

doi: 10.12097/gbc.2023.08.005

辽西柏杖子金矿花岗质岩体地球化学特征及其成矿意义

李红宾¹, 许卫军^{1,2}, 董国臣^{1*}, 常泽光¹, 李华伟¹, 汤家辉¹, 苏麟¹, 梁景利³
LI Hongbin¹, XU Weijun^{1,2}, DONG Guochen^{1*}, CHANG Zeguang¹, LI Huawei¹,
TANG Jiahui¹, SU Lin¹, LIANG Jingli³

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;

2. 凌源柏杖子金矿有限责任公司, 辽宁 朝阳 122521;

3. 华北地质勘查局五一四地质大队, 河北 承德 067000

1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Lingyuan Baizhangzi Gold Mine, Chaoyang 122521, Liaoning, China;

3. Brigade of North China Geological Exploration Bureau, Chengde 067000, Hebei, China

摘要: 辽西柏杖子金矿是冀东-辽西成矿带上较大规模的金矿之一, 其金成矿与中生代岩浆作用形成的花岗质岩体关系密切。在野外调研的基础上, 将柏杖子花岗质岩体划分为黑云母二长花岗岩、含黑云母二长花岗岩、二长花岗岩及花岗斑岩脉, 同时开展了岩石学、岩石地球化学、年代学及 Hf 同位素研究。研究结果显示, 花岗斑岩脉的锆石 U-Pb 年龄为 231.0 ± 1.3 Ma 和 231.7 ± 2.7 Ma, 形成于晚三叠世。花岗质岩体的主量元素均表现出高钾钙碱性、准铝到弱过铝质花岗岩的特征, 微量元素表现出相对富集 Rb、Th、U、K、Hf 元素, 相对亏损 Ba、Ta、Nb、P、Ti 元素, 无明显 Eu、Ce 异常, 相对富集轻稀土元素而亏损重稀土元素的特征, 在构造环境判别图解中均落入后碰撞环境。哈克图解及微量元素协变图显示, 从黑云母二长花岗岩到花岗斑岩脉具有 I 型花岗岩的演化趋势, 并经历了黑云母、钾长石、磷灰石、钛铁矿、榍石等矿物的分离结晶。花岗斑岩脉的锆石 Hf 同位素显示 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-9.02 \sim -5.62$ (平均 -7.43), 二阶段 Hf 模式年龄 T_{MD2} 为 $1592 \sim 1810$ Ma (平均 1710 Ma), 表明岩浆源区为古元古代晚期大陆地壳物质部分熔融形成。由锆石微量元素计算得到花岗斑岩脉的 ΔFMQ 为 $-1.23 \sim 4.65$ 。花岗斑岩脉富碱、高氧逸度及中等演化程度的特征都有利于金成矿, 具有较好的成矿潜力。

关键词: 花岗斑岩; 岩脉; 锆石 U-Pb 定年; Hf 同位素; 辽西; 柏杖子; 金矿

中图分类号: P588.12¹; P595; P597³ **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2024)10-1756-19

Li H B, Xu W J, Dong G C, Chang Z G, Li H W, Tang J H, Su L, Liang J L. Geochemical characteristics and metallogenic significance of granitic rock mass from the Baizhangzi gold deposit in western Liaoning. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(10): 1756-1774

Abstract: The Baizhangzi gold deposit in western Liaoning is among the largest gold deposits within the Jidong-Liaoxi metallogenic belt, where Mesozoic magmatism has led to the formation of granitic rock mass closely associated with gold ore. On the basis of field investigation, we have identified that the Baizhangzi granite consists of biotite monzogranite, biotite-bearing monzogranite, monzogranite and granitic porphyry dykes, and studied petrology, petrogeochemistry, chronology and Hf isotopic characteristics. The zircon U-Pb ages of granitic porphyry dykes were determined to be 231.0 ± 1.3 Ma and 231.7 ± 2.7 Ma, indicating formation in the Late Triassic. The major elements of Baizhangzi granitic rock mass exhibit characteristics of a high-K calc-alkaline series, displaying

收稿日期: 2023-08-02; 修订日期: 2024-01-26

资助项目: 重大科技专项计划《岩浆-流体系统成矿作用与空间结构》(编号: 202303AA08000601)

作者简介: 李红宾(2000-), 男, 在读硕士生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail: 136751697@qq.com

* 通信作者: 董国臣(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 从事岩石学及矿床学研究。E-mail: donggc@cugb.edu.cn

quasi-aluminum to weakly peraluminous granite composition; while the trace elements show enrichment in Rb, Th, U, K, Hf and depletion in Nb, Ba, P, Ti without obvious Eu and Ce anomalies. Additionally, there is relative enrichment in light rare earth elements and depletion in heavy rare earth elements placing it within the Post-COLG on tectonic setting discrimination diagrams. The Harker diagram and rare element covariant relationship indicate fractional crystallization of biotite, potassium feldspar, apatite, ilmenite and spar from biotite monzogranite to granitic porphyry dykes. The zircon Hf isotope analysis of the granitic porphyry dykes reveals $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values ranging from -9.02 to -5.62 (average -7.43), with two-stage Hf model ages (T_{MD2}) ranging from 1592 Ma to 1810 Ma (average 1710 Ma), suggesting derivation of the magma through partial melting of Late Paleoproterozoic crust. The zircon rare elements in the granitic porphyry dykes show a ΔFMQ range from -1.23 to 4.65. The enrichment of alkali, high oxygen fugacity($f\text{O}_2$), and medium degree of evolution in granite porphyry dykes are favorable conditions for gold mineralization, indicating a strong potential for mineralization.

Key words: granite porphyry; dykes; zircon U-Pb dating; Hf isotope; western Liaoning; Baizhangzi; gold deposit

冀东-辽西成矿带是华北地块北缘重要的金成矿带,产出了诸如金厂峪、峪耳崖、牛心山、唐杖子、柏杖子等金矿。区域上金成矿均与花岗质岩体有密切关系,如青山口花岗岩体、峪耳崖花岗岩体、唐杖子花岗斑岩株、牛心山花岗岩体、都山岩体、柏杖子花岗岩体等(赵海玲等, 1997; 毛景文等, 2005; 郭少丰等, 2009; 贺文等, 2018; 张岱岳等, 2022)。前人对这些岩体的年代学、构造环境等进行过研究,认为其主要形成于晚三叠世碰撞造山后期的伸展阶段及早一中侏罗世的陆内造山阶段(毛景文等, 2003; 熊乐等, 2017; 张岱岳等, 2022)。同时,作为燕山运动最典型的地区,华北地区伴随着大量岩浆侵入及火山喷发活动,岩石圈发生了巨量减薄现象,为区域金成矿作用提供了重要的研究窗口(邓晋福等, 2003; 毛景文等, 2003)。

柏杖子金矿是冀东-辽西成矿带上规模较大的金矿之一,金成矿与柏杖子花岗质岩体关系密切(魏有惠等, 1992; 罗镇宽等, 2004; Miao et al., 2008; 熊乐, 2017; 耿树峰, 2019)。前人对该岩体进行过研究,认为其形成时间集中于 222~236Ma(罗镇宽等, 2004; Miao, 2008; 熊乐, 2017; 李华伟, 2020; 苏麟, 2020),岩浆源区为下地壳熔融(熊乐, 2017; 耿树峰, 2019; 苏麟, 2020)。成矿物质具有深源特征,主要来自柏杖子花岗岩体(魏有惠, 1992; 王晓鸥, 2014; 熊乐, 2017),成矿流体以岩浆水为主并伴有大气降水的参与(熊乐, 2017)。但不同研究者对柏杖子花岗质岩体的岩性有不同的认识,如罗镇宽等(2003)、耿树峰(2019)等将柏杖子花岗岩体视为岩性均一的花岗岩体,熊乐(2017)认为其为花岗岩-石英二长岩的过渡类型,苏麟(2020)将其划分为黑云母二长花岗岩及钾化花岗岩,李华伟(2020)认为其为黑云母二长花

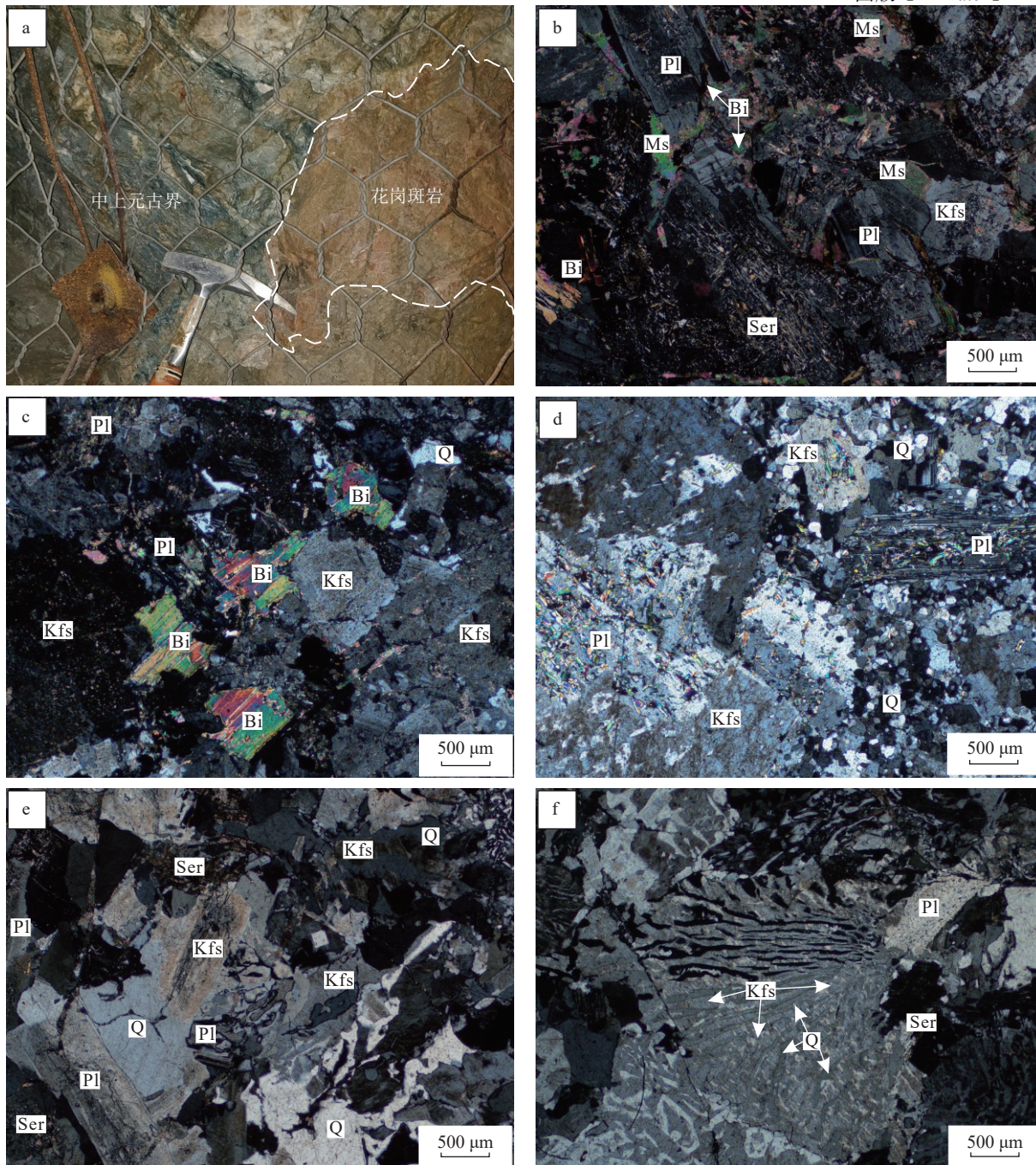
岗岩及石英二长岩。

本文通过对柏杖子金矿坑道编录,发现柏杖子花岗质岩体岩性复杂,可划分为黑云母二长花岗岩、含黑云母二长花岗岩、二长花岗岩、花岗斑岩脉等。区域上许多金矿床均出露与金矿关系密切的中酸性岩脉,如金厂峪花岗岩脉(陈显玉, 2021)、唐杖子花岗斑岩脉(郭少丰等, 2009)、峪耳崖闪长岩脉(杨爱雪等, 2021)等。而前人未报道过相关柏杖子花岗斑岩脉的特征,其与柏杖子花岗质岩体之间是否具有演化关系、对金成矿的约束都值得进一步研究。本文以矿区内花岗质岩体为研究对象,在岩石学、岩石地球化学、年代学等研究的基础上,重点研究了花岗斑岩脉的形成时间、与花岗质岩体的成因关系、构造环境、岩浆源区物质组成等,同时探讨花岗斑岩脉对金矿化的贡献与约束。

1 地质背景

辽西柏杖子金矿位于华北地块北缘(图 1-a),青龙-锦西大断裂与凌源-唐山大断裂交会处的都山岩体北东端,该区岩浆岩复杂,是冀东-辽西成矿带的重要组成部分(魏强等, 2016; 熊乐, 2017; 赵亮, 2019)。矿区出露地层主要有太古宇八道河群,中新元古界长城系、蓟县系、青白口系,中生界侏罗系、白垩系及新生界第四系。八道河群由角闪斜长片麻岩、花岗片麻岩及片麻状混合花岗岩组成;长城系、蓟县系及青白口系以砂岩和白云岩为主;侏罗系、白垩系为夹煤层的陆相火山碎屑沉积;第四系以沉积物、堆积物为主。构造以北东-北北东向断裂为主,区内 F1、F2 两条断裂是主要的控矿构造;F1 断裂延长约 8000 m,为左行走滑断裂,平面断距约 700 m,倾向 120°,倾角 30°~80°,主要控制矿区闪长岩脉的

