

DOI: 10.16788/j.hddz.32-1865/P.2024.07.011

引文格式: 李猛兴, 刘明, 吴珺玮, 杨五宝, 吉琛. 2025. 晋南地区孤峰山岩体年代学、地球化学特征及地质意义[J]. 华东地质, 46(3): 372-385. (LI M X, LIU M, WU J W, YANG W B, JI C. 2025. Geochronology, geochemistry and geological implications of the Gufengshan granite in the southern Shanxi Province[J]. East China Geology, 46(3): 372-385.)

晋南地区孤峰山岩体年代学、 地球化学特征及地质意义

李猛兴¹, 刘明¹, 吴珺玮¹, 杨五宝², 吉琛¹

(1. 中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 陕西 西安 710100;

2. 山西省地质调查院有限公司, 山西 太原 030006)

摘要: 早白垩世岩浆作用是研究华北克拉通破坏的理想窗口, 但对其中部地区的研究程度明显偏低。文章选择晋南地区孤峰山岩体开展了锆石 U-Pb 年龄和地球化学特征分析。结果表明, 孤峰山岩体由石英二长闪长岩组成, 成岩年龄为 $(133.0 \pm 0.5) \text{Ma}$, 形成于早白垩世早期。地球化学特征上, 岩体具有全碱含量中等 ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 含量为 $7.11\% \sim 7.40\%$)、富钠 (Na_2O 含量为 $4.17\% \sim 4.38\%$)、准铝质 (A/CNK 为 $0.80 \sim 0.97$) 的特点, 属高钾钙碱性系列 I 型花岗岩; 富集大离子亲石元素 (如 Rb、Ba、K) 及 Th 元素, 亏损高场强元素 (如 Ta、Nb、P、Ti), 稀土元素总量中等 ($(152.76 \sim 199.85) \times 10^{-6}$), 负锆异常不明显 (δ_{Eu} 为 $0.93 \sim 0.97$), 具有明显陆壳成分特征。结合区域地质背景及本次研究成果, 认为岩体形成与华北克拉通破坏对中部地区的影响有关。

关键词: 孤峰山; I 型花岗岩; 石英二长闪长岩; 华北克拉通破坏

中图分类号: P581; P59

文献标识码: A

文章编号: 2096-1871(2025)03-372-14

华北克拉通夹持于兴蒙造山带、祁连山—北秦岭造山带与桐柏—大别造山带之间, 大致呈三角形的轮廓形态, 地质演化历史悠久, 最古老的岩石时代为 38 亿年, 是我国保存较完整的古陆块之一, 也是全球克拉通遭受破坏的典型代表(林舸等, 2008; 杨进辉等, 2021; 翟明国, 2010)。中生代期间, 华北克拉通经历了强烈破坏, 稳定性发生了根本性转变, 在这一过程中发生了巨量岩浆活动事件、大规模金多金属矿床及不同伸展类型盆地的形成, 这一现象被称为“克拉通破坏”, 其本质是华北克拉通失去稳定性, 其东部地区表现尤其明显(白阳等, 2023; 朱日祥等, 2012, 2020)。前人用“燕山运动”、“地台活化”等具有鲜明我国特色的地质术语来表述这一重要地质现象(赵越等, 2022)。华北克拉通也因这一典型破坏特征, 成为

研究克拉通破坏过程的理想场所。

针对华北克拉通破坏这一科学问题, 前人从不同角度进行了较高等程度的研究, 并取得了诸多重大原创成果。一般认为华北克拉通破坏可能始于侏罗纪, 在早白垩世达到峰期, 且与古太平洋俯冲作用密切相关(吴福元等, 2008; 徐义刚等, 2009; 朱日祥等, 2011)。基于大兴安岭—太行山重力梯度带(形成于中生代)两侧岩石圈厚度和地壳结构的显著差异, 大致以该重力梯度带为界, 东部地区破坏明显(林舸等, 2008; 徐巧等, 2023; 朱日祥等, 2011), 而中部和西部地区相对稳定, 可能仅受到了局部影响, 尤其是区域上石炭纪—侏罗纪沉积地层的发育, 显示出了华北克拉通中部整体稳定的特点(陈衍景等, 2009; 林舸等, 2008; 朱日祥等, 2011)。

作为大陆地壳的重要组成部分, 花岗岩的形

* 收稿日期: 2024-07-22 修订日期: 2025-01-19 责任编辑: 石磊

基金项目: 中国地质科学院地质研究所“山西区域地质调查片区总结与服务产品开发子项目(山西区域地质志)(编号: 121201102000150012-05)”和山西省地质勘查项目“侯马测区 1: 5 万区域矿产调查(编号: 价勘 2007-09)”联合资助。

第一作者简介: 李猛兴, 1985 年生, 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事基础地质调查工作。Email: 282665774@qq.com。

通信作者简介: 刘明, 1986 年生, 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事基础地质调查工作。Email: mingl2005@163.com。

成过程蕴含着丰富的地壳与地幔相互作用信息, 是研究克拉通破坏过程的理想载体, 由其构建的岩浆年代学格架可以很好地约束重大地质事件的发生过程(李廷栋等, 2022; 王涛等, 2019; 吴福元等, 2007, 2017)。研究表明, 华北克拉通东部(胶东半岛、辽东半岛和燕山地区)中生代岩浆作用强烈, 尤其是代表伸展背景的 A 型花岗岩带广泛发育(130~110 Ma), 可看作华北克拉通破坏明显的浅表岩浆响应, 是探索华北克拉通东部遭受破坏的关键性突破口(孙金凤和杨进辉, 2009)。而同时期华北克拉通中部的岩浆作用相对微弱, 岩

浆岩分布也不均匀, 且相关研究程度偏低, 这制约了对华北克拉通破坏对其中部地区影响的整体认识。

鉴于此, 本文以华北克拉通中部南段晋南地区的早白垩世孤峰山岩体为研究对象, 系统分析了其岩相学、岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学特征, 并探讨了岩石的成因类型和构造背景。

