

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.204>



内蒙古赤峰金厂沟梁地区花岗岩类年代学、地球化学与Hf同位素特征

杨帆^{1,2}, 庞雪娇¹, 吴猛^{3*}, 刘淼¹, 陈井胜¹, 李斌¹

1. 中国地质调查局沈阳地质调查中心, 辽宁沈阳 110034

2. 吉林大学地球科学学院, 吉林长春 130061

3. 黑龙江省地质矿产测试应用研究所, 黑龙江哈尔滨 150036

摘要: 内蒙古赤峰金厂沟梁地区出露的中生代花岗岩类对确定华北克拉通北缘中段中生代构造格局和演化具有重要意义。对西台子岩体、金厂沟梁岩体、小西沟岩体及西对面沟岩体进行了锆石 U-Pb (LA-ICP-MS) 年龄测定、地球化学分析及 Hf 同位素测定。西台子岩体及金厂沟梁岩体锆石 U-Pb 测年结果分别为 220.5 ± 2.1 Ma 和 225.5 ± 1.7 Ma, 为晚三叠世, 两个岩体具有右倾的球粒陨石标准化配分曲线, 均为弱的正 Eu 异常, 锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 的变化范围分别为 $-8.0 \sim -3.0$ 和 $-5.7 \sim -2.3$; 小西沟岩体的锆石 U-Pb 测年结果为 162.5 ± 1.6 Ma, 为晚侏罗世, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 比值为 $0.14 \sim 0.51$, 其稀土元素球粒陨石标准化图谱显示稍向左倾的“V”字型, 弱的负 Eu 异常, 锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 $-7.3 \sim -4.4$; 西对面沟岩体锆石 U-Pb 测年结果为 128.2 ± 1.1 Ma, 为晚白垩世, 具有右倾的球粒陨石标准化配分曲线, 弱的正 Eu 异常, 锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 $-11.4 \sim -10.4$ 。西台子及金厂沟梁岩体为 I 型花岗岩, 小西沟岩体为 A₁ 型花岗岩, 西对面沟岩体为 C 型埃达克质岩石, 其源区均为华北克拉通下地壳物质的部分熔融; 西台子岩体、金厂沟梁岩体可能形成于古亚洲洋闭合后地壳伸展的动力学背景之下, 小西沟岩体形成于蒙古—鄂霍茨克海闭合后的伸展构造背景, 西对面沟岩体形成于地壳减薄过程中局部加厚的构造背景之下。

关键词: 中生代; 锆石 U-Pb 年代学; 地球化学; Hf 同位素; 内蒙古; 岩石学。

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2019)10-3209-14

收稿日期: 2019-08-15

Geochronology, Geochemistry and Hf Isotopic Compositions of Granitoids in Jinchanggouliang Area, Chifeng, Inner Mongolia

Yang Fan^{1,2}, Pang Xuejiao¹, Wu Meng^{3*}, Liu Miao¹, Chen Jingsheng¹, Li Bin¹

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

2. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

3. Geological Minerals Testing and Application Institute of Heilongjiang Province, Harbin 150036, China

Abstract: The Mesozoic granitoids exposed in Jinchanggouliang area of Chifeng are of great significance to the Mesozoic tectonic framework and evolution in the middle part of the north margin of North China. In this study, geochemical analysis, zircon U-Pb (LA-ICP-MS) dating and Hf isotopic compositions were carried out for the Xitaizi, Jinchanggouliang, Xiaoxigou and Xiduimianguou rock bodies. U-Pb dating of zircons from Xitaizi and Jinchanggouliang rock bodies are 220.5 ± 2.1 Ma, $225.5 \pm$

基金项目: 国家重点研发专项(No.2017YFC0601306); 中国地质调查局项目(No.DD20190042-04).

作者简介: 杨帆(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事矿产地质研究. ORCID: 0000-0001-8947-1316. E-mail: 541810741@qq.com

*** 通讯作者:** 吴猛(1974—), 高级工程师, E-mail: hdckqb@sina.com

引用格式: 杨帆, 庞雪娇, 吴猛, 等, 2019. 内蒙古赤峰金厂沟梁地区花岗岩类年代学、地球化学与 Hf 同位素特征. 地球科学, 44(10): 3209—3222.

1.7 Ma, respectively, which are Late Triassic. The two rock bodies have similar right-leaning chondrite-normalized distribution curves and show a certain weak positive Eu anomaly. The $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of the two rock bodies range from -8.0 to -3.0 , and -5.7 to -2.3 . U-Pb dating of zircons from Xiaoxigou rock body is 162.5 ± 1.6 Ma, which is Late Jurassic. The $(\text{La}/\text{Yb})_N$ ratios of the rock body are 0.14 to 0.51 and have a slightly left-leaning “V” shape chondrite-normalized distribution curve and a weak negative Eu anomaly. The $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ value is -7.3 to -4.4 . U-Pb dating of zircons from Xiduimiangu rock body is 128.2 ± 1.1 Ma and has right-leaning chondrite-normalized distribution curve and shows a certain weak positive Eu anomaly. The $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ value is -11.4 to -10.4 . Analyses of the above chronology, rock geochemistry and Hf isotope data, combined with regional geological data, show that Xitaizi and Jinchanggouliang rock bodies are I-type granites, Xiaoxigou rock body is A_1 -type granite and Xiduimiangu rock body is C-type adakite rocks. The source regions are all from the partial melting of the lower crustal materials in the North China craton. Xitaizi rock body and Jinchanggouliang rock body may have formed under the extensional dynamic background of the ancient Asian Ocean closure. Xiaoxigou rock body was formed in the extensional tectonic background after the closure of the Mongol-Okhotsk Ocean. The Xiduimiangu rock body was formed under the tectonic background of local thickening in the process of crust thinning.

Key words: Mesozoic; zircon U-Pb geochronology; geochemistry; Hf isotope; Inner Mongolia; petrology.

0 引言

华北克拉通北缘朝阳—赤峰地区中生代花岗岩类是中国东部岩浆带的重要组成部分,并与本区中生代大规模内生成矿作用关系密切,长期以来一直受到众多研究者的关注(刘红涛等,2002;苗来成等,2003;陈军强等,2005;付乐兵等,2010;段培新等,2014;熊乐等,2017).金厂沟梁位于内蒙古赤峰敖汉旗与辽宁西部朝阳市的交界处,大地构造位置处于华北克拉通北缘中段,区内发育众多花岗岩类侵入体,且其中一些花岗岩与金矿床表现出明显的时空关系,前人曾对区内花岗岩类的成岩时代进行过约束,王建平等(1992)采用K-Ar法测得对面沟岩体年龄为121.5~125.5 Ma;苗来成等(2003)通过SHRIMP U-Pb法测得西台子岩体和娄上岩体的年龄分别为 218 ± 4 Ma和 161 ± 1 Ma;候万荣(2011)等采用LA-ICP-MS U-Pb法测得对面沟岩体的年龄为138.7~142.6 Ma;段培新等(2014)通过LA-ICP-MS U-Pb法测得金厂沟梁岩体及西台子岩体的年龄分别为 249.9 ± 1.4 Ma和 216.7 ± 1.8 Ma,但对岩石成因以及源区性质未能很好地限制,笔者通过对研究区花岗质岩石进行岩石学、地球化学、锆石U-Pb年代学和Hf同位素测定,探讨不同时代花岗质岩体的源区性质、成因以及动力学背景.

1 区域地质概况

金厂沟梁北侧为近东西走向的赤峰—开源深大断裂,东南侧为北东走向的承德—北票断裂,西侧则是铁匠营—四官营断裂(图1a).区内出露的地

层主要为上太古界建平群,由黑云片麻岩夹斜长角闪岩、麻粒岩、磁铁石英岩扁豆体组成,是一套富含铁镁质的海底喷发基性火山岩、碎屑岩夹硅铁质岩石,经多次变质作用而形成的.晚侏罗世火山岩分布广泛,岩性复杂,由一套英安质、流纹质熔岩、凝灰岩、火山角砾岩组成.研究区内花岗岩类侵入体较为发育,它们侵入于上太古界建平群内,主要有西台子岩体、金厂沟梁岩体、西对面沟岩体、娄上岩体、小西沟等岩体(图1b).本文在结合前人对研究区内花岗岩类研究认识的基础上,对西台子岩体、金厂沟梁岩体、小西沟岩体以及对面沟岩体等4个岩体(图1)进行了详细的野外地质调查和样品采集.各岩体的地质特征、岩石学特征分述如下.

(1)西台子岩体:呈岩基产于研究区西南部,是区内规模最大的岩体,侵入于上太古界建平群,被上侏罗统火山岩覆盖,主体岩性为中粗粒二长花岗岩,岩石的新鲜面呈浅灰褐色—浅灰色,风化面呈灰黄色,岩石具二长结构,块状构造.岩石主要矿物为钾长石(35%~40%)、石英(20%~25%)、斜长石(25%~30%),次要矿物为黑云母(8%~10%),黑云母发生不同程度的绿泥石化(图2a).

(2)金厂沟梁岩体:呈岩基产于研究区中西部,侵入到上太古界建平群,岩性为中细粒二长花岗岩.岩石的新鲜面为浅灰褐色,风化面为黄褐色,花岗结构,块状构造.岩石主要矿物组成为斜长石(30%~35%)、微斜长石(30%~35%)、石英(26%~30%)、黑云母(3%~4%)(图2b).

