



引文格式: 宋彦博, 王继春, 袁硕浦, 等. 内蒙古下陶勒盖铁铜矿床成矿岩体地球化学特征及其成岩成矿启示[J]. 西北地质, 2024, 57(2): 90–106. DOI: 10.12401/j.nwg.2024009

Citation: SONG Yanbo, WANG Jichun, YUAN Shuopu, et al. Geochemical Characteristics of Ore-forming Intrusions and their Diagenetic and Metallogenic Revelation from the Xiataolegai Iron and Copper Deposit, Inner Mongolia[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(2): 90–106. DOI: 10.12401/j.nwg.2024009

内蒙古下陶勒盖铁铜矿床成矿岩体地球化学特征及其成岩成矿启示

宋彦博¹, 王继春², 袁硕浦¹, 王建平^{1,*}, 翟德高¹, 柳振江¹, 许展²,
王东星², 邱广东², 杨永亮¹

(1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 内蒙古自治区地质调查院, 内蒙古呼和浩特 010020)

摘要: 下陶勒盖铁铜矿床是位于内蒙古阿拉善盟额济纳旗西部的一处矽卡岩铁铜矿床, 同时也是北山成矿带早山地块古生代活动陆缘矽卡岩成矿系统的典型代表。其成矿与花岗闪长岩和二长花岗岩有密切的时空联系, 为查明二者的形成时代、岩浆源区特征及其与矿化之间的关系, 笔者开展了对花岗闪长岩和二长花岗岩进行了岩相学、岩石地球化学及锆石 U-Pb 年代学研究。结果表明, 花岗闪长岩与二长花岗岩均具有高 SiO₂、Al₂O₃ 含量和高碱含量, 低 MgO 含量, 轻稀土元素富集, 重稀土元素亏损。花岗闪长岩具 Eu 负异常和弱 Ce 正异常, 亏损 Ta、Nb、Ti 和 P 等高场强元素, 富集 Rb 和 La 等大离子亲石元素; 二长花岗岩具弱 Eu 负异常和 Ce 正异常, 亏损 Nb、Ti 和 P 等高场强元素, 富集 Rb 和 U 等大离子亲石元素, 这些特征表明二者均属钙碱性 I 型花岗岩。获得花岗闪长与二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄分别为 (451.7±4.8) Ma 和 (460.1±4.9) Ma, 指示该矿床东矿段和西矿段成岩及与其相关的成矿作用分别发生于晚奥陶世和中奥陶世。综合分析认为, 下陶勒盖铁铜矿床形成于中—晚奥陶世陆缘弧构造环境, 与洋盆俯冲产生的挤压作用有关。

关键词: 下陶勒盖铁铜矿床; 花岗闪长岩; 二长花岗岩; 岩石地球化学; 锆石 U-Pb 定年

中图分类号: P595; P618.41

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)02-0090-17

Geochemical Characteristics of Ore-forming Intrusions and their Diagenetic and Metallogenic Revelation from the Xiataolegai Iron and Copper Deposit, Inner Mongolia

SONG Yanbo¹, WANG Jichun², YUAN Shuopu¹, WANG Jianping^{1,*}, ZHAI Degao¹, LIU Zhenjiang¹, XU Zhan²,
WANG Dongxing², QIU Guangdong², YANG Yongliang¹

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Autonomous Region Geological Survey Institute of Inner Mongolia, Hohhot 010020, Inner Mongolia, China)

收稿日期: 2023-10-15; 修回日期: 2024-01-11; 责任编辑: 姜寒冰

基金项目: 内蒙古自治区自然资源厅项目“内蒙古北山成矿带黑鹰山-石板井地区铁铜钼多金属成矿系统研究与找矿预测”(2022-TZH03)资助。

作者简介: 宋彦博(1998-), 男, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail: 1339168830@qq.com。

* 通讯作者: 王建平(1972-), 男, 教授, 主要从事矿床学的教学与科研工作。E-mail: jpwang@cugb.edu.cn。

Abstract: The Xiataolegai iron and copper deposit, located in Inner Mongolia, is a representative skarn-type deposit within the active continental margin of the Beishan Metallogenic Belt. Situated in the western part of the Ejina Banner in the Alashan League, it is closely associated in both time and space with granodiorite and monzogranite linked to Fe-Cu mineralization. To ascertain the formation age, source characteristics, and the relationship between magmatism and mineralization, samples underwent petrography, geochemical analysis, and zircon U-Pb dating. Results reveal high SiO₂, Al₂O₃, alkalinity, and low MgO, with LREE enrichment and HREE depletion in both granodiorite and monzogranite. Granodiorite exhibits Rb, La enrichment, Ta, Nb, Ti, P depletion, weak Ce positive and Eu negative anomaly, while monzogranite shows Rb, U enrichment, Nb, Ti, P depletion, Ce positive and weak Eu negative anomaly. Both granodiorite and monzogranite are classified as calc-alkaline I-type granite. The obtained U-Pb ages for zircons from granodiorite and monzogranite are (451.7±4.8)Ma and (460.1±4.9)Ma, indicating that the magmatism and related mineralization in the eastern and western section of the deposit occurred in the Late Ordovician and Middle Ordovician, respectively. A comprehensive analysis suggests that the Xiataolegai deposit formed in the late-middle Ordovician within an active continental margin arc tectonic setting, likely associated with oceanic plate subduction.

Keywords: Xiataolegai iron and copper deposit; granodiorite; monzogranite; petrogeochemistry; zircon U-Pb dating

北山成矿带位于塔里木板块、西伯利亚板块与哈萨克斯坦结合部位,成矿带内深大断裂纵横交错,岩浆岩发育,成矿地质背景优越,金、铜、钼、铅和锌等金属资源丰富,是中国重要的有色金属找矿靶区(Xiao et al., 2010; 卜建军等, 2019; 任云伟等, 2019)。区内分布有黑鹰山铁矿、碧玉山铁矿、流沙山钼矿、三个井金矿和标山南东铁铜矿等一大批大中型矿床,充分展示了该区巨大的资源潜力和找矿前景(Ding et al., 2017; 高树起等, 2021; 陈耀等, 2023)。下陶勒盖铁铜矿床作为北山成矿带早山地块古生代活动陆缘矽卡岩成矿系统的典型代表,是北山成矿带中南段磁海—公婆泉 Fe-Cu-Au-Pb-Zn-W-Sn-Rb-V-U-P 成矿带中勘查发现的一处矽卡岩铁铜矿床(许立权等, 2019)。该矿床的发现不仅为内蒙古自治区境内寻找铁铜矿床提供了有力支撑,而且对于中大型铁铜矿床的寻找具有重要启示意义。目前对下陶勒盖铁铜矿床的研究相对较少,前人仅开展了矿床地质特征和地球物理等研究工作(魏民等, 2021),基本属于研究空白区,其成因机制和成矿规律有待深入研究。

笔者以下陶勒盖铁铜矿床成矿岩体为研究对象,通过成矿岩体岩相学、全岩元素组成和锆石 U-Pb 年代学研究,阐释成矿岩体的形成时代、岩浆成因和源区属性,进一步探讨成岩成矿构造环境,为深入理解下陶勒盖铁铜矿床成矿机制提供科学依据。

1 区域地质

研究区位于内蒙古自治区额济纳旗下陶勒盖—梧桐井一带,大地构造位置处于塔里木板块(Ⅲ)—北山古生代造山带(Ⅲ-2)—早山地块(Ⅲ-2-2)(图 1a)。研究区基底岩层为古元古界、古生界分布最广,出露地层以石炭系、白垩系分布最为广泛。区内二级构造单元为北山古生代造山带,岩浆活动十分发育,侵入岩分布广泛,从超基性岩、基性岩、中性岩到酸性岩均有出露,其中以中酸性侵入岩为主,为本区金属矿床的形成提供了物质来源与热动力条件。区内已发现铁、铜、钼、金矿床及多金属矿(化)点多处(图 1b),其中铁—铜矿化多沿侵入体与地层接触部位分布,构成矽卡岩型铁—铜矿床。

2 矿床地质

下陶勒盖铁铜矿床是原甘肃省地质局第四地质队于 20 世纪 60 年代末进行 1:2 000 地质草图填制时在地表见到了薄层铁、铜矿体,后经钻探和坑探查明的矽卡岩型铁铜矿床。该矿床由东西两个矿段组成,其间相距 10 km。两个矿段周围(约 3 km²)为低缓山丘,基岩露头不佳,被白垩系下统赤金堡组及第四系

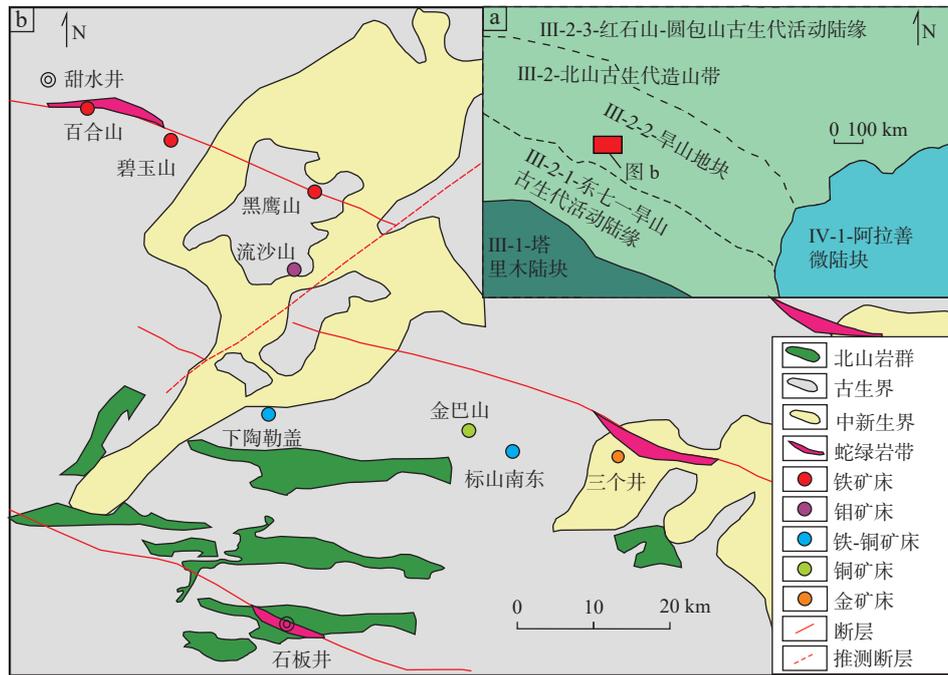


图1 下陶勒盖铁铜矿大地构造区(a)与内蒙古北山成矿带铁、铜、钼和金多金属矿床分布图(b)
(据 Ding et al., 2017; 高树起等, 2021)

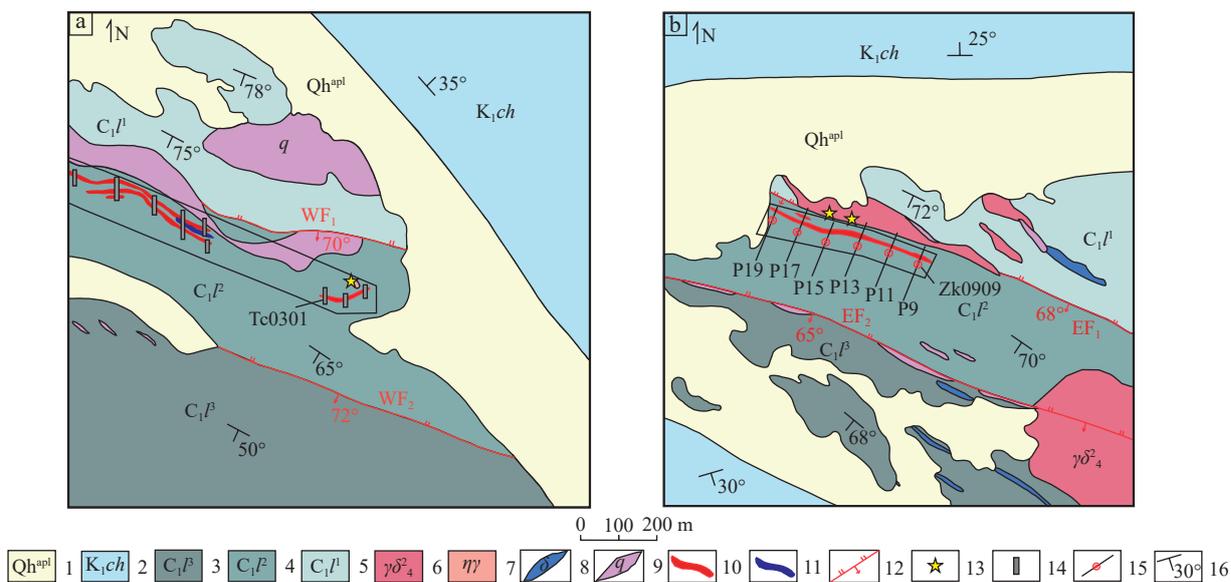
Fig. 1 (a) Tectonic map of the Xiataolegai iron and copper deposit a and (b) geological map, showing the distribution of Fe, Cu, Mo and Au polymetallic ore deposits in the Inner Mongolia Beishan metallogenic belt

