

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.287>



甘肃省龙首山茱岭钠交代型铀矿床地质特征与成因

赵如意^{1,2}, 陈毓川², 陈云杰³, 王刚³, 聂利³, 荣晓³, 李涛³

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自然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: 茱岭钠交代型铀矿床是中国西北部的重要铀矿床。在总结矿床地质特征的基础上, 通过流体包裹体、绿泥石温度计、同位素和地球化学特征等研究, 认为该矿床形成于早古生代后碰撞阶段。矿床的形成经历了5个阶段, 自矿体中心向外分为6个蚀变组合带; 成矿流体起源于花岗质岩浆演化晚期, 经与围岩交代、反应形成再平衡混合的岩浆水。它是温度为295℃左右、盐度为2.99%~4.57% NaCl_{eqv}、密度为0.75~0.77 g/cm³的流体, 其中富含U⁶⁺、Na⁺、CO₃²⁻等组分, 对SiO₂、Fe²⁺、Mn²⁺、K⁺和Rb、Sr、Mo、Ga、Zr、Ba等组分有较强的溶蚀或交代能力。流体沸腾是成矿物质的主要卸载机制, pH、Eh值的变化促进了成矿物质的进一步卸载。

关键词: 茱岭; 钠交代铀矿床; 地球化学; 组分迁移; 热液来源; 成矿机制。

中图分类号: P611

文章编号: 1000-2383(2020)01-090-18

收稿日期: 2018-08-13

Geological Characteristics and Its Genesis of the Jiling Na-Metasomatic Uranium Deposit in Longshou Mountains, Gansu Province

Zhao Ruyi^{1,2}, Chen Yuchuan², Chen Yunjie³, Wang Gang³, Nie Li³, Rong Xiao³, Li Tao³

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, Ministry of Natural Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

3. The No. 203 Research Institute of Nuclear Industry, Xianyang 712000, China

Abstract: The Jiling Na-metasomatic uranium deposit is one of the most important uranium deposits in NW China. Based on the deposit geological characteristics, we studied the inclusions in calcite, chlorite thermometer, isotope and geochemical characteristics in this paper. We considered that the Jiling uranium deposit was formed under post-collision background in the Early Paleozoic, which has experienced 5 stages, and includes 6 alteration zones from ore center to the edge of Na-metasomatic body. The ore bearing hydrothermal is rebalance water, which is generated from evolutive magma, reacted with wall rocks; its temperature is about 295℃, salinity is 2.99%–4.57% NaCl_{eqv} and density is 0.75–0.77 g/cm³. The hydrothermal fluid is rich in U⁶⁺, Na⁺, CO₃²⁻, and has strong dissolution ability to SiO₂, Fe²⁺, Mn²⁺, K⁺, Rb, Sr, Mo, Ga, Zr and Ba. Fluid boiling is main mechanism of ore deposition, and the changing of pH and Eh has promoted material deposition at the same time.

基金项目: 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); 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(矿产地志)项目(No. DD20160346); 中国地质调查局项目(No. 12120114014901)。

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. 甘肃省龙首山茱岭钠交代型铀矿床地质特征与成因. 地球科学, 45(1):90–107.

Key words: Jiling; Na-metasomatic uranium deposit; geochemistry; component migration; hydrothermal source; ore forming mechanism.

0 引言

从太古代到新生代,热液钠交代作用广泛发育于不同地质时期的围岩,钠交代作用普遍伴随有U的迁移富集,但只有一部分形成铀矿床.钠交代型铀矿虽然品位较低但规模较大,其蕴含U资源量可以与全球知名的不整合面型铀矿床相媲美(Wilde, 2013).古元古代(主要是1.90~1.50 Ga)是钠交代型铀矿的一个重要成矿时期(Wilde, 2013),形成了乌克兰中央铀成矿省(>300 kt U_3O_8)、巴西的Lagoa Real铀矿田(100 kt U_3O_8)、加拿大的中部矿带(74 kt U_3O_8)和Beaver Lodge铀矿田(30 kt U_3O_8)以及澳大利亚的Isa铀矿田(57 kt U_3O_8).古生代是钠交代型铀矿的另一个重要成矿阶段(Cuney *et al.*, 2012; Wilde, 2013),形成了巴西的Itataia铀矿床(142 kt U_3O_8) (Wilde, 2013)、喀麦隆的Poli铀矿床(Vels and Fritsche, 1988)及美国的Hill山铀矿田(Jerden, 2001).中国连山关铀矿床形成于1 900~1 800 Ma,矿体分布于钠交代片岩、片麻岩和片麻状黑云母花岗岩(2 200~2 100 Ma;韩军和夏毓亮, 2009)之中.如果说连山关铀矿床是元古代钠交代铀成矿作用在中国的响应,祁连山—龙首山铀成矿带的菱岭、新水井、扁都口钠交代型铀矿床则是古生代钠交代铀成矿作用在中国的代表.

菱岭钠交代型铀矿床是中国西北部龙首山铀成矿带重要的铀矿床,发现于20世纪60年代初,是一座中型规模的花岗岩型铀矿,为中国核工业早期发展做出了一定贡献.有关菱岭铀矿床的成矿物质来源,前人一致认为是菱岭岩体的花岗岩(李占游, 1987),但是对热液来源是幔汁(HACONS)还是演化分异的花岗质岩浆水(李占游, 1987)一直争论不下(赵如意等, 2013, 2015;陈云杰等, 2014),矿床的成矿过程和成矿机制也久无定论.在过去的几年中,笔者主持了龙首山成矿带的铀资源调查评价、勘查和研究工作,重点对菱岭铀矿床进行了解析,详细研究了钠交代似斑状花岗岩的岩石学、矿物学、矿体和矿石特征、蚀变分带和地球化学特征等地质特征.通过地球化学组分在钠交代似斑状花岗岩中不同蚀变带内迁移计算、流体包裹体温度和气相组分分析、绿泥石蚀变温度计算等方法研究

成矿流体性质和成矿过程,利用C、H、O、Sr、Nd、Pb同位素进一步约束成矿热液和成矿物质来源,并综合前人取得成果研究菱岭铀矿床的成矿流体运移、卸载机制和成矿模式.

1 区域地质背景

菱岭钠交代型铀矿床位于甘肃省龙首山成矿带中段,该带是中国西北部重要的铀成矿带.龙首山铀成矿带呈北西向展布于华北板块西南部阿拉善地块南缘(图1a),南邻河西走廊,北至潮水盆地,全长约180 km,宽约20 km(图1b).古元古界龙首山岩群(Pt_1L)是该区出露最古老的地层,它是由一套双峰式火山岩夹碎屑岩经中高级变质作用形成(胡能高, 2003),主要岩性有片麻岩、混合岩、片岩和大理岩等,平均U含量为 4.1×10^{-6} .中元古界墩子沟组(Pt_2dz , U含量 2.8×10^{-6})变砂岩、结晶灰岩和千枚岩不整合于古元古界之上,其上假整合覆盖新元古界韩母山群(Pt_3h , U含量 2.3×10^{-6})千枚岩、结晶灰岩,底部见含磷建造(U含量 10.5×10^{-6}),元古界是龙首山铀成矿带重要的含铀建造.早古生界局部可见寒武系,晚古生界出露较为齐全,中新生界主要分布于山间拉分盆地和龙首山南北两侧.龙首山铀成矿带岩浆作用十分发育,主要有中条期石英闪长岩、白岗岩(1 775 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)、似斑状花岗岩(458 Ma;张甲民等, 2017)、中粗粒花岗岩(赵亚云等, 2016)、碱性岩、钠长岩脉(443 Ma;赵如意等, 2015)及少量基性岩脉(485 Ma;高宇等, 2017)和花岗岩脉等.其中与铀矿化有关的侵入体有28个,出露面积约590 km²,占全区总面积的22.7%,绝大多数为加里东期侵入岩.龙首山成矿带构造总体呈北西向展布,地层褶皱较为紧密,并往往出现倒转现象,断层构造大部分为北西向,晚期发育近东西向断层,之后被近南北向断层穿切错断.

2 矿床地质

2.1 矿区地质

菱岭钠交代型铀矿床位于龙首山成矿带中段

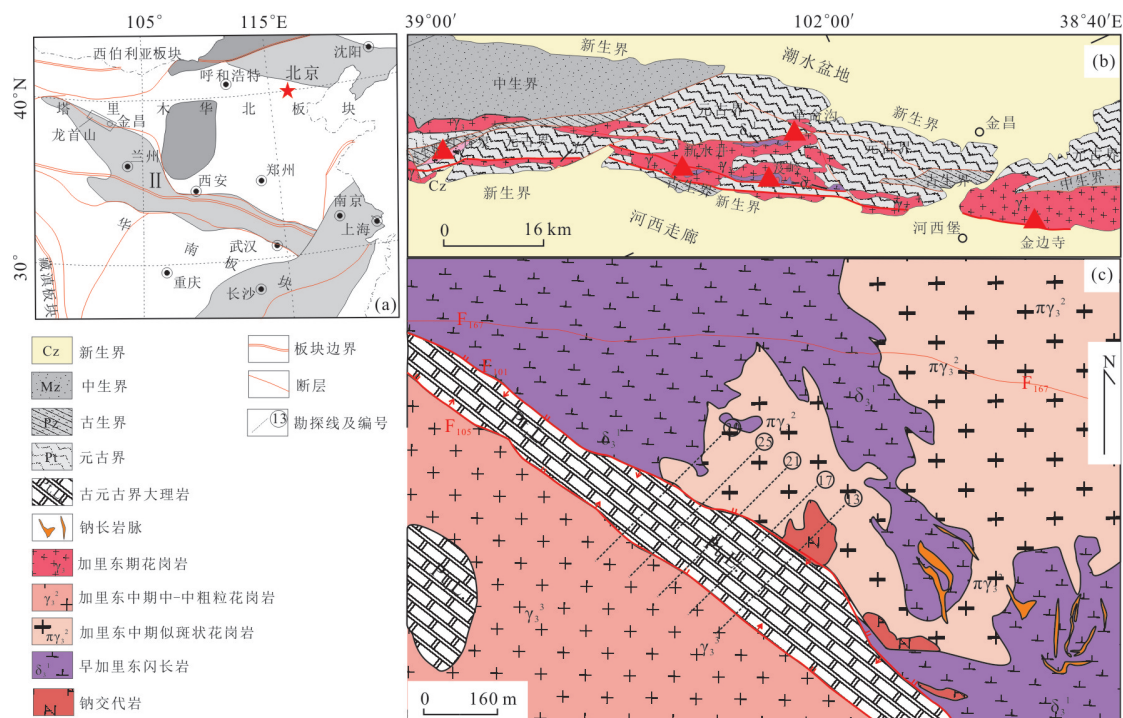


图1 菱岭铀矿床大地构造位置(a),区域地质(b)及矿床地质简图(c)

Fig.1 The tectonic location (a), regional (b) and deposit geological map (c) of Jiling uranium deposit

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,图2),大理岩硅化强烈,局部发育蛇纹石化,总体呈北东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_{101})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 Ma;张甲民等,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,钠长岩脉为矿区最晚的岩浆(残浆)活动(443 Ma;赵如意等,2015)产物.大理岩南侧以断层(F_{105})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(赵如意,2016).马路沟断裂展布于大理岩的北侧,是由 F_{101} 和 F_{102} 两条平行断裂组成,它是菱岭铀矿床的控矿断裂,二者相距几米至几十米,产状一致为 $220^{\circ}\sim 230^{\circ}/60^{\circ}\sim 70^{\circ}$.大理岩南侧断裂 F_{105} 产状为 $30^{\circ}\sim 35^{\circ}/70^{\circ}\sim 75^{\circ}$,早期矿床勘查过程中称之为菱岭铀矿床的控矿断裂.经调查,笔者认为 F_{105} 是右行走滑逆断层,是形成于铀成矿之后

的破矿断层,将下盘矿体和蚀变带向北西向错动约80 m,下降约40 m,这一成果为后来钻探查证提供了依据, F_{105} 断层下盘厚大矿体的发现,大大拓展了菱岭铀矿床的找矿新空间.

