

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.348>



# 甘肃省龙首山芨岭铀矿床蚀变和地球化学分带性特征:以钻孔 ZKJ29-3 为例

赵如意<sup>1,2</sup>, 陈毓川<sup>2</sup>, 陈云杰<sup>3</sup>, 荣 骁<sup>3</sup>, 王 刚<sup>3</sup>, 李 涛<sup>3</sup>

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. 中国地质科学院矿产资源研究所, 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037
3. 核工业二〇三研究所, 陕西咸阳 712000

**摘 要:** 芨岭铀矿床是解析龙首山成矿带铀成矿作用的关键所在。通过地质编录、镜下观察、电子探针和地球化学特征研究, 综合矿床与周边铀矿点的蚀变和地球化学特征, 将热液作用分为成矿前、成矿早期、主成矿、后成矿和成矿后等 5 个阶段。自矿体中心向外(A→F)的 6 个蚀变带中 Na<sub>2</sub>O、U 含量递减, SiO<sub>2</sub> 和 Rb 含量呈宽缓的“U”型, FeO 和 MgO 在 A 和 E 带中形成双峰, 而 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 HREE 则在 A 和 D 带含量较高, TiO<sub>2</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、MnO、CO<sub>2</sub>、Zr、V、Cs、REE 等组分主要富集于 B、C 和 D 带。成矿流体是起源于岩浆演化晚期的再平衡岩浆水, 富含 Na<sup>+</sup>、U<sup>6+</sup>、CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>。逆向沸腾是主要的成矿机制, pH 和 Eh 的变化进一步促进了沥青铀矿的沉淀。以蚀变组合分带与铀矿化关系为指导, 有望在龙首山成矿带中段落实一个大型铀矿基地。

**关键词:** 龙首山; 芨岭; 钠交代型铀矿; 蚀变矿物组合; 地球化学; 含铀热液; 资源潜力。

中图分类号: P611.1

文章编号: 1000-2383(2020)02-434-17

收稿日期: 2018-12-14

## The Characteristics of Geochemistry and Alteration of the Jiling Uranium Deposit in the Longshou Mountains, Gansu Province: A Case Study from Drill ZKJ29-3

Zhao Ruyi<sup>1,2</sup>, Chen Yuchuan<sup>2</sup>, Chen Yunjie<sup>3</sup>, Rong Xiao<sup>3</sup>, Wang Gang<sup>3</sup>, Li Tao<sup>3</sup>

1. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013 China
2. Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Resource Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China
3. The No. 203 Research Institute of Nuclear Industry, Xiayang 712000, China

**Abstract:** The Jiling Na-metasomatic uranium deposit is one of the most important deposits in the Longshou mountains ore belt, which is a key to the research on uranium mineralization in this area. Based on the logging data, microscope analysis, electronic probe and geochemical characteristics, we divide hydrothermal process into 5 stages including premetallogenic, early metallogenic, main metallogenic, post-metallogenic and after metallogenic stage. The alteration zones can be divided into zone A to zone F from the ore center to the alteration outer, and their geochemical characteristics are as follows: Na<sub>2</sub>O and U contents decreasing distinctly from zone A to zone F; SiO<sub>2</sub> and Rb contents show a relieved “U” type; FeO and MgO contents show bimodal in zone A and zone E, while P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and HREEs contents are relatively higher in zone A and Zone D; TiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MnO, CO<sub>2</sub>, Zr, V, Cs and REEs contents are distinctly higher in zones B, C and D. The ore forming hydrothermal solution is

**基金项目:** 中国核工业地质局项目(Nos. 201349, 201571); 中国地质调查局中国矿产地质与成矿规律综合集成和服务(矿产地质志)项目(No. DD20160346); 中国地质调查局项目(Nos. 12120114014901, DD2016013622); 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室自主基金项目(No. Z1914).

**作者简介:** 赵如意(1982—), 男, 工程师, 博士后, 主要从事矿产资源调查与评价工作, 重点进行岩浆岩与成矿研究。ORCID: 0000-0001-9877-0262. E-mail: 93236749@qq.com

**引用格式:** 赵如意, 陈毓川, 陈云杰, 等, 2020. 甘肃省龙首山芨岭铀矿床蚀变和地球化学分带性特征: 以钻孔 ZKJ29-3 为例. 地球科学, 45(2): 434-450.

rebalanced magma water, which is rich in  $\text{Na}^+$ ,  $\text{U}^{6+}$  and  $\text{CO}_3^{2-}$ . Pitchblende was downloaded from hydrothermal solution by fluid boiling for pressure releasing suddenly, and the changing of pH and Eh promoted the conversion from  $\text{U}^{6+}$  to  $\text{U}^{4+}$ . It could be hoped for a large scale uranium base are to be found under the guidance of altered mineral assemblages diagram in deep prospecting and ore forecasting.

**Key words:** Longshou mountains; Jiling; Na-metasomatic type uranium; alteration mineral assemblages; geochemistry; U-bearing hydrothermal; resource potential.

## 0 引言

中国的铀矿床以砂岩型、花岗岩型、火山岩型和碳硅泥岩型等4大类型为主(张金带等,2012),其中花岗岩型铀矿和火山岩型铀矿为热液型铀矿床。火山岩型铀矿床产于酸性或碱性陆相火山岩系中,除二叠纪白杨河矿床外,绝大部分产出于中生代晚期白垩纪的滨太平洋铀成矿域(蔡煜琦等,2015)。花岗岩型铀矿的产出多与S型花岗岩相关,产出时代自1.9 Ga至10 Ma都有,主要集中于140~50 Ma的华东南。热液型铀矿床多数有明显的矿岩时差,其成矿物质可来源于围岩、基底变质岩和富集地幔等,成矿流体与成矿物质可非同源,热源则主要来自于拉张构造背景下的大地热流(Li *et al.*, 2015)。热液蚀变可以分为酸性蚀变和碱交代两个主要类型,酸性蚀变产出的蚀变岩石多呈灰绿色,蚀变类型有硅化、水云母化、绢云母化、绿泥石化、黄铁矿化和黏土化等。碱交代是富碱( $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ ,有时还有 $\text{Li}^+$ 、 $\text{Rb}^+$ 、 $\text{Cs}^+$ )和挥发分热液作用下,蚀变岩石中碱金属含量增加,阳离子群原子价结构产生歧化,从而产生酸碱分离和再分配的一种流体作用。钠交代型铀矿是指在先形成的钠交代岩中再产生铀矿化的矿床类型,钠交代去硅作用常伴有赤铁矿化、绿泥石化和碳酸盐化,新生矿物常具有含碱、富钙、富镁等特征。虽然铀矿化都赋存于蚀变的中心部位,不同矿床蚀变矿物组合和分带性略有差异,如乌克兰中部铀成矿省(CUUP)中钠交代铀矿床的蚀变通常自外向内划分为A→E带5个带(Cuney *et al.*, 2012),中国3022钠交代型铀矿床的蚀变分带自矿体中心向外也可划分为5个带,也有一些矿床蚀变发育但分带性较差,如连山关钠交代型铀矿床。

芨岭钠交代铀矿床位于甘肃省龙首山成矿带中段,是中国北方碱交代型铀矿床的代表(杜乐天,1996)。笔者曾对该矿床蚀变分带进行了初步研究,划分出粉红色方解石化带、球粒状绿泥石化带、雪花状方解石化带、赤铁矿化带、假象绿泥石化带、高

岭土化带和硅化带等7个蚀变带(赵如意等,2013)。在主持该区勘查与评价工作期间,笔者以蚀变分带初步成果为指导思想,综合前人已经取得的地质、物探、水化学异常及钻孔资料,进一步梳理了断裂构造、蚀变分带和铀矿化之间的关系,对矿床外围和深部进行探索。首先在钻孔ZKJ29-3中发现厚度约350 m的钠交代体中赋存了累计厚度近百米的工业矿体( $\text{U}>0.05\%$ ),接着在多条勘探线取得相似进展。虽然初步成果成功地指导了深部找矿工作,但其未包含矿体中心部位发育的蚀变带,且对矿床的形成阶段、矿物组合及各蚀变带地球化学特征研究不足。本文以钻孔ZKJ29-3所见矿体和蚀变岩石为主要研究对象,综合芨岭钠交代型铀矿床的矿物学、岩石学、蚀变、矿化和地球化学特征,补充完善了蚀变矿物组合分带,并研究其地球化学分带性特征,进而探讨了成矿流体性质、热液来源和演化及成矿过程等。

## 1 区域地质背景

芨岭钠交代型铀矿床区域上位于华北板块西南部的龙首山陆缘带(图1a),南接河西走廊、北依潮水盆地(陶刚等,2017;王楠等,2018)。区内出露的最古老岩层为古元古界龙首山岩群,是由一套双峰式火山沉积碎屑岩经中高级变质作用而来(胡能高,2003),它与不整合上覆的中元古界韩母山群和新元古界墩子沟组一起,是龙首山成矿带红石泉白岗岩型铀矿、芨岭和新水井钠交代型铀矿、革命沟硅质角砾岩型铀矿及金边寺淋积型铀矿(原矿为钠交代型)等矿床和矿点、矿化异常点带的主要初始铀源。区域上岩浆作用十分发育,主要有中条期白岗岩(1750 Ma,辛存林等,2013)、晋宁期镁铁—超镁铁岩(827 Ma,李献华等,2004)、加里东期闪长岩(540 Ma,赵如意,2016)、花岗岩(赵亚云等,2016)、碱性岩等,海西期还有少量脉状岩浆活动。地层整体以复式背斜产出,受北西向主构造线的控制,早期断裂构造以北西向为主,衍生有与之小角度相交

的近东西向次级断裂,晚期产生的断裂以北东向和近南北向为主(图 1b).

## 2 矿床地质

芨岭钠交代型铀矿床定位于龙首山成矿带中段南部(图 1b). 矿区内出露的地层为古元古界龙首山岩群的白色大理岩(图 1c),大理岩呈北西向展布于矿区西南部,其长约 1.2 km,地表出露最宽处约 140 m,最窄处仅几米,向深部延伸的控制深度超过 430 m,大理岩上下均以断层与侵入岩相接. 大理岩北侧断层(F<sub>101</sub>)下盘侵入岩为灰色—深灰色闪长岩(540 Ma,赵如意,2016)和肉红色粗粒似斑状花岗岩(458.3±2.3 Ma,张甲民,2017). 闪长岩中粒—中

细粒结构,主要由黑云母、角闪石和斜长石组成. 似斑状花岗岩的斑晶主要为钾长石,呈板状为主,长约 0.8~3.5 cm,含量为 10%~40%,基质部分为粗粒—中粗粒花岗岩. 闪长岩中见有少量基性岩脉(485 Ma,高宇等,2017)侵入,钠长岩脉为矿区所见最晚的岩浆(残浆)活动(442.9±5.7 Ma,赵如意等,2015). 大理岩南侧以断层(F<sub>105</sub>)和中粒花岗岩相接触,矿区外围牛角沟矿点中粒—中粗粒花岗岩的侵位年龄为 445 Ma. 马路沟断裂展布于大理岩的北侧,是 F<sub>101</sub>和 F<sub>102</sub>组成的两条平行断裂,(F<sub>101</sub>和 F<sub>102</sub>)为大理岩北侧断裂,它是芨岭铀矿床的控矿断裂,两者相距几米~几十米,产状一致,为 220°~230°∠60°~70°. 大理岩南侧断裂 F<sub>105</sub>产状为 30°~35°

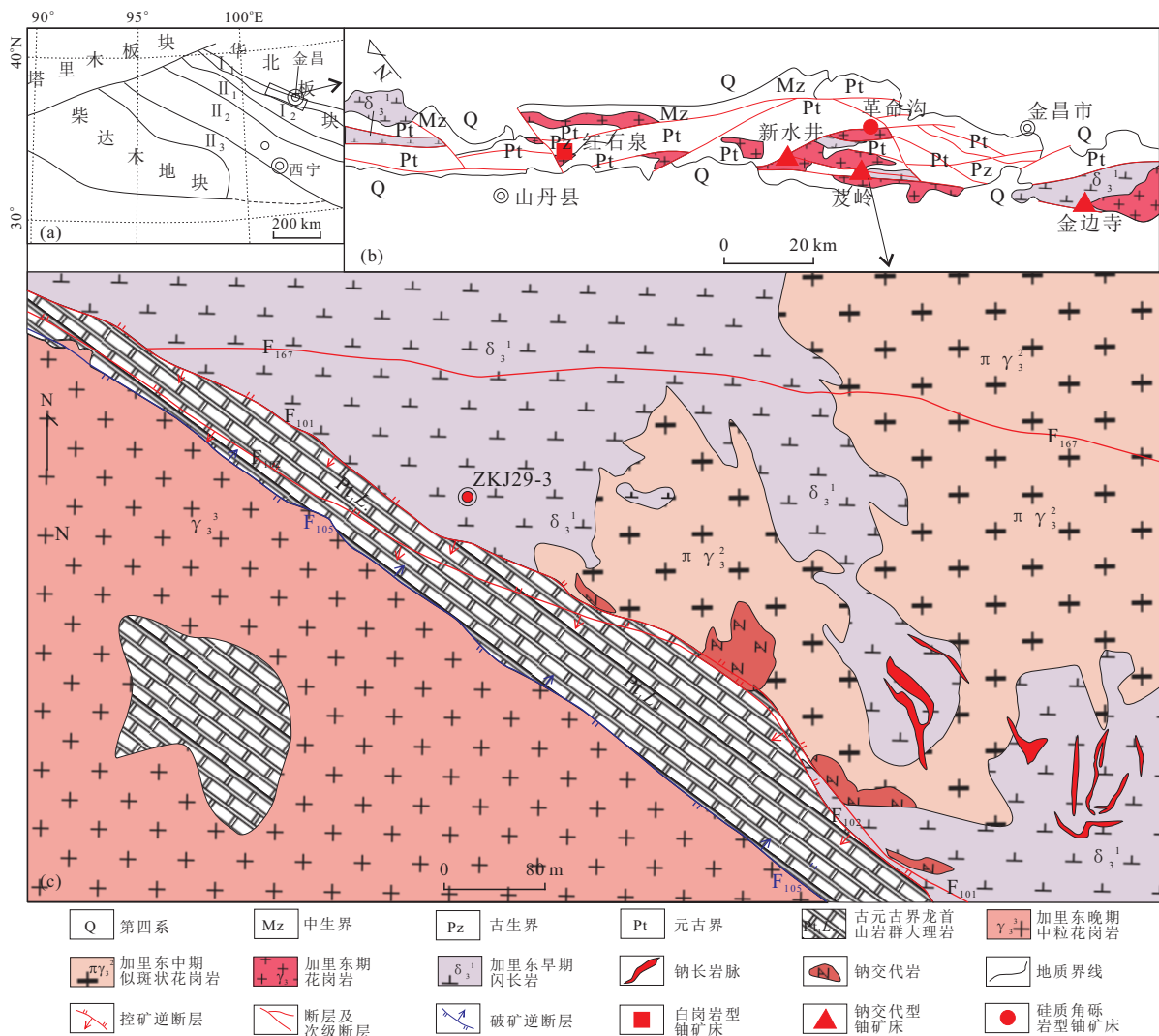


图 1 甘肃龙首山芨岭钠交代型铀矿床大地构造位置(a)、区域地质(b)和矿床地质图(c)

