

周舰. 冀北大囿古元古代花岗岩地球化学特征、岩石成因及其构造意义. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(3): 828-839. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220243.

Zhou Jian. Geochemistry, Petrogenesis and Tectonic Significance of the Paleoproterozoic Granites in Dahulun, North Hebei Province. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(3): 828-839. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220243.

冀北大囿古元古代花岗岩地球化学特征、 岩石成因及其构造意义

周 舰

核工业二四三大队, 内蒙古 赤峰 024000

摘要:冀北西部陆块东北缘局部地区发现古元古代花岗岩体, 由于缺少系统研究, 其地球化学特征及地质意义尚不清晰。本文对冀北大囿古元古代花岗岩的锆石 U-Pb 年代学、元素地球化学和 Sr-Nd-Pb 同位素进行了系统研究。结果显示: 两个花岗岩样品的锆石 U-Pb 年龄为 $(1\ 855 \pm 7)$ Ma 和 $(1\ 844 \pm 8)$ Ma。岩石高硅($w(\text{SiO}_2)$ 为 71.58%~74.01%)、高钾($w(\text{K}_2\text{O})$ 为 6.44%~7.07%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 为 3.68~4.20), 高铝饱和指数(A/CNK 为 1.12~1.27), 为钾质强过铝质岩石; 花岗岩富集轻稀土和大离子亲石元素, 亏损重稀土和高场强元素, 结合高 $\text{TFeO}/(\text{TFeO} + \text{MgO})$ 值(0.74~0.80)和高 10000 Ga/Al 值(3.36~3.55)及较高的锆石饱和温度(840~873 °C), 确定其具有 A_2 型花岗岩特征, 暗示其形成于碰撞造山后伸展构造体制。花岗岩样品具有较高的 Sr 初始值($(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 为 0.713 0~0.716 2)、负的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(-8.0~-7.6), Nd 二阶段模式年龄 $T_{\text{DM}2}$ 为 2.96~2.94 Ga, $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 、 $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 、 $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 值分别为 14.976~15.178、15.192~15.228 和 35.413~36.626。综合研究表明, 大囿钾质强过铝质花岗岩岩浆源自约 2.95 Ga 的中太古代下地壳物质部分熔融, 形成于华北克拉通东部陆块和西部陆块碰撞造山后的伸展构造环境。

关键词:大囿花岗岩; 古元古代; 锆石 U-Pb 年代学; 地球化学; 冀北

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220243

中图分类号:P595

文献标志码:A

Geochemistry, Petrogenesis and Tectonic Significance of the Paleoproterozoic Granites in Dahulun, North Hebei Province

Zhou Jian

No.243 Geological Party, CNNC, Chifeng 024000, Inner Mongolia, China

Abstract: Paleoproterozoic granites were discovered in localized areas of the northeastern margin of the landmass in the western part of north Hebei Province. However, systematically studies on their geochemical characteristics and geological significance are still unclear. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry, and Sr-Nd-Pb isotopes analysis on the Paleoproterozoic granites in the Dahulun area,

收稿日期:2022-08-31

作者简介:周舰(1989—), 男, 工程师, 主要从事铀矿地质研究与勘查方面的研究, E-mail:1045620827@qq.com

基金项目:中国核工业地质局铀矿调查项目(202001)

Supported by the Project of China National Nuclear Corporation (202001)

north Hebei Province, have been systematically studied. Two granite samples have been dated to $(1\ 855 \pm 7)$ Ma and $(1\ 844 \pm 8)$ Ma, and are rich in silicon ($w(\text{SiO}_2) = 71.58\% - 74.01\%$) and potassium ($w(\text{K}_2\text{O}) = 6.44\% - 7.07\%$), with $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ratios from 3.68 to 4.20 and A/CNK values from 1.12 to 1.27, displaying characteristics of strongly peraluminous, relatively potassic granites. They are enriched in light rare earth elements and large ion lithophilic elements, depletion in heavy rare earth elements and high field strength elements. Additionally, they show high $\text{TFeO}/(\text{TFeO} + \text{MgO})$ (0.74 - 0.80), and $10000 \times \text{Ga}/\text{Al}$ ratios (3.36 - 3.55) and high zircon saturation temperature (840 - 873 °C), which are typical characteristics of A_2 -type granite in a post-collisional extensional setting. All sample have high initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values of 0.713 0 - 0.716 2 and negative $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ values of -8.0 to -7.6, with two-stage model ages ($T_{\text{DM}2}$) ranging from 2.96 to 2.94 Ga. The $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$, $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$ and $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$ ratios were 14.976 - 15.178, 15.192 - 15.228 and 35.413 - 36.626, respectively. The comprehensive study shows that the Dahulun granitic magma originated from the partial melting of the ~ 2.95 Ga Mesoarchean lower crust and was produced in an extensional tectonic setting following the collision between the Eastern and Western blocks of the North China Craton.

Key words: Dahulun granite; paleoproterozoic; zircon U - Pb geochronology; geochemistry; northern Hebei Province

0 引言

华北克拉通是全球最古老的克拉通之一,经历了约 3.8 Ga 的漫长演化过程,记录了几乎地球早期发展的所有重大事件^[1-3],其构造单元划分和前寒武纪演化历史一直是该地区研究的热点问题^[4-8]。Zhao 等^[8]将华北克拉通分为东部陆块、西部陆块及二者之间的中央造山带,又在东部、西部陆块中进一步划分出胶—辽—吉带和孔兹岩带,并基于岩石学、岩石地球化学和同位素年代学,以及区域变质作用过程中压力、温度随时间变化的态势和轨迹的研究,认为东、西陆块在约 1.85 Ga 发生碰撞拼合形成中央造山带^[4,7-8],并最终形成稳定统一的华北克拉通,其可能与全球 Columbia 超大陆的汇聚事件相关^[4,7-9]。本文旨在通过对位于西部陆块东北缘的古元古代大囿圈花岗岩的年代学、岩石地球化学和 Sr-Nd-Pb 同位素研究,精确厘定其形成时代,约束岩石成因及其形成的大地构造背景,为探讨华北克拉通古元古代晚期构造演化提供岩浆岩证据。

1 地质背景及样品特征

研究区位于河北省张北县—沽源县之间,地处华北克拉通北缘西部陆块东北缘(图 1a),研究区出露的地层主要为下白垩统张家口组一段的流纹质火

山碎屑岩和二段的粗面岩、安山岩,侵入岩主要为古元古代变质黑云母二长花岗岩和变质正长花岗岩,及与张家口组火山岩同期的石英正长斑岩^①,整体上研究区约 45% 被第四系覆盖(图 1b)。

样品采自张北县大囿圈镇东北约 5.5 km 处(图 1b),地理坐标 $41^\circ 22' 32''\text{N}$, $115^\circ 14' 25''\text{E}$ 附近,该花岗岩被下白垩统张家口组火山岩不整合覆盖。河北省区域地质矿产调查研究所^①认为该花岗岩经历了变质作用改造,称之为变质花岗岩。但本文野外和显微镜下观察认为所研究的花岗岩基本没有发生变质(图 2),岩性为黑云母正长花岗岩,岩石呈淡红色,细粒半自形粒状结构,块状构造,主要由钾长石(40%~45%)、石英(30%~35%)、斜长石(15%~20%)和黑云母(<5%)组成,矿物蚀变微弱。

2 分析方法

锆石 U-Pb 同位素测年在中国地质调查局天津地质调查中心实验室采用 LA-ICP-MS 方法完成,激光束斑直径为 29 μm ,剥蚀频率为 7 Hz。U-Pb 同位素定年和微量元素质量分数处理时采用 91500 锆石标样和 SRM 610 玻璃标样作外标,分别进行同位素和微量元素分馏校正,测试数据采用 ICPMSDataCal 软件^[11]和 GLITTER 软件进行处理,普通 Pb 校正采用 Anderson^[12]的方法,年龄计

①河北省区域地质矿产调查研究所. 中华人民共和国 1:50 000 地质图(大囿圈幅(K50E016005)、羊囿圈幅(K50E016006)). 北京:全国地质资料馆,2003.

