

吕川,陈昌,聂斌.鹿井铀矿田 QF_V 号矿带东段赋矿花岗岩的岩石学、地球化学特征[J].世界核地质科学,2025,42(2):277-290. doi:10.3969/j.issn.1672-0636.2025.02.005

LYU Chuan, CHEN Chang, NIE Bin. Petrography and geochemical characteristics of uranium-bearing granite in the east section of QF_V belt, Lujing uranium ore-field[J]. World Nuclear Geoscience, 2025, 42(2): 277-290(in Chinese).

鹿井铀矿田 QF_V 号矿带东段赋矿花岗岩的 岩石学、地球化学特征

吕川,陈昌,聂斌

1 核工业二七〇研究所,江西 南昌,330200

2 中国地质学会华东放射性矿产勘查技术创新基地,江西 南昌,330200

摘要 鹿井铀矿田 QF_V 号矿带东段下古选地区产出硅质脉型铀矿化,赋矿围岩为中粗粒斑状黑云母花岗岩,近矿热液蚀变以赤铁矿化、硅化、绿泥石化和碳酸盐化为主。锆石U-Pb年代学、岩相学和岩石地球化学分析表明,该赋矿围岩锆石U-Pb谐和年龄为228.3 Ma和加权平均年龄为228.9 Ma,形成于印支期第2阶段(晚三叠世);主量元素具有高钾钙碱性系列弱过铝质花岗岩的特征,硅钛高、镁铁低、略低铝和富碱富钾低钠;微量元素中亏损Ba、Sr和Ti,富集Rb、Th、Pb和Nd,且稀土配分曲线为右倾的轻稀土富集型,轻重稀土分馏明显,Eu负异常明显,与S型花岗岩地球化学特征一致。分析认为,下古选地区赋矿花岗岩可能是上地壳富铝的浅变质岩系在晚三叠世挤压向伸展转换的背景下,因减压增温导致其部分熔融所形成的产物。与正常花岗岩相比较,蚀变(含矿)花岗碎岩具有更高的 SiO_2 含量、成倍数增加的CaO和 P_2O_5 含量以及 Fe_2O_3/FeO 和HREE/LREE比值、高的U和P含量等,这些都指示研究区U的聚集沉淀与P、LREE和HREE的化学活动密切相关。总结的这些化学指标是寻找花岗岩岩体内带硅质脉型铀矿化的有益指示。

关键词 花岗岩型铀矿;岩石地球化学;锆石U-Pb年龄;鹿井矿田

中图分类号 P619.14 文献标志码 A 文章编号 1672-0636(2025)02-0277-14

Petrography and geochemical characteristics of uranium-bearing granite in the east section of QF_V belt, Lujing uranium ore-field

LYU Chuan, CHEN Chang, NIE Bin

1 Research Institute No.270, CNNC, Nanchang 330200, China

2 Innovation Base for Radiometric Mineral Exploration Technology of East China, Nanchang 330200, China

Abstract: In the Xiaguxuan area of the eastern QF_V ore belt in the Lujing uranium ore-field, siliceous vein type uranium mineralization occurs. The ore-bearing rock is medium-coarse-grained porphyritic biotite granite. The hydrothermal alteration near the ore mainly includes hematitization, silicification, chloritization and carbonatization. Zircon U-Pb chronology, petrography and petrogeochemical analysis show that the

基金项目:国家自然科学基金(编号:42062006,42273028)、核资源与环境国家重点实验室开放基金(编号:2020NRE08)和中国核工业地质局地勘项目(编号:202231)联合资助

收稿日期:2025-02-04 改回日期:2025-03-26

第一作者:吕川,男,1984年生,高级工程师,主要从事铀矿地质找矿勘查与研究。E-mail:lv270@163.com

Supported by National Natural Science Foundation (No. 42062006, 42273028), Open Fund for State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment (No. 2020NRE08) and Geological Exploration Project of China Nuclear Geology (No. 202231)

Received date: 2025-02-04 revised date: 2025-03-26

First author: LYU Chuan, male, born in 1984, senior engineer, focusing on uranium geological prospecting exploration and research. E-mail: lv270@163.com

zircon U-Pb concordant age of the uranium-bearing fresh granite is 228.3 Ma and the weighted average age is 228.9 Ma, which was formed in the second stage of the Indosinian period (Late Triassic). The major elements are characterized by high potassium calc-alkaline series and weakly peraluminous granite, with high contents of silicon and titanium, low contents of magnesium and iron, slightly low aluminum, rich in alkalis and potassium and low in sodium. Among the trace elements, Ba, Sr and Ti are depleted, while Rb, Th, Pb and Nd are enriched. The rare earth distribution curve is of light rare earth enrichment type with right inclination, and there is obvious fractionation between light and heavy rare earth elements, with obvious negative Eu anomaly, which is consistent with the geochemical characteristics of S-type granite. It is considered through analysis that the ore-hosting granite in the Xiaguxuan area may be the product formed by the partial melting of the aluminous shallow metamorphic rock series in the upper crust due to decompression and temperature increase under the background of the transition from compression to extension in the Late Triassic. Compared with normal granite, the ore-bearing granite has a higher SiO_2 content, a multiple increase in the contents of CaO and P_2O_5 , as well as the ratios of $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ and HREE/LREE, and high contents of U and P, etc. All these indicate that the aggregation and precipitation of U in the study area are closely related to the chemical activities of P, LREE and HREE. These summarized chemical indexes are useful indicators for searching for siliceous vein type uranium mineralization in the inner zone of the granite body.

Keywords: granite-type uranium mineralization; litho-geochemistry; zircon U-Pb age; Lujing ore-field

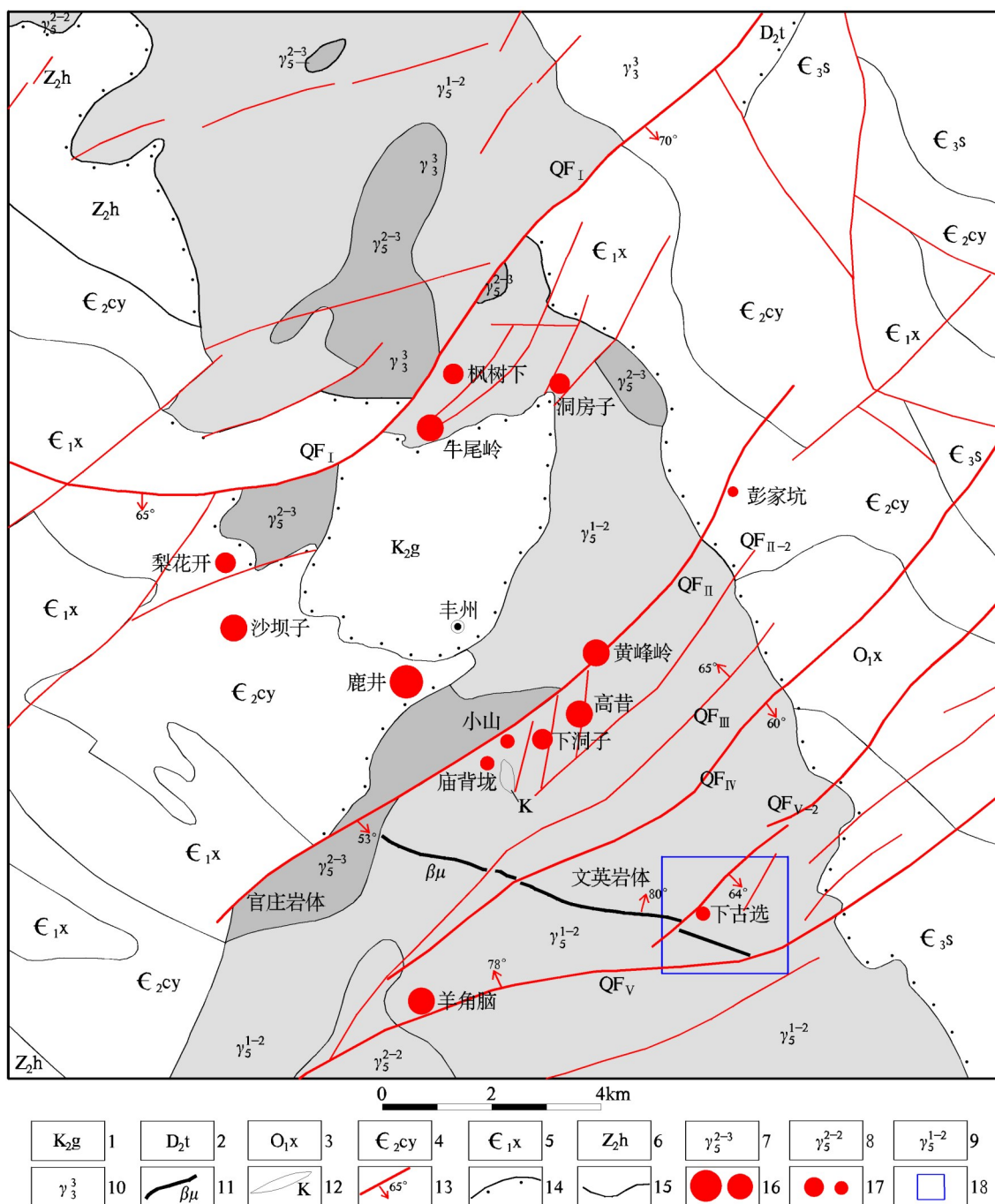
主量元素与大离子亲石元素(Large-ion lithophile element,简称LILE)地球化学组成特征,对蚀变(含矿)花岗碎裂岩在成矿阶段遭受的水-岩作用,即成矿热流体与岩石相互作用和不同元素的迁移估计规律进行有效判别^[1-5]。高场强元素(High field strength elements,简称HFSE)和稀土元素(Rare earth elements,简称REE)因其稳定的地球化学属性,一直是成岩、成矿流体来源的判别依据^[6-8]。鹿井铀矿田是我国南方重要的花岗岩型铀矿田之一,其内出露的印支期文英—热水花岗岩体与铀成矿关系密切。印支运动作为我国地质演化历史中的重要构造事件,对我国南方,特别是诸广地区的地质构造格局、岩浆活动以及铀成矿作用产生了重要影响。印支期花岗岩体为铀矿的形成提供了重要的物质基础和地质条件,是重要赋矿花岗岩体。前人针对鹿井铀矿田及周边地区成矿条件已开展了大量研究工作,在区域地质背景、岩石学特征、构造演化等方面取得了丰富成果^[4-16]。但对于文英—热水花岗岩体的形成机制、地球化学特征以及其与铀成矿之间的内在联系,尚存在诸多有待深入探讨的问题。

