

内蒙古沙麦钨矿花岗岩岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学及其地质意义

李怀彬¹, 籍进柱², 廉永³, 李腊梅¹, 吴皓然¹

(1. 中国冶金地质总局矿产资源研究院, 北京 101300; 2. 内蒙古工业大学资源与环境工程学院, 内蒙古呼和浩特 010051; 3. 锡林郭勒盟山金白音呼布矿业有限公司, 内蒙古锡林浩特 026316)

摘要: 沙麦钨矿床位于内蒙古东乌旗地区, 是该区目前已探明的中型岩浆热液型钨矿床。矿体主要赋存在黑云母二长花岗岩和黑云母二长花岗斑岩中, 对这两种花岗质岩石的岩相学、岩石地球化学和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学进行了研究。结果表明, 黑云母二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 135.6 ± 1.6 Ma 和 136.3 ± 1.8 Ma, 黑云母二长花岗斑岩锆石 U-Pb 年龄为 138.6 ± 1.1 Ma, 二者侵位时间均为早白垩世。两种花岗质岩体具有富 SiO_2 (73.73%~78.23%)、高钾钠 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) (7.56%~8.89%)、贫 MgO (0.09%~0.20%)、贫 CaO (0.51%~0.89%)、贫 TiO_2 (0.03%~0.12%) 的特征, 属于过铝质-高钾钙碱性系列; 微量元素富集 Rb、K、Th 和 U, 相对亏损 Sr、Ba、Nb、P 和 Ti 元素, 具有强烈的 Eu 负异常, 具有较高的 FeO^T 含量, 较高的 FeO^T/MgO 和 $\text{FeO}^T/(\text{FeO}^T + \text{MgO})$ 值显示 A 型花岗岩的特征。结合区域构造背景和地质资料, 认为沙麦花岗岩锆石 U-Pb 年龄与中国东部大规模成矿事件年龄范围一致, 形成于燕山期造山后伸展构造环境中, 与区域内大规模岩石圈减薄和伸展背景有关。

关键词: 兴蒙造山带; 锆石 U-Pb 定年; 岩石地球化学; A 型花岗岩; 后碰撞伸展

中图分类号: P588.12⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2023)06-0809-17

Petrogeochemistry, zircon U-Pb chronology and geological implications of granite in Shamai tungsten deposit, Inner Mongolia

LI Huai-bin¹, JI Jin-zhu², LIAN Yong³, LI La-mei¹ and WU Hao-ran¹

(1. Institute of Mineral Resources Research, China Metallurgical Geology Bureau, Beijing 101300, China; 2. School of Resources and Environmental Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 3. Xilin Gol League Shanjin Baiyin Hubu Mining Co., Ltd., Xilinhot 026316, China)

Abstract: Shamai tungsten deposit is a medium sized magmatic hydrothermal deposit located in Dong Ujimqin Banner of Inner Mongolia. The ore bodies mainly occur in biotite monzonite granite and biotite monzonite granite porphyry. In this study, the petrography, LA-ICP-MS zircon U-Pb chronology and petrogeochemistry of biotite monzonite granite and biotite monzonite granite porphyry are studied in order to clarify the genesis and age of the two rocks and provide further data for regional prospecting. The results show that the LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of biotite monzogranite are 135.6 ± 1.6 Ma and 136.3 ± 1.8 Ma, and the biotite monzonite granite porphyry is 138.6 ± 1.1 Ma. The main elements show they are peraluminous high potassium calc alkaline granite which are characterized by

收稿日期: 2023-02-08; 接受日期: 2023-10-07; 编辑: 尹淑萃

基金项目: 中国地质调查局项目(12120113056700); 中国冶金地质总局科技创新项目(CMGB202002); 内蒙古工业大学博士科研启动项目(BS2020024)

作者简介: 李怀彬(1989-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事地质工程及矿产勘查工作, E-mail: lihuaiying@cmgb.cn; 通讯作者: 籍进柱(1989-), 男, 博士, 副教授, 主要从事地质工程及遥感地质科研与教学工作, E-mail: jijinzhu@imut.edu.cn.

high SiO_2 (73.73%~78.23%), $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ (7.56%~8.89%) and low MgO (0.09%~0.20%), CaO (0.51%~0.89%), TiO_2 (0.03%~0.12%). They are enriched in Rb, K, Th, U, and depleted in Sr, Ba, Nb, P, Ti, with strong negative Eu anomaly and high FeO^T content, FeO^T/MgO and $\text{FeO}^T/(\text{FeO}^T+\text{MgO})$ ratio indicating the characteristics of A-type granite. The zircon U-Pb age of the Shamai granite is consistent with the age range of the large-scale metallogenesis in eastern China. The tectonic environment discrimination diagrams indicate that it was formed in the extensional tectonics environment after the continental collision in the Yanshanian period, which is related to the lithospheric thinning of northern margin of the North China Craton.

Key words: Xing-Meng orogenic belt; LA-ICP-MS zircon U-Pb chronology; petrogeochemistry; A-type granite; post collisional extension

Fund support: Project of China Geological Survey (12120113056700); Project of China Metallurgical Geology Bureau (CMGB202002); Doctoral Research Project of Inner Mongolia University of Technology (BS2020024)

沙麦钨矿床位于内蒙古东乌珠穆沁旗地区沙麦苏木境内,大地构造位置处于中亚造山带东段的兴蒙造山带。兴蒙造山带是我国北方重要的锡、铜、铅、锌、金、银、钨、铋多金属成矿带(江思宏等,2018),该成矿带边境线蒙古国地区已发现多处大中型钨(钼)矿床,如玉古兹尔(Yuguzer)钨(钼)矿床、阿尔巴彦(Arbayan)钨矿床、察布(Tuv)钨(钼、锡)矿床和乌姆努特(Umnut)钨(钼)矿床等(聂凤军等,2010),但在我国境内成规模的钨(钼)矿床(点)却很少(向安平,2016)。截至2010年,沙麦钨矿床累计查明资源储量330.69万吨, WO_3 储量26365吨,平均品位0.797%(内蒙古自治区第九地质矿产勘查开发院,2010),规模达中型。沙麦中型钨矿床的发现填补了该区钨资源的空白,为兴蒙造山带地区钨矿床勘查工作指明了方向。前人对沙麦钨矿床的矿床地质、成岩时代、矿床成因等方面进行了研究(胡朋等,2005;聂凤军等,2010;Jiang *et al.*, 2016;李俊建等,2016a;宓奎峰等,2020),认为该矿床是与岩浆活动密切相关的岩浆热液型矿床,然而对成岩体的成因类型和形成时代仍存在一些争议。在岩体的成因类型上,胡朋等(2006)通过沙麦矿区中细粒黑云母花岗岩和细粒似斑状花岗岩富硅、全碱含量中等和低磷的特征判断其为S型花岗岩;欧洋等(2014)通过沙麦花岗岩中Y和Rb含量、Rb和Th含量均呈负相关且 FeO^T 含量低于1%,也认为沙麦岩体为S型花岗岩;而Jiang等(2016)研究显示沙麦矿区中细粒黑云母二长花岗岩和似斑状黑云母二长花岗岩具有低P,高 SiO_2 、 K_2O 、A/CNK值的特征,稀土元素分布呈显著四分组效应和非CHARAC(电荷和半径控制)的微量元素特征,认为沙麦花岗岩为高分异I型花岗岩。在沙麦花岗岩的形成时代上,Nie

等(2011)获得的花岗岩成岩年龄为晚三叠世;而多数学者则认为花岗岩形成在晚侏罗-早白垩世之间,如赵一鸣等(1997)测得沙麦岩体黑云母K-Ar年龄为115 Ma;Jiang等(2016)获得中细粒黑云母二长花岗岩和似斑状黑云母二长花岗岩锆石LA-MC-ICP-MS U-Pb年龄分别为 153 ± 1 Ma和 146 ± 1 Ma;李俊建等(2016a)获得的黑云母花岗岩的TIMS锆石U-Pb年龄为 139.1 ± 0.93 Ma;宓奎峰等(2020)测得中细粒黑云母二长花岗岩、似斑状黑云母二长花岗岩独居石U-Pb谐和年龄分别为 141.6 ± 1.1 Ma和 141.4 ± 0.3 Ma。为了精确厘定沙麦钨矿床成矿岩体的成因类型和形成时代,本文针对与成矿关系密切的黑云母二长花岗岩和黑云母二长花岗岩斑岩开展了LA-ICP-MS锆石U-Pb年代学和岩石地球化学研究,结合前人研究结果,进一步探讨了沙麦钨矿床的成岩成矿时代、岩石成因类型和构造背景,为中国东部燕山期构造背景及动力学机制研究提供新的约束。

1 区域地质和矿区地质概况

1.1 区域地质背景

沙麦钨矿床大地构造位置位于兴蒙造山带东段(图1a)(内蒙古自治区地质矿产局,1991;聂凤军等,2007;徐备等,2014)。该区域大部分被草原覆盖,岩石出露较差,出露的地层主要为泥盆系、下二叠统、中下侏罗统、上侏罗统、下白垩统、新近系上新统和第四系(图1b)(内蒙古自治区地质矿产局,1991;崔凯等,2022)。其中,泥盆系安格尔音乌拉组浅变质岩和中下侏罗统马尼特庙群火山沉积岩分布范围最广,同时也是该区最重要的赋矿围岩。泥盆系安格尔音乌拉组为一套陆相及滨海相砂板岩沉

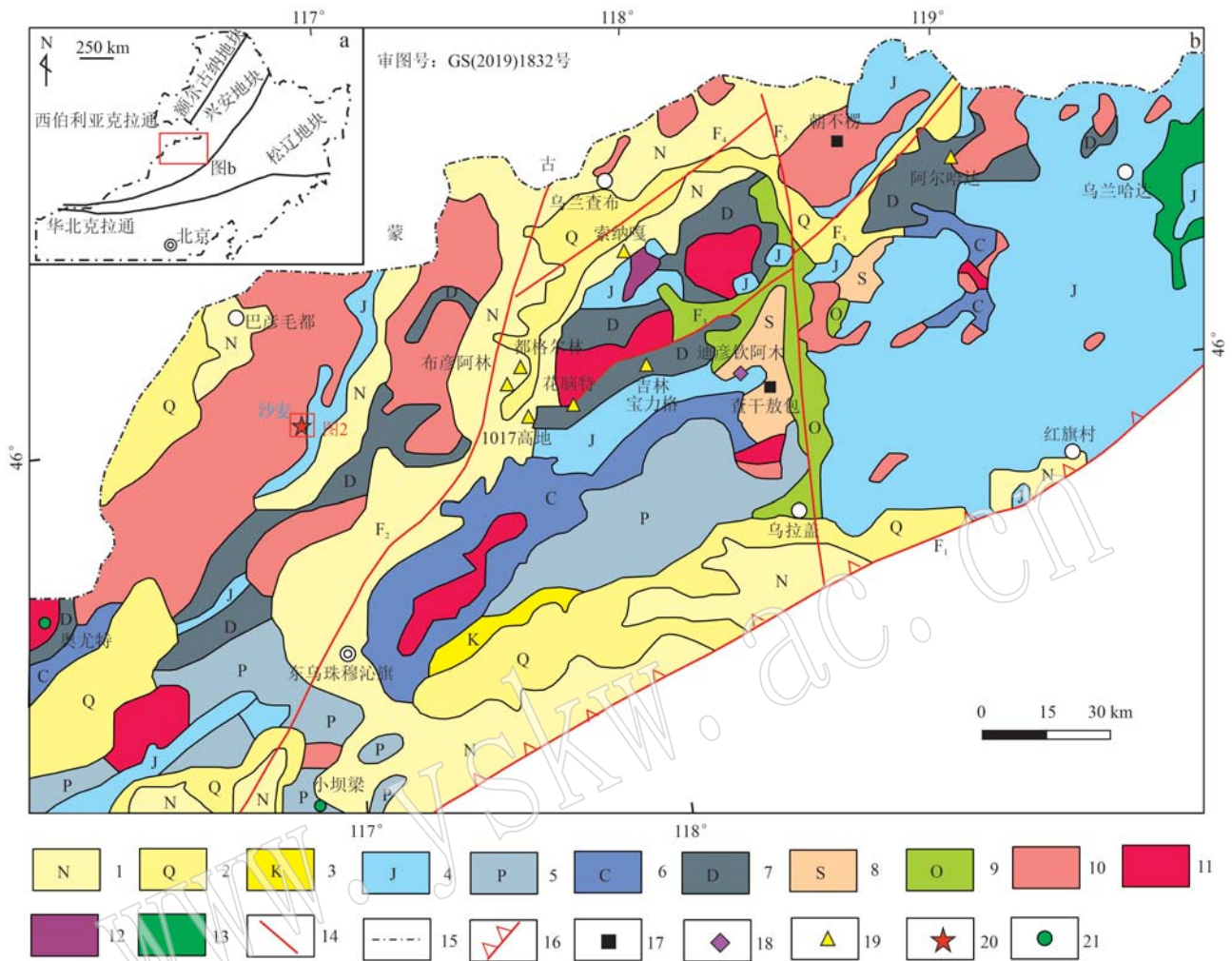


图 1 中国大兴安岭及毗邻地区大地构造分区(a,据徐备等, 2014)和东乌珠穆沁旗地区区域地质简图(b, 据内蒙古自治区地质矿产局, 1991; 崔凯等, 2022)

