

龙首山茈岭铀矿床含矿主岩特征及铀矿床成因讨论

刘正义¹, 王生云¹, 顾大钊², 刘红旭¹, 杜乐天¹, 高洪雷¹

(1. 核工业北京地质研究院, 北京 100029; 2. 中国核工业集团公司, 北京 100045)

摘要:龙首山岩浆活动带是以典型碱交代矿床为特点的铀成矿带, 大型矿床往往是以发育大型碱交代作用为前提。茈岭铀矿床属于加里东—华力西期与俯冲作用有关的岩浆热液组合。该区加里东早期和华力西期花岗岩, 分别是祁连洋向北俯冲及陆内俯冲的产物。笔者经长期野外研究, 通过大量显微镜下观察、常量、微量元素和同位素测定等室内分析与综合, 对茈岭铀矿床花岗岩含矿主岩主要特征及铀矿床成因作一初步总结。

关键词:茈岭铀矿床; 含矿主岩特征; 铀矿床成因讨论

中图分类号: P578.962; P619.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-6248(2018)02-0160-11

Discussion on the Characteristics of Ore-bearing Rock and the Genesis of the Jiling Uranium Deposit

LIU Zhengyi¹, WANG Shengyun¹, GU Dazhao², LIU Hongxu¹, DU Letian¹, GAO Honglei¹

(1. Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China;

2. China National Nuclear Corporation, Beijing 100045, China)

Abstract: The Longsushan magmatic activity belt is a uranium metallogenic belt characterized by typical alkali-metasomatite uranium. The large ore deposit is always closely related to alkali-metasomatism. The Jiling uranium deposit is attributed to Galedonian-Variscan magmatic hydrothermal fluids related to subduction. The Galedonian and Hercynian granites are respectively the products of northward and intracontinental subduction of Qilian ocean plate. According to the long-term field study and indoor comprehensive analysis (including microexamination, trace element and isotopic measurement), the characteristics of ore bearing rock and the genesis of the Jiling uranium deposit have been summarized in this paper.

Keywords: Jiling uranium deposit; feature of ore bearing rock; genesis of ore deposits

龙首山岩浆活动带是中国内陆一条极具特色的铀成矿带, 其西段发育世界上少有的伟晶状白岗岩型红石泉铀矿床, 东段产有世界著名的与超基性岩有关的 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床, 中段产有与加里

东花岗岩有关的碱交代型铀矿床茈岭(701)矿床和新水井(706)矿床。碱(钠)交代型铀矿床深受广大核地质工作者的关注, 几十年来已发表有不少代表性专著(王传文等, 1963; 杜乐天, 1982, 1986, 1996,

收稿日期: 2017-11-28; 修回日期: 2017-12-20

基金项目: 中国核工业地质局科研专项“一龙首山铀成矿带关键控矿要素研究及远景评价”(201654)项目资助

作者简介: 刘正义(1936-), 男, 研究员级高级工程师, 长期从事铀矿床地球化学和实验地球化学研究工作。E-mail: wang-sy2013@126.com

2001, 2015; 杜乐天等, 1995), 其对肯定该矿床热液钠交代类型及碱交代等理论突破和推广具有非常重要意义。对研究区含矿主岩及铀矿床成因这一关键问题, 笔者据长期野外工作和近来大量镜下观察, 包括各种分析资料整理结果初步探讨如下。

1 大地构造位置和区域地质构造格架及其区域地层含铀(钍)性

1.1 大地构造位置和区域地质构造格架

研究区位于华北板块西南边缘、华北板块龙首山陆缘带内。南倚华北板块的河西走廊弧后海盆以及北祁连缝合带; 南为另一构造单元——中祁连板块的中祁连离散型岛弧地体(汤中立等, 1999)。据近期发表中国板块划分意见, 该区处于一级柴达木-华北陆块大地构造单元, 阿拉善微陆块二级构造单元, 三级构造单元龙首山-雅布赖山地块中, 其北邻狼山古生代拗陷带, 东邻腾格里增生楔 2 个三级构造单元, 南邻祁连早古生代造山带二级构造单元中的河西走廊新生代盆地及北祁连晚元古—早古生代海沟系、中祁连古岛弧 3 个三级构造单元(刘训等, 2015)。

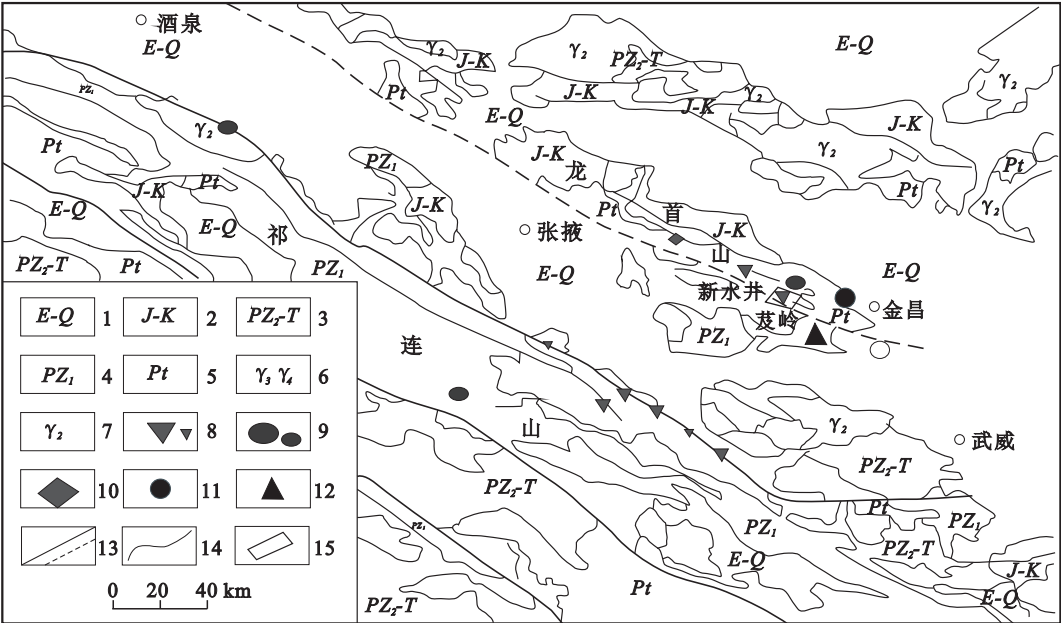
龙首山地区发育有 828~845 Ma 金川超镁铁质侵入体和 971~845 Ma 片理化花岗岩体。金川岩体中产有储量居全球第三位的 Cu-Ni 硫化物矿床。这些新元古代侵入体表明, 阿拉善陆块很可能不是华北克拉通的西部组成, 而是一块碎裂后的 Rodinia 超大陆的碎块, 具有与南面祁连陆块相似的构造属性(夏林圻等, 2016)。祁连陆块是一个具有古生代沉积岩系盖层和前寒武系基底的叠瓦式逆冲带, 陆块西南出露古元古代花岗片麻岩(2.47~2.2 Ga)、淡色花岗岩(1.96~1.91 Ga)和环斑花岗岩(1.77~1.76 Ga)组成的前寒武纪杂岩, 研究者认为北祁连洋的海底扩张可能一直延续到 516 Ma。全球性早古生代大洋是在新元古代由于 Rodinia 超大陆裂解而被打开。该大洋在早古生代末闭合和最终碰撞, 形成了欧洲加里东造山带和中国的中央造山带。祁连陆块和阿拉善陆块碰撞之前, 520 Ma 开始, 北祁连大洋岩石圈是向北或北东方向俯冲到阿拉善陆块之下, 与此同时南祁连大洋岩石圈是向北俯冲到祁连陆块之下。洋壳俯冲过程中, 洋壳组分逐渐转变榴辉岩相, 脱水释放独立的流体 H_2O , 随着俯冲加