1 地质背景及岩体地质

研究区位于华北克拉通中部南段(图 1(a)), 地理位置隶属于晋南地区万荣县, 区内出露地层

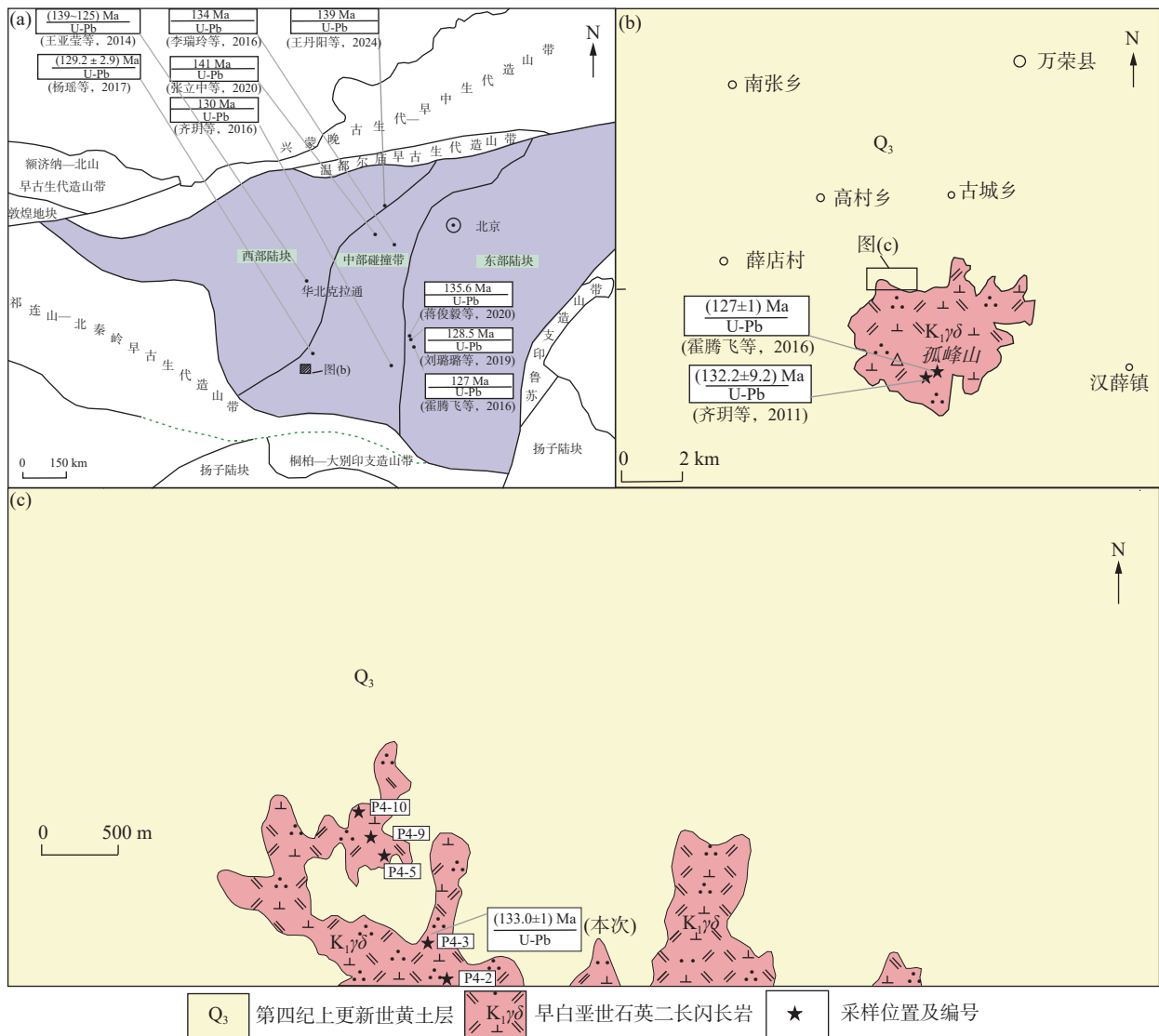


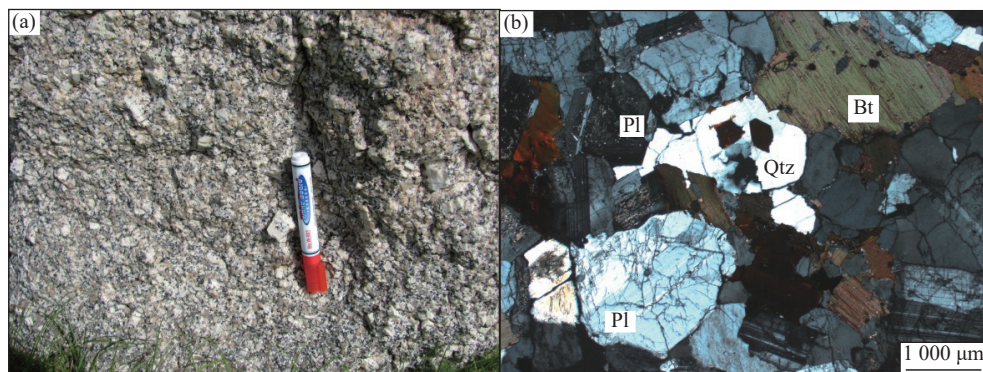
图1 华北克拉通基底构造单元图(a)(Zhao et al., 2012)、孤峰山岩体地质简图(b)(山西省地质调查院, 2019^①)和孤峰山岩体北缘地质简图(c)(山西省地质调查院, 2012^②)

Fig. 1 Division of basement tectonic units in the North China Craton(a), simplified geology of the Gufengshan granite pluton(b) and geology of the northern margin of the Gufengshan granite pluton(c)

简单,主要为大面积的第四纪黄土。钻孔资料显示,黄土层厚度变化较大,为 70~320 m,基岩为寒武纪—奥陶纪地层。孤峰山岩体在研究区内海拔最高,高出周围地表约 300 m,由早白垩世花岗岩岩体组成。从高空俯瞰,岩体呈近椭圆状岩株形态出露,出露面积约 32 km²(图 1(b))。

孤峰山岩体岩性单一,以中细粒石英二长闪长岩为主,特征如下(图 2):风化面呈土黄色,新鲜

面呈浅灰色,中细粒花岗结构为主,粒度为 0.5~2.5 mm,局部粒度略粗,并向不等粒似斑状结构过渡(斜长石斑晶粒度达 7~12 mm)。主要矿物组成:斜长石含量约 55%,半自形板状;钾长石含量约 25%,半自形板状;石英含量约 10%,它形粒状;角闪石含量 5%,柱状;黑云母含量为 1%~3%,灰褐色,片状;副矿物以磷灰石、锆石和磁铁矿为主。



Qtz.石英; Pl.斜长石; Bt.黑云母

图2 孤峰山岩体野外露头(a)及正交偏光显微照片(b)

Fig. 2 Outcrop(a) and photomicrograph(b) of the Gufengshan granite pluton

2 样品采集与测试方法

研究选择在孤峰山岩体北部露头较好的冲沟中,系统采集了 5 件岩石样品,样品编号分别为 P4-2、P4-3、P4-5、P4-9 和 P4-10,并开展主量元素、微量元素和稀土元素分析。采集过程中,尽量选择新鲜样品,避开风化蚀变强烈、节理裂隙发育及长英质细脉穿插等部位,采样位置见图 1(c)。主量元素、微量元素及稀土元素测试在湖北省地质实验测试中心完成,其中主量元素测试由 X 射线荧光光谱仪(仪器型号 Magix-pro2440)完成,误差优于 2%;微量元素及稀土元素测试由电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS, 仪器型号为 ThermoelementalX7)、X 射线荧光光谱仪(仪器型号为 1800)完成,误差优于 5%。

同时,在岩体中采集了 1 件锆石 U-Pb 测年样品,采样位置与 P4-3 相同。测年样品岩性为石英二长闪长岩。粗选加工过程(包括破碎、淘洗和重磁分离等)在河北省区域地质调查院实验室完成,在双目镜下手工挑选出符合要求的锆石颗粒,以晶形完整、透明度高、包裹体不发育者为最佳

选择。制靶、照相和分析测试等在中国地质调查局天津地质调查中心实验测试室完成,具体测试过程如下:对符合要求的锆石颗粒进行固化、抛光,完成制靶;通过阴极发光照相(CL)观察锆石颗粒内部结构特征,以便选取最佳测试位置;同位素测试采用质谱仪(仪器型号为 Neptune)和激光剥蚀仪(仪器型号为 UP193-FX)联机测试,其中采用锆石标准 NIST612 玻璃标样作为外标,分别计算 Pb、Th、U 元素的含量,激光剥蚀斑束直径为 32 μm,剥蚀深度为 35 μm 或 50 μm,剥蚀时间为 40 s。锆石点同位素比值、年龄误差分析值均为 1σ。具体测试步骤见相关参考文献(李怀坤等, 2010),其中相关数据处理及谐和图制作分别利用 ICPMS-DataCal 程序(Liu et al., 2010)和 Isoplot(Version 3.0)软件(Ludwig, 2003)完成。

3 锆石 U-Pb 年龄

锆石颗粒大多呈浅黄色,半透明状,晶形以长柱状为主,个别为短柱状。整体上,锆石粒径大小为 100~150 μm,长宽比为 1.5 : 1~2 : 1,阴极发

光图像中发育清晰的韵律环带结构(图 3(a))。Th/U 值为 0.47~1.00(锆石点 2、15 除外), 显示出岩浆锆石的特征。实验共分析了 20 个测试点, 测试数据结果见表 1, 其中部分锆石点(点 2、15、18)

的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为 2 019 Ma、1 597 Ma 和 1 939 Ma, 可能为捕获的古—中元古代锆石; 其余 17 个有效测试点均集中位于谐和线上, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 (133.0 ± 0.5) Ma($n=17$, $\text{MSWD}=0.37$)

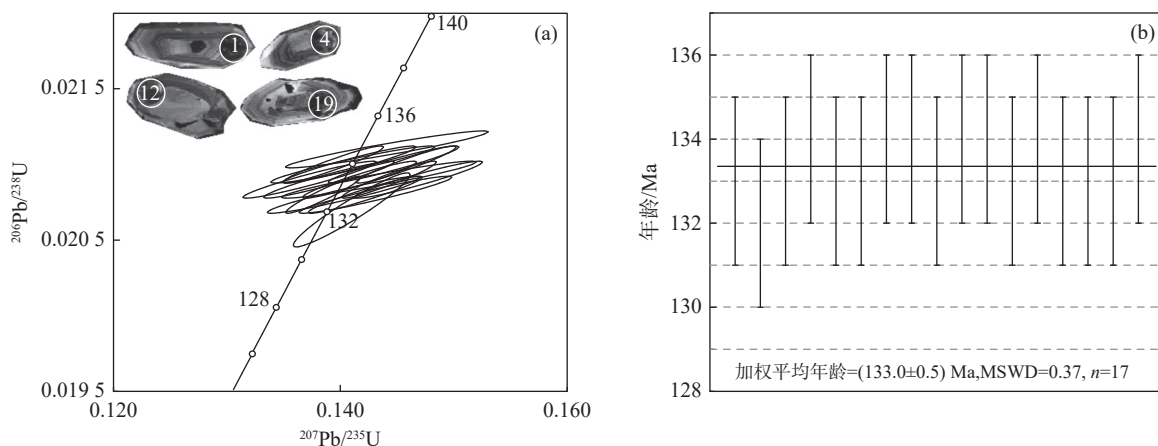


图3 孤峰山岩体的锆石 U-Pb 年龄谐和图(a)及加权平均年龄图(b)

Fig. 3 Zircon U-Pb concordia diagram(a) and the weighted average age(b) of the Gufengshan granite pluton