Fig. 1 Regional tectonic framework of the Da Hinggan Mountains and adjacent areas in northeast China (a, modified after Xu Bei *et al.*, 2014) and simplified regional geological map of the Dong Ujimqin Banner (b, modified after BGMNRMAR, 1991; Cui Kai *et al.*, 2022)

1—新近系; 2—第四系; 3—白垩系; 4—侏罗系; 5—二叠系; 6—石炭系; 7—泥盆系; 8—志留系; 9—奥陶系; 10—燕山期花岗岩; 11—海西期花岗岩; 12—石英斑岩; 13—玄武岩; 14—断裂; 15—国界线; 16—板块缝合线; 17—Fe 多金属矿床; 18—Mo 矿床; 19—Ag-Pb-Zn 矿床; 20—沙麦 W 矿床; 21—Cu 矿床; F₁—二连-贺根山深断裂带; F₂—东乌旗-伊和沙巴尔深大断裂; F₃—白云呼布尔-满都宝力格大断裂; F₄—巴润沙巴尔-朝不楞北大断裂; F₅—朝不楞西-乌拉盖断裂

1—Neogene; 2—Quaternary; 3—Cretaceous; 4—Jurassic; 5—Permian; 6—Carboniferous; 7—Devonian; 8—Silurian; 9—Ordovician; 10—Yanshanian granite; 11—Hercynian granite; 12—quartz porphyry; 13—basalt; 14—fault; 15—national boundary line; 16—plate suture line; 17—Fe deposit; 18—Mo deposit; 19—Ag-Pb-Zn deposit; 20—Shamai W deposit; 21—Cu deposit; F₁—Erlian-Hegenshan fault-zone; F₂—Dong Ujimqin Banner-Yiheshasha'er fault; F₃—Baiyunhubu'er-Mandubaolige fault; F₄—Barunshaba'er-Chaobuleng fault; F₅—Chaobuleng-Wulagai fault

积组合, 岩石均轻度区域变质, 岩性主要为灰色弱角岩化变泥岩、二云角岩、浅灰色板岩、变泥岩、浅灰色中细粒长石砂岩、硬砂岩夹板岩及粉砂岩等, 与其上部的上侏罗统白音高老组及玛尼图组呈角度不整合。下侏罗统马尼特庙群为一套陆相碎屑沉积物,

岩性主要为细砂岩、砾岩、泥岩和硬砂质砂岩等, 底部夹煤线, 地层局部已角岩化。区域上构造以 NE 和 SN 向断裂为主, 是主要的控岩、控矿构造(李继宏等, 2005), 其中 NE 向断裂主要有二连-贺根山深断裂带(F₁)、东乌旗-伊和沙巴尔深大断裂(F₂)、白云

呼布尔-满都宝力格大断裂(F_3)、巴润沙巴尔-朝不楞北大断裂(F_4)和巴彦毛都韧性剪切带,SN向断裂为朝不楞西-乌拉盖断裂(F_5)(图1b)。区内褶皱构造轴向与主干断裂走向相同,如NE向查干敖包复背斜、额仁高毕复向斜和朝不楞复背斜。区内岩浆岩活动频繁,其中以海西期和燕山期花岗岩最为发育,并且与金属矿床具有密切的成因关系(张万益,2008)。

1.2 矿床地质特征

1.2.1 矿区地质概况

沙麦钨矿床主体为沙麦岩体,大部分被第四系覆盖,仅在矿区东南部零星出露泥盆系浅变质岩和侏罗系火山沉积岩地层(李俊建等,2016a)。矿区位于NE向东乌旗复背斜的轴部,主要发育NW、NE两个方向多阶段活动的交叉断裂。NW向的压扭性

断裂是矿区内重要的容矿构造,控制钨矿体的展布。沙麦岩体主体为燕山期花岗岩类,总体呈NNE-SSW方向展布,东北和南西两端均延深至蒙古国境内(图1b),其延伸长约100 km,宽20~80 km不等(胡朋等,2006)。沙麦花岗岩体主体为黑云母二长花岗岩,可见黑云母二长花岗斑岩、细粒花岗岩、伟晶岩、细晶岩等呈岩墙或岩脉侵位至黑云母二长花岗岩中(图2)。云英岩及云英岩化花岗岩为含钨石英脉直接接触变围岩,又往往能够形成独立矿体(图3a、3b)。矿区围岩蚀变类型有云英岩化、角岩化、硅化、白云母化等,其中云英岩化、角岩化和硅化与矿区的W、Mo矿化关系密切。

1.2.2 矿体特征

沙麦矿区矿体主要分布在黑云母二长花岗岩和黑云母二长花岗斑岩岩体内(图2),目前在区内已

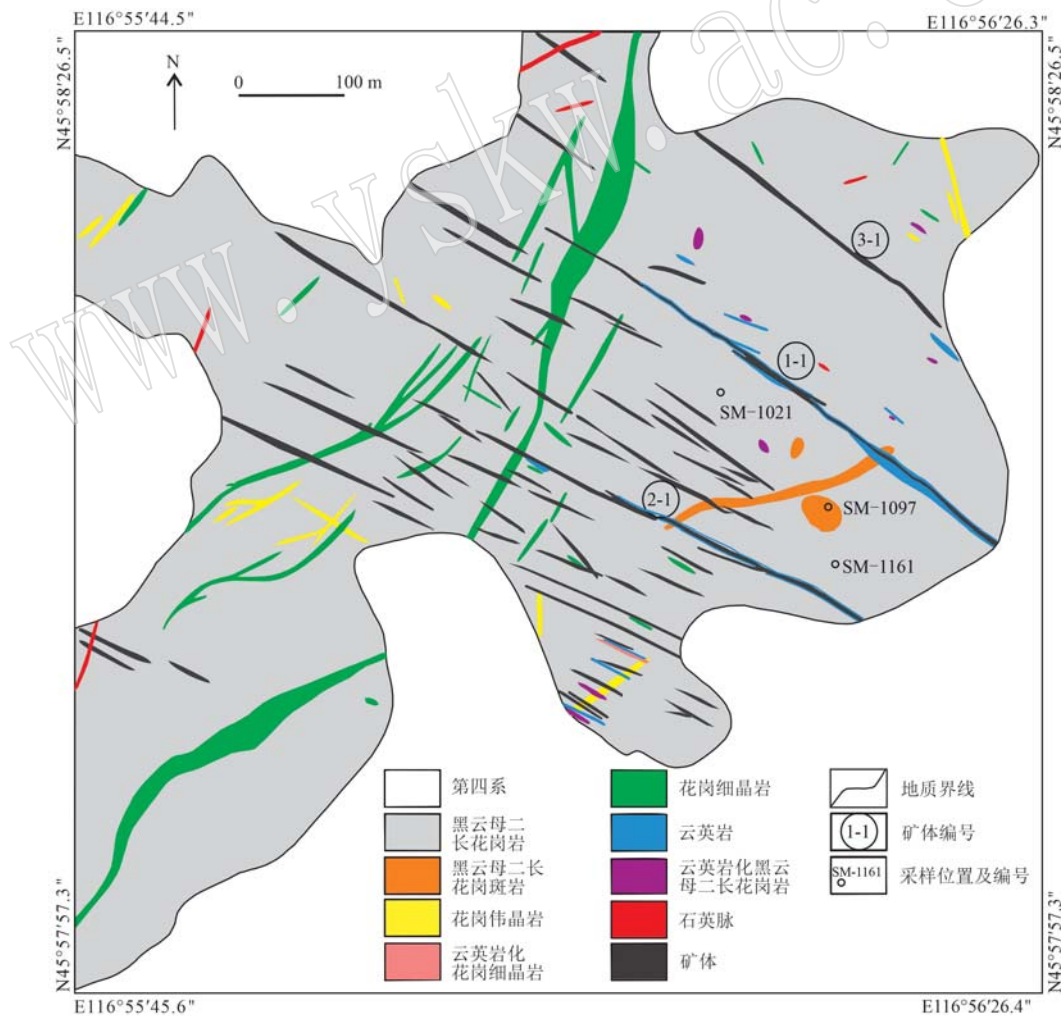


图2 沙麦钨矿床矿区地质简图(据寇奎峰等,2020修绘)

Fig. 2 Simplified geological map of the Shamai tungsten deposit (modified from Mi Kuifeng *et al.*, 2020)

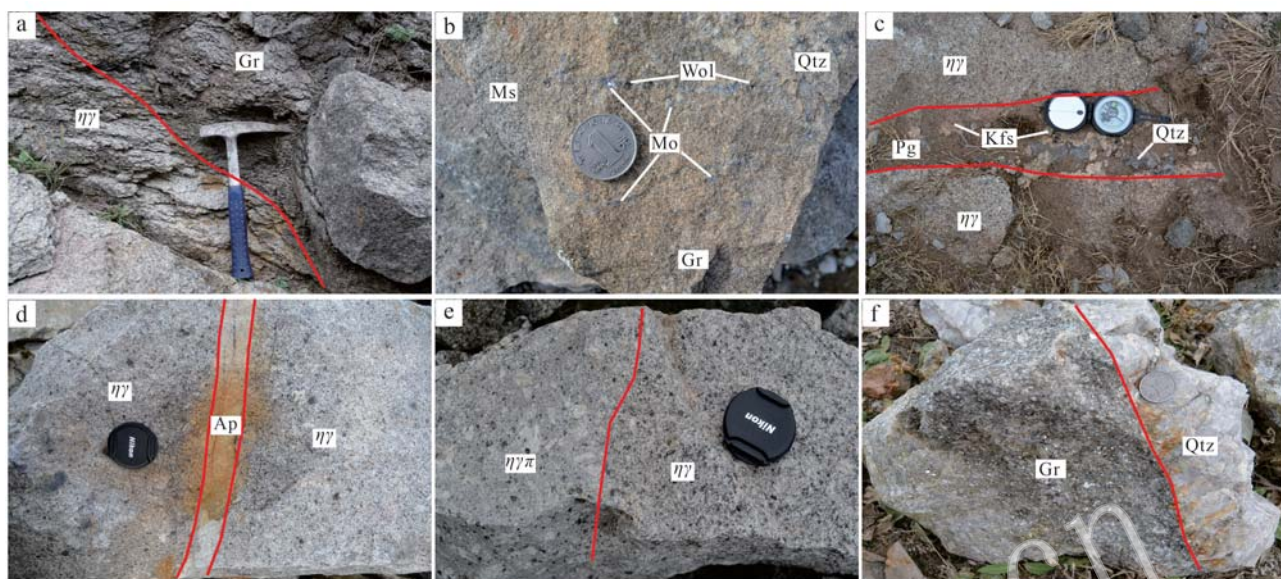


图3 沙麦钨矿区主要侵入岩和矿石野外照片

Fig. 3 Photographs of intrusive rocks and ore rocks in Shamai tungsten deposit

a—黑云母二长花岗岩脉及外侧围岩中的云英岩化蚀变; b—云英岩化蚀变岩中见浸染状黑钨矿和辉钼矿; c—黑云母二长花岗岩中见长英质伟晶岩脉; d—侵入于黑云母二长花岗岩中的细晶岩脉; e—黑云母二长花岗岩边部发育黑云母二长花岗斑岩; f—石英脉外侧围岩中发育云英岩化; ηγ—黑云母二长花岗岩; ηγπ—黑云母二长花岗斑岩; Ap—细晶岩; Gr—云英岩; Kfs—钾长石; Mo—辉钼矿; Ms—白云母; Pg—伟晶岩; Qtz—石英; Wol—黑钨矿

a—distribution of greisen on the edge of biotite monzogranite; b—disseminated molybdenite and wolframite are found in greisen; c—felsic pegmatite veins are found in biotite monzogranite; d—aplite veins are found in biotite monzogranite; e—biotite monzonitic-porphyr granite can be seen at the edge of biotite monzogranite; f—quartz vein edge develops greisenization; ηγ—biotite monzogranite; ηγπ—biotite monzonitic-porphyr granite;

