

甘肃省龙首山茱岭铀矿床成矿热液流体特征研究

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

1) 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;

2) 核工业二〇三研究所, 陕西咸阳 712000; 3) 中国地质科学院, 北京 100037

摘要: 茱岭铀矿是中国北方最典型的钠交代型铀矿床之一, 文章通过对茱岭矿床 ZKJ9-4 钻孔深部所见含矿蚀变闪长岩、近矿蚀变闪长岩、远矿蚀变闪长岩、闪长岩原岩地球化学特征和组分迁移计算及矿体中心部位的淡粉红色方解石脉流体包裹体特征、均一温度、盐度和激光拉曼光谱研究, 认为茱岭钠交代型铀矿床的成矿流体含有大量碳酸铀酰络合物 $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2]^{2-}$ 和 $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2]^{4-}$ 的同时还含有丰富的 SiO_2 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 、 $\sum\text{REE}$ 、U、Th、Ga、Sr、Zr、Ba、Rb、Nb、Mo、Cd、Sn、Hf、Ti、Ta、 CO_2 、 H_2S 和 CH_4 等组分, 成矿流体具有较强的还原性, 并对 MnO、 K_2O 、Cr 和 Co 具有较强的交代溶蚀作用。成矿流体是起源于岩浆演化晚期的再平衡岩浆水, 热液温度为 $(300\pm 20)^\circ\text{C}$, 盐度为 2.99 wt%~4.57 wt% NaCl, 密度为 0.75~0.77 g/cm³。流体沸腾是茱岭钠交代型铀矿成矿物质的早期卸载机制, 晚期成矿流体中加入了大量的大气降水, 流体混合作用进一步促进了成矿物质的卸载。

关键词: 龙首山; 茱岭铀矿床; 组分迁移; 方解石脉; 流体包裹体; 成矿机制

中图分类号: P619.14; P595 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2018.041701

A Study of Mineralizing Hydrothermal Fluid Characteristics of the Jiling Uranium Deposit in the Longshou Mountain, Gansu Province

ZHAO Ru-yi^{1,2)}, WANG Bo³⁾, CHEN Yu-chuan¹⁾, WANG Gang²⁾,
CHEN Yun-jie²⁾, NIE Li²⁾, LI Tao²⁾

1) MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources,
Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

2) No. 203 Research Institute of Nuclear Industry, Xianyang, Shannxi 712000;

3) Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037

Abstract: The Jiling uranium deposit is the most typical Na-metasomatic uranium deposit in North China. In this paper, the authors studied the geochemical characteristics of ore-bearing altered diorite, near-ore altered diorite, distal altered diorite and diorite, calculated component migration, fluid inclusions characteristics, homogenization temperatures, salinity, and made Raman analysis of light pink calcite vein in drill hole ZKJ9-4. The results show that the hydrothermal fluid is rebalance water from evolved magma, which has rich U in the forms of $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2]^{2-}$ and $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2]^{4-}$, together with abundant SiO_2 , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} , $\sum\text{REE}$, U, Th, Ga, Sr, Zr, Ba, Rb, Nb, Mo, Cd, Sn, Hf, Ti, Ta, CO_2 , H_2S , CH_4 , and some other components. The temperature of ore-forming fluid is $(300\pm 20)^\circ\text{C}$, the salinity is 2.99 wt%~4.57 wt% NaCl, and the density is 0.75~0.77 g/cm³. Fluid boiling was the ore-forming mechanism of early period hydrothermal fluid, while late period fluid was mixed with meteoric water, and the fluid mixing further promoted U unloading.

Key words: Longshou Mountain; Jiling uranium deposit; component migration; calcite vein; fluid inclusion; mineralizing mechanism

本文由中国核工业地质局项目(编号: 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(编号: DD20160346)和中国地质调查局地质调查项目(编号: 12120114014901)联合资助。

收稿日期: 2018-01-20; 改回日期: 2018-04-02; 网络首发日期: 2018-04-25。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 赵如意, 男, 1982年生。在站博士后。主要从事岩浆岩与成矿关系研究。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号。E-mail: 93236749@qq.com。

菱岭铀矿床是中国西北部祁连山—龙首山铀成矿带重要的铀矿床,也是中国北方最典型的钠交代型铀矿床之一(杜乐天,1996)。菱岭、新水井、扁都口等铀矿床及近百个铀矿点、矿化异常点带都是古生代钠交代型铀矿化作用的产物,与巴西东北部的 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)等都是古生代钠交代型热液铀成矿作用的产物(Cuney et al., 2012)。

菱岭钠交代型铀矿床发现于 20 世纪 60 年代初期,为中国核工业早期发展做出了贡献,该矿床的地质特征和成因研究也一直是热液铀成矿研究的热点(李占游,1987; 杜乐天,1996, 2001, 2009; 赵如意等, 2013, 2015; 陈云杰等, 2014; 钟军等, 2016; 张甲民等, 2017)。野外勘查和诸多研究成果一致表明,粉红色方解石化和细脉状绿泥石化是菱岭铀矿床蚀变中心部位发育的特征性蚀变,指示了较好铀矿化所在。前人研究表明(张祖还, 1984; Chen et al., 1992),在热液中与 UO_2^{2+} 配位的阴离子, ΣCO_2 的含量远高于 F^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等离子, U 主要以碳酸铀酰络合物离子 $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2]^{2-}$ 和 $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$ 的形式迁移,所以大多数铀矿床的成矿流体具有富含 CO_2 的特征(Poty et al., 1988),而方解石化也是热液铀矿床最常见的蚀变之一。方解石生长过程中所圈闭的流体保存了其形成时地质环境中的压力、温度、pH、盐度、深度等方面的信息(卢焕章等, 2004; 周云等, 2012)。因此,对菱岭矿床粉红色方解石脉中流体包裹体的特征和其两侧的蚀变围岩地球化学特征研究,能够最直接约束钠交代型铀矿的成矿流体特征,反演地球化学组分的迁移和富集特征,进而探讨其成矿机制。

1 区域地质背景

菱岭矿床位于龙首山成矿带中部,其南侧为华北板块西南陆缘海形成的河西走廊(图 1a),北侧是潮水盆地(汤中立和白云来, 1999)。古元古界龙首山岩群是区内出露最老的地层,经强烈的变质变形后,其片麻岩、片岩、大理岩中发育大量 A 型褶皱、无根褶皱及顺层韧性剪切带和构造透镜体(胡能高, 2003)。中元古界墩子沟群以角度不整合于龙首山岩群之上,常见含炭硅质板岩、变长石石英砂岩、白云岩等(许安东和姜修道, 2003)。新元古界韩母山群平行不整合或微角度不整合于墩子沟群之上,岩性为砾状白云岩、含砾千枚岩和含炭绢云千枚岩、绢云石英千枚岩等(校培喜等, 2011)。区域上岩浆作用十分发育,主要有中条期白岗岩(辛存林等, 2013)、

晋宁期镁铁—超镁铁岩(李献华等, 2004)、加里东期闪长岩(魏俏巧等, 2013)、花岗岩(赵亚云等, 2016)、碱性岩(张树明等, 2013)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,晚期产出的断裂以北东向和近南北向为主(图 1b)。

2 矿床地质

菱岭钠交代型铀矿床定位于菱岭复式岩体南带中段(图 1b, 图 2A),含矿岩石主要有蚀变似斑状花岗岩、蚀变闪长岩和钠长岩脉。矿床中部发育北西向马路沟断裂,是菱岭矿床的控矿断裂,所有矿体均呈透镜状、长透镜状、脉状、不规则状产出马路沟断裂的下盘。马路沟断裂,产状为 $220^\circ\sim 230^\circ\angle 60^\circ\sim 70^\circ$ 。断层上盘为古元古界龙首山岩群的大理岩,下盘似斑状花岗岩(458.3 ± 2.3 Ma, 张甲民等, 2017)超动侵入至加里东早期闪长岩(540 Ma, 赵如意, 2016)之中,后又被中粗粒花岗岩(445 Ma)和钠长岩脉(442.9 ± 5.7 Ma, 赵如意等, 2015)侵入。菱岭矿床所有矿体均赋存于钠交代体之中,但并非所有的蚀变体都发育有品位较高的铀矿化,钠交代体呈长透镜状、透镜状、囊状分布,总体呈 $55^\circ\sim 65^\circ$ 的倾角向 $310^\circ\sim 320^\circ$ 方向侧伏。马路沟断裂南侧,发育一条产状为 $30^\circ\sim 35^\circ\angle 70^\circ\sim 75^\circ$ 的晚期断层,野外调研和综合研究表明 F105 是右行走滑逆断层,将原矿体和蚀变带向北西向错动约 80 m,下降约 40 m。钻探查证的结果显示, F105 下盘存在厚大矿体,矿床中西部的新空间、新深度尚有一定的找矿空间有待拓展。进一步工作有望将前人控制约 150 m 长、10~45 m 宽的最大矿体(Dahlkamp, 2009; Zhou, 2000)增加一倍以上的长度。《世界铀矿床》(Dahlkamp, 2009)引用 IAEA 报告《中国铀成矿省》(Zhou, 2000)中介绍菱岭铀矿床的矿石品位为 0.03%~0.1%,资源量为 500~1 500 t,最新的勘查成果表明,矿床深部矿石品位变富趋势明显,资源量潜力很大。

3 样品采集与分析测试

本文研究所采集的粉红色方解石脉位于菱岭矿床 9 号勘探线钻孔 ZKJ9-4 的深部裂隙中(图 2B),粉红色方解石脉位于 475.30~475.50 m,轴心角 48° ,脉体宽约 20 cm(图 2C-1),为系统研究形成方解石脉的流体特征,对其进行连续取样。脉体两侧向外根据矿化强度依次发育含矿蚀变闪长岩、近矿蚀变闪长岩、远矿蚀变闪长岩和闪长岩原岩。含矿蚀变