表1 孤峰山岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果

Table 1 Results of LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the Gufengshan granite pluton

测点 编号	含量/ 10^{-6}				同位素比值				年龄/Ma							
	Pb	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
1	38	959	1 659	0.58	0.048 3	0.001 0	0.138 5	0.002 7	0.020 8	0.000 1	113	2	132	3	133	1
2*	1 131	493	3 017	0.16	0.127 9	0.000 8	6.483 0	0.075 2	0.367 7	0.003 6	2 069	13	2 044	24	2 019	20
3	79	2 729	2 733	1.00	0.049 5	0.001 3	0.141 0	0.004 2	0.020 7	0.000 2	171	4	134	4	132	1
4	49	1 822	2 008	0.91	0.049 9	0.002 0	0.143 1	0.005 5	0.020 8	0.000 1	192	8	136	5	133	1
5	2	64	79	0.81	0.048 2	0.001 3	0.139 4	0.003 6	0.021 0	0.000 1	110	3	133	3	134	1
6	9	270	402	0.67	0.048 3	0.001 6	0.139 0	0.004 7	0.020 9	0.000 1	115	4	132	4	133	1
7	7	197	305	0.65	0.051 0	0.001 6	0.146 9	0.004 6	0.020 9	0.000 1	240	8	139	4	133	1
8	1	28	40	0.70	0.049 9	0.001 7	0.144 7	0.004 7	0.021 0	0.000 1	192	6	137	5	134	1
9	2	87	100	0.87	0.050 3	0.001 2	0.145 8	0.003 6	0.021 0	0.000 1	208	5	138	3	134	1
10	3	67	142	0.47	0.047 7	0.001 7	0.137 3	0.004 8	0.020 9	0.000 1	85	3	131	5	133	1
11	2	49	104	0.47	0.049 6	0.002 2	0.144 1	0.007 3	0.021 1	0.000 1	179	8	137	7	134	1
12	32	899	1 377	0.65	0.048 7	0.002 1	0.141 1	0.005 9	0.021 0	0.000 1	134	6	134	6	134	1
13	4	109	178	0.62	0.049 2	0.001 4	0.141 7	0.004 1	0.020 9	0.000 1	159	5	135	4	133	1
14	40	936	1 741	0.54	0.048 7	0.001 7	0.140 8	0.004 8	0.021 0	0.000 1	134	5	134	5	134	1
15*	58	52	199	0.26	0.126 1	0.000 8	4.887 3	0.053 7	0.281 1	0.002 8	2 044	12	1 800	20	1 597	16
16	7	182	290	0.63	0.048 8	0.001 9	0.140 3	0.005 5	0.020 8	0.000 1	138	5	133	5	133	1
17	24	597	1 009	0.59	0.049 6	0.001 5	0.142 2	0.004 1	0.020 8	0.000 1	177	5	135	4	133	1
18*	112	198	272	0.73	0.143 2	0.000 8	6.927 0	0.078 7	0.350 9	0.003 8	2 266	13	2 102	24	1 939	21
19	17	505	734	0.69	0.050 1	0.001 2	0.144 3	0.003 4	0.020 9	0.000 1	198	5	137	3	133	1
20	11	311	479	0.65	0.049 7	0.002 4	0.143 4	0.007 0	0.020 9	0.000 1	180	9	136	7	134	1

测试单位: 中国地质调查局天津地质调查中心实验测试室, 标注*的点号表示未参与计算。

(图 3(b)), 代表了孤峰山岩体的侵位年龄, 时代为早白垩世早期。

素测试结果见表 2。

4 岩石地球化学特征

孤峰山岩体的主量元素、微量元素和稀土元素

分类图解上分布集中, 落在了亚碱性系列二长岩

表2 孤峰山岩体主量、微量及稀土元素分析结果

Table 2 Analysis results of major, trace and rare earth elements of the Gufengshan granite pluton

样品编号	主量元素/%及特征参数											
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ^T	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅		
P4-2	62.40	0.43	15.58	3.91	0.10	1.33	5.23	4.17	2.94	0.15		
P4-3	64.37	0.45	16.12	4.00	0.11	1.02	4.17	4.25	2.95	0.16		
P4-5	64.92	0.45	16.34	4.12	0.11	0.81	3.79	4.29	2.94	0.16		
P4-9	64.23	0.45	16.18	4.25	0.10	0.96	4.11	4.38	3.02	0.15		
P4-10	65.35	0.46	16.22	4.05	0.10	0.79	3.52	4.19	3.16	0.15		
样品编号	主量元素/%及特征参数											
	LOI	总和	DI	K ₂ O+Na ₂ O	K ₂ O/Na ₂ O	A/NCK	NK/A	σ	Mg [#]	FeO ^T /MgO		
P4-2	2.50	99.02	72.02	7.11	0.70	0.80	0.65	2.51	38	2.94		
P4-3	1.27	99.15	73.36	7.20	0.69	0.91	0.63	2.39	31	3.92		
P4-5	1.08	99.37	74.08	7.23	0.68	0.95	0.63	2.36	26	5.09		
P4-9	0.98	99.13	73.66	7.40	0.69	0.90	0.65	2.53	29	4.43		
P4-10	0.86	99.24	75.31	7.35	0.75	0.97	0.64	2.38	26	5.13		
样品编号	微量元素/10 ⁻⁶ 及特征参数											
	Zr	Nb	Ba	Hf	Ta	Rb	Th	Sr	Ni	Cr	Co	Nb/Ta
P4-2	131.0	10.101	1 698	3.780	0.996	44.37	6.03	1730	1.88	10.96	12.27	10.19
P4-3	185.0	10.010	1 571	4.941	1.064	47.52	6.33	1391	1.77	6.75	14.42	9.41
P4-5	157.9	9.528	1 492	4.663	0.707	49.87	7.26	1188	3.23	6.54	16.41	13.48
P4-9	147.3	9.474	2 011	4.125	0.670	50.95	6.23	1652	2.31	5.97	16.75	14.14
P4-10	147.8	12.206	1 743	4.256	0.834	53.65	6.42	1116	3.04	7.34	18.37	14.70
样品编号	稀土元素/10 ⁻⁶ 及特征参数											
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm
P4-2	36.74	70.59	8.47	32.51	5.38	1.56	4.13	0.58	2.91	0.53	1.49	0.23
P4-3	36.33	71.07	8.37	32.16	5.24	1.52	4.17	0.58	2.83	0.52	1.46	0.22
P4-5	45.14	84.61	9.79	38.23	6.33	1.80	5.17	0.71	3.42	0.63	1.76	0.26
P4-9	34.38	65.33	7.55	28.53	4.79	1.39	3.94	0.53	2.56	0.50	1.42	0.21
P4-10	37.00	70.78	8.52	32.71	5.32	1.54	4.12	0.58	2.75	0.51	1.43	0.21
样品编号	稀土元素/10 ⁻⁶ 及特征参数											
	Yb	Lu	Y	ΣREE	LREE	HREE	L/H	(La/Yb) _N	(La/Sm) _N	(Gd/Yb) _N	δ _{Eu}	
P4-2	1.48	0.22	14.52	166.82	155.25	11.57	13.42	17.81	4.41	2.31	0.97	
P4-3	1.44	0.23	14.17	166.14	154.69	11.45	13.51	18.10	4.48	2.40	0.96	
P4-5	1.74	0.26	17.71	199.85	185.90	13.95	13.33	18.61	4.60	2.46	0.93	
P4-9	1.41	0.22	13.61	152.76	141.97	10.79	13.16	17.49	4.63	2.31	0.95	
P4-10	1.44	0.22	14.40	167.13	155.87	11.26	13.84	18.43	4.49	2.37	0.97	

注: $\delta_{Eu}=2\times(Eu_{岩}/Eu_{球})/((Sm_{岩}/Sm_{球})+(Gd_{岩}/Gd_{球}))$; LOI为烧失量。