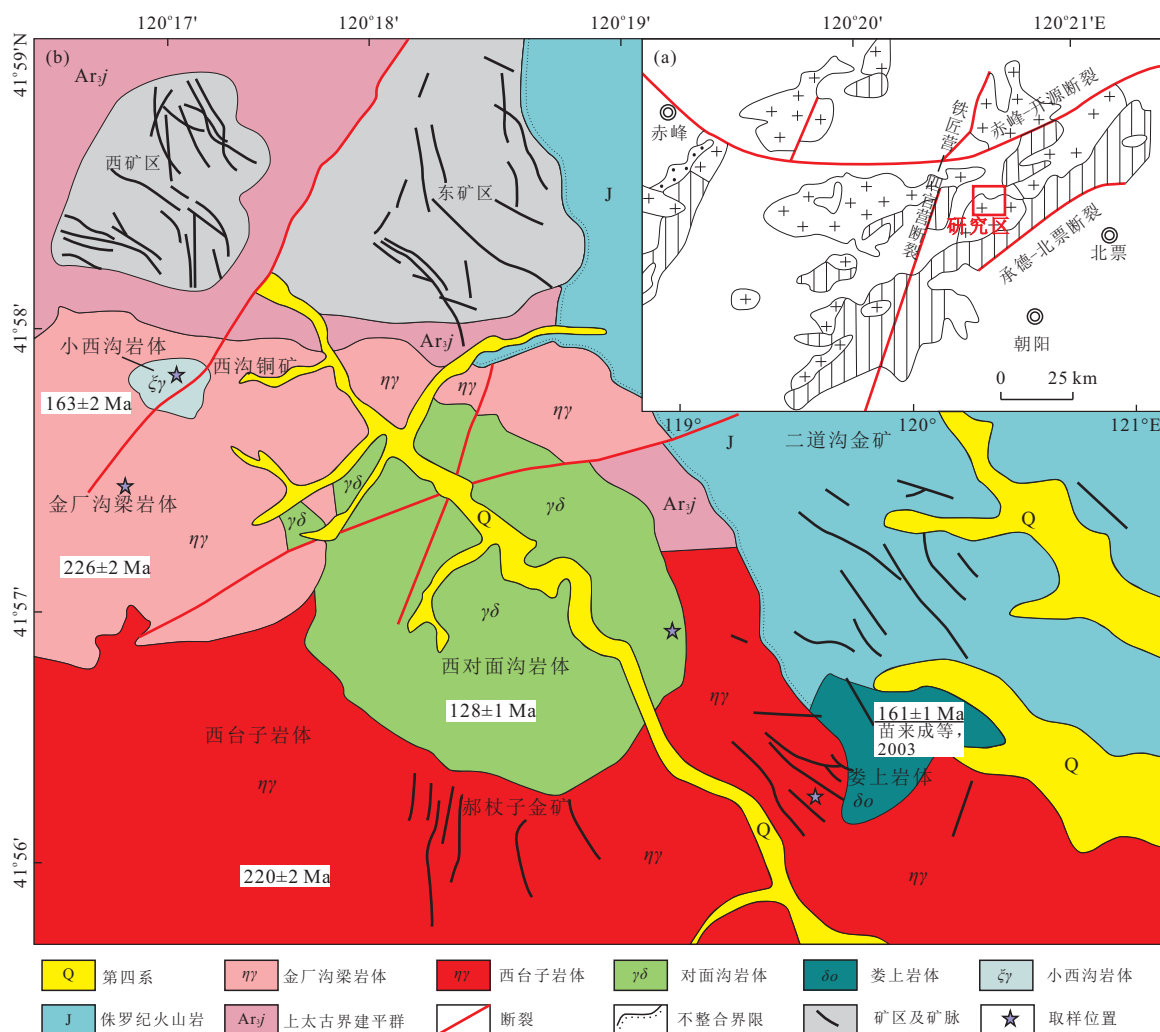


图 1 金厂沟梁地区地质简图

Fig.1 Sketch geological map of the Jinchanggouliang area

据段培新等(2014)修改

(3)小西沟岩体:呈岩株状侵入到金厂沟梁岩体中,岩性主要为粗粒文象正长花岗岩.岩石新鲜面为浅灰褐色,新鲜面为土黄色,粗粒花岗结构,文象结构,块状构造.岩石主要矿物组成为为钾长石(55%~60%)、斜长石(10%~15%)、石英(25%~30%),副矿物为锆石、榍石、磁铁矿(图 2c).

(4)西对面沟岩体:呈岩株状侵入于西台子岩基、金厂沟梁岩体和上太古界建平群中,岩石主体岩性为细粒石英二长岩.岩石新鲜面为浅灰白色,风化面为浅黄褐色,半自形粒状结构,块状构造.岩石主要矿物为斜长石(40%~45%)、钾长石(10%~15%)、石英(20%~25%),次要矿物为角闪石(10%~15%),黑云母(5%~6%);副矿物为磁铁矿、锆石、磷灰石(图 2d).

2 样品选择与分析测试

2.1 样品选择

本文选择了西台子中粗粒二长花岗岩(41°56'08"N, 120°19'50"E)、金厂沟梁中细粒二长花岗岩(41°57'55"N, 120°16'54"E)、小西沟粗粒文象正长花岗岩(41°57'25"N, 120°16'43"E)、西对面沟细粒石英二长岩(41°56'50"N, 120°19'04"E)进行了锆石 U-Pb 定年和 Lu-Hf 同位素分析,同时对 16 件新鲜样品进行了全岩主、微量元素分析.

2.2 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年法

锆石 U-Pb 同位素定年在国土资源部沉积盆地与油气资源重点实验室完成,激光剥蚀系统为 Geo-LasPro 193 nm 激光系统,质谱为高分辨电感耦合等离子体质谱仪 ELEMENT2,实验采用高纯 He 作

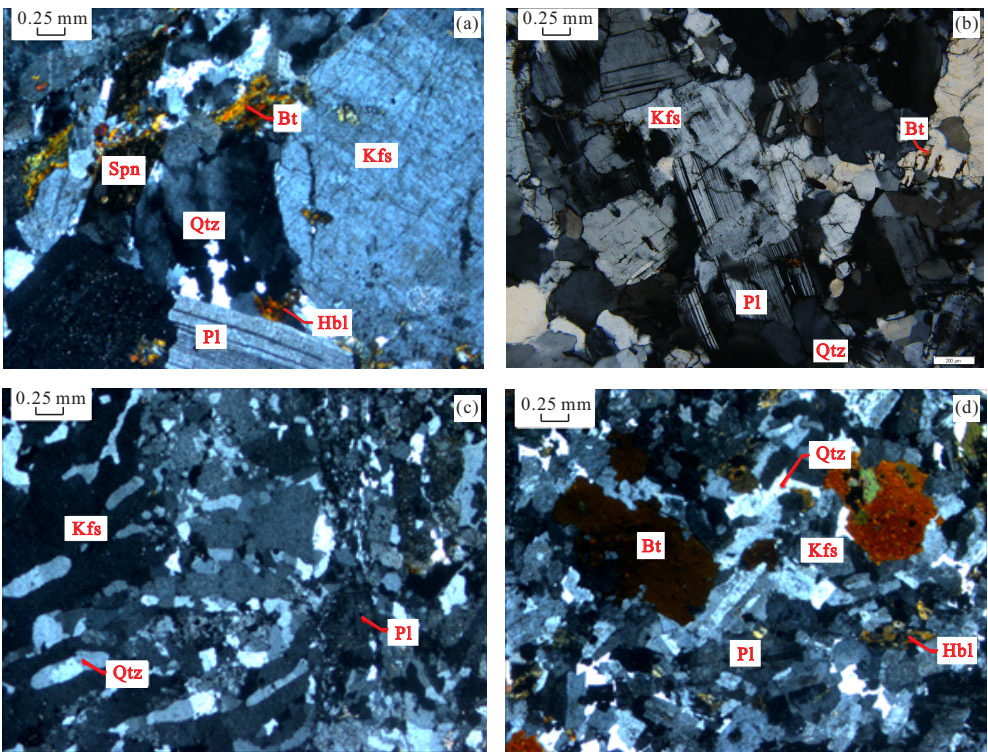


图2 金厂沟梁花岗岩类显微岩相学特征(正交偏光)

Fig.2 Characteristic photomicrographs of granitoids from Jinchanggouliang(orthogonal polarization)

a. 西台子二长花岗岩;b. 金厂沟梁二长花岗岩;c. 小西沟正长花岗岩;d. 西对面沟石英二长岩. Qtz. 石英;Kfs. 钾长石;Pl. 斜长石;Bt. 黑云母;Hbl. 角闪石;Spn. 榍石

为剥蚀物质的载气,激光波长 193 nm、束斑直径 32 μm 、脉冲频率 6 Hz、激光能量为 6 J/cm²,测试前先采用 NIST610 标准调谐仪器至最佳状态,使得 ¹³⁹La、²³²Th 信号达到最强,并使氧化物产率 ²³²Th¹⁶O/²³²Th<0.3%. 实验采用锆石标样 GJ-1 作为外标进行 U-Pb 同位素分馏效应和质量歧视的校正计算,Plřovice 锆石标样作为监控盲样来监视测试过程的稳定性;测试时每 5 个样品点插一组标样. 每个样品激光取样过程包括 20 s 的背景采集时间、50 s 的剥蚀取样时间和 10 s 的样品池冲洗时间. 对分析数据的离线处理采用软件 ICPMSDataCal (Ludwig,2003),分析结果见附表 1.

