

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.136>



蒙古国东部矽卡岩型铁多金属矿床 成矿岩体年代学及地球化学

张莉莉¹, 江思宏^{1*}, 王怀坤², 孟祥熙², 张 帅², 武昱东¹

1. 中国地质科学院矿产资源研究所自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037

2. 蒙古正元有限责任公司, 山东济南 250101

摘 要: 为探讨蒙古—鄂霍茨克洋演化有关的金属成矿问题, 对蒙古国东部哈拉特乌拉 Fe-Zn 矿床花岗闪长斑岩和查希尔 Fe-Mo 矿床黑云母二长花岗岩开展了锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学和 Hf 同位素组成研究。成矿岩体的年龄分别为 278 Ma 和 258 Ma, 均富钾、碱, 富集轻稀土元素和大离子亲石元素(K, Rb), 亏损高场强元素(Nb、Ta、Ti), 属高钾钙碱性 I 型花岗岩。锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分别为 6.6~9.8 和 6.9~11.1, Hf 两阶段模式年龄分别为 672~877 Ma 和 568~855 Ma, 表明岩体母岩浆源于新元古代亏损地幔形成的新生地壳的部分熔融。哈拉特乌拉和查希尔矽卡岩型铁多金属矿床成矿岩体应是蒙古—鄂霍茨克洋板块南东向俯冲的产物, 间接证明了蒙古—鄂霍茨克洋板块开始向南东俯冲的时间应早于 278 Ma。

关键词: U-Pb 年代学; 矽卡岩型; 铁多金属矿床; 蒙古—鄂霍茨克构造体系; 蒙古; 地球化学。

中图分类号: P595; P597; P612.

文章编号: 1000-2383(2022)08-2856-15

收稿日期: 2021-05-13

Geochronology and Geochemical Features of the Ore-Related Granite in the Skarn Type Fe Polymetallic Deposits in Eastern Mongolia

Zhang Lili¹, Jiang Sihong^{1*}, Wang Huaikun², Meng Xiangxi², Zhang Shuai², Wu Yudong¹

1. MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China

2. Mongolia Zhengyuan Co., Ltd., Jinan 250101, China

Abstract: In order to reveal the relationship between the ore genesis and the evolution of Mongolia-Okhotsk Ocean, we studied the whole rock geochemistry, U-Pb ages and Hf isotopes of the zircons from the ore-related granodiorite porphyry in the Haraat Uul Fe-Zn deposit and biotite monzogranite in the Tsahir Fe-Mo deposit. The ore-related granites were formed at ca. 278 Ma for the Haraat Uul Fe-Zn deposit and ca. 258 Ma for the Tsahir Fe-Mo deposit. The granitic rocks have high contents of K₂O and alkali, enrichments of LREE and LILEs (K, Rb), and depletions of HFSEs (Nb, Ta, Ti), which is indicative of high-K calc-alkaline I-type granites. The granodiorite porphyry of the Haraat Uul Fe-Zn deposit has positive $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ range of 6.6~9.8 with two-stage depleted mantle Hf model ages of 672~877 Ma; the biotite monzogranite for the Tsahir Fe-Mo deposit has positive $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ range of 6.9~11.1 with two-stage depleted mantle Hf model ages of 568~855 Ma, indicating that both of the protoliths were probably derived from a Neoproterozoic depleted mantle. Fe polymetallic mineralisation at the Haraat Uul and Tsahir areas was intimately

基金项目:《国家重点研发计划》项目(No.2017YFC0601303); 中国地质调查局项目《全球矿产资源储量动态评估》(No.DD20211410)。

作者简介: 张莉莉(1987—), 女, 博士, 主要从事金属矿床成矿规律研究。ORCID: 0000-0001-6406-1994. E-mail: zhanglili331@163.com

* **通讯作者:** 江思宏, ORCID: 0000-0002-7969-3860. E-mail: jiangsihong1@163.com

引用格式: 张莉莉, 江思宏, 王怀坤, 孟祥熙, 张帅, 武昱东, 2022. 蒙古国东部矽卡岩型铁多金属矿床成矿岩体年代学及地球化学. 地球科学, 47(8): 2856—2870.

Citation: Zhang Lili, Jiang Sihong, Wang Huaikun, Meng Xiangxi, Zhang Shuai, Wu Yudong, 2022. Geochronology and Geochemical Features of the Ore-Related Granite in the Skarn Type Fe Polymetallic Deposits in Eastern Mongolia. *Earth Science*, 47(8): 2856—2870.

related to the south-eastward subduction of the Mongol-Okhotsk Ocean, indirectly proved that the Mongolian-Okhotsk Ocean plate began to south-eastward subduction before 278 Ma.

Key words: U-Pb geochronology; skarn type; Fe-polymetallic deposit; Mongol-Okhotsk tectonic system; Mongolia; geochemistry.

0 引言

蒙古国地处中亚造山带的中东段,其构造演化与成矿规律研究越来越受到矿床学者的关注(如: Seltmann *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2017). 蒙古全境经历了新元古代—晚古生代古亚洲洋构造体系的演化,形成了世界级的欧玉陶勒盖斑岩型 Cu-Au-Mo 矿床(Porter, 2016)和查干苏布尔加斑岩型 Cu-Mo 矿床(Watanabe and Stein, 2000);其东部还经历了晚古生代—中生代蒙古—鄂霍茨克洋构造体系的演化,也形成了世界级的额尔登特斑岩型 Cu-Mo 矿床(江思宏等, 2010),以及一些其他类型的重要矿产,如图木尔廷敖包矽卡岩型 Fe-Zn 矿、喇嘛朝鲁图斑岩型 Cu-Mo 矿、脑名特斑岩型 Cu-Au 矿和阿布达尔陶勒盖斑岩型 Cu-Mo 矿(江思宏等, 2019). 蒙

古—鄂霍茨克构造带呈 SW-NE 向自蒙古国中部经西伯利亚东部一直延伸到现在的鄂霍茨克海,长度约 3 000 km(图 1). 近年来,在蒙古国东部新发现了一些矽卡岩型铁多金属矿床,如哈拉特乌拉 Fe-Zn 矿床、查希尔 Fe-Mo 矿床,及图木尔廷敖包 Fe-Zn 矿床,这些矿床的形成是否与蒙古—鄂霍茨克洋的演化相关尚不清楚,故本文选取位于蒙古国东部的哈拉特乌拉和查希尔矽卡岩型铁多金属矿床为主要研究对象,开展了成岩年代学和岩石地球化学研究,旨在探讨蒙古国东部矽卡岩型铁多金属矿床的形成与蒙古—鄂霍茨克洋构造体系演化之间的关系,为开展境内外金属成矿规律对比和指导国内相似类型金属矿床的找矿勘查提供科学依据.

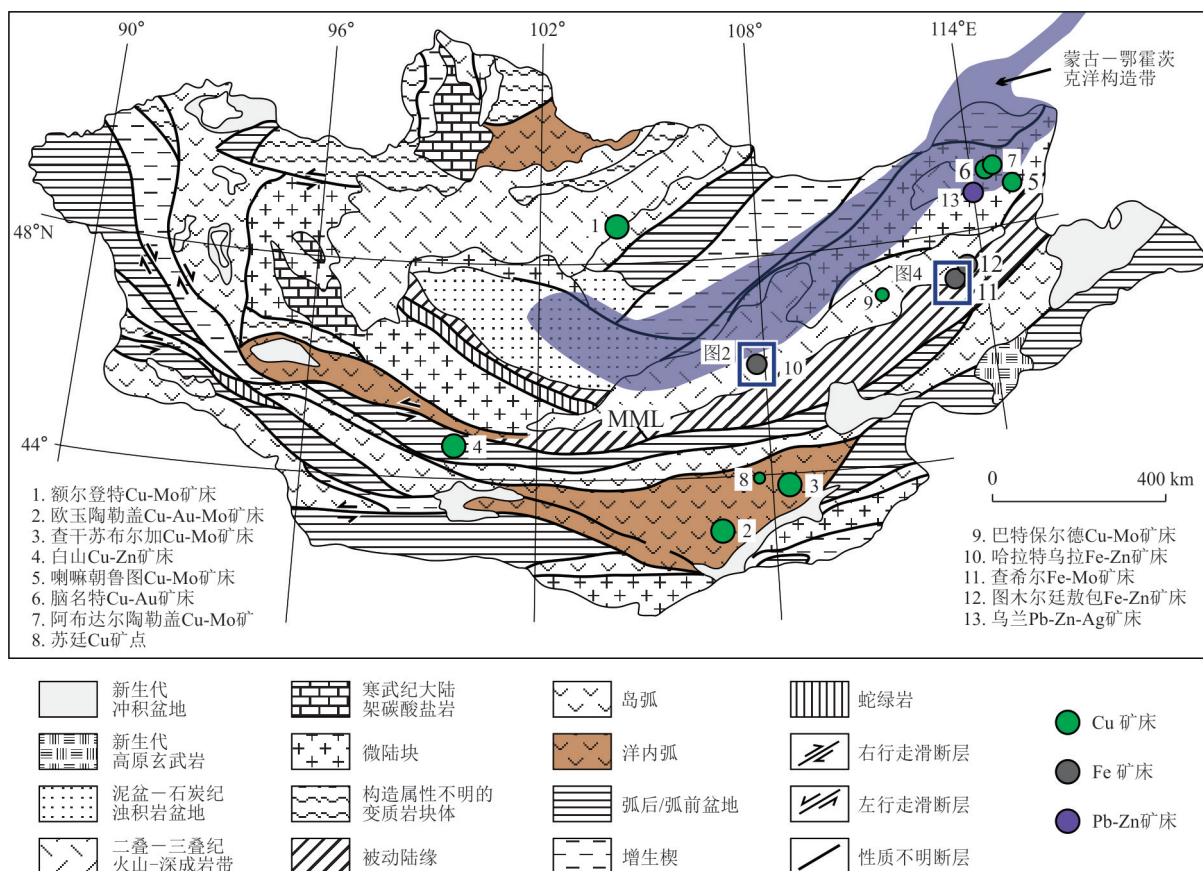


图 1 蒙古国主要金属矿床分布

Fig.1 Location of main ore deposits in Mongolia

底图据 Badarch *et al.*(2002); Tang *et al.*(2016)

1 区域地质背景

蒙古国位于中亚造山带的中东段,主要由一系列南凸的弧形构造和岩浆岩带组成,从新元古代到三叠纪自北向南经历了多期次的多岛洋盆聚合(Badarch *et al.*, 2002). 蒙古主构造线(MML)将整个蒙古划分为南、北两部分,北部出露有分散的前寒武纪和早古生代变质岩、新元古代蛇绿岩、早古生代岛弧火山岩和火山碎屑沉积岩,后期受到了蒙古—鄂霍茨克洋构造演化的影响. 关于蒙古—鄂霍茨克洋的起源,一种观点认为其是晚古生代便存在于亚洲东部的残留古太平洋(Donskaya *et al.*, 2013 及其参考文献);另一种观点认为,蒙古—鄂霍茨克洋起始于奥陶纪以后形成的一个弧后扩张盆地,该盆地的形成与古亚洲洋在早古生代时期的北向俯冲有关(Bussien *et al.*, 2011). 尽管对蒙古—鄂霍茨克洋的起源有不同的认识,但是都一致认同其具有剪刀式闭合特征,依据为沿着缝合带沉积岩与侵入岩自西向东变得越来越年轻(Metelkin *et al.*, 2010). MML 南部则主要发育泥盆—石炭纪与弧有关的火山岩和火山碎屑岩,并常见蛇绿岩碎片和蛇纹石化混杂岩. Badarch *et al.* (2002) 将整个蒙古划分为 44 个地体,其中 MML 北部 27 个,南部 17 个,地体类型有:克拉通型、变质型、被动大陆边缘型、岛弧型、弧后(前)盆地型、增生楔型和蛇绿岩型(图 1). 本文两处矽卡岩型铁多金属矿床就位于中戈壁带的二叠—三叠纪的火山—深成岩带(Badarch *et al.*, 2002).