本文在观察描述鹿井铀矿田 QF_V号矿带东段下古选地区正常(弱蚀变)花岗岩和蚀变

(含矿)花岗碎裂岩野外露头、室内镜下特征的基础上,通过岩相学、锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学分析,对比它们在主量元素、大离子亲石元素、高场强元素和稀土元素组成的变化特征,梳理总结蚀变(含矿)花岗碎裂岩的特征性地球化学指标,以期在鹿井矿田南部沿 QF_V石英硅化断裂带寻找、扩大花岗岩岩体内带硅质脉型铀矿化,进一步扩大找矿空间和铀资源规模提供有益的指示,为鹿井铀资源基地“探边、摸底、破覆盖”提供技术支撑。

1 矿田地质背景

鹿井铀矿田位于诸广山岩体中段狭窄部位,受SN向万洋—诸广隆起和NE向遂川—热水深断裂双重控制,处于遂川断裂和热水断裂组成的地堑式断陷部位,是NE向桃山—诸广花岗岩型铀成矿带的重要组成部分^[9-10](图1a)。遂川—热水断裂带是华南陆块湘赣边界中生代NE向走滑构造带,南西起广东城口,向北东经湖南热水,穿过鹿井矿田,斜切诸广山岩体,主断裂面多向SE倾斜,倾角较陡(50°~70°),局部断裂面向北西方向陡倾。该断裂控制着鹿井铀矿田、鹿井西南的构造格局和铀矿床、矿点的分布^[11-14],并在鹿井矿田范围内帚状分异为 QF_I、QF_{II}、QF_{III}、QF_{IV}和 QF_V5



1—赣州组; 2—跳马涧组; 3—下黄坑组; 4—茶园头组; 5—香楠组; 6—坝里组; 7—燕山早期第三阶段中细粒二云母花岗岩; 8—燕山早期第2阶段中细粒黑云母花岗岩; 9—印支期第2阶段中粗粒斑状黑云母花岗岩; 10—加里东晚期中粒黑云母花岗岩; 11—燕山晚期辉绿岩脉; 12—碱交代(岩); 13—断裂及产状; 14—不整合接触界线; 15—地质界线; 16—大型、中型铀矿床; 17—小型铀矿床、铀矿点; 18—研究区。

1—Ganzhou formation; 2—Tiaomajian formation; 3—Xiahuangkeng formation; 4—Chayuantou formation; 5—Xiangnan formation; 6—Bali formation; 7—Medium-fine grained two-mica granite in the third stage of the Early Yanshanian period; 8—Medium-fine grained biotite granite in the second stage of the early Yanshanian period; 9—Medium-coarse grained porphyritic biotite granite in the second stage of the Indosinian period; 10—Medium grained biotite granite in the late Caledonian period; 11—Diabase dike in the late Yanshanian period; 12—Alkali metasomatite; 13—Fault and its occurrence; 14—Unconformity contact boundary; 15—Geological boundary; 16—Large and medium-sized uranium deposits; 17—Small uranium deposits and uranium ore occurrences; 18—Study area.

图1 华东南大地构造分区及鹿井铀矿田地质简图(据参考文献[14]修改)

Fig. 1 Tectonic division map of Southeast China and geological sketch of the Lujiing uranium ore field (modified after Reference[14])

条石英硅化断裂带(图 1b)。

鹿井铀矿田已探明鹿井大型铀矿床,黄峰岭、高昔、沙坝子和牛尾岭等中型铀矿床,梨花开、枫树下、洞房子、下洞子和羊角脑等小型铀矿床,以及铀矿点、矿化点 24 个。这些矿床、矿点和矿化点主要沿 NE 向 QF_{I} 、 QF_{II} 、 QF_{V} 断裂带^[12,15]和 NW 向褶皱构造分布,矿体受断裂带、裂隙带、岩体接触带和层间破碎带控制^[16-18]。其中, QF_{I} 断裂带上盘主要分布枫树下、牛尾岭和洞房子矿床以及野猪坑、石万子、蔡家和大场坪矿点,矿化类型以碎裂蚀变岩型为主; QF_{II} 断裂带上下盘及其与 QF_{III} 断裂带夹持区主要分布黄峰岭、高昔和下洞子矿床以及金鸡岭、横坑、小山和集溪矿点,矿化类型均为碎裂蚀变岩型;沿 QF_{V} 断裂带分布有羊角脑矿床和下洞、下古选矿点,矿化类型以硅质脉型为主。

QF_{V} 号矿带东段(下古选地区)主体岩性为印支期第 2 阶段中粗粒斑状黑云母花岗岩,局部出露肉红色钾长石化花岗碎裂岩(碱交代岩)、燕山晚期细粒花岗岩,在 NWW 向断裂内见燕山晚期辉绿岩脉。该地区整体被 NEE 向 QF_{V} 断裂带和 NE 向 QF_{V-2} 断裂斜贯,断裂构造以 NE 向压扭性硅化断裂和 NWW 向张扭性辉绿岩脉为主(图 1b),前者是主要的控(含)矿构造。断裂内及旁侧硅化、钾长石化、赤铁矿化、绿泥石化和水云母化等近矿热液蚀变发育; γ 能谱铀含量高—异常晕与土壤 ^{210}Po 高—异常晕明显受 NE 向断裂控制,空间叠合性好^[14],显示优越的铀成矿地质条件和较好的找矿前景。

2 地质及岩相学特征

2.1 地质特征

研究区内岩体地表露头多为印支期第 2 阶段中粗粒斑状黑云母花岗岩,局部相变为中粗粒斑状黑云母二长花岗岩,整体呈肉红色—浅肉红色,普遍高岭土化,在铀矿化异常发育部位绿泥石化、褐铁矿化(水针铁矿)发育。受矿田级 NEE 向 QF_{V} 石英硅化断裂带构造作用影响,区内等间距、近平形状展布有 4 条硅化断裂,分别为 F_1 、 F_2 、 F_3 和 F_4 。 F_1 硅化断裂斜贯研究区,走向 $NE50^\circ\sim 60^\circ$,倾向 SE,倾角介于

$60^\circ\sim 75^\circ$ 之间,延长约 3.12 km,一般出露宽介于 3~4 m 之间,最厚达 9.10 m,走向膨胀收缩、分支复合明显。 F_1 硅化断裂穿切印支期第 2 阶段中粗粒斑状黑云母花岗岩,带内岩石变质变形为硅化角砾岩、构造角砾岩,且沿裂隙充填红褐色—杂色玉髓脉、白色石英脉等。受断裂活动影响,碎裂花岗岩和花岗碎裂岩在断裂上下盘均有分布,且规模较大,上盘整体呈灰绿色,发育水云母化、绿泥石化,下盘呈浅红褐色,发育钾长石化、赤铁矿化,热液蚀变分带较为清楚,已发现的工业铀矿化多分布在断裂下盘的浅红褐色的蚀变带内,上盘工业铀矿化相对较少发现。铀矿石为深红褐色强硅化赤铁矿化花岗质构造角砾岩,较破碎,手标本上矿化异常部位硅化、赤铁矿化和褐铁矿化发育,并有白色碳酸盐细脉沿张裂隙充填,旁侧围岩绿泥石化、高岭土化常见。