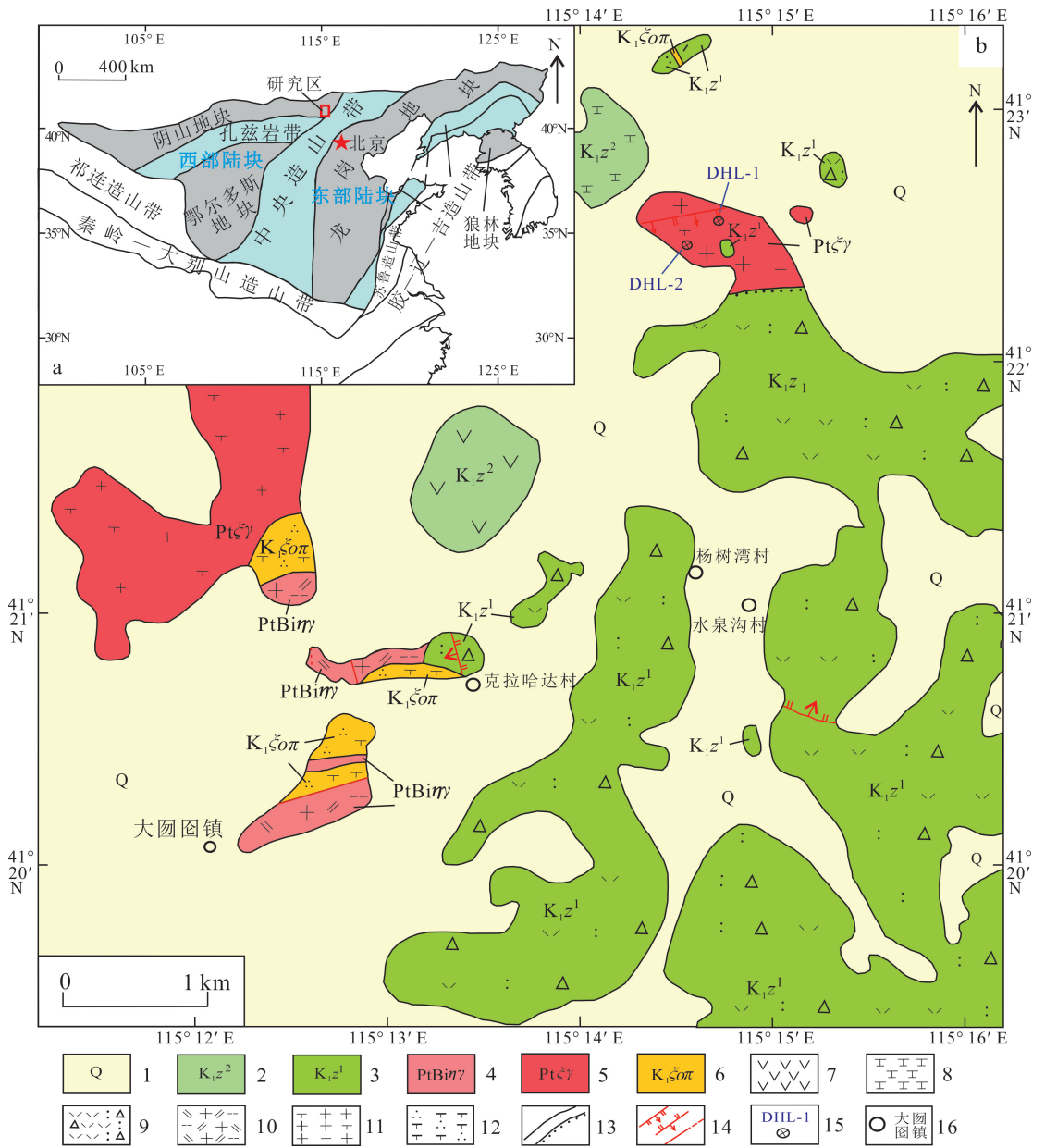


图 1 研究区大地构造位置图(a)及地质图(b)

Fig.1 Tectonic background map (a) and geologic map (b) of the study area

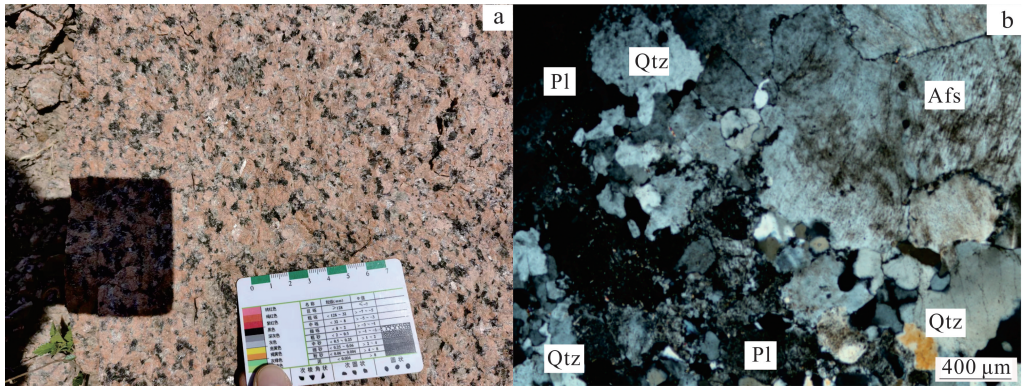
1. 第四系; 2. 张家口组二段; 3. 张家口组一段; 4. 古元古代变质黑云母二长花岗岩; 5. 古元古代变质正长花岗岩; 6. 早白垩世石英正长斑岩; 7. 安山岩; 8. 粗面岩; 9. 流纹质角砾凝灰岩; 10. 黑云母二长花岗岩; 11. 正长花岗岩; 12. 石英正长斑岩; 13. 整合及角度不整合界线; 14. 正断层、逆断层、实测及推测性质不明断层; 15. 样品位置及编号; 16. 地名。a 据文献[10]修编; b 据脚注①修编。

算及谐和图绘制采用 Isoplot 程序^[13]完成。

大囿囿花岗岩样品地球化学成分分析由核工业二〇八大队分析测试中心完成。先将岩石样品粉碎至厘米级,再选取无蚀变或弱蚀变的新鲜样品粉碎至 200 目。主量元素分析采用 X 射线荧光光谱

(XRF) 方法,数据误差优于 ±1%,其中 FeO、H₂O⁺、S、CO₂ 等质量分数采用化学方法分析;微量元素分析采用等离子体质谱(ICP-MS)方法,所测数据误差优于 ±5%,部分挥发性元素及质量分数极低元素的分析误差优于 ±10%。

①河北省区域地质矿产调查研究所. 中华人民共和国 1:50 000 地质图(大囿囿幅(K50E016005)、羊囿囿幅(K50E016006)). 北京: 全国地质资料馆, 2003.