2.3 岩石元素地球化学方法

将采集的样品粉碎成 200 目粉末后,主量元素分析采用 Axios Max X-荧光光谱仪,其中,FeO 采用 50 mL 滴定管滴定;样品先按照 1:5 的比例放入 Li₂B₄O₇ 溶液中,在 1 050~1 250℃ 温度下熔化,然后将熔化样品制成玻璃薄片进行分析,分析精度估计 1%(SiO₂)和 2%(其他氧化物);微量元素和稀土元素的分析在 X-serise 2 等离子质谱仪上完成;将 50 mg 全岩粉末(200 目)置于 Teflon 烧瓶中分别

用 HNO₃和 HF 溶解 2 d 后加入 HClO₄进一步溶解. 蒸干后用 5% 的 HNO₃溶液将样品稀释到 50 mL,最后做微量元素分析,分析过程中同时测定两个 GBW 系列标样:一个标样校正 Li, Ba, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Rb, Sr, Cs, Ba, Pb, Th, U, Sc, Y 及稀土元素;另一个标样校正 W, Mo, Nb, Ta, Zr 和 Hf 等元素,分析误差<5%. 主量元素、微量元素和稀土元素的测定在国土资源部沈阳地质调查中心检测分析中心完成,分析结果见附表 2.

2.4 锆石 Hf 同位素测试方法

金厂沟梁地区侵入岩的锆石 Hf 同位素原位组成分析在天津地质矿产研究所完成,测试仪器为 Neptune 多接收器电感耦合等离子体质谱仪和氟化氙准分子激光剥蚀系统联机,激光束斑直径为 50 μm . 分析过程中标准锆石 GJ-1 的 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 值为 0.282 000±0.000 040. 运用实验中测得的 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 和 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 比值来计算初始 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值. ¹⁷⁶Lu 的半衰期采用 1.865×10⁻¹¹ a⁻¹ (Scherer, 2001). 具体分析测试流程详见丁帅等(2017), Geng *et al.* (2017)和 Yu *et al.* (2019). 计算 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值时采用的 (¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_{DM}

和 $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}$ 比值分别为 0.283 25 和 0.038 4 (Griffin *et al.*, 2000). Hf 模式年龄的计算见 Amelin *et al.* (2000), Griffin *et al.* (2000) 和 Nowell *et al.* (1998).

3 分析结果

3.1 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 结果

对采自西台子地区的二长花岗岩样品中的 23 粒锆石进行了 U-Pb 同位素测年(附表 1), 锆石晶型较好, 以长柱状为主, 长宽比在 2:1~3:1 之间, 粒径约 85~160 μm , 发育典型的岩浆振荡环带结构(图 3a), 全部分析点的 Th 含量为 224.42×10^{-6} ~ 670.35×10^{-6} , U 含量为 382.18×10^{-6} ~ 685.23×10^{-6} , Th/U 比值为 0.49~1.14, 具有岩浆锆石的特征. 8 颗独立锆石的年龄介于 247~351 Ma, 为继承锆石, 剩余 15 颗锆石给出了谐和的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄, 15 个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 220.5 ± 2.1 Ma(图 4a), 代表该组岩浆锆石的结晶年龄, 即该二长花岗岩的成岩年龄(图 4a).

金厂沟梁二长花岗岩中的锆石多为无色透明, 多为长柱状, 自形到半自形, 粒径在 90~140 μm 之间, 其内部发育较为清晰的岩浆振荡生长环带(图 3b). 全部分析点的 Th 含量为 151.27×10^{-6} ~ 766.91×10^{-6} , U 含量为 227.15×10^{-6} ~ 1231.47×10^{-6} , Th/U 比值为 0.41~0.79, 具有岩浆锆石的特征. 样品共分析了 12 颗锆石, 均给出了谐和的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄, 12 个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$

年龄加权平均值为 225.5 ± 1.7 Ma(图 4b).

小西沟正长花岗岩中的锆石多呈浑圆状、椭球状, 粒径介于 80~140 μm , 长宽比为 1:1~2:1, 其内部发育明显的岩浆振荡生长环带(图 3c). 全部分析点的 Th 含量为 5.06×10^{-6} ~ 52.71×10^{-6} , U 含量为 5.72×10^{-6} ~ 31.46×10^{-6} , Th/U 比值为 0.85~1.84, 具有典型岩浆锆石的属性. 测得 25 粒锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 (158 ± 3) ~ (167 ± 4) Ma, 其加权平均值为 162.5 ± 1.6 Ma(图 4c).

西对面沟石英二长岩中的锆石多为无色透明, 多为自形一半自形柱状, 少量呈椭球状, 长宽比在 1:1~4:1 之间, 粒径在 100~240 μm 之间, 其内部发育较弱的面状分带, 绝大部分阴极发光强度较强(图 3d). 全部分析点的 Th 含量为 24.05×10^{-6} ~ 936.39×10^{-6} , U 含量为 71.32×10^{-6} ~ 444.30×10^{-6} , Th/U 比值为 0.34~3.03, 具有岩浆锆石的特征. 样品共分析了 22 颗锆石, 锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 (123 ± 3) ~ (133 ± 3) Ma, 其加权平均值为 128.2 ± 1.1 Ma(图 4d).

3.2 元素地球化学

西台子二长花岗岩及金厂沟梁二长花岗岩具有相似的地球化学性质, SiO_2 含量介于 68.19%~71.27%(附表 2), Al_2O_3 含量介于 14.36%~16.02%, MgO 含量介于 0.18%~0.81%, K_2O 含量介于 4.48%~4.98%, Na_2O 含量介于 3.64%~4.73%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值介于 0.98~1.34, 在 TAS 图解上, 投点均主要落入花岗岩范围(图 5a), 在 SiO_2 - K_2O 图解上, 投点部分落入钾玄岩系列, 部分落入高钾钙

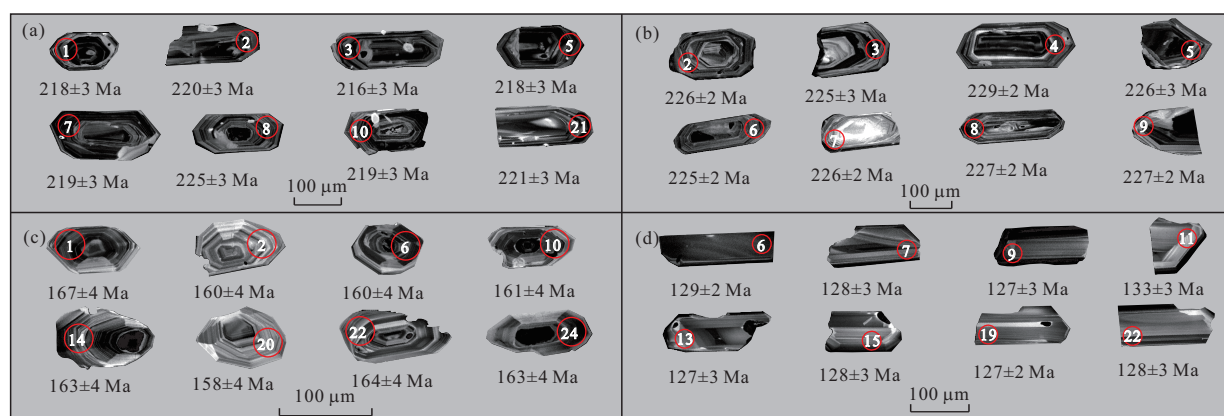


图 3 典型锆石 CL 图像

Fig.3 CL images of typical zircons

a. 西台子岩体; b. 金厂沟梁岩体; c. 小西沟岩体; d. 西对面沟岩体

碱性系列(图 5b),在 $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}$ 图解上,投点均落入钾质范围内(图 5c),在 $\text{A/CNK}-\text{A/NK}$ 图解上,投点均落入过铝质范围内(图 5d). 稀土含量介于 $116.93\times 10^{-6}\sim 175.55\times 10^{-6}$, LREE/HREE 比值介于 $15.05\sim 19.38$, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 比值介于 $22.07\sim 32.15$, 具有右倾的球粒陨石标准化配分曲线(图 6a),具有弱的正 Eu 异常($\delta\text{Eu}=1.09\sim 1.64$). 在微量元素原始地幔标准化蛛网图上(图 6b),西台子岩体样品亏损 Ba、Nb、Sr、P、Ti 等元素,富集 Rb、Th、Sm 等元素,金厂沟梁岩体样品亏损 Ba、Nb、P、Ti 等元素,富集 Rb、U、Th、Zr 等元素.

小西沟正长花岗岩 SiO_2 含量为 $75.28\%\sim 79.85\%$, Al_2O_3 含量为 $11.41\%\sim 13.57\%$, MgO 含量为 $0.20\%\sim 0.29\%$, K_2O 含量为 $3.27\%\sim 6.96\%$, Na_2O 含量为 $2.34\%\sim 2.92\%$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值为 $1.58\sim 2.82$,在 TAS 图解上,投点均落入花岗岩范围(图 5a),在 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 图解上,投点部分落入钾玄岩

系列、部分落入高钾钙碱性系列、部分落入钙碱性系列(图 5b),在 $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}$ 图解上,投点部分落入钾质范围内、部分落入高钾质系列(图 5c),在 $\text{A/CNK}-\text{A/NK}$ 图解上,投点均落入过铝质范围内(图 5d). 小西沟正长花岗岩稀土含量为 $26.30\times 10^{-6}\sim 97.08\times 10^{-6}$, LREE/HREE 比值为 $0.36\sim 0.86$, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 比值为 $0.14\sim 0.51$,其球粒陨石标准化配分曲线显示稍向左倾的“V”字型(图 6a),具有弱的负 Eu 异常($\delta\text{Eu}=0.37\sim 0.93$). 在微量元素原始地幔标准化蛛网图上(图 6b),样品亏损 Ba、La、Nd、Ti 等元素,富集 Rb、U、Th、Y、Yb 等元素.