2.2 岩相学特征

2.2.1 正常花岗岩

含矿断裂旁侧的正常花岗岩手标本常呈浅肉红色、灰白色(图 2),似斑状结构(图 3)、块状构造。斑晶为钾长石,板状,大小 $0.6\text{ cm}\times 1.4\text{ cm}\sim 1.0\text{ cm}\times 2.7\text{ cm}$,含量 $\pm 25\%$ 。基质为花岗结构,斜长石,短柱状,粒径介于 $0.5\sim 1.0\text{ cm}$ 之间,含量 $\pm 38\%$;石英,他形粒状,粒径介于 $0.3\sim 0.8\text{ cm}$ 之间,含量 $\pm 27\%$;黑云母,鳞片状,含量 $\pm 9\%$,野外定名为中粗粒斑状黑云母花岗岩。

2.2.2 碎裂花岗岩

含矿断裂内以及断裂间多为碎裂花岗岩,与蚀变(含矿)花岗碎裂岩呈渐变过渡。室内镜下碎裂花岗岩呈碎裂结构,碎块状构造,主要由长石、石英和黑云母组成,其中钾长石含量约 35% ,构成斑晶和基质,粒径介于 $1.5\sim 8.5\text{ mm}$ 之间的呈自形、半自形板柱状,粒径 $> 10\text{ mm}$ 的呈他形粒状,具微纹结构、卡式双晶;斜长石含量约 30% ,粒度介于 $1\sim 8\text{ mm}$ 之间,呈自形、半自形板柱状,具聚片双晶;石英含量约 30% ,呈他形粒状;黑云母含量约 5% ,呈片状,绿泥石化强烈,多呈绿泥石假象;少量白云母化,白云母与绿泥石互混。副矿物为钛铁矿、黄铁矿和电气石等。斑晶和钾长石、石英

等多具压碎结构, 矿物呈大小不一的碎块、碎粒状, 碎块之间有位移, 构成花岗质碎裂结构(图4), 沿碎裂裂隙中充填长石、石英的粉碎物和水云母、绢云母, 碳酸盐矿物。

2.2.3 蚀变(含矿)花岗碎裂岩

蚀变(含矿)花岗碎裂岩主要为深红褐色强硅化赤铁矿化花岗质构造角砾岩, 原岩为印支期第2阶段中粗粒斑状黑云母花岗岩, 具角

砾结构、脉状构造(图5)。铀矿石中金属矿物有沥青铀矿、黄铁矿和方铅矿, 脉石矿物为石英-玉髓、碳酸盐、胶状磷钇矿及紫色-紫黑色萤石, 常见次生钙铀云母和铜铀云母。沥青铀矿呈细脉状、不规则状, 脉宽介于1~3 mm之间; 钙铀云母和铜铀云母分别呈鲜黄色和草绿色, 鳞片状, 均沿裂隙面分布, 多为表生淋滤氧化成因。



图2 中粗粒斑状黑云母花岗岩岩心照片
Fig. 2 Core photos of the medium-coarse grained porphyritic biotite granite

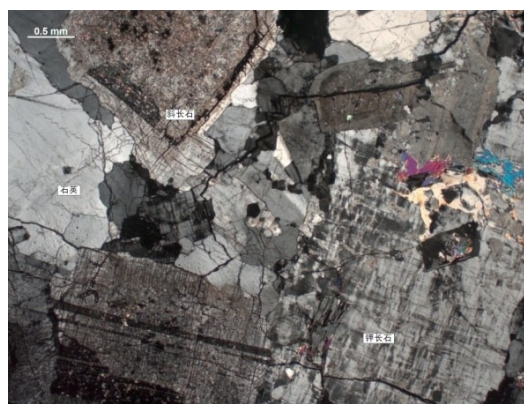


图3 似斑状结构(薄片,+)
Fig. 3 Porphyroid texture (thin section,+)

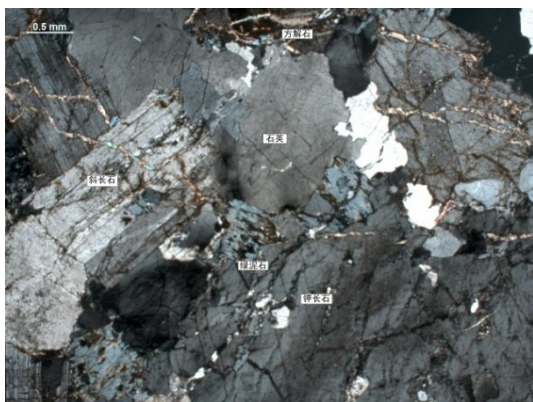


图4 花岗质碎裂结构(薄片,+)
Fig. 4 Granitic cataclastic texture (thin section,+)

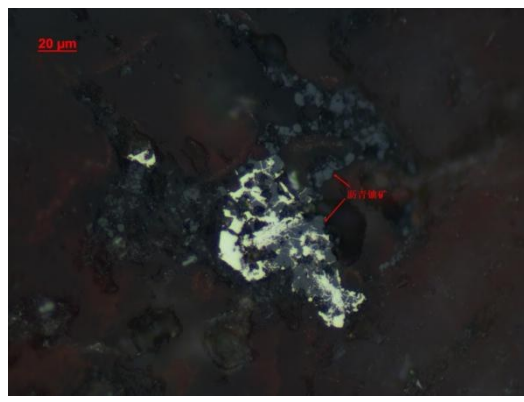


图5 角砾结构、脉状构造(光片,+)
Fig. 5 Breccia texture and veined structure (polished section,+)

3 样品采集和分析方法

3.1 样品采集

本次研究样品采自下古选地区ZK1号钻孔岩心。其中, 样品编号X20-6~X20-8为正常花岗岩, 样品编号X20-1~X20-3为碎裂花岗岩, 样品编号X20-4~X20-5为蚀变(含矿)花岗碎裂岩, 全部开展了岩相学观察和全岩主

量元素、微量和稀土元素含量检测, 并选择正常花岗岩X20-7开展LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素定年分析。

3.2 全岩主量、微量及稀土元素分析

本文所采样品的主量元素、微量元素和稀土元素组成及含量分析在核工业二七〇研究所分析测试中心完成。先将主量元素样品与四硼酸锂-偏硼酸锂混合熔剂混匀后, 在

1 150~1 250 °C 高温下熔融制成玻璃熔片。再借助岛津 X 荧光光谱仪进行主量元素含量测定,测定范围介于 0.002 %~99 % 之间。在测定过程中,X 光管最大电压 40 kV,最大电流 95 mA,内标校正采用康普顿射线消除基体效应。微量元素和稀土元素借助美国 PerkinElmer 公司 NexION2000B 型电感耦合等离子体质谱仪测定,仪器主要性能($^{89}\text{Y}\leq 3\%$ RSD, $^7\text{Li}\leq 3\%$ RSD, $^{204}\text{Tl}\leq 3\%$ RSD),雾化气流量 $0.98\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$,等离子体气流 $1.2\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$,射频功率 1 200 W,用内标法进行校正。样品前处理采用封闭溶矿方式,用氢氟酸、高氯酸、硝酸和盐酸等处理,选择不同质核比的离子检测某个离子的强度计算某种元素的含量。

3.3 锆石 U-Pb 年龄分析

在东华理工大学核资源与环境国家重点实验室依次完成锆石阴极发光图像拍摄和锆石 U-Pb 同位素组成及含量的测定。在 LA-ICP-MS 开展定年分析,该仪器由 GeoLasHD 193 nm 激光剥蚀系统和安捷伦 7900 ICP-MS 电感耦合等离子体质谱仪进行分析,剥蚀孔径 $32\ \mu\text{m}$,剥蚀频率 3.5 Hz,输出能量 $5.0\text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$,年龄校正标样为 91500,监控标样为 Plešovice,

微量元素含量外标为 SRM610。U-Pb 同位素数据处理采用软件 ICPMSDataCal 11.0^[18]完成,锆石 U-Pb 年龄谐和图绘制和锆石 U-Pb 年龄加权平均计算通过 Isoplot /Ex_ver3^[20]完成。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 年龄

