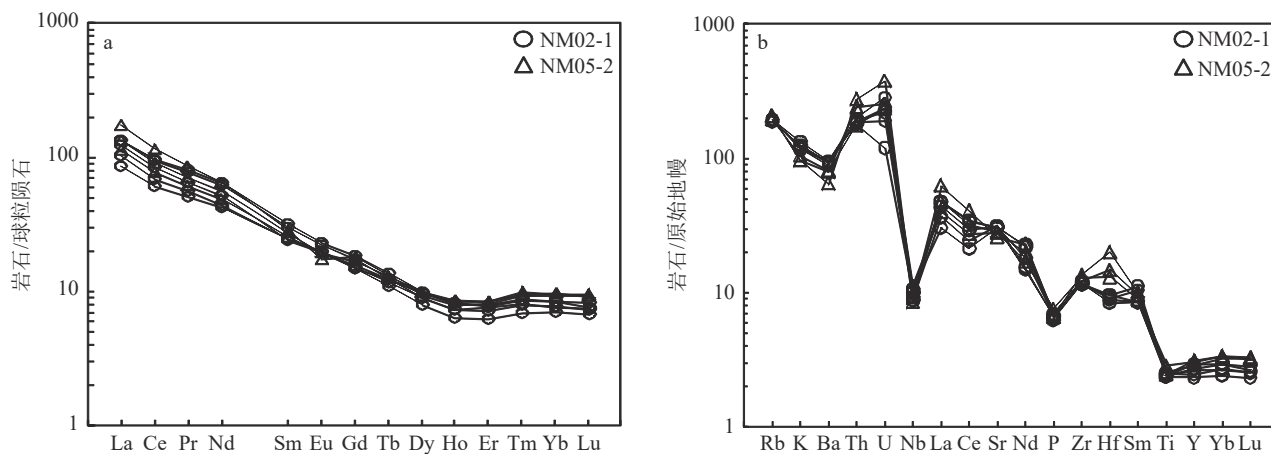


图 7 脑明特铜矿床花岗闪长岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b) (球粒陨石和原始地幔标准值分别据 Boynton, 1984 和 Sun et al., 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns(a) and primitive mantle-normalized trace elements spider diagram (b) of the granodiorite in the Nomint copper deposit

段有关的额尔登特铜-钼矿床成矿石英闪长岩形成于 240 Ma(江思宏等, 2010a)。这些年龄数据表明, 与蒙古-鄂霍茨克造山带中-西段有关的斑岩型铜钼成矿作用主要集中在中三叠世—早侏罗世之间, 并没有中侏罗世斑岩型铜成矿作用的记录。虽然在脑明特铜矿床东部约 10 km 处发育阿布达尔陶勒盖斑岩型铜钼矿床(图 1-a), 与之有关的花岗闪长斑岩与脑明特铜矿成矿花岗闪长岩均属阿布达尔陶勒盖期岩浆活动的产物, 但截至目前, 在脑明特矿区地表及深部尚未探获相似的斑岩体, 由此是否可排除脑明特铜矿床为斑岩型铜矿的可能? 该推测仍需进一步工作验证。尽管如此, 本次研究发现, 脑明特铜矿床的成矿成矿时代大体为中侏罗世, 丰富了区域铜成矿作用时限, 对研究区域铜成矿规律和指导找矿仍具有重要意义。

6.2 岩石成因及源区特征

花岗闪长岩体元素地球化学数据表明, 其具有明显的埃达克岩特征, 如主量元素 SiO_2 (62.81% ~ 66.03%) > 56%, Al_2O_3 (15.01% ~ 15.77%) > 15%, MgO (2.06% ~ 2.72%) < 3%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ < 1 (3 件发生轻微蚀变样品除外), 微量元素具有轻稀土元素相对富集, 重稀土元素相对亏损, Eu 异常不明显和贫 Y、Yb, 富集 Sr 的特点, 所有样品 Y 含量为 10.67×10^{-6} ~ 14.05×10^{-6} (< 18×10^{-6}), Yb 含量为 1.20×10^{-6} ~ 1.65×10^{-6} (< 1.9×10^{-6}), Sr 含量为 547.6×10^{-6} ~ 661.8×10^{-6} (> 400×10^{-6})。在 Y-Sr/Y 判别图解(图 8-a)中, 样品点全部落入埃达克岩区域。因此, 笔者认为脑明特铜矿的成矿花岗闪长岩为埃达克质岩石(张旗等, 2002)。