2.2 矿体特征

菱岭钠交代型铀矿床的蚀变体和铀矿化体呈 $55^{\circ}\sim 65^{\circ}$ 的倾角,向 $310^{\circ}\sim 320^{\circ}$ 方向侧伏(图2).矿体主要呈透镜状、长透镜状、不规则状产出于钠交代蚀变似斑状花岗岩(图3a、3b)之中,在沿裂隙发育的蚀变闪长岩和钠长岩脉中也有部分铀矿体产出.矿床早期勘查的矿体数目较多,个体较小,最长矿体约150 m,宽约45 m.矿石呈浸染状、细脉状、网脉状,矿石矿物主要为沥青铀矿,常与绿泥石、方解石充填于岩石微裂隙、矿物节理之中(图3c~3i).矿床总体品位为0.03%~0.10%,保有资源量500~1 500 t(Franz, 2009).最新的勘查成果表明主矿体被 F_{105} 断层截切,南侧矿体新增控制长度超过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.

2.3 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.在此,结合前人研究成果(赵如意等,2013;陈云杰等,

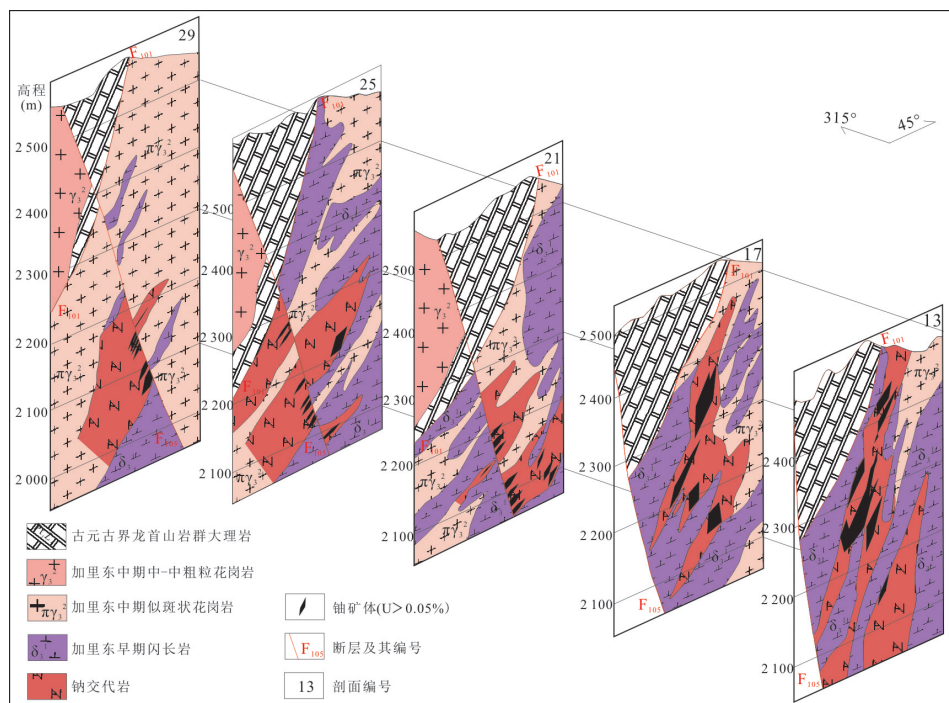


图 2 芨岭矿床 13、17、21、25 和 29 号勘探线剖面

Fig.2 The 13, 17, 21, 25 and 29 sections of the Jiling uranium deposit

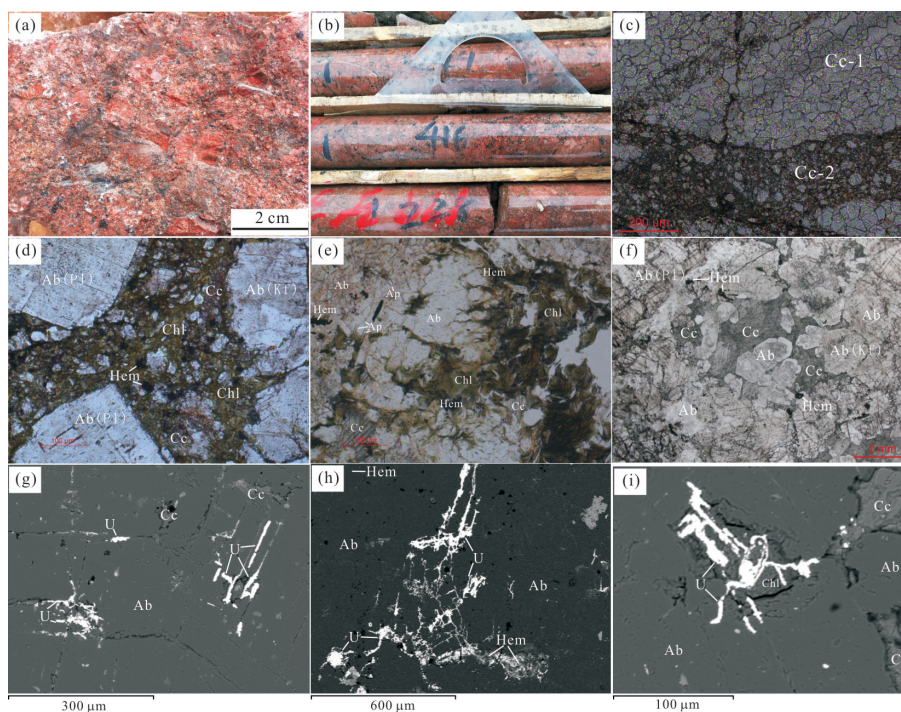


图 3 芨岭铀矿床岩石学特征(a~f)及沥青铀矿背散射电子图像(g~i)

Fig.3 The petrological characteristics (a~f) and backscattered electron images of pitchblende in Jiling U deposit (g~i)

Ab. 钠长石; Ap. 磷灰石; Cc. 方解石; Cc1. 主成矿阶段早期方解石; Cc2. 主成矿阶段晚期方解石; Chl. 绿泥石; Hem. 赤铁矿; Kf. 钾长石; Pl. 斜长石; U. 沥青铀矿

2014), 笔者将芨岭钠交代型铀矿化蚀变综合划分为成矿前钾钠混合交代阶段、成矿早期钠交代阶

段、主成矿期钠交代阶段、后成矿期钠交代阶段蚀变和成矿后阶段这 5 个阶段(图 4)。芨岭矿床常见的



图 4 菱岭矿床钠交代蚀变似斑状花岗岩中矿物共生关系

Fig.4 Mineral paragenesis in Na-metasomatic porphyritic granite of the Jiling uranium deposit

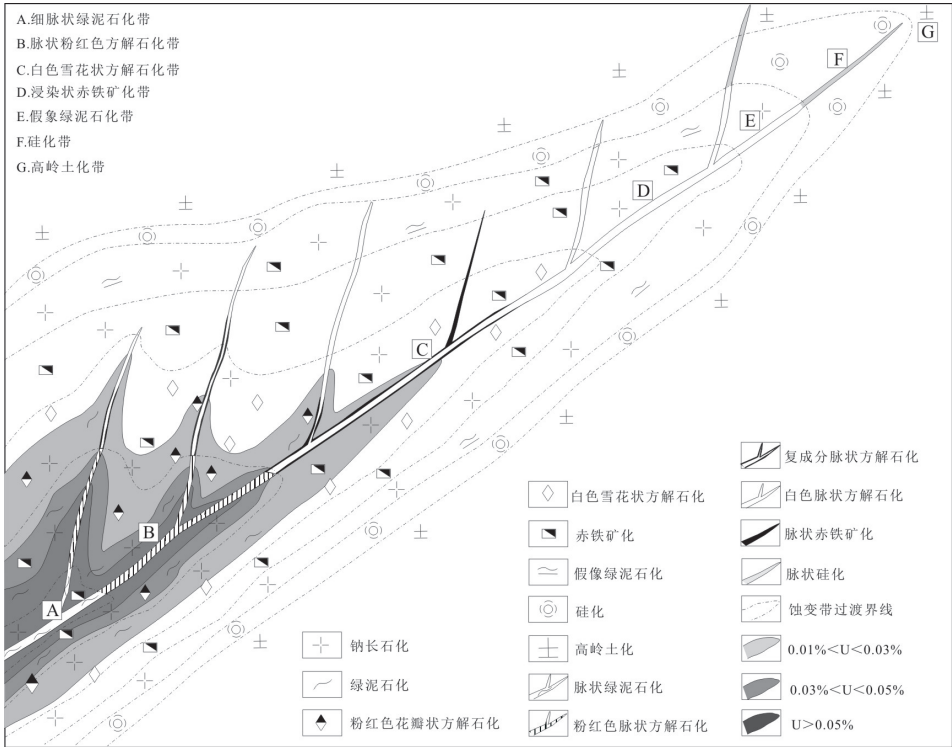


图 5 菱岭铀矿床蚀变矿物组合与分带图

Fig.5 The mineral assemblages and zones picture of the Jiling uranium deposit

蚀变(图 3)有钠长石化、细脉状绿泥石化、片状(粒状)绿泥石化、假象绿泥石化、粉红色脉状方解石化、白色雪花状方解石化、白色脉状方解石化、粉尘状(云雾状)赤铁矿化、浸染状赤铁矿化、细脉状赤铁矿化、硅化及高岭土化等蚀变。

在钠交代蚀变似斑状花岗岩中,钠长石化自矿体中心向外至交代体的边部都较发育(图 5),

其余蚀变自矿体中心向外依次可划分为 6 个蚀变组合带(A→F):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(A 带)、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(B 带)、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(C 带)、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(D带)、假象绿泥石化+钠长石化+弱赤铁矿化带(E带)、硅化带(F带)等。各蚀变组合带(A→F)以其最典型的蚀变矿物依次命名为细脉状绿泥石化带、粉红色方解石化带、雪花状方解石化带、赤铁矿化带、假象绿泥石化带和硅化带。

3 样品采集与实验

菱岭钠交代型铀矿的铀矿体主要赋存于钠交代似斑状花岗岩之中,为了系统研究矿床钠交代蚀变过程中似斑状花岗岩的地球化学组分迁移情况,将钻孔和地表出露的钠交代似斑状花岗岩按蚀变带进行分类取样。其中细脉状绿泥石化带样品90件、粉红色脉状方解石化带样品33件、雪花状方解石化带样品27件、赤铁矿化带样品8件、假象绿泥石化带样品16件和硅化带样品11件。细脉状绿泥石化和粉红色方解石化带位于蚀变带的核心部位,指示较好铀矿化所在,对细脉状绿泥石和粉红色方解石脉的研究能够较好地约束成矿流体性质。故而采集矿床中西部(17~29号勘探线)蚀变似斑状花岗岩内细脉状绿泥石、片状绿泥石和假象绿泥石使用电子探针对其进行成分测试。闪长岩相对较为致密,钠交代蚀变过程中地球化学组分扩散较慢,所以选择蚀变闪长岩中粉红色方解石脉进行流体包裹体测试分析。对粉红色方解石脉中零星的、孤立的或是平行于方解石节理成群出现的原生流体包裹体进行温度和气相成分测试后,利用相关经验公式计算其盐度、密度等相关参数。粉红色方解石脉取自矿床北东部9号勘探线ZKJ9-4钻孔475.30~475.50 m,样品共计8件,包裹体成分测试后每件随机抽取2个碎片进行温度测试。C、O同位素测试样品有6件采集于菱岭矿床中脉状方解石脉,4件采集于矿床外围方解石脉。