冲洪积所覆盖,地貌上形成“戈壁滩”。

下陶勒盖铁铜矿区出露地层较为简单,主要为石炭系下统绿条山组(C_1l)、白垩系下统赤金堡组(K_1ch)及第四系全新统(Qh)(图2)。石炭系下统绿条山组(C_1l)共划分3个岩性段,为一套浅海相碎屑岩组合,岩性以灰黄色长石砂岩、杂砂岩、灰黑色千枚岩、片岩、大理岩和硅质板岩为主,其中第二岩性段为赋矿地层,主要岩性为绢云母石英片岩、绿泥石片岩、变质砂岩夹板岩、大理岩和条带状大理岩;白垩系下统赤金堡组(K_1ch)不整合覆盖于绿条山组之上,为一套紫红、灰绿色砾岩、砂岩、砂质泥岩和灰黑色页岩夹煤层及泥灰岩序列;第四系全新统(Qh)主要分布在矿区南部及东、西矿段之间,岩性为洪冲积砂、砾石和砂土等,厚度较小,一般在10 m以内。矿区构造与区域总体构造线方向一致,其总体走向线为 $285^\circ\sim 290^\circ$,局部有较小的变化,区内褶皱构造不发育,绿条山组构成一倾向南-南西的单斜构造,沿地层走向断裂发育,东西矿段共发育4条逆断层,具张性的正断裂发育不明显(图2)。矿区内岩浆岩不发育,主要为中-酸性侵入岩及其岩脉,多呈小岩株或岩枝顺地层走向侵入。花岗闪长岩和二长花岗岩与东西矿段的矿化有密切的时空联系,分别为东矿段和西矿段的含

矿岩体,均顺地层侵位于绿条山组中,并各自与东矿段和西矿段绿条山组中大理岩组分接触交代形成矽卡岩化和铁矿化(图3a和图3b)。

下陶勒盖矿铁铜矿区累计查明铁矿石资源储量(332+333)为411.16万吨,铜金属资源量(333)为1861.92吨。东西矿段共查明7个矿体,其中6个磁铁矿体,1个铜矿体。东矿段主要是2个铁矿体,编号为EFe-1和EFe-2,西矿段包括4个铁矿体和1个铜矿体,编号分别为WFe-1、WFe-2、WFe-3、WFe-4和WCu-1。全矿区7个矿体均赋存于同一地层层位中(即石炭系下统绿条山组的第二岩性段),矿体产状和地层产状基本一致(走向 $105^\circ\sim 110^\circ$,倾角 $65^\circ\sim 75^\circ$),向南西倾斜,连续性较差,呈似层状和脉状产出。矿体的控制长度在400~1500 m,控制深度一般在100 m,最深者超过200 m。7个矿体主要分布在3个地段,WFe-1、WFe-2、WFe-3和WCu-1分布在西矿段的P1至P7勘查线(部分向西延伸出勘查范围外)一带;WFe-4在西矿段的P15至P17线;EFe-1和EFe-2分布在东矿段的P9至P19线(图3b)。西矿段4个铁矿体厚度为1.28~6.94 m,平均厚度为3.6 m,mFe品位为20.92%~27.98%,平均品位为27.67%。铜矿体厚度为1.45~5.39 m,Cu品位0.51%~2.21%。东矿段两个铁



a. 西矿段地质图; b. 东矿段地质图; 1. 第四系冲洪积物; 2. 白垩系下统赤金堡组石英砂岩; 3. 石炭系下统绿条山组第三岩性段变质砂岩; 4. 石炭系下统绿条山组第二岩性段片岩、大理岩; 5. 石炭系下统绿条山组第一岩性段片岩; 6. 奥陶系上统花岗闪长岩; 7. 奥陶系中统二长花岗岩; 8. 闪长岩脉; 9. 石英脉; 10. 铁矿体; 11. 铜矿体; 12. 逆断层; 13. 采样位置; 14. 探槽; 15. 勘探线及钻孔; 16. 地层产状

图 2 下陶勒盖铁铜矿床地质图(据内蒙古自治区第八地质矿产勘查开发院修改)

Fig. 2 Geological map of the Xiataolegai iron and copper deposit

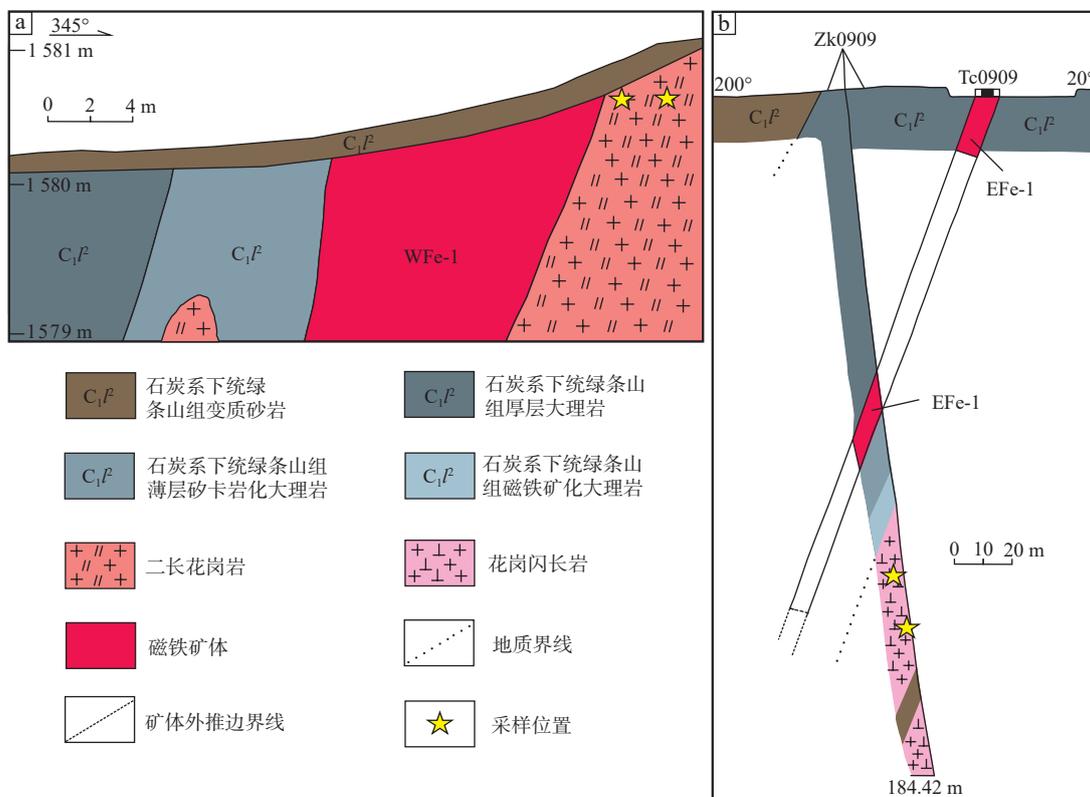


图 3 下陶勒盖铁铜矿床西矿段 3 号探槽剖面图(a)与东矿段 9 号勘探线钻孔剖面图(b)

(据内蒙古自治区第八地质矿产勘查开发院修改)

Fig. 3 (a) Profile along 3 exploration trench in the western section and (b) boreholes profile along exploration line 9 in the eastern section of the Xiataolegai iron and copper deposit

矿体厚度为 2.47~3.71 m, 平均厚度为 3.1 m, mFe 品位为 23.69%~24.76%, 平均品位为 24.57%。

下陶勒盖铁铜矿床矿石矿物主要为磁铁矿和黄铜矿, 少量褐铁矿和闪锌矿等, 脉石矿物主要为透辉石和透闪石, 次为方解石和绿泥石, 另见少量黑云母和蛇纹石等。金属矿物可见晚期黄铁矿呈小脉穿插于矿石中, 磁黄铁矿充填于矿石中。矿石构造以浸染状构造(图 4a)、条带状构造(图 4b)、脉状构造(图 4c)和块状构造为主, 矿石结构以半自形-他形粒状结构(图 4d)、乳滴结构(图 4e)、浸蚀结构(图 4f)、交代港湾状结构(图 4g)、交代残余结构(图 4h)和包含结构(图 4i)为主。

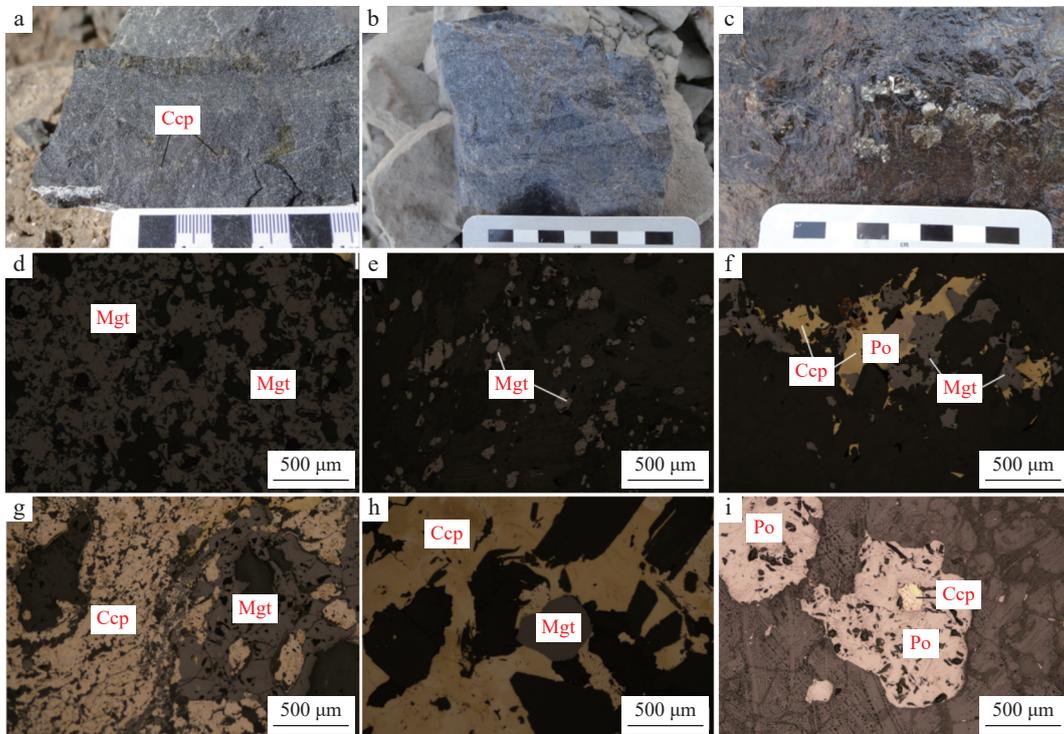
下陶勒盖铁铜矿区围岩蚀变发育, 主要蚀变类型为矽卡岩化、钾化(图 5c)、硅化(图 5d)、碳酸盐化和孔雀石化(图 5e)。其中矽卡岩化中以透闪石化(图 5a、图 5b 和图 5f)和透辉石化(图 5g)为主, 还有少量的硅灰石(图 5h)化和金云母化(图 5i)。矽卡岩矿物基本为镁质矽卡岩矿物, 未见石榴子石, 表明下陶勒盖铁铜矿床属于镁质矽卡岩矿床。