下古选地区正常花岗岩(X20-7)中锆石呈无色透明,晶型较好,短柱至长柱状,长介于 $65\sim 325\ \mu\text{m}$ 之间,宽介于 $35\sim 96\ \mu\text{m}$ 之间,长/宽比介于 1:2~1:3 之间,CL 图像显示较为清楚的锆石韵律环带(图 6a),具有核-边结构,为典型的岩浆结晶锆石^[20]。对样品中 30 颗锆石进行了 30 个测点分析,结果列于表 1。其中,锆石中 $w(\text{U})=94\times 10^{-6}\sim 7\ 543\times 10^{-6}$, $w(\text{Th})=44.7\times 10^{-6}\sim 1\ 207\times 10^{-6}$, $w(\text{Th})/w(\text{U})=0.02\sim 0.99$,属岩浆结晶锆石^[20]。数据点大都落在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和线上或者靠近谐和线(图 6a),谐和年龄为 $228.3\pm 1.8\text{ Ma}$ 。其中 19 个 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 视年龄值介于 222~234 Ma 之间的测点加权平均年龄为 $228.9\pm 1.7\text{ Ma}$ (MSWD=1.5)(图 6b),表明下古选地区蚀变(含矿)花岗碎裂岩形成于印支期第 2 阶段(晚三叠世)。

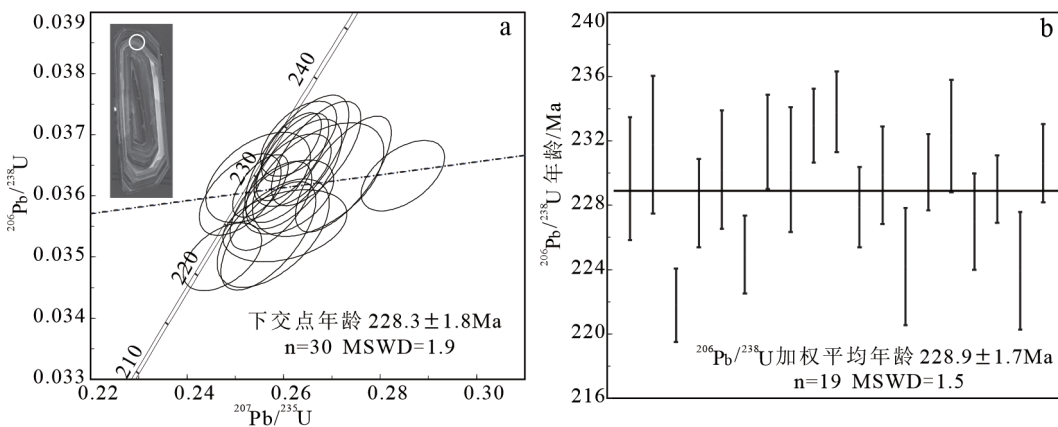


图 6 下古选地区蚀变(含矿)花岗碎裂岩锆石 U-Pb 谐和图、加权平均 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄图

Fig. 6 Concordia diagrams of the zircon U-Pb dating and weighted mean diagrams of $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ apparent ages for the altered granitic cataclastic rock in Xiaguxuan area

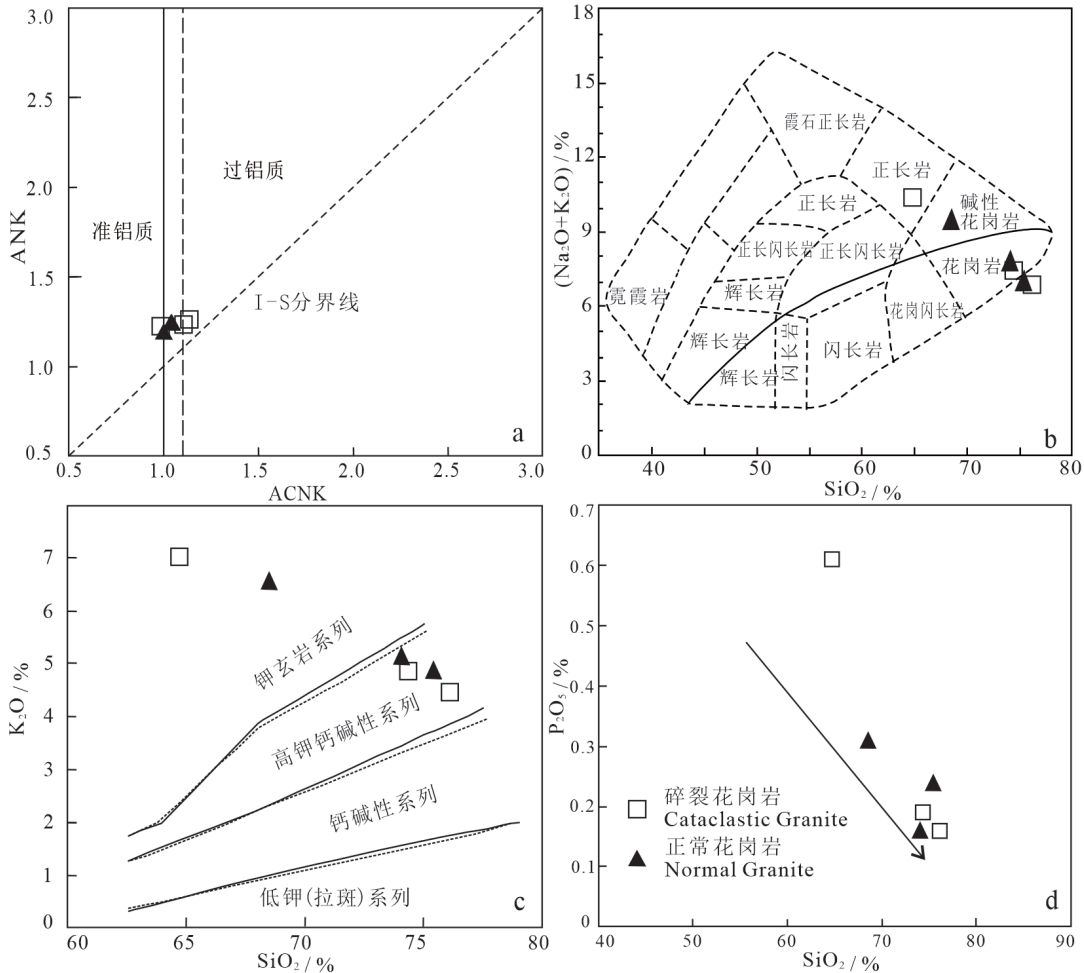
4.2 主量元素特征

如表 2 所示,研究区正常(弱蚀变)中粗粒斑状黑云母花岗岩总体上高硅($\text{SiO}_2=64.72\%\sim 76.12\%$,平均值 72.20%)、高钛($\text{TiO}_2=0.23\%\sim 0.56\%$,平均值 0.35%)、略低铝($\text{Al}_2\text{O}_3=10.88\%\sim 16.03\%$,平均值

12.72%)、铝指数 $A/\text{CNK}=\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})_{\text{摩尔比}}=1.00\sim 1.14$ (平均值 1.05)、 $A/\text{NK}=\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})_{\text{摩尔比}}=1.19\sim 1.26$ (平均值 1.23),属弱过铝质岩和 S 型花岗岩(图 7a),暗示其可能是上地壳富铝物质重熔的产物。富钾低钠($\text{Na}_2\text{O}=2.11\%\sim 3.32\%$,平均值

2.66%, K₂O = 4.44%~7.02%, 平均值 5.49%, Na₂O/K₂O = 0.43~0.54, 平均值 <1), 富碱 (Na₂O+K₂O = 6.84%~10.34%, 平均值 8.15), 属碱性花岗岩 (图 7b)。MgO 和 TFe₂O₃ 含量较低, MgO = 0.43%~0.89% (平均值 0.63%), TFe₂O₃ = 1.80%~3.48% (平均值 2.44%), 镁指数略低 Mg[#] (Mg[#] = 100 × Mg²⁺ / (Mg²⁺ + TFeO³⁺) =

34.3~37.8 (均值 36.2)。赖特碱度率 AR = 3.76~4.04, 属碱性岩。在 SiO₂-AR 图解上全部落入碱性岩区, 在 SiO₂-K₂O 图解上全部落入高钾钙碱性系列—钾玄岩系列 (图 7c)。CaO 和 P₂O₅ 含量分别为 0.52%~1.81% 和 0.16%~0.61%, 在 SiO₂-P₂O₅ 图解 (图 7d) 上 SiO₂ 与 P₂O₅ 含量呈较明显的负相关关系。



a—ACNK-ANK 图^[21]; b—SiO₂-K₂O+Na₂O 图^[22]; c—SiO₂-K₂O 图^[23]; d—SiO₂-P₂O₅ 图。
a-ACNK-ANK diagram^[21]; b-Diagram of SiO₂-(K₂O + Na₂O)^[22]; c-Diagram of SiO₂-K₂O^[23]; d-Diagram of SiO₂-P₂O₅.