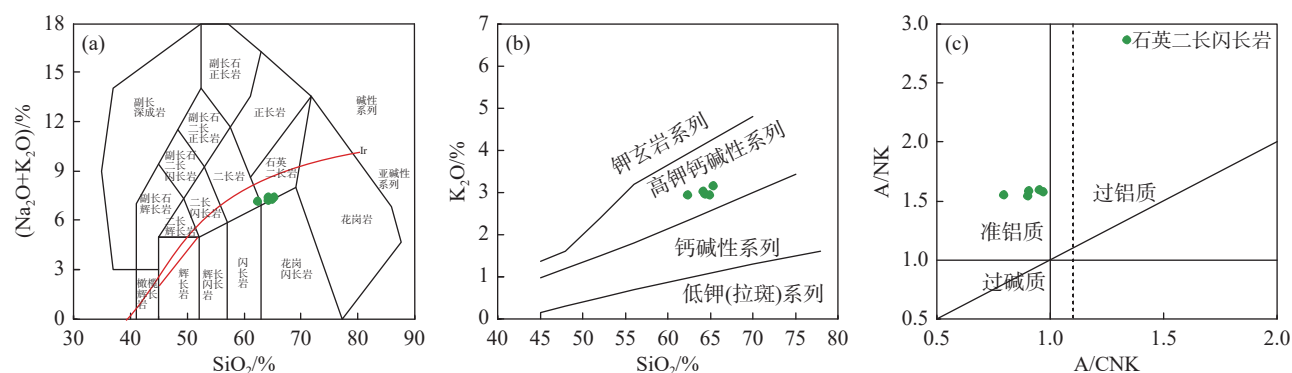
和石英二长岩区的分界线上(图 4(a)), 为中性岩类; 全碱含量中等($K_2O + Na_2O$ 含量为 7.11%~7.40%)、富钠(K_2O/Na_2O 值为 0.68~0.75, 均 < 1), 里特曼指数(σ)为 2.36~2.53, 具有钙碱性岩特征。在 SiO_2 - K_2O 图解上, 样品也集中落在高钾钙碱性系列区(图 4(b)); Al_2O_3 含量为 15.58%~16.34%, 含量中等, 铝饱和指数 A/CNK 为 0.80~0.97, 属准铝质岩石, 在 A/CNK-A/NK 图解上位于准铝质区间(图 4(c))。以上数据说明, 孤峰山岩体具有全碱含量中等、富钠、准铝质的特征, 属分异程度中等的中性岩。

4.2 微量元素与稀土元素特征

孤峰山岩体具有较高的 Sr 含量($(1116 \sim 1730) \times 10^{-6}$) 和 Ba 含量($(1492 \sim 2011) \times 10^{-6}$), 较低的 Rb 含量($(44.37 \sim 53.65) \times 10^{-6}$), Rb/Sr 值(0.03~

0.05) 和 Rb/Ba 值(0.03) 极低。另外, 高场强元素 Nb 含量($(9.474 \sim 12.206) \times 10^{-6}$) 和 Ta 含量($(0.670 \sim 1.064) \times 10^{-6}$) 也较低。在原始地幔标准化微量元素蛛网图上, 样品微量元素配分模式特征相近, 表现为: 大离子亲石元素(Rb、Ba、K)、Th 及 Sr 元素呈现正异常, 高场强元素(Ta、Nb、P、Ti 等) 为负异常, 总体上呈现出多峰多谷的右倾曲线特征(图 5(a))。

孤峰山岩体稀土元素总量 ΣREE 为 $(152.76 \sim 199.85) \times 10^{-6}$, 平均值为 170.54×10^{-6} , 含量中等且变化范围小; $(La/Sm)_N$ 为 4.41~4.60, $(Gd/Yb)_N$ 为 2.31~2.40, LREE/HREE 值为 13.16~13.84, $(La/Yb)_N$ 值为 17.49~18.61, 在球粒陨石标准化稀土元素配分模式图上呈现为轻稀土富集、重稀土亏损的右缓倾型(图 5(b)); δ_{Eu} 值为 0.93~0.97, 具有极弱负铕异常的特点。



(a). SiO_2 -(Na_2O+K_2O) 图解 (Middlemost, 1994); (b). SiO_2 - K_2O 图解 (Morrison, 1980); (c). A/CNK-A/NK 图解 (Maniar and Piccoli, 1989)

图4 孤峰山岩体主量元素地球化学判别图解

Fig. 4 Discrimination diagrams of major elements for the Gufengshan granite pluton

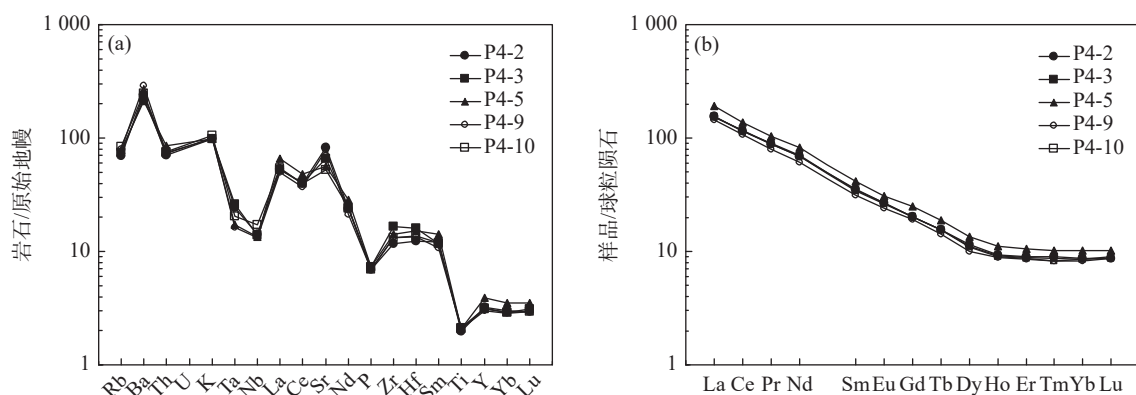


图5 孤峰山岩体原始地幔标准化微量元素蛛网图(a)及球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(b) (Sun and McDonough, 1989)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE pattern(a) and primitive mantle-normalized spider diagrams(b) of the Gufengshan granite pluton (Sun and McDonough, 1989)

5 讨论

5.1 孤峰山岩体时代

20 世纪 70 年代,地质工作者对孤峰山岩体进行了不同程度的研究。1:20 万运城幅区调报告^⑧、1:20 万韩城幅区调报告^⑨中均认为该岩体形成于燕山期,岩性由花岗闪长岩和正长闪长岩组成。近年来,不同学者在孤峰山岩体南缘进行了锆石 U-Pb 年龄测试,测试结果分别为(127±1) Ma(霍腾飞等, 2016)和(132.2±9.2) Ma(齐玥等, 2011)。本文在孤峰山岩体北缘采集样品并进行了锆石 U-Pb 年龄测试,获得的加权平均年龄为(133.0±0.5) Ma,与前人的研究成果基本一致,说明孤峰山岩体形

成于早白垩世。

与华北克拉通东部地区强烈的早白垩世岩浆作用相比,中部地区岩浆活动不发育,侵入岩具有规模较小、零星分布的特点,自北向南主要分布于晋冀蒙分界处、太行山、五台山及吕梁山等地区(表 3)。侵位时间范围相对较窄,集中于 141~125 Ma,与华北克拉通破坏的时间范围(吴福元等, 2008; 徐义刚等, 2009; 朱日祥等, 2011)一致。以上信息说明,华北克拉通中部在早白垩世也经历了一定程度的岩浆作用,且活动强度明显低于东部地区。孤峰山岩体与区域上其他早白垩世岩体的形成时代相近,这为华北克拉通中部早白垩世岩浆作用提供了新的年代学素材。

表3 华北克拉通中部早白垩世岩浆作用特征表
Table 3 Characteristics of Early Cretaceous magmatic activities in central North China Craton

位置	地点	岩性	年龄/Ma	成因	地质背景	文献
晋南地区					岩石圈减薄	
35°20′05″N; 110°46′14″E	山西孤峰山	石英二长闪长岩	(133.0±0.5)	I型		本文
35°53′40″N; 111°40′25″E	山西塔儿山	石英闪长岩	(129.2±2.9)	A型		杨瑶等, 2017
34°53′16″N; 114°52′12″E	山西蚕坊	花岗闪长岩	130			齐玥等, 2016
吕梁山地区					岩石圈减薄	
38°08′39″N; 110°52′27″E	山西紫金山	二长岩	139~125			王亚莹等, 2014
太行山地区					岩石圈减薄	
36°42′00″N; 114°02′00″E	河北坦岭	角闪二长岩	128.5	I型		刘璐璐等, 2019
36°50′36″N; 114°04′27″E	河北西石门	二长闪长岩	135.6	I型		蒋俊毅等, 2020
36°13′10″N; 114°52′14″E	河北黄龙埡	霓辉正长岩	127	I型		霍腾飞等, 2016
38°58′10″N; 113°56′12″E	河北赤瓦屋	石英闪长岩	134	I型		李瑞玲等, 2016
五台山地区					岩石圈减薄	
39°20′15″N; 113°41′12″E	山西义兴寨	石英斑岩	141			张立中等, 2020
晋冀蒙分界地区					岩石圈减薄	
40°58′45″N; 113°57′24″E	内蒙古大青山	似斑状二长花岗岩	139	I型		王丹阳等, 2024

5.2 孤峰山岩体成因

目前,花岗岩成因类型划分方案多达 20 余种,其中依据岩浆源区特征及构造背景提出的 MISA 分类(即 M、I、S、A 型),因其划分的合理性和科学性被学者们普遍接受,并得到了广泛应用(吴福元等, 2007)。本文以该方案为基础,来确定孤峰山岩体的成因类型。

