https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.216

东昆仑造山带海德乌拉铀矿床沥青铀矿年代学特征及成因

朱坤贺[1,2],戴佳文[3],王凯兴[1,2*],刘晓东[1],余驰达[1],雷勇亮[1,2],孙立强[1,2],何世伟[1,2]

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. 东华理工大学地球科学学院,江西南昌 330013
3. 青海省核工业地质局,青海西宁 810001

摘　要: 海德乌拉铀矿床位于东昆仑造山带东段,是西北地区最近发现的与火山岩有关的独立铀矿床,对其研究有助于揭示青藏高原热液铀成矿机制.利用扫描电镜、电子探针和激光原位分析等对海德乌拉铀矿床沥青铀矿开展了化学成分分析和同位素定年等工作.结果显示海德乌拉铀矿床沥青铀矿具有较高的Ca和REE含量,较低的LREE/HREE比值.沥青铀矿电子探针U-Th-Pb化学年龄为226~350 Ma,峰值为289 Ma;U-Pb同位素年龄为234.6±1.2 Ma(MSWD=0.99,n=17).两组年龄的差异可能与海德乌拉铀矿床沥青铀矿中存在普通铅而导致电子探针U-Th-Pb化学定年失准有关.研究认为海德乌拉铀矿床沥青铀矿形成于岩浆期后富Ca的中温热液,矿床的形成可能与古特提斯构造域布青山-阿尼玛卿洋北向俯冲-碰撞后的伸展环境有关.

关键词: 东昆仑造山带;火山岩型铀矿床;LA-ICP-MS U-Pb同位素年龄;后碰撞伸展;地球化学.

中图分类号: P597;P597+.3　　**文章编号:** 1000-2383(2022)08-2940-11　　**收稿日期:** 2021-08-13

Age and Genesis of Pitchblende of the Haidewula Uranium Deposit, East Kunlun Orogen and Its Geological Significance

Zhu Kunhe[1,2], Dai Jiawen[3], Wang Kaixing[1,2*], Liu Xiaodong[1],
Yu Chida[1], Lei Yongliang[1,2], Sun Liqiang[1,2], He Shiwei[1,2]

1. *State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment*, *East China University of Technology*, *Nanchang* 330013, *China*
2. *School of Earth Sciences*, *East China University of Technology*, *Nanchang* 330013, *China*
3. *Qinghai Nuclear Industry Geological Bureau*, *Xining* 810001, *China*

Abstract: The Haidewula uranium deposit, which is located in the eastern part of the East Kunlun orogenic belt, is the newly discovered independenturanium mineralization deposit related to volcanic rocks in northwest China. Therefore, the study on this deposit is beneficial to reveal the formation mechanism of hydrothermal uranium mineralization in the Qinghai-Tibet Plateau.In this paper, scanning electron microscope, electron probe analysis, and Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 42072095);中国核工业集团高校科研攻关项目(No.201619);青海省科技厅重点研发与转化计划"青海省东昆仑火山岩型铀矿资源调查理论创新与找矿突破"(No. 2021-SF-157).

作者简介: 朱坤贺(1996—),女,硕士研究生,从事地质学研究.ORCID:0000-0001-8986-9551. E-mail:1293682238@qq.com
* **通讯作者:** 王凯兴, ORCID:0000-0002-7380-3387. E-mail: xy2gmo02@ecut.edu.cn

引用格式: 朱坤贺,戴佳文,王凯兴,刘晓东,余驰达,雷勇亮,孙立强,何世伟,2022.东昆仑造山带海德乌拉铀矿床沥青铀矿年代学特征及成因.地球科学,47(8):2940-2950.

Citation: Zhu Kunhe, Dai Jiawen, Wang Kaixing, Liu Xiaodong, Yu Chida, Lei Yongliang, Sun Liqiang, He Shiwei, 2022.Age and Genesis of Pitchblende of the Haidewula Uranium Deposit, East Kunlun Orogen and Its Geological Significance.*Earth Science*, 47(8): 2940-2950.

in-situ analysis were carried out to explore the metallogenic age and genesis of the pitchblende at the Haidewula deposit. Analysis results show that the pitchblende shows high Ca and ∑REE contents and low LREE/HREE ratios.It has a U-Th-Pb chemical age of 226 to 350 Ma with a peak of 289 Ma, and a U-Pb isotopic age of 234.6±1.2 Ma (MSWD=0.99, n=17). The difference between the ages obtained by the two methods may be related to the inaccurate U-Th-Pb chemical age caused by a certain amount of common lead in the pitchblende of the Haidewula uranium deposit. We suggest that the pitchblende in the Haidewula uranium deposit were formed in post-magmatic Ca-rich medium-temperature hydrothermal fluids. And the formation of the Haidewula uranium deposit is related to the extensional environment after northward subduction-collision of the Buqingshan-Animaqing Ocean in the Paleo-Tethys tectonic domain.

Key words: The East Kunlun Orogenic Belt; Volcanic-hosted uranium deposit; LA-ICP-MS U-Pb isotopic age; Post-collision extension; geochemistry.

0　引言

我国的火山岩型铀矿床主要位于东部地区，如赣－杭成矿带、武夷山成矿带、沽源－红山子铀成矿带（巫建华等，2014，2017）. 在我国广袤的西北地区，仅在新疆雪米斯坦铀成矿带探明了与铍伴生的火山岩型铀矿床（蔡煜琦等，2015），而与火山岩有关的独立铀矿床较为罕见. 因此，我国西北地区是否具有发育典型的与火山岩有关的独立铀矿床的潜力有待于进一步研究. 海德乌拉铀矿床位于青海省格尔木市宗加镇西南约 140 km 处，地处我国秦祁昆铀成矿域祁连－昆仑铀成矿省祁漫塔格铀成矿远景带的东部（张金带等，2012），大地构造位置处于东昆仑造山带东段（图 1）. 该矿床是我国近些年在西北地区厘定的为数不多的与火山岩有关的独立铀矿床. 因此，海德乌拉铀矿床的发现，标志着我国西北地区首次探明了与火山岩有关的独立铀矿床，具有重要的科研价值和找矿意义.

由于发现时间尚短，海德乌拉铀矿床一些重要的科学问题有待于解决，其中最为关键的问题在于矿床形成时代和成因. 其中，成矿时代对于探讨矿床成因及确定找矿方向有重要的启示意义（骆金诚等，2019）. 沥青铀矿是铀矿床中最为常见的矿石矿物，为研究热液铀矿床成因提供了良好的素材. 由于类质同象、放射性衰变及后期流体改造等诸多因素，沥青铀矿晶体结构中存在一些杂质元素（Mercadier *et al.*, 2011; Martz *et al.*, 2019）. 由于存在放射性衰变形成的 Pb，新鲜的沥青铀矿普遍被认为是铀矿床定年的理想对象（Martz *et al.*, 2019）. 以类质同象形式取代铀进入沥青铀矿中的某些杂质，如 Th、稀土元素及其他元素的含量及其比值等，能够直接反映沥青铀矿结晶条件，因此通常被用来反演成矿流体的物理化学性质并进而探讨沥青铀矿的成因（Mercadier *et al.*, 2011; Frimmel *et al.*, 2014; Ozha *et al.*, 2017）.

本文以海德乌拉铀矿床沥青铀矿为研究对象，在扫描电镜（SEM）和电子探针（EPMA）分析的基础上，利用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪（LA-ICP-MS）对沥青铀矿开展原位微区分析，以厘定沥青铀矿的形成时代并探讨其形成机制，寄望该研究对东昆仑造山带热液铀矿床勘察与开发提供新的依据.