西对面沟石英二长岩 SiO_2 含量为 $63.20\%\sim 63.90\%$, Al_2O_3 含量为 $16.38\%\sim 16.57\%$, MgO 含量为 $1.89\%\sim 1.97\%$, K_2O 含量为 $4.22\%\sim 4.30\%$, Na_2O 含量为 $4.24\%\sim 4.47\%$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值为 $0.96\sim 1.01$. 在 TAS 图解上投点均落在石英二长岩范围(图 5a),在 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 图解上,投点落入钾玄岩

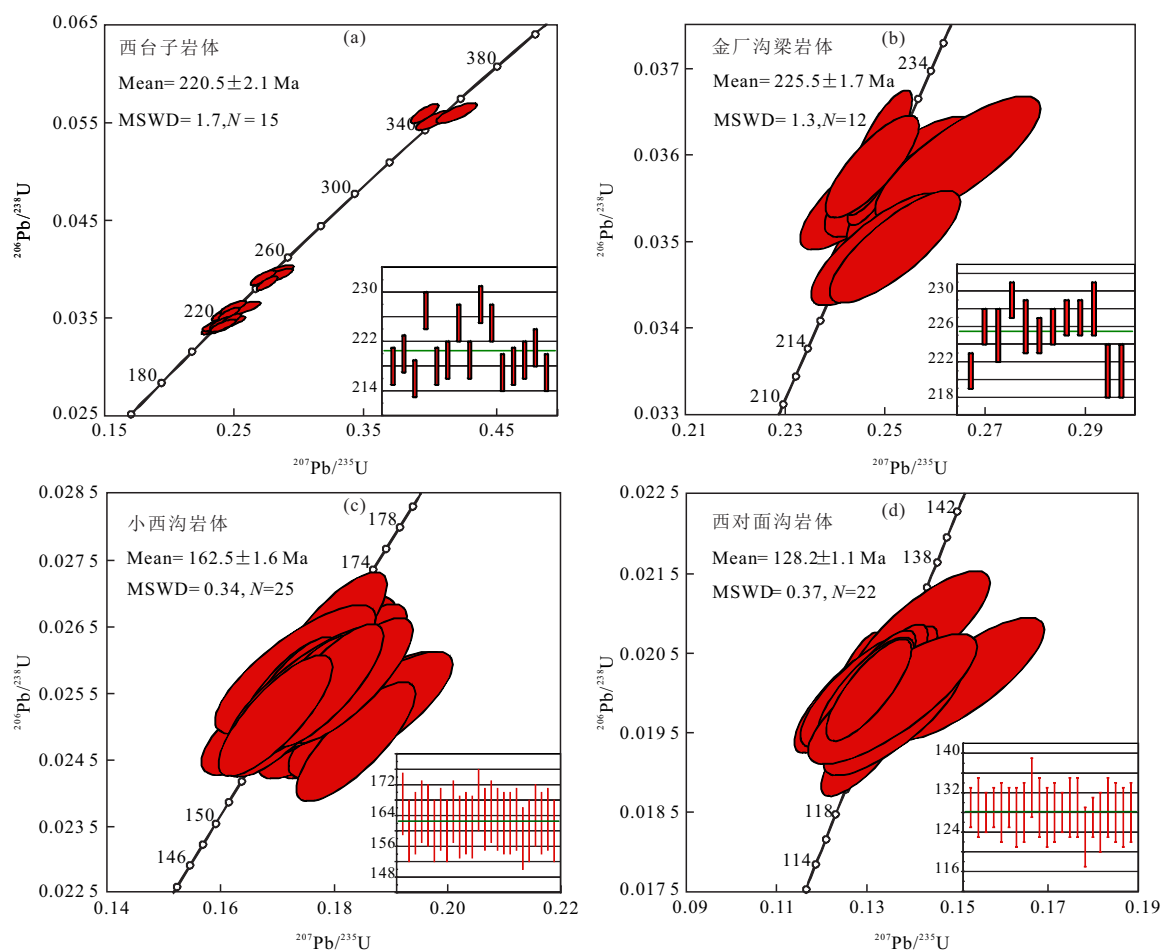


图 4 锆石 U-Pb 年龄谐和曲线图

Fig.4 U-Pb concordia diagrams of zircons

a. 西台子岩体;b. 金厂沟梁岩体;c. 小西沟岩体;d. 西对面沟岩体

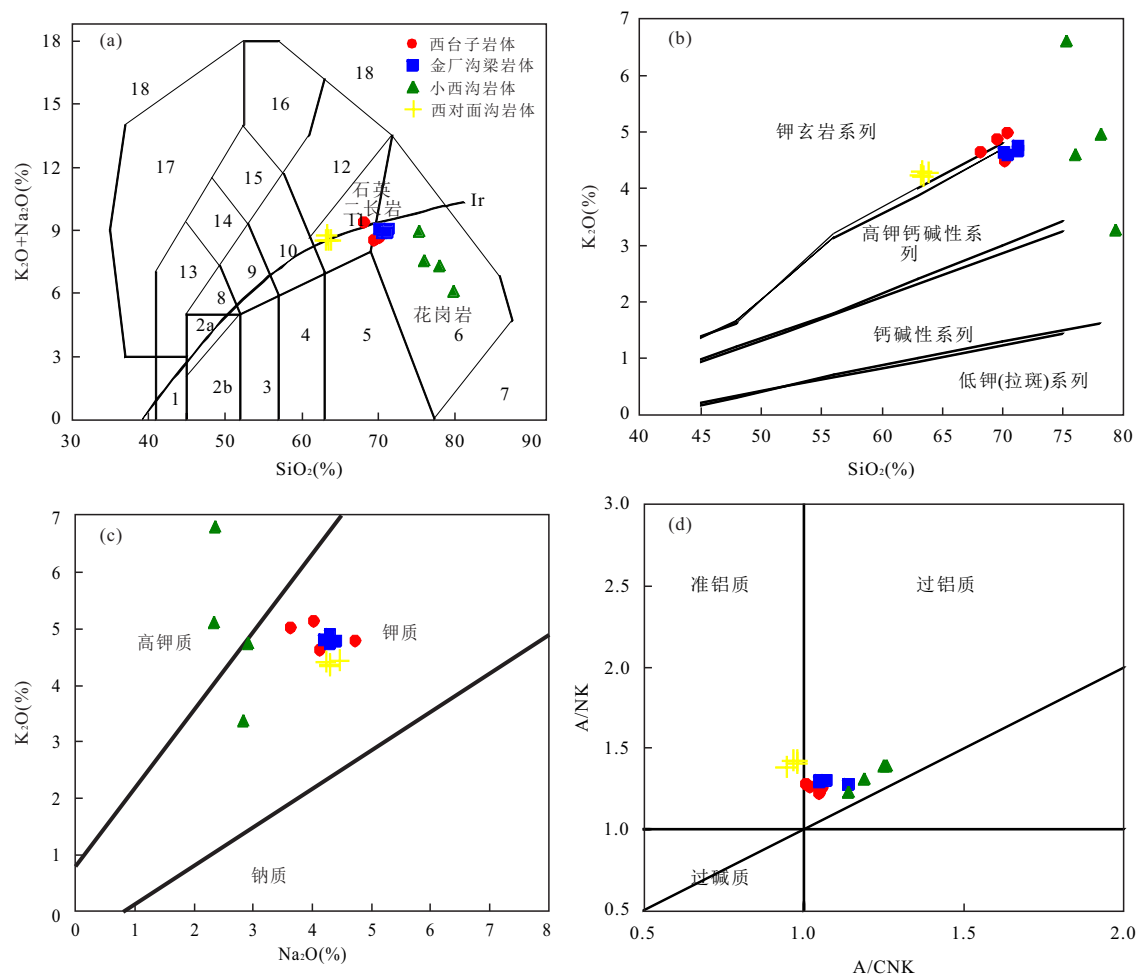


图 5 金厂沟梁花岗岩类 SiO_2 -($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)图解 (a); SiO_2 - K_2O 图解 (b); Na_2O - K_2O 图解 (c); A/CNK - A/NK 图解 (d)
 Fig.5 Plots of total alkali versus SiO_2 (TAS) (a), SiO_2 versus K_2O (b), Na_2O versus K_2O (c) and A/CNK versus A/NK (d)
 图 a 据 Irvine and Baragar(1971); 图 b 据 Pecerillo and Taylor(1976); 图 d 据 Maniar and Piccoli(1989)

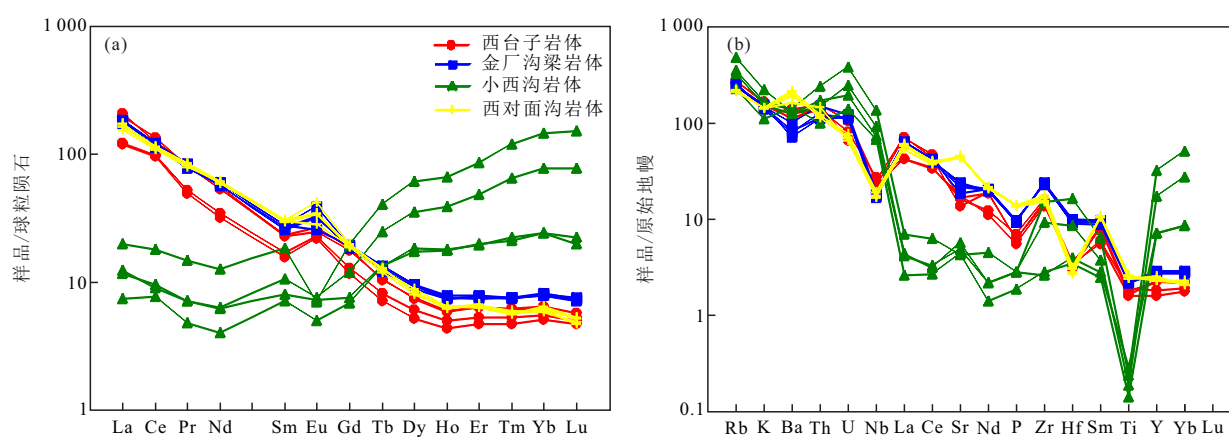


图 6 金厂沟梁花岗岩类球粒陨石标准化稀土元素配分图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)
 Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagram (b) for granitoids in Jinchanggouliang
 图 a 据 Boynton(1984); 图 b 据 Sun and McDonough(1989)

系列(图 5b),在 $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}$ 图解上,投点均落入钾质范围内(图 5c),在 $\text{A/CNK}-\text{A/NK}$ 图解上,投点均落入准铝质范围内(图 5d).西对面沟石英二长岩稀土含量为 $154.29 \times 10^{-6} \sim 164.54 \times 10^{-6}$, LREE/HREE 比值为 $15.58 \sim 16.42$, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 比值为 $26.28 \sim 27.41$,具有右倾的球粒陨石标准化配分曲线(图 6a),具有弱的 Eu 正异常($\delta\text{Eu}=1.13 \sim 1.68$).在微量元素原始地幔标准化蛛网图上(图 6b),样品亏损 Nb、Hf、Ti 等元素,富集 Ba、Sr、Sm 等元素.

