

冀北兰峡沟钼矿花岗岩成因及其成矿意义

任颖伟¹, 王红², 郑岩², 孟柯柯³, 李红宾¹, 张璨¹, 梁景利⁴, 董国臣¹

(1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 河北省地矿局第九地质大队, 河北 邢台 054000;
3. 河北省自然资源档案馆, 河北 石家庄 050051; 4. 华北地质勘查局五一四地质大队, 河北 承德 067000)

摘要:冀北兰峡沟钼矿床位于燕辽成矿带西部, 辉钼矿多赋存在花岗质片麻岩中, 花岗岩体中仅有零星矿化, 岩浆活动对钼矿化的影响一直是其密切关注的问题之一。年代学研究表明, 花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 134.9 ± 0.94 Ma, 形成于早白垩世, 与区域大规模岩浆活动时期一致。地球化学数据表明, 兰峡沟花岗岩具有高硅(SiO_2 为 75.41%~76.21%)、富碱($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 为 8.04%~8.73%)、富铝(Al_2O_3 为 12.19%~12.64%)、贫钙(CaO 为 0.44%~0.85%)的特征, 属高钾钙碱性系列、弱过铝质花岗岩。岩体富集大离子亲石元素(Rb、Th、U)和轻稀土元素, 亏损重稀土元素和高场强元素(Nb、P、Ti), 表现出中等 Eu 负异常($\delta\text{Eu}=0.31\sim 0.40$)。电子探针结果显示, 岩体中的黑云母为壳源铁质黑云母, 表现出高 Mg、Fe、K, 低 Ca、Na 的特征; 斜长石为钠长石, 具有高 Al、Na, 低 K、Ca 的特征。矿物学和地球化学特征表明岩体为分异 I 型花岗岩, 在岩浆演化过程中经历了黑云母、斜长石、磷灰石等矿物的结晶分异作用。锆石 Hf 同位素显示, 花岗岩的 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值介于 -18.16~-14.76 之间, 二阶段模式年龄 $t_{\text{DM2}}(\text{Hf})$ 为 2570~2117 Ma, 表明岩体来源于古元古代下地壳物质的部分熔融。岩体中黑云母氧逸度相对较高, 均落在 NNO 缓冲线以上。结晶温度为 599~776℃, 固结压力为 164~260 MPa, 侵位深度 6.23~9.90 km, 表明岩体形成于有利于钼矿成矿的温度和氧逸度环境, 具有较好的找矿潜力。

关键词:冀北地区; 锆石 U-Pb 年龄; 全岩地球化学; 矿物成分特征; 兰峡沟钼矿床

中图分类号: P588.12¹

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2025)03-0556-17

The petrogenesis of granite and its significance on mineralization in Lanxiagou Mo deposit of northern Hebei

REN Ying-wei¹, WANG Hong², ZHENG Yan², MENG Ke-ke³, LI Hong-bin¹, ZHANG Can¹, LIANG Jing-li⁴
and DONG Guo-chen¹

(1. School of Earth and Resources, China University of Geoscience, Beijing 100083, China; 2. The Ninth Geological Brigade of Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources, Xingtai 054000, China; 3. Natural Resources Archives of Hebei Province, Shijiazhuang 050051, China; 4. 514 Brigade of North China Geological Exploration Bureau, Chengde 067000, China)

Abstract: The Lanxiagou molybdenum deposit, situated in northern Hebei Province within the western Yan-Liao Metallogenic Belt, primarily hosts molybdenite within granitic gneisses, with only sporadic mineralization in granitic intrusions. The influence of magmatic activity on molybdenum mineralization remains a key research focus. Zircon U-Pb dating reveals the granitic intrusion formed at 134.9 ± 0.94 Ma (Early Cretaceous), coeval with regional magmatic events. Geochemically, the Lanxiagou granite exhibits high SiO_2 (75.41%~76.21%), alkalis ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ = 8.04%~8.73%), and Al_2O_3 (12.19%~12.64%) with low CaO (0.44%~0.85%), classifying as high-K calc-alkaline,

收稿日期: 2024-07-27; 接受日期: 2025-04-08; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 雄安新区科技创新专项(2023XAGG0068); 河北省实物资料再开发项目

作者简介: 任颖伟(2001-), 男, 汉族, 硕士研究生, 资源与环境专业, E-mail: yw17633240691@163.com; 通讯作者: 董国臣(1962-), 男, 汉族, 教授, 博士生导师, 主要从事岩石学及矿床学研究, E-mail: donggc@cugb.edu.cn.

weakly peraluminous granite. It displays enrichment in LILEs (Rb, Th, U) and LREEs, depletion in HREEs and HFSEs (Nb, P, Ti), and moderate Eu anomalies ($\delta\text{Eu}=0.31\sim0.40$). EPMA analyses indicate crust-derived ferromagnesian biotite (high Mg, Fe, K; low Ca, Na) and albite (high Al, Na; low K, Ca). Mineralogical and geochemical signatures suggest a differentiated I-type granite with crystallization differentiation of biotite, plagioclase, and apatite. Zircon $\varepsilon\text{Hf}(t)$ values (-18.16 to -14.76) and $t_{\text{DM2}}(\text{Hf})$ ages ($2\,570\sim2\,117$ Ma) indicate derivation from Paleoproterozoic lower crustal melting. The biotite in the intrusion exhibits relatively high oxygen fugacity (above the NNO buffer), with crystallization temperatures of $599\sim776^\circ\text{C}$, consolidation pressures of $164\sim260$ MPa, and emplacement depths of $6.23\sim9.90$ km, indicating formation under temperature and oxygen fugacity conditions favorable for molybdenum mineralization and significant exploration potential.

Key words: northern Hebei; zircon U-Pb dating; whole-rock geochemistry; mineral composition characteristics; Lanxiagou molybdenum deposit

Fund support: Xiong'an Science and Technology Innovation Project(2023XAGG0068); Hebei Province Physical Data Redevelopment Project

燕辽成矿带位于中亚造山带东部,华北克拉通北缘(Zhang *et al.*, 2021),是我国重要的钼矿床富集区之一,成矿地质条件良好,目前已发现钼矿床30余处,代表性矿床有曹四夭、大苏计、撒岱沟门钼矿床等(曾庆栋等, 2012; Chen *et al.*, 2020)。前人对燕辽成矿带中钼矿床的研究主要集中在区域岩浆活动和成矿作用,认为区域先后经历了古亚洲洋闭合、蒙古-鄂霍茨克洋闭合、西伯利亚克拉通碰撞、古太平洋板块俯冲及岩石圈减薄等多个构造演化过程,并诱发区域多期次岩浆活动和成矿作用(Wang *et al.*, 2018; 牛晓露等, 2021; 崔凯等, 2022)。区域岩浆活动主要集中在前寒武纪、印支期和燕山期,且钼矿化作用与古太平洋板块向欧亚大陆俯冲折返诱发的伸展构造背景下,由古老下地壳物质部分熔融形成的燕山期岩浆活动密切相关(Zeng *et al.*, 2013; 董朋生等, 2018)。

兰峡沟钼矿床是张北地区近年来新发现的钼矿床,相关研究较少,对于矿区岩浆活动及其对钼矿化的影响不清。而其钻孔岩心显示钼矿化多产在花岗质片麻岩中,花岗岩岩体中仅有零星矿化,因此研究矿区岩浆作用时限、演化过程及其对钼矿化的贡献,对指导地区进一步找矿具有重要参考意义。本文在区域已有钼矿勘查和研究资料的基础上,对兰峡沟钼矿区花岗岩体进行了研究,限定了花岗岩的形成时代,通过岩石地球化学、矿物成分及锆石 Hf 同位素分析,探讨了其成因类型、成岩物质来源演化过程及对钼矿化的贡献,为进一步勘查提供参考资料。

1 区域地质背景

研究区大地构造位置属华北克拉通北缘(图1a),燕辽成矿带西部。研究区属草原覆盖区,第四系松散沉积物分布广泛(图1b),地层出露较差,包括新近系石匣组(N_2s)、下侏罗统下花园组(J_1x)及古元古界红旗营子群(Pt_1Hn)。石匣组零星分布于区域西北部,主要由紫红、深灰色黏土组成,下部夹砂砾石层。下花园组主要由黄绿色石英长石砂岩、长石砂岩、炭质粉砂岩夹泥岩等陆相正常碎屑沉积岩组成,局部夹砾岩透镜体。红旗营子群广泛分布于区域中东部,主要岩石类型为花岗片麻岩、斜长角闪岩和斑状花岗片麻岩等中高级变质岩。

区域构造简单,推测存在一条形成于燕山运动晚期的 NE 向隐伏断层(图1b),主体沿沟谷和盆地展布。受古亚洲洋闭合、蒙古-鄂霍茨克洋闭合后伸展、古太平洋板块俯冲等构造运动的影响,区域岩浆活动频繁,以吕梁期和燕山期为主,并形成了具有复杂岩性组成的 EW 向岩浆岩带,包括王安镇杂岩体、象山花岗闪长岩和青羊沟二长花岗岩等(张海东等, 2016; 甄世民等, 2021; 陈井胜等, 2022)。区内大面积出露中生代二长花岗岩和前寒武纪变质深成岩,前寒武纪变质深成岩主要为变质正长花岗岩、变质二长花岗岩和变质石英二长闪长岩。晚侏罗世二长花岗岩出露于区域东南部,面积约 5 km^2 ,呈岩株状侵入于红旗营子群花岗片麻岩和古元古代变质石

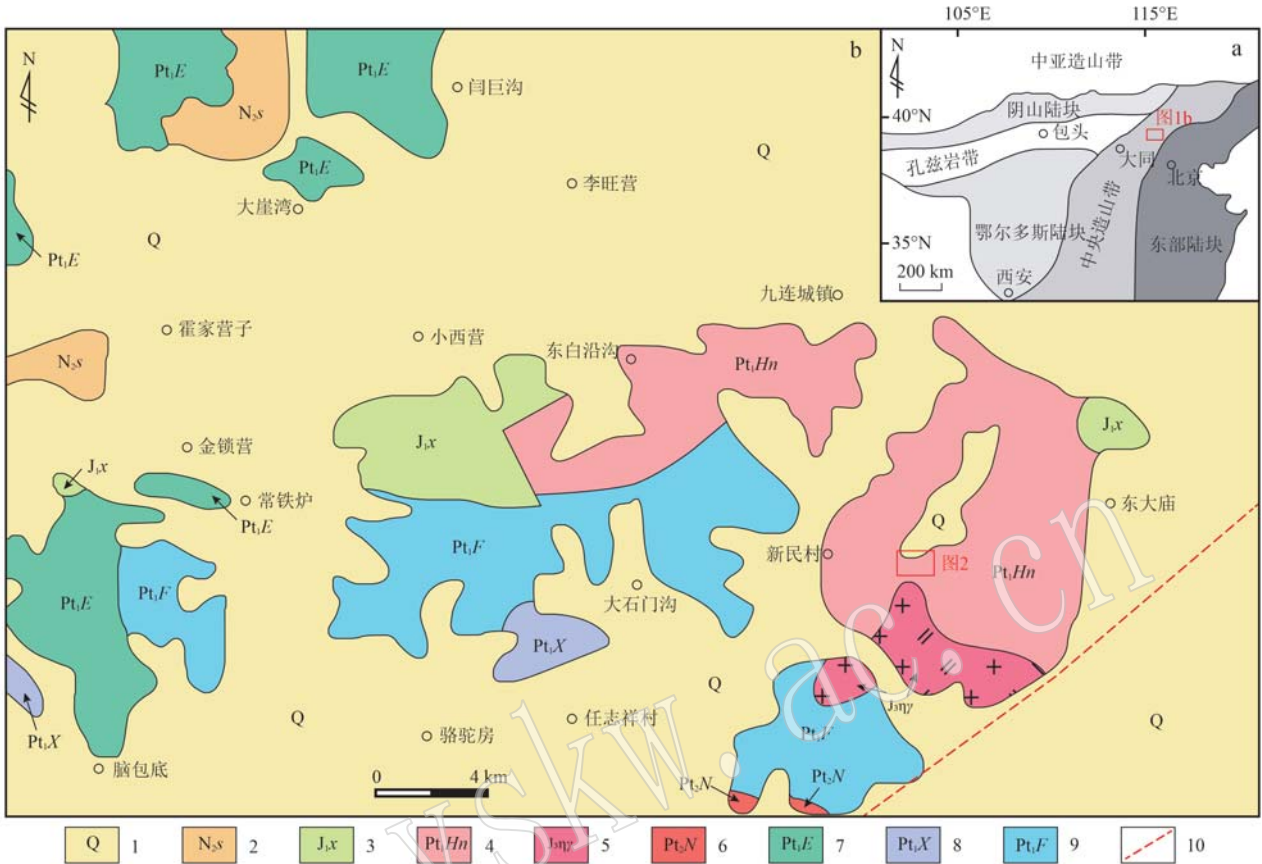


图 1 冀北兰峡沟钼矿大地构造位置图(a, 修改自 Zhang *et al.*, 2023)及区域地质图(b, 据河北省地质矿产勘查开发局, 2022)