样品镜下研究使用的是奥林巴斯偏光显微镜,全岩地球化学分析测试在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%,所用标样见王建其和柳小明(2016),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。

绿泥石化学成分的电子探针分析测试是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,使用仪器为日本JEOL JXA-8100型电子探针仪测定,工作条件为:加速电压15 kV,电流20 nA,束斑直径5 μm 。所使用的标样为国家标准局(GB/T 15617-95)的矿物标样,当分析结果的 $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}+\text{CaO})<0.5\%$ 时,视为合格数据,反之则认为绿泥石成分受到了混染,予以剔除。

流体包裹体测试分析包括包裹体温度测试和激光拉曼光谱测试,二者都是在西安地调中心实验测试中心完成。包裹体测温工作选用仪器为日本奥林巴斯偏光显微镜,英国LINKAM公司的THMSG600冷热台,仪器可测试-196~600 $^{\circ}\text{C}$ 范围温度,测试精度为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。单个流体包裹体成分分析使用英国Renishaw公司的inVia型激光拉曼探针,仪器编号为SX-51。实验室温度23 $^{\circ}\text{C}$,湿度45%, Ar^+ 激光波长514.5 nm,激光功率30 mW,扫描速度10秒/5次叠加,光谱仪狭缝为20 μm (赵如意等,2018)。

方解石碳氧同位素分析测试是在核工业北京地质研究院分析测试中心完成。测试前先将方解石研磨至200目,然后在真空系统中、25 $^{\circ}\text{C}$ 恒温条件下,利用磷酸法反应将所挑选较纯净方解石中的 CO_2 释放出来,再使用Finnigan公司的MAT-251型质谱仪对碳氧同位素的组成进行测试,测试精度0.2‰,采用标准为DZ/T0184.17-1997。分析结果采用PDB标准表示,氧同位素采用Friedman and O'Neil(1977)的平衡方程, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}=1.030\ 86\ \delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}+30.86$,转换成以SMOW标准表示。

4 钠交代岩地球化学特征

4.1 主量元素含量特征

各蚀变带钠交代似斑状花岗岩的主量元素特征及相关参数列于附表1,从中可以看出A~F带内的蚀变似斑状花岗岩的主量元素含量特征如下:(1) SiO_2 平均含量依次为61.61%、54.94%、55.69%、56.53%、63.72%和69.58%,似斑状花岗岩原岩平均值为68.44%;(2) TiO_2 平均含量依次为0.48%、0.47%、0.48%、0.99%、0.37%和0.36%,似斑状花岗岩原岩 TiO_2 平均含量为0.37%;(3) Al_2O_3 的平均含量依次为16.33%、14.89%、14.85%、15.77%、16.31%和13.89%,似斑状花岗岩原岩

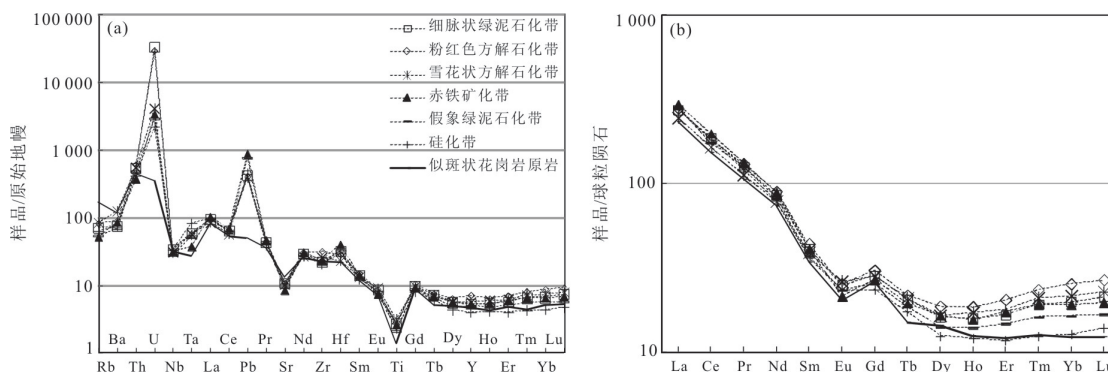


图 6 菱岭矿床钠交代似斑状花岗岩原始地幔标准化微量元素蛛网图(a)和球粒陨石标准化稀土元素配分曲线图(b)

Fig.6 The primitive mantle normalizes trace elements spider diagram (a) and chondrite-normalized rare earth elements diagram (b) of altered porphyritic granite in Jiling Uranium deposit

标准化数值据文献 Sun and McDonough(1989)

Al_2O_3 含量平均为 14.90%; (4) Fe_2O_3 的平均含量依次为 3.68%、3.82%、3.67%、7.14%、3.16% 和 2.55%, 似斑状花岗岩原岩 Fe_2O_3 含量平均值为 3.19%; (5) FeO 的平均含量 1.75% ($\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 平均值为 1.06)、1.84% ($\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 平均值为 1.03)、1.30% ($\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 平均值为 0.57)、1.13% ($\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 平均值为 0.23)、1.35% ($\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 平均值为 1.01) 和 1.12% ($\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 平均值为 0.99), 似斑状花岗岩原岩 FeO 含量平均值为 1.69% ($\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 平均值为 0.58); (6) MnO 的平均含量依次为 0.05%、0.11%、0.10%、0.06%、0.04% 和 0.04%, 似斑状花岗岩原岩 MnO 含量平均值为 0.06%; (7) MgO 的平均含量依次为 1.11%、1.42%、1.10%、1.16%、0.79% 和 0.57%, 似斑状花岗岩原岩 MgO 含量平均值为 0.63%; (8) CaO 的平均含量依次为 2.60%、7.10%、7.73%、3.38%、2.17% 和 1.78%, 似斑状花岗岩原岩 CaO 含量平均值为 1.64%; (9) Na_2O 的平均含量依次为 9.62%、8.07%、8.31%、8.30%、9.52% 和 7.33%, 似斑状花岗岩原岩 Na_2O 含量平均值为 5.31%; (10) K_2O 的平均含量依次为 0.19% (Na^+/K^+ 平均值为 92.17)、0.16% (Na^+/K^+ 平均值为 104.77)、0.16% (Na^+/K^+ 平均值为 100.08)、0.25% (Na^+/K^+ 平均值为 71.46)、0.18% (Na^+/K^+ 平均值为 89.78) 和 0.38% (Na^+/K^+ 平均值为 36.99), 似斑状花岗岩原岩 K_2O 含量平均值为 3.17% (Na^+/K^+ 平均值为 2.64); (11) P_2O_5 的平均含量依次为 0.30%、0.25%、0.29%、0.55%、0.18%、和 0.15%, 似斑状花岗岩原岩 P_2O_5 含量平均值为 0.12%。

4.2 微量元素含量特征

从附表 1 可以看出, 钠交代蚀变似斑状花岗岩中 A 带和 B 带的平均 U 含量都超过了工业铀矿化标准 ($\text{U} > 500 \times 10^{-6}$), Th 含量平均值分别为 45.5×10^{-6} 和 52.3×10^{-6} , 它们的 Th/U 平均值为 0.10 和 0.12. 在 C 带、D 带、E 带和 F 带内蚀变似斑状花岗岩中 U 的含量平均值逐渐降低, 依次为 89.8×10^{-6} 、 70.1×10^{-6} 、 60.6×10^{-6} 、 45.5×10^{-6} , 但是都高于似斑状花岗岩原岩中的含量 (平均为 7.3×10^{-6}). Th 的平均含量依次为 48.5×10^{-6} 、 31.3×10^{-6} 、 40.8×10^{-6} 、 35.4×10^{-6} , Th/U 的平均值分别为 0.67、0.47、0.89、1.16, 都小于似斑状花岗岩原岩中 Th/U 的平均值 (5.24). 在原始地幔标准化微量元素蛛网图上, 所有蚀变带的 U 和 Pb 均呈现高耸的尖峰, 而相对亏损 Rb、Ba、Nb、Ta、Sr、Ti, 总体形成了左端“峰谷并茂”、中间“深谷发育”、右端略微上翘的曲线特征 (图 6a). 与似斑状花岗岩原岩相比, 除 U、Pb 显著富集外, 还更为富集 Ta 和 Hf 和重稀土元素, 同时更为亏损 Rb、Ba、Sr 和 Ti 等元素。

4.3 稀土元素含量特征

钠交代蚀变似斑状花岗岩中 A~F 带的稀土元素 (附表 1) 总量 (ΣREE) 平均值依次为 255.89×10^{-6} 、 263.44×10^{-6} 、 241.59×10^{-6} 、 269.75×10^{-6} 、 246.60×10^{-6} 、 246.53×10^{-6} , 其中重稀土元素含量 (ΣHREE) 平均值依次为 15.81×10^{-6} 、 18.72×10^{-6} 、 21.65×10^{-6} 、 18.68×10^{-6} 、 18.44×10^{-6} 和 16.29×10^{-6} , δEu 的平均值依次为 0.74、0.68、0.77、0.66、0.76 和 0.80, 而似斑状花岗岩原岩的 ΣREE 、 ΣHREE 和 δEu 平均值分别 214.91×10^{-6} 、 15.815×10^{-6} 和 0.68. 在球粒陨石标准化稀土元素配分曲线

图上,似斑状花岗岩各蚀变带与似斑状花岗岩原岩的轻稀土元素均呈右倾模式,但都高于原岩曲线;重稀土元素都呈略微上翘的曲线特征,但原岩较平坦,其中粉红色方解石化带和雪花状方解石化带的重稀土曲线上翘最为强烈,细脉状绿泥石化带和赤铁矿化带次之,假象绿泥石化带再次,硅化带的重稀土曲线与原岩相当; δEu 的值高于原岩或与之相当,但曲线图上“钨谷”位置高于原岩(图6b)。

5 绿泥石温度计算

如前所述,菱岭铀矿床钠交代似斑状花岗岩中细脉状绿泥石发育于细脉状绿泥石化带中,片状(粒状)绿泥石多发育于粉红色方解石化带之中,而假象绿泥石化则发育于假象绿泥石化带中(图5)。3种不同产状绿泥石的电子探针化学组分含量和相关参数列于附表2。分析结果显示细脉状绿泥石组分含量高 Al_2O_3 (16.33%~20.24%) 和 MgO (15.16%~17.25%),中等 MnO (0.22%~0.38%),低 SiO_2 (25.78%~28.15%) 和 FeO (23.28%~25.08%);片状绿泥石组分含量高 FeO (25.67%~28.25%) 和 MnO (0.47%~0.83%),中等 SiO_2 (27.27%~28.28%) 和 Al_2O_3 (16.89%~19.81%),低 MgO (12.19%~13.79%);假象绿泥石组分含量高 SiO_2 (28.26%~29.74%),中等 FeO (25.82%~27.91%)、 MgO (12.69%~15.58%),低 Al_2O_3 (14.41%~15.37%为主)和 MnO (0.14%~0.27%为主)。使用基于14个氧原子数绿泥石蚀变温度计