研究区内出露地层主要为中元古界、古生界泥盆系、二叠系及中生界白垩系,其中,中元古界为一套海相沉积地层,呈残留体状分布,岩性主要为片岩、灰岩、大理岩化灰岩和白云质灰岩等;泥盆系为一套火山—沉积岩组合,主要岩性为灰岩和凝灰岩;二叠系为一套火山沉积地层,岩性主要为流纹岩、粗面岩、凝灰岩、安山岩和凝灰质粉砂岩;白垩系为一套陆相沉积地层,岩性主要为砂岩、粉砂岩、粘土岩和砾岩. 区域内岩浆活动强烈,分布有大面积的花岗岩类,具有多旋回、多期次侵入的特征. 区域构造主要为北东向和近东西向褶皱和断裂,控制了地层和岩浆岩的产出形态与规模.

2 哈拉特乌拉 Fe-Zn 矿床

2.1 矿区地质

哈拉特乌拉 Fe-Zn 矿床位于蒙古国南部中戈壁省境内,中心地理坐标:东经 107°43'35",北纬 45°59'20". 矿区内出露地层简单,主要为中元古界、古生界二叠系和新生界第四系(图 2). 中元界出露在矿区中部和北部,岩性主要为灰岩、大理岩化灰岩、大理岩、薄层石英角闪片岩. 地层走向北西,倾向北东或南西,倾角 50°~70°. 二叠系主要为火山沉积产物,在矿区内大面积出露,岩性为凝灰岩、凝灰角砾岩、凝灰熔岩及安山质、英安质、流纹质凝灰岩等. 第四系仅在矿区沟谷处见残破积层、坡积层、坡积—洪积层.

矿区内构造简单,主要为接触带构造,即碳酸盐岩—片岩岩层捕虏体和花岗闪长斑岩接触带. 沿接触带发生矽卡岩化,为导矿和储矿构造. 其次为断裂构造,为成矿期后的构造,对矿体起破坏作用.

矿区内侵入岩较为发育,主要有中粗粒花岗岩、花岗斑岩、正长斑岩、花岗闪长斑岩、闪长玢岩及流纹斑岩等.

2.2 矿体特征

矿区矽卡岩接触带走向为北西 300°~330°,呈似层状、透镜体状、不规则状分布,断续延长 3 500 m,宽一般在 100~400 m 之间. 矿区内共圈定 21 个矿体,探获(332+333)铁矿石资源量 5 674 万 t,矿床 TFe 平均品位 31.65%;伴生(332+333)锌金属量 44.61 万 t, Zn 平均品位 0.82%. 矿体自南东向北西,沿矽卡岩带分布,形态不规则,呈脉状、似层状、透镜状、扁豆状、条带状产出,厚度变化较稳定,有用组分分布均匀. 根据现有工程控制,主要矿体有 5 个,编号为 I、Ⅲ、①、③、④,次要矿体有 13 个,其余均为零星矿体. 围岩主要为不同成分的矽卡岩,包括石榴子石透辉石矽卡岩、石榴子石绿帘石透辉石矽卡岩、云母透辉石矽卡岩,其次为大理岩化灰岩、磁铁矿化大理岩化灰岩、大理岩和磁铁矿化大理岩,再次为花岗闪长斑岩、花岗斑岩和正长斑岩. 矿体与大理岩呈突变关系,与矽卡岩则呈渐变过渡. 矿体附近围岩内多见磁铁矿化,远离矿体磁铁矿化变弱. 围岩中普遍分布有浸染状黄铁矿颗粒.

I 号铁矿体:规模较大,地表断续出露,长度 980 m,倾向延深 350 m. 矿体沿矽卡岩带呈北西向弧形产出,呈脉状、囊状,走向 300°~330°,倾向北

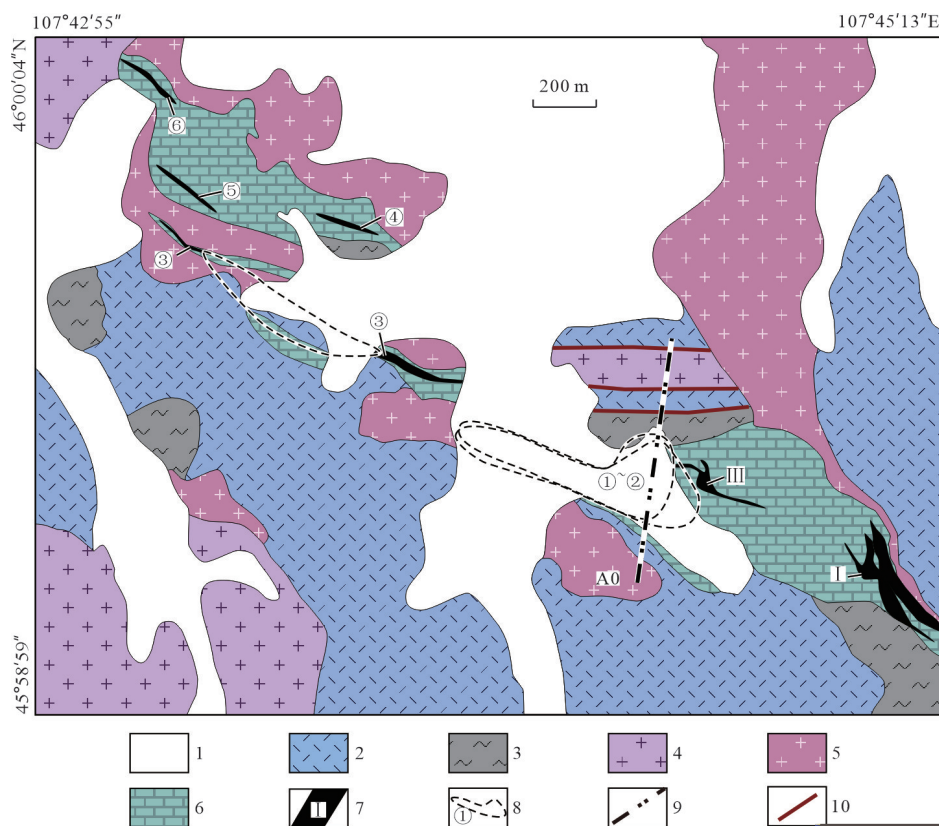


图2 哈拉特乌拉 Fe-Zn 矿区地质

Fig.2 Geological map of the Haraat Uul Fe-Zn ore district

1. 第四系; 2. 下二叠统安山岩、英安岩、流纹岩、凝灰岩、角砾岩; 3. 中元古界大理岩、大理岩化灰岩、片岩; 4. 花岗岩; 5. 花岗闪长斑岩; 6. 砂卡岩; 7. 矿体及编号; 8. 隐伏矿体及编号; 9. 勘探线; 10. 断层

东, 倾角 $68^{\circ} \sim 76^{\circ}$ 。矿体形态不规则, 膨胀狭缩现象明显。矿体厚度 1.85~83.59 m, 平均厚度为 26.92 m。矿体 TFe 品位 22.38%~55.94%, 平均品位为 34.87%, 伴生 Zn 品位 0.02%~3.72%, 平均品位 0.95%。

Ⅲ号矿体: 分布在哈拉特乌拉矿床砂卡岩带南东侧, 长度 232 m, 倾向延深 250 m。矿体沿砂卡岩带呈 S 形北西向产出, 呈脉状、囊状, 走向总体呈 300° , 向北西有分枝现象, 倾向北东, 倾角 $45^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 。矿体厚度 4.86~39.73 m, 平均厚度 17.58 m。矿体 TFe 27.30%~64.12%, TFe 平均为 44.56%, 伴生锌品位 0.02%~15.53%, 平均 0.54%。

①号铁矿体: 规模最大, 为一盲铁(锌)矿体, 走向延长约 1 100 m, 倾向延伸 330 m(图 3)。矿体呈似层状, 透镜状产出, 沿走向和倾向均呈舒缓波状, 分支复合产出。矿体总体走向北西 275° , 倾向北, 倾角 35° 。矿体平均真厚度 64.70 m, TFe 平均品位 34.87%, 伴生 Zn 平均品位 0.99%。

②号锌矿体: 为一盲锌矿体, 走向延长约 570

m, 倾向延伸 330 m(图 3)。矿体呈似层状、透镜状产出, 沿走向和倾向均呈舒缓波状, 分支复合产出。矿体总体走向北西 275° , 倾向北, 倾角 35° 。②号锌矿体与①号铁(锌)矿体呈重叠、交叉的形式产出。矿体平均真厚度 19.28 m, 矿体 Zn 平均品位 3.40%。

③号铁矿体: 走向延长约 1 300 m, 倾向延伸 144 m。矿体呈条带状、透镜状产出, 沿走向和倾向均呈舒缓波状形式产出。矿体总体走向北西 $292^{\circ} \sim 296^{\circ}$, 倾向南, 倾角 $50^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 。矿体平均真厚度 10.96 m, 矿体 TFe 平均品位 29.41%, 伴生 Zn 平均品位 0.984%。