一般认为, 埃达克岩主要形成于: ①加厚下地壳的熔融(Atherton et al., 1993; 张旗等, 2001; 王强等, 2001); ②玄武质岩浆经地壳混染与分离结晶(Castillo et al., 1999); ③俯冲洋壳的熔融(Defant et al., 1990); ④拆沉下地壳部分熔融(Kay et al., 1993; Gao et al., 2004; Wang et al., 2006)。其中, 加厚下地壳部分熔融形成的埃达克岩往往具有较高的 SiO_2 、 K_2O 含量, 而 Mg、Cr、Ni 含量相对较低, 由加厚下地壳发生部分熔融的熔体一般 $\text{Mg}^\# < 45$ (Rapp et al., 1995)。本次研究中, 花岗闪长岩体的 $\text{Mg}^\#$ 值为 45.37 ~ 54.97 (平均值 49.30), 与加厚下地壳部分熔融形成的埃达克质岩石不同; 另外, 花岗闪长岩属于高钾钙碱性、准铝质的岩石, 并未经明显的结晶分

异作用。在图 6-d 中, 样品点全部落入钙碱性或过铝质区域, 故可以排除玄武质岩浆地壳混染与分离结晶成因。一般认为, 蒙古-鄂霍茨克洋在三叠纪—侏罗纪完成闭合(Zonenshain et al., 1990; Zorin, 1999; Kravchinsky et al., 2002; Sorokin et al., 2004, 2010; 许文良等, 2013, 2019), 位于造山带中部的脑明特铜矿所在地恰好经历着蒙古-鄂霍茨克洋闭合造山过程, 故其应属陆内构造环境, 排除了俯冲洋壳熔融的可能。Kay et al. (1993) 研究认为, 当地壳加厚到一定程度, 并且经历拆沉作用后可以形成埃达克岩, 而拆沉下地壳部分熔融的熔体在上升过程中不可避免地会与上地幔相互作用, 导致形成的岩浆具有上地幔的地球化学属性, 引起 MgO、Cr、Ni 等元素含量偏高(Gao et al., 2004)。脑明特矿床成矿岩体具有相对较高的 $\text{Mg}^\#$ 值和 Cr、Ni 含量, 且在图 8-b 中, 样品点全部投入拆沉下地壳熔融形成的埃达克岩区域。由此认为, 脑明特花岗闪长岩体应为拆沉下地壳熔融形成的埃达克岩。

锆石原位 Lu-Hf 同位素分析结果表明, 花岗闪长岩的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值在 +0.3 ~ +4.3 之间, 且在 $t-\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图解中, 所有样品点均落在球粒陨石附近(图 9-a); 在 $\delta\text{Eu}-(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 图解中, 样品点均落入壳幔混源区域内(图 9-b), 进一步说明侵入岩除壳源物质外, 还有幔源物质的加入。花岗闪长岩的二阶段模式年龄 T_{DM2} 在 1183 ~ 937 Ma 之间, 指示原岩为中元古代晚期—新元古代早期的物质。前人对蒙古国东部 Ereen Davaa 微陆块的研究表明, 该地块基底岩系主要由古—中元古界北部戈壁系、额仁达瓦系陆源沉积物组成, 与中国境内额尔古纳微陆块相连, 均位于额尔古纳隐伏活动断裂以北, 为西伯利亚陆块向南延伸的一部分(Badarch et al., 2002; 李俊建等, 2015), 二者应具有相似的陆块基底。然而, 根据对 Ereen Davaa 微陆块的最新研究发现(Miao et al., 2017), 区内曾被认为代表前寒武纪基底岩石的片麻岩、角闪岩、片岩等变质岩主要形成于早古生代(495 ~ 464 Ma)和晚古生代—早中生代(295 ~ 172 Ma)。但是, 在 Ereen Davaa 微陆块变质岩中发现了 1796 ~ 794 Ma 的继承性锆石, 这与中国境内额尔古纳地块前寒武纪基底兴华渡口群中正变质岩的锆石年龄(1100 ~ 820 Ma)相似(武广, 2005; 苗来成等, 2007; 表尚虎等, 2012), 证明该期侵入岩与陆块基底具有

