



## 蒙古国查夫银多金属矿床含矿花岗闪长岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及岩石成因

陈 聪<sup>1,2</sup>, 吴涛涛<sup>1</sup>, 周永恒<sup>1</sup>, 鲍庆中<sup>1</sup>, 柴 璐<sup>1</sup>, 姜 平<sup>3</sup>

1. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034;
2. 辽宁省自然资源厅 深部矿产资源探测与评价重点实验室, 辽宁 沈阳 110034;
3. 中国地质调查局 哈尔滨自然资源综合调查指挥中心, 黑龙江 哈尔滨 150086

**摘要:** 中蒙边境查夫-甲乌拉银多金属矿集区内与成矿相关的岩浆岩研究薄弱。以查夫银多金属矿床含矿花岗闪长岩及其闪长质包裹体为研究对象, 进行了岩石学、锆石 U-Pb 年代学、地球化学和原位 Lu-Hf 同位素研究。花岗闪长岩及闪长质包裹体的锆石  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄分别为  $195.7 \pm 1.3$  Ma 和  $196.5 \pm 2.4$  Ma, 在误差范围内一致, 为早侏罗世岩浆作用的产物。寄主花岗闪长岩为准铝质-弱过铝质、高钾钙碱性-钙碱性系列的 I 型花岗岩, 闪长质包裹体为同源岩浆混合成因包裹体。寄主花岗闪长岩具有宽泛的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值(4.4~10.7), 其二阶段 Hf 模式年龄介于 550~960 Ma, 表明寄主花岗闪长岩的初始岩浆起源于新元古代从亏损地幔增生的新生地壳的部分熔融, 并存在幔源物质的混入。基于以上研究, 结合区域构造演化资料, 认为查夫银多金属矿床含矿花岗闪长岩形成于蒙古-鄂霍次克洋板块俯冲的活动大陆边缘背景。

**关键词:** 闪长质包裹体; 同源岩浆混合; 查夫银多金属矿; 蒙古-鄂霍次克洋; 板块俯冲; 蒙古国

## ZIRCON U-Pb CHRONOLOGY, GEOCHEMISTRY AND PETROGENESIS OF ORE-BEARING GRANODIORITE IN TSAV SILVER POLYMETALLIC DEPOSIT, MONGOLIA

CHEN Cong<sup>1,2</sup>, WU Tao-tao<sup>1</sup>, ZHOU Yong-heng<sup>1</sup>, BAO Qing-zhong<sup>1</sup>, CHAI Lu<sup>1</sup>, JIANG Ping<sup>3</sup>

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

2. Key Laboratory of Deep Mineral Resources Exploration and Evaluation, Liaoning Provincial Department of Natural Resources, Shenyang 110034, China;

3. Harbin Natural Resources Comprehensive Survey Center, CGS, Harbin 150086, China

**Abstract:** The research on magmatic rocks related to mineralization was weak in Tsav-Jiawula Ag polymetallic ore concentration area on the China-Mongolia border. Taking the ore-bearing granodiorite and its dioritic enclaves in Tsav Ag polymetallic deposit as object, the paper studies the petrology, zircon U-Pb chronology, geochemistry and in-situ Lu-Hf isotopes. The zircon  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  weighted average ages of  $195.7 \pm 1.3$  Ma and  $196.5 \pm 2.4$  Ma for granodiorite and diorite enclaves respectively are consistent within the error range, indicating that both were products of the Early

收稿日期: 2022-03-18; 修回日期: 2022-04-19. 编辑: 李兰英.

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“东北亚欧洲国际合作地质调查”(DD20221806), “中蒙俄毗邻区大型铀、铜资源基地评价”(DD20190438), “中国矿产地质志续编与产品服务”(DD20221695), “东北地区铜金稀有金属矿产地质调查”(DD20221687).

作者简介: 陈聪(1988—), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事矿床学研究, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, ORCID: 0000-0001-8101-9026, E-mail//1010674241@qq.com

通信作者: 吴涛涛(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事境外矿产调查与综合研究, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail//553583730@qq.com

Jurassic magmatism. The host granodiorite belongs to I-type granite of quasi aluminous-weakly peraluminous and high K calc alkaline-calc alkaline series. The diorite enclaves are of consanguineous magma mixing origin. The host granodiorite has broad  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  values (4.4–10.7) with the two-stage Hf model ages ranging from 550 to 960 Ma, reflecting the primary magma of host granodiorites originated from the partial melting of new crustal accretion from depleted mantle in Neoproterozoic with mantle-derived materials mixed. Combined with the regional tectonic evolution data, it is considered that the Tsav Ag polymetallic deposit was formed in the active continental margin setting caused by the subduction of Mongolia-Okhotsk oceanic plate.

**Key words:** dioritic enclave; mixing of consanguineous magma; Tsav Ag polymetallic deposit; Mongolia-Okhotsk ocean; plate subduction; Mongolia

## 0 引言

中蒙边境查夫-甲乌拉银多金属矿集区(也称乌兰-道尔瑙德铀、铅、锌、银多金属矿集区)横跨中蒙边境最东段,分别属我国内蒙古自治区和蒙古国东方省管辖。从大地构造位置上看,该矿集区地处华北-蒙古块体的东北段,位于中蒙古-额尔古纳前寒武纪-早古生代中间地块东南部<sup>[1]</sup>。受前中生代和中、新生代多期次大规模构造作用影响,区内各时代地层出露广泛,深大断裂纵横交错,不同期次的侵入岩十分发育,银多金属矿床(点)星罗棋布,并以查夫、甲乌拉、查干布拉根、额仁陶勒盖等大型多金属矿床著称于亚洲,它们特有的产出环境、地质特征和形成机理为国内外地质学者所关注<sup>[2]</sup>。近年来对矿集区银多金属矿床的研究主要集中于矿床地质特征及矿床成因等方面,并认为这些银多金属矿床主要赋存于中生代火山-沉积地层和侵入岩内,属浅成热液脉型银多金属矿床<sup>[2-6]</sup>;对矿集区内岩浆岩进行的地质年代学及地球化学方面研究,目前已识别出中晚三叠世(约 238 Ma)<sup>[3]</sup>、早侏罗世(约 191 Ma)<sup>[4]</sup>、晚侏罗世(164~146 Ma)<sup>[3,4,7]</sup>以及早白垩世(约 138 Ma)<sup>[8]</sup>等多期次岩浆事件,并认为银多金属成矿与晚侏罗世-早白垩世构造岩浆活动有关<sup>[4,7-8]</sup>;但以查夫为代表的部分银多金属矿区内侵入岩分布广泛,岩石类型复杂,含矿岩体形成时代不明,岩体与成矿之间的联系尚未厘清,严重制约对区域浅成热液脉型银多金属矿床成矿作用过程的深入理解,并影响了区域成矿规律的总结和岩浆岩找矿标志的识别。这些关键问题的研究对区域同类型银多金属矿床找矿勘查具有重要的意义。

鉴于此,笔者选取大型查夫银多金属矿床的含矿花岗闪长岩及其闪长岩包裹体为研究对象,通过高精

度的锆石 U-Pb 定年、全岩地球化学以及原位 Hf 同位素分析,查明含矿花岗闪长岩体的形成时代及其与成矿的关系,确定含矿花岗闪长岩体的岩石成因和岩浆源区,并限定成岩时期该区的构造背景。

## 1 地质背景与矿床特征

### 1.1 区域地质背景

查夫银多金属矿床位于中蒙边境查夫-甲乌拉银多金属矿集区西北部。该矿床地处蒙古-鄂霍次克东南侧的克鲁伦-额尔古纳地块中部<sup>[9]</sup>,蒙古-额尔古纳火山岩带乔巴山-鄂嫩火山链中的恩格尔善德火山构造盆地内<sup>[10]</sup>。该区先后经历了西伯利亚板块南缘侧向增生、蒙古-鄂霍次克洋盆俯冲与闭合、陆-陆碰撞和造山后伸展等构造演化过程<sup>[1]</sup>,发育有前中生代片麻岩、片岩和花岗岩类侵入岩,以及广泛分布的侏罗系火山-沉积岩。侏罗纪火山-沉积岩的主要岩石类型有玄武岩、安山岩、粗面安山岩、英安岩、安粗岩和高钾流纹岩,构成了查夫-甲乌拉银多金属矿集区银多金属矿体的主要容矿围岩(图 1)<sup>[10]</sup>。矿区及外围各类侵入岩(脉)十分发育,大多以不同时期的杂岩体产出,如晚侏罗世侵入杂岩体(花岗斑岩、霏细斑岩、闪长岩等)、早中生代岩浆杂岩体(正长岩、闪长岩、花岗闪长岩等)及前中生代杂岩体(正长花岗岩、正长岩)。

在构造方面,受木哈尔北西向断裂多期次活化影响,矿区范围内北西、北北西和北东向、北北东向及近南北向张扭性和张性断层破碎带十分发育,其中北西向和北北西向与北东向断层交汇部位是银多金属矿体产出的有利地段。