Pl. 斜长石; Qtz. 石英; Afs. 钾长石。

图 2 大囿圈花岗岩手标本(a)及镜下岩相学(b)特征

Fig.2 Specimen (a) and microscopic petrographic (b) characteristics of Dahulun granite

全岩 Sr - Nd - Pb 同位素分析在中国地质调查局天津地质调查中心实验室完成。其中,全岩 Sr - Nd - Pb 同位素利用 Triton 型热电质谱仪(TIMS)测定, Sr、Nd 和 Pb 同位素比值利用 $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 8.375209$ 和 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 分别对 Sr 和 Nd 进行质量分馏校正。铅同位素测量采用硅胶发射剂和铯金属带,利用铅标准物质 NBS981 监控仪器状态,实验过程以国际标准岩石样品 BCR - 2(玄武岩)监测分离流程。

3 分析结果

3.1 锆石 U - Pb 定年

本次对大囿圈花岗岩 DHL - 1、DHL - 2 的 2 个样品进行了锆石 U - Pb 同位素测试,所测锆石均呈自形一半自形柱状,震荡环带清晰(图 3),属于岩浆结晶锆石^[14]。测试分析结果如图 4 和表 1 所示。对 DHL - 1 和 DHL - 2 两个样品各分析了 29 粒锆石,去除普通 Pb 质量分数高和 Pb 丢失严重的测点

数据后,样品 DHL - 1 有 16 个锆石颗粒测试数据可用,其 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄主要变化于 1 884 ~ 1 832 Ma 之间,大多数位于谐和线右侧,加权平均年龄为 $(1\ 855 \pm 7)\text{Ma}$, MSWD = 1.10; 样品 DHL - 2 有 14 个锆石测点数据可用,其 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄主要介于 1 863 ~ 1 825 Ma 之间,测点也基本位于谐和线右侧,加权平均年龄为 $(1\ 844 \pm 8)\text{Ma}$, MSWD = 0.63。本次测年结果表明大囿圈花岗岩形成于 1.85 ~ 1.84 Ga 的古元古代晚期。

3.2 地球化学特征

大囿圈花岗岩的主量、微量和稀土元素分析结果列于表 2。

3.2.1 主量元素

大囿圈花岗岩的 $w(\text{SiO}_2)$ 较高,为 71.58% ~ 74.01%,极为富钾, $w(\text{K}_2\text{O})$ 为 6.44% ~ 7.07%,贫钠, $w(\text{Na}_2\text{O})$ 为 1.61% ~ 1.75%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 3.68 \sim 4.20$,属钾质花岗岩;岩石的 $w(\text{MgO})$ 、 $w(\text{CaO})$ 低,分别为 0.23% ~ 0.27% 和 0.97% ~ 1.27%; $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$

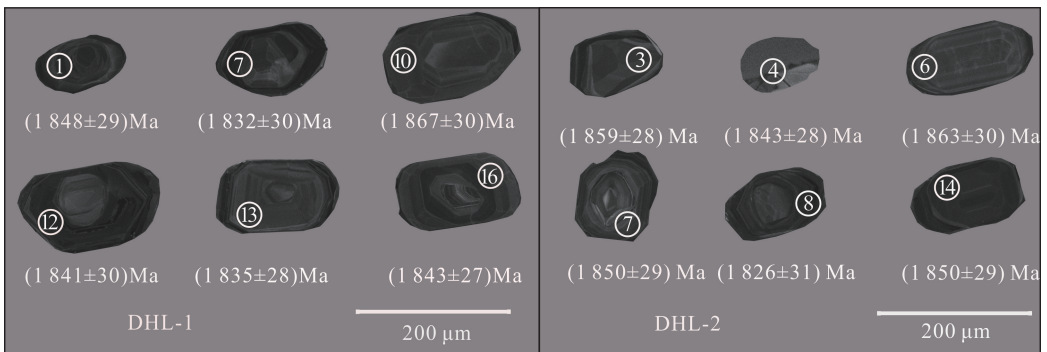


图 3 大囿圈花岗岩典型锆石测点位置和年龄

Fig.3 Laser U - Pb isotopic spots and ages of Dahulun granite

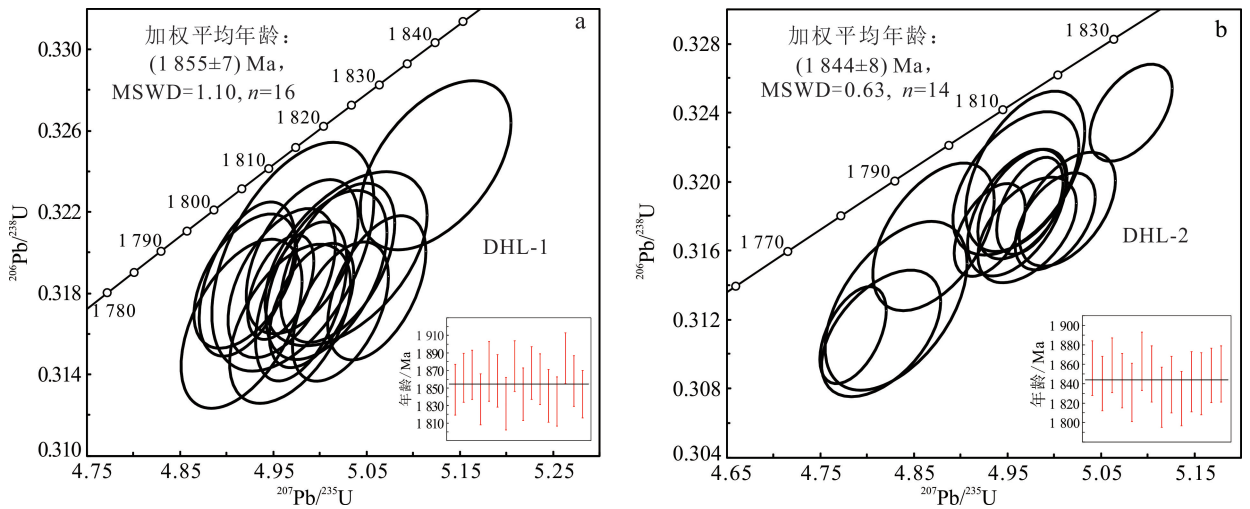


图 4 大囫圇花岗岩锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄谐和图

Fig. 4 Zircon $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ age concordant map of Dahulun granite

中等,为 14.05%~14.82%,铝饱和指数 $A/\text{CNK} = 1.12\sim 1.27$,属于强过铝质岩石($A/\text{CNK} > 1.1$);在 CIPW 标准矿物 An - Ab - Or 花岗岩分类图解上样品均位于花岗岩区(图 5),与岩相学观察到的结论吻合。在 $w(\text{K}_2\text{O}) - w(\text{SiO}_2)$ 图解上样品均位于钾玄岩系列区(图 6)。综上,大囫圇花岗岩为钾质强过铝质花岗岩。

3.2.2 稀土和微量元素

大囫圇花岗岩的稀土总量 $w(\sum \text{REE})$ 为 $154.30 \times 10^{-6} \sim 202.36 \times 10^{-6}$,明显富集轻稀土亏损重稀土, $\text{LREE}/\text{HREE} = 11.27 \sim 12.69$,轻重稀土元素分馏程度较强, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 14.01 \sim 17.84$,基本无铈异常($\delta\text{Eu} = 0.81 \sim 1.03$)。稀土元素球粒陨石标准化配分曲线为较平滑的右倾型(图 7a)。从微量元素原始地幔标准化蛛网图中(图 7b)可以看出大囫圇花岗岩富集 K、Rb、La、Zr、Hf、Th 等元素,较强烈亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素。

3.3 Sr - Nd - Pb 同位素

大囫圇花岗岩 4 件全岩样品的 Sr - Nd - Pb 同位素分析结果列于表 3。从表 3 中可知,花岗岩的初始 Sr 值较高($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 为 0.713 0~0.716 2,平均值为 0.715 8,显示出变质沉积泥质岩石部分熔融成因的特征,这与 $A/\text{CNK} > 1.1$ 所指示的源区特征一致; $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值为 0.511 195~0.511 333, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 -8.0~-7.6,对应的 Nd 二阶段模式年龄 $T_{\text{DM}2}$ 为 2.96~2.94 Ga,这些特征表明其源区岩石是形成于约 2.95 Ga 的古老地壳。样品全岩

