

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.295



华北西部贺兰山中段黄旗口花岗岩成因及地质意义

余淳梅, 杨华本, 曾佐勋, 吴林波

中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

摘要: 华北克拉通孔兹岩带内发育类型复杂的各类岩石, 是记录和反演华北西部早期块体拼合以及岩浆作用、变质演化的重要对象, 而其中段发育的出露面积广阔、岩性复杂的黄旗口花岗岩体的研究还较为薄弱。在野外地质和岩相学研究基础上, 主要报道了贺兰山中段黄旗口花岗岩的主、微量元素和 Sr-Nd 同位素组成, 对岩体的源区特征、成因及地质意义进行了探讨。黄旗口复式花岗岩体主要由早期正长花岗岩、二长花岗岩和晚期英云闪长岩组成。两期岩体具有高 K_2O (2.97%~6.71%) 含量, A/CNK 均大于 1.1, 但晚期侵入单元较早期岩石更贫硅、富铝。两期岩体都表现为轻稀土富集、Eu 负异常的特点, 且强烈富集 K、Rb、Th 等大离子亲石元素, 亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素。岩石 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 初始比值变化范围较大, 可能是后期改造的结果; $\epsilon_{Nd}(t)$ 变化在 +1.81~+4.90, 对应的 Nd 同位素模式年龄 T_{DM1} 为 2.10~2.37 Ga, T_{DM2} 为 2.10~2.35 Ga。这些特征表明黄旗口岩体为 S 型花岗岩, 可能来自该区归属于孔兹岩的赵池沟组岩系的部分熔融, 并可能有地幔岩浆的参与。结合区域变质、岩浆事件的综合研究成果, 认为黄旗口不同期次的花岗岩具有造山带花岗岩的特征, 分别形成于阴山地块和鄂尔多斯地块碰撞拼合以及造山后伸展的不同阶段。

关键词: 花岗岩; 地球化学; Sr-Nd 同位素; 岩石成因; 贺兰山黄旗口。

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2019)04-1266-12

收稿日期: 2018-04-20

Geochemistry and Significance of Paleoproterozoic Granitoids from Huangqikou, Central Helanshan Area

Yu Chunmei, Yang Huaben, Zeng Zuoxun, Wu Linbo

School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Widespread rocks in the khondalite belt record magmatism, metamorphism and tectonic evolution of the North China craton (NCC). Whereas the further research on Huangqikou granitic plutons exposed in the central Helanshan area is needed to offer information about the genetic mechanisms and the dynamic background. Based on the field geological and petrographic studies, major, trace elements and Sr-Nd isotopic compositions were carried out on the Huangqikou granitic plutons, so as to discuss their petrogenesis, source characteristics and geological significance. The early intruded Huangqikou granites consist of alkali granite and monzogranite, while the later intrusions are mainly tonalite. The Huangqikou granites display typical geochemical characteristics of S-type granite, such as high contents of K_2O (2.97%–6.71%), A/CNK > 1.1. However, the later intrusions generally show lower SiO_2 and higher Al_2O_3 relative to those early ones. All the studied granitic rocks show enriched LREE, and negative Eu anomalies. The samples generally show similar variation trend in the trace-element patterns, such as systematic enrichment of LILE (K, Rb, Th) and depletion of HFSE, e.g. Nb, Ta, P, Ti. All these geochemical features, combined with the majority of positive $\epsilon_{Nd}(t)$ (+1.81–+4.90) and Paleoproterozoic Nd model ages (T_{DM1} = 2.10–2.37 Ga, T_{DM2} = 2.10–2.35 Ga), suggest that the Huangqikou granites were mainly derived from the partial melting of the sedimentary rocks in the Zhaochigou Formation, but probably with minor mafic magma contributed from the mantle. Combined with previous regional metamorphic and magmatic studies, it is suggested that the early and later intruded granitic rocks in

基金项目: 宁夏 1:5 万黄旗口幅区调项目 (No. J48E009016); 国家自然科学基金青年基金项目 (No. 40602009); 中国地质大学 (武汉) 中央高校基本科研业务费专项资金 (No. CUG090101)。

作者简介: 余淳梅 (1977-), 博士, 副教授, 从事岩石学和矿物学的教学与研究工作。ORCID: 0000-0002-9039-7376. E-mail: chmyu@cug.edu.cn

引用格式: 余淳梅, 杨华本, 曾佐勋, 等, 2019. 华北西部贺兰山中段黄旗口花岗岩成因及地质意义. 地球科学, 44(4): 1266–1277.

the Huangqikou region belong to orogenic granitoids, and were probably formed during the collision between the Ordos and Yinshan blocks and post-collisional extension setting, respectively.

Key words: granite; geochemistry; Sr-Nd isotope; petrogenesis; Huangqikou area of Helanshan area.

早期地壳的形成和演化是前寒武纪固体地球科学研究的重要内容,岩浆作用是探究该问题的手段之一.我国华北克拉通在前寒武纪经历了复杂的、延续时间较长的多块体拼合,于 1.8 Ga 左右完成了基底的克拉通化(Zhao *et al.*, 2005).其中,在华北西部,阴山和鄂尔多斯地块拼合碰撞,形成了近东西向的孔兹岩带.孔兹岩带内发育类型复杂的各类岩石,是记录和反演华北西部早期块体拼合以及岩浆作用、变质演化的重要对象.位于该孔兹岩带西端的贺兰山地区发育较多的古元古代花岗岩.对贺兰山北段,如宗别立—牛头沟地区的花岗岩,已开展了较多的年代学、详细的地球化学和岩石成因研究(Dan *et al.*, 2012; 李正辉等, 2013; Zhang *et al.*, 2017;).然而,对中段发育的出露面积广阔、岩性复杂的黄旗口花岗岩体的研究还较为薄弱.以往针对黄旗口岩体部分岩石单元开展了少量年代学工作,获得的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 $2\ 003 \pm 10$ Ma、 $1\ 976 \pm 16$ Ma(王成等, 2012), 锆石 SIMS U-Pb 年龄为

1.95 Ga(Dan *et al.*, 2012),表明该岩体侵位于古元古代.对该岩体的成因,前人虽根据矿物化学、岩石主微量元素特征提出了重熔、原地交代作用(解国爱等, 2004)以及上地壳深熔(王成等, 2012)等认识,但更多的问题,诸如岩体的原岩性质和熔融过程、岩体形成的动力学背景以及对早期块体拼合演化的约束等,均缺乏深入的探讨.在详细的野外地质调查基础上,本文对黄旗口岩体中最重要的两个岩石单元开展了进一步的岩相学、岩石化学的研究,并较早报道了该岩体的 Sr-Nd 同位素组成,梳理了黄旗口岩体的岩性组合与相带,对岩石源区、成因及其地质意义进行了探讨,以期丰富对研究区 S 型花岗岩成因多样性的了解,增进对区域动力学演化过程的认识.

1 地质概况

黄旗口花岗岩位于贺兰山中段的南水、黄旗口、

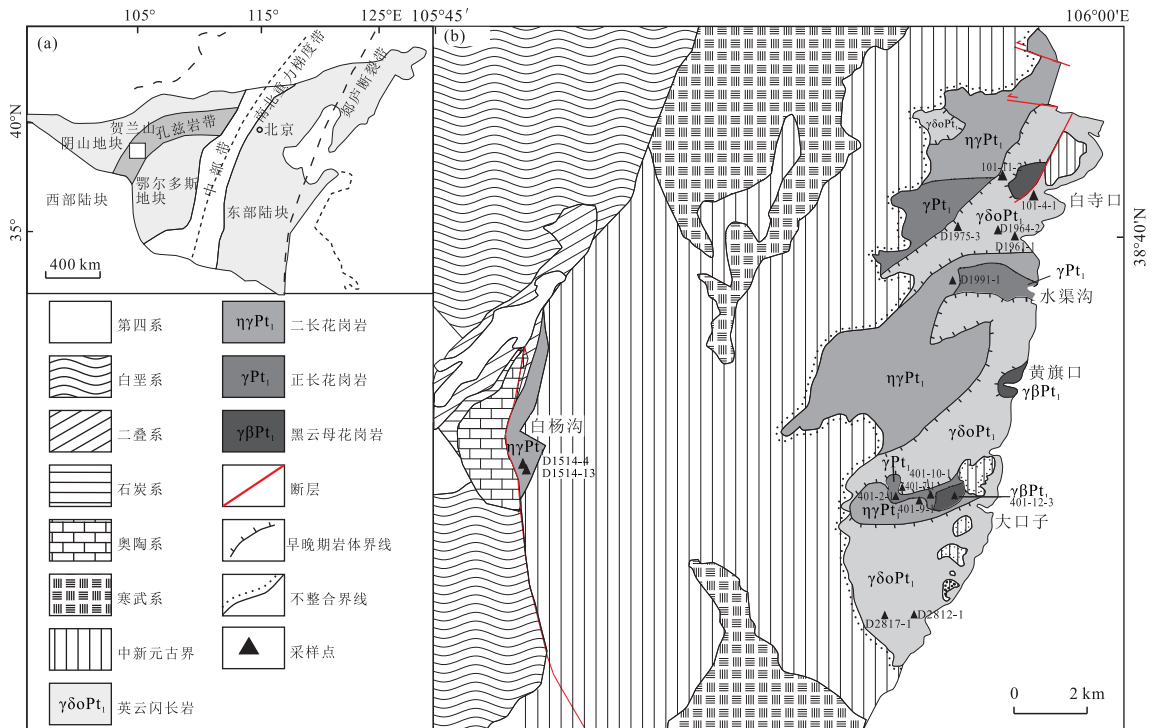


图 1 贺兰山中段黄旗口地区地质构造简图

Fig.1 Geological sketch map of Huangqikou in central Helanshan area

修改自宁夏国土资源调查监测院(2013,贺兰山中段 1:5 万区域地质调查成果报告);图 a 为华北克拉通构造单元划分简图,修改自 Zhao *et al.*(2005),其中白框所示为工作区(东经 $105^{\circ}45' \sim 106^{\circ}00'$,北纬 $38^{\circ}30' \sim 38^{\circ}40'$)

