

doi: 10.12029/gc20210211

黄广文,余福承,潘家永,陈正乐,吴德海,薛万文,宋泰忠,李善平. 2021. 伊犁盆地蒙其古尔铀矿床黄铁矿成因特征及其对铀成矿作用的指示[J]. 中国地质, 48(2): 507-519.

Huang Guangwen, Yu Fucheng, Pan Jiayong, Cheng Zhengle, Wu Dehai, Xue Wanwen, Song Taizhong, Li Shanping. 2021. Genesis of pyrite from the Mengqiguer uranium deposit in Ili Basin of Xinjiang and its implication for mineralization[J]. Geology in China, 48(2): 507-519(in Chinese with English abstract).

## 伊犁盆地蒙其古尔铀矿床黄铁矿成因特征及其对铀成矿作用的指示

黄广文<sup>1,2</sup>, 余福承<sup>2</sup>, 潘家永<sup>1</sup>, 陈正乐<sup>1,3</sup>, 吴德海<sup>1</sup>, 薛万文<sup>2</sup>, 宋泰忠<sup>2</sup>, 李善平<sup>2</sup>

(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. 青海省地质调查院 青海省青藏高原北部地质过程与矿产资源重点实验室, 青海 西宁 810012; 3. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

**摘要:**蒙其古尔铀矿床是近年伊犁盆地内发现的规模最大的砂岩型铀矿床,为了研究该矿床成矿物质来源、成矿流体性质及成矿环境等问题,本文以该矿床中与矿石矿物沥青铀矿、铀石等密切共生的脉石矿物黄铁矿为研究对象,分别对该矿床中西山窑组和八道湾组砂岩中黄铁矿微量元素、稀土元素及硫同位素地球化学特征进行了系统分析。结果表明:黄铁矿的稀土元素表现为相似的特征,即LREE明显较HREE富集( $La_N/Yb_N=4.27\sim 9.82$ )、明显负铈异常( $\delta Eu=0.50\sim 0.71$ )和基本无铈异常( $\delta Ce=0.93\sim 1.04$ )的特征;微量元素中Co含量为 $2.1\times 10^{-6}\sim 26.7\times 10^{-6}$ ,Ni含量为 $19.5\times 10^{-6}\sim 79.30\times 10^{-6}$ ,Co/Ni比值为0.07~0.88,As含量为 $8.90\times 10^{-6}\sim 95.60\times 10^{-6}$ ,相对于大陆地壳As平均含量富集;硫同位素组成具有相对宽泛的变化范围, $\delta^{34}S_{CDT}$ 为 $-17.30\text{‰}\sim 3.90\text{‰}$ ,极差为21.20‰。综合蒙其古尔铀矿床黄铁矿的稀土元素、微量元素和硫同位素组成特征,结合区内成矿地质背景,认为蒙其古尔铀矿床中的黄铁矿为沉积成因且形成于低温还原环境;黄铁矿中的硫主要源于具微生物成因特征的煤和沉积硫化物;在铀成矿作用过程中,黄铁矿和炭屑等有机质为铀成矿作用提供了发生氧化还原反应所需的还原剂。

**关键词:**黄铁矿;微量元素;硫同位素;成矿流体;蒙其古尔铀矿床;矿产勘查工程;伊利;新疆

**中图分类号:** P619.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2021)02-0507-13

## Genesis of pyrite from the Mengqiguer uranium deposit in Ili Basin of Xinjiang and its implication for mineralization

HUANG Guangwen<sup>1,2</sup>, YU Fucheng<sup>2</sup>, PAN Jiayong<sup>1</sup>, CHENG Zhengle<sup>1,3</sup>, WU Dehai<sup>1</sup>, XUE Wanwen<sup>2</sup>, SONG Taizhong<sup>2</sup>, LI Shanping<sup>2</sup>

收稿日期:2019-10-17;改回日期:2019-12-28

基金项目:国家自然科学基金项目(41772066、41902075、42002095)、青海省青藏高原北部地质过程与矿产资源重点实验室开放课题(2019-KY-04)、青海省科技厅基础研究计划项目(2018-SF-109、2019-ZJ-955Q)、青藏高原二次科考项目(2019QZKK0702)及江西省研究生创新专项基金项目(YC2018-B082)联合资助。