Ap—aplite; Gr—greisen; Kfs—K-feldspar; Mo—molybdenite; Ms—muscovite; Pg—pegmatite; Qtz—quartz; Wol—wolframite

发现有 550 多条含钨矿(化)体,其中达到经济品位的有 77 条,可将其划分为 3 条主矿化带(图 2)。矿区钨矿(化)体总体走向 $295^{\circ} \sim 307^{\circ}$, NW 向近似呈平行排列,长数米至数百米不等。矿化类型主要有石英脉型和云英岩型两种,局部可见伟晶岩型矿化。石英脉型矿石的 WO_3 品位一般高于云英岩型,例如,在 1 号矿化带石英脉型矿石中 WO_3 平均含量为 0.23%~4.82%,而云英岩型矿石中 WO_3 平均含量为 0.11%~0.77% (内蒙古自治区第九地质矿产勘查开发院, 2010)。石英脉型矿石主要以石英+黑钨矿+白云母脉的形式赋存于黑云母二长花岗岩等围岩中(图 4a),脉体中可见黄铁矿、萤石和黄玉(图 4b)等;云英岩型矿石主要发育于石英+黑钨矿脉两侧的浸染状蚀变围岩中(图 3a、3b、3f),主要矿物组合为石英和白云母,含少量浸染状黑钨矿和辉钼矿。两种矿石中的金属矿物除黑钨矿外,还见有白钨矿、黄铁矿、闪锌矿、黄铜矿(图 4c)、辉钼矿(图 4d)和毒砂等。

1.2.3 主要侵入岩岩石学特征

黑云母二长花岗岩岩体出露范围较广,岩石呈

灰白色,中细粒等粒结构,块状构造(图 5a),粒径在 0.1~3 mm 之间。岩石主要由斜长石(25%~30%)、钾长石(25%~30%)、石英(25%~35%)、黑云母(5%~10%)等组成(图 5b)。在显微镜下可见斜长石呈自形至半自形板状,常见聚片双晶,有时见斜长石环带状结构;钾长石呈板状半自形-自形晶,常见卡式双晶和格子双晶;石英呈它形粒状分布在长石、黑云母等矿物晶体之间。

黑云母二长花岗斑岩,岩石呈灰色至灰白色,斑状-似斑状结构,块状构造(图 5c)。岩石主要矿物为钾长石(30%~35%)、斜长石(25%~35%)、石英(20%~30%)、黑云母(5%~10%)(图 5d),次要矿物有磁铁矿、锆石、磷灰石、独居石和黄玉等。斑晶由长石和石英组成,其中斜长石的斑晶颗粒较大,粒度一般在 3~10 mm,呈板状自形晶,显微镜下可见聚片双晶;钾长石斑晶自形-半自形,粒度与斜长石相近,在显微镜下可见卡式双晶和格子双晶;石英斑晶颗粒较小,为 2~5 mm,呈半自形-它形。基质主要由斜长石、钾长石、石英组成,与斑晶矿物组成成分基本类似,粒径一般在 0.2~0.8 mm。

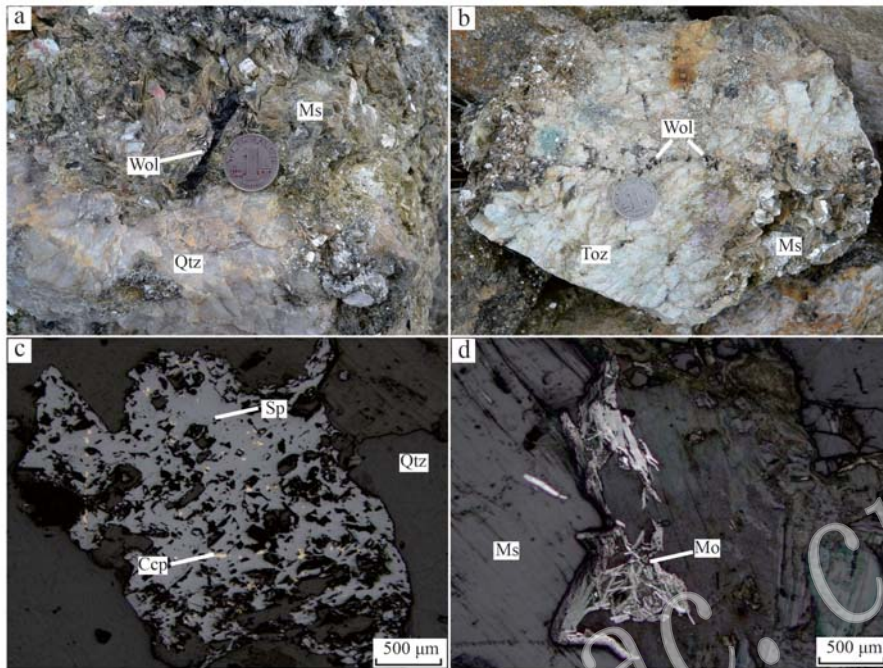


图4 沙麦钨矿区典型钨矿石的手标本照片和显微镜下部分金属矿物组合照片

Fig. 4 Photographs of ore samples and petrography of metal mineral association in the Shamai tungsten deposit

a—伟晶岩中团簇状白云母与黑钨矿共生；b—伟晶岩中发育团块状黄玉；c—黄铜矿呈乳滴状分布于闪锌矿中(反射光)；d—束状和集合体状辉钼矿(反射光)；Ccp—黄铜矿；Mo—辉钼矿；Ms—白云母；Qtz—石英；Sp—闪锌矿；Toz—黄玉；Wol—黑钨矿
a—muscovite clusters coexisting with wolframite in the pegmatite；b—massive topaz developed in pegmatite；c—chalcopyrite is distributed in sphalerite as milk drops (reflected light)；d—wolframite in quartz vein (reflected light)；Ccp—chalcopyrite；Mo—molybdenite；Ms—muscovite；Qtz—quartz；Sp—sphalerite；Toz—topaz；Wol—wolframite

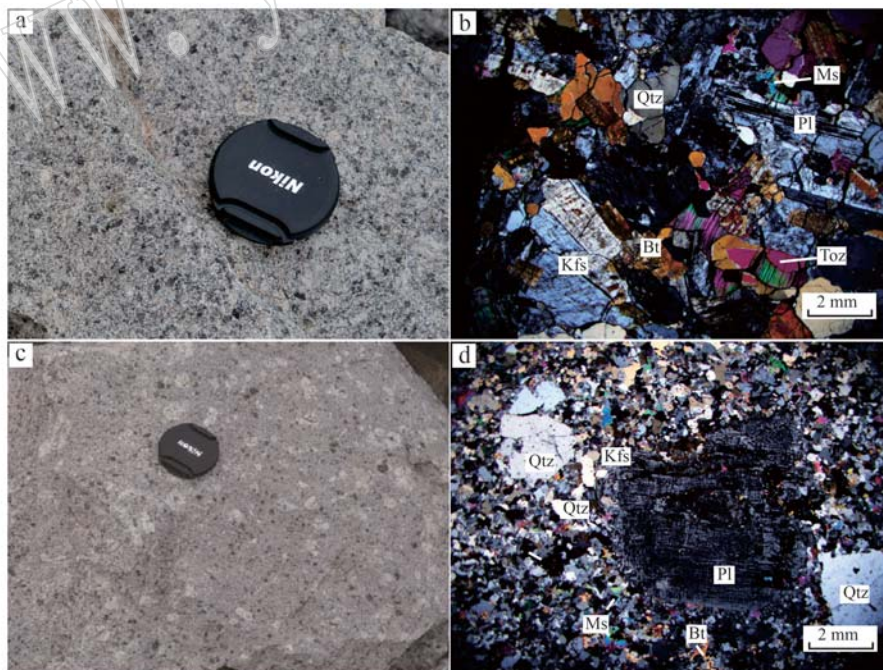


图5 岩石标本和显微岩相学照片

Fig. 5 Samples and micrography photos of rock

a—黑云母二长花岗岩标本；b—黑云母二长花岗岩显微镜下照片(正交偏光)；c—黑云母二长花岗岩斑岩标本；d—黑云母二长花岗岩斑岩显微镜下照片(正交偏光)；Bt—黑云母；Kfs—钾长石；Ms—白云母；Pl—斜长石；Qtz—石英；Toz—黄玉
a—biotite monzogranite samples；b—microphotograph of biotite monzogranite (crossed-polar light)；c—biotite monzonitic-porphyr granite samples；d—microphotograph of biotite monzonitic-porphyr granite, with plagioclase and quartz phenocrysts (crossed-polar light)；Bt—biotite；Kfs—K-feldspar；Ms—muscovite；Pl—plagioclase；Qtz—quartz；Toz—topaz

2 分析方法

测试样品采自沙麦钨矿床的黑云母二长花岗岩和黑云母二长花岗斑岩(图2),所取样品远离构造蚀变带,新鲜无蚀变。黑云母二长花岗岩样品 SM1018、SM1019、SM1025、SM1058 和黑云母二长花岗斑岩样品 SM1006、SM1011、SM1097、SM1123 用于全岩主、微量元素分析,黑云母二长花岗岩样品 SM1021、SM1161 和黑云母二长花岗斑岩样品 SM1097 进行了锆石定年测试。

岩石的主、微量元素分析测试工作在核工业北京地质研究院分析测试中心完成。主量元素测定方法依据《GB/T14506.28-93 硅酸盐岩石化学分析方法》,使用仪器为 Philips PW2404 型 X 荧光光谱仪(XRF),分析精度优于 1%。微量元素测试依据《DZ/T0223-2001 电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)方法》通则,使用 Finnigan MAT Element I 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)完成,分析精度多优于 3%(谢玉玲等, 2015a)。

单矿物锆石颗粒挑选工作在河北廊坊区调研究所实验室完成,在北京地时科技有限公司进行了锆石制靶工作和锆石阴极发光(CL)图像拍摄。锆石 U-Pb 定年在澳大利亚 James Cook 大学高级分析测试中心利用 Agilent 7500cs 激光剥蚀四极杆电感耦合等离子质谱(LA-ICP-MS)完成。测试采用 He 气作为剥蚀物质的载气,激光束斑直径为 30 μm ,剥蚀深度在 20~40 μm 之间。锆石 U-Pb 同位素采用 GJ-

1 标准对锆石进行同位素分馏校正,每隔 5~10 个样品测点分析一次标样,以确保标样和样品测试时的仪器条件相同。详细实验过程及分析方法见 Baker 等(2004)和 Halpin 等(2014)。