深发生富 H_2O 中性和酸性部分熔融体, 尔后进入地幔楔, 并被有效降低其固相线促使发生熔融引发岛弧岩浆作用。大约在 520 Ma 时, 低角度向北俯冲的北祁连大洋板片发生陡角度回转, 诱发岛弧后方软流层上涌引发弧后岩石圈伸展形成北祁连弧后盆地, 进而导致弧后盆地产生早寒武世—晚奥陶世(520~445 Ma)弧后盆地的火山作用。奥陶纪末—晚志留世 445~420 Ma 洋盆闭合, 445 Ma 时北祁连大洋板片断离诱发软流层上涌, 在祁连陆块北缘诱发产生 445~428 Ma 碰撞后裂谷火山活动。晚志留世—早泥盆世 420~400 Ma 发生强烈地造山作用, 并于早泥盆世堆积摩拉石建造, 晚泥盆世祁连山系跨塌, 连续岩石圈伸展和拆沉作用引起地壳熔融和强烈岩浆活动, 形成晚泥盆世开始 400~370 Ma 的闪长岩-花岗闪长岩-花岗岩侵入体, 亦即同时伴有碰撞后花岗质岩浆的侵入活动。石炭纪时造山运动完全终止(夏林圻等, 2016; 林宜慧等, 2012; 林宜慧和张立飞, 2012; 沈其韩等, 2012)。

前震旦纪地层分布于研究区南北部, 中部大部分为加里东期岩浆岩, 由于岩浆岩大量侵入, 局部地层残缺不全(刘洛图等, 1985)。该区地层主要岩石为前长城纪(该区缺失长城纪)龙首山群(P_{11})混合岩化普遍发育, 其下部为白家嘴子组(P_{11}^2b), 西部出现磁铁石英岩和磁铁角闪岩(称东大山组), 为碎屑岩-含铁石英岩及基性火山岩-斜长角闪岩(Sm-Nd 同位素测定年龄为 3 182 Ma)建造, 斜长角闪岩应属中太古宙产物。龙首山群上部主要为塔马子沟组(P_{11}^2t)中酸性火山岩-碎屑岩建造(Rb-Sr 等时线年龄为 $(2\ 147 \pm 74)$ Ma), 相当于古元古代。该带缺失长城纪, 蓟县纪为复陆屑次稳定型的墩子沟群($P_{12}d$), 缺失青白口“纪”沉积, 震旦纪为冰水沉积的韩母山群(Z_2h)。古生代早期为隆起剥蚀区, 古生代晚期为碎屑岩-碳酸盐岩(含煤)建造、摩拉石建造。

该区区域成矿情况为除在太古宙古陆边缘活动带中形成大东山铁矿床外(图 1), 中元古代早期 $(1\ 508 \pm 31)$ Ma(Sm-Nd 内部等时线年龄)由于岩浆脱离地幔, 在裂解作用条件下形成金川含镍铜超基性杂岩(刘洛图等, 1985; 汤琳, 2015)(图 1)。铀矿床有菱岭 701(成矿年龄 398 Ma)、新水井 706 钠交代型(成矿年龄 366 Ma、89 Ma)、革命沟 7201 硅质脉热液型(成矿年龄 292 Ma、90 Ma)、红石泉伟晶岩型(成矿年龄 1 740 Ma、334 Ma)、玉石

沟混合岩-钾交代型矿床(成矿年龄 558 Ma)等以及大量铀、钍矿点(104、404)和异常。因此,可以说龙首山是世界上一条特殊的“铀(钍)-稀土-金属成矿带”(图 1)。



1. 老第三系—第四系;2. 侏罗系—白垩系;3. 上古生界—三叠系;4. 下古生界;5. 元古界;6. 加里东期—华力西期花岗岩;7. 晋宁期花岗岩;8. 钠交代热液型铀矿床、矿点;9. 热液型铀矿床及铀、钍矿点;10. 伟晶岩型铀矿床;11. 金川镍矿;12. 东大山铁矿;13. 主要断裂带及推测断裂带;14. 地质界线;15. 研究区

图 1 龙首山-祁连山地质略图(据汤琳等,2015)

Fig. 1 Qilian-Longshoushan schematic geological map(After TANG ling et al. ,2015)

如上所述,晚志留—早泥盆世祁连造山带进入碰撞后构造阶段,构造应力由挤压转为拉张伸展(夏林圻等,2016)。林宜慧(2010)应用多颗粒一次熔融的⁴⁰Ar/³⁹Ar 同位素方法测定了北祁连山九个泉绿帘石蓝片岩和硬柱石蓝片岩,前者获得等时线年龄为(415±7) Ma,后者为(413±5) Ma,表明硬柱石蓝片岩可能是在冷俯冲作用下形成的,代表了祁连山洋残留洋盆最后闭合的时间(沈其韩等,2012),故加里东早期和华力西期花岗岩分别是祁连洋向北俯冲及陆内俯冲的产物。

1.2 区域地层地质单元含铀(钍)性

芨岭花岗岩体侵入于富铀的震旦纪和前震旦纪变质程度较浅的片岩、硅灰岩、大理岩系,构成芨岭背斜。区内地层含铀性为前震旦纪片岩、含铁石英岩,白云质大理岩和震旦纪硅质条带状灰岩夹千枚岩。下元古界龙首山群自下而上为麒麟组(Pt₁q¹)斜长片麻岩、斜长角闪岩、变粒岩、片岩等,U、Th 丰度分别为 5.5×10⁻⁶ 和 20.1×10⁻⁶;白家咀组

(Pt₁b¹)包括阴影状、条带状等混合岩、蛇纹石化大理岩、斜长片麻岩(Rb-Sr 变质年龄为 1 652 Ma)、其 U、Th 丰度分别为 3.67×10⁻⁶ 和 15.4×10⁻⁶;塔马子沟组(Pt₁t¹)见二云石英片岩、黑云石英片岩、片麻岩夹石墨大理岩(局部含石墨),U、Th 丰度分别为 3.23×10⁻⁶ 和 11.68×10⁻⁶;中元古界墩子沟群(Pt₂d¹)为石英砂岩、变质砾岩、硅质条带灰岩、千枚岩等,U、Th 丰度分别为 2.8×10⁻⁶ 和 6.76×10⁻⁶;以不整合接触关系的上震旦统韩母山群(Z₂hm)。U、Th 丰度分别为 2.3×10⁻⁶ 和 4.9×10⁻⁶,其中下亚群(Z₂hm^a)含碳千枚岩 U 丰度较高,为 4.33×10⁻⁶~16.6×10⁻⁶,平均达 10.47×10⁻⁶,为该区的富 U 地层。部分地段含铀性为白云质大理岩,含 U 为 4.1×10⁻⁶~4.4×10⁻⁶,其余前震旦纪片岩、含铁石英岩、震旦纪硅质条带状灰岩夹千枚岩,U 含量为 6.7×10⁻⁶~10.4×10⁻⁶(刘洛图等,1985)。芨岭花岗岩 U、Th 丰度为 5.1×10⁻⁶~6.3×10⁻⁶,Th/U 值为 1.3~2.9。