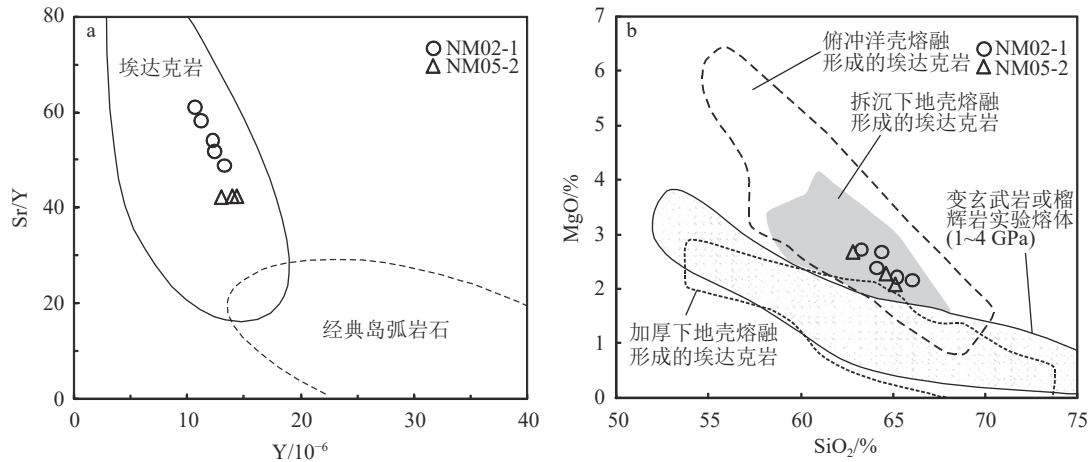


图 8 脑明特铜矿床花岗闪长岩 Y-Sr/Y(a, 底图据 Defant et al., 1993) 和 SiO_2 -MgO 图解(b, 底图据 Wang et al., 2006)

Fig. 8 Y-Sr/Y (a) and SiO_2 -MgO (b) diagrams of the granodiorite in Nomint copper deposit