Fig. 1 Geotectonic location map (a, modified from Zhang *et al.*, 2023) and regional geological map (b, after Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration, 2022) of the Lanxiagou molybdenum deposit in Northern Hebei Province

1—第四系; 2—新近系石匣组; 3—下侏罗统下花园组; 4—古元古界红旗营子群; 5—晚侏罗世二长花岗岩; 6—中元古代变质白云母正长花岗岩; 7—古元古代变质正长花岗岩; 8—古元古代变质二长花岗岩; 9—古元古代变质石英二长闪长岩; 10—推测断层
1—Quaternary; 2—Neogene Shixia Formation; 3—Lower Jurassic Xiahuyuan Formation; 4—Paleoproterozoic Hongqiyingzi Group; 5—Late Jurassic monzogranite; 6—Mesoproterozoic metamorphic muscovite syenogranite; 7—Paleoproterozoic metamorphic syenogranite; 8—Paleoproterozoic metamorphic monzogranite; 9—Paleoproterozoic metamorphic quartz monzogranite; 10—inferred fault

英二长闪长岩中,局部被第四系松散沉积物覆盖。

2 矿床地质及岩体特征

兰峡沟钼矿床位于张北县东北 50 km 处。矿区内出露地层主要为古元古界红旗营子群 (Pt₁Hn) 花岗片麻岩,上覆地层为第四系 (图 2a)。区内第四系松散沉积物覆盖较厚,未识别出断裂构造。矿区内大面积出露晚侏罗世二长花岗岩,总面积约 2.5 km²,呈岩株状侵入于红旗营子群花岗片麻岩中,岩石呈浅肉红色,中细粒花岗结构,矿物组成为钾长石 (35%~40%)、斜长石 (30%~35%)、石英 (25%~30%) 和黑云母 (3%~5%)。区内脉岩也较

为发育,整体走向为 NE 向,包括石英脉、花岗斑岩脉和闪长岩脉,侵入花岗片麻岩和二长花岗岩中。其中,石英脉宽约 0.1~1 m;花岗斑岩脉呈灰白色,宽约 2 m;闪长岩脉宽 3~5 m。

钻探工程验证红旗营子群花岗片麻岩下部可见隐伏的花岗岩体 (图 2b),侵入于上部花岗片麻岩中,接触带附近钼矿化明显。岩体中发育有石英细脉 (图 3a),宽度为 1~5 cm,可见辉钼矿化。花岗岩呈灰白色,中细粒花岗结构,块状构造,矿物组成为斜长石 (35%~40%)、石英 (30%~35%)、钾长石 (25%~30%) 及黑云母 (<5%),还发育锆石、榍石、磁铁矿等副矿物。其中,斜长石绢云母化蚀变严重,钾长石也发生轻微高岭土化,黑云母可见绿泥石化

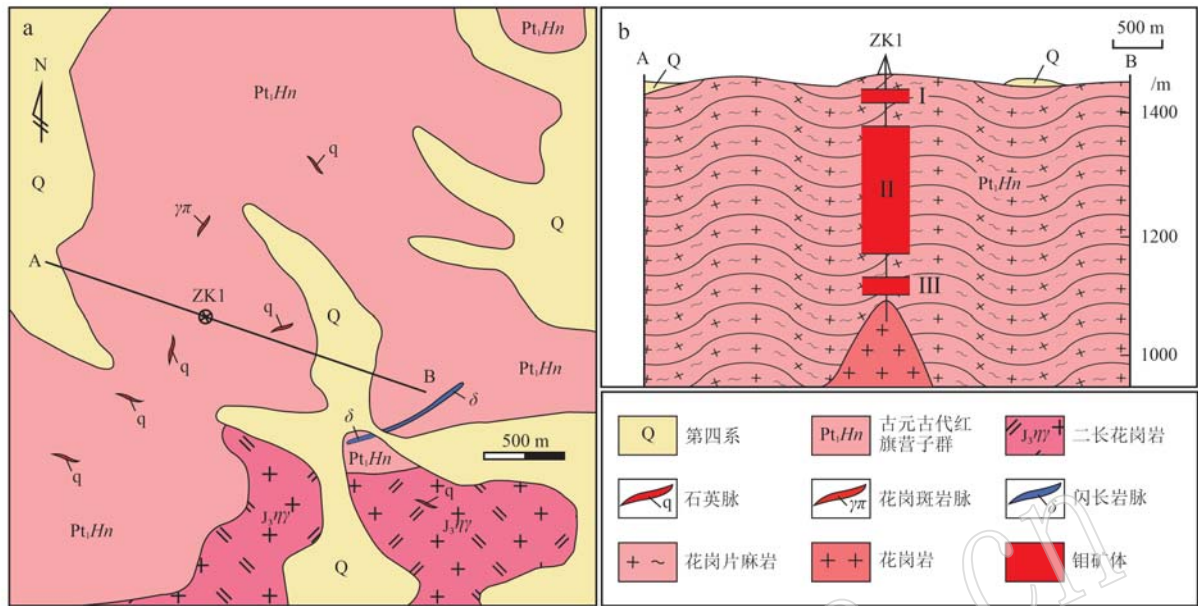


图2 兰峡沟矿区地质图(a)及A—B剖面图(b)

Fig. 2 Geological map (a) and A—B cross-section map (b) of Lanxiagou mining area

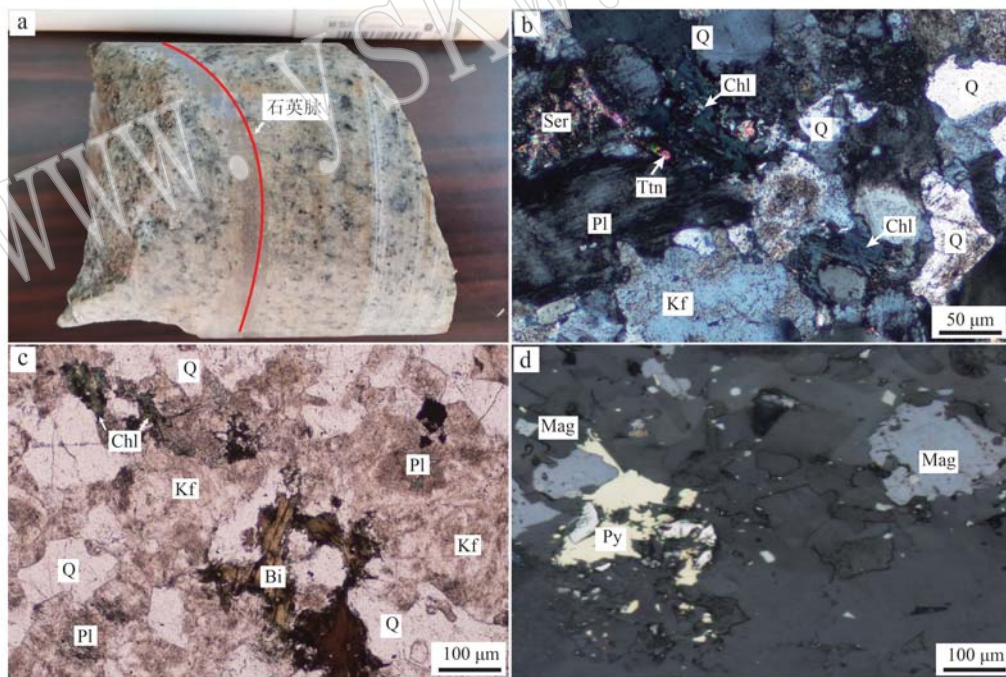


图3 兰峡沟花岗岩手标本(a)及显微照片(b, c, d)

Fig. 3 Hand specimens (a) and micrographs (b, c, d) of Lanxiagou granite

a—花岗岩手标本及石英细脉; b—花岗岩中发育榍石、绿泥石化和绢云母化蚀变(正交偏光); c—黑云母绿泥石化及铁染现象(单偏光); d—黄铁矿与磁铁矿共生(反射光); Q—石英; Pl—斜长石; Kf—钾长石; Bi—黑云母; Chl—绿泥石; Ser—绢云母; Mag—磁铁矿;

Py—黄铁矿; Ttn—榍石

a—granite specimens and quartz veins; b—alteration of chlorite and sericite (cross-polarized light); c—biotite chlorite and iron staining (plane-polarized light); d—pyrite is symbiotic with magnetite (reflected light); Q—quartz; Pl—plagioclase; Kf—K-feldspar; Bi—biotite; Chl—chlorite; Ser—sericite; Mag—magnetite; Py—pyrite; Ttn—titanite

(图 3b, 3c)。

据初步勘查结果及调研资料,矿区发育 3 条硫化矿体, II 号矿体为主矿体。矿体呈不规则透镜状产出,均赋存于红旗营子群花岗片麻岩中(图 2b)。围岩中还零星发育浸染状辉钼矿化,规模较小,不构成工业矿体。矿石构造主要有细脉状构造和浸染状构造。矿石矿物主要为辉钼矿和黄铁矿,还有少量磁铁矿。脉石矿物以石英、钾长石、斜长石为主,还有少量黑云母、绢云母、绿帘石及绿泥石等。

矿床围岩蚀变发育,蚀变类型主要有硅化、黄铁矿化、钾化、绿泥石化及黏土化。其中黄铁矿化多见于钻孔岩心中,为含硫热液作用的产物,与钼矿化关系密切。

3 样品采集及测试分析

本次研究在仔细观察兰峡沟矿区花岗岩岩心基础上,采集 6 件代表性样品。新鲜样品在中国地质大学(北京)粉碎至 200 目,在廊坊河北省区域地质调查院实验室进行全岩主量、微量元素分析,实验温度为 18~27℃。样品的主量元素是利用 X 荧光光谱仪,依据 X 射线荧光光谱法测定的;微量元素和稀土元素则是通过 ICP-Q 电感耦合等离子体质谱仪测定的,测定的主量及微量元素误差均小于 5%,烧失量则是利用 P124S 电子分析天平确定的。矿物电子探针成分分析在中国地质科学院电子探针实验室完成,所用仪器型号为 JXA-8100 电子探针显微分析仪,分析测试参数设置为:加速电压 15 kV,电流 2.0×10^{-8} nA,摄谱时间 10 s,束斑直径 5 μm 。通过