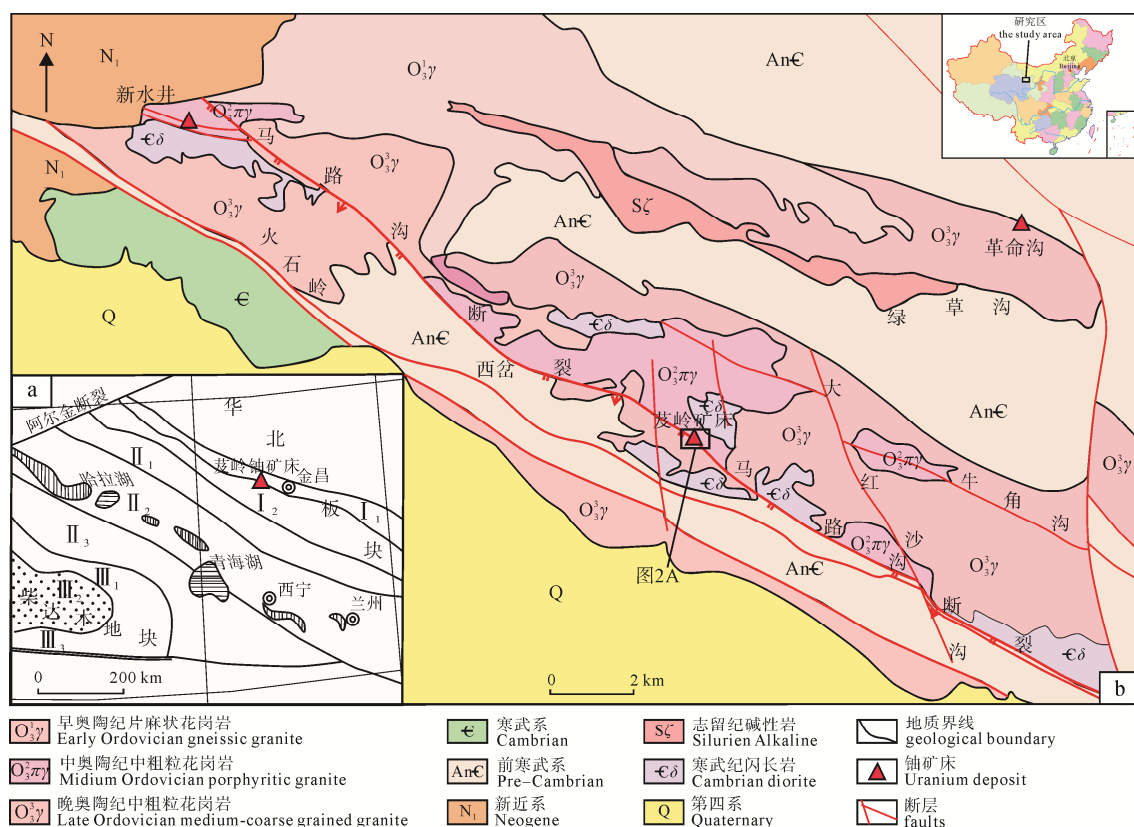


图1 甘肃省龙首山茱岭钠交代型铀矿床区域地质(a)与矿区地质图(b)(据张甲民等, 2017 改)

Fig. 1 Regional geological map (a) and local geological map (b) of the Jiling Na-metasomatic uranium deposit in Longshou Mountain, Gansu Province (after ZHANG et al., 2017)

I₁-龙首山陆缘带; I₂-河西走廊; II₁-北祁连缝合带; II₂-中祁连多岛弧带; II₃-南祁连弧后盆地; III₁-柴达木北缘隆起带; III₂-柴达木盆地; III₃-柴达木南缘隆起带

I₁-Longshou mountain Continental margin; I₂-Hexi Corridor; II₁-North Qilian Suture zone; II₂-Middle Qilian Multi island-arc zone; II₃-South Ailian back arc basin; III₁-North Qaidam Uplifted zone; III₂-Qaidam basin; III₃-South Qaidam Uplifted zone

闪长岩(U>0.05%), 呈暗紫红色, 主要由交代斜长石形成的钠长石、新生钠长石、蚀变角闪石残晶、绿泥石组成(图 2C-2), 赤铁矿呈粉尘状、云雾状分布于长石表面或浸染状分布于裂隙之中, 方解石和新生钠长石沿构造裂隙、矿物间隙和孔隙分布。矿化强度和蚀变强度在蚀变闪长岩中减弱较快, 上部蚀变范围宽度约 5.5 m, 下部蚀变范围宽度约 2 m。为研究茱岭矿床蚀变闪长岩的地球化学特征, 计算成矿流体与围岩作用过程中地球化学组分的迁移量, 自上而下系统采集正常闪长岩、弱蚀变闪长岩、强蚀变闪长岩、矿石及方解石等样品, 具体采样位置见表 1。淡粉红色方解石脉中富含流体包裹体, 产状多样, 在此选择零星的、孤立的包裹体或是平行于方解石节理成群出现的包裹体进行研究岩相学研究使用奥林巴斯显微镜完成, 全岩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, 分析数据总量介于 99.30~100.70 之间, 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。

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, 二者都是在西安地质调查中心实验测试中心完成。包裹体测温工作选用仪器为日本制造奥林巴斯偏光显微镜, 英国 LINKAM 公司制造的 THMSG600 冷热台, 仪器可测试-196~600 °C 范围温度, 测试精度为±1 °C。单个流体包裹体成分分析使用英国 Renishaw 公司生产的 inVia 型激光拉曼探针, 仪器编号为 SX-51。实验室温度为 23 °C, 湿度 45%, Ar⁺激光波长 514.5 nm, 激光功率 30 mW, 扫描速度 10 s/5 次叠加, 光谱仪狭缝为 20 μm。

4 围岩地球化学特征

4.1 主量元素特征

茱岭钠交代型铀矿床 9 号勘探线钻孔 ZKJ9-4 中所见蚀变闪长岩的全岩地球化学组成列于表 1。茱岭矿床闪长岩原岩 SiO₂ 含量为 52.25%~53.59%, TiO₂ 含量为 1.38%~1.43%, Al₂O₃ 含量为 15.32%~16.52%, Fe₂O₃ 含量为 3.51%~4.41%, FeO 含

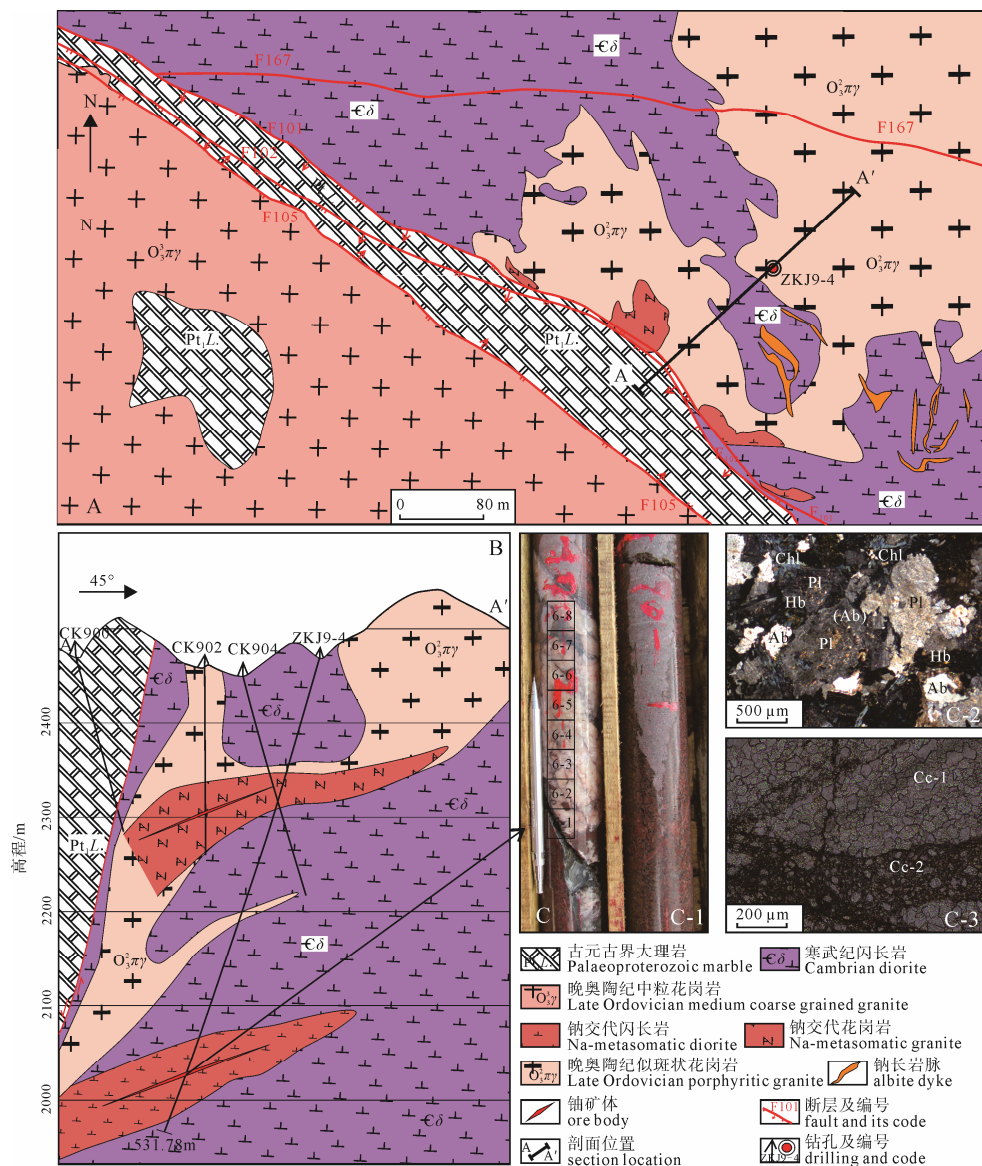


图2 芨岭铀矿床地质图(A), 9号勘探线剖面图(B), 蚀变闪长岩和淡粉红色方解石脉岩石学特征如(C)
Fig. 2 Geological map of the Jiling uranium deposit (A), geological section along No. 9 exploration line (B), petrological characteristics of metasomatic diorite and light pink calcite (C)