3 样品采集与测试方法

3.1 样品采集与岩相学特征

全岩主、微量元素特征分析样品共 9 件, 其中花岗闪长岩 5 件采自下陶勒盖铁铜矿床东矿段(样品 XT-044、XT-045 和 XT-046 采自东矿段北部岩体露头, 样品 XT-048 和 XT-049 采自东矿段露采坑北部钻孔深部); 二长花岗岩 4 件采自西矿段(样品 XT-051 和 XT-052 采自西矿段岩体露头, 样品 XT-053 和 XT-054 采自西矿段 3 号探槽)。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年测试样品共 2 件, 1 件花岗闪长岩测试样品采自东矿段露采坑北部钻孔(N: 41°58'05.94", E: 98°25'09.51"); 1 件二长花岗岩采自西矿段东竖井东南部探槽(N: 41°58'22.10", E: 98°17'23.55")。花岗闪长岩和二长花岗岩与成矿具有密切关系, 岩体均遭受不同程度的中-低温热液蚀变作用, 故样品采集过程中, 尽量选取蚀变较弱的样品, 以期降低蚀变对分析结果的影响。

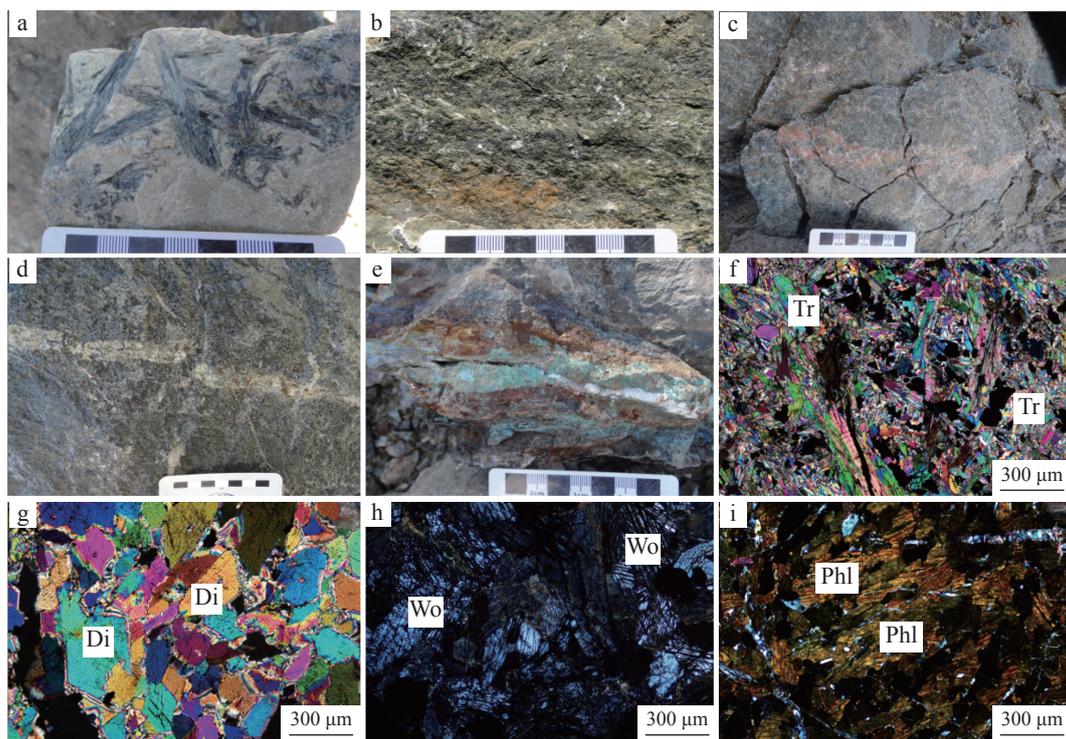
花岗闪长岩呈灰黑色, 中-粗粒结构, 主要矿物为



a.浸染状构造(含少量黄铜矿); b.条带状构造; c.脉状构造(含自形黄铁矿); d.磁铁矿呈半自形-他形粒状结构; e.磁铁矿呈乳滴结构; f.浸蚀结构(黄铜矿中包含磁黄铁矿); g.黄铜矿交代磁铁矿呈港湾状结构; h.黄铜矿交代磁铁矿呈交代残余结构; i.磁黄铁矿包含黄铜矿呈包含结构; Ccp.黄铜矿; Mgt.磁铁矿; Po.磁黄铁矿

图4 下陶勒盖铁铜矿床矿石手标本及显微照片

Fig. 4 Field photographs and microphotographs of the ore from the Xiataolegai iron and copper deposit



a.粗晶透闪石; b.强烈透闪石化; c.钾质脉体切穿岩体; d.磁铁矿大理岩中长英质脉体; e.破碎带中孔雀石化和方解石脉体; f.针柱状透闪石晶体组成放射状及柱状集合体; g.粒状透辉石; h.柱状硅灰石; i.深色鳞片状金云母; Di.透辉石; Phl.金云母; Tr.透闪石; Wo.硅灰石

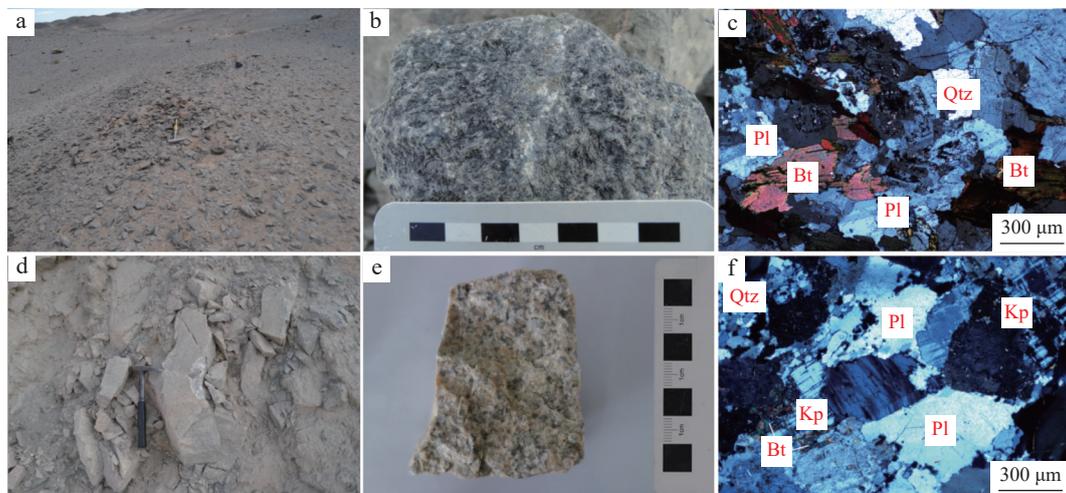
图5 下陶勒盖铁铜矿床围岩蚀变特征

Fig. 5 Alteration characteristics of the wall-rock from the Xiataolegai iron and copper deposit

斜长石(50%~55%)、石英(20%~25%)以及角闪石(10%~15%), 并还有少量的黑云母(约 5%)。样品具有不同程度的蚀变, 部分可见浸染状矿化(图 6b)。显微镜下斜长石多呈宽板状, 可见聚片双晶; 石英多为

他形粒状, 大部分呈乳白色; 板状黑云母呈黄褐色(图 6c)。

二长花岗岩呈灰白色, 中-细粒结构, 主要矿物为斜长石(30%~35%)、钾长石(20%~30%)以及石英



a.东矿段花岗闪长岩体露头; b.花岗闪长岩中浸染状矿化; c.花岗闪长岩镜下照片; d.西矿段二长花岗岩体露头; e.二长花岗岩体手标本; f.二长花岗岩镜下照片; Bt.黑云母; Kp.钾长石; Pl.斜长石; Qtz.石英

图6 下陶勒盖铁铜矿床岩体手标本及显微照片

Fig. 6 Field photographs and microphotographs of the granodiorite and monzogranite from the Xiataolegai iron and copper deposit

(25%~30%), 并还有少量的黑云母(约 2%)(图 6e)。显微镜下斜长石多呈宽板状, 钾长石呈板状, 可见格子双晶的微斜长石呈条纹状; 石英呈烟灰色, 多为他形粒状, 充填在不规则空隙中(图 6f)。

3.2 测试方法

全岩主、微量元素分析测试是在北京燕都中实测试技术有限公司完成, 测试流程如下: 将岩石粉碎粗碎至厘米级的块体, 选取无蚀变及脉体穿插的新鲜样品用纯化水冲洗干净, 烘干并粉碎至 200 目以备测试使用。主量元素测试首先将粉末样品称量后加 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ (1:8) 助熔剂混合, 并使用熔样机加热至 1150 °C 使其在金铂坩埚中熔融成均一玻璃片体, 后使用 XRF (Zetium, PANalytical) 测试, 依据国标 GB/T 14506.30-2010, 采用标样 GBW7113 作为评估数据的标准, 测试精度优于 1%。微量元素测试将 200 目粉末样品称量并置放入聚四氟乙烯溶样罐并加入 $\text{HF}+\text{HNO}_3$, 在干燥箱中将高压消解罐保持在 190 °C 温度 72 小时, 后取出经过赶酸并将溶液定容为稀溶液上机测试, 测试使用 ICP-MS(M90, analytikjena) 完成, 依据国标 GB/T14506.30-2010, 参考标样为 GSR-2, 分析误差小于 5%, 部分挥发性元素及极低含量元素的分析误差小于 10%。

锆石 U-Pb 同位素定年在内蒙古自治区地质调查院地质过程与矿产资源国家重点实验室完成, 采用多接收器电感耦合等离子质谱仪(LA-ICP-MS) 进行分析, 测试仪器型号 Agilent 7500a+New Wave 193 nm SS, 并采用 Geo Las 2005 激光剥蚀系统。束斑直径 32 μm , 激光剥蚀深度 20~40 μm , 具体分析流程参见文献(Liu et al., 2010)。

4 分析结果

4.1 主量元素

本次测试样品全岩主量元素分析结果见表 1。花岗闪长岩 SiO_2 含量在 63.38%~68.76%, 平均为 65.64%; Al_2O_3 含量为 15.38%~16.61%, 铝饱和指数(A/CNK)为 0.95~1.24, 平均值为 1.21; K_2O 含量介于 4.9%~6.4%, 平均为 5.8%; Na_2O 含量介于 1.67%~2.34%; 全碱含量($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)为 7.07%~8.39%, 均值为 7.87%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 2.26~3.83; MgO 含量较低为 0.88%~1.49%, TFe_2O_3 含量为 2.89%~3.98%, 平均为 3.31%。二长花岗岩 SiO_2 含量为 73.8%~74.47%,

平均为 74.11%; Al_2O_3 含量为 13.81%~14.63%, 铝饱和指数(A/CNK)为 1.06~1.15, 平均为 1.12; K_2O 含量为 5.2%~5.93%, 平均为 5.59%; Na_2O 含量为 2.82%~3.08%; 全碱含量($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)为 8.28%~8.75%, 均值为 8.57%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 1.69~2.1; MgO 含量较低为 0.15%~0.18%, TFe_2O_3 含量为 0.32%~0.5%, 平均为 0.41%。

下陶勒盖铁铜矿床测试样品在花岗岩 TAS 图解中, 1 件落入闪长岩区域, 4 件落入花岗闪长岩区域, 4 件落入花岗岩区域(图 7a)。在花岗岩 MALI- SiO_2 图解中, 花岗闪长岩与二长花岗岩样品均落入钙碱性花岗岩区域(图 7b)。在 SiO_2 -AR 图解中, 样品点分布较散, 样品分布于钙碱性和碱性系列(图 7c)。在 A/NK-A/CNK 图解中, 整体样品大部分落入过铝质区域, 1 件花岗闪长岩样品落入准铝质区域(图 7d)。在 Harker 图解中, 花岗闪长岩样品 SiO_2 与 Al_2O_3 、 Na_2O 、 MgO 、 TFe_2O_3 、 CaO 和 TiO_2 具备良好的线性关系, 并且随 SiO_2 含量增加, 表现出逐渐降低的趋势(图 8), 这说明花岗闪长岩样品具备同源岩浆分异演化的共性, 由此说明岩浆成分的演化受分离结晶作用的控制(王梁等, 2015; Han et al., 2020); 二长花岗岩样品 SiO_2 与 Na_2O 、 MgO 、 TFe_2O_3 、 CaO 和 TiO_2 线性关系不明显(图 9), 且除 Al_2O_3 之外, 随 SiO_2 含量增加其他含量基本保持不变, 说明二长花岗岩样品岩浆成分的演化受分离结晶作用控制的影响较小(王梁等, 2015; Han et al., 2020)。