计算公式 $t(^{\circ}\text{C}) = -61.9 + 321.98\text{Al}^{\text{IV}}$ (Cathelineau, 1988)进行计算,结果表明细脉状绿泥石的蚀变温度为274~320 $^{\circ}\text{C}$ (平均值295 $^{\circ}\text{C}$),片状绿泥石的蚀变温度为248~299 $^{\circ}\text{C}$ (平均值268 $^{\circ}\text{C}$),假象绿泥石的蚀变温度为152~238 $^{\circ}\text{C}$ (平均值205 $^{\circ}\text{C}$)(图7a)。

6 流体包裹体特征

菱岭钠交代型铀矿床淡粉红色方解石脉中所见的流体包裹体主要为富液相(I类)和富气相(II类)两相(L+V)包裹体(赵如意等,2018)。原生流体包裹体呈管状、长椭圆形、椭圆形和少量不规则状等零星、孤立或是平行于方解石节理成群出现,大小为3~10 μm ,长宽比为1:1~3:1。在气液两相包裹体中,气相部分呈圆形—椭圆形分布,约占总体积的15%~50%,个别可达70%左右。对其中的原生气液两相包裹体进行温度和激光拉曼光谱的测试和相关参数计算,结果列于附表3。粉红色方解石脉是菱岭钠交代型铀矿主成矿阶段方解石化,镜下特征显示其主要有早晚两期活动(图3c),早期流体温度较高为288~295 $^{\circ}\text{C}$ (图7a),盐度为2.99%~4.57% NaCl_{eqv} (图7b),密度为0.75~0.77 g/cm^3 (图8);晚期流体的温度较低为245~247 $^{\circ}\text{C}$,盐度为8.12%~8.82% NaCl_{eqv} ,密度为0.86 g/cm^3 左右。早期流体富含 CO_2 (1 388)、 H_2S (2 612)、 CH_4 (2 917)水溶液,晚期流体中除水外,还有 H_2 (4 155~4 160)、 CH_4 (2 917)、 N_2 (2 329)等气体。

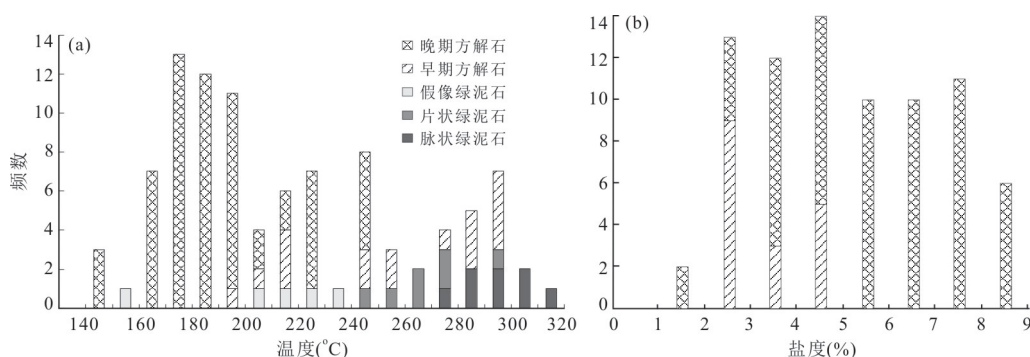
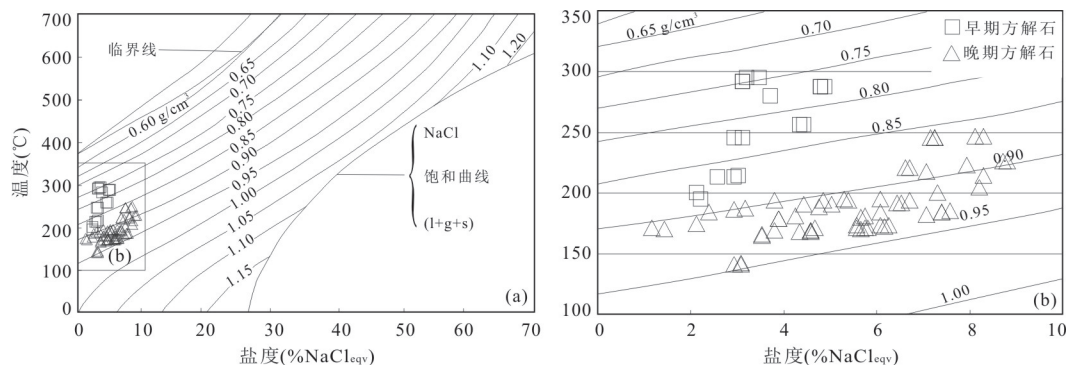


图7 菱岭铀矿床绿泥石蚀变温度和粉红色方解石脉流体包裹体均一温度直方图(a)与方解石流体包裹体盐度分布直方图(b)
Fig.7 The histograms of chlorite forming temperatures and fluid inclusions homogenization temperatures in calcite vein (a) and the fluid inclusions salinity histograms (b) of light pink calcite vein in Jiling uranium deposit

图 8 茆岭铀矿床淡粉红色方解石脉流体包裹体 NaCl-H₂O 系统 T - w - ρ 图解Fig. 8 The T - w - ρ diagram for NaCl-H₂O system of light pink calcite dyke in Jiling uranium deposit

7 同位素特征

茆岭钠交代型铀矿床和周边矿点的 C、O 测试结果和已有 C、H、O 同位素数据列于附表 4, 茆岭矿床和外围方解石脉 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值为 9.6‰ ~ 13.3‰ , 平均值为 10.8‰ , $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值为 -3.2‰ ~ -2.1‰ , 平均值为 -2.4‰ ; 茆岭矿床和周边矿点雪花状方解石 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 的值为 9.2‰ ~ 12.1‰ , 平均值为 10.7‰ , $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 的值为 -3.2‰ ~ -2.0‰ , 平均值为 -2.4‰ ; 周边矿点白色方解石脉 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 的值为 4.8‰ ~ 6.4‰ , 平均值为 5.6‰ , $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 的值为 -6.2‰ ~ -2.0‰ , 平均值为 -3.5‰ ; 茆岭似斑状花岗岩的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 的值为 8.6‰ ~ 10.4‰ , 平均值为 9.7‰ , 钠交代蚀变似斑状花岗岩和铀矿石的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 的值为 9.6‰ ~ 10.3‰ , 平均值为 10.0‰ . 似斑状花岗岩和钠交代蚀变似斑状花岗岩石英流体包裹体中 $\Delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$ 的值为 -72.5‰ ~ -70.7‰ , 粉红色方解石脉中 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 的值为 12.47‰ ~ 12.90‰ , $\Delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$ 的值为 -122.7‰ ~ -102.5‰ .

茆岭矿床周边似斑状花岗岩 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 值为 $0.708\ 07$ ~ $0.709\ 33$, ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)_i 的值为 $0.511\ 69$ ~ $0.511\ 72$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 的值为 -8.13 ~ -7.50 , t_{DM2} 的值为 $1\ 768$ ~ $1\ 815\ \text{Ma}$; 茆岭矿床铀矿石的 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 的值为 $0.709\ 61$ ~ $0.710\ 44$, ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)_i 的值为 $0.511\ 63$ ~ $0.511\ 73$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 的值为 -9.61 ~ -7.66 , t_{DM2} 的值为 $1\ 924$ ~ $1\ 766\ \text{Ma}$ (赵亚云等, 2016). 茆岭铀矿床似斑状花岗岩、钠交代似斑状花岗岩和外围龙首山岩群的铅同位素特征见附表 5. 从其中可以看出, 龙首山岩群 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值分别为 15.109 ~ 17.326 、 15.479 ~ 15.735 和 38.069 ~ 39.034 ; 似斑状花岗岩 (长石) $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值分别为 17.922 ~ 18.750 、

15.487 ~ 15.584 和 37.812 ~ 38.885 ; 钠交代蚀变似斑状花岗岩 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值分别为 24.828 ~ 11.530 、 15.921 ~ 20.690 和 38.532 ~ 39.931 ; 蚀变似斑状花岗岩中黄铁矿 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值分别为 40.280 ~ 93.121 、 16.797 ~ 19.827 和 37.887 ~ 40.425 .

8 讨论

8.1 成矿时代与成矿背景

龙首山钠交代型铀矿体主要赋存于钠交代蚀变似斑状花岗岩 ($458.3 \pm 2.3\ \text{Ma}$; 张甲民等, 2017) 之中, 牛角沟地段发育钾钠混合交代作用的中粗粒花岗岩的年龄为 $445\ \text{Ma}$, 而与铀矿化关系最为密切的钠长岩脉的年龄为 $443\ \text{Ma}$ (赵如意等, 2015). 最新得到的沥青铀矿成矿年龄为 444 ~ $442\ \text{Ma}$, 与钠长岩脉的形成年龄一致 (赵如意, 2016). 西北铀矿地质志记载的赵凤民所测沥青铀矿最早的成矿年龄为 440 ~ $430\ \text{Ma}$ 之间, 因此, 茆岭钠交代型铀矿的成矿年龄可推至 444 ~ $442\ \text{Ma}$ 左右, 具有较高的可信度.

Rodinia 超大陆裂解之后, 在柴达木地块与龙首山地块之间存在着广阔的大洋 (陶刚等, 2017), 其间存在多个“地体、岛弧”的增生带 (许志琴等, 2006). $540\ \text{Ma}$ 前后, 随着祁连洋壳从向南俯冲转为南北两向俯冲, 在河西走廊形成了弧后盆地 (许志琴等, 1994), 而龙首山地区的茆岭、河西堡等地产出了典型的弧背景闪长岩 (赵如意, 2016). 北祁连洋盆逐渐消亡, 柴达木地块、华北板块与北祁连洋中的岛弧强烈碰撞挤压, 形成祁连山—龙首山造山带. $485\ \text{Ma}$ 左右, 造山带的山根深入到地幔之中, 在重力和热能的双重作用下, 山根拆沉, 导致造山带上不同块体的伸展、滑塌 (吴才来等, 2010), 地幔上

涌形成辉绿岩(高宇等,2017),暗示着此时碰撞作用已经进入晚期.地幔上涌带来的能量和物质促使地壳深部大量物质重熔,形成了460 Ma左右的一系列后碰撞构造环境的花岗岩(张甲民等,2017;王楠等,2018),钠长岩脉(443 Ma;赵如意等,2015)的产出开启了茛岭钠交代型铀矿成矿作用的开端,即茛岭钠交代型铀矿形成于祁连山—龙首山早古生代碰撞造山的后碰撞构造背景.

8.2 化学组分迁移与热液组成

如前所述,茛岭铀矿床钠交代似斑状花岗岩中,自矿体中心向外依次为细脉状绿泥石化带(A)、粉红色方解石化带(B)、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).当热液流经围岩时,其通过与围岩发生溶蚀、沉淀、交换反应生成新的矿物组合,从而达到物理化学的平衡,其在宏观上主要表现为赋矿围岩的颜色、体积、成分的变化(Pirajno, 2009).围岩发生蚀变过程中,可以通过惰性组分来定量分析与成矿元素相关的各组分迁移变化特征,各组分归一化计算后将似斑状花岗岩原岩(C_i^0)和各蚀变带第*i*个组分的含量(C_i^A)及蚀变岩石相对似斑状花岗岩原岩的体积因子(*k*)代入蚀变岩石成分变化质量平衡方程计算出各组分相对惰性组分的迁移量(ΔC_i).在此选择 Al_2O_3 为惰性组分,对各蚀变带组分的迁移量进行计算,计算结果和参数列于附表6.