1　区域地质背景和矿床地质特征

昆仑造山带位于青藏高原北缘，是中国大陆巨型构造带－中央造山带的重要组成部分（许志琴等，2006）. 昆仑造山带，既记录了新生代青藏高原的隆起（Yin and Harrison, 2000），又保留了塔里木、柴达木和祁漫塔格板块之间俯冲与碰撞以及古特提斯洋闭合的信息（Roger *et al.*, 2003）. 以阿尔金走滑断裂带为界，昆仑造山带可分为东、西昆仑造山带. 以昆中、昆南缝合带为界，东昆仑造山带又可以分为北祁漫塔格带、中昆仑带、南昆仑带以及巴颜喀拉地体（图 1a）. 东昆仑造山带内元古宙、显生宙地层发育较为齐全（杜玉良，2012）. 地层由老到新分别为：古元古界金水口岩群片麻岩、片岩及大理岩等中高级变质岩系，中－新元古界万宝沟群和冰沟群碎屑岩、火山岩及碳酸盐岩等浅变质岩系，寒武－奥陶系滩间山群变碎屑岩、变质火山岩夹生物碎屑岩等浅变质岩系，奥陶－志留系纳赤台群火山岩及火山碎屑岩、泥盆系牦牛山组火山碎屑岩组合，三叠系鄂拉山组中酸性火山岩、新生代红色碎屑岩等. 区内岩浆侵入作用较强烈，主要包括早古生代、二叠－三叠纪侵入岩（国显正等，2017）.

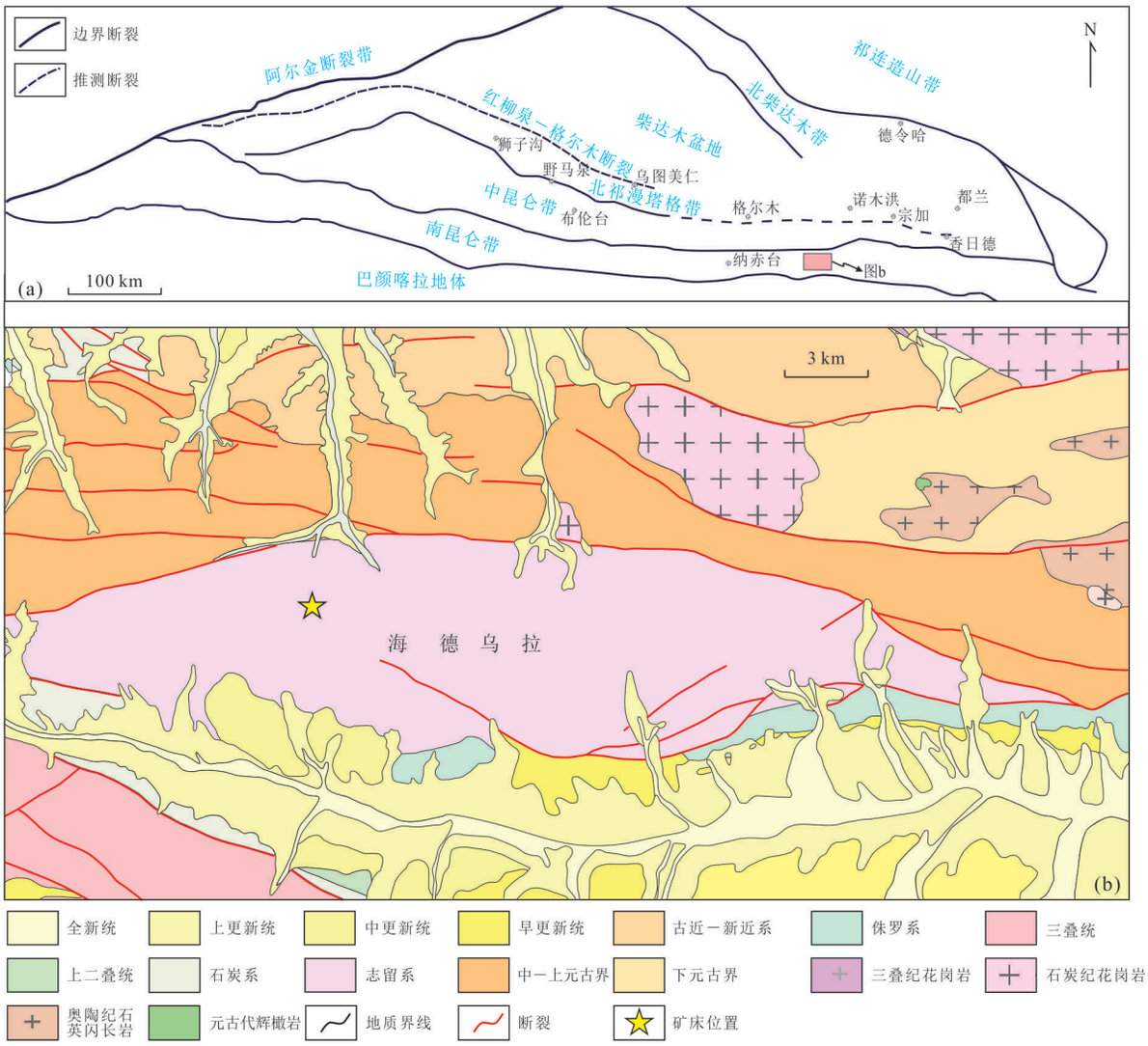

图 1　(a)东昆仑造山带构造简图(改自 Dong *et al*., 2018);(b)海德乌拉铀矿床地质简图(改自雷勇亮等,2021)

Fig.1　(a) Simplified tectonic map of the East Kunlun Orogenic Belt (from Dong *et al*., 2018); (b) Simplified geological map of the Haidewula volcanic rock area (from Lei *et al*., 2021)

海德乌拉铀矿床位于南昆仑带内,南昆仑带主要由古生代—三叠纪沉积和火山岩组合的不连续逆冲推覆带构成,发育少量前寒武纪变质岩和早古生代岩体碎片.赋矿火山盆地呈扁长形,东西延伸约 30 km,南北最长延伸约 7 km(图 1b).盆地北侧与中元古代呈断层接触,南侧发育有大量新生代的红色碎屑沉积物.盆地内火山活动具有多次喷发特征,岩性以玄武岩—粗安岩—粗面岩、流纹岩、流纹质熔结凝灰岩为主,夹有少量红色碎屑砂岩、粉砂岩,被晚期辉绿岩和花岗斑岩侵入(雷勇亮等,2021).该套火山岩最初被认为形成于侏罗纪(朱云海等,2003).本课题组最近研究表明海德乌拉盆地流纹岩形成于古生代志留纪罗德洛世,具有与华南火山岩型铀矿床赋矿流纹岩类似的 A 型岩浆岩地球化学特征(雷勇亮等,2021).目前,该矿床已圈定 12 条铀矿化带,长 100～1 300 m 不等,宽 50～200 m 不等,矿化带受北东—北东东向、倾向南东的断裂构造及其次级裂隙控制.平均铀品位 0.038%～1.310%,单样最高铀品位为 10.1%(李彦强等,2021).铀矿化受北东向断裂及其次级断裂、裂隙群控制.铀矿体形态复杂,多呈透镜状和细脉状,赋存于火山岩的岩性界面、隐爆角砾岩及裂隙中(图 2).矿床热液蚀变发育强烈,成矿前期热液蚀变主要有黄铁矿化(图 2c),成矿期蚀变主要有紫黑色萤石化(图 2b,2d,2e)、赤铁矿化(图 2c)、肉红色碳酸盐化和硅化等(图 2d,2e),成矿后期蚀变主要包括白色方解石化和伊利石化等.铀矿石主要呈紫黑色、猪肝红和杂色(图 2b,2c,2d).沥青铀矿为主要矿石矿