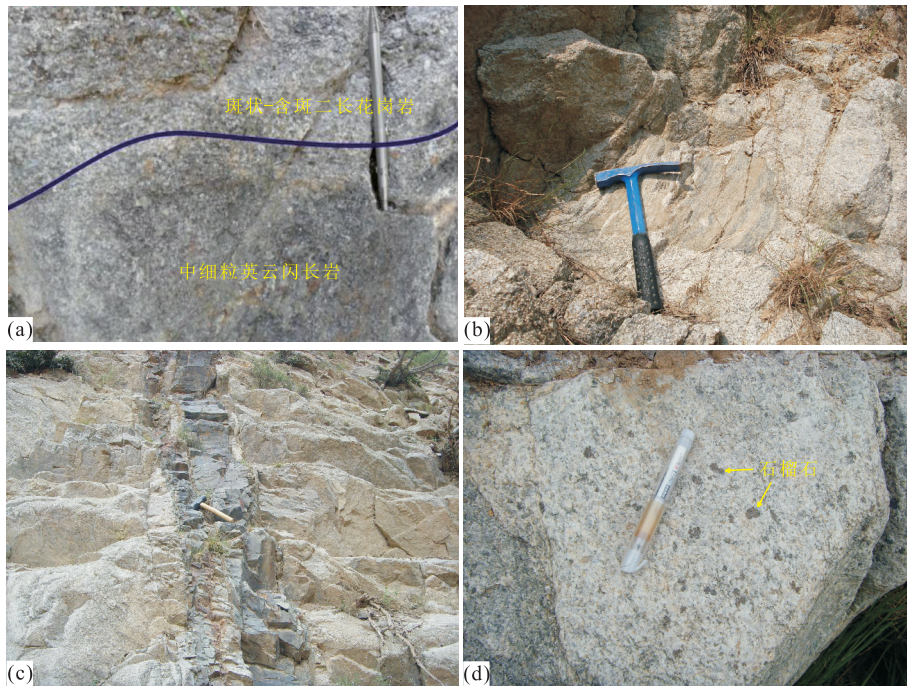


图 2 贺兰山中段黄旗口花岗岩野外特征

Fig.2 Field characteristics of the Huangqikou granites in central Helanshan

a.野外早晚两期岩体接触界线;b.黄旗口岩体中的捕掇体;c.岩体中穿插的辉绿岩脉;d.大口子沟出露的石榴石花岗岩

白寺口一带(图 1),出露面积约 81 km^2 ,呈近南北向长条形展布,北部被断层所切,东部为第四系覆盖,岩体西侧与下元古界赵池沟组呈不整合接触.野外未见该岩体与围岩的直接侵入接触.黄旗口岩体岩石类型复杂,多种类别岩石相互过渡.宁夏地质环境监测总站(2008,1:25 万宁夏区域地质调查)根据岩石结构和矿物组合,将黄旗口岩体划分为中央相、过渡相及边缘相,分别主要由英云闪长岩、花岗岩和斑状花岗岩组成.基于岩体野外接触关系、岩石结构构造和矿物组成,结合新获得的锆石 U-Pb 年龄结果(作者另文发表),本文认为黄旗口岩体是由早、晚两期花岗质岩浆侵入形成的复式岩体.其中,早期正长花岗岩和弱变形的二长花岗岩给出一致的 $2\ 051 \text{ Ma}$ 的侵位年龄,晚期英云闪长岩给出 $1\ 905 \text{ Ma}$ 的结晶年龄.早、晚两期岩体侵入接触关系明显,接触面比较复杂,沿两期接触带发育细粒边(图 2a),接触带两侧侵入体之间岩性有较明显区别.晚期侵入岩主要分布于复式岩体的东、南部.整个复式岩体内各种岩性并未呈现明显分带特征,也无明显规律性分布,横穿岩体内部剖面时可见岩性反复出现.黄旗口岩体以西白杨沟地区出露一规模相对较小(约 2.75 km^2)的岩体,其呈南北向长条状发育在贺兰山西段的白杨沟、柳门子沟、草渠沟一带,四

周为断层切割,西侧侵入下元古界赵池沟组,被奥陶系灰岩和二叠系砂页岩不整合接触覆盖,东侧与中新元古界呈不整合接触(图 1).白杨沟岩体岩性特征与黄旗口早期侵入体相似,其锆石 U-Pb 年龄为 $2\ 046 \text{ Ma}$ (作者待发表资料),与黄旗口早期岩体属同一期岩浆活动产物,可能是黄旗口早期岩体在白杨沟地区的剥蚀出露,故本文一并讨论.

黄旗口复式岩体中普遍含深灰色细粒黑云母变粒岩、暗灰色黑云斜长片麻岩等捕掇体(图 2b),它们与该区分布的赵池沟组变质岩具有类似的结构及矿物组合特征,很可能是岩浆上升过程中捕获的来自赵池沟组的岩石碎块.另外,岩体中各种规模的辉绿岩脉(图 2c)及小型花岗伟晶岩脉较发育,后者中见有黑色电气石.本文主要对黄旗口和白杨沟岩体进行了岩石学、岩石化学以及同位素综合研究.

2 岩相学特征

黄旗口早期侵入体主要以正长花岗岩和二长花岗岩为主,含少量黑云母花岗岩、花岗闪长岩及石榴石花岗岩等.正长花岗岩为中粗粒结构,矿物组合为石英($35\% \sim 40\%$) + 钾长石($25\% \sim 35\%$) + 斜长石($10\% \sim 15\%$) + 黑云母($\sim 5\%$) ± 白云母 ± 石榴石

表 1 贺兰山中段黄旗口和白杨沟岩体 Sr-Nd 同位素组成

Table 1 Sr and Nd isotopic compositions of the Huangqikou and Baiyanggou granitic plutons in central Helanshan

样品编号	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	2σ	(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _i	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	2σ	ε _{Nd} (t)	T _{DM1} (Ma)	T _{DM2} (Ma)
D0509-1	4.700	0.831 67	6	0.692 84	0.131 7	0.511 982	7	4.35	2 162	2 146
101-3-1	4.492	0.839 92	4	0.707 24	0.125 2	0.511 766	8	1.81	2 374	2 349
401-2-1	4.458	0.814 90	5	0.683 22	0.125 8	0.511 879	5	3.89	2 194	2 183
401-8-1	3.448	0.804 52	4	0.702 68	0.128 1	0.511 853	9	2.77	2 299	2 272
401-10-1	3.246	0.785 58	4	0.689 71	0.107 6	0.511 685	7	4.90	2 097	2 102
401-12-3	1.437	0.744 73	5	0.702 28	0.102 7	0.511 576	4	4.06	2 153	2 169
101-7-2	1.361	0.754 52	4	0.717 28	0.116 4	0.511 744	4	2.16	2 193	2 198
101-4-1	5.906	0.842 90	6	0.681 40	0.129 3	0.511 933	8	2.69	2 190	2 156
401-7-1	2.157	0.759 79	5	0.700 79	0.106 8	0.511 629	4	2.24	2 161	2 192
D1514-4	1.028	0.761 76	6	0.731 39	0.1161	0.511 810	13	5.10	2 085	2 086
D1514-13	3.381	0.771 21	5	0.671 35	0.1174	0.511 703	5	2.64	2 281	2 283

注: (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i = (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_s - (⁸⁷Rb/⁸⁶Sr)_s × (e^{λt} - 1), λ = 1.42 × 10⁻¹¹ a⁻¹; ε_{Nd}(t) = [(¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_s / (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_{CHUR}(t) - 1] × 10⁴; T_{DM1} = 1/λ × ln { 1 + [(¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_s - (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_{DM}] / [(¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd)_s - (¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd)_{DM}] } ; T_{DM2} = 1/λ × ln { 1 + [(¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_s - (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_{DM} - ((¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd)_s - (¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd)_C) × (e^{λt} - 1)] / [(¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd)_C - (¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd)_{DM}] } , 公式中的下标 S, CHUR, DM, C 分别表示样品测量值、球粒陨石值、亏损地幔值、大陆地壳平均值, (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_{DM} = 0.513 15, (¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd)_{DM} = 0.213 7, (¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd)_C = 0.118, λ = 6.54 × 10⁻¹² a⁻¹; t 为岩浆结晶年龄, 早期岩体为 2.05 Ga, 晚期岩体为 1.90 Ga.

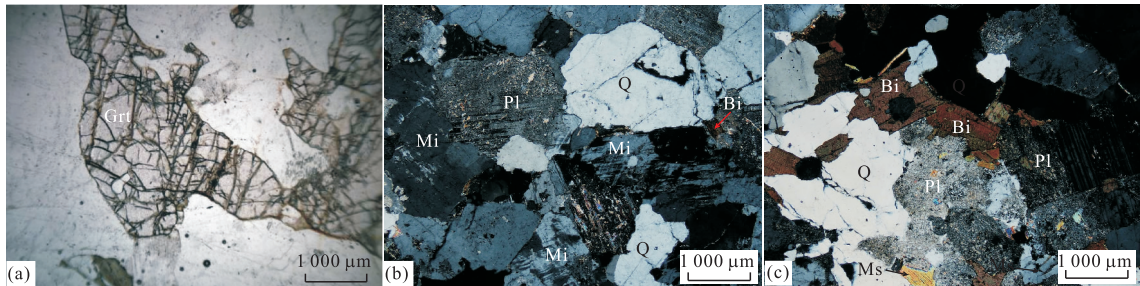


图 3 贺兰山中段黄旗口花岗岩体岩相学特征

Fig.3 Petrographic characteristics of the Huangqikou granites in central Helanshan

a.石榴石花岗岩的镜下显微特征,1966-1;b.二长花岗岩中矿物组合:Q(石英)+Mi(微斜长石)+Pl(斜长石)+Bi(黑云母),401-13-2;c.英云闪长岩中矿物组合:Q(石英)+Pl(斜长石)+Bi(黑云母)+Ms(白云母),401-6-1

(图 2d,图 3a),含磷灰石和锆石等副矿物.部分正长花岗岩为似斑状结构,斑晶钾长石具有半定向分布特征;石英表面发育裂纹,另可见蠕英石;斜长石发育钠长聚片双晶,且多数斜长石发生高岭土化;钾长石发育格子双晶,还可见条纹结构;石榴石粒度较大,多呈半自形-他形(图 3a).二长花岗岩部分具有似斑状结构、含斑结构,块状构造.斑晶为钾长石,基质主要由石英(30%~40%)+钾长石(25%~30%)+斜长石(25%~30%)+黑云母(~5%)±白云母(图 3b)组成,副矿物主要为磷灰石和锆石等.多数斜长石发生高岭土化,钾长石以微斜长石为主,个别颗粒可见格子双晶.