2 含矿主岩特征

2.1 菱岭复式岩体时间、空间分布与规模

菱岭铀矿床位于龙首山东中段,新水井铀矿床(706)矿床在菱岭矿床西端,二者北邻潮水盆地,南以龙首山区域深大断裂与河西走廊为界。龙首山深大断裂位于阿拉善微陆块与祁连早古生代造山带2个大地构造单元之间,属脆性挤压类型,走向为 $300^{\circ}\sim 265^{\circ}$,倾向为 $355^{\circ}\sim 30^{\circ}$,倾角为 $55^{\circ}\sim 70^{\circ}$,为长500 km、宽约0.5~20 km的北西西向边界断裂。

菱岭复式岩体沿北西西向复背斜核部展布,长54 km,宽数千米,出露面积为 146.6 km^2 ,岩体为主要由闪长岩、花岗岩、正长岩及酸性、基性脉岩组成的复式岩体(汤琳等,2015)。资料表明,含矿主岩同位素年龄为529~488 Ma,菱岭岩体闪长岩年龄为558 Ma,形成时间为晚奥陶世之后。菱岭岩体正长岩脉和细粒花岗岩年龄分别为438.8 Ma和401.8 Ma,属于志留纪和泥盆纪,晚于奥陶纪(柴宝民等,1987)。花岗岩和加里东早期闪长岩尤其在区内发生不同的混染作用,在花岗岩体中呈大小不等的残块或捕虏体。值得指出的是,菱岭岩体主体是灰白色中粗粒二(斜)长花岗岩,其中有部分是肉红色斑状花岗岩,肉红色大斑晶为钾交代的变斑晶,它是岩浆期后热液钾交代的结果。在花岗岩后有一次正长岩的形成,成矿的碱交代热液活动发生于正长岩的形成之后。成矿热液活动结束后又有超基性和基性岩岩脉侵入。

2.2 含矿主岩矿物组成与蚀变特征

菱岭花岗岩呈大岩基产出,呈灰白色和肉红色,最初认为是2期岩浆作用。经区域地质填图调查发现,肉红色中粗粒斑状花岗岩受裂隙密集带控制,二者应为一期产物。其矿物组成为斜长石,一般含量为35%~45%,钾长石(微斜长石-微斜条纹长石)为15%~35%,石英为20%~25%,黑云母为5%~10%。菱岭花岗岩斜长石被钾交代形成多种交代结构,形成钾长石变斑晶(微斜条纹长石),常含有斜长石、石英、黑云母、榍石、磷灰石、黄铁矿等矿物包裹体。亦见微斜长石、钾长石交代石英。条纹长石的条纹结构成因是高温下形成类质同象混晶在低温下分离的产物,条纹长石也经常钠长石化而成早期的棋盘格状钠长石。

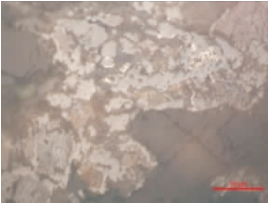
对钠交代岩成因争论激烈,最初认为是岩浆岩,经研究发现是一种热液蚀变岩石花岗岩的钠交代岩。其中,斜长石(No10~No17)一般含量为42%~45%,钾长石(微斜长石-微斜条纹长石)为15%~25%,石英为25%,黑云母为5%~8%;副矿物为榍石(最多达1.8%,颗粒度为0.5~4 mm)、磷灰石(容易发生局部富集于次生石英中)和锆石。随着勘探实践和科研的深入,研究者们认识到含矿岩石并不是一种独立的岩体,而是富钠热液进行交代蚀变的产物。铀矿主要是在钠交代作用之后,经过构造碎裂、热液交代填充而成的,从而肯定了碱交代热液成因。当时基于此认识扩大勘探范围,取得一定突破,并陆续发现新的盲矿体和新水井706矿床,以及如前述的其他类型矿床。

含矿花岗岩蚀变主要是钠长石化(棋盘格状钠长石、糖粒状钠长石)组成的钠交代岩,此外岩石蚀变明显,有赤铁矿化,包括早期尘状、粉末状和晚期针状、板状赤铁矿,钾长石变斑晶化;绿泥石化包括早期假象叶绿泥石、晚期磷绿泥石或球状铁绿泥石化,绢云母化,伊利石化,硅(或微晶石英)化;黄铁矿化包括早期颗粒浸染状,晚期半胶状、胶状化;碳酸盐化包括早期浊晶方解石化、晚期亮晶方解石化、磷灰石化,榍石化或白钛石(锐钛矿)化,个别钠黝帘石化、黄铁绢英岩化、金红石化等(图2)。

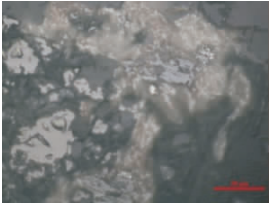
其中,扭曲的叶绿泥石于碎粒部位产出(图2-1),他形黄铁矿和赤铁矿于碎粒部位(图2-2、图2-3),绿色黑云母相伴有大量磷灰石晶体(图2-4),针状赤铁矿大量出现于碎粒化部位(图2-5),粒间黑云母叶绿泥石化中常有多个颗粒状榍石(图2-6),粒间大量绢云母出现于微弱碎粒化部位(图2-7),部分棋盘格状钠长石中有次生石英(图2-8),早期浊晶方解石脉被晚期亮晶方解石脉切穿(图2-9),方解石交代斜长石(图2-10),方解石交代长石和石英(图2-11),斑晶为部分棋盘格状钠长石,其边缘碎粒化(图2-12),方解石(于右部位)交代钾长石、钠长石构成交代残余结构(图2-13),岩石显强碎裂结构,角砾状构造,赤、褐铁矿化呈现猪肝色,岩石似为“隐爆成因”(图2-14),强碎裂处的黄铁矿、绿泥石处(于左部位)有 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以上胶状沥青铀矿(图2-15),另见 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以上大小胶状沥青铀矿(图2-16)。



