

相山铀矿田鹏姑山地区热液蚀变地球化学特征 及其对找矿的启示

许健俊^{1,2}, 夏菲¹, 张熠阳¹, 潘家永¹, 吕川², 魏欣², 党飞鹏², 钟福军¹

(1. 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室, 江西 南昌 330013; 2. 核工业二七〇研究所, 江西 南昌 330200)

摘要: 江西相山铀矿田是我国最大的火山岩型铀矿田之一。鹏姑山地区位于相山铀矿田西部, 毗邻邹家山、居隆庵等大型铀矿床, 成矿地质条件较好。近些年, 鹏姑山地区铀矿勘查取得重要突破, 区内热液蚀变具有典型的高温蚀变特征, 晚期叠加蚀变较少, 是研究高温热液蚀变与铀矿化关系的理想场所。鉴于此, 本文在野外地质调查的基础上, 通过岩相学和全岩地球化学分析, 研究了鹏姑山地区高温热液蚀变的地球化学特征, 探讨了高温热液蚀变特征及其与铀矿化的关系。研究结果表明, 鹏姑山地区高温热液蚀变主要以钠长石化、去硅化、绿泥石化和伊利石化为主, 局部叠加有磷灰石化、黄铁矿化、碳酸盐化和硅化。铀矿化与钠长石化、磷灰石化、碳酸盐化和去硅化蚀变关系较为密切。研究区铀矿化属碱交代型铀矿化, 形成于中高温的还原性环境, 磷灰石化促使了高品位铀矿化的形成。在碱交代蚀变之上叠加的磷灰石化和碳酸盐化在矿体部位发育最强烈, 可视为鹏姑山地区找矿勘查中最重要的找矿标志。

关键词: 热液蚀变; 碱交代; 铀矿化; 找矿勘查; 鹏姑山; 相山铀矿田

中图分类号: P611; P619. 14

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2023)04-0502-19

Geochemical characteristics of hydrothermal alteration in Penggushan district of Xiangshan uranium orefield and its implications for ore prospecting

XU Jian-jun^{1,2}, XIA Fei¹, ZHANG Yi-yang¹, PAN Jia-yong¹, LÜ Chuan², WEI Xin², DANG Fei-peng² and ZHONG Fu-jun¹

(1. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;
2. No. 270 Research Institute, China National Nuclear Corporation, Nanchang 330200, China)

Abstract: The Xiangshan uranium orefield in Jiangxi Province is one of the largest volcanic-related uranium orefields in China. The Penggushan district is located in the western part of the Xiangshan uranium orefield, close to the Julongan and Zoujiashan large uranium deposits, and has favorable minerogenetic conditions. In recent years, a significant breakthrough in the exploration of uranium deposits has been made in the Penggushan area, where the hydrothermal alterations are high-temperature alteration with less later superimposed alteration, so it is an ideal place to study the relationship between high-temperature hydrothermal alteration and uranium mineralization. In view of this, on the basis of a field geological survey, this paper analyzes the geochemical characteristics of hydrothermal alteration in Penggushan area through petrographic and whole rock geochemical analysis and discusses

收稿日期: 2022-04-08; 接受日期: 2023-03-20; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家自然科学基金(42002095, 42172098); 中国铀业有限公司-东华理工大学核资源与环境国家重点实验室联合基金(NRE2021-05, NRE2021-15); 核资源与环境国家重点实验室开放基金(2020NRE08); 中国核工业地质局地勘项目(202027-1)

作者简介: 许健俊(1989-), 男, 高级工程师, 从事铀矿地质勘查与成矿理论研究工作, E-mail: xjj270@163.com; 通讯作者: 夏菲(1968-), 男, 教授, 主要从事铀矿地质教学与科研工作, E-mail: fxia@ecut.edu.cn.

the characteristics of high-temperature hydrothermal alteration and its relationship with uranium mineralization. The results show that the high-temperature hydrothermal alterations are commonly dominated by albitization, desilication, chloritization, and illitization, and locally overprinted by apatitization, pyritization, carbonation, and silicification. The uranium mineralization shows a close spatial relationship with the albitization, apatitization, carbonation, and desilication. In the Penggushan district, uranium mineralization is alkali-metasomatized and formed in a medium-high temperature reductive environment. The occurrence of apatite in fluid is possibly an important factor for the formation of high-grade mineralization in the study area. Apatitization and carbonation superimposed on alkali metasomatic alteration are most strongly developed in the ore body, which are regarded as the most important prospecting indicators in future uranium resource exploration of Penggushan area.

Key words: hydrothermal alteration; alkali metasomatism; uranium mineralization; prospecting exploration; Penggushan district; Xiangshan uranium orefield

Fund support: National Natural Science Foundation of China (42002095, 42172098); Joint Fund of China Uranium Industry Co., Ltd. -East China University of Science and Technology State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment (NRE2021-05, NRE2021-15); Open Fund of State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment (2020NRE08); China Nuclear Industry Geology Bureau Co-funded by the Exploration Project (202027-1)

围岩蚀变是热液矿床最为显著的地质特征,它记录了水-岩反应的大量地质信息,如流体物理化学条件、流体性质、流体成分等,是研究流体-岩石置换作用的良好载体(Kishida and Kerrich, 1987; Monteiro *et al.*, 2008; Zhao *et al.*, 2021)。这些关键信息在刻画矿床形成过程、揭示矿床成因、指导找矿勘查方面发挥着重要作用(唐菊兴等, 2016; Hunger *et al.*, 2018; Kumar *et al.*, 2020; 刘学龙等, 2020; 吕承训等, 2021)。在热液铀矿床中,广泛发育的热液蚀变和蚀变分带是其重要特征,铀矿体周边往往伴随着多种类型、多个期次的热液蚀变,一般而言,矿石品位越高,矿体周边的围岩蚀变越强烈,热液叠加期次越多(章邦桐等, 1990; 刘国奇等, 2011; 吴玉等, 2013; 吴德海等, 2019; 张涛等, 2020; Yu *et al.*, 2020; 谭双等, 2022)。前人通过大量的野外观察和室内研究,建立了热液铀矿床的垂向和水平蚀变-矿化分带模式,总结出了“先碱后酸,上酸下碱”空间分带规律,有力地指导了我国华南地区热液铀矿的勘查工作,并取得了重要突破(杜乐天, 2011)。因此,在铀矿勘查的新区,加强热液蚀变的研究工作,将为下一步的找矿部署提供科学依据。

相山铀矿田位于赣杭火山岩带的西南段(图1a),是我国最大的火山岩型铀矿田之一(温志坚等, 1999a, 1999b; 蔡煜琦等, 2015)。近60余年的勘探与开采,矿田内资源日益枯竭,急需开拓新区,探明新资源量。鹏姑山地区位于相山铀矿田西部邹-石

断裂带和济河口断裂带的夹持区,毗邻邹家山、李家岭、居隆庵等大型铀矿床。自2016以来,核工业二七〇研究所先后在区内开展了大量的地质找矿工作,取得了较好的找矿效果,认为铀成矿地质条件优越,找矿潜力巨大。已有勘查资料表明,鹏姑山地区具有典型的高温蚀变特征,晚期蚀变叠加少,是研究高温热液蚀变与铀矿化关系的理想场所。但是,目前针对区内热液蚀变分带缺乏系统的梳理,高温热液蚀变与成矿的关系尚不明确,野外勘查标识也不清晰,在一定程度上限制了勘查一线工作人员对该区成矿作用的认识和勘查工作的部署。本次研究拟通过热液蚀变的岩相学和地球化学特征分析,查明鹏姑山地区热液蚀变组合,探讨高温热液蚀变与铀矿化的关系,为今后的找矿勘查提供重要启示。

1 研究区地质概况

相山铀矿田大地构造处于华夏板块与扬子板块两个一级大地构造单元拼合带附近。在区域地质背景上,矿田位于北东向赣杭火山岩带西南段,铀矿化整体受制于相山大型塌陷式火山盆地(图1a)。目前,在矿田内已探明邹家山、李家岭等铀矿床20余处,矿化规模大,资源丰富,被认为是我国最大的火山岩型铀矿田之一(温志坚等, 1999a, 1999b)。

相山火山盆地基底主要由青白口纪变质岩系组成,盆地东侧出露下石炭统及上三叠统;盖层为下白

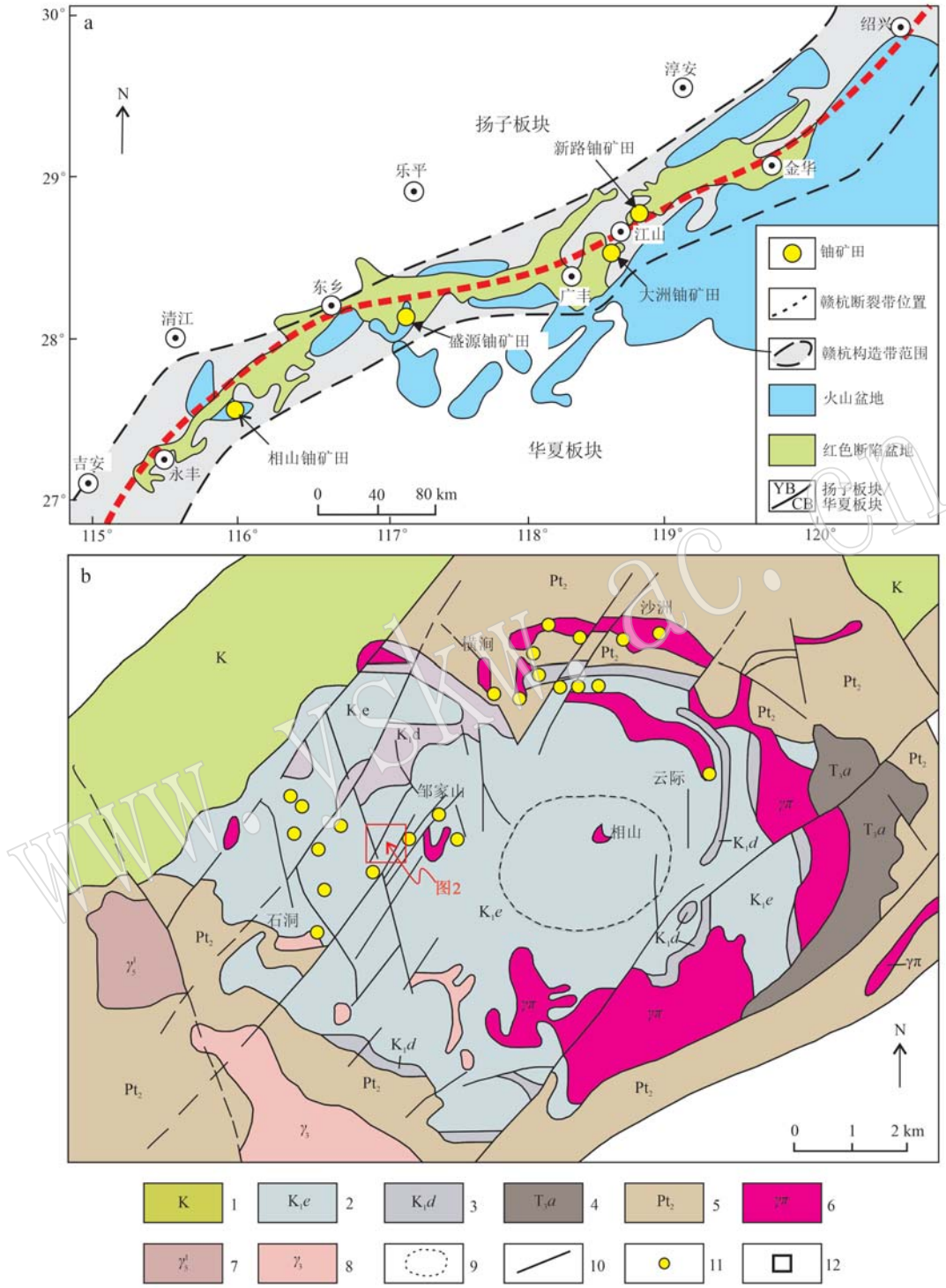


图 1 赣杭火山岩带 [a, 据余心起等(2006)] 与相山铀矿田 [b, 据陈正乐等(2011)] 地质简图
Fig. 1 Geological sketch of Gan-Hang volcanic rock belt (a, after Yu Xinqi *et al.*, 2006) and Xiangshan uranium orefield (b, after Chen Zhengle *et al.*, 2011)

1—白垩纪砂砾岩; 2—早白垩世鹅湖岭组碎斑熔岩、晶屑流纹凝灰岩; 3—早白垩世打鼓顶组流纹英安岩; 4—晚三叠世安源群砂砾岩、砂岩; 5—早古生代变质岩; 6—花岗岩岩; 7~8—花岗岩; 9—火山颈(推测); 10—断裂带; 11—铀矿床; 12—彭姑山地区
1—Cretaceous sandy conglomerate; 2—Early Cretaceous Ehuling Formation porphyroclastic lava, crystalline vitritic tuff; 3—Early Cretaceous Daguding Formation rhyodacite; 4—Late Triassic Anyuan Group gravel, sandstone; 5—Early Paleozoic metamorphic rocks; 6—granite porphyry; 7~8—granite; 9—volcano strength(speculated); 10—fault zone; 11—uranium deposit; 12—Penggushan district