黄旗口晚期侵入的英云闪长岩主要由石英

(30%~40%)+斜长石(45%~55%)+黑云母(5%~10%)±钾长石(<5%)±白云母(图 3c)组成,副矿物为磷灰石和锆石.斜长石部分高岭土化,石英颗粒他形充填于斜长石间的空隙中,钾长石以微斜长石为主.

白杨沟岩体以二长花岗岩为主,表面风化较严重,中粒结构,块状构造.主要由石英(30%~45%)、钾长石(20%~30%)、斜长石(20%~30%)、黑云母(~5%)组成,副矿物主要为磷灰石和锆石.

3 分析方法

全岩主量元素分析在国土资源部武汉矿产资源

监督检测中心和武汉综合岩矿测试中心采用 X 射线荧光氟化法(XRF, 3080E 型 X 射线荧光光谱仪)完成, 22 件样品的结果列于附表 1. 微量元素测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)利用 Agilent 7500a ICP-MS 分析完成, 主要测试步骤是: (1) 称取粉碎至大约 200 目的岩石粉末 50 mg 于 Teflon 溶样器中; (2) 采用 Teflon 溶样弹将样品用 HF 和 HNO₃ 在 195 °C 条件下消解 48 h; (3) 将在 120 °C 条件下蒸干除 Si 后的样品用 2% HNO₃ 稀释 2 000 倍, 定容于干净的聚酯瓶中. 详细的样品消解处理过程、分析精度和准确度同 Liu *et al.* (2008). 结果见附表 2.

全岩 Sr-Nd 同位素在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)利用 Finnigan Triton 型热电离同位素质谱仪(TIMS)完成. 主要步骤是: (1) 称取样品粉末 50~100 mg 进行溶样, 并用 1.5 mL HNO₃ + 1.5 mL HF 在 195 °C 条件下消解 48 h; (2) 在 115 °C 条件下蒸干后, 加入约 1 mL HCL; (3) 用 AG50X8 阳离子交换树脂分离 Rb、Sr 和 REE, 再用 HDEHP 萃淋树脂分离 Sm 和 Nd. 测得的 ⁸⁷Rb/⁸⁶Sr 比值和 ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd 比值分别根据 Rb、Sr、Sm、Nd 的含量计算. 详细的实验流程和分析方法见 Ling *et al.* (2009) 文献. 测试结果见表 1.

4 岩石地球化学特征

4.1 主量元素

黄旗口早期侵入体 SiO₂ 变化范围为 70.8%~74.8%, 平均为 73.1%; Al₂O₃ 在 12.8%~14.7% 之间, 平均为 13.9%; Na₂O+K₂O 为 5.87%~8.49%, 平均为 7.34%; 全碱较高且相对富钾(K₂O/Na₂O=0.99%~4.32%, 平均为 1.80%); A/CNK 值变化在 1.21~1.46, 均大于 1.1. 晚期岩体 SiO₂ 含量为 64.8%~74.6%, 平均 68.0%; Al₂O₃ 约为 13.6%~16.3%, 平均为 15.0%; Na₂O+K₂O=5.07%~7.92%, 平均为 6.66%; K₂O/Na₂O=1.31~3.14, 平均为 1.98; A/CNK=1.23~1.69, 平均值为 1.44; 白杨沟 2 个样品主要元素含量均值 SiO₂ 为 75.7%, Al₂O₃ 为 13.5%, Na₂O+K₂O 为 5.91%, K₂O/Na₂O 为 1.60, A/CNK 为 1.57. 上述岩石均具有低 MgO(0.23%~2.67%) 和主体变化在 31.7~54.9 的 Mg[#] (附表 1). 因此, 黄旗口岩体具有高硅、富碱特别是高 K₂O、富铝的特点, 落在亚碱性系列的花岗闪长岩和花岗岩区(图 4), 均显示为高钾钙碱性—

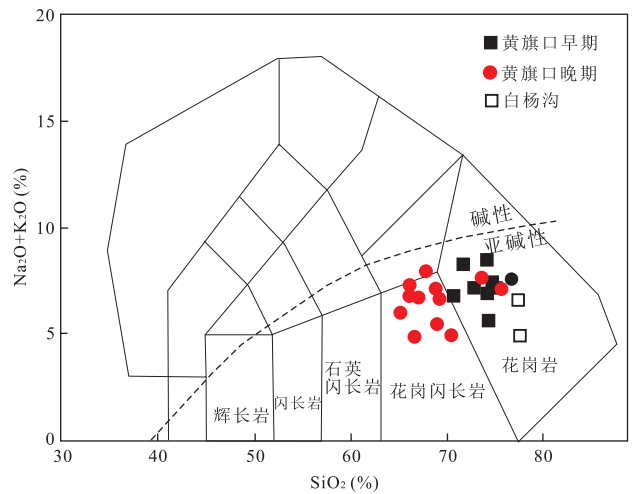


图 4 贺兰山中段黄旗口和白杨沟岩体 TAS 图解

Fig.4 Plot of SiO₂ vs. Na₂O+K₂O of the Huangqikou and Baiyanggou granitic plutons in central Helanshan
底图据 Middlemost(1994)

钾玄质系列, 以及过铝质特征(图 5).

比较而言, 黄旗口岩体中晚期样品具有较早期岩石低的 SiO₂ 和偏高的 FeO^T、MgO、Al₂O₃、TiO₂ 含量的特点, 而白杨沟岩体则与黄旗口岩体的主要元素组成基本一致(图 6, 附表 1). 岩石的 SiO₂ 与 K₂O、Na₂O 及黄旗口早期岩体、白杨沟岩体中 P₂O₅ 之间无明显相关性, 但 TiO₂、Al₂O₃、FeO^T、MgO、CaO 和晚期岩体中的 P₂O₅ 与 SiO₂ 含量具有一定的线性负相关, 暗示两期岩浆演化过程中可能都有斜长石、磷灰石和钛铁矿等矿物的分离结晶.

4.2 微量元素

黄旗口早期岩体稀土总量(\sum REE)为 $101 \times 10^{-6} \sim 263 \times 10^{-6}$, (La/Yb)_N 为 4.19~44.4; 晚期岩体 \sum REE 为 $109 \times 10^{-6} \sim 254 \times 10^{-6}$, (La/Yb)_N 为 4.57~53.2; 早、晚两期岩体均表现为轻稀土明显富集, 而重稀土由平坦到略微分异的变化特征(图 7a, 7c), Eu 负异常明显(δ Eu=0.31~0.94, 图 7a, 7c). 比较而言, 白杨沟岩体两样品具有更显著的重稀土分异(图 7a).

黄旗口早、晚两期岩体都表现为强烈富集 K、Rb、Th 等大离子亲石元素, 相对亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素的特点, 具有 Pb 的正异常和 Sr 的负异常(图 7b, 7d), 这与典型壳源岩浆的特征类似. 比较而言, 白杨沟岩体两样品显示出更明显的 Nb-Ta 负异常(图 7b).

4.3 Sr-Nd 同位素

黄旗口早期二长花岗岩和正长花岗岩的

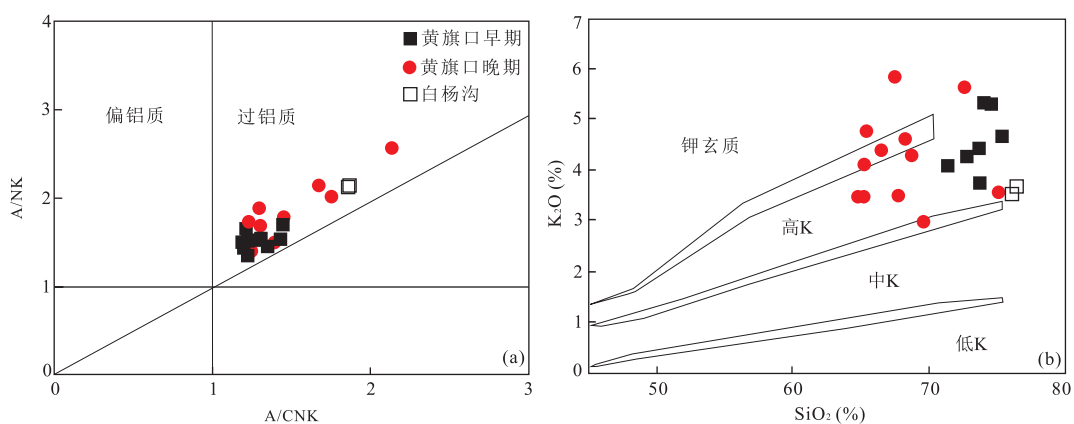


图 5 贺兰山中段黄旗口和白杨沟岩体的 A/NK—A/CNK(a)和 K₂O—SiO₂(b)关系

Fig.5 Plots of A/CNK vs. A/NK (a) and SiO₂ vs. K₂O (b) of the Huangqikou and Baiyanggou granitic plutons in central Helanshan

图 a 据 Maniar and Piccoli(1989), 图 b 据 Rickwood(1989)