图 7 花岗岩主量元素图解

Fig. 7 Diagram of major elements of the granite

上述特征表明, 下古选地区主体岩性中粗粒斑状黑云母花岗岩, 属高钾钙碱性系列弱过铝质花岗岩, 与华南地区壳源重熔(S)型花岗岩的岩石地球化学特征一致, 是上地壳硅铝质岩石经部分熔融和结晶分异作用而形成的酸性侵入岩。

如表 2 所示, 蚀变(含矿)花岗碎裂岩 SiO₂ 含量介于 72.15%~80.62% 之间, CaO 含量介于

5.29%~12.61% 之间, P₂O₅ 含量介于 9.03%~3.79% 之间, 明显增高; TiO₂ 和 Al₂O₃ 含量分别介于 0.06%~0.15% 和 2.19%~4.50% 之间, TFe₂O₃、Fe₂O₃ 和 FeO 含量分别介于 1.13%~1.88%、1.00%~1.94% 和 0.14%~0.23% 之间, MgO 含量介于 0.11%~0.12% 之间, 全碱和 Na₂O、K₂O 含量分别介于 0.49%~0.53%、0.13%~0.15% 和 0.34%~0.40% 之间, 均显著降低。

表 1 下古选地区正常花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年分析结果

Table 1 Analytical results of zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of normal granite in the Xiaguxuan area

测点号	含量/ $\times 10^{-6}$			同位素比值						年龄/Ma			
	Pb	Th	U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
X20-7-1	57.0	59.9	451	0.069 9	0.001 3	1.044 7	0.025 2	0.108 4	0.001 9	726	13	664	11
X20-7-2	231	375	5 740	0.051 6	0.000 7	0.261 6	0.004 1	0.036 8	0.000 4	236	3	233	2
X20-7-3	35.1	156	820	0.052 7	0.001 1	0.266 8	0.006 1	0.036 7	0.000 6	240	5	232	4
X20-7-4	74.1	352	1 794	0.052 1	0.001 0	0.257 4	0.005 6	0.035 8	0.000 5	233	5	227	3
X20-7-5	113	646	2 599	0.059 4	0.000 9	0.290 3	0.004 9	0.035 5	0.000 4	259	4	225	3
X20-7-6	140	67.5	3 564	0.051 2	0.000 8	0.255 2	0.003 8	0.036 2	0.000 3	231	3	229	2
X20-7-7	277	172	7 158	0.052 7	0.001 4	0.256 9	0.006 5	0.035 3	0.000 6	232	5	224	4
X20-7-8	37.9	157	888	0.052 1	0.001 0	0.261 9	0.005 3	0.036 4	0.000 4	236	4	231	2
X20-7-9	11.8	44.7	94.0	0.061 8	0.002 1	0.799 7	0.028 4	0.093 8	0.002 1	597	16	578	12
X20-7-10	57.5	285	1 320	0.053 4	0.001 6	0.267 2	0.009 0	0.036 3	0.000 6	240	7	230	4
X20-7-11	26.7	218	560	0.052 1	0.001 2	0.262 8	0.007 1	0.036 6	0.000 7	237	6	232	4
X20-7-12	93.2	236	2 339	0.051 2	0.001 0	0.247 3	0.005 4	0.035 0	0.000 4	224	4	222	2
X20-7-13	25.1	201	562	0.054 4	0.003 6	0.268 3	0.020 7	0.035 8	0.001 0	241	17	227	6
X20-7-14	52.7	168	1 271	0.050 5	0.001 0	0.251 0	0.005 6	0.036 0	0.000 4	227	5	228	3
X20-7-15	69.4	373	792	0.0584	0.001 0	0.533 3	0.018 4	0.066 2	0.001 9	434	12	413	12
X20-7-16	49.7	261	1 140	0.052 3	0.001 1	0.262 1	0.006 6	0.036 4	0.000 6	236	5	230	4
X20-7-17	36.8	535	746	0.053 1	0.001 7	0.260 3	0.008 5	0.035 5	0.000 4	235	7	225	2
X20-7-18	98.2	334	2 344	0.051 8	0.000 8	0.261 9	0.005 0	0.036 6	0.000 5	236	4	232	3
X20-7-19	38.8	113	930	0.054 3	0.001 1	0.272 4	0.006 6	0.036 4	0.000 6	245	5	230	4
X20-7-20	51.6	154	1 231	0.051 7	0.001 1	0.263 1	0.005 2	0.036 9	0.000 4	237	4	234	3
X20-7-21	60.8	642	1 313	0.052 6	0.001 2	0.261 0	0.006 2	0.036 0	0.000 4	235	5	228	2
X20-7-22	190	489	5 313	0.051 7	0.001 9	0.232 5	0.012 3	0.032 6	0.000 7	212	10	207	4
X20-7-23	197	487	5 889	0.055 2	0.000 9	0.230 5	0.003 9	0.030 3	0.000 5	211	3	192	3
X20-7-24	249	255	7 543	0.056 9	0.001 3	0.235 3	0.004 2	0.030 0	0.000 4	215	3	191	3
X20-7-25	21.0	184	468	0.050 9	0.001 4	0.254 7	0.007 2	0.036 3	0.000 5	230	6	230	3
X20-7-26	154	353	4 072	0.057 3	0.001 3	0.269 2	0.005 7	0.034 1	0.000 4	242	5	216	3
X20-7-27	122	1207	3 829	0.079 4	0.002 6	0.259 3	0.008 8	0.023 7	0.000 3	234	7	151	2
X20-7-28	38.5	307	899	0.052 8	0.001 4	0.257 9	0.007 7	0.035 4	0.000 6	233	6	224	4
X20-7-29	295	193	7 528	0.056 8	0.001 0	0.284 7	0.005 7	0.036 3	0.000 4	254	5	230	2
X20-7-30	22.5	395	401	0.073 6	0.002 6	0.371 2	0.013 3	0.036 6	0.000 6	321	10	231	4

4.3 微量元素和稀土元素特征

如表 3 和图 8a 所示,下古选地区正常(弱蚀变)花岗岩富集 Rb、Th、Pb 和 Nd,明显亏损 Ba、Sr 和 Ti,轻微亏损 Nb、Ta、Zr 和 Hf。微量元素原始地幔标准化蛛网图呈左侧“隆起”、右侧“平缓”的形态,与华南地区过铝—强过铝花岗岩的微量元素特征相似^[24-26]。稀土元素总量($\sum \text{REE}$)介于 $185 \times 10^{-6} \sim 404 \times 10^{-6}$ 之间,平均值 255×10^{-6} ; LREE 含量介于 $170 \times 10^{-6} \sim 366 \times 10^{-6}$ 之间,平均值 234×10^{-6} ; HREE 含量介于 $14.5 \times 10^{-6} \sim 38.1 \times 10^{-6}$ 之间,平均值 21.1×10^{-6} ; LREE/HREE 比值介于 9.6~12.8 之间,平均值为

11.4; $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 比值介于 13.2~20.4 之间,平均值为 16.8(表 4)。稀土元素球粒陨石标准化配分曲线呈“右倾型”(图 8b),显示轻稀土富集、重稀土亏损的特征,与华南地区壳源重熔(S)型花岗岩的岩石地球化学特征一致^[24-26]。

在微量元素原始地幔标准化蛛网图上(图 8a),蚀变(含矿)花岗碎裂岩与正常(弱蚀变)花岗岩微量元素特征基本一致,但前者 U 和 Pb 正异常更明显,U 含量最高可达 $1 211 \times 10^{-6}$,Pb 含量最高可达 $39 378 \times 10^{-6}$ 。在稀土元素球粒陨石标准化配分曲线上(图 8b),蚀变(含矿)花岗碎裂岩与正常(弱蚀变)花岗岩稀土元素特征大体一致,但前

表 2 下古选地区正常花岗岩、碎裂花岗岩及蚀变(含矿)花岗碎裂岩主量元素组成//%

Table 2 Compositions of major elements of normal granite, cataclastic granite and altered granitic cataclastic rock in the Xiaguxuan area/10⁻⁶