作者简介:黄广文,男,1991年生,博士生,主要从事铀矿地质调查与研究;E-mail:807334699@qq.com。

通讯作者:潘家永,男,1967年生,教授,博士生导师,主要从事矿床地球化学方面的教学与研究;E-mail: jypan@ecit.cn。

(1. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China; 2. Qinghai Province Key Laboratory of Geological Process and Mineral Resources of Northern Qinghai-Tibet Plateau, Qinghai Geological Survey Institute, Xining 810012, Qinghai, China; 3. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The Mengqiguer uranium deposit in the Ili Basin is the largest sandstone-hosted one discovered in recent years. In order to research the source of ore-forming materials, the properties of ore-forming fluids and the metallogenic environment of the deposit, a geochemical studies on trace elements and sulfur isotope of the pyrites (the gangue minerals in Xishanyao Formation and Badaowan Formation, which closely related to ore minerals such as uraninite and coffinite) were carried out systematically. The results show that the REEs of pyrite in each sample exhibits a similar distribution pattern, that is, LREE is significantly more enriched than HREE ( $La_N/Yb_N=4.27-9.82$ ), with strong negative Eu anomaly ( $\delta Eu=0.50-0.71$ ) and no Ce anomaly ( $\delta Ce=0.93-1.04$ ). The Co contents of pyrite range from  $2.1 \times 10^{-6}$  to  $26.7 \times 10^{-6}$ , Ni from  $19.5 \times 10^{-6}$  to  $79.30 \times 10^{-6}$ , the ratio of Co/Ni from 0.07 to 0.88, and As from  $8.90 \times 10^{-6}$  to  $95.60 \times 10^{-6}$  higher than the average As content of the continental crust. The sulfur isotope composition of pyrite has a relatively wide range of variation, i.e.  $\delta^{34}S_{CDT}$  ranging from  $-17.30\%$  to  $3.90\%$ , with the change range of  $21.20\%$ . Combined with characteristics of REEs, trace elements and sulfur isotope composition of pyrites and regional metallogenic setting, it is suggested that pyrite in this deposit is of sedimentary origin and was formed in a low temperature reduction environment. It is concluded that the sulfur of pyrite mainly originates from coal and sedimentary sulfide with microbial genetic characteristics, and pyrites and charcoal debris (organic matters) provide reductants for redox reactions during uranium mineralization.

**Key words:** pyrite; trace elements; sulfur isotope; ore-forming fluid; Mengqiguer uranium deposit; mineral exploration engineering; Ili; Xinjiang

**About the first author:** HUANG Guangwen, male, born in 1991, doctoral candidate, majoring in the exploration and research of uranium geology; E-mail: 807334699@qq.com.

**About the corresponding author:** PAN Jiayong, male, born in 1967, professor, supervisor of doctor candidates, engaged in the teaching and research of deposit geochemistry; E-mail: jyan@ecit.cn.

**Fund support:** Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41772066, No. 41902075, No. 42002095), Key Laboratory of the Northern Qinghai-Tibet Plateau Geological Processes and Mineral Resources (No. 2019-KY-04), the Natural Science Foundation of Qinghai Provincial Department of Science and Technology (No. 2018-SF-109, No. 2019-ZJ-955Q), Qinghai-Tibet Plateau secondary research (No. 2019QZKK0702) and Postgraduate Innovation Fund Project of Jiangxi Province, China (No. YC2018-B082).

## 1 引 言

黄铁矿是地壳内常见的金属硫化物之一,常伴生于各类岩石及矿藏中,是多种矿产的重要载体矿物,常见的如载铀矿物、载金矿物等(魏丽琼等, 2018)。在砂岩型铀矿床中黄铁矿常作为铀成矿过程中还原剂或还原环境的指示矿物(Liu et al., 2018),其形成过程贯穿于整个铀矿化阶段。黄铁矿的地球化学组成记录了含铀流体演化过程的重要信息,是成矿溶液性质、成矿环境、成矿机制及成矿流体演化等方面的重要指示剂(吴德海等, 2019a)。