ZAF 修正法对所得结果进行校正。

锆石单矿物挑选、制靶及显微照相工作均是在河北省区域地质调查院实验室完成的。先将原岩样品研磨至 300 目,通过常规重选和电磁选后,在双目镜下挑选晶形完整、透明度和色泽度较好的锆石,并将挑选出的锆石颗粒放置在 DEVCON 环氧树脂中,在固结后对其进行抛磨,使得锆石内部充分暴露,随后对其进行阴极发光照相,并标记出合适的点位对其进行 U-Pb 定年分析。锆石 U-Pb 测年及 Lu-Hf 同位素分析在中国地质大学(北京)科学研究院矿物激光微区分析实验室完成,仪器型号为 Neptune plus 多接收等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)。激光剥蚀的斑束为 23 μm ,能量密度为 13~14 J/cm²,频率为 8~10 Hz,激光剥蚀物质以 He 为载气送入。锆石标样为 TEMORA 标准锆石,灵敏度均 >40 V/ppm。锆石 Lu-Hf 同位素分析是在锆石 U-Pb 分析点位或附近完成的,基于锆石的 U-Pb 年龄计算得出。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 测年

在样品 23DM18 中挑选了 18 颗锆石用于 U-Pb 定年,锆石一般为无色透明,细长的自形-半自形棱柱状,晶粒长 150~300 μm ,长宽比为 1.5:1 至 2:1。大多数锆石在 CL 阴极发光图像上都具有典型的震荡环带(图 4a),表现出岩浆锆石的特征。

锆石的 Th 和 U 含量分别为 $187 \times 10^{-6} \sim 1626 \times 10^{-6}$ 和 $230 \times 10^{-6} \sim 2640 \times 10^{-6}$,对应的 Th/U 值为 0.39~1.26,且 Th 含量与 U 含量具有正相关关系(表 1),

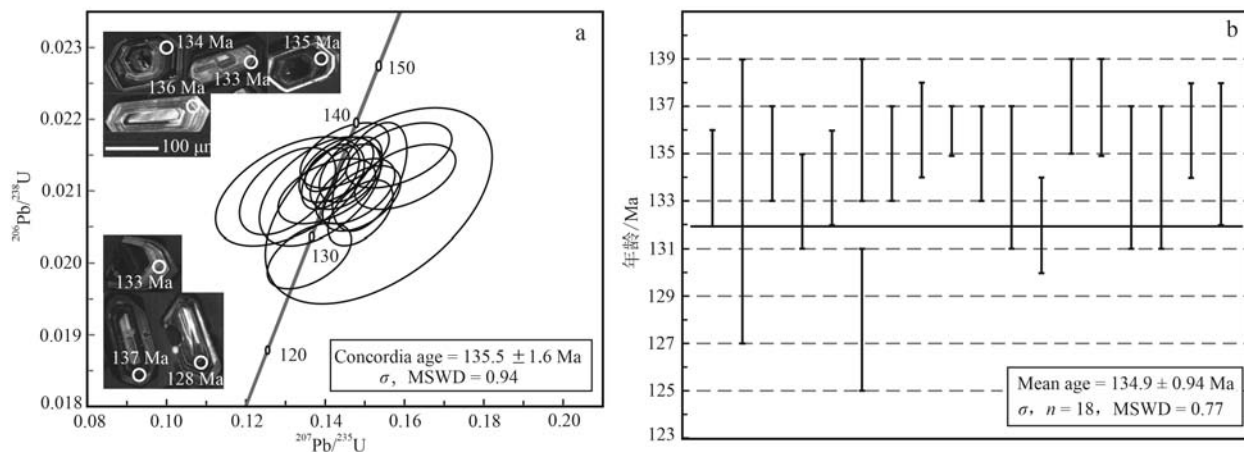


图 4 兰峡沟花岗岩中锆石阴极发光图像及谐和年龄图

Fig. 4 CL images and concordia diagrams of zircon ages for the Lanxiagou granite

表1 兰峡沟花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic data for the Lanxiagou granite

序号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值						年龄/Ma			
	Pb	U	Th		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	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
01	55	1 143	621	0.54	0.048 3	0.002 7	0.140 4	0.008 1	0.021 0	0.000 3	133	7	134	2
02	58	1 094	595	0.54	0.055 8	0.007 0	0.153 5	0.018 9	0.020 8	0.000 9	145	16	133	6
03	80	2 640	1 136	0.43	0.049 3	0.002 0	0.145 3	0.006 0	0.021 2	0.000 3	138	5	135	2
04	75	1 817	1 263	0.70	0.051 8	0.002 4	0.149 2	0.006 5	0.020 9	0.000 3	141	6	133	2
05	27	549	357	0.65	0.050 7	0.002 2	0.147 6	0.006 6	0.021 0	0.000 3	140	6	134	2
06	12	230	187	0.81	0.047 8	0.002 7	0.136 0	0.007 0	0.020 1	0.000 3	130	6	128	3
07	81	1 737	1 626	0.94	0.048 3	0.001 7	0.141 3	0.004 8	0.021 2	0.000 3	134	4	135	2
08	35	849	724	0.85	0.048 6	0.002 2	0.142 8	0.006 2	0.021 3	0.000 3	136	6	136	2
09	48	981	603	0.61	0.047 8	0.001 3	0.140 5	0.003 7	0.021 3	0.000 2	134	3	136	1
10	51	1 238	1 028	0.83	0.055 3	0.003 0	0.160 2	0.008 4	0.021 2	0.000 3	151	7	135	2
11	34	699	410	0.59	0.049 7	0.006 1	0.131 1	0.012 4	0.021 0	0.000 5	125	11	134	3
12	47	302	272	0.90	0.052 1	0.001 9	0.148 9	0.005 4	0.020 7	0.000 3	141	5	132	2
13	61	666	549	0.82	0.053 6	0.003 8	0.158 6	0.008 8	0.021 5	0.000 3	149	8	137	2
14	47	536	253	0.47	0.049 0	0.002 6	0.144 9	0.007 4	0.021 5	0.000 3	137	7	137	2
15	79	602	577	0.96	0.048 1	0.002 9	0.138 7	0.010 1	0.021 0	0.000 5	132	9	134	3
16	63	1 145	1 448	1.26	0.050 7	0.005 3	0.130 5	0.008 0	0.021 0	0.000 4	125	7	134	3
17	27	592	421	0.71	0.051 1	0.002 9	0.146 4	0.005 2	0.021 3	0.000 3	139	5	136	2
18	27	482	187	0.39	0.051 9	0.003 0	0.151 2	0.006 2	0.021 2	0.000 5	143	6	135	3

说明其为岩浆锆石。所有分析点均位于谐和曲线附近或与其重叠的区域内(图4a), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 128~137 Ma, 加权平均年龄为 134.9 ± 0.94 Ma (图4b)。这些年龄数据代表了花岗岩的结晶(侵位)年龄。

4.2 地球化学特征

分析结果表明(表2), 样品的烧失量为 0.53%~0.94%, 平均 0.78%, 说明样品新鲜。所有样品具有较高的 SiO_2 含量和全碱($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$)含量, 分别为 75.41%~76.21% 和 8.04%~8.73%, 较高的 Al_2O_3 和 K_2O 含量, 分别为 12.19%~12.64% 和 4.67%~5.18%, 以及较低的 CaO 含量, 0.44%~0.85%。样品的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 1.26~1.50, 在($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$)- SiO_2 图解中, 与同时期发育的青羊沟正长花岗岩均落在了花岗岩区域内(图5a)。其 A/CNK 和 A/NK 值分别为 1.02~1.08 和 1.10~1.15, 为弱过铝质花岗岩(图5b)。

样品的稀土元素总含量(ΣREE)为 95.68×10^{-6} ~ 113.58×10^{-6} (表2), 其稀土元素球粒陨石标准化配分图(图6a)显示出平坦的轻稀土分布模式, Eu 负异常明显($\delta\text{Eu}=0.31\sim0.40$), 富集轻稀土元素而亏损重稀土元素的特征[LREE/HREE 值为 10.54~13.14, (La/Yb)_N 值为 11.95~14.98]。在微量元素原始地幔标准化蛛网图中(图6b), 样品表现出富集

Rb、Th、U 等大离子亲石元素, 亏损 Nb、P、Ti 等高场强元素的特征。哈克图解显示 Al_2O_3 、 TiO_2 及 P_2O_5 与 SiO_2 含量呈负相关关系(图7a~7c)。

4.3 锆石 Hf 同位素组成

锆石原位 Hf 同位素组成分析是在与 U-Pb 测年重叠或邻近区域完成的, 锆石的 Hf 同位素组成 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 、单阶段模式年龄 t_{DM1} (Hf) 及二阶段模式年龄根据其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄计算得出(表3)。

分析结果表明(表3), 锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.000 50~0.001 74, 均小于 0.002, 说明锆石中存在少量放射性 Hf, 因此其 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值可以代表锆石形成过程中的 Hf 同位素组成。所有锆石的原始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.282 18~0.282 27, 平均为 0.282 23, 对应的 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 为 -18.16~-14.76, 平均为 -16.46, 单阶段模式年龄 t_{DM1} (Hf) 及二阶段模式年龄 t_{DM2} (Hf) 分别为 1 514~1 366 Ma 和 2 570~2 117 Ma。

4.4 矿物成分特征

矿物成分分析结果表明(表4、表5), 花岗岩中黑云母和斜长石的氧化物总质量分数分别为 95.13%~96.01% 和 99.09%~99.90%, 均在允许误差范围内。其中, 黑云母的 SiO_2 为 35.67%~37.76%, TiO_2 为 1.91%~2.95%, Al_2O_3 为 14.94%~16.43%, FeO^T 为 19.75%~23.30%, MgO 为 7.11%~9.97%, Na_2O 为 0.05%~0.10%, K_2O 为 9.88%~

表 2 兰峡沟花岗岩主量 ($w_B/\%$)、微量 ($w_B/10^{-6}$) 元素
分析结果

Table 2 Results of major ($w_B/\%$) and trace ($w_B/10^{-6}$)
element analysis for the Lanxiagou granite