图版 I Plate I



a. 花岗斑岩脉与围岩的侵入关系; b. 黑云母二长花岗岩显微照片; c. 含黑云母二长花岗岩显微照片; d. 二长花岗岩显微照片; e, f. 花岗斑岩脉显微照片。Q—石英; Pl—斜长石; Kfs—钾长石; Bi—黑云母; Ms—白云母; Ser—绢云母

斑状结构, 块状构造(图版 I -b)。主要矿物为石英(25%~30%)、钾长石(45%~55%)和斜长石(15%~25%), 副矿物为锆石。斑晶含量为 5%~10%, 主要由石英与斜长石组成, 石英以不规则粒状为主, 斜长石主要为半自形—自形板状, 可见钾化、硅化、绢云母化; 基质为细粒结构, 主要为长英质颗粒

(图版 I -e)。花岗斑岩脉普遍发育显微文象结构, 长石以条纹长石为主, 且在同一个矿物颗粒中, 石英基本具有相同的消光位(图版 I -f)。

3 样品采集及测试方法

从柏杖子金矿不同中段采集样品共 16 件, 其中

黑云母二长花岗岩 4 件, 含黑云母二长花岗岩 3 件, 二长花岗岩 4 件, 花岗斑岩脉 5 件, 采集位置均为新鲜岩石露头, 选取蚀变较弱的新鲜样品进行全岩主微量元素测试, 并选取 2 件花岗斑岩脉样品进行锆石 U-Pb 同位素年龄、微量元素及 Lu-Hf 同位素测试。

全岩主量、稀土及微量元素测试分析在北京锆年领航科技有限公司完成, 主量元素分析采用 X 射线荧光光谱法(XFR), 使用仪器为 Axios^{max} X 射线荧光光谱仪, 其中烧失量测定使用的仪器为 P124S 电子分析天平; 稀土及微量元素分析采用电感耦合等离子质谱法(ICP-MS), 使用仪器为 X Serise2 电感耦合等离子体质谱仪; 测试分析环境温度为 18~27℃, 相对湿度 25%~50%, 误差小于 5%。

锆石的分选、阴极发光(CL)图像、U-Pb 同位素分析、微量元素及 Lu-Hf 同位素分析在中国地质大学(北京)地质工程与矿产资源国家重点实验室矿床地球化学微区分析室完成。分析步骤: 先将样品破碎, 用常规重力和磁选方法进行分选以获得锆石颗粒, 然后在双目镜下挑选透明度和晶形较好的锆石颗粒, 放置于环氧树脂中制成锆石样靶。对锆石颗

粒进行透反射光显微照相及阴极发光图像分析, 选择测年点位。

锆石稀土元素及 U-Pb 同位素定年利用 LA-ICP-MS 完成, 测试所用激光剥蚀系统为美国 New Wave 公司生产的 UP213 nm, 分析测试以氦气为载气、激光束直径为 40 μm, 采用单点剥蚀的方法, 以国际标样锆石 91500 作为外标对锆石样品的年龄进行校正。对分析数据的离线处理及校正利用 ICPMS Data Cal 程序完成, 采用²⁰⁸Pb 对普通铅进行校正, 所分析的同位素比值和年龄误差为 1σ。锆石样品 U-Pb 年龄谐和图绘制和年龄加权平均计算用 Isoplot 3 程序完成。锆石 Hf 同位素分析在锆石 U-Pb 年龄分析位置或其附近进行, 所用仪器为激光剥蚀多接收器电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)和 193nm 氟化氙准分子激光器, 详细处理方法见耿建珍(2011)。

4 测试结果

4.1 主量元素特征

柏杖子花岗质岩体主量元素分析结果见表 1。

表 1 柏杖子花岗质岩体主量元素分析数据

Table 1 Major elements of granitic rock mass from the Baizhangzi gold deposit

%

元素	花岗斑岩					黑云母二长花岗岩				含黑云母二长花岗岩			二长花岗岩			
	20BZ	20BZ	20BZ	21BZ	21BZ	20BZ	20BZ	21BZ	20BZ	20BZ	20BZ	20BZ	20BZ	20BZ	21BZ	21BZ
	14	53	129	160	172	126	30	178	141	92	13	90	43	49	173	175
SiO ₂	76.93	69.02	70.45	74.55	74.43	66.08	68.43	68.03	65.69	64.01	65.449	68.25	65.05	68.41	67.83	68.71
Al ₂ O ₃	12.33	10.75	14.61	12.52	13.57	15.35	15.39	14.51	15.92	15.29	15.58	15.35	15.52	14.77	14.76	15.3
TiO ₂	0.05	0.06	0.19	0.07	0.11	0.38	0.29	0.28	0.35	0.36	0.35	0.29	0.35	0.27	0.29	0.29
CaO	0.59	3.76	1.43	1.23	0.59	1.545	1.07	1.75	1.9	2.36	1.76	1.43	1.9	1.43	1.54	1.21
MgO	0.23	1.94	0.60	0.22	0.26	1.15	0.75	0.64	0.85	1.21	0.98	0.62	0.72	0.65	0.62	0.45
K ₂ O	4.24	4.20	4.16	3.92	4.54	5.03	4.8	4.9	5.14	5.89	4.98	5.06	6.26	5.19	5.04	5.14
Na ₂ O	4.35	3.33	5.01	4.49	4.21	4.49	4.95	4.32	4.57	3.85	4.73	4.62	3.98	4.43	4.65	4.94
MnO	0.02	0.08	0.05	0.04	0.01	0.06	0.04	0.06	0.04	0.11	0.05	0.06	0.05	0.05	0.06	0.02
P ₂ O ₅	<0.01	<0.01	0.08	0.03	0.05	0.24	0.14	0.11	0.26	0.3	0.23	0.18	0.24	0.14	0.13	0.14
TFe ₂ O ₃	0.38	1.26	1.27	0.72	0.82	3.13	2.12	1.75	2.5	2.46	2.62	1.65	2.51	2.11	1.57	2.18
烧失量	0.78	5.34	1.874	1.40	0.84	2.39	1.57	2.75	2.07	3.65	2.79	2.18	2.61	2.03	2.68	1.56
总计	99.91	99.74	99.73	99.19	99.43	99.85	99.55	99.10	99.29	99.49	99.52	99.69	99.19	99.48	99.17	99.94
A/CNK	0.96	0.64	0.95	0.9	1.05	0.98	1.01	0.93	0.96	0.90	0.95	0.98	0.93	0.95	0.93	0.96
A/NK	1.05	1.07	1.15	1.08	1.15	1.20	1.15	1.17	1.22	1.20	1.18	1.17	1.17	1.14	1.13	1.12
σ	2.17	2.11	3.03	2.23	2.42	3.93	3.74	3.40	4.16	4.51	4.20	3.71	4.76	3.64	3.78	3.95
K ₂ O+ Na ₂ O	8.67	7.97	9.37	8.60	8.88	9.52	9.75	9.22	9.71	9.74	9.71	9.68	10.24	9.62	9.69	10.08
K ₂ O/Na ₂ O	0.98	1.26	0.83	0.87	1.08	1.12	0.97	1.13	1.12	1.53	1.05	1.10	1.57	1.17	1.08	1.04

注: TFe₂O₃ 为全铁含量; A/CNK = molar[Al₂O₃]/(CaO +K₂O+ Na₂O)]; A/NK = molar[Al₂O₃]/(K₂O+ Na₂O)]; σ = (K₂O+ Na₂O)²/(SiO₂-43)

黑云母二长花岗岩的 SiO_2 含量为 65.69%~68.43%, 全碱($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$)为 9.22%~9.71% 之间, 均值 9.55%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 0.97~1.13; 在全碱-硅(TAS)岩石分类图解(图 2-a)中, 样品点落入石英二长岩区域。 Al_2O_3 含量为 14.51%~15.92%, 均值为 15.29%。 A/CNK 值为 0.93~1.01, 均小于 1.1, A/NK 值为 1.15~1.22, 在 $\text{A}/\text{CNK}-\text{A}/\text{NK}$ 图解(图 2-b)中, 样品点落入准铝区域, 指示为 I 型花岗岩。 里特曼指数 $\sigma = 3.4\sim 4.16$, 均大于 3.3, 属于碱性岩石; 在 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 图解(图 2-c)中, 样品点落入钾玄岩系列区域。 在 $\text{SiO}_2-(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO})$ 图解(图 2-d)中, 样品点落入碱质系列区域内。

含黑云母二长花岗岩的 SiO_2 含量介于 64.01%~68.25% 之间, 全碱($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$)为 9.68%~9.74%,

均值 9.71%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 1.05~1.52; 在全碱-硅(TAS)岩石分类图解(图 2-a)中, 样品点落入石英二长岩区域。 Al_2O_3 含量介于 15.29%~15.57% 之间, 均值 15.41%。 A/CNK 值为 0.90~0.98, 均小于 1.1, A/NK 值为 1.17~1.20, 在 $\text{A}/\text{CNK}-\text{A}/\text{NK}$ 图解(图 2-b)中, 样品点落入准铝区域, 指示为 I 型花岗岩。 里特曼指数 $\sigma = 3.71\sim 4.51$, 均大于 3.3, 属于碱性岩石; 在 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 图解(图 2-c)中, 样品点落入钾玄岩系列区域。 在 $\text{SiO}_2-(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO})$ 图解(图 2-d)中, 样品点落入碱质系列区域。

二长花岗岩的 SiO_2 含量介于 65.05%~68.71% 之间, 全碱($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$)为 9.62%~10.24%, 均值为 9.91%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 1.04~1.57; 在全碱-硅(TAS)岩石分类图解(图 2-a)中, 样品点落入石英二长岩区域。

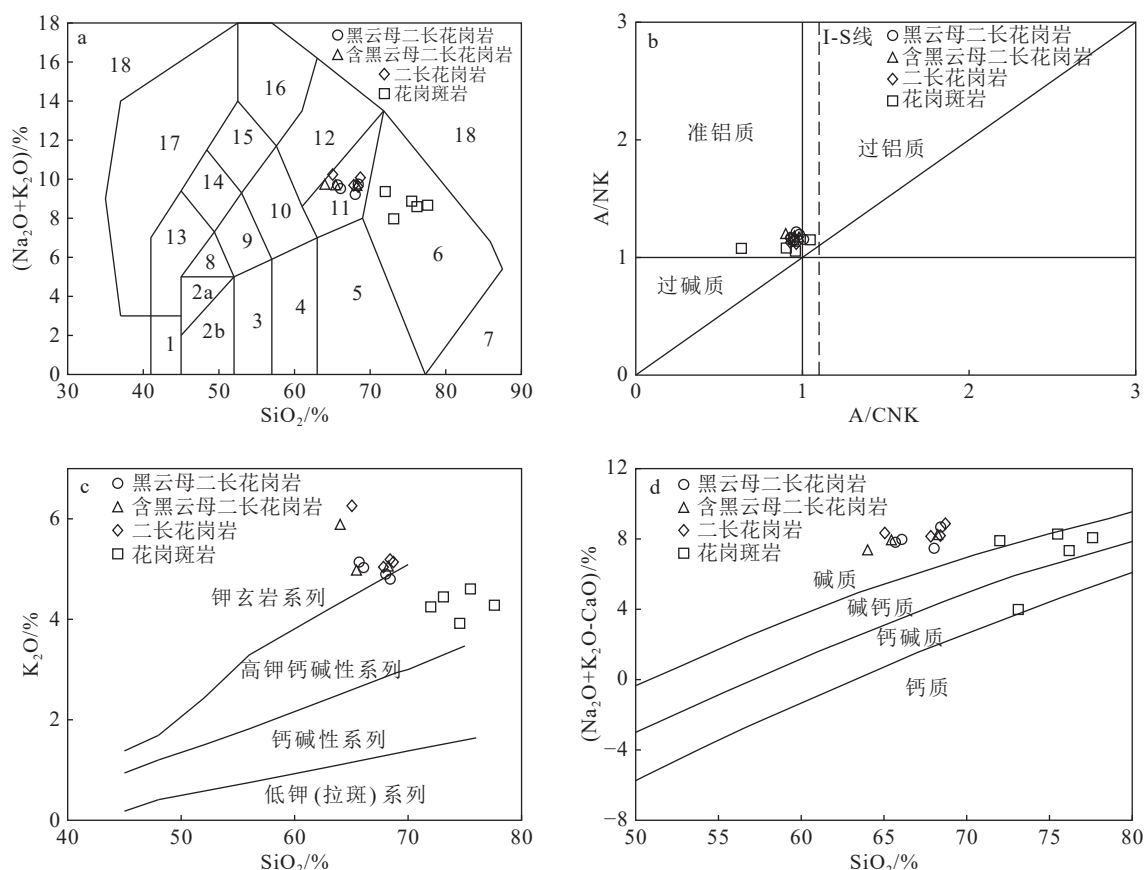


图 2 柏杖子金矿花岗岩体 TAS 图解(a, 据 Middlemost, 1994 修改)、 $\text{A}/\text{CNK}-\text{A}/\text{NK}$ 图解(b, 据 Maniar et al., 1989 修改)、 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 图解(c, 据 Rickwood, 1989 修改)和 $\text{SiO}_2-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO})$ 图解(d, 据 Frost, 2001 修改)