### 1.2 矿床地质特征

查夫银多金属矿床目前已圈定 21 条矿化带,其中

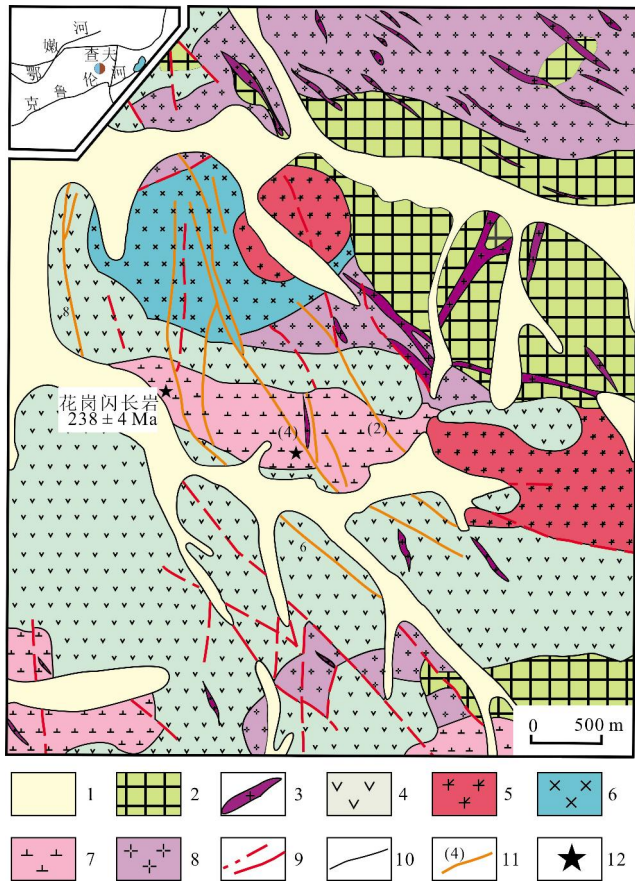


图1 查夫银多金属矿床地质图

Fig. 1 Geological sketch map of Tsav Ag polymetallic deposit  
 1—第四系 (Quaternary); 2—片岩、片麻岩、花岗片麻岩及大理岩化灰岩 (Pt<sub>3</sub>-Pz<sub>1</sub>) (schist, gneiss, granitic gneiss and marbleized limestone); 3—安山玢岩 (andesitic porphyrite); 4—上侏罗统沙里林组火山沉积岩 (volcanic sedimentary rock of Shalilin fm., Upper Jurassic); 5—晚侏罗世侵入杂岩: 花岗斑岩、霏细斑岩等 (Late Jurassic intrusive complex of granite porphyry, felsophyre, etc.); 6—晚侏罗世侵入杂岩: 闪长岩、辉长闪长岩等 (Late Jurassic intrusive complex of diorite, gabbro diorite, etc.); 7—早中生代岩浆杂岩: 正长岩、闪长岩、花岗闪长岩等 (Early Mesozoic magmatic complex of syenite, diorite, granodiorite, etc.); 8—前中生代正长花岗岩、正长岩 (pre-Mesozoic syenogranite and syenite); 9—断裂 (fault); 10—地质界线 (geological boundary); 11—矿体及编号 (orebody and number); 12—采样位置 (sampling location)

1、1A、1B、2、4、4A、6、8、8A、9、10 号等矿体经评价具有工业价值。这些多金属矿体呈脉状或透镜状产出在侏罗系沙里林组火山岩、早中生代侵入杂岩体(花岗闪长岩、闪长岩、正长岩等)以及晚侏罗世侵入杂岩(闪长岩、辉长闪长岩等)内,部分矿化带延伸至前中生代岩浆杂岩体内(图1)。受北西向、近南北向断裂构造影响,查夫多金属矿体走向多为北西向或近南北向,平面上表现为近于平行排列。

矿石类型包括石英-硫化物矿石和碳酸盐-石英-硫化物矿石两类。矿石矿物以方铅矿和闪锌矿为主,其次为黄铁矿、黄铜矿、白铁矿、辉铜矿、铜蓝、辉银矿、自然铋和自然银。脉石矿物包括石英、方解石、绢云母、电气石、绿泥石等。矿石结构主要有半自形粒状结构、他形粒状结构、嵌晶结构、溶蚀结构、交代残余结构等。矿石构造主要包括块状、角砾状、细脉状和浸染状构造。近矿体围岩蚀变发育,硅化、绢云母化、绿帘石化和碳酸盐化较为强烈,局部发育高岭土化。

经对比研究,查夫银多金属矿床与查夫-甲乌拉银多金属矿集区的乌兰和甲乌拉等多金属矿床均赋存在侏罗纪火山-沉积地层内,均受北西、北北西向断裂构造控制,矿体呈脉状或透镜状产出,具有相似的矿石与围岩蚀变特征(表1)。因此,查夫、乌兰及甲乌拉3处银多金属矿床均属于浅成热液脉型银多金属矿床。

## 2 地质与岩石学特征

本研究中的花岗闪长岩体位于查夫矿区中部,属于早中生代岩浆杂岩体。该杂岩体被2号、4号、6号等主要矿脉穿切,与沙里林组火山岩、晚侏罗世侵入杂岩共同构成查夫银多金属矿床的含矿介质(图1);岩体被北西、北北西以及近南北向断裂所穿切;岩体内发育大量的闪长质包裹体,呈浑圆状、椭球状或不规则状,与寄主花岗闪长岩接触界线清晰(图2a)。

花岗闪长岩:呈浅灰色,具粗中粒花岗结构,以块状构造为主,局部显示似片麻状构造。岩石由石英(30%)、斜长石(45%)、碱性长石(15%)及黑云母(10%)组成(图2b)。其中,石英呈他形粒状,边缘溶蚀现象明显,粒径约为1~5 mm;斜长石多呈自形板状,发育聚片双晶和环带结构,绢云母化和黏土化明显,粒径为2~8 mm;碱性长石呈半自形板状、他形粒状,多裂痕;条纹长石,部分可见蠕虫结构,绿帘石化、绢云母化、黏土化明显,粒径约为1~10 mm;黑云母呈片状,多发生绿泥石化,有异常干涉色。

闪长质包裹体:呈深灰色,直径介于8~25 cm,具细粒-微粒结晶结构。闪长质岩体主要由石英(10%)、斜长石(65%)以及绿泥石(25%,推测为黑云母蚀变形形成)组成(图2b)。其中,石英呈港湾状发育于板条状斜长石颗粒之间;斜长石呈自形条状,发育聚片双晶,绢云母化明显。

表1 查夫-甲乌拉银多金属矿集区内银多金属矿床地质特征对比表

Table 1 Comparison of geological characteristics of deposits in Tsav-Jiawula Ag polymetallic ore concentration area

地质特征	查夫银多金属矿床*	乌兰银多金属矿床 <sup>[3]</sup>	甲乌拉银多金属矿床 <sup>[5-6]</sup>
赋矿地层	侏罗系沙里林组玄武岩、安山岩、粗面安山岩、英安岩、安粗岩和高钾流纹岩	侏罗系英安岩、安山岩、玄武岩和流纹岩	侏罗系上统玄武岩、安山岩、流纹岩、板岩和砂砾岩
侵入岩脉	早中生代侵入杂岩(花岗闪长岩、闪长岩、正长岩、花岗闪长岩等)、晚侏罗世侵入杂岩(辉长闪长岩、闪长岩、闪长玢岩等)	晚侏罗世石英斑岩(150.8±4.4 Ma)	晚侏罗世正长斑岩(148.8±2.2 Ma)、二长斑岩(145.3±1.9 Ma)、石英斑岩(150.1±1.8 Ma)及富碱花岗斑岩(146.4±1.6 Ma)
控矿构造	查夫断裂带内北西和近南北向断裂	北西向穆哈尔断裂	北西、北北西向断裂构造
矿体特征	呈脉状、透镜状或条带状产于火山-沉积地层、早中生代岩浆杂岩体和晚侏罗世侵入杂岩内	主要呈脉状产于火山-沉积地层、石英斑岩体以及构造破碎带内	多呈脉状,少量为透镜状,产于火山-沉积地层内的北西西—北北西向断裂破碎带中
围岩蚀变	硅化、绢云母化、绿帘石化和碳酸盐化	绿帘石化、阳起石化、硅化、钾长石化、碳酸盐化、绿泥石化	硅化、绿泥石化、伊利石水白云母化、萤石化、碳酸盐化和青磐岩化
金属矿物	方铅矿和闪锌矿为主,其次为黄铁矿、黄铜矿、白铁矿、辉铜矿、铜蓝、辉银矿、自然铋和自然银	自然银、方铅矿、闪锌矿、黄铁矿为主,其次为黄铜矿、毒砂和磁黄铁矿	主要为方铅矿、闪锌矿、黄铁矿,其次为黄铜矿、磁黄铁矿、毒砂、磁铁矿以及辉银矿等含银矿物
脉石矿物	石英和方解石为主,次要矿物有绢云母、电气石、绿泥石等	石英、方解石、水白云母、萤石等	石英、方解石、萤石、绢云母、绿泥石、绿帘石
矿石结构	半自形粒状、他形粒状、嵌晶、溶蚀、交代残余结构等	半自形、他形粒状、交代残余、包含结构等	自形—半自形、他形粒状、充填、交代残余、包含、乳浊状、叶片状、碎裂、纤状、羽状、雏晶结构
矿石构造	块状构造、角砾状构造、细脉状构造和浸染状构造	块状构造、团块状构造、角砾状构造、浸染状构造、脉状构造等	块状构造、浸染状构造、细脉浸染状构造、团块状构造、脉状构造、不规则粒状构造、角砾状构造等

\* 资料来源于本研究及文献[10].