样品号	23DM13	23DM14	23DM15	23DM16	23DM17	23DM18
SiO ₂	75.60	75.78	76.21	75.43	75.41	75.74
Al ₂ O ₃	12.64	12.46	12.19	12.40	12.52	12.43
TiO ₂	0.21	0.22	0.20	0.22	0.23	0.21
Fe ₂ O ₃	0.41	0.44	0.36	0.50	0.54	0.46
FeO	0.81	0.84	0.78	0.79	0.85	0.74
CaO	0.55	0.45	0.84	0.80	0.44	0.85
MgO	0.28	0.30	0.28	0.32	0.34	0.26
K ₂ O	5.09	5.06	4.72	4.67	5.18	4.94
Na ₂ O	3.65	3.55	3.32	3.71	3.48	3.29
MnO	0.024	0.016	0.025	0.024	0.017	0.020
P ₂ O ₅	0.049	0.052	0.046	0.052	0.054	0.049
LOI	0.53	0.68	0.89	0.94	0.77	0.86
Total	99.84	99.85	99.86	99.86	99.83	99.85
A/CNK	1.02	1.04	1.02	1.04	1.07	1.08
A/NK	1.10	1.10	1.15	1.11	1.10	1.15
Mg [#]	43.66	46.94	43.76	43.37	44.30	45.23
K ₂ O/Na ₂ O	1.40	1.42	1.42	1.26	1.49	1.50
Na ₂ O+K ₂ O	8.73	8.61	8.04	8.37	8.67	8.23
La	22.00	26.50	23.50	24.00	23.00	23.60
Ce	42.60	50.80	45.20	45.20	44.80	46.40
Pr	4.71	5.55	4.90	4.97	4.95	4.86
Nd	16.10	18.30	16.20	16.60	16.50	15.70
Sm	2.80	3.24	2.80	2.87	3.06	2.63
Eu	0.34	0.31	0.27	0.30	0.31	0.28
Gd	2.32	2.73	2.42	2.55	2.68	2.37
Tb	0.33	0.39	0.35	0.36	0.39	0.32
Dy	1.82	2.27	1.98	2.00	2.35	1.83
Ho	0.32	0.41	0.35	0.36	0.42	0.34
Er	0.89	1.09	0.94	0.93	1.13	0.83
Tm	0.17	0.23	0.20	0.20	0.22	0.18
Yb	1.09	1.51	1.31	1.28	1.38	1.13
Lu	0.19	0.25	0.22	0.21	0.22	0.19
ΣREE	95.68	113.58	100.64	101.83	101.41	101.66
LREE/HREE	12.42	11.79	11.95	11.91	10.54	13.14
(La/Yb) _N	14.48	12.59	12.87	13.45	11.95	14.98
δEu	0.40	0.31	0.31	0.33	0.32	0.34
Y	11.6	15.30	13.00	13.40	14.30	12.40
Rb	287.00	240.00	246.00	233.00	228.00	241.00
Ba	175.00	179.00	149.00	149.00	147.00	146.00
Th	30.90	26.90	29.10	28.70	27.70	23.70
U	2.94	2.07	8.68	6.16	1.88	6.20
Nb	24.60	31.00	32.30	28.40	28.80	25.00
Ta	18.60	19.60	18.80	19.40	19.90	16.20
Sr	81.50	69.40	78.40	76.60	76.20	70.40
Zr	119.00	138.00	125.00	136.00	127.00	110.00
Hf	4.28	5.12	5.02	4.85	5.03	3.92
t _{Zr} /°C	762	776	767	771	769	756

10.13%, 总体表现出高 Mg、Fe、K, 低 Ca、Na 的特征; 斜长石的 SiO₂ 为 66.08% ~ 68.42%, Al₂O₃ 为 19.23% ~ 20.31%, FeO^T 为 0.01% ~ 0.28%, CaO 为 0.07% ~ 2.04%, Na₂O 为 10.10% ~ 11.41%, K₂O 为 0.06% ~ 0.16%, 总体表现出高 Al、Na, 低 K、Ca 的特征。

以 22 个 O 原子数为基础计算得出了黑云母的阳离子数及其他参数, 其中 Fe²⁺ 和 Fe³⁺ 值通过待定阳离子数法计算得出。黑云母的 X_{Mg} 为 0.35 ~ 0.47, MF 为 0.35 ~ 0.47, Mg[#] 为 0.38 ~ 0.51。在黑云母 $Mg^{2+} - (Al^{VI} + Fe^{3+} + Ti^{4+}) - (Fe^{2+} + Mn^{2+})$ 分类图解 (图 8a) 中, 样品均落在了铁质黑云母区域。

花岗岩中斜长石成分变化较小, 表现出高 Ab 值 (Ab_{89.12} ~ Ab_{99.20}), 低 An (An_{0.32} ~ An_{9.94}) 和 Or 值 (Or_{0.35} ~ Or_{0.94}) 的特点, 样品点均落在了长石分类图解中 (图 8b) 的钠长石区域。

5 讨论

5.1 岩浆活动时代

本次研究利用样品锆石 U-Pb 定年测定出花岗岩的岩浆结晶年龄为 134.9 ± 0.94 Ma, 表明该花岗岩为早白垩世岩浆活动的产物。

区域上有许多岩性相近的侵入岩体, 如象山花岗闪长岩、大湾流纹斑岩、青羊沟二长花岗岩和王安镇杂岩体等。其中, 王安镇杂岩体由石英闪长岩和花岗闪长岩组成, 前者侵位年龄为 128.3 ± 1.9 Ma, 而后者形成于 129.8 ± 2.7 Ma (张海东等, 2016); 象山花岗闪长岩的侵位年龄为 137.0 ± 2.0 Ma (甄世民等, 2021); 而青羊沟黑云母二长花岗岩的锆石定年结果为 130.0 ± 2.0 Ma (甄世民等, 2021); 张家口组喷出岩的流纹岩和粗面岩的锆石 U-Pb 年龄分别为 135.0 ± 2.0 Ma 和 127.8 ± 3.9 Ma (李创举等, 2012; 甄世民等, 2021), 均与本区花岗岩的年龄相近, 说明该花岗岩形成于早中生代一次重要岩浆活动事件。

在华北克拉通北缘中段还发育有与钼矿化密切相关的岩体, 例如大湾、曹四夭、大草坪和北栅子岩体等, 这些岩体形成于 130.5 ± 1.5 Ma ~ 148.5 ± 1.2 Ma (段焕春等, 2007; 李创举等, 2012; Wu *et al.*, 2017; Zhou *et al.*, 2019; 田林等, 2021), 与本区的岩浆活动时限一致, 表明早中生代岩浆活动事件同时伴生成矿作用。

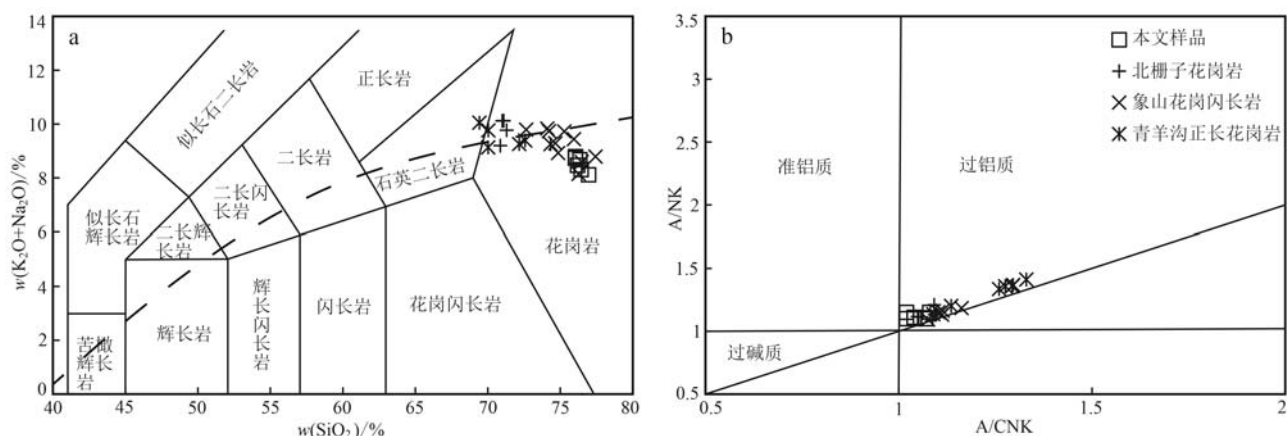


图5 兰峡沟花岗岩 $(K_2O+Na_2O)-SiO_2$ 图解(a, 据 Middlemost, 1994)及 $A/NK-A/CNK$ 图解(b, 据 Manilar and Piccoli, 1989; 北栅子花岗岩、曹四天正长花岗斑岩、青羊沟正长花岗岩据李创举等, 2012; Wu *et al.*, 2017; 甄世民等, 2021)

Fig. 5 Diagrams of $(K_2O+Na_2O)-SiO_2$ (a, after Middlemost, 1994) and $A/NK-A/CNK$ (b, after Manilar and Piccoli, 1989; Beizhazi granite, Caosiyao syenogranite porphyry and Qingyanggou syenogranite according to Li Chuangju *et al.*, 2012; Wu *et al.*, 2017; Zhen Shimin *et al.*, 2021)

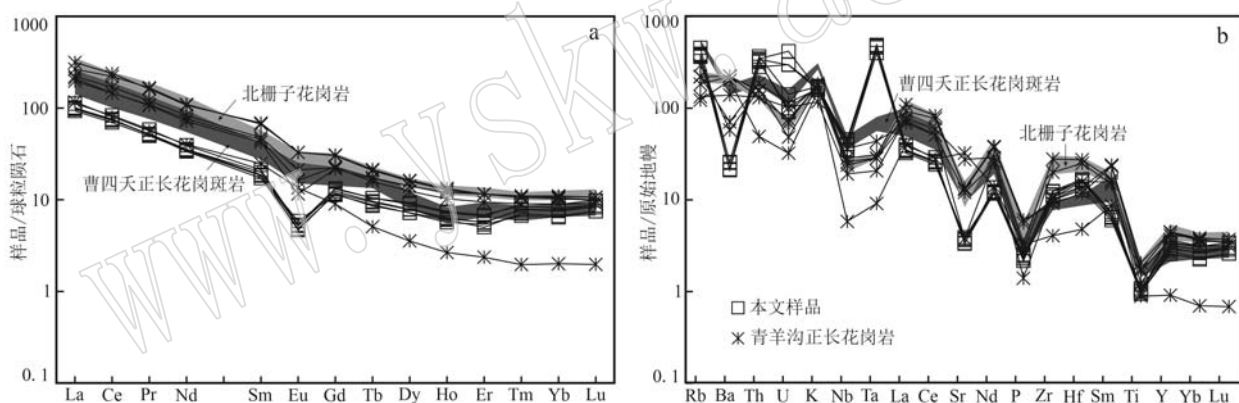


图6 兰峡沟花岗岩球粒陨石标准化稀土元素配分图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b) (球粒陨石及原始地幔的标准化数值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 Diagrams of chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive-mantle-normalized multi-elements spidergrams (b) (standardized values according to Sun and McDonough, 1989) for the Lanxiagou granite

由此可以看出,兰峡沟花岗岩体与冀北地区岩浆活动和伴生成矿作用时限一致,是华北克拉通北缘早中生代大规模岩浆活动和伴生成矿作用的产物。

5.2 岩石类型及成因

兰峡沟花岗岩具有高的 SiO_2 、 K_2O 和全碱含量以及低的 CaO 、 MgO 、 Ba 和 Sr 含量,与 A 型花岗岩相似(Whalen *et al.*, 1987),其较低的 $Zr+Nb+Y+Ce$ 含量、10 000 Ga/Al 和 FeO^T/MgO 值不同于典型的 A 型花岗岩,表现出高分异花岗岩的特征(Eby, 1992; King *et al.*, 1997)。由于样品低的 P_2O_5 含量和

A/CNK 值,它们不同于 S 型花岗岩(Chappell and White, 1992)。样品中 P_2O_5 与 SiO_2 含量呈负相关(图 7c),且 Th 含量与 Rb 含量呈正相关关系(Chappell, 1999),与 I 型花岗岩特征一致。黑云母的 MF 指数可用于区分 I 型($MF>0.38$)和 S 型($MF<0.38$)花岗岩(杨阳等, 2017),兰峡沟花岗岩中黑云母 MF 值为 0.35~0.47,具有较高的氧化系数(0.11~0.22)和 $Mg^{\#}$ 值(0.38~0.51),均表明其为 I 型花岗岩系列。在黑云母 Al_2O_3-MgO 图解(图 9a)和 $MgO-FeO^T-Al_2O_3$ 图解(图 9b)中,大多数样品落了造山带钙碱性岩系区域,少数样品落在了靠近造山带钙