3.3 锆石 Hf 同位素特征

在锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年的基础上,对金厂沟梁地区花岗岩类进行了锆石微区 Lu-Hf 同位素分析,结果列于附表 3.

西台子二长花岗岩 9 个点的锆石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于 $0.000\ 931 \sim 0.003\ 63$, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于 $0.282\ 416 \sim 0.282\ 567$,单阶段 Hf 模式年龄(T_{DM1})为 $1\ 020 \sim 1\ 195\ \text{Ma}$,两阶段 Hf 模式年龄(T_{DM2})为 $1\ 950 \sim 2\ 399\ \text{Ma}$, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 变化于 $-8.0 \sim -3.0$.

金厂沟梁二长花岗岩 9 个点的锆石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于 $0.000\ 762 \sim 0.001\ 557$, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于 $0.282\ 476 \sim 0.282\ 573$,单阶段 Hf 模式年龄(T_{DM1})为 $976 \sim 1\ 105\ \text{Ma}$,两阶段 Hf 模式年龄(T_{DM2})为 $1\ 898 \sim 2\ 196\ \text{Ma}$, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 变化在 $-5.7 \sim -2.3$.

小西沟正长花岗岩 9 个点的锆石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于 $0.001\ 131 \sim 0.002\ 104$, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于 $0.282\ 467 \sim 0.282\ 555$,单阶段 Hf 模式年龄(T_{DM1})为 $1\ 018 \sim 1\ 135\ \text{Ma}$,两阶段 Hf 模式年龄(T_{DM2})为 $2\ 038 \sim 2\ 314\ \text{Ma}$, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 变化在 $-7.4 \sim -4.4$.

西对面沟石英二长岩 9 个点的锆石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于 $0.000\ 786 \sim 0.001\ 760$, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于 $0.282\ 374 \sim 0.282\ 401$,单阶段 Hf 模式年龄(T_{DM1})为 $1\ 201 \sim 1\ 267\ \text{Ma}$,两阶段 Hf 模式年龄(T_{DM2})为 $2\ 562 \sim 2\ 649\ \text{Ma}$, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 变化在 $-11.4 \sim -10.4$.

4 讨论

4.1 岩浆岩侵入时代

本次研究采用 LA-ICP-MS 方法分别获得金厂沟梁地区西台子二长花岗岩、金厂沟梁二长花岗岩、小西沟正长花岗岩以及西对面沟石英二长岩的锆石 U-Pb 年龄分别为 $220.5 \pm 2.1\ \text{Ma}$ 、 $225.5 \pm 1.7\ \text{Ma}$ 、 $162.5 \pm 1.6\ \text{Ma}$ 和 $128.2 \pm 1.1\ \text{Ma}$.可见金厂沟梁地区存在晚三叠世、中晚侏罗世以及早白垩世多期中酸性侵入岩浆作用.

结合本文及前人研究成果,研究区多期岩浆活动并非孤立的岩浆事件,在赤峰地区也广泛发育晚三叠世、中晚侏罗世以及早白垩世中酸性侵入岩浆活动的记录.其中晚三叠世岩体包括八家子岩体的二长花岗岩($232\ \text{Ma}$,陈井胜,2018)、江沟山二长花岗岩($234\ \text{Ma}$,宋维民等,2010)和爱林沟岩体斑状二长花岗岩($230\ \text{Ma}$, $227\ \text{Ma}$,张金英,2013);中晚侏罗世岩体包括朝阳沟片麻状花岗岩($150\ \text{Ma}$,王彦斌等,2010);早白垩世岩体包括莫里海沟闪长岩($127\ \text{Ma}$,王彦斌等,2010)、阿贵浑德伦花岗岩($130\ \text{Ma}$,徐巧等,2017)和安家营子花岗岩($132\ \text{Ma}$,李永刚等,2003).上述数据进一步表明,赤峰地区晚三叠世、中晚侏罗世以及早白垩世中酸性侵入岩浆作用集中于 $220 \sim 232\ \text{Ma}$ 、 $150 \sim 162\ \text{Ma}$ 和 $128 \sim 132\ \text{Ma}$.

4.2 岩石成因及岩浆源区

西台子二长花岗岩、金厂沟梁二长花岗岩的 $10\ 000\ \text{Ga}/\text{Al}$ 分别为 $2.20 \sim 2.48$ 、 $2.11 \sim 2.29$,大部分低于 A 型花岗岩的下限; $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}$ 较小,分别为 $2.00 \sim 2.52$ 、 $1.41 \sim 1.78$; Al_2O_3 较高,分别为 $14.36\% \sim 16.02\%$ 、 $15.47\% \sim 15.95\%$,有别于 A 型花岗岩显著富铁贫铝的特征; K_2O 的含量分别为 $4.48\% \sim 4.98\%$ 、 $4.60\% \sim 4.76\%$,均大于 1.1% ,可以排除 M 型花岗岩的范围;在 $\text{Ce}-10\ 000\ \text{Ga}/\text{Al}$ 、 $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})-10\ 000\ \text{Ga}/\text{Al}$ 图解(图 7a, 7b)中,大部分样品均落在 I 型、S 型和 M 型花岗岩区或 I 型与 A 型过渡区域.磷灰石在 I 型和 S 型花岗岩浆中的不同行为被成功用于分区 I 型和 S 型花岗岩(Chappell, 1999; Wu, 2003).在准铝质—弱过铝质 I 型花岗岩中,磷灰石的溶解度很低,并在岩浆分异过程中随 SiO_2 的增加而降低;而在过铝质 S 型花岗岩中,磷灰石溶解度变化趋势正与此相反.西台子岩体、金厂沟梁岩体为准铝质—弱过铝质(大部分 $\text{A/CNK} < 1.1$),并且 SiO_2 与 P_2O_5 具有显著的负相关关系(图 8c, 8f),与 I 型花岗岩演化趋势一致.与此同时,两个岩体相对富集轻稀土元素且 LREE/HREE 比值分别介于 $16.72 \sim 19.38$ 和 $15.05 \sim 15.91$,轻重稀土分异明显,具有强烈的正 Eu 异常,相对富集大离子亲石元素 Rb、Th、U、K 和高场强 Zr 等元素,相对亏损 Ba、P、Ti 等元素,同样具有 I 型花岗岩的特征.结合岩石薄片未见 S 型花岗岩的标志矿物(如堇青石、白云母),但可见角闪石等矿物,认为西台子岩体、金厂沟梁岩体属于 I 型花岗岩.