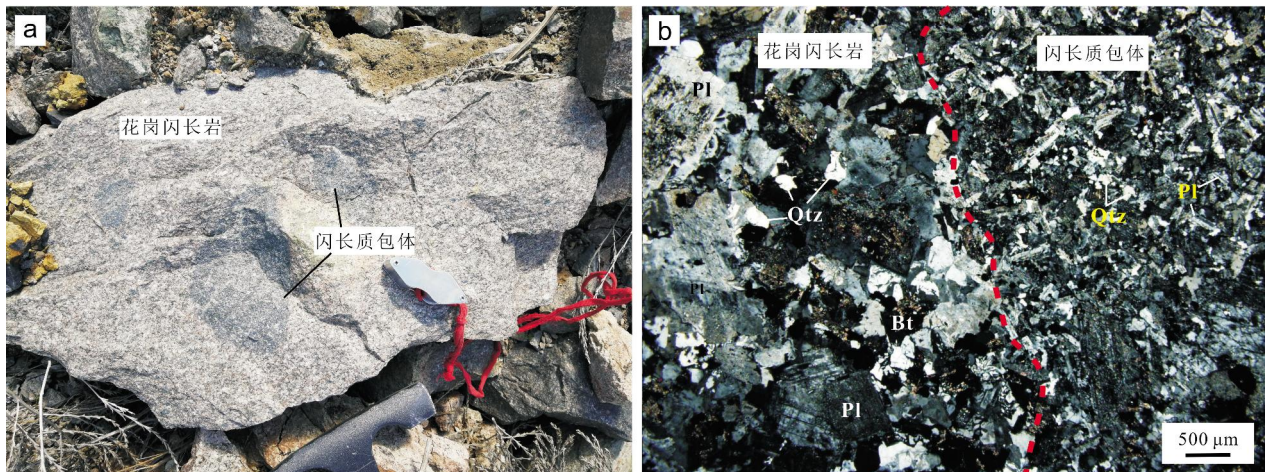


图2 含矿花岗闪长岩及闪长质包体野外及显微镜下照片

Fig. 2 Field and microscopic photographs of granodiorite host and dioritic enclaves

Bt—黑云母(biotite); Pl—斜长石(plagioclase); Qtz—石英(quartz)

### 3 样品和分析方法

用于锆石 U-Pb 定年和原位 Hf 同位素以及全岩地球化学分析的花岗闪长岩(CB02-1)及闪长质包裹体(CB02-2)样品采自查夫矿区4号矿脉3中段,具体

采样位置为 115°20'13.49"N, 48°55'20.97"E(图1).

主量、微量和稀土元素含量分析在自然资源部东北矿产资源监督检测中心完成. 其中主量元素采用玻璃熔片大型 X 射线荧光光谱法(XRF)分析,检测依据

参照 GB/T14506.28—93, 分析精度优于 2%~5%; 微量和稀土元素分析采用电感耦合等离子质谱法(ICP-MS), 检测依据参照 DZ/T0223—2001 等, 分析精度和准确度一般优于 5%~10%.

锆石单矿物分选、制靶和阴极发光图像的采集工作均在北京锆年领航科技有限公司完成. 锆石 U-Pb 定年在吉林大学东北亚矿产资源评价自然资源部重点实验室进行. 本研究锆石测定过程中激光剥蚀束斑直径为 30  $\mu\text{m}$ , 所测单点的同位素比值及元素含量采用 Glitter 程序进行处理, 数据采用 Anderson (2002) 的方法进行普通铅校正<sup>[11]</sup>, 并使用 Isoplot 程序进行锆石 U-Pb 谐和图的绘制和年龄计算. 具体实验测试过程参见文献[12].

寄主花岗岩闪长岩的锆石原位 Hf 同位素分析在北京锆年领航科技有限公司完成, 数据分析采用 193 nm 的 Resolution SE 型激光剥蚀系统和 Neptune plus 型多接收器电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS). 关键参数: 束斑 38  $\mu\text{m}$ ; 能量强度 7~8  $\text{J}/\text{cm}^2$ ; 频率 10 Hz; 载气 800 mL/min.  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值采用  $^{179}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.7325$  进行指数归一化校正. 分析点与 U-Pb 定年分析点为同一位置或为附近,  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  根据每个测点的锆石 U-Pb 年龄计算而来.

## 4 分析结果

### 4.1 岩石地球化学

含花岗岩闪长岩及闪长质包裹体的主量、微量及稀

土元素分析结果如表 2,3 (扫描首页 OSID 二维码可见).

花岗岩闪长岩的  $\text{SiO}_2$  含量为 61.60%~66.91%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  为 14.80%~15.86%,  $\text{K}_2\text{O}$  为 2.06%~2.75%,  $\text{Na}_2\text{O}$  为 3.74%~4.57%,  $\text{MgO}$  为 1.22%~2.16%,  $\text{CaO}$  为 2.99%~4.81%. 闪长质包裹体的  $\text{SiO}_2$  含量为 54.87%~55.42%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  为 15.66%~15.86%,  $\text{K}_2\text{O}$  为 0.73%~0.77%,  $\text{Na}_2\text{O}$  为 3.51%~3.59%,  $\text{MgO}$  为 4.62%~5.12%,  $\text{CaO}$  为 8.02%~8.25%. 对比显示, 寄主花岗岩闪长岩相对高硅、富钠、低镁和钙, 而闪长质包裹体相对富镁和钙, 低硅和钾. 在 A/NK-A/CNK 图解上, 两类岩石样品均落在准铝质-弱过铝质区域 (图 3a). 寄主花岗岩闪长岩和闪长质包裹体的里特曼指数  $\sigma$  分别为 1.76~2.31 和 1.44~1.52, 并且在  $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$  图解上, 寄主花岗岩闪长岩样品落在高钾钙碱性-钙碱性系列岩石区域, 闪长质包裹体样品落于钙碱性系列岩石区域 (图 3b), 表明寄主花岗岩闪长岩和闪长质包裹体均为准铝质-弱过铝质、高钾钙碱性-钙碱性系列岩石. 此外, 寄主花岗岩闪长岩和闪长质包裹体的  $\text{Mg}^\#$  分别介于 32~38 和 49~52 之间.

在主量元素 Harker (哈克) 图解 (图 4) 上, 寄主花岗岩闪长岩和闪长质包裹体的  $\text{SiO}_2$  与  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$  等氧化物显示出良好的线性关系.

寄主花岗岩闪长岩的稀土元素总量 ( $\sum \text{REE}$ ) 为  $139.99 \times 10^{-6}$ ~ $313.61 \times 10^{-6}$ , 高于闪长质包裹体 ( $84.85 \times 10^{-6}$ ~ $144.31 \times 10^{-6}$ ); LREE/HREE 比值为 6.20~14.21, 明显高于闪长质包裹体 (4.86~6.15), 二者的  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  分别变化于 5.80~15.55 和 4.2~5.79 (表 2). 由此可见, 寄

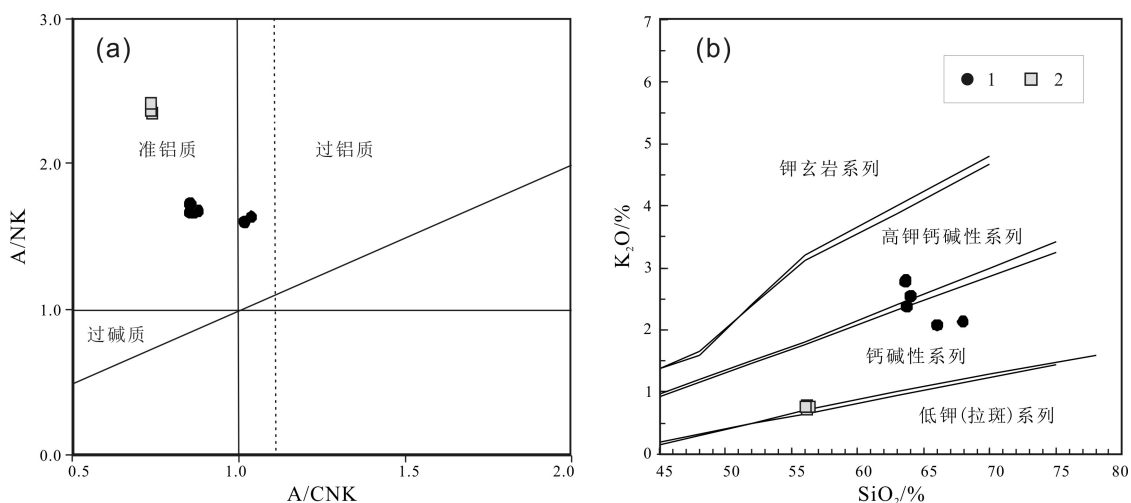


图 3 花岗岩闪长岩及闪长质包裹体 A/NK-A/CNK 和  $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$  图解

Fig. 3 The A/NK-A/CNK and  $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$  diagrams for host granodiorite and dioritic enclaves

1—寄主花岗岩闪长岩 (granodiorite host); 2—闪长质包裹体 (dioritic enclave)