Fig.1 The tectonic setting(a), regional (b) and deposit (c) geological maps of the Jiling Na-metasomatic uranium deposit in the Longshou mountains, Gansu Province

I<sub>1</sub>. 龙首山陆缘带; I<sub>2</sub>. 河西走廊; II<sub>1</sub>. 北祁连缝合带; II<sub>2</sub>. 中祁连离散地体; II<sub>3</sub>. 南祁连弧后盆地

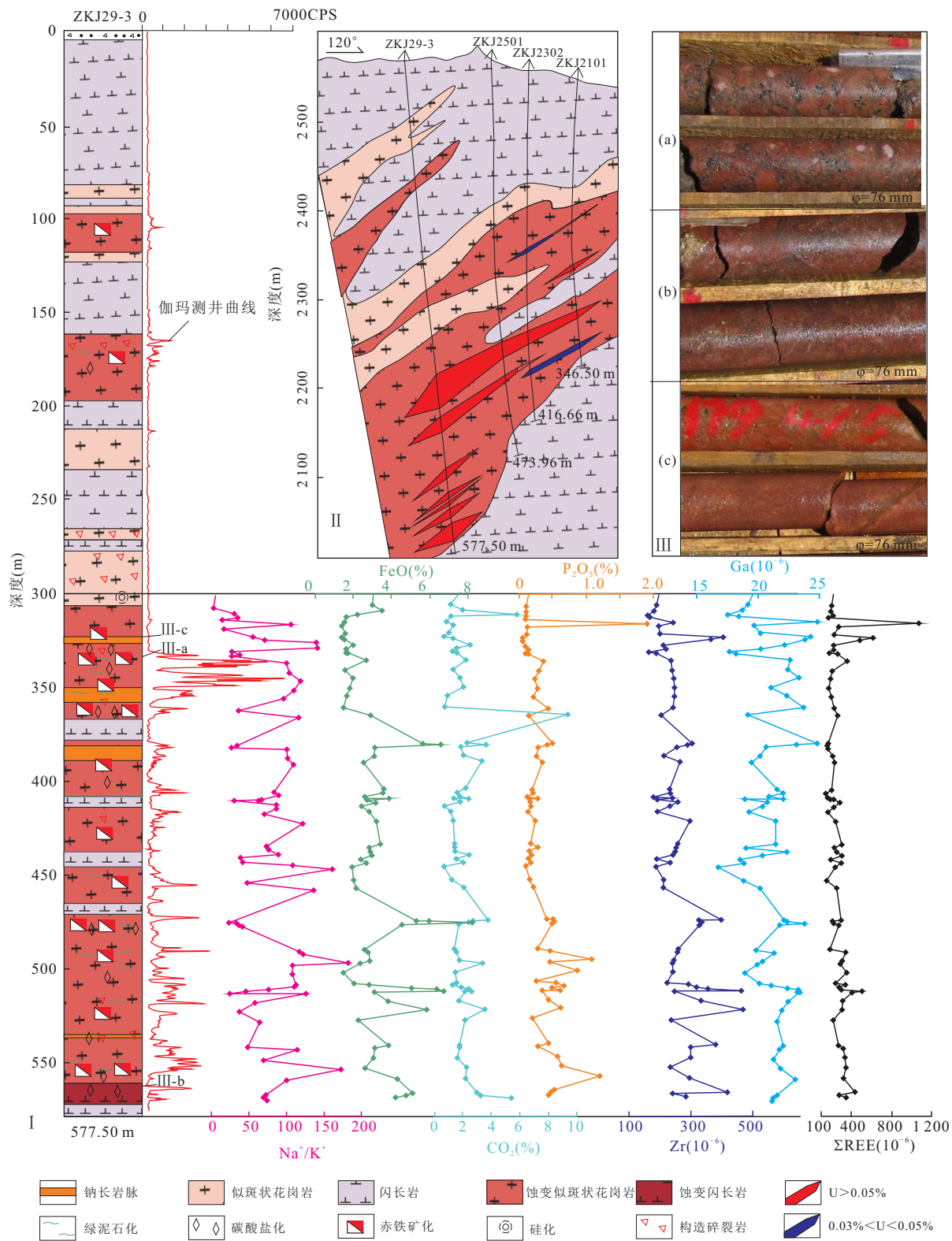


图 2 芨岭铀矿床钻孔 ZKJ29-3 柱状图 (I)、纵剖面图 (II) 和矿石特征 (III) 图

Fig.2 The drill column (I), longitudinal section(II) and ore mineralogical pictures(III) of the drill hole ZKJ29-3 from the Jiling uranium deposit

∠70°~75°, 早期矿床勘探阶段一直认为它是芨岭铀矿床的控矿断裂。经调查, 我们认为 F<sub>105</sub> 是一右行走

滑逆断层, 是铀成矿作用之后产生的破矿断裂。F<sub>105</sub> 将原矿体和蚀变带向北西向错动约 80 m, 下降约

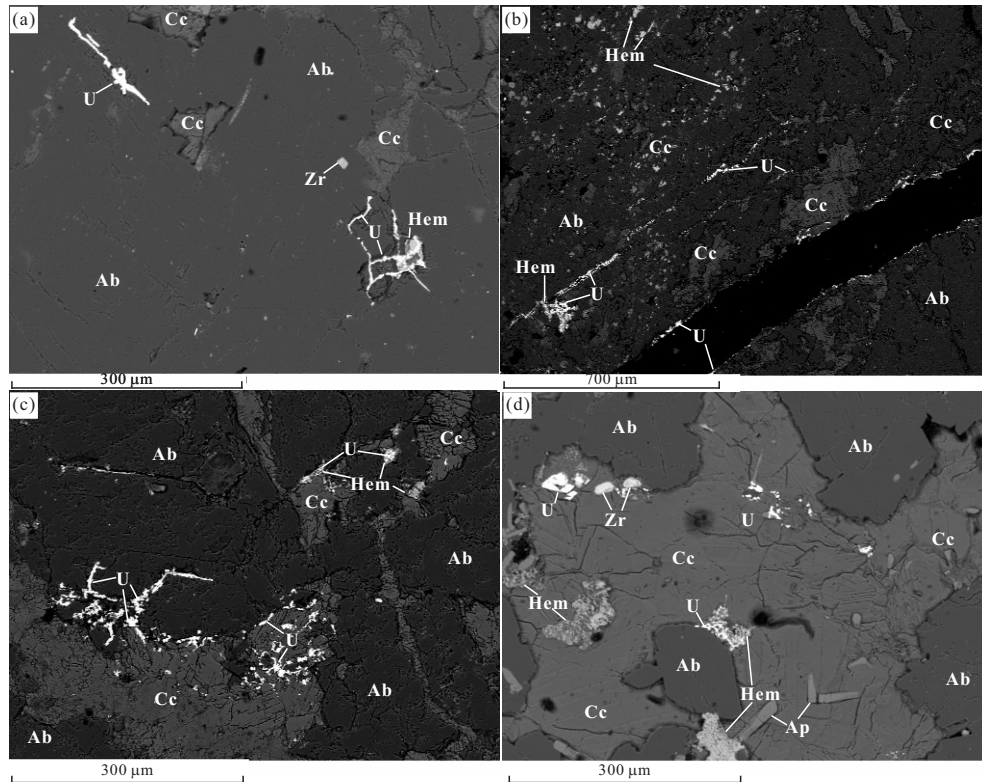


图3 菱岭铀矿床沥青铀矿背散射图像特征

Fig.3 The backscattered electron images of pitchblende from the Jiling uranium deposit  
Ab. 钠长石; Ap. 磷灰石; Cc. 方解石; Chl. 绿泥石; Hem. 赤铁矿; Kf. 钾长石; U. 沥青铀矿; Zr. 锆石

40 m, 后来钻探查证工作在 F<sub>105</sub> 南侧下盘发现了厚大矿体, 大大拓展了矿床外围的找矿空间。

菱岭钠交代型铀矿床的蚀变体和铀矿化体呈 55°~65° 的倾角向 310°~320° 方向侧伏。矿体主要呈透镜状、长透镜状、不规则状产于以蚀变似斑状花岗岩为主的钠交代体之中, 在蚀变闪长岩和钠长岩脉中沿裂隙和脉体呈产出。前人勘查的矿体多数较小, 最长者约 150 m, 宽约 45 m。矿石呈浸染状、细脉状、网脉状产出, 矿石矿物主要为沥青铀矿, 常与绿泥石、方解石共生于岩石微裂隙、矿物节理或脉体之中。矿床总体品位为 0.03%~0.10%, 保有资源量 500~1 500 t (Dahlkamp, 2009)。新的勘查成果表明主要矿体被 F<sub>105</sub> 断裂截切, 南侧新增控制长度超过 120 m, 且向深部矿石品位变富趋势明显, 进一步勘探将会大大增加其资源量。

### 3 钻孔结构

钻孔 ZKJ29-3 开孔方位 119.9°, 开孔倾角 80.5°, 校正孔深 577.50 m, 以金刚石钻头旋回式钻进, 开孔直径 108 mm, 终孔直径 76 mm。除地表第四系残

堆积外, 主要见有闪长岩、似斑状花岗岩和钠长岩脉 (图 2 I)。钻孔中所见的钠交代蚀变体和铀矿体与相邻勘探线钻孔在纵向剖面上连续性极好 (图 2 II)。放射性物探编录和测井结果表明, ZKJ29-3 钻孔中所见铀矿化主要赋存于蚀变似斑状花岗岩 (图 2 III a)、蚀变闪长岩 (图 2 III b) 和钠长岩脉之中 (图 2 III c)。沥青铀矿分布于岩石裂隙、矿物间隙、矿物解理及蚀变孔洞之中 (图 3)。

蚀变似斑状花岗岩是菱岭铀矿床的主要赋矿岩石, 颜色呈砖红色—暗紫红色, 块状构造, 似斑状结构。斑晶主要为钠交代蚀变钾长石, 特征与原岩相似, 基质矿物主要由交代形成的钠长石组成, 其余矿物含量变化很大。常见有绿泥石、绿帘石、方解石、假像黑云母、赤铁矿及含量不等的石英等矿物, 副矿物见锆石、磷灰石、锐钛矿等。随着蚀变强度的增加岩石中原生石英的含量越低, 赤铁矿的含量越高, 颜色越暗 (杜乐天, 1996; 赵如意等, 2013; 陈云杰等, 2014, ) 但只有一部分赤铁矿呈团块或脉状产出。钻孔中 83.99~115.76 m、151.17~220.77 m、266.21~322.87 m、325.87~345.35 m、359.20~381.06 m、381.09~457.78 m、474.03~536.40 m、

539.01~556.37 m为似斑状花岗岩,其中300 m以下全部发生不同强度的钠交代蚀变(图2 I)。

蚀变闪长岩通常发育于钻孔中有少量成矿前裂隙通过的地方(如560.00~571.20 m),沿裂隙发育宽度约1~200 cm暗紫红色蚀变带,蚀变后矿物主要有钠长石、绿泥石、绿泥石化角闪石等矿物组成,副矿物磷灰石含量增加明显。菱岭铀矿床中沿裂隙发育的含矿蚀变闪长岩单侧宽度一般不超过2 m,与似斑状花岗岩接触时,其发育的宽度略有增加,但通常与发育的裂隙有关,如563.80~565.70 m。

钠长岩脉呈浅橘红色—暗紫红色,几乎全部由钠长石组成,仅含有少量方解石、绿泥石、和赤铁矿,偶见有石英,副矿物有黄铁矿、锆石、方铅矿、闪锌矿等。钻孔中所见钠长岩脉主要分布于322.87~325.98 m、350.50~359.20 m、381.06~390.09 m、536.40~537.01 m。

## 4 围岩蚀变和矿物组合特征

和其他碱交代型铀矿床相似,菱岭钠交代型铀矿床的交代蚀变也具有多阶段演化的特征。杜乐天(1996)将其划分为钠长石化期、矿化期和矿后期,而陈云杰等(2015)沿用前人的认识将蚀变划分为高温钾钠混合交代阶段、区域性钾交代阶段、中低温热液钠钙交代阶段、矿化期钠交代阶段等。经过对菱岭矿床钻孔ZKJ29-3和其他钻孔及周边矿点的综合研究,该区钠交代型铀矿的热液蚀变可以综合为成矿前阶段、成矿早期阶段、主成矿阶段、后成矿阶段蚀变和成矿后阶段等5个阶段。