4.2 稀土元素和微量元素

测试样品全岩稀土和微量元素分析结果见表 1。花岗闪长岩稀土元素总量 $\Sigma\text{REE}=174.51\times 10^{-6}\sim 268.09\times 10^{-6}$, 平均为 219.54×10^{-6} , ΣLREE 值为 $157.76\times 10^{-6}\sim 253.19\times 10^{-6}$, 平均为 203.74×10^{-6} ; ΣHREE 值为 $13.04\times 10^{-6}\sim 18.6\times 10^{-6}$, 平均为 15.8×10^{-6} ; LREE/HREE 值为 9.42~17, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值为 11.63~23。以上数据表明, 花岗闪长岩以轻稀土元素富集, 重稀土元素亏损为特征, 且轻重稀土元素发生了明显的分馏(图 9a)。 δEu 值为 0.77~0.82, 平均为 0.79, 显示了花岗闪长岩样品具有 Eu 负异常, δCe 值为 1.04~1.07, 平均为 1.05, 显示花岗闪长岩样品具有弱 Ce 正异常。Sr 的含量较高, 变化范围较大, 为 $217.88\times 10^{-6}\sim 345.71\times 10^{-6}$; Y 含量较低, 介于 $15.45\times 10^{-6}\sim 26.05\times 10^{-6}$; 相容元素 Cr、Co 和 Ni 含量偏低(Cr 含量为 $2.45\times 10^{-6}\sim 3.45\times 10^{-6}$, Co 含量为 $2.87\times 10^{-6}\sim 7.21\times 10^{-6}$, Ni 含量为 $2.36\times 10^{-6}\sim 9.83\times 10^{-6}$)。在微量元素原始地幔标准化蛛网图中(图 9b),

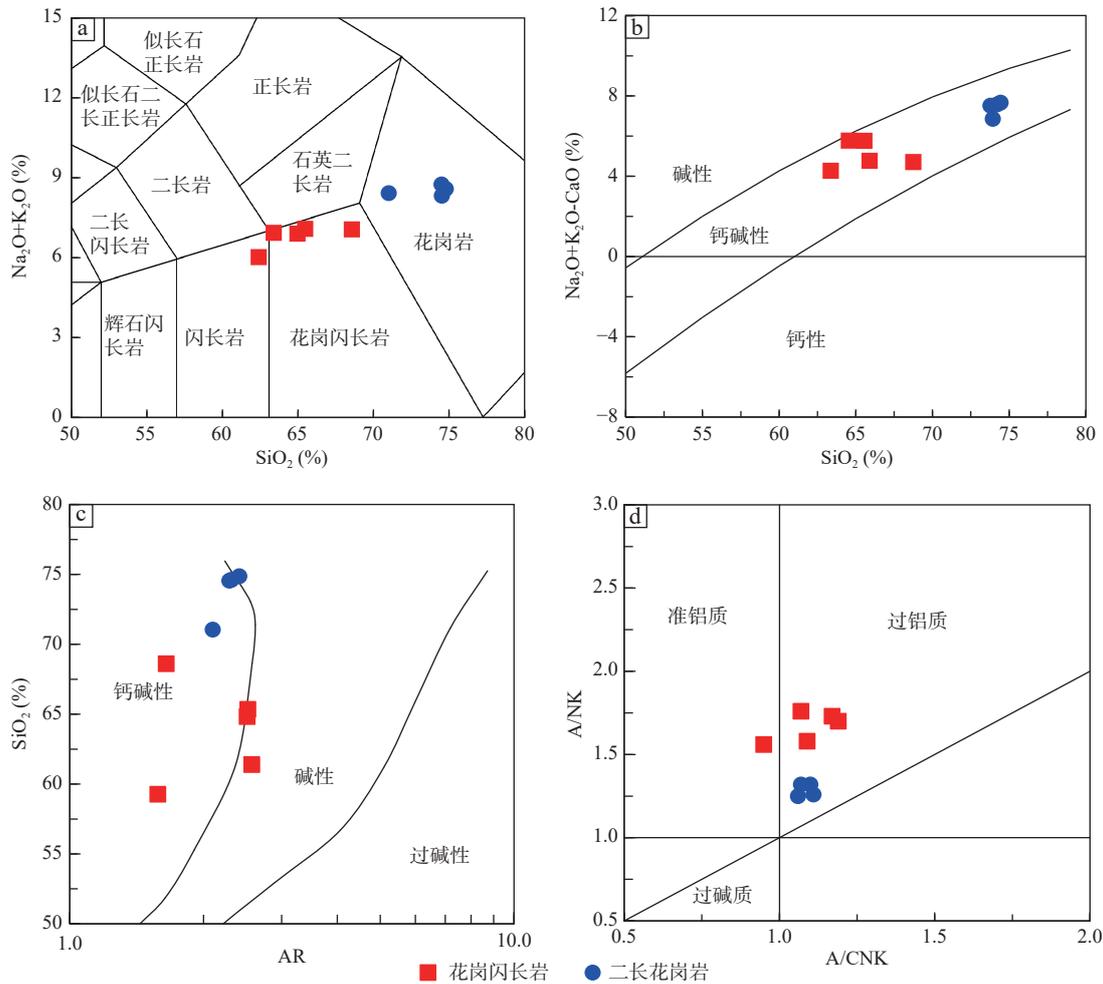
表 1 下陶勒盖铁铜矿床花岗闪长岩与二长花岗岩全岩主量元素(%)、稀土和微量元素(10^{-6})分析结果表Tab. 1 Major elements (%), REE and trace elements (10^{-6}) compositions of the granodiorite and monzogranite from the Xiataolegai iron and copper deposit

样品号	样品名	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	烧失量	总量	Sc	Ti	Cr	Co	Ni	Rb	Sr	Y	Zr
XT-044	花岗闪长岩	65.92	0.43	15.56	3.21	0.88	3.46	1.95	6.28	0.19	1.22	98.89	8.75	2556.73	2.87	2.87	3.16	273.09	217.88	25.11	245.99
XT-045	花岗闪长岩	63.38	0.49	16.61	3.98	1.49	3.31	2.23	5.34	0.21	1.23	98.26	11.75	2998.22	3.1	7.21	9.83	228.31	345.71	26.05	327.47
XT-046	花岗闪长岩	64.57	0.38	16.47	3.31	1.03	2.62	2.34	6.05	0.14	2.21	99.11	7.49	2254.02	3.45	4.03	8.22	248.55	287.41	15.45	248.25
XT-048	花岗闪长岩	65.57	0.41	16.46	3.37	1.17	2.31	1.67	6.42	0.14	1.99	99.47	8.22	2414.66	3.19	3.68	3.61	278.26	260.31	16.29	285.03
XT-049	花岗闪长岩	68.76	0.31	15.38	2.89	0.94	2.37	2.17	4.91	0.12	1.44	99.27	7.12	1846.33	2.45	4.43	2.36	217.81	271.06	17.87	193.32
XT-051	二长花岗岩	73.81	0.01	14.63	0.32	0.18	1.23	2.82	5.93	0.03	0.85	99.81	1.42	173.01	2.58	0.40	4.89	188.62	202.72	8.46	38.08
XT-052	二长花岗岩	74.47	0.01	13.81	0.34	0.18	0.85	3.03	5.53	0.05	1.11	99.33	1.07	179.12	1.45	0.26	1.23	189.78	185.41	8.36	24.17
XT-053	二长花岗岩	74.24	0.04	13.93	0.49	0.15	1.13	2.97	5.74	0.05	1.09	99.83	2.86	242.92	0.79	0.24	0.83	173.77	188.01	13.94	24.98
XT-054	二长花岗岩	73.95	0.02	14.15	0.51	0.18	1.42	3.08	5.21	0.03	1.34	99.88	1.96	209.39	0.47	0.41	0.63	166.95	153.62	16.85	48.82
样品号	样品名	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Hf	Lu	Ta	Pb	Bi	Th
XT-044	花岗闪长岩	888.49	36.12	73.21	8.23	32.96	5.89	1.35	4.95	0.62	4.74	0.87	2.57	0.41	2.23	5.96	0.36	1.03	3.56	0.58	5.54
XT-045	花岗闪长岩	1207.12	41.49	87.39	9.81	40.31	7.39	1.69	5.88	0.74	5.06	0.95	2.81	0.42	2.35	8.12	0.39	1.04	11.62	0.21	10.83
XT-046	花岗闪长岩	1383.96	64.21	122.78	12.46	45.29	6.83	1.63	5.37	0.54	3.51	0.73	2.13	0.33	2.01	6.31	0.33	0.99	9.91	0.22	15.19
XT-048	花岗闪长岩	1269.25	61.25	118.09	12.01	45.63	6.66	1.56	5.31	0.62	3.86	0.77	2.35	0.36	2.10	7.26	0.34	0.96	11.63	0.28	16.21
XT-049	花岗闪长岩	897.14	43.05	83.32	8.95	33.11	4.92	1.13	4.01	0.49	3.19	0.66	2.04	0.33	2.01	5.19	0.33	1.57	12.75	0.14	16.01
XT-051	二长花岗岩	379.84	8.09	23.35	2.56	9.33	1.74	0.64	1.63	0.24	1.89	0.41	1.29	0.23	1.26	1.72	0.22	0.61	31.71	0.07	8.39
XT-052	二长花岗岩	281.22	9.08	23.43	3.02	11.09	2.17	0.59	1.81	0.29	2.21	0.46	1.41	0.27	1.56	1.45	0.25	2.61	30.96	0.11	9.21
XT-053	二长花岗岩	354.39	8.38	17.89	2.84	10.41	2.23	0.47	2.04	0.36	2.96	0.66	2.04	0.36	2.25	1.52	0.35	1.42	19.36	0.06	9.71
XT-054	二长花岗岩	224.21	12.23	35.46	4.23	16.24	3.16	0.64	2.89	0.45	3.82	0.81	2.55	0.46	2.66	1.75	0.42	1.12	22.92	0.07	11.32

本区花岗闪长岩主要富集 Rb 和 La 等大离子亲石元素(LILE)及 Th、Zr、Hf 和 Pb 等高场强元素(HSFE), 同时亏损 Ta、Nb、Ti 和 P 等高场强元素(HSFE)以及 K 和 Sr 等大离子亲石元素(LILE), 表明有陆缘弧岩浆岩的特性, 且岩石形成可能与陆壳密切相关(孙德有等, 2004; Tan et al., 2023)。

二长花岗岩 Σ REE 值为 $52.88 \times 10^{-6} \sim 85.8 \times 10^{-6}$, 平均为 62.36×10^{-6} , Σ LREE 值为 $42.18 \times 10^{-6} \sim 71.72 \times 10^{-6}$, 平均为 52.25×10^{-6} ; Σ HREE 值为 $7.17 \times 10^{-6} \sim 14.07 \times 10^{-6}$,

平均为 10.11×10^{-6} ; LREE/HREE 值为 $3.84 \sim 6.38$, $(La/Yb)_N$ 值为 $2.73 \sim 4.62$ 。以上数据表明, 二长花岗岩以轻稀土元素富集, 重稀土元素亏损为特征, 且轻重稀土元素发生了明显的分馏(图 9a)。 δ Eu 值为 $0.65 \sim 1.16$, 平均为 0.85, 显示二长花岗岩样品具有弱 Eu 负异常; δ Ce 值为 $0.9 \sim 1.26$, 平均为 1.13, 显示二长花岗岩样品具有 Ce 正异常。Sr 的含量较高, 变化范围较大, 为 $153.62 \times 10^{-6} \sim 202.72 \times 10^{-6}$; Y 含量较低, 介于 $8.36 \times 10^{-6} \sim 16.85 \times 10^{-6}$; 相容元素 Cr、Co 和 Ni 含



a.花岗岩 TAS 图解(Middlemost, 1994); b.花岗岩 MAFI-SiO₂ 图解(Frost et al., 2001);
c.花岗岩 SiO₂-AR 图解(Leng et al., 2018); d.A/NK-A/CNK 图解(Tan et al., 2023)