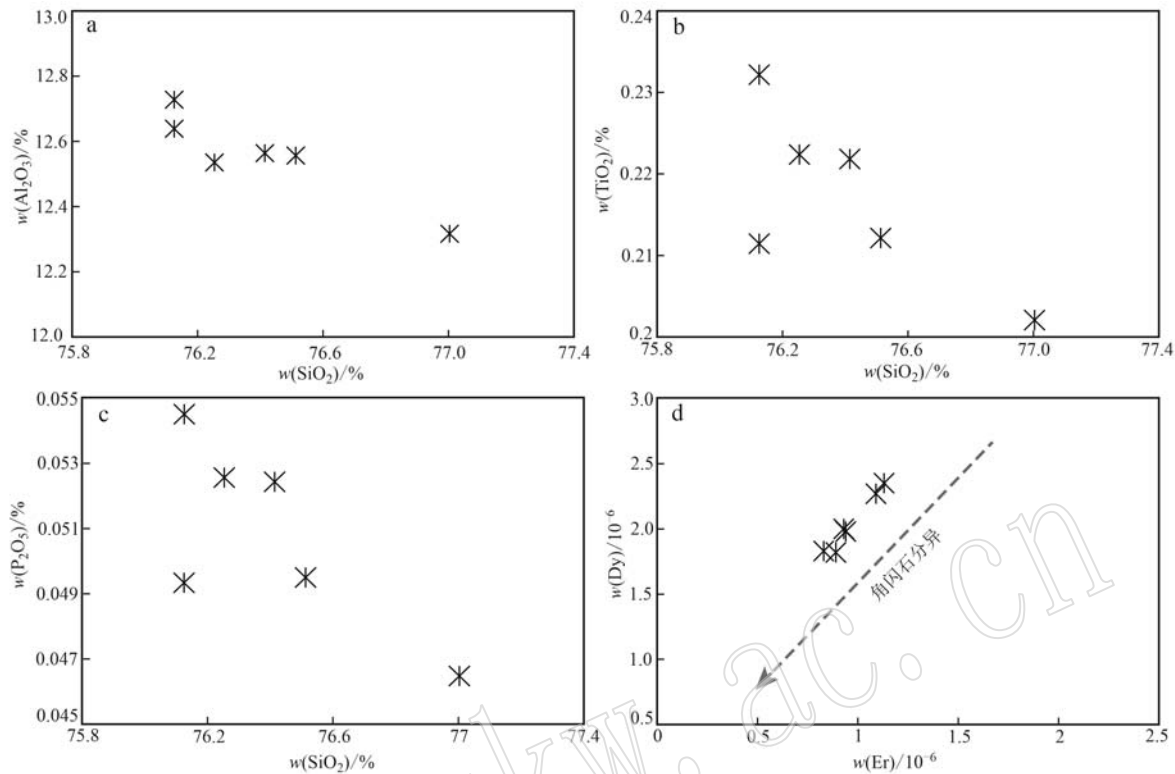


图 7 兰峡沟花岗岩主量元素哈克图解(a、b、c)和 Dy-Er 图解(d)
Fig. 7 The Haker diagrams (a, b, c) and Dy-Er diagram (d) for the Lanxiagou granite

表 3 兰峡沟花岗岩锆石 Hf 同位素组成
Table 3 In situ zircon Hf isotope compositions for the Lanxiagou granite

序号	年龄/Ma	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\varepsilon\text{Hf}(0)$	$\varepsilon\text{Hf}(t)$	t_{DM1}/Ma	t_{DM2}/Ma
01	134	0.000 58	0.000 01	0.282 27	0.000 03	-17.65	-14.76	1 366	2 117
02	133	0.000 76	0.000 01	0.282 22	0.000 02	-19.66	-16.82	1 452	2 475
03	135	0.000 50	0.000 01	0.282 24	0.000 03	-18.78	-15.86	1 407	2 413
04	133	0.001 31	0.000 01	0.282 23	0.000 02	-19.24	-16.44	1 456	2 443
05	134	0.001 16	0.000 01	0.282 24	0.000 02	-18.92	-16.09	1 438	2 421
06	128	0.000 55	0.000 01	0.282 20	0.000 02	-20.30	-17.54	1 468	2 525
07	135	0.001 19	0.000 05	0.282 23	0.000 03	-19.27	-16.42	1 453	2 445
08	136	0.000 92	0.000 01	0.282 22	0.000 03	-19.70	-16.80	1 459	2 475
09	136	0.001 23	0.000 03	0.282 24	0.000 03	-18.96	-16.09	1 442	2 422
10	135	0.001 29	0.000 01	0.282 20	0.000 03	-20.30	-17.46	1 497	2 516
11	134	0.000 69	0.000 02	0.282 25	0.000 03	-18.64	-15.76	1 409	2 404
12	132	0.001 00	0.000 03	0.282 26	0.000 03	-18.28	-15.48	1 406	2 379
13	137	0.001 74	0.000 03	0.282 20	0.000 02	-20.26	-17.42	1 514	2 509
14	137	0.000 91	0.000 04	0.282 18	0.000 03	-21.08	-18.16	1 513	2 570
15	134	0.000 52	0.000 03	0.282 21	0.000 03	-19.91	-17.02	1 452	2 493
16	134	0.001 01	0.000 04	0.282 20	0.000 06	-20.26	-17.42	1 485	2 515
17	136	0.001 17	0.000 03	0.282 27	0.000 03	-17.72	-14.84	1 390	2 336
18	135	0.001 38	0.000 03	0.282 26	0.000 04	-18.11	-15.27	1 413	2 363

碱性岩系的过铝质岩系区域,进一步表明样品为 I 型花岗岩(张振等, 2019)。在 $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})/\text{CaO}-(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$ 图解中(图 9c), 样品均落在分异花岗岩区域; 在 $\text{Ce}-\text{SiO}_2$ 花岗岩类型判别图解(图 9d)中, 样品落在了 I 型花岗岩区域。

在矿物组成方面, 兰峡沟花岗岩中未发育白云母等典型 S 型花岗岩的代表性矿物, 发育黑云母等暗色矿物; 结合其地球化学特征和较高的锆饱和温度(756~776℃), 笔者认为兰峡沟岩体为分异 I 型花岗岩。

表 4 兰峡沟花岗岩黑云母电子探针数据

$w_B/\%$

Table 4 Representative electron-microprobe analyses of biotites from the Lanxiagou granite

点号	16-2	16-3	16-4	18-1	18-2-1	18-2-2	18-3-1	18-3-2	18-4	18-5
SiO ₂	37.52	37.61	37.68	35.67	35.85	37.15	37.76	35.81	36.50	37.54
TiO ₂	1.91	2.37	2.43	2.66	2.29	2.59	2.78	2.35	2.76	2.95
Al ₂ O ₃	16.03	15.49	14.94	16.13	16.10	15.67	16.43	16.36	15.86	15.92
FeO ^T	19.75	20.16	19.96	23.30	23.12	21.45	20.02	22.98	22.96	20.76
MnO	0.24	0.21	0.26	0.34	0.42	0.33	0.31	0.37	0.29	0.32
MgO	9.70	9.65	9.97	7.19	7.64	8.13	8.09	7.11	7.61	8.13
CaO	0.02	0.10	0.00	0.65	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
Na ₂ O	0.08	0.09	0.09	0.07	0.10	0.09	0.10	0.09	0.05	0.09
K ₂ O	10.13	10.11	10.05	10.01	10.03	9.88	10.05	10.05	9.97	10.05
Total	95.38	95.85	95.40	96.01	95.58	95.32	95.53	95.13	96.00	95.75
以 22 个 O 原子为基准的离子数										
Si	5.73	5.74	5.77	5.55	5.59	5.73	5.76	5.60	5.64	5.74
^T Al	2.89	2.78	2.69	2.95	2.95	2.85	2.95	3.01	2.89	2.87
Ti	0.22	0.27	0.28	0.31	0.27	0.30	0.32	0.28	0.32	0.34
Fe ³⁺	0.40	0.40	0.40	0.33	0.32	0.47	0.56	0.37	0.41	0.52
Fe ²⁺	2.13	2.17	2.15	2.70	2.69	2.30	1.99	2.64	2.55	2.13
Mg	2.21	2.20	2.28	1.67	1.77	1.87	1.84	1.66	1.75	1.85
Ca	0.00	0.02	0.00	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.01	0.03
K	1.97	1.97	1.96	1.99	1.99	1.94	1.95	2.00	1.96	1.96
X _{Mg}	0.47	0.46	0.47	0.35	0.37	0.40	0.42	0.36	0.37	0.41
MF	0.46	0.46	0.47	0.35	0.37	0.40	0.41	0.35	0.37	0.41
Mg [#]	0.51	0.50	0.51	0.38	0.39	0.44	0.47	0.38	0.40	0.46
Fe ³⁺ /(Fe ³⁺ +Fe ²⁺)	0.16	0.16	0.16	0.11	0.11	0.17	0.22	0.12	0.14	0.20
p/MPa	222	190	164	243	243	210	241	260	222	216
t _{Ti} /°C	599	637	644	644	621	645	657	624	652	666

注：^TAl 为黑云母中 Al 阳离子的总和；FeO^T 为电子探针测试 FeO 质量分数；氧化系数=Fe³⁺/(Fe³⁺+Fe²⁺)；X_{Mg}=Mg/(Fe²⁺+Mg²⁺)；Cr₂O₃ 未参与离子数计算。

表 5 兰峡沟花岗岩斜长石电子探针数据

$w_B/\%$

Table 5 Representative electron-microprobe analyses of plagioclase from the Lanxiagou granite

点号	16-1	16-2	16-3	16-4	18-4	18-5	18-2
SiO ₂	66.81	67.85	66.67	66.08	67.04	66.73	68.42
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
Al ₂ O ₃	20.61	19.59	20.44	20.60	20.55	20.29	19.23
Cr ₂ O ₃	0.02	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
FeO ^T	0.16	0.02	0.01	0.01	0.04	0.13	0.28
MnO	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00
MgO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CaO	2.04	0.84	1.54	1.98	1.90	1.64	0.07
Na ₂ O	10.10	10.76	10.58	10.31	10.25	10.38	11.41
K ₂ O	0.16	0.10	0.06	0.10	0.07	0.11	0.08
Total	99.90	99.21	99.33	99.09	99.89	99.31	99.49
以 8 个 O 原子数为基准							
An	9.94	4.11	7.42	9.52	9.26	7.97	0.32
Ab	89.12	95.30	92.23	89.92	90.31	91.42	99.20
Or	0.94	0.59	0.35	0.56	0.42	0.61	0.48

注：FeO^T 为电子探针测试 FeO 质量分数。

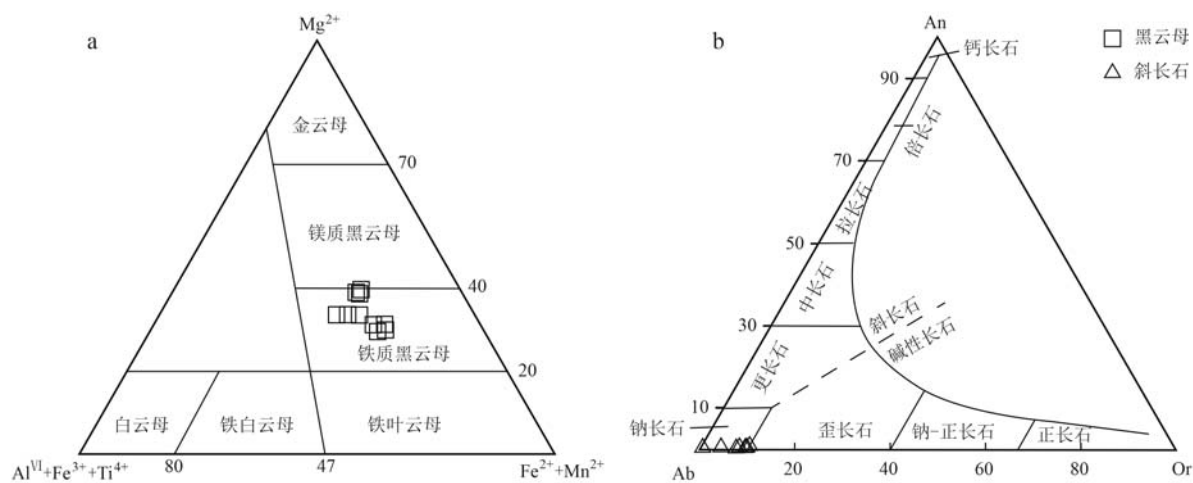


图 8 兰峡沟花岗岩黑云母 $Mg^{2+}-(Al^{VI}+Fe^{3+}+Ti^{4+})-(Fe^{2+}+Mn^{2+})$ 分类图解 (a, 据 Foster, 1960) 及斜长石 An-Ab-Or 分类图解 (b, 据 Deer *et al.*, 1992)