④号铁矿体: 走向延长约 300 m, 倾向延伸 380 m。矿体呈似层状产出, 沿走向和倾向均呈舒缓波状, 分支复合、尖灭再现产出。矿体总体走向北西 282° , 倾向北, 倾角 $50^{\circ} \sim 81^{\circ}$ 。矿体单工程见矿真厚度 3.85~47.47 m, 平均真厚度 17.92 m。矿体 TFe 平均品位 26.17%, 不含伴生锌金属量。

矿石中金属矿物主要为磁铁矿、闪锌矿, 次为黄铜矿、黄铁矿、镜铁矿、赤铁矿, 少量的磁赤铁矿、

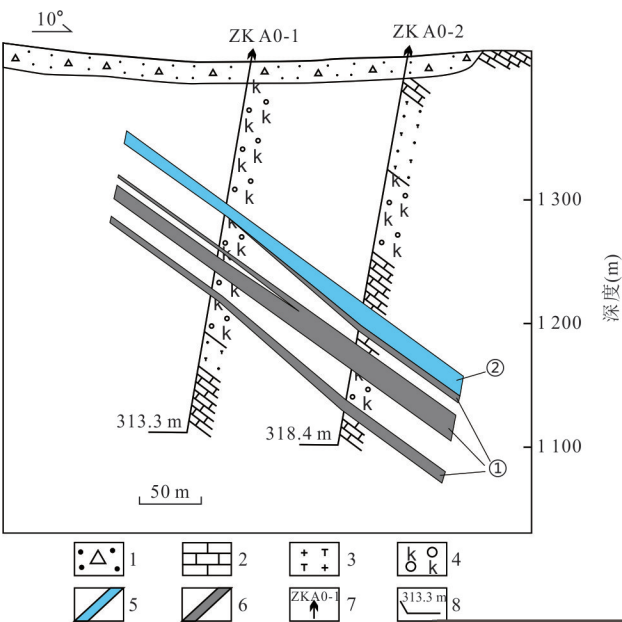


图3 哈拉特乌拉 Fe-Zn 矿床 A0 号勘探线剖面

Fig.3 Geological section along No.A0 exploration line of the Haraat Uul Fe-Zn ore district

1. 第四系; 2. 灰岩、大理岩化灰岩; 3. 花岗闪长斑岩; 4. 矽卡岩; 5. 锌矿体及编号; 6. 磁铁矿体及编号; 7. 钻孔编号及位置; 8. 钻孔深度

方铅矿等, 非金属矿物主要有碳酸盐矿物、透辉石、石榴子石、绿帘石, 其次石英、绿泥石、滑石、绢云母等. 矿石的结构主要为半自形—他形粒状结构、交代溶蚀结构、半自形粒状—粒状变晶结构, 其次为鳞片状变晶结构. 矿石构造以块状、条带状、浸染状及细脉浸染状、角砾状构造为主. 矿区近矿围岩蚀变为矽卡岩化、硅化、绢云母化、绿帘石化、碳酸盐化等.

3 查希尔 Fe-Mo 矿床

3.1 矿区地质

矿区位于蒙古国东部苏赫巴托省境内, 中心地理坐标: 东经 $112^{\circ}51'36''$, 北纬 $46^{\circ}44'17''$. 矿区内出露地层简单, 主要为古生代地层, 上覆新生代沉积物(图4). 古生界希尔嘎乌拉组出露在矿区中部, 走向北西 $280^{\circ}\sim 300^{\circ}$, 倾向北东, 倾角 $30^{\circ}\sim 50^{\circ}$, 主要岩性为泥质、砂质灰岩和安山质凝灰岩, 这些岩石多遭受到热液蚀变, 表现为硅化、大理岩化和矽卡岩化等. 该层位与矿化关系密切相关, 铁矿体的分布与灰岩和黑云母二长花岗岩接触交代形成的矽卡岩带分布一致. 矿区内构造主要为灰岩与花岗岩接触地段的接触带构造, 表现为矽卡岩带. 区内岩浆岩主要为黑云母二长花岗岩.

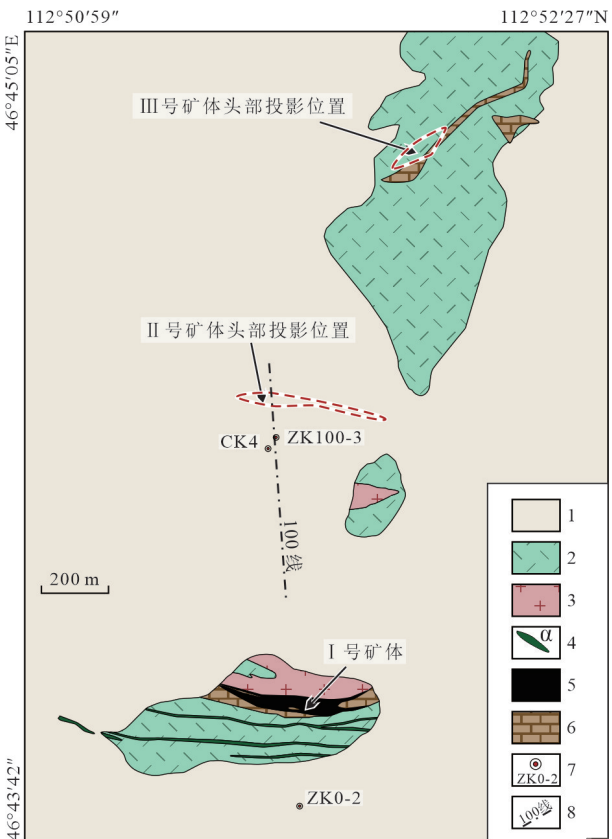


图4 查希尔 Fe-Mo 矿区地质

Fig. 4 Geological map of the Tsahir Fe-Mo ore district

1. 新生界; 2. 下泥盆统希尔嘎乌拉组: 泥质、砂质灰岩和安山质凝灰岩; 3. 黑云母二长花岗岩; 4. 辉绿岩; 5. 磁铁矿体; 6. 矽卡岩; 7. 钻孔及编号; 8. 勘探线

3.2 矿体特征

查希尔铁矿区矿体赋存于矽卡岩带内. 矿区内工程控制主要矿体2个, 为 I 号、II 号矿体; 次要矿体1个, 为 III 号矿体, 铁矿石推断以上级别资源量 5 440.70 万 t, 平均品位为 48.47%, 估算钼金属量 18 481 t, 平均品位 0.08%. 矿体形态呈似层状、脉状、不规则囊状, I 号矿体出露于地表, II、III 号矿体为隐伏矿体, 呈透镜状、不规则囊状产出.

I 号矿体: 矿体规模大, 地表出露 450 m, 长 700 m, 倾向延深 480 m. 矿体沿矽卡岩带呈东西向弧形产出, 呈似层状、透镜状, 走向 $250^{\circ}\sim 290^{\circ}$, 倾向南东, 倾角 $45^{\circ}\sim 78^{\circ}$. 矿体形态不规则, 膨胀狭缩现象明显, 地表在两端有分支现象. 矿体真厚度 2.01~88.02 m, 平均厚度为 26.06 m, 矿体 TFe 品位 21.09%~59.35%, 平均品位为 49.30%. 该矿体伴生 Mo 品位一般在 0.02%~0.36% 之间, 平均品位 0.08%.

II 号矿体: 位于矿区中部, 为隐伏矿体(图5).

长490 m,斜深280 m.矿体呈不规则囊状,走向为280°,倾向南东,倾角为7°~54°.矿体形态不规则,矿体顶底板起伏较大,膨胀狭缩现象明显,矿体厚度13.92~171.02 m,平均厚度81.37 m,矿体TFe品位21.25%~68.57%,平均47.75%.

Ⅲ号矿体:位于矿区北部,为隐伏矿体.推测矿体长200 m,斜深260 m,走向北东,倾向南东,倾角32°.矿体TFe平均品位45.10%.

矿区近矿围岩蚀变为大理岩化、矽卡岩化、硅化、绢云母化、绿帘石化等.矿石中金属矿物主要为磁铁矿、辉钼矿、黄铁矿、黄铜矿等.非金属矿物主要有透辉石、石榴子石、绿帘石,其次为碳酸盐矿物、石英、绿泥石、绢云母等.矿石的结构主要为半自形—他形粒状结构.矿石的构造以块状、条带状、浸染状构造为主.

矿体围岩主要为石榴子石矽卡岩、石榴子石透辉矽卡岩、透辉石矽卡岩和大理岩,其次为黑云母二长花岗岩、砂岩、凝灰岩.矿体与围岩界线清晰,靠近矿体的围岩多见磁铁矿化,与矿体呈渐变关系,远离矿体局部见有磁铁矿化,而围岩中普遍见有粒状黄铁矿分布.

在矿区南北两侧分别出露两条矽卡岩带,赋存Ⅰ号矿体的矽卡岩带走向250°~290°,地表延长约600 m,宽40~50 m,两端被第四系覆盖,辉钼矿赋存于矽卡岩带内;赋存Ⅱ号矿体的矽卡岩带隐伏于

地下;赋存Ⅲ号矿体的矽卡岩带走向北东52°,地表延长约590 m,最宽50 m左右,倾向南东,倾角40°左右.矽卡岩带主要由石榴子石矽卡岩、透辉石矽卡岩组成.

4 样品采集及测试方法

4.1 样品采集

HL-8号样品花岗闪长斑岩采自哈拉特乌拉矿区采坑内,坐标:107°45'01"E,45°59'07"N.岩石呈斑状结构,斑晶约占30%,主要包括:石英,约占6%,半自形,0.5~3.0 mm;钾长石,约占8%,1~2 mm,局部粘土化;斜长石,约占8%,1.0~2.5 mm,局部粘土化;角闪石,约占6%,0.5~1.5 mm;黑云母,约占2%,0.5~2.0 mm.基质约占70%.副矿物:<1%,主要为磷灰石,少量锆石.金属矿物:极少,黄铁矿、磁铁矿(图6a~6d).

CXE-2、CXE-3、CXE-4、CXE-5号样品黑云母二长花岗岩分别采自查希尔铁矿ZK0-2孔264.3 m、279 m、268.5 m、245 m处.岩石呈中粗粒花岗结构,主要矿物:石英,约占30%,他形粒状,直径约0.5~3.0 mm;钾长石,约占33%,半自形—他形,约1~5 mm;斜长石,约占30%,自形—半自形,约1~4 mm;黑云母,约占5%,片状,长轴约0.5~3.0 mm.副矿物:约2%,主要为锆石、磷灰石.金属矿物:<1%,主要为黄铁矿、磁铁矿(图6e~6h).