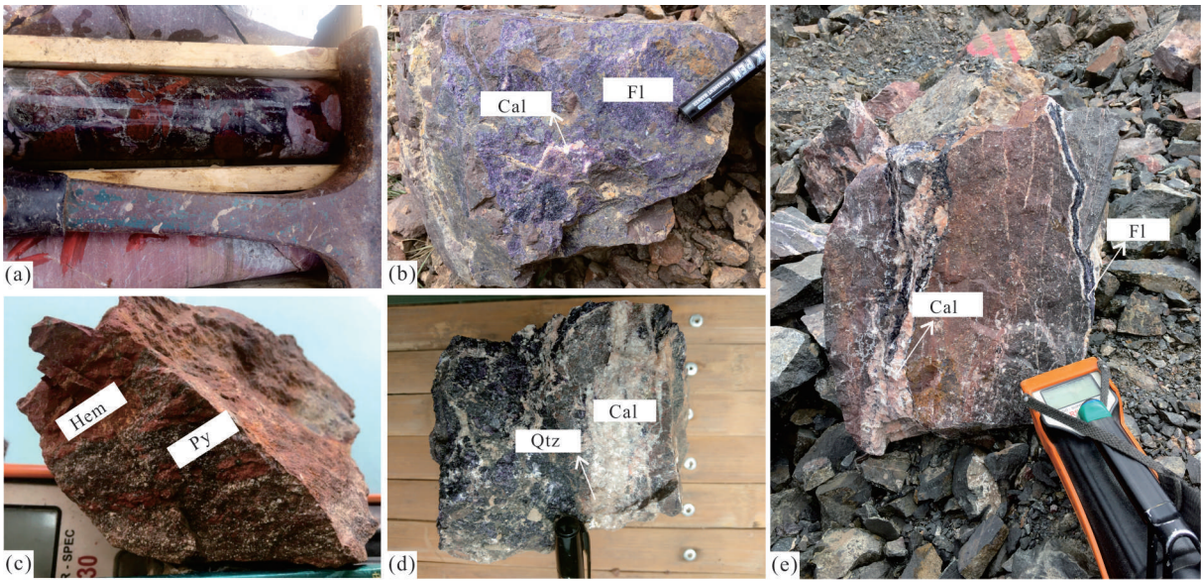

图 2　海德乌拉铀矿床的矿石特征

Fig.2　Ore characteristics of theHaidewula uranium deposit

a. 隐爆角砾岩型矿石;b. 紫黑色萤石化矿石;c. 浸染状赤铁矿－黄铁矿化矿石;d. 硅化－碳酸盐化矿石;e. 脉状萤石化－碳酸盐化矿石; Fl. 萤石;Py. 黄铁矿;Hem. 赤铁矿;Qtz. 石英;Cal. 方解石

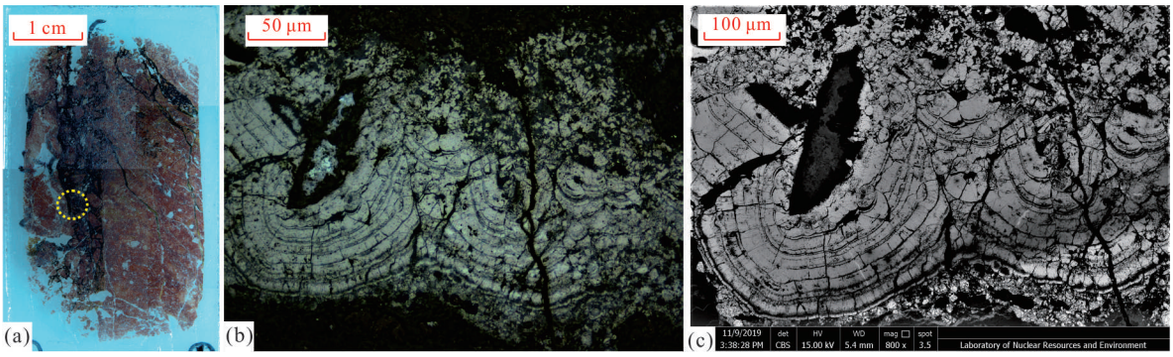

图 3　海德乌拉铀矿床沥青铀矿产状

Fig.3　The occurrence diagrams of pitchblende in the Haidewula uranium deposit

a.沥青铀矿薄片;b.沥青铀矿的显微镜图(反射光);c.沥青铀矿的BSE图

物,呈脉状和浸染状(图 3),与石英、萤石、方解石、黄铁矿和赤铁矿共生. 显微结构上海德乌拉铀矿床沥青铀矿具有同心环特征并发育有干裂纹(图 3b, 3c). 根据矿石矿物和脉石矿物共生组合关系,海德乌拉铀矿床矿化类型包括沥青铀矿－萤石－方解石型、沥青铀矿－黄铁矿－赤铁矿型和沥青铀矿－方解石－石英型.

2　样品及分析方法

在采集的手标本样品中圈出沥青铀矿的范围,交由室内实验人员制成电子探针片. 在反光镜下观察并圈定其中的沥青铀矿. 在显微镜反射光下,沥青铀矿呈暗灰白色,具有同心环特征并发育有干裂纹(图 3b). 对电子探针片进行镀碳处理后,再进行背散射成像,在此基础上开展电子探针主量元素和LA-ICP-MS微量元素和同位素分析. LA-ICP-MS测试选择与电子探针相同的点位加以测试.

背散射图像在东华理工大学核资源与环境国家重点实验室利用FEI捷克有限公司生产的FEI-Nova NanoSEM450场发射扫描电镜完成,工作条件为:加速电压15.0 kV,高真空模式,最高分辨率1.0 nm. X射线能谱仪为英国牛津仪器厂生产的牛津Inca Energy X-Max20,在MnKα处仪器分辨率优于 127 eV,鉴定元素范围^{4}Be-^{92}U,最大计数率

50 000 cps. 沥青铀矿电子探针化学成分分析在东华理工大学核资源与环境国家重点实验室完成，仪器型号为JXA-8100，工作条件：加速电压为15.0 kV，束流为20.0 nA，束斑直径大小为1 μm，修正方式为ZAF，测试过程按照GB/T15617-2002标准执行. 所采用的标样：U、Th、Pb均采用晶质铀矿[$\omega(UO_2)=90.2\%$，$\omega(ThO_2)=6.2\%$，$\omega(PbO)=1.75\%$]为标样，Si用硬玉，Ca用钙长石，Fe用磁铁矿，轻稀土(La、Ce、Pr、Nd)用独居石，其他稀土元素利用人工合成稀土磷酸盐. U、Th、Pb、Ce、La、Ba、Nd峰位计数时间为20 s，背景计数时间为10 s；其他元素特征峰的测量时间为10 s，背景测量时间为5 s. 所有元素检测限皆为200×10^{-6}，主量元素误差在1.5%以内，微量元素误差在5.0%以内.

沥青铀矿原位U-Pb微量元素和同位素定年在武汉上谱分析科技有限责任公司LA-ICP-MS仪器上完成. 激光剥蚀系统由GeolasProCOMPexPro ^{102}ArF 193 nm准分析激光器和MicroLas光学系统组成，ICP-MS型号为Agilent 7700e，激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气作为补偿气以调节灵敏度，二者在进入ICP-MS之前通过一个T型接头混合，激光剥蚀系统配置有信号平滑装置. 本次分析的激光束斑直径为16 μm，剥蚀频率为1 Hz. 采用核工业北京地质研究院研制的国家铀矿标准物质GBW04420作外标校正U-Pb同位素分馏，利用NIST610矫正微量元素含量. 每个时间分辨分析数据包括大约20～30 s空白信号和50 s样品信号接收区间. 对分析数据的离线处理在ICP-MS DataCal8.3(Liu *et al.*, 2008)软件上完成. 详细的实验流程、数据处理和校正方法等详见宗克清等(2015). 沥青铀矿原位U-Pb年龄谐和图绘制和年龄加权平均计算由Isoplot/Ex_Version 3.00软件(Ludwig, 2003)完成.