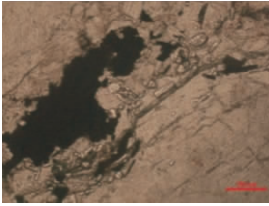
(1) 叶绿泥石(灰)于碎粒部位



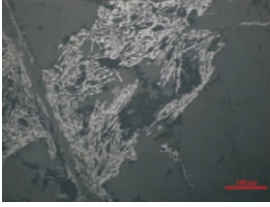
(2) 黄白色他形黄铁矿和赤铁矿(浅灰)于碎粒部位



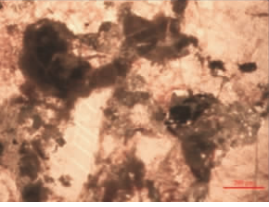
(3) 右上方胶状可能是沥青铀矿, 其他为黄铁矿、赤铁矿



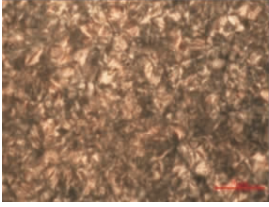
(4) 赤铁矿和绿色黑云母相伴于大量磷灰石晶体



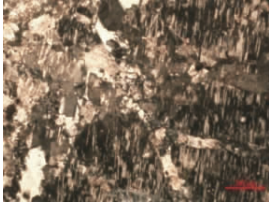
(5) 针状赤铁矿大量出现



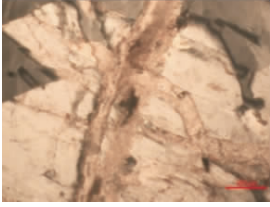
(6) 粒间叶绿泥石化黑云母中见多个颗粒状角闪石



(7) 粒间大量绢云母



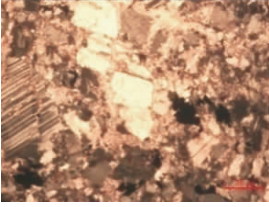
(8) 部分棋盘格状钠长石中有次生石英



(9) 浊方解石脉被净方解石脉切穿



(10) 方解石交代斜长石



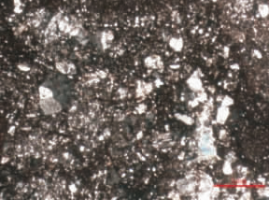
(11) 碳酸盐(彩色)交代长石和石英



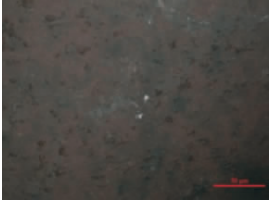
(12) 斑晶为部分棋盘格状钠长石, 其边缘碎粒化



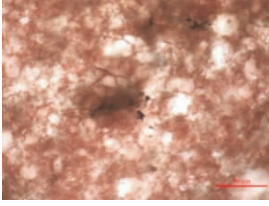
(13) 碳酸盐(右)交代钾钠长石构成交代残余结构



(14) 显强碎裂结构, 角砾状构造, 赤、褐铁矿化



(15) 强碎裂处黄铁矿绿泥石左见10μm以上胶状沥青铀矿



(16) 强钠长石化

图 2 含矿主岩显微照片

Fig. 2 Microscopic photographs of rock specimen

因此, 钠交代之前钾长石微斜长石化、早期棋盘格状钠长石化以及钠交代的“去石英化”后, 必然伴生绿泥石化。绿泥石化正是钠交代的后续蚀变, 把前期的钠长石变成绿泥石化蚀变的交代残余。“钠交代蚀变”中除产生大量钠长石外, 还会把岩石中碱土金属二价的 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 等释放产生除绿泥石外的绿帘石、方解石和黄铁矿等矿物。碱性钠长石化阶段不能使铀成矿。待成矿溶液碱度降低, 演化到绿泥石-方解石-赤(黄)铁矿阶段的蚀变(绢英岩化、绿泥石化、碳酸盐化、磷灰石化、伊利石化等)叠加才形成较高品位的工业矿化。至于国外 Rabbit LaKe 矿床铀矿体一般不分布于阿萨巴斯卡建造中, 而是只产于被断裂带控制的所谓斜长岩, 实为热液蚀变岩之旁, 实际正是砂岩强钠长石化形成“碱

交代岩”, 绿泥石化正是钠长石化的后续蚀变。加拿大另外一个重要产铀 Otish 盆地——Otish 铀矿床, 在阿萨巴斯卡盆地之东, 钠长石化由盖层一直发育于基底混合岩、花岗岩中。在钠长石化之前有微斜长石化和变正长岩, 钠交代沿着不整合面发育。法国 RUHLMANN F 等人发现 3 种铀矿化之一的“钠长石-晶质铀矿-钛铀矿化”是钠长石、绿帘石、方解石、白云石、方解石组合, 实际上这正是碱交代铀矿床矿物共生组合, 先是辉长岩墙从地幔向上贯入引导幔汁上涌, 并与围岩产生强烈钠交代和铀成矿(杜乐天, 2015)。

2.3 含矿主岩主量元素演变特征

蚀变岩石(3)(表 1)与其原岩相比, 烧失量相比原岩增加 1.17 倍, Na_2O 增加 70.16%, CaO 增加

46.96%, MnO 增加 44.44%, Fe₂O₃ 增加 38.85%; 而 MgO 相比原岩减少 71.82%, TiO₂ 减少 46.81%, P₂O₅ 减少 46.67%, K₂O 减少 40.17%, FeO 减少 18.47%, SiO₂ 减少 7.94%, Al₂O₃ 减少 3.16%, Th 增加 6.04%, U 增加 15.67%。由此得出, 钠交代蚀变过程中, 挥发分及钠离子和含氧高价 Fe、Mn、U 元素带入量较多, 而 Mg、Ti、P、K、Si 带出量比较大, 其中 Al、Th 元素变化不大。这种碱交代体为接近临界状态的含氧、氢、二氧化碳、硫的挥发性物, 以及含碱金属 Na、碱土金属 Ca 及 Mn、

Fe³⁺ 和 U 等变价元素。其中, 稀土元素 La、Ce 为正异常, 微量元素 Ba、Rb 相对富集的“碱性流体”。

钼矿化岩石(3)与蚀变岩(3)(表 1)相比, SiO₂、K₂O 明显减少, Al₂O₃、FeO 少量减少, 而 P₂O₅、CaO、MgO、烧失量、TiO₂、Fe₂O₃ 明显增加。Na₂O 少量增加, 显示具有一定的氧化还原, 富钠并交代 Si、K、P、Ti 及碱土金属 Ca、Mg(表现绿泥石化、碳酸盐化更增强以及出现绢石化、磷灰石化)和铀、钍矿化。另外, 茛岭花岗岩与中国加里东期花岗岩化学成分相近似(表 1)。

表 1 含矿主岩主量元素对比表(%)
Tab. 1 Major element scmparison table of mineralized hostrock(%)

样号与性质	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	烧失量	Th/U(10 ⁻⁶)
LS15-36	66.41	0.456	16.15	2.01	1.23	0.062	1.02	1.48	5.22	4.58	0.192	0.94	45.7/25.2
LS15-37	65.42	0.441	17.18	1.88	0.86	0.056	0.973	2.35	5.01	4.61	0.196	0.91	37/15.7
Lss12-03	67.46	0.41	15.95	0.97	2.26	0.09	1.01	2.37	3.90	4.42	0.20	1.98	21.5/3.49
Lss12-10	66.48	0.53	15.67	1.80	2.17	0.08	1.19	2.56	4.88	3.20	0.23	1.22	58.9/7.23
原岩 Lss12-(2)	66.97	0.47	15.81	1.39	2.22	0.09	1.10	2.47	4.39	3.56	0.22	1.60	40.2/5.36
蚀变岩(3)	62.11	0.25	16.31	1.93	1.81	0.13	0.31	3.63	7.47	2.13	0.15	3.47	42.63/24.52
矿化岩石(3)	53.61	0.55	14.36	2.94	1.21	0.13	1.16	9.41	7.62	0.19	0.50	7.96	294.7/>977.7
701(2)	70.19	0.32	14.23	0.85	2.05	0.06	0.67	1.29	4.13	4.18	0.12	0.86	29/19
DWL(4)	67.08	0.60	14.37	1.70	2.16	0.09	1.57	2.01	4.33	3.64	0.23	2.01	40.0/7.0
加里东期二长花岗岩(304)	67.02	0.48	15.35	1.17	2.35	0.07	1.38	3.14	3.52	2.97	0.13	—	—
Lss12-01	47.09	2.64	15.25	5.07	8.40	0.23	6.15	8.12	3.36	1.41	0.65	1.98	21.5/7.8