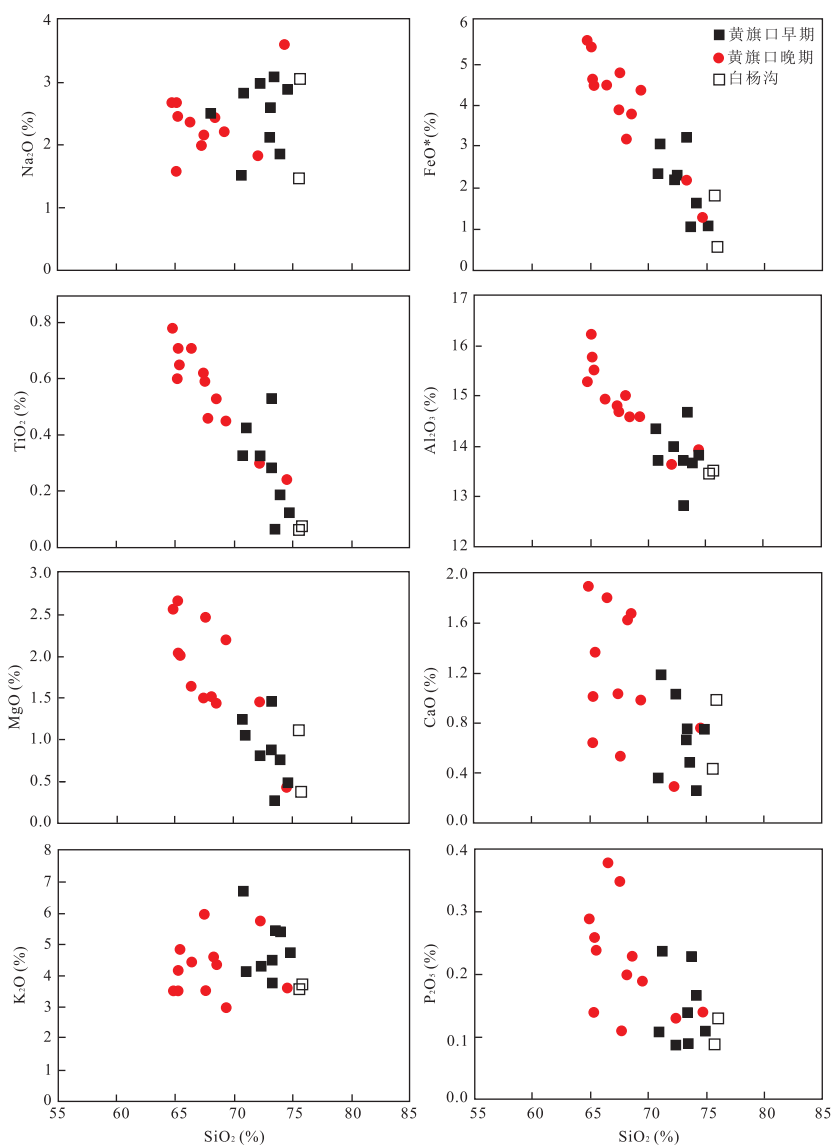


图 6 贺兰山中段黄旗口和白杨沟岩体主量元素哈克图解

Fig.6 Harker diagrams of major elements of the Huangqikou and Baiyanggou granitic plutons in central Helanshan

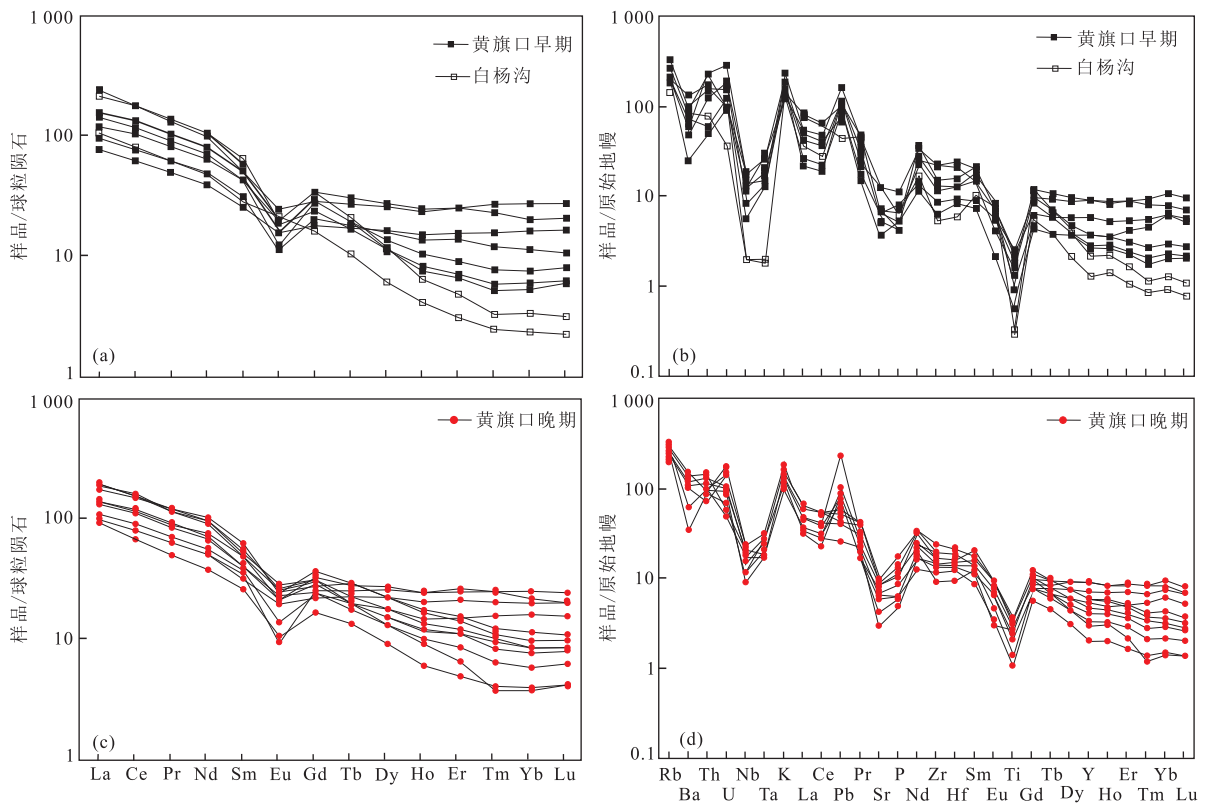


图 7 贺兰山中段黄旗口及白杨沟岩体稀土元素配分图(a,c)和微量元素蛛网图(b,d)

Fig.7 Chondrite-normalized REE patterns (a,c) and primitive mantle-normalized spidergrams (b,d) for the Huangqikou and Baiyanggou granitic plutons in central Helanshan

球粒陨石、原始地幔数据引自 Sun and McDonough(1989)

$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 变化在 0.683 22~0.707 24, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 1.81~4.90(表 1), 样品给出的 Nd 同位素模式年龄 T_{DM1} 和 T_{DM2} 均变化在 2.1~2.3 Ga; 晚期英云闪长岩的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 变化在 0.681 40~0.717 28, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 2.16~2.69, 对应十分接近的 T_{DM1} 和 T_{DM2} , 分别为 2 161~2 193 Ma 和 2 156~2 198 Ma(表 1). 白杨沟岩体两样品的 Sr-Nd 同位素组成落在黄旗口岩体的组成范围(表 1). 样品多具有较高的 Rb/Sr 比值, 对应变化较大的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$, 可能与 Sr 同位素体系易于迁移而引起的后期分馏作用有关. Nd 同位素组成及 Nd 模式年龄则较一致, 是岩石源区示踪的关键.

5 讨论

5.1 岩浆源区及岩石成因

就花岗岩的类别而言, 包括以岩浆源区性质区别的 I 型、S 型, 以及能反映特殊源区和(或)构造背景的 M 型和 A 型. 其中, S 型花岗岩是一类以含富铝相矿物(如堇青石)、铝饱和指数 ≥ 1.1 的岩石, 有时也可见

白云母和石榴石. 本文研究的黄旗口岩体早晚两期岩石样品中均发现了白云母、石榴石等富铝矿物, 缺乏 I 型花岗岩中常见的角闪石, 有研究者在黄旗口北面牛头沟一带斑状黑云母花岗岩中还观察到堇青石(Zhang *et al.*, 2017). 从岩石地球化学看, 黄旗口岩体均具有高硅、高钾、过铝质的特点, 早晚两期岩石的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值较高, A/CNK 值都大于 1.1(图 5), 属于强过铝质岩石类型, 虽然 I 型花岗岩岩浆演化后期可能存在斜长石的强分异使 A/CNK 值偏大(Wu *et al.*, 2003), 但黄旗口岩体中存在 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 和 A/CNK 值都高的样品(如 D1961-1, 401-7-1), 故本文倾向于认为黄旗口岩体应来自于富铝物质的熔融, 这些岩相学、岩石地球化学以及区域岩体分布特征表明黄旗口岩体为 S 型花岗岩.

一般认为, 具有强过铝质特征的 S 型花岗岩主要来自于变沉积岩物质的熔融(Sylvester, 1998). 有研究表明, 成熟度不一样的碎屑沉积岩(如杂砂岩和泥质岩)的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值能较好地指示其斜长石和粘土类矿物的相对含量, $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O} < 0.3$ 通常反映泥质岩的特征, $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O} > 0.3$ 则反映杂砂岩类

的属性.同样,由于在斜长石中,Sr、Ba 表现为相容性,而 Rb 具有不相容的特点,使得 Rb/Sr 和 Rb/Ba 比值亦成为区别泥质岩和杂砂岩的重要参数(Sylvester, 1998).黄旗口花岗岩早、晚两期岩石(包括白杨沟)的 CaO/Na₂O 比值大多数大于 0.3,少数低于 0.3;在 Rb/Sr 与 Rb/Ba 比值协变图解上,主要落在由高 CaO/Na₂O 比值的杂砂岩熔融产生的熔体区(图 8),表明黄旗口岩体可能主要来自混有少量泥质岩组分、富长石的类似(变)杂砂岩源区物质的部分熔融.有研究表明,如果花岗岩来自长石杂砂岩的部分熔融,那么据此形成的原始岩浆就很可能表现出 I 型过铝质花岗岩的特质,出现 SiO₂-P₂O₅ 负相关的现象(Chappell, 1999),因此,黄旗口花岗岩中 SiO₂ 与 P₂O₅ 呈负相关,可能与其源区物质为含泥质长石杂砂岩有关.

在华北西部,发育有绵延近 1 000 km、宽约 200 km 的孔兹岩带(图 1),由一套经历了麻粒岩相变质的变沉积岩、S 型花岗岩、TTG 片麻岩、基性麻粒岩和少量紫苏花岗岩等复杂岩组构成(Zhao *et al.*, 2005; Santosh *et al.*, 2007; Wan *et al.*, 2008, 2009; Xia *et al.*, 2008; Yin *et al.*, 2011; Peng *et al.*, 2012; Guo *et al.*, 2012; Dong *et al.*, 2013, 2014; Liu *et al.*, 2013).中段贺兰山地区孔兹岩系的物源,被认为与持续发生在 2.18~2.00 Ga 的活动大陆边缘弧岩浆有关(Dan *et al.*, 2012),在 2.00~1.95 Ga 完成沉积作用,并随后在约 1.95 Ga 左右遭受麻粒岩相变质(Dan *et al.*, 2012).构成孔兹岩系主体的变沉积岩,以含石墨的富铝片麻岩、石榴石石英岩、长英质正片麻岩、大理岩多见,且大多数片麻岩以长石(45%~70%)、石英(20%~30%)以及黑云母±石榴石±堇青石±夕线石(卢良兆等,1996)为组合,符合典型碎屑岩原岩的特征并含富铝相矿物.因此,孔兹岩中这些变沉积岩可能是黄旗口岩体 S 型花岗岩的熔融母岩.事实上,在研究区,黄旗口岩体除了与区域孔兹岩系密切共生外,在同位素组成上也有相似性.例如,本文获得的黄旗口岩体的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为 1.8~4.9,与前人获得的贺兰山及其东部集宁地区孔兹岩的 Nd 同位素较为接近(万渝生等, 2000; Xia *et al.*, 2008);岩体变化在 2.10~2.38 Ga 的 Nd 同位素模式年龄,也落入贺兰山孔兹岩中碎屑锆石的模式年龄范围内(Dan *et al.*, 2012).因此,黄旗口 S 型花岗岩可能来自该区孔兹岩系中变沉积岩物质的熔融.同行对孔兹岩带内其他 S 型花岗岩的研究也支持本文的解释(李正辉等, 2013; Zhang *et al.*, 2017).更进一步讲,笔者在黄旗口