Fig. 2 TAS(a), $\text{A}/\text{CNK}-\text{A}/\text{NK}$ (b), $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ (c) and $\text{SiO}_2-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO})$ (d) diagrams of granite from the Baizhangzi gold deposit

1—橄榄辉长岩; 2a—碱性辉长岩; 2b—亚碱性辉长岩; 3—辉长闪长岩; 4—闪长岩; 5—花岗闪长岩; 6—花岗岩; 7—石英岩; 8—二长辉长岩; 9—二长闪长岩; 10—二长岩; 11—石英二长岩; 12—正长岩; 13—副长石辉长岩; 14—副长石二长闪长岩; 15—副长石二长正长岩; 16—副长正长岩; 17—副长深成岩; 18—霓方钠岩/磷霞岩/粗白榴岩

Al_2O_3 含量介于 14.76%~15.52% 之间, 均值 15.09%。 A/CNK 值为 0.93~0.96, 均小于 1.1, A/NK 值为 1.12~1.16, 在 A/CNK-A/NK 图解(图 2-b)中, 样品点落入准铝区域, 指示为 I 型花岗岩。里特曼指数 $\sigma = 3.64 \sim 4.76$, 均大于 3.3, 属于碱性岩石; 在 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ 图解(图 2-c)中, 样品点落入钾玄岩系列区域。在 $\text{SiO}_2\text{-(K}_2\text{O+Na}_2\text{O-CaO)}$ 图解(图 2-d)中, 样品点落入碱质系列区域内。

花岗斑岩脉的 SiO_2 含量介于 69.02%~76.93% 之间, 属于 SiO_2 过饱和岩石; 全碱($\text{K}_2\text{O+Na}_2\text{O}$)介于 7.97%~9.37% 之间, 均值 8.69%, $\text{K}_2\text{O/Na}_2\text{O}$ 值为 0.83~1.26; 在全碱-硅(TAS)岩石分类图解(图 2-a)中, 样品点均落入花岗岩区域。 Al_2O_3 含量介于 11.39%~14.93% 之间, 均值 13.06%。 A/CNK 值介于 0.64~1.05 之间, 均小于 1.1, A/NK 值为 1.05~1.15, 在 A/CNK-A/NK 图解(图 2-b)中, 样品点均落入准铝—弱过铝质区域, 位于 I-S 线左侧。里特曼指数 $\sigma = 2.1 \sim 3$, 均小于 3.3, 属于钙碱性岩石; 在 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ 图解(图 2-c)中, 样品点均落入高钾钙碱性系列区域。在 $\text{SiO}_2\text{-(K}_2\text{O+Na}_2\text{O-CaO)}$ 图解(图 2-d)中, 大部分样品点落入碱钙质系列区域。

4.2 微量及稀土元素特征

柏杖子花岗质岩体的微量元素分析结果见表 2, 在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 3-a)中, 表现出右倾型的配分模式, 相对富集 Rb、Th、U、K、Hf 等大离子亲石元素, 相对亏损 Ba、Ta、Nb、P、Ti 等高场强元素的特征。稀土元素分析显示, 从黑云母二长花岗岩、含黑云母二长花岗岩、二长花岗岩到花岗斑岩脉, 稀土元素(REE)具有逐渐降低的趋势, LREE/HREE 值均较大(16.83~30.94), $(\text{La/Yb})_N$ 也具有逐渐降低的趋势, δEu 值整体上略小于 1 (0.76~1.04)。在稀土元素球粒陨石标准化配分型式图(图 3-b)中, 均表现出富集轻稀土元素、亏损重稀土元素和无明显 Eu 异常的特征。黑云母二长花岗岩、含黑云母二长花岗岩、二长花岗岩及花岗斑岩在稀土及微量元素特征上的一致性, 表明同源岩浆演化可能对其形成起到了重要作用。

4.3 锆石 U-Pb 年龄及稀土元素特征

花岗斑岩脉的锆石 U-Pb 同位素及微量元素测试数据见表 3、表 4。从锆石阴极发光图像看, 所选锆石颗粒自形程度较好, 呈长柱状, 亮度较高, 粒径 50~100 μm , 长宽比约为 2 : 1, 具有明显的振荡环带

且无热液锆石的暗色增生边结构。锆石的 Th/U 值分别为 0.93~1.34 和 0.89~1.38(平均值分别为 1.11 和 1.08), 均大于 0.4。2 件样品的锆石稀土元素显示出左倾型的配分模式, 均具有明显的 Ce 正异常及 Eu 负异常(图 4-a、c)。以上特征均表明, 这些锆石是典型的岩浆锆石(Hoskin et al., 2003)。

样品 20BZ14 的 16 个有效测点所在锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 228.8 ~ 233.9 Ma, 其年龄加权平均值为 231.0 ± 1.3 Ma(MSWD = 0.26)(图 4-b)。

样品 20BZ129 的 15 个有效测点所在锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 216.5 ~ 237.8 Ma, 其年龄加权平均值为 231.7 ± 2.7 Ma(MSWD = 0.81)(图 4-d)。

4.4 锆石 Lu-Hf 同位素特征

在锆石 U-Pb 定年的基础上, 选择 20 个点进行 Hf 同位素组成测定(表 5)。此次测试的锆石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值均小于 0.002, 表明锆石在形成后具有较低的放射成因 Hf 元素的积累(吴福元, 2007b)。样品 20BZ14 的锆石 Hf 同位素分析结果显示, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.000793 ~ 0.001338, 计算得到的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -9.02 ~ -6.00(均值 -7.44), 二阶段模式年龄(T_{MD2})为 1619.97 ~ 1809.94 Ma(均值 1709.91 Ma)。样品 20BZ129 的锆石 Hf 同位素分析结果显示 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.000369~0.001219, 计算得到的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -8.98 ~ -5.62(均值 -7.43), 二阶段模式年龄(T_{MD2})为 1591.91 ~ 1808.31 Ma(均值 1710.08 Ma)。2 件样品的锆石 Lu-Hf 同位素二阶段模式年龄均远大于其成岩年龄。

5 讨论

5.1 岩脉的形成时限

冀东-辽西成矿带分布许多与中生代侵入岩有关的金矿, 如峪耳崖花岗岩(罗镇宽等, 2001)、牛心山花岗岩(罗镇宽等, 2001; 郭少丰等, 2009)。前人对柏杖子金矿黑云母二长花岗岩(236 ± 1.6 Ma, 李华伟, 2020; 234 ± 1.6 Ma、 235 ± 1.9 Ma, 苏麟, 2020)、二长花岗岩(233 ± 3 Ma, 熊乐, 2017; 233 ± 1.9 Ma, 李华伟, 2020)的年龄测试结果也表明其均形成于晚三叠世(图 5)。

本次研究测试的 2 件花岗斑岩脉样品的锆石 U-Pb 年龄分别为 231.0 ± 1.3 Ma 和 231.7 ± 2.7 Ma, 可代表花岗斑岩脉的侵位年龄, 与黑云母二长花岗岩及二长花岗岩年龄具有一致性, 可能形成于晚三

表 2 柏杖子花岗质岩体微量和稀土元素分析数据

Table 2 Trace elements and REE of granitic rock mass from the Baizhangzi gold deposit 10⁻⁶

元素	花岗斑岩		黑云母二长花岗岩		含黑云母二长花岗岩		二长花岗岩		
	20BZ14	21BZ160	20BZ126	20BZ141	20BZ13	20BZ92	20BZ49	21BZ173	21BZ175
La	14.5	18.8	84.4	84.8	84.3	68.4	67.4	73.4	77.8
Ce	24.3	33.4	153	154	150	130	125	137	141
Pr	2.05	3.05	15.1	16.4	16.2	14.0	13.0	14.0	14.7
Nd	5.79	9.36	51.1	54.7	57.3	47.7	42.8	44.2	45.9
Sm	0.81	1.39	7.58	8.38	7.61	7.55	6.71	6.66	6.83
Eu	0.29	0.38	1.76	2.10	1.80	2.00	1.35	1.35	1.48
Gd	0.87	1.00	4.33	4.80	4.38	4.38	3.62	3.59	3.88
Tb	0.10	0.15	0.54	0.59	0.55	0.51	0.48	0.47	0.47
Dy	0.52	0.75	2.43	2.68	2.41	2.44	2.26	2.15	2.18
Ho	0.10	0.15	0.41	0.46	0.41	0.42	0.4	0.37	0.39
Er	0.36	0.43	1.14	1.21	1.15	1.08	1.11	1.07	1.05
Tm	0.093	0.075	0.17	0.17	0.16	0.17	0.16	0.16	0.15
Yb	0.70	0.58	1.05	1.11	1.06	1.02	1.03	1.03	1.01
Lu	0.10	0.099	0.17	0.17	0.16	0.17	0.17	0.17	0.17
ΣREE	50.58	69.56	323.2	331.6	327.5	279.8	265.5	285.6	297.0
LREE/HREE	16.83	20.53	30.56	28.63	30.86	26.46	27.76	30.70	30.94
δEu	1.04	0.95	0.86	0.93	0.87	0.98	0.76	0.76	0.80
δCe	0.96	0.98	0.97	0.95	0.93	0.97	0.97	0.98	0.95
(La/Yb) _N	14.97	23.30	57.66	54.80	57.05	48.10	46.94	51.12	55.25
Li	0.64	0.68	7.94	9.86	5.90	0.90	5.60	3.77	6.64
Be	6.59	5.51	3.88	4.72	4.30	5.01	5.03	5.09	5.60
Sc	1.31	0.74	3.5	3.68	3.59	4.33	2.45	2.43	2.31
Cr	5.41	5.49	10.9	15.6	10.2	11.6	7.15	10	8.82
Co	0.35	3.37	5.94	178	7.08	7.29	4.14	185	131
Ni	1.17	3.73	8.66	7.83	8.24	8.14	4.27	3.32	5.62
Ga	13.8	16.8	18.7	20.1	20.1	19	18.8	19.2	19.6
Rb	105	106	141	134	127	174	135	134	134
Sr	105	162	793	855	801	801	610	479	420
Zr	72.1	57.3	368	336	363	357	308	307	325
Nb	14.5	14.2	19.3	16.2	19.1	18.6	20.5	25	25.5
Cs	1.38	1.23	2.51	2.20	1.25	2.36	1.45	1.19	1.79
Ba	248	243	1580	1694	1311	1771	1221	1019	1789
Hf	4.07	3.51	8.51	8.17	8.4	8.69	7.47	7.81	8.5
Ta	1.07	1.46	1.00	0.93	1.01	0.95	1.17	1.99	1.76
Tl	0.53	0.60	0.84	0.68	0.7	0.98	0.73	0.73	0.66
Pb	22.2	46.2	28.2	30.5	16.5	25.7	30.4	15.7	20.3
Th	24.0	31.4	34.7	36.5	37.5	31.5	43.4	55.7	48.6
U	13.3	9.15	7.99	7.85	7.16	9.03	7.03	11.7	7.15

叠世的同一次岩浆侵位活动的晚期(Zhang et al., 2012; 叶浩, 2014; 李华伟, 2020)。

5.2 花岗岩成因

通常情况, 根据花岗岩的源岩性质将花岗岩划

分为 I 型、S 型和 A 型花岗岩。前人对柏杖子花岗质岩体开展过相关工作, 整体上具有高硅($\text{SiO}_2 > 60\%$)、高钾($\text{K}_2\text{O} > 4.9\%$)、低镁($\text{MgO} < 1\%$)、低磷($\text{P}_2\text{O}_5 < 0.2\%$)的特征, 且均为准铝质—弱过铝质岩

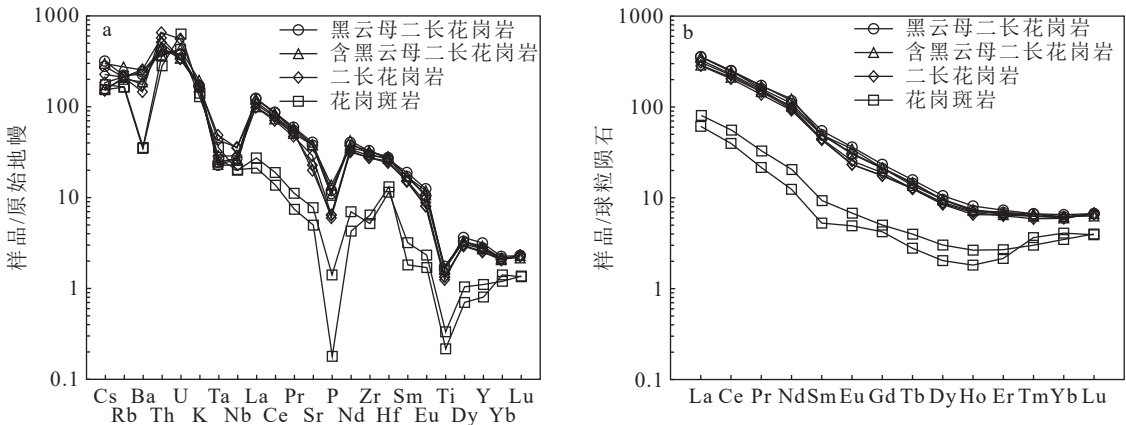


图3 柏杖子金矿花岗斑岩脉微量元素原始地幔标准蛛网图(a)和稀土元素球粒陨石标准化配分型式图(b)
(原始地幔和球粒陨石数据据 Sun et al., 1989)