孤峰山岩体具有中等的 K₂O 含量(2.94%~3.16%),排除了其成因类型为 M 型花岗岩(通常 K₂O 含量<1%)。根据区域研究成果,前人认为

其为富碱侵入岩(霍腾飞等, 2016),但其岩石化学特征又明显不同于 A 型花岗岩,后者以“碱性、贫水、非造山”著称,具体表现为:①岩体碱铝指数 NK/A 偏低(0.63~0.65,平均值为 0.64),而 A 型花岗岩碱铝指数 NK/A 通常>0.85(Whalen et al., 1987);②铁镁比 FeO^T/MgO 值为 2.94~5.13,平均值为 4.30,整体低于 A 型花岗岩 FeO^T/MgO 值(>8)(Whalen et al., 1987);③Zr 元素的含量为(131.0~185.0)×10⁻⁶,也明显低于 A 型花岗岩(>250×10⁻⁶)(Whalen et al., 1987),且在岩石成因图解上均位于

非 A 型花岗岩区,与前人测试样品分布基本一致(图 6(a)、图 6(b));④稀土元素特征明显不同于 A 型花岗岩,后者常具有铈亏损较强的海鸥型配

分模式;⑤手标本中未见 A 型花岗岩特有的碱性暗色矿物(郝书清等, 2022)。基于以上因素,排除了其成因类型为 A 型,而只可能为 I 型或 S 型。

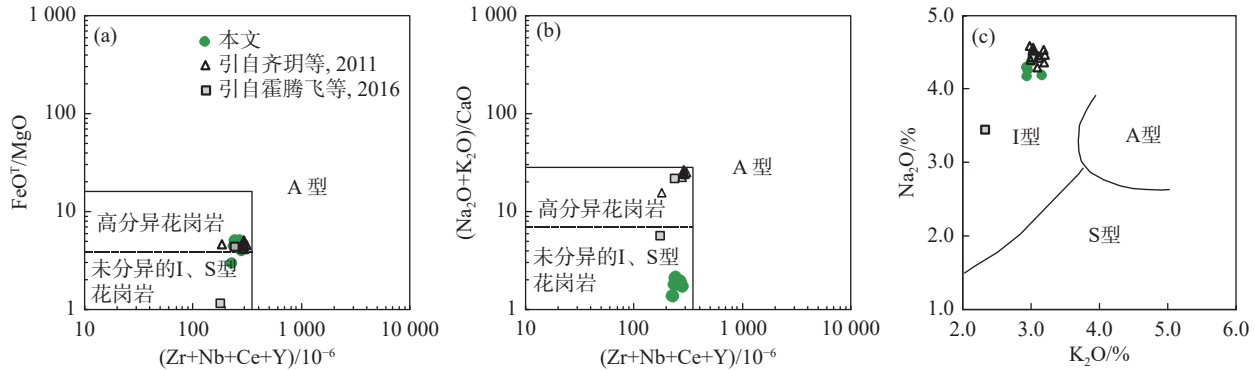


图6 孤峰山岩体 $(Zr+Nb+Ce+Y)-FeO^T/MgO$ (a)、 $(Zr+Nb+Ce+Y)-(Na_2O+K_2O)/CaO$ (b)、 K_2O-Na_2O (c)图解(Whalen et al., 1987; Collins et al., 1982)

Fig. 6 $(Zr+Nb+Ce+Y)-FeO^T/MgO$ (a), $(Zr+Nb+Ce+Y)-(Na_2O+K_2O)/CaO$ (b), K_2O-Na_2O (c) diagrams of the Gufengshan granite pluton(Whalen et al., 1987; Collins et al., 1982)

表 4 从矿物学、岩石地球化学和同位素地球化学等不同角度对 I 型花岗岩和岩体进行了全面对比,也进一步明确了孤峰山岩体的岩石成因类型,具体表现为:①样品中可见少量角闪石(含量<5%),这是确定岩体为 I 型花岗岩的依据之一;②A/CNK 值为 0.80~0.97,为准铝质岩石(图 4(c)),与准铝质特征的 I 型花岗岩一致,而明显不同于强过铝质特征的 S 型花岗岩(中等分异的 I 型与 S 型花岗岩以 A/CNK=1.10 为界)(Chappell and White, 1992; Wu et al., 2003; Zhong et al., 2023; 吴福元等, 2007);③具有明显富钠(Na_2O 含量为 4.17%~

4.38%)、富钙(CaO 含量为 3.52%~5.23%)、钙碱性(σ 值为 2.36~2.53)的特征,与 I 型花岗岩的岩石化学性质一致,在岩石成因图解上也集中落在了 I 型花岗岩区,与前人测试样品分布基本一致(图 6(c)); $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值(0.706 9~0.707 4)明显偏低(齐玥等, 2011),与 I 型花岗岩特点一致(陶志华等, 2023)。综合以上特征,认为孤峰山岩体为经历了中等分异的 I 型花岗岩。

岩体中 Cr、Co 和 Ni 元素的含量普遍较低,分别为 $(5.97\sim 10.96)\times 10^{-6}$ 、 $(12.27\sim 18.37)\times 10^{-6}$ 和 $(1.77\sim 3.23)\times 10^{-6}$,与下地壳特征相似(Rudnick

表4 孤峰山岩体特征表
Table 4 Characteristics of the Gufengshan granite pluton

	I型花岗岩	孤峰山岩体
定义	岩浆源区为火成岩	
矿物学组成	钾长石、斜长石、石英、角闪石、黑云母	钾长石、斜长石、石英、角闪石
	准铝质(A/CNK<1.10) (Whalen et al., 1987)	A/CNK=0.80~0.97
	钙碱性花岗岩为主	σ 值(2.36~2.53)显示为钙碱性岩
岩石地球化学特征	富钙(CaO 含量均值为3.20%) (吴锁平等, 2007)	CaO 含量3.52%~5.23%
	富钠(Na_2O 含量平均值为3.13%, $K_2O/Na_2O<1.0$) (吴锁平等, 2007)	Na_2O 含量4.17%~4.38%, K_2O/Na_2O 值为0.68~0.75
同位素地球化学特征	低 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值(<0.708)	$^{87}Sr/^{86}Sr=0.706\ 9\sim 0.707\ 4$ (齐玥等, 2011)

and Gao, 2003); Nb/Ta 值为 9.41~14.70, 也与壳源岩石接近(平均值为 13.4)(Rudnick and Gao, 2003), 明显低于原始地幔(平均值为 17.4)(Sun and McDonough, 1989); $Mg^\#$ 值为 26~38, 与下地壳纯熔体相符(通常 <40)(Rapp et al., 1999); 野外地质调查中, 未发现岩体中含暗色微粒闪长质包体。以上结果均反映了孤峰山岩体的物质来源主要为大陆地壳, 而地幔物质的贡献可能十分有限。在 C/MF-A/MF 图解上, 样品投点落在了英云闪长岩熔融区域, 岩浆演化阶段中部分熔融、分离结晶作用程度均一般(图 7(a)、图 7(b))。其中 Ba、Sr 元素正异常, Eu 元素微弱负异常(图 5(a)、图 5(b)), 说明钾长石、斜长石未经历明显的分离结晶作用(陈旭等, 2024); P 元素可见轻微亏损现象(图 5(b)), 可能与磷灰石的弱分离结晶有关(图 7(c))。前人对孤峰山岩体进行了全岩 Sr-Nd-Pb 同位素测试, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值明显偏低, 分别为 0.706 9~0.707 4(齐玥等, 2011)和 0.707 439(霍腾飞等, 2016), 测试结果也支持下地壳为主的岩浆源区性质。另外, 较高的 Sr 含量($(1\ 116\sim 1\ 730)\times 10^{-6}$)及 Sr/Y 值(67.08~119.15), 也暗示了岩体具有埃达克岩的地球化学属性以及岩浆源区深度较大的特征。

5.3 地质意义

华北克拉通在中生代期间经历了强烈破坏和岩石圈减薄等地质过程。以大兴安岭—太行山重力梯度带为界, 东部地区发生了明显破坏, 表现为早白垩世(130~120 Ma)的巨量岩浆作用以及大规模金多金属成矿作用(林舸等, 2008; 杨进辉等, 2021; 朱日祥等, 2012, 2020); 而中部、西部地区可

能仍保持着整体稳定性, 并未发生类似东部地区的明显拆沉作用, 区域上岩浆作用也明显不及东部地区强烈(白阳等, 2023; 林舸等, 2008; 徐义刚等, 2009; 赵越等, 2022)。