注: LS15-36、LS15-37 为灰色中粗粒斑状黑云母二长花岗岩; Lss12-03、Lss12-10 为肉红色中粗粒斑状黑云母二长花岗岩(据汤琳等, 2015); 701(2) 为肉红色中粗粒斑状花岗岩(据杜乐天, 1982; 柴宝民等, 1987); DWL(4) 肉红色中粗粒斑状花岗岩(据杜乐天等, 2011); 加里东期二长花岗岩(304) 据史长义等, 2008; 矿化岩石(3) 据杜乐天, 1996, 杜乐天等, 2011; 蚀变岩据汤琳等, 2015。

2.4 含矿主岩构造环境判别

茛岭矿床未蚀变含矿主岩(茛岭花岗岩) A/CNK=1.0, 为一系列准铝质钙碱性花岗质岩石。里特曼指数 σ 为 1.8~3.3, 属于钙碱系列。莱特碱度率(A.R)为 2.48~3.80。从 100(MgO+FeO+TiO₂)/SiO₂-(Al₂O₃+Cao)/(FeO+Na₂O+K₂O) 图解(图 3)(PEARCE JA, et al., 1984; 何付兵等, 2013)中也可以得出相同的结论。将茛岭花岗岩原岩样品在 K₂O-SiO₂ 图解以及 SiO₂-Na₂O+K₂O 图解投点, 皆为低硅、“高钾钙碱性系列”、“过碱性”系列“二长花岗岩”类岩石(汤琳等, 2015)。新鲜样品在 Rb-Yb+Nb 及 Nb-Y 图解(PEARCE et al., 1984, 胡洋等, 2015)中的投点结果表明, 该二长花岗岩构造环境为“火山弧花岗岩”, 且靠近“后碰撞花岗岩”范围(图 4)。

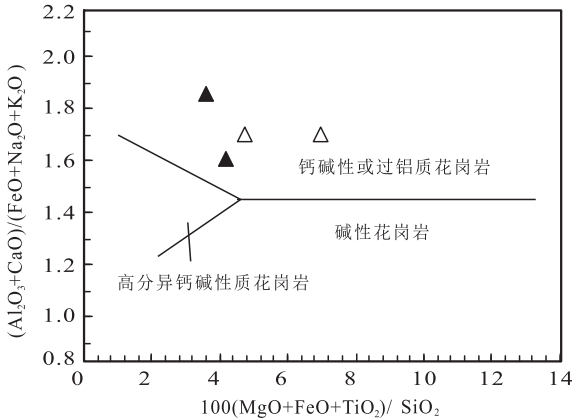
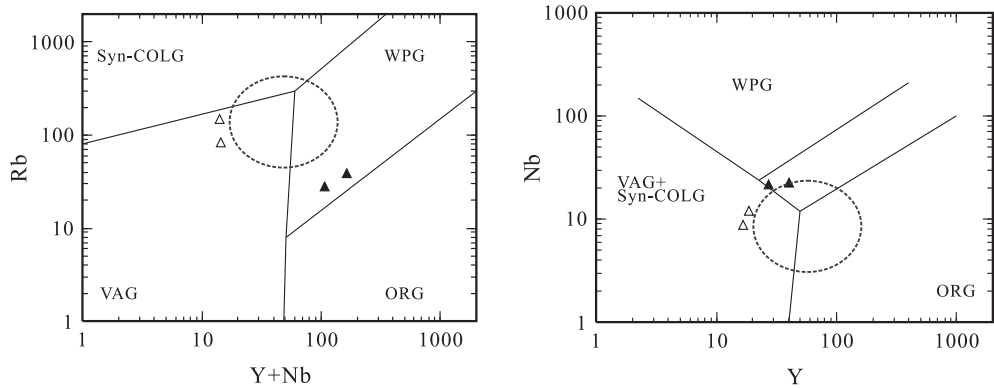


图 3 茛岭花岗岩体 100(MgO+FeO+TiO₂)/SiO₂-(Al₂O₃+Cao)/(FeO+Na₂O+K₂O) 图解
Fig. 3 100(MgO+FeO+TiO₂)/SiO₂-(Al₂O₃+Cao)/(FeO+Na₂O+K₂O) diagram of the Jiling granite



VAG. 火山弧花岗岩;syn-COLG. 同碰撞花岗岩;WPG. 板内花岗岩;ORG. 洋中脊花岗岩

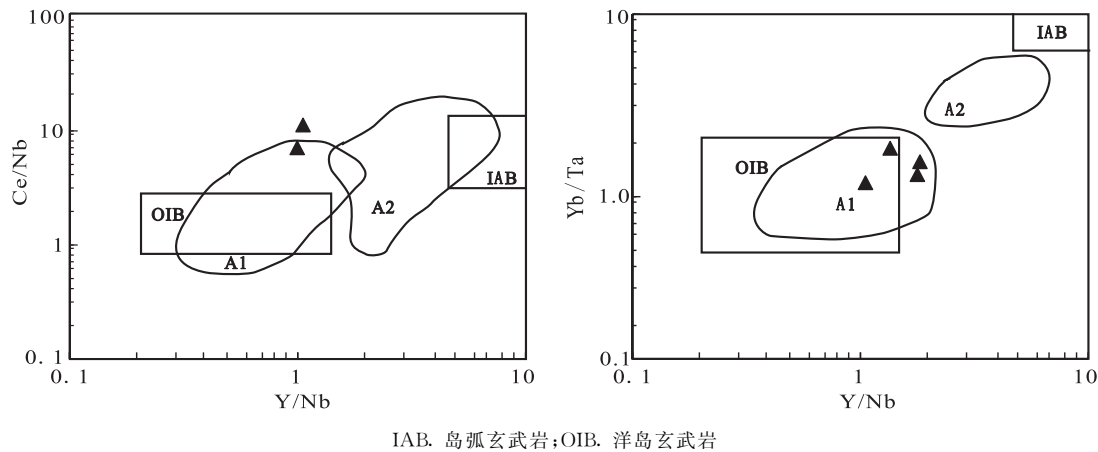
图 4 茆岭花岗岩岩体构造环境判别图解(据 PEARCE et al. ,1984;胡洋等,2015)

Fig. 4 Discrimination diagram for tectonic settings of the Jiling granite
(PEARCE et al. ,1984; After HU Yang et al. ,2015)

3 关于含矿花岗岩成因讨论

根据 PEARCE 提出的 $Yb+Nb-Rb$ 及 $Y-Nb$ 花岗岩岩体构造环境判别图解(PEARCE JA et al. , 1984),茆岭含矿主岩样品投点落于 VAG 火山弧花岗岩范围和 VAG+syn-COLG 火山弧+同碰撞,靠近 WPG 板内花岗岩范围,同时接近后碰撞花岗岩范围,可能具有后碰撞花岗岩特征(图 4)。经用花岗岩源区 $Ce/Nb-Y/Nb$ 及 $Yb/Ta-Y/Nb$ 判别图解(EBY,1992)投点,大多样品落入 A 型中的 A_1 花岗岩范围(图 5)(胡洋等,2015; WHALEN J B et al. ,1987)。在 $(Zr-Nb+Ce+Y)-(Na_2O+K_2O)/CaO$ 图解(何付兵等,2013; WHALEN J B. et al. ,1987)中,样品投点皆落于