从体积因子(*k*,即等地球化学浓度线的斜率)看,除硅化带为0.95显示蚀变后体积变小(即密度增大)外,其余各蚀变带*k*值为1.10~1.13,都是体积增大(密度变小).从附表6和图9中可以看出:(1)各蚀变带均有迁入的组分: Fe_2O_3 、 CaO 、 Na_2O 、 P_2O_5 、REE、U、Th、V、Sc、Ti、Ni、Cr、Co、Ta;(2)各蚀变带均有迁出的组分: K_2O 、Rb、Sr、Mo;(3) SiO_2 和Nb的变化较为一致,都是在硅化带迁入而在其余各蚀变带强烈迁出, MgO 的含量却恰恰相反,除在硅化带迁出外,其余各蚀变带均有迁入;(4) FeO 、 MnO 、Ga、Zr、Ba除在粉红色方解石或雪花状方解石化带有少量迁入外,均以迁出为主.(5) TiO_2 、HREE、Th等组分迁入内部蚀变带的同时又在外部蚀变带相对迁出,而Hf除雪花状方解石化带为迁出组分外,各蚀变带均有一定量的迁入.

钠交代似斑状花岗岩中U的含量增加时,Th的含量略微增加,当Th/U的值 <0.1 时,才会形成较

好的铀矿化,而Th/U的值一般大于0.01(图10a).在图10b中,钠交代似斑状花岗岩的各蚀变带自矿体中心向外呈顺时针排列,即蚀变岩石经历了钠长石化和方解石化先强后弱过程,这个过程可以在U- CO_2 图上各蚀变带的呈逆时针排列得到印证(图10c). P_2O_5 、 TiO_2 的含量与U含量呈一定的正相关关系(图10d、10e).结合前述 Na^+/K^+ 值特点和流体包裹体激光拉曼光谱测试结果,茛岭钠交代型铀矿床的成矿热液中含有丰富的 U^{6+} 、 Na^+ 、 CO_3^{2-} 的同时含有一定量的 Ti^{4+} 、 Fe^{3+} 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 P^{5+} 和REE、Th、V、Sc、Ti、Ni、Cr、Co、Ta等组分,它对 SiO_2 、 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 、 K^+ 和Rb、Sr、Mo、Ga、Zr、Ba等组分有较强的溶蚀或交代能力.

8.3 成矿热液性质

流体包裹体的测试和计算结果表明,方解石脉早期热液温度较高为289~296℃,盐度为2.99%~4.57% $NaCl_{eqv}$,密度为0.75~0.77 g/cm³.晚期流体的温度较低为245~247℃,盐度为8.12%~8.82% $NaCl_{eqv}$,密度为0.86 g/cm³左右(图8).由于热液流体中的 H_2O 、 $NaCl$ 和 CO_2 含量比例决定了成矿流体的特征和性质,而流体的温度和盐度又是制约流体中金属元素丰度的相互独立因素,热液中的金属元素丰度一般会随着温度和盐度的升高而增大(刘丛强等,2001).因此,从两期流体存在明显的温度和盐度差异看,茛岭钠交代型铀矿方解石脉至少是由两期不同热液活动形成的.哪一期热液才与铀成矿关系更为密切呢?这要从铀矿化与蚀变矿物组合之间的关系来看.在钻孔编录和伽玛测井过程中,凡是细脉状绿泥石出现时铀矿化强度必然出现峰值,镜下也见有较多的沥青铀矿与细脉状绿泥石、方解石共生.在细脉状绿泥石化带和粉红色方解石化带中U的平均含量都达到了工业矿化品位($>0.05\%$),国内外多数钠交代型铀矿床的铀矿化都与绿泥石化紧密相关(Cuney *et al.*, 2012).所以,细脉状绿泥石的形成温度更能代表成矿流体的温度.

从前述绿泥石温度计的计算结果看,细脉状绿泥石的蚀变温度为274~320℃(平均值295℃),片状绿泥石的蚀变温度为248~299℃(平均值268℃),假象绿泥石的蚀变温度为152~238℃(平均值205℃).虽然细脉状绿泥石的温度与方解石脉中早期热液流体的温度有约20℃的差值,但在 $\delta^{13}C_{PDB}$ - $\delta^{18}O_{SMOW}$ 温度模型图(刘家军等,2004)上,粉红色方解石脉中流体包裹体都是起源于温度约

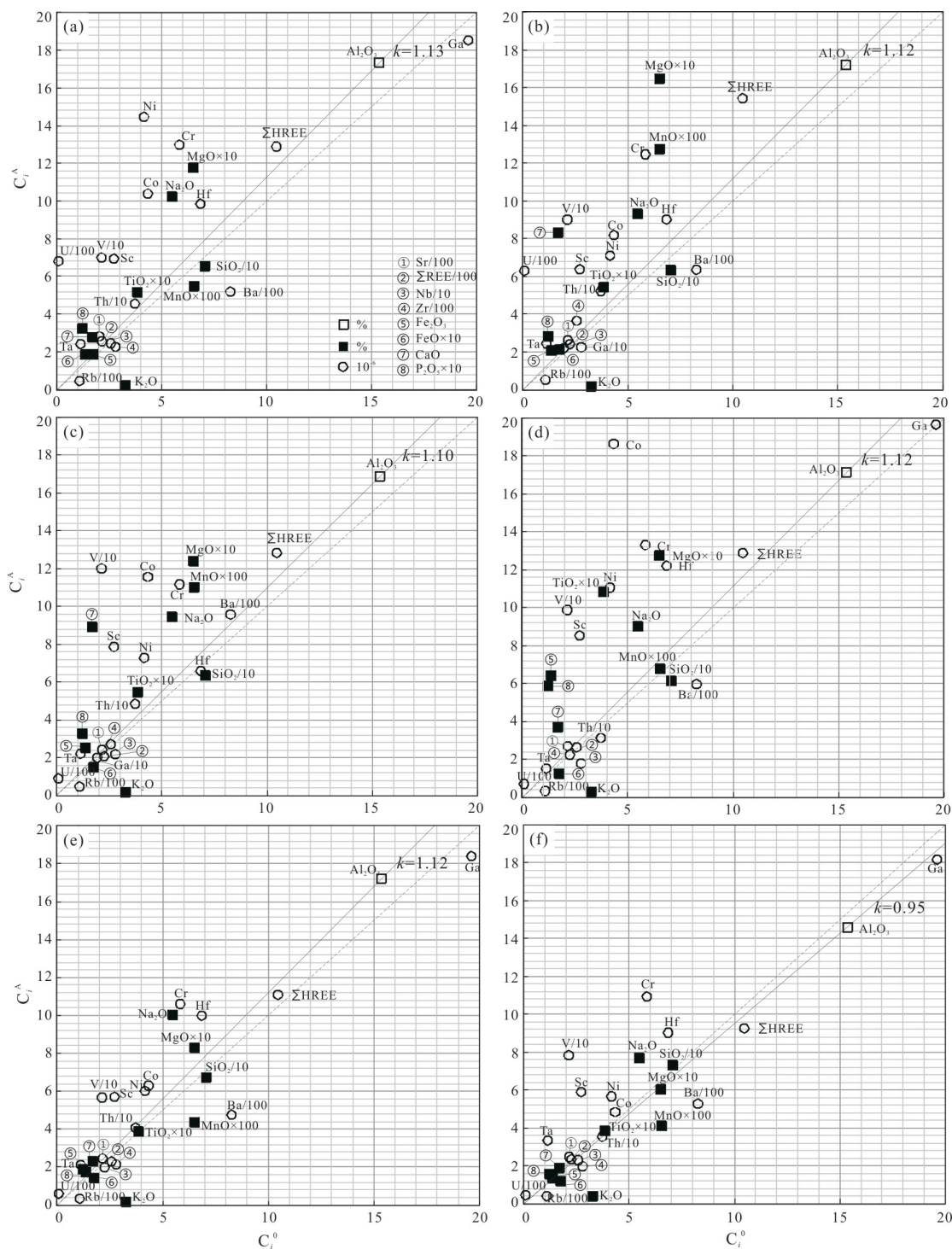


图9 茂岭铀矿床钠交代似斑状花岗岩中各蚀变带地球化学组分迁移 C_i^0 - C_i^A 图解

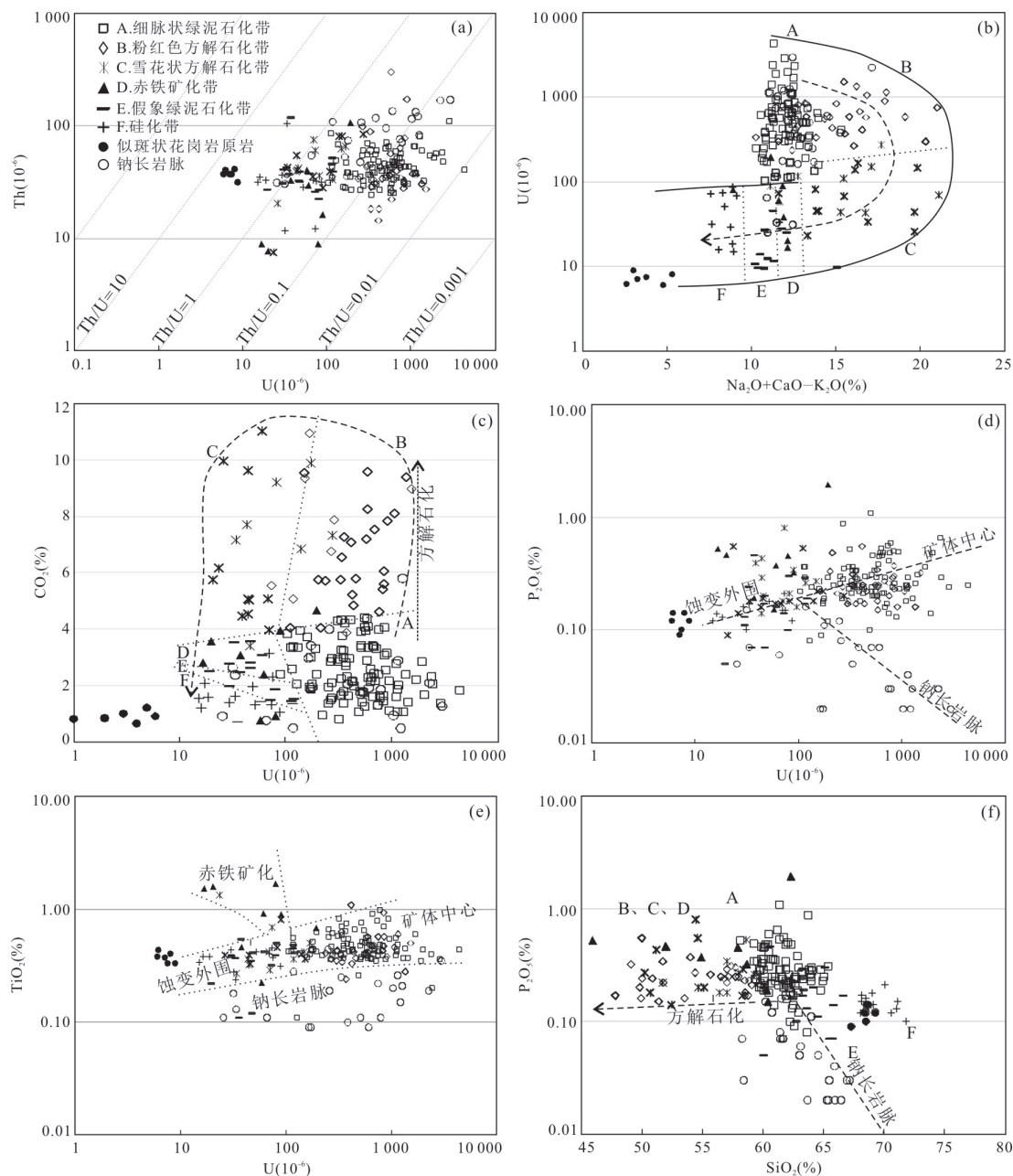
Fig.9 The C_i^0 - C_i^A diagrams of altered zones in Na-metasomatic porphyritic granite in Jiling uranium deposit

a. 细脉状绿泥石化带; b. 粉红色方解石化带; c. 雪花状方解石化带; d. 赤铁矿化带; e. 假象绿泥石化带; f. 硅化带

300 °C左右以 HCO_3^- 为主的深源热液(图11). 考虑到流体包裹体测试的方解石脉采集于矿床东北部9号勘探线, 而细脉状绿泥石的样品取自矿床西北部17~29号勘探线的更深部, 因此可以认为二者来自同样初始温度的热液. 总的来看, 茂