3 沥青铀矿化学成分

海德乌拉铀矿床沥青铀矿共测试50个EMPA点，主量元素测试结果见附表1. 海德乌拉铀矿床沥青铀矿的化学组成表现为：UO_2为83.05%～89.27%，中间值为86.32%；CaO为2.23%～3.43%，中间值为2.80%；PbO为2.68%～4.14%，中间值为3.40%；FeO为0.17%～1.18%，中间值为0.37%；SiO_2为0.26%～1.51%，中间值为0.45%，Th含量远低于检测限；稀土氧化物总量高($\sum REE_2O_3$：1.13%～2.30%)，轻稀土氧化物($\sum LREE_2O_3$：0.56%～1.68%)相对于重稀土氧化物富集($\sum HREE_2O_3$：0.14%～0.99%).

沥青铀矿化学组成中存在较多的杂质元素. 在这些杂质元素中，钍、稀土元素和钙等会在沥青铀矿形成过程中以类质同象形式取代U进入其晶体结构中(Martz *et al.*, 2019). 海德乌拉铀矿床沥青铀矿具有高的Ca含量，且CaO与UO_2之间的负相关性(图4a)，表明Ca可能是以类质同象取代U进入沥青铀矿中. 在被后期流体改造时，流体中的Fe和Si等元素是取代Pb进入沥青铀矿结构中(Martz *et al.*, 2019). 故而，FeO和SiO_2含量，以及它们与PbO之间的相关性可用来判别沥青铀矿是否经历后期蚀变(Martz *et al.*, 2019；郑国栋等，2021). Martz *et al.*(2019)认为未蚀变的沥青铀矿相比蚀变后的沥青铀矿而言，前者所含高Pb和较低的Fe和Si含量. 海德乌拉铀矿床沥青铀矿具有较低的FeO和SiO_2含量，同时FeO、SiO_2以及它们之和与PbO之间并未呈现出负相关性(图4)，说明Fe和Si并不是在后期热液过程中以替换PbO的形式进入到沥青铀矿之中. 因此，笔者认为被测点位是新鲜的未受到蚀变的沥青铀矿.

沥青铀矿LA-ICP-MS原位微量元素分析结果见附表2和图5. 微量元素测试结果显示海德乌拉矿床沥青铀矿具有较高的稀土元素总量($10\ 351\times10^{-6}$～$14\ 027\times10^{-6}$，中间值为$12\ 365\times10^{-6}$)，相对富集轻稀土元素($LREE_N/HREE_N$为1.63～1.90)，具有明显的Eu负异常，δEu为0.42～0.48，中间值为0.44. 在稀土元素球粒陨石标准化蛛网图中(图5)，海德乌拉铀矿床沥青铀矿显示出与热液脉型、侵入岩型和不整合面型铀矿床不同的稀土配分模式，且与俄罗斯思特烈卓夫火山岩型铀矿床的沥青铀矿具有明显不同的稀土元素配分模式(图5a)，而呈现出与形成于岩浆期后热液环境下的铀矿物类似的稀土配分模式(图5b).

4 沥青铀矿成因

在铀简单氧化物(主要是沥青铀矿和晶质铀矿)形成过程中，一些元素会以类质同象形式进入其中. 这些元素进入铀的简单氧化物时受控于成矿流体的物理化学性质、成矿物质来源以及同沉淀矿物等(Mercadier *et al.*, 2011；Martz *et al.*, 2019). 故而，这些元素及它们之间的比值可以用来反演铀的

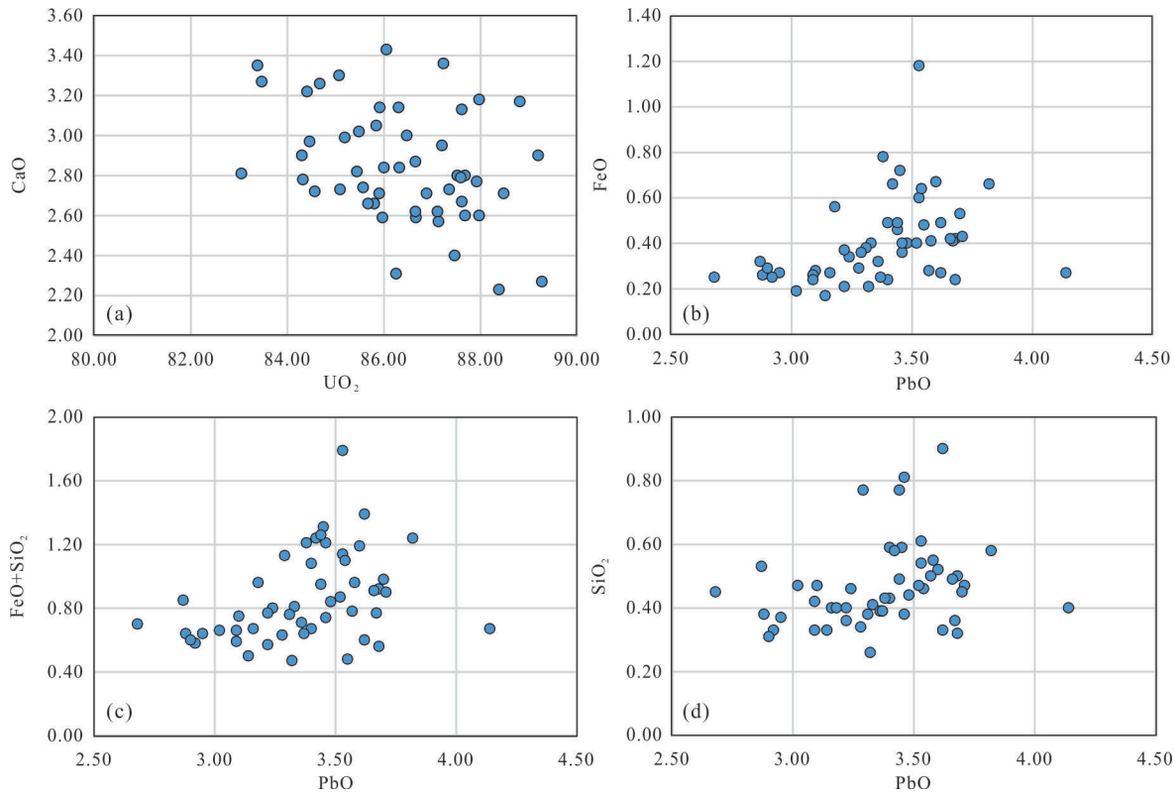

图 4　海德乌拉铀矿床沥青铀矿 $CaO-UO_2$(a)、$FeO-PbO$(b)、$SiO_2+FeO-PbO$(c)和 SiO_2-PbO(d)图

Fig.4　The $CaO-UO_2$(a), $FeO-PbO$(b), $SiO_2+FeO-PbO$ (c) and SiO_2-PbO(d) diagrams of pitchblende in the Haidewula uranium deposit