A 型花岗岩范围(图 6)。这种花岗岩的源岩物质是未经风化的火成岩熔融而来,是活动大陆边缘的产物。其特征是基本上由石英、数量不等的斜长石和碱性长石、普通角闪石和黑云母组成,不含白云母。呈中深成相大岩基产出,成岩温度高。 Al 平均含量为 14.5%, Th 和 Y 含量高。镜下观察发现,花岗岩造岩矿物成分为斜长石(52%),钾长石(微斜长石条纹长石)为 18%,石英为 22%,黑云母为 8%。但是,A 型花岗岩的形成过程较复杂,其源岩具有多样性。目前,关于 A 型花岗岩成因模式有多种说法:一是地幔玄武质岩浆,高度结晶分异与花岗岩时空关系密切的超基性或基性岩浆底侵的可能;另一个是壳幔物质混合;第三个是不同源区的部分熔融(胡洋等,2015; WHALEN J B,1987)。



IAB. 岛弧玄武岩;OIB. 洋岛玄武岩

图 5 茆岭花岗岩岩石源区 $Ce/Nb-Y/Nb$ 及 $Yb/Ta-Y/Nb$ 判别图解(据胡洋等,2015;WHALEN J B et al. ,1987)

Fig. 5 $Ce/Nb-Y/Nb$ and $Yb/Ta-Y/Nb$ diagram for the Jiling granite(After HU Yang et al. ,2015;WHALEN J B et al. ,1987)

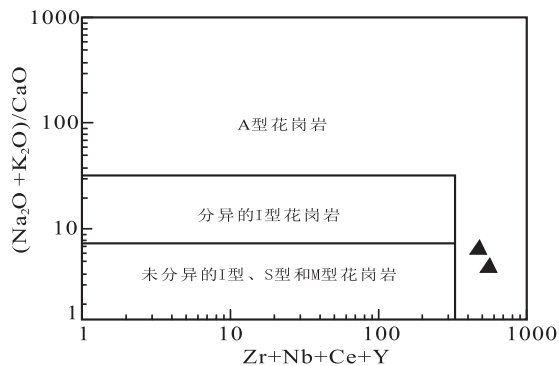


图 6 (Zr - Nb+Ce+Y)-(Na₂O+K₂O)/CaO 图解
(何付兵等,2013;WHALEN J B et al. ,1987)
Fig. 6 (Zr - Nb+Ce+Y)-(Na₂O+K₂O)/CaO diagram
for the Jingling granite(After HE Fubing et al. ,2013;
WHALEN J B et al. ,1987)

茛岭花岗岩(各粒度灰白、肉红色 8 个样)同位素测年结果($R=0.995\ 6$, $a=0.707\ 2$, $b=0.005\ 700$, $t=400.9\ \text{Ma}$)(李占游,1987)表明,该花岗岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比为 0.709 6,而加里东早期变质的龙首山群变质岩年龄为 574~532 Ma,其初始比为 0.723 2~0.767 7,变化大。GANTEN FAURE (1977)认为, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值小于 0.704 的花岗岩来源于上地幔,初始值为 0.704~0.706 的花岗岩也可是上地幔来源的,初始比值大于 0.706 的侵入体可能是下地壳熔融导生的,故茛岭花岗岩有可能源

于下地壳熔融而成(杜乐天,1996,2001;金才坤,1987)。同时,其花岗岩长石类 Pb 同位素等时线得出斜率 R 为 0.138 3 的直线,相关系数为 0.989 5,成岩年龄为 400 Ma,把 400 Ma 花岗岩成岩年龄代入二次等时线公式计算,得出长石 Pb 的来源年龄 $t_1=2\ 00\ 8\ \text{Ma}$,反映 $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ 值的 μ 值平均为 9.3,远大于地幔原始 Pb 的 μ 值(7.3~8.0),表明花岗岩长石 Pb 源于 20 亿年前的壳源岩石。

BHATIA(1985)认为 Th/U 和 La/Th 值也是确定源岩类型的重要标志,当 Th/U 值约为 2.5~3.0 时,其源岩为岛弧火山岩;Th/U 值为 4.5 时,其物源主要以沉积岩为主,可能有岛弧火山碎屑岩混入;当 Th/U 值约为 6 时,可以肯定其物源主要是再旋回沉积岩,且源岩可能存在钼矿化(钼石、独居石)。该区茛岭花岗岩 Th/U 值为 $40.2/5.36=7.5$ (表 1)以及 Hf - La/Th 源岩判别图解(FLOYD et al. ,1990;旷红伟等,2013)、La/Yb - ΣREE 图解(ALLEGRE C T. 1978)投点(图 7),可以反映源岩主要为沉积岩源,有长英质火山岩和花岗岩或增加古老沉积物成分、源岩存在钼矿化(钼石)的特点。该区南部另一花岗岩型碱交代 706 矿床产有含钼铈矿化以及前震旦纪地层中产有钼石,龙首山中段北部前震旦纪片麻岩中产有稀土-钼-含钼晶质铈矿带(陈照博等,1963)。

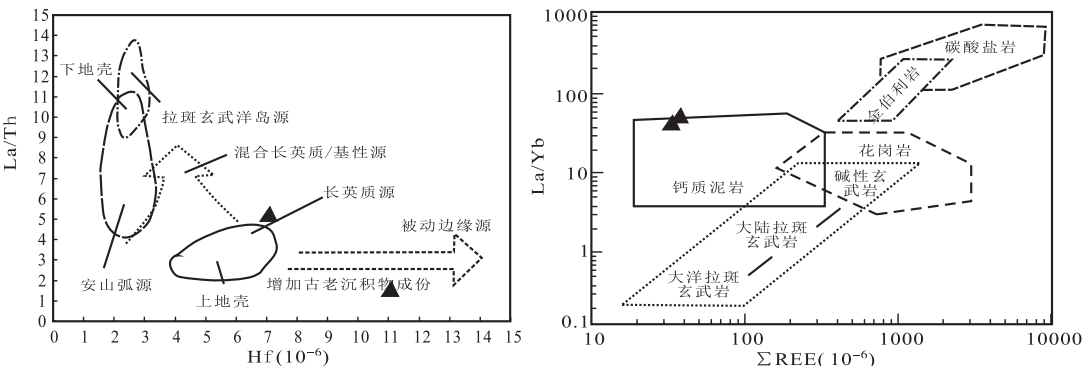


图 7 Hf - La/Th 源岩判别图解(据 FLOYD et al. ,1990;旷红伟等,2013)和 La/Yb - $\Sigma\text{REE}(10^{-6})$ 图解(据旷红伟等,2013;ALLEGRE,1978)
Fig. 7 Trace discriminative diagram of Hf - La/Th(After FLOYD et al. ,1990; KUANG Hongwei et al. ,2013) and La/Yb - ΣREE diagram(After KUANG Hongwei et al. ,2013; ALLEGRE,1978)

所用茛岭复式岩体中花岗岩、闪长岩稀土元素和微量元素含量见表 2。表现出稀土总量较大,轻稀土元素富集,重稀土元素较平坦,Eu 弱负异常球粒陨石标准化配分曲线表现出右倾趋势。蚀变

稀土元素出现轻重稀土明显分异,La、Ce 为正异常,Ba、Rb 相对富集,U、Th 明显富集等特点。其中,矿化样品 Ba、Sr、Rb 减少,个别重金属 Dy、Ho、Er 增加。

表 2 含矿主岩稀土和微量元素含量对比表(10⁻⁶)

Tab. 2 Trace and rare earth elements contents comparison table of Jingling granite(10⁻⁶)