Fig. 3 Primitive mantle-normalized trace element spider diagrams (a) and chondrite-normalized REE patterns (b) of granite porphyry dykes from the Baizhangzi gold deposit

表3 柏杖子花岗斑岩脉 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 测试结果

Table 3 Zircon U-Th-Pb isotopic data obtained by LA-ICP-MS of granite porphyry dykes from Baizhangzi

测点	含量/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值								年龄/Ma				谐和度
	Pb	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	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ			
20BZ14																	
01	21.45	555.14	413.44	1.34	0.0479	0.0022	0.2686	0.0068	0.0364	0.0004	241.6	5.5	230.2	2.5	95%		
02	26.30	649.17	504.73	1.29	0.0485	0.0017	0.2588	0.0067	0.0370	0.0004	233.7	5.4	233.9	2.4	99%		
03	11.14	278.61	212.95	1.31	0.0531	0.0015	0.2669	0.0074	0.0364	0.0004	240.2	5.9	230.6	2.6	95%		
04	17.74	361.38	359.99	1.00	0.0526	0.0016	0.2655	0.0082	0.0366	0.0004	239.1	6.6	231.9	2.5	96%		
05	14.87	332.75	292.59	1.14	0.0467	0.0021	0.2510	0.0070	0.0364	0.0004	227.4	5.7	230.7	2.6	98%		
06	16.62	373.98	348.86	1.07	0.0476	0.0022	0.2644	0.0085	0.0363	0.0004	238.2	6.9	230.1	2.4	96%		
07	45.01	931.99	918.24	1.01	0.0555	0.0013	0.2777	0.0053	0.0363	0.0004	248.8	4.2	230.0	2.3	92%		
08	38.00	810.32	828.33	0.98	0.0481	0.0025	0.2756	0.0077	0.0367	0.0006	247.2	6.1	232.1	3.9	93%		
09	21.97	474.08	438.04	1.08	0.0557	0.0016	0.2792	0.0073	0.0365	0.0004	250.0	5.8	231.3	2.6	92%		
10	42.12	847.88	860.04	0.99	0.0539	0.0013	0.2692	0.0068	0.0363	0.0005	242.0	5.5	230.0	2.9	94%		
11	27.93	556.62	597.56	0.93	0.0526	0.0012	0.2643	0.0064	0.0366	0.0005	238.1	5.1	231.9	3.2	97%		
12	18.63	388.53	372.25	1.04	0.0538	0.0020	0.2819	0.0073	0.0365	0.0004	252.1	5.8	231.4	2.5	91%		
13	53.52	1161.67	1076.05	1.08	0.0551	0.0012	0.2754	0.0070	0.0361	0.0005	247.0	5.6	228.8	2.9	92%		
14	20.48	498.22	396.15	1.26	0.0519	0.0016	0.2589	0.0074	0.0363	0.0003	233.8	6.0	229.9	2.2	98%		
15	17.82	405.83	343.99	1.18	0.0534	0.0018	0.2711	0.0093	0.0369	0.0005	243.6	7.4	233.3	2.8	95%		
16	23.26	489.43	462.66	1.06	0.0520	0.0022	0.2794	0.0079	0.0365	0.0004	250.2	6.3	231.2	2.6	92%		
20BZ129																	
01	31.77	741.49	706.20	1.05	0.0546	0.0015	0.2675	0.0081	0.0355	0.0005	240.7	6.5	225.1	3.4	93%		
02	16.31	437.55	317.69	1.38	0.0513	0.0015	0.2526	0.0071	0.0358	0.0004	228.7	5.7	227.0	2.3	99%		
03	41.16	952.65	947.18	1.01	0.0533	0.0013	0.2503	0.0063	0.0342	0.0006	226.8	5.1	216.5	4.0	95%		
04	34.64	741.83	764.50	0.97	0.0529	0.0013	0.2662	0.0069	0.0365	0.0005	239.7	5.5	231.3	3.3	96%		
05	23.33	454.56	495.79	0.92	0.0498	0.0014	0.2526	0.0071	0.0368	0.0005	228.7	5.8	233.2	3.0	98%		
06	24.60	649.23	469.07	1.38	0.0508	0.0012	0.2597	0.0061	0.0371	0.0004	234.5	4.9	235.1	2.7	99%		
07	24.16	513.69	508.16	1.01	0.0536	0.0013	0.2674	0.0069	0.0361	0.0004	240.6	5.5	228.3	2.4	94%		
08	12.40	234.45	255.91	0.92	0.0497	0.0016	0.2523	0.0075	0.0370	0.0005	228.4	6.1	234.3	2.9	97%		
09	23.52	589.10	469.77	1.25	0.0535	0.0019	0.2654	0.0094	0.0360	0.0004	239.0	7.6	227.8	2.5	95%		
10	35.57	675.76	752.44	0.90	0.0489	0.0010	0.2506	0.0052	0.0372	0.0004	227.0	4.2	235.6	2.7	96%		
11	21.73	476.78	430.05	1.11	0.0498	0.0013	0.2580	0.0069	0.0376	0.0003	233.1	5.6	237.8	2.1	98%		
12	16.43	383.71	329.21	1.17	0.0481	0.0016	0.2407	0.0078	0.0364	0.0004	219.0	6.4	230.5	2.4	94%		
13	29.75	644.43	609.19	1.06	0.0513	0.0013	0.2641	0.0069	0.0373	0.0004	238.0	5.5	236.1	2.8	99%		
14	48.96	974.04	1030.80	0.94	0.0512	0.0010	0.2642	0.0056	0.0375	0.0006	238.1	4.5	237.6	3.7	99%		
15	30.70	752.22	601.35	1.25	0.0532	0.0012	0.2682	0.0057	0.0367	0.0004	241.3	4.6	232.1	2.4	96%		

石,具有 I 型花岗岩的特征(熊乐, 2017; 苏麟, 2020)。本次测试的柏杖子花岗质岩体均具有贫 Al (A/CNK: 0.64~1.05)、低磷(P_2O_5 0.1%~0.3%)的特征。在 A/CNK-A/NK 图解(图 2-b)中,样品点均落入 I-S 线的左侧,在哈克图解(图 6)中,也具有 I 型花岗岩的演化趋势(Pichavant et al., 1992)。与 S 型花岗岩强烈富 Al(A/CNK > 1.1)且具有较高的磷

($P_2O_5 > 0.2\%$)的特征不同(Whalen et al., 1987)。柏杖子花岗质岩体主量元素 TFeO/MgO 介于 0.62~4.35 之间,与 A 型花岗岩富铁含量(>10)的特征明显不同。微量元素均亏损 Nb、Ba、P、Ti 等高场强元素,不同于 A 型花岗岩富集高场强元素的特征(Watson et al., 1983)。Whalen et al. (1987)对大量 A 型花岗岩进行了研究总结,认为其 $10^4 \times Ga/Al$ 值一

表 4 柏杖子花岗斑岩脉锆石稀土和微量元素分析数据

Table 4 Analysis results of zircon REE and trace elements of granite porphyry dykes from Baizhangzi																	10 ⁻⁶
测点	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	logfO ₂	ΔFMQ	ΔNNO
20BZ14																	
01	0.199	86.65	0.327	5.489	8.451	3.380	34.8	9.074	88.54	29.64	120.8	24.22	214.3	43.2	-16.70	-1.23	-1.79
02	0.190	95.98	0.423	6.055	8.805	3.696	37.4	10.36	103.2	34.02	138.6	27.47	241.9	48.4	-16.27	-0.76	-1.32
03	0.047	40.23	0.138	2.407	3.386	1.541	14.48	3.880	38.21	12.5	51.11	10.08	91.19	18.03	-16.19	0.17	-0.41
04	2.065	82.01	0.728	5.894	7.495	2.629	28.51	7.917	80.15	28.32	117.9	23.8	219.5	44.51	-15.37	0.95	0.40
05	0.184	62.94	0.255	3.238	4.998	1.971	20.6	5.699	54.74	18.59	74.58	14.85	134.8	27.28	-14.11	1.16	0.57
06	2.99	74.82	1.255	11.15	13.14	4.883	45.49	11.91	116	38.18	157.8	31.06	278.5	54.48	-13.83	1.16	0.61
07	2.399	113.3	1.419	8.318	9.546	2.994	36.9	9.912	97.74	33.25	138.4	27.89	254.9	49.26	-13.68	1.29	0.74
08	0.46	96.65	0.769	8.88	13.28	4.695	55.59	14.89	150.1	49.49	203.1	40.92	362.7	70.73	-13.66	1.80	1.24
09	6.382	96.54	1.731	10.62	7.914	2.664	29.25	7.808	74.79	25.38	105.8	21.08	189.4	37.15	-13.62	1.83	1.29
10	6.759	105.5	1.929	11.06	7.704	2.673	30.56	8.459	86.81	29.99	128.4	25.91	230.1	45.73	-13.53	1.90	1.34
11	0.059	102.7	0.254	4.073	8.366	2.892	35.23	10.09	104.1	37.41	156	32.02	285.1	58.68	-13.45	2.19	1.63
12	0.356	79.51	0.404	4.677	6.595	2.546	28.01	7.293	76.4	26.02	106.3	21.58	195.2	39.3	-13.13	2.30	1.74
13	9.015	200.7	3.473	21.70	17.85	5.920	67.96	17.93	182.7	62.85	266.9	53.39	483.6	95.11	-13.02	2.31	1.74
14	9.171	96.58	2.642	14.51	8.472	2.875	29.01	7.276	71.54	23.57	94.64	18.84	168.8	32.42	-12.97	2.33	1.77
15	0.027	72.99	0.289	4.729	8.029	3.036	30.12	8.210	82.63	27.45	111.9	21.88	199.4	39.58	-12.67	2.70	2.15
16	13.35	119.3	3.457	15.95	9.4	3.531	33.91	9.429	97.13	33.85	141.5	28.39	261.3	52.61	-12.27	3.24	2.66
20BZ129																	
01	2.296	112	1.977	11.39	8.899	3.518	37.16	10.26	103.4	35.62	150.0	30.83	274.0	54.15	-15.03	-1.09	-1.55
02	0.194	46.75	1.281	14.47	14.91	3.838	39.88	8.913	73.15	21.83	86.21	16.81	152.1	29.07	-14.99	0.50	-0.06
03	3.442	121.6	2.235	12.44	10.85	3.321	40.09	10.72	110.7	38.13	162.5	32.27	296.1	57.86	-14.17	0.98	0.45
04	9.566	138.8	4.694	23.33	12.45	3.799	40.99	10.99	115.9	39.56	168.5	34.31	313.5	60.86	-13.56	1.06	0.49
05	4.314	98.62	1.905	12.45	8.474	3.109	31.85	8.968	91.69	31.64	132.9	27.44	248.9	49.99	-13.13	1.41	0.85
06	0.620	93.96	0.445	5.171	8.052	3.066	32.92	8.643	85.05	28.01	113.1	22.79	200.2	39.93	-13.09	1.77	1.25
07	2.301	97.97	2.389	12.26	9.487	3.390	33.56	9.117	89.37	30.32	126.1	25.75	232.3	45.75	-12.66	1.94	1.38
08	0.040	39.04	0.307	3.931	4.779	1.352	15.30	3.417	32.42	9.995	42.52	8.912	82.80	16.90	-12.65	2.36	1.83
09	1.129	90.85	0.703	6.863	6.769	2.871	29.32	7.666	77.45	24.74	100.0	19.93	180.7	35.65	-12.18	2.41	1.85
10	0.120	104	0.277	3.389	7.421	2.471	33.39	9.749	98.05	33.37	142.5	28.89	262.8	51.56	-12.08	2.63	2.10
11	2.458	94.30	0.821	7.094	8.020	2.567	30.39	8.067	79.84	25.92	108.6	21.39	190.0	37.87	-11.88	2.75	2.20
12	0.034	71.90	0.277	4.633	6.747	2.961	30.40	8.319	80.01	27.89	117.4	23.48	212.8	43.31	-11.85	2.76	2.25
13	0.641	104.2	0.517	6.336	8.711	3.478	37.91	10.49	106.2	36.41	152.3	30.82	279.4	55.50	-11.56	3.01	2.46
14	4.094	117.3	1.574	9.175	9.277	2.913	38.32	10.05	103.8	35.53	151.2	30.65	283.6	54.57	-10.96	3.35	2.79
15	0.262	116.3	0.412	5.363	8.844	3.138	37.39	10.16	101.4	34.18	140.3	27.76	250.9	49.28	-10.10	4.65	4.09
01	2.296	112	1.977	11.39	8.899	3.518	37.16	10.26	103.4	35.62	150.0	30.83	274.0	54.15	-15.03	-1.09	-1.55