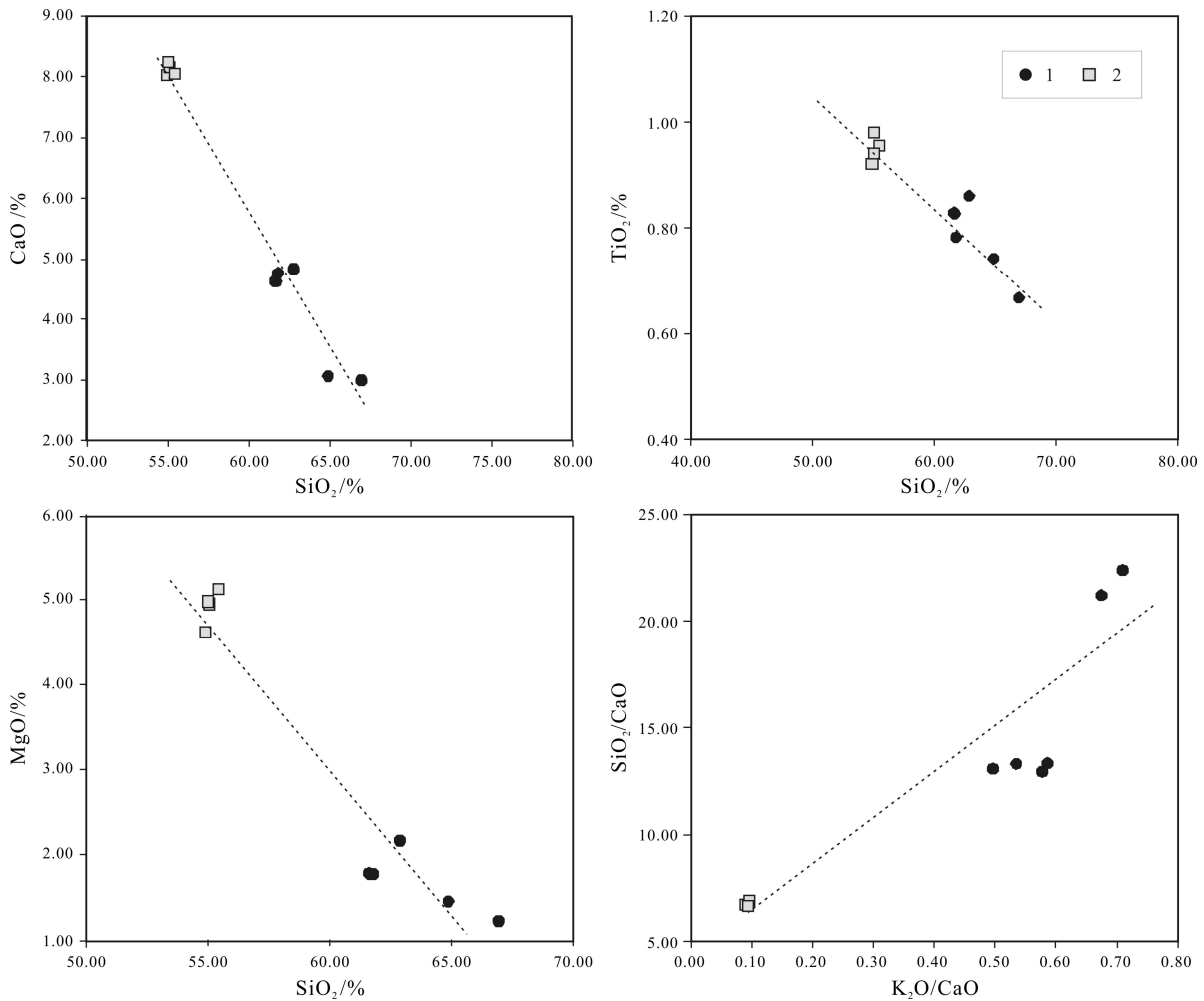


图4 花岗闪长岩及包裹体主量元素哈克图解

Fig. 4 Harker variation diagrams for host granodiorite and dioritic enclaves

1—寄主花岗闪长岩(host granodiorite); 2—闪长质包裹体(dioritic enclave)

主花岗闪长岩和包裹体均表现为轻、重稀土元素显著分馏,且轻稀土元素相对富集,重稀土元素明显亏损的特征.在球粒陨石标准化稀土元素配分图解上,寄主花岗闪长岩与包裹体呈现出相似的右倾型的稀土元素配分型式(图 5a),并显示出弱的铕负异常特征,  $\delta\text{Eu}$  值分别为 0.76~0.93 和 0.73~0.84.

在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 5b)上,寄主花岗闪长岩明显富集大离子亲石元素 Rb 和高场强元素 Zr、Th 及 U,相对亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti 以及大离子亲石元素 Sr. 闪长质包裹体样品具有与寄主花岗闪长岩相似的微量元素分布型式,Nb、Ta 等元素异常特征更显著.

#### 4.2 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄

寄主花岗闪长岩和闪长质包裹体 LA-ICP-MS 锆

石 U-Th-Pb 同位素分析结果如表 4(扫描首页 OSID 二维码可见),代表性锆石 CL 图像及分析点位置见图 6.

寄主花岗闪长岩与闪长质包裹体发育的锆石多为自形一半自形的短柱状,其中寄主花岗闪长岩中的锆石长 50~120  $\mu\text{m}$ ,宽 40~90  $\mu\text{m}$ ,长宽比为 1:1~1.5:1;闪长质包裹体中的锆石长 110~200  $\mu\text{m}$ ,宽 70~150  $\mu\text{m}$ ,长宽比为 1.1:1~2.5:1;这些锆石多数具有清晰的振荡生长环带(图 6),Th/U 比值分别为 0.46~0.87 和 0.58~1.07,表明定年分析的锆石均为岩浆锆石.

花岗闪长岩样品测定的 26 颗锆石的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄值为 201~265 Ma. 其中 23 个分析点的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄值为 191~201 Ma,对应的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄及和谐年龄分别为  $195.7 \pm 1.3$  Ma (MSWD=1.11) 和  $197.0 \pm 2.3$  Ma (MSWD=0.64)(图 7a),代表了寄主花岗

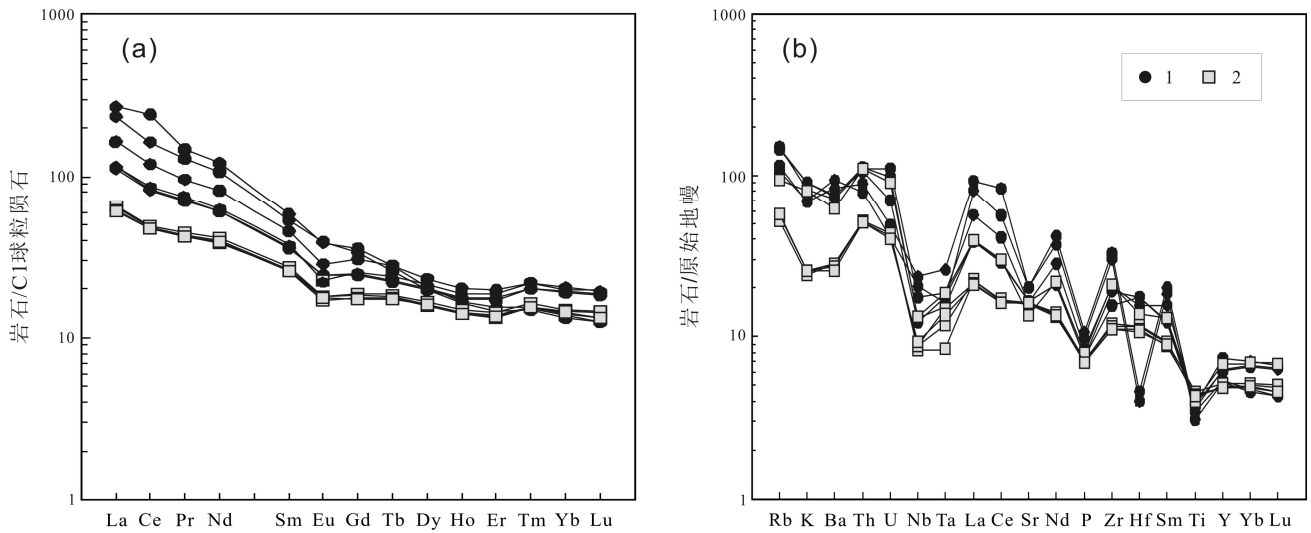


图 5 花岗闪长岩及包裹体稀土元素配分曲线和微量元素蛛网图  
(球粒陨石和原始地幔标准值分别据文献[13]和[14])

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized trace element spidergrams of granodiorite host and dioritic enclaves  
(Chondrite and primitive-mantle values from references [13] and [14] respectively)  
1—寄主花岗闪长岩(host granodiorite); 2—闪长质包裹体(dioritic enclave)



图 6 花岗闪长岩(CB02-1)及闪长质包裹体(CB02-2)代表性锆石 CL 图像及分析点位

Fig. 6 CL images and analytical points of representative zircons in host granodiorite and dioritic enclaves