($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i = 14.976~15.178, ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i = 15.192~15.228, ($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i = 35.413~36.626,也显示出岩浆来自下地壳的特征。

4 讨论

4.1 岩石成因类型

由前述可知,大囫圇花岗岩是形成于 1.85~1.84 Ga 的钾质强过铝质岩石,其较高的 TFeO/MgO(2.88~4.11)、TFeO/(TFeO+MgO)(0.74~0.80)、10000Ga/Al(3.36~3.55)值和较高的锆石饱和温度(840~873 °C,温度计算方法见文献[16-17]),显示出 A 型花岗岩特征^[18](图 8),较强烈亏损 Nb、Ta、P 和 Ti 元素。但几乎无铈异常($\delta\text{Eu} = 0.81 \sim 1.03$)的地球化学特征又与典型的 A 型花岗岩有很大区别。已有研究表明^[19-22],分布在华北克拉通恒山、尚义、小秦岭和鲁山地区以及青藏部分地区的钾质花岗岩也具有类似特征。有关该类型花岗岩的成因主要为:钾质花岗岩来源于以 TTG 片麻岩为代表的晚太古代陆壳物质^[19]、幔源岩浆分离结晶并且同化混染早期奥长花岗岩^[21]以及受到地壳物质混染^[20,22]。

4.2 岩浆源区性质

目前,有关铝质 A 型花岗岩的成因有较多争议,Anderson 等^[23]认为铝质 A 型花岗岩起源于低 $f_{\text{H}_2\text{O}}$ (水逸度)、高 f_{O_2} (氧逸度)的过铝质下地壳变质沉积岩的部分熔融;Creaser 等^[24]提出英云闪长质到花岗闪长质成分的地壳岩浆源岩经部分熔融

表 1 大囿圈花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年数据

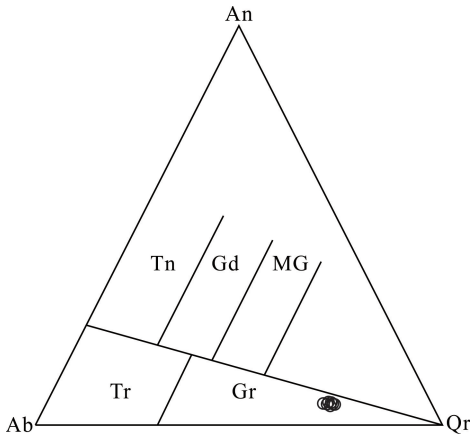
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating data of Dahulun granites

测点号	$\epsilon_{\text{Pb}}/10^{-6}$		Th/U	同位素比值										年龄/Ma			
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	2σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2σ		
样品号: DHL-1																	
1	61.6	981	0.06	0.113 1	0.001 8	4.981 0	0.049 0	0.319 8	0.003 1	0.099 3	0.001 8	1.848	29	1 815	8	1 789	15
2	81.8	981	0.08	0.114 0	0.001 7	4.991 0	0.037 0	0.317 4	0.002 5	0.100 6	0.001 4	1.862	28	1 817	6	1 789	12
3	55.9	1 273	0.04	0.114 2	0.001 8	4.980 0	0.040 0	0.317 6	0.003 2	0.097 0	0.002 0	1.865	28	1 816	7	1 789	16
4	44.0	897	0.05	0.112 4	0.001 8	4.916 0	0.053 0	0.316 5	0.003 4	0.097 0	0.002 2	1.837	29	1 804	9	1 789	16
5	36.2	891	0.04	0.114 5	0.002 1	5.124 0	0.066 0	0.324 3	0.003 4	0.108 5	0.003 7	1.869	34	1 839	11	1 811	16
6	60.5	859	0.07	0.113 7	0.001 9	4.968 0	0.053 0	0.316 5	0.003 2	0.102 8	0.002 1	1.858	30	1 813	9	1 789	15
7	49.9	844	0.06	0.112 2	0.001 8	4.920 0	0.045 0	0.318 6	0.002 7	0.097 9	0.002 2	1.832	30	1 805	8	1 789	13
8	36.2	772	0.05	0.114 8	0.001 8	5.022 0	0.042 0	0.317 1	0.002 8	0.096 7	0.002 6	1.875	29	1 824	8	1 789	14
9	40.2	647	0.06	0.112 8	0.001 8	4.971 0	0.071 0	0.319 8	0.004 6	0.096 1	0.002 5	1.843	30	1 813	12	1 789	22
10	58.5	881	0.07	0.114 3	0.001 9	5.028 0	0.071 0	0.319 7	0.003 5	0.106 6	0.004 0	1.867	30	1 823	12	1 789	17
11	51.3	1 310	0.04	0.113 9	0.001 8	5.007 0	0.053 0	0.318 9	0.003 4	0.099 2	0.002 0	1.860	29	1 820	9	1 789	17
12	48.1	832	0.06	0.112 7	0.001 9	4.959 0	0.047 0	0.318 5	0.003 0	0.099 8	0.002 1	1.841	30	1 812	8	1 789	15
13	72.9	1 029	0.07	0.112 3	0.001 7	4.922 0	0.042 0	0.318 7	0.003 1	0.091 0	0.001 6	1.835	28	1 806	7	1 789	15
14	213.0	906	0.23	0.115 4	0.001 8	5.068 0	0.043 0	0.318 0	0.002 9	0.032 6	0.000 7	1.884	29	1 830	7	1 789	14
15	45.2	1 046	0.04	0.113 7	0.001 9	5.019 0	0.050 0	0.319 5	0.003 2	0.101 5	0.003 8	1.858	29	1 822	8	1 789	16
16	90.7	1 008	0.09	0.112 8	0.001 7	4.958 0	0.029 0	0.318 3	0.002 1	0.095 2	0.001 1	1.843	27	1 812	5	1 789	10
样品号: DHL-2																	
1	29.0	829	0.03	0.113 7	0.001 8	5.082 0	0.036 0	0.324 0	0.002 3	0.102 1	0.001 9	1.856	28	1 832	6	1 809	11
2	47.8	785	0.06	0.112 6	0.001 7	4.931 0	0.031 0	0.317 2	0.002 2	0.099 6	0.001 9	1.840	28	1 807	5	1 776	11
3	377.0	1 142	0.33	0.113 8	0.001 8	5.001 0	0.035 0	0.317 7	0.002 3	0.098 4	0.000 8	1.859	28	1 820	6	1 778	11
4	41.9	1 006	0.04	0.112 8	0.001 8	4.966 0	0.039 0	0.318 7	0.002 6	0.101 7	0.001 9	1.843	28	1 813	7	1 783	13
5	33.4	948	0.04	0.112 1	0.001 9	4.815 0	0.052 0	0.311 2	0.003 0	0.095 5	0.002 4	1.831	30	1 787	9	1 747	15
6	39.4	741	0.05	0.114 1	0.001 9	5.014 0	0.042 0	0.318 4	0.002 7	0.106 6	0.004 2	1.863	30	1 821	7	1 782	13
7	65.9	713	0.09	0.113 3	0.001 8	4.971 0	0.043 0	0.317 2	0.002 5	0.105 2	0.002 1	1.850	29	1 814	7	1 776	12
8	32.0	1 174	0.03	0.111 7	0.001 9	4.871 0	0.053 0	0.316 8	0.003 5	0.100 3	0.003 3	1.826	31	1 797	9	1 774	17
9	650.0	658	0.99	0.112 6	0.001 8	4.959 0	0.055 0	0.319 9	0.003 4	0.090 8	0.001 1	1.839	29	1 812	9	1 789	17
10	56.8	1 377	0.04	0.111 7	0.001 7	4.785 0	0.029 0	0.311 1	0.002 3	0.096 0	0.001 3	1.825	28	1 782	5	1 746	11
11	100.0	1 100	0.09	0.112 7	0.002 0	4.969 0	0.052 0	0.320 6	0.003 8	0.097 1	0.001 9	1.842	31	1 814	9	1 789	18
12	499.0	932	0.54	0.112 6	0.002 0	4.831 0	0.062 0	0.312 8	0.004 0	0.091 3	0.001 4	1.840	32	1 790	11	1 754	20
13	98.5	1 146	0.09	0.113 1	0.001 7	4.974 0	0.029 0	0.318 6	0.002 3	0.095 9	0.001 1	1.849	28	1 815	5	1 789	11
14	33.4	904	0.04	0.113 2	0.001 8	4.960 0	0.043 0	0.318 2	0.003 0	0.100 3	0.003 1	1.850	29	1 812	7	1 789	15