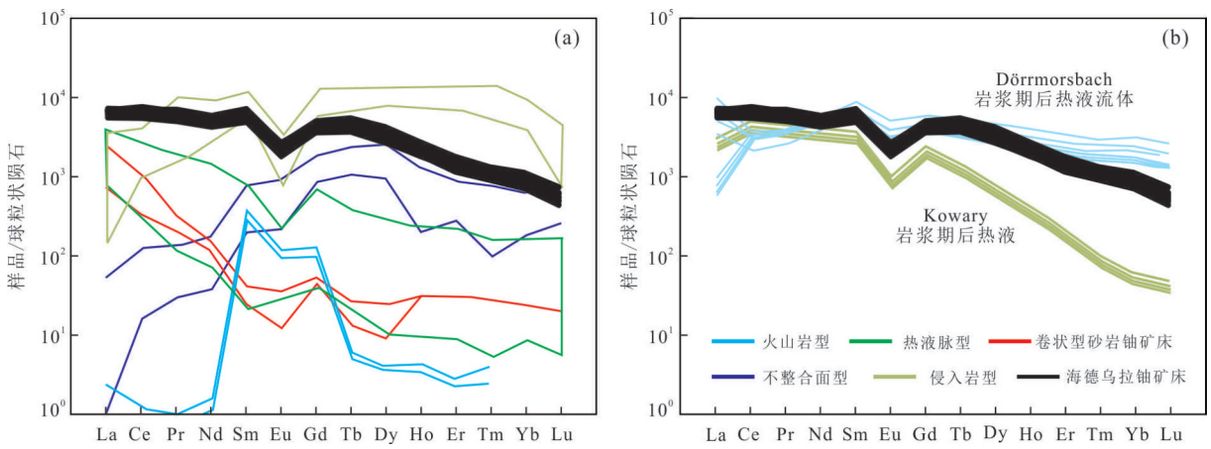

图 5　海德乌拉铀矿床沥青铀矿稀土元素球粒陨石标准化配分

Fig.5　Chondrite-normalization REE patterns of pitchblende in the Haidewula uranium deposit

稀土元素标准化值据 Boynton (1984), 底图改自 Mercadier *et al.*(2011)和 Frimmel *et al.*(2014)

简单氧化物形成的环境. 如形成于岩浆/变质环境的铀氧化物具有高的 Th 含量及低的 U/Th 比值小于 100;形成于高温热液环境下铀的氧化物 U/Th 比值介于 100～1 000 之间;形成于中低温环境下铀的氧化物具有低的 Th 含量及 U/Th 比值大于 1 000 (Mercadier *et al.*, 2011; Frimmel *et al.*, 2014). 高温环境下形成的铀简单氧化物具有高的稀土元素总量,低的轻重稀土比值以及轻重稀土分异不明显的稀土配分模式图;中低温环境下形成的铀简单氧化物有较低的稀土元素含量及明显分异的稀土配分模式(Mercadier *et al.*, 2011; Frimmel *et al.*, 2014). 总而言之,具有相似的稀土配分模式的铀矿物之间具有可类比的成因(Mercadier *et al.*, 2011).

如前所述,海德乌拉铀矿床沥青铀矿具有较低

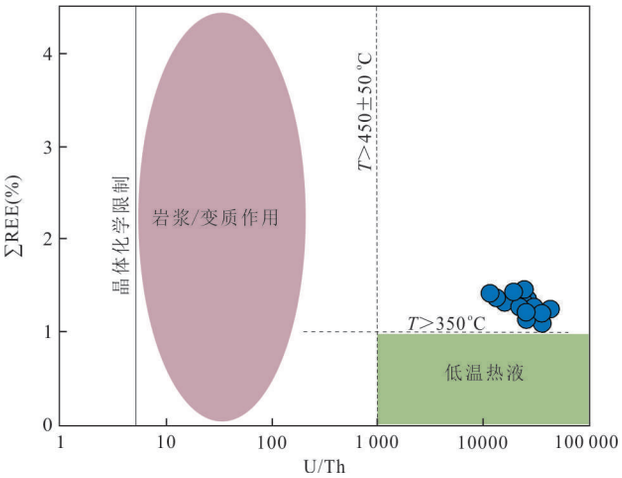

图6　海德乌拉铀矿床沥青铀矿稀土总量与U/Th关系

Fig.6　Total REE versus U/Th diagram for pitchblende in the Haidewula uranium deposit

底图据Frimmel *et al*.(2014)

的Th含量,在EMPA测试过程中Th含量低于检测线,在LA-ICP-MS微量元素测试获得Th含量为18×10^{-6}～65×10^{-6}(中间值为31×10^{-6}),U/Th比值为12 900～50 195,说明海德乌拉铀矿床沥青铀矿形成温度低于450 °C(图6),高的稀土元素总量及相对较低的轻重稀土元素分异程度($LREE_N/HREE_N$为1.63～1.90)表明海德乌拉铀矿床沥青铀矿形成温度高于350 °C(图6).在稀土元素球粒陨石标准化图中(图5b),海德乌拉铀矿床沥青铀矿的稀土配分模式与岩浆期后热液流体相关的铀矿床类似.因此,可认为海德乌拉铀矿床沥青铀矿形成于350～450 °C的成矿流体中,该成矿流体主要与岩浆期后热液流体有关.

此外,海德乌拉铀矿床沥青铀矿具有较高Ca含量(1.60%～2.45%).已有研究表明,在热液脉型铀矿床中,新鲜的沥青铀矿CaO含量最高可以达到8%(Ballouard *et al*., 2017),这可能与成矿流体富含Ca有关(Martz *et al*., 2019).Ca和U具有相似的离子半径,且大部分热液铀矿床的形成都与富Ca的流体或者岩浆有关(Richard *et al*., 2016).因此,海德乌拉铀矿床沥青铀矿较高的CaO含量表明其可能起源于富Ca的流体中,并经历Ca和U之间的类质同象.CaO与UO_2之间的负相关性(图4a),也说明海德乌拉铀矿床沥青铀矿形成与富Ca流体有关.

5　成矿时代

利用郭国林等(2012)用VC编写的年龄计算程序,即根据UO_2、ThO_2和PbO浓度,采用Bowles(1990)多次迭代的方法得到海德乌拉地区沥青铀矿50个测点U-Th-Pb化学年龄,其化学年龄范围为226～350 Ma,主要集中于270～300 Ma,峰值为289 Ma(图7a).

海德乌拉铀矿床沥青铀矿LA-ICP-MS U-Pb同位素测试结果见附表3.海德乌拉沥青铀矿测得$^{206}Pb/^{238}U$比值为0.048 8～0.062 3,$^{207}Pb/^{235}U$比值为0.792 1～1.453 6,利用Isoplot R软件(Vermeesch,2018),采用等时线法进行普通铅矫正后得到的$^{206}Pb/^{238}U$和$^{207}Pb/^{235}U$比值分别0.036 5～0.038 1和0.255 3～0.268 2.计算得到的$^{206}Pb/^{238}U$和$^{207}Pb/^{235}U$年龄都介于231～241 Ma之间,得到的$^{206}Pb/^{238}U$加权平均年龄为234.6±1.2 Ma(MSWD=0.99,n=17,图7b).

定年结果显示,海德乌拉沥青铀矿U-Th-Pb化学年龄和同位素年龄存在较大的不一致性.该现象产生的原因可能与不同定年方法的有效性有关.U-Th-Pb化学年龄有效的前提条件为:(1)被测的沥青铀矿未遭受后期流体改造;(2)沥青铀矿中不存在非放射性成因的普通铅(Martz *et al*., 2019).尽管LA-ICP-MS并不能够有效的测定铀氧化物中作为主量元素Pb的真实含量,然而其较高的普通铅占比却依旧能够说明海德乌拉铀矿床沥青铀矿中存在大量的普通铅.因此,本文认为火山岩型铀矿床沥青铀矿同位素年龄相对可靠,即该矿床成矿年龄为234.6±1.2 Ma.