微量元素	Ls15-36	Ls15-37	Lss12-03	Lss12-10	Lss12-04	Lss12-026	Lss13-41	Lss12-20
Rb	190.00	106.00	111.00	64.40	13.40	48.60	93.40	5.96
Sr	680.00	827.00	458.00	505.00	211.00	123.00	119.00	191.00
Y	24.10	21.60	16.50	15.80	33.20	33.00	51.10	54.30
Nb	33.40	26.40	15.10	14.70	28.20	22.00	29.00	34.80
Ba	1 811.00	1 913.00	1 623.00	1 176.00	423.00	1 139.00	1 929.00	94.40
La	91.70	84.20	108.00	94.90	87.40	112.00	194.00	99.20
Ce	153.00	139.00	185.00	169.00	157.00	192.00	388.00	180.00
Pr	16.10	14.10	18.10	17.00	16.80	19.60	35.20	24.30
Nd	53.90	46.80	52.20	50.20	52.80	64.70	117.00	83.10
Sm	8.18	7.04	7.00	6.85	8.09	8.37	15.80	17.10
Eu	1.57	1.34	1.27	1.30	1.49	1.34	2.07	1.22
Gd	6.84	5.5	6.87	6.56	7.55	7.62	13.5	15.4
Tb	1.02	0.83	0.8	0.78	1.04	1.12	1.86	2.48
Dy	4.99	3.94	3.32	3.09	5.39	5.53	9.10	13.00
Ho	0.874	0.782	0.63	0.58	1.13	1.09	1.78	2.42
Er	2.57	2.28	1.78	1.71	3.29	3.59	5.36	5.69
Tm	0.413	0.376	0.27	0.26	0.63	0.66	0.9	0.84
Yb	2.82	2.2	1.70	1.60	4.17	4.60	6.14	4.67
Lu	0.433	0.368	0.21	0.21	0.56	0.79	1.04	0.54
ΣREE	344.43	308.756	387.5	354.04	547.33	423.01	791.75	449.96
LREE	324.47	292.48	371.57	339.25	323.58	398.01	752.07	404.92
HREE	19.96	16.276	15.58	14.79	23.75	25.00	39.68	45.04
L/H	16.256	17.97	23.85	22.93	13.62	15.92	18.95	8.99
δEu	0.62	0.63	0.55	0.58	0.57	0.50	0.42	0.23
δCe	0.90	0.90	0.94	0.95	0.94	0.92	1.07	0.89
Th	45.7	37.0	21.5	58.9	47.90	27.7	52.3	59.10
U	25.2	15.7	3.49	7.23	44.30	9.47	19.8	975.00
Ta	2.23	1.89	1.33	1.00	1.50	1.50	1.60	1.40
Tl	1.96	1.02	0.3	0.56	0.12	0.30	0.61	0.04
Zr	262.0	253.0	310	472	273	501.00	446	544
Hf	5.58	5.06	7.18	11.5	6.67	9.50	12.1	17

注:LS15-36、LS15-37 为原岩灰色中粗粒斑状黑云母二长花岗岩;Lss12-03、Lss12-10 为原岩肉红色中粗粒斑状黑云母二长花岗岩;Lss12-04 为赤铁矿化碳酸盐钠长石化花岗岩;Lss12-026 为弱钠长石化二长花岗岩;Lss12-041 为钠长石化二长花岗岩;Lss12-20 为矿化碎裂蚀变花岗岩。

4 矿床成因讨论

 菱岭铀矿化产于岭复式岩体南部边缘部位,沿北西向马路沟断裂带外拐弯部位分布。亦即铀矿体产于龙首山群大理岩与加里东晚期花岗岩之间北西西向马路沟断裂的下盘,次一级东西向断裂控制的钠交代岩中,呈不规则的雁行式产出。具体而言,菱岭铀矿床位于马路沟断裂(F₁₀₁)下盘 10~300 m 钠

长石化花岗岩中(王传文等,1963;赵风民等,1963),矿体呈透镜状,呈侧列再现,与 F₁₀₁呈锐角产出。矿体长几十米至一、二百米,厚数十米,一般品位 U 接近 0.1%。

 矿化主岩是肉红色碎裂蚀变花岗岩,局部为碎裂蚀变闪长岩。同时菱岭铀矿床蚀变具有分带性,蚀变分带大体呈现火焰状(侧向),划分为靠近矿体强碎裂为 1~2 级碎裂,以铁绿泥石、针状-板状-集合状赤铁矿化为主,含有一定的铁绿泥石化、黄铁矿

化、浊碳酸盐化;再向外为3~4级碎裂,以假象绿泥石和粉末状赤铁矿的红化。含有一定的铁绿泥石化含有白钛石(锐钛矿)化-黄铁矿化-浊碳酸盐化;再向外则多见亮碳酸盐化、硅化。其中,比较发育的是3~4级碎裂蚀变花岗岩,碎裂中心为1~2级碎裂蚀变(706矿床就是根据这种构造蚀变带划分中的碎裂中心与马路沟断裂的构造格架评价和肯定706矿点而突破的)。

造岩矿物、蚀变矿物、铀矿物演化流程是早期棋盘格钠长石形成,早期钠交代促进铀的第一次预富集,伴随斜长石钠长石碎粒化发生红化(先粉末状针铁矿和板状赤铁矿后为微粒状、麻点赤铁矿微晶赤铁矿)、绢云母(后水云母)化、硅(微晶石英)化、绿泥石[先假象(镁铁)叶绿泥石,后球状胶状(铁)绿泥石(含铀或与沥青铀矿共生)]化、碳酸盐化(先浊晶、亮晶)蚀变,楣石-锐钛矿(白钛石)-含钛铀矿物-钛铀矿(?)。成矿溶液从碱性逐渐向“酸化”演化,从多个花岗岩型铀矿床流体包裹体数据和作图得出,从成矿前一成矿期一成矿后的高温到中低温,成矿溶液显示“碱、酸、碱”演化规律中的酸性阶段成矿。

该矿床主要铀矿物沥青铀矿呈分散状及微脉状于碎裂处产出,同位素年龄为381~398 Ma,属华力西早期中泥盆世生成,该成矿时代与祁连运动相一致。祁连运动指祁连山区早古生代末期的一次褶皱运动,北祁连山区晚泥盆世老君山砾岩(摩拉石建造)与早古生代浅变质岩系(早峡群)之间角度不整合确定的可能也与此运动有关(黄宗理等,2006)。

5 结论

(1)成矿控制作用为铀矿床严格受北西向区域断裂控制,铀矿化则赋存于次一级东西向压扭性断裂构造蚀变带内。亦即产于北西向马路沟断裂下外拐弯下盘,次一级东西向断裂控制的钠交代蚀变岩中。

(2)菱岭矿床由3条碎裂蚀变带组成,23个矿体皆赋存于长近千米、宽几百米、延伸几百米的向南陡倾的碎裂蚀变带中,矿体形态分支复合、膨胀收缩,埋深东浅西深,有侧伏,中等倾角,呈不规则的雁行式产出。

(3)含矿主岩加里东早期菱岭花岗岩岩体和区域华力西期花岗岩分别是祁连洋向北俯冲及陆内俯冲的产物。

(4)该矿床主要铀矿物沥青铀矿呈分散状及微脉状于碎裂处产出,同位素年龄为420~398 Ma,属于晚志留世至早泥盆世生成。该成矿时代与祁连运动大体相一致。

参考文献(References):