岭矿床的成矿流体是初始温度为295 °C (± 20 °C)左右, 盐度为2.99%~4.57% $NaCl_{eqv}$, 密度为0.75~0.77 g/cm³的热液.

以28个氧原子为标准计算的Fe-Si图解上可以看出, 茂岭钠交代型铀矿的细脉状绿泥石主要为密

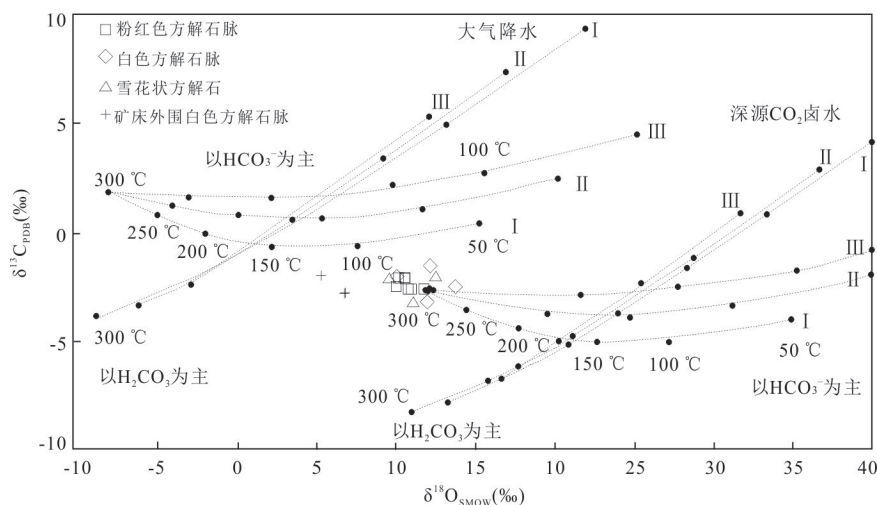
图 10 菱岭铀矿床 U 与多组分地球化学图解(a~e)及 SiO₂-P₂O₅关系图解(f)Fig.10 The diagrams of U with some components (a—e) and SiO₂-P₂O₅ (f) diagrams

绿泥石,片状绿泥石则显示密绿泥石向铁镁绿泥石过渡的趋势,而假象绿泥石则显示镁铁绿泥石向铁斜绿泥石过渡的特点(图 12a).绿泥石的形成过程是一个反映水—岩反应物理化学条件变化的过程,一般认为,镁绿泥石形成于略微氧化低 pH 值环境,而铁绿泥石更倾向于还原环境产出,同时自蚀变带中心向边部温度降低会使得绿泥石中铁含量升高(Inoue, 1995).以 28 个氧原子为标准计算的阳离子含量中,细脉状绿泥石的 Mg²⁺平均值为 5.23,片状(粒状)绿泥石的 Mg²⁺平均值为 4.13,

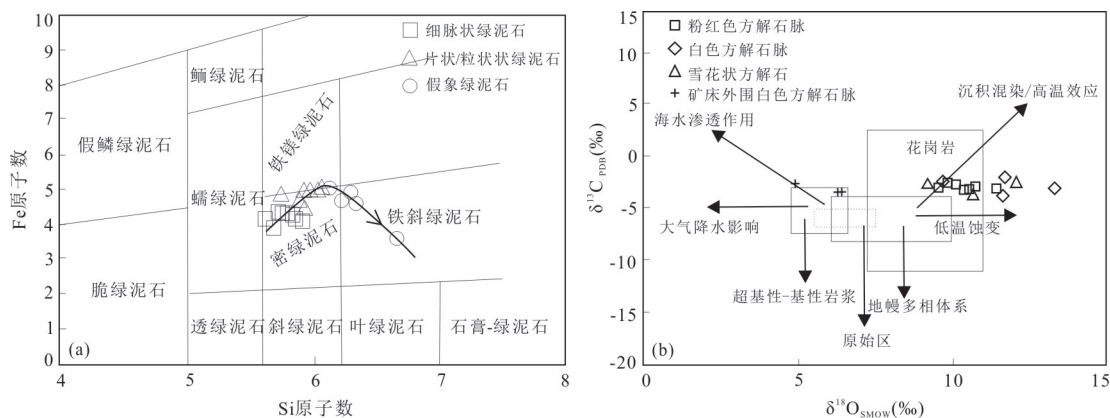
而假象绿泥石中 Mg²⁺平均值为 4.68,因此,形成细脉状绿泥石脉的含矿热液是略微氧化的相对低 pH 值流体,随着流体中 CO₃²⁻含量的降低,流体 pH 值升高, Eh 值和温度降低,流体趋于相对还原使得绿泥石中 Fe²⁺含量升高.

8.4 成矿热液和物质来源

菱岭钠交代型铀矿床的成矿作用开始于钠长岩脉产出的成矿早期阶段,钠长岩脉与铀成矿物质具有“同源、共体、等时”的特点(赵如意等, 2015).在图 10d、10f 中可以看出,钠长岩脉中的 P₂O₅ 的含量

图 11 菱岭矿床及外围不同产状方解石中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}-\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 温度模型Fig.11 The $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}-\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ temperature model of calcite in and around Jiling uranium deposit

据刘家军等 (2004)

图 12 菱岭铀矿床绿泥石 Si-Fe 分类图解 (a) 和不同产状方解石 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}-\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ (b)Fig.12 The Si-Fe classification diagram of chlorites (a) and $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}-\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ diagram (b) of calcites

底图据刘家军等 (2004)

与 U 和 SiO_2 的含量都呈明显的负相关, 具有高分异花岗岩的特点, 而其中 Th 含量与 U 含量呈现明显的正相关 (图 10a). 通常认为岩石中的 Th 相对稳定, 很少会被交代进入热液, 但岩浆演化晚期的碱性岩残浆中含有大量的 Th, 因此, 钠长岩脉起源于碱性岩浆演化晚期. 这与菱岭矿床外围绿草沟地段碱性岩中 Th 含量普遍较高, 并且发育钍矿化点和钍铀矿点的事实相一致.

菱岭矿床主成矿阶段形成的粉红色方解石脉的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值为 $9.6\text{‰} \sim 11.4\text{‰}$, 平均值为 10.3‰ , $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 的值为 $-2.6\text{‰} \sim -2.1\text{‰}$, 平均值为 -2.4‰ . 菱岭矿床和周边矿点雪花状方解石 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 的值为 $9.2\text{‰} \sim 12.1\text{‰}$, 平均值为 10.7‰ , $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 的值为 $-3.2\text{‰} \sim -2.0\text{‰}$, 平均值为 -2.4‰ (陈云杰等,

2014). Ohmoto (1986) 认为初生水来源于地幔去气作用, 从未参加过地表水循环, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 的值为 $(6 \pm 1)\text{‰}$; 不同化学成分火成岩氧同位素组成的系统趋势反映了造岩矿物 $\delta^{18}\text{O}$ 的规律性. SiO_2 含量增加, 火成岩中 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 倾向于增加. 从硅铝质岩浆去气产生的岩浆水的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值为 $6\text{‰} \sim 10\text{‰}$, 而花岗岩和伟晶岩具有更高且变化范围更大的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ ($7\text{‰} \sim 13\text{‰}$). 在 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}-\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 图上, 粉红色方解石脉和雪花状方解石的样点落入花岗岩区, 但向低温蚀变方向演化的趋势明显 (图 12b). 这种趋势暗示, 成矿热液起源于花岗岩浆水, 流经围岩时由于发生交代蚀变而受到一定程度的混染. 菱岭铀矿床矿石 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 的值为 $8.99\text{‰} \sim 11.21\text{‰}$, 而 $\delta^{18}\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$ 的值为 $-74.2\text{‰} \sim -72.4\text{‰}$, 也表明菱岭铀矿床的成矿

热液是起源于花岗岩质岩浆演化晚期,经与围岩交代、反应形成的再平衡混合岩浆水。

前述菱岭矿床周边似斑状花岗岩和矿床矿石的Sr、Nd同位素特征相似, t_{DM2} 年龄分别为1 815~1 768 Ma和1 924~1 766 Ma(赵亚云等,2016),显示了二者都是起源于古元古界地质体。似斑状花岗岩中长石的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 数据呈现出一条斜率为0.138 3的直线,相关系数为0.989 5,利用二次等时线公式计算得出铅的来源年龄为2 008 Ma(李占游,1987)。矿床周边古元古界、似斑状花岗岩、矿石和矿石中的黄铁矿的铅同位素比值相似, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 数据呈现出斜率为0.055的直线,相关性系数为0.995 4。似斑状花岗岩中有一颗核部年龄为 $2\,319\pm 27$ Ma的锆石,钠长岩脉中也有一颗核部为 $1\,904\pm 8$ Ma的锆石,这都表明成矿物质、成矿热液、钠长岩脉、似斑状花岗岩都是由古元古界龙首山岩群部分熔融后经演化而来。

8.5 流体运移与卸载机制

菱岭铀矿床和周边其他矿点一样发育成矿前钾钠混合交代作用,它是继岩浆侵位之后发生的高温热液蚀变,蚀变后的岩石中变得多孔、疏松、性脆,在晚期构造应力作用下易于形成构造破碎带。龙首山成矿带中段的大多数钠交代体在地表出露于马路沟断裂与次级断裂相交、平面上呈“入”字、剖面上呈“y”字形的夹持区,菱岭钠交代型铀矿床产出于马路沟断裂(F_{101} 和 F_{102})与 F_{106} 交汇部位向东约1.5 km处,夹持区内发育一组产状为 $250^\circ\angle 35^\circ$ 和 $220^\circ\angle 70^\circ$ 的裂隙,沿该组裂隙细脉状绿泥石化和粉红色方解石化强烈,是菱岭矿床热液运移和卸载的通道。钠交代蚀变似斑状花岗