4.2 测试方法

4.2.1 锆石测年 将岩石样品人工破碎,经淘洗后用电磁选、重液分选的方法选出锆石,再于双目镜下进行进一步的挑选,用于测试.样品锆石的制靶和光学显微镜照相工作于北京锆年领航科技有限公司进行.选取晶形完好和透明度较高的单颗粒锆石,制成环氧树脂靶后打磨、抛光,分别在反射光、透射光和阴极发光下照相.使用的阴极发光装置为GATAN MINI CL,电子光学显微系统为日本电子扫描电镜JSM-6510.根据反射光、透射光和阴极发光图,避开裂隙和包裹体,选择干净、透明和环带清晰的测试点位,部分具有继承锆石边核结构特征的锆石,选择核部进行测试.

样品HL-8和CXE-2的LA-MC-ICP-MS锆石U-Pb定年测试分析在中国地质科学院矿产资源研究所自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室完成.锆石测年所用仪器激光烧蚀多接收器等离子质谱(LA-MC-ICPMS)由New Wave UP 213激光

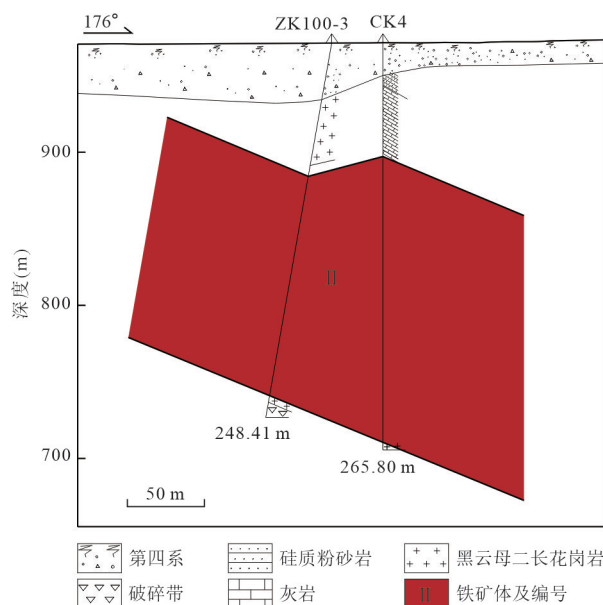


图5 查希尔Fe-Mo矿床Ⅱ号矿体100线剖面

Fig.5 Geological section along No.100 exploration line of the Tsahir Fe-Mo ore district

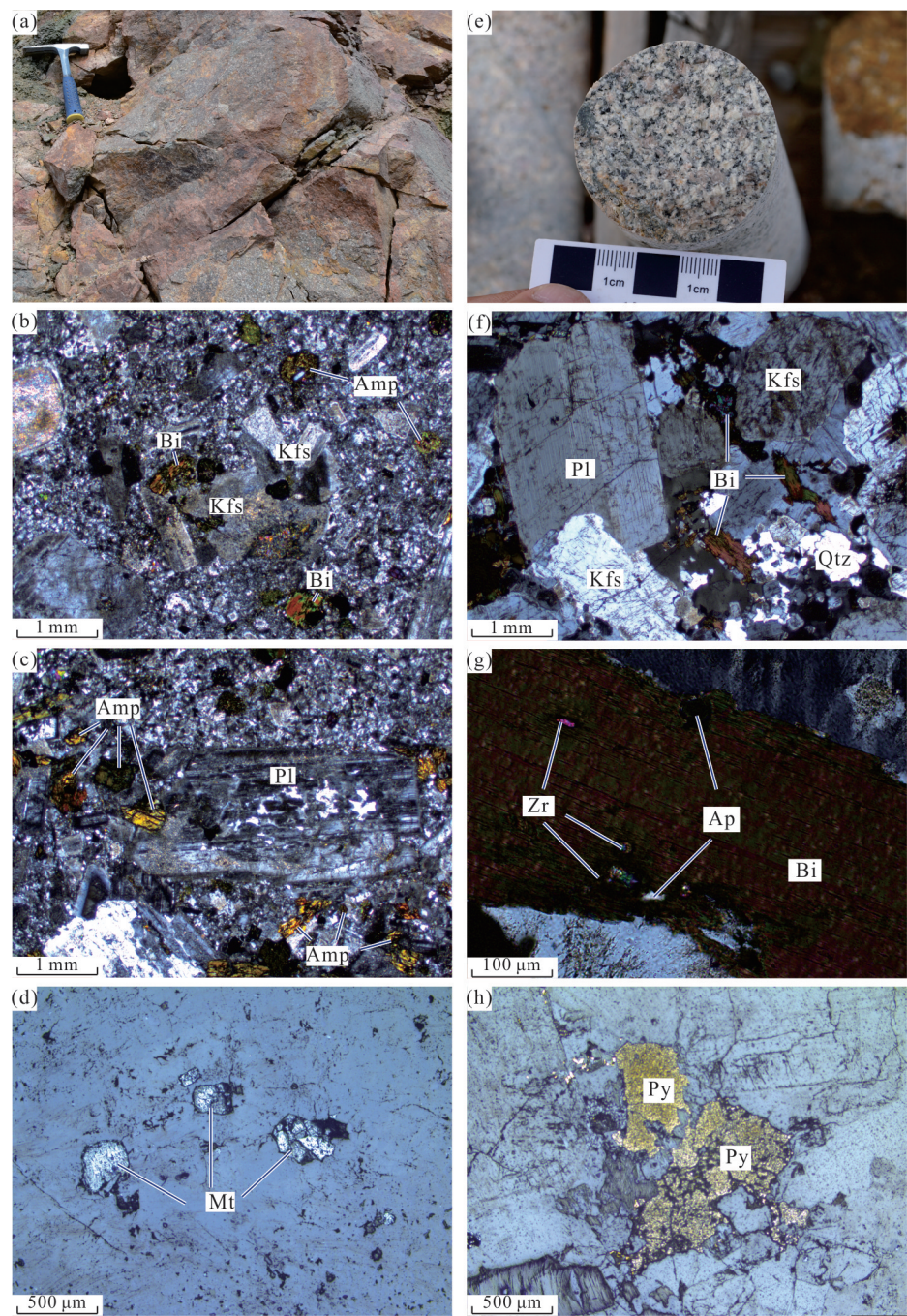


图6 哈拉特乌拉花岗闪长斑岩(样品号:HL-8)和查希尔黑云母二长花岗岩(样品号:CXE-2)岩相学特征
Fig.6 Petrographic characteristic of the granodiorite porphyry (Sample No. HL-8)in the Haraat Uul deposit and the biotite monzo-
granite (Sample No. CXE-2) in the Tsahir deposit

a. 采坑内的花岗闪长斑岩;b. 花岗闪长斑岩主要矿物组成(正交光); c. 花岗闪长斑岩中的角闪石和斜长石(正交光); d. 花岗闪长斑岩中的磁铁矿(反射光);e. 岩心中的黑云母二长花岗岩;f. 黑云母二长花岗岩主要矿物组成(正交光);g. 黑云母二长花岗岩中的副矿物(正交光);h. 黑云母二长花岗岩中的黄铁矿(反射光); Qtz. 石英;Kfs. 钾长石;Pl. 斜长石; Bi. 黑云母; Mt. 磁铁矿; Py. 黄铁矿; Zr. 锆石; Ap. 磷灰石; Amp. 角闪石

剥蚀系统和 Finnigan Neptune 型多接收等离子体质谱仪组成. 激光剥蚀所用斑束直径 25 μm, 频率为 10 Hz, 能量密度约为 2.5 J/cm², 以氦气为载. 激光剥蚀采样采用单点剥蚀的方式, 数据分析前用标样 GJ-1std、PL 和 SRM610 调试, U-Pb 定年用锆石样

GJ-1 作外标, 测量锆石 PL 观察仪器的状态和测试的重现性, 锆石标准的重现性在 1%(2σ) 左右. 测试时每测定 10 个样品点, 测定 2 次锆石标样 GJ-1std、1 次 SRM610 和 1 次 PL. 采用 ICPMSDataCal 程序对仪器灵敏度漂移校正、样品和空白信号的选择、元

素含量及U-Th-Pb同位素以及年龄计算(Liu *et al.*, 2008),测量过程中绝大多数分析点 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}>1\ 000$,未进行普通Pb校正,对 ^{204}Pb 含量异常高的测试点在计算时剔除.采用Isoplot程序绘制锆石U-Pb谐和图和计算加权平均年龄(Ludwig, 2003).详细实验测试过程参见侯可军等(2009).

4.2.2 锆石 Hf 同位素 锆石原位Hf同位素分析测试在中国地质科学院矿产资源研究所自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室完成,利用ESI NWR193型激光剥蚀系统(LA)的Neptune型多接收电感耦合等离子体质谱(MC-ICPMS).激光束直径为40 μm ,详细的分析方法见(侯可军等, 2007).采用 $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu}=0.026\ 580$ 和 $^{176}\text{Yb}/^{173}\text{Yb}=0.796\ 218$ (Chu *et al.*, 2002)进行校正,测定的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值用 $^{179}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.732\ 50$ 校正.用标准锆石91500与锆石样品交叉分析对仪器漂移进行外部监控.用单个锆石年龄和现在球粒陨石比值($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.282\ 772$; $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.03\ 320$)来计算 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ (Blichert-Toft *et al.*, 1997);参考现今亏损地幔比值($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ ratio of 0.283 25; $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ ratio of 0.038 40)计算单阶段模式年龄(T_{DM})(Verwoort and Blichert-toft, 1999);两阶段模式年龄(T_{DM}^{C})是在假设地壳平均 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值为0.015得到的(Griffin *et al.*, 2002).

4.2.3 全岩元素地球化学 岩石粉末样品的制备工作在廊坊岩拓地质服务有限公司完成.用于全岩主微量测试的岩石样品粉碎至200目粉末并保证混合均匀,粉碎过程中保证无污染,然后称取适量粉末样品进行测试.

岩石样品的主量元素和微量元素测试在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成,送样前首先经过岩石薄片显微镜下鉴定,然后选取新鲜至弱蚀变的样品,去除风化面,手工碎至1 mm,依次用3%的HCl和去离子水超声浸泡和清洗,烘干后用不锈钢钵粉碎至200目用于化学分析.主量元素采用X射线荧光光谱法测定(AxiosmAX X射线荧光光谱仪).微量元素采用高温高压消解,利用ELEMENT XR等离子体质谱仪.测试精度:主量元素的RSD $<5\%$,微量和稀土元素的RSD $<10\%$.