垩统打鼓顶组(K_1d)和鹅湖岭组(K_1e)中酸性火山熔岩和陆相碎屑沉积岩,盆地北部和东南部有少量次火山岩体侵位(图1b)。盆地西北侧大面积出露早白垩世(K_1)火山熔岩,岩性以流纹英安岩和碎斑熔岩为主(方锡珩等,1982)。盆地内火山岩和次火山岩的形成时代主要集中在135 Ma左右,具有高硅、富钾、铝过饱和,富集Rb、Th、U、LREE,亏损Nb、Ta、Ti、P等地球化学特征(范洪海等,2001;杨水源等,2010,2012)。在盆地北部有少量煌斑岩脉出露,其 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄为134、120~125和84.5 Ma(刘龙等,2020)。盆地内构造主要分基底构造和盖层构造两类。基底构造以断裂构造为主,属区域性北东向断裂构造及其次级派生构造;盖层构造主要是

与火山盆地有关的环形火山机构、火山塌陷构造等。前人研究认为,相山铀矿田先后经历了两期铀矿化事件:第1期为铀-赤铁矿阶段,成矿年龄为 115 ± 0.6 Ma;第2期为铀-萤石-水云母化阶段,成矿年龄为 99 ± 6 Ma(范洪海等,2003)。两期成矿事件分别形成于不同的地质构造背景,第1期成矿事件主要与大规模火山塌陷及深部碱性岩浆岩、基性岩侵位作用有关,第2期成矿事件则主要与晚中生代华南岩石圈的区域性伸展、裂解活动相关(范洪海等,2003;胡瑞忠等,2007;Bonnetti *et al.*, 2020)。

本文研究区位于相山铀矿田西部近南北向济河口断裂与北东向邹-石断裂带夹持区,即鹏姑山至济河口断裂带之间的区域(图2)。东侧毗邻邹家山、

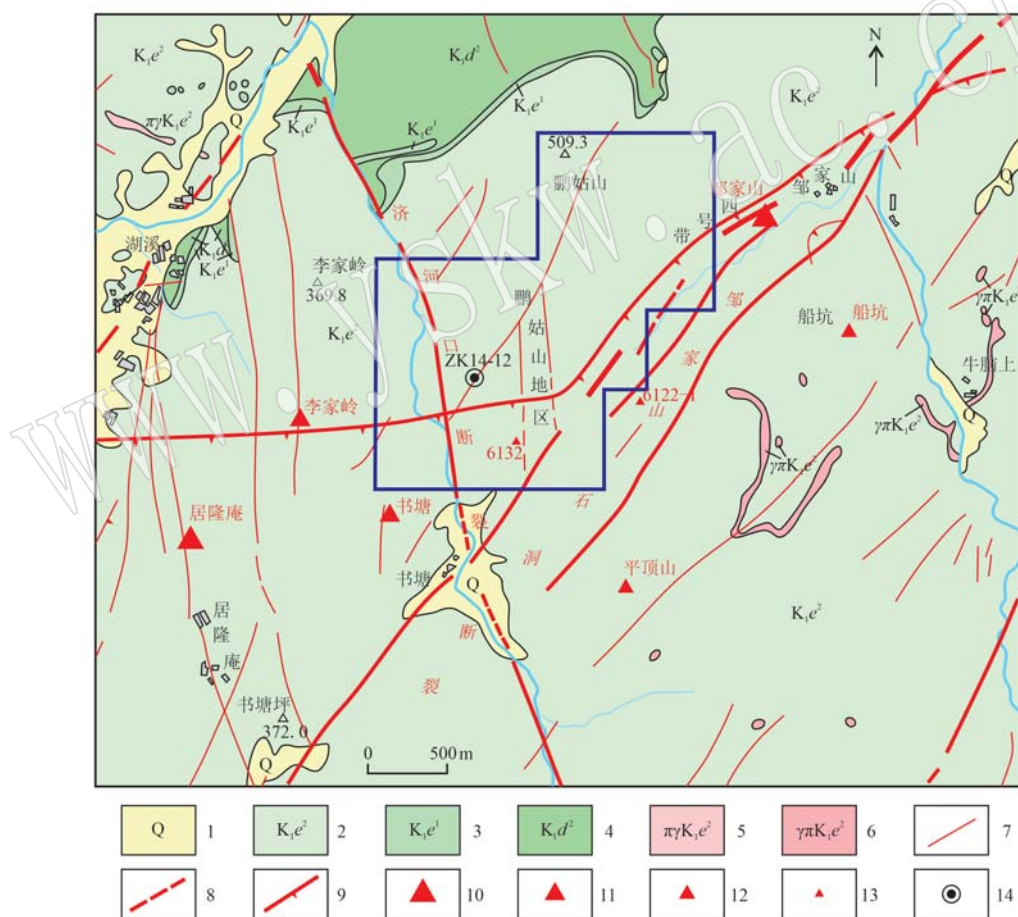


图2 鹏姑山地区地质简图

Fig. 2 Geological sketch map of the Penggushan district

1—第四系残、坡积物;2—下白垩统鹅湖岭组上段(K_1e^2)碎斑熔岩;3—下白垩统鹅湖岭组下段(K_1e^1)砂岩、凝灰岩;4—下白垩统打鼓顶组上段(K_1d^2)流纹英安斑岩;5—花岗斑岩;6—斑状花岗岩;7—实测断裂构造;8—推测断裂构造;9—火山塌陷构造;10—大型铀矿床;11—中型铀矿床;12—小型铀矿床;13—铀矿点;14—钻孔

1—Quaternary residual and slope deposits; 2—Porphyroclastic lava in the upper member of the Lower Cretaceous Erhuling Formation (K_1e^2); 3—sandstone and tuff of the lower member of the Lower Cretaceous Erhuling Formation (K_1e^1); 4—rhyolite dacite porphyry of the upper member of the Lower Cretaceous Daguding Formation (K_1d^2); 5—granite porphyry; 6—porphyritic granite; 7—measured fault structure; 8—speculated fault structure; 9—volcanic collapse structure; 10—large size uranium deposit; 11—medium size uranium deposit; 12—small size uranium deposit; 13—uranium occurrence; 14—drill

船坑及平顶山铀矿床,这些矿床的矿体多产于邹-石断裂旁侧的次级裂隙内及其与火山岩组间界面交汇复合部位;西侧毗邻书塘、李家岭及居隆庵铀矿床,这些矿床的矿体则主要产于盆地西部菱形断块内近南北向次级断裂或裂隙带内。研究区内地表仅出露下白垩统鹅湖岭组上段(K_1e^2)流纹质碎斑熔岩,钻探揭露鹅湖岭组下段(K_1e^1)熔灰状碎斑熔岩和打鼓顶组上段(K_1d^2)流纹英安斑岩及次火山岩等。目前大量钻孔揭露显示流纹英安斑岩是研究区最主要的赋矿岩性。区内构造主要分为断裂构造和裂隙构造。近南北向济河口断裂是区内最主要的断裂带,裂隙内见碱性长石化或充填灰白色硅质、碳酸盐细脉。鹏姑山地区矿体主要赋存在济河口断裂下盘流纹英安斑岩的次级裂隙中,矿体呈群脉型,整体形态平缓。含矿断裂带发育钠长石化、绿泥石化、碳酸盐化等热液蚀变,局部发育较为典型的热液蚀变分带。

2 样品采集与分析

在相山铀矿田鹏姑山研究区,热液蚀变发育极为广泛,主要沿断裂构造带两侧呈线状分布。按蚀

变矿物组合、蚀变岩颜色和蚀变岩与矿体的距离,本次研究将蚀变岩分成远矿蚀变岩和近矿蚀变岩两类。远矿蚀变岩系距离矿体较远,距离可达 10~50 m 左右,蚀变较弱,基本上保留了流纹英安斑岩的斑状结构;近矿蚀变岩系距离矿体较近,距离一般为 10 m 以内,蚀变较为强烈,岩石破碎明显,局部保留流纹英安斑岩的斑状结构。铀矿石一般以断裂带为中心,在断裂带旁侧的 10 m 范围内。

本次研究样品均采自研究区内施工的钻井岩芯,其中正常围岩(流纹英安斑岩)8 件,远矿蚀变岩(弱蚀变流纹英安岩)28 件,近矿蚀变岩(强蚀变流纹英安岩)11 件,贫矿石(低品位铀矿石)26 件,富矿石(高品位铀矿石)18 件,共计 91 件。蚀变分带以 ZK14-12 钻孔岩心最为典型,具体描述列于表 1。样品地球化学分析在核工业二七〇研究所分析测试中心完成,主量元素采用日本岛津 XRF-1800 型 X 射线荧光光谱仪分析,检测方法依据《硅酸盐岩石化学分析方法 第 28 部分:16 个主次成分量测定》(GB/T 14506.28-2010),全岩 U 和 Th 含量采用 PerkinElmer NexION 2000 ICP-MS 分析,检测方法依据《硅酸盐岩石化学分析方法 第 30 部分:44 个元素量测定》(GB/T14506.30-2010)。

表 1 鹏姑山地区 ZK14-12 蚀变分带典型样品描述
Table 1 Description of representative samples from hydrothermal alteration zone in the Penggushan district

样品编号	蚀变分带	岩性	标高/m	岩石结构	热液蚀变	矿物组合
ZK14-12H24	正常围岩	流纹英安斑岩	-610	斑状结构、块状构造	极弱	斜长石、钾长石、石英、黑云母
ZK14-12H23	远矿蚀变岩	弱蚀变流纹英安斑岩	-643	斑状结构、块状构造	中等,黏土化、伊利石化、钠长石化、绿泥石化	斜长石、钾长石、石英、黑云母、绿泥石、钠长石
ZK14-12H22	近矿蚀变岩	强蚀变流纹英安斑岩	-652	碎裂结构、碎块构造	较强烈,钠长石化、绿泥石化、少量黄铁矿化、碳酸盐化	钠长石、钾长石、斜长石、绿泥石、少量黄铁矿、方解石
ZK14-12H21	贫矿石	低品位铀矿石	-658	碎裂结构、碎块构造	强烈,钠长石化、赤铁矿化、硅化、黄铁矿化、绿泥石化、碳酸盐化、萤石化、少量硅化、磷灰石化	钠长石、黄铁矿、赤铁矿、次生石英、萤石、方解石、磷灰石、绿泥石、钛铀矿
ZK14-12H20	富矿石	高品位铀矿石	-660	碎裂结构、角砾状构造	十分强烈,钠长石化、赤铁矿化、绿泥石化、磷灰石化、黄铁矿化、碳酸盐化、萤石化	钠长石、黄铁矿、方解石、磷灰石、钛铀矿、钍石、晶质铀矿

3 分析结果

3.1 岩相学

正常围岩为流纹英安斑岩,灰褐色、红褐色,具斑状结构,基质具隐晶质-霏细结构。斑晶占全岩含

量约 30%,主要由斜长石、钾长石、石英和黑云母组成。基质约占全岩的 70%,由隐-微晶质石英、长石、黑云母等矿物组成(图 3a~3c)。斜长石呈自形-半自形板柱状,以团块状集合体或自形单晶产出,粒径 0.15~3.00 mm,部分颗粒发育聚片双晶和卡式双晶,含量约 25%;钾长石呈自形-半自形板柱状,多以