3 测试结果

3.1 岩石地球化学结果

3.1.1 主量元素分析结果

沙麦钨矿区黑云母二长花岗岩 SiO_2 含量介于 75.49%~78.23% 之间, Al_2O_3 含量介于 11.83%~13.23% 之间, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 含量介于 7.84%~8.44% 之间, MgO 含量介于 0.09%~0.2% 之间, CaO 含量介于 0.51%~0.74% 之间, TiO_2 含量介于 0.03%~0.06% 之间。黑云母二长花岗斑岩 SiO_2 含量为 73.73%~74.81%, Al_2O_3 含量为 13.3%~13.68%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 含量为 7.56%~8.89%, MgO 含量为 0.12%~0.19%, CaO 含量为 0.69%~0.89%, TiO_2 含量为 0.08%~0.12%。

尽管两种岩性在野外和岩相学特征存在差异,但其主量元素地球化学特征则具有很大的相似性,均具有富 SiO_2 、富 Al_2O_3 、高钾钠含量、贫 MgO 、贫 CaO 和贫 TiO_2 的特征。两种岩性的样品中 K_2O 含量介于 4.16%~5.11% 之间,平均值为 4.59%; Na_2O 含量为 3.27%~3.88%,平均值为 3.58%; 可见样品中 K_2O 含量明显高于 Na_2O 含量,属高钾质类型岩石,在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解(图 6a)上,投影点均落在高钾钙碱性系列区域范围内,显示高钾钙碱性特征。铝饱和

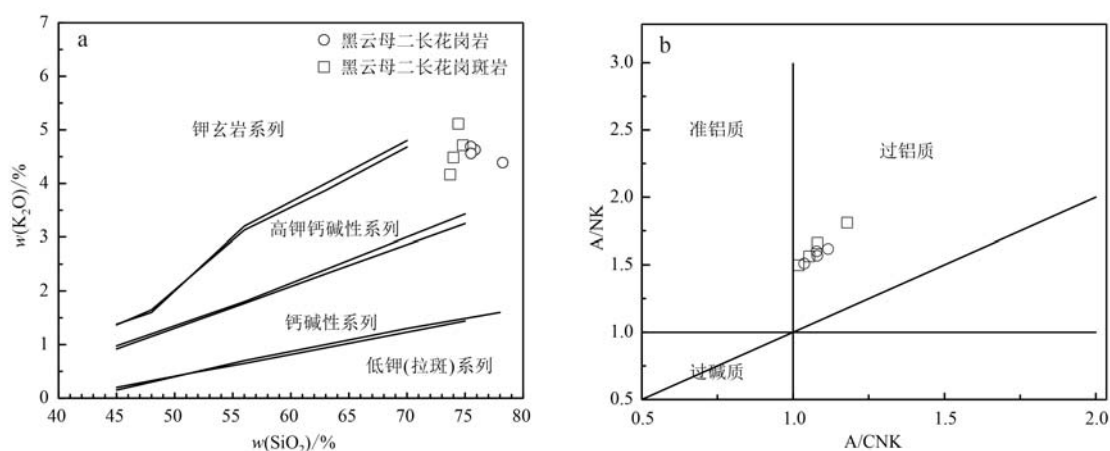


图 6 沙麦钨矿主要侵入岩 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解(a, 据 Peccerillo and Taylor, 1976)和 $\text{A}/\text{NK}-\text{A}/\text{CNK}$ 分类图解(b, 据 Maniar and Piccoli, 1989)

Fig. 6 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ diagrams (a, after Maniar and Piccoli, 1989) and $\text{A}/\text{CNK}-\text{A}/\text{NK}$ classification diagrams (b, after Maniar and Piccoli, 1989) of major intrusive rocks from Shamai tungsten deposit

指数(A/CNK)介于1.02~1.18之间,A/NK在1.50~1.81之间,在A/NK-A/CNK分类图解上,样品均落入过铝质花岗岩系列区域(图6b)。

3.1.2 稀土和微量元素分析结果

从表1可见,黑云母二长花岗岩稀土元素总量为 $159.40 \times 10^{-6} \sim 227.02 \times 10^{-6}$,平均 205.15×10^{-6} ,

表1 沙麦钨矿床主要侵入岩主量元素($w_B/\%$)、微量元素和稀土元素($w_B/10^{-6}$)分析结果

Table 1 Major ($w_B/\%$) and trace elements($w_B/10^{-6}$) of major intrusive rocks from Shamai tungsten deposit

岩性 样号	黑云母二长花岗岩				黑云母二长花岗斑岩			
	SM1019	SM1018	SM1058	SM1025	SM1011	SM1123	SM1097	SM1006
SiO ₂	75.85	75.49	75.51	78.23	74.43	74.01	74.81	73.73
TiO ₂	0.06	0.05	0.04	0.03	0.09	0.12	0.08	0.10
Al ₂ O ₃	12.78	12.9	13.23	11.83	13.3	13.6	13.29	13.68
Fe ₂ O ₃	1.60	1.49	1.35	0.82	1.75	1.97	1.71	2.38
FeO ^T	1.07	1.05	1.11	0.70	1.45	1.66	1.50	1.84
MnO	0.11	0.12	0.09	0.05	0.06	0.15	0.09	0.25
MgO	0.20	0.12	0.09	0.10	0.16	0.19	0.12	0.17
CaO	0.59	0.74	0.51	0.54	0.71	0.89	0.69	0.83
Na ₂ O	3.27	3.37	3.88	3.45	3.78	3.72	3.80	3.40
K ₂ O	4.63	4.69	4.56	4.39	5.11	4.48	4.71	4.16
P ₂ O ₅	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02
烧失量	0.85	0.96	0.68	0.50	0.57	0.78	0.63	1.22
总量	99.96	99.95	99.96	99.95	99.98	99.93	99.96	99.95
Na ₂ O+K ₂ O	7.90	8.06	8.44	7.84	8.89	8.2	8.51	7.56
A/CNK	1.12	1.08	1.08	1.04	1.02	1.08	1.05	1.18
A/NK	1.62	1.60	1.57	1.51	1.50	1.66	1.56	1.81
Li	172	216	175	87	155	471	388	630
Be	5.38	4.16	8.79	5.96	8.92	4.58	6.28	4.70
Sc	6.80	7.01	6.68	3.07	5.09	6.80	5.97	14.30
V	4.20	3.73	4.93	3.16	14.9	15.50	11.70	16.20
Cr	4.43	2.55	2.26	3.04	5.15	4.17	4.59	3.24
Co	0.548	0.497	0.441	0.447	0.926	0.979	0.840	0.834
Ni	2.75	1.69	1.54	1.63	2.23	2.38	2.89	2.38
Cu	8.35	5.24	7.08	11.90	3.60	19.00	3.97	7.69
Zn	98.8	76.6	126.0	86.8	60.4	120.0	80.6	192.0
Ga	26.8	28.9	27.7	23.1	22.9	26.9	25.1	35.7
Rb	595	642	565	485	429	689	533	813
Sr	18.1	16.0	9.4	16.3	47.8	50.2	42.1	25.4
Y	100	144	109	88.1	66.4	78	71.1	78.6
Mo	4.26	1.43	3.07	3.55	5.02	8.21	5.63	10.3
Cd	0.27	0.24	0.21	0.12	0.07	2.15	0.12	1.60
In	0.35	0.34	0.36	0.12	0.12	0.51	0.16	0.92
Sb	0.48	0.39	0.16	0.23	0.21	0.29	0.26	0.21
Cs	28.2	30.8	30.8	15.0	32.8	33.7	33.5	43.4
Ba	46	48	15	42.4	217	177	161	147
La	31	25.1	16.6	28.3	36.4	43.3	40.4	34.8
Ce	74.9	62.8	42.9	72.0	84.2	99.6	96.6	83.3
Pr	9.93	8.52	6.11	10.00	10.80	12.90	12.50	10.80
Nd	38.6	34.5	24.7	39.7	42.8	50.3	48.6	41.9
Sm	12.3	11	9.29	12.2	11.1	12.6	12.8	11.6
Eu	0.18	0.17	0.07	0.19	0.40	0.47	0.32	0.32
Gd	11.2	12.1	9.0	10.5	9.6	11.0	10.8	10.2
Tb	2.82	3.56	2.64	2.44	2.19	2.48	2.38	2.41
Dy	16.7	21.9	16.9	14.4	12.3	13.7	13.4	14.1
Ho	3.43	4.71	3.49	2.82	2.36	2.71	2.72	2.79

续表 1

Continued Table 1

岩性 样号	黑云母二长花岗岩				黑云母二长花岗斑岩			
	SM1019	SM1018	SM1058	SM1025	SM1011	SM1123	SM1097	SM1006
Er	10.20	13.70	10.30	8.27	6.72	7.78	7.81	7.78
Tm	1.88	2.58	2.05	1.54	1.26	1.44	1.41	1.48
Yb	12.20	17.50	13.50	9.88	8.22	9.21	9.30	9.82
Lu	1.68	2.45	1.85	1.36	1.12	1.25	1.30	1.36
W	13.2	34.5	7.55	11.3	11.4	21	10.4	13.6
Re	0.002	0.003	0.004	<0.002	<0.002	<0.002	0.003	0.009
Tl	4.07	4.31	4.01	3.7	3.03	4.18	3.89	4.52
Pb	38.7	35	21.5	78.4	38.5	46.5	38.8	41.1
Bi	6.79	5.96	4.89	1.47	1.83	0.827	1.37	1.66
Th	21.8	19.1	12.9	19.9	20.7	23.8	23.1	17.8
U	7.77	6.59	5.47	5.45	18.4	9.32	14.7	10.5
Nb	22.4	25.5	29	8.94	18.4	21.2	20.5	25.5
Ta	6.61	7.44	8.76	2.64	2.94	4.43	4.32	7.54
Zr	84.9	92.1	67.7	81.6	108	126	130	124
Hf	5.21	5.48	5.12	4.93	5.20	5.77	6.40	6.01
Rb/Sr	32.87	40.13	60.11	29.75	8.97	13.73	12.66	32.01
K/Rb	0.008	0.007	0.008	0.009	0.012	0.007	0.009	0.005
ΣREE	227.02	220.59	159.40	213.60	229.47	268.74	260.34	232.66
ΣLREE	166.91	142.09	99.67	162.39	185.70	219.17	211.22	182.72
ΣHREE	60.11	78.50	59.73	51.21	43.77	49.57	49.12	49.94
LREE/HREE	2.78	1.81	1.67	3.17	4.24	4.42	4.30	3.66
(La/Yb) _N	1.82	1.03	0.88	2.05	3.18	3.37	3.12	2.54
Zr/Hf	16.30	16.81	13.22	16.55	20.77	21.84	20.31	20.63
10 000Ga/Al	3.96	4.23	3.95	3.69	3.25	3.74	3.57	4.93
FeO ^T /MgO	5.30	8.68	11.94	7.14	9.29	8.83	12.50	10.70
FeO ^T /(FeO ^T +MgO)	0.84	0.90	0.92	0.88	0.90	0.90	0.93	0.91
Y+Nb	122.40	169.50	138.00	97.04	84.80	99.20	91.60	104.10

LREE/HREE 值介于 1.67~3.17 之间, (La/Yb)_N 值为 0.88~2.05, 平均 1.45, 轻微富集轻稀土元素。黑云母二长花岗斑岩稀土元素总量为 229.47×10^{-6} ~ 268.74×10^{-6} , 平均 247.80×10^{-6} , LREE/HREE 值为 3.66~4.42, (La/Yb)_N 值为 2.54~3.37, 平均 3.05。在稀土元素分配模式图中(图 7a), 两种岩石稀土元素变化趋势基本一致, 轻稀土相对富集, 而重稀土则相对亏损, Eu 有明显的负异常, 球粒陨石标准化稀土配分曲线总体呈海鸥型分布。