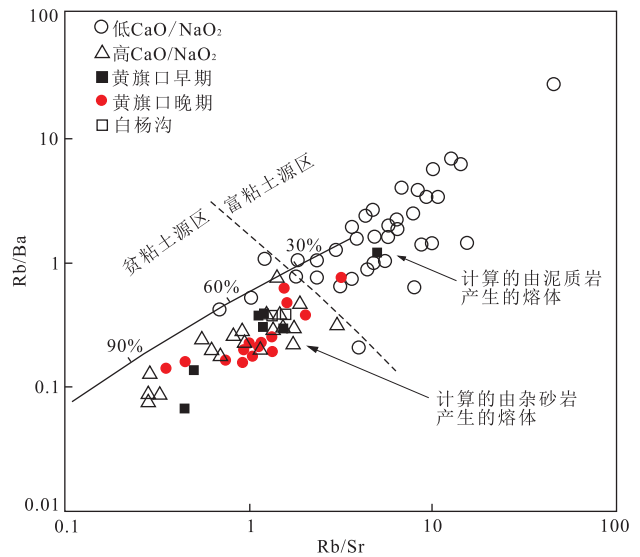


图 8 贺兰山中段黄旗口和白杨沟花岗岩的 Rb/Ba—Rb/Sr 图解
Fig. 8 Plot of Rb/Ba vs. Rb/Sr of the granitic rocks from the Huangqikou and Baiyanggou area in central Helanshan
其他样品数据来自 Sylvester (1998)

岩体中,发现了许多与邻区古元古代赵池沟组岩系具有很类似的结构及矿物组合特征的黑云母变粒岩、黑云斜长片麻岩等的捕虏体.这些岩石捕虏体有可能代表了花岗岩熔体的源区残留.本课题组通过在研究区开展详细的综合地质调查,发现赵池沟岩组是本区唯一的下元古界地层单元,由一套浅变质、弱变形的白云母石英片岩、变粒岩及少量黑云斜长片麻岩、二长片麻岩组成,也含石英(杂)砂岩、石英长石砂岩.碎屑锆石年代学结果(90%给出 2.2~2.0 Ga 年龄)揭示赵池沟组岩系记录了与华北西部孔兹岩带较一致的演化信息(Dan *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2014),建议将赵池沟组归于孔兹岩系.综上所述,认为贺兰山中段的黄旗口古元古代花岗岩可能来自该区孔兹岩系的部分熔融,本区含石英长石砂岩、石英杂砂岩的赵池沟组岩系可能是较为接近的熔融原岩.

强过铝质 S 型花岗岩熔体的地球化学性质除受原岩组成约束外,还与熔融温度有关.Sylvester(1998)认为,强过铝质 S 型花岗岩按形成条件可分为高温和高压型两类,前者往往具有相对较低的 Al₂O₃/TiO₂ 比值(<100)(Sylvester, 1998).黄旗口岩体大多数样品的 Al₂O₃/TiO₂ 比值小于 100,表明其属于高温型.锆饱和温度被认为可近似代表花岗质熔体的近液相线温度(King *et al.*, 1997).依据 Miller *et al.*(2003)修正的锆饱和温度计 $T_{Zr} = 12\ 900 / [2.95 + 0.85M + \ln(496\ 000 / Zr_m)]$ (其中 T_{Zr} 为 Zr 饱和温度(K), M 为熔体阳离子比值, $M = (2Ca + K + Na) / (Si \times Al)$, Zr_m 为

熔体中 Zr 浓度),对黄旗口岩体进行了相应的计算。计算时充分考虑了该温度计的适用条件(如锆达到饱和、没有或少见继承锆石、无锆石的明显分异结晶),对低 Zr/Hf 比值的样品进行了校正,获得黄旗口早期岩体的锆饱和温度为 735~872 °C,晚期样品的锆饱和温度介于 796~853 °C,表明晚期岩体锆饱和温度整体略高于早期,与辽东连山关 S 型花岗岩类似(杨凤超等,2016),形成于高温环境下。值得注意的是,黄旗口花岗岩的岩浆结晶温度,明显高于青藏高原过铝质花岗岩普遍给出的低于 700 °C 的结果(Zhang *et al.*,2004; 廖忠礼等,2006),也高于松潘构造带马尔康不同粒径结构的强过铝质二云母花岗岩(703~756 °C、770~786 °C)(时章亮等,2009),意味着黄旗口花岗质熔体在形成演化过程中有更多其他热源供给,如来自地幔的。从 Nd 同位素组成看,黄旗口岩体的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为 1.8~4.9,整体要明显高于贺兰山地区其他 1.90 Ga 和 1.95 Ga (Dan *et al.*,2014; Zhang *et al.*,2017)以及东部凉城 1.93~1.90 Ga 的 S 型花岗岩(Peng *et al.*,2012),表明黄旗口花岗质熔体在形成过程中,应有来自地幔的新生岩浆组分的贡献。贺兰山北部牛头沟 1.90 Ga 的 S 型斑状黑云母花岗岩给出相对低的锆饱和温度(750~800 °C),对应略低的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(-1.6~-0.4),支持笔者的解释。从花岗岩产生需要热源供给来看,幔源岩浆往往是一个重要的热源。许多花岗岩具有壳幔岩浆混合的特点,发育时代一致的基性岩脉和暗色微粒包体。黄旗口岩体中同样发育多条基性岩脉,尽管岩体中广泛发育的基性岩脉还缺少全面和准确的年代学工作,但从花岗岩产生的条件考虑,不排除这些基性岩脉与寄主花岗岩同期的可能性。例如,在区域上,贺兰山北段乌尔图沟—正义关沟一带的辉绿岩脉即是与古元古代花岗岩同期侵入(李红宇等,2010)。故本文认为黄旗口花岗质熔体在形成演化中可能有少量地幔岩浆的贡献,实际上,对该区古元古代 S 型花岗岩在形成过程中有地幔岩浆的贡献,是许多研究者的共识(Peng *et al.*,2012; Dan *et al.*,2014)。

因此,贺兰山地区黄旗口古元古代花岗岩为强过铝质的 S 型花岗岩,可能来自该区归属于孔兹岩的赵池沟组岩系的部分熔融,并叠加有少量幔源基性岩浆的贡献。

5.2 形成环境与构造意义

黄旗口过铝质 S 型花岗岩多含白云母,偶见石榴石,尚未见堇青石,A/CNK 值变化在 1.21~1.69,锆饱和温度为 735~872 °C,类似 Barbarin(1999)定

义的含白云母过铝质花岗岩。岩体普遍高于 1.15 的 A/CNK 值,符合 Maniar and Piccoli(1989)统计归类的同碰撞花岗岩特点。同时,笔者尝试利用花岗岩形成环境判别图进行投点,黄旗口岩体样品基本落在同碰撞花岗岩+火山弧花岗岩的区域,但考虑到花岗岩形成构造环境的复杂性,本文更多地结合区域大地构造演化历史判断岩体的形成环境。根据区域地质演化和目前所获得的年代数据,认为黄旗口岩体总体为同碰撞—后造山阶段的岩浆作用产物,可能与华北西部阴山与鄂尔多斯地块的碰撞造山有关;早期岩体形成于碰撞造山过程,而晚期岩体产于造山后的伸展阶段。不同构造背景下赵池沟组岩石的熔融可能是造成早、晚两期岩体组成不同的原因,其中,产于伸展体制下的晚期岩体可能相对叠加了更多地幔岩浆组分的参与。

随着研究的深入,特别是高精度年代学资料的积累,古元古代花岗质岩浆作用在我国华北北缘广泛分布的事实得到明确。2.05~2.00 Ga、2.00~1.87 Ga、1.85~1.80 Ga 被认为是该时期岩浆作用的 3 个主要时段,形成类型多样、性质复杂的岩石,对应古元古代晚期华北多块体拼合过程的不同阶段(耿元生等,2009)。其中,第 1 阶段主要发育变形较强且经历变质改造的钠质黑云母斜长片麻岩和钾质花岗片麻岩(Zhao *et al.*,2008;耿元生等,2009);第 2 阶段以富钠英云闪长岩和斑状富钾花岗岩为主(耿元生等,2009; Peng *et al.*,2012; Dan *et al.*,2014; Zhang *et al.*,2017);第 3 阶段是华北多块体完成拼合并最终克拉通化的重要时期,发育最广泛的岩浆作用。贺兰山地区主要出露 2.05~2.00 Ga、2.00~1.87 Ga 这两阶段的古元古代岩浆,如本文研究的黄旗口早期(2.05 Ga)和晚期(1.90 Ga)花岗岩,其可能与阴山地块和鄂尔多斯地块的碰撞拼合以及造山后的伸展有关(李正辉等,2013; Zhang *et al.*,2017)。

来自前寒武地壳物质组成、物质来源、一系列变质、岩浆和重大构造事件发生和发展过程等的研究表明,阴山和鄂尔多斯地块可能于 1.97~1.94 Ga 经历碰撞拼合,形成近东西向的孔兹岩带(Zhao *et al.*,2008,2010; Yin *et al.*,2011; Guo *et al.*,2012),在约 1.92~1.90 Ga 进入造山后的伸展阶段(Guo *et al.*,2012; Zhang *et al.*,2017)。本文黄旗口早期正长花岗岩和二长花岗岩,与先前报道的 2.05 Ga 黑云斜长片麻岩(原岩可能为英云闪长岩)和石榴子石浅色花岗岩(耿元生等,2009),共同揭示在贺兰山地区存在一期明显的 2.05 Ga 的花岗质