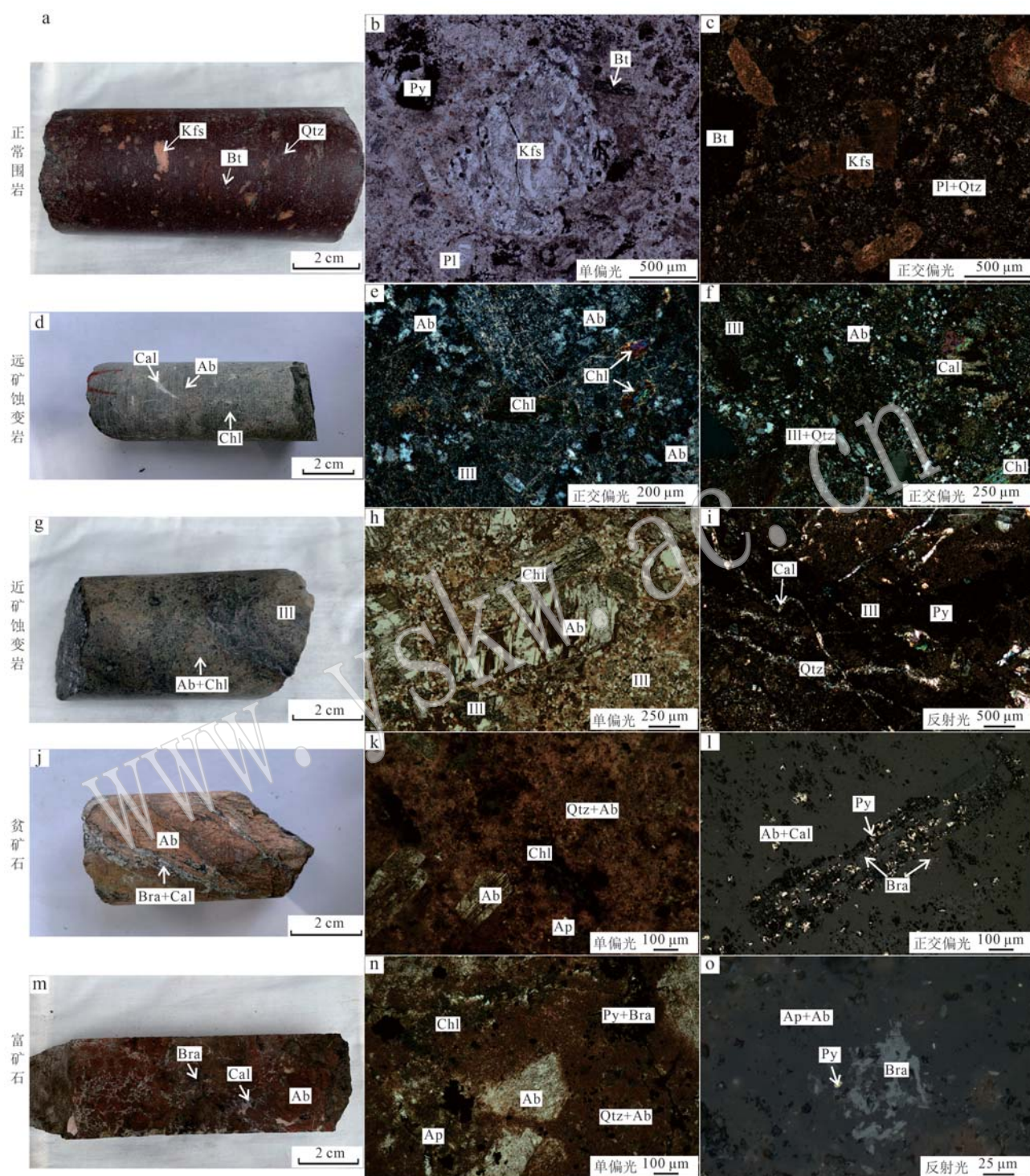


图3 蚀变岩与铀矿石岩相学特征

Fig. 3 Microphysiography of altered rocks and uranium ores

Ab—钠长石; Ap—磷灰石; Cal—方解石; Chl—绿泥石; Bra—钛铀矿; Bt—黑云母; Ill—伊利石; Kfs—钾长石; Pl—斜长石; Qtz—石英;
Py—黄铁矿
Ab—albite; Ap—apatite; Cal—calcite; Chl—chlorite; Bra—brannerite; Bt—biotite; Ill—illite; Kfs—K-feldspar; Pl—plagioclase; Qtz—quartz;
Py—pyrite

独立晶体产出,局部颗粒较粗大,粒径0.2~4.00 mm,含量约30%;石英呈不规则他形、椭圆形等形态,粒径约0.2~2.0 mm,含量约25%;黑云母呈暗色或墨绿色自形宽板状鳞片集合体或片状晶体产出,片径0.20~1.48 mm,局部发育绿泥石化,周缘有铁质析出,含量约5%。副矿物有锆石、磷灰石、磁铁矿、黄铁矿等,含量<5%。

远矿蚀变岩为弱蚀变流纹英安斑岩,浅绿色,基本保留原岩的斑状结构,斜长石和钾长石斑晶发生较为明显的黏土化和伊利石化。伊利石化分两类,一类发生于斜长石和钾长石斑晶的中心,另一类则沿长石斑晶的裂隙发生(图3d~3f)。此外,基质中的长石也普遍发育伊利石化,但仍保留长石的晶体形态。钾长石发育较为明显的钠长石化,新形成的钠长石形态不一,有板柱状、不规则粒状和细脉状,但新生钠长石的集合体保留了钾长石的假像。黑云母发育强烈的绿泥石化,绿泥石多成黑云母的假像产出,在绿泥石的边缘和裂隙内有金红石和铁质析出。反射光下可以见到绿泥石周边有星点状黄铁矿分布,颗粒细小,粒径小于0.05 mm。基质中的黑云母发生了较明显的绿泥石化,保留了黑云母的假像,钾长石发育钠长石化。

近矿蚀变岩为强蚀变流纹英安斑岩,绿、黑、红杂色,呈现为碎裂结构,斑晶呈碎块状,可拼合(图3g~3i),局部保留了原岩的斑状结构。钾长石发育强烈的钠长石化,钠长石几乎全部替代了钾长石,保留了钾长石的假像。斜长石发育强烈的伊利石化,几乎整个长石都转变为伊利石,但保留了斜长石的假像。黑云母已完全绿泥石化,呈现黑云母的假像,基质中可以见到脉状的绿泥石。黄铁矿含量明显增加,颗粒较为细小,呈星点状或细脉状产出。岩石裂隙内产出有少量的方解石脉、石英脉和细粒黄铁矿,局部见到方解石脉切穿石英脉,表明方解石形成晚于石英。方解石和石英的脉体较为细小,脉宽小于0.5 mm,延伸较短。局部可以见到团块状的方解石胶结早期的长石和石英。

贫矿石为低品位铀矿石,浅肉红色,碎块状构造,整体较为破碎,裂隙明显增加,裂隙内充填有方解石、萤石、黄铁矿等矿物(图3j~3l)。裂隙两侧发育明显的赤铁矿化,使得矿石颜色变红(图4a),呈渐变过渡。矿石局部破碎程度较完全,形成大小不一、不规则的块体,后被白色方解石胶结。镜下长石斑晶明显减少,钠长石含量显著增加,个别保留了

钾长石的晶体形态,局部空洞内可见长柱状次生石英。矿石中发育强烈的绿泥石化、伊利石化、钠长石化、赤铁矿化与黄铁矿化(图4b),赤铁矿化与磷灰石交织共生,形成团块(图4a)。钛铀矿常和方解石、黄铁矿、萤石等矿物共生,呈脉状、网脉状、透镜状产出,钛铀矿颗粒细小,主要呈星点状分布,局部为团粒状集合体(图5)。矿石中磷灰石含量显著增加,多呈短柱状和放射状集合体产出,与钛铀矿共生。

富矿石为高品位铀矿石,肉红色,碎裂状、角砾状构造,肉红色角砾被白色方解石胶结,角砾大小不一,形态不规则,磨圆度较差,角砾发育强烈的钠长石化和赤铁矿化,在矿石的裂隙内可见黑色萤石和钛铀矿产出(图3m~3o)。镜下可见不同形态的角砾,发育强烈的钠长石化、绿泥石化、磷灰石化、黄铁矿化。矿石中钠长石化十分强烈(图4c、4d),原岩中的长石斑晶和基质都发生了强烈的钠长石化。绿泥石化沿矿物的裂隙发育,局部有团块状集合体。磷灰石常呈短柱状、长柱状和集合体产出(图4c),分布于矿物的裂隙或空洞内。钛铀矿呈细脉状、星点状或团块状产出(图4d),钛铀矿的细脉内常包裹有钍石,两者关系密切(图5a、5b)。

鹏姑山地区主要的铀矿物为钛铀矿和铀钍石,其次为晶质铀矿(图5)。钛铀矿常与铀钍石共生,形成集合体或脉体,被方解石和磷灰石所胶结(图4e、4f、5a),少数钛铀矿-铀钍石集合体与黄铁矿伴生,黄铁矿晶形较差,有被交代的痕迹(图4d、4f)。部分钛铀矿分布于磷灰石颗粒之间,呈不规则状产出,被自形的磷灰石颗粒所包裹或胶结(图5b)。铀钍石主要以半自形-自形粒状产出,分布在钛铀矿的颗粒间或被钛铀矿所包裹(图5c、5d)。晶质铀矿以细小不规则球粒状或立方体形态分布于钛铀矿颗粒空隙内,粒径往往小于5 μm (图5b)。

3.2 地球化学特征

样品的地球化学分析结果列于表2。流纹英安斑岩 SiO_2 含量为67.05%~69.55%,平均68.53%, Al_2O_3 含量为13.73%~14.82%,平均14.31%, K_2O 含量为3.11%~5.57%,平均4.81%, CaO 含量为1.71%~2.47%,平均2.12%, Na_2O 含量为2.00%~3.74%,平均2.56%,表现出高硅、富钾的特征, A/CNK 值为1.00~1.13,平均为1.08,属于过铝质系列(图6a)。 MgO 含量为0.42%~0.87%,平均0.59%, Fe_2O_3 含量为3.06%~3.66%,平均3.36%,

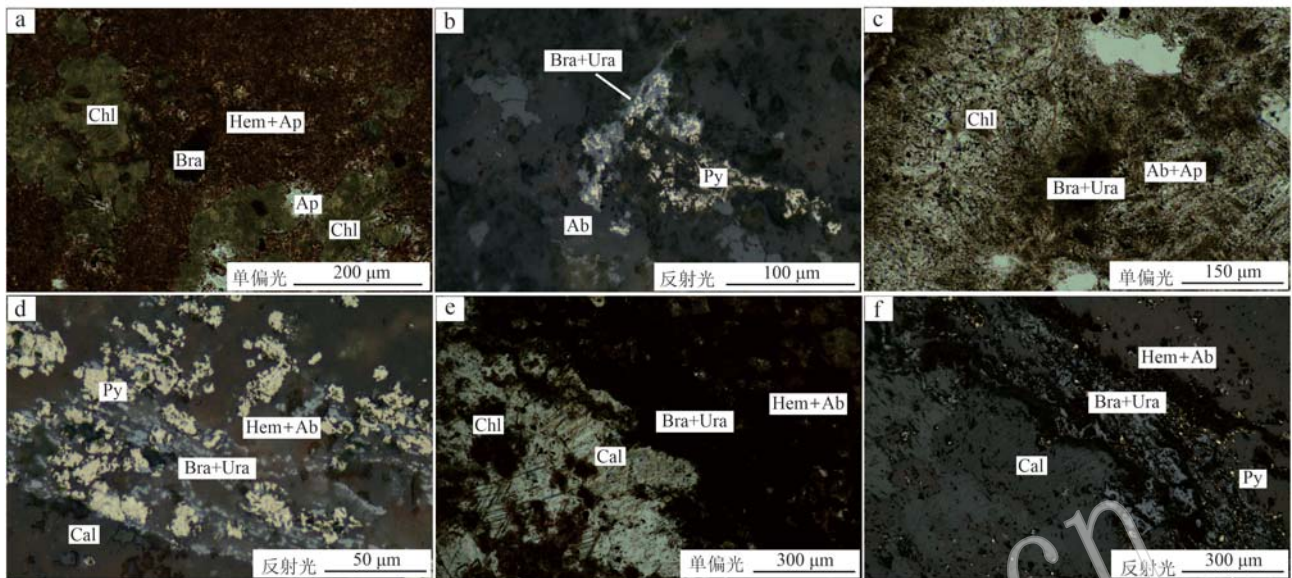


图 4 铀矿物与热液蚀变关系

Fig. 4 Relationship between uranium minerals and hydrothermal alteration

Ab—钠长石；Ap—磷灰石；Cal—方解石；Bra—钛铀矿；Hem—赤铁矿；Py—黄铁矿；Ura—晶质铀矿
 Ab—albite；Ap—apatite；Cal—calcite；Bra—brannerite；Hem—Hematite；Py—pyrite；Ura—uraninite