从构造图解分析, 孤峰山岩体具有以下特征: 样品在(Yb+Ta)-Rb 图解上落在了后碰撞区(图 8(a)), 而后碰撞区范围位于同碰撞花岗岩、火山弧花岗岩和板内花岗岩的交界处, 以所指示的构造环境宽泛为特征; 在 R1-R2 图解上, 样品投点落在了碰撞后隆起花岗岩区(图 8(b)); 在图 8(c)上, 样品均落在了代表挤压与伸展环境重叠的区域(图 8(c))。以上结果均显示出岩体具有后碰撞的特征, 但由于构造图解往往具有多解性, 还需结合其他特征进一步分析。从岩浆作用时空分布看, 孤峰山岩体形成年龄为 (133.0 ± 0.5) Ma, 与区域上相邻不远的塔儿山岩体((129.2 ± 2.9) Ma)(杨瑶等, 2017)、蚕坊岩体(130 Ma)(齐玥等, 2016)及黄龙埡岩体(127 Ma)(霍腾飞等, 2016)的侵位年龄基本一致, 指示了它们可能形成于同一构造事件背景, 即华北克拉通破坏这一地质事件。早白垩世是华北克拉通破坏的峰期, 此时华北克拉通中部整体处于伸展背景。孤峰山岩体的形成过程可能为: 在区域伸展背景下软流圈上涌, 携带的热量促使下地壳发生部分熔融, 后侵位上升至地表冷凝后形成。岩石学和岩石地球化学特征均暗示了地幔物质成分对岩体的形成贡献很小。

因此, 我们可以进一步推断: 在古太平洋板块俯冲这一动力因素背景下, 华北克拉通中部南段的整体稳定性虽未发生明显改变, 但也受到了华

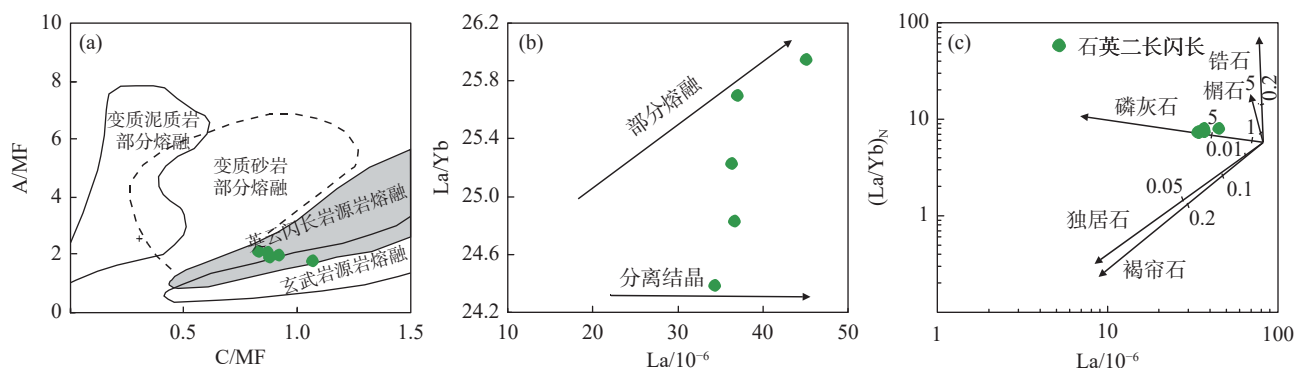


图7 孤峰山岩体 C/MF-A/MF(a)、La-La/Yb(b)和 La-(La/Yb)_N(c)关系图(底图分别据 Altherr et al., 2000、Allègre and Minster, 1978 和 Wu et al., 2003)

Fig. 7 C/MF-A/MF(a), La-La/Yb(b) and La-(La/Yb)_N(c) diagrams of the Gufengshan granite pluton (Modified from Altherr et al., 2000, Allègre and Minster, 1978 and Wu et al., 2003)

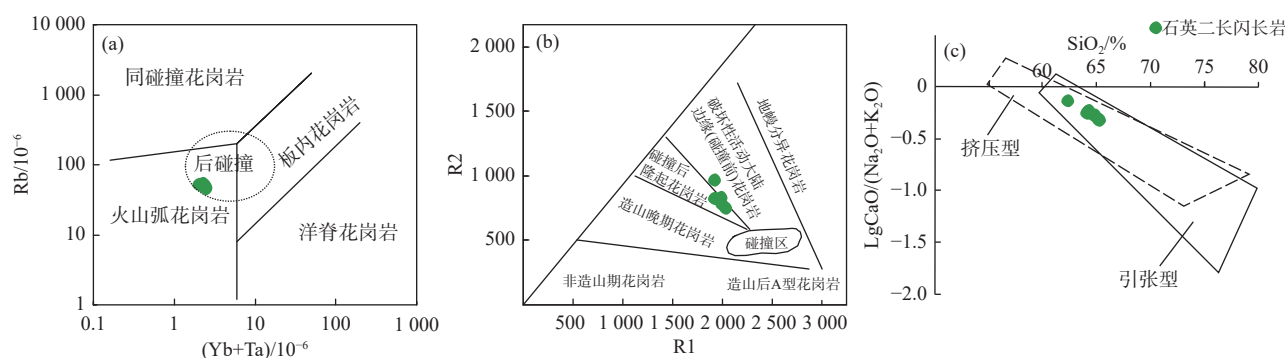


图8 孤峰山岩体构造环境(Yb+Ta)-Rb图解(a)(Pearce et al., 1984)、R1-R2图解(b)(Batchelor and Bowden, 1985)和 SiO_2 - $\text{LgCaO}/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 图解(c)(Brown, 1982)

Fig. 8 (Yb+Ta)-Rb(a)(Pearce et al., 1984), R1-R2(b)(Batchelor and Bowden, 1985) and SiO_2 - $\text{LgCaO}/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ (c)(Brown, 1982) tectonic settings discrimination diagrams of the Gufengshan granite pluton

北克拉通破坏的影响,区域上早白垩世岩体的零星出露即是明显例证,但这一作用并不显著,在空间范围上呈现出了不连续性。

幅区域地质调查报告[R].

6 结论

(1)岩石学及年代学研究结果显示,孤峰山岩体中细粒石英二长闪长岩的侵位年龄为 (133.0 ± 0.5) Ma,形成于早白垩世早期,与华北克拉通东部中生代大规模岩浆作用同期。

(2)岩体具有全碱含量中等、富钠及准铝质的特征,稀土元素含量中等,负钨异常不明显,大离子亲石元素(Rb、Ba、K)及Th元素富集,高场强元素(Ta、Nb、P、Ti等)亏损,为典型的I型花岗岩。

(3)岩体形成于华北克拉通破坏的地质事件背景下,但克拉通破坏对于中部地区的影响并不显著。

致谢: 感谢李奎芳、张超等同事在野外样品采集过程中提供的大量帮助!感谢审稿专家和责任编辑提出的许多建设性修改意见,使得本文不断完善,在此一并表示感谢!

注释

- ①山西省地质调查院. 2019. 中国区域地质志山西志[R].
- ②山西省地质调查院. 2012. 侯马测区1:5万区域矿产调查报告[R].
- ③山西省建委地质局区域地质测量队. 1972. 1:20万运城幅区域地质调查报告[R].
- ④山西省地质局区域地质测量队. 1977. 1:20万韩城

References

- ALLÈGRE C J, MINSTER J F. 1978. Quantitative models of trace element behavior in magmatic processes[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 38(1): 1-25.
- ALTHERR R, HOLL A, HEGNER E, LANGER C, KREUZER H. 2000. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European variscides: northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany)[J]. *Lithos*, 50(1-3): 51-73.
- BAI Y, ZHANG L C, ZHU M T, HUANG K, GAO B Y, LI W J, WANG C L. 2023. Contribution of mantle materials to Early Cretaceous gold mineralization in the northern margin of the North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 39(1): 217-235 (in Chinese with English abstract).
- BATCHELOR R A, BOWDEN P. 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters[J]. *Chemical Geology*, 48(1-4): 43-55.
- BROWN G C. 1982. Calc-alkaline intrusive rocks: their diversity, evolution, and relation to volcanic arcs[M]//THORPE R S. Andesites. New York: John Wiley and Sons, 437-461.
- CHAPPELL B W, WHITE A J R. 1992. I- and S-type granites in the Lachlan fold belt[J]. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 83(1-2): 1-26.
- CHEN X, WEN C H, CAO C H, HUANG L Q, LI B, ZENG G Q. 2024. Zircon U-Pb ages, geochemical characteristics and geological significance of biotite monzogranite and two-mica monzogranite in the northwestern Mufushan of northeast Hunan Province[J]. *Geology and Exploration*, 60(6): 1168-1182 (in Chinese with English abstract).