表 2 大圖岡花岗岩主量元素、微量和稀土元素分析结果
 Table 2 Analysis results of major elements, trace and rare earth elements in Dahulun granite

样品号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	K ₂ O/ Na ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O ⁺	H ₂ O ⁻	S	CO ₂	烧失量	总量	An	Ab	Or	TFeO/ MgO
DHL-1	72.49	0.09	14.05	0.54	0.59	0.05	0.26	1.11	1.73	7.06	4.08	0.02	0.66	0.20	0.006	0.319	0.75	99.39	3.43	14.85	42.44	4.11
DHL-2	73.71	0.08	14.42	0.18	0.60	0.01	0.25	0.97	1.61	6.76	4.20	0.02	0.76	0.08	0.005	0.301	0.46	99.82	2.82	13.79	40.37	3.03
DHL-3	74.01	0.07	14.16	0.14	0.55	0.01	0.23	1.02	1.64	6.46	3.94	0.02	0.66	0.07	0.004	0.279	0.63	99.61	3.23	14.04	38.74	3.01
DHL-4	73.10	0.08	14.35	0.18	0.66	0.01	0.27	1.10	1.71	6.59	3.85	0.03	0.78	0.10	0.005	0.370	0.79	99.66	3.04	14.66	39.57	3.01
DHL-5	73.40	0.07	14.32	0.14	0.54	0.01	0.23	1.27	1.75	6.44	3.68	0.02	0.92	0.08	0.004	0.502	0.82	99.93	3.05	15.02	38.56	2.88
DHL-9	73.40	0.08	14.63	0.19	0.57	0.01	0.25	1.02	1.61	6.45	4.01	0.02	0.72	0.59	0.005	0.378	1.17	100.13	2.60	13.85	38.65	2.99
DHL-10	71.58	0.08	14.82	0.16	0.63	0.01	0.24	1.11	1.70	7.07	4.16	0.02	0.78	0.16	0.005	0.363	0.77	98.98	3.19	14.69	42.73	3.20
样品号	A/ CNK																					
	TFeO/ (TFeO+ MgO)																					
DHL-1	0.80	1.12	1.60	29.82	1.27	4.98	135.41	72.10	41.23	94.83	7.96	24.52	4.93	1.43	4.45	0.63	3.70	0.68	1.82	0.30	1.87	0.33
DHL-2	0.75	1.23	1.72	27.74	1.11	4.34	86.79	77.80	48.16	80.07	9.41	31.55	5.85	1.67	4.95	0.68	3.95	0.68	1.85	0.29	1.90	0.32
DHL-3	0.75	1.23	1.75	25.55	1.08	3.73	72.27	78.30	46.88	77.87	9.03	30.33	5.59	1.63	4.77	0.67	3.77	0.66	1.92	0.28	1.89	0.32
DHL-4	0.75	1.20	1.73	26.65	1.14	3.31	102.12	78.40	49.80	85.96	10.00	33.81	6.22	1.54	5.22	0.72	3.95	0.71	1.93	0.28	1.88	0.34
DHL-5	0.74	1.18	1.75	22.27	1.07	2.92	86.79	77.80	36.61	68.66	7.20	24.10	4.61	1.40	3.96	0.54	3.02	0.53	1.61	0.23	1.55	0.28
DHL-9	0.75	1.27	1.81	30.24	1.28	4.79	102.12	71.20	42.33	77.92	8.38	27.73	5.32	1.70	4.56	0.65	3.93	0.70	1.97	0.30	2.04	0.35
DHL-10	0.76	1.19	1.69	28.43	1.27	4.26	153.47	76.50	41.33	77.92	8.14	26.93	5.18	1.61	4.48	0.61	3.81	0.67	1.89	0.29	1.93	0.33
样品号	10000Ga/ Al																					
	LREE/ HREE																					
	(La/Yb) _N δEu																					
	Ti/Zr T _{Zr} /°C																					
	Nd/Th																					
DHL-1	140.88	392.96	8.59	1.61	5.24	0.88	531.39	288.29	8.04	13.84	35.07	26.36	3.55	11.28	35.76	188.68	12.69	14.87	0.92	1.77	850	2.86
DHL-2	131.10	459.57	10.55	1.68	4.14	0.89	533.76	290.50	8.92	12.80	23.32	26.74	3.50	13.34	33.37	191.33	12.09	17.10	0.93	1.57	861	2.99
DHL-3	130.06	457.06	9.54	1.54	3.82	0.80	506.92	284.38	8.96	12.43	19.01	25.75	3.44	13.88	29.08	185.61	12.00	16.72	0.94	1.50	860	3.18
DHL-4	128.07	473.32	11.89	1.82	3.60	0.57	470.63	281.34	8.59	12.76	18.78	26.87	3.54	14.37	37.87	202.36	12.47	17.84	0.81	1.73	855	2.84
DHL-5	114.96	454.57	8.16	1.40	3.09	0.57	578.28	245.11	7.64	9.88	18.03	25.48	3.36	12.16	36.66	154.30	12.16	15.98	0.98	1.59	840	2.95
DHL-9	141.87	461.44	7.57	1.75	4.68	1.03	523.96	316.93	10.65	12.85	22.41	27.26	3.52	15.18	42.87	177.86	11.27	14.01	1.03	1.57	873	3.67
DHL-10	141.81	423.07	7.67	1.74	4.24	0.76	539.90	288.99	9.14	12.64	23.75	26.62	3.39	13.56	37.50	175.11	11.51	14.46	1.00	1.70	855	3.51

注:主量元素质量分数单位为%;微量和稀土元素质量分数单位为10⁻⁶;T_{Zr}为锆饱和温度。



Tn. 英云闪长岩;Gd. 花岗闪长岩;MG. 二长花岗岩;Tr. 奥长花岗岩;Gr. 花岗岩。底图数据据文献[15]。

图 5 大囿图花岗岩 An - Ab - Or 分类图解

Fig.5 An - Ab - Or classification diagram of Dahulun granite

作用可以派生出偏铝质 A 型花岗岩;King 等^[25]认为铝质 A 型花岗岩起源于具正常含水量的长英质下地壳的部分熔融,其源区应是经过地幔流体交代的饱满型源区,富集碱金属和高场强元素,最理想的源区岩石应是饱满型长英质麻粒岩;Poitrasson 等^[26]也主张铝质 A 型花岗岩起源于下部地壳物质的部分熔融,但他们认为下地壳源区的成分主要是镁铁质的。

大囿图花岗岩的高硅高钾、富集轻稀土和亏损重稀土元素的特征,以及样品的 Ti/Zr 值为 1.50~1.77(地壳 Ti/Zr<30)^[27],Nd/Th 值为 2.84~3.67

(幔源岩石 Nd/Th>15)^[28],暗示岩浆应来自地壳物质部分熔融。在 $\epsilon_{Nd}(t)-t$ 图解(图 9a)上大囿图钾质花岗岩样品均落在新太古代地壳演化区,在 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}-^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解(图 9b)中样品点落于下地壳区域,以及 Nd 二阶段模式年龄为 2.96~2.94 Ga,这表明大囿图古元古代晚期钾质花岗岩源自约 2.95 Ga 中太古代下地壳岩石的部分熔融,综合岩石较高的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值(0.713 0~0.716 2)和 A/CNK 值(1.12~1.27),其源岩应以下地壳高级变质沉积岩为主^[29]。