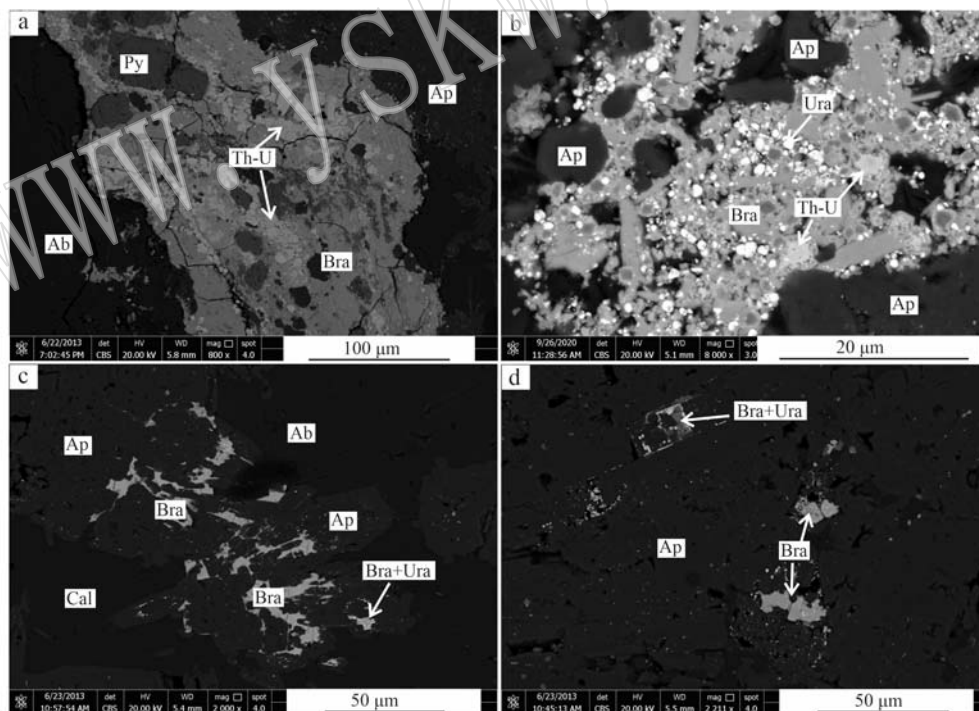


图 5 鹏姑山地区矿石中铀矿物的背散射图像

Fig. 5 Backscatter images of uranium minerals in ore of the Penggushan district

Ab—钠长石；Ap—磷灰石；Cal—方解石；Bra—钛铀矿；Th-U—铀钍石；Py—黄铁矿；Ura—晶质铀矿
 Ab—albite；Ap—apatite；Cal—calcite；Bra—brannerite；Th-U—uranothorite；Py—pyrite；Ura—uraninite

FeO 含量为 0.37%~1.38%，平均 0.74，具有相对较低含量的 MgO 和 FeO，较高含量的 Fe_2O_3 。全岩 U

含量为 $5.80 \times 10^{-6} \sim 7.63 \times 10^{-6}$ ，Th 含量为 $19.30 \times 10^{-6} \sim 22.90 \times 10^{-6}$ ，Th/U 值为 2.53~3.79。

表 2 鹏姑山地区正常围岩、蚀变岩和铀矿石元素分析结果
Table 2 Elemental analysis results of normal rocks, altered rocks and uranium ores of the Penggushan district

样品元素	正常围岩 (n = 8)			远矿蚀变岩 (n = 28)			近矿蚀变岩 (n = 11)			贫矿石 (n = 26)			富矿石 (n = 18)		
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
主量元素 (w _B / %)															
SiO ₂	67.05	69.55	68.53	53.64	76.36	67.13	55.19	73.57	65.66	52.76	68.13	59.15	41.98	58.73	55.84
TiO ₂	0.39	0.44	0.42	0.14	0.75	0.41	0.19	0.49	0.42	0.18	0.51	0.44	0.36	0.50	0.43
Al ₂ O ₃	13.73	14.82	14.31	9.95	20.45	14.81	13.11	18.04	15.27	14.78	17.87	16.19	11.47	18.36	15.63
Fe ₂ O ₃	3.06	3.66	3.36	0.74	2.84	1.45	0.76	2.39	1.40	0.22	4.19	2.17	0.84	3.56	2.25
FeO	0.37	1.38	0.74	0.42	3.44	1.90	0.94	3.17	1.93	0.37	2.69	1.75	0.95	2.39	1.72
MnO	0.07	0.11	0.08	0.04	0.27	0.10	0.05	0.26	0.13	0.05	0.25	0.15	0.11	0.31	0.16
MgO	0.42	0.87	0.59	0.24	1.70	0.84	0.28	1.64	0.87	0.02	1.66	0.89	0.36	1.71	0.91
CaO	1.71	2.47	2.12	0.84	9.20	2.77	1.04	5.06	2.62	1.81	7.84	5.10	3.97	17.04	7.35
Na ₂ O	2.00	3.74	2.56	0.75	9.39	5.29	3.22	9.48	7.05	3.52	10.52	8.55	5.72	9.68	8.28
K ₂ O	3.11	5.57	4.81	0.09	5.67	2.32	0.03	4.81	1.01	0.03	5.08	0.47	0.03	1.33	0.35
P ₂ O ₅	0.14	0.19	0.16	0.04	0.32	0.16	0.12	0.40	0.28	0.17	3.94	1.37	0.93	8.21	2.37
LOI	1.35	3.36	2.66	0.88	9.04	3.39	1.68	5.28	3.44	1.83	6.30	4.14	2.57	11.43	4.79
Total	99.29	101.14	100.32	99.30	101.33	100.56	99.45	101.08	100.09	99.21	101.41	100.35	98.88	100.44	99.67
微量元素 (w _B / 10 ⁻⁶)															
U	5.80	7.63	6.57	2.85	41.10	15.70	52.71	96.90	74.54	107	910	447	1 010	3 365	1 577
Th	19.30	22.90	21.68	7.90	38.40	21.15	18.20	57.95	30.25	19.90	166	53.80	23.40	955	113

n 代表分析的样品数量。

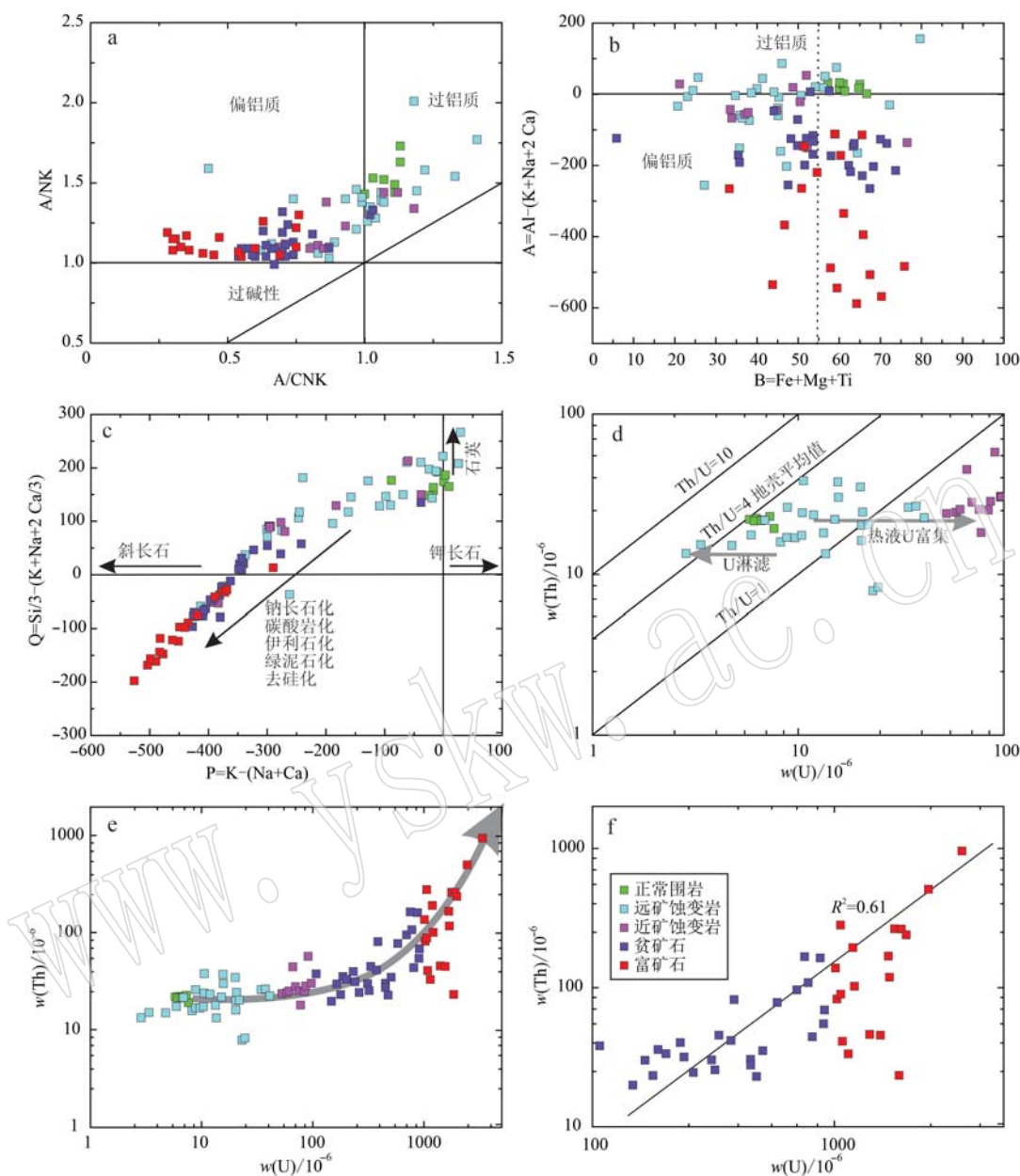


图6 A/NK-A/CNK(a)、 $[Al-(K+Na+2Ca)]-(Fe+Mg+Ti)$ (b)、 $[Si/3-(K+Na+2Ca/3)]-[K-(Na+Ca)]$ (c)和Th-U图解(d,e,f)

Fig. 6 Sactter plots of A/NK versus A/CNK(a), $Al-(K+Na+2Ca)$ versus $(Fe+Mg+Ti)$ (b), $[Si/3-(K+Na+2Ca/3)]$ versus $[K-(Na+Ca)]$ (c) and Th versus U (d, e, f)

远矿蚀变岩 SiO_2 含量为 53.64% ~ 76.36%, Na_2O 含量为 0.75% ~ 9.39%, K_2O 含量为 0.09% ~ 5.67%, CaO 含量为 0.84% ~ 9.20%, Al_2O_3 含量为 9.95% ~ 20.45%。与流纹英安斑岩相比较,远矿蚀变岩的 SiO_2 、 Na_2O 、 K_2O 和 CaO 含量变化较大,具有更高的 MgO (0.24% ~ 1.70%, 平均值 0.84%) 和 FeO (0.42% ~ 3.44%, 平均值 1.90%) 含量,更低的 Fe_2O_3 含量 (0.74% ~ 2.84%, 平均值 1.45%)。U 含量变化大,为 2.85×10^{-6} ~ 41.11×10^{-6} ,大部分样品 U

含量较流纹英安斑岩高,但小部分样品 U 含量明显低于流纹英安斑岩。Th 含量为 7.90×10^{-6} ~ 38.40×10^{-6} ,平均值为 21.15×10^{-6} ,Th/U 值为 0.34 ~ 4.74。

近矿蚀变岩 SiO_2 含量为 55.19% ~ 73.57%, Na_2O 含量为 3.22% ~ 9.48%, K_2O 含量为 0.03% ~ 4.81%, CaO 含量为 1.04% ~ 5.06%, Al_2O_3 含量为 13.11% ~ 18.04%。与流纹英安斑岩相比较,近矿蚀变岩具有更高的 Na_2O (3.22% ~ 9.48%, 平均 7.05%)、 CaO (1.04% ~ 5.06%, 平均 2.62%)、 MgO

(0.28%~1.64%, 平均 0.86%)、FeO (0.94%~3.17%, 平均 1.93%) 和 P_2O_5 (0.11%~0.40%, 平均 0.28%) 含量, 更低的 Fe_2O_3 (0.76%~2.39%, 平均 1.40%) 和 K_2O (0.03%~4.81%, 平均 1.00%) 含量。U 含量为 52.71×10^{-6} ~ 96.90×10^{-6} , 平均 74.5×10^{-6} , Th 含量为 18.20×10^{-6} ~ 57.92×10^{-6} , 平均 30.3×10^{-6} , Th/U 值为 0.23~0.68, 与流纹英安斑岩相比, U 含量显著增加, Th 含量略有增加。

贫矿石 SiO_2 含量为 52.76%~68.13%, Na_2O 含量为 3.52%~10.52%, K_2O 含量为 0.03%~5.08%, CaO 含量为 1.81%~7.84%, Al_2O_3 含量为 14.78%~17.87%。与蚀变岩相比, 贫矿石具有更高的 Na_2O (3.52%~10.52%, 平均 8.55%)、 Fe_2O_3 (0.22%~4.19%, 平均 2.17%)、CaO (1.81%~7.84%, 平均 5.10%) 和 P_2O_5 (0.17%~3.94%, 平均 1.37%) 含量, 更低的 FeO (0.37%~2.69%, 平均 1.75%)、 K_2O (0.03%~5.08%, 平均 0.47%) 和 SiO_2 (52.76%~68.13%, 平均 59.15%) 含量。U 含量为 107×10^{-6} ~ 910×10^{-6} , 平均值为 447×10^{-6} , Th 含量为 19.9×10^{-6} ~ 166×10^{-6} , 平均值为 53.8×10^{-6} , Th/U 值为 0.05~0.36, 与流纹英安斑岩相比, U 和 Th 含量都有显著增加。