图7 下陶勒盖铁铜矿床花岗闪长岩与二长花岗岩主量元素图解

Fig. 7 Major elements diagrams of the granodiorite and monzogranite the Xiataolegai iron and copper deposit

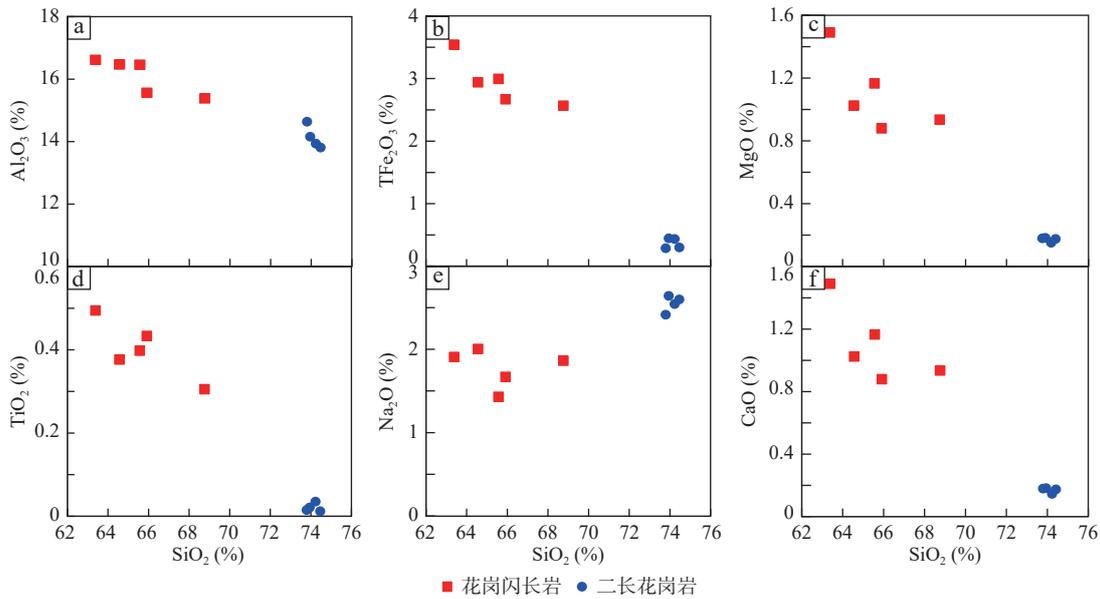
量偏低(Cr 含量为 $0.47 \times 10^{-6} \sim 2.58 \times 10^{-6}$, Co 含量为 $0.24 \times 10^{-6} \sim 0.41 \times 10^{-6}$, Ni 含量为 $0.63 \times 10^{-6} \sim 4.89 \times 10^{-6}$)。在微量元素原始地幔标准化蛛网图中(图 9b), 本区二长花岗岩主要富集 Rb 和 U 等大离子亲石元素(LILE)以及 Pb、Ta 和 Th 等高场强元素(HSFE), 同时亏损 Nb、Ti 和 P 等高场强元素(HSFE)以及 K 和 Ba 等大离子亲石元素(LILE), 表明可能是受到岩石圈或地壳污染的陆缘弧岩浆岩特性(孙德有等, 2004; 郝增元等, 2020)。

4.3 锆石 U-Pb 年龄

花岗闪长岩样品锆石的阴极发光图像见图 10a, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测定结果见表 2。花岗闪长岩样品锆石颗粒粒度为 100~300 μm。根据镜下透反射及阴极发光特征可见, 锆石普遍具有生长环带, 形态较为完好, 多呈长柱状, 干净透明, 无明显裂缝和

包裹体。锆石 Th/U 值均大于 0.1(0.64~1.02), 岩浆锆石特征明显。花岗闪长岩中锆石共分析了 11 个点, 主要集中在 465.7~443.0 Ma, 11 个测点计算获得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和年龄为 $(451.7 \pm 4.8) \text{ Ma}$ (MSWD=2.3) (图 10b), 大部分在谐和线附近, 加权平均年龄为 $(452.1 \pm 4.8 \text{ Ma})$ (MSWD=2.3) (图 10b), 时代为晚奥陶世, 代表该花岗闪长岩的侵位时间。

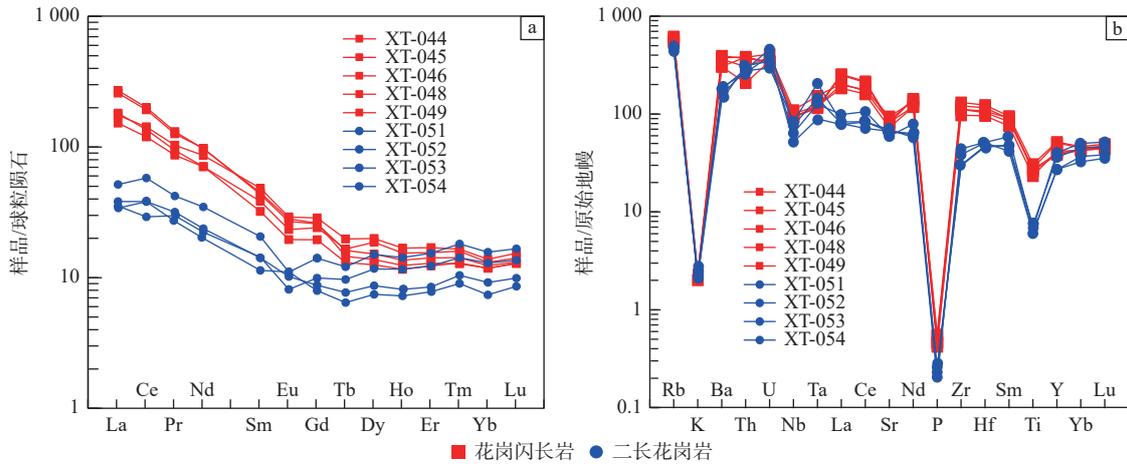
二长花岗岩样品锆石的阴极发光图像见图 11a, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测定结果见表 2。二长花岗岩样品锆石颗粒粒度为 100~200 μm。根据镜下透反射及阴极发光特征可见, 锆石普遍具有生长环带, 形态较为完好, 多呈长柱状, 干净透明, 无明显裂缝和包裹体。锆石 Th/U 值均大于 0.1(0.34~0.56), 显示其岩浆成因(柳永正等, 2023; 王新雨等, 2023; 冉亚洲等, 2024)。二长花岗岩中锆石共分析了 9 个点, 主要集



a. Al_2O_3 - SiO_2 协变图; b. TFe_2O_3 - SiO_2 协变图; c. MgO - SiO_2 协变图; d. TiO_2 - SiO_2 协变图; e. Na_2O - SiO_2 协变图; f. CaO - SiO_2 协变图

图8 下陶勒盖铁铜矿床花岗闪长岩与二长花岗岩哈克图解

Fig. 8 Harker diagrams for the granodiorite and monzogranite from the Xiataolegai iron and copper deposit



a. 稀土元素球粒陨石标准化分配曲线; b. 微量元素原始地幔标准化蛛网图(球粒陨石标准值和原始地幔标准化值据 Tan et al., 2023)

图9 下陶勒盖铁铜矿床花岗闪长岩与二长花岗岩稀土、微量元素图解

Fig. 9 REE and trace elements diagrams for the granodiorite and monzogranite from the Xiataolegai iron and copper deposit

中在 474.6~442.5 Ma, 9 个测点计算获得 $^{206}Pb/^{238}U$ 和 $^{207}Pb/^{235}U$ 谐和年龄为 $(460.5 \pm 7.8) Ma$ (MSWD=4.1) (图 11b), 大部分落在谐和线附近, 加权平均年龄为 $(460.1 \pm 4.9) Ma$ (MSWD=4.1) (图 11b), 时代为中奥陶世, 代表该二长花岗岩的侵位时间。

5 讨论

5.1 成岩成矿时代

下陶勒盖铁铜矿床花岗闪长岩成岩年龄为

$(451.7 \pm 4.8) Ma$, 二长花岗岩的成岩年龄为 $(460.5 \pm 7.8) Ma$, 这两个年龄之间存在大约 10 Ma 时间差, 应为两期岩浆事件的结果。花岗闪长岩的侵位时代为晚奥陶世, 二长花岗岩的侵位时代为中奥陶世, 这与赋矿地层为早石炭世描述相矛盾。目前矿区地层资料将赋矿地层绿条山组划归为石炭系, 但以往的地质资料认为绿条山组地层划归于下元古界北山岩群。北山岩群地层(杨富林于 2016 年测得约 1329 Ma, 属中元古代)为一套中低级变质岩系, 其原岩以碎屑岩及碳酸盐岩岩系为主, 表现为各种片岩及大理岩, 部分地

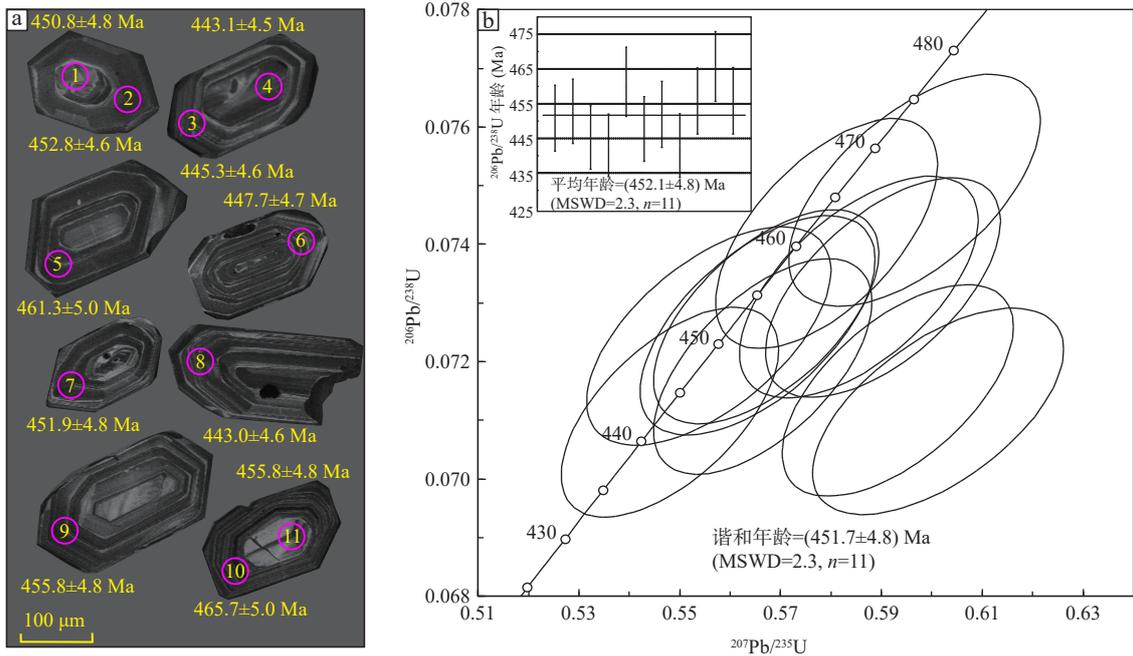


图 a 中标示年龄为锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄

图10 花岗闪长岩典型测点 CL 图像(a)及年龄与锆石 U-Pb 加权平均年龄、谐和年龄图(b)

Fig. 10 (a) Zircon cathodoluminescence (CL) images of the granodiorite and (b) Zircon U-Pb concordia and weighted average age diagrams of the granodiorite

表 2 下陶勒盖铁铜矿床花岗闪长岩与二长花岗岩锆石 U-Pb 同位素 LA-ICP-MS 定年结果表

Tab. 2 Results of LA-ICP-MS zircon U-Pb dating for the granodiorite and monzogranite from the Xiataolegai iron and copper deposit