Fig. 8 $Mg^{2+}-(Al^{VI}+Fe^{3+}+Ti^{4+})-(Fe^{2+}+Mn^{2+})$ classification diagram (a, after Foster, 1960) of biotite and An-Ab-Or classification diagram of plagioclase (b, after Deer *et al.*, 1992) from the Lanxiagou granite

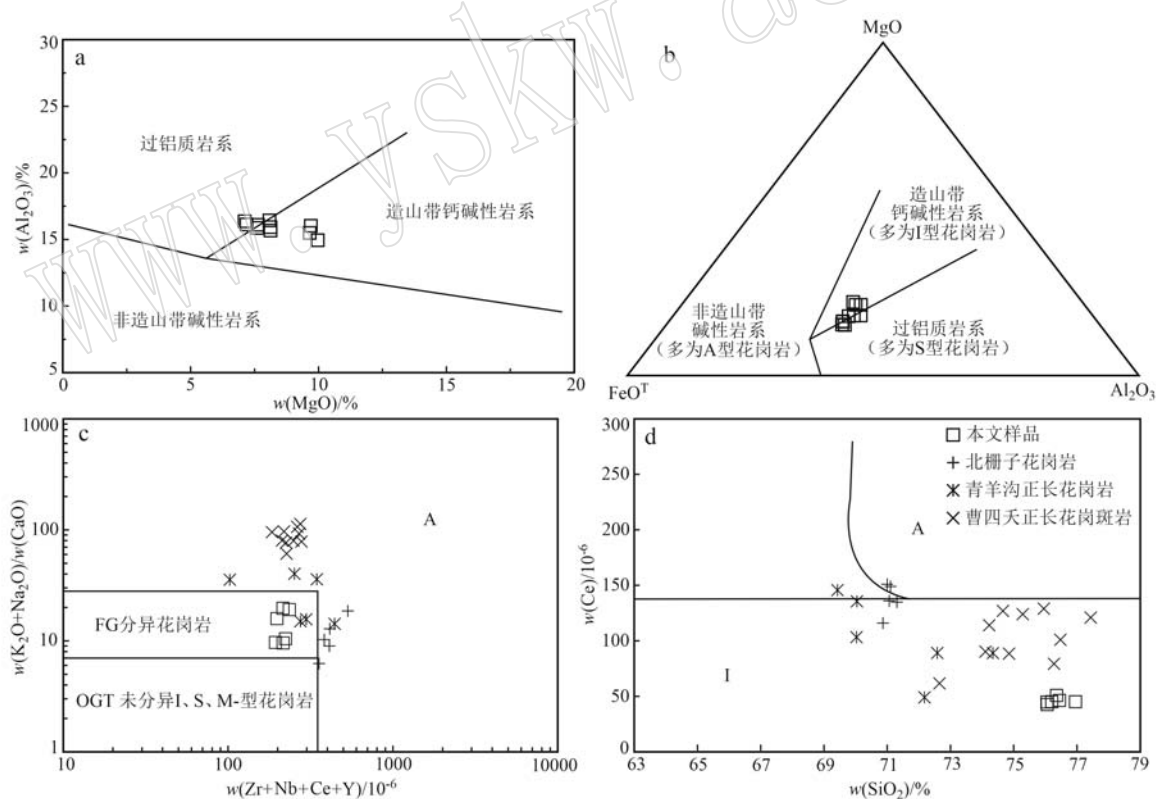


图 9 兰峡沟花岗岩中黑云母 Al_2O_3 -MgO 图解 (a, 据 Abdel-Rahman, 1994), MgO - FeO^T - Al_2O_3 图解 (b, 据 Abdel-Rahman, 1994), 花岗岩的 $(K_2O+Na_2O)/CaO-(Zr+Nb+Ce+Y)$ 图解 (c, 据 Whalen *et al.*, 1987) 及 $Ce-SiO_2$ 图解 (d, 据 Collins *et al.*, 1982)

Fig. 9 Diagrams of Al_2O_3 -MgO (a, after Abdel-Rahman, 1994), MgO - FeO^T - Al_2O_3 (b, after Abdel-Rahman, 1994) of biotite; diagrams of $(K_2O+Na_2O)/CaO-(Zr+Nb+Ce+Y)$ (c, after Whalen *et al.*, 1987) and $Ce-SiO_2$ (d, after Collins *et al.*, 1982) of the Lanxiagou granite

锆石的 Hf 含量随长英质岩浆的结晶分异逐渐增加,而 Th/U 值降低 (Claiborne *et al.*, 2010)。兰峡沟花岗岩锆石表现出相似的 Hf 含量和 Th/U 值变化,且锆石的 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值变化较小,同时岩相学观察发现斜长石未发育环带结构,说明其形成于封闭的岩浆系统,没有受到混染作用影响 (Kemp *et al.*, 2007; Yang *et al.*, 2015)。因此,花岗岩中 SiO_2 与主量和微量元素之间的变化趋势可以反映岩浆的结晶分异过程。

兰峡沟花岗岩表现出与同时期曹四夭、北栅子和青羊沟岩体相似的地球化学特征 (图 7a、7b),即显著亏损 Eu、Ba、Nb、Sr、P 和 Ti 元素,说明其母岩浆可能经历了相似的演化过程。但不同于其他岩体的 Ta 负异常,兰峡沟花岗岩富集 Ta,且 Ta 含量与 Ta/Nb 值呈正相关关系,说明其经历了云母的分异结晶。样品 Dy 与 Er 元素含量呈正相关关系 (图 7d),说明存在角闪石和黑云母的分异结晶 (Drummond *et al.*, 1996)。钾长石作为 Ba 和 Eu 的重要载体矿物 (Rudnick and Gao, 2003),其结晶分异通常会导致 Ba 和 Eu 的负异常; Al_2O_3 与 SiO_2 含量的线性负相关关系被认为是斜长石结晶分异的结果,而强烈 Eu 负异常表明源区可能存在大量斜长石残留。与大多数主要造岩矿物相比,副矿物结晶分异能够强烈分馏稀土元素, TiO_2 与 SiO_2 含量的负相关关系 (图 7b),Nb 和 Ti 的负异常被认为与含 Ti 相矿物 (如钛铁矿、金红石和榍石) 的分异有关 (Wu *et al.*, 2003)。P 的明显负异常以及 P_2O_5 与 SiO_2 含量的负相关关系表明可能经历了磷灰石的结晶分异作用 (图 7c)。

5.3 岩浆源区

对花岗质岩石成因的研究表明,其可能来源于古老地壳物质或新生地壳物质的熔融、幔源岩浆的分异以及壳幔岩浆混合 (Skjerlie and Dana, 1996; Altherr and Siebel, 2002)。

兰峡沟花岗岩具有较高的 SiO_2 、 K_2O 和 Al_2O_3 含量,低的 CaO 、 MgO 、 TiO_2 含量和 $\text{Mg}^\#$ 值,以及富集轻稀土元素和大离子亲石元素,亏损重稀土元素和高场强元素的地球化学特征,与地壳物质部分熔融形成的花岗质岩浆相似 (Barbarin, 1999)。同时样品的 Sr 和 Ba 含量接近大陆地壳平均值,同样指示其来源于地壳 (Rudnick and Fountain, 1995)。

样品的 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值较低且变化幅度较小,为 $-14.76 \sim -18.16$,位于华北富集岩石圈地幔 [$\varepsilon\text{Hf}(t)$

$= -9.0$] 与古老下地壳 [$\varepsilon\text{Hf}(t) = -35$] 之间,说明其源区组分较为单一。所有锆石均具有负的 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值,且显示有古元古代的 Hf 同位素二阶段模式年龄 $t_{\text{DM2}}(\text{Hf})$ ($2\,570 \sim 2\,117\text{ Ma}$),这与古元古代华北克拉通地区地壳增生事件相吻合,因此可以代表岩体的原岩年龄 (Wan *et al.*, 2013)。在 $\varepsilon\text{Hf}(t) - t$ 图解中 (图 10a),所有样品均落在了古元古代地壳 Hf 同位素演化的燕山褶皱冲断带岩浆岩区域 (Yang *et al.*, 2006),而远离 Chen 等 (2009) 提出的东部中亚造山带岩浆岩区。岩体中发育的黑云母均为铁质黑云母 (图 8a),表明其来源于下地壳 (谢应雯等, 1987)。而样品在黑云母 $\text{FeO}^T / (\text{FeO}^T + \text{MgO}) - \text{MgO}$ 图解中 (图 10b) 均落在壳源区。

已有研究表明,岩体地球化学特征可以反映岩浆源区物质组分的差异 (Sylvester, 1998)。本文样品 Rb/Ba 和 Rb/Sr 值分别为 $1.34 \sim 1.65$ 和 $2.99 \sim 3.52$,落在了富黏土-贫斜长石区域 (图 10c);而在限定岩浆源区物质组分的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 判别图解 (图 10d) 中,均落在了泥质熔体区域。以上特征表明兰峡沟花岗岩来源于古元古代下地壳富黏土变质碎屑岩的部分熔融,没有明显的幔源物质输入。

5.4 对钼成矿的意义

Mo 元素在大陆地壳中的丰度要远高于原始地幔,常在结晶分异过程中富集 (Mustard *et al.*, 2006)。岩体结晶过程成矿特点可体现在其形成条件,如温度、氧逸度、压力和侵位深度等方面 (向坤等, 2019)。

本文样品锆石达到饱和状态,可以用于计算岩浆的初始温度。其计算公式 (Watson and Harrison, 1983) 为: $t = 12\,900 / [2.95 + 2.85(\text{Na}^+ + \text{K}^+ + 2\text{Ca}^{2+}) / (\text{Al}^{3+} + \text{Si}^{4+}) + \ln(496\,000 / \text{Zr}_{\text{melt}})] - 273.15$,其中 Zr_{melt} 为熔体中的 Zr 含量,计算得出花岗岩的结晶温度为 $756 \sim 776^\circ\text{C}$ (表 2)。

Henry 等 (2005) 提出了花岗质岩浆体系中黑云母 Ti 地质温度计: $t = \{ [\ln(\text{Ti}) + 2.3594 + 1.7283(X_{\text{Mg}})^3] / 4.6482 \times 10^{-9} \}^{0.333}$, $X_{\text{Mg}} = \text{Mg} / (\text{Mg} + \text{Fe})$ 。利用 Henry 等 (2005) 提出的公式计算结果显示岩浆温度为 $599 \sim 666^\circ\text{C}$ (表 4)。

上面计算结果显示黑云母温度较全岩锆饱和温度低,可能与黑云母、锆石的结晶次序有关。因此,该花岗岩结晶温度为 $599 \sim 776^\circ\text{C}$ 。