在微量元素蛛网图(图 7b), 两种岩体均显示出富集 Rb、K、Th、U 元素, 相对亏损 Sr、Ba 和 Nb、P、Ti 元素。高 Rb、低 Sr 和 Ba 的微量元素特征反映了钾长石和斜长石在花岗岩结晶过程中占据主导地位(顾玉超等, 2017)。两种岩体的微量元素原始地幔标准化分布模式曲线均有向右倾的趋势, 且走向大体一致。岩石样品中 (La/Yb)_N 值均大于 1, 说明在岩浆成岩的过程中可能经历了分离结晶作用。

3.2 锆石 U-Pb 年代学结果

锆石 CL 图像(图 8)显示, 两种花岗质岩石中锆石具有相似的特征: 长柱状或短柱状, 自形-半自形晶, 晶棱或晶锥较完整, 长轴多在 50~200 μm 之间, 长短轴比多为 2:1~3:1。锆石晶面较整洁光滑, 能够清晰的看到韵律环带, 为典型的岩浆锆石。LA-ICP-MS 测试点位尽量布置在没有包裹体的锆石中, 且这些位置环带较为清晰, 以便更精确的获取锆石结晶年龄。

本次在锆石阴极发光(CL)图像及 LA-ICP-MS 分析数据的基础上, 共挑选能够参与年代学计算的有效数据点 30 个(详见表 2)。黑云母二长花岗岩选取样品 SM1021 共测试有效点位 12 个, U-Pb 年龄在 131.1 ± 3.2 Ma ~ 140.0 ± 1.7 Ma 之间, U-Pb 下交点年龄为 135.6 ± 1.6 Ma (MSWD = 1.8, $n = 12$) (图 9a); 黑云母二长花岗岩另一个样品 SM1161 共测试有效点位 7 个, U-Pb 年龄在 131.1 ± 3.6 ~ 138.7 ± 2.0 Ma

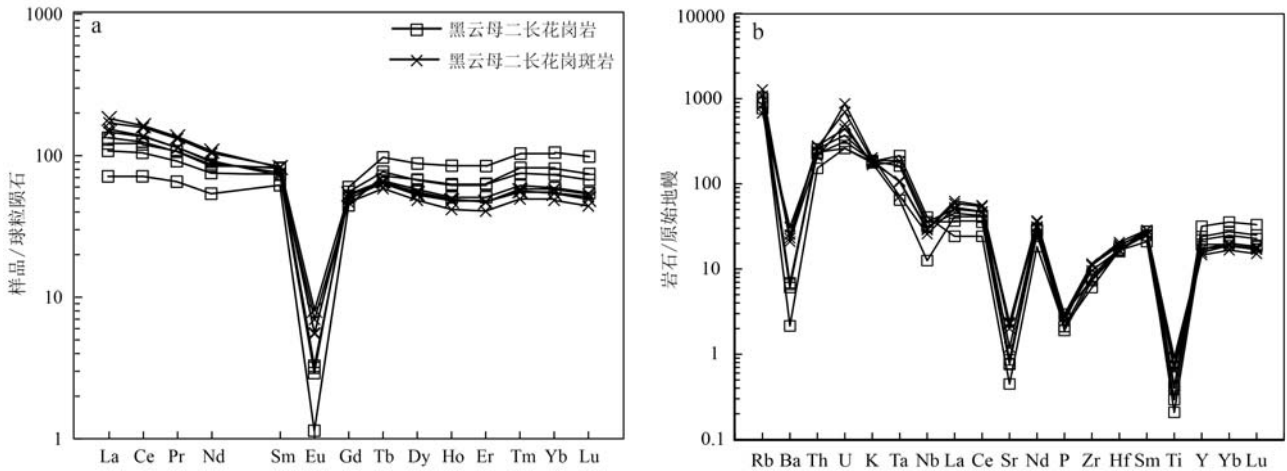


图7 沙麦钨矿主要侵入岩稀土元素球粒陨石标准化配分图(a, 标准化值据 McDonough and Sun, 1994)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b, 标准值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns (a, normalization value after McDonough and Sun, 1994) and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams (b, normalization value after Sun and McDonough, 1989) of intrusive rocks from Shamai tungsten deposit

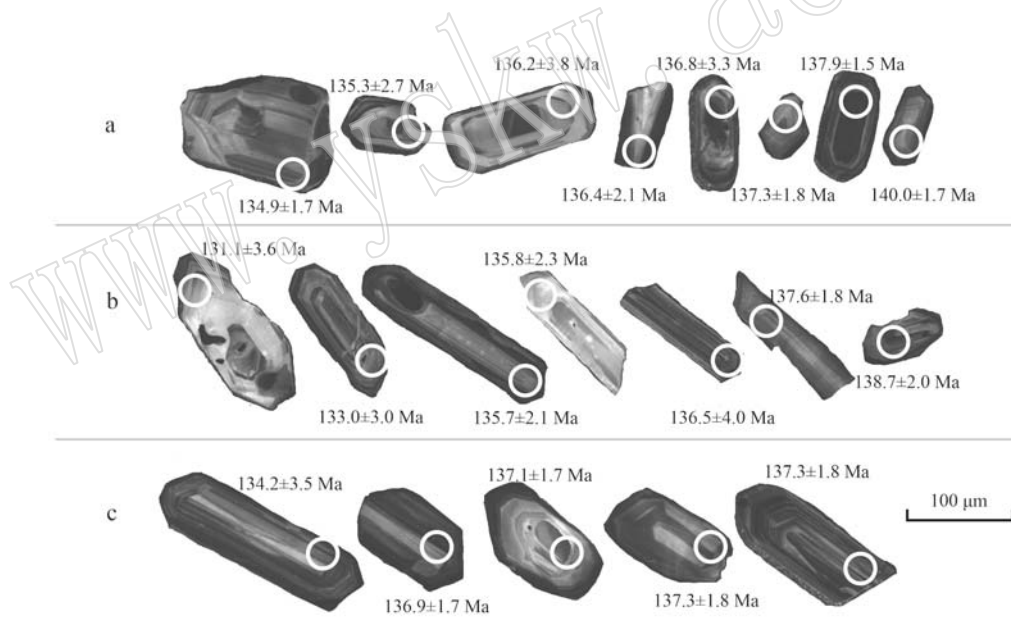


图8 沙麦钨矿黑云母二长花岗岩(a,b)和黑云母二长花岗斑岩(c)锆石阴极发光照片及测试位置

Fig. 8 CL images zircon grains from biotite monzogranite (a, b) and biotite monzonitic-porphyry granite (c) of Shamai tungsten deposit, showing the analysis spots and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age

之间, U-Pb 下交点年龄为 136.3 ± 1.8 Ma (MSWD = 0.94, $n = 7$) (图 9b); 两件样品所测得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值变化范围较小。黑云母二长花岗斑岩(样品 SM1097)有效点位 11 个, U-Pb 年龄在 134.2 ± 3.5 Ma ~ 142.7 ± 3.5 Ma 之间, 下交点年龄为 138.6 ± 1.1 Ma (MSWD = 1.14, $n = 11$) (图 9c), 时间接近但略早于黑云母二长花岗岩, 两者侵位时间均为早白垩世。

4 讨论

4.1 岩石成因类型和成岩背景

沙麦矿区的黑云母二长花岗岩和黑云母二长花岗斑岩的地球化学研究结果显示, 两种花岗岩岩石均富 SiO_2 (73.73% ~ 78.23%) 和 Al_2O_3 (11.83% ~

表 2 沙麦钨矿主要侵入岩锆石 U-Pb 测年数据
Table 2 Zircon U-Pb data of the major intrusive rocks from Shamai tungsten deposit

岩性	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
	Pb	Th	U	U		1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ
SM1021-1	37	272	859	0.32	0.180 5	0.006 9	40.62	0.91	0.034 5	0.001 9	2 657	63	686	131.1	3.2
SM1021-2	24	404	997	0.40	0.050 3	0.000 6	47.98	0.48	0.006 7	0.000 1	208	27	135	132.7	1.3
SM1021-3	2	34	79	0.43	0.053 2	0.002 7	47.65	0.89	0.007 1	0.000 3	339	117	143	133.1	2.5
SM1021-4	12	187	332	0.56	0.157 8	0.002 5	41.14	0.49	0.017 6	0.000 3	2 432	27	353	133.8	1.7
SM1021-5	38	326	1 241	0.26	0.107 0	0.003 1	43.84	0.53	0.020 4	0.000 8	1 749	53	408	134.9	1.7
SM1021-6	13	126	409	0.31	0.144 2	0.007 7	41.50	0.71	0.023 9	0.001 3	2 279	92	478	135.3	2.7
SM1021-7	2	25	59	0.42	0.164 3	0.007 8	40.05	1.04	0.026 0	0.001 3	2 500	80	518	136.2	3.8
SM1021-8	3	42	128	0.33	0.060 2	0.003 4	46.09	0.69	0.007 8	0.000 3	610	123	157	136.4	2.1
SM1021-9	12	124	375	0.33	0.135 8	0.005 1	41.53	0.96	0.023 6	0.001 3	2 175	65	472	136.8	3.3
SM1021-10	12	206	519	0.40	0.049 2	0.001 0	46.43	0.61	0.007 2	0.000 2	156	48	144	137.3	1.8
SM1021-11	11	143	447	0.32	0.050 5	0.001 0	46.15	0.51	0.007 4	0.000 2	217	45	148	137.9	1.5
SM1021-12	8	126	331	0.38	0.048 6	0.001 1	45.56	0.54	0.006 9	0.000 2	130	55	138	140.0	1.7
SM1161-1	34	301	542	0.56	0.298 5	0.007 0	33.46	0.79	0.041 9	0.001 6	3 462	36	831	131.1	3.6
SM1161-2	28	288	1 157	0.25	0.064 7	0.004 5	47.01	1.03	0.003 1	0.000 5	764	146	62	133.0	3.0
SM1161-3	44	363	679	0.53	0.309 2	0.003 6	31.69	0.41	0.045 9	0.000 8	3 517	18	906	135.7	2.1
SM1161-4	132	848	2 555	0.33	0.249 2	0.004 5	35.18	0.53	0.051 5	0.001 3	3 180	28	1 015	135.8	2.3
SM1161-5	15	196	330	0.59	0.189 0	0.007 9	38.52	1.03	0.023 6	0.001 4	2 734	69	471	136.5	4.0
SM1161-6	14	137	514	0.27	0.068 4	0.001 7	45.20	0.60	0.011 0	0.000 4	880	51	221	137.6	1.8
SM1161-7	46	353	1 545	0.23	0.119 3	0.001 4	41.91	0.61	0.025 1	0.000 5	1 945	21	501	138.7	2.0
SM1097-4	2	29	63	0.46	0.052 7	0.002 9	47.30	1.24	0.006 8	0.000 4	314	124	136	134.2	3.5
SM1097-5	5	56	224	0.25	0.049 5	0.001 4	46.53	0.58	0.007 1	0.000 2	171	64	142	136.9	1.7
SM1097-6	8	91	350	0.26	0.051 5	0.001 1	46.35	0.57	0.007 2	0.000 2	263	49	145	137.1	1.7
SM1097-7	6	74	237	0.31	0.054 8	0.001 3	46.11	0.60	0.007 2	0.000 2	404	55	146	137.3	1.8
SM1097-8	5	74	223	0.33	0.050 5	0.001 3	46.34	0.62	0.006 9	0.000 2	218	60	139	137.3	1.8
SM1097-9	4	57	172	0.33	0.051 9	0.001 6	46.16	0.64	0.007 0	0.000 2	282	68	141	137.6	1.9
SM1097-10	6	75	228	0.33	0.047 9	0.001 2	46.05	0.62	0.007 2	0.000 2	94	61	146	138.5	1.9
SM1097-11	6	124	216	0.57	0.048 1	0.001 4	45.92	0.62	0.007 5	0.000 2	106	66	150	138.9	1.9
SM1097-12	11	96	436	0.22	0.054 5	0.001 1	44.84	0.60	0.007 6	0.000 2	391	47	153	141.2	1.9
SM1097-13	47	453	1 627	0.28	0.088 3	0.001 5	42.84	0.45	0.015 0	0.000 3	1 388	32	300	141.5	1.5
SM1097-14	11	109	212	0.51	0.215 4	0.007 2	35.37	0.77	0.031 2	0.001 1	2 946	54	622	142.7	3.5