### 4.1 围岩蚀变

**4.1.1 成矿前阶段** 成矿前阶段相当于前人划分的高温钾钠混合交代阶段(陈云杰等,2015),由于成矿阶段热液活动十分强烈,蚀变的强度和范围叠覆于成矿前阶段的大多数蚀变范围之上,菱岭矿床钻孔ZKJ29-3中,未见明显的成矿前阶段蚀变。但菱岭矿区外围的绿草沟矿点和牛角沟矿点都见有发育的成矿前蚀变。成矿前蚀变以钾钠混合交代为特征,牛角沟钾钠混合交代作用使得原岩中的石英和黑云母被溶蚀,留下大量的孔洞、空隙,白色方解石呈雪花状充填于孔洞和空隙之中(图4a),伴随有铀的轻微迁移富集,先是钠交代蚀变原有斜长石和钾长石(图4b),后在解理、孔隙中形成新生钾长石。绿草沟矿点钾钠混合交代岩中局部见有霓石和霓辉石,副矿物主要有磁铁矿、褐帘石、方钍石和含铀方

钍石等。

**4.1.2 成矿早期阶段** 成矿早期阶段相当于杜乐天(1996)所划分的“钠长石化期”,不同之处在于“钠长石化期”并无明显铀矿化产出,而成矿早期有发育的铀矿化,该阶段以钠交代体沿钠长岩脉两侧大量产出为特点。龙首山成矿带中段岩浆演化出的碱性岩主要展布于北带绿草沟地区(约10 km长,1~2.3 km宽),碱性岩中有较多钠长岩脉体穿插,其特征与菱岭矿床所见钠长岩脉相同(图4c)。菱岭矿床矿区范围所见钠长岩脉主要由钠长石组成(图4d),常见有两个粒级的钠长石颗粒,较大的颗粒为1~2 mm,呈板状,但表面多为赤铁矿所染,较小粒级的钠长石大小为0.1~0.2 mm,表面比较洁净,无铁染现象,推测较大者可能是来自于围岩的长石被热液蚀变后形成(赵如意等,2015)。

钠长岩脉被主成矿阶段的含沥青铀矿绿泥石细脉和方解石—赤铁矿复成份脉体穿切(图4e),其形成明显早于主成矿阶段。钠长岩脉本身具有较高的铀含量( $>50 \times 10^{-6}$ ),ZKJ29-3中约有1/4的高品位矿石赋存于钠长岩脉中,整个矿床中在品位高于0.10%的矿石样品中钠长岩脉占24.0%,品位高于0.20%的矿石样品中钠长岩脉占28.5%。钻孔ZKJ29-3中381.06~390.09 m钠长岩脉两侧的蚀变似斑状花岗岩,随着远离钠长岩脉其蚀变强度减弱,铀矿化强度减弱,这种变化趋势在矿床东部钠长岩脉密集区更为明显(图4c)。

**4.1.3 主成矿阶段** 主成矿阶段相当于杜乐天(1996)所划分的“矿化期”和陈云杰等(2015)划分中低温热液钠钙交代阶段。主成矿阶段蚀变作用规模较大,持续时间较长,是富挥发分的含铀钠质热液沿钾钠混合交代作用产生的孔洞和空隙、构造裂隙和碎裂岩带及成矿早期钠交代作用形成的空间运移所致(杜乐天,1996;赵如意,2015),形成的蚀变主要有绿泥石化、方解石化、赤铁矿化、钠长石化和硅化等。

#### (1)绿泥石化

绿泥石化主要有细脉状绿泥石化(图4e~4g)、片状(球粒状)绿泥石化(图4h,4i)和假像绿泥石化3种产状。钻孔ZKJ29-3中细脉状绿泥石化发育于矿体中心部位,表现为主成矿期热液沿一组轴心角为80°和35°的裂隙晶出绿泥石、方解石和沥青铀矿等,裂隙附近蚀变和铀矿化强度最强,向两侧围岩渐弱。在336~338 m,346~348 m,406~408 m,

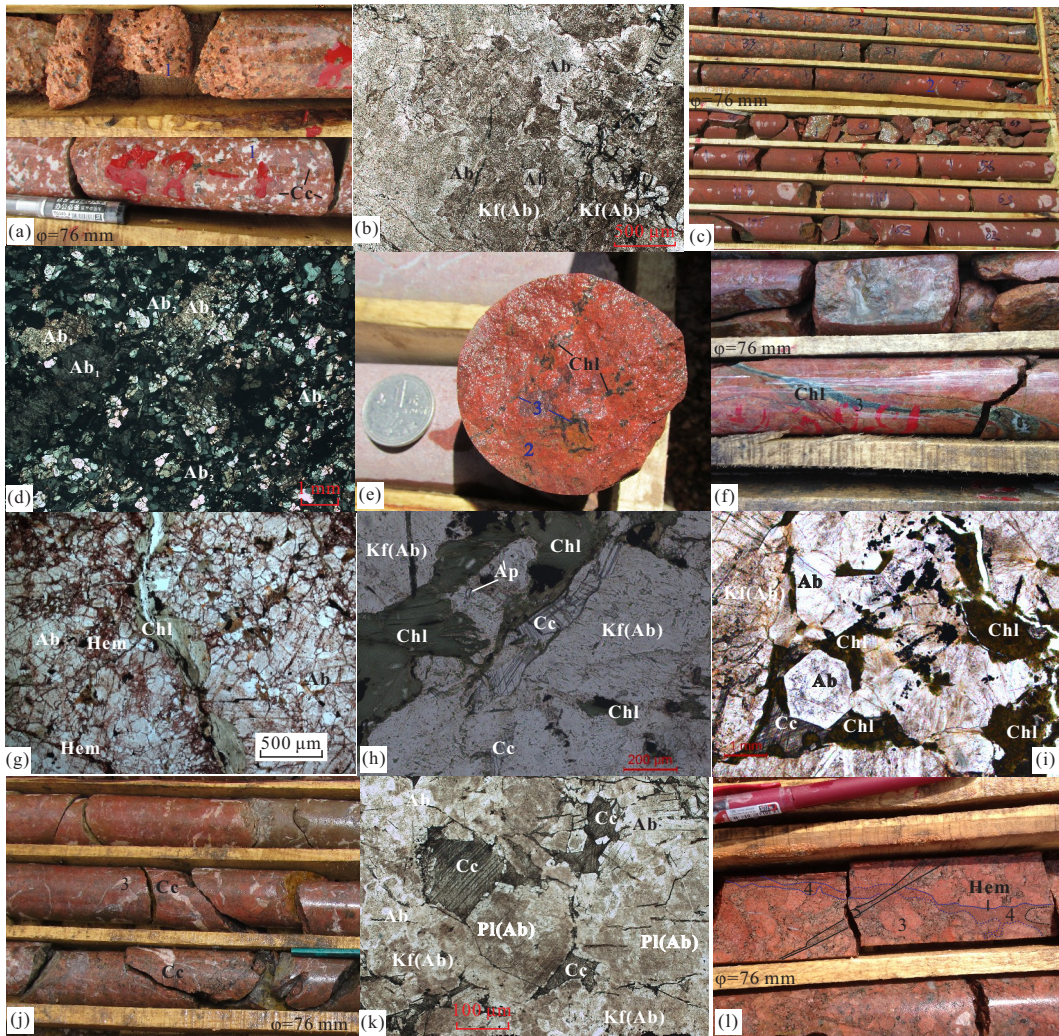


图4 菱岭铀矿床钻孔ZKJ29-3中各阶段蚀变岩石和主要蚀变矿物特征

Fig.4 The characteristics of altered rocks in every stage and altered minerals in the drill ZKJ29-3 from the Jiling uranium deposit  
 1. 成矿前蚀变阶段钾钠混合交代蚀变岩; 2. 成矿早期钠交代蚀变阶段; 3. 主成矿期钠交代蚀变阶段; 4. 后成矿阶段补充交代; 5. 成矿后硅质热液脉; Ab. 钠长石; Ab1. 粗粒交代钠长石; Ab2. 细粒结晶钠长石; Ap. 磷灰石; Cc. 方解石; Chl. 绿泥石; Hem. 赤铁矿; Kf(Ab). 钠长石交代钾长石; Pl(Ab). 钠长石交代斜长石

547~554 m 均见沿裂隙发育含沥青铀矿的方解石绿泥石脉,脉体呈暗绿色—黑色,脉体宽度0.5~5.0 mm,其分布密度1.0~3.3条/m. 裂隙两侧围岩显微裂隙中也被显微脉状的绿泥石充填,向矿体边部逐渐过渡为与方解石共生的片状绿泥石. 细脉状绿泥石镜下呈浅绿色—棕红色,而片状绿泥石则是灰绿色—浅褐红色. 假像绿泥石有两种产出,一种是热液蚀变闪长岩时形成的角闪石假像绿泥石,一种是蚀变似斑状花岗岩时在钠交代体的边部形成的蚀变黑云母假像绿泥石,假像绿泥石化是各阶段热液作用的外围蚀变.

#### (2)方解石化

ZKJ29-3中的碳酸盐化较强,电子探针测试结果和染色鉴定表明全部是方解石. 方解石化主要有粉红色脉状方解石化,粉红色花瓣状方解石化、白色雪花状方解石化、杂色复成分脉状方解石化、白色脉状等产状. 粉红色脉状方解石化和粉红色花瓣状方解石化一般分布于细脉状绿泥石化外围,由大量的粉尘状赤铁矿分布于方解石之中致色,是主成矿阶段近矿蚀变代表. 当方解石在溶蚀石英孔洞中结晶充填而无粉尘状赤铁矿伴生时,则形成分布较广的白色雪花状方解石化,与成矿前阶段钾钠混合交代所产出的方解石化相似. 杂色复成分方解石脉是由方解石和赤铁矿组成,常见于钠交代蚀变体

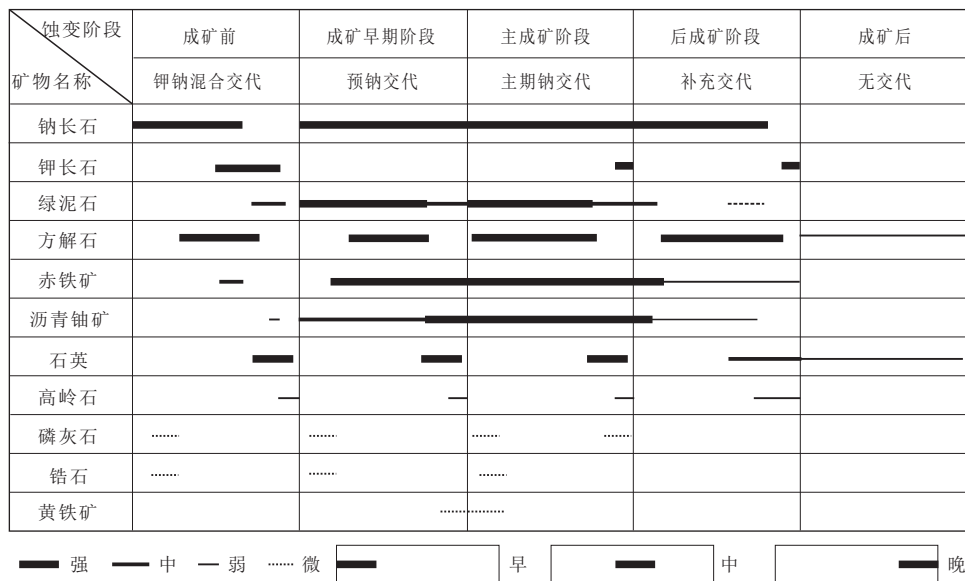


图 5 芨岭铀矿床蚀变似斑状花岗岩中矿物共生关系图(引自赵如意等,2018)

Fig.5 Mineral paragenesis in porphyritic granite of the Jiling uranium deposit

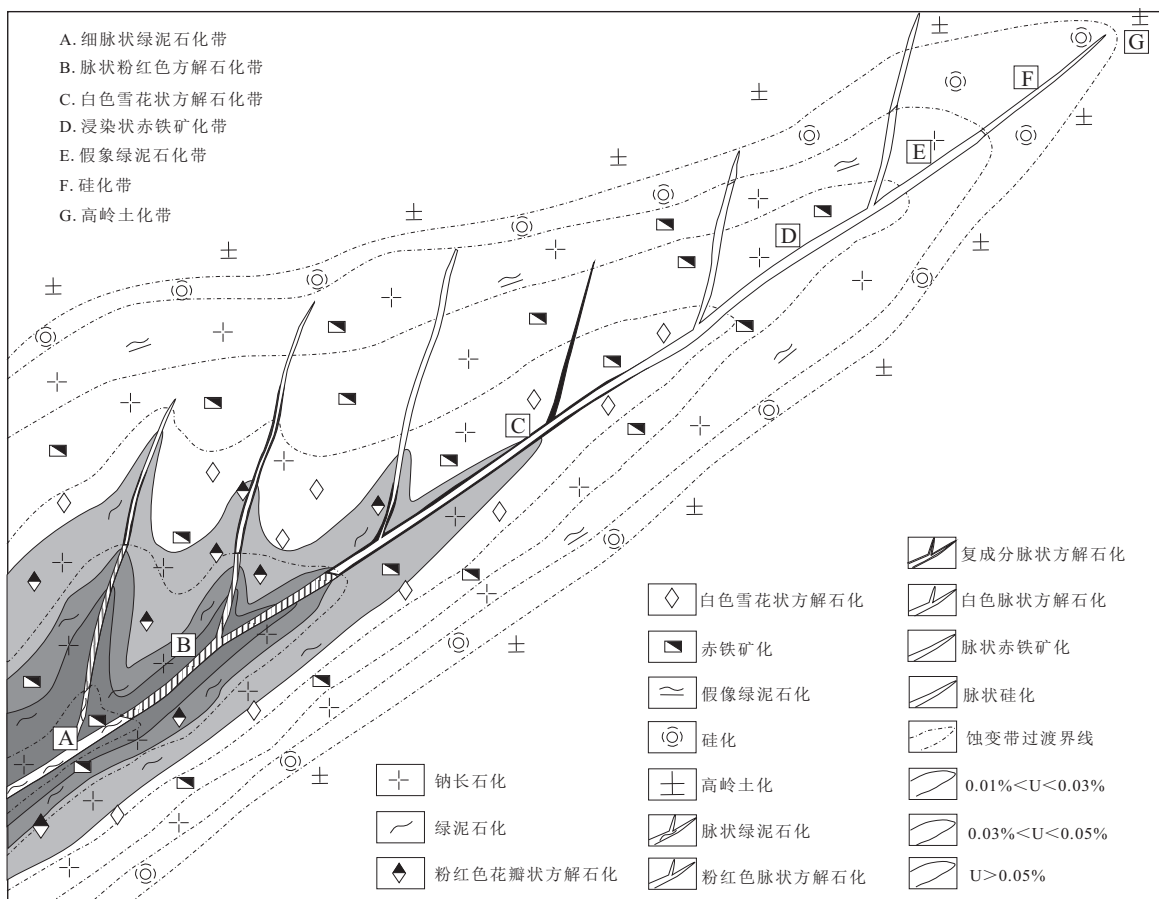


图 6 芨岭铀矿床蚀变矿物组合与分带图(引自赵如意等,2018)

