

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2020.03.019

甘肃龙首山革命沟矿床铀矿化特征及成因探讨

王伟,李涛,刘涛,李天石,郭长林

(核工业二〇三研究所,陕西 咸阳 712000)

摘要:革命沟矿床位于龙首山成矿带茆岭岩体的北带,矿石种类较多,通过对主要矿石进行研究表明,不同矿石具有不同的地球化学特征,也发育不同的矿化蚀变组合,但均表现为强烈硅化为主的酸性热液蚀变特征,硅含量明显增加,主要形成沥青铀矿物。综合分析认为,革命沟矿床是以充填裂隙和热交代作用为主的热液成因矿床;铀矿化受革命沟断裂及其次级断裂和构造角砾岩、大理岩与角闪岩岩性界面及硅化蚀变带所控制。

关键词:铀矿化;热液型铀矿床;控矿要素;龙首山革命沟

中图分类号:P619.14

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2020)03-0210-10

Characteristics and Genesis of Uranium Mineralization of Geminggou Deposit in Longshoushan, Gansu Province

WANG Wei, LI Tao, LIU Tao, LI Tianshi, GUO Changlin

(No. 203 Research Institute of Nuclear Industry, Xianyang 712000, Shaanxi, China)

Abstract: The Geminggou deposit is located in the northern part of the jiling rock mass in Longshoushan metallogenetic belt with various ore types. Study of main ores shows that different ores have different geochemical characteristics and different assemblages of mineralization alteration. What they have in common is the strong silicification of acid hydrothermal alteration and the forming of pitchblende with the obvious increase of silicon. Therefore, it is considered that Geminggou deposit is a hydrothermal deposit with the filling of fissures and the thermal metasomatism. Uranium mineralization is controlled by the Geminggou fault and its secondary faults, the lithologic interface of structural breccia, marble and amphibolites, and the silicified alteration zone.

Keywords: uranium mineralization; hydrothermal deposit; mineral control elements; Geminggou of Longshoushan

热液型铀矿床是中国重要的铀矿床类型之一(杜乐天,2011)。在龙首山成矿带已发现茆岭矿床、新水井矿床和革命沟矿床等多个热液型铀矿床(刘正义等,2018;王伟等,2019),但革命沟矿床表现出

不同于茆岭矿床和新水井矿床的铀矿化特征。笔者结合近几年的研究成果,对革命沟矿床的铀矿化特征和控矿要素进行了进一步的总结和认识,探讨矿床成因,旨在明确革命沟矿床的成矿作用,为该矿区

收稿日期:2019-06-11;修回日期:2020-01-08

基金项目:中国核工业地质局“甘肃省龙首山成矿带三岔-金边寺地区铀矿资源调查评价与勘查”(202002)

作者简介:王伟(1988-),男,工程师,地质学专业,现主要从事铀矿地质勘查及研究工作。E-mail:1317698642@qq.com

深部和外围的进一步勘查,以及寻找类似成因的矿床指明方向。

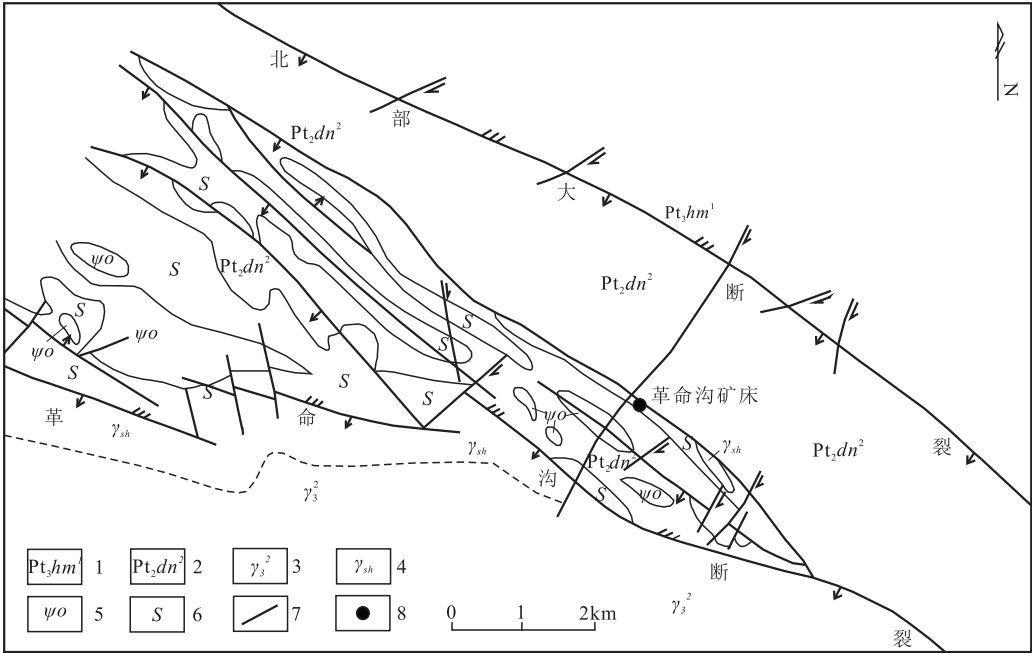
1 区域地质概况

龙首山地区属于位于华北板块西南缘,阿拉善地块的南缘,南接河西走廊过渡带,北邻潮水盆地(张新虎,1992;赵如意等,2013)。区内所出露的最早的地层是以变质结晶基底产出的古元古界龙首山群,上覆地层为中元古界墩子沟群和新元古界孩母山群。本区褶皱和断裂构造非常发育,大地构造单元以南北深大断裂为界,划分为走廊带、龙首山地块和潮水盆地。区内岩浆活动强烈,主要发育侵入岩,

分布十分广泛,岩石种类多,有超基性岩、基性岩、中性岩、酸性岩、碱性岩等,其中以加里东期侵入的茆岭岩体为代表(张良等,2017;聂丽等,2016),而革命沟矿床位于茆岭岩体的北带外接触带。

