

· 专题研究 ·

Doi: 10.20086/j.cnki.yskw.2025.4183

华北克拉通北缘沙峪口早白垩世埃达克质 花岗岩成因

——年代学与地球化学制约

李 壮^{1,2}, 杨荣彬², 秦明硕¹, 朱 鑫¹, 华秋实¹, 宋泽章¹

(1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249; 2. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871)

摘要: 花岗岩作为壳幔物质循环的重要指示,其成因演化研究为制约陆壳增生-分异过程、解析造山作用动力学机制以及揭示深部地球化学储库演化提供了关键约束。为限定华北克拉通北缘燕山褶皱带晚中生代构造演化过程,本文聚焦北京沙峪口早白垩世花岗岩体,通过岩相学分析、全岩主微量元素地球化学、锆石原位 U-Pb 定年和 Lu-Hf 同位素等方法,系统揭示了其成岩时代、岩浆演化及地球动力学背景。沙峪口二长花岗岩中的锆石 U-Pb 谐和年龄为 134 ± 1 、 132 ± 1 、 132 ± 1 、 131 ± 3 、 130 ± 4 和 133 ± 2 Ma,指示岩体侵位时代为早白垩世。地球化学分析表明,沙峪口二长花岗岩具高硅($\text{SiO}_2 = 63.70\% \sim 69.13\%$)、富碱质($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 9.48\% \sim 10.81\%$)、过铝质($A/\text{CNK} = 1.05 \sim 1.13$ 且 $A/\text{NK} = 1.26 \sim 1.29$)特征,属高钾钙碱性 I 型花岗岩;富集大离子亲石元素(如 Rb、K、Ba)和轻稀土元素,亏损高场强元素(如 Nb、Ta 和 Ti);具高 K_2O 、Sr,低 MgO、Y、Yb,以及高 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值等特性,呈现出 C 型埃达克岩的地球化学特征。沙峪口二长花岗岩中锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 $-23.84 \sim -19.76$ 之间,二阶段模式年龄 t_{DM}^2 介于 $3\,768 \sim 3\,408$ Ma 之间,说明岩浆起源于古太古代地壳的部分熔融。该二长花岗岩的锆石饱和温度较低($637 \sim 699^\circ\text{C}$),属于低温型花岗岩,指示岩浆形成过程中存在外来流体的渗透作用。综合区域构造演化,认为在古太平洋板块俯冲背景下,幔源岩浆底侵,外来流体的渗透诱发加厚的太古宙火成岩下地壳部分熔融,岩浆经历微弱的分离结晶作用,最终在低温条件下冷凝结晶形成沙峪口花岗岩。

关键词: 沙峪口花岗岩; C 型埃达克岩; 锆石 U-Pb 定年; Lu-Hf 同位素; 岩石成因

中图分类号: P588.12⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2025)05-1003-25

Petrogenesis of the Early Cretaceous adakitic granites in the Shayukou area of the northern margin of North China Craton: Geochronologic and geochemical constraints

LI Zhuang^{1,2}, YANG Rong-bin², QIN Ming-shuo¹, ZHU Xin¹, HUA Qiu-shi¹ and SONG Ze-zhang¹

(1. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871)

Abstract: Granites serve as critical indicators of crust-mantle material cycling. Their genetic evolution provides essential constraints for deciphering continental crustal accretion-differentiation processes, unraveling the dynamics

收稿日期: 2024-10-24; 接受日期: 2025-07-24; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 国家自然科学基金项目(42002238, 41804045, 42272161); 东北亚矿产资源评价重点实验室开放课题(DBY-KF-19-03); 中国石油天然气股份有限公司重大科技专项(2023ZZ16, 2024D101-01-06)

作者简介: 李 壮(1989-), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事前寒武纪地质学与岩石学研究, E-mail: lizhuangcc@pku.edu.cn。

of orogenic mechanisms, and elucidating the evolution of deep-seated geochemical reservoirs. To constrain the Late Mesozoic tectonic evolution of the Yanshan Fold Belt along the northern margin of the North China Craton, we conducted systematical investigations of the Shayukou granites in Beijing. These investigations included petrographic analysis, zircon U-Pb geochronology, whole-rock major and trace element geochemistry, and Lu-Hf isotopic analyses. Zircon U-Pb concordant ages from the Shayukou monzogranite yield 134 ± 1 , 132 ± 1 , 132 ± 1 , 131 ± 3 , 130 ± 4 and 133 ± 2 Ma, respectively, constraining the pluton emplacement to the Early Cretaceous. Geochemical analyses reveal the following characteristics: the Shayukou monzogranites possess high silica ($\text{SiO}_2 = 63.70\% \sim 69.13\%$), alkali enrichment ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O} = 9.48\% \sim 10.81\%$), and peraluminous composition ($A/\text{CNK} = 1.05 \sim 1.13$ and $A/\text{NK} = 1.26 \sim 1.29$), classified as high-K calc-alkaline I-type granites. The rocks exhibit pronounced enrichment in large-ion lithophile elements (LILEs; *e.g.*, Rb, K, Ba) and light rare earth elements (LREEs), coupled with depletion in high-field-strength elements (HFSEs; *e.g.*, Nb, Ta, Ti). Diagnostic features, including elevated K_2O , Sr, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ ratios, and suppressed MgO, Y, and Yb contents, collectively characterize them as C-type adakites. Zircons from the Shayukou monzogranites exhibit $\varepsilon\text{Hf}(t)$ values ranging from -23.84 to -19.76 , with two-stage Hf model ages (t_{DM}^C) of $3\,768 \sim 3\,408$ Ma, indicating derivation from the partial melting of Paleoarchean crust. The low zircon saturation temperatures, ranging from 637°C to 699°C , classify the monzogranite as a low-temperature granite, suggesting the generation of magma involved infiltration of external fluids. Integrated with regional tectonic evolution, the Shayukou granite formed in a setting associated with the subduction of the Paleo-Pacific Plate. The underplating of mantle-derived magma, along with fluid fluxing, initiated the partial melting of thickened Archean igneous lower crust. Subsequently, the magma underwent limited fractional crystallization and crystallized at low temperatures.

Key words: Shayukou granite; C-type adakites; zircon U-Pb dating; Lu-Hf isotope; petrogenesis

Fund support: National Natural Science Foundation of China (42002238, 41804045, 42272161); Open Fund Project of Key Laboratory of Mineral Resources Evaluation in Northeast Asia (DBY-KF-19-03); PetroChina Company Limited Major Science and Technology Project (2023ZZ16, 2024D101-01-06)

花岗岩构成了大陆地壳的主要组成部分,是研究地球演化历史的关键对象。它记录了地球内部和外部过程的复杂互动,其独特的化学和矿物组成使其成为地球区别于太阳系其他行星的一个显著特征(翟明国等, 2021; 郑永飞等, 2024; 朱弟成等, 2025)。对花岗岩的研究有助于揭示地球早期环境条件以及地壳和地幔之间的相互作用等(King *et al.*, 1997; Yang *et al.*, 2006; 吴福元等, 2007; 邓心禾等, 2025)。鉴于其形成机制和构造背景的复杂性,需要利用岩石学、年代学和地球化学等多种手段进行综合研究(Chappell and White, 1974; 吴福元等, 2007)。华北克拉通发育大规模中生代花岗岩,其岩石成因备受关注(吴福元等, 2003; 葛茂卉等, 2020; 李刚等, 2020; 李友连等, 2025)。前人对华北克拉通北缘云蒙山变质核杂岩的运动学指向、变形机制、几何特征、剪切作用类型、构造年代学及动力学背景等进行了深入解析,并对该区中生代花岗岩开展了年代学和地球化学研究(Davis *et al.*,

1996; 朱大岗等, 2000; 姬广义等, 2004a, 2004b; Shi *et al.*, 2009; 陈印等, 2013, 2014; Zhu *et al.*, 2015; 赵腾格等, 2021)。这些研究建立了花岗岩年代学格架(姬广义等, 2004a; 欧阳志侠, 2010; 赵美涛等, 2014, 2015; 康月蓝等, 2018),并深入探讨了云蒙山地区花岗岩的成因及构造演化特征。然而,相较于云蒙山地区北缘花岗岩,其西南部沙峪口花岗岩的年代学、岩石成因学及地球动力学的研究仍较为薄弱(姬广义等, 2004b)。为此,本研究选取沙峪口二长花岗岩,通过系统的岩石学、锆石 U-Pb 年代学和地球化学研究,揭示其岩石成因及岩浆演化,进而为华北克拉通北缘晚中生代构造演化提供岩石学约束。

1 区域地质背景

华北克拉通是全球最古老的陆壳板块之一,其中蕴藏着具有 38 亿年历史的始太古代岩石(Lei

et al., 2023)。华北克拉通西南部与祁连山-秦岭-大别造山带相接,东南部则与苏鲁造山带相邻,将华北克拉通与南部的扬子板块分隔开来(图 1a, Wu *et al.*, 2019)。位于华北克拉通的北缘,燕山造山带中段的云蒙山花岗岩基出露面积大约为 300 km²(图 1b, 姬广义等, 2004a; 王磊等, 2022),从岩体边缘到中心发育闪长岩-石英闪长岩-石英二长闪长岩-石英二长岩-花岗闪长岩-二长花岗岩序列,核部可见正长花岗岩及碱长花岗岩(欧阳志侠, 2010; 赵美涛等, 2014)。岩体普遍遭受了不同程度的韧性变形改造,从岩体中心向外,变形程度逐渐增强,面理和线理均向围岩倾斜,形成环状分布(Davis *et al.*, 1996)。岩石单元主要包括太古宙变质基底、中新元古代及寒武纪海相沉积盖层、中侏罗世陆相沉积,以及晚侏罗世至早白垩世髫髻山组陆相火山岩(Davis

et al., 1996; 姬广义等, 2004a)。太古宙变质基底主要分布在云蒙山的东北部,由片麻岩、片岩和斜长角闪岩等组成(金文山等, 1999)。岩浆活动在晚三叠世、晚侏罗世和早白垩世达到高峰,其中晚侏罗世最为频繁,岩体形成年龄约 143 Ma(康月蓝等, 2018)。

2 岩相学特征

从时空关系上,沙峪口岩体和长园岩体位于云蒙山岩基西南部(欧阳志侠, 2010),均为晚中生代构造热事件的产物,其中沙峪口岩体位于中心,面积约为 50 km²,平面形态近似椭圆形,(图 1b, 姬广义等, 2004a),长园岩体呈环状围绕沙峪口岩体展布,野外露头呈灰白色,铁镁质矿物以角闪石为主,次要

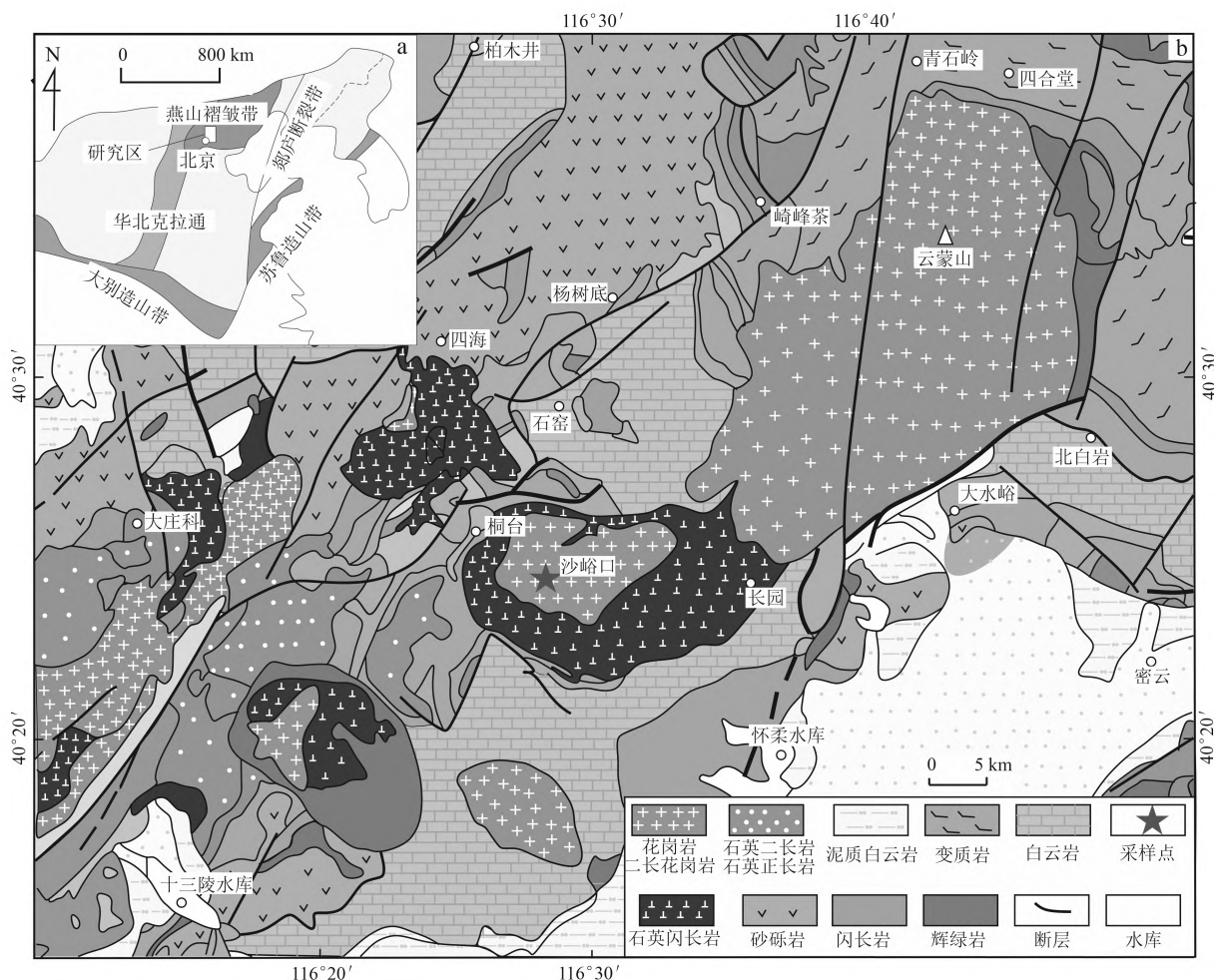


图 1 沙峪口岩体大地构造位置图(a, 据 Wu *et al.*, 2019) 和区域地质图(b, 据姬广义等, 2004a)

Fig. 1 Geotectonic location map (a, after Wu *et al.*, 2019) and regional geological map (b, after Ji Guangyi *et al.*, 2004a) of the Shayukou pluton

矿物为肉红色碱性长石(康月蓝等, 2018)。

沙峪口岩体呈 NWW 向椭圆状展布, 其岩石类型主要包括石英二长岩、二长花岗岩、正长花岗岩和碱长花岗岩等, 岩石具有典型的块状构造。自中心向边缘, 野外露头总体由肉红色渐变为灰白色, 颗粒

由中-粗粒向中-细粒过渡, 斜长石、碱性长石和石英等浅色矿物为主要矿物, 暗色矿物含量略有升高。岩体中心的镁铁质矿物以片状黑云母为主, 到岩体边缘柱状角闪石开始出现。野外宏观尺度, 研究区内发育暗色微粒包体及中基性岩墙(图2a)。暗色

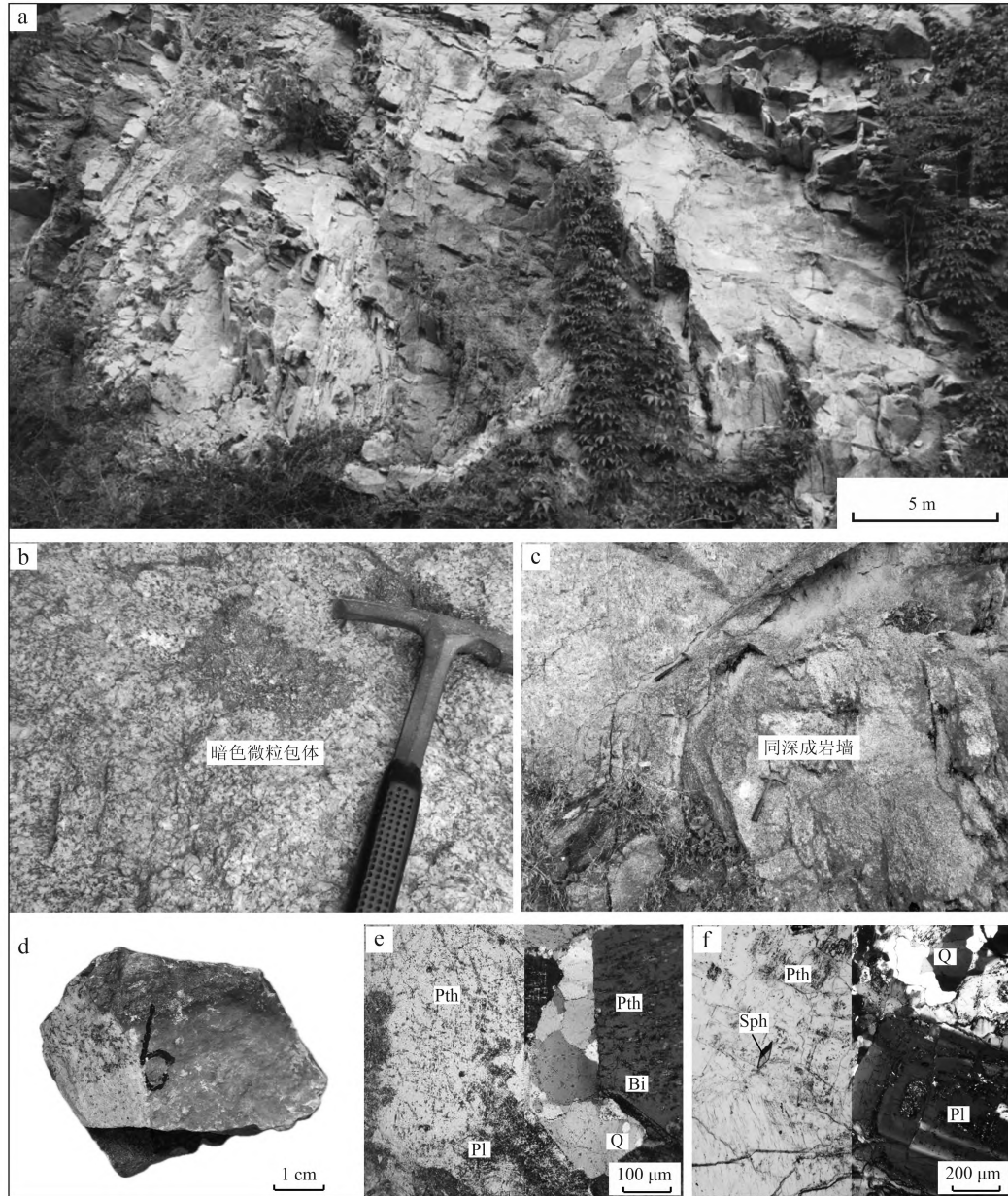


图2 沙峪口岩体野外(a、b、c)、手标本(d)及显微(e、f)照片

Fig. 2 Field photos (a, b, c), hand specimen (d), and photomicrographs (e, f) of the Shayukou pluton

a—中基性岩墙分布于二长花岗岩中; b—浑圆状暗色微粒包体分布于二长花岗岩中; c—中基性岩墙与二长花岗岩接触界面呈弯曲状; d—块状构造; e—花岗结构(左侧单偏光; 右侧正交偏光); f—斜长石呈环带结构(左侧单偏光; 右侧正交偏光); Q—石英; Pl—斜长石;