富矿石具有较低的 SiO_2 (41.98%~58.73%, 平均 51.05%)、 Fe_2O_3 (0.84%~3.56%, 平均 2.36%)、FeO (0.95%~2.39%, 平均 1.68%) 和 K_2O (0.03%~1.33%, 平均 0.18%) 含量, 较高的 Na_2O (5.72%~9.68%, 平均 7.89%)、 P_2O_5 (0.93%~8.21%, 平均 3.82%) 和 U (1.010×10^{-6} ~ 3.365×10^{-6} , 平均 1.577×10^{-6})、Th (23.4×10^{-6} ~ 954×10^{-6} , 平均 199×10^{-6}) 含量, Th/U 值为 0.01~0.28, MnO 含量 (0.11%~0.31%, 平均 0.18%) 相对稳定。与流纹英安斑岩相比, 富矿石的 SiO_2 和 K_2O 含量显著降低, Na_2O 、U 和 Th 含量显著增加 (图 6)。

4 讨论

4.1 蚀变带矿物组合

热液蚀变的本质是岩石中矿物与流体之间发生的系列物质交换作用, 原有的矿物消失和新矿物的形成是热液蚀变过程的主要表现形式。前人研究认为, 热液铀矿床中的热液蚀变主要分为碱性蚀变和酸性蚀变, 碱性蚀变主要发生在成矿作用前期, 主要表现为钠长石化和钾长石化; 酸性蚀变主要发生主

成矿期, 主要表现为硅化、碳酸盐化、萤石化等 (杜乐天, 2011)。

相山铀矿田鹏姑山地区热液蚀变的蚀变矿物组合与地球化学特征如下:

(1) 远矿蚀变岩: 全岩 SiO_2 、CaO、 Na_2O 、 K_2O 、 Fe_2O_3 、FeO 和 MgO 含量变化较大, 导致远矿蚀变岩在图 6a 和图 6b 中分布极为分散。在图 6c 和图 7a 中, 远矿蚀变岩投点显示出良好的线性关系, 表明样品发生了较明显的钠交代作用, 主要表现为钠长石交代钾长石, 造成全岩 K_2O 含量随 Na_2O 含量的增加而降低。这得到了岩相学中钠长石交代原岩中钾长石斑晶现象的验证 (图 3e~3f)。钠交代是碱交代的一种, 往往伴随一定程度的“去硅”作用, 即全岩中石英矿物被溶解形成空洞 (Petersson and Eliasson, 1997; Dolníček *et al.*, 2014)。注意到在部分样品中 Na_2O 含量较高, 而 K_2O 和 SiO_2 含量较低, 表明这些样品遭受了明显的钠交代作用。但是, 个别样品中 SiO_2 含量不减反而增加, 在 72% 以上, 可能与远矿蚀变岩局部遭受到硅化有关, 表现为晚期石英脉穿插于钠长石等矿物中间 (图 3f)。一般来说, 花岗质蚀变岩中 FeO、MgO 和 TiO_2 含量的变化一般与绿泥石化和黄铁矿化有关。在图 6b 中, 样品 Fe+Mg+Ti 含量变化较大, 可能与局部发育的绿泥石化和黄铁矿化 (图 3f) 有关。部分样品的 CaO 含量较高, 则与局部的碳酸盐化有关, 这与手标本和镜下观察到的方解石细脉穿插于绿泥石化蚀变之上的现象相一致 (图 3d~3f)。岩相学观察中未发现方解石脉和石英细脉的穿插关系, 碳酸盐化和硅化蚀变的先后关系无法判别。极个别样品 K_2O 含量的增加与镜下观察到的伊利石化有关, 伊利石化叠加在钠长石和斜长石之上 (图 3f), 表明远矿蚀变岩局部叠加有少量伊利石化, 且晚于钠长石化。因此, 远矿蚀变岩的蚀变矿物组合为钠长石化+去硅化+绿泥石化±黄铁矿化±伊利石化±碳酸盐化±硅化。

(2) 近矿蚀变岩: 与远矿蚀变岩类似, 近矿蚀变岩也具有变化范围较大的 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、FeO、MgO、CaO、 Na_2O 、 K_2O 和 P_2O_5 含量, 但具有更高的 Na_2O 、U 和 Th 含量。在图 6a、6b 中, 近矿蚀变岩基本上落于过铝质至偏铝质区域内; 在图 6c 中, 整体呈现负相关关系, 指示近矿蚀变岩与远矿蚀变岩类似, 表明近矿蚀变岩也经历了较为明显的钠交代作用, 但钠长石化程度明显更高。与流纹英安斑岩相比, 近矿蚀变岩具有更低的 Fe_2O_3 和 K_2O 含量, 更高

的 Al_2O_3 、 FeO 、 MgO 、 CaO 、 Na_2O 和 P_2O_5 含量,样品中 K_2O 和 Na_2O 含量也呈现出明显的负相关性,表明近矿蚀变岩经历了强烈钠长石化、绿泥石化、碳酸盐化、黄铁矿化和磷灰石化蚀变,与镜下观察到的现象基本一致(图 3g~3i)。碳酸盐化和磷灰石化多呈脉状叠加于早期的钠长石化和绿泥石化之上,磷灰石或胶结早期形成的钠长石和黄铁矿等矿物(图 3m~3n)。个别样品中 SiO_2 含量高达 73.55%,远高于流纹英安斑岩(SiO_2 含量平均 68.53%),表明近矿蚀变岩局部也叠加了硅化蚀变。近矿蚀变岩的 U 和 Th 含量显著增加(图 6e~6f),分别为 52.71%~96.90% 和 18.20%~57.95%,平均含量分别为 74.57% 和 30.25%,指示近矿蚀变岩经历了富 U 和 Th 的流体交代。由上述分析可知,近矿蚀变带的蚀变组合为钠长石化+去硅化+绿泥石化+磷灰石化+黄铁矿化±碳酸盐化±硅化。

(3) 铀矿石:与流纹英安斑岩和蚀变岩相比,铀矿石具有最低的 SiO_2 含量和变化范围最大的 Fe_2O_3 、 FeO 、 MgO 、 CaO 、 Na_2O 、 K_2O 和 P_2O_5 含量,表明矿石中赤铁矿化、黄铁矿化、绿泥石化、碳酸盐化、钠长石化和磷灰石化的分布极为不均一。由图 6c 可知,铀矿石发育最强的钠长石化、碳酸盐化和磷灰石化,与岩相学观察的现象一致(图 3j~3o、图 4),表明这 3 种蚀变与铀矿化关系密切。而且,由远矿蚀变带到铀矿石, Na_2O 含量逐渐增加,钠长石化也逐渐明显。钠长石呈现肉红色板状或粒状晶形,含铀矿物的磷灰石和方解石脉包裹或充填在钠长石颗粒间隙(图 4、图 5),磷灰石和方解石局部有包裹或穿插钠长石的迹象,表明钠长石化为成矿早期蚀变。与蚀变岩相比,在矿石样品中 SiO_2 含量(平均 55.84%,表 2)显著降低,且岩相学观察也未发现硅化与铀矿化有着密切联系,推测蚀变带中的硅化可能为成矿期后蚀变,仅分布于远矿蚀变带和近矿蚀变带。

综上所述,鹏姑山地区矿体旁侧的蚀变带至少发育 4 期热液蚀变作用。第 1 期为广泛发育的钠交代作用,形成了钠长石、黄铁矿、绿泥石等矿物,为成矿前期蚀变;第 2 期为富钾流体交代,在蚀变带中形成较弱的伊利石化,也为成矿前期蚀变;第 3 期为富磷和富碳流体的交代蚀变,形成磷灰石化和碳酸盐化,与铀矿化关系密切,为成矿期蚀变;第 4 期为局部的硅化蚀变,形成细脉状的石英脉,为成矿期后蚀变。

4.2 热液蚀变与铀矿化

热液蚀变与铀矿化关系十分密切,全球各地的热液铀矿化基本上都产于铀地球化学背景含量偏高、断裂构造多次活动、热液蚀变广泛发育且多期活动的地质体中(章邦桐等,1990;谭双等,2022)。一般而言,富矿体产于热液蚀变强烈且活动期次多的断裂或裂隙带内。因此,铀矿体两侧的热液蚀变对矿化的形成具有重要影响。

与流纹英安斑岩相比,鹏姑山地区铀矿石具有更高 FeO 、 CaO 、 MgO 、 Na_2O 、 P_2O_5 和 LOI 含量,更低的 SiO_2 、 Fe_2O_3 和 K_2O 含量,在图 6a、6b 中都投影于偏铝质区域内,在图 6c 中具有最低的 Q 和 P 值,且呈负相关性,在图 7a 中所有样品呈现出负线性关系,富矿石和贫矿石均表现出低 K_2O 高 Na_2O 特征,总体表现出强烈的钠长石化、碳酸盐化、磷灰石化和去硅化蚀变以及局部的黄铁矿化和绿泥石化(图 4)。在图 7b、7c 中,远矿蚀变岩、近矿蚀变岩及矿石的 U 和 Th 与 Na_2O 含量之间呈现正相关关系。相比贫矿石,富矿石具有更高的 CaO 和 P_2O_5 含量,更低的 SiO_2 、 Al_2O_3 和 K_2O 含量,表明富矿石与更强烈的磷灰石化、碳酸盐化、钠长石化和去硅化蚀变关系更密切。由图 8 可知,矿石表现出高 CaO 和 P_2O_5 以及低 SiO_2 含量的特征,而富矿石表现得更为明显。岩相学特征显示,富矿石中铀矿物往往与胶状磷灰石和浸染状碳酸盐化共生(图 3n~3o),才使得富矿石样品中 CaO 和 P_2O_5 含量较高。在 ZK14-12 剖面图中,由正常围岩到富矿石, Na_2O 、 CaO 、 P_2O_5 和 Th 含量增加, SiO_2 和 K_2O 含量降低, MgO 和 FeO 含量在远矿蚀变岩和近矿蚀变岩最高, Al_2O_3 含量在远矿蚀变岩最高(图 9),这与前文所述的蚀变特征也基本一致。总体上来看,铀矿化与强烈的钠长石化、磷灰石化、碳酸盐化和去硅化蚀变关系密切(图 4),而矿石品位与这些蚀变的程度存在一定的正相关性(图 7b、7c)。

由上文可知,鹏姑山地区铀矿化与强烈的钠长石化、磷灰石化、碳酸盐化和去硅化蚀变关系密切(图 4),此特征类似于杜乐天等(2009)所述的碱交代型铀矿化。此类矿化不仅在相山矿田邹家山广泛发育,在鹿井矿田高昔矿床和龙首山地区菱岭矿床也有产出(Min *et al.*, 1999; 王运等, 2012; 赵如意等, 2013; 胡宝群等, 2016)。在鹏姑山地区的远矿蚀变岩中,部分样品的铀含量低于正常围岩的平均值,又有相对高含量的 CaO 、 Na_2O 或 K_2O ,在图 6d

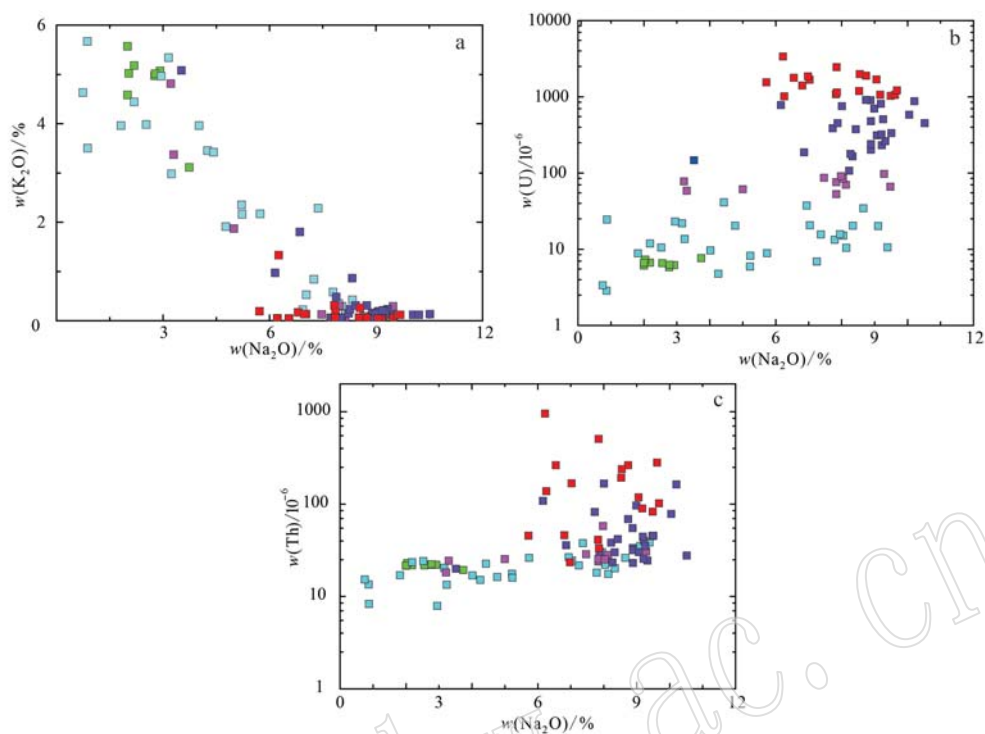


图7 全岩 K_2O-Na_2O (a)、 $U-Na_2O$ (b) 与 $Th-Na_2O$ (c) 图解 (图例同图6)