黑云母
二长
花岗岩

黑云母
二长
花岗岩

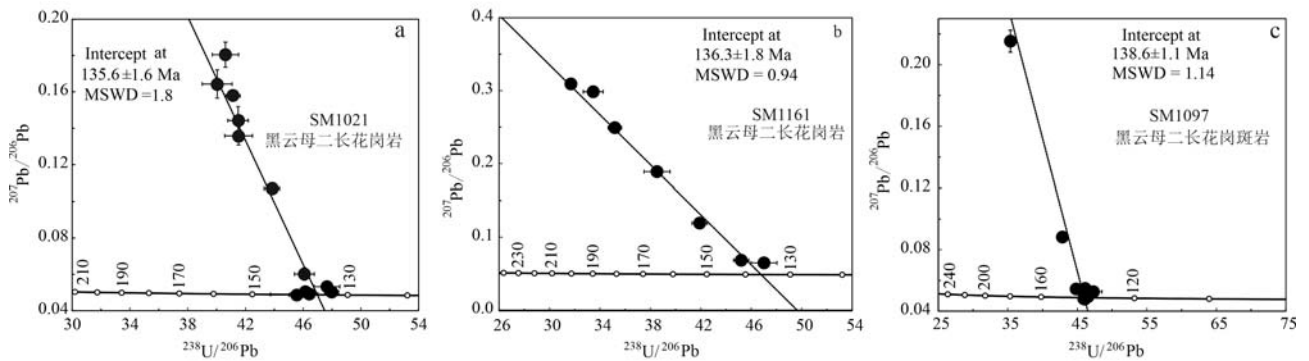


图 9 沙麦钨矿主要侵入岩锆石 U-Pb 下交点年龄图

Fig. 9 Zircon U-Pb lower intercepted ages of main intrusive rocks in Shamai tungsten deposit

a, b—黑云母二长花岗岩锆石 U-Pb 下交点年龄图; c—黑云母二长花岗岩斑岩锆石 U-Pb 下交点年龄图

a, b—zircon U-Pb lower intercepted ages of biotite monzogranite; c—zircon U-Pb lower intercepted ages of biotite monzonitic-porphry granite

13.68%), 高 Rb/Sr 值 (8.97~60.11), 低 K/Rb 值 (0.005~0.012), 稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图呈明显负 Eu 异常的“海鸥型”, 微量元素蛛网图上显示 Sr、Ba、Ti 和 P 值出现明显亏损, 并且明显富集 Zr、Y 和 Yb 等元素, 这些特征与典型的 A 型花岗岩特征 (吴锁平等, 2007) 相似。此外, 沙麦花岗岩 Zr/Hf 值集中在 13.22~21.84 之间, 均小于 25, 表明沙麦花岗岩为高分异花岗岩的特征 (吴福元等, 2017)。富 Si 的过铝质 A 型花岗岩和高分异的 I 型花岗岩在矿物学和地球化学的某些特征方面高度相似, 二者很难区分 (吴福元等, 2007), 因此, 需要多种判别方法结合来判定花岗岩成因类型。

在 10 000Ga/Al-Zr (图 10a) 和 10 000 Ga/Al-Y 花岗岩判别图解 (图 10b) 上, 两种岩性样品全部位于 A 型花岗岩区域。此外, A 型花岗岩具有较高的 FeO^T 含量、 FeO^T/MgO 和 $\text{FeO}^T/(\text{FeO}^T + \text{MgO})$ 的比值, 这是辨别 A 型花岗岩和高分异 I 型花岗岩的重要指标 (Frost *et al.*, 2001; 孙海瑞等, 2021)。沙麦钨矿两种花岗岩的 FeO^T 含量为 (0.70%~1.84%), 远高于高分异的 I 型花岗岩的 FeO^T 含量 (~0.5%) (唐功建等, 2008)。另外, 沙麦矿区两种花岗岩具有较高的 FeO^T/MgO (5.30~12.50) 和 $\text{FeO}^T/(\text{FeO}^T + \text{MgO})$ (0.84~0.92) 的比值, 在岩石类型判别图 (图 10c、10d) 中, 均落在 A 型花岗岩区域, 表明本次研究的花岗岩应属于 A 型花岗岩。

沙麦钨矿两种花岗岩 P_2O_5 含量 (0.02%~0.03%) 远低于高分异 S 型花岗岩 (均值 0.14%), 而且沙麦花岗岩中 Na_2O 含量 (4.39%~5.11%) 高于

高分异 S 型花岗岩 (均值 2.81%), 以上均表明沙麦花岗岩应该不属于高分异 S 型花岗岩, 而是 A 型花岗岩。

在构造环境 Al_2O_3 - SiO_2 判别图解上 (图 11a), 沙麦钨矿两种花岗岩均落在后造山花岗岩类系列范围内。在 Rb-(Y+Nb) 微量元素图解 (图 11b) 中, 沙麦钨矿两种花岗岩都落在板内花岗岩和同碰撞花岗岩交界处, Forster 等 (1997) 将这一区域圈定为后碰撞伸展花岗岩区, 显示沙麦花岗岩形成于造山后伸展构造环境中。沙麦钨矿床位于中亚造山带东段的兴蒙造山带, 该区经历了古亚洲洋构造域和古太平洋构造域两大构造演化阶段。古生代期间, 该区经历了古亚洲洋盆形成与闭合 (Xiao *et al.*, 2004; 张晓飞等, 2018; 唐克东等, 2022; 王帅等, 2022)。中生代-新生代时期兴蒙造山带进入了滨西太平洋构造域发育阶段。在燕山晚期滨西太平洋构造活动持续向西俯冲, 导致深部软流层继续发生上涌底侵, 晚侏罗世至早白垩世, 该区广泛发育双峰式火山岩和 A 型花岗岩 (赵越, 1990; 谢玉玲等, 2015b), 是碰撞后伸展的记录, 表明此时该区处于伸展的构造环境。在此阶段, 古太平洋板块相对亚洲大陆向北剪切走滑造成近东西向的古板块结合带和一系列近东西向断裂活化, 特别是走滑形成的局部张性空间引起软流圈上涌、岩石圈地幔或下地壳部分熔融 (邵济安等, 2001; 谢玉玲等, 2015b), 导致大规模早白垩世岩浆侵位并伴随广泛的金属矿化 (聂风军等, 2010)。沙麦花岗岩形成时代为 135.6~138.6 Ma, 为早白垩世, 与区域伸展及广泛的成岩成矿时间一

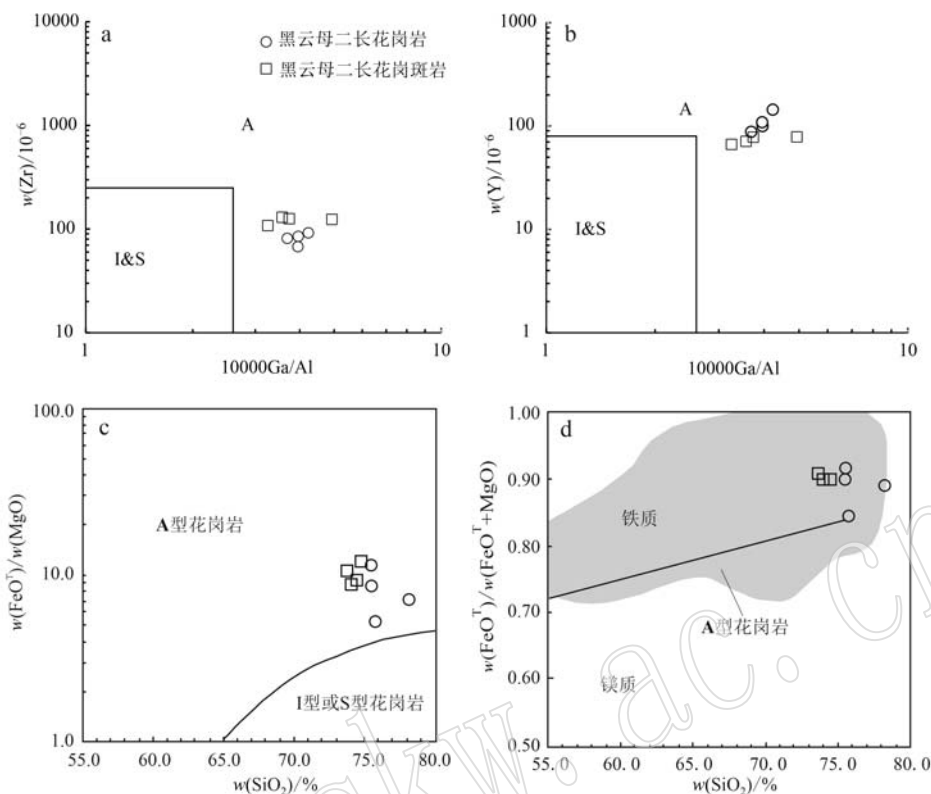


图 10 沙麦钨矿花岗岩岩石类型判别图(底图据 Whalen *et al.*, 1987; Frost *et al.*, 2001)

Fig. 10 Discrimination diagram of granite rock types in Shamai tungsten deposit (after Whalen *et al.*, 1987; Frost *et al.*, 2001)

a—花岗岩 Zr-10 000 Ga/Al 判别图解; b—花岗岩 Y-10 000 Ga/Al 判别图解; c—花岗岩 $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}-\text{SiO}_2$ 判别图解; d—花岗岩 $\text{FeO}^{\text{T}}/(\text{FeO}^{\text{T}}+\text{MgO})-\text{SiO}_2$ 判别图解

a—Zr-10 000 Ga/Al discrimination diagram; b—Y-10 000 Ga/Al discrimination diagram; c— $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}-\text{SiO}_2$ discrimination diagram; d— $\text{FeO}^{\text{T}}/(\text{FeO}^{\text{T}}+\text{MgO})-\text{SiO}_2$ discrimination diagram

致,表明沙麦钨矿的形成与区域大规模成矿事件有关。

4.2 矿区岩浆作用与钨成矿的关系

前人研究表明,在燕山期 160~110 Ma 期间,中国东部出现了一次大规模或大爆发成矿事件(毛景文等, 2000)。大兴安岭南段地区强烈岩浆活动主要集中在 150~120 Ma 之间,花岗岩侵位主要集中在 140~120 Ma 之间(邵济安等, 2001)。近年来,位于大兴安岭南段西坡的东乌旗地区获得了大量与中酸性侵入岩浆岩相关的多金属矿床成岩成矿年龄数据,除个别矿床在海西期形成,如 1017 高地银多金属矿床绢云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄为 301.2 ± 1.8 Ma(王治华等, 2013);大部分成岩成矿年龄均集中在燕山期,如朝不楞砂卡岩型铁多金属矿床钾长花岗岩斑岩年龄 138~140 Ma(聂凤军等, 2007),辉钼矿 Re-Os 年龄 140.7 ± 1.8 Ma(Wu *et al.*, 2017);奥尤特铜矿含石英脉石英 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄 187.11 ± 3.50 Ma(李

俊建等, 2016b);花脑特银多金属矿床斑状石英正长岩锆石 U-Pb 年龄 172.6 ± 2.0 Ma(谢玉玲等, 2015b);阿尔哈达银铅锌多金属矿床与成矿密切的黑云母二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄 154 ± 1.2 Ma(谢玉玲等, 2015b);索纳嘎斑岩型钼多金属矿床花岗岩斑岩锆石 U-Pb 年龄 164.8 ± 2.0 Ma,辉钼矿 Re-Os 年龄 166.9 ± 2.3 Ma(杨梅珍等, 2012)。这说明兴蒙造山带东乌旗地区从晚三叠世至早白垩世经历了强烈的火山活动和中酸性岩浆侵位,并伴随一系列的成矿事件,在早白垩世和侏罗世达到巅峰。