Fig.6 The mineral assemblages and zones picture of the Jiling uranium deposit

的中部,向外过渡为白色脉状方解石化. ZKJ29-3 中 345.5~347.5 m 蚀变似斑状花岗岩(图 4j)和

549.30~556.00 m 蚀变闪长岩之中分布有粉红色细脉状方解石化,和细脉状绿泥石化一起指示了两个



明显的成矿中心。

### (3) 赤铁矿化

赤铁矿化在钠交代蚀变作用各个阶段都有出现,以主成矿阶段最为发育,从矿体中心到钠交代体的边部都可以见到。ZKJ29-3中所见的赤铁矿化主要有粉尘状(云雾状)赤铁矿化(图 4i, 4k)、浸染状赤铁矿化(图 4g)、脉状赤铁矿化(图 4l)。粉尘状(云雾状)赤铁矿化是指赤铁矿呈粉尘状或云雾状分布于长石、方解石和绿泥石化等矿物表明及周边,在矿体中心部位最为发育。浸染状赤铁矿化发育范围较广,整个钠交代蚀变体中都有发育,通常以方解石化带外侧为最强。脉状赤铁矿化一般发育于蚀变体的边部或是沿裂隙超出钠交代体的范围。

### (4) 钠长石化

毫无疑问,钠长石化是各阶段热液作用中发育范围最广的蚀变,钻孔 ZKJ29-3 中发育的钠交代体累计厚度约 350 m,占整孔岩心的 61%。钠长石化除表现为将原岩中斜长石和钾长石交代为钠长石外,还会在石英溶蚀后的孔洞中和裂隙中结晶出新的粒状钠长石晶体,使岩石趋向于单一的钠长石组分(图 4i, 4k)。

### (5) 硅化

硅化在钻孔 ZKJ29-3 中的 177~179 m、308~332 m 和 418~421 m 可见有发育,硅化使得岩心整体硬度变大,石英分布于矿物颗粒之间,偶见有与裂隙中石英相连接者。硅化作用是由钠交代蚀变的排硅作用在蚀变带外围形成的硅化壳(杜乐天, 1996)。

**4.1.4 后成矿阶段** 后成矿阶段是主成矿阶段结束后,成矿作用并未完全停止的热液补充阶段,是主成矿阶段的延续。ZKJ29-3 中可见主成矿阶段分布于蚀变带外围的赤铁矿脉沿张性裂隙充填于含矿似斑状花岗岩之中(图 4l),同时在硅化带内裂隙中发育的细脉状赤铁矿化等现象也证明了该期热液活动的存在。

**4.1.5 成矿后阶段** 成矿后热液作用依然十分常见,在钻孔 ZKJ29-3 中所见主要为沿裂隙分布白色方解石细脉、硅质细脉(图 4l)、黄铁矿细脉等穿切于钠交代体之中,其特点是赤铁矿化不再发育,方解石的结晶较差及硅质脉呈白色等。

## 4.2 蚀变组合分带性特征

从 ZKJ29-3 和其他工业铀矿孔及已有矿床资料看,茂岭钠交代型铀矿产出于多阶段蚀变相互叠加形成的钠交代体之中(图 5),自矿体中心向外依次

可见如下 6 个蚀变组合带(图 6):A:细脉状绿泥石化+钠长石化+方解石化+粉尘状(云雾状)赤铁矿化带;B:粉红色脉状方解石化+片状(粒状)绿泥石化+钠长石化+粉尘状赤铁矿化带;C:白色雪花状方解石化+复成分脉状方解石化+钠长石化+浸染状赤铁矿化带;D:浸染状赤铁矿化+白色脉状方解石化+钠长石化+假象绿泥石化带;E:假象绿泥石化+钠长石化+弱赤铁矿化带;F:硅化带等。在蚀变组合分带图(图 6)中,分别以各蚀变组合带中最典型的蚀变矿物为名,将 A→F 带依次命名为细脉状绿泥石化带、粉红色方解石化带、白色雪花状方解石化带、浸染状赤铁矿化、假象绿泥石化带和硅化带。这 6 个蚀变矿物组合带通常为过渡关系,相互叠加或者发育不全,在茂岭矿床 41 号勘探线钻孔 ZK4101 深部和新水井外围 102 号矿点发育有强烈的高岭土化被硅化叠加,即钠交代体的外围有时还发育有高岭土化带(G)。

## 5 样品采集与分析测试

在完成 ZKJ29-3 物探测井、地质编录和物探编录之后,依据测井解释结果和地质物探综合编录对劈开岩芯进行系统取样。为能够有效对比蚀变和地球化学分带性,用于研究的样品原岩全部为似斑状花岗岩,主要有绿泥石化带(A)13 件,方解石化带(B+C)18 件、赤铁矿化带(D)7 件、假象绿泥石化带(E)5 件、硅化带(F)12 件。

样品薄片鉴定由项目组完成,地球化学分析测试由核工业二〇三研究所分析测试中心完成,主量元素检测使用的是荷兰帕纳科公司制造的 Axios X 射线光谱仪,分析数据中总量介于 99.30~100.70,满足 GB/T14506.28-2010、GB/T14506-2010 和 GB/T3257.21-1987 要求。微量元素和稀土元素检测使用的是荷兰帕纳科公司制造的 Axios X 射线光谱仪和 Thermo Fisher 公司制造的 Xseries2 型 ICP-MS,分析数据结果满足 GB/T14506.28-2010、DZ/T0223-2001 要求。利用电子探针对矿体中 U 的赋存状态进行研究,该工作在长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室完成,使用仪器为本 JEOLJXA-8100 型电子探针测定,工作条件为:加速电压 15 kV,电流 20 nA,束斑直径 5 μm。

## 6 蚀变岩地球化学特征

### 6.1 主量元素特征

所有样品的主量元素含量及相关参数列于表 1,从其中可以看出,蚀变似斑状花岗岩  $\text{SiO}_2$  含量为 45.07%~71.40%,平均 63.28%,其中硅化带  $\text{SiO}_2$  含量最高而赤铁矿化带中  $\text{SiO}_2$  含量最低,平均值分别为 69.53% 和 57.07%。蚀变似斑状花岗岩中  $\text{Na}_2\text{O}$  的含量为 6.71%~11.13%,平均为 9.24%,而  $\text{K}_2\text{O}$  强烈减少,含量为 0.08%~0.71%,平均为 0.22,其  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  的值为 14.46~182.61,平均值为 86.02。蚀变似斑状花岗岩中  $\text{TiO}_2$  的含量为 0.11%~1.67%,平均值为 0.52%,其中赤铁矿化带中的  $\text{TiO}_2$  的含量最高,平均值为 0.93%。蚀变似斑状花岗岩的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 13.02%~17.28%,平均含量为 15.78%,略高于原岩中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的含量(14.20%~15.90%),其中假象绿泥石化带中的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量最高为 15.94%~17.28%,平均值为 16.70%。蚀变似斑状花岗岩中的  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  含量为 0.64%~12.17%,平均含量为 2.02%,赤铁矿化带中  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  含量最高,2.70%~12.17%,平均值 6.47%, $\text{FeO}$  在蚀变似斑状花岗岩中含量为

0.46%~3.62%,平均值为 1.57%。 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$  的值为 0.08~4.44,其中假象绿泥石化带中的  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$  比值最高为 1.40~4.06,平均值 2.07。蚀变似斑状花岗岩中的含量为 0.20%~3.25%,平均含量为 1.00%,明显高于原岩中  $\text{MgO}$  的含量(0.33%~0.86%),且在绿泥石化带中的含量最高,为 0.43~3.25,平均值 1.35。蚀变似斑状花岗岩中  $\text{MnO}$ 、 $\text{CaO}$  和  $\text{CO}_2$  的含量变化较大,分别为 0.02%~0.16%、0.76%~7.98% 和 0.74%~6.30%, $\text{MnO}$  和  $\text{CaO}$  在赤铁矿化带中含量最高,平均值分别为 0.06% 和 3.38%, $\text{CO}_2$  在方解石化带中的含量最高,平均含量为 2.70%。蚀变似斑状花岗岩中  $\text{P}_2\text{O}_5$  含量为 0.07%~1.92%,平均值为 0.34%,明显高于似斑状花岗岩原岩中  $\text{P}_2\text{O}_5$  的含量(0.09%~0.14%)。

### 6.2 微量元素与稀土元素特征

从表 2 和微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 7a, 7b)上可以看出,蚀变似斑状花岗岩强烈富集 Th、U,相对亏损 Ba、Nb、Ta、Sr、Ti。与似斑状花岗岩原岩相比,蚀变似斑状花岗岩各带中 Rb、Ba 含量减少而 Th、U 强烈增加,呈现出左端交叉而右端高出的形态。从表 2 可以看出,似斑状花岗岩原岩的稀

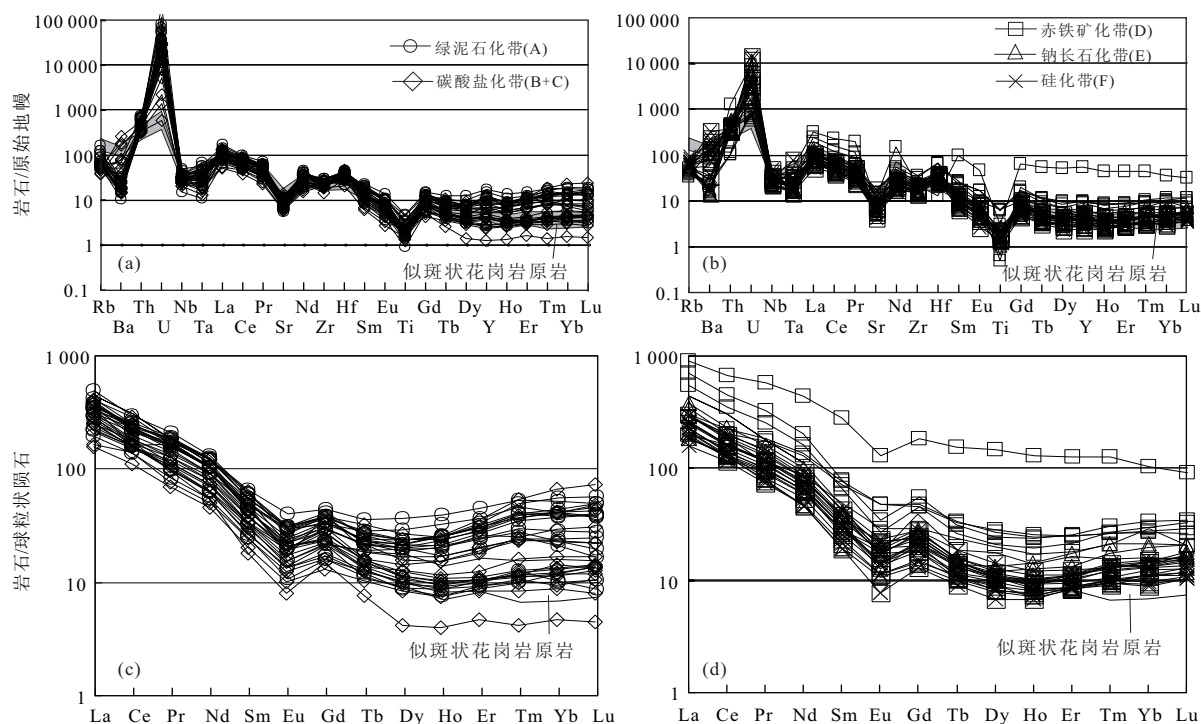


图 7 菱岭铀矿床钻孔 ZKJ29-3 中蚀变似斑状花岗岩和原岩原始地幔标准化微量元素蛛网图和球粒陨石标准化稀土元素

Fig.7 The primitive mantle normalizes trace elements spider diagram (a, b) and chondrite normalized rare earth elements diagram (c, d) of altered porphyritic granite and protolith in the drill hole ZKJ29-3 from the Jiling uranium deposit

配分曲线图(标准化数值据文献 Sun and McDonough, 1989)

土元素总量 ( $\Sigma \text{REE}$ ) 为  $201.81 \times 10^{-6} \sim 385.20 \times 10^{-6}$ , 轻重稀土比值 ( $\Sigma \text{LREE} / \Sigma \text{HREE}$ ) 为 12.74~23.17,  $\delta \text{Eu}$  为 0.33~0.64 (平均值为 0.51). 蚀变似斑状花岗岩的稀土元素总量 ( $\Sigma \text{REE}$ ) 为  $142.67 \times 10^{-6} \sim 1071.91 \times 10^{-6}$ , 变化范围较大, 平均值为  $277.82 \times 10^{-6}$ , ( $\Sigma \text{LREE} / \Sigma \text{HREE}$ ) 为 6.97~32.71, 平均为 14.44,  $\delta \text{Eu}$  为 0.49~0.84, 平均为 0.63. 从球粒陨石标准化稀土元素配分曲线图上 (图 7c、d) 看, 所有样品与似斑状花岗岩原岩 ( $\Sigma \text{REE}$  为  $201.81 \times 10^{-6} \sim 385.20 \times 10^{-6}$ ,  $\Sigma \text{LREE} / \Sigma \text{HREE}$  为 12.74~23.17,  $\delta \text{Eu}$  为 0.33~0.64) 都呈现 Eu 谷发育、轻稀土分馏明显的特征, 重稀土元素似斑状花岗岩原岩分馏不明显, 而蚀变似斑状花岗岩中重稀土元素均有一定的增加, 尤其是矿体中心部位附近的绿泥石化带和方解石化带内样品, 重稀土元素明显呈右端上翘的形态.