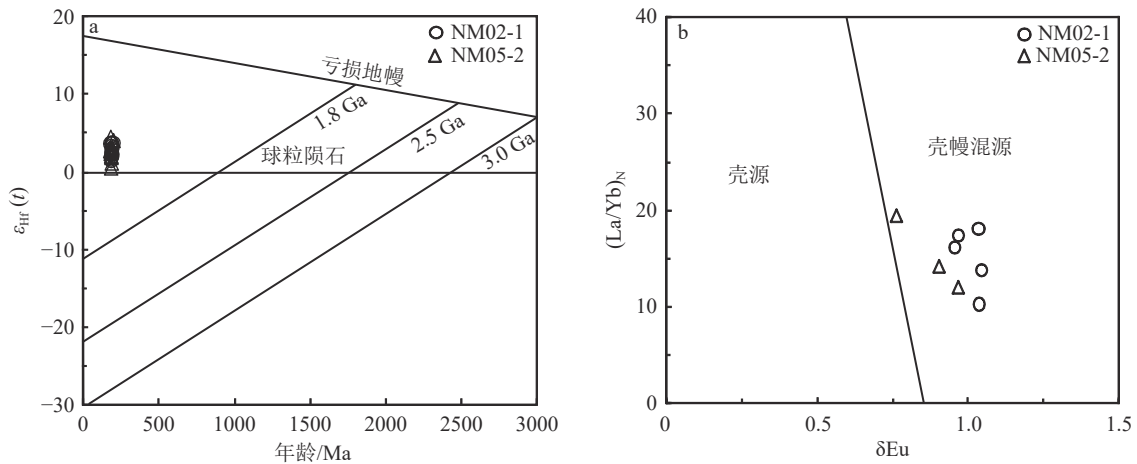


图 9 脑明特铜矿床花岗闪长岩 $t-\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图解(a, 底图据 Yang et al., 2006) 和 $\delta\text{Eu}-(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 图解(b, 底图据 Collins et al., 1982)

Fig. 9 The $t-\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ (a) and $\delta\text{Eu}-(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ (b) diagrams of the granodiorites in the Nomint copper deposit

成因联系。综上所述,笔者认为,脑明特矿床成矿花岗闪长岩的初始岩浆源区为拆沉下地壳的部分熔融,在初始岩浆上升过程中,加入了中-新元古代基底岩石组分,使之形成埃达克岩地球化学特征的成矿岩体。此外,脑明特铜矿成矿岩体中广泛发育的镁铁质暗色微粒包体的存在,也暗示其有幔源物质或年轻的下地壳物质的加入。

6.3 成岩成矿构造背景

脑明特铜矿床位于蒙古-鄂霍茨克缝合带中段的核心位置,对该矿床成矿岩体构造背景的研究,有助于丰富蒙古-鄂霍茨克造山带构造演化。对蒙古-鄂霍茨克的演化历史,学者们普遍认为,其活动时限从晚古生代一直到中生代(许文良等, 2019; 付俊彧等, 2021; 李猛兴等, 2023),而关于其闭合时限存在

较大争议,受西伯利亚板块相对于中-蒙地块旋转,造成蒙古-鄂霍茨克洋自西向东发生剪刀式闭合,西部在晚三叠世开始闭合,而东部闭合时间存在争议,一种观点认为在晚侏罗世已发生闭合(Zonenshain et al., 1990; Zorin, 1999; Sorokin et al., 2004; 许文良等, 2013),而另一种观点认为,东段闭合时间可持续到晚侏罗世—早白垩世(Kravchinsky et al., 2002; Sorokin et al., 2010)。对于脑明特铜矿所处位置,前人对该区的变质沉积岩进行了系统研究,发现该区在中侏罗世(172 ~ 163 Ma)发生了一期区域性构造变形事件,暗示该区在中侏罗世发生闭合(Miao et al., 2017)。与此同时,在中国境内兴安地块与松嫩地块之间的孙吴地区,发现一套原始岩浆起源于加厚陆壳物质部分熔融的白云母花岗岩,其形成时代

为中侏罗世(168 Ma), 被认为是与蒙古-鄂霍茨克缝合带闭合过程中陆-陆碰撞的产物(李宇等, 2015)。此外, 在与蒙古国毗邻的中国满洲里-额尔古纳地区出露一套碱性-亚碱性过渡属性的火山岩, 其形成时代同样为中侏罗世(166~158 Ma), 同样被认为是加厚陆壳坍塌阶段相对应的伸展环境的产物(孟恩等, 2011; Xu et al., 2013)。

综上所述, 鉴于脑明特矿床成矿岩体具有埃达克岩地球化学属性, 其原始岩浆形成于拆沉下地壳熔融, 形成时代为中侏罗世(166~162 Ma)。这些特点均与上述证据吻合, 说明该成矿岩体形成于蒙古-鄂霍茨克缝合带闭合后的陆内伸展环境, 并由此限定了蒙古-鄂霍茨克洋在该地区在中侏罗世时期已完成闭合。