Fig. 7 Scatter plots of K_2O-Na_2O (a), $U-Na_2O$ (b) and $Th-Na_2O$ (c) of whole-rocks (symbols are the same as Fig. 6)

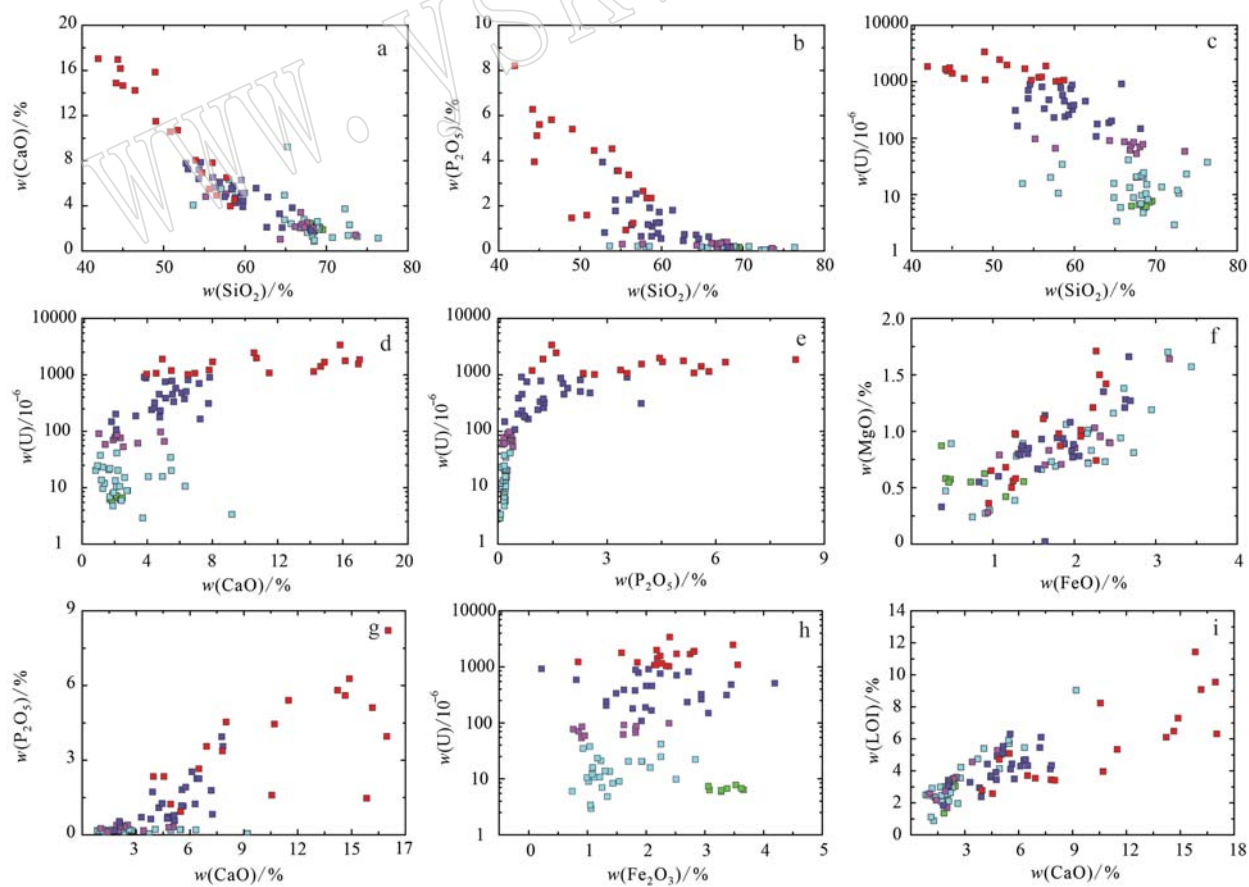


图8 全岩地球化学元素哈克图解 (图例同图6)

Fig. 8 Harker plots of whole-rocks (symbols are the same as Fig. 6)

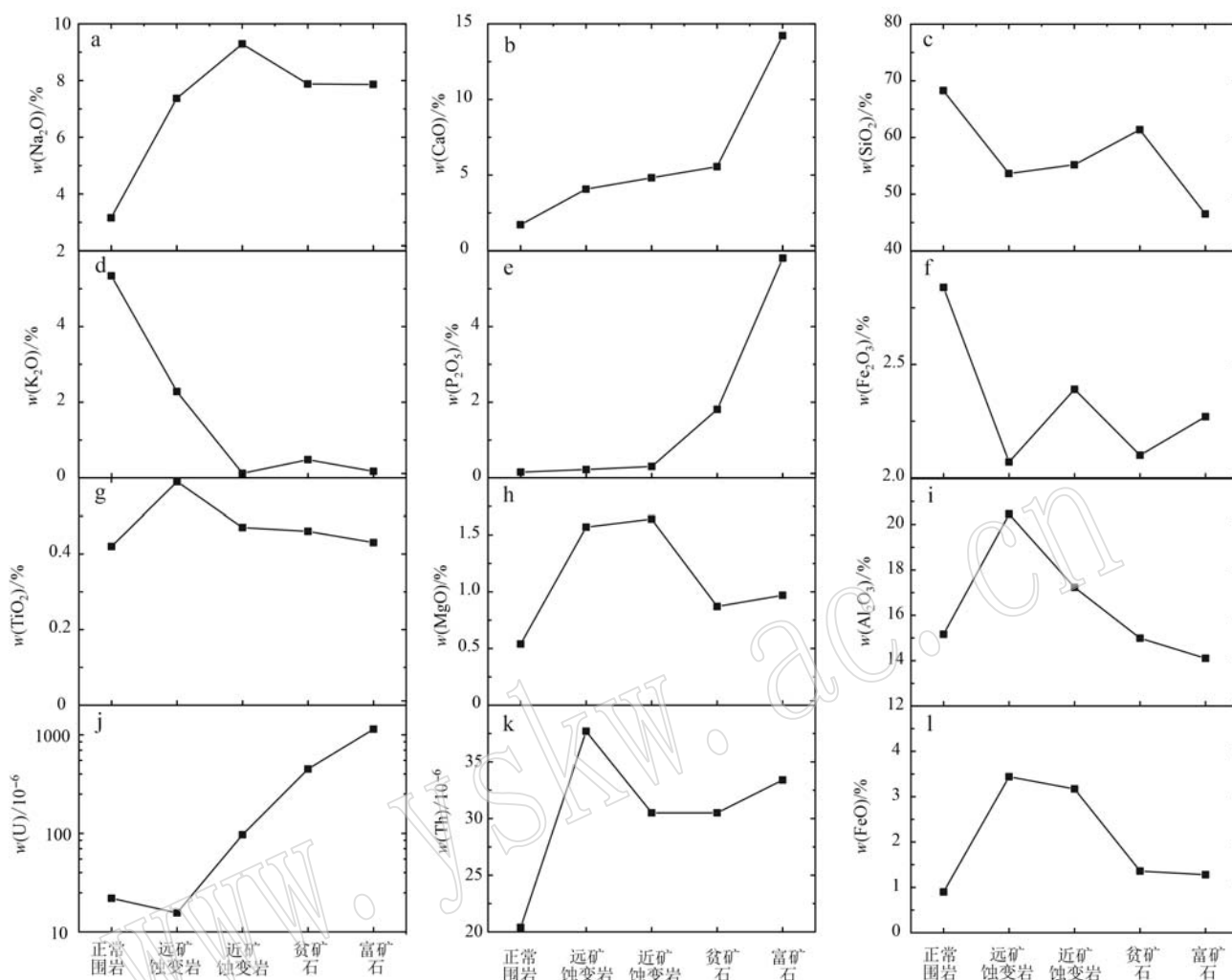


图9 钻孔ZK14-12矿化剖面元素变化图解

Fig. 9 Diagram of elemental change of ZK14-12 drill section

中,表现出铀淋滤的趋势,表明它们在遭受碱交代蚀变的同时,发生了铀的活化迁出。而大部分的蚀变样品在图6d中表现出铀富集的趋势,表明碱交代作用之后的含铀成矿流体对蚀变岩进行了叠加改造,使得铀迁入了蚀变带内。王运等(2012)认为碱交代蚀变不仅使得赋存于副矿物(如黑云母、锆石、独居石、铀钍石等)中的铀被活化迁移形成游离态的 U^{6+} ,还通过去硅化、钾钠交代,大大降低了岩石机械强度,增加了孔隙度,促使了成矿流体的迁移(章邦桐等,1990)。此外,碱交代形成的绿泥石、伊利石、绢云母、水白云母等黏土矿物对沉淀形成的铀矿物又有吸附作用,具有富集铀的效果(温志坚等,2000)。鹏姑山地区蚀变带内发育钠长石化、去硅化、绿泥石化、磷灰石化、碳酸盐化、黄铁矿化为主(图3n~3o、图4),而铀矿物多与磷灰石和方解石共生(图5),暗

示磷灰石化和碳酸盐化可能是导致铀矿的沉淀重要因素,可作为找矿标志。

4.3 对成矿作用的启示

碱交代岩石是K、Na等碱金属带入形成的热液蚀变岩,分为钠交代岩、钾交代岩和钠钾混合交代岩(杜乐天,2002)。碱交代型铀矿化则指产于碱交代岩中的热液铀矿化,铀矿化与碱交代岩在空间上有着密切的联系,但铀矿化却不是形成于碱交代作用,碱交代岩仅仅是有利的容矿岩石(吴俊奇等,1998;杜乐天等,2009)。在鹏姑山地区,蚀变岩普遍经历了明显的钠交代作用,形成了广泛的钠交代岩,但区内铀矿化却与晚期的磷灰石化和碳酸盐化关系更为密切,也说明钠交代为成矿的早期蚀变,而磷灰石化和碳酸盐化才是成矿期蚀变。这与前人报道的碱交代型铀矿化特征(杜乐天,2002;邓平等,2005;朱

捌, 2010; 胡宝群等, 2016) 也相吻合。

杜乐天(2011)认为, 碱交代型铀矿化往往属于早期高温铀矿化, 发育在矿床的深部, 与深部发育的碱交代体关系密切。对鹏姑山地区铀矿石的扫描电镜分析发现, 铀矿物主要以钛铀矿为主, 晶质铀矿次之, 钛铀矿颗粒内部和边缘常常伴随产出有大量的钍石、铀钍石(图5), 矿脉内包裹有早期形成的黄铁矿(图5b、5d、5e、5f)。晶质铀矿和钛铀矿一般形成于中高温热液环境中, 结合它们在鹏姑山地区的矿物组合, 我们认为鹏姑山地区铀矿化属于碱交代型铀矿化, 形成于中高温的还原性环境中。此外, 前人在相山铀矿田邹家山、居隆庵、李家岭等矿床也报道了碱交代型铀矿化(王运等, 2012; 胡宝群等, 2016; 李海东等, 2016; 王峰等, 2017), 表明碱交代型铀矿化在相山铀矿田内是一种较为普遍的现象。

在鹏姑山地区, 铀矿石中的磷灰石与钛铀矿、晶质铀矿、铀钍石等铀矿物紧密共生(图5a、5b), 说明磷灰石与铀矿化存在紧密的联系, 类似于邹家山矿床的碱交代型铀矿石(高海东等, 2020)。实验地球化学表明, 磷与铀的地球化学特征较相近, 在热液流体中存在共迁移、共沉淀的现象(谢佑新等, 1997)。相山矿田方解石 C-O 同位素和黄铁矿 He-Ar 同位素组成表明有不同比例的幔源成矿流体或物质参与到了热液铀成矿过程中(Hu *et al.*, 2008; 严冰等, 2014)。磷是地幔流体的特征性示踪成分(杜乐天, 1996; 温志坚等, 1999a), 会随着地幔流体参与与成矿, 而形成富磷、富铀的成矿流体。矿石中广泛存在钛铀矿、铀钍石和钍石, 表面成矿流体不仅富铀, 还富含大量的钍和钍。王运等(2020)认为, 相山矿田钛铀矿中的钍主要来自赋矿的围岩, 如碎斑熔岩和流纹英安斑岩。钍在岩浆热液中和铀具有相似的地球化学性质, 表现为强不相容性, 而在中低温热液流体中, 铀和钍的地球化学性质则具有明显差别, 钍相对稳定, 铀则相对活动。Bonnetti 等(2020)对相山早期铀矿化的研究显示, 早期铀矿化的形成与区域上和相山矿田深部的幔源碱性岩浆活动密切相关。由此推测, 鹏姑山地区矿石中大量的钍石和铀钍石发育, 可能指示成矿流体中有部分岩浆热液加入。在鹏姑山地区高温还原性流体中, 铀主要以 $(\text{UO}_2)^{2-}$ 形式存在。当成矿流体物理化学性质发生改变时, 成矿流体的氧逸度迅速降低, 使得磷灰石和方解石沉淀消耗 CO_3^{2-} 、 OH^- 、 F^- 、 Cl^- 等络阴离子(温志坚等,