Ab-钠长石; (Ab)-交代钠长石; Cc-1-早期方解石; Cc-2-晚期方解石; Chl-绿泥石; Hb-角闪石; Pl-斜长石
Ab-albite; (Ab)-metasomatic albite; Cc-1-early term calcite; Cc-2-late term calcite; Chl-chlorite; Hb-hornblende; Pl-plagioclase

量为 4.28%~4.35%, MgO 含量为 2.80%~2.98%, CaO 含量为 3.84%~4.20%, Na₂O 含量为 5.38%~5.52%, K₂O 含量为 2.47%~3.96%, P₂O₅ 含量为 0.61%~0.66%, 其中 Fe²⁺/Fe³⁺ 的值为 0.87~1.10, Na⁺/K⁺ 的值为 2.17~3.30。蚀变闪长岩的 SiO₂ 含量为 47.79%~68.52%, TiO₂ 含量为 1.08%~1.66%, Al₂O₃ 含量为 14.28%~16.86%, Fe₂O₃ 含量为 0.89%~3.22%, FeO 含量为 1.73%~6.53%, MgO 含量为 0.07%~3.77%, CaO 含量为 1.05%~8.96%, Na₂O 含量为 4.88%~10.10%, K₂O 含量为 0.31%~3.84%, P₂O₅ 含量为 0.03%~1.28%, 其中 Fe²⁺/Fe³⁺ 的值为 1.10~4.84, Na⁺/K⁺ 的值为 1.93~36.46。

4.2 微量元素含量特征

闪长岩原岩的 U 含量为 $6.80 \times 10^{-6} \sim 9.20 \times 10^{-6}$,

Th 含量为 $17.60 \times 10^{-6} \sim 26.00 \times 10^{-6}$, Th/U 的值为 1.91~3.82, 蚀变闪长岩的 U 含量为 $7.20 \times 10^{-6} \sim 505 \times 10^{-6}$, Th 含量为 $16.70 \times 10^{-6} \sim 94.60 \times 10^{-6}$, Th/U 的值为 0.19~4.46。在原始地幔标准化微量元素蛛网图上(图 3A), 闪长岩原岩呈现出相对亏损 Rb、Ba、Nb、Ta、Sr、Hf、Ti 等元素而相对富集 Th、U、Pb 等元素的左端微隆右端微倾的曲线特征, 与原岩相比, 蚀变闪长岩更为强烈富集 Th、U、Pb, 相对弱亏损 Rb、Ba、Nb、Ta、Sr、Hf, 但更亏损 Ti 等元素, 总体呈现出左端尖峰, 右端略微上翘的曲线特征。

4.3 稀土元素特征

芨岭矿床闪长岩的原岩稀土元素总量(Σ REE) 为 $173.06 \times 10^{-6} \sim 223.77 \times 10^{-6}$, 重稀土含量(Σ HREE)

表 1 菱岭矿床钻孔 ZKJ9-4 中铀矿体与围岩主量元素(wt%)、微量元素和稀土元素($\times 10^{-6}$)含量一览表
Table 1 Major elements (wt%), trace elements and REE ($\times 10^{-6}$) content of orebody and host rock in drill hole ZKJ9-4 of the Jiling deposit

样品	ZKJ9-4-1	ZKJ9-4-2	ZKJ9-4-3	ZKJ9-4-4	ZKJ9-4-5	ZKJ9-4-7	ZKJ9-4-8	ZKJ9-4-9	ZKJ9-4-0
岩性	远矿蚀变 闪长岩	远矿蚀变 闪长岩	近矿蚀变 闪长岩	近矿蚀变 闪长岩	近矿蚀变 闪长岩	含矿蚀变 闪长岩	闪长岩	闪长岩	闪长岩
起始/m	471.73-472.13	472.13-472.33	472.33-473.13	473.13-473.93	473.45-473.55	473.93-474.93	478.93-479.23	479.23-479.23	471.20-471.73
SiO ₂	66.87	68.52	47.63	61.90	49.97	47.79	53.59	52.25	52.80
TiO ₂	1.46	1.08	1.45	1.42	1.65	1.66	1.43	1.38	1.41
Al ₂ O ₃	14.63	15.40	14.28	16.86	15.95	14.63	16.52	15.32	16.18
Fe ₂ O ₃	0.89	0.46	2.20	1.42	3.22	3.20	3.51	4.41	3.78
FeO	2.53	2.49	6.07	1.73	6.53	6.50	4.31	4.28	4.35
MnO	0.07	0.09	0.18	0.08	0.17	0.19	0.17	0.17	0.17
MgO	1.01	0.07	2.68	1.09	3.78	3.77	2.98	2.83	2.90
CaO	2.16	1.05	8.96	3.11	4.93	7.64	4.10	3.84	4.20
Na ₂ O	4.88	5.90	7.19	10.10	6.63	6.03	5.38	5.67	5.52
K ₂ O	3.84	3.61	0.31	0.42	0.89	0.73	2.47	3.96	2.73
P ₂ O ₅	0.16	0.03	0.91	0.20	1.28	1.27	0.66	0.61	0.66
烧失量	1.61	1.67	7.69	1.67	4.02	5.61	3.87	4.15	4.25
Fe ²⁺ /Fe ³⁺	2.56	4.84	2.48	1.10	1.82	1.83	1.10	0.87	1.05
Na ⁺ /K ⁺	1.93	2.48	35.16	36.46	11.29	12.52	3.30	2.17	3.06
Y	43.20	47.50	27.90	39.30	26.60	15.20	27.50	39.90	27.40
La	48.10	50.60	54.60	47.60	73.40	56.40	30.30	40.10	37.80
Ce	82.00	95.00	95.40	88.90	111	94.60	74.00	97.60	82.17
Pr	7.79	10.20	9.80	9.64	9.41	9.23	8.57	11.50	9.10
Nd	27.80	35.80	31.90	35.90	29.30	30.90	33.80	41.30	33.47
Sm	5.50	6.24	5.00	6.50	4.35	5.20	5.97	7.13	5.73
Eu	2.01	1.97	1.43	2.25	1.24	1.47	1.50	1.68	1.30
Gd	5.60	5.93	5.33	6.13	5.39	4.89	5.75	7.17	5.58
Tb	1.12	1.05	0.75	1.04	0.76	0.68	0.74	0.98	0.70
Dy	5.00	4.87	3.20	4.96	2.81	2.40	5.35	6.85	4.84
Ho	1.67	1.78	1.14	1.38	0.955	0.60	0.85	1.20	0.84
Er	4.19	5.92	2.99	4.67	2.88	1.64	2.91	3.82	2.68
Tm	0.92	1.32	0.73	1.00	0.68	0.39	0.35	0.53	0.35
Yb	5.55	7.79	4.10	5.84	3.44	1.93	2.62	3.48	2.39
Lu	1.23	1.51	0.89	1.41	0.77	0.32	0.35	0.43	0.31
ΣREE	198.48	229.98	217.26	217.22	246.39	210.65	173.06	223.77	187.24
ΣHREE	19.68	24.24	13.80	20.30	12.30	7.96	13.17	17.29	12.11
δEu	1.11	0.99	0.85	1.09	0.78	0.89	0.78	0.72	0.70
U	7.20	7.70	48.80	55.00	80.00	505.00	6.80	9.20	7.80
Th	32.10	26.40	16.70	41.50	34.20	94.60	26.00	17.60	20.17
Sc	6.30	4.95	7.60	11.00	4.45	2.20	5.00	4.00	4.53
Ti	2 389.00	2 754.00	3 544.00	5 718.00	2 621.00	2 803.00	3 768.00	4 049.00	3 323.00
V	68.60	51.80	52.70	83.40	48.70	25.20	39.10	61.50	42.37
Cr	10.40	7.85	8.30	7.40	6.85	6.90	9.00	11.40	8.07
Ga	17.60	20.30	19.40	19.50	19.10	20.40	19.20	20.00	19.27
As	11.90	16.40	7.40	8.70	7.40	4.40	3.60	8.30	5.40
Sr	301.60	199.30	202.00	207.9	152.00	166.10	119.80	125.90	117.10
Zr	191.00	297.30	248.00	269.20	255.00	273.90	162.10	170.50	175.30
Ba	475.80	243.00	257.00	293.40	471.00	217.00	109.30	148.00	101.73
Rb	42.10	68.00	49.40	41.40	52	37.30	34.30	49.30	43.27
Co	6.57	4.91	6.70	10.10	5.99	5.43	9.51	7.62	7.30
Ni	10.70	8.60	9.31	8.38	9.49	8.75	7.78	8.47	6.76
Nb	25.40	23.40	22.40	25.90	33.7	23.50	14.00	11.70	11.87
Mo	7.35	4.38	2.36	1.59	3.32	2.384	1.01	2.61	1.76
Cd	0.10	0.31	0.25	0.46	0.26	0.39	0.06	0.22	0.11
Sn	1.80	3.53	2.59	3.543	2.53	1.908	1.81	2.50	1.77
Hf	3.08	4.94	4.14	3.64	5.19	4.95	2.35	1.89	2.31
Ta	1.68	1.37	2.05	1.82	2.15	1.36	0.71	1.60	1.02
W	1.38	0.43	0.38	0.41	0.59	0.39	3.30	5.07	3.30
Cs	0.38	1.52	0.62	0.64	0.46	0.32	0.53	1.25	0.83
Bi	0.21	0.17	0.16	0.19	0.16	0.14	0.19	0.32	0.25
Sb	0.23	0.51	0.13	0.11	0.12	0.14	0.19	0.29	0.22
Th/U	4.46	3.43	0.34	0.75	0.43	0.19	3.82	1.91	2.67