- CHEN Y J, ZHAI M G, JIANG S Y. 2009. Significant achievements and open issues in study of orogenesis and metallogenesis surrounding the North China continent[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2695-2726 (in Chinese with English abstract).
- COLLINS W J, BEAMS S D, WHITE A J R, CHAPPELL B W. 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80(2): 189-200.
- HAO S Q, RONG X W, WANG L J, LI M X. 2022. Discovery of the Late Carboniferous alkali-feldspar granite from the Bulinmiao Area in Inner Mongolia and its constraints on the evolution of the Paleo-Asian Ocean[J]. *Geological Bulletin of China*, 41(9): 1613-1623 (in Chinese with English abstract).
- HUO T F, YANG D B, SHI J P, XU W L, YANG H T. 2016. Petrogenesis of the Early Cretaceous alkali-rich intrusive rocks in the central North China Block: constraints from zircon U-Pb chronology and Sr-Nd-Hf isotopes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(3): 1697-1712 (in Chinese with English abstract).
- JIANG J Y, SU S G, CUI X L, LIU L L, MENG W Y, WANG J J. 2020. The processes and mechanism of lithospheric thinning in eastern North China Craton during Early Cretaceous: evidence from Xishimen Complex, Hebei Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36(2): 356-390 (in Chinese with English abstract).
- LI R L, DUAN C, CHEN Z K, LI W, ZHANG Z Y. 2016. Zircon U-Pb age of granitoid from the Chiawu Cu-W occurrence northern Taihang Mountain and its implications[J]. *Geology in China*, 43(5): 1761-1770 (in Chinese with English abstract).
- LI T D, LIU Y, DING X Z, PANG J F. 2022. Ten advances in regional geological research of China in recent years[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96(5): 1544-1581 (in Chinese with English abstract).
- LI M X, WANG L J, ZHANG L M, WANG Z Q, LUO D, LI Z. 2023. Petrogenesis of the Huobulin Granite in the southern part of the Xing'an Block and its insight into the evolution of the Mongol-Okhotsk ocean[J]. *Geological Bulletin of China*, 42(9): 1541-1555 (in Chinese with English abstract).
- LI H K, ZHU S X, XIANG Z Q, SU W B, LU S N, ZHOU H Y, GENG J Z, LI S, YANG F J. 2010. Zircon U-Pb dating on tuff bed from Gaoyuzhuang Formation in Yanqing, Beijing: further constraints on the new subdivision of the Mesoproterozoic stratigraphy in the northern North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(7): 2131-2140 (in Chinese with English abstract).
- LIN K, ZHAO C B, XIAO H Q, CHEN G H, YAN Y, ZHANG D S, LIU S L, CHEN Y P. 2008. Dynamic mechanisms and models of tectonic activation in North China Craton[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 32(2): 133-142 (in Chinese with English abstract).
- LIU Y S, GAO S, HU Z C, GAO C G, ZONG K Q, WANG D B. 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 51(1-2): 537-571.
- LIU L L, SU S G, WANG N, WANG W B. 2019. Deep magmatic processes and shallow responses during the lithospheric thinning of North China Craton: taking Tanling intrusive complex as an example[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(9): 2873-2892 (in Chinese with English abstract).
- LUDWIG K R. 2003. Isoplot 3.00: a geochronological toolkit for microsoft excel[M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 1-70.
- MANIAR P D, PICCOLI P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635-643.
- MIDDLEMOST E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth-Science Reviews*, 37(3-4): 215-224.
- MORRISON G W. 1980. Characteristics and tectonic setting of the shoshonite rock association[J]. *Lithos*, 13(1): 97-108.
- PEARCE J A, HARRIS N B W, TINDLE A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 25(4): 956-983.
- QI Y, LUO J H, WU J D, CHEN F K. 2016. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic composition of the Canfang and Gufengshan granodiorite plutons in central-southern North China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(7): 2015-2028 (in Chinese with English abstract).
- QI Y, XU H B, ZHANG J X, LUO J H. 2011. Geochemistry, geochronology and geological significance of Gufengshan granodiorite in Linfen Grabben Basin[J]. *Geological Review*, 57(4): 565-573 (in Chinese with English abstract).
- RAPP R P, SHIMIZU N, NORMAN M D, APPLIGATE G S. 1999. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: experimental constraints at 3.8 GPa[J]. *Chemical Geology*, 160(4): 335-356.
- RUDNICK R L, GAO S. 2003. Composition of the continental crust[J]. *Treatise on Geochemistry*, 3: 1-64.
- SUN S S, MCDONOUGH W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313-345.

- SUN J F, YANG J H. 2009. Early Cretaceous A-type granites in the eastern North China Block with relation to destruction of the craton[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(1): 137-147 (in Chinese with English abstract).
- TAO Z H, MA Z X, CAI C L, YU X L, AN Z, PEI Y S, ZHANG B. 2023. Geochemistry, zircon trace element characteristics and geological significance of the Baimahai indosinian granites in the northern Sanjiang Section, Qinghai[J]. *Geology and Exploration*, 59(1): 99-112 (in Chinese with English abstract).
- WANG Y Y, CAI J H, YAN G H, ZHOU W W, YAN Z J. 2014. Shrimp zircon U-Pb age, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotopic characteristics of the Zijinshan alkaline complex in Linxian County, Shanxi Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 33(6): 1052-1072 (in Chinese with English abstract).
- WANG T, GUO L, LI S, WANG X X, WANG C Y. 2019. Some important issues in the study of granite tectonics[J]. *Journal of Geomechanics*, 25(5): 899-919 (in Chinese with English abstract).
- WANG D Y, LI M X, WANG Q, WANG L J. 2024. Magmatic response to lithospheric thinning of the North China Craton—evidence from the Daqingshan granite[J]. *East China Geology*, 45(2): 173-186.
- WHALEN J B, CURRIE K L, CHAPPELL B W. 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407-419.
- WU F Y, JAHN B M, WILDE S A, LO C H, YUI T F, LIN Q, GE W C, SUN D Y. 2003. Highly fractionated I-type granites in NE China (I): geochronology and petrogenesis[J]. *Lithos*, 66(3-4): 241-273.
- WU F Y, LI X H, YANG J H, ZHENG Y F. 2007. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217-1238 (in Chinese with English abstract).
- WU F Y, LIU X C, JI W Q, WANG J M, YANG L. 2017. Highly fractionated granites: recognition and research[J]. *Science China Earth Sciences*, 60(7): 1201-1219 (in Chinese with English abstract).
- WU S P, WANG M Y, QI K J. 2007. Present situation of researches on A-type granites: a review[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(1): 57-66 (in Chinese with English abstract).
- WU F Y, XU Y G, GAO S, ZHENG J P. 2008. Lithospheric thinning and destruction of the North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1145-1174 (in Chinese with English abstract).
- XU Q, JIA R, TANG G, ZHANG P F, FAN C B, DUAN Z W, LI H N. 2023. The mineralization of tin in the southern section of the Daxing'an Mountains: a case study of the Huanggang—Ganzhuermiao Area[J]. *Geology and Exploration*, 59(2): 271-284 (in Chinese with English abstract).
- XU Y G, LI H Y, PANG C J, HE B. 2009. On the timing and duration of the destruction of the North China Craton[J]. *Chinese Science Bulletin*, 54(19): 3379-3396 (in Chinese with English abstract).
- YANG J H, XU L, SUN J F, ZENG Q D, ZHAO Y N, WANG H, ZHU Y S. 2021. Geodynamics of decratonization and related magmatism and mineralization in the North China Craton[J]. *Science China Earth Sciences*, 64(9): 1409-1427 (in Chinese with English abstract).
- YANG Y, ZHAO J F, LIU C Y, XUE R, YAN Z D. 2017. The zircon LA-ICP-MS U-Pb ages and geochemical characteristics of Ta'ershan intrusions, southern Shanxi Province, and their geological implications[J]. *Geological Review*, 63(3): 809-821 (in Chinese with English abstract).
- ZHAI M G. 2010. Tectonic evolution and metallogenesis of North China Craton[J]. *Mineral Deposits*, 29(1): 24-36 (in Chinese with English abstract).
- ZHANG L Z, CHEN L, WANG G P, DENG X D, LI J W. 2020. Garnet U-Pb dating constraints on the timing of breccia pipes formation and genesis of gold mineralization in Yixingzhai Gold Deposit, Shanxi Province[J]. *Earth Science*, 45(1): 108-117 (in Chinese with English abstract).
- ZHAO G C, CAWOOD P A, LI S Z, WILDE S A, SUN M, ZHANG J, HE Y H, YIN C Q. 2012. Amalgamation of the North China Craton: key issues and discussion[J]. *Precambrian Research*, 222-223: 55-76.
- ZHAO Y, GAO H L, ZHANG S H, LIU J. 2022. A brief century review of the “Yanshan Movement” and its founder[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96(5): 1510-1523 (in Chinese with English abstract).
- ZHONG S H, LI S Z, LIU Y, CAWOOD P A, SELTMANN R. 2023. I-type and S-type granites in the earth's earliest continental crust[J]. *Communications Earth & Environment*, 4(1): 61.
- ZHU R X, CHEN L, WU F Y, LIU J L. 2011. Timing, scale and mechanism of the destruction of the North China Craton[J]. *Science China Earth Sciences*, 54(6): 789-797 (in Chinese with English abstract).
- ZHU R X, XU Y G, ZHU G, ZHANG H F, XIA Q K, ZHENG T Y. 2012. Destruction of the North China Craton[J]. *Science China Earth Sciences*, 55(10): 1565-1587 (in Chinese with English abstract).
- ZHU R X, ZHOU Z H, MENG Q R. 2020. Destruction of the North China Craton and its influence on surface geology and terrestrial biotas[J]. *Chinese Science Bulletin*, 65(27):