测试点号	元素含量 (10^{-6})				同位素比值						年龄 (Ma)				谐和度 (%)		
	^{206}Pb	^{238}U	^{232}Th	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
样品 XT-47花岗闪长岩																	
XT-47-1	33.0	420	270	0.64	0.055 683	0.000 971	0.555 747	0.009 897	0.072 438	0.000 761	439.8	38.8	448.8	8.0	450.8	4.7	99
XT-47-2	59.5	708	635	0.90	0.056 501	0.000 875	0.567 133	0.009 134	0.072 766	0.000 745	472.1	34.3	456.2	7.3	452.8	4.6	99
XT-47-3	53.9	671	512	0.76	0.060 149	0.000 909	0.593 241	0.009 375	0.071 511	0.000 737	608.9	32.7	472.9	7.5	445.3	4.6	93
XT-47-4	54.7	677	536	0.80	0.061 129	0.000 972	0.601 235	0.010 187	0.071 153	0.000 719	643.8	34.2	478.0	8.1	443.1	4.5	92
XT-47-5	77.9	885	908	1.03	0.056 599	0.000 819	0.579 132	0.008 990	0.074 183	0.000 800	475.9	32.0	463.9	7.2	461.3	5.0	99
XT-47-6	68.4	820	758	0.92	0.057 073	0.000 838	0.566 472	0.008 859	0.071 918	0.000 750	494.3	32.4	455.7	7.1	447.7	4.7	98
XT-47-7	39.8	490	382	0.78	0.056 459	0.000 908	0.565 446	0.009 521	0.072 619	0.000 764	470.5	35.6	455.1	7.7	451.9	4.8	99
XT-47-8	51.5	643	536	0.83	0.055 836	0.000 856	0.548 034	0.008 808	0.071 138	0.000 731	445.9	34.1	443.7	7.1	443.0	4.6	99
XT-47-9	60.7	701	703	1.00	0.058 394	0.000 891	0.590 287	0.009 525	0.073 264	0.000 765	544.6	33.3	471.1	7.6	455.8	4.8	96
XT-47-10	43.6	530	368	0.70	0.057 726	0.000 928	0.596 570	0.010 196	0.074 922	0.000 807	519.4	35.3	475.1	8.1	465.7	5.0	98
XT-47-11	59.9	707	663	0.94	0.057 924	0.000 903	0.585 539	0.009 673	0.073 272	0.000 772	526.9	34.2	468.0	7.7	455.8	4.8	97
样品 XT-50二长花岗岩																	
XT-50-1	65.7	853	373	0.44	0.058 255	0.000 854	0.599 708	0.009 533	0.074 612	0.000 805	539.4	32.1	477.0	7.6	463.5	5.0	97
XT-50-2	63.4	846	329	0.39	0.055 924	0.000 827	0.568 218	0.008 921	0.073 668	0.000 772	449.3	32.8	456.9	7.2	458.2	4.8	99
XT-50-3	65.6	882	334	0.38	0.060 274	0.000 926	0.598 740	0.009 818	0.071 920	0.000 739	613.4	33.2	476.4	7.8	447.7	4.6	93
XT-50-4	61.5	809	332	0.41	0.055 732	0.000 883	0.569 984	0.009 641	0.074 167	0.000 811	441.7	35.3	458.0	7.7	461.2	5.0	99
XT-50-5	69.7	910	506	0.56	0.064 514	0.001 077	0.626 786	0.009 992	0.071 055	0.000 806	758.5	35.2	494.1	7.9	442.5	5.0	88
XT-50-6	57.6	750	312	0.42	0.056 160	0.000 843	0.579 898	0.009 349	0.074 860	0.000 805	458.7	33.3	464.4	7.5	465.4	5.0	99
XT-50-7	72.2	902	414	0.46	0.060 178	0.000 886	0.631 297	0.009 776	0.076 404	0.000 902	610.0	31.8	496.9	7.7	474.6	5.6	95
XT-50-8	66.8	877	295	0.34	0.055 790	0.000 832	0.581 459	0.009 302	0.075 534	0.000 787	444.0	33.2	465.4	7.4	469.4	4.9	99
XT-50-9	45.2	581	259	0.45	0.056 166	0.000 925	0.580 605	0.010 168	0.074 984	0.000 806	458.9	36.5	464.9	8.1	466.1	5.0	99

注: 1σ 代表单个数据点误差。

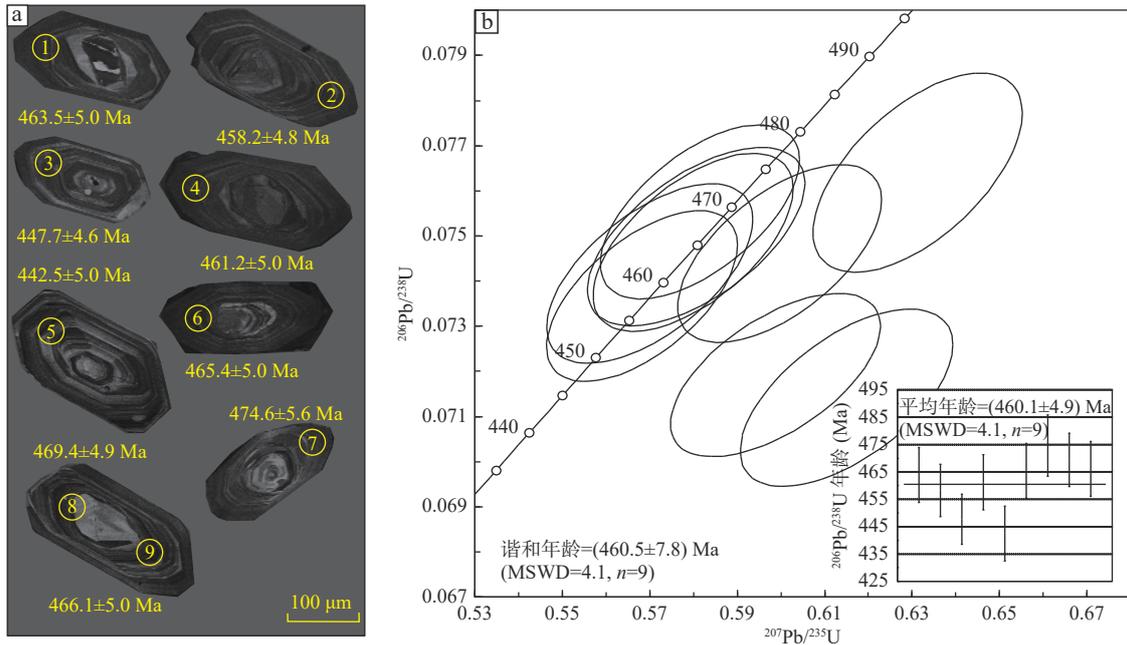


图 a 中标示年龄为锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄

图 11 二长花岗岩典型测点 CL 图像(a)及年龄与锆石 U-Pb 加权平均年龄、谐和年龄图(b)

Fig. 11 (a) Zircons cathodoluminescence (CL) images of the monzogranite and (b) Zircon U-Pb concordia and weighted average age diagrams of the monzogranite

段见混合岩化,与矿区赋矿地层绿条山组第二岩性段以绢云母石英片岩、绿泥片岩、变质砂岩夹板岩、大理岩和条带状大理岩为主的特征较为相似。本区赋矿地层绿条山组很可能属于北山岩群的一部分(王东星,内蒙古地调院口头交流)。因此,下陶勒盖铁铜矿床东矿段和西矿段的矿化分别与花岗闪长岩和二长花岗岩的侵位时代同时或略晚,该岩浆事件与北山成矿带中茈茈台子-石板井-小黄山构造带中奥陶世变质辉长岩(约 462.5 Ma)、斜山-东七一山岛弧晚奥陶世片麻状细中粒石英闪长岩(约 453.2 Ma)和阿民乌苏-好水井一带中奥陶世片麻状细中粒花岗闪长岩(约 463.8 Ma)等构造-岩浆活动的时间相一致(Song et al., 2013a, 2013b; 孟庆涛, 2019)。

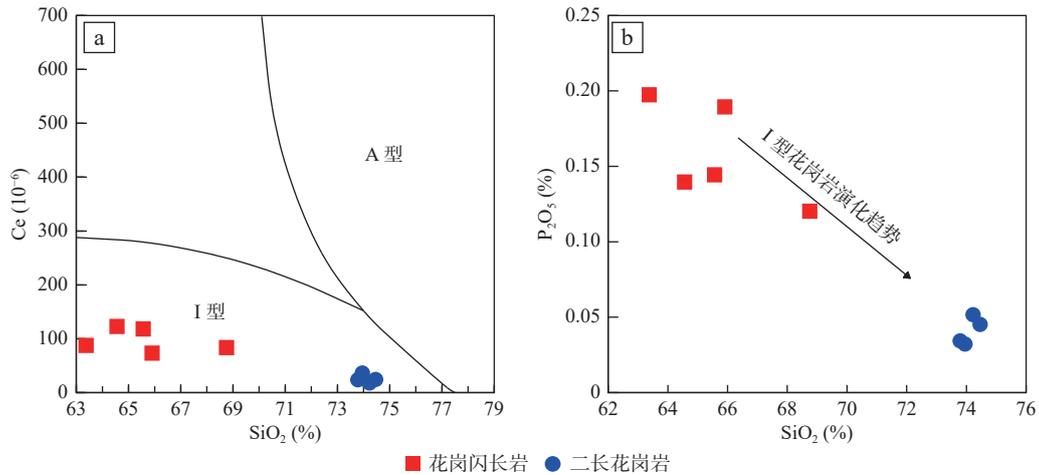
5.2 岩石成因类型

下陶勒盖铁铜矿床花岗闪长岩与二长花岗岩主量元素均显示高硅、高碱和高铝饱和指数的特点;花岗闪长岩微量元素显示 Eu 负异常,弱 Ce 正异常,富集 Rb 和 La 等大离子亲石元素(LILE)以及 Th、Zr、Hf 和 Pb 等高场强元素(HSFE),同时亏损 Ta、Nb、Ti 和 P 等高场强元素(HSFE)以及 K 和 Sr 等大离子亲石元素(LILE)。二长花岗岩微量元素显示弱 Eu 负异常,Ce 正异常,富集 Rb 和 U 等大离子亲石元素(LILE)以

及 Pb、Ta 和 Th 等高场强元素(HSFE),同时亏损 Nb、Ti 和 P 等高场强元素(HSFE)以及 K 和 Ba 等大离子亲石元素(LILE)。在 Ce-SiO₂ 图解中,全部的花岗闪长岩与二长花岗岩数据点均落在 I 型花岗岩区域内(图 12a)。研究表明,I 型花岗岩 P₂O₅ 的含量会随着 SiO₂ 的含量增加而表现为下降的趋势,呈现明显的负相关性(Li et al., 2006; 吴福元等, 2007; Essaifi et al., 2014)。下陶勒盖铁铜矿床花岗闪长岩与二长花岗岩 P₂O₅ 含量基本随着 SiO₂ 含量的升高而降低,与 I 型花岗岩的演化趋势相同(图 12b)。

5.3 岩浆源区

下陶勒盖铁铜矿床花岗闪长岩在 Harker 图解中, SiO₂ 与 Al₂O₃、Na₂O、MgO、TFe₂O₃、CaO 和 TiO₂ 都呈现良好线性关系(图 8),说明其可能经历了岩浆混合作用(王珍珍等, 2017)。显示较高的 SiO₂、K₂O 和 Al₂O₃ 含量,较低的 MgO 和 TFe₂O₃ 含量,富集大离子亲石元素(Rb),亏损高场强元素(Nb、Ta 和 Ti),结合其 Eu 负异常,很可能是下地壳岩石部分熔融而成(Latisha et al., 2018)。微量元素 Nb/Ta 值介于 9.66~15.52,平均为 11.32,小于地幔平均值(60),接近地壳平均值(10),Nd 均值为 39.46,高于壳源岩石范围(小于 15),Th 均值为 12.76,低于壳源岩石范围(Bea et al.,



a.花岗岩 Ce-SiO₂ 图解(据洪大卫等, 2000); b.I型花岗岩 P₂O₅-SiO₂ 图解(据吴福元等, 2007; Essaifi et al., 2014)