已有研究表明,黑云母的 X_{Mg} 值与岩浆流体的

氧逸度正相关,在岩浆流体氧逸度的黑云母 Fe^{3+} - Fe^{2+} - Mg^{2+} 图解(图 11a)中,样品点均落在了 NNO 和 HM 氧逸度缓冲线之间,更接近 NNO 缓冲线,表明岩体氧逸度较高。将黑云母 Ti 地质温度计算结果作

为与黑云母平衡的岩浆温度,通过基于黑云母稳定度 $[100(\text{Fe}/\text{Fe}+\text{Mg})]$ 的 $\log f_{\text{O}_2}$ - t 图解(图 11b)估算出花岗岩体的氧逸度为 $-13.86 \sim -16.07$,表明兰峡沟花岗岩具有相对较高的氧化态(Foley and Wheller, 1990)。

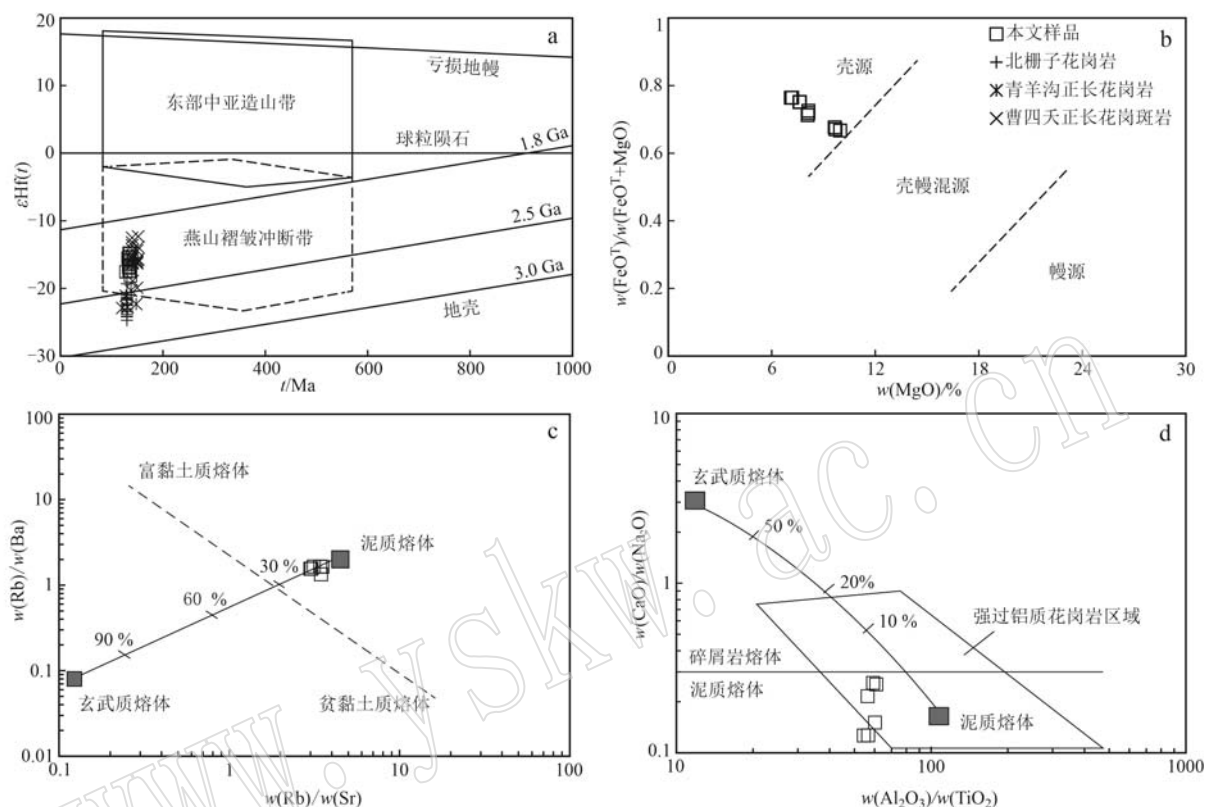


图 10 兰峡沟花岗岩 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ - t 图解(a, 据 Xiao *et al.*, 2004)、黑云母 $\text{FeO}^{\text{T}}/(\text{FeO}^{\text{T}}+\text{MgO})$ - MgO 图解(b, 据周作侠, 1988)、全岩 Rb/Ba - Rb/Sr 图解(c, 据 Sylvester, 1998)和 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ - $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 图解(d, 据 Sylvester, 1998)

Fig. 10 Diagrams of zircon $\varepsilon\text{Hf}(t)$ vs. t (a, after Xiao *et al.*, 2004), $\text{FeO}^{\text{T}}/(\text{FeO}^{\text{T}}+\text{MgO})$ - MgO (b, after Zhou zuoxia, 1988), Rb/Ba - Rb/Sr (c, after Sylvester, 1998) and $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ - $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ (d, after Sylvester, 1998) of the biotites from the Lanxiagou granite

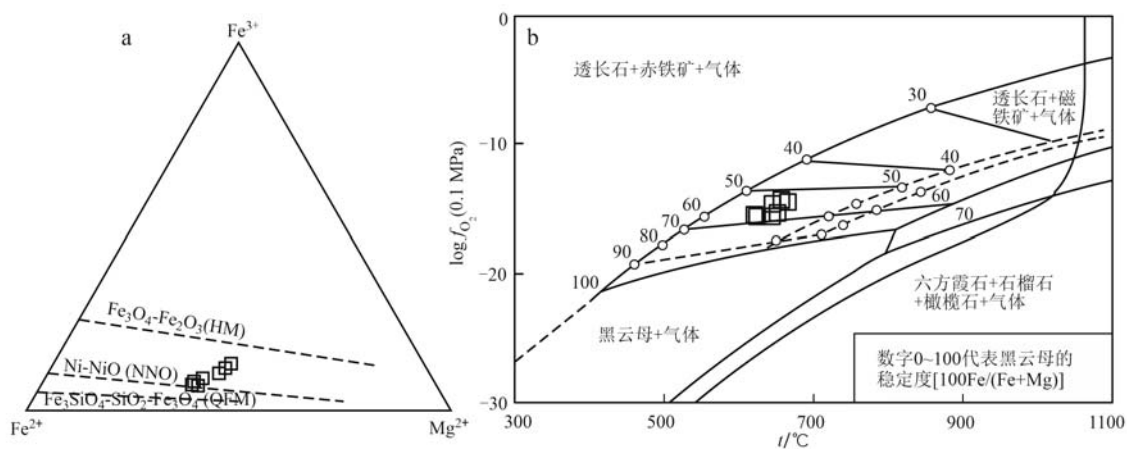


图 11 兰峡沟花岗岩中黑云母的 Fe^{3+} - Fe^{2+} - Mg^{2+} 图解(a)及 $\log f_{\text{O}_2}$ - t 图解(b) (据 Wones and Eugster, 1965)

Fig. 11 Diagrams of Fe^{3+} - Fe^{2+} - Mg (a) and $\log f_{\text{O}_2}$ - t (b) of the biotites from the Lanxiagou granite (after Wones and Eugster, 1965)

黑云母的全铝含量(TAl)与岩体固结压力存在良好的正相关性(Uchida *et al.*, 2007),利用黑云母全铝压力计: $p(kbar) = 3.03 \times TAl - 6.53 (\pm 0.33)$,可以计算岩浆结晶时的压力。其中, TAl 是以22个O原子为基准得出的黑云母中铝离子总数。据此得出兰峡沟花岗岩的结晶压力为164~260 MPa,对应的侵位深度为6.23~9.90 km。

可以看出,兰峡沟花岗岩是由地壳富黏土变质碎屑岩部分熔融后,上侵过程中结晶分异并在有利于成矿的温度和氧逸度条件下形成的,表明岩体具有较好的找矿潜力。

6 结论

(1) 锆石 U-Pb 测年结果表明兰峡沟花岗岩的侵位年龄为 134.9 ± 0.94 Ma,与区域大规模岩浆活动时代一致,为早白垩世岩浆活动的产物。

(2) 岩体为高钾钙碱性系列,弱过铝质 I 型花岗岩,来源于古元古代下地壳富黏土变质碎屑岩的部分熔融,经历了云母、长石及磷灰石等矿物的分离结晶作用。

(3) 黑云母均为铁质黑云母,表现出高 Mg、Fe、K,低 Ca、Na 特征;斜长石具有高的 Ab 值和 Al、Na 含量,为钠长石。

(4) 兰峡沟花岗岩中黑云母具有较高的氧逸度,均位于 NNO 缓冲线以上,其结晶温度为 $599 \sim 776^\circ\text{C}$,固结压力为 164~260 MPa,侵位深度为 6.23~9.90 km。表明岩体形成于有利于成矿的温度和氧逸度条件,具有较好的找矿潜力。

致谢 中国地质科学院毛小红老师和李青林老师在矿物电子探针分析实验中给予了指导与帮助;中国地质大学(北京)科学研究院张亮亮副研究员在锆石 U-Pb 同位素分析和 Hf 同位素分析过程中提供了帮助与指导;匿名审稿专家给出了大量富有建设性的建议和修改意见;在此一并致以诚挚的谢意!

References

Abdel-Rahman A F M. 1994. Nature of biotites from alkaline, calc-alkaline, and peraluminous magmas[J]. *Journal of Petrology*, 35(2): 525~541.

Altherr R and Siebel W. 2002. I-type plutonism in a continental back-arc setting: Miocene granitoids and monzonites from the central Aegean Sea, Greece[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(4): 397~415.

Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments[J]. *Lithos*, 46(3): 605~626.

Chappell B W. 1999. Aluminium saturation in I-and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites[J]. *Lithos*, 46(3): 535~551.

Chappell B W and White A J R. 1992. I-and S-type granites in the Lachlan fold belt[J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 83(1~2): 1~26.

Chen B, Jahn B M and Tian W. 2009. Evolution of the solonker suture zone: Constraints from zircon U-Pb ages, Hf isotopic ratios and whole-rock Nd-Sr isotope compositions of subduction- and collision-related magmas and forearc sediments[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(3): 245~257.

Chen Jingsheng, Li Weiwei, Shi Yi, *et al.* 2022. Evolution of the eastern segment of the northern margin of the North China Craton in the Triassic: Evidence from the geochronology and geochemistry of magmatic rocks in Kaiyuan area, North Liaoning[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 38(8): 2 216~2 248 (in Chinese with English abstract).

Chen P W, Zeng Q D and Zhou T C. 2020. Petrogenesis and Mo prospecting significance of Sadaigoumen granites on the northern margin of the North China Craton[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 214: 106536.

Claiborne L L, Miller C F and Wooden J L. 2010. Trace element composition of igneous zircon: A thermal and compositional record of the accumulation and evolution of a large silicic batholith, Spirit Mountain, Nevada[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160(4): 511~531.

Collins W J, Beams S D, White A J R, *et al.* 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80(2): 189~200.

Cui Kai, Li Lamei, Wu Haoran, *et al.* 2022. Fluid exsolution, evolution for the ore-controlling in Diyanqin'amu porphyry Mo deposit, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 41(6): 1 120~1 134 (in Chinese with English abstract).

Deer W A, Howie R A and Zussman J. 1992. An Introduction to the Rock-forming Minerals. 2 Edition[M]. Harlow: Longman Group: 1~232.