## 7 讨论与结论

### 7.1 蚀变矿物分带与铀矿化

钠交代蚀变是芨岭矿床发育最强烈、分布最广泛的蚀变, 所见的铀矿体 ( $U > 0.05\%$ )、铀矿化 ( $0.03\% < U < 0.05\%$ ) 和铀异常 ( $0.01\% < U < 0.03\%$ ), 乃至铀的略微迁移和富集都发育于蚀变体之中, 但什么样的钠交代体才能富集铀矿体呢? 这一直是众多学者和勘查人员孜孜以求的目标. 从前述可知, 甘肃省龙首山芨岭钠交代型铀矿床的铀矿化作用主要发育于成矿早期阶段和主成矿阶段, 与沥青铀矿密切共生的有细脉状绿泥石、片状绿泥石、粉红色方解石、柱状磷灰石、锆石和锐钛矿等矿物.

一般认为 Th 较稳定的存在于花岗岩之中, Th/U 值的变化主要是由 U 含量的变化引起的 (Cuney *et al.*, 2012; 钟军等, 2016). 似斑状花岗岩原岩的 Th/U 值为 1.96~3.25, 当其中发育较好的铀矿化时, Th/U 值下降为 0.1~0.01 (图 8a), 发育工业铀矿化者主要为蚀变带中心部位的细脉状绿泥石化带样品.

芨岭矿床似斑状花岗岩中所见含镁铁矿物主要有黑云母、假象绿泥石、细脉状和片状绿泥石及少量的绿帘石等. 由于多阶段蚀变的叠加使得铀含量与 FeO 含量的相关性不甚清晰, 但是其与 MgO 的含量呈现一定的相关性. 在 MgO-U 关系图 (图 8b) 上, 钻孔 ZKJ29-3 的样品呈现向右开口的喇叭

状, 当 MgO 的含量  $> 1.0\%$  时, 钠交代蚀变似斑状花岗岩中一般都出现铀异常 ( $U > 100 \times 10^{-6}$ ), 矿体中心的细脉状绿泥石化带和方解石化带位于喇叭口的部位.

钠长石化是热液交代岩石使之趋向于由单一钠长石矿物组成的过程, 钠长石不仅彻底取代了原有斜长石、钾长石, 还在石英溶蚀孔洞和裂隙中晶出了许多新生钠长石. 其中的  $\text{Na}^+$  不断的取代  $\text{K}^+$ , 钠代钾的程度和铀矿化在各蚀变分带的强度具有很好的分带性关系 ( $U > 100 \times 10^{-6}$ , 图 8c). 同时, Na/Al (摩尔比) 的值也越来越趋向于 1, 当 Na/Al (摩尔比)  $> 0.92$  时, 83.3% 的样品中发育铀异常 ( $U > 100 \times 10^{-6}$ , 图 8d).

### 7.2 蚀变带地球化学分带性特征

从前述蚀变矿物组合分带和各蚀变带地球化学特征图 (图 9) 可以看出:

(1) 成矿前蚀变似斑状花岗岩中的  $\text{SiO}_2$ 、FeO、MnO、MgO、CaO、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、Rb、Cs、REE 等含量低于似斑状花岗岩原岩, 而  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、U、V 的略含量高于似斑状花岗岩原岩.

(2) 钠交代型铀矿成矿阶段, 成矿物质自矿体中心开始卸载, 细脉状绿泥石化带中含量最高的化学组分有  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、FeO、MgO、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、U、Rb、HREE 等.  $\text{SiO}_2$  和 Rb 一起卸载, 在矿体核心部位细脉状绿泥石化带和外围“硅壳”中含量最高, 形成了宽缓的“U”型含量特征 (图 9a、b). 而  $\text{Na}_2\text{O}$  (Na/K)、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、U 则形成了细脉状绿泥石化带中最高向外递减的内高外低型含量特征 (图 9e).

(3) FeO 和 MgO 在矿体中心部位细脉状绿泥石化带和假象绿泥石化带有两个含量高峰, 形成双峰式含量特征 (图 9c、d), 而  $\text{P}_2\text{O}_5$  和 HREE 在矿体中心细脉状绿泥石化带和赤铁矿化带有两个含量高峰 (图 9f、g).

(4)  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、CaO、MnO、 $\text{CO}_2$ 、Zr、V、Cs、REE 等组分虽然在矿体核心部位的细脉状绿泥石化带中略有卸载, 但是在中部的方解石化带和赤铁矿化带中的含量达到峰值, 形成了中间呈峰的含量特征 (图 9i~9n).

### 7.3 成矿流体性质

蚀变作用是指矿物、岩石受到热液作用, 原岩的结构、构造和成分发生相应改变而生成新矿物组合的过程. 当热液或流体作用于围岩发生水岩反应时, 两者之间必然趋向于达到某种新的物理化学平

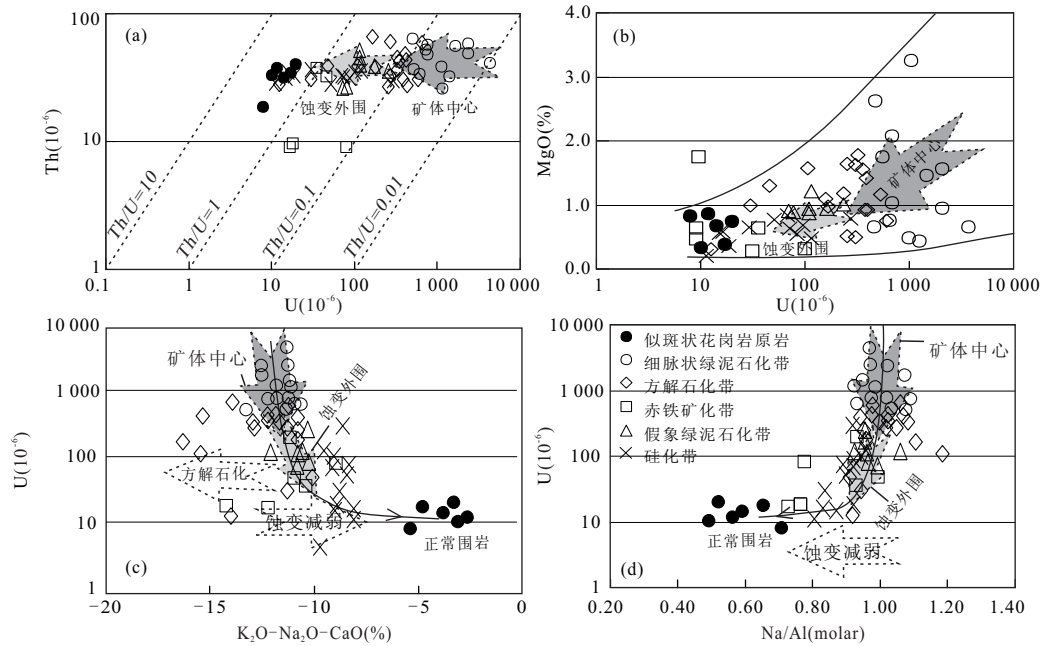


图8 菱岭铀矿床钻孔ZKJ29-3中各蚀变带铀含量与多组分地球化学关系

Fig.8 The U-poly-geochemical diagrams of all zones in the drill hole ZKJ29-3 from the Jiling uranium deposit

衡,从而反映流体的性质(Pirajno, 2009). 菱岭钠交代型铀矿床赋矿围岩的原岩主要为似斑状中粗粒花岗岩,而蚀变矿物组合从矿体中心向外依次有细脉状绿泥石化带(A)、粉红色脉状方解石化带(B)、白色雪花状方解石化带(C)、浸染状赤铁矿化带(D)、假象绿泥石化带(E)、硅化带(F)等. 从蚀变矿物组合、原岩和各蚀变带地球化学特征可以看出:

①钠交代型铀矿的成矿流体是一种含铀的富碱流体,其中富含 $\text{Na}^+$ 、 $\text{U}^{6+}$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 等离子,其中的铀以碳酸铀酰络合物 $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2]^{2-}$ 和 $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$ 的形式存在,与我国华南碱交代型铀矿和国外钠交代型铀矿的成矿物质在热液流体内的赋存状态相似(杜乐天,1996). ②钠交代热液流体具有较强的石英和铁镁质矿物溶蚀能力,将流经原岩中的石英和黑云母溶蚀,使得热液中含有一定量的Si和大离子亲石元素Cs、Ba及Mn、Ca、Mg与 $\text{Fe}^{(3+)}$ 含量. ③成矿流体具有极强的交代能力,将原岩中的钾长石和斜长石交代为钠长石,同时萃取了流经围岩中的Rb、Sr等微量元素,并将 $\text{Fe}^{2+}$ 氧化为 $\text{Fe}^{3+}$ . ④钠交代热液的成矿流体具有较强的副矿物溶蚀能力,流经围岩中的晶质铀矿、锆石、磷灰石、锐钛矿及部分含稀土矿物被溶蚀,使得成矿流体中富含 $\text{U}^{6+}$ ,并含有一定量的Zr、Ti、P、REE等. ⑤成矿流体温度大约为 $300^\circ\text{C}(\pm 20^\circ\text{C})$ 左右,其初始盐度为 $2.99\% \sim 4.57\%$  NaCl,密度为 $0.75 \sim 0.77 \text{ g/cm}^3$ (赵

如意等,2018a).

#### 7.4 热液来源

稳定同位素地球化学特征对确定成矿流体、成矿物质的来源和成矿机制有极其重要的意义,方解石的C-O同位素体系已经被广泛应用于示踪各类热液矿床成矿流体的来源及演化(姜军胜等,2015;王健等,2018). 菱岭钠交代型铀矿床方解石化广泛发育,方解石脉的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 的值为 $9.6\% \sim 13.3\%$ ,平均值为 $10.8\%$ , $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 的值为 $-3.2\% \sim -2.1\%$ ,平均值为 $-2.4\%$ (陈云杰等,2014;赵如意等,2018b),矿石的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 的值为 $8.99\% \sim +11.21\%$ ,而 $\delta^{18}\text{DH}_2\text{O}$ 的值为 $-74.2\% \sim -72.4\%$ ,暗示成矿热液是起源于花岗岩浆演化晚期,经与围岩交代、反应形成的再平衡混合岩浆水.

菱岭钠交代型铀矿床的铀矿石、钠长岩、正常似斑状花岗岩及龙首山岩群的 $\text{Pb}^{206}/\text{Pb}^{204} < 19.5$ , $\text{Pb}^{208}/\text{Pb}^{204} < 39.5$ , $\text{Pb}^{207}/\text{Pb}^{204} - \text{Pb}^{206}/\text{Pb}^{204}$ 显示了一条斜率为0.1383的直线,相关性系数0.9895,暗示钠交代型铀矿的热液、铀源与似斑状花岗岩和钠长岩脉是同源的. 将Pb-Pb法得出的花岗岩年龄带入二次等时线公式进行计算,得出铅的来源年龄 $t_1 = 2008 \text{ Ma}$ . 似斑状花岗岩中有一颗年龄为 $2319 \pm 27 \text{ Ma}$ 的捕获锆石,钠长岩脉中一颗年龄为 $1904 \pm 8 \text{ Ma}$ 捕获锆石,它们都与龙首山岩群的形成时代相一致.