图12 下陶勒盖铁铜矿床花岗闪长岩与二长花岗岩成因类型图解

Fig. 12 Granite discrimination diagrams for the granodiorite and monzogranite from the Xiataolegai iron and copper deposit

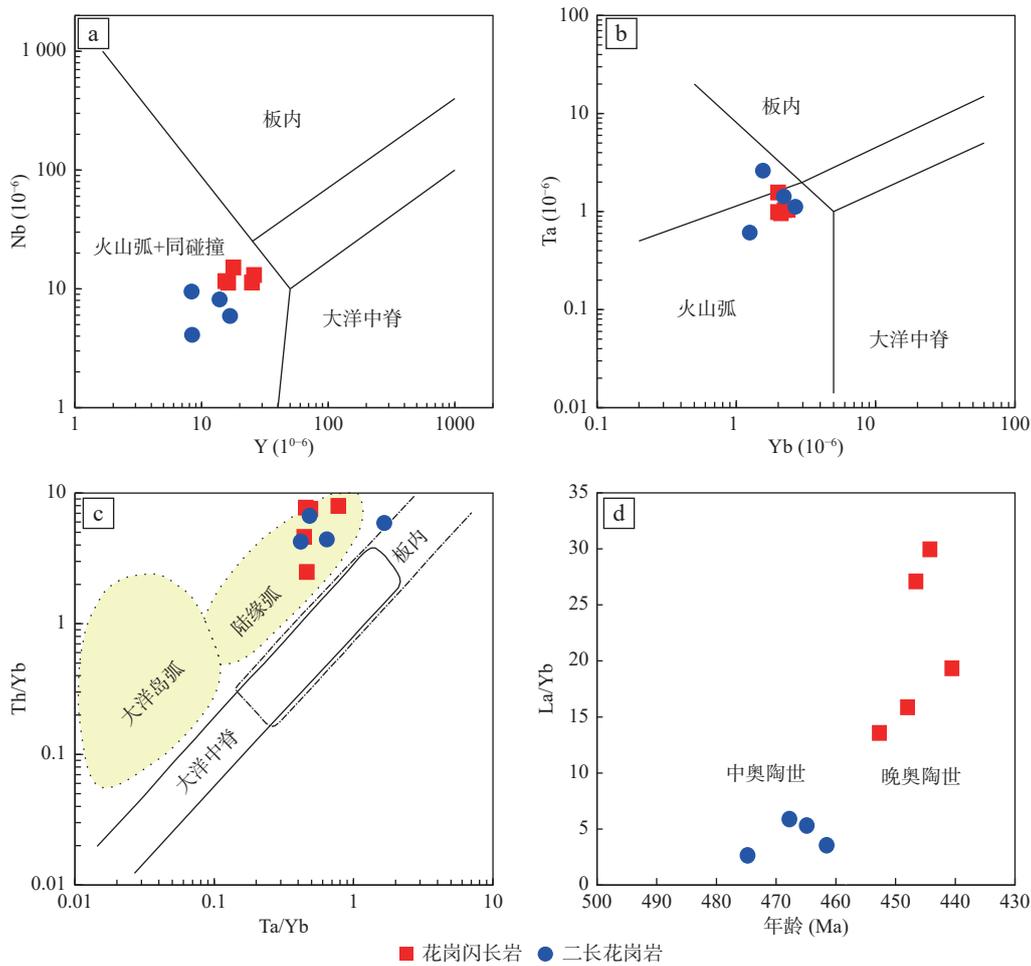
2001; Du et al., 2016)。这些特征表明本区花岗闪长岩形成源于地壳物质和地幔岩浆的混合作用(袁玲玲等, 2022)。

下陶勒盖铁铜矿床二长花岗岩显示较高的 SiO₂、K₂O 和 Al₂O₃ 含量, 较低的 MgO 和 TFe₂O₃ 含量, 富集大离子亲石元素(Rb), 亏损高场强元素(Nb、Ti 和 P), 反映了地壳源区的特点。微量元素 Nb/Ta 值介于 3.63~6.71, 平均为 5.33, 远远小于地幔平均值(60), 较小于地壳平均值(10), Nd 和 Th 均值分别为 11.77 和 9.65, 均低于壳源岩石范围(小于 15), La/Nb 值平均为 1.51(大于 1), 表明岩石壳源的属性(Bea et al., 2001; Du et al., 2016)。此外, 研究区样品 Sm/Nd 值在 0.19~0.21, 与大陆地壳的 Sm/Nd 值(0.17~0.25)相近, 反映岩石组分多源于地壳(Bea et al., 2001; Du et al., 2016)。综上所述, 本区二长花岗岩特征显示出壳源属性。

5.4 成岩成矿构造环境

花岗闪长岩与二长花岗岩均具有准铝质-弱过铝质特征(0.95~1.19), 它们的镁质、钙碱性-碱钙性特征均类似于科迪勒拉花岗岩, 因此被视为典型的与弧岩浆相关的 I 型花岗岩(Frost et al., 2001)。花岗闪长岩与二长花岗岩在 Nb-Y 构造判别图解(图 13a)中样品数据投点于火山弧与同碰撞构造环境, Ta-Yb 构造判别图解中大部分样品数据均投点于火山弧区域(图 13b), Th/Yb-Ta/Yb 图解中大部分样品数据均投点于陆缘弧区域(图 13c), 由此说明下陶勒盖铁铜矿床的花岗闪长岩与二长花岗岩很大可能形成于陆缘弧构造环境。

前人研究表明, 研究区所处早山地块是在奥陶纪中期从塔里木陆块裂解分离出来的, 裂解后在塔里木陆块与早山地块之间形成一个具有一定规模的次生洋盆, 并形成蛇绿岩带, 即红柳河-洗肠井蛇绿岩带(刘雪亚等, 1984; 左国朝等, 1990; 龚全胜等, 2002, 2003)。中国地质调查局天津地质调查中心在红柳河-牛圈子-洗肠井蛇绿岩带东段白云山和月牙山等地发现了典型的 MORB 型蛇绿岩, 并在蛇绿岩套中的辉长岩、辉石岩和斜长花岗岩中获得多个锆石 U-Pb 年龄, 范围在 530~500 Ma(孙立新等, 2017)。本区的花岗质岩石均显示出 LILE 和 LREE 的相对富集但 HSFE (如 Ta、Nb 和 Ti)明显亏损, 这通常被解释为弧相关花岗岩的“俯冲特征”(Morris et al., 2000), 并且时代更早的红柳河-洗肠井蛇绿岩带的存在是洋壳俯冲的强有力证明(Cleven et al., 2015)。因此, 笔者认为下陶勒盖铁铜矿床的花岗闪长岩与二长花岗岩形成于与俯冲相关的挤压环境, 这也与北山造山带广泛存在的早古生代弧岩浆作用相吻合(Song et al., 2013a, 2013b)。并且, 与早期二长花岗岩 474.6~442.5 Ma 样品相比, 晚期花岗闪长岩 465.7~443.0 Ma 岩样品具有更低的 La/Yb 值(图 13d), 而这项指标与地壳厚度具有正相关性(Profeta et al., 2015)。因此, 研究区晚奥陶世的地壳厚度比中奥陶世的地壳厚度要厚得多, 进一步表明了本区域地壳变厚是由于洋盆俯冲产生的挤压环境导致。花岗闪长岩与二长花岗岩年龄与前人在石板井地区测得早古生代陆缘弧花岗岩和石英二长岩样品的年龄 464~428 Ma 较为一致(袁禹, 2020), 表明了本



a.Nb-Y 构造判别图解 (Pearce et al., 1984); b.Ta-Yb 构造判别图解 (Pearce, 1983);
c.Th/Yb-Ta/Yb 构造判别图解 (Bonin et al., 2007); d.La/Yb 图解 (Profeta et al., 2015)

图 13 下陶勒盖铁铜矿床花岗闪长岩与二长花岗岩微量元素构造环境图解

Fig. 13 Tectonic discrimination diagram of trace elements for the the granodiorite and monzogranite from the the Xiataolegai iron and copper deposit

区花岗闪长岩与二长花岗岩形成于中—晚奥陶世的陆缘弧构造环境。

综上所述,笔者认为下陶勒盖铁铜矿床花岗闪长岩与二长花岗岩均形成于陆缘弧构造环境,其演化过程为:奥陶纪中期,研究区所处早山地块从塔里木陆块裂解分离,裂解后在塔里木陆块与早山地块之间形成一个具有一定规模的次生洋盆,洋盆向北发生俯冲消亡,导致陆壳加厚,洋壳的俯冲作用带来水和热,使得被加厚的陆壳底部部分熔融产生二长花岗岩的母岩浆,随着俯冲进行和温度升高,俯冲板片脱水交代引起上覆地幔楔的部分熔融,地幔物质熔融产生岩浆底侵作用,地壳物质被加热,发生部分熔融,随着幔源岩浆与地壳物质的不断作用,形成混合岩浆,即花岗闪长岩的母岩浆。两种岩浆分别向上运移,地层中的

铁质(包括铜)被溶解运移到热液中,再沿其通道(走向断层)迁移至绿条山组(北山岩群)中化学性质活泼的大理岩而停留,与之发生强烈的交代,富集而形成了本矿床。

6 结论

(1)下陶勒盖铁铜矿床花岗闪长岩与二长花岗岩主量元素具有高硅、高碱和高铝饱和指数的特点,微量元素花岗闪长岩富集 Rb、La、Th、Zr、Hf 和 Pb 等元素,亏损 Ta、Nb、Ti、P、K 和 Sr 等元素,二长花岗岩富集 Rb、U、Pb、Ta 和 Th 等元素,亏损 Nb、Ti、P、K 和 Ba 等元素,二者均为钙碱性的 I 型花岗岩。

(2)下陶勒盖铁铜矿床花岗闪长岩 LA-ICP-MS 锆

石 U-Pb 年龄为 (451.7±4.8)Ma, 二长花岗岩年龄为 (460.1±4.9)Ma, 与区域内大规模构造-岩浆活动的时间一致, 表明下陶勒盖铁铜矿床形成于中—晚奥陶世的陆缘弧构造环境, 可能与洋盆俯冲作用有关。

致谢: 内蒙古自治区地质调查院为野外工作提供较大帮助, 匿名审稿人对文章的评审并提出宝贵意见, 编辑老师提出建设性意见极大提高了本文的质量, 在此一并致谢。

参考文献(References):