- Dong Pengsheng, Dong Guochen, Sun Zhuanrong, *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).
- Drummond M S, Defant M J and Kepezhinskas P K. 1996. Petrogenesis of slab-derived trondhjemite-tonalite-dacite/adakite magmas [J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 87(1~2): 205~215.
- Duan Huanchun, Qin Zhengyong, Lin Xiaohui, *et al.* 2007. Zircon U-Pb ages of intrusive bodies in Dacaping molybdenum ore district, Fengning County, Hebei Province[J]. *Mineral Deposits*, 26(6): 634~632 (in Chinese with English abstract).
- Eby G N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications[J]. *Geology*, 20(7): 641.
- Foley S F and Wheller G E. 1990. Parallels in the origin of the geochemical signatures of island arc volcanics and continental potassic igneous rocks: The role of residual titanates[J]. *Chemical Geology*, 85(1~2): 1~18.
- Foster M D. 1960. Interpretation of the composition of trioctahedral micas [J]. *Geological Survey Professional Paper*, 354: 1~49.
- Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration. 2022. Report on survey of molybdenum polymetallic mine in Qiandongdamiao, Zhangbei County, Hebei Province[R]. 1~96 (in Chinese).
- Henry D J. 2005. The Ti-saturation surface for low-to-medium pressure metapelite biotites: Implications for geothermometry and Ti-substitution mechanisms[J]. *American Mineralogist*, 90(2~3): 316~328.
- Kemp A I, Hawkesworth C J, Foster G L, *et al.* 2007. Magmatic and crustal differentiation history of granitic rocks from Hf-O isotopes in zircon[J]. *Science*, 315(5814): 980~983.
- King P L, White A J R, Chappell B W, *et al.* 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan fold belt, southeastern Australia[J]. *Journal of Petrology*, 38(3): 371~391.
- Li Chuanju and Bao Zhiwei. 2012. Geochemical characteristics and geodynamic implications of the Early Cretaceous magmatism in Zhangjiakou region, northwest Hebei province, China[J]. *Geochimica*, 41(4): 343~358 (in Chinese with English abstract).
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635~643.
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth-Science Reviews*, 37(3~4): 215~224.
- Mustard R, Ulrich T, Kamenetsky V S, *et al.* 2006. Gold and metal enrichment in natural granitic melts during fractional crystallization[J]. *Geology*, 34(2): 85.
- Niu Xiaolu, Liu Fei, Feng Guangying, *et al.* 2021. Petrogenesis of the Late Silurian to Early Devonian potassic alkaline rocks on the northern margin of the North China Craton and their constraints on the tectonic evolution[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 40(5): 835~858 (in Chinese with English abstract).
- Rudnick R L and Fountain D M. 1995. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective[J]. *Reviews of Geophysics*, 33(3): 267~309.
- Rudnick R L and Gao S. 2003. Composition of the continental crust[J]. *Treatise on Geochemistry*, 3: 659.
- Skjerlie K P and Dana J A. 1996. Vapour-absent melting from 10 to 20 kbar of crustal rocks that contain multiple hydrous phases: Implications for anatexis in the deep to very deep continental crust and active continental margins[J]. *Journal of Petrology*, 37(3): 661~691.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and process[J]. *Geological Society, London, Special Publication*, 42(1): 313~345.
- Sylvester P J. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites[J]. *Lithos*, 45(1~4): 29~44.
- Tian Lin, Zhang Zhiyuan, Wang Zhimin, *et al.* 2021. Zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating of Dawan Zn-Mo deposit in Laiyuan County of Hebei Province and its geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 40(6): 1214~1229 (in Chinese with English abstract).
- Uchida E, Endo S and Makino M. 2007. Relationship between solidification depth of granitic rocks and formation of hydrothermal ore deposits [J]. *Resource Geology*, 57(1): 47~56.
- Wan Y S, Xu Z Y, Dong C Y, *et al.* 2013. Episodic Paleoproterozoic (~2.45, ~1.95 and ~1.85 Ga) mafic magmatism and associated high temperature metamorphism in the Daqingshan area, North China Craton: SHRIMP zircon U-Pb dating and whole-rock geochemistry [J]. *Precambrian Research*, 224: 71~93.
- Wang Y, Zhou L Y, Liu S F, *et al.* 2018. Post-cratonization deformation processes and tectonic evolution of the North China Craton [J]. *Earth-Science Reviews*, 177: 320~365.
- Watson E B and 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(2): 295~304.
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407~419.

- Wones D R and Eugster H P. 1965. Stability of biotite; Experiment, theory and application[J]. American Mineralogist, 50(9): 1 228 ~ 1 272.
- 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 G, Li X Z, Xu L Q, *et al.* 2017. Age, geochemistry, and Sr-Nd-Hf-Pb isotopes of the Caosiyao porphyry Mo deposit in Inner Mongolia, China[J]. Ore Geology Reviews, 81: 706~727.
- Xiang Kun, Xue Chuandong, Xie Zhipeng *et al.* 2019. Petrogenesis of the late Yanshanian Laba granite in northwestern Yunan Province and its metallogenic implications: Evidence from mineral chemistry of biotites and amphiboles[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 38(1): 34~46 (in Chinese with English abstract).
- Xiao W J, Zhang L C, Qin K Z, *et al.* 2004. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the eastern Tianshan (China): Implications for the continental growth of Central Asia[J]. American Journal of Science, 304: 370~395.
- Xie Yingwen and Zhang Yuquan. 1987. Typomorphic peculiarities of biotites from different genetic types of granite in the Hengduan Shan region[J]. Acta Mineralogica Sinica, 7(3): 245~254 (in Chinese with English abstract).
- Yang J H, Wu F Y, Shao J, *et al.* 2006. Constraints on the timing of uplift of the Yanshan fold and thrust belt, North China[J]. Earth and Planetary Science Letters, 246(3~4): 336~352.
- Yang L Q, Deng J, Qiu K F, *et al.* 2015. Magma mixing and crust-mantle interaction in the Triassic monzogranites of Bikou Terrane, Central China: Constraints from petrology, geochemistry, and zircon U-Pb-Hf isotopic systematics[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 98: 320~341.
- Yang Yang, Wang Xiaoxia, Yu Xiaowei, *et al.* 2017. Chemical composition of biotite and amphibole from Mesozoic granites in northwestern Jiaodong Peninsula, China, and their implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 33(10): 3 123~3 136 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Q D, Liu J M, Qin K Z, *et al.* 2013. Types, characteristics, and time-space distribution of molybdenum deposits in China[J]. International Geology Review, 55(11): 1 311~1 358.
- Zeng Qingdong, Liu Jianming, Xiao Wenjiao, *et al.* 2012. Mineralizing types, geological characteristics and geodynamic background of Triassic molybdenum deposits in the northern and southern margins of North China Craton[J]. Acta Petrologica Sinica, 28(2): 357~371 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Haidong, Liu Jianchao, Wang Jinya, *et al.* 2016. Petrology, geochronology and geochemistry characteristics of Wang' anzen complex in the northern Taihang Mountain and their geological significance [J]. Acta Petrologica Sinica, 32(3): 727~745 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Y S, Zhang Y M, Gu X X, *et al.* 2023. Zircon UPb geochronology and Sr-Nd-Pb-Hf isotope geochemistry of the Dahuabei pluton from the northern margin of North China Craton: Implications for petrogenesis, tectonic setting and AuMo mineralization[J]. Lithos, 442: 107078.
- Zhang Zhen, Duan Xiaoxia, Chen Bin, *et al.* 2019. Implications of biotite geochemical characteristics for difference of ore-related magmatic system between Wushan copper deposit and Zhuxiling tungsten deposit[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 38(5): 673~692 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z J, Cheng Q M, Wu G P, *et al.* 2021. Petrogenesis of the Quanzigou porphyry Mo deposit at the northern margin of the North China Craton: Constrains from geochronology, geochemistry, and Sr-Nd-Hf isotopes characteristics[J]. Journal of Geochemical Exploration, 231: 106681.
- Zhen Shimin, Wang Dazhao, Bai Haijun, *et al.* 2021. The Paleozoic-Mesozoic magmatic-tectonic activities and their geological implications in the Zhangjiakou-Xuanhua district, northern margin of the North China Craton[J]. Acta Petrologica Sinica, 37(6): 1 619~1 652 (in Chinese with English abstract).
- Zhou T C, Zeng Q D, Chen P W, *et al.* 2019. The formation of the Caosiyao giant porphyry Mo deposit on the northern margin of the North China Craton: Constraints from U-Pb and Re-Os geochronology, whole-rock geochemistry, Hf isotopes, and oxygen fugacity of the magma[J]. Geological Journal, 54(4): 2 160~2 184.
- Zhou Zuoxia. 1988. Chemical characteristics of mafic mica in intrusive rocks and its geological meaning [J]. Acta Petrologica Sinica, 4 (3): 63~73 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈井胜, 李巍巍, 时 溢, 等. 2022. 华北板块北缘东段三叠纪构造演化——来自辽北开原岩浆岩年代学、地球化学的证据[J]. 岩石学报, 38(8): 2 216~2 248.
- 崔 凯, 李腊梅, 吴皓然, 等. 2022. 内蒙古迪彦钦阿木斑岩钼矿床成矿流体的出溶、演化及对成矿的制约[J]. 岩石矿物学杂志,

- 41(6): 1 120~1 134.
- 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.
- 段焕春, 秦正永, 林晓辉, 等. 2007. 河北丰宁县大草坪钼矿区岩体锆石 U-Pb 年龄研究[J]. 矿床地质, 26(6): 634~642.
- 河北省地质矿产勘查开发局. 2022. 河北省张北县前东大庙钼多金属矿普查报告[R]. 1~96.
- 李创举, 包志伟. 2012. 冀西北早白垩世岩浆岩的地球化学特征及其地球动力学背景[J]. 地球化学, 41(4): 343~358.
- 牛晓露, 刘飞, 冯光英, 等. 2021. 华北克拉通北缘晚志留世-早泥盆世钾质碱性岩的成因及对区域构造演化的限定[J]. 岩石矿物学杂志, 40(5): 835~858.
- 田林, 张志远, 王志敏, 等. 2021. 河北涞源大湾锌钼矿床锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 40(6): 1 214~1 229.
- 向坤, 薛传东, 谢志鹏, 等. 2019. 滇西北拉巴燕山晚期花岗岩岩石成因及其成矿指示——黑云母和角闪石矿物化学证据[J]. 岩石矿物学杂志, 38(1): 34~46.
- 谢应雯, 张玉泉. 1987. 横断山不同成因类型花岗岩类岩石中黑云母的标型特征[J]. 矿物学报, 7(3): 245~254.
- 杨阳, 王晓霞, 于晓卫, 等. 2017. 胶西北中生代花岗岩中黑云母和角闪石成分特征及成岩成矿意义[J]. 岩石学报, 33(10): 3 123~3 136.
- 曾庆栋, 刘建明, 肖文交, 等. 2012. 华北克拉通南北缘三叠纪钼矿化类型、特征及地球动力学背景[J]. 岩石学报, 28(2): 357~371.
- 张海东, 刘建朝, 王金雅, 等. 2016. 太行山北段王安镇杂岩体岩石学、年代学、地球化学特征及地质意义[J]. 岩石学报, 32(3): 727~745.
- 张振, 段晓侠, 陈斌, 等. 2019. 黑云母地球化学特征对武山铜矿和竹溪岭钨矿成矿岩浆体系差异的指示[J]. 岩石矿物学杂志, 38(5): 673~692.
- 甄世民, 王大钊, 白海军, 等. 2021. 华北克拉通北缘张家口-宣化地区古生代-中生代岩浆构造活动与成矿作用[J]. 岩石学报, 37(6): 1 619~1 652.
- 周作侠. 1988. 侵入岩的镁铁云母化学成分特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 4(3): 63~73.