岩浆作用。该期岩浆事件,较普遍认识的 1.95 Ga 时阴山地块与鄂尔多斯地块达到峰期碰撞的时间 (Wan *et al.*, 2008; Yin *et al.*, 2011; Guo *et al.*, 2012) 略早,表明它们可能是地块碰撞拼合早期阶段,地壳物质升温发生麻粒岩相高级变质 (Wan *et al.*, 2008; Yin *et al.*, 2011; Guo *et al.*, 2012)、表壳岩系熔融的岩浆产物,与黄旗口晚期 (1.90 Ga) 同属第 2 阶段 (2.00~1.87 Ga) 的岩浆和变质事件在华北西部则较为多见,广泛记录在孔兹岩系 (Wan *et al.*, 2009) 以及一些代表性的 (如贺兰山北段和东部凉城) S 型花岗岩之中 (Peng *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2017)。重要的是,越来越多资料显示,这一时段的岩浆作用,与区域上的麻粒岩相变质作用 (耿元生等, 2009)、特别是超高温 (UHT) 变质作用在空间上紧密相伴 (Santosh *et al.*, 2007)。基于一系列同期辉石闪长岩岩体、岩脉的发育, Guo *et al.* (2012) 提出超高温 (UHT) 变质作用可能与洋脊俯冲引起的镁铁质岩浆底侵提供的热量有关。这一解释模型能够回答区域上与孔兹岩系部分熔融有关的 1.93~1.89 Ga 的 S 型花岗岩岩浆作用 (Peng *et al.*, 2012), 反映了与地幔物质上涌有关的岩石圈伸展信息。尽管上述认识主要来自孔兹岩带东部的集宁、凉城、大青山等地的研究,但发育在西部的贺兰山地区的 1.92 Ga 变质闪长岩 (耿元生等, 2009) 以及 S 型花岗岩 (Dan *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2017), 也极可能是这一动力体制下的产物。本文研究的黄旗口晚期 1.90 Ga 英云闪长岩也不例外地形成于这一碰撞造山后的伸展背景。黄旗口早、晚两期岩体主体成岩物质虽为孔兹岩系的熔融,但早期岩体的可能熔融源区更深,而晚期伸展背景下的岩体源区偏浅,不同深浅部位的孔兹岩系的物质组成也不完全相同,加之晚期岩体在伸展体制下可能有更多地幔组分的参与,这就解释了早、晚两期岩体在地球化学组成上的差异,并与前文对岩石成因的推断也吻合。因此,贺兰山地区黄旗口不同期次的古元古代岩体完整地记录了华北西部阴山地块和鄂尔多斯地块碰撞拼合以及造山后伸展的重要信息。

6 结论

(1) 黄旗口岩体主要由早期的正长花岗岩、二长花岗岩及少量花岗闪长岩、黑云母花岗岩和晚期的英云闪长岩组成。西侧的白杨沟岩体主要为二长花岗岩,与黄旗口早期岩体在岩性和形成时代上一致。

(2) 黄旗口花岗岩为强过铝质 S 型花岗岩,可能来自该区归属于孔兹岩的赵池沟组岩系的部分熔融,并叠加有少量地幔基性岩浆的贡献。

(3) 黄旗口不同期次的古元古代花岗岩具有造山型的特征,分别形成于阴山地块和鄂尔多斯地块的碰撞拼合以及造山后的伸展阶段,为阴山和鄂尔多斯地块的碰撞演化提供了重要制约。

致谢:感谢匿名审稿专家提出宝贵的审稿意见。

附表 1~2 见本刊官网 (<http://www.earth-science.net>)。

References

- Barbarin, B., 1999. A Review of the Relationships between Granitoid Types, Their Origins and Their Geodynamic Environments. *Lithos*, 46 (3): 605 - 626. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(98\)00085-1](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(98)00085-1)
- 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)
- Dan, W., Li, X.H., Guo, J.H., et al., 2012. Integrated In-Situ Zircon U-Pb Age and Hf-O Isotopes for the Helanshan Khondalites in North China Craton: Juvenile Crustal Materials Deposited in Active or Passive Continental Margin? *Precambrian Research*, 222/223: 143 - 158. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2011.07.016>
- Dan, W., Li, X.H., Wang, Q., et al., 2014. Paleoproterozoic S-Type Granites in the Helanshan Complex, Khondalite Belt, North China Craton: Implications for Rapid Sediment Recycling during Slab Break-off. *Precambrian Research*, 254: 59 - 72. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.07.024>
- Dong, C.Y., Wan, Y.S., Wilde, S.A., et al., 2014. Earliest Paleoproterozoic Supracrustal Rocks in the North China Craton Recognized from the Daqingshan Area of the Khondalite Belt: Constraints on Craton Evolution. *Gondwana Research*, 25(4): 1535 - 1553. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.05.021>
- Dong, C.Y., Wan, Y.S., Xu, Z.Y., et al., 2013. SHRIMP Zircon U-Pb Dating of Late Paleoproterozoic Kondalites in the Daqing Mountains Area on the North China Craton. *Scientia Sinica Terrae*, 56 (1). <https://doi.org/10.1007/s11430-012-4459-3>
- Geng, Y.S., Zhou, X.W., Wang, X.S., et al., 2009. Late-Paleoproterozoic Granite Events and Their Geological Significance in Helanshan Area, Inner Mongolia: Evidence from Geochronology. *Acta Petrologica Sinica*, 25 (8):

- 1830—1842(in Chinese with English abstract).
- Guo, J. H., Peng, P., Chen, Y., et al., 2012. UHT Sapphirine Granulite Metamorphism at 1.93—1.92 Ga Caused by Gabbro Intrusions: Implications for Tectonic Evolution of the Northern Margin of the North China Craton. *Precambrian Research*, 222/223: 124—142. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2011.07.020>
- King, P. L., White, A. J. R., Chappell, B. W., et al., 1997. Characterization and Origin of Aluminous A-Type Granites from the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia. *Journal of Petrology*, 38(3): 371—391. <https://doi.org/10.1093/pej/38.3.371>
- Li, H. Y., Song, X. H., Guo, H. W., et al., 2010. Geological and Geochemical Features and Ore Genesis of the Niutougou Gold Deposit in the Northern Helan Shan Mountains, Ningxia. *Geology and Exploration*, 46(6): 1036—1044(in Chinese with English abstract).
- Li, L. M., Zeng, Z. X., Lu, Y. J., et al., 2014. LA-ICP-MS U-Pb Geochronology of Detrital Zircons from the Zhaochigou Formation—Complex in the Helan Mountain and Its Tectonic Significance. *Chinese Science Bulletin*, 59(13): 1425—1437. <https://doi.org/10.1007/s11434-014-0180-2>
- Li, Z. H., Liu, X. M., Dong, Y. P., et al., 2013. Geochemistry and Zircon U-Pb Age of the Paleoproterozoic Syn-Collisional Granites in Helanshan Region and Its Geological Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 29(7): 2405—2415(in Chinese with English abstract).
- Liao, Z. L., Mo, X. X., Pan, G. T., et al., 2006. Petrochemistry Characteristic and Petrogenesis of Peraluminous Granite in the Tibet. *Acta Geologica Sinica*, 80(9): 1329—1341 (in Chinese with English abstract).
- Ling, W. L., Duan, R. C., Xie, X. J., et al., 2009. Contrasting Geochemistry of the Cretaceous Volcanic Suites in Shandong Province and Its Implications for the Mesozoic Lower Crust Delamination in the Eastern North China Craton. *Lithos*, 113(3—4): 640—658.
- Liu, S. J., Dong, C. Y., Xu, Z. Y., et al., 2013. Palaeoproterozoic Episodic Magmatism and High-Grade Metamorphism in the North China Craton: Evidence from SHRIMP Zircon Dating of Magmatic Suites in the Daqingshan Area. *Geological Journal*, 48(5): 429—455. <https://doi.org/10.1002/gj.2453>
- Liu, Y. S., Zong, K. Q., Kelemen, P. B., et al., 2008. Geochemistry and Magmatic History of Eclogites and Ultramafic Rocks from the Chinese Continental Scientific Drill Hole: Subduction and Ultrahigh-Pressure Metamorphism of Lower Crustal Cumulates. *Chemical Geology*, 247(1—2): 133—153. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.10.016>
- Lu, L. Z., Xu, X. C., Liu, F. L., 1996. The Precambrian Khondalite Series in Northern China. Changchun Publishing House, Changchun(in Chinese).
- 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\(1989\)1010635:tdog>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1989)1010635:tdog>2.3.co;2)
- Middlemost, E. A. K., 1994. Naming Materials in the Magma/Igneous Rock System. *Earth-Science Reviews*, 37(3—4): 215—224. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(94)90029-9)
- Miller, C. F., McDowell, S. M., Mapes, R. W., 2003. Hot and Cold Granites? Implications of Zircon Saturation Temperatures and Preservation of Inheritance. *Geology*, 31(6): 529—532. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2003\)0310529:hacgio>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2003)0310529:hacgio>2.0.co;2)
- Peng, P., Guo, J. H., Windley, B. F., et al., 2012. Petrogenesis of Late Paleoproterozoic Liangcheng Charnokites and S-Type Granites in the Central-Northern Margin of the North China Craton: Implications for Ridge Subduction. *Precambrian Research*, 222—223: 107—123. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2011.06.002>
- Rickwood, P. C., 1989. Boundary Lines within Petrologic Diagrams Which Use Oxides of Major and Minor Elements. *Lithos*, 22(4): 247—263. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(89\)90028-5](https://doi.org/10.1016/0024-4937(89)90028-5)
- Santosh, M., Tsunogae, T., Li, J. H., et al., 2007. Discovery of Sapphirine-Bearing Mg-Al Granulites in the North China Craton: Implications for Paleoproterozoic Ultrahigh Temperature Metamorphism. *Gondwana Research*, 11(3): 263—285. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2006.10.009>
- Shi, Z. H., Zhang, H. F., Cai, H. M., 2009. Petrogenesis of Strongly Peraluminous Granites in Markan Area, Songpan Fold Belt and Its Tectonic Implication. *Earth Science*, 34(4): 569—584(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>
- Sylvester, P. J., 1998. Post-Collisional Strongly Peraluminous Granites. *Lithos*, 45(1—4): 29—44. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(98\)00024-3](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(98)00024-3)
- Wan, Y., Liu, D., Xu, Z., et al., 2008. Paleoproterozoic Crustally Derived Carbonate-Rich Magmatic Rocks from the Daqingshan Area, North China Craton: Geological, Petrographical, Geochronological and Geochemical (Hf, Nd, O and C) Evidence. *American Journal of Science*,