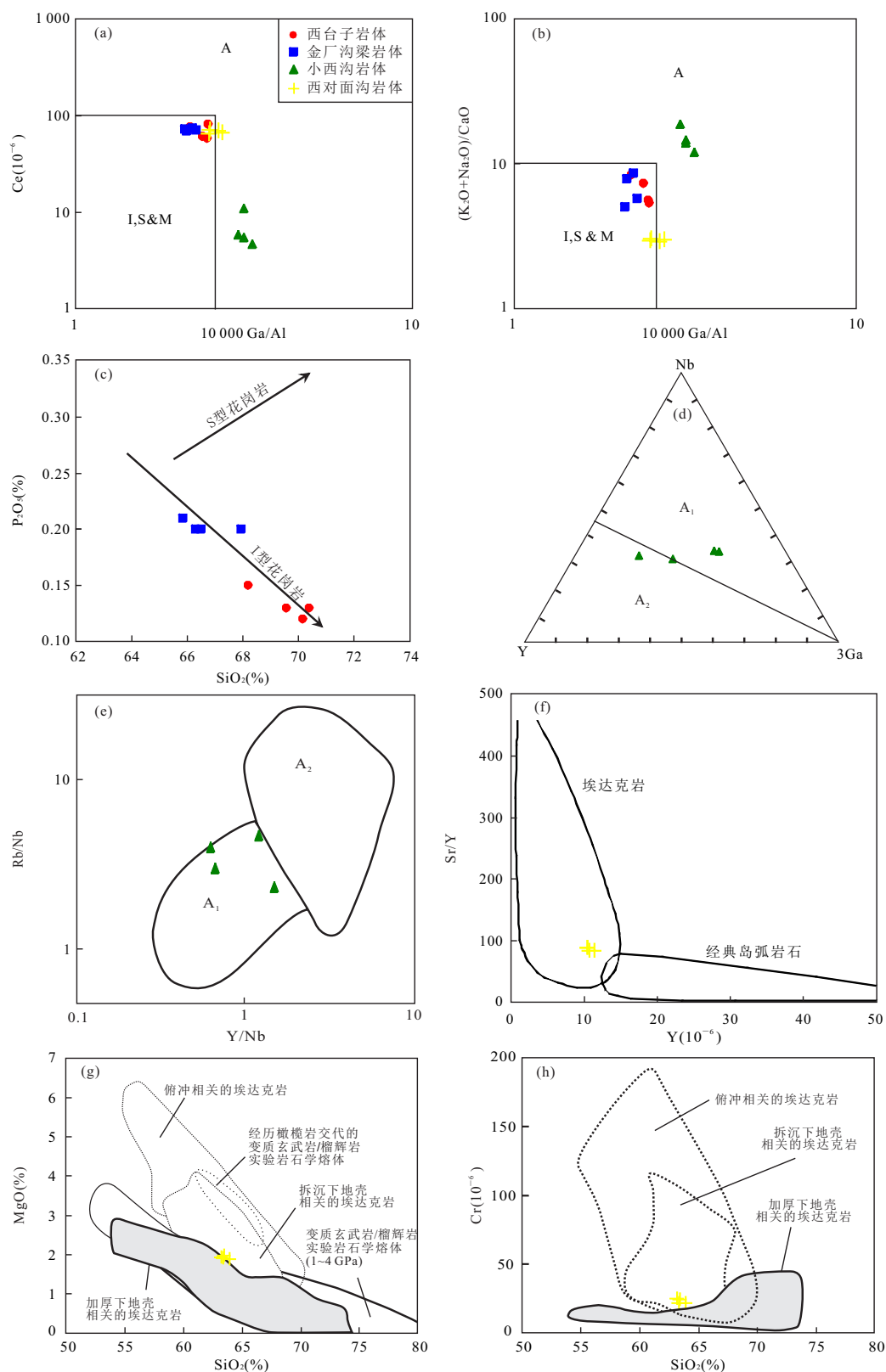


图7 金厂沟梁地区花岗岩成因类型判别图解

Fig.7 Genitic type discrimination diagrams for granites in Jinchanggouliang area

A, I, S, M 分别代表 A 型, I 型, S 型, M 型花岗岩; A₁: 大陆板内/裂谷环境; A₂: 造山后环境; 底图 a, b 据 Whalen *et al.* (1987); 底图 c 据 Chap-pell and White (1992); 底图 d, e 据 Eby (1992)

小西沟正长花岗岩主量元素以高硅($\text{SiO}_2=75.28\%\sim79.85\%$)、富碱($\text{K}_2\text{O}=3.27\%\sim6.96\%$, $\text{Na}_2\text{O}=2.34\%\sim2.92\%$)、低铝($\text{Al}_2\text{O}_3=11.41\%\sim13.57\%$)为特征;具有弱的Eu负异常;富集Rb、U、Th、Y等元素,明显亏损Ba、Ti、Sr等元素,10 000 Ga/Al介于3.05~3.36,均大于2.6,上述岩石地球化学特点表明其属于A型花岗岩(Eby, 1992; Whalen *et al.*, 1987; 张旗, 2013),同时在一系列判别图解(图7a~7b, 7d~7e)中也得到了印证,显示A₁型花岗岩的特征。

西对面沟石英二长岩具有高 SiO_2 (63.20%~63.90%, $\geq 56\%$)、高 Al_2O_3 (16.38%~16.57%, $\geq 15\%$)、高 K_2O (4.22%~4.30%, $> 3.9\%$)、高Sr($909\times 10^{-6}\sim 963\times 10^{-6}$, $> 400\times 10^{-6}$)、高Sr/Y比值(84.64~88.65, $> 20\sim 40$),具有较低的Y($10.38\times 10^{-6}\sim 11.34\times 10^{-6}$, $< 18\times 10^{-6}$)和Yb($1.00\times 10^{-6}\sim 1.10\times 10^{-6}$, $< 1.9\times 10^{-6}$)含量,并且具有富集轻稀土元素、亏损重稀土元素等特征,具有C型埃达克质岩石的特征(图7f),在判别图解(图7g, 7h)中,所有数据点落在加厚下地壳相关的埃达克岩与拆沉下地壳相关的埃达克岩交界部位,由于研究区并未广泛发育同时期基性岩石,且石英二长岩中暗色包体不发育,认为西对面沟石英二长岩为与加厚下地壳相关的埃达克质岩石。

西台子二长花岗岩、金厂沟梁二长花岗岩、小西沟正长花岗岩以及西对面沟石英二长岩中锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 变化范围分别为-8.0~-3.0、-5.7~-2.3、-7.3~-4.4、-11.4~-10.4,两阶段Hf同位素模式年龄($T_{\text{DM}2}$)变化范围分别在1 950~2 399 Ma、1 898~2 196 Ma、2 028~2 314 Ma及2 562~2 649 Ma,具有古元古代—新太古代的两阶段Hf同位素模式年龄(1.9~2.7 Ga)。其中西台子二长花岗岩、金厂沟梁二长花岗岩具有相近的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值及两阶段模式年龄,暗示两者具有相同的岩浆来源。锆石Hf两阶段模式年龄可反映其源区物质从亏损地幔被抽取的地壳平均存留年龄,也就是地壳生长的时间(Nebel *et al.*, 2007)。在 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t 图解(图8)上,锆石Hf同位素均分布于亏损地幔演化线之下,位于元古宙地壳演化范围内,说明岩浆源于古老地壳物质的再熔融。此外,西台子二长花岗岩、金厂沟梁二长花岗岩、小西沟正长花岗岩与西对面沟石英二长岩相比, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值明显偏高一些,Hf同位素模式年龄也年轻一些,表明有更多新生物质的参与。显然,岩性、

形成时代不尽相同的4个样品的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值主要为负值,这一现象揭示了其源区可能主要与古老地壳物质的再循环有关,锆石Hf同位素数据显示其时代为古元古代—新太古代(1.9~2.7 Ga),表明他们可能主要来源于华北克拉通古老地壳物质的部分熔融。

4.3 成岩动力学背景

研究区地处华北克拉通北缘,自古生代以来是一个至少经历了古亚洲洋、蒙古—鄂霍茨克海构造域演化等地质事件叠加的复合构造区。在古亚洲洋演化阶段,华北板块和西伯利亚板块在晚古生代已经发生碰撞,因此华北克拉通北缘在印支期是一种晚造山或造山后的构造环境(苗来成, 2003)。本次研究的西台子二长花岗岩以及金厂沟梁二长花岗岩均具有后碰撞花岗岩的特点(图9)。赤峰地区八家子二长花岗岩(232 Ma),江沟山二长花岗岩(234 Ma, 宋维民等, 2010),爱林沟二长花岗岩(230 Ma, 227 Ma, 张金英, 2013),金厂沟梁地区中酸性脉岩(228 Ma, 付乐兵等, 2010)的地球化学特征同样显示为造山晚期和造山后花岗岩岩石组合(陈井胜, 2018)。除此之外,华北板块北缘晚三叠世岩浆活动强烈,内蒙古中东部地区的高钾钙碱性花岗岩形成时代处于235~222 Ma(Yang *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2014);华北板块北缘东部吉林—延边地区花岗岩形成时代处于235~224 Ma(Jiang *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2012; 刘锦等, 2016),晚三叠世碱性杂岩带沿华北板块北缘分布呈带状近东西向分布,侵位时间处于233~216 Ma(刘锦等, 2016)。因此,上述印支期花岗岩可能就是在这种造山后的拉张环境下地壳物质的部分熔融形成的。华北板块北缘晚三叠世火成岩岩石组合具有“双峰式火山岩”岩石组合及碱性杂岩的特征,类似于上述造山后拉张环境的岩石组合(陈井胜, 2018)。从空间分布情况来看,晚三叠世火成岩多呈带状近东西向分布于华北板块北缘与兴蒙造山带接触位置(Wu *et al.*, 2004),显示其应该与古亚洲闭合后的伸展作用有关。研究区大面积的三叠世—早侏罗世花岗岩的侵入同样是西伯利亚与华北板块碰撞后地壳伸展的记录。

中侏罗世蒙古—鄂霍茨克海闭合进入陆内造山阶段,西伯利亚板块的持续南向运动导致了自北向南的地壳增厚,在冀北—辽西地区海房沟组之下存在一个区域性的自北向南的逆冲断裂,时间约为170 Ma左右(Zhang *et al.*, 2011),表明中侏罗世陆