1999a), 破坏了成矿流体化学组分的平衡, 同时, 新形成的羟基磷灰石对 $(\text{UO}_2)^{2-}$ 具有较强的吸附性, 使得铀矿物会沉淀在磷灰石晶体内部或表面(张慧等, 2019; 高海东等, 2020), 这也促使了铀矿物的形成。正是磷灰石和铀矿化存在紧密的联系, 才使得鹏姑山地区铀矿石中 P_2O_5 和 CaO 的含量显著增加。

4.4 对找矿勘查的启示

围岩蚀变是热液铀矿床的显著标志, 铀矿化产于蚀变中心的破碎带或裂隙带内, 围岩蚀变则往往以矿体为中心, 往两侧呈带状分布。因此, 围岩蚀变被认为是野外勘查工作的重要找矿标志。查明与铀矿化关系密切的特定蚀变或蚀变组合, 对找矿勘查具有重要的意义。

鹏姑山地区的围岩蚀变以钠长石化、去硅化、绿泥石化和伊利石化为主, 局部叠加有磷灰石化、黄铁矿化、碳酸盐化和硅化。由正常围岩到矿体, 钠长石化、去硅化、磷灰石化逐渐增强, 绿泥石化、伊利石化、黄铁矿化在近矿蚀变岩和远矿蚀变岩最为强烈。碳酸盐化和磷灰石化在矿体部分最为强烈。由此, 建立了鹏姑山地区铀矿化的热液蚀变分带模型, 见图10。一般而言, 钠交代蚀变范围最广, 其分布一般从矿体所在位置向外延伸 10~50 m, 个别情况下向外延伸可超过 50 m; 绿泥石化和黄铁矿化蚀变范围其次, 距离矿体大于 10 m; 磷灰石化和碳酸盐矿化蚀变范围最窄, 距离矿体最近(<10 m)。因此, 在野外勘查和钻井编录过程中, 应加强对钠长石化蚀变的判别, 再在钠交代岩的范围内寻找绿泥石化和黄铁矿化蚀变, 最后进一步寻找磷灰石化和碳酸盐矿化蚀变。磷灰石化和碳酸盐矿化往往在矿体部位发育最为强烈, 可以视为最为重要的找矿标志。

5 结论

(1) 鹏姑山地区高温热液蚀变主要为钠长石化、去硅化、绿泥石化和伊利石化为主, 局部叠加有磷灰石化、黄铁矿化、碳酸盐化和硅化。

(2) 铀矿化与钠长石化、磷灰石化、碳酸盐化和去硅化蚀变关系密切。热液蚀变主要起到促使铀活化和铀矿物沉淀的作用。

(3) 研究区铀矿化属碱交代型铀矿化, 形成于中高温的还原性环境, 磷灰石化促进了铀矿物的沉淀和富集。

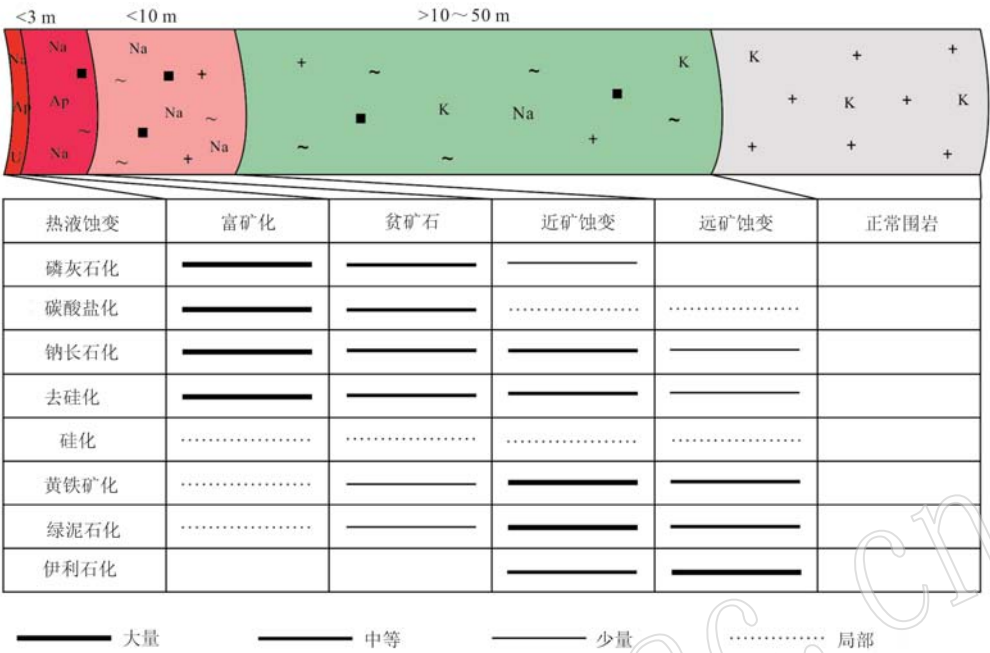


图 10 鹏姑山地区热液蚀变分带模型
Fig. 10 Zone model of hydrothermal alteration in the Penggushan district

(4) 碱交代之后叠加的磷灰石化和碳酸盐化在矿体部位发育最强烈,可视为鹏姑山地区找矿勘查中最重要的找矿标志。

References

Bonnetti C, Liu X D, Cuney M, *et al.* 2020. Evolution of the uranium mineralisation in the Zoujiashan deposit, Xiangshan ore field: Implications for the genesis of volcanic-related hydrothermal U deposits in South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 122: 103514.

Cai Yuqi, Zhang Jindai, Li Ziyin, *et al.* 2015. Outline of uranium resources characteristics and metallogenetic regularity in China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 89(6): 1 051~1 069 (in Chinese with English abstract).

Chen Zhengle, Yang Nong, Wang Pingan, *et al.* 2011. Analysis of the tectonic stress field in the Xiangshan uranium orefield, Linchuang area, Jiangxi, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 30(4): 514~531(in Chinese with English abstract).

Deng Ping, Ling Hongfei, Shen Weizhou, *et al.* 2005. A discussion on alkali metasomatism in Shituling uranium deposit, Northern Guangdong Province[J]. *Geological Review*, 51(5): 79~87(in Chinese with English abstract).

Dolníček Z, René M, Hermannová S, *et al.* 2014. Origin of the Okrouhlá Radouň episyenite-hosted uranium deposit, Bohemian Massif, Czech Republic: Fluid inclusion and stable isotope constraints [J]. *Mineralium deposita*, 49(4): 409~425.

Du Letian. 1996. The relationship between crust fluids and mantle fluids [J]. *Earth Science Frontiers*, 3(3~4): 13~21 (in Chinese with English abstract).

Du Letian. 2002. The important significance of alkali-metasomatic rock studies[J]. *Mineral Deposits*, 21(S1): 953~958 (in Chinese with English abstract).

Du Letian. 2011. On the theory system of hydrothermal uranium metalization in China[J]. *Uranium Geology*, 27(2): 65~68, 80(in Chinese with English abstract).

Du Letian and Wang Wenguang. 2009. Alkaline mantle fluids and alkali-rich hydrothermal metallogenesis[J]. *Mineral Deposit*, 28(5): 599~610(in Chinese with English abstract).

Fan Honghai, Ling Hongfei, Wang Dezi, *et al.* 2003. Study on metallogenetic mechanism of Xiangshan uranium ore-field[J]. *Uranium Geology*, 19(4): 208~213(in Chinese with English abstract).

Fan Honghai, Wang Dezi, Liu Changshi, *et al.* 2001. Discovery of quenched enclaves in subvolcanic rocks in Xiangshan, Jiangxi Province and its genetic mechanism[J]. *Acta Geologica Sinica*, 75(1): 64~69, 146(in Chinese with English abstract).

Fang Xiheng, Hou Wen Yao and Wan Guoliang. 1982. Petrographic stud-

- ies of the volcanic complex in the Xiangshan caldera[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 1(1): 1~10(in Chinese with English abstract).
- Gao Haidong, Wang Yun, Qiu Linfei, *et al.* 2020. Mineralogical characteristics of apatite from the Zoujiashan uranium deposit and its implication on uranium mineralization[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 44(6): 113~127(in Chinese with English abstract).
- Hu Baoqun, Wang Qian, Qiu Linfei, *et al.* 2016. Geochemistry of alkali metasomatized rocks of Zoujiashan uranium ore-deposit in Xiangshan ore-field[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 40(2): 377~385(in Chinese with English abstract).
- Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Peng Jiantang, *et al.* 2007. Some problems concerning relationship between Mesozoic-Cenozoic lithospheric extension and uranium metallogenesis in South China[J]. *Mineral Deposits*, 26(2): 139~152(in Chinese with English abstract).
- Hu R Z, Bi X W, Zhou M F, *et al.* 2008. Uranium metallogenesis in South China and its relationship to crustal extension during the Cretaceous to Tertiary[J]. *Economic Geology*, 103(3): 583~598.
- Hunger R B, Xavier R P, Moreto C P N, *et al.* 2018. Hydrothermal alteration, fluid evolution, and Re-Os geochronology of the Grota Funda iron oxide copper-gold deposit, Carajas Province (Para State), Brazil[J]. *Economic Geology*, 113(8): 1769~1794.
- Kishida A and Kerrich R. 1987. Hydrothermal alteration zoning and gold concentration at the Kerr-Addison Archean lode gold deposit, Kirkland Lake, Ontario[J]. *Economic Geology*, 82(3): 649~690.
- Kumar C, Chatterjee S and Oommen T. 2020. Mapping hydrothermal alteration minerals using high-resolution AVIRIS-NG hyperspectral data in the Hutti-Maski gold deposit area, India[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 41(2): 794~812.
- Li Haidong, Pan Jiayong, Xia Fei, *et al.* 2016. Hydrothermal alteration and its geochemical characteristics of Lijialing deposit in Xiangshan uranium ore deposit[J]. *Geoscience*, 30(3): 555~566(in Chinese with English abstract).
- Liu Guoqi, Xia Fei, Pan Jiayong, *et al.* 2011. Multivariate statistical analysis based geochemical characteristics of trace elements in the Xiangshan uranium ore field[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 30(4): 423~432(in Chinese with English abstract).
- Liu Long, Zhang Shuming, Rao Zehuang, *et al.* 2020. Geochronology, Geochemistry of lamprophyre and evidence for mantle fluid in the western part of Xiangshan uranium orefield[J/OL]. *Geology in China*, 1~19. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20201022.1135.004.html> (in Chinese with English abstract).
- Liu Xuelong, Li Wenchang, Zhang Na, *et al.* 2020. Tongchanggou porphyry Mo-Cu deposit in Zhongdian area of northwestern Yunnan: Hydrothermal alteration zone, vein system and prospecting indicator[J]. *Mineral Deposits*, 39(5): 845~866(in Chinese with English abstract).
- Lü Chengxun, Huo Qinglong, Tang Zhanxin, *et al.* 2021. Structural alteration zone and listric distribution characteristics in Northwest Jiadong Peninsula[J]. *Geoscience*, 35(5): 1274~1281(in Chinese with English abstract).
- Min M Z, Luo X Z, Du G S, *et al.* 1999. Mineralogical and geochemical constraints on the genesis of the granite-hosted Huangao uranium deposit, SE China[J]. *Ore Geology Reviews*, 14(2): 105~127.
- Monteiro L V S, Xavier R P, Hitzman M W, *et al.* 2008. Mineral chemistry of ore and hydrothermal alteration at the Sossego iron oxide-copper-gold deposit, Carajás Mineral Province, Brazil[J]. *Ore Geology Reviews*, 34(3): 317~336.
- Petersson J and Eliasson T. 1997. Mineral evolution and element mobility during episyenitization (dequartzification) and albitization in the postkinematic Bohus granite, southwest Sweden[J]. *Lithos*, 42(1~2): 123~146.
- Tan Shuang, Chen Qi, Wan Jianjun, *et al.* 2022. Characteristics of chlorite in Xiangyangping uranium ore deposit, middle segment of Miaoshan and its petrogenetic and metallogenic significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 41(6): 1097~1108(in Chinese with English abstract).
- Tang Juxing, Song Yang, Wang Qin, *et al.* 2016. Geological characteristics and exploration model of the Tiegelongnan Cu (Au-Ag) deposit: The first ten million tons metal resources of a porphyry-epithermal deposit in Tibet[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 37(6): 663~690(in Chinese with English abstract).
- Wang Feng, Lin Jinrong, Hu Zhihua, *et al.* 2017. Metallogenic characteristics of alkali and acid metasomatism in Julong'an uranium deposit[J]. *Uranium Geology*, 33(3): 144~149(in Chinese with English abstract).
- Wang Yun, Hu Baoqun, Gao Haidong, *et al.* 2022. Modes of occurrence of Ti in supernormal enriched uranium ore of Zoujiashan deposit and its significance for uranium mineralization[J]. *Mineral Deposit*, 39(6): 1049~1062(in Chinese with English abstract).
- Wang Yun, Hu Baoqun, Sun Zhanxue, *et al.* 2012. The geochemical characteristics of alkali metasomatic ore and its ore-forming significance at Zoujiashan deposit, Xiangshan uranium field[J]. *Uranium Geology*, 28(5): 281~289(in Chinese with English abstract).
- Wen Zhijian, Du Letian and Liu Zhengyi. 1999a. Relation between francolite and metallogenesis of high-grade uranium ores in Xiangshan