闪长岩的结晶年龄;此外,还有 1 个分析点的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄值为  $265\pm 3$  Ma,另外 2 个分析点的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄值为  $217\pm 3$  Ma,可能为捕获的锆石年龄。

闪长质包裹体样品测试的 30 粒锆石的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄值为 186~197 Ma,对应的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄及谐和年龄分别为  $196.5\pm 2.4$  Ma (MSWD=0.81)和

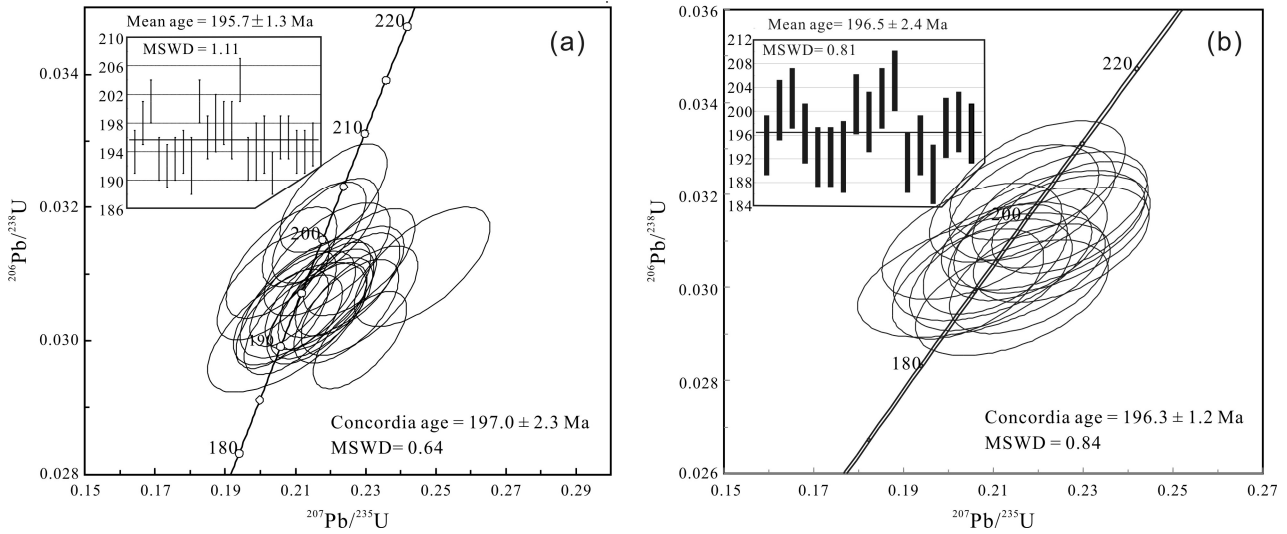


图7 花岗闪长岩及闪长质包裹体锆石谐和年龄及加权平均年龄图

Fig. 7 Zircon U-Pb concordia age and weighted average age plots of granodiorite host and dioritic enclaves

196.3±1.2 Ma (MSWD=0.84)(图 7b),代表了闪长质包裹体的结晶年龄。

4.3 锆石原位 Lu-Hf 同位素组成

寄主花岗闪长岩的锆石原位 Lu-Hf 同位素分析结果见表 5 (扫描首页 OSID 二维码可见). 进行 Hf 同位素计算时,利用同一锆石测定的 U-Pb 年龄( $t$ ). Hf 同位素分析结果表明, 寄主花岗闪长岩锆石初始  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值为 0.282 776~0.282 951,  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为 4.4~10.6 (图 8), 对应的 Hf 同位素两阶段模式年龄 ( $T_{\text{DM}}^{\text{C}}$ ) 为 558~953 Ma (表 4).

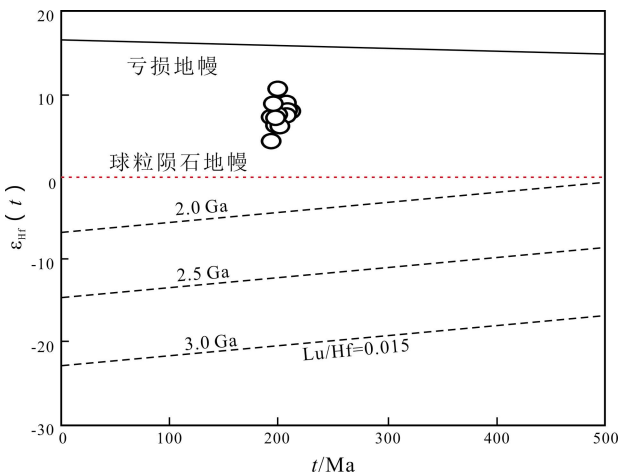


图8 花岗闪长岩  $\epsilon_{\text{Hf}}(t) - t$  图解

Fig. 8  $\epsilon_{\text{Hf}}(t) - t$  plots for the zircons in granodiorite host

5 讨论

5.1 岩体形成时代及其与成矿关系

查夫银多金属矿区侵入岩分布广泛,以中生代侵入岩尤为发育,且岩石类型复杂,岩浆活动期次繁多,这使得查夫银多金属矿区成岩成矿序列难以确定. 对查夫银多金属矿区内中生代侵入岩的地质年代学研究极为薄弱, 仅张璟等对矿区中部早中生代岩浆杂岩体中花岗闪长岩进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年, 获得了 238±4 Ma 的侵位年龄<sup>[4]</sup>(图 1). 本研究对早中生代岩浆杂岩体花岗闪长岩中发育的岩浆锆石进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年, 获得了  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为 195.7±1.3 Ma (MSWD=1.11), 与其锆石谐和年龄 197.0±2.3 Ma (MSWD=0.64) 一致, 进而限定该花岗闪长岩形成于早侏罗世; 另外, 还测定出 265 Ma 和 217 Ma 的捕获的岩浆锆石年龄, 暗示该区还存在中二叠世和晚三叠世岩浆事件. 由此可见, 本研究中的含矿花岗闪长岩所在的早中生代岩浆杂岩体应属于中三叠世—早侏罗世多期岩浆活动的产物.

近年来, 中蒙边境查夫-甲乌拉银多金属矿区内银多金属矿床的成岩成矿时代研究已积累了许多同位素年代学数据. 李铁刚等对甲乌拉多金属矿床进行了闪锌矿和黄铁矿的 Rb-Sr 定年, 获得了 143.0±2.0 Ma 和 142.0±3.0 Ma 的 Rb-Sr 等时线年龄, 由此限定甲乌拉多金属矿床形成于早白垩世初期<sup>[5]</sup>. 杨梅等在甲乌



拉多金属矿床与矿化密切相关的富碱花岗斑岩体内识别出岩浆和热液成因两类锆石, 分别获得了  $146.4 \pm 1.6$  Ma 和  $143.1 \pm 3.9$  Ma 的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄, 限定甲乌拉矿床形成于早白垩世初期, 与成矿相关的岩浆作用发生于晚侏罗世末期<sup>[7]</sup>. 许立权等对内蒙古额仁陶勒盖银矿与成矿密切相关的石英斑岩脉进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年, 获得了  $138.6 \pm 2.3$  Ma 的成岩年龄, 进而限定额仁陶勒盖银矿形成于早白垩世初期<sup>[8]</sup>. 张璟等限定乌兰多金属矿床形成于晚侏罗世末期—早白垩世初期(约 140 Ma)<sup>[3]</sup>. 由此可见, 中蒙边境查夫—甲乌拉银多金属矿集区的银多金属矿床的岩浆—成矿作用大多集中于晚侏罗世末期—早白垩世. 查夫银多金属矿床在成矿地质背景、矿床地质特征、矿体与矿石特征等方面与乌兰、甲乌拉等多金属矿床具有相似性(表 1). 因此, 笔者认为它们应属于燕山晚期同—期岩浆成矿事件的产物, 并与晚侏罗世末期—早白垩世中酸性岩体侵位密切相关; 而本研究中的早侏罗世花岗闪长岩仅构成查夫矿床的含矿岩体, 与多金属矿化并无成因联系. 前人研究获得查夫银多金属矿区内花岗岩脉的黑云母  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  同位素年龄为  $135 \pm 2$  Ma<sup>[15]</sup>, 可能代表了查夫银多金属矿的成矿时代.

## 5.2 岩石成因及岩浆源区

在岩相学上, 花岗闪长岩的暗色矿物为黑云母和少量的角闪石, 不发育 S 型花岗岩的标志性矿物(如堇青石、红柱石、石榴子石等); 在岩石地球化学方面, 花岗闪长岩样品的 A/CNK 值为  $0.85 \sim 1.04$ , 均小于 1.1

(图 3a), 里特曼指数  $\sigma$  为  $1.76 \sim 2.31$ , 小于 3.3, 属于准铝质、高钾钙碱性—钙碱性系列岩石; 在  $\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}$  图解上, 花岗闪长岩样品均落在 I 型花岗岩区域(图 9a). 因此, 查夫银多金属矿床的含矿花岗闪长岩为准铝质、高钾钙碱性—钙碱性的 I 型花岗岩.