样号	X20-1	X20-2	X20-3	X20-4	X20-5	X20-6	X20-7	X20-8
样品描述	碎裂花岗岩			蚀变(含矿)花岗碎裂岩		中粗粒斑状黑云母花岗岩		
铀矿化情况	异常			工业		无矿		
SiO ₂	74.37	76.12	64.72	72.15	80.62	68.52	75.41	74.04
Fe ₂ O ₃	1.04	1.10	0.95	1.00	1.94	0.84	1.58	0.97
FeO	1.67	1.37	2.63	0.23	0.14	1.65	0.54	0.93
Al ₂ O ₃	11.74	11.04	16.03	2.19	4.50	14.75	10.88	11.88
CaO	0.64	0.52	1.81	12.61	5.29	1.28	0.89	1.07
MgO	0.69	0.65	0.89	0.11	0.12	0.57	0.54	0.43
K ₂ O	4.85	4.44	7.02	0.34	0.40	6.58	4.88	5.15
Na ₂ O	2.57	2.40	3.32	0.15	0.13	2.89	2.11	2.66
MnO	0.08	0.09	0.08	0.10	0.09	0.06	0.10	0.09
TiO ₂	0.39	0.31	0.56	0.06	0.15	0.35	0.24	0.23
P ₂ O ₅	0.19	0.16	0.61	9.03	3.79	0.31	0.24	0.16
微量	0.18	0.15	0.26	0.07	0.08	0.23	0.16	0.14
烧失量	1.03	1.67	1.49	1.38	2.26	1.53	1.73	1.79
总量	99.46	100.02	100.35	99.43	99.52	99.34	99.30	99.54

表 3 下古选地区正常花岗岩、碎裂花岗岩及蚀变(含矿)花岗碎裂岩微量元素组成/10⁻⁶

Table 3 Compositions of trace elements of normal granite, cataclastic granite and altered granitic cataclastic rock in the Xiaguxuan area /10⁻⁶

样号	X20-1	X20-2	X20-3	X20-4	X20-5	X20-6	X20-7	X20-8
样品描述	碎裂花岗岩			蚀变(含矿)花岗碎裂岩		中粗粒斑状黑云母花岗岩		
铀矿化情况	异常			工业		无矿		
U	130	89.8	129	1 211	532	33.3	22.5	47.3
Li	31.80	31.72	48.02	110.63	119.49	37.64	27.65	19.29
Be	2.77	4.73	5.79	6.58	8.30	5.42	2.62	7.72
Sc	5.24	4.62	8.64	1.57	2.52	6.08	3.88	5.20
V	34.83	23.79	39.68	13.81	18.16	25.98	18.58	16.14
Cr	43.96	50.17	32.42	29.78	33.61	30.45	37.21	33.88
Co	4.72	3.60	5.75	1.06	1.84	3.67	2.65	2.67
Ni	6.93	6.52	9.04	1.97	3.43	3.51	4.65	3.49
Cu	10.46	9.28	16.16	9.04	12.31	6.14	6.24	5.70
Zn	143.64	128.74	117.73	41.19	56.38	67.57	79.80	49.95
Ga	16.71	17.32	27.85	5.56	8.44	21.87	14.26	15.40
Rb	273.05	254.53	403.45	51.49	62.62	396.65	256.36	330.00
Sr	115.01	74.41	144.59	61.59	36.51	141.04	99.41	80.53
Y	27.6	21.1	53.1	36.3	26.6	23.7	18.2	23.8
Nb	15.40	20.16	33.60	6.18	8.36	20.56	12.23	13.99
Mo	1.90	3.18	12.57	3.03	1.69	2.33	1.49	1.40
Cd	0.27	0.37	0.20	3.60	1.36	0.17	0.25	0.02
In	0.05	0.05	0.07	0.01	0.02	0.05	0.03	0.02
Sn	8.10	8.36	18.19	2.45	3.62	10.31	6.85	8.03
Cs	7.56	8.76	9.43	10.50	13.03	11.01	8.64	8.57
Ba	633.1	443.8	1025.0	171.8	165.4	1011.3	642.6	431.3
La	46.8	46.3	83.2	12.5	22.0	55.4	39.7	50.2

表 3 (续)

样号	X20-1	X20-2	X20-3	X20-4	X20-5	X20-6	X20-7	X20-8
样品描述	碎裂花岗岩		蚀变(含矿)花岗碎裂岩		中粗粒斑状黑云母花岗岩			
铀矿化情况	异常		工业		无矿			
Ta	0.50	1.04	2.22	0.13	0.63	1.05	0.97	1.40
W	2.25	1.97	5.19	10.90	13.36	3.71	2.23	2.39
Tl	1.72	1.59	2.45	0.29	0.36	2.30	1.65	1.95
Pb	60.84	46.57	61.28	38.16	44.91	62.07	49.32	45.27
Bi	2.40	0.72	0.53	0.63	0.77	0.34	0.55	0.57
Zr	130.10	113.50	158.77	25.58	56.62	110.31	83.97	84.90
Th	35.74	33.86	53.23	6.30	13.32	35.84	34.10	
Hf	2.09	1.86	2.66	0.40	0.82	1.70	1.38	1.40

表 4 下古选地区正常花岗岩、碎裂花岗岩及蚀变(含矿)花岗碎裂岩稀土元素/ 10^{-6}

Table 4 Compositions of rare-earth elements of normal granite, cataclastic granite and altered granitic cataclastic rock in the Xiaguxuan area / 10^{-6}

样号	X20-1	X20-2	X20-3	X20-4	X20-5	X20-6	X20-7	X20-8
样品描述	弱蚀变碎裂花岗岩		蚀变(含矿)花岗碎裂岩		中粗粒斑状黑云母花岗岩			
铀矿化情况	异常		工业		无矿			
La	46.86	46.33	83.25	12.54	22.08	55.45	39.73	50.27
Ce	97.62	94.90	174.35	29.60	43.56	114.33	80.49	103.90
Pr	11.04	10.85	19.46	2.90	5.32	13.13	8.92	11.69
Nd	41.55	41.06	73.74	11.06	20.40	49.23	34.10	43.51
Sm	7.39	7.06	13.96	2.56	4.07	8.81	6.08	7.67
Eu	0.96	0.78	1.48	0.38	0.54	1.36	0.89	0.81
Gd	6.80	6.04	12.88	2.95	4.09	7.12	5.29	6.52
Tb	0.99	0.85	1.95	0.53	0.68	1.03	0.78	0.97
Dy	4.98	4.11	9.53	3.46	3.55	4.78	3.63	4.56
Ho	1.02	0.76	1.88	0.80	0.73	0.87	0.67	0.85
Er	3.11	2.22	5.60	2.72	2.22	2.41	2.00	2.57
Tm	0.47	0.35	0.91	0.50	0.37	0.38	0.31	0.41
Yb	2.42	1.77	4.54	2.81	2.15	1.95	1.59	2.18
Lu	0.40	0.28	0.76	0.45	0.33	0.33	0.26	0.35
Y	27.68	21.11	53.14	36.30	26.65	23.74	18.24	23.87
Σ REE	253.29	238.47	457.43	109.56	136.74	284.92	202.98	260.13
LREE	205.42	200.98	366.24	59.04	95.97	242.31	170.21	217.85
HREE	20.19	16.38	38.05	14.22	14.12	18.87	14.53	18.41
LREE/HREE	10.17	12.27	9.63	4.15	6.80	12.84	11.71	11.83

者 LREE 含量明显较低($59.0 \times 10^{-6} \sim 96.0 \times 10^{-6}$), 且 HREE 配分曲线更趋水平, 这是相异于正常花岗岩的明显特征。

5 讨 论

5.1 元素含量变化与热液蚀变

如表 2 所示, 研究区蚀变(含矿)花岗碎裂

岩相较于正常花岗岩和碎裂花岗岩, 其 SiO_2 含量增高(均值大于 72.20%), 与硅化有关; TiO_2 (0.06%~0.15%) 和 Al_2O_3 (2.19%~4.50%) 含量, $^{\text{T}}\text{Fe}_2\text{O}_3$ (1.13%~1.88%)、 Fe_2O_3 (1.00%~1.94%) 和 FeO (0.14%~0.23%) 含量, MgO (0.11%~0.12%) 含量及全碱 (0.49%~0.53%) 和 Na_2O (0.13%~0.15%)、 K_2O

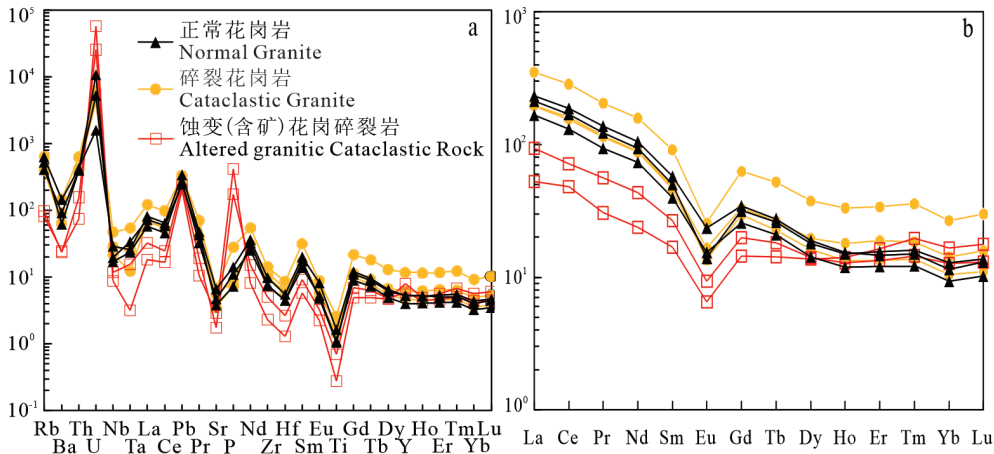


图 8 花岗岩微量元素蛛网图(a)和花岗岩稀土元素配分图(b), 标准化数值引自参考文献[27]