5 测试结果

5.1 锆石测年结果

HL-8花岗闪长斑岩的锆石绝大多数为长柱状,

长轴50~200 μm ,多数在100 μm 左右,长轴与短轴比值在1~4,多数为2.在CL图像中有明显的环带,显示岩浆锆石的特征.选择了20颗锆石开展了年代学测试(图7a),获得锆石中的Th含量($40.5\sim 317$) $\times 10^{-6}$,U含量($79.3\sim 285$) $\times 10^{-6}$,Th/U比值为0.50~1.11(附表1),具有岩浆锆石的特征.锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄介于(251 ± 5)~(373 ± 13) Ma,其中,11个锆石年龄结果比较接近,谐和度比较高,获得的加权平均年龄值为(278 ± 3) Ma,MSWD=2.1(图7b),代表了花岗闪长斑岩的侵位年龄;1个比较老的锆石年龄(点号:1),为(302 ± 8) Ma,可能为捕获的围岩锆石年龄;2个比较年轻的锆石年龄(点号:18、19),可能发生了铅丢失;其余6个测点(点号:2、11、13、14、15、16)协和度低,未参与锆石年龄计算.

CXE-2黑云母二长花岗岩的锆石绝大多数为长柱状,长轴50~160 μm ,多数在100 μm ,长轴与短轴比值在1~4.在CL图像中有明显的环带,显示岩浆锆石的特征(图7c).选择了20颗锆石开展了年代学测试,获得锆石中的Th和U含量分别为($179\sim 1\ 265$) $\times 10^{-6}$ 和($95.8\sim 618.0$) $\times 10^{-6}$,Th/U比值为0.47~3.30(附表1),具有岩浆锆石的特征.锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄介于(237 ± 4)Ma~(371 ± 6) Ma,其中,9个测点的锆石年龄结果比较接近,获得的加权平均年龄值为(258 ± 3) Ma,MSWD=0.75(图7d),代表了查希尔矿区黑云母二长花岗岩的侵位年龄;2个比较老的锆石年龄(点号:2、15),为(371 ± 6)Ma和(280 ± 5)Ma,可能为捕获的围岩锆石年龄;其余9个测点(点号为1、5、8、9、10、16、17、18、19)协和度低,未参与锆石年龄计算.

5.2 锆石 Hf 同位素测试结果

样品HL-8的12颗岩浆锆石的Hf同位素 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值介于0.282 789~0.292 886, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值介于0.001 089~0.002 027, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为6.6~9.8,两阶段模式年龄 T_{DM}^{C} 为672~877 Ma(附表2),属新元古代.1颗捕获锆石(点号:1)的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为12.3,两阶段模式年龄为531 Ma,属寒武纪.

样品CXE-2的9颗岩浆锆石的Hf同位素 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值介于0.282 802~0.282 942, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值介于0.001 305~0.004 327, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为6.9~11.1,两阶段模式年龄为568~855 Ma(附表2),属新元古代.1颗捕获锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为3.9,两阶段模式年龄为1 118 Ma,属中元古代.

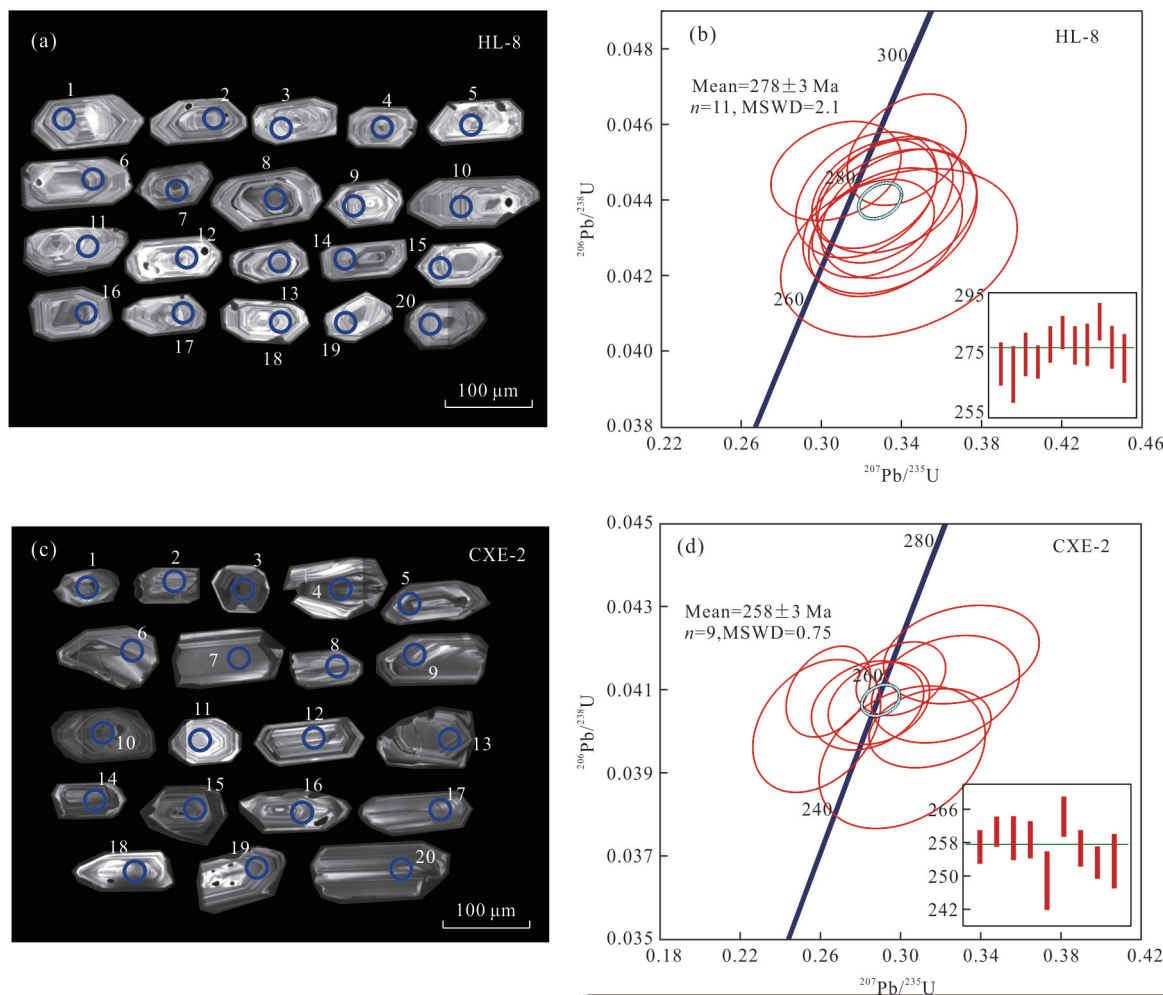


图7 哈拉特乌拉矿区花岗闪长斑岩锆石 CL 图像(a)和 U-Pb 谐和图(b);查希尔矿区黑云母二长花岗岩锆石 CL 图像(c)U-Pb 谐和图(d)
Fig. 7 Zircon CL images (a) and U-Pb concordia diagrams(b) for the granodiorite porphyry in Haraat Uul Fe-Zn deposit; zircon CL images (c) and U-Pb concordia diagrams(d) for the biotite monzogranite in Tsahir Fe-Mo deposit

5.3 岩石地球化学测试结果

哈拉特乌拉矿区花岗闪长斑岩 SiO_2 含量为 66.40%, Na_2O 含量为 4.47%, K_2O 含量为 4.44%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 为 0.99, Al_2O_3 含量为 16.13%, A/CNK 为 0.92(附表 3). 查希尔矿区黑云母二长花岗岩 SiO_2 含量为 66.00%~67.32%, Na_2O 含量为 5.72%~6.31%, K_2O 含量为 3.32%~3.69%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 介于 0.53~0.65 之间, Al_2O_3 含量为 17.06%~17.67%, A/CNK 介于 1.00~1.05 之间. 总的来看, 两处铁矿床岩体均具富钾、碱、贫钙、铁、镁特征. 哈拉特乌拉矿区花岗闪长斑岩为准铝质高钾钙碱性系列花岗岩, 查希尔矿区黑云母二长花岗岩则属弱过铝质高钾钙碱性系列(图 8a, 8b).

哈拉特乌拉矿区花岗闪长斑岩的稀土元素含量为 174.73×10^{-6} (附表 3), 在图 8c 中, 稀土配分曲线呈现右倾, 表明轻稀土富集, 中、重稀土亏损, Eu/Eu^*

值为 0.84, 表明 Eu 具有较弱的负异常. 在元素蛛网图中(图 8d), 亏损元素 Th、Nb、Ta、Sr、P、Ti, 富集元素 U、K、La、Ce、Sm、Tb. 查希尔矿区花岗闪长斑岩的稀土元素含量为 $(357.36 \sim 517.12) \times 10^{-6}$, 明显高于哈拉特乌拉矿区花岗闪长斑岩的稀土元素含量. 在图 8c 中, 稀土配分曲线呈现右倾, 表明轻稀土富集, 中、重稀土亏损, Eu/Eu^* 值为 0.85~1.06, 表明 Eu 具有较弱的负异常或者正异常. 在元素蛛网图中(图 8d), 亏损元素 Nb、Ta、Sr、P、Ti, 富集元素 U、K、La、Ce、Sm、Tb.

6 讨论

6.1 成岩成矿年代

测试结果表明, 哈拉特乌拉铁多金属矿床中与成矿有关的花岗闪长斑岩的锆石 U-Pb 年龄为

(278 ± 3) Ma, 查希尔铁矿中与成矿有关的黑云母二长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为(258 ± 3) Ma. 矽卡岩型矿床的形成与高温岩浆和钙质围岩的交代作用有关, 因此矽卡岩型矿床的成矿年龄非常接近或略晚于岩体的侵位年龄, 故哈拉特乌拉铁多金属矿床和查希尔铁多金属矿床的成矿年龄分别应略晚于为 278 Ma 和 258 Ma, 属于早、晚二叠世. 至今, 蒙古国东部尚未有二叠纪成矿年龄的报道. 区域上, 其南部的欧玉陶勒盖斑岩型 Cu-Au-Mo 矿床的形成年龄是 371 Ma (Porter, 2016), 查干苏布尔加斑岩型 Cu-Mo 矿床的形成年龄为 370 Ma (Watanabe and Stein, 2000), 苏廷斑岩型铜矿点的年龄为 333 Ma (朱明帅等, 2015), 均明显早于上述两个矽卡岩型铁多金属矿床的形成年代, 属晚泥盆—早石炭世. 而研究区北部的额尔登特斑岩型 Cu-Mo 矿床和图木尔廷敖包矽卡岩型 Fe-Zn 矿床的成矿年龄约为 240 Ma (Watanabe and Stein, 2000; 江思宏等,

2010), 均晚于本文两处矽卡岩型铁多金属矿床的成矿年龄, 属中三叠世. 故该区 278~258 Ma 的矽卡岩型铁矿床成矿年龄表明蒙古国东部存在二叠纪的成矿事件, 这一新发现对区域找矿和成矿规律的研究与总结具有重要意义.