2 矿床地质

矿区内出露地层主要为中元古界墩子沟群中组大理岩、硅化大理岩和新元古界孩母山群下组千枚岩,主要位于革命沟断裂下盘(图 1),紧靠断裂,含 U 丰富,平均 U 含量为 2.8×10^{-6} , Th 含量为 6.76×10^{-6} ,是本区铀成矿重要的物质来源之一,为后期成矿奠定了坚实的物质基础。



1. 新元古界孩母山群下组千枚岩;2. 中元古界墩子沟群大理岩;3. 加里东中期花岗岩;4. 碎裂花岗岩;5. 角闪岩;6. 构造角砾岩;7. 断层;8. 矿床

图 1 革命沟矿床地质略图

Fig. 1 Geological sketch map of Geminggou deposit

矿区断裂构造以革命沟断裂为主,对成矿起主导作用,断裂走向北西 290°,倾向南西,倾角 65°~85°,具多次活动特点,主活动期为加里东末期,形成宽数米至数十米的硅质构造角砾岩,并伴有强烈的热液蚀变和成矿活动。革命沟断裂发育大量次级裂隙,沿次级裂隙往往充填大量的角闪岩脉和辉绿岩脉,在成矿期活动破碎,成为有利的容矿场所。

茆岭岩体是该区最主要的侵入岩体(赵如意,2016),主要由加里东期闪长岩、花岗岩和碱性岩组成,主要分布于革命沟断裂上盘;少量角闪岩呈条带状和透镜状产在革命沟断裂下盘的大理岩中,从东到西有数十条,单条长数十米至数百米,宽数米至二、三十米,长轴方向 310°左右,局部具片理状构造。

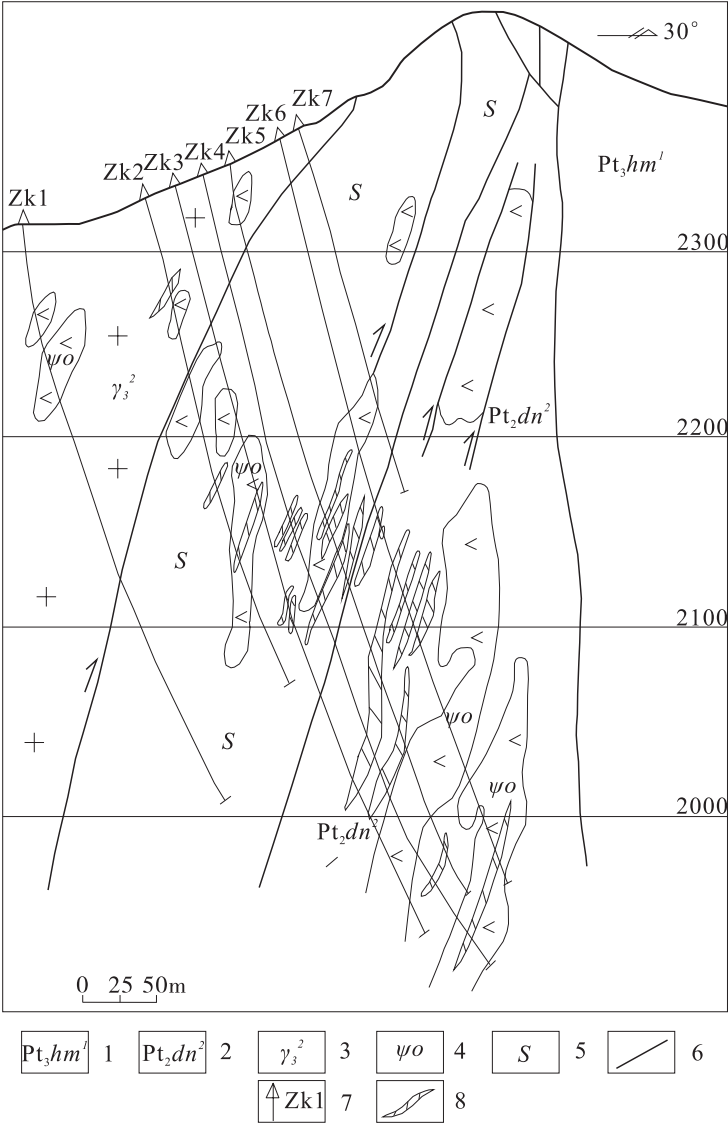
3 铀矿化特征

3.1 矿体

沿革命沟断裂形成一个长达十余千米的矿化带。革命沟矿床位于该矿化带东段,矿体数量多,规模小,形态较复杂,分布不集中;矿体的形态为不规则透镜状。矿体的产状与控矿断裂构造的产状基本一致,走向 290°~310°,倾向南西,倾角 60°左右(图 2)。