7 结 论

(1) 蒙古国东北部脑明特铜矿床成矿花岗闪长岩形成时间分别为 166.3 ± 2.3 Ma 和 162.6 ± 1.6 Ma, 为中侏罗世晚期的产物, 并由此限定脑明特铜矿床成矿时代在中侏罗世晚期。

(2) 脑明特铜矿床成矿花岗闪长岩具有高 SiO_2 和 Al_2O_3 含量, 低 MgO 和 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值, 微量元素具有轻稀土元素相对富集, 重稀土元素相对亏损, Eu 异常不明显和贫 Y、Yb, 富集 Sr 的特点, 岩石具有典型埃达克岩的地球化学特征。

(3) 脑明特铜矿床成矿花岗闪长岩具有较低的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 正值(0.3~4.3), 二阶段模式年龄 $T_{\text{DM}2}$ 在 1183~937 Ma 之间, 岩浆源区为下地壳中-新元古界基底岩石部分熔融。该期侵入岩是在中侏罗世晚期蒙古-鄂霍茨克洋闭合后地壳加厚拆沉阶段的产物。

致谢: 感谢蒙古正元公司李德亮副总经理在矿床考察方面提供的帮助。

参考文献

Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 192(1/2): 59-79.

Atherton M P, Petford N. 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust [J]. *Nature*, 362: 144-146.

Badarch G, Cunningham W D, Windley B F. 2002. A new terrane subdivision for Mongolia: Implications for the Phanerozoic crustal growth of Central Asia [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21: 87-110.

Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly Sy, et al. 2002. Igneous Zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, (143): 602-622.

Boynton W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies [C]// Henderson P. *Rare earth Element Geochemistry*. Elsevier, Amsterdam: 63-114.

Castillo P R, Janney P E, Solidum R U. 1999. Petrology and geochemistry of Camiguin island, southern Philippines: insights to the source of adakites and other lavas in a complex arc setting [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 134: 33-51.

Chen Z G, Zhang L C, Wan B, et al. 2011. Geochronology and geochemistry of the Wunugetushan porphyry Cu-Mo deposit in NE China, and their geological significance [J]. *Ore Geology Reviews*, 43(1): 92-105.

Collins W J, Beams S D, White A J R, et al. 1982. Nature and origin of a type granites with particular reference to southeastern Australia [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80(2): 189-200.

Defant M J, Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas melting of young subducted lithosphere [J]. *Nature*, 347: 662-665.

Defant M J, Drummond M S. 1993. Mount St. Helens: Potential example of the partial melting of the subducted lithosphere in a volcanic arc [J]. *Geology*, 21(6): 547-550.

Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, et al. 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton [J]. *Nature*, 432(7019): 892-897.

Kay R W, Kay S M. 1993. Delamination and delamination magmatism [J]. *Tectonophysics*, 219(1/3): 177-189.

Kravchinsky V A, Cogné J P, Harbert W P, et al. 2002. Evolution of the Mongol-Okhotsk Ocean as constrained by new palaeomagnetic data from the Mongol-Okhotsk suture zone, Siberia [J]. *Geophysical Journal International*, 148(1): 34-57.

Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635-643.

Miao L C, Zhang F, Baatar M, et al. 2017. SHRIMP zircon U-Pb ages and tectonic implications of igneous events in the Erendavaa metamorphic terrane in NE Mongolia [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 144(aug.15): 243-260.

Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system [J]. *Earth Science Reviews*, 37(3/4): 215-224.

Nie F J, Li Q F, Liu C H, et al. 2015. Geology and origin of Ag-Pb-Zn deposits occurring in the Ulaan-Jiawula metallogenic province, northeast Asia [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, (97): 424-441.

Peccerillo R, Taylor S R. 1976. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 58: 63-81.

Rapp R P, Watson E B. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8-32 kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling [J]. *Journal of Petrology*, 36(4): 891-931.

Sorokin A A, Yarmolyuk V V, Kotov A B, et al. 2004. Geochronology of Triassic-Jurassic granitoids in the southern framing of the Mongol-Okhotsk fold belt and the problem of Early Mesozoic granite formation in central and eastern Asia [J]. *Doklady Earth Sciences*, 399(8): 1091-1094.