Pth—条纹长石; Bi—黑云母; Sph—榍石

a—intermediate-mafic dykes distributed within the monzogranites; b—subrounded dark microgranular enclaves distributed within the monzogranites; c—curved contact interface between the intermediate-mafic dykes and the monzogranites; d—massive structure; e—granitic texture (left—plane-polarized light; right—cross-polarized light); f—zoning of the plagioclase (left—plane-polarized light; right—cross-polarized light); Q—quartz;

Pl—plagioclase; Pth—perthite; Bi—biotite; Sph—sphene

微粒包体主要呈现出浑圆的外形(图 2b),呈现出塑性流变的特性(陈斌等, 2009; Chen *et al.*, 2009)。相较于沙峪口二长花岗岩,其中的(石英)闪长质包体的粒径较小,呈中-细粒结构,大量针柱状角闪石等暗色矿物和斜长石作为主要矿物,碱性长石和石英含量很低。中基性岩墙与二长花岗岩主体的界面呈现出微波状或弯曲形态(图 2c),并且在偏向岩墙一侧可以观察到主体的粗粒碱性长石的存在,揭示了同深成岩墙形成于岩浆混合作用过程(Li *et al.*, 2020, 2021)。

本研究样品采集于北京怀柔沙峪口岩体的西南部,采样点地理坐标纬度 40°24'33"N、经度 116°28'18"E,海拔高度为 92.52 m。样品岩性为二长花岗岩,主要矿物包括石英、斜长石和碱性长石,其中石英的含量在 15%~25%(体积分数,下同)之间,斜长石的含量在 30%~40%之间,正长石的含量在 5%~10%之间,条纹长石的含量在 15%~25%之间。次要矿物黑云母的含量在 8%~10%之间,副矿物包括磷灰石、榍石、磁铁矿等(图 2d, 2e)。碱性长石呈半自形板状,粒径 2.0~5.0 mm,其中正长石发育卡式双晶,条纹长石发育条纹结构,客晶相对主晶高岭土化程度低;斜长石呈半自形至自形板条状,粒径 2.0~4.0 mm,普遍发育聚片双晶及环带结构,环带具有显著的差异风化现象,暗示由核部至边部的成分变化(图 2f);石英呈它形粒状充填于其他矿物之中,粒径 0.5~1.5 mm,具有显著波状消光现象,指示受应力作用发生轻微变形;黑云母呈褐绿色自形长条状,表现出明显的塑性变形特征;榍石与磷灰石的自形程度较高,边缘平直且局部呈楔状。

3 测试分析

首先,将待测年样品经过手工破碎、淘洗、电磁选、重液分选,在双目镜下挑选出含包裹体少、无明显裂隙且晶型完好的锆石。然后,将锆石置于环氧树脂内研磨,再抛光清洗制成激光样品靶。锆石的阴极发光图像(图 3)采集在武汉上谱分析科技有限责任公司完成。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 原位定年分析在中国科学院地质力学研究所激光剥蚀-电感耦合等离子质谱仪实验室完成。年龄计算以国际标准锆石 91500 为外标进行同位素比值校正,以 TEM 为监控盲样;元素含量以国际标样 NIST 610 为外标,²⁹Si 为内标。实验中采用氦气作为剥蚀物质的载气、

氩气为补偿气以调节灵敏度。分析时采用 6 Hz 的激光频率,193 nm 的激光波长,32 μm 的激光束斑直径,激光预剥蚀时间和剥蚀时间分别为 20 s 和 50 s, U、Th、Pb 元素积分时间为 20 ms,其他元素积分时间为 15 ms。测试结果通过 GLITTER4.4 软件计算得出,实验获得的数据采用 Andersen(2002)的方法进行同位素比值的校正以扣除普通 Pb 的影响,谐和图的绘制采用 Isoplot 4.15 完成(Ludwig, 2003)。锆石 Hf 同位素测试在南京聚谱检测科技有限公司利用 7700X 型四级杆等离子体质谱仪、Neptune Plus 型多接收等离子体质谱仪完成。Geolas Pro 型激光剥蚀系统过程用氦气作为剥蚀物质载体,剥蚀束斑为 45 μm,测定时使用锆石国际标样 GJ-1 作为参考物质(Blichert-toft and Albarède, 1997; Liu *et al.*, 2010; Hu *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2025)。

样品的主微量元素测试在诚谱检测技术(廊坊)有限公司完成。主量元素采用 X 荧光光谱法(XRF)测定,误差小于 0.5%。Zr、Sr、Ba、Rb 和 Nb 等微量元素同样采用 X 荧光光谱法完成,其中 Ba 元素的误差控制在 5%以内,而其他元素的误差低于 3%。稀土元素及 V、Cr、Ni、Co、Cu、Pb、U、Th、Ta 和 Hf 等采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定,误差小于 5%(Li *et al.*, 2015)。

4 分析结果

4.1 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年

6 件样品共计 116 个锆石的 U-Pb 年龄见表 1。SYK1-2 样品中的锆石呈自形柱状,粒径介于 40~130 μm 之间,长宽比 2:1(图 3a)。锆石普遍发育显著振荡环带,具有较高 Th/U 值(0.28~0.92,平均值为 0.53),指示岩浆成因(Belousova *et al.*, 2002; Corfu *et al.*, 2003)。16 个锆石 U-Pb 年代学分析点均分布于谐和线及其邻近区域,²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 134±1 Ma(图 4a),代表岩浆结晶时代为早白垩世。1 个²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄稍老的分析点为 146±3 Ma,代表晚侏罗世末期捕获锆石的年龄。

SYK2-4 样品中的锆石主要呈自形短柱状,粒径集中在 30~125 μm,长宽比 2:1~3:1(图 3b)。锆石普遍发育清晰振荡环带,具有高 Th/U 值(0.29~1.19,平均值为 0.51),指示岩浆成因(Belousova *et al.*, 2002; Corfu *et al.*, 2003)。19 个锆石 U-Pb 年代学分析点均分布于谐和线上及其附近区域,²⁰⁶Pb/²³⁸U 加

表1 沙峪口二长花岗岩锆石 U-Pb 同位素年龄数据
Table 1 Zircon U-Pb dating data for the Shayukou monzogranites

点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值及误差						年龄和误差/Ma			
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
SYK1-2													
岩浆锆石													
SYK1-2-01	43.68	106.39	0.41	0.050 0	0.002 8	0.141 0	0.007 6	0.020 8	0.000 4	134	7	133	2
SYK1-2-02	96.34	158.55	0.61	0.053 9	0.002 5	0.161 3	0.007 6	0.021 7	0.000 3	152	7	138	2
SYK1-2-03	118.57	250.39	0.47	0.095 2	0.006 2	0.272 7	0.019 7	0.020 5	0.000 3	245	16	131	2
SYK1-2-04	48.69	63.42	0.77	0.074 3	0.005 3	0.214 3	0.014 9	0.021 3	0.000 4	197	12	136	3
SYK1-2-05	90.49	210.63	0.43	0.054 7	0.002 6	0.160 8	0.007 3	0.021 5	0.000 3	151	6	137	2
SYK1-2-06	72.47	157.15	0.46	0.051 0	0.003 1	0.146 1	0.008 9	0.021 1	0.000 3	138	8	134	2
SYK1-2-08	55.25	143.33	0.39	0.049 6	0.003 3	0.147 0	0.010 0	0.021 4	0.000 3	139	9	137	2
SYK1-2-09	35.36	93.41	0.38	0.056 2	0.004 6	0.159 8	0.012 4	0.021 2	0.000 4	150	11	135	3
SYK1-2-10	76.20	147.52	0.52	0.050 1	0.003 5	0.134 1	0.009 6	0.019 6	0.000 3	128	9	125	2
SYK1-2-11	99.93	183.93	0.54	0.054 5	0.002 6	0.151 9	0.007 0	0.020 3	0.000 3	144	6	130	2
SYK1-2-12	61.08	161.16	0.38	0.052 2	0.002 9	0.146 3	0.007 8	0.020 4	0.000 3	139	7	130	2
SYK1-2-13	26.14	62.29	0.42	0.056 1	0.003 7	0.162 4	0.010 7	0.021 1	0.000 4	153	9	135	3
SYK1-2-14	255.55	278.90	0.92	0.054 4	0.002 7	0.159 3	0.006 7	0.021 6	0.000 4	150	6	137	3
SYK1-2-16	131.61	188.49	0.70	0.049 1	0.002 8	0.136 2	0.007 0	0.020 4	0.000 3	130	6	130	2
SYK1-2-19	64.78	120.48	0.54	0.055 4	0.003 1	0.165 9	0.009 4	0.021 8	0.000 4	156	8	139	2
SYK1-2-20	307.62	348.85	0.88	0.053 0	0.002 0	0.149 4	0.005 6	0.020 6	0.000 3	141	5	132	2
捕获锆石													
SYK1-2-07	19.11	69.31	0.28	0.055 7	0.004 7	0.173 8	0.014 3	0.022 9	0.000 5	163	12	146	3
SYK2-4													
岩浆锆石													
SYK2-4-01	22.06	75.68	0.29	0.060 2	0.003 7	0.174 9	0.011 2	0.021 1	0.000 4	164	10	135	3
SYK2-4-02	29.49	44.96	0.66	0.064 1	0.005 9	0.175 2	0.014 3	0.021 0	0.000 5	164	12	134	3
SYK2-4-03	24.57	73.83	0.33	0.055 9	0.004 2	0.152 6	0.010 9	0.020 4	0.000 4	144	10	130	3
SYK2-4-05	61.51	117.70	0.52	0.094 6	0.009 1	0.304 2	0.031 6	0.022 4	0.000 5	270	25	143	3
SYK2-4-06	144.60	121.21	1.19	0.050 3	0.002 8	0.139 2	0.007 3	0.020 3	0.000 3	132	6	129	2
SYK2-4-07	25.34	79.84	0.32	0.053 8	0.003 9	0.149 8	0.010 5	0.020 5	0.000 3	142	9	131	2
SYK2-4-08	51.36	127.11	0.40	0.055 0	0.003 2	0.156 2	0.008 5	0.020 8	0.000 3	147	7	133	2
SYK2-4-09	30.46	97.25	0.31	0.046 9	0.002 7	0.138 5	0.008 3	0.021 5	0.000 4	132	7	137	3
SYK2-4-10	39.42	90.35	0.44	0.060 8	0.004 0	0.170 3	0.010 1	0.020 8	0.000 4	160	9	133	2
SYK2-4-11	41.68	108.28	0.38	0.053 4	0.003 4	0.153 4	0.009 6	0.021 2	0.000 4	145	8	135	2
SYK2-4-12	141.55	219.36	0.65	0.052 2	0.002 5	0.145 5	0.007 1	0.020 3	0.000 2	138	6	129	1
SYK2-4-13	68.74	74.04	0.93	0.076 0	0.006 7	0.207 8	0.015 1	0.020 9	0.000 4	192	13	133	3
SYK2-4-14	46.71	104.91	0.45	0.055 0	0.003 5	0.159 1	0.010 5	0.020 9	0.000 3	150	9	133	2
SYK2-4-15	34.71	103.48	0.34	0.054 7	0.004 3	0.149 9	0.010 7	0.020 7	0.000 4	142	9	132	2
SYK2-4-16	54.12	122.01	0.44	0.051 9	0.003 6	0.149 2	0.010 1	0.021 2	0.000 4	141	9	135	2
SYK2-4-17	28.87	60.94	0.47	0.059 4	0.004 0	0.162 9	0.011 4	0.020 2	0.000 4	153	10	129	3
SYK2-4-18	36.75	107.39	0.34	0.055 1	0.004 5	0.151 5	0.012 0	0.020 4	0.000 4	143	11	130	2
SYK2-4-19	100.43	118.92	0.84	0.060 1	0.004 2	0.172 0	0.012 7	0.020 7	0.000 4	161	11	132	2
SYK2-4-20	56.57	121.57	0.47	0.053 9	0.003 4	0.151 2	0.008 5	0.020 9	0.000 4	143	8	133	2
SYK3-7													
岩浆锆石													
SYK3-7-02	21.76	43.41	0.50	0.095 9	0.008 1	0.275 6	0.019 7	0.021 5	0.000 7	247	16	137	4
SYK3-7-03	48.48	183.54	0.26	0.051 5	0.003 0	0.144 1	0.007 5	0.020 6	0.000 2	137	7	132	2
SYK3-7-04	46.54	104.45	0.45	0.064 3	0.004 3	0.182 7	0.011 1	0.021 0	0.000 4	170	10	134	3
SYK3-7-05	44.43	82.22	0.54	0.060 1	0.004 2	0.176 2	0.012 1	0.021 4	0.000 4	165	10	136	3
SYK3-7-06	16.16	75.59	0.21	0.049 6	0.003 7	0.139 3	0.009 8	0.020 9	0.000 4	132	9	133	2
SYK3-7-07	30.93	116.56	0.27	0.053 6	0.003 5	0.153 1	0.010 8	0.021 0	0.000 4	145	9	134	2
SYK3-7-08	29.19	96.93	0.30	0.047 5	0.003 5	0.133 6	0.010 0	0.020 7	0.000 4	127	9	132	3
SYK3-7-09	29.38	115.17	0.26	0.053 4	0.003 5	0.151 2	0.009 5	0.020 8	0.000 3	143	8	133	2