菱岭岩体花岗岩的Sr-Nd-Pb同位素特征,与

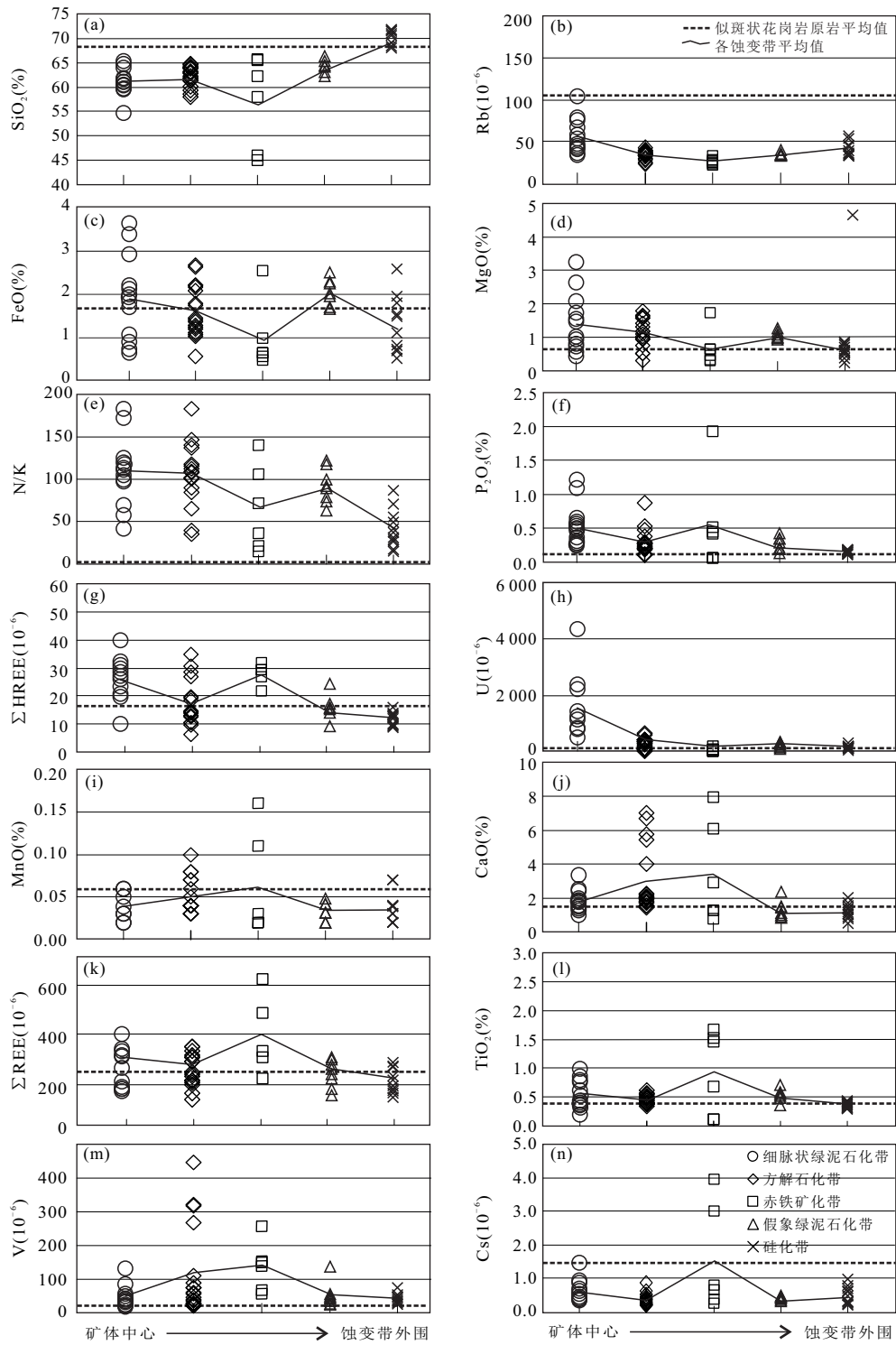


图9 芟岭铀矿床钻孔 ZKJ29-3 中各蚀变组合带地球化学分带性特征图

Fig.9 The geochemical zonal diagram of altered mineral assemblages in the drill hole ZKJ29-3 from the Jiling uranium deposit

Ivrea Zone 下部地壳的特点相似,表明其起源于古老残留地壳的部分熔融,但可能有少量幔源物质的参与(赵亚云等,2016).芟岭矿床似斑状花岗岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值为 0.709 0~0.731 6,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值  $-9.8\sim-4.9$ , Nd 两阶段模式年龄( $T_{2\text{DM}}$ )为 1

578~1 971 Ma,显示似斑状花岗岩的源岩与古元古代龙首山岩群变质岩有关(赵如意,2016),它是后碰撞构造背景下,底侵上地幔物质作用引发地壳深部的古元古代龙首山岩群部分熔融形成的(张甲民等,2017).

### 7.5 成矿过程

花岗岩侵位之后,在岩浆冷凝过程中,由残浆演化至富碱阶段,形成了一种浆—气—液无明显界线的流体,这种流体是一种类似于超临界流体和透岩浆流体的高温碱质流体.该流体向外运移过程中溶蚀了通道附近花岗岩中的石英、黑云母,形成了大量的孔洞状、雪花状方解石化钾钠混合交代花岗岩.钾钠混合交代使得岩石变脆、“疏松”,在后来的构造应力作用下易于形成断裂及破碎带.同时钾钠混合交代作用所形成的孔洞、空隙及显微空间,与断裂破碎带一起,为之后钠交代热液铀成矿作用提供了充足的通道和空间,奠定了良好的围岩基础.

芨岭复式岩体的深部岩浆房演化出了碱性岩侵位于绿草沟一带,晚期更是出现了钠长岩脉穿插于碱性岩、中粗粒花岗岩、似斑状花岗岩和闪长岩之中,钠长岩脉是残浆向钠质热液演化过渡阶段的产物(赵如意等,2015).钠长岩脉沿构造裂隙侵位过程中,对其两侧的围岩和产生了较强的钠交代,同时产出有铀矿化,即为成矿早期阶段铀矿化,其产出的钠交代岩与钾钠混合交代岩一起,是主成矿阶段的主要赋矿围岩.

主成矿阶段的热液流体沿构造裂隙和之前的多孔、“疏松”交代岩运移时,不断的与围岩发生水岩反应,当遇到构造破碎带或者孔隙密集部位时,由于压力的突然降低流体沸腾,致使碳酸铀酰络合物分解并卸载成矿物质成矿(赵如意等,2013,2018b),同时pH值和Eh改变,进一步促进了 $U^{6+}$ 转化为 $U^{4+}$ ,形成沥青铀矿(杜乐天,1996).卸载成矿物质的同时, $CO_3^{2-}$ 与热液中的 $Ca^{2+}$ 相结合形成方解石,主要分布于矿体边部及外围的裂隙、空隙中,而 $Fe_2O_3$ 呈粉尘状(云雾状)分布于钠长石和方解石晶面,矿体呈现紫红—暗紫红色. $CO_2$ 等气体的逸散和温度的降低,使得流体中的 $Fe_2O_3$ 与方解石呈细脉状共生或是呈浸染状产出于蚀变岩石之中.随着热液流体继续向外运移,其对石英和暗色矿物的溶蚀能力不断减弱,直至仅能与黑云母反应形成假象绿泥石并交代形成钠长石.热液中 $SiO_2$ 含量的增加和溶解能力的降低,加上 $Na^+$ 的减少,热液由碱性逐渐过渡为酸性,在碱交代体的外围形成了硅化壳,有时还会使围岩发生高岭土化等蚀变.

### 7.6 芨岭矿床及周边找矿潜力预测

ZKJ29-3与芨岭钠交代型铀矿床的赋矿围岩见有蚀变似斑状花岗岩、蚀变闪长岩和钠长岩脉,矿

床外围墩子沟矿点发育钠交代蚀变的则是片麻岩和片岩,北祁连扁都口钠交代型铀矿床是以钠交代砂岩为赋矿围岩.乌克兰中部铀成矿省(CUUP)钠交代型铀矿的赋矿围岩为蚀变片麻岩、混合岩、花岗岩等(Cuney *et al.*, 2012),圭亚那的钠交代型铀赋矿围岩为蚀变二长辉长岩、二长岩、二长花岗岩等(Alexandre, 2010),而澳大利亚的Valhalla钠交代型铀矿区则是以蚀变粉砂岩和蚀变细砂岩为赋矿围岩(Polito *et al.*, 2009).钠交代型铀矿化无一例外的产出于钠交代体之中,赋矿围岩可以是富钠热液流经的所有岩石,似斑状中粗粒结构更利于流体运移、卸载成矿.

巴西东北部的Itataia矿床(Netto *et al.* 1991)、喀麦隆的Poli矿床(Vels and Fritsche, 1988)及美国的Coles Hill铀矿田(Jerden *et al.* 2001)等铀矿床/田都形成于古生代.龙首山钠交代型铀矿U-Pb同位素测年结果表明该区钠交代型铀矿的成矿作用最早开始于444~430 Ma前后(赵如意,2016),芨岭、新水井和扁都口铀矿床和区内近百个钠交代型铀矿点、矿化异常点带组成了北祁连—龙首山古生代钠交代型铀成矿带.古生代钠交代型铀成矿作用在世界多地形成大型—超大型矿田(床),而北祁连—龙首山的钠交代型铀矿床都是以中小型为主,资源潜力尚待进一步评价与勘查.

芨岭钠交代型铀矿床和世界各地钠交代型铀矿的共同特征是受构造控制的中低品位矿石(平均品位0.05%~0.20% U)的产出与石英被大量溶蚀的钠交代岩有关(Cuney *et al.*, 2010; Wilde, 2013).前人对芨岭钠交代型铀矿床的勘探落已经实了中小规模矿床(500~1 500 t U,品位0.03%~0.10%)(Dahlkamp, 2009),我们的工作又在新深度和新空间取得了很好进展.在蚀变组合分带与铀矿化关系图(图4)的指导下,笔者带队在芨岭矿床外围和深部探索时于660 m以深都发现了较好的工业铀矿体,与前人勘查深度相比,将矿床找矿深度拓展了200多米.曾预测芨岭矿床外围小白芨芨沟地段赋存盲矿体,施工验证的4个钻孔中新发现工业铀矿孔2个,铀矿化孔2个,且仍未封边.类比可知,在芨岭矿床深部、 $F_{105}$ 断裂以南、西岔—小白芨芨沟及火石岭等断裂构造、蚀变似斑状花岗岩和岩性界面“三位一体”控矿要素发育地段具有较大的资源潜力.综上所述,以钠交代型铀矿蚀变组合和地球化学分带性特征为指导,通过进一步研究和勘查工

作,有望在龙首山成矿带中段落实一个大型铀矿基地。

## 8 结论

(1)甘肃龙首山芨岭钠交代型铀矿床的热液作用按产出时间可分为成矿前阶段、成矿早期阶段、主成矿阶段、后成矿阶段和成矿后阶段,从矿体中心向外蚀变组合带以特征性蚀变矿物依次命名为细脉状绿泥石化带(A)、粉红色脉状方解石化带(B)、白色雪花状方解石化带(C)、赤铁矿化带(D)、假象绿泥石化带(E)和硅化带(F)等,外围有时发育有高岭土化带(G)。

(2)与似斑状花岗岩原岩相比,芨岭铀矿床的钠交代岩具有低硅,高钛、镁、磷,强烈钠代钾, MnO、CaO 含量与 CO<sub>2</sub> 含量一致且变化较大,强烈富集 Th、U,相对亏损 Rb、Ba、Nb、Ta、Sr 及轻稀土右倾分馏明显、重稀土右端富集上翘的地球化学特征。

(3)从矿体中心向外带(A→F),各蚀变带中 Na<sub>2</sub>O(Na/K)、U 则向外递减;SiO<sub>2</sub> 和 Rb 含量呈宽缓的“U”型;FeO 和 MgO 在两个绿泥石化带形成双峰而 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 HREEs 则在细脉状绿泥石化带和赤铁矿化带有两个含量高峰;TiO<sub>2</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、MnO、CO<sub>2</sub>、Zr、V、Cs、REE 等组分的含量矿体外围方解石化带和赤铁矿化带中达到高峰。

(4)芨岭钠交代型铀矿的成矿流体是起源于岩浆演化晚期的平衡岩浆水,其中富含 Na<sup>+</sup>、U<sup>6+</sup>、CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>,沿构造裂隙和“疏松”交代岩运移时,由于流体沸腾致使碳酸铀酰络合物分解并卸载成矿物质成矿,同时 pH 值和 Eh 的改变进一步促使 U<sup>6+</sup> 转化为 U<sup>4+</sup> 形成沥青铀矿。

致谢:项目开展过程中得到了核工业二〇三研究所权建平总工、李万华主任与李占游主任的支持和帮助;两位评审专家的高水平审阅和建设性意见使得本文更为出色;编辑老师的精雕细琢让本文瑕疵更少。在此,对大家表示衷心的感谢!

表格数据参见本刊官网:[www.earth-science.net](http://www.earth-science.net)。

## References

Alexandre, P., 2010. Mineralogy and Geochemistry of the Sodium Metasomatism-Related Uranium Occurrence of Aricheng South, Guyana. *Mineralium Deposita*, 45(4): 351–367. <https://doi.org/10.1007/s00126-010-0278-7>

Cai, Y.Q., Zhang, J.D., Li, Z.Y., et al., 2015. Outline of Uranium Resources Characteristics and Metallogenetic Regularity in China. *Acta Geologica Sinica*, 89(6): 1051–1069(in Chinese with English abstract).

Chen, Y.J., Fu, C.M., Wang, G., et al., 2014. Carbon and Oxygen Isotopes in Granite-Type Hydrothermal Uranium Deposits: A Case Study of Jiling Uranium Ore Field in Longshoushan, Gansu Province. *Geology and Exploration*, 50(4):641–648(in Chinese with English abstract).

Chen, Y.J., Wang, W., Wang, G., et al., 2015. Characteristics of Alteration in Jiling Uranium Mining Area in Longshoushan Area of Gansu. *Mineral Resources and Geology*, 29(2):144–151(in Chinese with English abstract).

Cuney, M., 2010. Evolution of Uranium Fractionation Processes Through Time: Driving the Secular Variation of Uranium Deposit Types. *Economic Geology*, 105(3): 553–569. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.3.553>

Cuney, M., Emetz, A., Mercadier, J., et al., 2012. Uranium Deposits Associated with Na-Metasomatism from Central Ukraine: A Review of Some of the Major Deposits and Genetic Constraints. *Ore Geology Reviews*, 44(2): 82–106. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2011.09.007>

Dahlkamp, F. J., 2009. Uranium Deposits of the World. Springer, Berlin, 1–350.

Gao, Y., Zhao, R.Y., Wang, G., et al., 2017. The Geochemical Characteristics and Its Significances of Jiling Diabase in Longshou Mountain, Gansu Province. *Geology and Resources*, 5:505–514(in Chinese with English abstract).

Hu, N.G., 2003. Geochemical Characteristics and the Tectonic Setting of the Longshoushan Group in the Dongdashan area, Gansu Province. *Journal of Chang'an University (Earth Science Edition)*, 25(4): 32–39(in Chinese with English abstract).