- uranium orefield[J]. *Uranium Geology*, 15(4): 26~33(in Chinese with English abstract).
- Wen Zhijian, Du Letian and Liu Zhengyi. 1999b. The ore-forming model of xiangshan uranium ore field[J]. *Geological Review*, 45(S1): 763~767(in Chinese with English abstract).
- Wen Zhijian, Du Letian and Liu Zhengyi. 2000. Relationship between hydrometallization and uranium mineralization in the Xiangshan ore-field[J]. *Mineral Deposits*, 19(3): 257~263(in Chinese with English abstract).
- Wu Dehai, Xia Fei, Pan Jiayong, *et al.* 2019. Characteristics of hydrothermal alteration and material migration of Mianhuakeng uranium deposit in northern Guangdong Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(9): 2745~2764(in Chinese with English abstract).
- Wu Junqi, Min Maozhong, Zhai Jianping, *et al.* 1998. Alkali metasomatic alteration of the granite in Middle Chuguan Mountain, South China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 14(1): 91~99(in Chinese with English abstract).
- Wu Yu, Pan Jiayong, Xia Fei, *et al.* 2013. Uranium mineralization characteristics and ore-control factors in Shazaoquan Area of Badanjilin Basin[J]. *Uranium Geology*, 29(1): 9~17, 23(in Chinese with English abstract).
- Xie Youxin, Wei Sanyuan and Liu Xiaoyu. 1997. Prospecting model for super-large size uranium deposit and prospecting assessment in Fujian, Jiangxi and Guangdong Provinces[J]. *China Nuclear Science and Technology Report*, (S1): 28~29(in Chinese with English abstract).
- Yan Bing, Yan Han, Wei Wenfeng, *et al.* 2014. Helium-Argon isotopic characters and geological significance of the Shazhou uranium deposit, Xiangshan orefield, Jiangxi Province[J]. *Geological Review*, 60(3): 624~634(in Chinese with English abstract).
- Yang Shuiyuan, Jiang Shaoyong, Jiang Yaohui, *et al.* 2010. Zircon U-Pb geochronology, Hf isotopic composition and geological implications of the rhyodacite and rhyodacitic porphyry in the Xiangshan uranium ore field, Jiangxi Province[J]. *Science China: Earth Science*, 40(8): 953~969(in Chinese with English abstract).
- Yang Shuiyuan, Jiang Shaoyong, Zhao Kuidong, *et al.* 2012. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotopic compositions of the rhyolite porphyry from the Zhoujiaoshan deposit in Xiangshan uranium ore field, Jiangxi Province, SE China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(12): 3915~3928(in Chinese with English abstract).
- Yu C D, Wang K X, Liu X D, *et al.* 2020. Hydrothermal alteration and elemental mass changes of the Xiangyangping uranium deposit in the Miaoershan ore field, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 125: 103675.
- Yu Xinqi, Wu Ganguo, Shu Liangshu, *et al.* 2006. The Cretaceous tectonism of the Gan-Hang tectonic belt, southeastern China[J]. *Earth Science Frontiers*, 13(3): 31~43(in Chinese with English abstract).
- Zhao H B, Zhang Y and Liu L. 2021. Hydrothermal alteration processes in the giant Dahutang tungsten deposit, South China: Implications from litho-geochemistry and mass balance calculation[J]. *China Geology*, 4(2): 230~244.
- Zhang Bangdong, Wu Junqi, Qiu Zhili, *et al.* 1990. On the relationship between hydrothermal alteration and uranium enrichment[J]. *Geological Review*, 36(3): 238~244, 291(in Chinese with English abstract).
- Zhang Hui, Luo Mingbiao, Xue Zhiliang, *et al.* 2019. Role of hydroxyapatite in uranium enrichment and mineralization[J]. *Hydrometallurgy of China*, 38(5): 416~421(in Chinese with English abstract).
- Zhang Tao, Huang Hongye, Li Jie, *et al.* 2020. In situ micro-determination on ore-bearing minerals, geochemical characteristics of REE and their constraints on ore-forming fluids in the Xiangyangping uranium deposit, northern Guangxi[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 39(4): 423~440(in Chinese with English abstract).
- Zhao Ruyi, Chen Yunjie, Wu Bin, *et al.* 2013. A metallogenic model of the sodic-metasomatic type uranium deposit in the Jiling area of Longshoushan, Gansu Province[J]. *Geology and Exploration*, 49(1): 67~74(in Chinese with English abstract).
- Zhu Ba. 2010. The Study of Mantle Liquid and Uranium Metallogenesis: Take Uranium Ore Field of South Zhuguang Mountain as An Example[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 1~104(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 蔡煜琦, 张金带, 李子颖, 等. 2015. 中国铀矿资源特征及成矿规律概要[J]. *地质学报*, 89(6): 1051~1069.
- 陈正乐, 杨农, 王平安, 等. 2011. 江西临川地区相山铀矿田构造应力场分析[J]. *地质通报*, 30(4): 514~531.
- 邓平, 凌洪飞, 沈渭洲, 等. 2005. 粤北石土岭铀矿床碱交代作用成因探讨[J]. *地质论评*, 51(5): 79~87.
- 杜乐天. 1996. 地壳流体与地幔流体间的关系[J]. *地学前缘*, 3(4): 13~21.
- 杜乐天. 2002. 碱交代岩研究的重大成因意义[J]. *矿床地质*, 21

- (S1): 953~958.
- 杜乐天. 2011. 中国热液铀矿成矿理论体系[J]. 铀矿地质, 27(2): 65~68, 80.
- 杜乐天, 王文广. 2009. 碱型地幔流体与富碱热液成矿[J]. 矿床地质, 28(5): 599~610.
- 范洪海, 凌洪飞, 王德滋, 等. 2003. 相山铀矿田成矿机理研究[J]. 铀矿地质, 19(4): 208~213.
- 范洪海, 王德滋, 刘昌实, 等. 2001. 江西相山潜火山岩中淬冷包体的发现及其成因机制探讨[J]. 地质学报, 75(1): 64~69, 146.
- 方锡珩, 侯文尧, 万国良. 1982. 相山破火山口火山杂岩体的岩石学研究[J]. 岩矿测试, 1(1): 1~10.
- 高海东, 王运, 邱林飞, 等. 2020. 相山矿田邹家山铀矿床矿石中磷灰石的矿物学特征及其铀成矿意义[J]. 大地构造与成矿学, 44(6): 1113~1127.
- 胡宝群, 王倩, 邱林飞, 等. 2016. 相山矿田邹家山铀矿床碱交代矿化蚀变岩地球化学[J]. 大地构造与成矿学, 40(2): 377~385.
- 胡瑞忠, 毕献武, 彭建堂, 等. 2007. 华南地区中生代以来岩石圈伸展及其与铀成矿关系研究的若干问题[J]. 矿床地质, 26(2): 139~152.
- 李海东, 潘家永, 夏菲, 等. 2016. 相山李家岭铀矿床热液蚀变作用地球化学特征[J]. 现代地质, 30(3): 555~566.
- 刘国奇, 夏菲, 潘家永, 等. 2011. 基于多元统计的相山铀矿田微量元素地球化学特征分析[J]. 矿物岩石地球化学通报, 30(4): 423~432.
- 刘龙, 张树明, 饶泽煌, 等. 2020. 相山铀矿田西部煌斑岩年代学、地球化学及幔源流体的证据[J/OL]. 中国地质, 1~19. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20201022.1135.004.html>.
- 刘学龙, 李文昌, 张娜, 等. 2020. 滇西北中甸地区铜厂沟斑岩铜矿床热液蚀变分带、脉体系统及找矿标志[J]. 矿床地质, 39(5): 845~866.
- 吕承训, 霍庆龙, 唐占信, 等. 2021. 胶西北断裂构造蚀变分带及其矿式分布特征[J]. 现代地质, 35(5): 1274~1281.
- 谭双, 陈琪, 万建军, 等. 2022. 苗儿山中段向阳坪铀矿床绿泥石特征及其成岩成矿意义[J]. 岩石矿物学杂志, 41(6): 1097~1108.
- 唐菊兴, 宋扬, 王勤, 等. 2016. 西藏铁格隆南铜(金银)矿床地质特征及勘查模型——西藏首例千万吨级斑岩-浅成低温热液型矿床[J]. 地球学报, 37(6): 663~690.
- 王峰, 林锦荣, 胡志华, 等. 2017. 居隆庵铀矿床酸碱交代叠合成矿特征[J]. 铀矿地质, 33(3): 144~149.
- 王运, 胡宝群, 高海东, 等. 2020. 邹家山矿床超常富集铀矿石Ti的赋存特征及其铀成矿意义[J]. 矿床地质, 39(6): 1049~1062.
- 王运, 胡宝群, 孙占学, 等. 2012. 相山铀矿田邹家山矿床碱交代型矿石地球化学特征及其成矿意义[J]. 铀矿地质, 28(5): 281~289.
- 温志坚, 杜乐天, 刘正义. 1999a. 相山铀矿田磷灰石与富矿形成的关系[J]. 铀矿地质, 15(4): 26~33.
- 温志坚, 杜乐天, 刘正义. 1999b. 相山铀矿田特富矿成矿模式[J]. 地质论评, 45(S1): 763~767.
- 温志坚, 杜乐天, 刘正义. 2000. 相山矿田热液水云母化及其与铀矿化关系研究[J]. 矿床地质, 19(3): 257~263.
- 吴德海, 夏菲, 潘家永, 等. 2019. 粤北棉花坑铀矿床热液蚀变与物质迁移研究[J]. 岩石学报, 35(9): 2745~2764.
- 吴俊奇, 闵茂中, 翟建平, 等. 1998. 华南诸广山复式岩体中段花岗岩的碱交代蚀变[J]. 岩石学报, 14(1): 91~99.
- 吴玉, 潘家永, 夏菲, 等. 2013. 相山横洞-岗上英铀矿床围岩蚀变及地球化学特征[J]. 铀矿地质, 29(1): 9~17, 23.
- 谢佑新, 卫三元, 刘小宇. 1997. 大型、超大型火山岩型铀矿床找矿模式及闽粤赣边区成矿远景评估[J]. 中国核科技报告, (S1): 28~29.
- 严冰, 严寒, 魏文凤, 等. 2014. 江西相山沙洲铀矿床He、Ar同位素特征及其地质意义[J]. 地质论评, 60(3): 624~634.
- 杨水源, 蒋少涌, 姜耀辉, 等. 2010. 江西相山流纹英安岩和流纹英安斑岩锆石U-Pb年代学和Hf同位素组成及其地质意义[J]. 中国科学: 地球科学, 40(8): 953~969.
- 杨水源, 蒋少涌, 赵葵东, 等. 2012. 江西相山铀矿田邹家山矿床中流纹斑岩的锆石U-Pb年代学、岩石地球化学与Sr-Nd-Hf同位素组成[J]. 岩石学报, 28(12): 3915~3928.
- 余心起, 吴淦国, 舒良树, 等. 2006. 白垩纪时期赣杭构造带的伸展作用[J]. 地学前缘, 13(3): 31~43.
- 章邦桐, 吴俊奇, 丘志力, 等. 1990. 论热液蚀变与铀成矿富集作用的关系[J]. 地质论评, 36(3): 238~244, 291.
- 张慧, 罗明标, 徐志良, 等. 2019. 羟基磷灰石在铀富集成矿中的作用[J]. 湿法冶金, 38(5): 416~421.
- 张涛, 黄宏业, 李杰, 等. 2020. 桂北向阳坪铀矿床矿石矿物LA-ICP-MS原位稀土元素地球化学特征及其对成矿流体的制约[J]. 岩石矿物学杂志, 39(4): 423~440.
- 赵如意, 陈云杰, 武彬, 等. 2013. 甘肃龙首山菱岭地区钠交代型铀矿成矿模式研究[J]. 地质与勘探, 49(1): 67~74.
- 朱捌. 2010. 地幔流体与铀成矿作用研究——以诸广山南部铀矿田为例[D]. 成都: 成都理工大学, 1~104.