注: logfO₂为绝对氧逸度; ΔFMQ为对应温度下绝对氧逸度与铁橄榄石-磁铁矿+石英缓冲液氧逸度的差值; ΔNNO为对应温度下绝对氧逸度与自然镍-绿镍矿缓冲液氧逸度的差值; 计算方法据Li et al., 2019

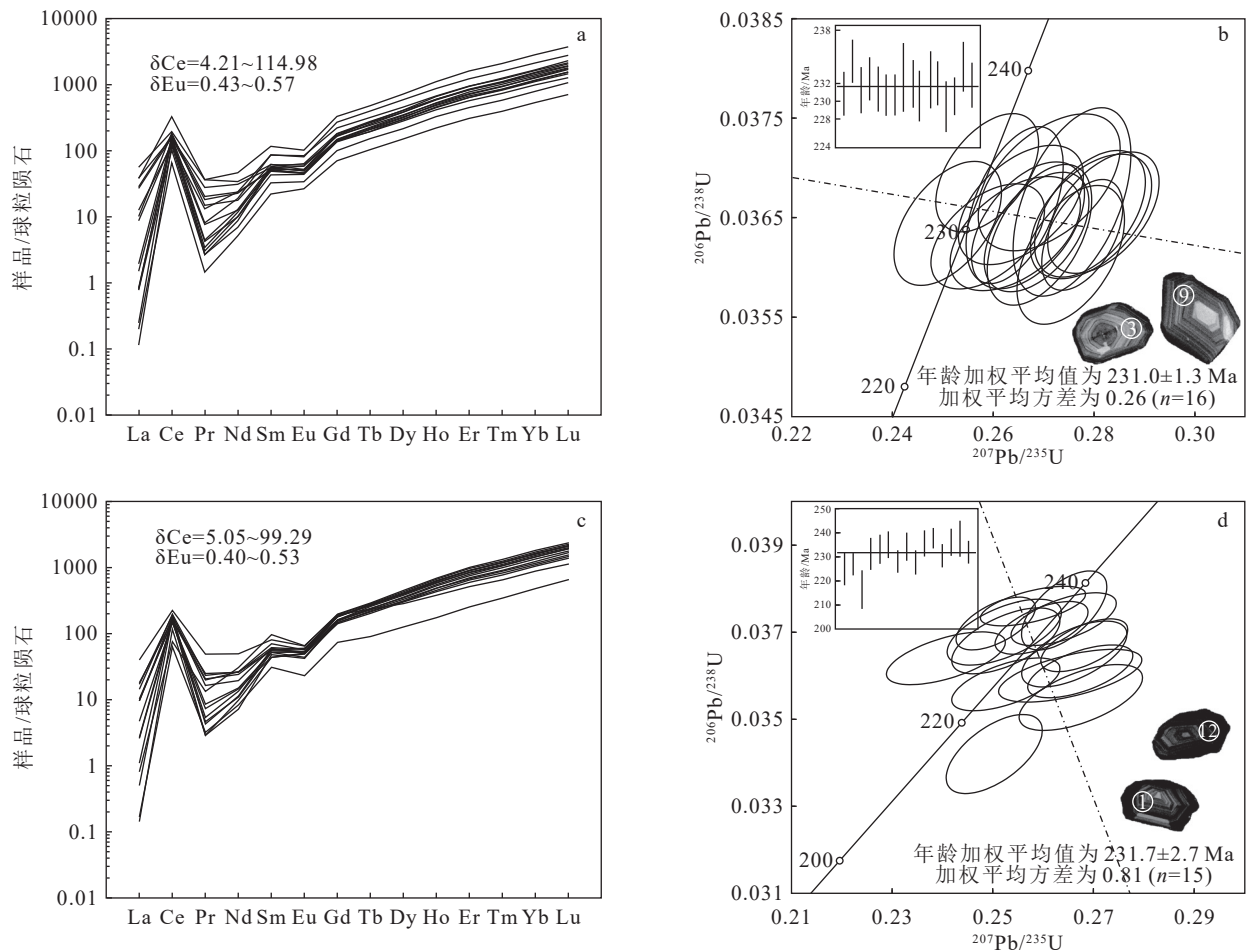


图4 花岗斑岩脉锆石稀土元素配分图(a, c)和U-Pb 年龄谐和图(b, d)

Fig. 4 Zircon chondrite-normalized REE patterns diagram (a, c) and U-Pb concordia diagram (b, d) of granite porphyry dykes

般大于 2.6, 而全球 A 型花岗岩的平均值为 3.75, 柏杖子花岗质岩体的 $10^4 \times \text{Ga}/\text{Al}$ 值为 2.12~2.53, 与典型 A 型花岗岩的特征不一致。

虽然薄片未见 I 型花岗岩的典型矿物角闪石, 但 P_2O_5 与 SiO_2 具有 I 型花岗岩的演化趋势(图 6), 高硅(SiO_2 为 65.05%~76.93%)、高全碱($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 为 7.52%~10.24%)的特征也表明岩体经历了一定程度的结晶分异作用。综上所述, 柏杖子花岗质岩体整体为 I 型花岗岩。

在柏杖子花岗质岩体哈克图解(图 6)中, TiO_2 、 MgO 、 TFe_2O_3 、 Al_2O_3 、 MnO 、 P_2O_5 均与 SiO_2 表现出良好的线性负相关关系, 暗示具有成因联系, 并表现出黑云母二长花岗岩→含黑云母二长花岗岩→二长花岗岩→花岗斑岩脉的演化序列, 与锆石 U-Pb 年龄特征一致。 MgO 、 TFe_2O_3 与 SiO_2 的负相关关系说明岩浆经历了基性矿物(如黑云母)的分离结晶(Miller et al., 1984), 从黑云母二长花岗岩到花岗斑岩, 黑云

母含量减少也可以证实这一点。 TiO_2 与 SiO_2 的负相关关系则说明可能存在榍石的分离结晶。

从稀土及微量元素图解看(图 3), 花岗斑岩脉与柏杖子花岗质岩体具有相似的配分型式, 暗示其之间具有同源性。花岗斑岩微量元素表现出 Ba、Sr、Ta、Nb、P、Ti 等元素的亏损, 其中 P、Ti 元素表现出强烈亏损, 暗示结晶分异过程中有磷灰石、钛铁矿或富含 P、Ti 元素矿物的晶出(赵军红等, 2005; 董朋生等, 2018; Dong et al., 2022), 黑云母二长花岗岩、含黑云母二长花岗岩及二长花岗岩中发育磷灰石, 而花岗斑岩中未见磷灰石也证实了磷灰石的分离结晶。Ba、Sr 元素的亏损可能与斜长石、钾长石的分离结晶作用有关, 而斜长石分离结晶通常伴随着 δEu 的负异常, 花岗质岩体均未表现出明显的 δEu 异常特征, 同时 Al_2O_3 与 SiO_2 具有负相关关系也说明斜长石的结晶分异作用不充分, 可能是富水岩浆在一定程度上抑制了斜长石的结晶分离(Othmar

表 5 柏杖子花岗斑岩脉锆石 Hf 同位素分析结果

Table 5 Zircon Lu–Hf isotopic data of granite porphyry dykes from the Baizhangzi gold deposit

测点	年龄/Ma	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	ε _{Hf} (0)	ε _{Hf} (t)	T _{DM1} /Ma	T _{DM2} /Ma
20BZ14											
01	230.2	0.022090	0.000089	0.000845	0.000004	0.282432	0.000028	−12.5	−7.5	1154	1713
02	230.6	0.025620	0.000310	0.000997	0.000011	0.282449	0.000024	−11.9	−6.9	1135	1677
03	231.9	0.021620	0.000320	0.000793	0.000013	0.282473	0.000024	−11.0	−6.0	1095	1620
04	230.7	0.026510	0.000270	0.001015	0.000012	0.282435	0.000030	−12.4	−7.4	1155	1708
05	230.1	0.022322	0.000074	0.000861	0.000003	0.282389	0.000029	−14.0	−9.0	1215	1810
06	232.1	0.027310	0.000340	0.001036	0.000012	0.282429	0.000020	−12.6	−7.6	1164	1721
07	231.9	0.033810	0.000210	0.001338	0.000007	0.282444	0.000029	−12.1	−7.1	1152	1690
08	230.0	0.039160	0.000610	0.001316	0.000024	0.282475	0.000021	−11.0	−6.1	1108	1622
09	228.8	0.027960	0.000760	0.000981	0.000018	0.282396	0.000028	−13.8	−8.8	1209	1796
10	231.4	0.027950	0.000310	0.001081	0.000011	0.282420	0.000029	−12.9	−7.9	1178	1742
20BZ129											
01	225.1	0.024100	0.000510	0.000858	0.000011	0.282407	0.000019	−13.4	−8.5	1189	1773
02	227	0.009420	0.000150	0.000369	0.000005	0.282485	0.000025	−10.6	−5.6	1067	1592
03	235.1	0.025810	0.000440	0.000968	0.000014	0.282453	0.000041	−11.7	−6.7	1128	1665
04	231.3	0.027390	0.000670	0.000996	0.000017	0.282390	0.000020	−14.0	−9.0	1218	1808
05	233.2	0.027760	0.000380	0.001068	0.000012	0.282417	0.000025	−13.0	−8.0	1182	1747
06	228.3	0.032910	0.000290	0.001219	0.000005	0.282409	0.000025	−13.3	−8.4	1198	1770
07	235.6	0.029180	0.000330	0.001099	0.000010	0.282429	0.000025	−12.6	−7.5	1166	1719
08	230.5	0.024970	0.000240	0.000947	0.000008	0.282446	0.000029	−12.0	−7.0	1138	1683
09	237.6	0.028920	0.000760	0.001091	0.000028	0.282430	0.000027	−12.6	−7.4	1164	1716
10	232.1	0.024680	0.000340	0.000936	0.000013	0.282470	0.000033	−11.1	−6.1	1104	1628

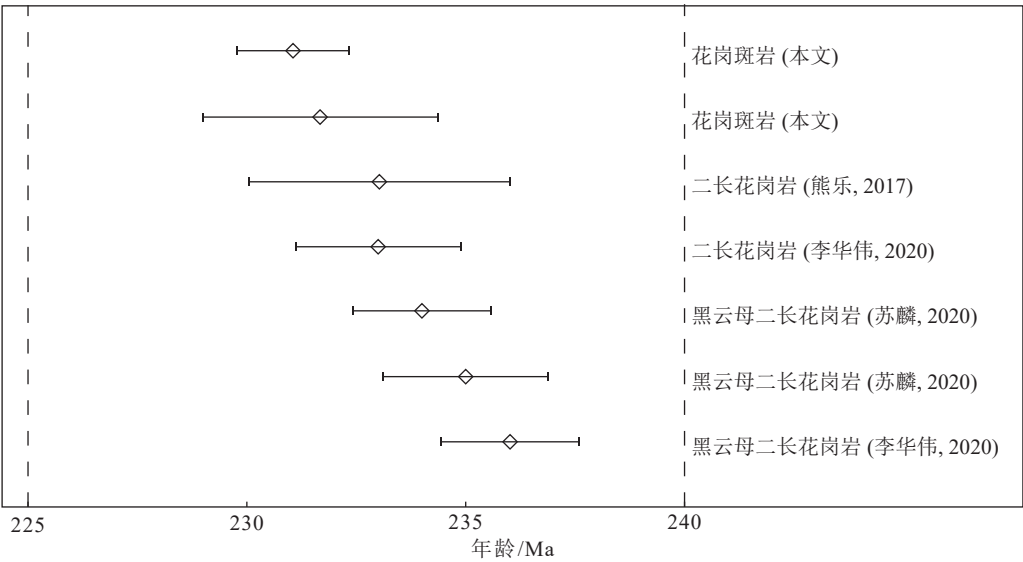


图 5 柏杖子金矿区相关花岗质侵入体年龄

Fig. 5 Ages of the granitic intrusions associated with the Baizhangzi gold deposit