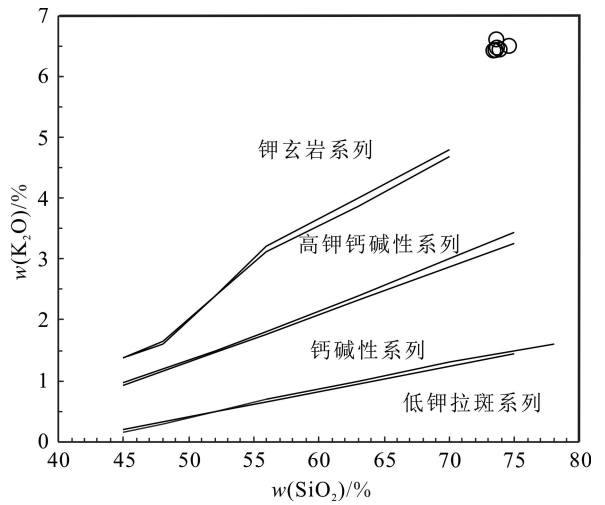


图 6 大囿图花岗岩 w(K₂O)-w(SiO₂)图解

Fig.6 w(K₂O) - w(SiO₂) diagram of Dahulun granite

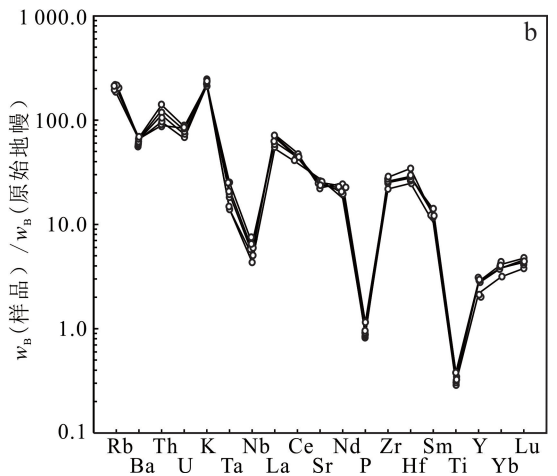
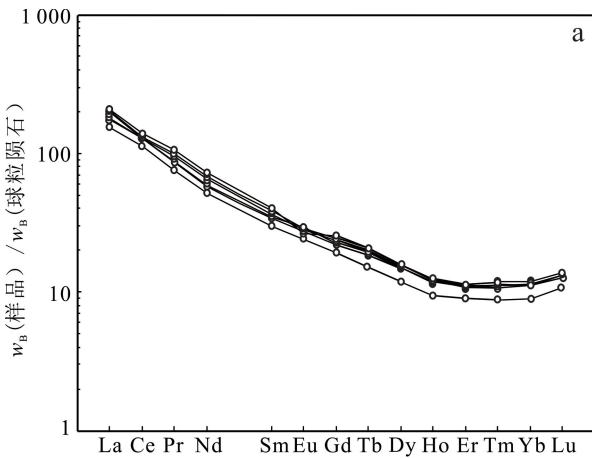


图 7 大囿图花岗岩稀土元素球粒陨石标准化配分图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)

Fig.7 Chondrite-normalized REE distribution pattern (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagram (b) of Dahulun granite

表 3 大囫图花岗岩 Sr - Nd - Pb 同位素分析结果
Table 3 Sr - Nd - Pb isotopic analysis result of Dahulun granite

样品号	Rb	Sr	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	2σ	(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _i	Sm	Nd	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	2σ
DHL - S1	141	531	0.770 436	0.736 590	0.000 007	0.716 2	4.9	24.5	0.121 516	0.511 333	0.000 002
DHL - S2	131	534	0.711 667	0.735 047	0.000 007	0.716 1	5.8	31.5	0.112 238	0.511 221	0.000 005
DHL - S3	130	507	0.743 827	0.734 797	0.000 011	0.715 1	5.6	30.3	0.111 497	0.511 203	0.000 005
DHL - S4	128	471	0.788 295	0.733 940	0.000 009	0.713 0	6.2	33.8	0.111 215	0.511 195	0.000 003

样品号	ε _{Nd} (t)	T _{DM2} / Ga	U	Th	Pb	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	(²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb) _t	(²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb) _t	(²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb) _t
DHL - S1	-7.7	2.94	1.61	8.59	32.70	15.948 5	15.301	37.0	14.976	15.192	35.413
DHL - S2	-7.6	2.94	1.68	10.55	37.10	16.037 3	15.320	37.8	15.125	15.217	36.056
DHL - S3	-7.9	2.96	1.54	9.54	37.60	15.896 3	15.297	36.9	15.088	15.207	35.450
DHL - S4	-8.0	2.96	1.82	11.89	39.50	16.110 6	15.332	38.4	15.178	15.228	36.626

注:Rb,Sr,Sm,Nd,U,Th,Pb 质量分数的单位为 10⁻⁶。

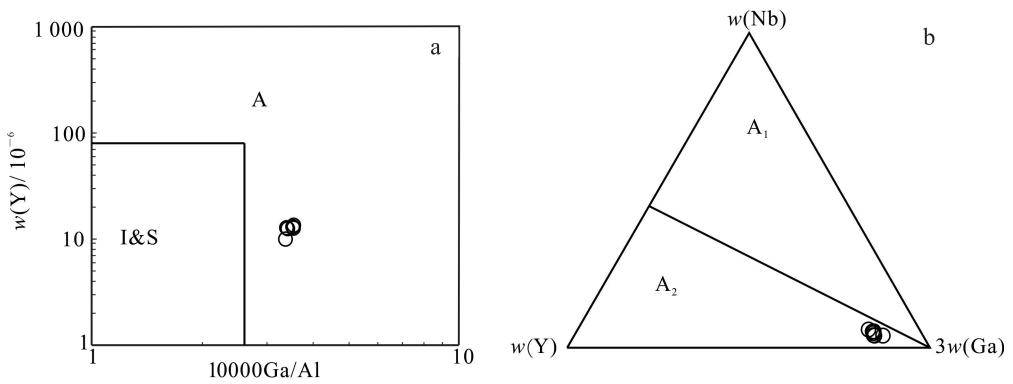
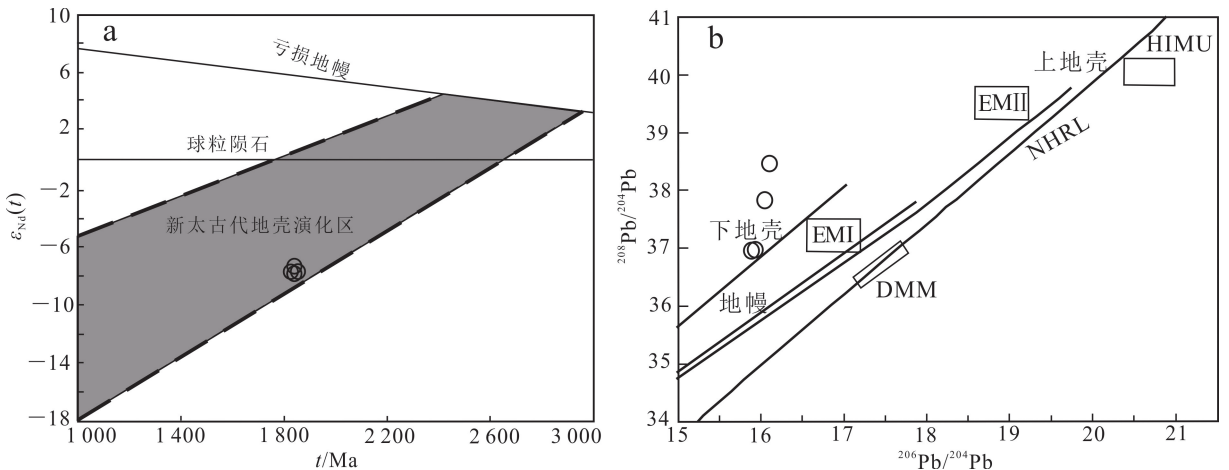