续表 1-1

Continued Table 1-1

点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值及误差						年龄和误差/Ma			
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
SYK3-7-10	17.27	63.76	0.27	0.063 3	0.004 9	0.170 5	0.011 7	0.020 3	0.000 4	160	10	129	3
SYK3-7-11	50.16	76.97	0.65	0.050 4	0.004 6	0.151 4	0.014 6	0.021 6	0.000 4	143	13	138	3
SYK3-7-12	19.37	81.30	0.24	0.055 9	0.005 8	0.144 2	0.012 0	0.019 9	0.000 4	137	11	127	3
SYK3-7-14	36.87	117.08	0.31	0.058 8	0.004 5	0.159 4	0.011 4	0.020 0	0.000 4	150	10	128	3
SYK3-7-17	27.06	105.90	0.26	0.050 4	0.003 7	0.141 3	0.010 5	0.020 5	0.000 4	134	9	131	2
SYK3-7-19	24.76	87.53	0.28	0.074 1	0.005 2	0.203 5	0.013 8	0.020 0	0.000 4	188	12	128	3
SYK3-7-20	16.07	68.25	0.24	0.072 7	0.005 3	0.200 8	0.014 0	0.020 5	0.000 5	186	12	131	3
捕获锆石													
SYK3-7-01	78.46	281.67	0.28	0.154 1	0.002 5	6.121 0	0.177 8	0.286 0	0.006 7	1 993	25	1 622	33
SYK3-7-13	92.26	159.03	0.58	0.155 4	0.003 0	6.771 7	0.343 2	0.306 3	0.014 3	2 082	45	1 722	70
SYK3-7-15	17.07	69.30	0.25	0.073 3	0.005 7	0.521 7	0.092 7	0.038 2	0.004 4	426	62	242	28
SYK3-7-16	11.60	55.80	0.21	0.081 8	0.005 5	0.577 3	0.073 8	0.042 6	0.004 1	463	48	269	26
SYK3-7-18	85.60	69.10	1.24	0.325 6	0.022 5	1.652 7	0.169 0	0.031 7	0.001 3	991	65	201	8
SYK3-8													
岩浆锆石													
SYK3-8-02	135.86	332.41	0.41	0.048 6	0.003 0	0.132 8	0.008 2	0.019 8	0.000 5	127	7	127	3
SYK3-8-03	10.13	53.36	0.19	0.049 9	0.005 2	0.137 5	0.014 1	0.020 0	0.000 7	131	13	128	4
SYK3-8-04	118.29	185.98	0.64	0.048 4	0.002 7	0.135 6	0.007 4	0.020 3	0.000 5	129	7	130	3
SYK3-8-05	25.42	50.54	0.50	0.050 6	0.010 4	0.136 0	0.027 8	0.019 5	0.000 6	130	25	125	4
SYK3-8-06	56.60	109.09	0.52	-0.956 3	0.085 3	-2.850 5	0.187 9	0.021 6	0.001 4	0	103	138	9
SYK3-8-09	45.90	68.07	0.67	0.046 2	0.081 9	0.127 6	0.225 7	0.020 0	0.002 3	122	203	128	14
SYK3-8-10	17.13	55.26	0.31	0.046 8	0.092 3	0.137 1	0.270 5	0.021 3	0.002 3	131	242	136	14
SYK3-8-14	28.27	77.03	0.37	0.048 1	0.062 6	0.138 1	0.179 6	0.020 9	0.001 5	131	160	133	9
SYK3-8-16	157.41	228.87	0.69	0.066 5	0.007 0	0.198 4	0.020 4	0.021 7	0.000 8	184	17	138	5
SYK3-8-20	39.58	221.53	0.18	0.048 5	0.004 2	0.145 6	0.012 7	0.021 8	0.000 6	138	11	139	4
捕获锆石													
SYK3-8-01	97.05	141.33	0.69	0.048 8	0.004 5	0.154 4	0.014 0	0.022 9	0.000 6	146	12	146	4
SYK3-8-07	27.77	76.71	0.36	0.065 0	0.006 8	0.210 4	0.021 6	0.023 5	0.000 8	194	18	150	5
SYK3-8-08	19.79	51.07	0.39	0	0	0	0	0.025 7	0.002 2	0	0	164	14
SYK3-8-15	139.07	173.66	0.80	0.056 0	0.026 6	0.198 5	0.094 0	0.025 7	0.001 1	184	80	164	7
SYK3-8-13	18.71	49.43	0.38	0.059 2	0.059 0	0.233 0	0.231 3	0.028 6	0.002 5	213	191	181	16
SYK3-8-17	91.07	146.21	0.62	0.108 3	0.011 7	0.338 9	0.034 8	0.022 7	0.001 0	296	26	145	6
SYK3-8-19	144.81	259.28	0.56	0.052 5	0.005 5	0.184 8	0.019 0	0.025 5	0.000 8	172	16	163	5
异常锆石													
SYK3-8-11	36.01	85.82	0.42	0.256 2	0.173 5	0.497 9	0.326 7	0.014 1	0.002 4	410	221	90	15
SYK3-8-12	38.62	89.47	0.43	1.712 7	0.471 2	3.998 4	0.414 8	0.016 9	0.004 4	1 634	84	108	28
SYK3-8-18	27.33	81.36	0.34	0.172 5	0.156 9	0.41	0.369 1	0.017 2	0.002 3	349	266	110	14
SYK4-1													
岩浆锆石													
SYK4-1-01	65.22	135.27	0.48	0.055 7	0.004 2	0.153 2	0.011 4	0.020 1	0.000 6	145	10	128	4
SYK4-1-02	41.74	103.92	0.40	0.052 1	0.005 5	0.136 8	0.014 1	0.019 1	0.000 6	130	13	122	4
SYK4-1-03	306.60	371.19	0.83	0.058 9	0.004 5	0.157 6	0.011 7	0.019 5	0.000 6	149	10	125	4
SYK4-1-04	28.07	88.69	0.32	0.056 7	0.020 2	0.159 5	0.056 5	0.020 5	0.000 9	150	50	131	5
SYK4-1-05	39.56	113.01	0.35	0.048 9	0.003 7	0.145 2	0.010 8	0.021 7	0.000 6	138	10	138	4
SYK4-1-16	9.43	46.11	0.20	1.019 5	0.125 3	3.107 1	0.230 8	0.022 2	0.002 3	1 434	57	142	14
SYK4-1-20	111.22	90.10	1.23	-0.138 6	0.015 1	-0.402 5	0.041 1	0.021 2	0.001 0	-523	70	135	6
捕获锆石													
SYK4-1-06	66.79	119.22	0.56	0.056 0	0.071 6	0.176 6	0.225 2	0.023 0	0.002 3	165	194	147	15
SYK4-1-07	28.67	88.09	0.33	0.066 9	0.118 7	0.226 0	0.399 9	0.024 7	0.003 4	207	331	157	21
SYK4-1-08	27.33	53.58	0.51	0.078 1	0.083 4	0.289 3	0.307 6	0.027 1	0.003 0	258	242	172	19
SYK4-1-09	75.76	148.16	0.51	0.368 5	0.046 8	1.651 1	0.169 9	0.032 7	0.002 6	990	65	208	16

续表 1-2

Continued Table 1-2

点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值及误差						年龄和误差/Ma			
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
SYK4-1-10	24.66	74.21	0.33	0.054 4	0.062 4	0.173 1	0.198 2	0.023 2	0.001 8	162	172	148	11
SYK4-1-11	39.90	81.81	0.49	0.049 8	0.028 6	0.202 9	0.115 8	0.029 7	0.001 8	188	98	189	11
SYK4-1-12	13.22	43.63	0.30	0	0	0	0	0.040 1	0.006 3	0	0	253	39
SYK4-1-14	73.52	222.59	0.33	0.048 1	0.051 2	0.149 6	0.159 1	0.022 7	0.001 8	142	141	145	11
SYK4-1-15	139.20	129.81	1.07	0	0	0	0	0.025 1	0.001 3	0	0	160	8
SYK4-1-17	176.07	197.74	0.89	0.260 8	0.022 6	0.879 5	0.064 8	0.024 6	0.001 3	641	35	157	8
SYK4-1-19	88.88	161.7	0.55	-0.21 1	0.018 7	-0.742 4	0.054 7	0.025 6	0.001 4	0	216	163	9
异常锆石													
SYK4-1-13	179.69	232.10	0.77	0.304 0	0.025 7	0.711 5	0.052 6	0.017 1	0.000 8	546	31	109	5
SYK4-1-18	186.73	117.56	1.59	0.064 9	0.029 7	0.162 5	0.073 8	0.018 3	0.001 1	153	64	117	7
SYK4-2													
岩浆锆石													
SYK4-2-02	71.86	145.14	0.50	0	0	0	0	0.021 5	0.001 0	0	0	137	6
SYK4-2-04	22.68	65.22	0.35	0.047 8	0.031 4	0.138 0	0.090 6	0.021 1	0.000 9	131	81	134	6
SYK4-2-05	59.41	166.15	0.36	0.047 3	0.019 4	0.135 6	0.055 7	0.021 0	0.000 7	129	50	134	4
SYK4-2-07	149.32	233.54	0.64	0.049 8	0.008 7	0.145 4	0.025 4	0.021 4	0.000 6	138	23	136	4
SYK4-2-08	16.17	62.89	0.26	0.047 7	0.013 6	0.130 9	0.037 1	0.020 0	0.000 7	125	33	128	4
SYK4-2-09	338.07	369.54	0.91	0.056 4	0.005 9	0.152 9	0.015 8	0.019 8	0.000 6	145	14	126	4
SYK4-2-13	25.99	52.37	0.50	0.058 6	0.012 6	0.181 8	0.038 8	0.022 6	0.000 8	170	33	144	5
SYK4-2-14	91.90	228.73	0.40	0.056 6	0.003 1	0.165 8	0.009 1	0.021 3	0.000 5	156	8	136	3
SYK4-2-15	22.94	65.60	0.35	0.055 0	0.023 0	0.157 4	0.065 6	0.020 8	0.000 8	148	58	133	5
SYK4-2-17	41.24	100.58	0.41	0.048 5	0.009 6	0.135 1	0.026 6	0.020 2	0.000 6	129	24	129	4
SYK4-2-19	25.24	111.97	0.23	0.050 7	0.006 1	0.136 1	0.016 2	0.019 4	0.000 5	130	15	124	3
SYK4-2-20	142.10	231.18	0.61	0.047 0	0.003 1	0.146 8	0.009 6	0.022 5	0.000 6	139	9	144	4
捕获锆石													
SYK4-2-01	30.66	91.57	0.33	0	0	0	0	0.023 0	0.001 5	0	0	147	10
SYK4-2-03	13.22	34.93	0.38	0.123 5	0.062 4	0.392 9	0.196 9	0.023 2	0.001 7	337	144	148	11
SYK4-2-06	48.84	73.55	0.66	0.058 1	0.029 7	0.200 6	0.102 4	0.025 3	0.001 1	186	87	161	7
SYK4-2-10	23.36	66.82	0.35	0.351 4	0.043 4	1.506 7	0.156 3	0.031 3	0.002 3	933	63	199	14
SYK4-2-18	47.94	107.84	0.44	0.059 4	0.003 7	0.195 2	0.011 9	0.023 8	0.000 6	181	10	151	4
异常锆石													
SYK4-2-11	23.40	65.24	0.36	0.290 2	0.036 2	0.579 5	0.059 6	0.014 6	0.001 1	464	38	93	7
SYK4-2-12	38.63	96.34	0.40	0.075 7	0.013 1	0.189 8	0.032 3	0.018 2	0.000 7	176	28	117	4
SYK4-2-16	72.91	108.03	0.67	0.049 1	0.005 1	0.116 1	0.011 9	0.017 1	0.000 6	112	11	109	4

权平均年龄为 132 ± 1 Ma (图 4b), 代表岩浆结晶年龄为早白垩世。

SYK3-7 样品中的锆石呈自形短柱状, 粒径介于 $20 \sim 95 \mu\text{m}$ 之间, 长宽比 $2:1$ (图 3c)。锆石发育显著振荡环带, Th/U 值较高 ($0.21 \sim 1.24$, 平均值为 0.38) 指示岩浆成因 (Belousova *et al.*, 2002; Corfu *et al.*, 2003)。20 个锆石 U-Pb 年代学分析点中 15 个位于谐和线及其邻近区域, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 132 ± 1 Ma (图 4c), 代表了岩浆结晶年龄为早白垩世。3 个 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄稍老分析点介于 $269 \sim 201$ Ma 之间, 代表晚二叠世至晚三叠世捕获锆石的年龄, 另外 2 个 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄较老分析点加权平

均年龄为 $1\ 672 \pm 52$ Ma, 代表古元古代晚期捕获锆石的年龄。

SYK3-8 样品中的锆石呈自形短柱状或长柱状, 粒径介于 $30 \sim 130 \mu\text{m}$ 之间, 长宽比 $2:1 \sim 3:1$ (图 3d)。锆石普遍发育显著振荡环带, 较高 Th/U 值 ($0.18 \sim 0.80$, 平均值为 0.47) 指示岩浆成因 (Belousova *et al.*, 2002; Corfu *et al.*, 2003)。20 个锆石 U-Pb 年代学分析点中 10 个位于谐和线及其邻近区域, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 131 ± 3 Ma, 代表岩浆结晶年龄为早白垩世 (图 4d)。7 个 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄稍老分析点介于 $181 \sim 145$ Ma 之间, 代表侏罗纪捕获锆石的年龄。

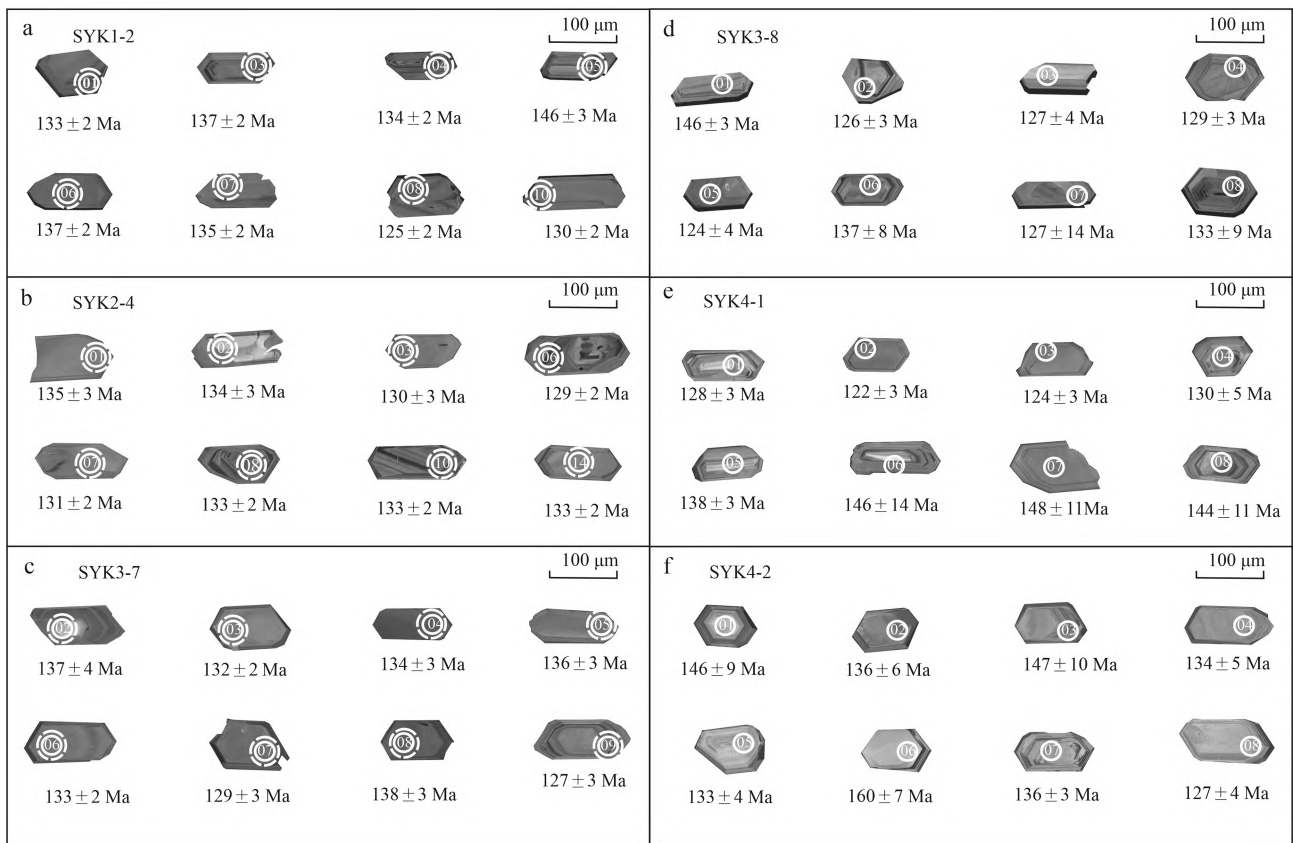


图3 沙峪口二长花岗岩中代表性锆石阴极发光图像(小实线圆圈为 U-Pb 测试区; 大虚线圆圈为 Lu-Hf 测试区)

Fig. 3 Cathodoluminescence images for representative zircons from the Shayukou monzogranites (small solid circles representing U-Pb analytical spots; big dashed circles representing Lu-Hf analytical spots)

SYK4-1 样品中的锆石呈自形短柱状, 粒径介于 50~115 μm 之间, 长宽比 2:1 (图 3e)。锆石发育显著振荡环带, 较高的 Th/U 值 (0.32~1.59, 平均值为 0.75) 指示岩浆成因 (Belousova *et al.*, 2002; Corfu *et al.*, 2003)。20 个锆石 U-Pb 年代学分析点中, 7 个位于谐和线及其邻近区域, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 130 ± 4 Ma, 代表岩浆结晶年龄为早白垩世 (图 4e)。11 个 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄稍老分析点介于 253~145 Ma 之间, 代表晚三叠世末期至晚侏罗世末期捕获锆石的年龄。

SYK4-2 样品中的锆石呈自形短柱状, 粒径介于 25~80 μm 之间, 长宽比 2:1~3:1 (图 3f)。锆石普遍发育显著振荡环带, 较高的 Th/U 值 (0.23~0.91, 平均值为 0.45) 指示岩浆成因 (Belousova *et al.*, 2002; Corfu *et al.*, 2003)。20 个锆石 U-Pb 年代学分析点中 (表 1), 12 个位于谐和线及其邻近区域, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 133 ± 2 Ma, 代表岩浆结晶年龄为早白垩世至晚白垩世 (图 4f)。5 个 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄稍老分析点的加权平均年龄为 161 ± 9 Ma, 代表

晚侏罗世捕获锆石的年龄。

4.2 主量元素特征

沙峪口二长花岗岩主量元素分析结果详见表 2。主量元素分析显示, 沙峪口二长花岗岩化学成分变化较大, 具有较高的 SiO_2 (63.70%~69.13%)、 Al_2O_3 (17.25%~18.49%)、 Na_2O (4.79%~5.83%), 较低的 P_2O_5 (0.08%~0.23%) 含量的特征, 其 MgO 和 CaO 含量分别为 0.28%~0.84% 和 0.92%~1.65%, K_2O 和 Na_2O 含量相当, 为 3.65%~6.02%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 0.63~1.26。为了深入讨论沙峪口二长花岗岩成因与岩浆演化, 本次研究收集前人已发表的沙峪口正长花岗岩、长园岩体和云蒙山岩体的主微量元素数据作为对比 (图 5~图 13, 欧阳志侠, 2010; 赵美涛等, 2014, 2015; 康月蓝等, 2018)。根据 Irvine 等 (1997) 的 TAS 分类图可知 (图 5a), 沙峪口岩体样品落入花岗岩和石英二长岩区域, 与岩相学特征一致, 并可见沙峪口岩体表现出钙碱性系列特征; 在 An-Ab-Or 三元图中, 样品落入花岗岩区域, 相较于长园岩体具有更低的钙长石含量 (图 5d)。