岩的显微裂隙统计结果表明,U含量与显微裂隙发育程度相关,当显微裂隙中发育的方解石微脉和绿泥石微脉数达到2.22条/ 5 mm^2 时,通常会出现较富的铀矿体。因此,成矿前钾钠混合交代蚀变岩和断裂构造破碎带为后期钠交代热液的运移提供了良好的通道,同时也是上佳的赋矿空间。

流体混合、水岩反应和流体沸腾(相分离)是热液流体成矿物质卸载的主要机制(Pirajno, 2009)。菱岭铀矿床淡粉红色方解石脉中流体包裹体特征显示,早期成矿流体温度从 $279.80\sim 294.52^\circ\text{C}$ (平均 289°C)降低至 $245.27\sim 256.61^\circ\text{C}$ (平均 251°C),密度从 $0.75\sim 0.77\text{ g/cm}^3$ 升高至 $0.82\sim 0.83\text{ g/cm}^3$,但盐度变化不甚明显(图8b)。在流体密度与均一温度关系图上(图13a),早期流体温度、密度变化线出现了拐点,激光拉曼光谱测试结果显示转折点前后早期流体中最大的差异在于 CO_2 含量大大降低。这种热液流体组分、温度、密度呈跳跃式变化而盐度不甚变化的原因最可能是流体中气相组分的瞬间逸出——即流体沸腾。除围岩外,绿泥石的产出与热液的温度、盐度、氧逸度和pH值等息息相关(Inoue, 1995),在图13b上,菱岭钠铀矿床的片状绿泥石和假象绿泥石呈现出线性相关的特征,而细脉状绿泥石的产出则有其独立的区域。这表明细脉状绿泥石产出时的热液状态与片状绿泥石和假象绿泥石产出时的热液状态迥异,也验证了流体沸腾是早期热液的成矿卸载机制。

热液铀矿床普遍发育赤铁矿化(红化),菱岭铀矿床可见有赤铁矿与沥青铀矿共生。热液型铀矿床赤铁矿的成因一直存在热液成因(王玉生,1983;)、氧化还原成因(嵇少丞,1983)和辐射成因

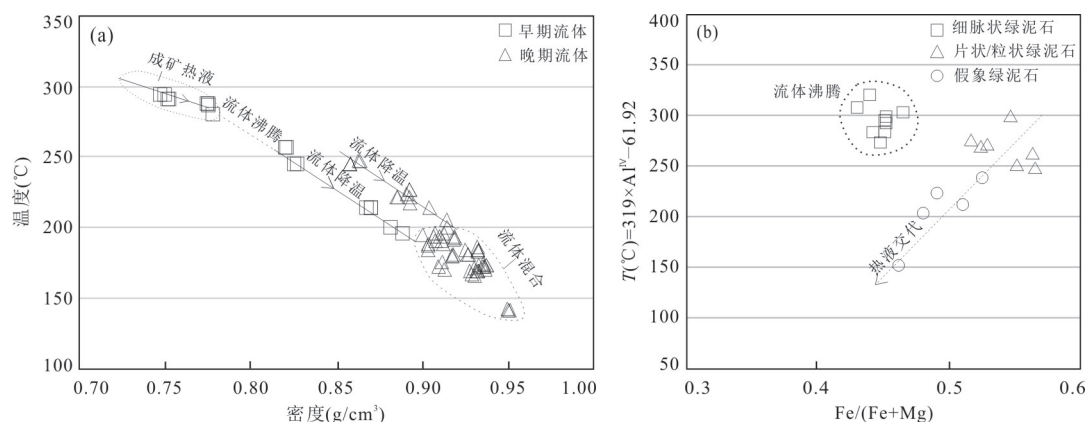


图13 菱岭铀矿床淡粉红色方解石脉流体温度和密度演化图解(a)和绿泥石 T - $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ 图解(b)

Fig.13 The temperature-salinity diagram (a) of light pink calcite vein and T - $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ diagram (b) of chlorites in Jiling uranium deposit

(Ткачева, 1985;)等多种说法.但茈岭铀矿床中可见赤铁矿呈粉尘状分布于长石表面或是与方解石共生形成韵律和环带,大量浸染状、云雾状赤铁矿的产出具有热液成因的特点.因此,赤铁矿的成因为pH和Eh值变化引起的氧化还原作用较为合理.沸腾后流体的pH和Eh值发生较大变化引发氧化还原条件的改变,必然会促进成矿物质的进一步卸载.

主成矿阶段粉红色方解石脉中早期流体温度降低至195.0~214.4℃(平均207℃),盐度也降低到了2.12% NaCl_{eqv}左右,密度则升高到0.87~0.89 g/cm³.晚期流体的温度从245~247℃(平均246℃)降低至206~227℃(平均220℃),盐度也从8.12%~8.82% NaCl_{eqv},略微降低到了7.06%~8.12% NaCl_{eqv}左右,密度从0.86 g/cm³升高至0.91 g/cm³,即其先是经历了温度降低、密度升高,但盐度降低不多的冷却过程(图13a).而后从200℃左右降低至165~175℃过程中,盐度从7.06%~8.12% NaCl_{eqv}快速降低至1.15%~2.12% NaCl_{eqv},密度升高为0.91~0.95 g/cm³,在图13a中不再遵守

温度和密度的变化趋势线,而是呈现出一个区域.这暗示此时有大量的他源低盐度(1%~2% NaCl_{eqv})热液加入并与之混合,它源热液的温度与围岩温度基本相似,为165~175℃左右.茈岭矿床外围白色方解石脉中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 的值为-2.80‰~-2.00‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 的值为4.9‰~6.4‰(图12b),显示了晚期成矿流体中有大气降水加入的特点,流体混合作用是晚期流体性质改变的主要诱因.

8.6 成矿模式

综合龙首山成矿带的地质背景、区域地质演化及茈岭钠交代型铀矿床的成矿时代、热液和物质来源、热液组分和性质及热液运移和卸载机制,总结茈岭矿床成矿模式如下(图14):(1)初始铀源形成阶段:在古老阿拉善陆块南缘,龙首山陆核古元古代裂谷中沉积了一套双峰式火山岩夹碎屑岩建造,经强烈变质变形后的龙首山岩群可划分为麒麟沟组、白家咀子组和塔马子沟组,平均U含量分别为 5.5×10^{-6} 、 3.67×10^{-6} 、 3.23×10^{-6} ,为之后龙首山成矿带铀成矿作用提供了初始铀源.(2)成矿物质初步富集阶段:古元古代末期,龙首山裂谷闭合,区域上

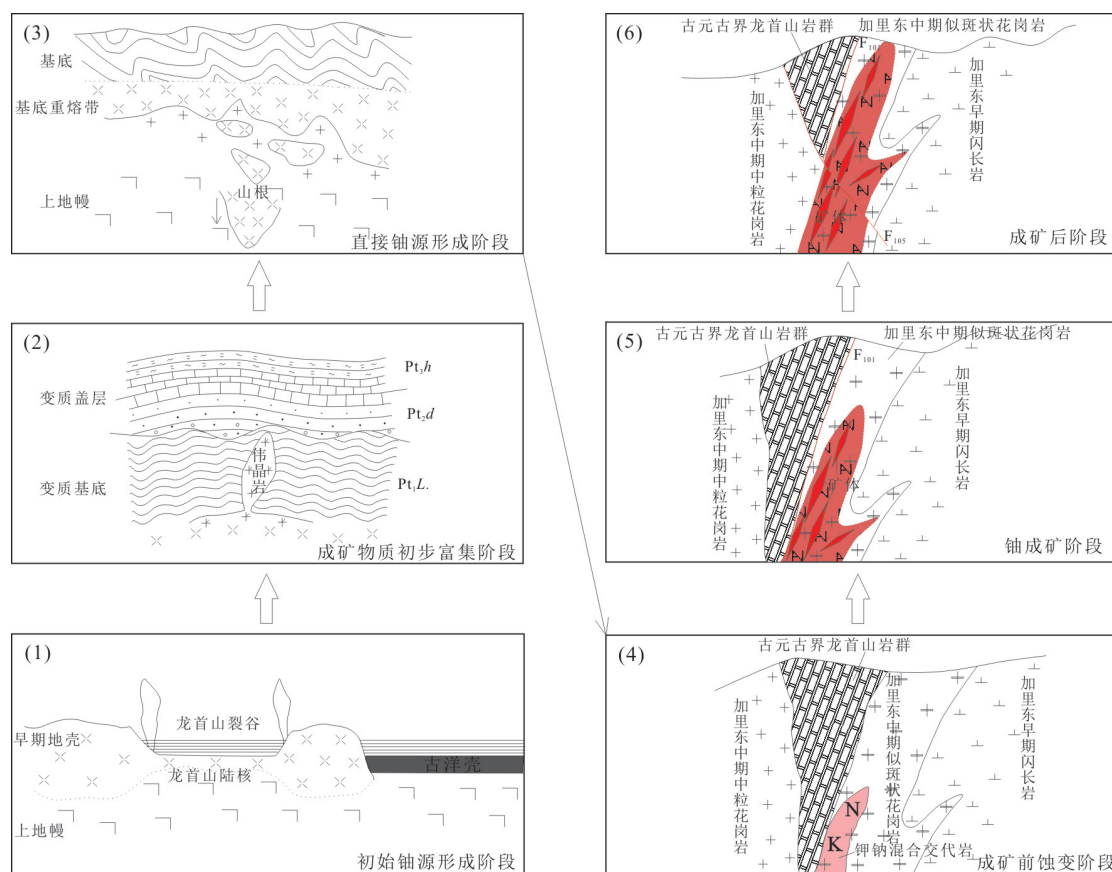


图14 茈岭钠交代型铀矿床成矿模式

Fig.14 The genetic model of Jiling Na-metasomatic uranium deposit

发育强烈的变质变形,成熟度较高的陆壳物质重熔结晶成伟晶状花岗岩,结晶晚期残浆中的铀以晶质铀矿的形式结晶出来富集于高硅富黑云母部位形成岩浆型铀矿床,完成了成矿物质初步富集。(3)直接铀源形成阶段:中、新元古界沉积之后,超大陆裂解,古祁连山从单一向南方柴达木地块俯冲转换为向柴达木地块和龙首山地块同时俯冲的南北双向俯冲(许志琴等,1994)。古祁连山闭合后,龙首山—祁连山早古生代造山开始,在后碰撞造山环境下,山根深入到地幔之中。在重力和热量的双重作用下,山根拆沉,导致造山带上不同块体的伸展、滑塌(吴才来等,2010),地幔上涌(辉绿岩脉年龄485 Ma;高宇等,2017)带来大量热能,加之应力相对松弛,下地壳物质熔融形成大规模花岗岩浆(458.3 Ma;张甲民等,2017),为芨岭矿床提供了直接铀源。(4)成矿前蚀变阶段:岩浆结晶晚期,岩体上部基本结晶完毕,下部 K^+ 、 Na^+ 以及挥发分和流体残存于矿物颗粒之间,形成粒间富气热液流体,向上运移过程中对流经岩体交代,产生了成矿前的钾钠混合交代作用,钾钠混合交代作用对花岗岩中的U起到了活化作用。在构造应力的作用下,沿岩石应力薄弱部位发育马路沟断裂(F_{101})及其次级断裂,钾钠混合交代岩由于其疏松、多孔、性脆而更易形成构造碎裂岩。(5)铀成矿阶段:深部岩浆房演化出碱性岩、钠长岩脉(442 Ma)和富钠富挥发分含铀热液,流体沿断裂和钾钠混合交代岩运移,在萃取吸收流经围岩中的U之后,形成了芨岭钠交代型铀矿床的成矿热液。当富含挥发分的含铀热液运移至压力骤然降低部位时,流体突然沸腾,大量 CO_2 气体瞬间逸出,热液中的碳酸铀酰络合物($[UO_2(CO_3)_2]^{4-}$)分解沉淀成矿,一部分 U^{6+} 由于流体沸腾导致的Eh变化被还原为 U^{4+} 从热液中沉淀出来,同时围岩产生钠长石化、绿泥石化、方解石化和赤铁矿化。(6)成矿后阶段:在后续地质演化中,可能有少量晚期成矿作用的叠加,并被晚期破断断裂(F_{105})截切。新构造运动的抬升剥蚀作用,使得在地壳浅部形成的钠交代型铀矿上升至地表附近。