- 308(3):351—378. <https://doi.org/10.2475/03.2008.07>
- Wan, Y.S., Geng, Y.S., Liu, F.L., et al., 2000. Age and Composition of the Khondalite Series of the North China Craton and Its Adjacent Area. *Progress in Precambrian Research*, 23(4):221—237(in Chinese with English abstract).
- Wan, Y.S., Liu, D.Y., Dong, C.Y., et al., 2009. The Precambrian Khondalite Belt in the Daqingshan Area, North China Craton: Evidence for Multiple Metamorphic Events in the Palaeoproterozoic Era. *Geological Society, London, Special Publications*, 323(1):73—97. <https://doi.org/10.1144/sp323.4>
- Wang, C., Meng, F., Mao, Z.L., 2012. Zircon SHRIMP U-Pb Dating Technique for Huangqikou Granite in Helanshan Area and Its Lithochemical Characteristics. *Ningxia Engineering Technology*, 11(3):206—213, 219(in Chinese with English abstract).
- Wu, F., Jahm, B. M., Wilde, S. A., et al., 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)
- Xia, X., Sun, M., Zhao, G., et al., 2008. Paleoproterozoic Crustal Growth in the Western Block of the North China Craton: Evidence from Detrital Zircon Hf and Whole Rock Sr-Nd Isotopic Compositions of the Khondalites from the Jining Complex. *American Journal of Science*, 308(3):304—327. <https://doi.org/10.2475/03.2008.05>
- Xie, G.A., Zhang, Q.L., Ren, W.J., et al., 2004. Discussion on Genesis of the Proterozoic Bedding Granites in the Middle Part of Helanshan. *Journal of Stratigraphy*, 28(3):276—280(in Chinese with English abstract).
- Yang, F.C., Sun, J.G., Song, Y.H., et al., 2016. SHRIMP U-Pb Age, Hf Isotope Composition and Geochemical Characteristics of Neoproterozoic Granitic Complex in Liaodong Lianshanguan Area, NE China. *Earth Science*, 41(12):2008—2018(in Chinese with English abstract).
- Yin, C. Q., Zhao, G. C., Guo, J. H., et al., 2011. U-Pb and Hf Isotopic Study of Zircons of the Helanshan Complex: Constraints on the Evolution of the Khondalite Belt in the Western Block of the North China Craton. *Lithos*, 122(1—2):25—38. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.11.010>
- Zhang, D.H., Wei, J.H., Fu, L.B., et al., 2017. Petrogenesis and Thermal Overprint of S-Type Granites in Helanshan Region, North China Craton: Constraints on the 1.90 Ga Khondalites Decompression Melting and 1.32 Ga Tectono-Thermal Event. *Precambrian Research*, 303:660—672. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.08.016>
- Zhang, H.F., Harris, N., Parrish, R., et al., 2004. Causes and Consequences of Protracted Melting of the Mid-Crust Exposed in the North Himalayan Antiform. *Earth and Planetary Science Letters*, 228(1—2):195—212. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.09.031>
- Zhao, G.C., Sun, M., Wilde, S.A., et al., 2005. Late Archean to Paleoproterozoic Evolution of the North China Craton: Key Issues Revisited. *Precambrian Research*, 136(2):177—202. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2004.10.002>
- Zhao, G.C., Wilde, S.A., Guo, J.H., et al., 2010. Single Zircon Grains Record Two Paleoproterozoic Collisional Events in the North China Craton. *Precambrian Research*, 177(3/4):266—276. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2009.12.007>
- Zhao, G.C., Wilde, S.A., Sun, M., et al., 2008. SHRIMP U-Pb Zircon Geochronology of the Huai'an Complex: Constraints on Late Archean to Paleoproterozoic Magmatic and Metamorphic Events in the Trans-North China Orogen. *American Journal of Science*, 308(3):270—303. <https://doi.org/10.2475/03.2008.04>

附中文参考文献

- 耿元生, 周喜文, 王新社, 等, 2009. 内蒙古贺兰山地区古元古代晚期的花岗岩浆事件及其地质意义: 同位素年代学的证据. *岩石学报*, 25(8):1830—1842.
- 李红宇, 宋新华, 郭合伟, 等, 2010. 宁夏贺兰山北段牛头沟金矿地质地球化学特征和矿床成因探讨. *地质与勘探*, 46(6):1036—1044.
- 李正辉, 柳小明, 董云鹏, 等, 2013. 贺兰山古元古代同碰撞花岗岩地球化学、锆石 U-Pb 年代及其地质意义. *岩石学报*, 29(7):2405—2415.
- 廖忠礼, 莫宣学, 潘桂棠, 等, 2006. 西藏过铝花岗岩的岩石化学特征及成因探讨. *地质学报*, 80(9):1329—1341.
- 卢良兆, 徐学纯, 刘福来, 1996. 中国北方早前寒武纪孔兹岩系. 长春: 长春出版社.
- 时章亮, 张宏飞, 蔡宏明, 2009. 松潘造山带马尔康强过铝质花岗岩的成因及其构造意义. *地球科学*, 34(4):569—584.
- 万渝生, 耿元生, 刘福来, 等, 2000. 华北克拉通及邻区孔兹岩系的年代及对太古宙基底组成的制约. 前寒武纪研究进展, 23(4):221—237.
- 王成, 孟方, 毛自力, 2012. 贺兰山黄旗口花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年和岩石地球化学特征. *宁夏工程技术*, 11(3):206—213, 219.
- 解国爱, 张庆龙, 任文军, 等, 2004. 贺兰山中段古元古代层状花岗岩成因探讨. *地层学杂志*, 28(3):276—280.
- 杨凤超, 孙景贵, 宋运红, 等, 2016. 辽东连山关地区新太古代花岗岩杂岩 SHRIMP U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及地质意义. *地球科学*, 41(12):2008—2018.

附表1 贺兰山中段黄旗口和白杨沟岩体主量元素组成 (%)

Appendix table 1 Compositions of major elements (%) of the Huangqikou and Baiyanggou granitic plutons in Helanshan

样品	D05 09-1	D19 91-1	101- 3-1	401- 2-1	401- 8-1	401- 9-1	401- 10-1	401- 12-3	D281 2-1	D281 3-1	D281 7-1	D196 1-1	D196 3-2	D196 4-2	D197 5-3	D198 3-1	101- 4-1	101-7 -2	101-1 1-2	401- 7-1	D15 14-4	D1514 -13	
岩石 类型	花 岗 闪 长 岩	二 长 花 岗 岩	花 岗 闪 长 岩	正 长 花 岗 岩	正 长 花 岗 岩	二长 花 岗 岩	正 长 花 岗 岩	黑云 母花 岗 岩	英云闪长岩													二长花岗岩	
	黄旗口早期岩体								黄旗口晚期岩体												白杨沟		
SiO ₂	73.2	73.2	74.8	70.8	74.0	73.6	72.3	71.1	65.4	65.3	74.6	66.4	68.5	67.4	69.4	65.2	72.3	68.1	67.6	64.8	75.8	75.6	
TiO ₂	0.28	0.53	0.12	0.33	0.19	0.06	0.33	0.43	0.65	0.71	0.24	0.71	0.53	0.62	0.45	0.60	0.30	0.46	0.59	0.78	0.07	0.06	
Al ₂ O ₃	13.7	12.8	13.9	14.4	13.7	14.7	14.0	13.8	15.5	15.8	13.9	15.0	14.6	14.8	14.6	16.3	13.6	15.0	14.7	15.3	13.5	13.5	
Fe ₂ O ₃	0.63	0.75	0.02	0.46	0.60	0.34	0.39	0.85	0.67	0.99	0.16	0.92	0.86	1.17	0.58	0.76	0.48	1.19	1.03	0.60	0.14	0.62	
FeO	1.90	2.90	1.07	2.17	1.40	0.90	2.07	2.70	4.17	4.20	1.23	4.07	3.40	3.37	4.10	5.07	2.07	2.63	4.33	5.30	0.50	1.53	
MnO	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.04	0.02	0.04	0.04	0.05	0.01	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04	0.01	0.04	0.02	0.04	0.01	0.01	
MgO	0.87	1.46	0.50	1.26	0.78	0.27	0.82	1.07	2.01	2.04	0.44	1.64	1.44	1.50	2.20	2.67	1.46	1.52	2.47	2.57	0.38	1.12	
CaO	0.77	0.66	0.72	0.37	0.27	0.48	1.04	1.20	1.36	1.01	0.75	1.80	1.67	1.03	0.98	0.64	0.28	1.63	0.53	1.89	0.98	0.44	
Na ₂ O	2.59	2.12	2.89	1.55	1.88	3.08	2.98	2.84	2.45	2.67	3.60	2.36	2.43	1.99	2.21	1.58	1.82	2.50	2.14	2.66	3.05	1.48	
K ₂ O	4.46	3.75	4.71	6.71	5.42	5.41	4.34	4.15	4.82	4.14	3.58	4.42	4.33	5.93	2.97	3.49	5.72	4.66	3.50	3.49	3.69	3.60	
P ₂ O ₅	0.09	0.14	0.11	0.11	0.17	0.23	0.09	0.24	0.24	0.26	0.14	0.38	0.23	0.35	0.19	0.14	0.13	0.20	0.11	0.29	0.13	0.09	
H ₂ O ⁺	1.20	1.33	0.90	1.55	1.32	0.75	1.19	1.40	2.08	2.58	1.08	1.84	1.49	1.43	2.04	3.24	1.52	1.63	2.56	1.92	1.03	1.66	
CO ₂	0.09	0.09	0.14	0.05	0.05	0.05	0.18	0.05	0.32	0.05	0.09	0.23	0.23	0.09	0.05	0.05	0.14	0.14	0.27	0.05	0.45	0.14	
LOI	1.06	0.98	0.91	1.32	1.15	0.62	1.15	1.13	2.06	2.15	0.98	1.67	1.54	1.19	1.83	2.83	1.52	1.71	2.34	1.31	1.37	1.64	
Total	100.9	100.7	100.7	101.1	100.9	100.4	100.9	100.9	101.8	101.9	100.7	101.4	101.3	100.9	101.6	102.5	101.3	101.4	102.1	101.0	101.1	101.4	
A/CNK	1.30	1.46	1.24	1.37	1.45	1.24	1.22	1.21	1.32	1.47	1.24	1.25	1.24	1.28	1.69	2.15	1.40	1.23	1.77	1.32	1.25	1.89	