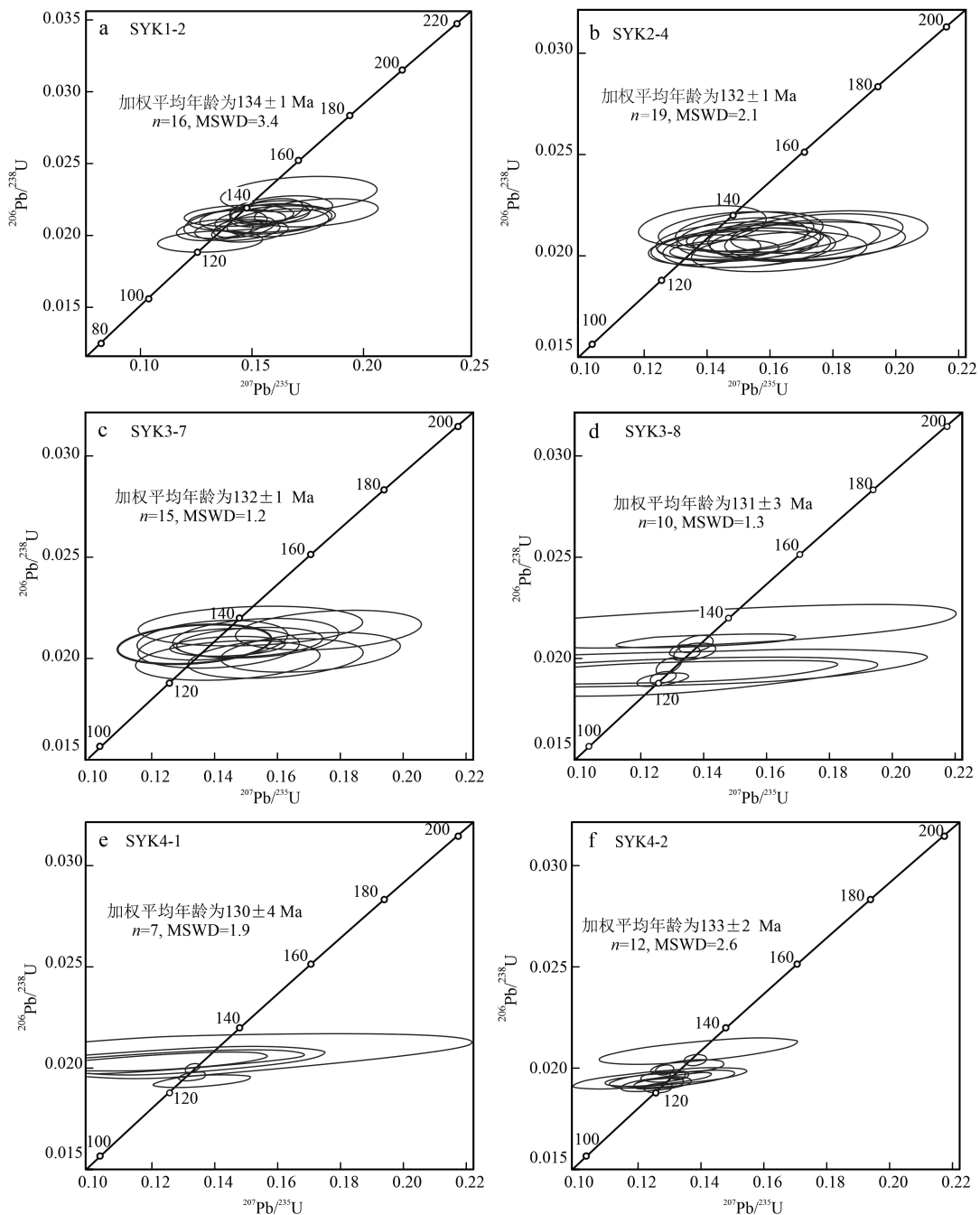


图4 沙峪口二长花岗岩的锆石年龄谐和图

Fig. 4 Zircon U-Pb concordia diagrams of the Shayukou monzogranites

根据 $A/NK-A/CNK$ 图解 (图 5b), 沙峪口二长花岗岩的 A/CNK 值在 1.05~1.13 之间, A/NK 值在 1.26~1.29 之间, 与沙峪口正长花岗岩的高铝特征一致, 均落入过铝质区 (Maniar and Piccoli, 1989)。在 K_2O-SiO_2 图解中 (图 5c), 样品主要落入高钾钙碱性系列区域, 仅个别样品落入钾玄岩系列区域, 显示岩

体整体具有高钾的特征 (Rickwood, 1989)。相较于长园岩体, 沙峪口岩体较为富硅、富碱, 而相对贫铁、贫钙, 与岩体空间关系相符; 云蒙山岩体化学成分变化更大, 兼具长园岩体和沙峪口岩体地球化学特征, 可能暗示具有独立且近似后二者的岩浆演化过程。

表 2 沙峪口岩体的全岩主量元素 ($w_B/\%$) 和微量元素 ($w_B/10^{-6}$) 分析结果Table 2 Whole-rock major ($w_B/\%$) and trace ($w_B/10^{-6}$) elements analytical results of the Shayukou pluton

岩石类型	二长花岗岩			正长花岗岩						
样品编号	SYK1-2	SYK2-4	SYK3-7	CP716-05 *	Y241 *	Y242 *	CP716-06 *	CP716-07 *	Y261 *	Y262 *
SiO ₂	63.70	64.52	69.13	73.68	72.48	73.79	72.24	71.16	75.23	72.16
Al ₂ O ₃	18.49	17.94	17.25	14.25	14.34	13.49	15.17	15.42	13.58	14.78
Fe ₂ O ₃	1.24	1.38	0.62	1.22	0.87	1.18	0.99	1.43	0.14	1.26
FeO	1.12	1.54	0.69	1.10	1.63	1.80	0.89	1.29	0.94	1.80
MgO	0.67	0.84	0.28	0.24	0.45	0.44	0.23	0.27	0.23	0.53
CaO	1.65	1.62	0.92	0.39	1.58	0.89	0.35	0.18	1.15	1.40
Na ₂ O	4.79	5.76	5.83	4.16	4.22	3.83	4.30	3.62	3.97	4.14
K ₂ O	6.02	4.04	3.65	4.67	4.03	4.66	4.65	4.78	4.50	4.05
P ₂ O ₅	0.12	0.23	0.08	0.04	0.07	0.03	0.02	0.01	0.04	0.05
TiO ₂	0.47	0.47	0.24	0.16	0.21	0.18	0.10	0.14	0.12	0.16
Zr	26.06	39.00	49.02	108.00	81.00	87.00	85.00	92.00	71.00	71.00
Sc	2.27	2.57	2.82							
V	35.38	40.73	24.75	9.00	19.00	27.00	9.00	12.00	9.00	
Cr	17.76	22.30	12.91		15.00	18.00			12.00	
Co	4.22	5.00	2.01							
Ni	4.10	6.11	2.21							
Cu	10.62	23.45	12.25							
Zn	60.25	101.63	35.73							
Ga	19.91	21.16	25.22	17.00	15.00	18.00	17.90	18.10	15.00	
Rb	51.82	49.03	52.83	115.00	72.00	57.00	97.60	92.70	97.00	
Sr	1 388.30	1 127.25	571.07	262.00	451.00	590.00	309.00	434.00	279.00	
Y	5.37	4.05	2.77	5.70			6.50	3.90		
Zr	26.06	39.00	49.02	108.00	81.00	87.00	85.00	92.00	71.00	
Nb	5.14	4.79	5.38	11.30	11.00	7.00	8.60	9.70	18.00	
Cs	0.28	0.39	0.42	1.15			0.80	0.72		
Ba	4 544.19	1 874.32	547.27	926.00	1 105.00	1 345.00	994.00	1 240.00	845.00	
Hf	0.87	0.88	3.64	3.70			3.30	3.30		
Ta	0.35	0.31	0.37							
Pb	23.76	30.50	29.64							
Th	1.51	1.48	2.60	9.28			13.40	7.47		
U	0.29	0.39	0.89	1.76			2.43	0.65		
La	38.69	36.22	13.74	17.40			24.80	18.20		
Ce	75.94	67.40	24.06	50.60			36.70	40.60		
Pr	8.78	7.60	3.35	3.62			4.48	3.74		
Nd	32.77	27.18	12.18	11.90			15.20	12.90		
Sm	4.71	3.74	1.74	1.87			2.20	2.13		
Eu	2.12	1.37	0.60	0.34			0.54	0.40		
Gd	2.89	2.32	1.15	1.23			1.46	1.15		
Tb	0.35	0.27	0.15	0.18			0.20	0.13		
Dy	1.30	1.03	0.55	0.92			1.09	0.76		
Ho	0.20	0.15	0.09	0.19			0.20	0.13		
Er	0.54	0.42	0.26	0.49			0.60	0.33		
Tm	0.07	0.05	0.03	0.08			0.08	0.04		
Yb	0.37	0.27	0.36	0.66			0.68	0.33		
Lu	0.05	0.04	0.03	0.09			0.09	0.04		

* 数据来自赵美涛等(2015)。

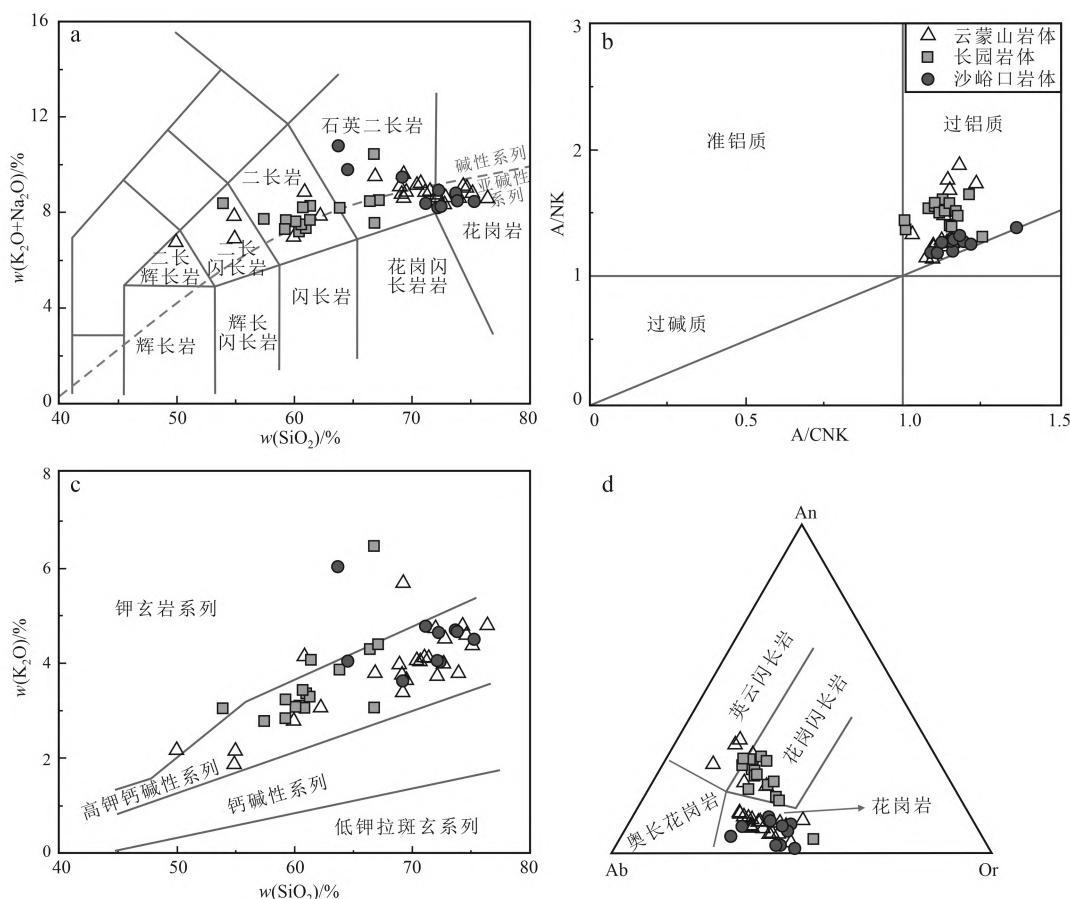


图5 沙峪口岩体 TAS 图解(a, 据 Irvine and Baragar, 1997)、A/NK-A/CNK 图解(b, 据 Maniar and Piccoli, 1989)、 K_2O-SiO_2 图解(c, 据 Rickwood, 1989)和 An-Ab-Or 分类图(d, 据 Martin *et al.*, 2005)

Fig. 5 TAS diagram (a, after Irvine and Baragar, 1997), A/NK-A/CNK (b, after Maniar and Piccoli, 1989), K_2O-SiO_2 (c, after Rickwood, 1989), and An-Ab-Or ternary diagrams (d, after Martin *et al.*, 2005) of the Shayukou pluton

4.3 微量元素特征

在微量元素特征方面,沙峪口花岗岩表现出较低的稀土元素总量($\sum REE = 58.29 \times 10^{-6} \sim 168.76 \times 10^{-6}$), $(La/Yb)_N$ 值为 18.91~96.22, 平均为 47.21, Sr/Y 值为 45.96~278.33, 平均为 157.97。在球粒陨石标准化的稀土配分图解中(图 6a), 样品呈现出显著的右倾稀土配分模式, 显示出轻稀土元素(LREE)强烈富集以及重稀土元素(HREE)的明显亏损, 符合低稀土组二长花岗质至正长花岗质岩石的特征(Fu *et al.*, 2017)。沙峪口花岗岩具较弱 Eu 的正异常与负异常($\delta Eu = 0.69 \sim 1.76$), 与云蒙山和长园地区中酸性岩体的 Eu 异常特征类似($\delta Eu = 0.67 \sim 1.45$)。在微量元素原始地幔标准化蛛网图中(图 6b), 沙峪口花岗岩的微量元素配分曲线也呈现出一致性, 均呈现出大离子亲石元素富集(如 Rb、K、Ba)和高场强元素亏损(如 Nb、Ta 和 Ti)的特征, 与大陆地壳的

微量元素配分曲线一致(李献华等, 2000)。

4.4 锆石 Lu-Hf 同位素特征

对样品 SYK1-2、SYK2-4 和 SYK3-7 中典型岩浆锆石进行了原位或邻近相同结构区域的微区 Hf 同位素分析(锆石 Lu-Hf 测试区见图 3), 分析结果详见表 3。3 个样品中的锆石 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 值为 0.000 39~0.000 75、0.000 35~0.001 36 和 0.000 45~0.000 59, 所有岩浆成因锆石 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 值均高于 0.002 00, 表明在锆石结晶后, 基本上没有显著的放射性成因 ^{176}Lu 的积累。因此, 所测得的 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 比率能够代表锆石形成时体系中的 Hf 同位素组成(Jonathan Patchett *et al.*, 1982; 吴福元等, 2007)。样品 SYK1-2 中 139~125 Ma 的岩浆锆石 $^{176}Hf/^{177}Hf = 0.282 05 \sim 0.282 10$, 由它们的结晶年龄计算获得的 $\varepsilon Hf(t) = -22.60 \sim -20.96$, 平均值为 -21.70, 二阶段模式年龄 t_{DM}^C 介于

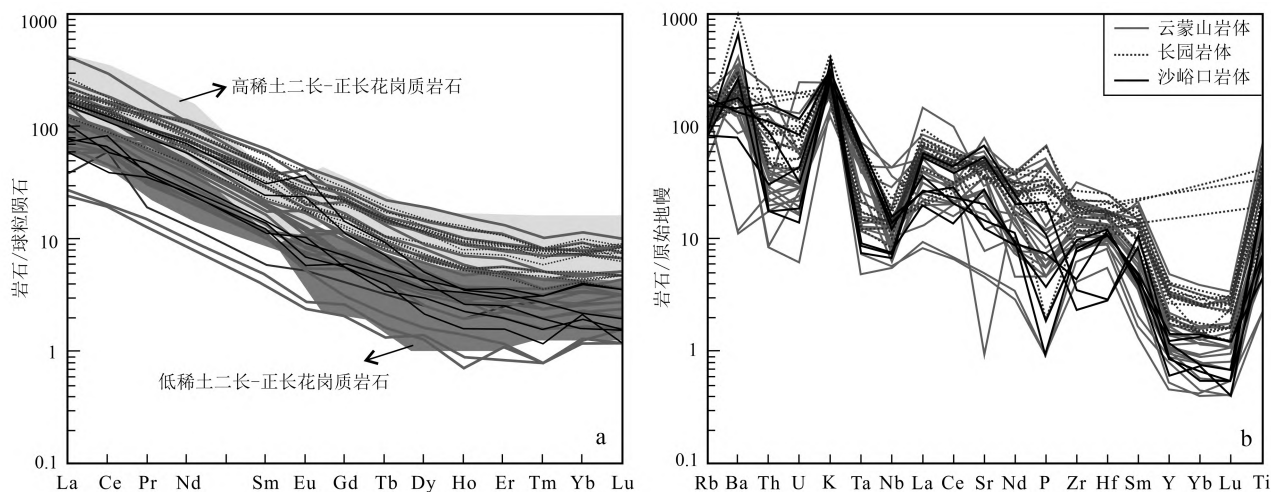


图6 沙峪口岩体球粒陨石标准化稀土元素配分图(a)以及原始地幔标准化微量元素蛛网图(b) (标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized spider diagrams (b) (normalizing values after Sun and McDonough, 1989) of the Shayukou pluton

3 661 Ma 到 3 511 Ma 之间,平均值为 3 580 Ma。样品 SYK2-4 中 143 ~ 125 Ma 的锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282\,02 \sim 0.282\,12$,由它们的结晶年龄计算获得的 $\varepsilon\text{Hf}(t) = -23.84 \sim -20.29$,平均值为 -21.65 ,二阶段模式年龄 t_{DM}^{C} 介于 3 768 Ma 至 3 451 Ma 之间,平均值为 3 575 Ma。样品 SYK3-7 中 138 ~ 127 Ma 的锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282\,02 \sim 0.282\,13$,由结晶年龄计算获得的 $\varepsilon\text{Hf}(t) = -23.84 \sim -19.76$,平均值为 -21.65 ,二阶段模式年龄 t_{DM}^{C} 介于 3 768 Ma 至 3 408 Ma 之间,平均值为 3 575 Ma。沙峪口二长花岗岩锆石 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 均小于 0,数据点分布在球粒陨石线以下的华北克拉通区域,初步指示 2.5 ~ 3.0 Ga 地壳源区(图 7),可能暗示沙峪口二长花岗岩主要为古太古代地壳物质部分熔融产物(表 3; Griffin *et al.*, 2002)。

5 讨论

5.1 沙峪口岩体的形成时代

基于角闪石和黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年及锆石 U-Pb 年龄研究,云蒙山地区在晚三叠世(206 Ma)经历了一次岩浆活动(Davis *et al.*, 1996; Wu *et al.*, 2014),与本文所报道的沙峪口二长花岗岩中晚三叠世捕获锆石的年龄一致(表 1)。同时,华北克拉通在印支运动晚期经历的后造山伸展过程与西伯利亚板块的碰撞造山活动紧密相关,引发了地壳显著增厚、造山后期的伸展作用以及华北克拉通岩石圈的拆沉(翟