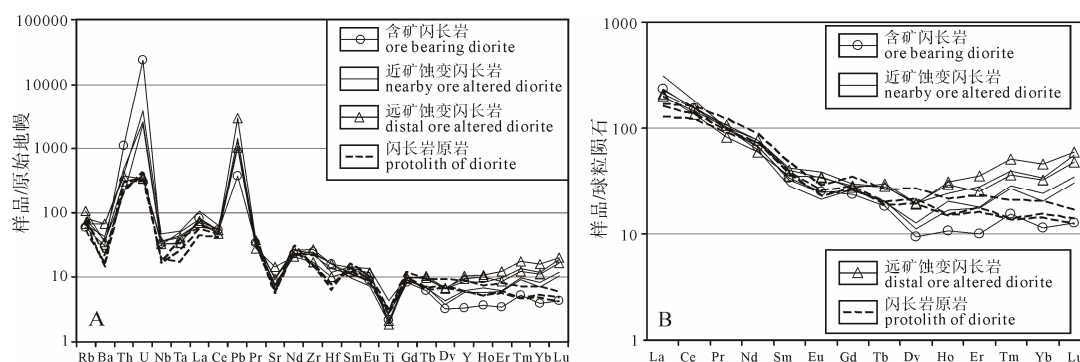


图3 菱岭矿床 ZKJ9-4 中闪长岩与蚀变闪长岩原始地幔标准化微量元素蛛网图(A)与球粒陨石标准化稀土元素配分曲线图(B)(原始地幔标准化值和球粒陨石标准化据文献 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 3 Primitive mantle normalized trace elements spider diagram (A) and chondrite-normalized REE patterns (B) of diorite and metasomatic diorite in drill hole ZKJ9-4 of the Jiling deposit (normalizing values of primitive mantle and chondrite after Sun and McDonough, 1989)

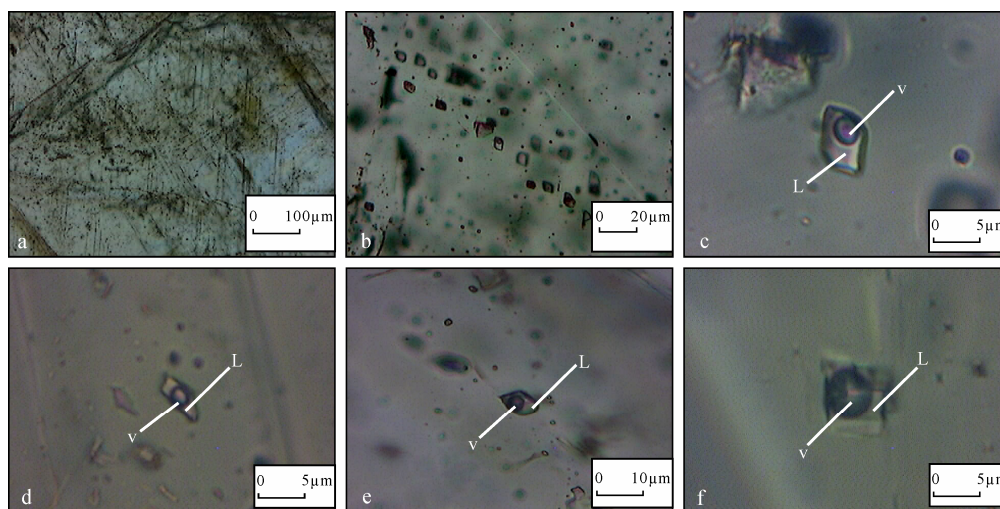


图4 菱岭铀矿床淡粉红色方解石脉流体包裹体特征

Fig. 4 The inclusion characteristics of light pink calcite in the Jiling uranium deposit

a-沿方解石节理产出的包裹体; b-成列产出的包裹体; c, d, e-I 类包裹体; f-II 类包裹体; L-液相包裹体; V-气相包裹体
a-inclusions along the cleavages; b-inclusions in a line; c, d, e-type I inclusion; f-type II inclusion; L-liquid inclusion; V-vapor inclusion

为 $12.11 \times 10^{-6} \sim 17.29 \times 10^{-6}$, δEu 的值为 0.70~0.78。蚀变闪长岩的稀土元素总量 (ΣREE) 为 $198.48 \times 10^{-6} \sim 246.39 \times 10^{-6}$, 重稀土含量 (ΣHREE) 为 $7.96 \times 10^{-6} \sim 24.24 \times 10^{-6}$, δEu 的值为 0.78~1.11。在球粒陨石标准化稀土元素配分曲线图上(图 3B), 闪长岩原岩呈现出轻稀土元素右倾明显强分馏而重稀土元素微右倾弱分馏的特征, 其“铈谷”发育明显, 但深度不大。蚀变闪长岩的轻稀土元素与原岩相似, 但左端更高, 重稀土元素则呈现出右端明显上翘的特征, 其“铈谷”不甚明显, 还出现了“铈峰”。

5 流体包裹体特征

5.1 包裹体类型与特征

菱岭铀矿床 9 号勘探线钻孔 ZKJ9-4 深部所见的淡粉红色方解石脉中富含流体包裹体, 原生包裹体呈零星的、孤立的包裹体或是平行于方解石节理成群出现(图 4a, b)。根据 Roedder(1986)和卢焕章等

(2004)提出的流体包裹体在室温下相态的分类标准, 菱岭铀矿床淡粉红色方解石脉中的流体包裹体主要有两类:

I 类: 富液相 L+V 两相水溶液包裹体, L 主要是水溶液, V 主要是气相。这种流体包裹体分布最广, 多数成群的平行于方解石节理产出, 大多数长约 $3 \sim 10 \mu\text{m}$, 长宽比为 1:1~3:1, 少数可达 $15 \mu\text{m}$ 。呈管状、椭圆状、次圆状产出。其中的气相比比例约占包裹体体积的 15%~40%(图 4c, d, e)

II 类: 富气相 L+V 两相水溶液包裹体, L 主要是水溶液, V 主要是气相。这种流体包裹体多数呈孤立的、零星分布, 大小约 $3 \sim 10 \mu\text{m}$, 长宽比为 1:1~2:1, 呈椭圆状、似椭圆状、似立方体状、不规则状产出。其中的气相比比例约占包裹体体积的 45%~70%(图 4f)。

5.2 流体包裹体测试结果

菱岭铀矿床淡粉红色方解石脉的流体包裹体

均一温度、冰点测试结果列于表 2。使用 Potter 等(1978)的 NaCl-H₂O 体系盐度计算公式与刘斌和段光贤(1987)的最小二乘法拟合曲线二次多项式对包裹体中流体盐度与密度进行计算, 计算结果列于表 2。用于均一温度测试的流体包裹体总计 77 个, 从

均一温度测试结果和均一温度频数直方图上(图 5a)可以看出, 均一温度主要分为三个区间, 即 280~300 ℃ 的包裹体有 8 个, 占测试数目的 10.4%; 250~260 ℃ 的包裹体有 9 个, 占测试数目的 11.7%; 160~230 ℃ 的包裹体有 60 个, 占测试数目的

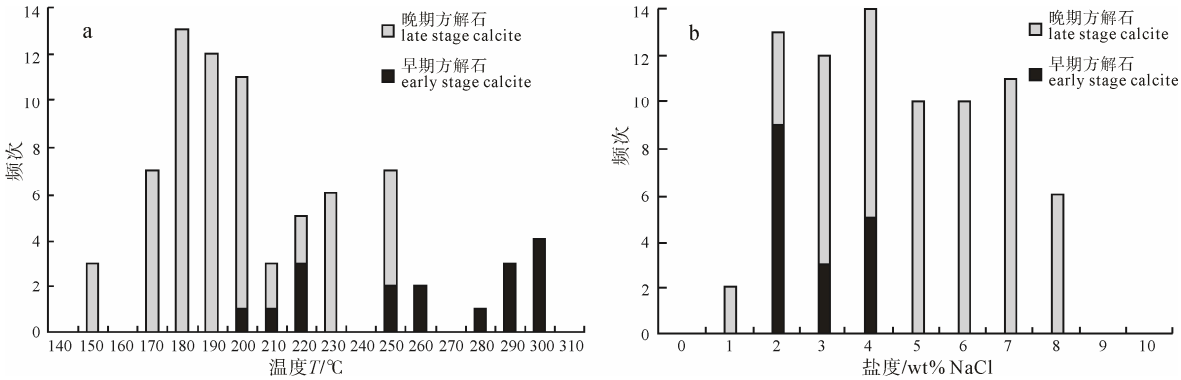


图 5 荇岭铀矿床淡粉红色方解石脉流体包裹体均一温度直方图(a)和盐度分布直方图(b)
Fig. 5 Histograms of homogenization temperature (a) and salinity (b) of light pink calcite vein in the Jiling uranium deposit

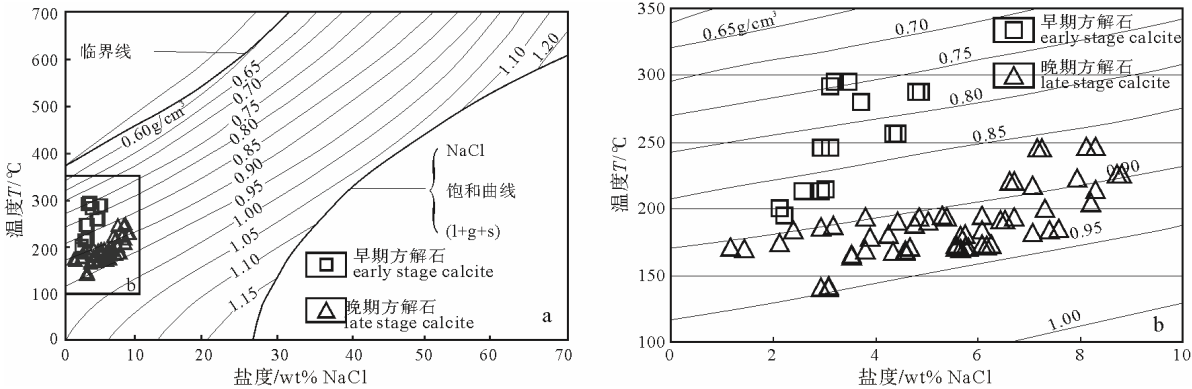


图 6 荇岭铀矿床淡粉红色方解石脉流体包裹体 NaCl-H₂O 系统 T- ω - ρ 图解
Fig. 6 The T- ω - ρ diagram for NaCl-H₂O system of light pink calcite dyke in the Jiling uranium deposit