笔者研究发现, 查夫银多金属矿床含矿花岗闪长岩内发育大量的闪长质暗色微粒包裹体. 通常酸性岩体中的包裹体主要分为残留体、同源包体、析离体、捕虏体和镁铁质微粒包体等 5 种成因<sup>[17]</sup>, 近年来还有学者提出了“同源岩浆混合”的新成因类型<sup>[18-19]</sup>. 锆石 U-Pb 定年结果显示, 寄主花岗闪长岩和闪长质包裹体的加权平均年龄分别为  $195.7 \pm 1.3$  Ma (MSWD=1.11) 和  $196.5 \pm 2.4$  Ma (MSWD=0.81), 二者在误差范围内大体一致(图 7), 而且闪长质包裹体具有明显的岩浆结构特征(图 2b), 由此排除了其为残留体和捕虏体的可能. 同源包裹体或堆晶体中的矿物颗粒往往较寄主酸性岩更为粗大; 析离体则主要呈豆荚状和透镜状, 矿物颗粒通常定向排列, 这 3 种成因的包裹体与寄主的酸性岩常为渐变过渡. 包裹体暗色矿物种类或组合与其寄主岩石有明显区别是同源包体重要的鉴别标志<sup>[20]</sup>. 笔者从岩相学观察到寄主花岗闪长岩与暗色包裹体发育的暗色矿物以黑云母为主, 且闪长质包裹体呈椭圆状或不规则状分布, 与寄主花岗闪长岩具有明显的接触关系, 具有细粒—微粒结晶结构, 矿物颗粒较寄主的花岗闪长岩明显更细. 这些特征与同源包体、堆晶体和析离体的地质岩相学特征相矛盾, 相反与 Didier 等

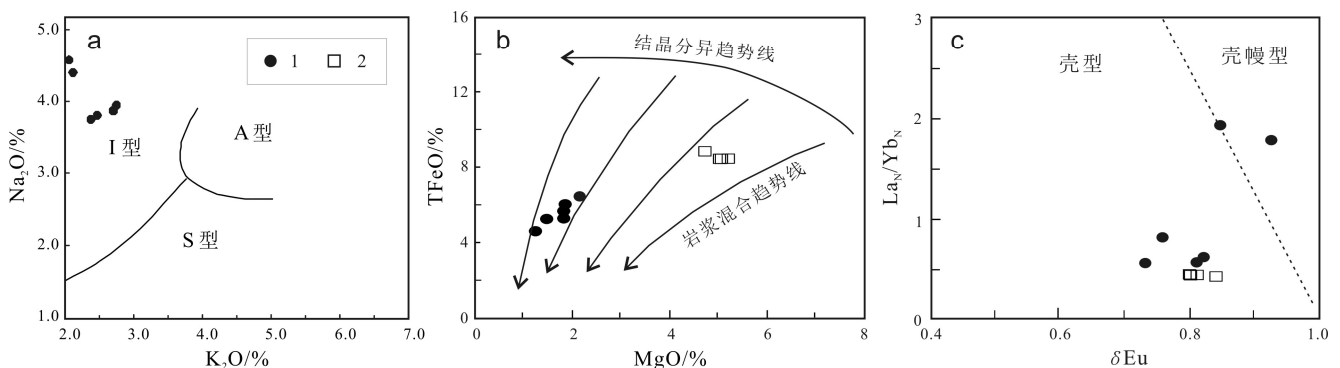


图 9 花岗闪长岩和闪长质包裹体  $\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{TFeO}-\text{MgO}$  及  $\text{La}_N/\text{Yb}_N-\delta\text{Eu}$  图解

(b 和 c 据文献[16])

Fig. 9 The  $\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{TFeO}-\text{MgO}$  and  $\text{La}_N/\text{Yb}_N-\delta\text{Eu}$  diagrams of host granodiorite and dioritic enclaves

(Figs. b and c after Reference [16])

1—寄主花岗闪长岩(granodiorite host); 2—闪长质包裹体(dioritic enclave)

提出的岩浆混合成因的镁铁质微粒包体 (MME) 特征相符<sup>[17]</sup>。寄主花岗闪长岩和包裹体样品在主量元素 Harker 图解上呈现出良好的协变关系 (图 4), 也清晰地反映出两端元岩浆混合的特征<sup>[21]</sup>。另外, 在 TFeO-MgO 图解上, 寄主岩和包裹体样品均落在岩浆混合区域 (图 9b), 表明包裹体的形成可能与岩浆混合作用有关。

寄主花岗闪长岩和包裹体也表现出同源性的特点。同源岩浆或岩浆源区没有外来物质加入的情况下, 岩石的 Nb/Ta 比值会相对固定, 变化不大<sup>[22]</sup>。本研究中寄主花岗闪长岩和闪长质包裹体的 Nb/Ta 比值分别为 12.38~22.12 (平均为 15.62) 和 10.30~16.97 (平均为 13.02), 二者 Nb/Ta 比值基本一致, 表明二者可能起源于同一岩浆源区。由此可见, 本研究的闪长质包裹体同时具有“同源包体”和“岩浆混合包体”的特征, 这与同源岩浆混合成因的皖南旌德花岗闪长岩中的暗色包裹体较为相似<sup>[18]</sup>。Vernon 曾提出层状岩浆房对流模型来解释花岗岩中的暗色包裹体, 认为岩浆房中存在着铁镁质和长英质两层岩浆, 成分与温度的不均一性导致了不同性质岩浆发生对流, 下层铁镁质岩浆团被带至长英质岩浆中并淬火冷凝成为暗色包裹体, 而上层的长英质岩浆团被拖入下部, 并很快均一化混合<sup>[23]</sup>。这种模型可以视为同源岩浆混合的一种特殊形式<sup>[18]</sup>, 也可以很好地解释本研究中的闪长质包裹体的成因。

锆石极强的稳定性使其 Hf 同位素组成较少受到后期地质事件的影响, 极低的 Lu 含量可以获得锆石形成时准确的 Hf 同位素组成, 这些特性使锆石 Hf 同位素成为目前探讨地壳演化和示踪岩石源区的重要工具<sup>[24]</sup>。本研究中锆石原位 Hf 同位素分析结果显示, 寄主花岗闪长岩初始  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值为 0.282 776~0.282 951,  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为 4.4~10.6, 二阶段模式年龄 ( $T_{\text{DM}}^{\text{C}}$ ) 为 558~963 Ma (表 5)。在  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)-t$  图解中, 寄主花岗闪长岩样品落于亏损地幔和下地壳之间的区域 (图 8), 表明花岗闪长岩的初始岩浆为新元古代从亏损地幔增生的年轻陆壳物质。然而, 花岗闪长岩和闪长质包裹体的 Nb/Ta 比值集中于 11.32~16.32, 整体介于下地壳 (Nb/Ta=8.3)<sup>[25]</sup> 和原始地幔 (Nb/Ta=17.5)<sup>[26]</sup> 之间, 而且个别寄主花岗闪长岩体的 Nb/Ta 比值在 20 以上, 表明岩浆源区存在幔源物质的混入。在  $\text{La}_N/\text{Yb}_N-\delta\text{Eu}$  图解上, 寄主花岗闪长岩及包裹体样品点基本落于壳源区

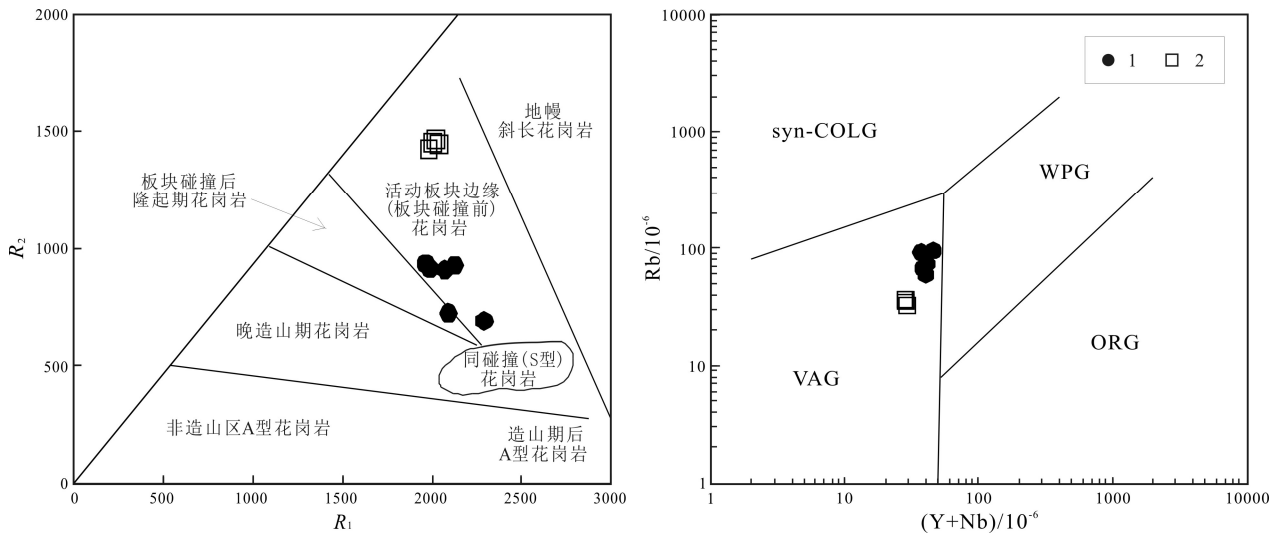
域, 且投点位置基本较为接近 (图 9c), 进一步显示形成包裹体和寄主岩石的初始岩浆是同源的, 且以壳源为主; 而寄主岩石存在 2 个样品点位于壳型和壳幔型分界线及壳幔型区域, 反映了岩浆源区存在幔源物质的混入。这也得到了寄主花岗闪长岩宽泛的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  变化范围 (约 6 个  $\varepsilon$  单位) 的支持<sup>[27]</sup>。此外, 闪长质包裹体具有较低的  $\text{SiO}_2$  (54.87%~55.42%) 含量和较高的  $\text{MgO}$  (4.62%~5.12%) 含量及  $\text{Mg}^{\#}$  值 (49~52), 明显区别于基性下地壳物质部分熔融产生的岩浆 ( $\text{Mg}^{\#}$  值通常小于 45)<sup>[28]</sup>, 同样显示出幔源岩浆的特征。