- Sorokin A A, Sorokin A P, Ponomarchuk V A, et al. 2010. The age and geochemistry of volcanic rocks on the eastern flank of the Umlakan-Ogodzha volcanoplutonic belt(Amur region)[J]. *Russian Geology and Geophysics*, 51(4): 369–379.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes, in magmatism in the ocean basins[M]. Geological Society of Special Publication, London: 313–345.
- Sylvester P J. 1989. Post-Collisional Alkaline Granites[J]. *The Journal of Geology*, 97(3): 261–280.
- Tang J, Xu W L, Wang F, et al. 2016. Early Mesozoic southward subduction history of the Mongol–Okhotsk oceanic plate: Evidence from geochronology and geochemistry of Early Mesozoic intrusive rocks in the Erguna Massif, NE China[J]. *Gondwana Research*, 31: 218–240.
- Wang Q, Xu J F, Jian P, et al. 2006. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, South China: Implications for the genesis of porphyry copper mineralization[J]. *Journal of Petrology*, 47(1): 119–144.
- Wang Y, Zhao C, Zhang F, et al. 2015. SIMS zircon U–Pb and molybdenite Re–Os geochronology, Hf isotope, and whole-rock geochemistry of the Wunugetushan porphyry Cu–Mo deposit and granitoids in NE China and their geological significance[J]. *Gondwana Research*, 28: 1228–1245.
- Xu W L, Pei F P, Feng W, et al. 2013. Spatial–temporal relationships of Mesozoic volcanic rocks in NE China: Constraints on tectonic overprinting and transformations between multiple tectonic regimes[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 74(25): 167–193.
- Yang J H, Wu F Y, Shao J, et al. 2006. Constraints on the Timing of Uplift of the Yanshan Fold and Thrust Belt, North China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 246(3/4): 336–352.
- Yuan H L, Gao S, Liu X M, et al. 2005. Accurate U–Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(3): 353–370.
- Zonenshain L P, Kuzmin M L, Natapov L M. 1990. Geology of the USSR: A plate–tectonics synthesis[M]. Washington DC: American Geophysical Union, Geodynamics Series, 21: 1–242.
- Zorin Y A. 1999. Geodynamics of the western part of the Mongolia–Okhotsk collisional belt, Trans-Baikal region (Russia) and Mongolia[J]. *Tectonophysics*, 306(1): 33–56.