表 2 荇岭铀矿床淡粉红色方解石脉流体包裹体显微测温与激光拉曼测试结果

Table 2 The microthermometric and laser Raman data of fluid inclusions in light pink calcite dyke in the Jiling uranium deposit

样品	测试数	温度测试				形成深度/ km	激光拉曼光谱测试								
		冰点/℃	均一温度/℃	盐度 /wt% NaCl	密度 ρ/(g/cm ³)		气相比例 /%	液相/%				气相/%			
								CH ₄	H ₂ O	CO ₂	H ₂ S	CH ₄	N ₂	H ₂	
ZKJ9-4-6-1-1	6	-1.8 ~ -0.7	170.3 ~ 187.6	1.15 ~ 3.18	0.90 ~ 0.91	1.29 ~ 1.62	20	100.00					51.1	48.9	
ZKJ9-4-6-1-2	5	-4.1 ~ -2.2	194.0 ~ 200.0	3.80 ~ 7.32	0.90 ~ 0.92	1.70 ~ 1.82	15	100.00					22.6	77.4	
ZKJ9-4-6-2-1	5	-3.4 ~ -2.5	188.5 ~ 195.5	4.41 ~ 6.09	0.91	1.68 ~ 1.76	15	100.00					62.5	37.5	
ZKJ9-4-6-2-2	6	-2.4 ~ -2.0	165.2 ~ 180.6	3.53 ~ 4.23	0.92 ~ 0.93	1.44 ~ 1.60	25	0.22	99.78				12.4	61.2 26.4	
ZKJ9-4-6-3-1	5	-3.5 ~ -3.1	171.7 ~ 173.4	5.55 ~ 6.26	0.94	1.54 ~ 1.57	20	100.00					54.5	45.5	
ZKJ9-4-6-3-2	6	-2.6 ~ -1.7	141.1 ~ 171.3	2.91 ~ 4.67	0.93 ~ 0.95	1.21 ~ 1.50	15	0.04	99.96				63.6	36.4	
ZKJ9-4-6-4-1	4	-4.3 ~ -4.0	182.4 ~ 185.5	7.05 ~ 7.58	0.93	1.66 ~ 1.69	45	0.05	99.95				40.7	59.3	
ZKJ9-4-6-4-2	5	-3.4 ~ -2.6	168.8 ~ 174.2	4.59 ~ 6.08	0.93 ~ 0.94	1.50 ~ 1.57	40	100.00					45.0	55.0	
ZKJ9-4-6-5-1	5	-1.7 ~ -1.2	195.4 ~ 214.0	2.12 ~ 3.00	0.87 ~ 0.89	1.66 ~ 1.84	15	100.00			29.1	12.8		58.1	
ZKJ9-4-6-5-2	5	-3.7 ~ -3.2	180.5 ~ 192.1	5.64 ~ 6.53	0.92 ~ 0.93	1.62 ~ 1.74	15	100.00			56.8	43.2			
ZKJ9-4-6-6-1	4	-2.7 ~ -2.1	279.8 ~ 287.8	3.72 ~ 4.86	0.77 ~ 0.78	2.45 ~ 2.56	45	0.01	99.99	41.1	19.8	32.4		6.7	
ZKJ9-4-6-6-2	5	-4.7 ~ -4.0	245.0 ~ 246.8	7.15 ~ 8.29	0.86	2.23 ~ 2.26	15	0.02	99.98			12.9	87.1		
ZKJ9-4-6-7-1	4	-4.8 ~ -3.8	291.2 ~ 294.5	3.10 ~ 3.45	0.75	2.51 ~ 2.56	30	100.00					96.3	3.7	
ZKJ9-4-6-7-2	4	-5.0 ~ -4.6	205.1 ~ 226.6	8.20 ~ 8.82	0.89 ~ 0.91	1.87 ~ 2.08	20	0.02	99.98			59.2		40.8	
ZKJ9-4-6-8-1	4	-2.5 ~ -1.7	245.3 ~ 256.6	2.92 ~ 4.42	0.82 ~ 0.83	2.10 ~ 2.27	70	0.01	99.99			65.5		34.5	
ZKJ9-4-6-8-2	5	-4.5 ~ -3.7	217.3 ~ 223.4	6.62 ~ 7.94	0.89	1.97 ~ 2.04	30	0.15	99.85				57.4	42.6	

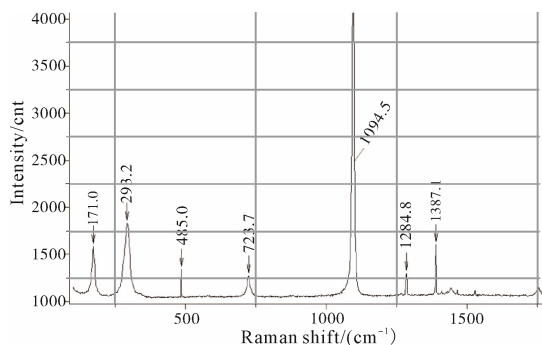


图7 菱岭铀矿床粉红色方解石脉含 CO₂ 气相包裹体激光拉曼图谱

Fig. 7 The laser Raman spectra of CO₂-bearing vapor inclusion in light pink calcite dyke of the Jiling uranium deposit

77.9%。盐度计算和密度结果和盐度分布直方图(图5b)表明, 菱岭矿床粉红色方解石脉的流体盐度为1.17 wt%~7.69 wt% NaCl, 密度为0.75~0.95 g/cm³。与使用 Bodnar(1983)NaCl-H₂O 体系 T - ω - ρ 相图(图6)投影所得结果较为一致。从镜下看, 粉红色方解石脉有两期热液活动(图2C-3), 从图6中也可以看出, 所取菱岭矿床钻孔 ZKJ9-4 深部淡粉红色方解石脉的热液主要有两期, 早期热液盐度较低, 晚期热液盐度较高。早期流体在镜下观察时有些包裹体常温下呈现灰黑色, 具有含 CO₂ 的特征, 激光拉曼光谱分析结果表明, 早期流体是富含 CO₂(1 285, 1 387)(图7)、H₂S(2 612)、CH₄(2 917)水溶液。晚期流体的激光拉曼测试结果表明, 晚期流体中除水外, 还有 H₂(4 155~4 160)、CH₄(2 917)、N₂(2 329)等气体。

6 讨论

6.1 组分迁移定量分析与成矿热液化学性质

菱岭钠交代型铀矿床的钠交代体除整体发育钠长石化外, 自矿体中心向外特征性蚀变依次有细脉状绿泥石化、粉红色脉状方解石化、白色雪花状方解石化、浸染状赤铁矿化、假象绿泥石化和硅化(赵如意等, 2013)。其中矿体呈现出暗紫红色-紫红色, 发育细脉状绿泥石化和粉红色方解石化。由前述可知, 钻孔 ZKJ9-4 中所见的方解石脉正是矿化中心部位的脉体, 同时赋矿蚀变闪长岩中发育较多新生钠长石、交代斜长石而成的钠长石、交代角闪石形成的绿泥石和空隙中的方解石。围岩蚀变是成矿热液与围岩发生作用的结果, 其在宏观上主要表现为赋矿围岩的颜色、体积、成分的变化, 使用蚀变岩石成分变化质量平衡方程(Grant, 1986)计算出 ZKJ9-4 中各地球化学组分从闪长岩原岩含量(C_i^0)到含矿蚀变闪长岩、近矿强蚀变闪长岩和远矿弱蚀变闪长岩的含量(C_i^A)及得失(ΔC_i)列于表3。

从表3和 C_i^0 - C_i^A 图解(图8)可以看出, 与闪长岩的原岩相比, 蚀变闪长岩地球化学组分有如下变化特征: (1)在热液蚀变和成矿过程中各蚀变带中 SiO₂、Na₂O、 Σ REE、U、Th、Ga、Sr、Zr、Ba、Rb、Nb、Mo、Cd、Sn、Hf 和 Ta 的含量均有增加, 其中 SiO₂ 在远矿弱蚀变闪长岩中含量增加最多, 可达 20.46%, 而 U、Th、Zr、Hf、Rb、Ba 和 Mo 主要增加于含矿蚀变闪长岩之内。(2)在各蚀变带中均减少的地球化学组分有 Fe₂O₃、MnO 和 Co, 其中

表3 菱岭矿床含矿蚀变闪长岩、近矿蚀变闪长岩、远矿蚀变闪长岩地球化学组分迁移计算结果及参数一览表

Table 3 The geochemical component migration calculating results and parameters of ore bearing diorite, nearby ore body altered diorite and distal ore body altered diorite in the Jiling deposit