6　成矿意义

海德乌拉地区火山岩为中志留世(426 Ma)的A型中性－酸性火山岩组合,铀矿床成矿时代为晚三叠世(235 Ma),该成矿时代与海德乌拉火山盆地内发育的辉绿岩年龄一致(233 Ma,作者待发表数据).通过分析东昆仑地区已有成岩－成矿年代学数据(图8和附件1中的数据),发现海德乌拉火山盆地成岩－成矿事件可能与早古生代以来东昆仑造山带大规模成岩－成矿作用有关.研究表明,东昆仑造山带自早寒武世以来经历了至少两次大规模构造岩浆作用,第一次与古生代始特提斯构造域的演化有关,第二次与晚古生代－中生代的古特提斯洋构造域的演化有关(Dong *et al*., 2018).已有研究表明东昆仑造山带始特提斯洋北向俯冲作用起始于早寒武世且延续至早志留世(刘彬等,2013).

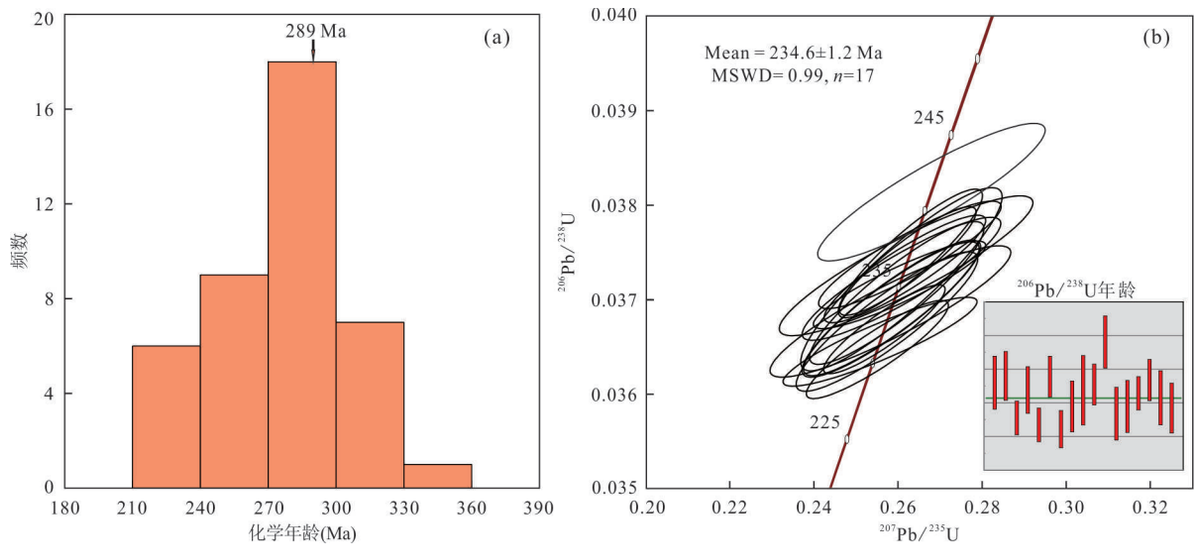

图 7　海德乌拉铀矿床沥青铀矿化学年龄频数图(a)及 U-Pb 同位素年龄谐和图(b)

Fig.7　Frequencyof chemical age (a) and U-Pb isotope age concordance(b) diagrams of pitchblende in theHaidewulauranium deposit

中志留世至泥盆纪发育的大面积 A 型花岗岩(刘彬等，2013；Dong *et al.*, 2018)、I 型花岗岩(贾小辉等，2009)、海德乌拉 A 型火山岩(426 Ma)以及磨拉石沉积(Dong *et al.*, 2018)，表明自中志留世开始东昆仑造山带进入了后碰撞伸展环境(Xin *et al.*, 2018). 故而，海德乌拉流纹岩形成于始特提斯洋闭合后引发的后碰撞伸展环境.

自晚古生代以来，东昆仑地区古特提斯构造域布青山－阿尼玛卿洋北向俯冲，在东昆仑造山带内形成一系列 I 型花岗岩(Dong *et al.*, 2018). 早三叠世存在的与洋壳俯冲有关的中压变质作用说明布青山－阿尼玛卿洋俯冲作用可能一直持续到早三叠世(陈能松等，2007). 晚三叠世时期，东昆仑造山带岩浆岩主要为高钾钙碱性－钾玄岩系列，具有后碰撞花岗岩的特征，区内存在的 A 型花岗岩、安山岩－流纹岩等都表明东昆仑造山带晚三叠世属于后碰撞环境(Dong *et al.*, 2018). 然而，由布青山－阿尼玛卿洋闭合后的碰撞到后碰撞伸展环境的起始时间目前仍存在争议. 由于中三叠世侵入岩记录较少，所以大部分学者认为中三叠世为同碰撞环境(Xiong *et al.*, 2014). 然而，Ding *et al.*(2014)对中三叠世花岗质岩脉的研究认为东昆仑造山带在中三叠世就已经进入了后碰撞环境.

通过对热液铀矿床的研究，前人认为热液铀成矿作用与区域内岩石圈伸展有关，每一期次铀成矿作用都对应于一期次岩石圈伸展环境(Hu *et al.*, 2009). 因此，本次研究得到的海德乌拉铀矿床晚三叠世成矿年龄(234.6±1.2 Ma)，意味着东昆仑造山带至少在 235 Ma 之前就已经进入了伸展环境. 在伸展环境下，上涌的幔源铁镁质岩浆可能为区内成矿提供热和矿化剂(如 CO_2 和 F)，形成富矿化剂的热液流体. 卤族元素和 CO_2 能够进一步提高铀在热液流体中的溶解度，富含矿化剂的热液流体能够大量萃取火山岩中的铀形成富铀流体. 在合适的物理化学条件下，该成矿流体与围岩之间发生化学反应并导致沥青铀矿、方解石和萤石的沉淀. 东昆仑造山带在早中生代时期存在一系列成矿事件，如 239 Ma 左右的东昆仑东段哈日扎铜钼矿(国显正等，2016)、234 Ma 左右的祁漫塔格卡尔却卡铜钼矿(高永宝等，2018)、236 Ma 左右的祁漫塔格尕林格铁－铜多金属矿(于淼等，2015)及 236Ma 左右的鄂拉山什多龙矽卡岩型辉钼矿(李文良等，2014)等成矿事件. 综合来看，海德乌拉成矿带内沥青铀矿的成矿年龄与上述矿床成矿年龄吻合，说明中－晚三叠世是海德乌拉地区的一个重要成矿期，这也可能进一步说明至少从中－晚三叠世东昆仑造山带已经进入了后碰撞伸展环境.

7　结论

通过以上对海德乌拉铀矿床沥青铀矿的研究，本文得到以下 3 点结论：

(1)海德乌拉铀矿床沥青铀矿 $^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄为 234.6±1.2 Ma，表明该地区铀矿形成于晚三叠世.

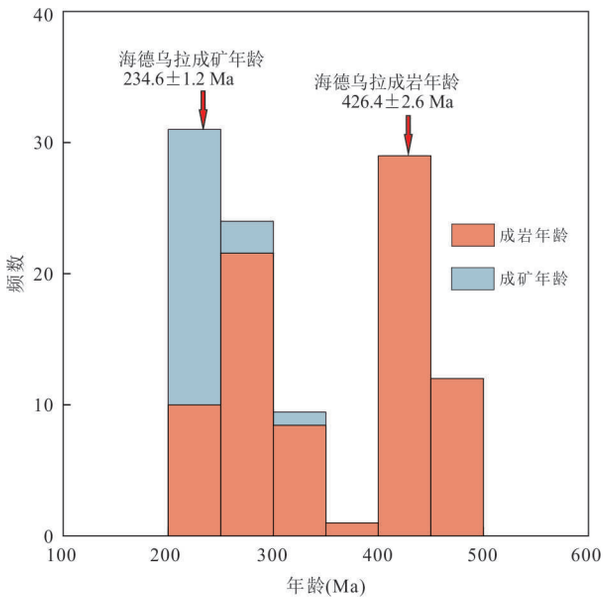

图8 东昆仑造山带岩浆岩成岩和成矿年龄直方图

Fig.8 Diagenetic and metallogenicages histogramsin the East Kunlun orogenic belt

其成岩年龄来自 Dong *et al*.(2018);成矿年龄来自补充材料中的文献

(2)海德乌拉铀矿床沥青铀矿形成与岩浆晚期富Ca的中温热液流体有关.