6.2 成矿岩体成因和物质来源

哈拉特乌拉矿区花岗闪长斑岩和查希尔矿区黑云母二长花岗岩均具有富钾 (分别为 $K_2O = 4.44\%$; $3.32\% \sim 3.69\%$, 下同)、富碱 ($K_2O + Na_2O = 8.91\%$; $9.41\% \sim 9.76\%$)、贫钙 ($CaO = 2.99\%$; $1.60\% \sim 2.01\%$)、贫铁 ($FeO^T = 2.63\%$; $1.81\% \sim 2.04\%$)、贫镁 ($MgO = 0.98\%$; $0.58\% \sim 0.69\%$) 的特征, 总体上属准铝质到弱过铝质高钾钙碱性系列花岗岩类. 岩石成因类型方面, 样品具有相对低的 A/CNK 值 (0.92 ; $1.00 \sim 1.05$)、 FeO^T/MgO 值 (2.68 ; $2.92 \sim 3.21$) 和 $10\,000 \times Ga/Al$ 值 (2.19 ; $2.12 \sim 2.17$), 及 $FeO^T/(FeO^T + MgO)$ 值 (0.73 ; $0.75 \sim$

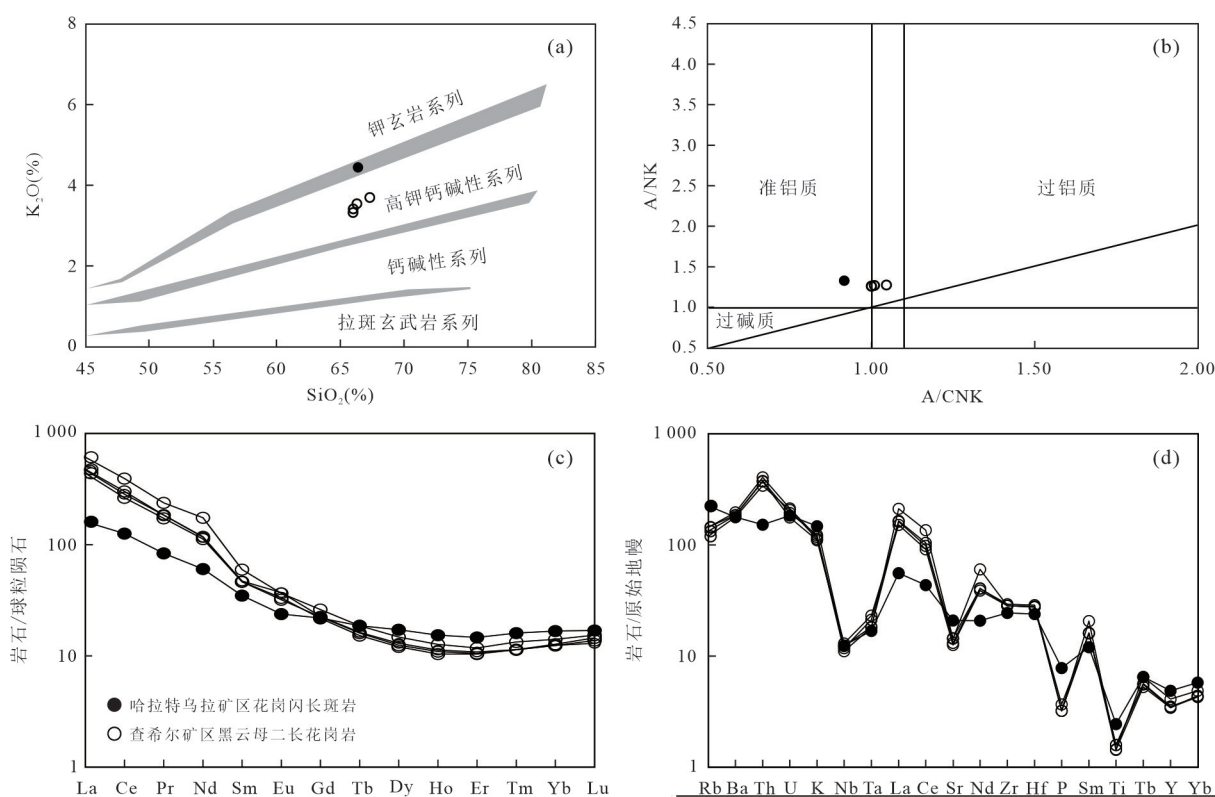


图8 哈拉特乌拉矿区花岗闪长斑岩和查希尔矿区黑云母二长花岗岩 SiO_2 vs. K_2O 图解 (底图据 Rickwood, 1989)(a); A/CNK vs. A/NK 图解 (底图据 Irvine and Baragar, 1971)(b); 球粒陨石标准化稀土元素配分曲线(c); 原始地幔标准化微量元素蛛网图(d)

Fig. 8 Diagrams for the granodiorite porphyry in Haraat Uul Fe-Zn deposit and biotite monzogranite in Tsahir Fe-Mo deposit showing: (a) SiO_2 vs. K_2O (modified after Rickwood, 1989); (b) A/CNK vs. A/NK (modified after Irvine and Baragar, 1971); (c) Chondrite-normalised REE patterns; and (d) primitive mantle normalised element spider patterns

标准化数据据 Sun and McDonough (1989)

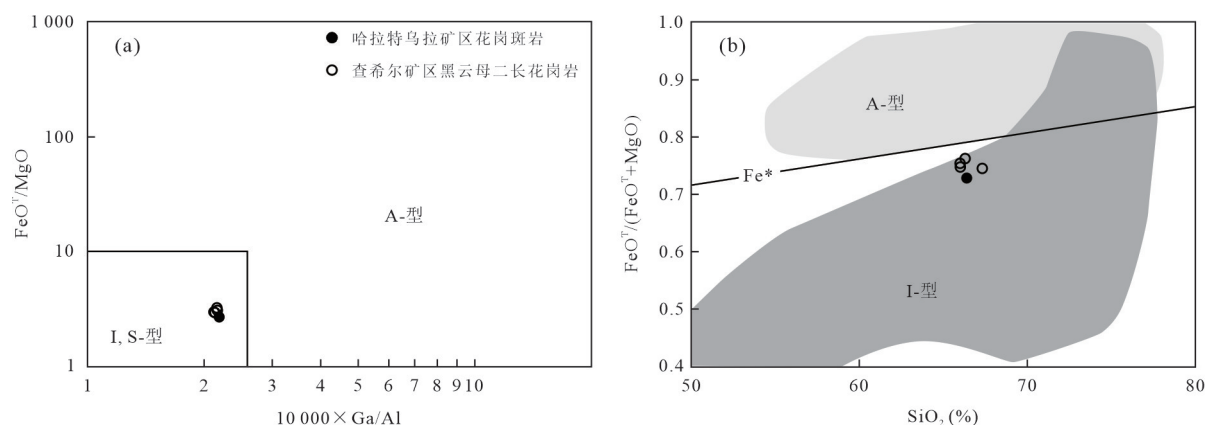


图9 哈拉特乌拉矿区花岗闪长斑岩和查希尔矿区黑云母二长花岗岩 $10\,000 \times \text{Ga}/\text{Al}$ vs. FeO^+/MgO 图解 (a); SiO_2 vs. $\text{FeO}^+ / (\text{FeO}^+ + \text{MgO})$ 图解 (b)

Fig. 9 Diagrams for the granodiorite porphyry in Haraat Uul Fe-Zn deposit and biotite monzogranite in Tsahir Fe-Mo deposit showing: (a) $10\,000 \times \text{Ga}/\text{Al}$ vs. FeO^+/MgO ; (b) SiO_2 vs. $\text{FeO}^+ / (\text{FeO}^+ + \text{MgO})$

底图依次据 Whalen *et al.* (1987); Frost *et al.* (2001)

0.76), 判断属 I 型花岗岩 (图 8b, 9a, 9b). 该结论也得到了样品岩相特征的进一步证实, 如哈拉特乌拉矿区花岗闪长斑岩中含有 I 型花岗岩特征矿物角闪石. 两处岩体均未见石榴子石、堇青石等特征矿物, 可排除 S 型花岗岩的可能. 尽管查希尔矿区黑云母二长花岗岩具有较高的锆饱和温度 ($830 \sim 839^\circ\text{C}$), 但因未见碱性特征矿物 (如钠铁闪石), 也进一步排除了 A 型花岗岩的可能. 一般来说, I 型花岗岩有 3 种成因解释: (1) 幔源玄武质岩浆和地壳熔体的混合模式 (Kemp *et al.*, 2007); (2) 幔源玄武质岩浆的结晶分异作用 (Barth *et al.*, 1995); (3) 壳内含水的钙碱性至高钾钙碱性的镁铁质到中性的变火成岩部分熔融演变而成 (Roberts and Clemens, 1993). 本文中两处铁矿岩体中均未见镁铁质捕虏体, 且锆石 Hf 同位素组成较均一, 表现为 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 ($6.6 \sim 11.1$; $7.5 \sim 16.0$) 跨度小于 10 (Kemp *et al.*, 2007), 故排除混合模式的可能. 通过结晶分异作用形成中酸性岩需要大量的幔源玄武质岩浆 (Peccherillo *et al.*, 2003), 而研究区附近二叠系是一套中酸性火山沉积地层, 不能满足通过结晶分异产生花岗岩所需玄武质岩浆的规模, 因此结晶分异模式也不适用于解释岩体成因. 前人研究指出, 地壳演化过程中元素 Nb 和 Ta 发生分馏, 使得幔源岩浆具有较高的 Nb/Ta 值 (~ 17.5), 而壳源岩浆 Nb/Ta 值则较低 ($\sim 11 \sim 12$) (Green, 1995). 本文两处铁矿成矿岩体 Nb/Ta 值分别为 13 和 $10 \sim 12$, 显示壳源特征. 此外, 部分岩石地球化学特征, 包括低 $\text{Mg}^\#$ 值 (< 40), 轻稀土元素富集, 重稀土元素亏损, 富集大离子亲

石元素 (K、Rb), 亏损高场强元素 (Nb、Ta、Ti), 也表明了成矿岩体应来源于地壳物质的部分熔融.