寄主花岗闪长岩样品在 Harker 图解中  $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$  及  $\text{TiO}_2$  与  $\text{SiO}_2$  显示出负的相关性 (图 4), 表明其岩浆可能经历了角闪石的分离结晶; 结合微量元素蛛网图中 P、Ti 的明显负异常 (图 5b), 暗示磷灰石和 Fe-Ti 等氧化物也发生了分离结晶; 稀土元素配分曲线上呈现出的微弱负 Eu 异常, 还指示岩浆演化过程中存在斜长石的分离结晶作用 (图 5a)。综上, 笔者认为查夫矿区花岗闪长岩内的闪长质包裹体为特殊的“同源岩浆混合成因”包裹体, 寄主岩石与包裹体主要起源于新元古代从亏损地幔增生的地壳物质的部分熔融, 源区还存在幔源物质的加入, 并在岩浆演化过程中经历了斜长石、磷灰石、角闪石等矿物的分离结晶作用。

### 5.3 成岩构造背景

中生代期间, 中蒙边境查夫-甲乌拉银多金属矿集区主要受蒙古-鄂霍次克洋的构造演化影响<sup>[2]</sup>, 但目前对蒙古-鄂霍次克洋盆闭合的时间仍有争议。Metelkin et al. 认为早侏罗世时期蒙古-鄂霍次克洋盆在西部已经闭合<sup>[29]</sup>; 部分学者认为, 蒙古-鄂霍次克洋的闭合自西向东具有剪刀式闭合的特征, 东部闭合的时间可能持续到晚侏罗世—早白垩世<sup>[30-31]</sup>; 而许文良等提出额尔古纳地块西北侧蒙古-鄂霍次克洋的闭合时间应发生在中侏罗世<sup>[32-33]</sup>。

寄主花岗闪长岩属准铝质、高钾钙碱性-钙碱性的 I 型花岗岩, 微量元素蛛网图中显示出富集大离子亲石元素和亏损高场强元素的特征, 尤其 Nb、Ta 的明显亏损, 表明岩体的形成与洋壳俯冲作用有关。在  $R_1-R_2$  和  $\text{Rb}-(\text{Y}+\text{Nb})$  构造环境判别图解上, 花岗闪长岩和闪长质包裹体样品分别落于活动板块边缘 (板块碰撞前) 花岗岩和火山弧花岗岩区域内 (图 10)。本研究锆石 U-Pb 定年结果显示, 花岗闪长岩及闪长质包裹体

图 10 含矿花岗闪长岩及闪长质包体  $R_1$ - $R_2$  和  $Rb$ -( $Y+Nb$ )构造判别图解

(底图分别据文献[34]和[35])

Fig. 10 The  $R_1$ - $R_2$  and  $Rb$ -( $Y+Nb$ ) tectonic discrimination diagrams for ore-bearing granodiorite and dioritic enclaves

(After References [34] and [35])

Syn-COLG—同碰撞花岗岩(syn-collision granite); WPG—板内花岗岩(within-plate granite); VAG—火山弧花岗岩(volcanic arc granite); ORG—洋中脊花岗岩(ocean ridge granite); 1—寄主花岗闪长岩(granodiorite host); 2—闪长质包裹体(dioritic enclave)

的形成年龄约为 196 Ma, 对应于早侏罗世。以上说明, 蒙古-鄂霍次克洋中段在早侏罗世时期尚未闭合, 仍处于俯冲作用下, 而查夫含矿花岗闪长岩应为是蒙古-鄂霍次克洋板块俯冲的产物。Tang et al. 在蒙古-鄂霍次克缝合带东南侧识别出一套晚三叠世末期—早侏罗世侵入岩, 由二长花岗岩、正长花岗岩、花岗闪长岩、石英斑岩、花岗斑岩、辉长闪长岩等岩石组成, 构成了近北东向展布的与蒙古-鄂霍次克洋板片南向俯冲有关的侵入岩带<sup>[9]</sup>。查夫银多金属矿的含矿花岗闪长岩应属于该侵入岩带的一部分, 而侵入岩带中的基性岩经研究为俯冲流体交代的地幔楔的部分熔融的产物<sup>[9]</sup>, 那么花岗闪长岩初始岩浆中的幔源组分可能也与俯冲流体交代的地幔楔熔体有关。

早侏罗世时期, 蒙古-鄂霍次克洋板块持续向克鲁伦-额尔古纳地块下方俯冲, 俯冲流体交代的地幔楔发生部分熔融, 形成了基性岩浆。该基性岩浆上侵诱发了新元古代增生的下地壳的部分熔融, 进而形成了寄主花岗闪长岩的初始岩浆, 其上下不同性质的岩浆发生混合作用, 经历了一定的分离结晶作用后, 最终形成了查夫矿区的含矿花岗闪长岩及其闪长质包裹体(图 11)。

## 6 结论

(1) 查夫银多金属矿床的含矿花岗闪长岩的锆石 U-Pb 年龄为  $195.7 \pm 1.3$  Ma (MSWD=1.11), 对应于早侏罗世。结合查夫银多金属矿床的地质特征, 认为该花岗闪长岩仅作为查夫银多金属矿床的含矿岩体, 与银多金属矿化并无成因联系。

(2) 含矿花岗闪长岩属于准铝质-弱过铝质、高钾钙碱性-钙碱性系列的 I 型花岗岩; 其内部发育的闪长质暗色微粒包裹体同时显示出“同源包体”和“岩浆混合包体”的地质与地球化学特征, 为特殊的“同源岩浆混合”包裹体。

(3) 花岗闪长岩锆石原位 Hf 同位素分析结果显示, 寄主花岗闪长岩的  $\epsilon_{Hf}(t)$  值为 4.4~10.6, 二阶段模式年龄 ( $T_{DM}^c$ ) 为 558~953 Ma, 表明形成花岗闪长岩的初始岩浆主要起源于新元古代从亏损地幔增生的地壳部分熔融, 并存在幔源物质的混入。

(4) 综合区域构造演化、成岩年代学及地球化学资料, 花岗闪长岩应形成于蒙古-鄂霍次克洋俯冲的活动大陆边缘背景。

致谢: 野外地质工作得到了蒙古正元有限责任公

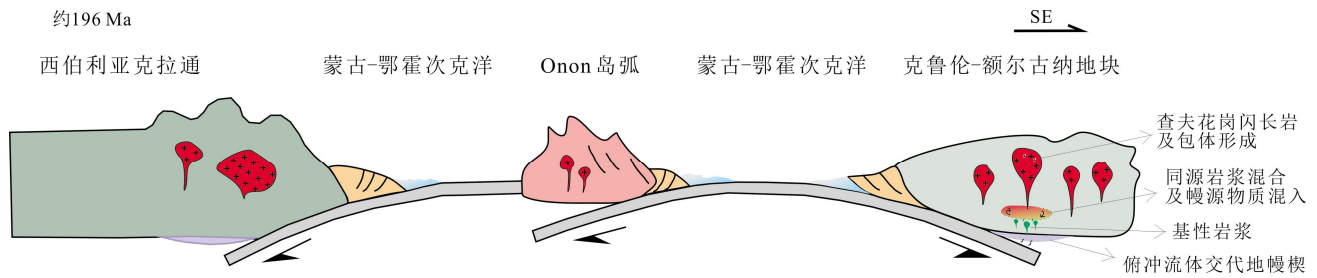


图 11 查夫银多金属矿床含矿花岗闪长岩及闪长质包裹体成岩模式图

(据文献[9]修改)

Fig. 11 Diagenetic model of granodiorite host and dioritic enclaves

(Modified from Reference [9])