3.2 矿石

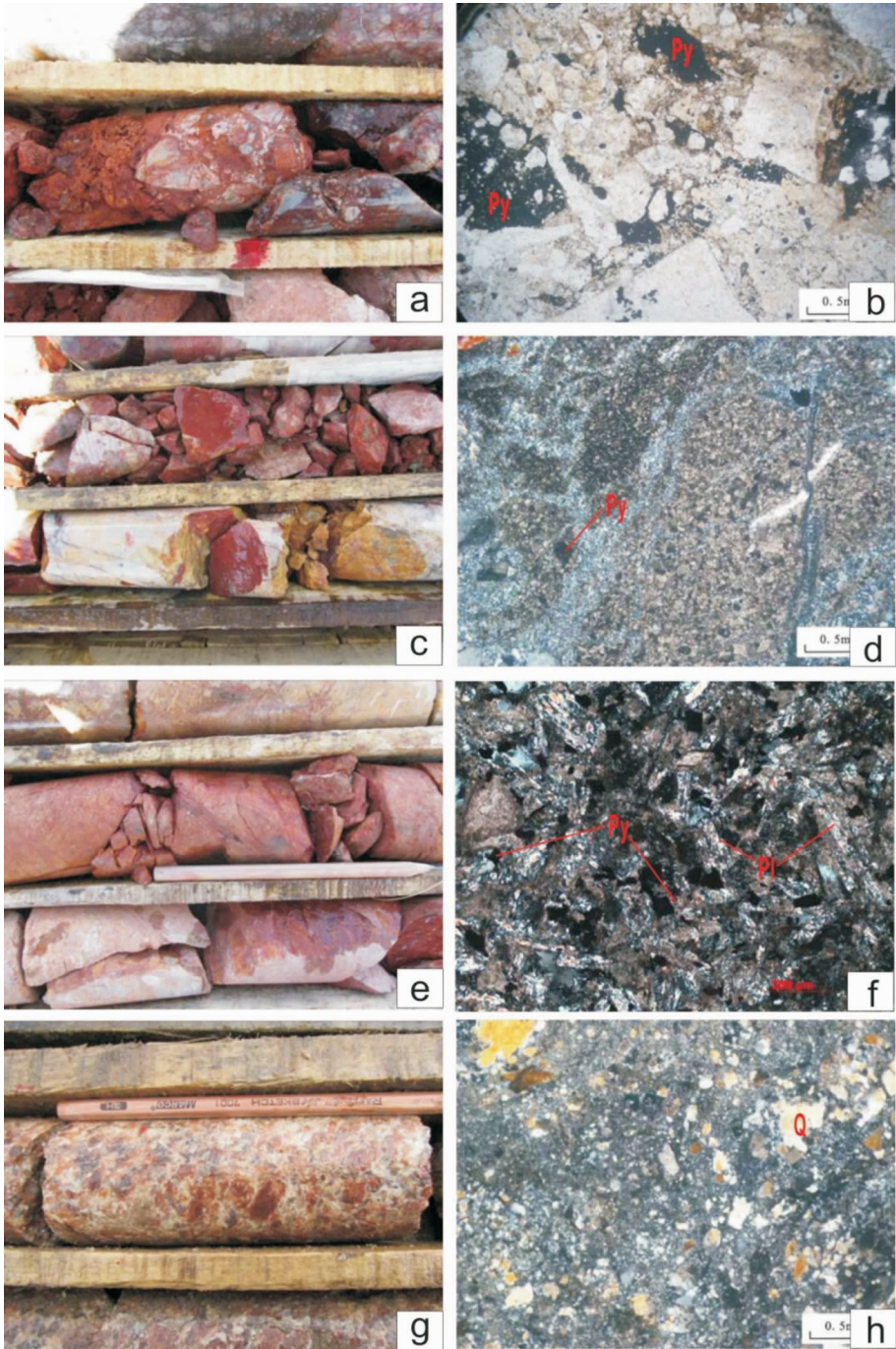
革命沟矿床铀矿石主要为含矿构造角砾岩和含矿角闪岩,占矿石总量的 88%,其次为含矿大理岩和含矿花岗岩(图 3);矿石结构主要有胶状、蠕虫状和不规则粒状结构;矿石的构造主要有脉状、网脉状-角砾状构造、脉状-浸染状构造和浸染状构造。矿石金属矿物主要有黄铁矿和胶状黄铁矿;脉石矿物主要有微晶石英和玉髓,随含矿岩石不同还有少量方解石或高岭土等矿物。



1. 新元古界孩母山群下组千枚岩;2. 中元古界墩子沟群大理岩;3. 加里东中期花岗岩;4. 角闪岩;5. 坑道;6. 断裂;7. 矿体;8. 矿体

图 2 革命沟矿床勘探线剖面示意图

Fig. 2 Map of exploration line of Geminggou deposit



a. 含矿构造角砾岩性特征;b. 含矿构造角砾岩镜下特征(+);c. 含矿大理岩岩性特征;d. 含矿大理岩镜下特征(+);e. 含矿角闪岩岩性特征;f. 含矿角闪岩镜下特征(+);g. 含矿花岗岩岩性特征;h. 含矿花岗岩镜下特征(+)

图 3 革命沟矿床矿石特征图

Fig. 3 Ore characteristic map of Geminggou deposit

3.3 U 存在形式

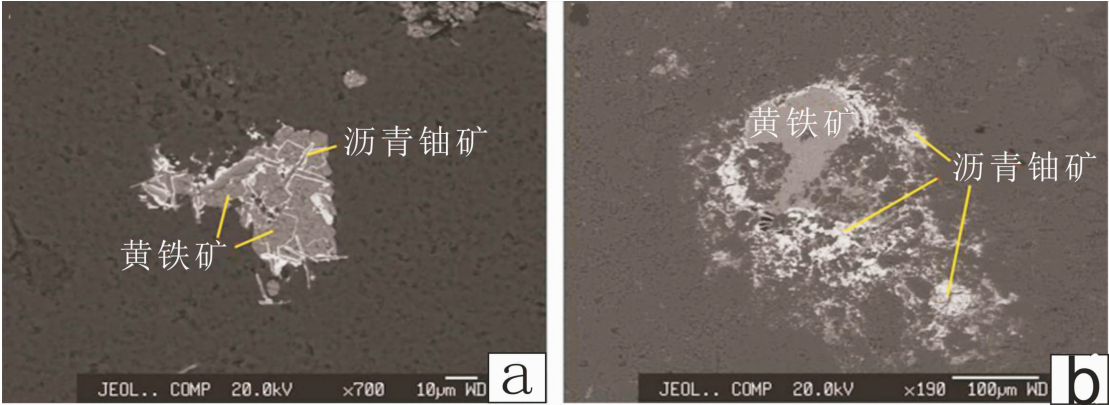
铀矿物主要为沥青铀矿,沥青铀矿颗粒极小,肉眼难以辨认。镜下观察,铀矿物呈不规则粒状、蠕虫