Jerden, J.L., 2001. Origin of Uranium Mineralization at Coles Hill Virginia (USA) and Its Natural Attenuation Within an Oxidized Rock-Soil-Ground Water System. *Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia*, 1–100.

Jiang, J.S., Zheng, Y.Y., Gao, S.B., et al., 2015. Genesis of Chazangcuo Cu-Pb-Zn Deposit, Tibet: Constraints from C-H-O-S-Pb Isotope Geochemistry. *Earth Science*, 40(6):1006–1016(in Chinese with English abstract).

Li, X.H., Su, L., Song, B., et al., 2004. The SHRIMP Zircon U-Pb Dating and Its Geological Significance of Jinchuan Ultramafic Plutone. *Chinese Science Bulletin*, 49(4): 401–402(in Chinese with English abstract).

Li, Z.Y., Huang, Z.Z., Li, X.Z., et al., 2015. The Discovery of Natural Native Uranium and Its Significance. *Acta*

- Geologica Sinica(English Edition)*, 89(5): 1561—1567. <https://doi.org/10.1111/1755-6724.12564>
- Netto, A.M., Meyer, A., Cuney, M., et al., 1991. A Thermo-Geochronological Study of the Itataia Phospho-Uraniferous Deposit (Ceará, Brazil) by Apatite Fission Track Analysis: Genetic Implications. Source, Transport and Deposition of Metals, New York, 1—150.
- Pirajno, F., 2009. Hydrothermal Processes and Mineral Systems. *Economic Geology*, 104(4):597—597. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8613-7\\_11](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8613-7_11)
- Polito, P.A., Kyser, T.K., Stanley, C., 2009. The Proterozoic, Albitite-Hosted, Valhalla Uranium Deposit, Queensland, Australia: A Description of the Alteration Assemblage Associated with Uranium Mineralization in Diamond Drill Hole V39. *Mineralium Deposita*, 44(1): 11—40, <https://doi.org/10.1007/s00126-007-0162-2>
- Sun, S.S., McDonough, W.F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Process. In: Saunders, A. D., Norry, M. J., eds., *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, Special Publication, 42: 313—345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
- Tao, G., Zhu, L.D., Li, Z.W., et al., 2017. Petrogenesis and Geological Significance of the North Liuhuangkuang Granodiorite in the West Segment of the Qilian Terrane: Evidences from Geochronology, Geochemistry and Hf Isotopes. *Earth Science*, 42(12): 2258—2275 (in Chinese with English abstract).
- Vels, B., Fritsche, R., 1988. Sodium Metasomatism in the Kitongo Uranium Occurrence Near Poli, *Cameroon Uranium*, 4:365—383.
- Wang, J., Zhang, J., Zhang, X.J., et al., 2018. Rb-Sr Sphalerite Geochronology, Stable Isotopic Analyses and Geological Significance of the Tianbaoshan Pb-Zn Deposit in Sichuan Province, China Southwestern. *Earth Science*. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20180619.1336.080.html> (in Chinese with English abstract).
- Wang, Wu, C.L.N., Lei, M., et al., 2018. Mineralogical Characteristics of Qingshan Granitic Pluton in North Qilian Orogenic Belt and Their Constraints on Petrogenesis. *Earth Science*, 43(4): 1253—1265 (in Chinese with English abstract).
- Wilde, A., 2013. Towards a Model for Albitite-Type Uranium. *Minerals*, 3(1): 36—48. <https://doi.org/10.3390/min3010036>
- Xin, C.L., Ma, W.Y., An, G.B., et al., 2013. Geological Characteristics and Mineralization Mechanism of the NO. 207 Uranium Deposit in Longshoushan, Gansu Province. *Acta Geological Sinica*, 87(4): 577—590 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J.D., Li, Z.Y., Cai, Y.Q., et al., 2012. The Main Advance and Achievements in the Potential Evaluation of Uranium Resource in China. *Uranium Geology*, 28(6): 321—326 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J.M., Zhao, R.Y., Wang, G., et al., 2017. The Geological Characteristics and Significances of A-Type Porphyritic Granite in the Jiling Uranium Deposit in the Longshou Mountain, Gansu Province. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 36(5): 813—823 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, R.Y., 2016. The Study on Geological Characteristics and Metallogeny of Jiling Sodium-Metasomatic Uranium Deposit in Longshou Mountain Metallogenic Belt in Gansu Province (Dissertation). Chang'an University, Xi'an, 1—148 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, R.Y., Chen, Y.C., Chen, Y.J., et al., 2018b. The Geological Characteristics and its Genesis of the Jiling Na—Metasomatic Uranium Deposit in Longshou Mountains, Gansu Province. *Earth Science*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20181015.0955.014.html> (in Chinese with English abstract).
- Zhao, R.Y., Chen, Y.J., Wu, B., et al., 2013. A Metallogenic Model of the Sodic-Metasomatic Type Uranium Deposit in the Jiling Area of Longshoushan, Gansu Province. *Geology and Exploration*, 49(1): 67—74 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, R.Y., Jiang, C.Y., Chen, X., et al., 2015. Geological Features of Albitite Veins and Its Relationship with Uranium Metallogenic in the Middle Longshou Mountains of Gansu Province. *Geology and Exploration*, 51(6): 1069—1078 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, R.Y., Wang, B., Chen, Y.C., et al., 2018a. A Study of Mineralizing Hydrothermal Fluid Characteristics of the Jiling Uranium Deposit in the Longshoushan Mountains, Gansu Province. *Acta Geoscientia Sinica*, 39(3): 282—294 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y.Y., Zhang, S.M., Tang, L., et al., 2016. Sr-Nd-Pb Isotopic Characteristics and Its Geological Significance of the Jiling Granitic Pluton in the Middle Longshou Mountains. *Earth Science*, 41(6): 1016—1030 (in Chinese with English abstract).
- Zhong, J., Fan, H.H., Gu, D.Z., et al., 2016. Major and Trace Element Migration and Metallogenic Processes of the Xinshuijing U-Th Deposit in the Longshoushan Metallogenic Belt, Gansu Province. *Geology in China*, 04: 1393—1408 (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.地质学报,89(6):1051-1069.
- 陈云杰,傅成铭,王刚,等,2014.花岗岩型热液铀矿床C、O同位素研究—以甘肃省龙首山芨岭矿区为例.地质与勘探,50(4):641-648.
- 陈云杰,王伟,王刚,等,2015.甘肃省龙首山地区芨岭铀矿区蚀变特征分析.矿产与地质,29(2):144-151.
- 杜乐天,1996.烃碱流体的地球化学原理—重论热液作用和岩浆作用.北京:科学出版社,1-230.
- 高宇,赵如意,王刚,等,2017.甘肃龙首山芨岭辉绿岩地球化学特征及其地质意义.地质与资源,5:505-514.
- 胡能高,2003.甘肃东大山地区龙首山岩群地球化学特征及其构造环境.地球科学与环境学报,25(04):32-39.
- 姜军胜,郑有业,高顺宝,等,2015.西藏查藏错铜铅锌矿床成因:C-H-O-S-Pb同位素制约.地球科学,40(6):1006-1016.
- 李献华,苏犁,宋彪,等,2004.金川超镁铁侵入岩SHRIMP锆石U-Pb年龄及地质意义.科学通报,49(4):401-402.
- 陶刚,朱利东,李智武,等,2017.祁连地块西段硫磺矿北花岗岩闪长岩的岩石成因及其地质意义:年代学、地球化学及Hf同位素证据.地球科学,42(12):2258-2275.
- 王健,张均,张晓军,等,2018.四川天宝山矿床闪锌矿Rb-Sr年代学、稳定同位素及地质意义.地球科学.<http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20180619.1336.080.html>
- 王楠,吴才来,雷敏,等,2018.北祁连青山花岗岩体矿物学特征及其对岩石成因的约束.地球科学,43(4):1253-1265.
- 辛存林,马维云,安国堡,等,2013.甘肃龙首山207铀矿床成矿地质特征及其成矿机制探讨.地质学报,87(4):577-590.
- 张甲民,赵如意,王刚,等,2017.甘肃芨岭矿区A型似斑状花岗岩地质特征及其地质意义.矿物岩石地球化学通报,36(5):813-823.
- 张金带,李子颖,蔡煜琦,等,2012.全国铀矿资源潜力评价工作进展与主要成果.铀矿地质,28(6):321-326.
- 赵如意,2016.甘肃省龙首山成矿带芨岭钠交代型铀矿地质特征与成矿作用研究.西安:长安大学,1-148.
- 赵如意,王博,陈毓川,等,2018a.甘肃省龙首山芨岭铀矿床成矿热液流体特征研究.地球学报,39(3):282-294.
- 赵如意,陈毓川,陈云杰等,2018b.甘肃省龙首山芨岭钠交代型铀矿床地质特征与成因.地球科学,<http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20181015.0955.014.html>
- 赵如意,陈云杰,武彬,等,2013.甘肃龙首山芨岭地区钠交代型铀矿成矿模式研究.地质与勘探,49(1):67-74.
- 赵如意,姜常义,陈旭,等,2015.甘肃省龙首山成矿带中段钠长岩脉地质特征及其与铀矿化关系研究.地质与勘探,51(6):1069-1078.
- 赵亚云,张树明,汤琳,等,2016.龙首山中段芨岭花岗岩体Sr-Nd-Pb同位素特征及意义.地球科学,41(6):1016-1030.
- 钟军,范洪海,顾大钊,等,2016.甘肃龙首山成矿带新水井铀(钍)矿床元素迁移规律及成矿作用过程研究.中国地质,4:1393-1408.

表 1 茂岭铀矿床 ZKJ29-3 钻孔蚀变似斑状花岗岩主量元素 (wt%) 含量一览表

Table 1 The major element contents (wt%) table of altered porphyritic granite in the drill hole ZKJ29-3 from the Jiling uranium deposit

样品	取样位置 (m)	蚀变带	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI	CO <sub>2</sub>	Fe <sup>2+</sup> /Fe <sup>3+</sup>	N/K	Na/Al (molar)	K-Na-Ca (wt%)
D13-01		原岩	68.43	0.33	15.88	3.48	0.83	0.08	0.33	2.04	4.75	3.78	0.12	1.42	0.81	0.36	1.26	0.49	-3.01
D13-80			67.26	0.37	15.90	3.82	1.79	0.06	0.73	1.49	5.04	3.30	0.09	1.62	0.82	1.08	1.53	0.52	-3.23
LTW01			68.55	0.40	14.25	3.39	1.33	0.05	0.82	1.76	6.14	2.58	0.14	1.86	1.00	0.77	2.38	0.71	-5.32
LTW02			68.66	0.43	14.36	3.66	2.41	0.08	0.86	1.34	4.93	3.69	0.14	1.45	0.64	2.65	1.34	0.56	-2.58
LTW03			69.25	0.38	14.20	3.26	2.06	0.05	0.38	1.60	5.64	2.49	0.12	2.35	1.19	2.31	2.27	0.65	-4.75
LTW04			68.48	0.33	14.87	3.52	1.73	0.06	0.67	1.60	5.35	3.19	0.10	1.74	0.89	1.19	1.68	0.59	-3.76
	平均		68.44	0.37	14.91	3.52	1.69	0.06	0.63	1.64	5.31	3.17	0.12	1.74	0.89	1.39	1.74	0.59	-3.78
	标准差	0.59	0.04	0.73	0.18	0.51	0.01	0.21	0.22	0.47	0.50	0.02	0.31	0.17	0.82	0.43	0.07	0.97	
1	340.53	细 脉 状 绿 泥 石 化 带	65.34	0.37	16.70	2.26	0.64	0.02	0.43	1.68	9.64	0.14	0.31	3.02	1.37	0.46	104.40	0.95	-11.18
2	344.84		63.96	0.44	16.00	3.62	1.05	0.03	0.65	1.97	9.43	0.12	0.25	3.45	1.81	0.47	119.14	0.97	-11.28
3	349.80		64.76	0.20	16.01	2.69	0.88	0.03	0.94	1.92	9.46	0.13	0.29	3.50	2.05	0.57	110.33	0.97	-11.25
4	354.18		64.91	0.44	17.08	2.94	0.73	0.02	0.48	1.01	10.23	0.16	0.23	2.49	0.96	0.38	96.94	0.99	-11.08
5	474.03		59.61	0.82	16.96	5.28	3.62	0.05	1.74	1.31	9.62	0.35	0.51	3.59	1.75	3.10	41.67	0.93	-10.58
6	488.69		61.88	0.49	16.92	3.15	1.83	0.03	1.02	1.40	10.50	0.13	0.48	4.00	1.56	1.79	122.46	1.02	-11.77
7	493.10		61.35	0.48	16.58	3.26	1.90	0.05	0.65	2.51	10.84	0.09	1.09	3.13	1.79	1.80	182.61	1.08	-13.26
8	505.70		61.72	0.79	16.55	3.96	1.92	0.04	0.76	1.36	10.99	0.15	0.56	3.13	1.28	1.15	111.08	1.09	-12.20
9	509.41		60.65	0.60	16.49	3.93	2.17	0.04	1.45	1.85	10.77	0.13	0.36	3.75	2.17	1.56	125.61	1.07	-12.49
10	514.23		60.11	0.76	16.51	5.07	2.89	0.04	2.62	1.20	10.37	0.27	0.46	2.54	1.76	1.70	58.23	1.03	-11.30
11	544.33		60.43	0.99	17.10	3.94	2.11	0.05	2.07	1.27	10.14	0.22	0.59	3.14	1.64	1.45	69.88	0.98	-11.19
12	549.34		61.15	0.40	16.50	3.68	1.67	0.04	1.55	2.37	10.25	0.09	0.65	3.49	2.29	1.01	172.67	1.02	-12.53
13	554.96		54.60	0.49	15.22	6.78	3.37	0.06	3.25	3.37	8.54	0.13	1.22	5.60	2.23	1.22	99.60	0.92	-11.78
	平均	61.57	0.56	16.51	3.89	1.91	0.04	1.35	1.79	10.06	0.16	0.54	3.45	1.74	1.28	108.82	1.00	-11.68	
	标准差	2.75	0.21	0.50	1.17	0.92	0.01	0.84	0.63	0.67	0.07	0.29	0.75	0.38	0.73	38.16	0.05	0.72	
14	164.92	方 解 石 化 带	57.97	0.50	14.38	3.51	1.17	0.08	1.10	6.71	9.67	0.10	0.27	5.78	5.06	0.58	146.61	1.11	-16.28
15	165.92		58.59	0.62	14.08	4.25	1.38	0.07	1.58	5.44	10.13	0.13	0.53	4.58	3.88	0.56	118.14	1.18	-15.44
16	166.20		59.31	0.49	14.81	3.38	1.03	0.07	0.93	5.76	9.63	0.08	0.24	4.97	4.28	0.51	182.50	1.07	-15.31
17	311.70		62.15	0.34	13.02	2.38	1.28	0.10	0.30	7.02	7.26	0.31	0.12	6.83	5.79	1.46	35.51	0.92	-13.97
18	327.50		64.50	0.38	16.17	2.50	1.07	0.04	1.00	2.09	9.27	0.10	0.11	3.73	2.51	0.90	140.55	0.94	-11.26
19	335.51		62.82	0.37	15.65	3.80	1.76	0.04	1.16	2.06	9.29	0.14	0.38	4.14	2.24	1.05	100.61	0.98	-11.21
20	381.06		62.95	0.57	16.13	3.56	2.21	0.04	1.18	1.53	9.34	0.14	0.30	4.17	1.93	2.18	101.15	0.95	-10.73
21	385.70		64.04	0.39	15.18	3.36	2.16	0.03	1.64	2.00	9.38	0.14	0.28	3.44	2.06	2.44	101.58	1.02	-11.24