沙麦钨矿床是华北地区规模最大的中型钨矿床,矿石类型以石英脉型和云英岩型为主,在沙麦花岗岩体南东方向的突出部位及其围岩中产出。该矿床与燕山晚期的黑云母二长花岗岩和黑云母二长花岗岩斑岩关系密切,矿体受控于由花岗岩节理发育而来的 NW 向张扭性断裂(李俊建等, 2016a)。本文通

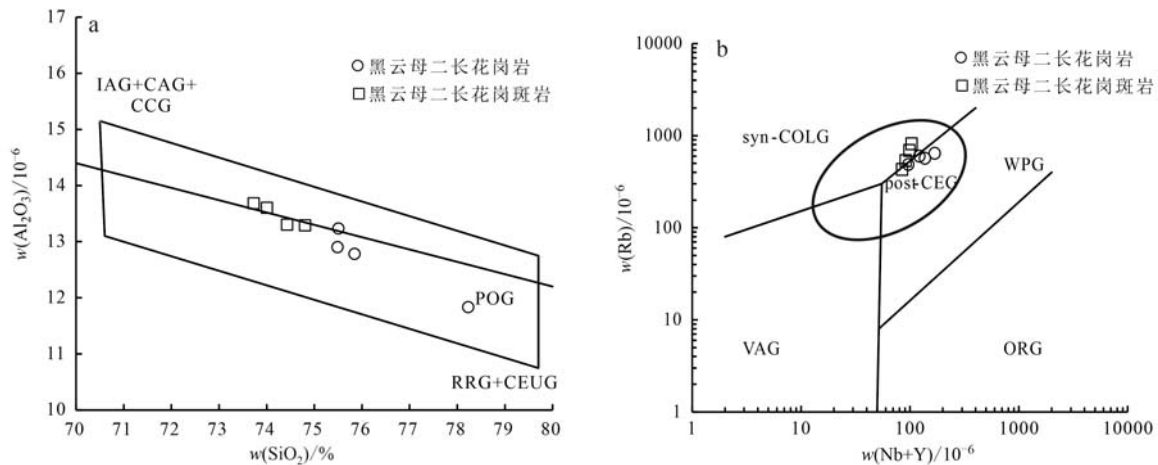


图 11 沙麦侵入岩 Al_2O_3 - SiO_2 构造环境判别图解(a, 底图据 Maniar and Piccoli, 1989) 和 Rb - $\text{Y}+\text{Nb}$ 构造环境判别图解 (b, 底图据 Forster *et al.*, 1997)

Fig. 11 Al_2O_3 - SiO_2 tectonic discrimination diagram (a, modified from Maniar and Piccoli, 1989) and Rb - $\text{Y}+\text{Nb}$ tectonic discrimination diagram (b, modified from Forster *et al.*, 1997) of major intrusive rocks from Shamai tungsten deposit
 a: IAG—岛弧花岗岩; CAG—大陆弧花岗岩; CCG—大陆碰撞花岗岩; POG—后碰撞花岗岩; RRG—与裂谷有关的花岗岩; CEUG—与大陆的造陆抬升有关的花岗岩; b: syn-COLG—同碰撞花岗岩; VAG—火山弧花岗岩; WPG—板内花岗岩; ORG—洋中脊花岗岩; post-CEG—后碰撞伸展花岗岩
 a: IAG— island arc granitoids; CAG—continental arc granitoids; CCG—continental collision granitoids; POG—post-collisional granitoids; RRG—rift-related granitoids; CEUG—continental epeirogenic uplift granitoids; b: syn-COLG—syncollision granites; VAG—volcanic arc granites; WPG—within plate granites; ORG—ocean ridge granites; post-CEG—post-collision extension granites

过对与成矿关系密切的两种花岗岩进行了锆石 U-Pb 测年,显示其侵位年龄介于 138.6~135.6 Ma 之间,且黑云母二长花岗斑岩形成略早于黑云母二长花岗岩,但非常接近,属同一期岩浆产物。综合前人研究结果,沙麦钨矿床与成矿相关的岩浆侵入年龄集中在 153~135 Ma 之间,而成矿年龄集中介于 140~137 Ma 之间 (Jiang *et al.*, 2016; 吴皓然等, 2022),表明岩浆热液型矿床的成矿作用与岩浆活动在时间上和空间上有密切联系,且成岩与成矿近乎同期进行。花岗质岩浆不仅能够从深部带来大量的成矿物质,并在岩浆演化分异的过程中造成元素在岩体顶部和边部富集,扮演了“热能机”的作用,导致成矿热液的对流循环 (高征西, 2019)。此外,在沙麦钨矿的黑云母二长花岗岩中发育大量的伟晶岩脉,记录了岩浆出溶流体的过程,钨等成矿元素富集在流体内部。随着地壳浅部温度和压力的降低,花岗质岩浆开始侵位与冷凝,并在岩体的隆起部位经常形成一系列开放的断裂系统。顺着这些断裂系统,原聚集在岩隆部位的成矿流体开始沸腾,沿裂隙向减压方向运移 (张作衡等, 1998)。胡朋等 (2005)

研究表明沙麦钨矿主成矿期流体为岩浆水和大气降水的混合。成矿流体伴随着大气降水的加入,引起流体物理化学性质发生改变,导致钨快速沉淀,形成钨矿床 (高征西, 2019)。

5 结论

(1) 沙麦钨矿体主要赋存于黑云母二长花岗岩和黑云母二长花岗斑岩中,其与成矿关系密切。两种不同类型花岗岩为同源岩浆,岩体形成时代介于 138.6~135.6 Ma 之间,属于早白垩世。

(2) 沙麦矿区两种花岗岩均富 SiO_2 、钾钠、富微量元素 Pb、Th 和 U,具有较高的 FeO^T 含量、 FeO^T/MgO 和 $\text{FeO}^T/(\text{FeO}^T+\text{MgO})$ 值、 A/CNK 值和 10 000 Ga/Al 值,贫 Mg、Ca、Sr、Ba、Nb、P 和 Ti,强烈的 Eu 负异常,显示沙麦花岗质岩体具有 A 型花岗岩的特征。

(3) 沙麦钨矿形成于燕山期造山后伸展构造环境中,与区域内大规模岩石圈减薄和伸展背景有关,是中国东部大规模成矿事件的产物。

References

- Baker J, Peate D, Waight T, *et al.* 2004. Pb isotopic analysis of standards and samples using a ^{207}Pb - ^{204}Pb double spike and thallium to correct for mass bias with a double-focusing MC-ICP-MS[J]. *Chemical Geology*, 211: 275~303.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Inner Mongolia Autonomous Region. 1991. Regional Geology of Inner Mongolia Autonomous Region[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~725 (in Chinese).
- Cui Kai, Li Lamei, Wu Haoran, *et al.* 2022. Fluid exsolution, evolution for the ore-controlling in Diyanqin'amu porphyry Mo deposit, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 41(6): 1120~1134 (in Chinese with English abstract).
- Forster H J, Tischendorf G and Trumbull R B. 1997. An evaluation of Rb vs. (Y+Nb) discrimination diagram to infer tectonic setting of silicic igneous rocks[J]. *Lithos*, 40: 261~293.
- Frost B R, Barnes C G, Collins W J, *et al.* 2001. A geochemical classification for granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 42(11): 2033~2048.
- Gao Zhengxi. 2019. Polymetallic Mineralization and Prospecting Direction in the Gaoerqi-Chaobuleng Area, Inner Mongolia[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 1~181 (in Chinese with English abstract).
- Gu Yuchao, Chen Renyi, Jia Bin, *et al.* 2017. Zircon U-Pb dating and geochemistry of the granite porphyry from the Shuangjianzishan silver polymetallic deposit in Inner Mongolia and tectonic implications[J]. *Geology and Exploration*, 53(3): 495~507 (in Chinese with English abstract).
- Halpin J A, Jensen T, McGoldrick P, *et al.* 2014. Authigenic monazite and detrital zircon dating from the Proterozoic Rocky Cape Group, Tasmania: Links to the Bel-Purcell Supergroup, North America[J]. *Precambrian Research*, 250: 50~67.
- Hu Peng, Nie Fengjun, He Ying, *et al.* 2005. Geological features and fluid inclusions of Shamai tungsten deposit, Inner Mongolia[J]. *Mineral Deposits*, 24(6): 603~612 (in Chinese with English abstract).
- Hu Peng, Nie Fengjun, He Ying, *et al.* 2006. A peraluminous granite with positive $\varepsilon\text{Nd}(t)$ values: The Shamai pluton in Inner Mongolia, northeast China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(11): 2781~2790 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Sihong, Bagas L, Hu Peng, *et al.* 2016. Zircon U-Pb ages and Sr-Nd-Hf isotopes of the highly fractionated granite with tetrad REE patterns in the Shamai tungsten deposit in eastern Inner Mongolia, China: Implications for the timing of mineralization and ore genesis[J]. *Lithos*, 261: 332~339.
- Jiang Sihong, Zhang Lili, Liu Yifei, *et al.* 2018. Metallogeny of Xing-Meng Orogenic Belt and some related problems[J]. *Mineral Deposits*, 37(4): 671~711 (in Chinese with English abstract).
- Li Jihong and Zhang Wanchang. 2005. Tectonic information extract in the Dong Ujimqin Banner grassland district of Inner Mongolia[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Reserch*, 20(2): 137~141 (in Chinese with English abstract).
- Li Junjian, Fu Chao, Tang Wenlong, *et al.* 2016a. The metallogenic age of the Shamai wolframite deposit in Dong Ujimqin Banner, Inner Mongolia[J]. *Geological Bulletin of China*, 35(4): 524~530 (in Chinese with English abstract).
- Li Junjian, Zhao Zelin, Dang Zhicai, *et al.* 2016b. Metallogenic epoch of the Aoyoute copper deposit in Dong Ujimqin Banner, Inner Mongolia[J]. *Geological Bulletin of China*, 35(4): 537~541 (in Chinese with English abstract).
- Maniar P and Piccoli P. 1989. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of American Bulletin*, 101: 635~643.
- Mao Jingwen and Wang Zhiliang. 2000. A preliminary study on time limits and geodynamic setting of large-scale metallogeny in East China[J]. *Mineral Deposits*, 19(4): 289~296 (in Chinese with English abstract).
- McDonough W F and Sun S S. 1994. The composition of the Earth[J]. *Chemical Geology*, 120(3): 223~253.
- Mi Kuifeng, Yang Yan, Yan Tingjie, *et al.* 2020. In situ monazite U-Pb geochronology of highly fractionated granites in Shamai tungsten deposit, Inner Mongolia and its mineralization significance[J]. *Geoscience*, 34(3): 504~513 (in Chinese with English abstract).
- Nie Fengjun and Jiang Sihong. 2011. Geological stting and origin of Mo-W-Cu deposits in the Honggor Shamai distriet, Inner Mongolia, North China[J]. *Resource Geology*, 61(4): 344~355.
- Nie Fengjun, Hu Peng, Jiang Sihong, *et al.* 2010. Geological features, geochronology and origin of the tungsten and tungsten (molybdenum) deposits in the Shamai-Yuguzer mineralization concentrated camp along the Sino-Mongolian Border[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 31(3): 383~394 (in Chinese with English abstract).
- Nie Fengjun, Zhang Wanyi, Du Andao, *et al.* 2007. Re-Os isotopic age dating of molybdenite separates from the Chaobuleng skarn iron-polymetallic deposit, Dong Ujimqin Banner, Inner Mongolia[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 28(4): 315~323 (in Chinese with English abstract).
- Ou Yang, Lu Bingxiong, Yao Yuan, *et al.* 2014. Geochemical characteristics of granite bodies in Shamai area, Dongwu banner, Inner Mongolia[J]. *Public Communication of Science & Technology*, (10):