岩石类型	参数	k	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Σ REE	Σ HREE	U	Th	Sc
闪长岩原岩	C_i^0		55.75	1.48	16.88	4.11	4.55	0.18	3.06	4.27	5.82	3.22	0.68	194.70	14.20	7.93	21.26	4.51
含矿蚀变闪长岩	C_i^A	0.96	55.45	1.65	16.28	3.71	5.34	0.13	3.52	4.78	7.71	0.71	0.73	259.40	10.60	619	46.07	2.83
	ΔC_i		1.70	0.23	-0.01	-0.27	0.98	-0.04	0.58	0.69	2.17	-2.49	0.08	75.51	-3.16	633	26.48	-1.58
近矿蚀变闪长岩	C_i^A	0.98	56.02	1.51	16.55	2.42	5.09	0.15	2.67	6.05	8.39	0.57	0.85	227.00	15.50	61	30.80	7.68
	ΔC_i		1.41	0.06	0.01	-1.65	0.64	-0.02	-0.33	1.90	2.74	-2.64	0.19	36.93	1.62	55	10.17	3.33
远矿蚀变闪长岩	C_i^A	0.91	69.36	1.27	15.38	0.69	2.57	0.08	0.55	1.65	5.52	3.82	0.10	214.20	22.00	7.5	29.25	5.63
	ΔC_i		20.46	-0.09	0.03	-3.35	-1.72	-0.09	-2.45	-2.46	0.25	0.97	-0.57	40.68	9.98	0.3	10.89	1.67
岩石类型	参数	k	Ti	V	Cr	Ga	Sr	Zr	Ba	Rb	Co	Ni	Nb	Mo	Cd	Sn	Hf	Ta
闪长岩原岩	C_i^0		3 713	47.66	9.49	19.49	120.93	169.30	119.68	42.29	8.14	7.67	12.52	1.79	0.13	2.03	2.18	1.11
含矿蚀变闪长岩	C_i^A	0.96	1 846	18.93	8.53	19.00	226.97	277.93	782.60	78.40	4.71	5.33	21.07	10.38	0.33	2.81	11.25	1.42
	ΔC_i		-1 801	-28.04	-0.65	0.20	114.27	118.71	691.31	38.95	-3.26	-2.15	9.31	8.96	0.21	0.88	9.47	0.36
近矿蚀变闪长岩	C_i^A	0.98	3 961	61.60	7.52	19.33	187.30	257.40	340.47	47.60	7.60	9.06	27.33	2.42	0.32	2.89	4.32	2.01
	ΔC_i		328	15.20	-1.82	0.24	70.19	93.35	227.74	6.28	-0.39	1.58	15.37	0.68	0.20	0.92	2.23	0.94
远矿蚀变闪长岩	C_i^A	0.91	2 571	60.20	9.13	18.95	250.45	244.15	359.40	55.05	5.74	9.65	24.40	5.86	0.20	2.66	4.01	1.53
	ΔC_i		-888	18.50	0.54	1.34	154.29	99.00	275.27	18.21	-1.83	2.94	14.29	4.65	0.09	0.90	2.22	0.56

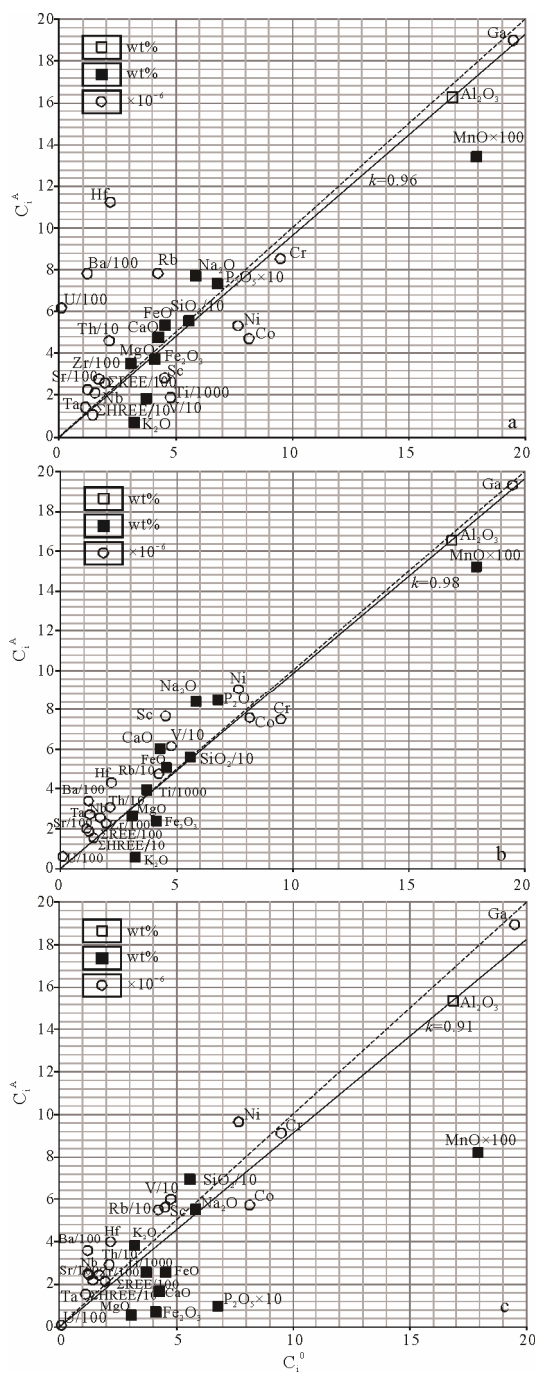


图 8 茆岭矿床含矿蚀变闪长岩(a)、近矿蚀变闪长岩(b)和远矿蚀变闪长岩(c) C_i^0 - C_i^A 图解

Fig. 8 The C_i^0 - C_i^A diagrams of ore-bearing diorite (a), near-ore altered diorite(b) and distal altered diorite (c) in the Jiling deposit

Fe_2O_3 在远矿蚀变闪长岩中减少量较多, 而 MnO 和 Co 在含矿蚀变闪长岩中减少较多。(3)含矿闪长岩中含量相对增加而在远矿弱蚀变闪长岩中相对减少的组分有 TiO_2 、 FeO 、 MgO 、 CaO 、 P_2O_5 等。(4)在含矿闪长岩中相对减少而在蚀变围岩中相对增加的地球化学组分有 K_2O (远矿蚀弱势变闪长岩增加)、 ΣHREE 、 Sc 、 V 、 Ni 等。因此, 从闪长岩的蚀变矿物组合和地球化学组分迁移计算结果及变化特征看, 在卸载成矿前流体中, 铀以碳酸铀酰络合物的形式

存在(杜乐天, 1996, 2001; 李占游, 1987; 付伟等, 2014), 同时还含有一定量的 SiO_2 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 、 ΣREE 、 U 、 Th 、 Ga 、 Sr 、 Zr 、 Ba 、 Rb 、 Nb 、 Mo 、 Cd 、 Sn 、 Hf 、 Ti 和 Ta 等组分及 CO_2 、 H_2S 、 CH_4 等挥发分。成矿流体具有较强的还原性, 使得其中 Fe_2O_3 减少而 Fe^{2+} 含量增加(含矿闪长岩的 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 的平均值为 2.44), 同时对 MnO 、 K_2O 、 Cr 和 Co 具有较强的交代溶蚀作用。

6.2 成矿流体物理特征

如前所述, 淡粉红色方解石脉的早期热液流体温度较高为 $287.8^\circ\text{C} \sim 294.5^\circ\text{C}$, 盐度为 $2.99 \text{ wt}\% \sim 4.57 \text{ wt}\%$ NaCl , 密度为 $0.75 \sim 0.77 \text{ g/cm}^3$ 。晚期流体的初始温度较低为 250°C 左右, 其盐度较高为 $7.15 \text{ wt}\% \sim 8.82 \text{ wt}\%$ NaCl 。形成地球上绝大多数矿床的成矿流体其主要组分有 H_2O 、 NaCl 和 CO_2 , 它们的含量比例决定了成矿流体的特征和性质(张德会等, 2011), 而流体的温度和盐度则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, 2011)。粉红色方解石脉中早期流体和晚期流体的温度和盐度存在明显不同, 说明二者源区具有一定的差异。茆岭矿床细脉状绿泥石的蚀变温度为 $273.51 \sim 319.54^\circ\text{C}$, 片状绿泥石的蚀变温度为 $248.26 \sim 299.17^\circ\text{C}$, 假象绿泥石的蚀变温度为 $152.27 \sim 237.52^\circ\text{C}$ (赵如意, 2016)。虽然粉红色方解石脉的早期流体温度与细脉状绿泥石的形成温度有约 20°C 的差异, 但是考虑到本次流体包裹体的取样靠近矿床东部, 细脉状绿泥石形成温度计算的样品采集于矿床北西部的深部, 所以二者是同一期热液作用的产物, 它们之间存在约 20°C 的温度差异进一步证明了热液来源于北西部。粉红色方解石脉和细脉状绿泥石都是产出于蚀变中心, 指示铀矿体的所在, 表明了温度较高的流体是钠交代型铀矿的成矿热液, 即茆岭矿床的成矿流体是初始温度为 $(300 \pm 20)^\circ\text{C}$, 盐度为 $2.99 \text{ wt}\% \sim 4.57 \text{ wt}\%$ NaCl , 密度为 $0.75 \sim 0.77 \text{ g/cm}^3$ 的热液。茆岭钠交代型铀矿的成矿作用晚于钠交代作用(杜乐天, 1996)或许是晚期流体的补充成矿作用。

6.3 成矿机制与热液来源

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(Sverjensky, 1979; 林文蔚和殷秀兰, 1998; 金明霞等, 1999; 贺文等, 2017)。茆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 $279.80 \sim 294.52^\circ\text{C}$ 降低至 $245.27 \sim 256.61^\circ\text{C}$, 密度从 $0.75 \sim 0.77 \text{ g/cm}^3$ 升高至 $0.82 \sim 0.83 \text{ g/cm}^3$, 但密度、盐度变化不甚

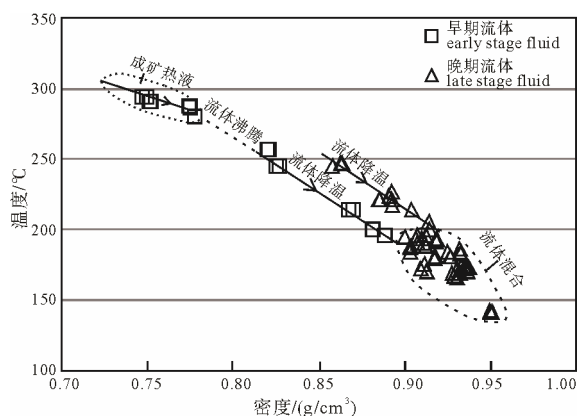


图9 菱岭铀矿床淡粉红色方解石脉流体温度和密度演化图解

Fig. 9 The temperature and salinity diagram of light pink calcite vein in the Jiling uranium deposit

明显。在流体密度与均一温度和盐度关系图上(图9), 与之后的流体温度、密度变化线形成了一个拐点, 早期成矿流体的包裹体成分激光拉曼光谱测试结果(表1)表明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是由于流体中气相组分的瞬间逸出导致的, 也就是说流体沸腾是早期成矿热液中成矿物质的卸载机制。沸腾卸载成矿物质之后的早期流体温度降低至 $195.37\sim 214.04\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时盐度也降低到了 $2.12\text{ wt}\%$ NaCl左右, 密度升高至 $0.87\sim 0.89\text{ g/cm}^3$ 。