- 卜建军, 吴俊, 史冀忠, 等. 北山—巴丹吉林地区石炭纪—二叠纪构造古地理及其演化[J]. 地质科技情报, 2019, 38(6): 113-120.
- BU Jianjun, WU Jun, SHI Jizhong, et al. Carboniferous-Permian Tectonic Paleogeography of Beishan-Badain Jaran Region and its Evolution[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2019, 38(6): 113-120.
- 陈耀, 张成, 张青, 等. 内蒙古北山成矿带月牙山—老硐沟地区金多金属矿床成矿预测[J]. 西北地质, 2023, 56(2): 151-162.
- CHEN Yao, ZHANG Cheng, ZHANG Qing, et al. Metallogenic Regularity and Prospecting Prediction of Gold Polymetallic Deposits in Yueyashan-Laodonggou Area of Beishan Metallogenic Belt, Inner Mongolia[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(2): 151-162.
- 高树起, 王云峰, 王晓东, 等. 北山地区三道明水 Cu-Zn 矿床地质特征及矿床成因初探[J]. 岩石矿物学杂志, 2021, 40(6): 1141-1154.
- GAO Shuqi, WANG Yunfeng, WANG Xiaodong, et al. The Geological Feature and Genetic Mechanism of the Sandaomingshui Cu-Zn Deposit in the Beishan Area[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2021, 40(6): 1141-1154.
- 龚全胜, 刘明强, 李海林, 等. 甘肃北山造山带类型及基本特征[J]. 西北地质, 2002, 39(3): 28-34.
- GONG Quansheng, LIU Mingqiang, LI Hailin, et al. The Type and Basic Characteristics of Beishan Orogenic Belt, Gansu[J]. Northwestern Geology, 2002, 39(3): 28-34.
- 龚全胜, 刘明强, 梁宏宏, 等. 北山造山带大地构造相及构造演化[J]. 西北地质, 2003, 40(1): 11-17.
- GONG Quansheng, LIU Mingqiang, LIANG Minghong, et al. The Tectonic Facies and Tectonic Evolution of Beishan Orogenic Belt, Gansu[J]. Northwestern Geology, 2003, 40(1): 11-17.
- 郝增元, 高鉴, 王晨, 等. 北山造山带风雷山地区二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其构造背景[J]. 中国地质, 2020, 47(4): 1204-1219.
- HAO Zengyuan, GAO Jian, WANG Chen, et al. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating and Tectonic Setting of the Monzogranites in the Fengeleishan Area of Beishan Orogenic Belt, Inner Mongolia[J]. Geology in China, 2020, 47(4): 1204-1219.
- 洪大卫, 王式, 谢锡林, 等. 兴蒙造山带正 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值花岗岩的成因和大陆地壳生长[J]. 地质前缘, 2000, 7(2): 441-456.
- HONG Dawei, WANG Shi, XIE Xilin, et al. Genesis of Positive $\epsilon_{Nd}(t)$ Granitoids in the Da Hinggan Mts.-Mongolia Orogenic Belt and Growth Continental Crust[J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(2): 441-456.
- 刘雪亚. 甘肃北山区的钙碱系列岩浆活动及其与板块构造的关系[J]. 中国地质科学院院报, 1984, 3: 151-165.
- LIU Xueya. Magmatism of Calc-alkaline Series in the Beishan Region of Gansu Province and its Relation to Plate Tectonics[J]. Acta Geoscientica Sinica, 1984, 3: 151-165.
- 柳永正, 张海平, 张永清, 等. 内蒙古中东部玛尼吐组火山岩形成时代及其大地构造环境[J]. 西北地质, 2023, 56(2): 46-60.
- LIU Yongzheng, ZHANG Haiping, ZHANG Yongqing, et al. Zircon U-Pb Age and Tectonic Setting of the Manitu Formation in the Middle-East Inner Mongolia, China[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(2): 46-60.
- 孟庆涛. 内蒙古北山地区晚奥陶—早志留世侵入岩地球化学特征及其地质意义[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
- MENG Qingtao. The Geological Characteristics and Significance of Late Ordovician to Early Silurian Intrusive Rocks in Beishan Area, Nei Monggol[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019.
- 冉亚洲, 陈涛, 梁文天, 等. 西秦岭郎木寺组火山岩锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. 西北地质, 2024, 57(1): 110-121.
- RAN Yazhou, CHEN Tao, LIANG Wentian, et al. Zircon U-Pb Age of Volcanic Rocks from the Langmusi Formation in the Western Qinling Mountains and Its Tectonic Significance[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(1): 110-121.
- 任云伟, 任邦方, 牛文超, 等. 内蒙古哈珠地区石炭纪白山组火山岩: 北山北部晚古生代活动陆缘岩浆作用的产物[J]. 地球科学, 2019, 44(1): 312-327.
- REN Yunwei, REN Bangfang, NIU Wenchao, et al. Carboniferous Volcanics from the Baishan Formation in the Hazhu Area, Inner Mongolia: Implications for the Late Paleozoic Active Continental Margin Magmatism in the Northern Beishan[J]. Earth Science, 2019, 44(1): 312-327.
- 孙德有, 吴福元, 张艳斌, 等. 西拉木伦河—长春—延吉板块缝合带的最后闭合时间——来自吉林大玉山花岗岩体的证据[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2004, 34(2): 174-181.
- SUN Deyou, WU Fuyuan, ZHANG Yanbin, et al. The Final Closing Time of the West Lamulun River-Changchun-Yanji Plate Suture Zone Evidence from the Dayushan Granitic Pluton, Jilin Province[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition),

- 2004, 34(2): 174–181.
- 孙立新, 张家辉, 任邦方, 等. 北山造山带白云山蛇绿混杂岩的地球化学特征、时代及地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2017, 36(2): 131–147.
- SUN Lixin, ZHANG Jiahui, REN Bangfang, et al. Geochemical Characteristics and U-Pb Age of Baiyunshan Ophiolite Mélange in the Beishan Orogenic Belt and their Geological Implications[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2017, 36(2): 131–147.
- 王梁, 王根厚, 雷时斌, 等. 内蒙古乌拉山大桦背岩体成因: 地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Sr-Nd-Hf 同位素制约[J]. *岩石学报*, 2015, 31(7): 1977–1994.
- WANG Liang, WANG Genhou, LEI Shibin, et al. Petrogenesis of Dahuabei Pluton from Wulashan, Inner Mongolia: Constraints from Geochemistry, Zircon U-Pb Dating and Sr-Nd-Hf Isotopes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(7): 1977–1994.
- 王新雨, 王书来, 吴锦荣, 等. 青海省牛苦头铅锌矿床成矿时代研究: 来自成矿岩体年代学和黄铁矿 Re-Os 地球化学证据[J]. *西北地质*, 2023, 56(6): 71–81.
- WANG Xinyu, WANG Shulai, WU Jinrong, et al. Mineralization Age and Ore forming–Source of Niukutou Pb–Zn Deposit, Qinghai: Evidence from Geochronology of Ore–forming Rock Bodies and Re–Os Geochemistry of Pyrite[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(6): 71–81.
- 王珍珍, 刘栋, 赵志丹, 等. 冈底斯带南部桑日高分异 I 型花岗岩的岩石成因及其动力学意义[J]. *岩石学报*, 2017, 33(8): 2479–2493.
- WANG Zhenzhen, LIU Dong, ZHAO Zhidan, et al. The Sangri Highly Fractionated I-type Granites in Southern Gangdese: Petrogenesis and Dynamic implication[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(8): 2479–2493.
- 魏民, 赵泽南, 杨建坤, 等. 内蒙古北山地区矿物的地球化学特征及其地质意义[J]. *世界有色金属*, 2021, 4(6): 207–209.
- WEI Min, ZHAO Zenan, YANG Jiankun, et al. Geochemical Characteristics and Geological Significance of Minerals in Beishan Area, Inner Mongolia[J]. *World Nonferrous Metals*, 2021, 4(6): 207–209.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. *岩石学报*, 2007, 23(6): 1217–1238.
- WU Fuyuan, LI Xianhua, YANG Jinhui, et al. Discussions on the Petrogenesis of Granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(6): 1217–1238.
- 许立权, 陈志勇, 张彤, 等. 内蒙古自治区铁矿资源潜力评价[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2019.
- XU Liquan, CHEN Zhiyong, ZHANG Tong, et al. Evaluation of Iron Ore Resource Potential in Inner Mongolia Autonomous Region[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2019.
- 袁禹. 北山造山带大陆地壳的形成与演化[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- YUAN Yu. The Continental Crust Formation and Evolution of the Beishan Orogenic Belt[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- 袁玲玲, 王祎帆, 刘建平, 等. 湖南香花岭晚侏罗世高分异花岗岩的岩石地球化学特征: 岩石成因与稀有金属成矿效应[J]. *岩石学报*, 2022, 38(7): 2113–2138.
- YUAN Lingling, WANG Yifan, LIU Jianping, et al. Petro-geochemistry of Late Jurassic highly fractionated granites in the Xi-anghualing area of Hunan Province: Constraints on petrogenesis and rare-metal mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2022, 38(7): 2113–2138.
- 左国朝, 张淑玲, 何国琦, 等. 北山地区早古生代板块构造特征[J]. *地质科学*, 1990, 25(4): 305–314.
- ZUO Guochao, ZHANG Shuling, HE Guoqi, et al. Early Paleozoic Plate Tectonics in Beishan Area[J]. *Chinese Journal of Geology*, 1990, 25(4): 305–314.
- Bea F, Fershtater G B, Montero P, et al. Recycling of continental crust into the mantle as revealed by Kytlym dunite zircons, Ural Mts, Russia[J]. *Terra Nova*, 2001, 13(6): 407–412.
- Bonin Bernard. A-type granites and related rocks: evolution of a concept, problems and prospects[J]. *Lithos*, 2007, 97(1–2): 1–29.
- Cleven N, Lin S, Guilmette C, et al. Petrogenesis and Implications for Tectonic Setting of Cambrian Suprasubduction-zone Ophiolitic Rocks in the Central Beishan Orogenic Collage, Northwest China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 113: 369–390.
- Ding Jiixin, Han Chunming, Xiao Wenjiao, et al. Geochronology, Geochemistry and Sr-Nd Isotopes of the Granitic Rocks Associated with Tungsten Deposits in Beishan District, NW China, Central Asian Orogenic Belt: Petrogenesis, Metallogenic and Tectonic Implications[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 89: 441–462.
- Du Lilin, Yang Chonghui, Derek A. Wyman, et al. Age and depositional setting of the Paleoproterozoic Gantaohu Group in Zanzhuang Complex: Constraints from zircon U-Pb ages and Hf isotopes of sandstones and dacite[J]. *Precambrian Research*, 2016, 286: 59–100.
- Essaifi A, Samson S, Goodenough K. Geochemical and Sr-Nd isotopic constraints on the petrogenesis and geodynamic significance of the Jebilet magmatism (Variscan Belt, Morocco)[J]. *Geological Magazine*, 2014, 151(4): 666–691.
- Frost B R, Barnes C G, Collins W J, et al. A Geochemical Classification for Granitic Rocks[J]. *Journal of Petrology*, 2001, 42: 2033–2048.
- Han Shuai, Li Haibing, Pan Jiawei, et al. Genesis and geodynamic process of early Cretaceous intermediate-felsic batholith within

- the Chem Co zone, western Qiangtang and implications for Bangong-Nujiang Tethyan Ocean subduction[J]. *Gondwana Research*, 2020, 82: 193–220.
- Latisha A, Brengman, Christopher M. Fedo. Development of a mixed seawater-hydrothermal fluid geochemical signature during alteration of volcanic rocks in the Archean (~2.7 Ga) Abitibi Greenstone Belt, Canada[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2018, 227: 227–245.
- Leng Chengbiao, Gao Jianfeng, Chen Wei Terry, et al. Platinum-group elements, zircon Hf-O isotopes, and mineralogical constraints on magmatic evolution of the Pulang porphyry Cu-Au system, SW China[J]. *Gondwana Research*, 2018, 62: 163–177.
- Li Shengrong, Sun Li, Zhang Huafeng, et al. Magma mixing genesis of the Qushui collisional granitoids, Tibet, China: Evidences from genetic mineralogy[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(4): 884–894.
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Zong Keqing, et al. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(15): 1535–1546.
- Morris G A, Larson P B, Hooper P R. Subduction Style Magmatism in a Non-subduction Setting: the Colville Igneous Complex, NE Washington State, USA[J]. *Journal of Petrology*, 2000, 41: 43–67.
- Middlemost E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth-Science Reviews*, 1994, 37: 215–224.
- Profeta L, Ducea M N, Chapman J B, et al. Quantifying Crustal Thickness over Time in Magmatic Arcs[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 17786.
- Pearce J A. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins[C]. In: Hawkesworth C J, Norry M J (Eds.), *Continental Basalts and Mantle Xenoliths*. Shiva Press Limited, Cheshire, 1983, 230–249.
- Pearce J A, Harris N B, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25: 956–983.
- Song Dongfang, Xiao Wenjiao, Han Chunming, et al. Geochronological and Geochemical Study of Gneiss-schist Complexes and Associated Granitoids, Beishan Orogen, Southern Altaids[J]. *International Geology Review*, 2013a, 55: 1705–1727.
- Song Dongfang, Xiao Wenjiao, Han Chunming, et al. Progressive Accretionary Tectonics of the Beishan Orogenic Collage, Southern Altaids: Insights from Zircon U-Pb and Hf Isotopic Data of High-grade Complexes[J]. *Precambrian Research*, 2013b, 227: 368–388.
- Tan Fucheng, Hua Kong, Biao Liu, et al. In Situ U-Pb Dating and Trace Element Analysis of Garnet in the Tongshanling Cu Polymetallic Deposit, South China[J]. *Minerals*, 2023, 13(2): 187
- Xiao Wenjiao, Mao Qigui, Windley B F, et al. Paleozoic Multiple Accretionary and Collisional Processes of the Beishan Orogenic Collage[J]. *American Journal of Science*, 2010, 310(10): 1553–1594.