状或不规则脉状。

沥青铀矿最大颗粒为 0.051 mm,最小颗粒为 0.009 4 mm,平均粒径为 0.081 mm。沥青铀矿与

胶黄铁矿细脉和黑色硅质细脉关系密切,并见有沥青铀矿溶蚀黄铁矿的现象(图 4)。其次在各类矿石

中均有呈分散状态的 U 存在,主要被钛铁矿、黏土矿物、玉髓和铁质等吸附。



a. 沥青铀矿沿黄铁矿裂隙充填;b. 沥青铀矿溶蚀黄铁矿

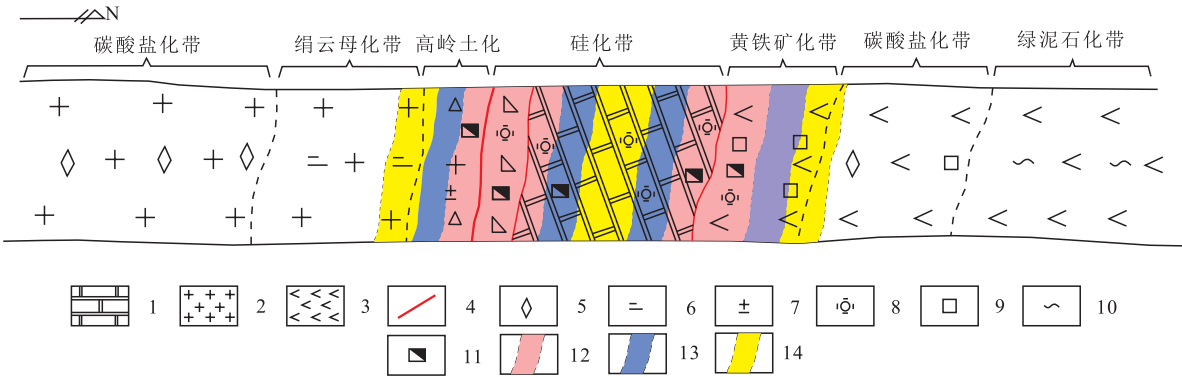
图 4 革命沟矿床沥青铀矿电子探针图像

Fig. 4 Electronic probe image of bituminous uranium ore in Geminggou deposit

3.4 蚀变分带

热液蚀变主要受构造的控制,构造岩石与蚀变岩石分布基本一致,蚀变主要沿革命沟断裂和北西向次级断裂发育,由于断裂两侧的岩性不同,蚀变发育的程度也不同,上盘花岗岩中主要发育

硅化→赤铁矿化→高岭土化→绢云母化→绿泥石化蚀变组合,蚀变晕圈最宽可达 20 m;下盘的大理岩、构造角砾岩和角闪岩中主要发育硅化→赤铁矿化→黄铁矿化→碳酸盐化→绿泥石化组合(图 5)。



1. 大理岩;2. 花岗岩;3. 角闪岩;4. 断裂;5. 碳酸盐化;6. 绢云母化;7. 高岭土化;8. 硅化;9. 黄铁矿化;10. 绿泥石化;11. 赤铁矿化;12. 工业矿体;13. 矿化体;14. 异常体

图 5 革命沟矿床蚀变水平分带示意图

Fig. 5 Map of alteration horizontal zoning of Geminggou deposit

硅化沿断裂中心及两侧分布,最宽可达 10 m,一般宽 1~2 m,主要为微晶石英集合体,以胶状物和脉状形式产出,有强烈交代作用,与矿化关系密切;赤铁矿化主要呈浸染状分布于矿物颗粒间,伴随硅化、绢云母化、碳酸盐化出现;黄铁矿化主要沿构造分布于矿化岩石中,产出形式有结晶良好的晶质黄铁矿和胶状黄铁矿;碳酸盐化主要分布在角闪岩

和花岗岩内,蚀变矿物主要是白云石和方解石。白云石呈他形粒状,浅褐色,主要交代长石类和角闪石类矿物;方解石多为白色,呈细脉状;绢云母化主要见于花岗岩之中,与高岭土一起组成绢云母-高岭土化带。

3.5 地球化学特征

由于革命沟矿床矿石主要为含矿构造角砾岩和

含矿角闪岩,故本次研究重点采集了构造角砾岩3件样品、矿化构造角砾岩3件样品、含矿构造角砾岩3件样品、角闪岩3件样品、矿化角闪岩3件样品和含矿角闪岩3件样品进行研究。主量元素分析在核工业二〇三研究所分析测试中心完成,检测使用仪器为荷兰帕纳科公司制造的 Axios X 射线光谱仪,稀土元素检测使用的是荷兰帕纳科制造的 Axios 型 X 射线光谱仪和美国 Thermo Fisher 制造的 XSERIES II 型 ICP-MS; U、Th 元素检测使用的是核工业北京地质研究院制造的 MUA 型激光荧光仪。分析测试结果分别见表1、表2。

3.5.1 主量元素特征

含矿构造角砾岩的 SiO_2 平均含量为 76.83%, Al_2O_3 的平均含量为 13.92%, FeO 的平均含量为 0.29%, Fe_2O_3 的平均含量为 0.37%, MgO 的平均含量为 0.24%, CaO 的平均含量为 0.44%, Na_2O 的平均含量为 0.01%, K_2O 的平均含量为 0.58%, P_2O_5 的平均含量为 0.31%, MnO 的平均含量为 0.01%, TiO_2 的平均含量为 0.78%, 烧矢量的平均含量为 5.65%(表1)。从构造角砾岩—矿化构造角砾岩—含矿构造角砾岩来看, SiO_2 和 Al_2O_3 的平均含量逐步增加, P_2O_5 和 TiO_2 的平均含量也明显增加, MgO 、 CaO 和烧矢量的平均含量明显逐步减少, 反映出铀成矿作用过程主要是一个方解石、白云石含量大量减少, 硅质含量大量增加的过程。

含矿角闪岩的 SiO_2 平均含量为 53.18%, Al_2O_3 的平均含量为 13.20%, FeO 的平均含量为 5.31%, Fe_2O_3 的平均含量为 2.00%, MgO 的平均含量为 2.72%, CaO 的平均含量为 5.20%, Na_2O 的平均含量为 2.10%, K_2O 的平均含量为 1.27%, P_2O_5 的平均含量为 0.63%, MnO 的平均含量为 0.06%, TiO_2 的平均含量为 2.36%, 烧矢量的平均含量为 14.85%(表1)。从角闪岩—矿化角闪岩—含矿角闪岩看, SiO_2 的平均含量明显逐步增加, 其余主量元素变化不明显, 说明硅化是铀成矿作用过程中最主要的蚀变特征。