ZKJ9-4中含矿蚀变闪长岩、近矿蚀变闪长岩、远矿蚀变闪长岩和闪长岩原岩中平均Th含量依次为 94.60×10^{-6} 、 30.80×10^{-6} 、 29.25×10^{-6} 、 21.26×10^{-6} , 表明成矿热液中具有较高的Th含量。由于岩石中的Th相对稳定, 很少会被交代进入热液, 所以早期铀成矿热液中的Th只能来源于岩浆演化晚期产生的岩浆水, 这一点可以从钠长岩脉中的U含量与Th含量呈现明显的正相关(赵如意等, 2015)得到印证。菱岭矿床方解石脉的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 的值为 $-3.2\text{‰}\sim -2.1\text{‰}$, 平均值为 -2.4‰ , $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 的值为 $9.6\text{‰}\sim 13.3\text{‰}$ 。C、O同位素显示了热液来源于花岗岩区, 向低温蚀变方向演化的趋势(赵如意, 2016)。矿石中 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值为 $8.99\text{‰}\sim +11.21\text{‰}$, $\delta^2\text{H}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 $-74.2\text{‰}\sim -72.4\text{‰}$, 表明钠交代型铀矿的成矿热液是起源于花岗岩岩浆演化晚期分异出的富碱初始岩浆水, 经与围岩交代、反应形成的再平衡混合岩浆水(李占游, 1987)。

晚期流体到达ZKJ9-4所在的深部裂隙后, 温度从 $244.98\sim 246.78\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降低至 $205.56\sim 214.25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 盐度也从 $8.12\text{ wt}\%\sim 8.82\text{ wt}\%$ NaCl, 略微降低到了 $7.06\text{ wt}\%\sim 8.10\text{ wt}\%$ NaCl, 密度从 0.86 g/cm^3 升高至 0.91 g/cm^3 , 即其先是经历了降温降低、密度升高,

但盐度降低不多的冷却过程。而后从 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右降低至 $165\sim 175\text{ }^{\circ}\text{C}$ 过程中, 盐度从 $7.06\text{ wt}\%\sim 8.10\text{ wt}\%$ NaCl快速降低至 $1.15\text{ wt}\%\sim 2.12\text{ wt}\%$ NaCl, 密度升高为 $0.91\sim 0.95\text{ g/cm}^3$ (图5), 在图7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它源低盐度($1\text{ wt}\%\sim 2\text{ wt}\%$ NaCl)热液加入与之混合, 它源热液的温度与围岩温度基本相似, 为 $165\sim 175\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。陈云杰等(2014)对菱岭矿床、新水井矿床和牛角沟钠交代型铀矿点的雪花状充填方解石和脉状方解石C、O同位素研究, 得到 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 的值为 $-1.50\text{‰}\sim -6.33\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 的值为 $-2.577\text{‰}\sim 5.051\text{‰}$, 认为龙首山钠交代型铀矿的成矿热液水源是岩浆热液与大气降水混合而成, 即晚期流体混合作用进一步促进了成矿物质的卸载。根据邵洁涟等流体压力和成矿深度计算公式(邵洁涟和梅建明, 1986; 邵洁涟, 1999), 此时围岩所处的深度为 $1.29\sim 1.82\text{ km}$ (表2), 平均深度为 1.56 km 。

7 结论

(1)菱岭钠交代型铀矿床的成矿流体是起源于岩浆演化晚期的再平衡岩浆水, 除富含U外, 还含有丰富的 SiO_2 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 、 $\sum\text{REE}$ 、Th、Ga、Sr、Zr、Ba、Rb、Nb、Mo、Cd、Sn、Hf、Ti和Ta等组分及 CO_2 、 H_2S 、 CH_4 等挥发分, 成矿流体具有较强的还原性, 并对MnO、 K_2O 、Cr和Co具有较强的交代溶蚀作用。

(2)成矿热液流体温度为 $(300\pm 20)\text{ }^{\circ}\text{C}$, 盐度为 $2.99\text{ wt}\%\sim 4.57\text{ wt}\%$ NaCl, 密度为 $0.75\sim 0.77\text{ g/cm}^3$, 流体沸腾是菱岭钠交代型铀矿成矿物质的早期卸载机制, 晚期成矿流体中加入了大量的大气降水, 流体混合作用进一步促进了成矿物质的卸载。

Acknowledgements:

This study was supported by China Geological Bureau of Nuclear Industry (Nos. 201349 and 201571), and China Geology Survey (Nos. DD20160346 and 12120114014901).

参考文献:

- 陈云杰, 傅成铭, 王刚, 赵如意, 王伟, 苗华军. 2014. 花岗岩型热液铀矿床C、O同位素研究-以甘肃省龙首山菱岭矿区为例[J]. 地质与勘探, 50(4): 641-648.
- 杜乐天. 1996. 碱流体的地球化学原理-重论热液作用和岩浆作用[M]. 北京: 科学出版社.
- 杜乐天. 2001. 中国热液铀矿基本成矿规律和一般热液成矿学[M]. 北京: 原子能出版社: 17-26.

- 杜乐天. 2009. 幔汁(HACONS 流体)地球内动因探索[J]. 地球学报, 30(6): 739-748.
- 付伟, 冯佐海, 黄永高, 柴明春, 康志强, 余勇, 杨梦力, 江超强. 2014. 广西花山铀矿床氧化带中铀酰矿物特征、成因及其勘查指示意义[J]. 地球学报, 35(3): 295-304.
- 贺文, 林彬, 杨欢欢, 方向, 宋英昕, 韦少港, 侯淋. 2017. 西藏铁格隆南 Cu-Au 矿床成矿流体特征及与矿化蚀变的内在联系[J]. 地球学报, 38(5): 638-650.
- 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[J]. 地球科学与环境学报, 25(04): 32-39.
- 金明霞, 王洁民, 高锦曦. 1999. 残浆沸腾与锡钨成矿作用[J]. 地球学报, 20(3): 265-271.
- 李献华, 苏犁, 宋彪, 刘敦一. 2004. 金川超镁铁侵入岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 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[J]. 铀矿地质, (3): 175-183.
- 林文蔚, 殷秀兰. 1998. 成矿流体的浓缩作用及浓缩方式研究[J]. 地球学报, 19(2): 158-165.
- 刘斌, 段光贤. 1987. NaCl—H₂O 溶液包裹体的密度式和等容式及其应用[J]. 矿物学报, (4): 345-352.
- 刘丛强, 黄智龙, 李和平, 苏根利. 2001. 地幔流体及其成矿作用[J]. 地学前缘, 8(4): 231-243.
- 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 欧光习, 沈昆, 张文淮. 2004. 流体包裹体[M]. 北京: 科学出版社: 132-137.
- 邵洁涟, 梅建明. 1986. 浙江火山岩区金矿床的矿物包裹体标型特征研究及其成因与找矿意义[J]. 矿物岩石, (3): 103-111.
- 邵洁涟. 1988. 金矿找矿矿物学[M]. 北京: 中国地质大学出版社: 1-150.
- 汤中立, 白云来. 1999. 华北古大陆西南边缘构造格架与成矿系统[J]. 地学前缘, (2): 271-283.
- 魏俏巧, 郝立波, 陆继龙, 赵玉岩, 赵新运, 石厚礼. 2013. 甘肃河西堡花岗岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 32(6): 729-735.
- 校培喜, 由伟丰, 曹宣铎, 胡云绪, 谢从瑞. 2011. 甘肃中西部龙首山一带“韩母山群”的重新厘定[J]. 地质通报, 30(8): 1228-1232.
- 辛存林, 马维云, 安国堡, 杨国林, 孙现辉. 2013. 甘肃龙首山 207 铀矿床成矿地质特征及其成矿机制探讨[J]. 地质学报, 87(4): 577-590.
- 许安东, 姜修道. 2003. 华北地台西缘中元古界蓟县系墩子沟群特征及其地质意义[J]. 长安大学学报(地球科学版), 25(4): 27-31.
- 张德会, 金旭东, 毛世德, 王丽丽. 2011. 成矿热液分类兼论岩浆热液的成矿效率[J]. 地学前缘, 18(5): 90-102.
- 张甲民, 赵如意, 王刚, 聂利. 2017. 甘肃龙首山茂岭铀矿区 A 型似斑状花岗岩地质特征及其地质意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 36(5): 813-823.
- 张树明, 魏正宇, 张良, 汤琳, 赵新胤. 2013. 龙首山碱交代型铀矿床特征和存在的问题[J]. 矿物学报, 33(S2): 284-285.
- 张祖还. 1984. 铀地球化学[M]. 北京: 原子能出版社: 225-347.
- 赵如意, 陈云杰, 武彬, 王刚. 2013. 甘肃龙首山茂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.
- 赵如意, 姜常义, 陈旭, 王刚, 陈云杰, 聂利. 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[J]. 地质与勘探, 51(6): 1069-1078.
- 赵如意. 2016. 甘肃省龙首山成矿带茂岭茂岭钠交代型铀矿地质特征与成矿作用研究[D]. 西安: 长安大学: 48-50.
- 赵亚云, 张树明, 汤琳, 尧宏福, 杨春四. 2016. 龙首山中段茂岭花岗岩体 Sr-Nd-Pb 同位素特征及意义[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 41(6): 1016-1030.
- 钟军, 范洪海, 顾大钊, 王生云, 陈金勇, 史长昊, 李恒强. 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[J]. 中国地质, 04: 1393-1408.
- 周云, 唐菊兴, 秦志鹏, 彭惠娟. 2012. 西藏甲玛铜多金属矿床成因研究——来自流体包裹体的证据[J]. 地球学报, 33(4): 485-500.