两处铁矿床成矿岩体均显示中稀土亏损, 表明岩浆源区的残留矿物中有角闪石或发生过角闪石的分离结晶 (Hanson, 1978). 不同之处在于, 哈拉特乌拉矿区花岗闪长斑岩显示负 Eu 异常, 而查希尔矿区黑云母二长花岗岩则显示极弱的 Eu 负异常或正异常, 表明前者岩浆源区可能存在斜长石残留, 而后者岩浆源区斜长石不稳定, 甚至不存在斜长石残留. 另外, 相较于哈拉特乌拉矿区花岗闪长斑岩, 查希尔矿区黑云母二长花岗岩具有更低的 Y、Yb、HREE 含量, 以及更高的锆饱和温度. 综上, 判断相较于哈拉特乌拉矿区花岗闪长斑岩, 查希尔矿区黑云母二长花岗岩母岩浆很可能源于深度更大的下地壳的部分熔融.

锆石 Hf 同位素测试结果显示, 哈拉特乌拉矿区花岗闪长斑岩锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $6.6 \sim 9.8$, 与查希尔矿区黑云母二长花岗岩锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 ($6.6 \sim 11.1$) 比较接近, 均为较高的正值, 表明岩体母岩浆为新生下地壳部分熔融产物, 这与中亚造山带中的花岗岩普遍具有正的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值具有一致性. 哈拉特乌拉矿区花岗闪长斑岩和查希尔矿区内黑云母二长花岗岩中的锆石的 Hf 两阶段模式年龄分别为 $672 \sim 877$ Ma 和 $568 \sim 855$ Ma, 推测两者均为新元古代亏损地幔形成的新生地壳熔融的产物. 大地构造上, 该区处于中亚造山带东段, 在中一新元古代古亚洲洋演化过程中经历了大规模的地壳增生过程, 并以垂向增生方式为主 (许文良等, 2019), 故认为这两个矿

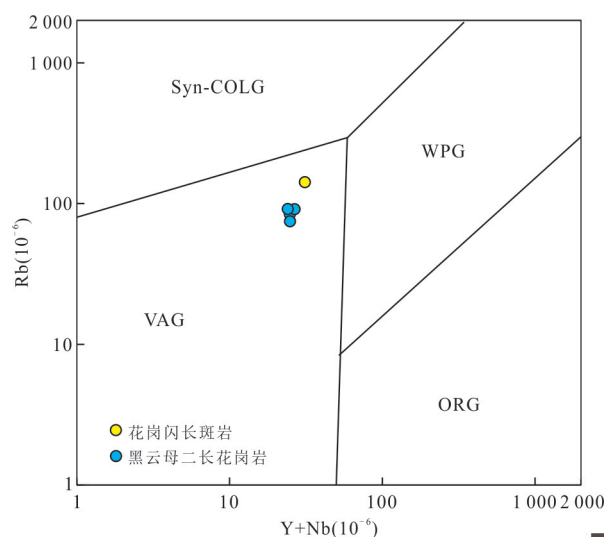


图10 哈拉特乌拉矿区花岗闪长斑岩和查希尔矿区黑云母二长花岗岩Rb-(Y+Nb)图

Fig. 10 Diagram of Rb versus (Y+Nb) for granodiorite porphyry in Haraat Uul Fe-Zn deposit and biotite monzogranite in Tsahir Fe-Mo deposit

底图据 Pearce *et al.* (1984); Syn-COLG. 同碰撞花岗岩; VAG. 火山弧花岗岩; WPG. 板内花岗岩; ORG. 大洋中脊花岗岩

区岩体母岩浆源区的形成可能与该期构造事件有关。

6.3 成矿地质背景

高钾钙碱性I型花岗岩主要形成于两种构造背景:(1)类似安第斯型陆缘弧,俯冲板片脱水产生流体相交代地幔楔形成母岩浆;(2)类似加里东造山带的后碰撞环境,母岩浆源于碰撞过程中地壳增厚至后碰撞的减压环境(Roberts and Clemens, 1993). 在构造环境判别图解中(图10),哈拉特乌拉矿区内的花岗闪长斑岩与查希尔矿区内的黑云母二长花岗岩均落在火山弧花岗岩范围内,表明其形成于活动大陆边缘。

二叠纪前后,研究区所在的中亚造山带中东段主要受古亚洲洋和蒙古—鄂霍茨克洋构造域影响(Tang *et al.*, 2016). 关于古亚洲洋最终的闭合时限和位置问题,虽仍有争议,但目前学界普遍认同其最终在晚二叠世末闭合于索伦缝合带(Xiao *et al.*, 2015). 该缝合带位于本文两处铁矿床以南500 km,且延伸方向近东西。而蒙古—鄂霍茨克缝合带则位于铁矿床北部不到100 km范围内,且延伸方向与两处铁矿床所在的二叠—三叠纪的火山—深成岩带相一致,均为NE-SW向。再则,研究区南部的欧玉陶勒盖和查干苏布尔加等斑岩型铜矿形成于泥盆

纪时期,与古亚洲洋一个分支大洋的俯冲有关。晚石炭世—二叠纪,该分支洋盆经历了闭合、碰撞和伸展的演化过程,形成了诸如欧玉陶勒盖铜矿床东部巨大的汗博格达(Khanbogd 或 Khan Bogd)碱性岩体,该岩体的侵位年龄约为290 Ma(Kovalenko *et al.*, 2006),为伸展构造背景下的产物,表明古亚洲洋已于早二叠世在研究区南侧结束了俯冲。综上,判断本文两处铁矿床成矿岩体的形成与古亚洲洋演化关系并不密切。

蒙古—鄂霍茨克洋俯冲至闭合时代均颇具争议,目前认为其在晚古生代局部已发生俯冲,持续到三叠纪,自西向东呈剪刀式闭合,最终闭合于晚侏罗—早白垩世(许文良等, 2019)。故判断,本文两处铁矿床成矿岩体应是蒙古—鄂霍茨克洋板块南东向俯冲的产物(图11)。该构造带北东向沿线的额尔古纳地块西北部也见有两处高钾钙碱性I型花岗岩的报道,成岩年龄分别为267~241 Ma和246 Ma(Tang *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2018),以及地块东北部一处早—中三叠世的安山岩的报道,成岩年龄为251~243 Ma(李强等, 2020),表明蒙古国境内这条二叠—三叠纪的火山—深成岩带很可能向北东一直延伸至我国境内。相应地,该火山—深成岩带发育有一系列砂卡岩型Zn-Fe矿床,从南西到北东,依次产出有哈拉特乌拉、查希尔、图木尔廷敖包3个大型矿床,成矿年龄具有逐渐变年轻的趋势,即从哈拉特乌拉Fe-Zn矿床的278 Ma,到查希尔Fe-Mo矿床的258 Ma,再到图木尔廷敖包Zn-Fe矿床的240 Ma(江思宏等, 2010; 图1),印证了蒙古—鄂霍茨克洋板块俯冲自南西至北东剪刀式闭合的特征,同时也间接证明了早在278 Ma的早二叠世,蒙古—鄂霍茨克洋板块就已开始向南东俯冲,即该板块开始向南东俯冲的时间应早于278 Ma。此外,倘若该火山—深成岩带延伸至我国境内,其沿线迄今尚未发现形成于中—晚三叠世的大型砂卡岩Fe矿床,但不排除其存在的可能性。

7 结论

(1)哈拉特乌拉和查希尔砂卡岩型铁多金属矿床的成矿年龄分别为278 Ma和258 Ma,属早、晚二叠世。

(2)哈拉特乌拉矿区花岗闪长斑岩和查希尔矿区黑云母二长花岗岩均具有富钾、碱,贫钙、铁、镁的特征,轻稀土元素富集,中重稀土元素亏损,富集

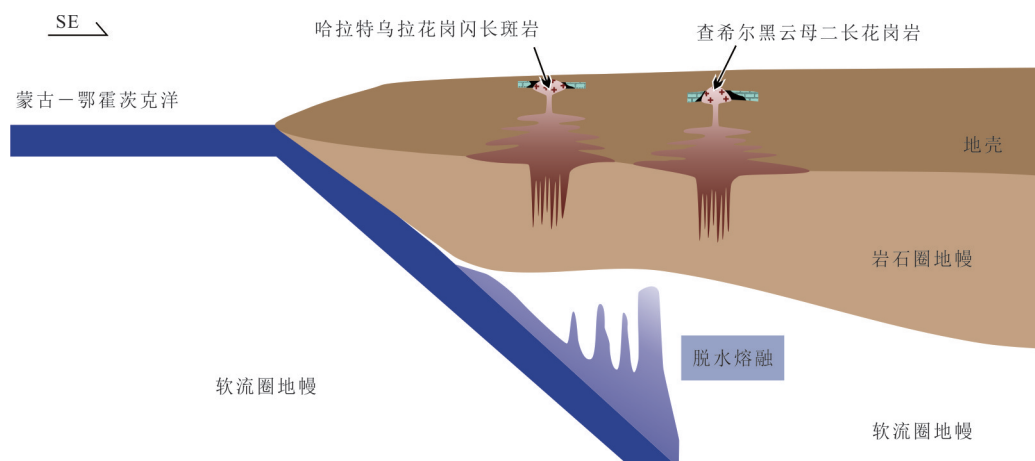


图 11 研究区构造-岩浆-成矿演化模式图

Fig. 11 Cartoon showing the proposed geodynamics-petrogenetic-metallogenic model for the study area

大离子亲石元素(K、Rb),亏损高场强元素(Nb、Ta、Ti),总体上属准铝质到弱过铝质、高钾钙碱性系列、I型花岗岩。哈拉特乌拉矿区花岗闪长斑岩锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为6.6~9.8, Hf两阶段模式年龄为672~877 Ma;查希尔矿区黑云母二长花岗岩锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为6.9~11.1, Hf两阶段模式年龄为568~855 Ma,两者均为新元古代亏损地幔形成的新生地壳熔融的产物。

(3)哈拉特乌拉和查希尔矽卡岩型铁多金属矿床的成矿岩体应是蒙古-鄂霍茨克洋板块南东向俯冲的产物,间接证明了蒙古-鄂霍茨克洋板块开始向南东俯冲的时间应早于278 Ma。

致谢:参加野外考察的还有蒙古科技大学的Baatar Munkhtsengel教授、Bayaraa Batkhishig教授和Otgonkhuu Javkhlan博士,中国地质科学院矿产资源研究所陈郑辉教授级高级工程师、蒙古正元公司的汲鹏高工,吉林大学的杨言辰教授、韩世炯博士。野外考察期间,还得到了蒙古科技大学Ochir Gere教授、山金矿业有限责任公司和蒙龙查胡特敖包有限责任公司的大力帮助,在此对上述各位专家和单位表示最诚挚的感谢。