3.5.2 稀土元素特征

构造角砾岩、矿化构造角砾岩和含矿构造角砾岩的稀土元素总量(ΣREE)平均值分别为 15.53×10^{-6} 、 9.33×10^{-6} 、 309.43×10^{-6} , LREE/HREE 平均值分别为 11.13、6.26 和 19.79, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 平均值分别为 13.81、6.91 和 32.84, δEu 平均值分别为 1.41、1.85 和 0.72(表2)。含矿构造角砾岩相比构造角砾岩和矿化构造角砾岩, 稀土元素总量

(ΣREE) 显著增加, LREE/HREE 以及 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值均有增大的趋势, 轻、重稀土元素分馏作用更明显, Eu 由正异常变为负异常(图6a), 说明热液成矿作用带来了大量的外来组分。

角闪岩、矿化角闪岩和含矿角闪岩的稀土元素总量(ΣREE)平均值分别为 246.14×10^{-6} 、 241.73×10^{-6} 、 202.67×10^{-6} , LREE/HREE 平均值分别为 8.24、8.21 和 7.31, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 平均值分别为 13.71、12.74 和 10.16, δEu 平均值分别为 0.92、0.92 和 1.01(表2)。含矿角闪岩相比角闪岩和矿化角闪岩, 稀土元素总量(ΣREE)呈略微下降的趋势, LREE/HREE 值以及 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值均变化不明显, Eu 均呈较弱正异常或负异常, 整体具有相似的变化趋势, 呈左陡右缓的配分模式(图6b)。

4 控矿要素

4.1 断裂控矿

断裂构造是该区铀成矿的第一控矿要素, 控制着铀矿体的分布、规模及形态。铀矿化主要受到革命沟断裂和其次级断裂的控制, 革命沟断裂的上下盘都可以形成工业矿体, 但大部分矿化赋存在革命沟断裂下盘的构造角砾岩、大理岩和角闪岩脉中, 少量矿化产于断裂上盘的碎裂花岗岩内。在革命沟断裂斜列部位, 单体构造走向与总体走向交角较大的地段控制大部分矿体, 这类矿体单体规模较大, 但分布不集中; 与主干断裂呈入字型相交的分支断裂控制了全部脉岩中的矿体, 这类矿体单体小、厚度薄, 成群出现。

4.2 岩性界面控矿

革命沟断裂与北部断裂之间呈狭长的构造角砾岩、大理岩带, 具硬、脆的物理特点, 当富酸硅质热液进入大理岩时易碎、易裂, 容易形成赋矿空间, 同时构造角砾岩、大理岩的化学成分和矿液成分相差很大, 硅质不断得到补充, CO_2 改变热液性质, S^{2-} 、 H_2S 促使沥青铀矿的生成沉淀, 这是一种特定的地球化学环境。在革命沟断裂下盘, 沿构造充填的脉状角闪岩体, 因含较多的 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 等金属阳离子对沿构造上升的含矿溶液中的 U^{6+} 有一定的还原富集作用, 同时经过构造破碎, 为含矿热液提供了非常有利的容矿空间, 为热液减压区, 蚀变角闪岩脉的规模越大, 破碎程度越高, 越有利于含矿热液的富集成矿, 故矿体多产于构造角砾岩、大理岩与角闪岩接触破碎蚀变带。

表 1 构造角砾岩和角闪岩主量元素表(%)
Tab. 1 Major elements of tectonic breccia and amphibolite (%)

样号	岩性	U(10 ⁻⁶)	Th(10 ⁻⁶)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	MnO	TiO ₂	烧失量	总量
Y-1	构造角砾岩	4.70	3.43	18.63	0.72	0.32	0.28	18.07	24.50	0.05	0.05	0.02	0.02	0.02	37.78	100.46
Y-2		22.10	1.84	8.55	1.04	0.09	0.71	19.88	26.64	0.05	0.06	0.02	0.01	0.04	42.20	99.29
Y-3		23.30	2.00	6.70	0.91	0.06	0.60	20.92	27.16	0.05	0.05	0.02	0.01	0.04	43.86	100.38
平均值		16.70	2.42	11.29	0.89	0.16	0.53	19.62	26.10	0.05	0.05	0.02	0.01	0.03	41.28	100.04
Y-4	矿化构造角砾岩	120.00	1.66	51.71	0.56	3.11	1.09	7.36	9.81	0.05	0.10	0.02	0.02	0.02	26.24	100.09
Y-5		125.00	3.82	41.44	7.18	1.69	0.57	0.33	2.25	3.93	1.09	0.08	0.08	0.24	41.60	100.48
Y-6		413.00	1.75	29.67	0.78	0.26	0.53	15.56	20.47	0.05	0.05	0.02	0.02	0.02	32.88	100.31
平均值		219.33	2.41	40.94	2.84	1.69	0.73	7.75	10.84	1.34	0.41	0.04	0.04	0.09	33.57	100.29
Y-7	含矿构造角砾岩	726.00	25.60	76.29	14.03	0.55	0.24	0.35	0.81	0.01	0.83	0.25	0.01	0.63	5.52	99.52
Y-8		1 040.00	30.90	71.12	18.02	0.21	0.34	0.18	0.22	0.01	0.53	0.47	0.01	1.17	7.12	99.40
Y-9		1 340.00	13.70	83.08	9.71	0.34	0.28	0.20	0.28	0.01	0.39	0.22	0.01	0.53	4.30	99.35
平均值		1 035.33	23.40	76.83	13.92	0.37	0.29	0.24	0.44	0.01	0.58	0.31	0.01	0.78	5.65	99.42
Y-10	角闪岩	5.80	4.32	39.02	12.94	3.13	9.46	2.79	4.02	0.06	0.69	1.72	0.04	5.55	10.43	89.85
Y-11		7.49	3.10	38.61	11.50	2.30	8.94	5.69	8.18	1.20	1.03	1.48	0.17	4.80	10.23	94.13
Y-12		22.60	3.93	34.01	8.76	2.13	7.28	4.45	7.47	0.05	2.96	0.75	0.07	4.03	27.89	99.85
平均值		11.96	3.78	37.21	11.07	2.52	8.56	4.31	6.56	0.44	1.56	1.32	0.09	4.79	16.18	94.61
Y-13	矿化角闪岩	101.00	2.63	36.18	11.93	3.61	7.92	3.17	3.80	0.06	0.73	1.50	0.05	4.93	10.72	84.60
Y-14		111.00	3.12	39.97	13.92	4.92	8.45	4.05	4.87	0.06	0.76	1.65	0.08	5.40	13.23	97.36
Y-15		388.00	4.72	37.67	8.85	1.94	9.28	3.45	5.61	0.05	2.24	0.32	0.05	3.03	27.41	99.90
平均值		200.00	3.49	37.94	11.57	3.49	8.55	3.56	4.76	0.06	1.24	1.16	0.06	4.45	17.12	93.95
Y-16	含矿角闪岩	524.00	4.05	60.64	11.52	0.67	3.87	0.71	3.29	0.05	0.23	1.52	0.01	5.17	12.35	100.03
Y-17		685.00	3.20	41.66	14.05	3.58	10.07	6.42	9.76	0.06	1.58	0.22	0.10	1.37	19.36	108.23
Y-18		750.00	6.46	57.23	14.03	1.75	2.00	1.03	2.54	6.20	2.01	0.15	0.08	0.53	12.84	100.39
平均值		653.00	4.57	53.18	13.20	2.00	5.31	2.72	5.20	2.10	1.27	0.63	0.06	2.36	14.85	102.88