References:

- BODNAR R J. 1983. A method of calculating fluid inclusion volumes based on vapor bubble diameters and P-V-T-X properties of inclusion fluids[J]. Economic Geology, 78(3): 535-542.
- CHEN Yun-jie, FU Cheng-ming, WAGNG Gang, ZHAO Ru-yi, WANG Wei, MIAO Hua-jun. 2014. Carbon and oxygen isotopes in granite-type hydrothermal uranium deposits: A case study of the Jiling uranium ore field in Longshoush mountain, Gansu Province[J]. Geology and Exploration, 50(4): 0641-0648(in Chinese with English abstract).
- CHEN P R, ZHANG B T, ZHANG Z H. 1992. Speciation and precipitation of uranium complexes in hydro-thermal solutions related to granite-type uranium deposits[J]. Chinese Journal of Geochemistry, (3): 252-259.
- CUNEY M, EMETZ A, MERCADIER J, MYKCHAYLOV V, SHUNKO V, YUSLENKO A. 2012. Uranium deposits associated with na-metasomatism from central ukraine: a review of some of the major deposits and genetic constraints[J]. Ore Geology Reviews, 44(2): 82-106.
- DAHLKAMP F J. 2009. Uranium deposits of the world[M]. Springer Berlin Heidelberg: 75-79.
- DU Le-tian. 1996. The geochemical principle of hydrocarbon alkali fluid: Another theory of hydrothermal process and magmatism [M]. Beijing: Science Publishing House(in Chinese).
- DU Le-tian. 2001. The basal metallogenic regularity of hydrothermal uranium ore in Chian and general hydrothermal metallogeny[M]. Beijing: Automatic energy Publishing House:

- 17-26(in Chinese).
- DU Le-tian. 2009. Mantle ichor (HACONS Fluids): the interior crucial factor of geodynamics[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(6): 739-748(in Chinese with English abstract).
- FU Wei, FENG Zuo-hai, HUANG Yong-gao, CHAI Ming-chun, KANG Zhi-qiang, YU Yong, YANG Meng-li, JIANG Chao-qiang. 2014. Mineralogical characteristics and genesis of the uranyl minerals in the oxidized zone of the Huashan deposit, Guangxi, and their implications for deep ore exploration[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 35(3): 295-304(in Chinese with English abstract).
- HE Wen, LIN Bin, YANG Huan-huan, FANG Xiang, SONG Ying-xin, WEI Shao-gang, HOU Lin. 2017. Fluid inclusion feature and its internal relationship with mineralization and epithermal alteration of the Tiegelongnan Cu-Au Deposit[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 38(5): 638-650(in Chinese with English abstract).
- HU Neng-gao. 2003. Geochemical characteristics and the tectonic setting of the Longshoushan Group in the Dongdashan area, Gansu Province[J]. *Journal of Chang'an University (Earth Science Edition)*, 25(04): 32-39(in Chinese with English abstract).
- GRANT J A. 1986. The isocon diagram-A simple solution to greenschist's equation for metasomatic lateration[J]. *Economic Geology*, 81: 1976-1982.
- 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[D]. The-sis, Virginia, Polyt. Instit. And State University: 1-100.
- JIN Ming-xia, WANG Jie-min, GAO Jin-xi. 1999. Ebullition of the residual magma and Sn-W mineralization[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 20(3): 265-271(in Chinese with English abstract).
- LI Xian-hua, SU li, SONG Biao, LIU Dun-yi. 2004. The SHRIMP zircon U-Pb dating and its geological significance of Jinchuan ultramafic plutone[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(4): 401-402(in Chinese with English abstract).
- LI Zhan-you. 1987. Rare earth element geochemisitry of granite-type hydrothermal uranium deposits with alkaline metasomatism in northwest China[J]. *Uranium Geology*, 3(3): 175-183(in Chinese).
- LIN Wen-wei, YIN Xiu-lan. 1998. Inspissation of ore forming fluid and its forms[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 19(2): 158-165(in Chinese with English abstract).
- LIU Bin, DUAN Guang-xian. 1987. The density and isochoric formulae for NaCl-H₂O fluid inclusions and their applications[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, (4): 345-352(in Chinese with English abstract).
- LIU Cong-qiang, HUANG Zhi-long, LI He-ping, SU Gen-li. 2001. The geofluid in the mantle and its role in ore forming processes[J]. *Earth Science Frontiers(China University of Geosciences,Beijing)*, 8(4): 231-243(in Chinese with English abstract).
- LU Huan-zhang, FAN Hong-rui, NI Pei, OU Xi-guang, SHEN Kun, ZHANG Wen-huai. 2004. Fluid inclusions[M]. Beijing: Science Press: 132-137(in Chinese).
- NETTO A M, MEYER A, CUNEY M, POUPEU G. 1991. A thermo-geochronological study of the Itataia phospho-uraniferous deposit (Ceará, Brazil) by apatite fission track analysis: Genetic implications[M]. *Source, Transport and Deposition of Metals*: 1-150.
- POTTER R W, CLYNNE M A, BROWN D L. 1978. Freezing point depression of aqueous chloride solutions[J]. *Economic Geology*, 73(2): 284-285.
- POTY B, PAGEL M. 1988. Fluid inclusions related to uranium deposits: a review[J]. *Journal of the Geological Society*, 145(1): 157-162.
- ROEDDER E. 1986. Fluid inclusions[M]. *Mineralogical Society of America, Reviews in Mineralogy*: 644-645.
- SHAO Jie-lian, MEI Jian-ming. 1986. On the study of typomorphic characteristics of mineral inclusion in the gold deposits from volcanic terrain in Zhejiang and its genetic and prospecting significance[J]. *Minerals and Rocks*, 6(3): 103-111(in Chinese with English abstract).
- SHAO Jie-lian. 1988. Gold prospecting mineralogy[M]. Beijing: China University of Geosciences Press: 1-150(in Chinese).
- SUN S S, MCDONOUGH W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and process[J]. *Geological Society, Special Publication*, 42: 313-345.
- SVERJENSKY D A. 1979. Geochemistry of hydrothermal ore deposits[J]. *Journal of Geology*, 76(5): 606-606.
- TANG Zhong-li, BAI Yun-lai. 1999. Geotectonic framework and metallogenic system in the southwest margin of North China paleocontinent[J]. *Earth Science Frontiers*, (2): 271-283(in Chinese with English abstract).
- VELS B, FRITSCH R. 1988. Sodium metasomatism in the Kintongo uranium occurrence near Poli, Cameroon[J]. *Uranium* 4: 365-383.
- WEI Qiao-qiao, HAO Li-bo, LU Ji-long, ZHAO Yu-yan, ZHAO Xin-yun, SHI Hou-li. 2013. LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb dating of Hexipu granite and its geological implications[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 32(6): 729-735(in Chinese with English abstract).
- XIAO Pei-xi, YOU Wei-feng, CAO Xuan-duo, HU Yun-xu, XIE Cong-rui. 2011. Redefining of the Hanmushan Group in Longshoushan, central-western Gansu Province[J]. *Geological*

- Bulletin of China, 30(8): 1228-1232(in Chinese with English abstract).
- XIN Cun-lin, MA Wei-yun, AN Bao-guo, YANG Guo-lin, SUN Xian-hui. 2013. Geological characteristics and mineralization mechanism of the NO. 207 uranium deposit in Longshoushan, Gansu Province[J]. Acta Geological Sinica, 87(4): 577-590(in Chinese with English abstract).
- XU An-dong, JIANG Xiu-dao. 2003. Characteristics and geological significance of the Dunzigou Group of the mesoproterozoic in the western edge of the North China platform[J]. Journal of Chang'an University (Earth Science Edition), 25(4): 27-31(in Chinese with English abstract).
- ZHANG De-hui, JIN Xu-dong, MAO Shi-de, WANG Li-li. 2011. The classification of ore-forming fluid and the efficiency of ore forming of magmatic hydrothermal solution[J]. Earth Science Frontiers, 18(5): 90-102(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Jia-min, ZHAO Ru-yi, WANG Gang, NIE Li. 2017. The geological characteristics and significances of A type porphyritic granite in the Jiling uranium deposit in the Longshou mountains, Gansu Province[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 36(5): 813-823(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Shu-ming, WEI Zhen-yu, ZHANG Liang, TANG Lin, ZHAO Xin-yin. 2013. The characteristics and questions of alkali metasomatic uranium deposit in Longshou mountain[J]. Acta Mineralogica Sinica, (S2): 284-285(in Chinese).
- ZHANG Zu-huan. 1984. Uranium geochemistry[M]. Beijing: Atomic Energy Press: 225-347(in Chinese).
- ZHAO Ru-yi, CHEN Yun-jie, WU Bin, WANG Gang. 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).
- ZHAO Ru-yi, JIANG Chang-yi, CHEN Xu, WANG Gang, CHEN Yun-jie, NIE Li. 2015. Geological features of albitite veins and its relationship with uranium metallogenic in the middle Longshou mountains of Gansu Province[J]. Geology and Exploration, 51(6): 1069-1078(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Ru-yi. 2016. The study on geological characteristics and metallogeny of Jiling sodium-metasomatic uranium deposit in Longshou Mountain metallogenic belt in Gansu province[J]. Xi'an: Chang'an University: 48-50(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Ya-yun, ZHANG Shu-ming, TANG Lin, YAO Hong-fu, YANG Chun-si. 2016. Sr-Nd-Pb isotopic characteristics and its geological significance of the Jiling granitic pluton in the middle Longshou mountains[J]. Earth Science, 41(6): 1016-1030(in Chinese with English abstract).
- ZHONG Jun, FAN Hong-hai, GU Da-zhao, WANG Sheng-yun, CHEN Jin-yong, SHI Chang-hao. 2016. Major and trace element migration and metallogenic processes of the Xinshuijing U-Th deposit in the Longshoushan metallogenic belt, Gansu Province[J]. Geology in China, 04: 1393-1408(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Wei-xun. 2000. Uranium provinces in China. Manuscript for IAEA atlas/UDEPO[M]. 18 (unpublished).
- ZHOU Yun, TANG Ju-xing, QIN Zhi-peng, PENG Hui-juan. 2012. A Study of Fluid Inclusions and Their Constraints on the Genesis of the Jiama(Gyama) Copper Polymetallic Deposit in Tibet[J]. Acta Geoscientia Sinica, 33(4): 485-500(in Chinese with English abstract).