司李德亮教授级高工的大力支持与协助,舒广龙研究员对本文的研究工作进行了细致的指导,在此致以衷心的感谢。

#### 参考文献(References):

- [1]内蒙古自治区地质矿产局. 内蒙古自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1991: 1-725.  
Bureau of Geology and Mineral Resources of Inner Mongolia Autonomous Region. Regional geology of Inner Mongolia Autonomous Region[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 1-725. (in Chinese)
- [2]聂凤军, 刘勇, 刘翼飞, 等. 中蒙边境查夫-甲乌拉地区中生代银多金属矿床成矿作用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(6): 1715-1725.  
Nie F J, Liu Y, Liu Y F, et al. Ore-forming processes of silver-polymetallic deposits occurring within Tsav-Jiawula region along China-Mongolian border[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011, 41(6): 1715-1725.
- [3]张璟, 邵军, 鲍庆中, 等. 蒙古国乌兰铅锌矿地质特征、岩石地球化学特征及U-Pb年龄[J]. 中国地质, 2014, 41(4): 1124-1135.  
Zhang J, Shao J, Bao Q Z, et al. Geological and rock geochemical characteristics and U-Pb age of the Ullan lead-zinc deposit in Mongolia[J]. Geology in China, 2014, 41(4): 1124-1135.
- [4]张璟, 邵军, 鲍庆中, 等. 中蒙克鲁伦-满洲里成矿带铅锌矿地球化学特征及LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄对比[J]. 地质通报, 2015, 34(4): 663-674.  
Zhang J, Shao J, Bao Q Z, et al. A comparative study of lithochemical characteristics and LA-ICP-MS zircon U-Pb age of lead-zinc deposits in the Herlen-Manzhouli metallogenic belt along China-Mongolia border area[J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(4): 663-674.
- [5]李铁刚, 武广, 刘军, 等. 大兴安岭北部甲乌拉铅锌银矿床Rb-Sr同位素测年及其地质意义[J]. 岩石学报, 2014, 30(1): 557-570.  
Li T G, Wu G, Liu J, et al. Rb-Sr isochron age of the Jiawula Pb-Zn-Ag deposit in the Manzhouli area and its geological significance [J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(1): 257-270.
- [6]牛斯达, 李胜荣, 郭健. 内蒙古甲乌拉铅锌银矿绢云母<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar年龄及其地质意义[J]. 地质与勘探, 2020, 56(1): 59-67.  
Niu S D, Li S R, Guo J. <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar ages of the sericite in the Jiawula Pb-Zn-Ag deposit, Inner Mongolia and their geological significance [J]. Geology and Exploration, 2020, 56(1): 59-67.
- [7]杨梅, 孙景贵, 王忠禹, 等. 大兴安岭西坡甲乌拉铜银铅锌矿床富碱花岗斑岩的成因及其地质意义: 锆石U-Pb定年和地球化学特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2017, 47(2): 477-496.  
Yang M, Sun J G, Wang Z Y, et al. Petrogenesis and Geological Significance of the alkali-rich granite porphyry in the Jiawula Cu-Ag-Pb-Zn deposit in the western slope of the Great Xing'an Range: Zircon U-Pb dating and geochemical characteristics [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2017, 47(2): 477-496.
- [8]许立权, 刘翠, 邓晋福, 等. 内蒙古额仁陶勒盖银矿区火成岩岩石地球化学特征及锆石SHRIMP U-Pb同位素定年[J]. 岩石学报, 2014, 30(11): 3203-3212.  
Xu L Q, Liu C, Deng J F, et al. Geochemical characteristics and zircon U-Pb SHRIMP age of igneous rocks in Erentaolegai silver deposit, Inner Mongolia[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(11): 3203-3212.
- [9]Tang J, Xu W. Mesozoic intrusive rocks in the Erguna Massif, NE China[J]. Gondwana Research, 2016, 31: 218-240.
- [10]曹宏经. 查夫矿床的含矿构造(内蒙古)[J]. 国外铀金地质, 1996, 13(1): 58-65.  
Cao H J. The ore-bearing structure of the Tsav deposit (Eastern Mongolia)[J]. Overseas Uranium and Gold Geology, 1996, 13(1): 58-65. (in Chinese)
- [11]Andersen T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report <sup>204</sup>Pb [J]. Chemical Geology, 2002, 192(1/2): 59-79.
- [12]Yuan H L, Gao S, Liu X M, et al. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry[J]. Geostandards and Geoanalytical Research,

- 2004, 28(3): 353-370.
- [13] Boynton W V. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies[J]. *Developments in Geochemistry*, 1984, 2: 63-114.
- [14] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1989, 42(1): 313-345.
- [15] Ministry of Industry and Trade, Mongolia (MITM). Mongolia: Investor's forum [C]//Internal Mining and Oil Industry Information Bulletin, 2002: 1-350.
- [16] 郭晓东, 牛翠祎, 王治华, 等. 滇西马厂箐岩体及其中深源包体地球化学特征[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2011, 41(S1): 141-153.
- Guo X D, Niu C Y, Wang Z H, et al. Geochemical characteristics of the Machangqing intrusive and its deep-derived enclaves, western Yunnan Province [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2011, 41(S1): 141-153.
- [17] Didier J, Barbarin B. Macroscopic features of mafic microgranular enclaves[J]. *Enclaves and Granite Petrology*, 1991: 253-262.
- [18] 张俊杰, 王光杰, 杨晓勇, 等. 皖南旌德花岗闪长岩与暗色包体的成因: 地球化学、锆石 U-Pb 年代学与 Hf 同位素制约[J]. *岩石学报*, 2012, 28(12): 4047-4063.
- Zhang J J, Wang G J, Yang X Y, et al. The petrogenesis of the Jingde granodiorite and its MMEs: Constraints from geochemistry, zircon U-Pb dating and Hf isotopic compositions[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(12): 4047-4063.
- [19] 陈伟, 宋杨, 刘洪章, 等. 同源岩浆不同期次之间混合产生的暗色包体——以北拉萨地块中部晚白垩世桑心日岩体为例[J]. *岩石学报*, 2019, 35(7): 2143-2157.
- Chen W, Song Y, Liu H Z, et al. MMEs formed by magma mixing of different episodes of the same sourced magma: A case study of the Late Cretaceous Sangxinri pluton in the middle part of the northern Lhasa block[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35(7): 2143-2157.
- [20] 周金城, 徐夕生, 陶仙聪. 寄主花岗岩对微花岗岩类包体的地球化学制约[J]. *地球化学*, 1994, 23(3): 254-261.
- Zhou J C, Xu X S, Tao X C. Geochemical constraints on microgranitoid enclaves by host granites[J]. *Geochimica*, 1994, 23(3): 254-261.
- [21] Zorpi M J, Coulon C, Orsini J B, et al. Magma mingling, zoning and emplacement in calc-alkaline granitoid plutons[J]. *Tectonophysics*, 1989, 157(4): 315-329.
- [22] Foley S F. Liquid immiscibility and melt segregation in alkaline lamprophyres from Labrador[J]. *Lithos*, 1984, 17: 127-137.
- [23] Vernon R H. Restite, xenoliths and microgranitoid enclaves in granites [J]. *Journal & Proceedings, Royal Society of New South Wales*, 1983, 116(3/4): 77-103.
- [24] Amelin Y, Lee D C, Halliday A N, et al. Nature of the earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircons [J]. *Nature*, 1999, 399(6733): 252-255.
- [25] Rudnick R L, Gao S. Composition of the continental crust [J]. *Treatise on Geochemistry*, 2003(3): 1-64.
- [26] Jochum K P, McDonough W F, Palme H, et al. Compositional constraints on the continental lithospheric mantle from trace elements in spinel peridotite xenoliths [J]. *Nature*, 1989, 340(6234): 548-550.
- [27] Kemp A I S, Hawkesworth C J, Foster G L, et al. Magmatic and crustal differentiation history of granitic rocks from Hf-O isotopes in zircon [J]. *Science*, 2007, 315(5814): 980-983.
- [28] Rapp R P, Shimizu N, Norman M D, et al. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: Experimental constraints at 3.8 GPa [J]. *Chemical Geology*, 1999, 160(4): 335-356.
- [29] Metelkin D V, Gordienko I V, Klimuk V S. Paleomagnetism of Upper Jurassic basalts from Transbaikalia: New data on the time of closure of the Mongol-Okhotsk Ocean and Mesozoic intraplate tectonics of Central Asia [J]. *Russian Geology and Geophysics*, 2007, 48(10): 825-834.
- [30] Kravchinsky V A, Cogné J P, Harbert W P, et al. Evolution of the Mongol-Okhotsk Ocean as constrained by new palaeomagnetic data from the Mongol-Okhotsk suture zone, Siberia [J]. *Geophysical Journal International*, 2002, 148(1): 34-57.
- [31] Sorokin A A, Sorokin A P, Ponomarchuk V A, et al. The age and geochemistry of volcanic rocks on the eastern flank of the Umlekan-Ogodzha volcanoplutonic belt (Amur Region) [J]. *Russian Geology and Geophysics*, 2010, 51(4): 369-379.
- [32] 许文良, 孙晨阳, 唐杰, 等. 兴蒙造山带的基底属性与构造演化过程 [J]. *地球科学*, 2019, 44(5): 1620-1646.
- Xu W L, Sun C Y, Tang J, et al. Basement nature and tectonic evolution of the Xing'an-Mongolian orogenic belt [J]. *Earth Science*, 2019, 44(5): 1620-1646.
- [33] 许文良, 王枫, 裴福萍, 等. 中国东北中生代构造体制与区域成矿背景: 来自中生代火山岩组合时空变化的制约 [J]. *岩石学报*, 2013, 29(2): 339-353.
- Xu W L, Wang F, Pei F P, et al. Mesozoic tectonic regimes and regional ore-forming background in NE China: Constraints from spatial and temporal variations of Mesozoic volcanic rock associations [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(2): 339-353.
- [34] Batchelor R A, Bowden P. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters [J]. *Chemical Geology*, 1985, 48(1/4): 43-55.
- [35] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25(4): 956-983.