Fig. 8 Trace element spider diagram of granite (a) and rare earth element distribution pattern of granite (b), normalized values are cited from reference [27]

(0.34%~0.40%)含量均显著降低,与硅化有关;Na₂O/K₂O 比值无明显变化,表明水-岩作用过程中,岩石里的 Na、K 和 Mg 等被流体中 Si 交代。CaO 和 P₂O₅ 含量均成倍数增加,分别与沿裂隙充填的碳酸盐脉和呈胶状赋存的磷钇矿有关;Fe₂O₃/FeO 比值呈倍数增加,与赤铁矿化有关。

5.2 元素含量特征与源区物质

如表 3 所示,下古选地区正常花岗岩和碎裂花岗岩中 Nb/Ta 比值介于 9.99~30.8 之间(平均值 17.9)、Zr/Hf 比值介于 60.6~64.9 之间(平均值 61.6),这比值均明显高于中国东部正常花岗岩中 Nb/Ta 比值(11)和 Zr/Hf 比值(33~40),表明壳源物质在熔融过程和岩浆分异演化的过程中,都可能存在熔体与富挥发分流体间的分异分离,从而导致 Nb-Ta 和 Zr-Hf 这两组元素对发生不同程度分馏,使 Nb 和 Zr 趋向富集而 Ta 和 Hf 相对亏损。在表 4 中,重稀土元素分异程度较低,(Gd/Yb)_N=2.32~3.02(均值 2.62),指示物源区深度较大。负 Eu 异常明显 δEu=0.33~0.51,均值 0.40,表明该岩浆在演化过程中可能存在斜长石结晶分离。在岩浆演化过程中,富挥发分流体的形成可能与源岩物质以富水沉积岩为主,或者可能与岩浆演化的晚阶段富挥发分的高温水热流体分离释放有关。

下古选地区正常花岗岩和碎裂花岗岩中 Rb/Sr 比值介于 2.37~4.10 之间(平均值 3.01)、

Rb/Nb 比值介于 12.0~23.6 之间(平均值 17.7),这比值均明显高于中国东部正常花岗岩中 Rb/Sr 比值(0.31)和 Rb/Nb 比值(6.8)^[28],也高于全球上地壳正常花岗岩中 Rb/Sr 比值(0.32)和 Rb/Nb 比值(4.5)^[28],这些特征均表明下古选地区花岗岩的源岩来自成熟度较高的陆壳物质,这是研究区及区域铀成矿的前提条件之一。同时,这些特征微量元素比值所指示的信息与主量元素所指示的下古选地区花岗岩源岩为“富黑云母的变泥质岩或变杂砂岩”(图 9)的信息,相互佐证。

上述推论与研究区所在的印支期文英—热水岩体周缘寒武系变余砂岩、板岩、炭质板岩相对应。所以,综合认为研究区正常花岗岩可能是上地壳富铝的浅变质岩系在晚三叠世挤压向伸展转换的背景下,因减压增温导致其部分熔融所形成的产物。

5.3 元素含量变化与铀成矿

研究区正常花岗岩和碎裂花岗岩中微量铀含量介于 33.3×10⁻⁶~225×10⁻⁶ 之间(平均值为 120×10⁻⁶),明显高于中国东部上地壳微量铀含量(平均值 1.5×10⁻⁶)^[28]。在微量元素原始地幔标准化蛛网图上,蚀变(含矿)花岗碎裂岩与正常花岗岩曲线特征大体相似,只是蚀变(含矿)花岗碎裂岩具有更明显的 U 和 P 正异常和更高的 U 和 P 含量,暗示铀矿物可能与磷钇矿正相关;并且蚀变(含矿)花岗碎裂岩显示更低的 Rb、Ba、Th、Nb、Ta、

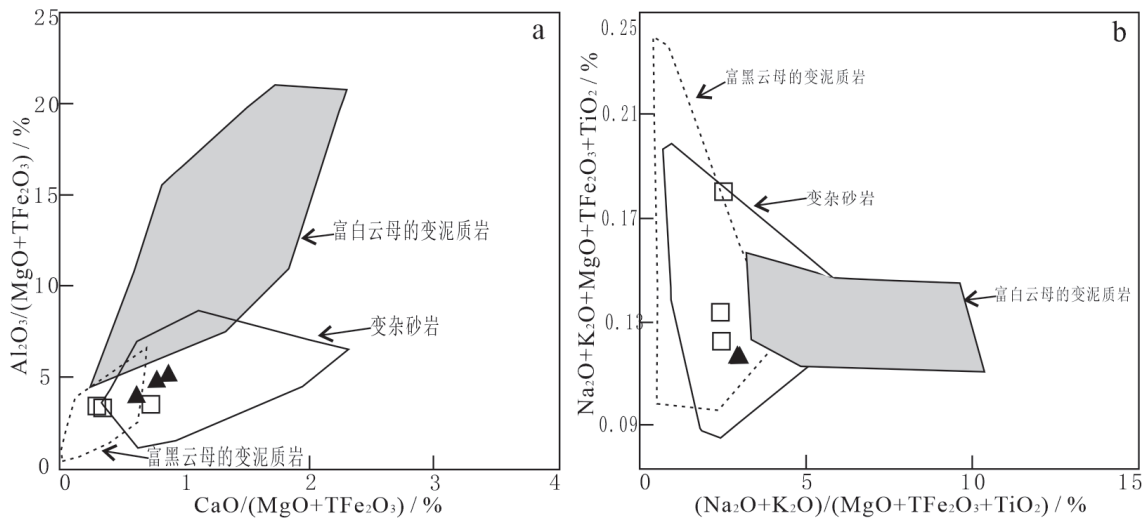


图9 花岗岩源区判别图解

Fig. 9 Discrimination diagram for the source area of granite

La、Ce、Sr、Zr、Hf 和 Ti (表 4), 以及 HREE/LREE 比值增大和 HREE 更为平缓的配分曲线特征(图 6b), 表明含铀流体在运移沉淀过程(与围岩间的水-岩作用)中成矿元素 U 的卸载富集与 LREE、HREE 元素化学活动密切相关^[14]。上述特征说明, 研究区成矿元素 U 的卸载富集与磷钇矿紧密共生, 从而在地球化学特征上显示出 U 含量与 P 含量、HREE/LREE 比值呈正相关关系。

6 结论

1) 下古选地区中粗粒斑状黑云母花岗岩是高钾钙碱性系列弱过铝质花岗岩, 具有 S 型花岗岩的特征, 成岩年龄为 $228.9 \pm 1.7\text{Ma}$, 形成于晚三叠世, 是印支期第 2 阶段酸性岩浆上侵的产物。

2) 蚀变(含矿)花岗碎裂岩与正常花岗岩和碎裂花岗岩相比, 主量元素含量的变化, 是水-岩作用过程中元素代入代出的结果, 与硅化、赤铁矿化、碳酸盐化及磷钇矿的形成紧密相关; 在铀成矿过程中, 铀矿物的富集与磷钇矿紧密共生, U 含量与 P、HREE 含量呈正相关关系。

3) 花岗岩 SiO_2 、CaO 和 P_2O_5 含量, $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 比值, 以及 U、P 含量和 HREE/LREE 比值, 是在花岗岩岩体内带开展硅质脉型铀矿化找矿的有益指示。

参考文献

- 赵振华. 微量元素地球化学[J]. 地球科学进展, 1992, 7(5): 65-66.
ZHAO Zhenhua. Trace element geochemical [J]. Advance in Earth Sciences, 1992, 7(5): 65-66 (in Chinese).
- 张展适, 华仁民, 邓平, 等. 诸广-下庄铀矿集区成矿过程中水-岩作用的地质地球化学特征[J]. 地球化学, 2005, 34(5): 483-494.
ZHANG Zhanshi, HUA Renmin, DENG Ping, et al. Geological and geochemical characteristics of water-rock interaction in the processes of uranium mineralization in Zhuguang-Xiazhuang uranium ore-concentrated district [J]. Geochimica, 2005, 34(5): 483-494 (in Chinese).
- 余泉, 陈以良, 陈振华, 等. 江西北部五里街地区横山花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学及成因研究[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2023, 46(3): 239-258.
YU Quan, CHEN Yiliang, CHEN Zhenhua, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb age, geochemistry and genesis of the Hengshan granite in Wulijie, northern Jiangxi province [J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 2023, 46(3): 239-258 (in Chinese).
- 徐勋胜, 张鸿, 田毓仁, 等. 赣南蔡江 A 型花岗岩年代学、地球化学特征及地质意义[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2023, 46(4): 387-398.
XU Xunsheng, ZHANG Hong, TIAN Yuren, et al.