A/NK	1.50	1.69	1.40	1.46	1.53	1.34	1.46	1.50	1.68	1.77	1.42	1.72	1.67	1.52	2.13	2.54	1.48	1.64	2.01	1.87	1.50	2.12
Fe0 ^T	2.49	3.62	1.09	2.62	1.96	1.21	2.45	3.51	4.89	5.23	1.39	5.00	4.24	4.48	4.72	5.95	2.54	3.76	5.40	5.96	0.63	2.12
Mg [#]	41.9	44.9	45.3	48.8	45.9	31.7	39.6	38.6	44.7	44.2	37.7	39.7	40.7	41.1	47.5	47.0	53.5	46.6	48.1	45.3	54.9	52.9

Fe0^T 为全铁; A/NK=摩尔Al₂O₃/(Na₂O+K₂O); A/CNK=摩尔Al₂O₃/(CaO+Na₂O+K₂O); Mg[#]=100×Mg²⁺/(Mg²⁺+TFe²⁺)。

附表2 贺兰山中段黄旗口和白杨沟岩体微量元素组成 (10^{-6})Appendix table 2 Compositions of trace elements (10^{-6}) of the Helanshan and Baiyanggou granitic plutons in Helanshan

样品号	D0509-	D1991-	101-3-	401-2-	401-8-	401-10-	401-12-	D2812-	D2813-	D2817-
黄旗口早期岩体										
Li	33.2	34.2	11.3	32.9	15.4	35.7	30.9	49.6	45.7	16.5
Be	2.73	0.52	5.66	1.42	1.62	1.42	2.35	1.52	1.90	0.45
Sc	8.54	14.0	4.64	9.85	4.69	4.88	8.45	12.2	14.2	4.17
V	25.2	66.1	9.54	33.0	21.8	15.8	37.3	60.3	74.0	9.20
Cr	20.7	86.6	200	31.4	37.4	19.4	26.4	40.6	44.9	3.68
Co	8.09	10.2	1.69	5.36	4.79	2.73	6.98	9.66	10.4	1.62
Ni	5.83	32.8	6.37	7.12	11.4	3.74	6.92	12.8	14.8	1.72
Cu	2.99	14.2	1.92	11.0	28.2	1.43	5.49	6.19	4.02	1.58
Zn	27.9	66.1	11.0	46.5	28.6	40.2	46.2	47.5	52.0	30.3
Ga	17.4	16.9	15.6	17.0	14.8	17.0	17.2	20.8	21.5	16.2
Rb	170	173	115	208	161	163	131	182	197	130
Sr	106	143	75.1	137	136	147	265	175	186	143
Y	41.0	12.6	17.6	39.9	26.0	12.1	16.1	18.7	15.2	9.34
Zr	128	240	70.8	138	91.1	243	251	179	225	135
Nb	8.88	12.8	4.00	8.15	5.81	9.70	10.6	12.6	11.8	6.47
Mo	0.07	0.49	0.09	0.07	0.09	0.19	0.38	0.27	0.06	0.05
Sn	2.78	2.63	1.01	2.85	3.70	2.16	1.56	1.25	3.79	3.01
Cs	6.91	7.75	1.48	4.64	3.81	2.83	3.30	6.48	4.31	2.47
Ba	338	434	174	667	486	406	898	986	1066	790
La	28.3	33.8	15.1	36.9	18.2	55.0	56.8	45.6	32.1	22.4
Ce	64.5	73.0	33.0	81.8	38.2	112	109	95.6	75.0	42.0
Pr	7.80	8.61	4.16	9.77	4.75	13.1	12.3	11.2	8.21	4.73
Nd	30.3	33.3	15.6	37.8	18.2	49.1	45.8	43.7	32.3	17.7
Sm	6.60	6.44	3.23	7.87	3.85	8.73	7.78	7.40	6.12	3.98
Eu	0.70	1.05	0.36	1.15	0.91	0.89	1.40	1.48	1.33	0.60
Gd	5.73	4.88	2.52	6.93	3.65	6.11	5.86	5.78	4.92	3.41
Tb	1.00	0.62	0.41	1.13	0.64	0.71	0.73	0.76	0.66	0.50
Dy	6.48	2.85	2.68	6.94	4.10	2.93	3.40	3.83	3.34	2.30
Ho	1.33	0.46	0.56	1.38	0.85	0.42	0.59	0.68	0.56	0.34
Er	4.20	1.16	1.97	4.06	2.54	1.08	1.48	1.77	1.39	0.80
Tm	0.68	0.15	0.34	0.59	0.40	0.13	0.20	0.21	0.16	0.10
Yb	4.61	1.00	2.58	3.43	2.73	0.89	1.27	1.30	0.97	0.66
Lu	0.69	0.16	0.38	0.52	0.42	0.15	0.20	0.20	0.16	0.10
Hf	3.85	6.58	2.56	4.00	2.81	7.29	6.40	4.65	5.83	3.90
Ta	1.18	1.05	0.53	0.79	0.59	0.62	0.72	0.74	0.77	0.77
Tl	0.96	1.06	0.60	1.20	0.84	0.98	0.77	1.06	1.05	0.84
Pb	18.2	13.4	17.4	30.0	17.7	18.6	12.1	8.10	7.62	15.9
Th	10.9	10.4	4.21	12.8	5.02	19.0	14.7	12.7	8.00	10.2
U	3.93	3.65	1.83	3.24	2.61	5.84	1.99	1.21	1.46	1.95
Σ REE	204	180	101	240	125	263	263	238	183	109
(La/Yb)	4.39	24.3	4.19	7.73	4.78	44.4	32.1	25.1	23.7	24.3
δ Eu	0.34	0.54	0.36	0.46	0.72	0.35	0.60	0.66	0.71	0.48

续表2

样品号	D1961-1	D1963-2	D1964-2	D1975-3	D1983-1	101-4-1	101-7-2	101-11-2	401-7-1	D1514-4	D1514-13
	黄旗口晚期岩体									白杨沟	
Li	42.5	54.9	56.2	45.7	47.8	27.9	27.9	40.2	44.2	6.00	16.1
Be	0.48	1.80	1.27	2.45	2.55	2.64	1.84	2.36	1.28	1.17	2.38
Sc	14.0	11.4	11.3	13.4	15.5	7.95	9.95	14.4	14.7	1.15	1.36
V	61.7	51.5	56.9	87.5	100	29.0	48.5	76.0	76.8	4.82	6.53
Cr	53.6	60.1	35.3	137	139	111	64.4	125	51.9	6.54	10.2
Co	9.19	6.79	8.35	22.7	16.0	3.45	7.79	9.93	10.4	1.20	4.60
Ni	11.3	9.91	9.63	41.5	42.8	8.01	9.69	27.5	13.3	4.45	17.7
Cu	9.56	5.88	7.30	37.6	27.5	6.30	5.13	19.1	9.06	2.72	8.06
Zn	69.8	64.2	58.6	89.8	154	29.8	51.4	64.6	245	24.9	46.4
Ga	20.2	18.8	19.3	18.6	22.6	16.8	17.2	23.1	20.9	12.3	18.2
Rb	206	175	197	163	172	178	150	199	148	90.5	130
Sr	207	187	151	144	129	88.5	321	63.3	199	256	112
Y	27.3	21.4	26.8	33.7	40.7	25.0	19.0	43.0	13.8	5.76	9.77
Zr	194	216	186	167	159	104	157	151	267	59.2	166
Nb	15.4	10.6	13.6	8.69	12.8	8.49	8.21	16.8	12.7	1.36	1.37
Mo	0.07	0.19	0.11	0.19	0.13	0.074	0.17	0.11	0.26	0.05	0.05
Sn	2.48	3.05	2.30	1.58	2.63	1.37	2.40	3.16	2.29	0.79	0.77
Cs	6.79	9.18	9.34	4.82	3.05	3.95	3.61	7.41	6.92	0.50	2.03
Ba	890	834	766	741	871	446	882	246	872	610	561
La	42.3	46.8	33.2	24.0	31.9	25.5	34.3	23.6	46.1	25.0	51.3
Ce	93.9	97.9	71.3	49.9	69.4	55.7	73.7	49.9	96.5	49.2	108
Pr	11.7	11.6	8.77	6.08	8.06	6.80	8.70	6.17	11.5	5.87	12.8
Nd	47.3	45.7	34.9	24.2	31.6	26.5	33.5	23.9	45.4	22.4	50.1
Sm	9.52	8.33	7.48	4.89	6.28	5.66	6.45	5.24	8.02	4.31	9.73
Eu	1.38	1.41	1.24	1.14	1.24	0.80	1.28	0.54	1.63	1.21	1.10
Gd	7.58	6.24	6.77	4.55	5.97	4.80	5.10	5.19	6.28	3.31	6.96
Tb	1.08	0.85	1.06	0.86	1.05	0.75	0.73	0.94	0.75	0.39	0.78
Dy	5.59	4.44	5.75	5.62	6.98	4.41	3.76	6.62	3.33	1.53	2.94
Ho	0.99	0.75	0.94	1.15	1.38	0.83	0.67	1.38	0.51	0.23	0.36
Er	2.56	1.99	2.35	3.50	4.12	2.48	1.81	4.30	1.07	0.51	0.79
Tm	0.31	0.26	0.28	0.52	0.64	0.40	0.24	0.63	0.09	0.06	0.08
Yb	1.91	1.44	1.64	3.40	4.23	2.71	1.46	3.70	0.62	0.39	0.56
Lu	0.27	0.21	0.25	0.51	0.61	0.39	0.21	0.51	0.10	0.06	0.08
Hf	4.98	5.68	5.00	4.50	4.44	2.98	4.26	4.23	6.74	1.76	4.80
Ta	0.76	1.04	0.89	0.84	1.22	1.20	0.69	1.38	0.71	0.08	0.08
Tl	1.45	1.16	1.22	1.13	1.09	1.03	0.90	1.51	0.92	0.58	1.08
Pb	9.25	11.6	13.3	19.2	45.4	13.5	15.4	4.81	9.96	21.2	8.13
Th	8.29	11.8	9.87	6.21	9.69	8.73	9.74	7.82	8.76	6.53	19.5
U	2.00	2.12	2.14	3.06	3.11	3.11	1.32	3.81	1.04	0.75	1.89
∑REE	254	250	203	164	214	163	191	176	236	120	255

$(La/Yb)_N$	15.9	23.4	14.6	5.05	5.41	6.75	16.9	4.57	53.2	45.6	66.0
δEu	0.48	0.57	0.52	0.72	0.61	0.45	0.65	0.31	0.67	0.94	0.38

注: $\delta Eu = Eu_N / [(Sm_N + Gd_N) / 2]$, 下标 N 表示球粒陨石标准化数据.