表 2 构造角砾岩和角闪岩稀土元素表(10^{-6})
Tab. 2 Table of rare earth elements in structural breccia and amphibolite(10^{-6})

样号	岩性	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	LREE	HREE	LREE/ HREE	La _N / Y _{Bn}	δEu	δCe
Y-1	构造角砾岩	2.55	2.69	4.90	0.58	2.24	0.45	0.12	0.51	0.09	0.40	0.09	0.16	0.04	0.26	0.03	12.56	10.98	1.58	6.97	7.42	0.77	0.96
Y-2		1.68	4.91	16.30	0.86	2.64	0.39	0.26	0.60	0.04	0.28	0.08	0.17	0.03	0.14	0.03	26.72	25.36	1.36	18.59	25.16	1.64	1.94
Y-3		1.00	1.48	3.40	0.25	1.07	0.16	0.12	0.25	0.05	0.18	0.05	0.13	0.03	0.12	0.02	7.31	6.48	0.83	7.82	8.85	1.83	1.37
平均值		1.74	3.03	8.20	0.56	1.98	0.33	0.17	0.45	0.06	0.29	0.07	0.15	0.03	0.17	0.03	15.53	14.27	1.26	11.13	13.81	1.41	1.43
Y-4	矿化构造角砾岩	1.59	1.55	3.83	0.31	1.27	0.32	0.23	0.36	0.06	0.28	0.09	0.16	0.02	0.12	0.03	8.63	7.51	1.12	6.71	9.27	2.07	1.35
Y-5		1.67	1.99	4.22	0.36	1.47	0.40	0.27	0.35	0.06	0.31	0.07	0.17	0.02	0.22	0.03	9.94	8.71	1.23	7.06	6.49	2.21	1.22
Y-6		1.84	1.80	3.89	0.31	1.38	0.33	0.14	0.34	0.07	0.41	0.10	0.30	0.05	0.26	0.05	9.42	7.85	1.57	5.00	4.97	1.28	1.28
平均值		1.70	1.78	3.98	0.33	1.37	0.35	0.21	0.35	0.06	0.33	0.09	0.21	0.03	0.20	0.04	9.33	8.02	1.31	6.26	6.91	1.85	1.28
Y-7	含矿构造角砾岩	21.20	83.60	143.00	13.60	52.00	6.61	1.51	6.00	0.62	3.14	0.61	1.96	0.25	1.81	0.25	314.96	300.32	14.64	20.51	33.13	0.73	1.04
Y-8		35.10	99.10	190.00	19.60	78.70	9.24	2.11	8.75	0.91	4.45	0.87	2.59	0.33	2.29	0.37	419.31	398.75	20.56	19.39	31.04	0.72	1.06
Y-9		18.30	52.20	88.10	8.21	31.50	3.67	0.86	3.84	0.41	2.05	0.41	1.34	0.16	1.09	0.18	194.02	184.54	9.48	19.47	34.35	0.70	1.04
平均值		24.87	78.30	140.37	13.80	54.07	6.51	1.49	6.20	0.65	3.21	0.63	1.96	0.25	1.73	0.27	309.43	294.54	14.89	19.79	32.84	0.72	1.05
Y-10	角闪岩	34.90	42.30	103.30	14.20	67.00	14.10	3.95	11.90	1.41	6.96	1.16	2.76	0.31	1.87	0.22	271.44	244.85	26.59	9.21	16.23	0.93	1.03
Y-11		34.40	45.70	104.80	14.20	67.80	13.00	4.01	11.30	1.33	6.51	1.12	2.65	0.29	1.85	0.22	274.78	249.51	25.27	9.87	17.72	1.01	1.01
Y-12		33.10	29.80	68.00	9.39	43.50	10.00	2.58	9.32	1.63	8.10	1.72	4.13	0.58	2.98	0.47	192.20	163.27	28.93	5.64	7.17	0.82	1.00
平均值		34.13	39.27	92.03	12.60	59.43	12.37	3.51	10.84	1.46	7.19	1.33	3.18	0.39	2.23	0.30	246.14	219.21	26.93	8.24	13.71	0.92	1.01
Y-13	矿化角闪岩	30.60	40.90	100.60	13.50	63.00	12.80	3.62	10.50	1.30	6.25	0.99	2.55	0.27	1.72	0.23	258.23	234.42	23.81	9.85	17.06	0.95	1.05
Y-14		33.70	46.50	109.20	14.50	70.40	13.80	4.05	11.60	1.34	6.49	1.10	2.65	0.30	2.01	0.22	284.16	258.45	25.71	10.05	16.59	0.98	1.03
Y-15		38.80	27.80	63.20	8.86	38.70	9.81	2.55	9.07	1.73	8.94	1.92	4.58	0.72	4.36	0.55	182.79	150.92	31.87	4.74	4.57	0.83	0.99
平均值		34.37	38.40	91.00	12.29	57.37	12.14	3.41	10.39	1.46	7.23	1.34	3.26	0.43	2.70	0.33	241.73	214.60	27.13	8.21	12.74	0.92	1.02
Y-16	含矿角闪岩	18.10	41.10	90.60	12.20	55.90	11.70	3.80	9.31	1.27	4.98	0.87	1.89	0.25	1.53	0.21	235.61	215.30	20.31	10.60	19.27	1.11	0.99
Y-17		32.60	25.40	58.00	7.15	31.00	6.72	1.96	5.83	0.86	5.28	1.03	2.84	0.38	2.60	0.35	149.40	130.23	19.17	6.79	7.01	0.96	1.06
Y-18		50.60	32.50	77.60	10.40	47.00	11.70	3.54	10.70	2.15	11.50	2.70	6.00	0.93	5.55	0.74	223.01	182.74	40.27	4.54	4.20	0.97	1.03
平均值		33.77	33.00	75.40	9.92	44.63	10.04	3.10	8.61	1.43	7.25	1.53	3.58	0.52	3.23	0.43	202.67	176.09	26.58	7.31	10.16	1.01	1.03