et al., 2001), 花岗斑岩普遍发育显微文象结构也表明岩浆曾富水(杜等虎等, 2015)。

在杖子花岗质岩体微量元素协变关系图中, Ba、Sr、Rb 和 Eu 元素之间的变化关系也证明了钾长石

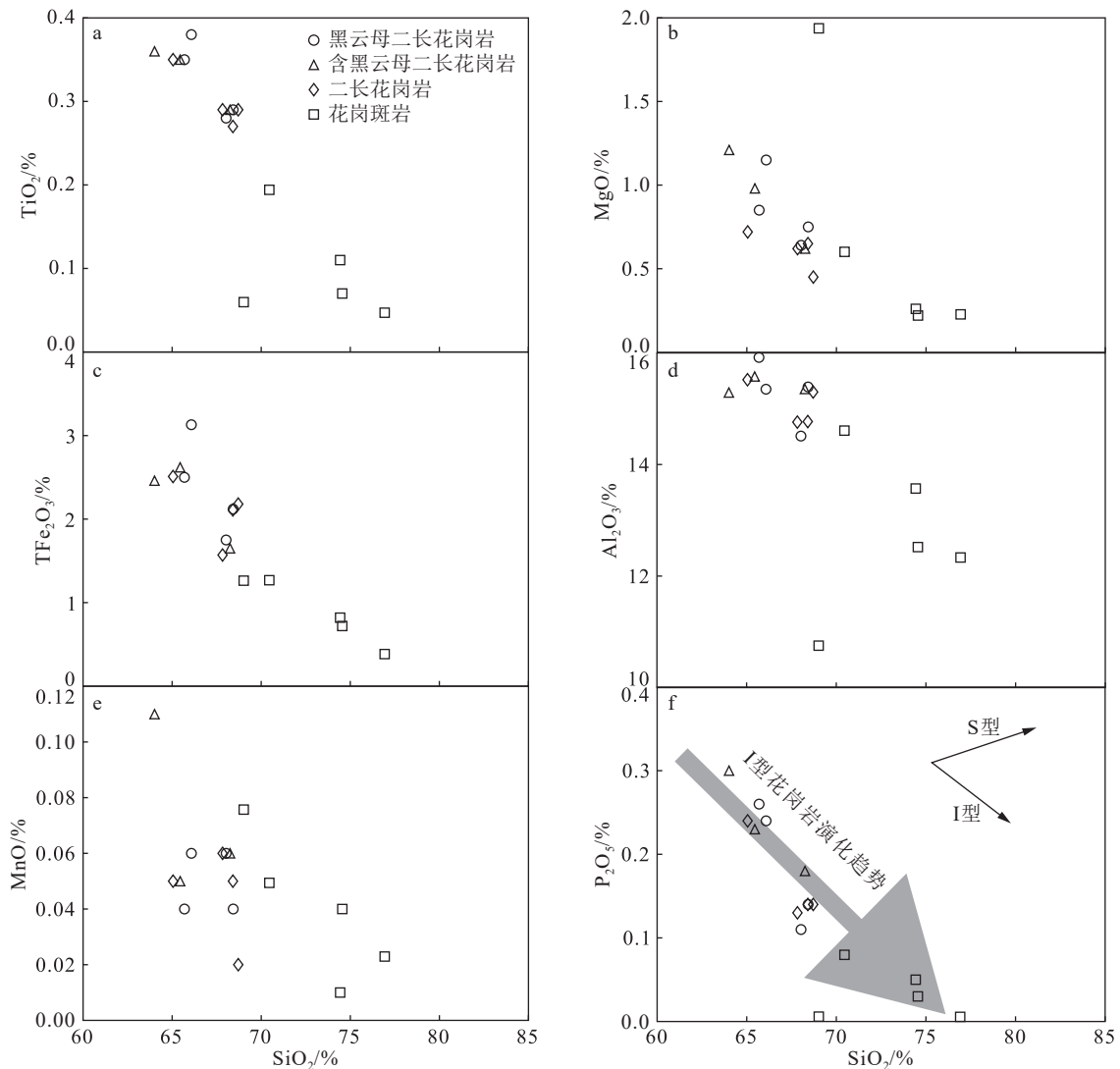


图6 柏杖子花岗质岩体哈克图解

Fig. 6 Harker diagrams of granite from the Baizhangzi gold deposit

的分离结晶(图7-a, b, e, f); Zr-Ti₂O图解则指示存在黑云母、钛铁矿和榍石的分离结晶(图7-c), La-(La/Yb)_N图解指示可能存在榍石或独居石的分离结晶(图7-d)。上述证据表明,柏杖子花岗斑岩脉是由柏杖子花岗质岩体经过黑云母、钾长石、磷灰石、钛铁矿、榍石等矿物分离结晶而形成的高钾钙碱性、准铝质—弱过铝质的中等分异的I型花岗岩。

5.3 构造环境

研究区位于华北地块北缘,中生代早期古亚洲洋残留海盆封闭,南北古陆对接,自印支期—侏罗纪中期,华北地区处于内陆碰撞造山阶段。在此期间华北地块经历了花岗质岩浆多期次重熔及同熔作用,形成中国东部最宏大的一次花岗质岩浆侵位事

件(毛景文等, 2005)。罗镇宽等(2004)认为大陆主碰撞期不利于岩浆上升,而板内时期岩浆作用非常稀少,因此大量的岩浆作用发生在主碰撞期后、板内时期之前。后碰撞环境指在碰撞造山过程中,大洋封闭后由陆—陆碰撞进入到板内环境这段时间的构造环境(Liégeois et al., 1998)。在冀东—辽西一带,发现大量印支期花岗岩,反映了区域性的一次重要构造环境,即中朝板块与西伯利亚板块产生的后碰撞环境(罗镇宽等, 2003)。区域上的许多中生代花岗质岩体也形成于后碰撞环境中,如金厂峪花岗岩(陈显玉, 2021)、都山岩体(罗镇宽等, 2004)、牛心山花岗岩(毛景文等, 2005)等。

本次研究结果显示,在全岩微量元素Y-Nb构

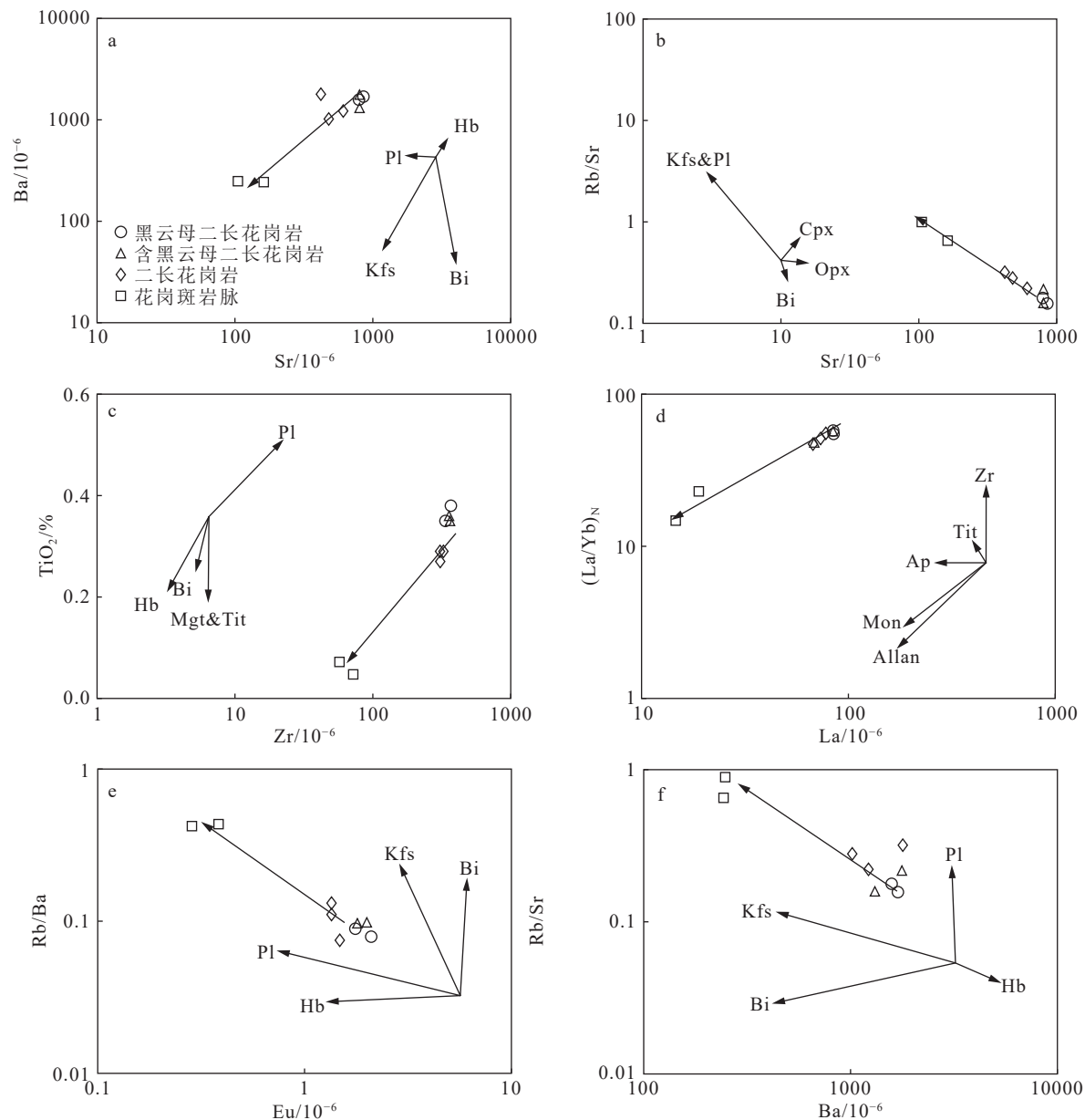


图 7 柏杖子花岗质岩体元素协变关系图(底图据徐晓波等, 2021)

Fig. 7 Element covariant relationship of granite from the Baizhangzi gold deposit

Bi—黑云母; Pl—斜长石; Kfs—钾长石; Hb—角闪石; Cpx—单斜辉石; Opx—斜方辉石; Mgt—磁铁矿; Tit—榍石;
Mon—独居石; Allan—褐帘石; Ap—磷灰石

造环境判别图解(图 8-a)中, 样品点均落入同碰撞花岗岩(Syn-COLG)或火山弧花岗岩(VAG)区域。在全岩微量元素 Rb-(Y+Nb) 构造判别图解中(图 8-b), 样品点均落入火山弧花岗岩(VAG)或后碰撞花岗岩(Post-COLD)区域。而研究区自印支期以来古亚洲洋就已经闭合, 不存在岛弧环境(Zhang et al., 2009; 严翔等, 2019), 同时主量元素指示的高钾钙碱性 I 型花岗岩及微量元素指示的富集大离子亲石元

素、亏损高场强元素的特征也与造山带后碰撞花岗岩特征相似(韩宝福, 2007; 张旗等, 2008; 王程等, 2014)。所以, 柏杖子花岗斑岩构造背景与花岗质岩体一致, 应形成于中朝板块与西伯利亚板块碰撞形成的后碰撞环境。

5.4 岩浆源区

柏杖子花岗质岩体的主量元素均具有富碱(7.9%~10.24%)、高铝(11.39%~15.92%)、低镁(0.23%~

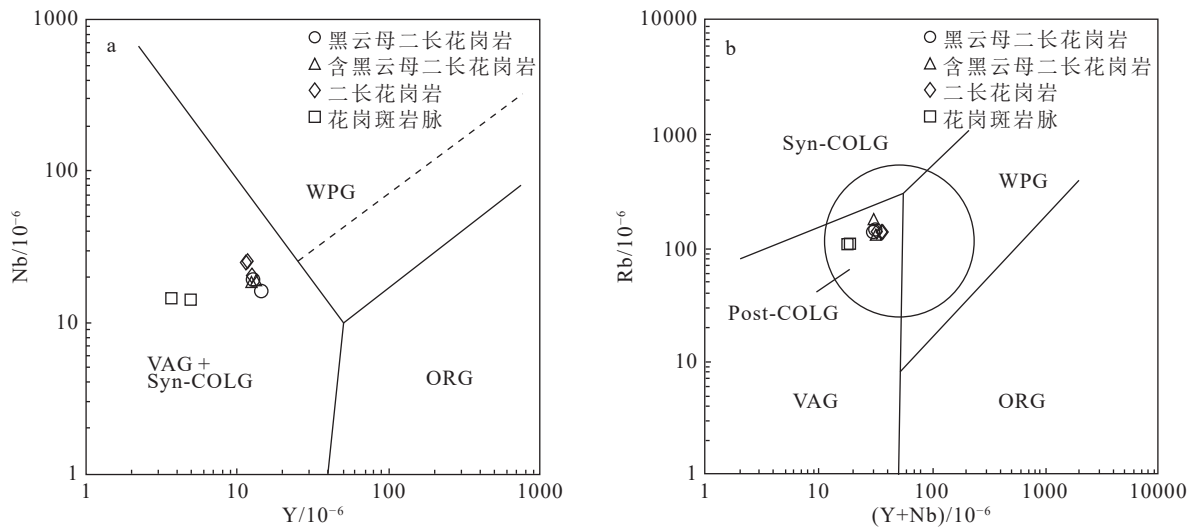


图8 柏杖子金矿花岗斑岩脉构造环境判别图解(据 Pearce et al., 1984 修改)

Fig. 8 Tectonic setting discrimination diagrams of granite porphyry dykes from the Baizhangzi gold deposit

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

1.94%)、低 TFe_2O_3 (0.38%~3.13%) 的特点, 指示壳源的特征(徐希阳等, 2016; Dong et al., 2020)。微量元素显示的富集大离子亲石元素、亏损高场强元素的特征也指示其可能为地壳成因(程顺波等, 2009)。Cr (3.74×10^{-6} ~ 15.6×10^{-6})、Ni (1.17×10^{-6} ~ 8.66×10^{-6})、Sc (0.74×10^{-6} ~ 4.33×10^{-6}) 含量远低于地幔源区熔融形成的岩浆 (250×10^{-6} 、 90×10^{-6} ~ 670×10^{-6} 、 15×10^{-6} ~ 28×10^{-6}), 表明岩浆来自地壳源区(Rudnick et al., 2014), 高 Sr/Y 值(28.6~32.9)与 $(\text{La}/\text{Y})_{\text{N}}$ 值(14.9~64.59)则指示下地壳重熔的特点(徐希阳等, 2016)。