- 杜乐天,戎家树,陈安福,等. 地幔岩中微粒合金和还原气体[J]. 科学通报, 1995, 40(19):1788-1788.
- DU Letian, RONG Jiashu, CHEN Anfu, et al. Particulate alloy and reducing gas in mantle rock[J]. Chinese Science Bulletin, 1995, 40(19):1788-1788.
- 杜乐天. 碱交代作用地球化学原理[J]. 中国科学, 1986(1):83-92.
- DU Letian. Geochemical principle of alkali metasomatism[J]. Science Sinica, 1986(1):83-92.
- 杜乐天. 全球热液铀矿地球化学—对当代国际热液铀矿理论的重建[M]. 北京:地质出版社, 2015.
- DU Letian. Global hydrothermal uranium geochemistry-Reconstruction of contemporary international hydrothermal uranium theory[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2015.
- 杜乐天. 烃碱流体地球化学原理—重论热液作用和岩浆作用[M]. 北京:科学出版社, 1996.
- DU Letian. The principle of hydrocarbon base fluid geochemistry-Further discussion of hydrothermal action and magmatism[M]. Beijing: Science Press, 1996.
- 杜乐天. 我国花岗岩型铀矿的主要地质规律及成矿模式[A], 花岗岩铀矿文集[C]. 北京:原子能出版社, 1982.
- DU Letian. Major geological laws and metallogenic models of granite type uranium deposits in China[A], Beijing: Atomic Energy Publishing House, 1982.
- 杜乐天. 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, 2001.
- DU Letian. Basic metallogenic regularity and general hydrothermal metallogeny of uranium deposits in China[M]. Beijing: Atomic Energy Publishing House, 2001.
- 何付兵,徐吉祥,谷晓丹,等. 内蒙古东乌珠穆沁旗阿木古楞复式花岗岩体时代、成因及地质意义[J]. 地质论评, 2013, 59(6):1150-1164.
- HE Fubing, XU Jixiang, GU Xiaodan, et al. Ages, Origin and Geological Implications of the Amuguleng Composite Granite in East Ujimqin Banner, Inner Mongolia[J]. Geological Review. 2013, 59(6):1150-1164.
- 胡洋,王居里,王建其,等. 新疆西准噶尔庙尔沟岩体的地球

- 化学及年代学研究[J]. 岩石学报, 2015, 31(2): 505-522.
- HU Yang, WANG Juli, WANG Jianqi, et al. Geochemistry and geochronology of the Miaogou granite pluton in West Junggar, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(2): 505-522.
- 黄宗理, 张良弼. 地球科学大辞典: 基础科学卷[M]. 北京: 地质出版社, 2006.
- HUANG Zongli, ZHANG Lingbi. *Geoscience Dictionary: Basic Science Volume*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006.
- 旷红伟, 许克民, 柳永清, 等. 胶东诸城晚白垩世恐龙骨骼化石地球化学及埋藏学研究[J]. 地质论评, 2013, 59(6): 1000-1023.
- KUANG Hongwei, XU Keming, LIU Yongqing, et al. Geochemistry and Taphonomy of Late Cretaceous Dinosaur Bonebeds in Zhucheng, Eastern Shandong, China[J]. *Geological Review*, 2013, 59(6): 1000-1023.
- 林宜慧, 张立飞. 北祁连山清水沟蓝片岩带中含硬柱石蓝片岩和榴辉岩的岩石学、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学及其意义[J]. 地质学报, 2012, 86(9): 1503-1524.
- LIN Yihui, ZHANG Lifei. Petrology and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Geochronology of the Lawsonite-Bearing Blueschist and Eclogite from the Qingshuigou Blueschist Belt in North Qilian Mountains in NW China and Their Tectonic Implication[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(9): 1503-1524.
- 刘训, 游国庆. 中国的板块构造区划[J]. 中国地质, 2015, 24(1): 1-17.
- LIU Xun, YOU Guoqing. Tectonic regional subdivision of China in the light of plate theory[J]. *Geology in China*, 2015, 42(1): 1-17.
- 沈其韩, 耿元生. 中国蓝片岩带的时空分布、地质特征和成因[J]. 地质学报, 2012, 86(9): 1407-1446.
- SHEN Qihan, GENG Yuansheng. The Tempo-Spatial Distribution, Geological Characteristics and Genesis of Blueschist Belts in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(9): 1407-1446.
- 汤琳, 张树明. 龙首山菱岭复式岩体岩石地球化学特征及构造环境探讨[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2015, 38(3): 265-272.
- TANG Lin, ZHANG Shuming. Geochemical characteristics of jiling composite pluton in longshou mountain and tectonic environment discussion[J]. *Journal of East China Institute of Technology (Natural Science Edition)*, 2015, 38(3): 265-272.
- 汤中立, 白云来. 华北古大陆西南边缘构造格架与成矿系统[J]. 地学前缘, 1999, 6(2): 271-283.
- TANG Zhongli, BAI Yunlai. Geotectonic framework and metallogenic system in the southwest margin of north china paleocontinent[J]. *Earth Science Frontiers*, 1999, 6(2): 271-283.
- 夏林圻, 李向民, 余吉远, 等. 祁连山新元古代中晚期至早古生代火山岩作用与构造演化[J]. 中国地质, 2016, 43(4): 1087-1138.
- XIA Linqi, LI Xiangmin, YU Jiyuan, et al. Mid-Late Neoproterozoic to Early Paleozoic volcanism and tectonic evolution of the Qilian Mountain[J]. *Geology in China*, 2016, 43(4): 1087-1138.
- 徐夕生, 邱检生. 火成岩岩石学[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- XU Xisheng, QIU Jiansheng. *Igneous petrology*[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- 杜乐天, 王文广, 刘正义. 中国铀矿床研究评价—第一卷, 花岗岩型铀矿床[R]. 中国核工业地质局, 核工业北京地质研究院, 2011, 553-562.
- 刘洛图, 王健. 大胆实践, 认真研究, 突破 701、706 碱交代型铀矿床, 1985, 中国铀矿床发现和发展实例[R]. 北京: 核工业部地质局编, (1955-1985), 17-22.
- 陈照博, 刘正义. 龙首山中段地区铀钍矿点物质成分及铀矿的区域成矿特点[R]. 北京: 核工业北京地质研究院, 1963, 1-168.
- 赵凤民, 王传文, 潘之明, 等. 甘肃 1704 工区矿物及矿化特征[R]. 北京: 核工业北京地质研究院, 1963, 1-70.
- 王传文, 赵凤民, 陈肇博, 等. 菱岭矿床铀矿化和围岩蚀变特征[R]. 北京: 核工业北京地质研究院, 1963, 1-80.
- 柴宝民, 杨瑞木, 孙延怀, 等. 龙首山花岗岩与铀矿化的关系[R]. 地质科研, (1-2). 咸阳: 西北地勘局二〇三研究所, 1987, 1-42.
- 李占游. 菱岭花岗岩与钠交代热液铀矿化的稳定同位素及稀土元素研究[J]. 地质科研, 西北地勘局二〇三研究所, 1987, (1-2): 107-114.
- ALLEGRE C T. Quantitative models of trace planet. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1978, 38(1): 1-20.
- FLOYD P A, LEVERIDGE B E, FRANKE W, et al. Provenance and depositional environment of Rhenohercynian synorogenic greywackes from the Giessen Nappe, Germany[J]. *Geologische Rundschau (International Journal of Earth Science)* 1990, 79(3): 611-626.
- PEARCE JA, HARRIS NBW, TINDLE AG. Trace element discrimination for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25(4): 956-983.
- WHALEN JB, CURRIE K L, CHAPPEL IBW. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Mineralogy and Petrology*, 1987, 95: 407-419.