图 8 大囫图花岗岩成因类型地球化学判别图解

Fig.8 Geochemical discriminant diagram of the genetic types of Dahulun granite



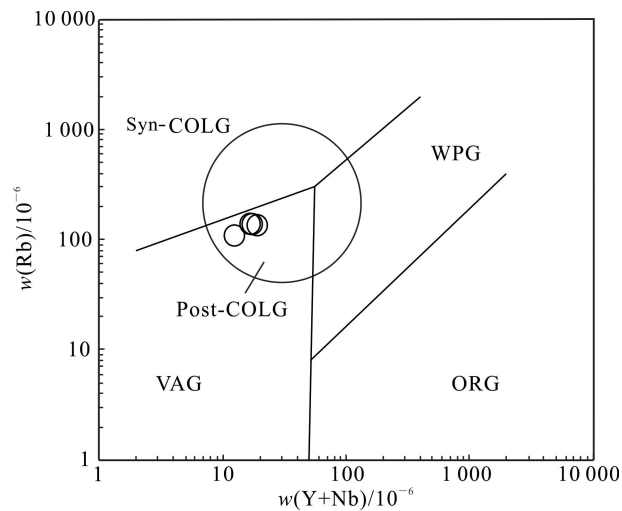
a 据文献[27]修改。HIMU. 具有高 U/Pb 值的地幔;DMM. 亏损地幔端元;EM I、EM II. 富集地幔端元;NHRL. 北半球参考线。

图 9 大囫图花岗岩年龄 ε_{Nd}(t) - t 变异图解 (a) 及 ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb - ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 图解 (b)

Fig.9 ε_{Nd}(t) - t variation diagram (a) and ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb - ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb diagram (b) of Dahulun granite

4.3 大囿图花岗岩形成的构造环境

大囿图花岗岩高钾和 A 型花岗岩特征暗示其与伸展构造背景密切相关,应形成于造山后或非造山构造环境^[30-31]。Eby^[32]基于不同 A 型花岗岩在微量元素组成特征上的差异将其进一步划分为 A₁ 和 A₂ 型,前者通常形成于非造山的大陆裂谷或大陆板内构造环境,后者通常形成于造山后的构造环境,并为地壳部分熔融的成因。相关判别图解显示大囿图钾质花岗岩属于 A₂ 型(图 8b),且位于后碰撞区域(图 10),表明其形成于造山后的伸展构造背景。



ORG. 大洋中脊花岗岩;WPG. 板内花岗岩;VAG. 火山弧花岗岩;Syn-COLG. 同碰撞花岗岩;Post-COLG. 后碰撞花岗岩。

图 10 大囿图花岗岩构造环境判别图解

Fig. 10 Discriminant diagram of tectonic environment of Dahulun granite

已有大量研究证实,华北克拉通东部陆块和西部陆块在古元古代末期约 1.85 Ga 发生陆-陆碰撞拼合^[33-37],随后形成一系列造山后伸展背景的岩浆岩,包括 1.80~1.75 Ga 熊耳群双峰式火山岩^[38-39]和 1.68~1.62 Ga 长城系火山-沉积建造^[31],以及与它们同期的基性岩墙群和 1.72~1.60 Ga 的斜长岩-环斑花岗岩、碱性岩-碱性花岗岩等非造山岩浆活动。本文所研究的大囿图钾质花岗岩形成于约 1.84 Ga,这表明华北克拉通西部陆块东北缘碰撞造山后的伸展作用可能从 1.84 Ga 就已经开始^[40-41]。

5 结论

1) 大囿图花岗岩形成于约 1.85~1.84 Ga 的古元古代晚期。

2) 大囿图花岗岩属于钾质强过铝质岩石,具 A₂ 型花岗岩特征,岩浆源于中太古代下地壳高级变质沉积岩的部分熔融。

3) 大囿图钾质花岗岩形成于华北克拉通东部陆块和西部陆块碰撞造山后的伸展构造环境。

参考文献(References):

- [1] 翟明国. 华北克拉通的形成演化与成矿作用[J]. 矿床地质, 2010, 29(1): 24-36.
Zhai Mingguo. Tectonic Evolution and Metallogenesis of North China Craton[J]. Mineral Deposits, 2010, 29(1): 24-36.
- [2] Zhai M G, Santosh M. The Early Precambrian Odyssey of the North China Craton: A Synoptic Overview[J]. Gondwana Research, 2011, 20(1): 6-25.
- [3] Zhai M G, Santosh M. Metallogeny of the North China Craton: Link with Secular Changes in the Evolving Earth[J]. Gondwana Research, 2013, 24(1): 275-297.
- [4] Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A, et al. Archean Blocks and Their Boundaries in the North China Craton: Lithological, Geochemical, Structural and P-T Path Constraints and Tectonic Evolution [J]. Precambrian Research, 2001, 107(1/2): 45-73.
- [5] Kusky T M, Li J H. Paleoproterozoic Tectonic Evolution of the North China Craton[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2003, 22(4): 383-397.
- [6] 赵国春. 华北克拉通基底主要构造单元变质作用演化及其若干问题讨论[J]. 岩石学报, 2009, 25(8): 1772-1792.
Zhao Guochun. Metamorphic Evolution of Major Tectonic Units in the Basement of the North China Craton: Key Issues and Discussion [J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(8): 1772-1792.
- [7] 赵国春, 孙敏, Wilde S A. 华北克拉通基底构造单元特征及早元古代拼合[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2002, 32(7): 538-549.
Zhao Guochun, Sun Min, Wilde S A. The Basement Structural Units of the North China Craton are Pieced Together in the Early Proterozoic[J]. Science in China (Series D: Earth Science), 2002, 32(7): 538-549.
- [8] Zhao G C, Sun M, Wilde S A, et al. Late Archean to Paleoproterozoic Evolution of the North China Craton: Key Issues Revisited[J]. Precambrian Research, 2005, 136(2): 177-202.
- [9] 李三忠, 赵国春, 孙敏. 华北克拉通早元古代拼合与