锆石的 Lu-Hf 同位素体系具有很高的封闭温度, 其同位素比值不会随后期部分熔融或分离结晶而变化, 因此锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值代表了岩浆源区的成分特征(吴福元等, 2007a, b; 李剑锋等, 2021)。花岗质岩石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 正值通常表示来自亏损地幔或从亏损地幔中新增生的年轻地壳物质的部分熔融, 负值则通常代表古老地壳熔融成因(Sláma et al., 2008)。本文 2 件花岗斑岩脉样品的锆石 Hf 同位素具有相似的组成特征, 测试的 20 颗锆石颗粒的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.000369~0.001338, 组成变化不大, 表明其岩浆源区比较单一。计算得到的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为负值, 为 -9.02~-5.62 (平均 -7.43), 两阶段 Hf 模式年龄 T_{MD2} 为 1591.9~1809.9 Ma (平均 1710 Ma), 在 t - $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图解(图 9)中, 所有样品点落入球粒陨石与 1.8 Ga 平均地壳演化线之间, 表明岩浆源区由古元古代晚期大陆地壳物质部分熔融形成。

前人对柏杖子花岗岩的研究也认为, 岩浆源区为下地壳熔融(熊乐, 2017; 耿树峰, 2019; 苏麟, 2020)。上述证据表明, 柏杖子花岗斑岩的物源与花岗质岩体具有一致性, 来自大陆下地壳, 没有幔源物质的加入, 为下地壳物质部分熔融形成的。

5.5 成矿意义

Blevin (2004) 提出了评价岩浆-热液成矿系统成矿性的参数, 包括氧化还原程度、成分组成(如碱度)和岩浆演化程度。

根据 Maitre (1976) 总结的计算氧化率(OX)的公式, 可以依据 TFe_2O_3 、 SiO_2 、 K_2O 及 Na_2O 的含量计算出 Fe_2O_3 和 FeO 的含量, 而 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 值也可以用来衡量岩浆形成的氧化还原环境。计算显示, 黑云

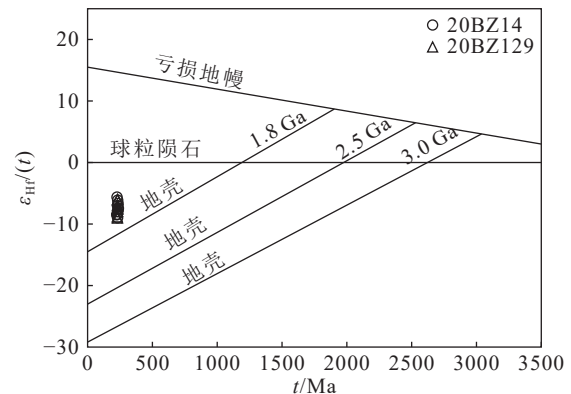


图9 柏杖子花岗斑岩脉锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 与 U-Pb 年龄图解

Fig. 9 Zircon t - $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ diagram of granite porphyry dykes from the Baizhangzi gold deposit

母二长花岗岩的 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 值为 0.92~0.98, 含黑云母二长花岗岩的 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 值为 0.95~0.97, 二长花岗岩的 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 值为 0.96~1.01, 花岗斑岩脉的 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 值为 0.83~0.95, 均属于磁铁矿系列 (>0.8), 而 Cu、Mo 和 Au 矿床通常与磁铁矿系列的花岗岩有关 (Ishihara, 1977; 汪雄武, 2002; Blevin, 2004)。同时, Geo- fo_2 软件可利用锆石的微量元素来计算锆石的氧逸度 (表 4; Li et al., 2019), 计算可知花岗斑岩脉的 $\log \text{fo}_2$ 为 -16.7~-10.1 (均值 -13.36), ΔFMQ 为 -1.23~4.65 (均值 1.74), ΔNNO 为 -1.79~4.09 (均值 1.18)。而含黑云母二长花岗岩和二长花岗岩的 ΔFMQ 分别为 -6.32~1.30、-4.93~3.67 (赵志雄, 未发表数据), 表明从二长花岗岩到花岗斑岩, 氧逸度有所增加。在锆石 $T_{\text{Ti}}-\log \text{fo}_2$ 图解 (图 10) 中, 2 件花岗斑岩脉样品的锆石数据点大部分落于 NNO 线之上, 在此范围内 S 主要以硫酸盐的形式溶解在熔体中, 硫化物不易析出, 有利于 Au 元素的富集 (Blevin, 2004)。

柏杖子花岗质岩体及花岗斑岩脉均富碱, $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 含量介于 7.9%~10.08% 之间, 在主量元素图解中样品点分别落入钾玄岩系列或高钾钙碱性系列区域内 (图 2-c), 有利于成矿物质的富集 (Blevin, 2004)。

Rb/Sr 和 K/Rb 值可作为评价岩浆演化程度的参数, Blevin (2004) 通过对澳大利亚东部花岗岩类的 K/Rb 值研究将花岗岩类划分为低演化程度

(>400)、中等演化程度 (200~400) 和高演化程度 (<200), 而与 Cu 和 Au 矿床相关的花岗岩的 K/Rb 值一般大于 200 (Blevin, 2004)。本次研究的黑云母二长花岗岩、含黑云母二长花岗岩、二长花岗岩和花岗斑岩的 Rb/Sr 值分别为 0.15~0.18、0.15~0.22、0.22~0.32、0.65~0.99, K/Rb 分别为 296.14~318.42、281~325.52、312.23~319.14、307.94~336.43。表明花岗质岩体及花岗斑岩脉整体处于中等演化程度, 有利于铜-金矿床的形成。此外, 锆石 Zr/Hf 值也可以用来评价花岗岩的演化程度, 花岗斑岩脉的锆石 Zr/Hf 值为 45.6~54.5, 属于中等分异花岗岩 (25~55) (Breiter et al., 2014)。

综上所述, 柏杖子花岗质岩体与花岗斑岩脉均具有富碱、高氧逸度及中等演化程度的特征, 有利于金成矿。而花岗斑岩作为与花岗质岩体同源演化的最终产物, 较高的氧逸度暗示其具有较好的成矿潜力。

6 结 论

(1) 辽西柏杖子花岗质岩体可划分为黑云母二长花岗岩、含黑云母二长花岗岩、二长花岗岩及花岗斑岩脉, 为高钾钙碱性、准铝—弱过铝质的 I 型花岗岩。微量元素均表现出相对富集 Rb、Th、U、K、Hf 元素, 相对亏损 Ba、Ta、Nb、P、Ti 元素的特征; 稀土元素均表现出轻稀土元素富集、重稀土元素亏损, 无明显 Eu、Ce 异常的特征。

(2) 柏杖子花岗斑岩脉 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 231 Ma, 为晚三叠世早期岩浆作用的产物。

(3) 柏杖子花岗斑岩脉与花岗质岩体具有相同的构造环境和岩浆源区, 均形成于中朝板块与西伯利亚板块碰撞形成的后碰撞构造环境中, 岩浆源区为古元古代晚期大陆下地壳物质部分熔融形成的壳源岩浆。

(4) 花岗斑岩脉作为岩浆结晶分异的最终产物, 其富碱、高氧逸度及中等演化程度的特征, 有利于金成矿, 具有较好的成矿潜力。

致谢: 中国地质大学 (北京) 地质工程与矿产资源国家重点实验室矿床地球化学微区分析室的老师们在 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年过程中给予了大力支持, 审稿专家提出了宝贵的修改意见, 在此一并感谢。

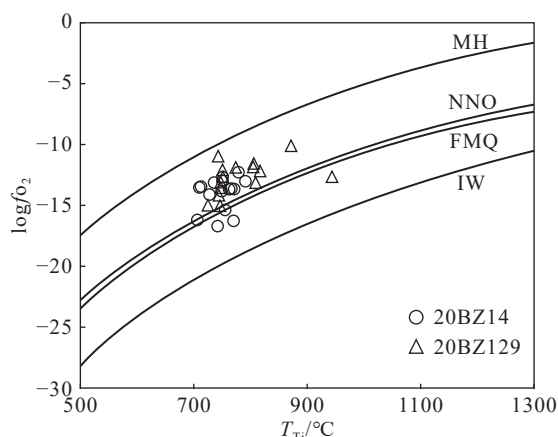


图 10 柏杖子金矿花岗斑岩脉锆石 $T_{\text{Ti}}-\log \text{fo}_2$ 图解

Fig. 10 Zircon $T_{\text{Ti}}-\log \text{fo}_2$ diagram of granite porphyry dykes from the Baizhangzi gold deposit

MH—磁铁矿-赤铁矿; NNO—自然镍-绿镍矿; FMQ—铁橄榄石-磁铁矿+石英; IW—自然铁-方铁矿

References

- Blevin P L. 2004. Redox and compositional parameters for interpreting the granitoid metallogeny of Eastern Australia: implications for good-rich ore systems[J]. *Resource Geology*, 54: 241–252.
- Breiter K, Lamas C N, Kras Borges R M. 2014. Chemical characteristics of zircon from A-type granites and comparison to zircon of S-type granites[J]. *Lithos*, 192/195: 208–225.
- Chen X Y. 2021. Geological and Geochemical Characteristics and Geological Significance of Jinchangyu Intermediate-acid Dikes in East Hebei[D]. Master Thesis of Hebei GEO University (in Chinese with English abstract).
- Cheng S B, Fu J M, Xu, D M, et al. 2009. Geochemical Characteristics and Petrogenesis of Xuehuading Granitic Batholith and its Enclaves, South China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 33(4): 588–597 (in Chinese with English abstract).
- Deng J F, Su S G, Zhao H L, et al. 2003. Deep Processes of Mesozoic YanShanian Lithosphere Thinning in North China[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 41–50 (in Chinese with English abstract).
- Dong P S, Dong G C, Sun Z R, et al. 2018. Zircon U–Pb chronology, Hf isotopic compositions, geochemistry characteristics and geological significance of Shouwangfen complex in Yanshan region[J]. *Earth Science Frontiers*, 25(6): 264–276 (in Chinese with English abstract).
- Dong P, Dong G, Santosh M, et al. 2020. Early Cretaceous igneous activities in the north flank of the North China Craton: The Shouwangfen complex example[J]. *International Geology Review*, 62(6): 714–739.
- Dong P, Dong G, Santosh M, et al. 2022. Eocene magmatism in the western Tengchong Block: Implications for crust–mantle interaction associated with the slab rollback of the Neo-Tethys Ocean[J]. *Gondwana Research*, 106: 259–280.
- Du D H, Yang Z M, Liu Y F, et al. 2015. Geology, alteration and mineralization of the Tinggong porphyry Cu deposit in southern Tibet[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 34(4): 447–474 (in Chinese with English abstract).
- Frost B R, Barnes C G, Collins W J, et al. 2001. A geochemical classification for granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 42(11): 2033–2048.
- Geng J Z, Li H K, Zhang J, et al. 2011. Zircon Hf isotope analysis by means of LA–MC–ICP–MS[J]. *Geological Bulletin of China*, 30(10): 34–39. (in Chinese with English abstract).
- Geng S F. 2019. Baizhangzi gold deposit metallogenic geological features and metallogenic prediction in Lingyuan city of Liaoning province, China[D]. Master Thesis of Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Guo S F, Tang Z L, Luo Z H, et al. 2009. Zircon SHRIMP U–Pb dating and geological significance from granite bodies in Tangzhangzi and Niuxinshan, eastern Hebei Province, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 28(10): 1458–1464 (in Chinese with English abstract).
- Han B F. 2007. Diverse post-collisional granitoids and their tectonic setting discrimination[J]. *Earth Science Frontiers*, 14(3): 64–72 (in Chinese with English abstract).
- He W, Ye H S, Cao J. 2018. The study of zircon U–Pb ages and Hf isotopes of the intrusions of the Tangzhangzi Au (Mo) poly-metallic deposit and the geological implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(9): 2703–2715 (in Chinese with English abstract).
- Hoskin P W O, Schaltegger U. 2003. The Composition of Zircon and Igneous and Metamorphic Petrogenesis[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 27–62.
- Ishihara S I. 1977. The Magnetite-series and Ilmenite-series Granitic Rocks[J]. *Mining Geology*, 27: 293–305.
- Lentz D R, Fowler A D. 1992. A Dynamic Model for Graphic Quartz–Feldspar Intergrowths in Granitic Pegmatites in the Southwestern Grenville Province[J]. *The Canadian Mineralogist*, 30(3): 571–585.
- Li H W. 2020. Genesis and deep prospecting of altered granite type orebody in Baizhangzi gold deposit, Liaoning province[D]. Master Thesis of China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Li J F, Fu J M, Ma C Q, et al. 2021. Zircon U–Pb ages, geochemical characteristics and geological significance of Jinjiling pluton in Nanling[J]. *Earth Science*, 46(4): 1231–1247 (in Chinese with English abstract).
- Li W, Cheng Y, Yang Z. 2019. Geo - fO_2 : Integrated software for analysis of magmatic oxygen fugacity[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20(5): 2542–2555.
- Liégeois J P. 1998. Preface—Some words on the post-collisional magmatism[J]. *Lithos*, 45: XV–XVIII.
- Luo Z K, Li J J, Guan K, et al. 2004. SHRIMP zircon U Pb age of the granite at Baizhangzi gold field in Lingyuan, Liaoning Province[J]. *Geological Survey and Research*, 27(2): 82–85 (in Chinese with English abstract).
- Luo Z K, Miao L C, Guan K, et al. 2003. SHRIMP U–Pb zircon dating of the Dushan granitic batholith and related granite–porphyry dyke, eastern Hebei Province, China, and their geological significance[J]. *Geochimica*, 32(2): 70–77 (in Chinese with English abstract).
- Luo Z K, Qiu Y S, Guan K, et al. 2001. SHRIMP U–Pb dating on zircon from Yu'erya and Niuxinshan granite intrusions in eastern Hebei Province[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 20(4): 278–285 (in Chinese with English abstract).
- Maitre R W L. 1976. Some problems of the projection of chemical data into mineralogical classification[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 56(2): 181–189.
- Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635–643.
- Mao J W, Zhang Z H, Yu J J, et al. 2003. Mesozoic tectonic setting of large scale ore-forming in east China and adjacent areas: revealed by precise ages of metallic deposits[J]. *Science in China (series D)*, 33(4): 289–299 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Xie G Q, Zhang Z H, et al. 2005. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings[J]. *Acta Petrologica*, 21(1): 169–188 (in Chinese with English abstract).