(3)海德乌拉铀矿床的形成与古特提斯构造域布青山—阿尼玛卿洋北向俯冲—碰撞后的伸展环境有关.

致谢:样品处理与实验测试得到了武汉上谱分析检测有限公司工作人员的指导和帮助,在成文过程中得到中国地质大学(武汉)张迪博士的帮助,在修改过程中得到三位匿名审稿老师和责任编辑的帮助,在此一并表示感谢.

附表见本刊官网(www.earth-science.net).

References

Bowles, J. F. W, 1990. Age Dating of Individual Grains of Uraninite in Rocks from Electron Microprobe Analyses. *Chemical Geology*, 83(1/2): 47—53. https://doi.org/10.1016/0009-2541(90)90139-X.

Ballouard, C., Poujol, M., Boulvais, P., et al., 2017. Magmatic and Hydrothermal Behavior of Uranium in Syntectonic Leucogranites: The Uranium Mineralization Associated with the Hercynian Guérande Granite (Armorican Massif, France). *Ore Geology Reviews*, 80: 309—331. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.06.034.

Boynton, W. V., 1984. Chapter 3: Cosmochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies. In: P. Henderson (Editor), Developments in Geochemistry. Elsevier, 63—114.

Chen, N.S., Sun, M., Wang, Q.Y., et al., 2007. Electron Microprobe Chemical Ages of Monazites in the Central Kunlun Belt of the East Kunlun Orogenic Belt: Records of Multi-Stage Tectonic Metamorphism Events. *Chinese Science Bulletin*, (11): 1297—1306 (in Chinese with English abstract).

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

Du, Y.L., Jia, Q.Z., Han, S.F., 2012. Mesozoic Tectono-Magmatic-Mineralization and Copper-Gold Polymetallic Ore Prospecting Research in East Kunlun Metallogenic Belt in Qinghai. *Northwestern Geology*, 45(4): 69—75 (in Chinese with English abstract).

Ding, Q. F., Jiang, S. Y., Sun, F. Y, 2014. Zircon U-Pb Geochronology, Geochemical and Sr-Nd-Hf Isotopic Compositions of the Triassic Granite and Diorite Dikes from the Wulonggou Mining Area in the Eastern Kunlun Orogen, NW China: Petrogenesis and Tectonic Implications. *Lithos*, 205: 266—283. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.07.015

Dong, Y. P., He, D. F., Sun, S. S., et al., 2018. Subduction and Accretionary Tectonics of the East Kunlun Orogen, Western Segment of the Central China Orogenic System. *Earth-Science Reviews*, 186: 231—261. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.12.006

Frimmel, H. E., Schedel, S., Brätz, H, 2014. Uraninite Chemistry as Forensic Tool for Provenance Analysis. *Applied Geochemistry*, 48: 104—121. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.07.013

Guo, G.L., Zhang, Z.S., Liu, X.D., et al., 2012. EPMA Chemical U-Th-Pb Dating of Uraninite in Guangshigou Uranium Deposit. *Journal of East China University of Technology(Natural Science)*, 35(4): 309—314 (in Chinese with English abstract).

Guo, X.Z., Jia, Q.Z., Kong, H.L., et al., 2016. Age, Genesis and Geological Significance of Harizha Quartz Diorite in the Eastern Part of East Kunlun. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 35(5):18—26 (in Chinese with English abstract).

Guo, X.Z., Wang, H.J., Xu, R.K., et al., 2017. Zircon U-Pb Dating of Tieshiguan Eclogite in the Northern Margin of Qaidam Basin and Its Geological Significance. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 36(6): 995—1006 (in Chinese with English abstract).

Gao, Y.B., Li, K., Qian, B., et al., 2018. The Metallogenic

Chronology of Kaerqueka Deposit in Eastern Kunlun: Evidences from Molybdenite Re-Os and Phlogopite Ar-Ar Ages. *Geotectonica et Metallogenia*, 42(1): 96—107 (in Chinese with English abstract).

Hu, R. Z., Burnard, P. G., Bi, X. W., et al., 2009. Mantle-Derived Gaseous Components in Ore-Forming Fluids of the Xiangshan Uranium Deposit, Jiangxi Province, China: Evidence from He, Ar and C Isotopes. *Chemical Geology*, 266(1/2): 86—95. https://doi. org/10.1016/j. chemgeo.2008.07.017

Jia, X.H., Wang, Q., Tang, G.J., 2009. A-Type Granites: Research Progress and Implications. *Geotectonica et Metallogenia*, 33(3): 465—480 (in Chinese with English abstract).

Ludwig, K. R., 2003. ISOPLOT 3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, Berkeley.

Li, Y.Q., Duan, J.H., Dai, J.W., et al., 2021. Geochemical characteristics of host rocks and uranium mineralization in Haidewula area, Qinghai. *Uranium Geology*, 37(4): 643—652 (in Chinese with English abstract).

Liu, Y. S., Hu, Z. C., Gao, S., et al., 2008. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. *Chemical Geology*, 257(1/2): 34—43. https://doi. org/10.1016/j.chemgeo.2008.08.004

Liu, B., Ma, C.Q., Jiang, H.A., et al., 2013. Early Paleozoic Tectonic Transition from Ocean Subduction to Collisional Orogeny in the Eastern Kunlun Region: Evidence from Huxiaoqin Mafic Rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6): 2093—2106 (in Chinese with English abstract).

Li, W.L., Xia, R., Qing, M., et al., 2014. Re-Os Molybdenite Ages of the Shenduolong Skarn Mo-Pb-Zn Deposit and Geodynamic Framework, Qinghai Province. *Rock and Mineral Analysis*, 33(6): 900—907 (in Chinese with English abstract).

Luo, J.C., Shi, S.H., Chen, Y.W., et al., 2019. Review on Dating of Uranium Mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 35(2):589—605 (in Chinese with English abstract).

Lei, Y.L., Dai, J.W., Bai, Q., et al., 2021. Genesis and implications of peraluminous A-Type rhyolite in the Haidewula area, East Kunlun Orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 36 (7): 1964—1982 (in Chinese with English abstract).

Mercadier, J., Cuney, M., Lach, P., et al., 2011. Origin of Uranium Deposits Revealed by Their Rare Earth Element Signature. *Terra Nova*, 23(4): 264—269. https://doi.org/ 10.1111/ j. 1365-3121. 2011. 01008. X

Martz, P., Mercadier, J., Perret, J., et al., 2019. Post-Crystallization Alteration of Natural Uraninites: Implications for Dating, Tracing, and Nuclear Forensics. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 249: 138—159. https://doi.org/10.1016/j.gca.2019.01.025

Ozha, M. K., Pal, D. C., Mishra, B., et al., 2017. Geochemistry and Chemical Dating of Uraninite in the Samarkiya Area, Central Rajasthan, Northwestern India-Implication for Geochemical and Temporal Evolution of Uranium Mineralization. *Ore Geology Reviews*, 88: 23—42. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.04.010

Roger, F., Arnaud, N., Gilder, A., et al., 2003. Geochronological and Geochemical Constraints on Mesozoic Suturing in East Central Tibet. *Tectonics*, 22: 1037—1057. https://doi.org/ 10. 1029/ 2002TC001466

Richard, A., Cathelineau, M., Boiron, M. C., et al., 2016. Metal-Rich Fluid Inclusions Provide New Insights into Unconformity-Related U Deposits (Athabasca Basin and Basement, Canada). *Mineralium Deposita*, 51(2): 249—270. https://doi.org/10.1007/s00126-015-0601-4

Vermeesch, P, 2018. Dissimilarity Measures in Detrital Geochronology. *Earth - Science Reviews*, 178: 310—321. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.11.027

Wu, J.H., Xie, K.R., Wu, R.G., et al., 2014. The New Progress in the Study of Mesozoic Rhyolite-Trachyte Assemblage and Hydrothermal-Type Uranium Mineralization in Eastern China. *Advances in Earth Science*, 29(12): 1372—1382(in Chinese with English abstract).