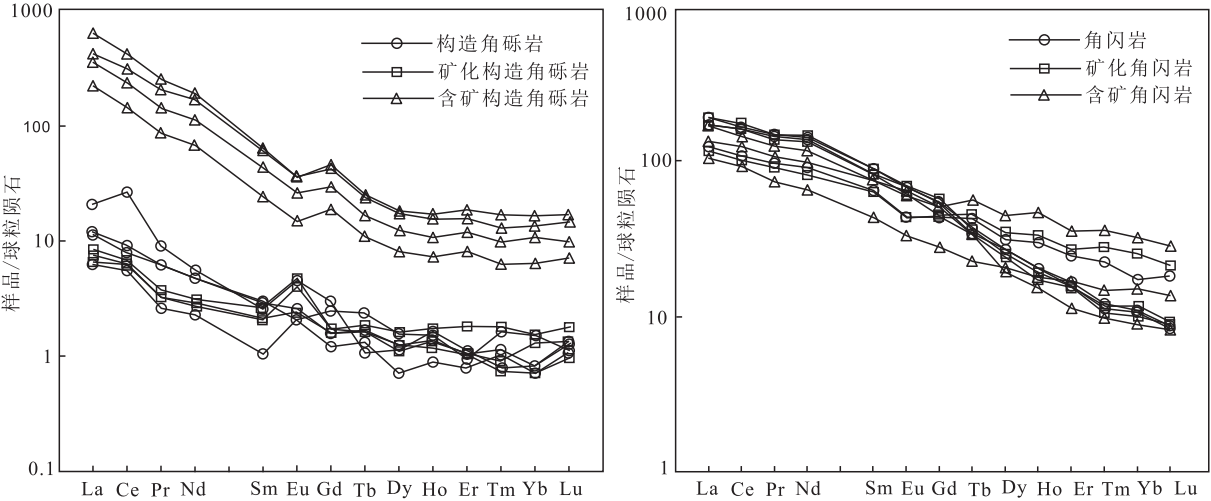


图 6 (a)构造角砾岩球粒陨石标准化稀土元素配分图和(b)角闪岩球粒陨石标准化稀土元素配分图

Fig. 6 Standardized REE partition maps of (a) tectonic breccia and (b) amphibolite chondrites

4.3 蚀变控矿

矿化多赋存在规模宏大且多期构造叠加的硅化蚀变带内,热液活动的强弱和活动期次决定着铀矿体的富集程度,因此热液活动越强烈,蚀变越发育,矿床较富的矿体均产在多次形成的强硅化蚀变岩中。

5 矿床成因探讨

龙首山成矿带南、北两带呈现出不同的铀矿化特征。南带以茆岭钠交代岩铀矿床为代表(史长昊, 2016),发育钠长石化、赤铁矿化、碳酸盐化和绿泥石化为主的蚀变组合(刘金枝等, 2010; 程学友等, 2005; 刘正义等, 2018); 北带以革命沟硅质岩铀矿床为代表(宋振涛等, 2018; 陈云杰等, 2015),发育以硅化、赤铁矿化、绢云母化、高岭土化和黄铁矿化为主的蚀变组合。革命沟矿床围岩 U 含量较高, 具有较好的铀源条件, 在热液作用过程中, 热液不断与围岩进行着能量和物质的交换, 形成富 U 的含矿热液, 含矿热液沿革命沟断裂及其次级断裂运移, 当温度、压力和 pH 值等发生变化时, 均可导致铀矿物的卸载成矿。在不同的围岩环境中形成不同的矿石, 由于不同矿石组分不同, 在热液作用过程中矿石组分的变化有所不同, 表现出不同的蚀变组合, 但均伴随着 Si 含量的明显增加。Si 在铀成矿溶液中的溶解度主要受温度和 pH 值的影响(刘成东等, 2017), 当温度降低, pH 值减小时, Si 易出现饱和析出, 并可导致铀矿物的沉淀。当含矿热液运移到构造角砾岩中, 由于存在大量的微裂隙, 沥青铀矿主要以充填

于微裂隙的方式沉淀; 当运移到构造角砾岩、大理岩与角闪岩接触面时, 由于地球化学环境的变化, 围岩中提供了大量的 S^{2-} 、 H_2S 等还原剂, 含矿热液与围岩发生热交代作用, 致使沥青铀矿发生沉淀。因此, 认为革命沟矿床是沿构造两侧以充填裂隙和交代围岩等方式形成的热液型铀矿床。

6 结论

- (1) 铀矿化主要受革命沟断裂及其次级断裂, 构造角砾岩、大理岩和角闪岩岩性界面和硅化蚀变带多种要素综合控制。
- (2) 不同的矿石发育不同的蚀变组合, 总体以发育硅化、赤铁矿化、绢云母化、高岭土化和黄铁矿化蚀变为主。
- (3) 不同矿石表现出不同的地球化学特征, 但均伴随着硅含量的明显增加。
- (4) 革命沟矿床为热液成因铀矿床, 主要以充填裂隙和交代围岩等方式形成沥青铀矿物。

参考文献(References):