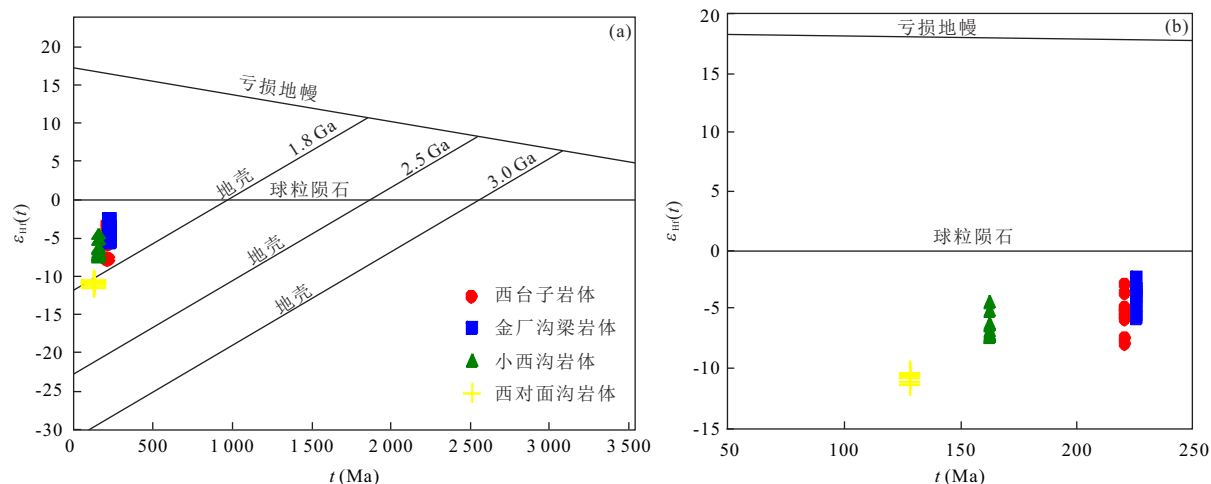
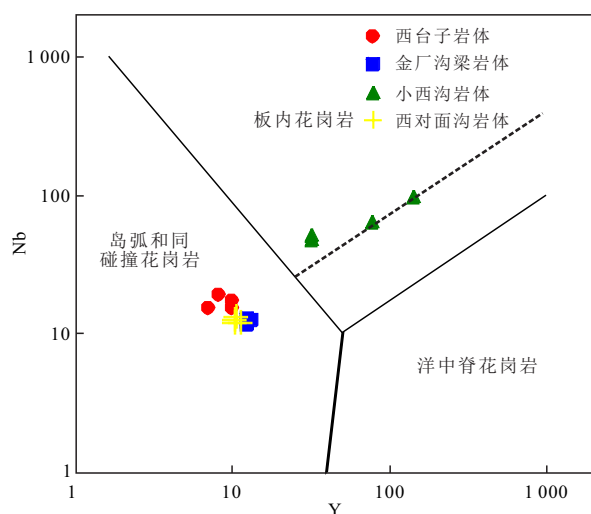
图 8 金厂沟梁地区花岗岩类锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t 图解Fig.8 Diagrams of zircon $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t of granitoids in Jinchanggouliang area

图 9 赤峰地区花岗岩类构造环境判别图解

Fig. 9 Discrimination diagram for tectonic settings from Chifeng granitoids

据 Pearce *et al.* (1984)

壳加厚事件的存在(赵越等, 2004; 李宇等, 2015). 地壳增厚使岩石圈或下地壳拆沉进而诱发了华北克拉通伸展减薄与破坏(高山等, 2009), 中侏罗世—晚侏罗世期间的岩浆活动即发育在伸展构造背景之下(王彦斌等, 2010; Qiu and Deng, 2017; Qiu *et al.*, 2019), 小西沟正长花岗岩(162.5 Ma)即为该时期岩浆活动的产物. 早白垩世研究区处于中国东部岩石圈在伸展体制下大规模的减薄背景之下, 岩石圈的减薄在 145~120 Ma 达到最大程度(Yang *et al.*, 2019), 地壳在减薄过程中由于渐进性和区域不均衡性, 会导致局部地段的地壳加厚, 西对面沟石英闪长岩(128.2 Ma)即产出在此背景下.

5 结论

(1) 金厂沟梁地区西台子二长花岗岩、金厂沟梁二长花岗岩、小西沟正长花岗岩以及西对面沟石英二长岩的锆石 U-Pb 年龄分别为 220.5 ± 2.1 Ma、 225.5 ± 1.7 Ma、 162.5 ± 1.6 Ma 和 128.2 ± 1.1 Ma.

(2) 岩石地球化学及锆石 Hf 同位素特征表明, 西台子二长花岗岩、金厂沟梁二长花岗岩具有 I 型花岗岩的特征, 小西沟正长花岗岩具有 A_1 型花岗岩的特征, 西对面沟石英二长岩具有 C 型埃达克质岩石的特征, 其源区均可能来源于华北克拉通古老地壳物质的部分熔融.

(3) 西台子岩体、金厂沟梁岩体形成于古亚洲洋闭合后地壳伸展的动力学背景之下, 小西沟岩体形成于蒙古—鄂霍茨克海闭合后的伸展构造背景之下, 西对面沟岩体形成于地壳减薄过程中局部加厚的构造背景之下.

附表见本刊官网(<http://www.earth-science.net>).

References

- Amelin, Y., Lee, D. C., Halliday, A. N., 2000. Early-Middle Archaean Crustal Evolution Deduced from Lu-Hf and U-Pb Isotopic Studies of Single Zircon Grains. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(24): 4205–4225. [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(00\)00493-2](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(00)00493-2)
- Boynton, W. V., 1984. Geochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies. In: Henderson, P., ed., *Rare Earth Element Geochemistry*. Elsevier, Amsterdam,

- 63—114.
- Chappell, B. W., 1999. Aluminium Saturation in I⁻ and S⁻ Type Granites and the Characterization of Fractionated Haplogranites. *Lithos*, 46(3): 535—551. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(98\)00086-3](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(98)00086-3)
- Chappell, B. W., White, A. J. R., 1992. I⁻ and S⁻ Type Granites in the Lachlan Fold Belt. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 83(1—2): 1—26. <https://doi.org/10.1017/s0263593300007720>
- Chen, J. Q., Sun, J. G., Piao, S. C., et al., 2005. Genesis and Significance of Dark Dikes in the Jinchanggouliang Mine Area, Inner Mongolia: Evidences from Geochemistry of the Major and Trace Elements. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 35(6): 707—713 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J. S., 2018. Petrogenesis of the Late Paleozoic to Early Mesozoic Granitic from the Chifeng Region and Their Tectonic Implication (Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese with English abstract).
- Ding, S., Tang, J. X., Zheng, W. B., et al., 2017. Geochronology and Geochemistry of Naruo Porphyry Cu (Au) Deposit in Duolong Ore-Concentrated Area, Tibet, and Their Geological Significance. *Earth Science*, 42(1): 1—23 (in Chinese with English abstract).
- Duan, P. X., Li, C. M., Liu, C., et al., 2014. Geochronology and Geochemistry of the Granites from the Jinchanggouliang Gold Deposit Area in the Inner Mongolia and Its Geological Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 30(11): 3189—3202 (in Chinese with English abstract).
- Eby, G. N., 1992. Chemical Subdivision of the A-Type Granitoids: Petrogenetic and Tectonic Implications. *Geology*, 20(7): 641. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1992\)020<0641:csotat>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1992)020<0641:csotat>2.3.co;2)
- Fu, L. B., Wei, J. H., Wei, Q. R., et al., 2010. Petrogenesis and Geodynamic Setting of Late Triassic Dykes of Jinchanggouliang, Eastern Inner Mongolia. *Earth Science*, 35(6): 933—946 (in Chinese with English abstract).
- Gao, S., Zhang, J. F., Xu, W. L., et al., 2009. Delamination and Destruction of the North China Craton. *Chinese Science Bulletin*, 54(14): 1962—1973 (in Chinese).
- Geng, J. Z., Qiu, K. F., Gou, Z. Y., et al., 2017. Tectonic Regime Switchover of Triassic Western Qinling Orogen: Constraints from LA-ICP-MS Zircon U-Pb Geochronology and Lu-Hf Isotope of Danchuan Intrusive Complex in Gansu, China. *Geochemistry*, 77(4): 637—651. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2017.05.001>
- Griffin, W. L., Pearson, N. J., Belousova, E., et al., 2000. The Hf Isotope Composition of Cratonic Mantle: LAM-MC-ICPMS Analysis of Zircon Megacrysts in Kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133—147. [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(99\)00343-9](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(99)00343-9)
- Hou, W. R., 2013. Contrast study on the Hadamengou Gold Deposit and Jinchanggouliang Gold Deposit, Inner Mongolia (Dissertation). Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Irvine, T. N., Baragar, W. R. A., 1971. A Guide to the Chemical Classification of the Common Volcanic Rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(5): 523—548. <https://doi.org/10.1139/e71-055>
- Jiang, N., Liu, Y. S., Zhou, W. G., et al., 2007. Derivation of Mesozoic Adakitic Magmas from Ancient Lower Crust in the North China Craton. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(10): 2591—2608. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2007.02.018>
- Li, Y., Ding, L. L., Xu, W. L., et al., 2015. Geochronology and Geochemistry of Muscovite Granite in Sunwu Area, NE China: Implications for the Timing of Closure of the Mongol-Okhotsk Ocean. *Acta Petrologica Sinica*, 31(1): 56—66 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. G., Zhai, M. G., Miao, L. C., et al., 2003. Relationship between Intrusive Rocks and Gold Mineralization of the Anjiayingzi Gold Deposit, Inner Mongolia and Its Implications for Geodynamics. *Acta Petrologica Sinica*, 19(4): 808—816 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H. T., Zhai, M. G., Liu, J. M., et al., 2002. The Mesozoic Granitoids in the Northern Marginal Region of North China Craton: Evolution from Post-Collisional to Anorogenic Settings. *Acta Petrologica Sinica*, 18(4): 433—448 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J., Liu, Z. H., Li, S. C., et al., 2016. Geochronology and Geochemistry of Triassic Intrusive Rocks in Kaiyuan Area of the Eastern Section of the Northern Margin of North China. *Acta Petrologica Sinica*, 32(9): 2739—2756 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig, K. R., 2003. Isoplot 3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, Berkeley.
- Maniar, P. D., Piccoli, P. M., 1989. Tectonic Discrimination of Granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635—643. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1989\)101<0635:tdog>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1989)101<0635:tdog>2.3.co;2)
- Miao, L. C., Fan, W. M., Zhai, M. G., et al., 2003. Zircon SHRIMP U-Pb Geochronology of the Granitoid Intrusive