Wu, J.H., Lao, Y.J., Xie, G.F., et al., 2017. Stratigraphy and Geochronology of the Volcanic Rocks in the Xiangshan Uranium Orefield, Jiangxi Province and Its Geological Implications. *Geology in China*, 44(5): 974—992(in Chinese with English abstract).

Xu, Z.Q., Yang, J.S., Li, H.B., et al., 2006. The Early Palaeozoic Terrene Framework and the Formation of the High-Pressure (HP) and Ultra-High Pressure (UHP) Metamorphic Belts at the Central Orogenic Belt (COB). *Acta Geologica Sinica*, 80(12): 1793—1806 (in Chinese with English abstract).

Xiong, F.Q., Ma, C.Q., Zhang, J.Y., et al., 2014. Reworking of Old Continental Lithosphere: an Important Crustal Evolution Mechanism in Orogenic Belts, As Evidenced by Triassic I-Type Granitoids in the East Kunlun Orogen, Northern Tibetan Plateau. *The Geological Society of London*, 171: 847—863. https://doi. org/ 10.1144/ jgs2013-038

Xin, W., Sun, F. Y., Li, L., et al., 2018. The Wulonggou Metaluminous A_2-Type Granites in the Eastern Kunlun Orogenic Belt, NW China: Rejuvenation of Subduction-

Related Felsic Crust and Implications for Post-Collision Extension. *Lithos*, 312/313: 108－127. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.05.005

Yin, A., Harrison, T.M., 2000. Geologic Evolution of the Himalayan－Tibetan Orogeny. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28: 211－280. https://doi.org/10. 1146/ annurev. earth. 28. 1. 211

Yu, M., Feng, C.Y., Liu, H.C., et al., 2015. ^{40}Ar-^{39}Ar Geochronology of the Galinge Large Skarn lron Deposit in Qinghai Province and Geological Significance. *Acta Geologica Sinica*, 89(3): 510－521(in Chinese with English abstract).

Zhu, Y.H., Zhu, Y.S., Lin, Q.X., et al., 2003. Characteristics of Early Jurassic Volcanic Rocks and Their Tectonic Significance in Haidewula, East Kunlun Orogenic Belt, Qinghai Province. *Earth Science*, 28(6): 653－659 (in Chinese with English abstract).

Zhang, J.D., Li, Z.Y., Cai, Y.Q., et al., 2012. The Main Advance and Achievements in the Potential Evaluation of Uranium Resource in China. *Uranium Geology*, 28(6): 321－326(in Chinese with English abstract).

Zong, K.Q., Chen, J.Y., Hu, Z.C., et al., 2015. In-Situ U-Pb Dating of Uraninite by fs-LA-ICP-MS. *Scientia Sinica (Terrae)*, 45(9): 1304－1319(in Chinese with English abstract).

Zheng, G.D., Luo, Q., Liu, W.Q., et al., 2021. In-Situ U-Pb Age and Elemental Characteristics of Pitchblende in Shulouqiu Uranium Deposit and Its Geological Significance. *Scientific Journal of Earth Science*, 1－24(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

蔡煜琦,张金带,李子颖,等,2015.中国铀矿资源特征及成矿规律概要.地质学报,89(6):1051－1069.

陈能松,孙敏,王勤燕,等,2007.东昆仑造山带昆中带的独居石电子探针化学年龄:多期构造变质事件记录.科学通报,(11): 1297－1306.

杜玉良,贾群子,韩生福,2012.青海东昆仑成矿带中生代构造－岩浆－成矿作用及铜金多金属找矿研究.西北地质,45(4): 69－75.

高永宝,李侃,钱兵,等,2018.东昆仑卡而却卡铜钼铁多金属矿床成矿年代学:辉钼矿Re-Os和金云母Ar-Ar同位素定年约束.大地构造与成矿学,42(1): 96－107.

国显正,贾群子,孔会磊,等,2016.东昆仑东段哈日扎石英闪长岩时代、成因及其地质意义.地质科技情报,35(5): 18－26.

国显正,贾群子,钱兵,等,2017.东昆仑高压变质带榴辉岩和榴闪岩地球化学特征及形成动力学背景.地球科学与环境学报,39(6):735－750.

郭国林,张展适,刘晓东,等,2012.光石沟铀矿床晶质铀矿电子探针化学定年研究.东华理工大学学报(自然科学版),35(4): 309－314.

贾小辉,王强,唐功建,2009.A型花岗岩的研究进展及意义.大地构造与成矿学,33(3): 465－480.

雷勇亮,戴佳文,白强,等,2021.东昆仑造山带海德乌拉铝质A型流纹岩成因及其意义.岩石学报,36(7): 1964－1982.

李文良,夏锐,卿敏,等,2014.应用辉钼矿Re-Os定年技术研究青海什多龙矽卡岩型钼铅·锌矿床的地球动力学背景.岩矿测试,33(6): 900－907.

李彦强,段建华,戴佳文,等,2021.青海海德乌拉地区火山岩型铀矿含矿主岩地球化学及铀矿化特征研究.铀矿地质,37(4): 643－652.

刘彬,马昌前,蒋红安,等,2013.东昆仑早古生代洋壳俯冲与碰撞造山作用的转换:来自胡晓钦镁铁质岩石的证据.岩石学报,29(6): 2093－2106.

骆金诚,石少华,陈佑纬,等,2019.铀矿床定年研究进展评述.岩石学报,35(2): 589－605.

巫建华,劳玉军,谢国发,等,2017.江西相山铀矿田火山岩系地层学、年代学特征及地质意义.中国地质,44(5): 974－992.

巫建华,解开瑞,吴仁贵,等,2014.中国东部中生代流纹岩－粗面岩组合与热液型铀矿研究新进展.地球科学进展,29(12): 1372－1382.

许志琴,杨经绥,李海兵,等,2006.中央造山带早古生代地体构架与高压/超高压变质带的形成.地质学报,80(12): 1793－1806.

于淼,丰成友,刘洪川,等,2015.青海尕林格矽卡岩型铁矿金云母$^{40}Ar/^{39}Ar$年代学及成矿地质意义.地质学报,89(3): 510－521.

郑国栋,罗强,刘文泉,等,2021.粤北书楼丘铀矿床沥青铀矿原位U-Pb年龄和元素特征及其地质意义.地球科学: 1－24.

宗克清,陈金勇,胡兆初,等,2015.铀矿fs-LA-ICP-MS原位微区U-Pb定年.中国科学:地球科学,45(9): 1304－1319.

张金带,李子颖,蔡煜琦,等,2012.全国铀矿资源潜力评价工作进展与主要成果.铀矿地质,28(6): 321－326.

朱云海,朱耀生,林启祥,等,2003.东昆仑造山带海德乌拉一带早侏罗世火山岩特征及其构造意义.地球科学,28(6): 653－659.