- abstract).
- Miao L C, Qiu Y M, Fan W M. 2008. Mesozoic multi-phase magmatism and gold mineralization in the Early Precambrian North China craton, eastern Hebei Province, China: SHRIMP Zircon U-Pb Evidence[J]. *International Geology Review*, 50(9): 826–847.
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma /igneous rock system[J]. *Earth-science reviews*, 37(3/4): 215–224.
- Miller C F, David W M. 1984. Extreme fractionation in felsic magma chambers: a product of liquid-state diffusion or fractional crystallization?[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 68(1): 151–158.
- Miller C F, McDowell, Susanne M, et al. 2003. Hot and cold granites? Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance[J]. *Geology*, 31(6): 529.
- Othmar M, Peter B K, Timothy L G. 2001. The role of H₂O during crystallisation of primitive arc magmas under uppermost mantle conditions and genesis of igneous pyroxenites: An experimental study[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 141(6): 643–658.
- 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.
- Pichavant M, Montel J M, Richard L R. 1992. Apatite solubility in peraluminous liquids: Experimental data and an extension of the Harrison-Watson model[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(10): 3855–3861.
- Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. *Lithos*, 22(4): 247–263.
- Rudnick R L, Gao S. 2014. Composition of the continental crust[J]. *Treatise on Geochemistry*, 4: 1–51.
- Sláma J, Kosler J, Condon D J, et al. 2008. Plesovice zircon – A new natural reference material for U–Pb and Hf isotopic microanalysis[J]. *Chemical Geology*, 249: 1–35.
- Su L. 2020. The granite in the Baizhangzi, western Liaoning and the significance of gold mineralization[D]. Master Thesis of China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313–345.
- Wang C, Wei Q R, Liu X N, et al. 2014. Post-collision related late indosinian granites of Gangdise terrane: Evidences from zircon U–Pb geochronology and petrogeochemistry[J]. *Earth Science–Journal of China University of Geosciences*, 39(9): 1277–1288 (in Chinese with English abstract).
- Wang X O. 2014. Geological characteristics and metallogenic model of the Baizhangzi gold deposit in Lingyuan, Liaoning Province[J]. *Geology and Resources*, 23(4): 339–342 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X W, Wang X D, 2002. Some diagnostic criteria for mineralized granite[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 21(2): 119–130 (in Chinese with English abstract).
- Watson E B, Harrison T M. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 64: 295–304.
- Wei Q, Xuan L, Ma L, et al. 2016. Prospecting New Progress and Significance in Maojiadian–Baizhangzi Gold-concentrated Area[J]. *NON-Ferrous Mining and Metallurgy*, 32(3): 4–8 (in Chinese with English abstract).
- Wei Y H. 1992. Stable Isotope Characteristics of Baizhangzi Gold Deposit in Liaoning[J]. *Journal of Shenyang Institute of Gold Technology*, 11(4): 20–26 (in Chinese with English abstract).
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. 1987. A-type granite: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407–419.
- Wu F Y, Li X H, Yang J H, et al. 2007a. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217–1238 (in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Li X H, Zheng Y F, et al. 2007b. Lu–Hf isotopic systematics and their applications in petrology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(2): 185–220 (in Chinese with English abstract).
- Xiong L. 2017. The Relationship between E evolution of the Mesozoic Magmatic Rocks and Gold Metallogenesis in Eastern Hebei– western Liaoning District[D]. Ph.D Thesis of China University of Geosciences (Wuhan) (in Chinese with English abstract).
- Xu X Y, Jiang N, Fan W B, et al. 2016. Petrogenesis and geological implications for the Mesozoic granites in Qinglong area, eastern Hebei Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(1): 212–232 (in Chinese with English abstract).
- Xu X B, Wang L X, Ma C Q, et al. 2021. Petrogenesis and geological implications of the Yangfengou intermediate felsic dykes in the Balong area within the Eastern Kunlun orogen[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 40(3): 654–674 (in Chinese with English abstract).
- Yan X, Chen B, Wang Z Q, et al. 2019. The petrogenesis of the two stage A –type granites from the Niujian silver deposit in the northern margin of North China Craton and their tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(2): 558–588 (in Chinese with English abstract).
- Yang A X, Sun D Y, Hou X G, et al. 2021. Geochemical characteristics and geological significance of diorite of Yu'erya gold deposit area in Eastern Hebei Province[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 51(2): 416–428 (in Chinese with English abstract).
- Ye H. 2014. The Early Mesozoic magmatism and deformation in the east segment of the northern margin of the North China Craton[D]. Ph.D Thesis of China Academy of Geological Sciences (in Chinese with English abstract).
- Zhang D Y, Wang S Z, Cao C, et al. 2022. Mesozoic magmatism and metallogenic significance in eastern Hebei gold belt: Evidence from zircon mineralogy[J]. *Geological Review*, 68(4): 1361–1374 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Q, Wang Y L, Jin W J, et al. 2008. Criteria for the recognition of pre-, syn- and post-orogenic granitic rocks[J]. *Geological Bulletin of China*, 27(1): 1–18 (in Chinese with English abstract).

- Zhang S H, Zhao Y, Song B, et al. 2009. Contrasting Late Carboniferous and Late Permian--Middle Triassic intrusive suites from the northern margin of the North China craton: Geochronology, petrogenesis, and tectonic implications[J]. Geological Society of America Bulletin, 121: 181–200.
- Zhang S H, Zhao Y, Ye H, et al. 2012. Early Mesozoic alkaline complexes in the northern North China Craton: Implications for cratonic lithospheric destruction[J]. Lithos, 155: 1–18.
- Zhao H L, Deng J F, Di Y J, et al. 1997. The genesis and model of Yuerya gold deposit[J]. Earth Science, 22(3): 53–56(in Chinese with English abstract).
- Zhao J H, Peng J T, Hu R Z, et al. 2005. Chronology, petrology, geochemistry and tectonic environment of Banxi quartz porphyry Dikes, Hunan Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 26(6): 525–534 (in Chinese with English abstract).
- Zhao L. 2019. Geological characteristics and direction of altered granite type gold deposit in Baizhangzi, Liaoning Province[D]. Master Thesis of Jilin University (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈显玉. 2021. 冀东金厂峪中酸性岩脉地质地球化学特征及地质意义[D]. 河北地质大学硕士学位论文.
- 程顺波, 付建明, 徐德明, 等. 2009. 湖南雪花顶花岗岩及其包体的地质地球化学特征和成因分析[J]. 大地构造与成矿学, 33(4): 588–597.
- 邓晋福, 苏尚国, 赵海玲, 等. 2003. 华北地区燕山期岩石圈减薄的深部过程[J]. 地学前缘, 10(3): 41–50.
- 董朋生, 董国臣, 孙转荣, 等. 2018. 燕山地区寿王坟杂岩体锆石 U–Pb 年代学、Hf 同位素和地球化学特征及其地质意义[J]. 地学前缘, 25(6): 264–276.
- 杜等虎, 杨志明, 刘云飞, 等. 2015. 西藏厅宫斑岩铜矿床地质、蚀变及矿化特征研究[J]. 岩石矿物学杂志, 34(4): 447–474.
- 耿建珍, 李怀坤, 张健, 等. 2011. 锆石 Hf 同位素组成的 LA–MC–ICP–MS 测定[J]. 地质通报, 30(10): 34–39.
- 耿树峰. 2019. 辽宁省凌源市柏杖子金矿床成矿地质特征与成矿预测[D]. 吉林大学硕士学位论文.
- 郭少丰, 汤中立, 罗照华, 等. 2009. 冀东唐杖子、牛心山花岗岩体锆石 SHRIMP U–Pb 定年及其地质意义[J]. 地质通报, 28(10): 1458–1464.
- 韩宝福. 2007. 后碰撞花岗岩类的多样性及其构造环境判别的复杂性[J]. 地学前缘, 14(3): 64–72.
- 贺文, 叶会寿, 曹晶. 2018. 冀东唐杖子金(铜)多金属矿区侵入岩体锆石 U–Pb 年龄、Hf 同位素特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 34(9): 2703–2715.
- 李华伟. 2020. 辽宁柏杖子金矿区蚀变花岗岩型矿体成因及深部找矿预测[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文.
- 李剑锋, 付建明, 马昌前, 等. 2021. 南岭金鸡岭岩体锆石 U–Pb 年龄、地球化学特征及地质意义[J]. 地球科学, 46(4): 1231–1247.
- 罗镇宽, 李俊健, 关康, 等. 2004. 辽宁凌源柏杖子金矿区花岗岩 SHRIMP 锆石 U–Pb 年龄[J]. 地质调查与研究, 27(2): 82–85.
- 罗镇宽, 苗来成, 关康, 等. 2003. 冀东都山花岗岩基及相关花岗斑岩脉 SHRIMP 锆石 U–Pb 年龄[J]. 地球化学, 32(2): 70–77.
- 罗镇宽, 裴有守, 关康, 等. 2001. 冀东峪耳崖和牛心山花岗岩体 SHRIMP 锆石 U–Pb 定年及其意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 20(4): 278–285.
- 毛景文, 张作衡, 余金杰, 等. 2003. 华北及邻区中生代大规模成矿的地球动力学背景: 从金属矿床年龄精测得到启示[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 33(4): 289–299.
- 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 等. 2005. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景[J]. 岩石学报, 21(1): 169–188.
- 苏麟. 2020. 辽西柏杖子花岗岩及其对金成矿意义[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文.
- 王程, 魏启荣, 刘小念, 等. 2014. 冈底斯印支晚期后碰撞花岗岩: 锆石 U–Pb 年代学及岩石地球化学证据[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 39(9): 1277–1288.
- 王晓鸥. 2014. 辽宁凌源柏杖子金矿床地质特征及成矿模式[J]. 地质与资源, 23(4): 339–342.
- 汪雄武, 王晓地. 2002. 花岗岩成矿的几个判别标志[J]. 岩石矿物学杂志, 21(2): 119–130.
- 魏强, 玄力, 马利, 等. 2016. 毛家店-柏杖子金矿集中区找矿新进展及意义[J]. 有色矿冶, 32(3): 4–8.
- 魏有惠. 1992. 辽宁柏杖子金矿床稳定同位素特征[J]. 沈阳黄金学院学报, 11(4): 20–26.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 2007a. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报, 23(6): 1217–1238.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. 2007b. Lu–Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报, 27(2): 185–220.
- 熊乐. 2017. 冀东—辽西地区中生代岩浆演化与金成矿关系[D]. 中国地质大学(武汉)博士学位论文.
- 徐希阳, 姜能, 范文博, 等. 2016. 冀东青龙地区中生代花岗岩的岩石成因和地质意义[J]. 岩石学报, 32(1): 216–236.
- 徐晓波, 王连训, 马昌前, 等. 2021. 东昆仑造山带巴隆地区羊粪沟中酸性岩脉成因及其地质意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 40(3): 654–674.
- 严翔, 陈斌, 王志强, 等. 2019. 华北克拉通北缘牛圈银矿区两期 A 型花岗岩的成因及其构造意义[J]. 岩石学报, 35(2): 558–588.
- 杨爱雪, 孙德有, 侯雪刚, 等. 2021. 冀东峪耳崖金矿区闪长岩脉地球化学特征及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 51(2): 416–428.
- 叶浩. 2014. 华北北缘东段早中生代构造变形与岩浆作用研究[D]. 中国地质科学院博士学位论文.
- 张岱岳, 王树志, 曹冲, 等. 2022. 冀东金矿带中生代岩浆作用及其成矿意义——来自锆石矿物学证据[J]. 地质论评, 68(4): 1361–1374.
- 张旗, 王元龙, 金惟俊, 等. 2008. 造山前、造山和造山后花岗岩的识别[J]. 地质通报, 27(1): 1–18.
- 赵海玲, 邓晋福, 狄永军, 等. 1997. 河北峪耳崖金矿床成因及成矿模式[J]. 地球科学, 22(3): 53–56.
- 赵军红, 彭建堂, 胡瑞忠, 等. 2005. 湖南板溪脉岩的年代学、岩石学、地球化学及其构造环境[J]. 地球学报, 26(6): 525–534.
- 赵亮. 2019. 辽宁柏杖子蚀变花岗岩型金矿地质特征及找矿方向[D]. 吉林大学硕士学位论文.