9 结论

(1)芨岭矿床成矿作用起始于444~442 Ma,形成于祁连山—龙首山早古生代碰撞造山的后碰撞环境。钠交代蚀变似斑状花岗岩是芨岭铀矿床的主要赋矿围岩,经历了成矿前的钾钠混合交代阶段、

成矿早期的钠交代阶段、主成矿期的钠交代阶段、后成矿期的钠交代阶段蚀变和成矿后阶段这5个阶段,自矿体中心向外可以划分为细脉状绿泥石化带、粉红色方解石化带、雪花状方解石化带、赤铁矿化带、假象绿泥石化带和硅化带这6个蚀变带。

(2)成矿热液是起源于花岗岩质岩浆演化晚期,经与围岩交代、反应形成的再平衡混合岩浆水。它是略微氧化相对低pH值,温度为295℃($\pm 20^\circ C$)左右,盐度为2.99%~4.57% $NaCl_{eqv}$,密度为0.75~0.77 g/cm³的流体,其中含有丰富的 U^{6+} 、 Na^+ 、 CO_3^{2-} 的同时还含有一定量的 Ti^{4+} 、 Fe^{3+} 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 P^{5+} 和REE、Th、V、Sc、Ti、Ni、Cr、Co、Ta等组分,它对 SiO_2 、 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 、 K^+ 和Rb、Sr、Mo、Ga、Zr、Ba等组分有较强的溶蚀或交代能力。

(3)钾钠混合交代岩和构造碎裂岩是钠交代热液成矿的运移通道和容矿空间,流体沸腾是成矿物质的主要卸载机制,pH、Eh值的变化促进了成矿物质的进一步卸载,晚期有大气降水的混合作用。

(4)钠交代成矿过程中有 Fe_2O_3 、CaO、 Na_2O 、 P_2O_5 、LREE、U、Th、V、Sc、Ti、Ni、Cr、Co、Ta等组分的迁入和 K_2O 、Rb、Sr、Mo等组分的迁出及 SiO_2 、Nb、FeO、MnO、Ga、Zr、Ba、 TiO_2 、HREE、Th等组分的交换。

致谢:项目开展过程中得到了权建平总工、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;编辑老师认真细致地雕琢让本文瑕疵更少。在此,表示衷心的感谢!

附表见本刊官网(<http://www.earth-science.net>)。

References

- Chen, Y. J., Fu, C. M., Wang, G., et al., 2014. Carbon and Oxygen Isotopes in Granite-Type Hydrothermal Uranium Deposits: A Case of the Jiling Uranium Ore Field in Longshou Mountain, Gansu Province. *Geology and Exploration*, 50(4):641—648 (in Chinese with English abstract).
- 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: 82—106. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2011.09.007>
- Franz, J. D., 2009. Uranium Deposits of the World. Springer, Berlin.
- Friedman, I., O'Neil, J. R., 1977. Compilation of Stable Isotope Fractionation Factors of Geochemical Interest. U.

- S. Geological Survey Professional Paper, Reston.
- Gao, Y., Zhao, R. Y., Wang, G., et al., 2017. Geochemical Characteristics and Geological Implication of the Jiling Diabase in Gansu Province. *Geology and Resources*, 26 (5):505—514 (in Chinese with English abstract).
- Han, J., Xia, Y. L., 2009. Discussion on Zircon LA-ICP-MS Ages of Lianshanguan-Gaojiagou Granites and Its Significance. *Uranium Geology*, 25(4): 214—221 (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 Earth Science and Environmental*, 25(4):32—39 (in Chinese with English abstract).
- Inoue, A., 1995. Formation of Clay Minerals in Hydrothermal Environments. In: Velde, B., ed., *Origin and Mineralogy of Clays*. Springer, Berlin, 268—330.
- Jerden, J. L., 2001. Origin of Uranium Mineralisation at Coles Hill Virginia (USA) and Its Natural Attenuation within an Oxidized Rock - Soil - Ground Water System (Dissertation). Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg.
- Ji, S. C., 1983. The Genetic Mechanism of Reddening. *Uranium Geology*, (3): 22—26 (in Chinese).
- Li, X. H., Su, L., Song, B., et al., 2004. SHRIMP U-Pb Zircon Age of the Jinchuan Ultramafic Intrusion and Its Geological Significance. *Chinese Science Bulletin*, 49(4): 401—402 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. Y., 1987. Rare Earth Element Geochemistry of Granite-Type Hydrothermal Uranium Deposits with Alkaline Metasomatism in Northwest China. *Uranium Geology*, 3(3):175—183(in Chinese).
- Liu, C. Q., Huang, Z. L., Li, H. P., et al., 2001 The Geo-fluid in the Mantle and Its Role in Ore Forming Processes. *Earth Science Frontiers*, 8(4):231—243 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. J., He, M. Q., Li, Z. M., et al., 2004. Oxygen and Carbon Isotopic Geochemistry of Baiyangping Silver - Copper Polymetallic Ore Concentration Area in Lanping Basin of Yunnan Province and Its Significance. *Mineral Deposits*, 23(1):1—10 (in Chinese with English abstract).
- Ohmoto, H., 1986. Stable Isotope Geochemistry of Ore Deposits. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 16(6): 491—559.
- Pirajno, F., 2009. *Hydrothermal Processes and Mineral Systems*. Springer, Berlin.
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 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 Sement of the Qilian Terrane: Evidences from Geochronology, Geochemistry, and Hf Isotopes. *Earth Science*, 42(12): 2258—2275 (in Chinese with English abstract).
- Ткачева, Т. В., 1985. The Discussion on the Radioactive Genetic Hypothesis of Hematitization nearby Ore in Hydrothermal Uranium Deposit. Translated by Mo, Y. Z.. *World Nuclear Geoscience*, (1):41—45 (in Chinese).
- Vels, B., Fritsche, R., 1988. Sodium Metasomatism in the Kitongo Uranium Occurrence near Poli, Cameroon. *Uranium*, 4:365—383.
- Wang, J. Q., Liu, X. M., 2016. Proficiency Testing of the XRF Method for Measuring 10 Major Elements in Different Rock Types. *Rock and Mineral Analysis*, 35(2): 145—151 (in Chinese with English abstract).
- Wang, N., Wu, C. L., 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).
- Wang, Y. S., 1983. The Categories and Geological Significances of Reddening. *Uranium Geology*, (2):1—8 (in Chinese).
- Wilde, A., 2013. Towards a Model for Albitite-Type Uranium. *Minerals*, 3(1): 36—48. <https://doi.org/10.3390/min3010036>
- Wu, C. L., Xu, X. Y., Gao, Q. M., et al., 2010. Early Palaeozoic Ggranitoid Magmatism and Tectonic Evolution in North Qilian, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (4):1027—1044 (in Chinese with English abstract).
- 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 Geologica Sinica*, 87(4): 577—590 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. Q., Xu, H. F., Zhang, J. X., et al., 1994. The Zhoulangnanshan Caledonian Subductive Complex in the Northern Qilian Mountain and Its Dynamics. *Acta Geologica Sinica*, 68(1): 1—15 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. Q., Yang, J. S., Li, H. B., et al., 2006. The Qinghai-Tibet Plateau and Continental Dynamics: A Review on Terrain Tectonics, Collisional Orogenesis, and Processes and Mechanisms for the Rise of the Plateau. *Geology in China*, 33(2):221—238 (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 Mountains, 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 (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 Ore Deposit in the Jiling Area of Longshou Mountain, Gansu Province. *Geology and Prospecting*, 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 Their Relationship with Uranium Mineralization 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., 2018. A Study of Mineralizing Hydrothermal Fluid Characteristics of the Jiling Uranium Deposit in the Longshou Mountain, Gansu Province. *Acta Geoscientica 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).
- 附中文参考文献**
- 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——以甘肃省龙首山茱岭矿区为例. *地质与勘探*, 50(4): 641—648.
- 高宇, 赵如意, 王刚, 等, 2017. 甘肃龙首山茱岭辉绿岩地球化学特征及其地质意义. *地质与资源*, 26(5): 505—514.
- 韩军, 夏毓亮, 2009. 连山关—高家沟花岗岩体LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄及其地质意义. *铀矿地质*, 25(4): 214—221.
- 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(4): 32—39.
- 嵇少丞, 1983. 有关红化蚀变的成因机制问题. *铀矿地质*, (3): 22—26.
- 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.
- 李占游, 1987. 西北某花岗岩型碱交代热液铀矿床稀土元素地球化学. *铀矿地质*, 3(3): 175—183.
- 刘丛强, 黄智龙, 李和平, 等, 2001. 地幔流体及其成矿作用. *地质前缘*, 8(4): 231—243.
- 刘家军, 何明勤, 李志明, 等, 2004. 云南白秧坪银铜多金属矿集区碳氧同位素组成及其意义. *矿床地质*, 23(1): 1—10.
- Ткачева, Т.В. 1985. 论热液铀矿床中近矿赤铁矿化带形成的放射性成因假说. 莫耀支, 译. *世界核地质科学*, (1): 41—45.
- 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.
- 王建其, 柳小明, 2016. X射线荧光光谱法分析不同类型岩石中10种主量元素的测试能力验证. *岩矿测试*, 35(2): 145—151.
- 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.
- 王玉生, 1983. 红化蚀变的类型及其地质意义. *铀矿地质*, (2): 1—8.
- 吴才来, 徐学义, 高前明, 等, 2010. 北祁连早古生代花岗质岩浆作用及构造演化. *岩石学报*, 26(04): 1027—1044.
- 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.
- 许志琴, 徐惠芬, 张建新, 等, 1994. 北祁连走廊南山加里东俯冲杂岩增生地质体及其动力学. *地质学报*, 68(1): 1—15.
- 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等, 2006. 青藏高原与大陆动力学——地体拼合、碰撞造山及高原隆升的深部驱动力. *中国地质*, 33(2): 221—238.
- 张甲民, 赵如意, 王刚, 等, 2017. 甘肃茱岭矿区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.
- 赵如意, 2016. 甘肃省龙首山成矿带茱岭钠交代型铀矿地质特征与成矿作用研究(博士学位论文). 西安: 长安大学.
- 赵如意, 陈云杰, 武彬, 等, 2013. 甘肃龙首山茱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.
- 赵如意, 王博, 陈毓川, 等, 2018. 甘肃省龙首山茱岭铀矿床成矿热液流体特征研究. *地球学报*, 39(3): 282—294.
- 赵亚云, 张树明, 汤琳, 等, 2016. 龙首山中段茱岭花岗岩体Sr-Nd-Pb同位素特征及意义. *地球科学*, 41(6): 1016—1030.