22	403.20		61.26	0.39	16.44	3.90	2.65	0.06	1.63	1.83	9.97	0.18	0.21	4.07	2.22	2.99	83.98	1.00	-11.62
23	405.00		61.88	0.55	16.59	4.36	2.61	0.05	1.56	1.42	9.49	0.16	0.22	3.61	1.63	1.95	89.93	0.94	-10.75
24	437.80		64.13	0.41	15.71	3.25	2.05	0.04	1.30	1.68	8.69	0.33	0.20	4.07	2.45	2.29	39.92	0.91	-10.04
25	441.80		64.75	0.52	16.03	3.53	1.74	0.04	0.97	1.53	9.34	0.13	0.19	2.86	2.06	1.20	108.93	0.96	-10.74
26	454.97		63.95	0.44	15.90	3.32	1.23	0.03	0.92	2.02	9.90	0.11	0.23	2.97	2.10	0.69	136.45	1.02	-11.81
27	494.50		60.18	0.47	15.56	3.36	1.44	0.08	0.75	4.01	10.02	0.14	0.48	4.96	3.39	0.90	108.51	1.06	-13.89
28	499.20		63.72	0.47	16.85	2.16	0.53	0.04	0.51	2.26	10.73	0.15	0.88	2.50	1.51	0.37	108.45	1.05	-12.84
29	504.80		63.20	0.40	16.92	2.97	1.11	0.03	0.50	1.93	11.13	0.15	0.27	2.57	1.61	0.71	112.50	1.08	-12.91
30	524.50		61.91	0.43	17.28	2.63	1.33	0.03	1.42	2.19	10.25	0.24	0.21	3.58	2.16	1.27	64.75	0.98	-12.20
31	539.01		61.45	0.55	17.07	3.75	2.17	0.04	1.77	1.74	10.62	0.14	0.29	2.88	1.78	1.77	115.01	1.02	-12.22
	平均		62.15	0.46	15.77	3.33	1.61	0.05	1.12	2.96	9.67	0.16	0.30	3.98	2.70	1.32	105.28	1.01	-12.47
	标准差		1.99	0.08	1.10	0.59	0.57	0.02	0.42	1.86	0.83	0.07	0.18	1.11	1.22	0.75	34.77	0.07	1.78
32	256.60	赤	45.91	1.52	15.28	13.24	0.97	0.11	0.63	6.10	6.77	0.71	0.52	8.97	4.67	0.09	14.46	0.73	-12.16
33	258.00	铁	45.07	1.46	14.43	11.67	2.52	0.16	1.74	7.98	6.71	0.48	0.42	9.51	6.30	0.31	21.19	0.77	-14.21
34	313.40	矿	65.74	0.12	17.19	3.21	0.46	0.02	0.28	0.76	10.39	0.22	0.07	1.91	0.70	0.19	71.60	0.99	-10.93
35	314.40	化	65.49	0.11	16.30	3.42	0.62	0.03	0.64	1.27	9.21	0.10	0.07	3.25	1.34	0.25	139.64	0.93	-10.38
36	360.30	…	57.90	1.67	16.95	7.64	0.55	0.02	0.46	1.25	7.99	0.33	0.45	4.97	0.74	0.09	36.71	0.78	-8.91
	平均		56.02	0.98	16.03	7.84	1.02	0.07	0.75	3.47	8.21	0.37	0.31	5.72	2.75	0.19	56.72	0.84	-11.32
	标准差		9.05	0.71	1.04	4.12	0.77	0.06	0.51	2.98	1.42	0.21	0.20	3.04	2.30	0.09	45.93	0.10	1.78
37	407.60	假	65.77	0.32	15.94	2.70	1.66	0.04	0.90	1.38	9.61	0.23	0.14	2.94	1.86	2.11	63.35	0.99	-10.76
38	410.00	象	62.88	0.44	16.68	3.87	2.23	0.04	0.94	1.38	9.69	0.17	0.18	3.62	1.86	1.75	86.42	0.96	-10.90
39	419.80	绿	63.87	0.66	16.54	3.74	2.27	0.03	1.01	0.77	9.61	0.12	0.26	3.26	1.36	2.03	121.42	0.96	-10.26
40	431.80	泥	63.34	0.41	17.28	3.42	2.49	0.04	1.21	1.01	9.69	0.20	0.19	3.10	1.47	4.06	73.46	0.92	-10.50
41	433.80	石	65.07	0.50	16.35	3.40	1.93	0.02	0.89	0.82	9.58	0.19	0.30	2.80	1.42	1.68	76.44	0.96	-10.21
42	435.80	化	63.27	0.45	17.23	3.68	1.97	0.03	0.94	0.84	10.07	0.17	0.17	3.08	1.50	1.45	89.81	0.96	-10.74
43	487.30		63.24	0.48	16.86	3.14	1.66	0.03	0.87	1.33	10.86	0.14	0.29	2.77	1.44	1.40	117.61	1.06	-12.05
	平均		63.92	0.47	16.70	3.42	2.03	0.03	0.97	1.08	9.87	0.17	0.22	3.08	1.56	2.07	89.79	0.97	-10.77
	标准差		1.00	0.10	0.44	0.37	0.29	0.01	0.11	0.26	0.43	0.03	0.06	0.27	0.19	0.85	20.46	0.04	0.57
44	309.40		68.06	0.34	13.73	3.47	2.57	0.07	0.56	2.04	7.26	0.36	0.12	3.71	1.98	4.44	30.58	0.87	-8.94
45	312.70		71.34	0.32	14.54	1.66	0.71	0.03	0.20	1.66	7.11	0.71	0.11	2.00	1.21	0.90	15.18	0.80	-8.06
46	317.40	硅	69.05	0.38	14.82	2.22	0.49	0.04	0.58	1.24	7.47	0.66	0.14	3.15	1.32	0.32	17.16	0.83	-8.05
47	321.40	化	70.98	0.38	14.40	2.06	0.66	0.03	0.36	1.01	8.06	0.22	0.13	2.08	1.06	0.55	55.55	0.92	-8.85
48	329.50	带	68.48	0.44	15.02	2.22	0.72	0.03	0.65	1.49	7.64	0.40	0.16	3.19	1.61	0.56	28.96	0.84	-8.73
49	331.40		70.57	0.31	14.10	2.06	0.71	0.03	0.54	1.31	7.90	0.32	0.12	2.41	1.33	0.62	37.43	0.92	-8.89
50	331.50		71.08	0.37	13.19	2.22	0.78	0.03	0.64	1.54	7.14	0.40	0.15	2.73	1.59	0.64	27.06	0.89	-8.28
51	408.00		69.00	0.42	14.67	3.01	1.78	0.03	0.77	0.75	8.01	0.39	0.18	2.57	1.38	1.88	31.14	0.90	-8.37





44	309.40		17.6	54.2	83.9	9.59	29.5	4.31	1.13	4.17	0.49	2.6	0.52	1.56	0.27	2.1	0.32	12.0	183	195	15.2	0.81	37	706	32.0	237	16.3	0.66	207	180	8.86	3.9	213	29.4	1.02	17.1	10.1	0.14
45	312.70		14.9	46.6	74.8	8.63	27.7	4.24	1	3.71	0.43	2.47	0.47	1.45	0.24	1.58	0.27	10.6	163	174	15.4	0.77	57	1290	29.0	75	23.4	3.16	366	167	8.1	6.7	241	30	2.32	16.8	13.1	0.39
46	317.40		23.6	70	121	13.9	43.3	6.6	1.34	5.69	0.69	3.64	0.69	2.08	0.33	2.46	0.39	16.0	256	272	16.0	0.67	53	875	35.0	101	22.2	0.83	251	196	9.76	4.8	298	43.7	1.16	18	14.3	0.35
47	321.40		21.6	60.7	99.2	11.3	36.1	5.91	1.24	5.1	0.55	2.93	0.57	1.81	0.34	2.28	0.37	13.9	214	228	15.4	0.69	37	1004	33.0	87	21.4	0.73	122	199	10	5.4	205	74.3	0.76	18.5	25.8	0.38
48	329.50		19.6	58.6	97	11	34	5.21	1.06	4.77	0.52	2.68	0.59	1.84	0.34	2.32	0.4	13.5	207	220	15.4	0.65	43	764	37.0	69	33.1	1.24	290	219	10.7	3.4	261	33.5	0.43	18.6	10.8	0.54
49	331.40	硅	12	43.2	82.2	7.9	25	3.61	0.66	2.98	0.42	2.06	0.44	1.47	0.26	1.87	0.28	9.8	163	172	16.6	0.62	44	1574	32.0	292	21.6	1.26	158	165	8.45	5.4	199	34.9	0.51	16	6.5	0.11
50	331.50	化	18.9	70.7	116	12.8	38.3	5.35	1.29	4.92	0.52	2.61	0.53	1.72	0.31	2.19	0.34	13.2	244	258	18.6	0.77	45	2194	32.0	19	23.6	0.92	179	188	10.1	5.2	268	33	0.93	16.6	8.7	1.68
51	408.00	带	18.1	49.9	81.2	9.15	30	4.7	0.83	4.02	0.44	2.64	0.54	1.66	0.32	2.26	0.39	12.3	176	188	14.3	0.59	43	541	28.0	122	28.7	0.8	159	190	10.8	3.4	238	43.3	0.75	17.3	14.3	0.23
52	412.00		20.7	62.1	99.2	11.1	33.6	4.84	0.82	4.61	0.49	2.77	0.51	1.88	0.36	2.6	0.42	13.6	212	225	15.5	0.53	36	107	35.0	30	18.6	0.91	90	232	11.6	3.1	187	34.2	0.76	18.7	11.1	1.17
53	414.90		10.9	45.3	79.6	7.36	21.6	2.9	0.45	2.69	0.34	1.72	0.38	1.41	0.23	1.84	0.31	8.9	157	166	17.6	0.49	34	247	35.0	52	16.9	0.67	111	192	8.51	0.5	176	41	0.51	17.6	22.7	0.67
54	439.80		14.3	54.1	86.6	9.41	29.1	3.88	0.79	3.75	0.39	2.1	0.42	1.39	0.26	1.66	0.28	10.3	184	194	17.9	0.63	39	536	33.0	15	18.8	0.86	152	189	9.8	6.6	201	40.5	0.89	16.9	31.2	2.2
55	451.00		12.7	37.4	70.2	6.92	22.1	3.26	0.65	3.13	0.4	2.25	0.46	1.38	0.24	1.52	0.26	9.6	141	150	14.6	0.62	43	912	30.0	16	17.6	0.63	148	211	11.4	3.4	232	53.1	1.3	17.2	15.9	1.88
	平均		17.1	54.4	90.9	9.92	30.9	4.57	0.94	4.13	0.47	2.54	0.51	1.64	0.29	2.06	0.34	12.0	192	204	16.1	0.65	43	896	33.0	93	21.9	1.06	186	194	9.84	4.32	226	40.91	0.94	17.4	15.4	0.35
	标准差		3.75	9.62	14.6	1.98	6.00	1.00	0.26	0.85	0.08	0.45	0.08	0.21	0.04	0.33	0.05	1.98	32.8	35	1.25	0.09	6.31	531	2.47	81.0	4.58	0.64	73.9	18.0	1.07	1.59	334	11.5	0.47	0.79	6.85	0.69
	总平均		31.8	72.1	120	13.5	43.5	6.78	1.33	6.11	0.77	4.46	0.96	3.15	0.58	3.96	0.6	20.6	257	278	14.4	0.63	40	418	39.0	467	21.2	1.23	178	245	10.9	5.62	291	77.51	2.63	19.2	13.8	0.08
	总标准差		15.5	22.6	38.3	4.24	13.8	2.17	0.49	1.93	0.25	1.67	0.42	1.49	0.31	2.24	0.35	8.07	77.8	83.2	4.49	0.10	25.2	474	11.8	723	4.52	0.53	68.6	49.0	2.88	3.91	154	80.5	8.37	1.86	6.26	0.81

注：似斑状花岗岩原岩数据引自张甲民等(2017)；工业矿体中 U 含量用>500 表示