明国等, 2002, 2003; 翟明国, 2012)。晚侏罗世,云蒙山地区出现了大量花岗闪长质至闪长质侵入岩和髫髻山组火山岩,其年龄范围大致在 170 ~ 150 Ma 之间(赵越等, 2004; 张岳桥等, 2007),华北克拉通受到多向挤压汇聚作用的影响,整体稳定性被破坏,边缘地区岩石圈减薄,并伴随着大规模的岩浆活动(吴福元等, 2003)。沙峪口二长花岗岩中的锆石发育清晰的振荡环带和高 Th/U 值(>0.4),表明为岩浆成因,锆石 U-Pb 定年结果显示花岗岩的形成时代为约 130 Ma,揭示了云蒙山西南部的早白垩世岩浆事件(Corfu *et al.*, 2003)。这一年龄与云蒙山强烈晚中生代岩浆活动和变质核杂岩的年龄相吻合(Davis *et al.*, 1996; 姬广义等, 2004a; Shi *et al.*, 2009; 陈印等, 2013, 2018; 康月蓝等, 2018),共同记录了华北克拉通早白垩世强烈的构造热事件。此后,该区域进入稳定伸展阶段,发育大规模沉积盆地,岩浆活动显著减弱(朱光等, 2021)。

5.2 岩石成因

沙峪口早白垩世花岗岩的主微量元素变化较大,暗示了复杂的岩浆演化过程(图 5、图 6; 表 2)。沙峪口花岗岩的稀土元素含量不高,并且呈现出显著的右倾稀土配分模式(图 6)。Fu 等(2017)依据稀土元素含量以及配分模式,将二长花岗岩至正长花岗岩划分出高稀土组和低稀土组,并认为高稀土二长-正长花岗岩来源于邻近区域同时期二长-正长

表3 沙峪口二长花岗岩锆石 Hf 同位素
Table 3 Zircon Hf isotopic data for the Shayukou monzogranites

点号	t/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\varepsilon\text{Hf}(0)$	$\varepsilon\text{Hf}(t)$	t_{DM1}/Ma	$t_{\text{DM}}^c/\text{Ma}$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
SYK1-2										
SYK1-2-001	133	0.028 27	0.000 72	0.282 09	0.000 02	-24.12	-21.27	1 624	3 541	-0.98
SYK1-2-002	138	0.028 34	0.000 75	0.282 07	0.000 02	-24.83	-21.87	1 653	3 597	-0.98
SYK1-2-003	131	0.020 80	0.000 54	0.282 07	0.000 02	-24.83	-22.00	1 644	3 605	-0.98
SYK1-2-004	136	0.019 95	0.000 53	0.282 05	0.000 02	-25.53	-22.60	1 671	3 661	-0.98
SYK1-2-005	137	0.014 61	0.000 45	0.282 09	0.000 02	-24.12	-21.16	1 613	3534	-0.99
SYK1-2-006	134	0.023 63	0.000 68	0.282 07	0.000 02	-24.83	-21.95	1 650	3 602	-0.98
SYK1-2-008	137	0.019 72	0.000 51	0.282 05	0.000 02	-25.53	-22.58	1 670	3 660	-0.98
SYK1-2-009	135	0.029 89	0.000 74	0.282 07	0.000 02	-24.83	-21.94	1 652	3 601	-0.98
SYK1-2-010	125	0.017 70	0.000 51	0.282 07	0.000 02	-24.83	-22.13	1 643	3 613	-0.98
SYK1-2-011	130	0.012 62	0.000 39	0.282 08	0.000 02	-24.47	-21.66	1 624	3 574	-0.99
SYK1-2-012	130	0.021 33	0.000 54	0.282 10	0.000 02	-23.76	-20.96	1 603	3 512	-0.98
SYK1-2-013	135	0.021 26	0.000 54	0.282 09	0.000 02	-24.12	-21.21	1 616	3 537	-0.98
SYK1-2-014	137	0.018 16	0.000 52	0.282 08	0.000 02	-24.47	-21.52	1 629	3 566	-0.98
SYK1-2-016	130	0.013 90	0.000 44	0.282 10	0.000 02	-23.76	-20.96	1 599	3 511	-0.99
SYK1-2-019	139	0.027 72	0.000 71	0.282 07	0.000 02	-24.83	-21.85	1 651	3 596	-0.98
SYK1-2-020	132	0.016 16	0.000 43	0.282 08	0.000 02	-24.47	-21.62	1 626	3 572	-0.99
SYK2-4										
SYK2-4-001	135	0.015 30	0.000 47	0.282 09	0.000 02	-24.12	-21.20	1 614	3 536	-0.99
SYK2-4-002	134	0.016 98	0.000 48	0.282 08	0.000 02	-24.47	-21.58	1 628	3 569	-0.99
SYK2-4-003	130	0.015 03	0.000 42	0.282 09	0.000 02	-24.12	-21.31	1 611	3 543	-0.99
SYK2-4-005	143	0.015 47	0.000 50	0.282 05	0.000 02	-25.53	-22.45	1 670	3 652	-0.98
SYK2-4-006	129	0.011 29	0.000 38	0.282 08	0.000 02	-24.47	-21.68	1 623	3 575	-0.99
SYK2-4-007	131	0.057 33	0.001 36	0.282 02	0.000 02	-26.59	-23.84	1 750	3 768	-0.96
SYK2-4-008	133	0.015 63	0.000 47	0.282 07	0.000 03	-24.83	-21.95	1 641	3 602	-0.99
SYK2-4-009	137	0.014 58	0.000 43	0.282 09	0.000 02	-24.12	-21.16	1 612	3 533	-0.99
SYK2-4-010	133	0.023 26	0.000 62	0.282 05	0.000 02	-25.53	-22.68	1 675	3 666	-0.98
SYK2-4-011	135	0.016 41	0.000 47	0.282 10	0.000 02	-23.76	-20.85	1 600	3 505	-0.99
SYK2-4-012	129	0.030 92	0.000 71	0.282 12	0.000 02	-23.06	-20.29	1 582	3 451	-0.98
SYK2-4-013	133	0.016 14	0.000 44	0.282 10	0.000 02	-23.76	-20.89	1 599	3 507	-0.99
SYK2-4-014	133	0.018 60	0.000 55	0.282 08	0.000 02	-24.47	-21.61	1 631	3 571	-0.98
SYK2-4-015	132	0.027 20	0.000 72	0.282 08	0.000 02	-24.47	-21.64	1 638	3 573	-0.98
SYK2-4-016	135	0.028 95	0.000 74	0.282 08	0.000 02	-24.47	-21.58	1 639	3 570	-0.98
SYK2-4-017	129	0.019 40	0.000 57	0.282 09	0.000 02	-24.12	-21.34	1 618	3 545	-0.98
SYK2-4-018	130	0.028 97	0.000 73	0.282 09	0.000 02	-24.12	-21.33	1 624	3 545	-0.98
SYK2-4-019	132	0.010 93	0.000 35	0.282 09	0.000 02	-24.12	-21.26	1 609	3 539	-0.99
SYK2-4-020	133	0.019 55	0.000 57	0.282 05	0.000 02	-25.53	-22.67	1 673	3 666	-0.98
SYK3-7										
SYK3-7-002	137	0.019 80	0.000 59	0.282 13	0.000 02	-22.70	-19.76	1 564	3 408	-0.98
SYK3-7-003	132	0.016 19	0.000 49	0.282 08	0.000 02	-24.47	-21.62	1 628	3 572	-0.99
SYK3-7-004	134	0.021 80	0.000 59	0.282 06	0.000 02	-25.18	-22.30	1 660	3 633	-0.98
SYK3-7-005	136	0.020 61	0.000 57	0.282 07	0.000 02	-24.83	-21.90	1 645	3 599	-0.98
SYK3-7-006	133	0.015 26	0.000 48	0.282 07	0.000 02	-24.83	-21.96	1 641	3 602	-0.99
SYK3-7-007	134	0.019 38	0.000 52	0.282 08	0.000 02	-24.47	-21.58	1 629	3 570	-0.98
SYK3-7-008	132	0.016 47	0.000 47	0.282 02	0.000 02	-26.59	-23.74	1 709	3 761	-0.99
SYK3-7-009	133	0.016 77	0.000 52	0.282 08	0.000 02	-24.47	-21.61	1 629	3 571	-0.98
SYK3-7-010	129	0.016 26	0.000 48	0.282 07	0.000 02	-24.83	-22.04	1 641	3 607	-0.99
SYK3-7-011	138	0.020 40	0.000 59	0.282 09	0.000 02	-24.12	-21.15	1 619	3 533	-0.98
SYK3-7-012	127	0.018 90	0.000 56	0.282 08	0.000 02	-24.47	-21.74	1 631	3 579	-0.98
SYK3-7-014	128	0.020 63	0.000 55	0.282 09	0.000 02	-24.12	-21.36	1 617	3 546	-0.98
SYK3-7-017	131	0.019 12	0.000 52	0.282 12	0.000 02	-23.06	-20.23	1 574	3 447	-0.98
SYK3-7-019	128	0.017 05	0.000 45	0.282 09	0.000 02	-24.12	-21.35	1 613	3 545	-0.99

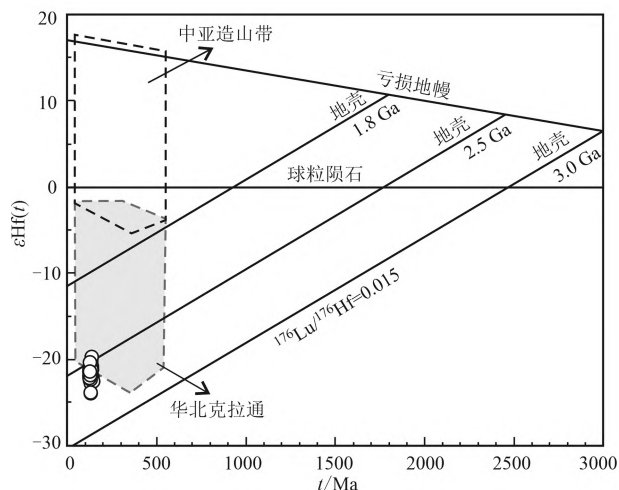


图7 沙峪口二长花岗岩的锆石 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 与 U-Pb 年龄图解 (据 Li *et al.*, 2025)

Fig. 7 The plot of $\varepsilon\text{Hf}(t)$ vs. U-Pb ages values for the zircons from the Shayukou monzogranites (after Li *et al.*, 2025)

花岗质岩石的部分熔融,而低稀土二长-正长花岗岩则形成于发生一定程度分异作用的岩浆 (Yang *et al.*, 2008; Fu *et al.*, 2017)。沙峪口花岗岩主要分布在低稀土组区域,部分轻稀土元素明显富集的样品在重稀土元素亏损至低稀土组范围 (图 6a)。样品具有较低的 MgO 、 FeO 、 P_2O_5 含量,呈 Eu 正异常的过铝质高钾钙碱性特征,与分异的花岗质岩石的地球化学特征类似,说明沙峪口二长花岗岩经历了岩浆结晶分异作用 (佟鑫等, 2023)。

沙峪口花岗岩的 MgO 含量、相容元素含量和 $\text{Mg}^\#$ 值呈现出较小的变化范围 (表 2),暗示它们经历了轻微的分离结晶作用。结合岩相学特征可知,石英、碱性长石、斜长石是沙峪口二长花岗岩中的主要造岩矿物 (图 2d、2e、2f)。由于石英和碱性长石结晶于岩浆冷却过程的后期,因此不过多讨论二者分离结晶过程。斜长石的堆晶会导致 Eu 显著正异常,这是因为 Eu^{2+} 在晶体化学上与 Ca^{2+} 具有相似的性质,常会替代诸如钙长石这类富钙矿物晶格中的二价钙离子,导致具斜长石堆晶结构的岩石常出现 Eu 元素相对富集 (郑方顺等, 2023)。沙峪口花岗岩标准矿物计算中,斜长石多数为钠长石,但钙长石占比可达次要矿物级别 (图 5d),说明沙峪口花岗岩中的斜长石可能是引起 Eu 正异常的重要因素。在 $\text{V}/\text{Th}-\text{Sc}/\text{Th}$ 图解中 (图 8a),随着 Sc/Th 值的增加, V/Th 值也随之增加,存在正相关关系,揭示了在岩浆演化过程中经历了黑云母的分离结晶;结合 $\text{Sr}-\text{K}_2\text{O}/$

Na_2O 图解 (图 8c),黑云母和斜长石的分离结晶作用较明显。此外,石英不具有 Eu 元素类质同象的离子,碱性长石中基本不含钙离子,并且碱性花岗岩中通常表现为 Eu 负异常,因此二者不会引起 Eu 正异常 (Tong *et al.*, 2019)。角闪石是中稀土和重稀土元素的主要寄主矿物,重稀土元素的明显亏损,暗示在沙峪口中酸性岩浆演化过程中角闪石的分离结晶作用 (陈斌等, 2002)。这与岩相学上沙峪口花岗岩几乎无角闪石,而边缘相的长园岩体普遍含有角闪石的特征相符 (康月蓝等, 2018)。次要矿物黑云母和角闪石分离结晶通常会引起岩石 Eu 的负异常 (Fujimaki, 1986; Loader *et al.*, 2017; 郑方顺等, 2023),与多数沙峪口花岗岩、长园岩体及云蒙山岩体中 Eu 元素相对亏损的特征相符。

除了主要矿物和次要矿物,沙峪口二长花岗岩普遍发育磷灰石、榍石、磁铁矿等副矿物 (图 2d、2e、2f)。磷灰石、榍石、褐帘石都是含钙矿物,包含的 Ca^{2+} 可成为 Eu^{2+} 类质同象的阳离子。具有 Eu 正异常的沙峪口-长园岩体 δEu 与 CaO 有明显负相关关系,说明含钙矿物的分离结晶仍是 Eu 正异常的重要因素。磷灰石为以 Ca^{2+} 为阳离子的磷酸盐矿物,是酸性岩浆体系中 P_2O_5 的主要寄主矿物;榍石为以钙和钛为阳离子的硅酸盐矿物,是沙峪口花岗岩中 TiO_2 主要寄主矿物;褐帘石中的 Ca^{2+} 常与 Ce 元素发生类质同象,因此褐帘石的分离结晶常引起 Ce 元素异常。 La 含量和 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 之间正相关性较强,表明在岩浆演化过程中褐帘石也经历了分离结晶;在 $\text{Nb}/\text{Ta}-\text{SiO}_2$ 图解中 (图 8d),含钛矿物也发生了微弱分离结晶。对于具有 Eu 正异常的样品, δEu 与 P_2O_5 及 TiO_2 均呈现负相关关系 (图 9b、9c),说明沙峪口花岗岩中的 Eu 正异常还可由磷灰石和榍石的分离结晶引起; δEu 与 δCe 具有微弱的负相关性,说明了富集 Ce 元素的褐帘石的分离结晶不是引起 Eu 正异常的原因 (图 9d; 佟鑫等, 2023)。副矿物虽然含量有限,但对稀土元素具有很高的分配系数 (Fu *et al.*, 2017)。沙峪口花岗岩相较于边缘相长园岩体稀土元素明显亏损,同样暗示了磷灰石、榍石等副矿物分离结晶过程。综合岩相学和地球化学特征,分离结晶过程在沙峪口花岗质岩浆演化过程中较明显,斜长石堆晶及次要矿物 (黑云母、角闪石) 分离结晶发生的同时伴随着副矿物的分离结晶作用。

P_2O_5 含量的变化被认为是区分 I 型和 S 型花岗

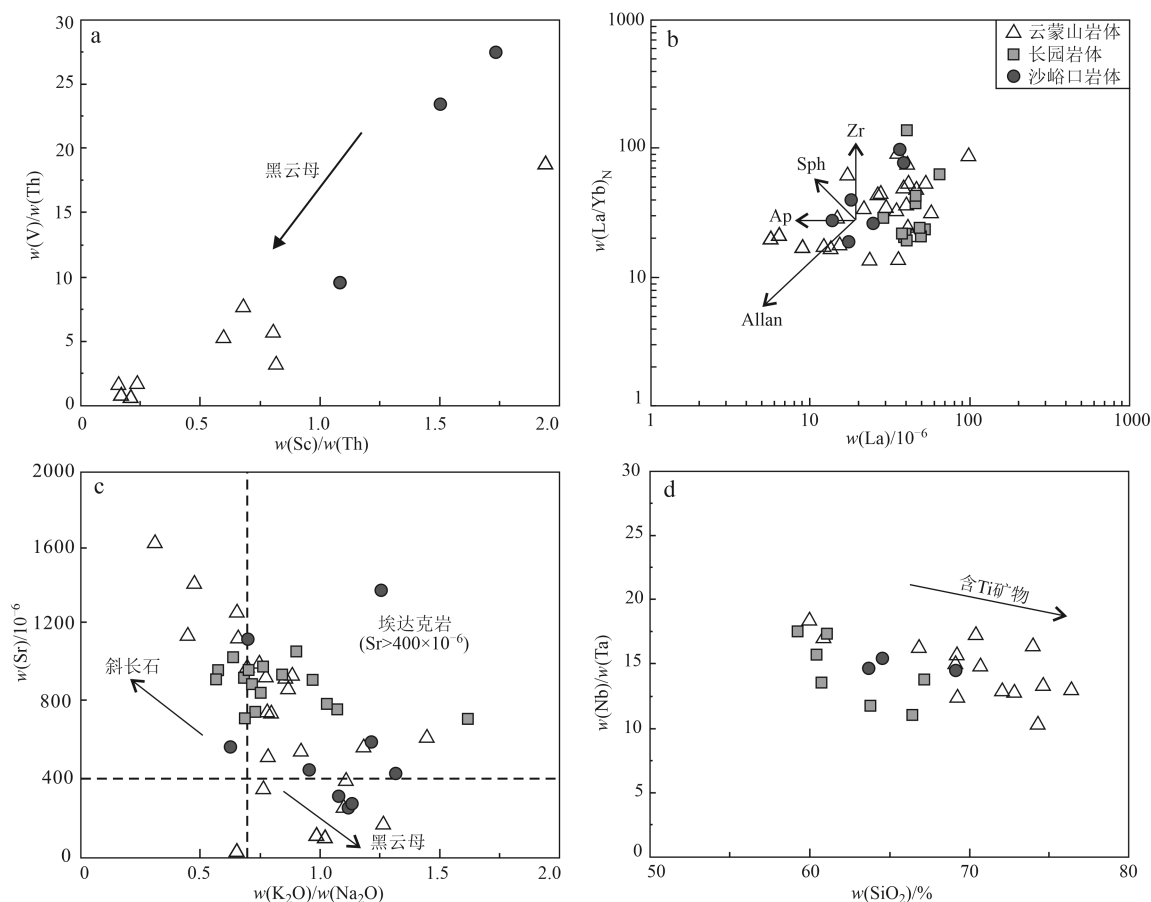


图8 沙峪口岩体 V/Th-Sc/Th (a)、 $(La/Yb)_N$ -La (b)、Sr-K₂O/Na₂O (c) 和 Nb/Ta-SiO₂ (d) 图解

Fig. 8 Diagrams of V/Th-Sc/Th (a), $(La/Yb)_N$ -La (b), Sr-K₂O/Na₂O (c) and Nb/Ta-SiO₂ (d) for the Shayukou pluton