- sions from Jinchanggouliang - Erdaogou Gold Orefield and Its Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 19(1): 71—80 (in Chinese with English abstract).
- Nebel, O., Nebel-Jacobsen, Y., Mezger, K., et al., 2007. Initial Hf Isotope Compositions in Magmatic Zircon from Early Proterozoic Rocks from the Gawler Craton, Australia: A Test for Zircon Model Ages. *Chemical Geology*, 241(1—2): 23—37. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.02.008>
- Nowell, G. M., Kempton, P. D., Noble, S. R., et al., 1998. High Precision Hf Isotope Measurements of MORB and OIB by Thermal Ionisation Mass Spectrometry: Insights into the Depleted Mantle. *Chemical Geology*, 149(3—4): 211—233. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(98\)00036-9](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(98)00036-9)
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W., Tindle, A. G., 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956—983. <https://doi.org/10.1093/petrology/25.4.956>
- Peccerillo, A., Taylor, S. R., 1976. Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63—81. <https://doi.org/10.1007/bf00384745>
- Qiu, K. F., Deng, J., 2017. Petrogenesis of Granitoids in the Dewulu Skarn Copper Deposit: Implications for the Evolution of the Paleotethys Ocean and Mineralization in Western Qinling, China. *Ore Geology Reviews*, 90: 1078—1098. <https://doi.org/10.13039/501100004613>
- Qiu, K. F., Yu, H. C., Wu, M. Q., et al., 2019. Discrete Zr and REE Mineralization of the Baerzhe Rare-Metal Deposit, China. *American Mineralogist*. <https://doi.org/10.2138/am-2019-6890>
- Scherer, E., 2001. Calibration of the Lutetium - Hafnium Clock. *Science*, 293(5530): 683—687. <https://doi.org/10.1126/science.1061372>
- Song, W. M., Bian, X. F., Xing, D. H., et al., 2010. U-Pb Zircon Geochronology and Geochemistry of Jianggoushan Intrusion in Beipiao Area, Liaoning, China. *Geology and Resources*, 19(4): 339—345 (in Chinese with English abstract).
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313—345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Wang, J. P., Liu, Y. S., Dong, F. X., et al., 1992. Structural Ore-Control Analysis of Jinchanggouliang Gold Deposit in Inner Mongolia. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Wang, Y. B., Han, J., Li, J. B., et al., 2010. Age, Petrogenesis and Geological Significance of the Deformed Granitoids in the Louzidian Metamorphic Core Complex, Southern Chifeng, Inner Mongolia: Evidence from Zircon U-Pb Dates and Hf Isotopes. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(6): 763—778 (in Chinese with English abstract).
- Whalen, J. B., Currie, K. L., Chappell, B. W., 1987. A-Type Granites: Geochemical Characteristics, Discrimination and Petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407—419. <https://doi.org/10.1007/bf00402202>
- Wu, F., 2003. Highly Fractionated I-Type Granites in NE China (I): Geochronology and Petrogenesis. *Lithos*, 66(3—4): 241—273. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(02\)00222-0](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(02)00222-0)
- Wu, F. Y., Wilde, S. A., Zhang, G. L., et al., 2004. Geochronology and Petrogenesis of the Post-Orogenic Cu-Ni Sulfide-Bearing Mafic-Ultramafic Complexes in Jilin Province, NE China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 781—797. [https://doi.org/10.1016/S1367-9120\(03\)00114-7](https://doi.org/10.1016/S1367-9120(03)00114-7)
- Xiong, L., Shi, W. J., Li, H., et al., 2017. Geochemistry, Sr-Nd-Hf Isotopes and Petrogenesis of Mid-Late Triassic Baizhangzi Granitic Intrusive Rocks in Eastern Hebei - Western Liaoning Province. *Earth Science*, 42(2): 207—222 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Q., Sun, H. J., Zhu, X. Y., et al., 2017. Chronology and Geochemistry of the Granites in Aguihundun Lead-Zinc Deposit, Inner Mongolia. *Mineral Exploration*, 8(6): 957—966 (in Chinese with English abstract).
- Yang, F., Sun, J. G., Wang, Y., et al., 2019. Geology, Geochronology and Geochemistry of Weilasituo Sn-Polymetallic Deposit in Inner Mongolia, China. *Minerals*, 9(2): 104. <https://doi.org/10.3390/min9020104>
- Yang, J. H., Sun, J. F., Zhang, J. H., et al., 2012. Petrogenesis of Late Triassic Intrusive Rocks in the Northern Liaodong Peninsula Related to Decratonization of the North China Craton: Zircon U-Pb Age and Hf-O Isotope Evidence. *Lithos*, 153: 108—128. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.06.023>
- Yu, H. C., Guo, C. A., Qiu, K. F., et al., 2019. Geochronological and Geochemical Constraints on the Formation of

- the Giant Zaozigou Au-Sb Deposit, West Qinling, China. *Minerals*, 9(1): 37. <https://doi.org/10.13039/501100001809>
- Zhang, C. H., Li, C. M., Deng, H. L., et al., 2011. Mesozoic Contraction Deformation in the Yanshan and Northern Taihang Mountains and Its Implications to the Destruction of the North China Craton. *Science China Earth Sciences*, 54(6): 798–822. <https://doi.org/10.1007/s11430-011-4180-7>
- Zhang, J. Y., 2013. Petrologic Characteristics and Chronology of the Ailingou Pluton in Jiefangyingzi, Neimenggu (Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., 2013. The Criteria and Discrimination for A-Type Granites: A Reply to the Question Put forward by Wang Yang and Some Other Persons for “A-Type Granite: What is the Essence?”. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 32(2): 267–274 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. H., Zhao, Y., Davis, G. A., et al., 2014. Temporal and Spatial Variations of Mesozoic Magmatism and Deformation in the North China Craton: Implications for Lithospheric Thinning and Decratonization. *Earth Science Reviews*, 131: 49–87. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.12.004>
- Zhang, S. H., Zhao, Y., Ye, H., et al., 2012. Early Mesozoic Alkaline Complexes in the Northern North China Craton: Implications for Cratonic Lithospheric Destruction. *Lithos*, 155: 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.08.009>
- Zhao, Y., Xu, G., Zhang, S. H., et al., 2004. Yanshanian Movement and Conversion of Tectonic Regimes in East Asia. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 319–328 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 陈井胜, 2018. 赤峰地区晚古生代—早中生代花岗岩成因及其构造意义(博士学位论文). 长春: 吉林大学.
- 陈军强, 孙景贵, 朴寿成, 等, 2005. 金厂沟梁金矿区暗色脉岩的成因和意义: 主要和微量元素地球化学证据. 吉林大学学报(地球科学版), 35(6): 707–713.
- 丁帅, 唐菊兴, 郑文宝, 等, 2017. 西藏拿若斑岩型铜(金)矿含矿岩体年代学、地球化学及地质意义. 地球科学, 42(1): 1–23.
- 段培新, 李长民, 刘翠, 等, 2014. 内蒙古赤峰金厂沟梁金矿区花岗岩类年代学、地球化学特征及其地质意义. 岩石学报, 30(11): 3189–3202.
- 付乐兵, 魏俊浩, 魏启荣, 等, 2010. 内蒙古金厂沟梁地区晚三叠世脉岩地球化学特征及成岩动力学背景. 地球科学, 35(6): 933–946.
- 高山, 章军锋, 许文良, 等, 2009. 拆沉作用与华北克拉通破坏. 科学通报, 54(14): 1962–1973.
- 侯万荣, 2011. 内蒙古哈达门沟金矿床与金厂沟梁金矿床对比研究(博士学位论文). 北京: 中国地质科学院.
- 李永刚, 翟明国, 苗来成, 等, 2003. 内蒙古安家营子金矿与侵入岩的关系及其地球动力学意义. 岩石学报, 19(4): 808–816.
- 李宇, 丁磊磊, 许文良, 等, 2015. 孙吴地区中侏罗世白云母花岗岩的年代学与地球化学: 对蒙古—鄂霍茨克洋闭合时间的限定. 岩石学报, 31(1): 56–66.
- 刘红涛, 翟明国, 刘建明, 等, 2002. 华北克拉通北缘中生代花岗岩: 从碰撞后到非造山. 岩石学报, 18(4): 433–448.
- 刘锦, 刘正宏, 李世超, 等, 2016. 华南北缘东段开原地区三叠纪侵入岩年代学及岩石地球化学研究. 岩石学报, 32(9): 2739–2756.
- 苗来成, 范蔚茗, 翟明国, 等, 2003. 金厂沟梁—二道沟金矿田内花岗岩类侵入体锆石的离子探针 U-Pb 年代学及意义. 岩石学报, 19(1): 71–80.
- 宋维民, 卞雄飞, 邢德和, 等, 2010. 辽宁北票地区江沟山岩体锆石 U-Pb 年代学和地球化学. 地质与资源, 19(4): 339–345.
- 王建平, 刘永山, 董法先, 等, 1992. 内蒙古金厂沟梁金矿构造控矿分析. 北京: 地质出版社.
- 王彦斌, 韩娟, 李建波, 等, 2010. 内蒙赤峰楼子店拆离断层带下盘变形花岗岩岩石的时代、成因及其地质意义——锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素证据. 岩石矿物学杂志, 29(6): 763–778.
- 熊乐, 石文杰, 李欢, 等, 2017. 冀东—辽西中—晚三叠世柏杖子花岗岩质侵入岩地球化学、Sr-Nd-Hf 同位素特征及岩石成因. 地球科学, 42(2): 207–222.
- 徐巧, 孙洪军, 祝新友, 等, 2017. 内蒙古阿贵浑德伦铅锌矿花岗岩类年代学及地球化学特征. 矿产勘查, 8(6): 957–966.
- 张金英, 2013. 内蒙古解放营子爱林沟岩体岩石学特征及形成时代(硕士学位论文). 长春: 吉林大学.
- 张旗, 2013. A 型花岗岩的标志和判别——兼答汪洋等对“A 型花岗岩的实质是什么”的质疑. 岩石矿物学杂志, 32(2): 267–274.
- 赵越, 徐刚, 张拴宏, 等, 2004. 燕山运动与东亚构造体制的转变. 地学前缘, 11(3): 319–328.