- 134~136 (in Chinese with English abstract).
- Peccerillo R and Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene cal-calkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 50: 63~81.
- Shao Ji'an, Liu Futian, Chen Hui, *et al.* 2001. Relationship between mesozoic magmatism and subduction in Da Hinggan-Yanshan area [J]. Acta Geologica Sinica, 75(1): 56~63 (in Chinese with English abstract).
- Sun Hairui, Lü Zhicheng, Han Zhirui, *et al.* 2021. Genesis and geological significance of late jurassic high-B ore-bearing A-type granite in the Dayishan tin deposit, Hunan Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 37(6): 1 749~1 764 (in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. Geological Society London Special Publications, 42: 313 ~ 345.
- Tang Gongjian, Chen Haihong, Wang Qiang, *et al.* 2008. Geochronological age and tectonic background of the Dabate A-type granite pluton in the west Tianshan[J]. Acta Petrologica Sinica, 24(5): 947~958 (in Chinese with English abstract).
- Tang Kedong, Ju Nan, Zhang Daquan, *et al.* 2022. Implication of the tectonic evolution of paleo asian ocean[J]. Geology and Resources, 31(3): 246~258, 300 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shuai, Li Yingjie, Kong Xingrui, *et al.* 2022. Ocean basin closure and post orogenic extension in the eastern Paleo-Asian Ocean: Evidence from Middle Triassic A-type granite in Sonid Youqi, Inner Mongolia[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 41(3): 555~568 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhihua, Chang Chunjiao, Wang Liang, *et al.* 2013. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age and its geological significance of 1 017 high land Ag polymetallic deposit in Dong Ujimqin Banner, Inner Mongolia[J]. Geochimica, 42(6): 589~598 (in Chinese with English abstract).
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. Contributions to Mineralogy & Petrology, 95(4): 407~419.
- Wu C, Wang B R, Zhou Z G, *et al.* 2017. The relationship between magma and mineralization in Chaobuleng iron polymetallic deposit, Inner Mongolia[J]. Gondwana Research, 45: 228~253.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, *et al.* 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(2): 185~220 (in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Liu Xiaochi, Ji Weiqiang, *et al.* 2017. Highly fractionated granites: Recognition and research[J]. Scientia Sinica Terrae, 47(7): 745~765 (in Chinese with English abstract).
- Wu Haoran, Li Huaibin, Li Lamei, *et al.* 2022. Muscovite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of the Shamai tungsten deposit in Inner Mongolia and their geological significance[J]. Geology and Exploration, 58(4): 798~808 (in Chinese with English abstract).
- Wu Suoping, Wang Meiyang and Qi Kaijing. 2007. Present situation of researches on A-type granites: A review [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 26(1): 57~66 (in Chinese with English abstract).
- Xiang Anping. 2016. Tungsten and Molybdenum Mineralization Mechanism of Dongwuqi to Nenjiang Metallogenic Belt and its Geodynamic Setting, Inner Mongolia[D]. China University of Geosciences, 1~190 (in Chinese with English abstract).
- Xiao W J, Zhang L C, Qin K Z, *et al.* 2004. Paleozonic accretionary and collisional tectonics of the eastern Tianshan China: Implication for the continental growth of central Asia[J]. American Journal of Science, 304: 370~395.
- Xie Yuling, Li Lamei, Guo Xiang, *et al.* 2015a. Chronology, petrochemistry of fine grained granite and their implication to Mo-Cu mineralization in Xichong Mo deposit, Anhui Province, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 31(7): 1 929~1 942 (in Chinese with English abstract).
- Xie Yuling, Li Lamei, Li Yingxu, *et al.* 2015b. Yanshanian Molybdenum (Tungsten)-Lead Zinc (Silver) Metallogenic System in Dong Ujimqin Banner, Inner Mongolia[M]. Geological Publishing House, 1~107 (in Chinese).
- Xu Bei, Zhao Pan, Bao Qingzhong, *et al.* 2014. Preliminary study on the pre-Mesozoic tectonic unit division of the Xing-Meng Orogenic Belt (XMOB) [J]. Acta Petrologica Sinica, 30(7): 1 841~1 857 (in Chinese with English abstract).
- Yang Meizhen, Hou Kun, Lu Jianpei, *et al.* 2012. Chronology of molybdenum-lead-zinc polymetallic deposit of Suo Naga, Dong Ujimqin Banner Region [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 37(6): 1 327~1 337 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wanyi. 2008. Magmatic Activity and Metallogeny of Dong Ujimqin Banner Inner Mongolia[D]. Beijing: Geological Publishing House, 1~170 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiaofei, Zhou Yi, Cao Jun, *et al.* 2018. Geochronological and geochemical features of bimodal intrusive rocks in the Hanwula area of Xiwu banner, Inner Mongolia: Constraints on closure of the Paleo-Asian ocean[J]. Acta Geologica Sinica, 92(4): 665~686 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zuoheng, Mao Jingwen, Yang Jianmin, *et al.* 1998. Fluids and hydrogen, oxygen, and sulfur isotopes of the Thar quartz vein type tungsten deposit in Gansu[J]. Mineral Deposits, 17(s): 791~794 (in Chinese).
- Zhao Yiming and Zhang Dequan. 1997. Metallogenic Regularity and Prospective Evaluation of Copper Polymetallic Deposits in Daxing'anling

- and its Adjacent Areas [M]. Beijing: Seismological Publishing House, 33~47 (in Chinese).
- Zhao Yue. 1990. The mesozoic orogenies and tectonic evolution of the Yanshan area [J]. Geological Review, 36(1): 1~13 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 崔凯, 李腊梅, 吴皓然, 等. 2022. 内蒙古迪彦钦阿木斑岩钨矿床成矿流体的出溶, 演化及对成矿的制约 [J]. 岩石矿物学杂志, 41(6): 1120~1134.
- 高征西. 2019. 内蒙古高尔其-朝不愣地区多金属成矿作用与找矿方向 [D]. 武汉: 中国地质大学, 1~181.
- 顾玉超, 陈仁义, 贾斌, 等. 2017. 内蒙古双尖子山银多金属矿床花岗岩年代学、地球化学特征及构造意义 [J]. 地质与勘探, 53(3): 495~507.
- 胡朋, 聂凤军, 赫英, 等. 2005. 内蒙古沙麦钨矿床地质及流体包裹体研究 [J]. 矿床地质, 24(6): 603~612.
- 胡朋, 聂凤军, 赫英, 等. 2006. 内蒙古沙麦岩体: 正 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值的过铝质花岗岩 [J]. 岩石学报, 22(11): 2781~2790.
- 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.
- 李继宏, 张万昌. 2005. 内蒙古东乌旗草原覆盖区遥感构造信息提取 [J]. 地质找矿论丛, 20(2): 137~141.
- 李俊建, 付超, 唐文龙, 等. 2016a. 内蒙古东乌旗沙麦钨矿床的成矿时代 [J]. 地质通报, 35(4): 524~530.
- 李俊建, 赵泽霖, 党智财, 等. 2016b. 内蒙古东乌旗奥尤特铜矿床的成矿时代 [J]. 地质通报, 35(4): 537~541.
- 毛景文, 王志良. 2000. 中国东部大规模成矿时限及其动力学背景的初步探讨 [J]. 矿床地质, 19(4): 289~296.
- 寇奎峰, 杨艳, 颜廷杰, 等. 2020. 内蒙古沙麦钨矿区高分异花岗岩独居石 U-Pb 定年及成矿意义 [J]. 现代地质, 34(3): 504~513.
- 内蒙古自治区第九地质矿产勘查开发院. 2010. 内蒙古自治区东乌珠穆沁旗沙麦钨矿核查矿区资源储量核查报告 [R].
- 内蒙古自治区地质矿产局. 1991. 内蒙古自治区区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1~725.
- 聂凤军, 胡朋, 江思宏, 等. 2010. 中蒙边境沙麦-玉古兹尔地区钨和钨(钼)矿床地质特征, 形成时代和成因机理 [J]. 地球学报, 31(3): 383~394.
- 聂凤军, 张万益, 杜安道, 等. 2007. 内蒙古朝不愣砂卡岩型铁多金属矿床辉钨矿-钼-钨同位素年龄及地质意义 [J]. 地球学报, 28(4): 315~323.
- 欧洋, 卢炳雄, 姚远, 等. 2014. 内蒙古东乌旗沙麦地区花岗岩体地球化学特征 [J]. 科技传播, (10): 134~136.
- 邵济安, 刘福田, 陈辉, 等. 2001. 大兴安岭-燕山晚中生代岩浆活动与俯冲作用关系 [J]. 地质学报, 75(1): 56~63.
- 孙海瑞, 吕志成, 韩志锐, 等. 2021. 湖南大义山晚侏罗世富硼型成锡矿 A 型花岗岩成因及地质意义 [J]. 岩石学报, 37(6): 1749~1764.
- 唐功建, 陈海红, 王强, 等. 2008. 西天山达巴特 A 型花岗岩的形成时代与构造背景 [J]. 岩石学报, 24(5): 947~958.
- 唐克东, 鞠楠, 张大权, 等. 2022. 关于古亚洲洋构造演化研究的几点思考 [J]. 地质与资源, 31(3): 246~258, 300.
- 王帅, 李英杰, 孔星蕊, 等. 2022. 古亚洲洋东段洋盆闭合与后造山伸展——来自内蒙古苏尼特右旗中三叠世 A 型花岗岩的证据 [J]. 岩石矿物学杂志, 41(3): 555~568.
- 王治华, 常春郊, 王梁, 等. 2013. 内蒙古 1017 高地银多金属矿床 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄及地质意义 [J]. 地球化学, 42(6): 589~598.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用 [J]. 岩石学报, 23(2): 185~120.
- 吴福元, 刘小驰, 纪伟强, 等. 2017. 高分异花岗岩的识别与研究 [J]. 中国科学: 地球科学, 47(7): 745~765.
- 吴皓然, 李怀彬, 李腊梅, 等. 2022. 内蒙古沙麦钨矿白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄及其地质意义 [J]. 地质与勘探, 58(4): 798~808.
- 吴锁平, 王梅英, 戚开静. 2007. A 型花岗岩研究现状及述评 [J]. 岩石矿物学杂志, 26(1): 57~66.
- 向安平. 2016. 内蒙古东乌旗至嫩江成矿带钨(钼)矿成矿机制及地球动力学背景研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 1~190.
- 谢玉玲, 李腊梅, 郭翔, 等. 2015a. 安徽西冲钨矿床细粒花岗岩的岩石定年、岩石化学及与成矿的关系研究 [J]. 岩石学报, 31(7): 1929~1942.
- 谢玉玲, 李腊梅, 李应栩, 等. 2015b. 内蒙古东乌珠穆沁旗地区燕山期钨(钼)-铅(银)成矿系统 [M]. 北京: 地质出版社, 1~107.
- 徐备, 赵盼, 鲍庆中, 等. 2014. 兴蒙造山带前中生代构造单元划分初探 [J]. 岩石学报, 30(7): 1841~1857.
- 杨梅珍, 侯坤, 陆建培, 等. 2012. 东乌珠穆沁旗索纳嘎铅钨钼多金属矿床成矿年代学 [J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 37(6): 1327~1337.
- 张万益. 2008. 内蒙古东乌珠穆沁旗岩浆活动与金属成矿作用 [D]. 北京: 地质出版社, 1~170.
- 张晓飞, 周毅, 曹军, 等. 2018. 内蒙古西乌旗罕乌拉地区双峰式侵入体年代学, 地球化学特征及其对古亚洲洋闭合时限的制约 [J]. 地质学报, 92(4): 665~686.
- 张作衡, 毛景文, 杨建民, 等. 1998. 甘肃塔尔石英脉型钨矿流体及氢、氧、硫同位素研究 [J]. 矿床地质, 17(增刊): 791~794.
- 赵一鸣, 张德全. 1997. 大兴安岭及其邻区铜多金属矿床成矿规律与远景评价 [M]. 北京: 地震出版社, 33~47.
- 赵越. 1990. 燕山地区中生代造山运动及构造演化 [J]. 地质论评, 36(1): 1~13.