岩的关键指标,即随着 SiO₂ 含量的增加 P₂O₅ 含量增加,表明为 S 型花岗岩, P₂O₅ 含量减少表明为 I 型花岗岩 (Chappell and White, 1992)。在 Al₂O₃-SiO₂ 图解中 (图 10a), 沙峪口花岗岩的 Al₂O₃ 和 SiO₂ 呈现出较好的正相关性, 相关系数 $R^2 = 0.64$; 而在 P₂O₅-SiO₂ 判别图解中 (图 10b), P₂O₅ 和 SiO₂ 之间呈现出显著的负相关性, 相关系数 $R^2 = 0.88$ 。此外, 沙峪口花岗岩中铁镁质矿物为黑云母, 边缘相长园花岗岩中铁镁质矿物主要为角闪石, 未识别出钠闪石和钠铁闪石等碱性暗色矿物, 也没有富铝矿物出现 (如白云母、堇青石), 并且 Na₂O 的含量高于 3.2% (介于 3.62%~5.83%), 不符合 S 型与 A 型花岗岩特征 (Chappell and White, 1992)。综上, 结合岩相学特征与地球化学分析可以将沙峪口花岗岩归类于 I 型花岗岩。

在 Sr/Y-Y 判别图 (图 11a) 中, 沙峪口花岗岩呈现出高 Sr/Y 值 (45.96~278.33, 平均 157.97)、高 Sr

($262.00 \times 10^{-6} \sim 1\,388.30 \times 10^{-6}$, 平均 601.29×10^{-6})、低 Y ($2.77 \times 10^{-6} \sim 6.50 \times 10^{-6}$, 平均 4.72×10^{-6}) 特征。在 $(La/Yb)_N$ -Yb_N 图解 (图 11b) 中, 可见样品 Yb 低 ($0.27 \times 10^{-6} \sim 0.68 \times 10^{-6}$, 平均 0.45×10^{-6}), 而 $(La/Yb)_N$ 值较高 (18.91~96.22), 并且大多落入埃达克岩区域 (Defant and Drummond, 1990)。张旗等 (2002) 依据埃达克岩的构造背景和地球化学等特征, 将其分为 O 型和 C 型两类: O 型埃达克岩主要由年轻俯冲洋壳部分熔融形成, 反映俯冲相关构造环境; C 型埃达克岩主要是由下地壳部分熔融形成的一系列中酸性火成岩构成, 是加厚地壳部分熔融的产物。与 O 型埃达克岩相比, 除了在 SiO₂、Al₂O₃、MgO、Y、Yb 以及 Eu 异常指标上保持一致性外, C 型埃达克岩还表现出更高的 K₂O 含量和更低的 MgO 含量 (蔡剑辉等, 2005)。沙峪口花岗岩整体相对富钾 (K₂O=3.65%~6.02%), 而低镁 (MgO<0.90%), 这些地球化学特征与 C 型埃达克岩的特征更相符合。

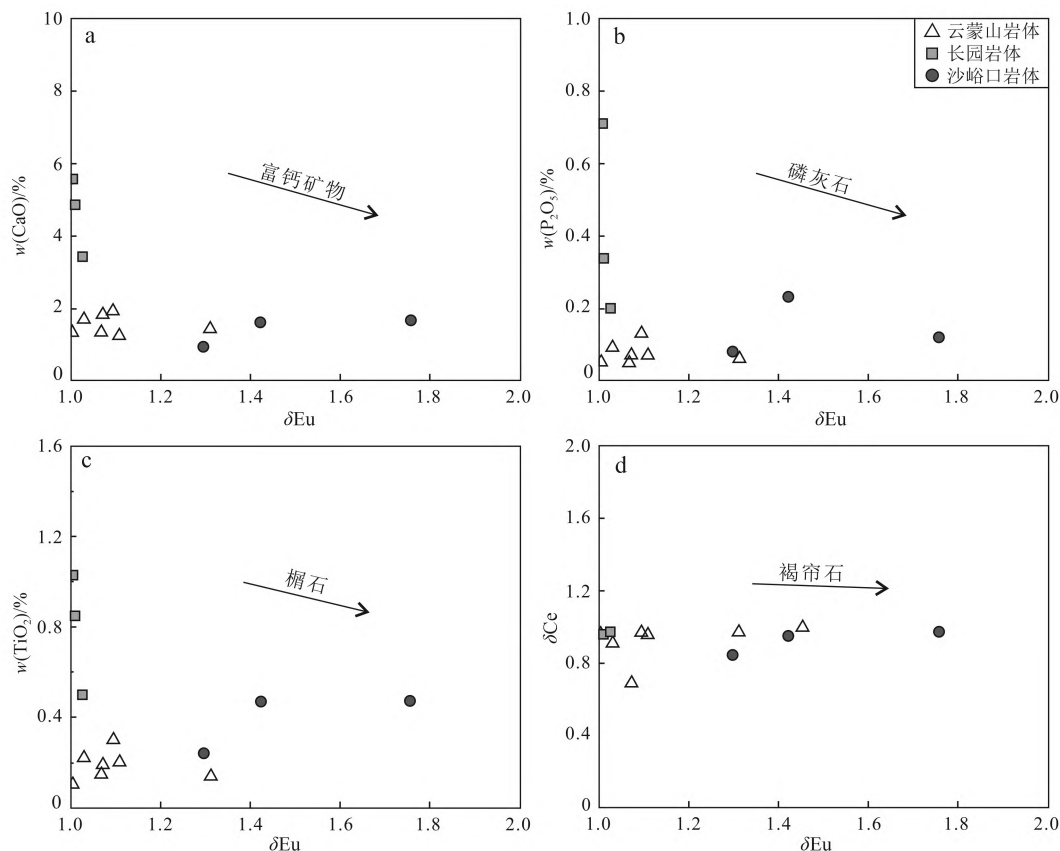


图9 沙峪口岩体 $\text{CaO}-\delta\text{Eu}$ (a)、 $\text{P}_2\text{O}_5-\delta\text{Eu}$ (b)、 $\text{TiO}_2-\delta\text{Eu}$ (c) 和 $\delta\text{Ce}-\delta\text{Eu}$ (d) 图解

Fig. 9 δEu relative to CaO (a), P_2O_5 (b), TiO_2 (c), and δCe diagrams (d) of the Shayukou pluton

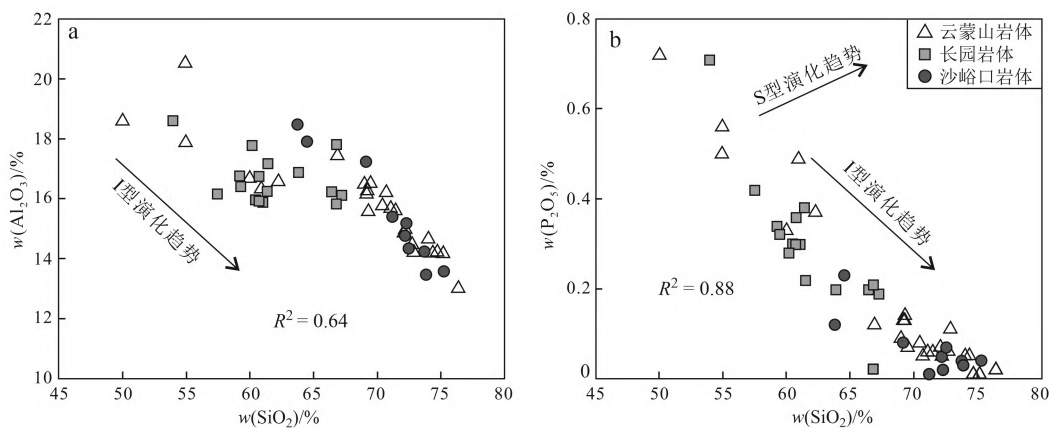


图10 沙峪口岩体 $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ (a) 和 $\text{P}_2\text{O}_5-\text{SiO}_2$ (b) 图解 (据 Wu *et al.*, 2003)

Fig. 10 $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ (a) and $\text{P}_2\text{O}_5-\text{SiO}_2$ diagrams (b) (after Wu *et al.*, 2003) of the Shayukou pluton

目前主要有3种模式解释C型埃达克岩的成因: ① 基性岩浆在高压条件下的分异作用 (Chiara-dia, 2009; Castillo, 2012); ② 下地壳拆沉导致的部分熔融 (Kay and Kay, 1993; Wang *et al.*, 2006); ③ 加厚的下地壳部分熔融 (张旗等, 2002)。首先, 基性岩浆在高压分异过程中通常伴随强烈的壳幔相互

作用和交代混染, 但在沙峪口地区未发现大规模同时代的基性岩体, 同时也没有明显结晶分异作用的野外证据, 如较大规模的中性岩体。其次, 由拆沉作用形成的埃达克岩在上升过程中会与上地幔发生相互作用, 通常会导致形成的岩浆具有较高的 MgO 、 Cr 、 Ni 含量 (张旗等, 2006)。相比之下, 由增厚下地

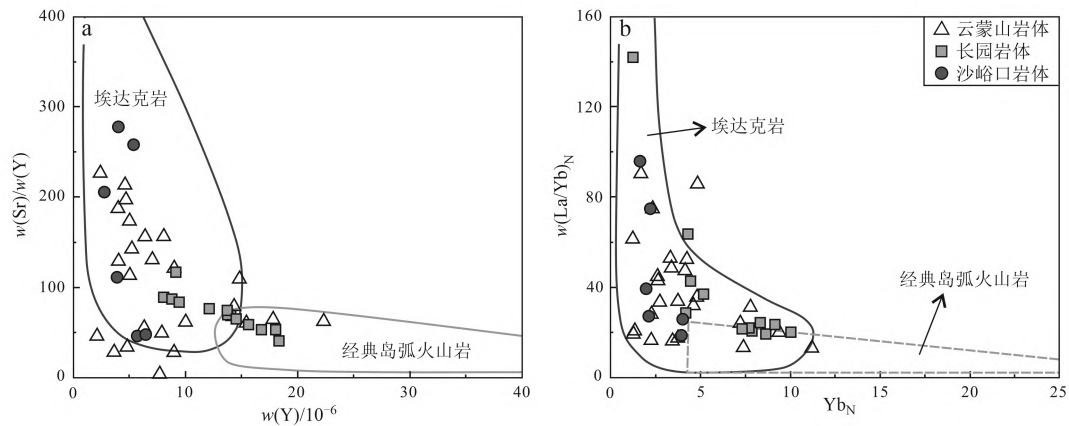


图 11 沙峪口岩体 Sr/Y-Y (a) 和 $(La/Yb)_N$ -Yb_N 图解 (b) (据 Martin *et al.*, 2005)

Fig. 11 Sr/Y-Y (a) and $(La/Yb)_N$ -Yb_N diagrams (b) (after Martin *et al.*, 2005) of the Shayukou pluton

壳部分熔融形成的埃达克岩往往具有较高的 SiO_2 、 K_2O 含量,而 MgO 、 Cr 、 Ni 含量相对较低。沙峪口花岗岩的 MgO 含量介于 0.23% 至 0.84% 之间,且 Cr 含量 ($12.00 \times 10^{-6} \sim 22.30 \times 10^{-6}$) 和 Ni 含量 ($2.21 \times 10^{-6} \sim 6.11 \times 10^{-6}$) 较低,表明其不可能是拆沉地壳或基性岩浆分异作用形成的,而更可能是增厚基性下地壳部分熔融的产物。在 MgO - SiO_2 (图 13c) 中,样品具有高硅、低镁特征,与俯冲洋壳熔融形成的埃达克岩和拆沉下地壳熔融形成的埃达克岩特征不同,落入加厚下地壳熔融区域,进一步支持其起源于加厚下地壳部分熔融。一般认为,亏损型地幔的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 为正值,而富集型地幔或者古老地壳同位素值则较低且呈负值(李壮等, 2020)。沙峪口二长花岗岩中的锆石 Hf 同位素变化范围较小且为负值(图 7),暗示了太古宙的古老基性下地壳参与花岗岩体的形成。

锆石饱和温度的计算公式为 $T_{Zr} = 12\,900 / [2.95 + 0.85 M + \ln(496\,000/Zr_{melt})]$ (Miller *et al.*, 2003)。式中, T_{Zr} 为绝对温度 (K); M 为岩石中某些阳离子的比值,即 $M = (Na + K + 2 Ca) / (Al \times Si)$; Zr_{melt} 代表熔体中的 Zr 含量 (10^{-6})。花岗岩中富含捕获锆石表明其源区中锆石已达到饱和状态,由于部分 Zr 含量存在于捕获锆石中,而非完全溶解于熔体(隋振民等, 2011),因此基于沙峪口花岗岩计算得出的锆石饱和温度,代表了岩浆温度的上限(图 12a、12b)。通过全岩主量元素和 Zr 含量进行计算得出,沙峪口二长花岗岩形成时的温度范围为 637~699℃,属于低温型 ($t_{Zr} < 800^\circ C$),这暗示了其形成可能有流体的参与,反映了与俯冲相关的构造背景(吴福元等, 2007; 隋振民, 2007, 2011)。流体通常源于黑云母、

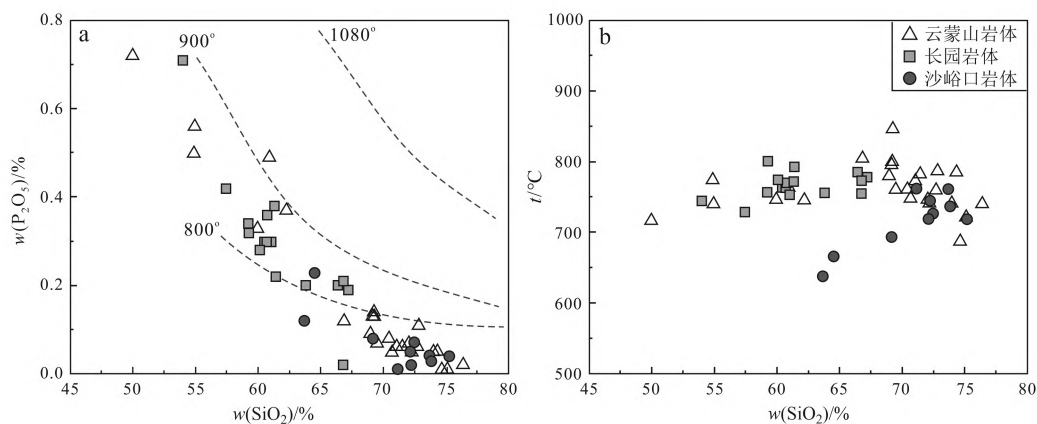


图 12 沙峪口岩体 P_2O_5 - SiO_2 图解 (a) 和 t - SiO_2 图解 (b) (据 Harrison and Watson, 1984)

Fig. 12 P_2O_5 - SiO_2 (a) and t - SiO_2 diagrams (b) (after Harrison and Watson, 1984) of the Shayukou pluton

白云母和钙质角闪石等含水矿物的脱水反应(Patiño *et al.*, 1995; Gardien *et al.*, 1995; Best and Christiansen, 2001)。然而,要产生大规模的岩浆,其白云母必须达到一定数量(秦江锋等, 2005)。地球化学与岩石学特征表明,沙峪口花岗岩属于I型花岗岩,其形成应源于火成岩的部分熔融,表明白云母的脱水熔融不是其主要成因(李壮等, 2016)。另一种可能的来源是外来流体的注入,例如俯冲带中沉积物的脱水反应,或是超镁铁质-镁铁质岩浆岩中含水矿物的脱水反应(Best and Christiansen, 2001),而在沙峪口地区识别出少量的暗色微粒包体和同深成岩墙(图1b、1c),是白垩纪岩浆混合强有力的证据。张茜等(2023)对沙峪口岩体的副矿物、次要矿物和主要矿物的电子探针研究中发现,磷灰石、黑云母、斜长石的电子探针数据分别指示了岩浆演化早期阶段、岩浆混合阶段和晚期平衡阶段,暗示了可能有少量幔源物质参与岩浆过程(Li *et al.*, 2019; 李壮等, 2020, 2024)。浑圆状细粒闪长质暗色包体可能来源于幔源镁铁质岩浆与壳源花岗质岩浆的混合过程,少量幔源岩浆进入黏度较大的壳源岩浆中,形成球状至椭球状包裹体,两种岩浆发生物质交换,最终形成中性富镁铁质矿物的暗色微粒包体(Pietranik and Koepke, 2009)。因此,推测岩浆演化两个阶段:第一阶段为富水流体渗透至加厚的下地壳。由于其规模较小,流体与围岩快速达到热平衡,故对下地壳整体温度影响有限。然而,该热液活动显著降低了下地壳岩石的液相线温度,最终诱发花岗质岩浆的形成;第二阶段表现为小规模、高温的偏基性岩浆快速上涌,注入已存在的花岗质岩浆房,发生淬冷作用,形成暗色微粒包体及同深成岩墙(秦江锋等, 2005)。