附表见本刊官网(www.earth-science.net)。

References

- Badarch, G., Cunningham, W.D., Windley, B. F., 2002. A New Terrane Subdivision for Mongolia: Implications for the Phanerozoic Crustal Growth of Central Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21(1): 87–110. [https://doi.org/10.1016/s1367-9120\(2\)00017-2](https://doi.org/10.1016/s1367-9120(2)00017-2)
- Barth, A. P., Wooden, J. L., Tosdal, R. M., et al., 1995. Crustal Contamination in the Petrogenesis of a Calc-Alkaline Rock Series: Josephine Mountain Intrusion, California. *Geological Society of America Bulletin*, 107(2): 201. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1995\)107<0201:ccitpo>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1995)107<0201:ccitpo>2.3.co;2)
- Blichert-Toft, J., Gleason, J. D., Télouk, P., et al., 1997. The Lu-Hf Isotope Geochemistry of Shergottites and the Evolution of the Martian Mantle-Crust System. *Earth and Planetary Science Letters*, 173(1/2): 25–39. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(99\)00222-8](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(99)00222-8)
- Bussien, D., Gombojav, N., Winkler, W., et al., 2011. The Mongol-Okhotsk Belt in Mongolia: an Appraisal of the Geodynamic Development by the Study of Sandstone Provenance and Detrital Zircons. *Tectonophysics*, 510(1/2): 132–150. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.06.024>
- Chu, N. C., Taylor, R. N., Chavagnac, V., et al., 2002. Hf Isotope Ratio Analysis Using Multi-Collector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry: An Evaluation of Isobaric Interference Corrections. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 17(12): 1567–1574. <https://doi.org/10.1039/b206707b>
- Donskaya, T. V., Gladkochub, D. P., Mazukabzov, A. M., et al., 2013. Late Paleozoic-Mesozoic Subduction-Related Magmatism at the Southern Margin of the Siberian Continent and the 150 Million-Year History of the Mongol-Okhotsk Ocean. *Journal of Asian Earth Sciences*, 62(7): 79–97. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.07.023>
- Frost, B. R., Barnes, C. G., Collins, W. J., et al., 2001. A Geochemical Classification for Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 42(11): 2033–2048. <https://doi.org/10.1093/petrology/42.11.2033>
- Green, T. H., 1995. Significance of Nb/Ta as an Indicator of Geochemical Processes in the Crust-Mantle System.

- Chemical Geology*, 120(3/4): 347—359. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00145-x](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00145-x)
- Griffin, W. L., Wang, X., Jackson, S. E., et al., 2002. Zircon Chemistry and Magma Mixing, SE China: In-Situ Analysis of Hf Isotopes, Tonglu and Pingtan Igneous Complexes. *Lithos*, 61(3/4): 237—269. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(2\)00082-8](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(2)00082-8)
- Hanson, G. N., 1978. The Application of Trace Elements to the Petrogenesis of Igneous Rocks of Granitic Composition. *Earth and Planetary Science Letters*, 38(1): 26—43. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(78\)90124-3](https://doi.org/10.1016/0012-821x(78)90124-3)
- Hou, K. J., Li, Y. H., Tian, Y. R., 2009. In situ U-Pb Zircon Dating Using Laser Ablation-Multi Ion Counting-ICP-MS. *Mineral Deposits*, 28(4): 481—492 (in Chinese with English abstract).
- Hou, K. J., Li, Y. H., Zou, T. R., 2007. Laser Ablation-MC-ICP-MS Technique for Hf isotope Microanalysis of Zircon and Its Geological Application. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2595—2604 (in Chinese with English abstract).
- Irvine, T. N., Baragar, W. R. A., 1971. A Guide to the Chemical Classification of the Common Volcanic Rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(5): 523—548. <https://doi.org/10.1139/e71-055>
- Jiang, S. H., Han, S. J., Chen, Z. H., et al., 2019. Summary on Metallogeny of Copper Deposits in Mongolia. *Geological Science and Technology Information*, 38 (5): 1—19 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, S. H., Nie, F. J., Su, Y. J., et al., 2010. Geochronology and Origin of the Erdenet Superlarge Cu-Mo Deposit in Mongolia. *Acta Geoscientica Sinica*, 31 (3): 289—306 (in Chinese with English abstract).
- Kemp, A. I. S., Hawkesworth, C. J., Foster, G. L., et al., 2007. Magmatic and Crustal Differentiation History of Granitic Rocks from Hf-O Isotopes in Zircon. *Science*, 315(5814): 980—983. <https://doi.org/10.1126/science.1136154>
- Kovalenko, V. I., Yarmolucyk, V. V., Sal'nikova, E. B., et al., 2006. Geology, Geochronology, and Geodynamics of the Khan Bogd Alkali Granite Pluton in Southern Mongolia. *Geotectonics*, 40: 450—466. <https://doi.org/10.1134/S0016852106060033>
- Li, Q., Cheng, X. Q., Chen, W., et al., 2021. Discovery of Early-Middle Triassic Andesite in Erguna Massif and Its Indication of Southward Subduction of Mongol-Okhotsk Ocean Plate. *Earth Science*, 46(8): 2768—2785(in Chinese with English abstract).
- Liu, H. C., Li, Y. L., He, H. Y., et al., 2018. Two-Phase Southward Subduction of the Mongol-Okhotsk Oceanic Plate Constrained by Permian-Jurassic Granitoids in the Erguna and Xing'an Massifs (NE China). *Lithos*, 304—307: 347—361. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.01.016>
- 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. *Chemical Geology*, 257(1/2): 34—43. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.08.004>
- Ludwig, K. R., 2003. User's Manual for a Geochronological Toolkit for Microsoft Excel (Isoplot/Ex version 3.0) Berkeley Geochron Center Special Publication, California, 71.
- Metelkin, D. V., Vernikovskiy, V. A., Kazansky, A. Y., et al., 2010. Late Mesozoic Tectonics of Central Asia Based on Paleomagnetic Evidence. *Gondwana Research*, 18(2/3): 400—419. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2009.12.008>
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W., Tindle, A. G., 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956—983. <https://doi.org/10.1093/petrology/25.4.956>
- Peccerillo, A., Barberio, M. R., Yirgu, G., et al., 2003. Relationships between Mafic and Peralkaline Silicic Magmatism in Continental Rift Settings: A Petrological, Geochemical and Isotopic Study of the Gedemsa Volcano, Central Ethiopian Rift. *Journal of Petrology*, 44(11): 2003—2032. <https://doi.org/10.1093/petrology/egg068>
- Porter, T. M., 2016. The Geology, Structure and Mineralisation of the Oyu Tolgoi Porphyry Copper-Gold-Molybdenum Deposits, Mongolia: A Review. *Geoscience Frontiers*, 7(3): 375—407. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.08.003>
- Rickwood, P. C., 1989. Boundary Lines within Petrologic Diagrams which Use Oxides of Major and Minor Elements. *Lithos*, 22(4): 247—263. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(89\)90028-5](https://doi.org/10.1016/0024-4937(89)90028-5)
- Roberts, M. P., Clemens, J. D., 1993. Origin of High-Potassium, Talc-Alkaline, I-Type Granitoids. *Geology*, 21(9): 825. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1993\)021<0825:oohtpa>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1993)021<0825:oohtpa>2.3.co;2)
- Seltnann, R., Porter, T. M., Pirajno, F., 2014. Geodynamics and Metallogeny of the Central Eurasian Porphyry and Related Epithermal Mineral Systems: A Review. *Journal of Asian Earth Sciences*, 79(2): 810—841. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2013.03.030>
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313—345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>

- 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. *Gondwana Research*, 31(5): 218–240. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.12.010>
- Vervoort, J. D., Blichert-Toft, J., 1999. Evolution of the Depleted Mantle: Hf Isotope Evidence from Juvenile Rocks through Time. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(3/4): 533–556. [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(98\)00274-9](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(98)00274-9)
- Wang, T., Tong, Y., Zhang, L., et al., 2017. Phanerozoic Granitoids in the Central and Eastern Parts of Central Asia and their Tectonic Significance. *Journal of Asian Earth Sciences*, 145(3): 368–392. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.06.029>
- Watanabe, Y., Stein, H. J., 2000. Re-Os Ages for the Erdenet and Tsagaan Suvarga Porphyry Cu-Mo Deposits, Mongolia, and Tectonic Implications. *Economic Geology*, 95(7): 1537–1542. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.95.7.1537>
- Watson, E. B., Harrison, T. M., 1983. Zircon Saturation Revisited: Temperature and Composition Effects in a Variety of Crustal Magma Types. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2): 295–304. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(83\)90211-x](https://doi.org/10.1016/0012-821x(83)90211-x)
- Whalen, J. B., Currie, K. L., Chappell, B. W., 1987. A-Type Granites: Geochemical Characteristics, Discrimination and Petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407–419. <https://doi.org/10.1007/bf00402202>
- Xiao, W. J., Brian, F. W., Shu, S., et al., 2015. A Tale of Amalgamation of three Permo-Triassic Collage Systems in Central Asia: Oroclines, Sutures, and Terminal Accretion. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 43(1): 477–507. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060614-105254>
- Xu, W. L., Sun, C. Y., Tang, J., et al., 2019. Basement Nature and Tectonic Evolution of the Xing'an-Mongolian Orogenic Belt. *Earth Science*, 44(5): 1620–1646 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, M. S., Anaad, C., Baatar, M., et al., 2015. SHRIMP Zircon U-Pb Dating of Tsagaan Suvarga and Shuteen Porphyry Copper Deposits: Constraints on Metallogenic Time and Tectonic Setting of Porphyry-Type Mineralization in South Gobi, Mongolia. *Geological Bulletin of China*, 34(4): 675–685 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 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. 矿床地质, 28(4): 481–492.
- 侯可军, 李延河, 邹天人, 等, 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用. 岩石学报, 23(10): 2595–2604.
- 江思宏, 韩世炯, 陈郑辉, 等, 2019. 蒙古国铜矿床成矿规律. 地质科技情报, 38(5): 1–19.
- 江思宏, 聂凤军, 苏永江, 等, 2010. 蒙古国额尔登特特大型铜-钼矿床年代学与成因研究. 地球学报, 31(3): 289–306.
- 李强, 程学芹, 陈伟, 等, 2020. 额尔古纳地块早-中三叠世安山岩的发现及其对蒙古-鄂霍茨克洋南向俯冲的指示. 地球科学, 46(8): 2768–2785.
- 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. 地球科学, 44(5): 1620–1646.
- 朱明帅, Anaad, C., Baatar, M., 等, 2015. 蒙古国查干苏布尔加和苏廷铜矿容矿斑岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄—对南戈壁斑岩型铜矿成矿时代及成矿背景的约束. 地质通报, 34(4): 675–685.