杜乐天. 中国热液铀成矿理论体系[J]. 铀矿地质, 2011, 27(02): 65-68+80.
DU Letian. On the theory system of hydrothermal uranium metalization in China[J]. Uranium Geology, 2011, 27(02): 65-68+80.
刘正义, 王生云, 顾大钊, 等. 龙首山茆岭铀矿床含矿主岩特

- 征及铀矿床成因讨论[J]. 西北地质, 2018, 51(02): 160-170.
- LIU Zhengyi, WANG Shengyun, GU Dazhao, et al. Discussion on the Characteristics of Ore-bearing Rock and the Genesis of the Jiling Uranium Deposit [J]. Northwestern Geology, 2018, 51(02): 160-170.
- 王伟, 马骥, 陈云杰, 等. 龙首山菱岭岩体北带正长岩型铀矿的矿化特征及成矿规律[J]. 矿产与地质, 2019, 33(02): 254-263+295.
- WANG Wei, MA Li, CHEN Yunjie, et al. Mineralization characteristic and metallogenic regularity of syenite type in northern of Jiling rock mass, Longshoushan metallogenic belt [J]. Mineral and Geology, 2019, 33(02): 254-263 + 295.
- 张新虎. 龙首山古裂谷带的基本特征及其演化历史[J]. 西北地质, 1992, (01): 6-13.
- ZHANG Xinhui. Basic characteristics and evolution history of the Longshoushan ancient rift zone [J]. Northwestern Geology, 1992, (01): 6-13.
- 赵如意, 陈云杰, 武彬, 等. 甘肃龙首山菱岭地区钠交代型铀矿成矿模式研究[J]. 地质与勘探, 2013, 49(01): 67-74.
- ZHAO Ruyi, CHEN Yunjie, WU Bin, et al. A Metallogenic model of the Sodic-Metasomatic Type Uranium Ore Deposit in the Jiling area of Longshoushan, Gansu Province [J]. Geology and Exploration, 2013, 49(01): 67-74.
- 张良, 张树明, 魏正宇, 等. 龙首山菱岭地区基性岩脉地球化学特征及其地质意义[J]. 西北地质, 2017, 50(04): 23-32.
- ZHANG Liang, ZHANG Shuming, WEI Zhengyu, et al. Geochemical Characteristics of Basic Dikes from Jiling Area in Longshoushan and Its Geological Significance [J]. Northwestern Geology, 2017, 50(04): 23-32.
- 聂利, 赵如意, 陈旭, 等. 甘肃省龙首山成矿带菱岭岩体闪长岩特征及其与铀成矿关系[J]. 现代地质, 2016, 30(04): 760-769.
- NIE Li, ZHAO Ruyi, CHEN Xu, et al. Characteristics of Diorite from Jiling Pluton and Its Relationship with Uranium Metallogenic in Longshou Mountains, Gansu Province [J]. Modern Geology, 2016, 30(04): 760-769.
- 赵如意. 甘肃省龙首山成矿带菱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, 2016.
- ZHAO Ruyi. The Study on Geological Characteristics and Metallogeny of Jiling Sodium-metasomatic Uranium Deposit in Longshou Mountain Metallogenic Belt in Gansu Province [D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.
- 史长昊. 甘肃龙首山地区碱交代型铀钍矿床地质及成矿流体研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.
- SHI Changhao. Study on Geology and Ore-forming Fluid of Typical Alkaloid U-Th Deposits in Longshoushan Area [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2017.
- 刘金枝, 安伟涛. 龙首山钠交代热液型铀矿床的碱交代作用研究[J]. 科技广场, 2010, (07): 187-189.
- LIU Jinzhi, AN Weitao. Study of Alkali Metasomatism on the Hydrothermal Uranium Deposit of Sodium Metasomatism in Longshou Mountain [J]. Science and Technology Square, 2010, (07): 187-189.
- 程学友, 牛林. 钾、钠交代作用与铀、金、铁等内生金属矿产的关系[J]. 铀矿地质, 1995, (05): 278-283+313.
- CHENG Xueyou, NIU Lin. Relationship between metasomatism of potassium and sodium and endogenetic metallic minerals such as uranium, gold and iron [J]. Uranium Geology, 1995, (05): 278-283+313.
- 黄净白, 黄世杰. 中国铀资源区域成矿特征[J]. 铀矿地质, 2005, (03): 129-138.
- HUANG Jingbai, HUANG Shijie. Regional metallogenic characteristics of uranium resources in China [J]. Uranium Geology, 2005, (03): 129-138.
- 刘正义, 戚大能. 512矿床可地浸砂岩铀成矿环境模拟实验[J]. 铀矿地质, 2000, (06): 362-374.
- LIU Zhengyi, QI Daneng. In situ leachable sandstone uranium metallogenic environment simulation experiment of deposit 512 [J]. Uranium Geology, 2000, (06): 362-374.
- 宋振涛, 赵红瑞, 祁程, 等. 硅质脉型铀矿床地质特征及成矿机制探讨——以甘肃革命沟矿床为例[J]. 矿产勘查, 2018, 9(01): 45-54.
- SONG Zhentao, ZHAO Hongrui, QI Cheng, et al. discussion on geological characteristics and metallogenic mechanism of siliceous vein type uranium deposits-Taking the revolutionary Valley deposit in Gansu Province as an example [J]. Mineral Exploration, 2018, 9(01): 45-54.
- 陈云杰, 傅成铭, 王伟, 等. 甘肃省龙首山革命沟铀矿床围岩蚀变地球化学特征[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2015, 38(03): 257-264.
- CHEN Yunjie, FU Chengming, WANG Wei, et al. Geochemical characteristics of wall rock alteration in revolutionary Valley uranium deposit, Longshoushan, Gansu Province [J]. Journal of Donghua University of Technology (Natural Science Edition), 2015, 38(03): 257-264.
- 刘成东, 梁良. 热液铀矿床的沥青铀矿研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2017, 36(02): 339-344.
- LIU Chengdong, LIANG Liang. Research progress of pitchblende in hydrothermal uranium deposits [J]. Bulletin of Mineral Rock Geochemistry, 2017, 36(02): 339-344.