5.3 地球动力学背景及构造意义

中生代时期,华北克拉通板块经历了岩石圈减薄和破坏的过程(Wu *et al.*, 2005a, 2005b, 2011, 2014)。伴随着蒙古-鄂霍茨克洋的闭合,该克拉通遭受了复杂的收缩构造作用,尤其在燕山及其周边地区,广泛发育了与挤压作用密切伴生的构造如褶皱和冲断构造。这些过程共同导致了地壳的缩短和增厚(郑亚东等, 2000; 董树文等, 2007; Zhang *et al.*, 2019)。三叠纪时期,华北板块与扬子板块的碰撞形成了苏鲁超高压变质带(郭敬辉等, 2005); 侏罗纪到白垩纪时期,古太平洋板块开始俯冲至华北板块下方,俯冲板块释放的流体导致上覆岩石圈

地幔的弱化(Davis *et al.*, 1996; 郑亚东等, 2000; 董树文等, 2007; Davis and Darby, 2010; Deng *et al.*, 2017; 郑永飞等, 2018),进而引发了加厚地壳的部分熔融,广泛形成了燕山早期I型花岗岩类(Wu *et al.*, 2005b)。沙峪口早白垩世花岗岩的 SiO_2 和 Al_2O_3 、 P_2O_5 含量的负相关性以及矿物学特征,均表明其属于I型花岗岩(图10),结合太古宙的Hf同位素模式年龄,指示其起源于古老的火成岩下地壳部分熔融(图7; Kelemen *et al.*, 2014)。沙峪口花岗岩具有高场强元素亏损(Nb、Ta、Ti和P等)的地球化学特征,与俯冲带岩浆岩特征相似。沙峪口花岗岩具有(Y+Nb)含量和Rb含量小于 100×10^{-6} , Rb/30、Hf/3 Ta的相对含量不同于同碰撞、板内和洋脊花岗岩的特征,大部分样品落入火山弧花岗岩内(Pearce *et al.*, 1984),少量落入碰撞后花岗岩内(图13a、13b、13d),暗示其形成环境与俯冲带密切相关。沙峪口花岗岩具有C型埃达克岩的地球化学特征,如高Sr、低Y以及高 K_2O 含量等,揭示增厚下地壳部分熔融成因。朱光等(2021)通过厘定侏罗纪至白垩纪燕山地区大规模的变形构造,如对走滑逆冲剪切带的同位素定年,显示在144~135 Ma之间发生了短暂性的区域性挤压,紧接着强挤压事件后在早白垩期间转变为长期而强烈的伸展活动,说明在误差范围内与沙峪口岩体的形成时代一致,进一步揭示其形成于挤压后的伸展环境中。因此,随着压力的升高和少量地幔物质的加入,太古宙加厚的火成岩下地壳发生部分熔融产生中酸性岩浆,随后发生了轻微的分异结晶作用,侵位于雾迷山组灰岩中,最终冷凝形成了沙峪口早白垩世花岗岩(赵美涛等, 2014, 2015; Deng *et al.*, 2017)。

6 结论

(1) 沙峪口岩体形成于早白垩世,与华北克拉通北缘中生代构造热事件的时间框架相吻合。

(2) 沙峪口二长花岗岩兼具过铝质高钾钙碱性I型花岗岩和C型埃达克岩特征,且经历轻微的斜长石堆晶、次要暗色矿物和副矿物分离结晶作用。

(3) 华北克拉通北缘早白垩世岩浆形成于古太平洋板块俯冲背景,其成因可能与幔源岩浆底侵或/和外来流体的渗透诱发古老加厚下地壳部分熔融过程密切相关。

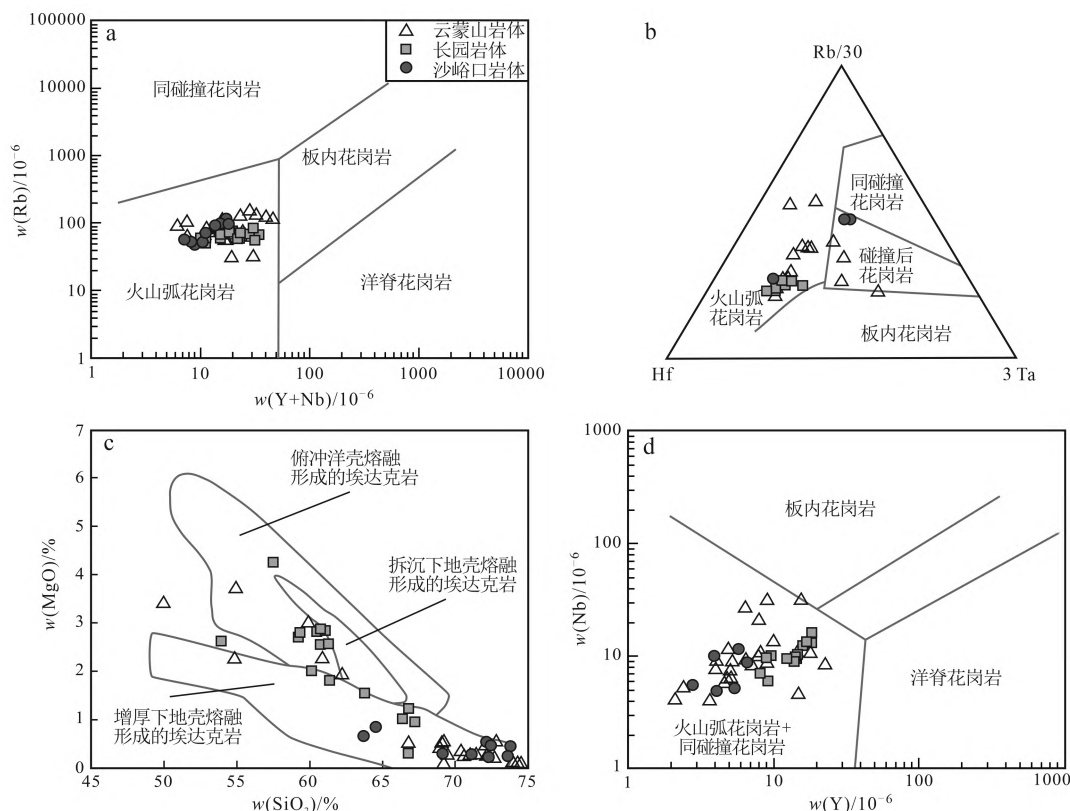


图 13 Rb-(Y+Nb)图解(a)、Hf-3 Ta-Rb/30 图解(b)、MgO-SiO₂ 图解(c)和 Nb-Y 图解(d) (据 Pearce *et al.*, 1984)

Fig.13 Rb-(Y+Nb) (a), Hf-3 Ta-Rb/30 (b), MgO-SiO₂ (c), and Nb-Y (d) diagrams of the Shayukou pluton (after Pearce *et al.*, 1984)

References

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ²⁰⁴Pb[J]. *Chemical Geology*, 192(1~2): 59~79.
- Belousova E, Griffin W, O'Reilly S Y, *et al.* 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602~622.
- Best M G and Christiansen E H. 2001. *Igneous Petrology*[M]. Oxford, Blackwell Science, 480.
- Blichert-Toft J and Albarède F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(1~2): 243~258.
- Cai Jianhui, Yan Guohan, Mu Baolei, *et al.* 2005. Zircon U-Pb age, Sr-Nd-Pb isotopic compositions and trace element of Fangshan complex in Beijing and their petrogenesis significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 776~788 (in Chinese with English abstract).
- Castillo P R. 2012. Adakite petrogenesis[J]. *Lithos*, 134: 304~316.
- Chappell B W and White A J R. 1974. Two contrasting granite type[J]. *Pacific Geology*, 8(2): 173~174.
- Chappell B W and White A J R. 1992. I-type and S-type granites in the Lachlan Fold Belt[J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh Earth Sciences*, 79: 169~181.
- Chen B, Chen Z C and Jahn B M. 2009. Origin of mafic enclaves from the Taihang Mesozoic orogen, North China Craton[J]. *Lithos*, 110(1~4): 343~358.
- Chen Bin, He Jingbo and Ma Xinghua. 2009. Petrogenesis of mafic enclaves from the north Taihang Yanshanian intermediate to felsic plutons: Evidence from petrological, geochemical and zircon Hf-O isotopic data[J]. *Science in China (Series D)*, 39(7): 922~934 (in Chinese).
- Chen Bin, Zhai Mingguo and Shao Ji'an. 2002. Genesis and significance of Mesozoic batholith in northern Taihang Mountain: Geochemical evidence of major and trace elements[J]. *Science in China (Series D)*, 32(11): 896~907 (in Chinese).
- Chen Yin, Zhu Guang, Jiang Dazhi, *et al.* 2013. Timing determination of phase B of the yanshanian movement in the eastern North China Craton: Evidence from dating of a ductile shear zone in sihetang, north-eastern Beijing[J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(3): 295~310 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yin, Zhu Guang, Jiang Dazhi, *et al.* 2014. Deformation law and devel-

- opment mechanism of Yunnengshan metamorphic core complex[J]. Chinese Science Bulletin, 59(16): 1 525~1 541 (in Chinese).
- Chen Yin, Zhu Guang, Liu Wengang, *et al.* 2018. Mesozoic magmatic activities and tectonic movements in mount Yunmeng area, Beijing[J]. Geological Review, 64(4): 843~868 (in Chinese with English abstract).
- Chiaradia M. 2009. Adakite-like magmas from fractional crystallization and melting-assimilation of mafic lower crust (Eocene Macuchi arc, Western Cordillera, Ecuador) [J]. Chemical Geology, 265(3~4): 468~487.
- Corfu F, Hanchar J M, Hoskin P W O, *et al.* 2003. Atlas of zircon textures [J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 53(1): 469~500.
- Davis G A and Darby B J. 2010. Early Cretaceous overprinting of the Mesozoic Daqing Shan fold-and-thrust belt by the Hohhot metamorphic core complex, Inner Mongolia, China[J]. Geoscience Frontiers, 1(1): 1~20.
- Davis G A, Qian X L and Zheng Y D. 1996. Mesozoic deformation and plutonism in the Yunneng Shan; A metamorphic core complex north of Beijing, China[J]. The Tectonic Evolution of Asia, 8: 253~280.
- Defant M J and Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. Nature, 347(6 294): 662~665.
- Deng J, Liu X F, Wang Q F, *et al.* 2017. Isotopic characterization and petrogenetic modeling of Early Cretaceous mafic dike—Lithospheric extension in the North China Craton, eastern Asia[J]. GSA Bulletin, 129(11~12): 1 379~1 407.
- Deng Xinhe, Wang Liyuan, Xu Jing, *et al.* 2025. Characteristics and geological significance of alkaline mafic minerals in A-type granite in Gushan area, Fuzhou[J]. Acta Petrologica Sinica, 41(1): 112~134 (in Chinese with English abstract).
- Dong Shuwen, Zhang Yueqiao, Long Changxing, *et al.* 2007. Jurassic tectonic revolution in China and new interpretation of the Yanshan movement[J]. Acta Geologica Sinica, 81(11): 1 449~1 461 (in Chinese with English abstract).
- Fu J H, Liu S W, Wang M J, *et al.* 2017. Late Neoproterozoic monzogranitic-syenogranitic gneisses in the Eastern Hebei-Western Liaoning Province, North China Craton: Petrogenesis and implications for tectonic setting[J]. Precambrian Research, 303: 392~413.
- Fujimaki H. 1986. Partition coefficients of Hf, Zr, and REE between zircon, apatite, and liquid[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 94(1): 42~45.
- Gardien V, Thompson A B, Grujic D, *et al.* 1995. Experimental melting of biotite + plagioclase + quartz \pm muscovite assemblages and implications for crustal melting[J]. Journal of Geophysical Research; Solid Earth, 100(B8): 15 581~15 591.
- Ge Maohui, Zhang Jinjiang, Liu Kai, *et al.* 2020. Petrogenesis of the Late Paleozoic to Mesozoic granite from the Xiao Hinggan Mountains-Zhangguangcai Mountains and its geological implications[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 39(4): 385~405 (in Chinese with English abstract).
- Griffin W L, Wang X, Jackson S E, *et al.* 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes[J]. Lithos, 61(3~4): 237~269.
- Guo Jinghui, Chen Fukun, Zhang Xiaoman, *et al.* 2005. Evolution of syn- to post-collisional magmatism from north Sulu UHP belt, Eastern China: Zircon U-Pb geochronology[J]. Acta Petrologica Sinica, 21(4): 1 281~1 301 (in Chinese with English abstract).
- Harrison T M and Watson E B. 1984. The behavior of apatite during crustal anatexis: Equilibrium and kinetic considerations[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 48(7): 1 467~1 477.
- Hu Z C, Liu Y S, Gao S, *et al.* 2012. Improved in situ Hf isotope ratio analysis of zircon using newly designed X skimmer cone and jet sample cone in combination with the addition of nitrogen by laser ablation multiple collector ICP-MS[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 27(9): 1 391.
- Irvine T N and Baragar W R A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 8(5): 523~548.
- Ji Guangyi, Wang Yang and Sun Yonghua. 2004a. Petrological characteristics and structural deformation of Yunnengshan magmatic complex, Beijing[J]. Beijing Geology, 16(3): 1~11 (in Chinese with English abstract).
- Ji Guangyi, Wang Yang and Xia Xifan. 2004b. Geology of the Changyuan granitoid complex in Huairou County, Beijing municipality: Petrological characteristics and tectonic significance[J]. Beijing Geology, 16(4): 1~13 (in Chinese with English abstract).
- Jin Wenshan and Guan Ailian. 1999. Isotopic age of the Archean rocks in Beijing area and their geological implications[J]. Progress in Precambrian Research, 22(3): 1~13 (in Chinese with English abstract).
- Jonathan P P, Kouvo O, Hedge C E, *et al.* 1982. Evolution of continental crust and mantle heterogeneity: Evidence from Hf isotopes[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 78(3): 279~297.
- Kang Yuelan and Shi Yuruo. 2018. Zircon SHRIMP U-Pb ages and geochemical characteristics of the granitoids in Yunnengshan area of Beijing and their geological significance[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 37(3): 379~394 (in Chinese with English abstract).
- Kay R W and Kay S M. 1993. Delamination and delamination magmatism

- [J]. *Tectonophysics*, 219(1~3): 177~189.
- Kelemen P B, Hanghøj K and Greene A R. 2014. One View of the Geochemistry of Subduction-related Magmatic Arcs, with an Emphasis on Primitive Andesite and Lower Crust[C]//*Treatise on Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier: 749~806.
- 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, south-eastern Australia[J]. *Journal of Petrology*, 38(3): 371~391.
- Lei K, Wang Y F, Zhang Q, *et al.* 2023. Decoding the onset of Ca. 3.8 Ga continental nuclei in Anshan, North China: A review integrated with 1: 10, 000 geological mapping, zircon U-Pb dating, and Si-O-Nd-Hf-W isotopes[J]. *Earth-Science Reviews*, 247: 104606.
- Li Gang, Xue Jixiang, Liu Zhenghong, *et al.* 2020. Genesis and emplacement of syntectonic granitic plutons during Late Mesozoic extension in eastern North China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36(8): 2 413~2 430 (in Chinese with English abstract).
- Li Xianhua, Zhou Hanwen, Liu Ying, *et al.* 2000. Mesozoic shoshonitic intrusives in the Yangchun Basin, western Guangdong, and their tectonic significance: I. Petrology and isotope geochronology [J]. *Geochimica*, 29(6): 513~520 (in Chinese with English abstract).
- Li Youlian, Guo Jinghui, Ouyang Dongjian, *et al.* 2025. Petrogenesis and implications of the Shangzhuang Mesozoic gabbro-diorite-granite suite in Yanshan Mountains (Beijing) [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 41(1): 31~65 (in Chinese with English abstract).
- Li Z, Chen B, Wei C J, *et al.* 2015. Provenance and tectonic setting of the Paleoproterozoic metasedimentary rocks from the Liaohé Group, Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton: Insights from detrital zircon U-Pb geochronology, whole-rock Sm-Nd isotopes, and geochemistry [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 111: 711~732.
- Li Z, Chen C J, Chen B, *et al.* 2021. Early Cretaceous crust-mantle interaction in the Middle-Lower Yangtze River Metallogenic Belt, East China: Li-Nd-Sr isotopic and elemental constraints[J]. *Lithos*, 398: 106308.
- Li Zhuang, Chen Changjian and Chen Bin. 2024. Li-Sr-Nd isotopes and geochemistry of Wushan Intermediate-Acidic magmatic rocks in Middle-Lower Yangtze River Region[J]. *Earth Science*, (7): 2 475~2 489 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhuang, Meng En, Pei Fuping, *et al.* 2016. Geochronology, geochemistry and origin of the Early Cretaceous jianyi pluton in Dashiqiao, Liaoning province[J]. *Geology and Resources*, 25(2): 101~107 (in Chinese with English abstract).
- Li Z, Wei C J, Chen B, *et al.* 2020. Late Neoproterozoic reworking of the Mesoproterozoic crustal remnant in northern Liaoning, North China Craton: A U-Pb-Hf-O-Nd perspective [J]. *Gondwana Research*, 80: 350~369.
- Li Z, Wei C J, Zhang S W, *et al.* 2019. Neoproterozoic granitoid gneisses in eastern Hebei, North China Craton: Revisited[J]. *Precambrian Research*, 324: 62~85.
- Li Zhuang, Zhang Wei, Yang Fan, *et al.* 2020. Petrogenesis of the mesoproterozoic granodioritic-tonalitic gneisses in the Kaiyuan area, northern Liaoning: Elemental and zircon U-Pb-Hf isotopic geochemical constraints[J]. *Bulletin of Mineralogy*, 39(6): 1 292~1 311 (in Chinese with English abstract).
- Li Z, Zhao G C, Chen B, *et al.* 2025. Origin of Late Triassic lamprophyres in the western Yanshan Tectonic Belt related to destruction of the North China Craton: Geochronological and geochemical constraints[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 281: 106504.
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, *et al.* 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.
- Loader M A, Wilkinson J J and Armstrong R N. 2017. The effect of titanite crystallisation on Eu and Ce anomalies in zircon and its implications for the assessment of porphyry Cu deposit fertility[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 472: 107~119.
- Ludwig K R. 2003. *ISOPLLOT 3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel*[D]. Berkeley Geochronology Center Special Publication.
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635~643.
- Martin H, Smithies R H, Rapp R, *et al.* 2005. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: Relationships and some implications for crustal evolution[J]. *Lithos*, 79(1~2): 1~24.
- Miller C F, McDowell S M and Mapes R W. 2003. Hot and cold granites? Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance[J]. *Geology*, 31(6): 529.
- Ouyang Zhixia. 2010. Comparative Study on Ages and Genetic Types of Late Mesozoic Granites in Major Metamorphic Core Complexes of the North China Craton and their Implications [D]. Beijing: China Academy of Geological Sciences (in Chinese with English abstract).
- Patiño D A E and Beard J S. 1995. Dehydration-melting of biotite gneiss and quartz amphibolite from 3 to 15 kbar[J]. *Journal of Petrology*, 36(3): 707~738.
- Pearce J A, Harris N B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 25(4): 956~983.
- Pietranik A and Koepke J. 2009. Interactions between dioritic and granodioritic magmas in mingling zones: Plagioclase record of mixing,