- Chronology, geochemistry and the geological significance of Caijiang A-type granite in south Jiangxi province [J]. *Journal of East China University of Technology(Natural Science)*, 2023, 46(4):387-398 (in Chinese).
- 5 陈迪云. 稀土元素的某些地球化学行为及对热液铀成矿的指示意义[J]. *铀矿地质*, 1993, 9(6): 353-357.
CHEN Diyun. Some geochemical behaviour of REE and their indicating significance for hydrothermal uranium mineralization[J]. *Uranium Geology*, 1993, 9(6): 353-357(in Chinese).
- 6 张展适, 华仁民, 刘晓东, 等. 贵东花岗杂岩体的稀土元素特征及与铀成矿关系[J]. *中国稀土学报*, 2005, 23(6): 749-756.
ZHANG Zhanshi, HUA Renmin, LIU Xiaodong, et al. Geochemical characteristics of rare earth elements of Guidong granitic complex and their relationship with uranium mineralization[J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 2005, 23(6): 749-756(in Chinese).
- 7 王海洋, 潘家永, 钟福军, 等. 粤北澜河铀矿床赋矿花岗岩LA-ICP-MS锆石U-Pb定年及地球化学特征[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 45(4): 327-335.
WANG Haiyang, PAN Jiayong, ZHONG Fujun, et al. Zircon U-Pb ages and geochemical characteristics for ore-bearing granites of Lanhe deposit, northern Guangdong [J]. *Journal of East China University of Technology(Natural Science)*, 2022, 45(4): 327-335 (in Chinese).
- 8 党飞鹏, 方启春, 徐勋胜, 等. 鹿井矿田小山区段煌斑岩特征及其与铀矿化关系[C]//中国核学会2019年学术年会论文集, 北京: 中国核学会, 2019: 75-80.
DANG Feipeng, FANG Qichun, XU Xusheng, et al. Lithological characteristics of dolerite and its implication for U mineralization in Xishan district, Lujing ore field [C]//Proceedings of the 2019 Annual Conference of the Chinese Nuclear Society, Beijing: Chinese Nuclear Society, 2019: 75-80 (in Chinese).
- 9 钟福军, 夏菲, 王玲, 等. 诸广中部鹿井铀矿田辉绿岩磷灰石U-Pb年龄、地球化学特征及其与铀成矿关系[J]. *地质学报*, 2023, 97(8): 2593-2608.
ZHONG Fujun, XIA Fei, WANG Ling, et al. Geochronology and geochemistry of dolerite in the Lujing uranium ore field of central Zhuguangshan complex, and its relationship with uranium mineralization[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2023, 97(8): 2593-2608(in Chinese).
- 10 黄宏业, 黄思东, 蔡松峰. 湖南鹿井地区铀成矿地质背景及找矿思路分析[J]. *世界核地质科学*, 2008, 98(2): 63-67.
HUANG Hongye, HUANG Sidong, CAI Songfeng. Analysis on geological setting of uranium mineralization and prospecting strategy in Lujing area, Hunan province[J]. *World Nuclear Geoscience*, 2008, 98(2): 63-67(in Chinese).
- 11 张万良, 党飞鹏. 鹿井矿田铀矿床主控矿因素及找矿方向分析[J]. *铀矿地质*, 2022, 38(2): 238-246.
ZHANG Wanliang, DANG Feipeng. Major ore-controlling factor and prospecting direction of Lujing uranium ore field[J]. *Uranium Geology*, 2022, 38(2): 238-246(in Chinese).
- 12 张万良, 何晓梅, 吕川, 等. 鹿井铀矿田成矿地质特征及控矿因素[J]. *铀矿地质*, 2011, 27(2): 81-87.
ZHANG Wanliang, HE Xiaomei, LYU Chuan, et al. Analysis on the metallogenic feature and ore-controlling factors in Lujing uranium orefield [J]. *Uranium Geology*, 2011, 27(2): 81-87(in Chinese).
- 13 许谱林, 唐湘生, 郭福生, 等. 华南鹿井铀矿田NE向QF₂断裂特征及其与铀成矿关系探讨[J]. *大地构造与成矿学*, 2023, 47(1): 98-114.
XU Pulin, TANG Xiangsheng, GUO Fusheng, et al. The geological features of QF₂ fault and its relationship with uranium mineralization in Lujing uranium ore-field, South China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2023, 47(1): 98-114(in Chinese).
- 14 李志鹏, 夏菲, 党飞鹏, 等. 鹿井铀矿田庙背垅地区赋矿碱交代岩岩石学、地球化学特征[J]. *铀矿地质*, 2022, 38(1): 46-57.
LI Zhipeng, XIA Fei, DANG Feipeng, et al. Petrography and geochemical characteristics of uranium-bearing alkali metasomatite in Miaobeilong section, Lujing uranium ore field[J]. *Uranium Geology*, 2022, 38(1): 46-57(in Chinese).
- 15 张万良. 华南铀矿类型、特点及其空间分布[J]. *矿产与地质*, 2011, 25(4): 265-272.
ZHANG Wanliang. Uranium deposit type, characteristics and its spatial distribution in South China[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2011, 25(4): 265-272 (in Chinese).
- 16 张万良, 李余亮. 湘赣边界鹿井地区下寒武统斑

- 点板岩地球化学特征及原岩形成环境[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2023, 46(5): 486-498.
- ZHANG Wanliang, LI Yuliang. Geochemical characteristics and protolith formation environment of the lower Cambrian spotted slate in the Lujing area of the Hunan Jiangxi border[J]. Journal of East China University of Technology(Natural Science), 2023, 46(5): 486-498(in Chinese).
- 17 LIU Yongsheng, HU Zhaochu, GAO Shan, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. Chemical Geology, 2008, 257(1/2): 34-43.
- 18 Ludwig K R. A Geochronological toolkit for microsoft excel: ISOPLOT 3.00[R]. Berkeley: Geochronology Center, 2003: 39.
- 19 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 2004, 49(16): 1589-1604.
- WU Yuanbao, ZHENG Yongfei. Zircon genetic mineralogy study and its constraints on U-Pb age interpretation[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(16): 1589-1604(in Chinese).
- 20 黎彤, 袁怀雨, 吴胜昔. 中国花岗岩类和世界花岗岩类平均化学成分的对比如研究[J]. 大地构造与成矿学, 1998, 22(1): 29-34.
- LI Tong, YUAN Huayu, WU Shengxi. On the average chemical composition of granitoids in china and the world[J]. Geotectonica et Metallogenia, 1998, 22(1): 29-34(in Chinese).
- 21 Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. GSA Bulletin, 1989, 101(5): 635-643.
- 22 Middlemost E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. Earth-Science Reviews, 1994, 37(3/4): 215-224.
- 23 Peccerillo A, Taylor S R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1976, 58(1): 63-81.
- 24 孙涛, 周新民, 陈培荣, 等. 南岭东段中生代强过铝花岗岩成因及其大地构造意义[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2003, 33(12): 1209-1218.
- SUN Tao, ZHOU Xinmin, CHEN Peirong, et al. The genesis of Mesozoic strong peraluminous granite in the eastern section of Nanling and its tectonic significance[J]. Chinese Science (D: Earth Science), 2003, 33(12): 1209-1218(in Chinese).
- 25 吴昆明, 陈琪, 王珂, 等. 广西苗儿山中段天门地区花岗岩体年代学及地球化学特征[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2021, 44(6): 501-518.
- WU Kunming, CHEN Qi, WANG Ke, et al. Chronology and geochemical characteristics of Tianmen granites in the middle segment of Miao'er shan, Guangxi province[J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 2021, 44(6): 501-518(in Chinese).
- 26 Taylor S R, McLennan S M. The geochemical evolution of the continental crust[J]. Reviews of Geophysics, 1995, 33(2): 241-265.
- 27 Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42(1): 313-345.
- 28 高山. 关于大陆地壳化学组成研究中某些问题的讨论[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 1999, 24(3): 228-233.
- GAO Shan. Discussion on some problems in the study of chemical composition of continental crust[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 1999, 24(3): 228-233(in Chinese).