- Columbia 超大陆形成研究进展[J].科学通报, 2016, 61(9): 919-925.
- Li Sanzhong, Zhao Guochun, Sun Min. Paleoproterozoic Amalgamation of the North China Craton and the Assembly of the Columbia Supercontinent[J]. Chin Sci Bull, 2016, 61(9): 919-925.
- [10] Liu C H, Zhao G C, Liu F L, et al. Coexistence of A- and I-Type Granites in the Lüliang Complex: Tectonic Implications for the Middle Paleoproterozoic Trans-North China Orogen, North China Craton[J]. Lithos, 2021, 380/381:105875.
- [11] Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, et al. Reappraisal and Refinement of Zircon U-Pb Isotope and Trace Element Analyses by LA-ICP-MS[J]. Chin Sci Bull, 2010, 55: 1535-1546.
- [12] Andersen T. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses that Do not Report ^{204}Pb [J]. Chemical Geology, 2002, 192(1/2): 59-79.
- [13] Ludwig K R. User's Manual for Isoplot 3.1: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[J]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003, 4: 25-32.
- [14] Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. Igneous Zircon: Trace Element Composition as an Indicator of Source Rock Type[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2002, 143(5): 602-622.
- [15] O'Connor J T. A Classification for Quartz-Rich Igneous Rocks Based on Feldspar Ratio[J]. U S Geol Surv Prof, 1965, 525: 79-84.
- [16] Watson E B, Harrison T M. Zircon Saturation Revisited: Temperature and Composition Effects in a Variety of Crustal Magma Types [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1983, 64(2): 295-304.
- [17] Miller C F, McDowell S M, Mapes R W. Hot and Cold Granites? Implications of Zircon Saturation Temperatures and Preservation of Inheritance [J]. Geology, 2003, 31(6): 529-532.
- [18] Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-Type Granites: Geochemical Characteristics [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1987, 95: 420-436.
- [19] 赵瑞幅, 郭敬辉, 彭澎, 等. 恒山地区古元古代 2.1 Ga 地壳重熔事件: 钾质花岗岩锆石 U-Pb 定年及 Hf-Nd 同位素研究[J]. 岩石学报, 2011, 27(6): 1607-1623.
- Zhao Ruifu, Guo Jinghui, Peng Peng, et al. 2.1 Ga Crustal Remelting Event in Hengshan Complex: Evidence from Zircon U-Pb Dating and Hf-Nd Isotopic Study on Potassic Granites [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(6): 1607-1623.
- [20] 侯增谦, 曲晓明, 杨竹森, 等. 青藏高原碰撞造山带: III: 后碰撞伸展成矿作用[J]. 矿床地质, 2006, 25(6): 629-651.
- Hou Zengqian, Qu Xiaoming, Yang Zhusen, et al. Metallogenesis in Tibetan Collisional Orogenic Belt: III: Mineralization in Post-Collisional Extension Setting[J]. Mineral Deposits, 2006, 25(6): 629-651.
- [21] 李孟江, 陈衍景, 张莉. 华北克拉通北缘晚古生代尚义钾质花岗岩的成因分析: 来自岩石地球化学的证据[J]. 地球化学, 2012, 41(3): 227-239.
- Li Mengjiang, Chen Yanjing, Zhang Li. Genesis of Late Paleozoic Shangyi Potassic Granite in the Northern Margin of the North China Craton: Petrochemistry Evidence [J]. Geochimica, 2012, 41(3): 227-239.
- [22] 贾晓亮. 小秦岭和鲁山地区太华杂岩的研究: 对华北南缘基底演化的意义[D]. 西安: 西北大学, 2016.
- Jia Xiaoliang. Research for Taihua Complex in Xiaoqinling and Lushan Areas: Implications for the Evolution of the Crystalline Basement in Southern North China Craton [D]. Xi'an: Northwest University, 2016.
- [23] Anderson J L, Thomas W M. Proterozoic Anorogenic Two-Mica Granites: Silver Plume and St Vrain Batholiths[J]. Geology, 1985, 13: 177-180.
- [24] Creaser R A, Price R C, Wormald R J. A-Type Granites Revisited: Assessment of a Residual-Source Model[J]. Geology, 1991, 19: 163-166.
- [25] King P L, White A J R, Chappell B W, et al. Characterization and Origin of Aluminous A-Type Granites from the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia[J]. J Petrol, 1997, 38(3): 371-391.
- [26] Poitras F, Duthou J L, Pin C. The Relationship Between Petrology and Nd Isotopes as Evidences for Contrasting Anorogenic Granite Genesis: Example of the Corsican Province (SE France) [J]. J Petrol, 1995, 36: 1251-1274.
- [27] Taylor S R, McLennan S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution [J]. The Journal of Geology, 1985, 94(4): 57-72.
- [28] McDonough W F, Sun S S. The Composition of the Earth[J]. Chemical Geology, 1995, 120: 223-253.
- [29] 李光速, 杜庆祥, 韩作振, 等. 吉林省延边地区中酸性

- 岩浆岩年龄、成因及其构造意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(4): 1175 - 1194.
- Li Guangsu, Du Qingxiang, Han Zuozhen, et al. Zircon U - Pb Geochronology, Geochemistry and Hf Isotopic Composition of the Middle Jurassic Granodiorite in South Jilin Province[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(4): 1175 - 1194.
- [30] 师江朋, 杨德彬, 霍腾飞, 等. 华北克拉通南缘 A 型花岗岩的年代学和 Nd - Hf 同位素组成: 对古元古代晚期伸展事件的制约[J]. 岩石学报, 2017, 33(10): 3042 - 3056.
- Shi Jiangpeng, Yang Debin, Huo Tengfei, et al. The Geochronology and Nd - Hf Isotope Compositions of A - Type Granites on the Southern Margin of North China Craton: Constraints on the Late Paleoproterozoic Extensional Events [J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33(10): 3042 - 3056.
- [31] Frost C D, Rimü O T, Dall' Agnol R. IGCP Project 510: A - Type Granites and Related Rocks Through Time[J]. Lithos, 2007, 97 (1/2): 7 - 13.
- [32] Eby G N. Chemical Subdivision of the A - Type Granitoids: Petrogenetic and Tectonic Implications [J]. Geology, 1992, 20(7): 641 - 644.
- [33] 翟明国, 胡波, 彭澎, 等. 华北中—新元古代的岩浆作用与多期裂谷事件[J]. 地学前缘, 2014, 21(1): 100 - 119.
- Zhai Mingguo, Hu Bo, Peng Peng, et al. Meso-Neoproterozoic Magmatic Events and Multi-Stage Rifting in the NCC [J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(1): 100 - 119.
- [34] Lu S N, Zhao G C, Wang H C, et al. Precambrian Metamorphic Basement and Sedimentary Cover of the North China Craton: A Review[J]. Precambrian Research, 2008, 160(1/2): 77 - 93.
- [35] Zhao G C, Wilde S A, Sun M, et al. SHRIMP U - Pb Zircon Ages of Granitoid Rocks in the Lüliang Complex: Implications for the Accretion and Evolution of the Trans-North China Orogen[J]. Precambrian Research, 2008, 160(3/4): 213 - 226.
- [36] Zhao G C, Cawood P A, Li S Z, et al. Amalgamation of the North China Craton: Key Issues and Discussion[J]. Precambrian Research, 2012, 222/223: 55 - 76.
- [37] Zhai M G, Santosh M, Zhang L C. Precambrian Geology and Tectonic Evolution of the North China Craton[J]. Gondwana Research, 2011, 20(1): 1 - 5.
- [38] 赵太平, 陈福坤, 翟明国, 等. 河北大庙斜长岩杂岩体锆石 U - Pb 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 2004, 20(3): 685 - 690.
- Zhao Taiping, Chen Fukun, Zhai Mingguo, et al. Single Zircon U - Pb Ages and Their Geological of the Damiao Anorthosite Complex, Hebei Province, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(3): 685 - 690.
- [39] Zhao G C, Cawood P A, Wilde S A, et al. Review of Global 2.1 - 1.8 Ga Orogens: Implications for a Pre-Rodinia Supercontinent [J]. Earth-Science Reviews, 2002, 59: 125 - 162.
- [40] 郭西运, 李猛兴. 大兴安岭南段晚石炭世敖伦岩体成因及其对古亚洲洋演化的启示[J]. 地质通报, 2022, 41(7): 1191 - 1201.
- Guo Xiyun, Li Mengxing. Petrogenesis of the Late Carboniferous Aolun Granite in the Southern Da Xing' an Mountains and Its Insight into the Evolution of the Paleo-Asia Ocean [J]. Geological Bulletin of China, 2022, 41(7): 1191 - 1201.
- [41] 施璐, 唐振, 郑常青, 等. 大兴安岭中部柴河地区晚侏罗世花岗岩质岩石成因及构造意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50(1): 112 - 128.
- Shi Lu, Tang Zhen, Zheng Changqing, et al. Genesis and Tectonic Significance of Late Jurassic Granitoids in Chaihe Region, Central Great Xing' an Range, NE China [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, 50(1): 112 - 128.