- 表尚虎, 郑卫政, 周兴福. 2012. 大兴安岭北部锆石 U–Pb 年龄对额尔古纳地块构造归属的制约[J]. *地质学报*, 86(8): 1262–1272.
- 陈志广, 张连昌, 万博, 等. 2008. 内蒙古乌奴格吐山斑岩铜钼矿床低 Sr–Yb 型成矿斑岩地球化学特征及地质意义[J]. *岩石学报*, 24(1): 115–128.
- 陈志广, 张连昌, 卢百志, 等. 2010. 内蒙古太平川铜钼矿成矿斑岩时代、地球化学及地质意义[J]. *岩石学报*, 26(5): 1437–1449.
- 付俊或, 那福超, 李仰春, 等. 2021. 蒙古–鄂霍茨克洋南向俯冲: 小兴安岭西北部部落马湖群中三叠世岩浆记录[J]. *地质通报*, 40(6): 889–904.
- 侯召硕. 2014. 内蒙古额尔古纳地区八大关铜钼矿床成因与构造背景[D]. 吉林大学硕士学位论文: 39–46.
- 江思宏, 聂凤军, 苏永江, 等. 2010a. 蒙古国额尔登特大型铜–钼矿床年代学与成因研究[J]. *地球学报*, 31(3): 289–306.
- 江思宏, 聂凤军, 苏永江, 等. 2010b. 蒙古国图木尔廷敖包大型锌矿床地质特征及成因[J]. *地球学报*, 31(3): 321–330.
- 江思宏, 张莉莉, 刘翼飞, 等. 2018. 兴蒙造山带成矿规律及若干科学问题[J]. *矿床地质*, 37(4): 671–711.
- 江思宏, 韩世炯, 陈郑辉, 等. 2019. 蒙古国铜矿床成矿规律[J]. *地质科技情报*, 38(5): 1–19.
- 李俊建, 张锋, 任军平, 等. 2015. 中蒙边界地区构造单元划分[J]. *地质通报*, 34(4): 636–662.
- 李俊建, 唐文龙, 付超, 等. 2016. 中蒙边界地区成矿区带划分[J]. *地质通报*, 35(4): 461–487.
- 李猛兴, 王丽娟, 张利明, 等. 2023. 兴安地块南段霍布林岩体成因及其对蒙古–鄂霍茨克洋演化的启示[J]. *地质通报*, 42(9): 1541–1555.
- 李宇, 丁磊磊, 许文良, 等. 2015. 孙吴地区中侏罗世白云母花岗岩的年代学与地球化学: 对蒙古–鄂霍茨克洋闭合时间的限定[J]. *岩石学报*, 31(1): 56–66.
- 黎彤. 1976. 化学元素的地球丰度[J]. *地球化学*, (3): 167–174.
- 刘翼飞, 聂凤军, 江思宏, 等. 2010. 蒙古国阿林诺尔钼矿床赋矿花岗岩年代学及地球化学特征[J]. *地球学报*, 31(3): 343–349.
- 孟恩, 许文良, 杨德彬, 等. 2011. 满洲里地区灵泉盆地中生代火山岩的锆石 U–Pb 年代学、地球化学及其地质意义[J]. *岩石学报*, 27(4): 1209–1226.
- 苗来成, 刘敦一, 张福勤, 等. 2007. 大兴安岭韩家园子和新林地区兴华渡口群和扎兰屯群锆石 SHRIMP U–Pb 年龄[J]. *科学通报*, (5): 591–601.
- 秦克章, 李惠民, 李伟实, 等. 1999. 内蒙古乌奴格吐山斑岩铜钼矿床的成岩、成矿时代[J]. *地质论评*, 45(2): 180–185.
- 邵军, 李仁民, 鲍庆中, 等. 2021. 蒙古–鄂霍茨克洋成矿带中段地质演化、成矿作用及重要矿床[M]. 北京: 地质出版社: 19–23.
- 王强, 赵振华, 熊小林, 等. 2001. 底侵玄武质下地壳的熔融: 来自安徽沙溪 adakite 质富钠石英闪长玢岩的证据[J]. *地球化学*, (4): 353–362.
- 武广. 2005. 大兴安岭北部区域成矿背景与有色、贵金属矿床成矿作用[D]. 吉林大学博士学位论文: 31–35.
- 吴涛涛, 周永恒, 陈聪, 等. 2018. 蒙古国铀矿地质特征及资源潜力[J]. *地质与勘探*, 54(6): 1247–1255.
- 许文良, 王枫, 裴福萍, 等. 2013. 中国东北中生代构造体制与区域成矿背景: 来自中生代火山岩组合时空变化的制约[J]. *岩石学报*, 29(2): 339–353.
- 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.
- 张璟, 邵军, 鲍庆中, 等. 2014. 蒙古国乌兰铅锌矿地质特征、岩石地球化学特征及 U–Pb 年龄[J]. *中国地质*, 41(4): 1124–1135.
- 张璟, 王宇利, 成龙, 等. 2019. 蒙古国脑明特铜金矿地质特征与成矿模式[J]. *矿产勘查*, 10(12): 3063–3065.
- 张旗, 王焰, 钱青, 等. 2001. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造–成矿意义[J]. *岩石学报*, (2): 236–244.
- 张旗, 王焰, 刘伟, 等. 2002. 埃达克岩的特征及其意义[J]. *地质通报*, 21(7): 431–435.