2954-2965 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 白阳, 张连昌, 朱明田, 黄柯, 高炳宇, 李文君, 王长乐. 2023. 华北克拉通北缘早白垩世金成矿与地幔物质的贡献[J]. 岩石学报, 39(1): 217-235.
- 陈旭, 文春华, 曹创华, 黄乐清, 李彬, 曾广乾. 2024. 湘东北幕阜山西北部黑(二)云母二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义[J]. 地质与勘探, 60(6): 1168-1182.
- 陈衍景, 翟明国, 蒋少涌. 2009. 华北大边造山过程与成矿研究的重要进展和问题[J]. 岩石学报, 25(11): 2695-2726.
- 郝书清, 戎秀伟, 王丽娟, 李猛兴. 2022. 内蒙古布林庙晚石炭世碱长花岗岩的发现及其对古亚洲洋演化的制约[J]. 地质通报, 41(9): 1613-1623.
- 霍腾飞, 杨德彬, 师江朋, 许文良, 杨浩田. 2016. 华北地块中部早白垩世富碱侵入岩的成因: 锆石 U-Pb 年代学和 Sr-Nd-Hf 同位素制约[J]. 岩石学报, 32(3): 1697-1712.
- 蒋俊毅, 苏尚国, 崔晓亮, 刘璐璐, 孟维一, 王菁姣. 2020. 早白垩世华北克拉通东部岩石圈减薄过程和机制: 来自河北西石门杂岩体的证据[J]. 岩石学报, 36(2): 356-390.
- 李瑞玲, 段超, 陈志宽, 李伟, 张志远. 2016. 太行山北段赤瓦屋铜钨矿化区花岗岩质岩石的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 中国地质, 43(5): 1761-1770.
- 李廷栋, 刘勇, 丁孝忠, 庞健峰. 2022. 中国区域地质研究的十大进展[J]. 地质学报, 96(5): 1544-1581.
- 李怀坤, 朱士兴, 相振群, 苏文博, 陆松年, 周红英, 耿建珍, 李生, 杨锋杰. 2010. 北京延庆高庄组凝灰岩的锆石 U-Pb 定年研究及其对华北北部中元古界划分新方案的进一步约束[J]. 岩石学报, 26(7): 2131-2140.
- 林舸, 赵崇斌, 肖焕钦, 陈广浩, 闫义, 张德圣, 刘士林, 陈运平. 2008. 华北克拉通构造活化的动力学机制与模型[J]. 大地构造与成矿学, 32(2): 133-142.
- 刘璐璐, 苏尚国, 王娜, 王文博. 2019. 华北克拉通减薄过程中岩浆深部过程及浅部响应: 以河北武安坦岭杂岩体为例[J]. 岩石学报, 35(9): 2873-2892.
- 齐玥, 罗金海, 巫嘉德, 陈福坤. 2016. 华北中南部蚕坊和孤峰山花岗闪长岩体的地球化学特征和 Sr-Nd-Pb 同位素组成[J]. 岩石学报, 32(7): 2015-2028.
- 齐玥, 徐鸿博, 张竞雄, 罗金海. 2011. 临汾断陷盆地孤峰山花岗闪长岩的地球化学和年代学及其地质意义[J]. 地质论评, 57(4): 565-573.
- 孙金凤, 杨进辉. 2009. 华北东部早白垩世 A 型花岗岩与克拉通破坏[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 34(1): 137-147.
- 陶志华, 马忠贤, 蔡成龙, 于小亮, 安朝, 裴有生, 张彬. 2023. 青海三江北段白马海印支期花岗岩地球化学、锆石微量元素特征及地质意义[J]. 地质与勘探, 59(1): 99-112.
- 王亚莹, 蔡剑辉, 阎国翰, 周伟伟, 闫志娇. 2014. 山西临县紫金山碱性杂岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素研究[J]. 岩石矿物学杂志, 33(6): 1052-1072.
- 王涛, 郭磊, 李舫, 王晓霞, 王朝阳. 2019. 花岗岩大地构造研究的若干重要问题[J]. 地质力学学报, 5(5): 899-919.
- 王丹阳, 李猛兴, 王权, 王丽娟. 2024. 华北克拉通减薄的岩浆浅表响应——来自大青山岩体的证据[J]. 华东地质, 45(2): 173-186.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报, 23(6): 1217-1238.
- 吴福元, 刘小驰, 纪伟强, 王佳敏, 杨雷. 2017. 高分异花岗岩的识别与研究[J]. 中国科学: 地球科学, 47(7): 745-765.
- 吴锁平, 王梅英, 戚开静. 2007. A 型花岗岩研究现状及其述评[J]. 岩石矿物学杂志, 26(1): 57-66.
- 吴福元, 徐义刚, 高山, 郑建平. 2008. 华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的主要学术争论[J]. 岩石学报, 24(6): 1145-1174.
- 徐巧, 贾若, 唐果, 张平发, 范春宝, 段志伟, 李华年. 2023. 大兴安岭南段锡的成矿作用: 以黄岗—甘珠尔庙地区为例[J]. 地质与勘探, 59(2): 271-284.
- 徐义刚, 李洪颜, 庞崇进, 何斌. 2009. 论华北克拉通破坏的时限[J]. 科学通报, 54(14): 1974-1989.
- 杨进辉, 许蕾, 孙金凤, 曾庆栋, 赵亚楠, 王浩, 朱昱升. 2021. 华北克拉通破坏与岩浆-成矿的深部动力学过程[J]. 中国科学: 地球科学, 51(9): 1401-1419.
- 杨瑶, 赵俊峰, 刘池洋, 薛锐, 闫占冬. 2017. 山西南部塔儿山岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义[J]. 地质论评, 63(3): 809-821.
- 翟明国. 2010. 华北克拉通的形成演化与成矿作用[J]. 矿床地质, 29(1): 24-36.
- 张立中, 陈蕾, 王国平, 邓晓东, 李建威. 2020. 石榴石 U-Pb 定年对山西义兴寨金矿床角砾岩筒时间的限制和金矿成因的指示[J]. 地球科学, 45(1): 108-117.
- 赵越, 高海龙, 张拴宏, 刘健. 2022. 回眸燕山运动——致敬“燕山运动”的创建者和中国地质学会的奠基人翁文灏[J]. 地质学报, 96(5): 1510-1523.
- 朱日祥, 陈凌, 吴福元, 刘俊来. 2011. 华北克拉通破坏的时间、范围与机制[J]. 中国科学: 地球科学, 41(5): 583-592.
- 朱日祥, 徐义刚, 朱光, 张宏福, 夏群科, 郑天愉. 2012. 华北克拉通破坏[J]. 中国科学: 地球科学, 42(8): 1135-1159.
- 朱日祥, 周忠和, 孟庆任. 2020. 华北克拉通破坏对地表地质与陆地生物的影响[J]. 科学通报, 65(27): 2954-2965.

Geochronology, geochemistry and geological implications of the Gufengshan granite in the southern Shanxi Province

LI Mengxing¹, LIU Ming¹, WU Junwei¹, YANG Wubao², JI Chen¹

(1. Xi'an Center of Mineral Resources Survey, China Geological Survey, Xi'an 710100, Shaanxi, China;

2. Shanxi Institute of Geological Survey Co., Ltd, Taiyuan 030006, Shanxi, China)

Abstract: The early Cretaceous magmatism is an ideal window for studying the mechanism of North China Craton destruction, but the research in its central area is obviously shallow. This paper studied zircon U-Pb dating and geochemical characteristics of the Gufengshan granite pluton. The results show that the granite pluton is mainly composed of quartz monzodiorite. The weighted average age is (133.0 ± 0.5) Ma, suggesting that it was emplaced in the early stage of the Early Cretaceous. The geochemistry indicates that it is characterized with medium total alkali content ($K_2O + Na_2O = 7.11\% \sim 7.40\%$), Na richness ($Na_2O = 4.17\% \sim 4.38\%$), and metaluminous rock ($A/CNK = 0.80 \sim 0.97$), belonging to the high-K calc-alkaline I-type series. It is also characterized with the enrichment of large ion lithophile elements (Rb, Ba, K) and Th, depletion in high field-strength elements (Ta, Nb, P and Ti), medium rare earth element contents ($\Sigma REE = (152.76 \sim 199.85) \times 10^{-6}$), and weak negative Eu anomalies ($\delta Eu = 0.93 \sim 0.97$), which is geochemically similar to the continental crust composition. Combined with local geological setting and research findings this time, it indicated that the orogenesis of Gufengshan granite pluton was related to the tectonic influence of the North China Craton's destruction on its central area.

Key words: Gufengshan; I-type granite; quartz monzodiorite; North China Craton destruction