- mingling and subsolidus interactions in the G[●]siniec Intrusion, NE Bohemian Massif, SW Poland[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 158(1): 17~36.
- Qin Jiangfeng, Lai Shaocong, Li Yongfei, *et al.* 2005. Zircon saturation temperatures of Yangba granodiorite and mafic microgranular enclaves in northern margin of Yangtze Block and its significance[J]. *North-western Geology*, 38(3): 1~5 (in Chinese with English abstract).
- Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. *Lithos*, 22(4): 247~263.
- Shi Y R, Zhao X T, Ma Y S, *et al.* 2009. Late Jurassic-Early Cretaceous plutonism in the northern part of the Precambrian North China Craton: SHRIMP zircon U-Pb dating of diorites and granites from the Yunmengshan geopark, Beijing[J]. *Acta Geologica Sinica—English Edition*, 83(2): 310~320.
- Sui Zhenmin and Chen Yuejun. 2011. Zircon saturation temperatures of granites in eastern Great Xing'an Range, and its geological significance[J]. *World Geology*, 30(2): 162~172 (in Chinese with English abstract).
- Sui Zhenmin, Ge Wenchun, Wu Fuyuan, *et al.* 2007. Zircon U-Pb ages, geochemistry and its petrogenesis of Jurassic granites in northeastern part of the Da Hinggan-Mts[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 461~480 (in Chinese with English abstract).
- Sun S S and 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.
- Tong Xin, Wang Huichu and Zhang Yong. 2023. Neoproterozoic cratonization of the North China Craton: Petrology, zircon chronology and elemental geochemistry of the Changli alkaline granitoids in eastern Hebei, North China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 39(9): 2 598~2 618 (in Chinese with English abstract).
- Tong X, Zhao Z D, Niu Y L, *et al.* 2019. Petrogenesis and tectonic implications of the Eocene-Oligocene potassic felsic suites in western Yunnan, eastern Tibetan Plateau: Evidence from petrology, zircon chronology, elemental and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic geochemistry [J]. *Lithos*, 340: 287~315.
- Wang Lei, Li Jianbo, Shi Juncheng, *et al.* 2022. Genesis and geological significance of late Mesozoic granites in Yunmengshan area[J]. *Journal of East China University of Technology (Natural Science)*, 45(6): 538~547 (in Chinese with English abstract).
- Wang Q, Xu J F, Jian P, *et al.* 2006. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, South China: Implications for the genesis of porphyry copper mineralization[J]. *Journal of Petrology*, 47(1): 119~144.
- Wu Fuyuan, Ge Wenchun, Sun Deyou, *et al.* 2003. Discussions on the lithospheric thinning in Eastern China[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 51~60 (in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, *et al.* 2007. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1 217~1 238 (in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Jahn B M, Wilde S A, *et al.* 2003. Highly fractionated I-type granites in NE China (I): Geochronology and petrogenesis [J]. *Lithos*, 66(3~4): 241~273.
- Wu F Y, Lin J Q, Wilde S A, *et al.* 2005a. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in Eastern China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 233(1~2): 103~119.
- Wu F Y, Sun D Y, Ge W C, *et al.* 2011. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(1): 1~30.
- Wu F Y, Yang J H, Wilde S A, *et al.* 2005b. Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of Jurassic granites in the Liaodong Peninsula, NE China[J]. *Chemical Geology*, 221(1~2): 127~156.
- Wu F Y, Yang J H, Xu Y G, *et al.* 2019. Destruction of the North China craton in the Mesozoic [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 47(1): 173~195.
- Wu L, Wang F, Lin W, *et al.* 2014. Rapid cooling of the Yanshan Belt, northern China: Constraints from ⁴⁰Ar/³⁹Ar thermochronology and implications for cratonic lithospheric thinning[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 90: 107~126.
- Yang J H, Wu F Y, Chung S L, *et al.* 2006. A hybrid origin for the Qianshan A-type granite, Northeast China: Geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic evidence[J]. *Lithos*, 89(1~2): 89~106.
- Yang J H, Wu F Y, Wilde S A, *et al.* 2008. Petrogenesis and geodynamics of Late Archean magmatism in eastern Hebei, eastern North China Craton: Geochronological, geochemical and Nd-Hf isotopic evidence[J]. *Precambrian Research*, 167(1~2): 125~149.
- Zhai Mingguo. 2012. Evolution of the North China Craton and early plate tectonics[J]. *Acta Geologica Sinica*, 86(9): 1 335~1 349 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo and Fan Qicheng. 2002. Mesozoic replacement of bottom crust in North China Craton: Anorogenic mantle-crust interaction[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(1): 1~8 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo, Zhang Yanbin, Li Qiuli, *et al.* 2021. Cratonization, lower crust and continental lithosphere [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(1): 1~23 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo, Zhu Rixiang, Liu Jianming, *et al.* 2003. Critical time limit for the transition of Mesozoic tectonic system in eastern North China [J].

- Science in China (Series D), 33(10): 913~920 (in Chinese).
- Zhang Qi, Jin Weijun, Wang Yuanlong, *et al.* 2006. Ocean lithosphere delamination and the lower crust delamination: The different mechanism and geological implication: Comment on the delamination model of lower crust and lithosphere mantle[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(11): 2 631~2 638 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Wang Yan, Liu Wei, *et al.* 2002. Adakite: Its characteristics and implications[J]. *Geological Bulletin of China*, 21(7): 431~435 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qian, Li Zhuang and Qin Mingshuo. 2023. Electron probe X-ray in petrological analysis: A case study of Shayukou Village[J]. *Urban Geology*, 18(3): 100~111 (in Chinese with English abstract).
- Zhang S, Zhu G, Liu C, *et al.* 2019. Episodicity of stress state in an overriding plate: Evidence from the Yalu River Fault Zone, East China[J]. *Gondwana Research*, 71: 150~178.
- Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, Zhao Yue, *et al.* 2007. Jurassic tectonics of North China: A synthetic view[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(11): 1 462~1 480 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Meitao and Wang Yang. 2014. Geochemical characteristics and petrogenesis of the Shicheng diorite and Yunmengshan granite in Beijing area[J]. *Mineralogy and Petrology*, 34(3): 60~69 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Meitao and Wang Yang. 2015. Geochemical characteristics and petrogenesis of Changyuan zoned pluton in Beijing municipality[J]. *Bulletin of Mineralogy*, 34(4): 820~829 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Tengge, Hou Quanlin, Shi Mengyan, *et al.* 2021. Strain characteristics and tectonic significance of Dashuiyu ductile shear zone in Yunmengshan metamorphic core complex, Beijing[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(8): 2 483~2 501 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yue, Xu Gang, Zhang Shuanhong, *et al.* 2004. Yanshanian movement and conversion of tectonic regimes in East Asia[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 319~328 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Fangshun and Song Guoxue. 2023. Application of Eu anomaly in geology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 39(9): 2 832~2 856 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Yadong, Davis G A, Wang Cong, *et al.* 2000. Major Mesozoic tectonic events in the Yanshan Belt and the plate tectonic setting[J]. *Acta Geologica Sinica*, 74(4): 289~302 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Yongfei, Chen Renxu and Gao Peng. 2024. Anatectic metamorphism and granite petrogenesis in continental collision zones[J]. *Earth Science*, 49(1): 1~28 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Yongfei, Xu Zheng, Zhao Zifu, *et al.* 2018. Mesozoic mafic magmatism in North China: Implications for thinning and destruction of cratonic lithosphere[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 48(4): 379~414 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Dagang, Cui Shengqin, Wu Zhenhan, *et al.* 2000. Tectonic features of the compressional-extensional system and dynamic analysis of rock fabric in Yunmengshan area, Beijing[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 21(4): 337~344 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Dicheng, Wang Qing, Li Shimin, *et al.* 2025. Magma genesis and crustal evolution in continental collision zones[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 55(5): 1 398~1 423 (in Chinese).
- Zhu G, Chen Y, Jiang D Z, *et al.* 2015. Rapid change from compression to extension in the North China Craton during the Early Cretaceous: Evidence from the Yunmengshan metamorphic core complex[J]. *Tectonophysics*, 656: 91~110.
- Zhu Guang, Lu Yuanchao, Su Nan, *et al.* 2021. Crustal deformation and dynamics of Early Cretaceous in the North China Craton[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 51(9): 1 420~1 443 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 蔡剑辉, 阎国翰, 牟保磊, 等. 2005. 北京房山岩体锆石 U-Pb 年龄和 Sr、Nd、Pb 同位素与微量元素特征及成因探讨[J]. *岩石学报*, 21(3): 776~788.
- 陈 斌, 贺敬博, 马星华. 2009. 北太行山燕山期中酸性岩体中暗色包体的成因: 岩石学、地球化学和锆石 Hf-O 同位素证据[J]. *中国科学(D 辑)*, 39(7): 922~934.
- 陈 斌, 翟明国, 邵济安. 2002. 太行山北段中生代岩基的成因和意义: 主要和微量元素地球化学证据[J]. *中国科学(D 辑)*, 32(11): 896~907.
- 陈 印, 朱 光, 姜大志, 等. 2013. 四合堂剪切带活动时代及其对燕山运动 B 幕时间的限定[J]. *地质学报*, 87(3): 295~310.
- 陈 印, 朱 光, 姜大志, 等. 2014. 云蒙山变质核杂岩的变形规律与发育机制[J]. *科学通报*, 59(16): 1 525~1 541.
- 陈 印, 朱 光, 刘文刚, 等. 2018. 北京云蒙山地区中生代岩浆活动及构造演化[J]. *地质论评*, 64(4): 843~868.
- 邓心禾, 王力圆, 徐 净, 等. 2025. 福州鼓山地区 A 型花岗岩中碱性暗色矿物特征及其地质意义[J]. *岩石学报*, 41(1): 112~134.
- 董树文, 张岳桥, 龙长兴, 等. 2007. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释[J]. *地质学报*, 81(11): 1 449~1 461.
- 葛茂卉, 张进江, 刘 恺, 等. 2020. 小兴安岭-张广才岭地区晚古生代至中生代花岗岩的成因及其地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 39(4): 385~405.
- 郭敬辉, 陈福坤, 张晓曼, 等. 2005. 苏鲁超高压带北部中生代岩浆侵入活动与同碰撞-碰撞后构造过程: 锆石 U-Pb 年代学[J]. *岩*

- 石学报, 21(4): 1 281~1 301.
- 姬广义, 汪 洋, 孙永华. 2004a. 北京云蒙山岩浆杂岩体的岩石学和构造变形特征[J]. 北京地质, 16(3): 1~11.
- 姬广义, 汪 洋, 夏希凡. 2004b. 北京怀柔长园花岗杂岩体岩石学和构造变形特征及其地质意义[J]. 北京地质, 16(4): 1~13.
- 金文山, 管爱莲. 1999. 北京地区太古宙岩石同位素年龄及其意义[J]. 前寒武纪研究进展, 22(3): 1~13.
- 康月蓝, 石玉若. 2018. 北京云蒙山地区侵入岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 37(3): 379~394.
- 李 刚, 薛吉祥, 刘正宏, 等. 2020. 华北东部晚中生代区域伸展背景下同构造花岗岩体的起源与就位[J]. 岩石学报, 36(8): 2 413~2 430.
- 李献华, 周汉文, 刘 颖, 等. 2000. 粤西阳春中生代钾玄质侵入岩及其构造意义: I. 岩石学 and 同位素地质年代学[J]. 地球化学, 29(6): 513~520.
- 李友连, 郭敬辉, 欧阳东剑, 等. 2025. 燕山地区北京中生代上庄辉长岩-闪长岩-花岗岩杂岩体的壳幔岩浆混合成因及意义[J]. 岩石学报, 41(1): 31~65.
- 李 壮, 陈长健, 陈 斌. 2024. 长江中下游地区武山中酸性岩石 Li-Sr-Nd 同位素及地球化学[J]. 地球科学, 49(7): 2 475~2 489.
- 李 壮, 孟 恩, 裴福萍, 等. 2016. 辽宁大石桥早白垩世建一岩体年代学、地球化学及成因研究[J]. 地质与资源, 25(2): 101~107.
- 李 壮, 张 伟, 杨 帆, 等. 2020. 辽北开原中太古代花岗闪长质-英云闪长质片麻岩成因: 元素和锆石 U-Pb-Hf 同位素地球化学制约[J]. 矿物岩石地球化学通报, 39(6): 1 292~1 311.
- 欧阳志侠. 2010. 华北克拉通主要变质核杂岩晚中生代花岗岩时代、成因类型对比及意义[D]. 北京: 中国地质科学院.
- 秦江锋, 赖绍聪, 李永飞, 等. 2005. 扬子板块北缘阳坝岩体锆石饱和温度的计算及其意义[J]. 西北地质, 38(3): 1~5.
- 隋振民, 陈跃军. 2011. 大兴安岭东部花岗岩类锆石饱和温度及其地质意义[J]. 世界地质, 30(2): 162~172.
- 隋振民, 葛文春, 吴福元, 等. 2007. 大兴安岭东北部侏罗纪花岗质岩石的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及成因[J]. 岩石学报, 23(2): 461~480.
- 佟 鑫, 王惠初, 张 永. 2023. 华北克拉通新太古代末期的克拉通化: 冀东昌黎碱性花岗质岩石的岩石学、锆石年代学和元素地球化学[J]. 岩石学报, 39(9): 2 598~2 618.
- 王 磊, 李建波, 史峻丞, 等. 2022. 云蒙山地区晚中生代花岗岩成因分析及地质意义[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 45(6): 538~547.
- 吴福元, 葛文春, 孙德有, 等. 2003. 中国东部岩石圈减薄研究中的几个问题[J]. 地学前缘, 10(3): 51~60.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报, 23(6): 1 217~1 238.
- 翟明国. 2012. 华北克拉通的形成以及早期板块构造[J]. 地质学报, 86(9): 1 335~1 349.
- 翟明国, 樊祺诚. 2002. 华北克拉通中生代下地壳置换: 非造山过程的壳幔交换[J]. 岩石学报, 18(1): 1~8.
- 翟明国, 张艳斌, 李秋立, 等. 2021. 克拉通、下地壳与大陆岩石圈[J]. 岩石学报, 37(1): 1~23.
- 翟明国, 朱日祥, 刘建明, 等. 2003. 华北东部中生代构造体制转折的关键时限[J]. 中国科学(D辑), 33(10): 913~920.
- 张 旗, 金惟俊, 王元龙, 等. 2006. 大洋岩石圈拆沉与大陆下地壳拆沉: 不同的机制及意义——兼评“下地壳+岩石圈地幔拆沉模式”[J]. 岩石学报, 22(11): 2 631~2 638.
- 张 旗, 王 焰, 刘 伟, 等. 2002. 埃达克岩的特征及其意义[J]. 地质通报, 21(7): 431~435.
- 张 茜, 李 壮, 秦明硕. 2023. 电子探针技术在岩石学中的应用——以沙峪口岩体为例[J]. 城市地质, 18(3): 100~111.
- 张岳桥, 董树文, 赵 越, 等. 2007. 华北侏罗纪大地构造: 综评与新认识[J]. 地质学报, 81(11): 1 462~1 480.
- 赵美涛, 汪 洋. 2014. 北京石城闪长岩和云蒙山花岗岩岩石地球化学特征及成因[J]. 矿物岩石, 34(3): 60~69.
- 赵美涛, 汪 洋. 2015. 北京长园带状岩体的岩石地球化学特征及成因探讨[J]. 矿物岩石地球化学通报, 34(4): 820~829.
- 赵腾格, 侯泉林, 石梦岩, 等. 2021. 北京云蒙山变质核杂岩大水峪韧性剪切带的应变特征及构造意义[J]. 岩石学报, 37(8): 2 483~2 501.
- 赵 越, 徐 刚, 张拴宏, 等. 2004. 燕山运动与东亚构造体制的转变[J]. 地学前缘, 11(3): 319~328.
- 郑方顺, 宋国学. 2023. 铀异常在地质学中的应用[J]. 岩石学报, 39(9): 2 832~2 856.
- 郑亚东, Davis G A, 王 琮, 等. 2000. 燕山带中生代主要构造事件与板块构造背景问题[J]. 地质学报, 74(4): 289~302.
- 郑永飞, 陈仁旭, 高 彭. 2024. 大陆碰撞带深熔变质与花岗岩成因[J]. 地球科学, 49(1): 1~28.
- 郑永飞, 徐 峥, 赵子福, 等. 2018. 华北中生代镁铁质岩浆作用与克拉通减薄和破坏[J]. 中国科学(地球科学), 48(4): 379~414.
- 朱大岗, 崔盛芹, 吴珍汉, 等. 2000. 北京云蒙山地区挤压-伸展体系构造特征及其岩石组构的动力学分析[J]. 地球学报(中国地质科学院院报), 21(4): 337~344.
- 朱弟成, 王 青, 李世民, 等. 2025. 大陆碰撞带岩浆成因与地壳演化[J]. 中国科学: 地球科学, 55(5): 1 398~1 423.
- 朱 光, 陆元超, 苏 楠, 等. 2021. 华北克拉通早白垩世地壳变形规律与动力学[J]. 中国科学(地球科学), 51(9): 1 420~1 443.