伊犁盆地为中国基础能源开发勘探的重要盆地之一,同时也是可地浸砂岩型铀矿的重要产铀地

(黄广文等, 2017)。经探明盆地内自西向东依次分布有达拉地、郎卡、蒙古古尔、扎吉斯坦、乌库尔其、库捷尔太及洪海沟砂岩型铀矿床(王军等, 2009; 侯慧群等, 2010; 张鑫等, 2015; 黄广文等, 2018)。蒙古古尔铀矿床具有含矿层位多、矿石品位高、储量大等特点,成为目前伊犁盆地内发现的规模最大的砂岩型铀矿床,同时也是我国首个建设千吨级可地浸砂岩型产铀基地(黄广文等, 2017, 2018)。前人针对该矿床开展了一系列的研究工作,主要集中于成矿地质条件、沉积物源示踪、岩矿石地球化学特征、构造环境、沉积相与铀成矿体系、赋矿机理、流体包裹体、水文地球化学等方面(陈戴生等, 1996; 李胜祥等, 2006; 王军堂等, 2008; 王冰等, 2009; 王军等, 2009; 张占峰等, 2010; 康勇和王冰, 2010; 张

晓, 2012; 王勋等, 2014; 邱玉波等, 2014; 王冰等, 2015; 修晓茜等, 2015a, 2015b; 陈奋雄等, 2016a, 2016b, 2016c; 丁波等, 2016; 黄广文等, 2017, 2018), 并获取了一批重要的成果及认识。上述研究成果及认识大多基于矿区内矿石或赋矿围岩间展开的, 而对于与铀矿物密切共生的脉石矿物(如黄铁矿等)方面研究极少, 甚至处于空白状态。蒙古古尔铀矿床中黄铁矿是最常见的脉石矿物之一, 多赋存于炭屑周围或炭屑细胞腔内, 常与目的层中矿石矿物沥青铀矿、铀石等构成共生关系, 与铀成矿作用关系密切。因此, 本文以该矿床含矿目的层西山窑组( $J_{2x}$ )和非含矿层八道湾组( $J_1b$ )碎屑岩中黄铁矿单矿物为研究对象, 在野外地质调查、钻孔岩心编录及室内岩矿鉴定基础上, 应用同位素质谱仪(Flash-EA 与 MAT-253 联机测试)和电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)对黄铁矿进行了硫同位素、微量元素及稀土元素测试分析, 初步探讨黄铁矿的成因、成矿物质来源、成矿流体性质及成矿环境, 为深入认识该矿床成因机理提供依据, 同时为伊犁盆地内进一步寻找可地浸砂岩型铀矿提供必要的理论支撑。

## 2 矿区地质概况

伊犁盆地位于哈萨克斯坦板块与塔里木板块所夹持的伊犁微地块之上, 受南北天山挤压应力下形成的大型山间裂隙-坳陷复合型盆地, 总体呈近EW向狭长带状分布(黄广文等, 2018)。蒙古古尔铀矿床位于伊犁盆地南缘斜坡带东部构造活动区与西部构造稳定区的过渡区带, 隶属次级构造单元北东方向扎吉斯坦屈型向斜东南翼的组成部分, 该向斜整体上呈东、西、南三面翘起, 向斜轴部为扎吉斯坦河谷地段(张占峰等, 2010; 黄广文等, 2017, 2018)。区内发育 $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ 三条主断裂构造(图1), 矿床出露于 $F_1$ 、 $F_3$ 断裂之间, 其中 $F_1$ 断裂分布于矿区东南部, 为伊犁盆地南缘逆冲控盆断裂带组成部分;  $F_2$ 断裂为 $F_1$ 断裂的分支部分, 位于矿区西南部;  $F_3$ 断裂即扎吉斯坦河断裂, 位于矿区西北部, 为隐伏逆断层(张占峰等, 2010; 黄广文等, 2017)。矿区直接基底为一套古生界石炭系一二叠系中酸性火山岩, 广泛出露于研究区南部蚀源区。研究区出露中新生代地层自下而上为中下侏罗统水西沟群

( $J_{1-2sh}$ )、中侏罗统头屯河组( $J_2t$ )、上白垩统东沟组( $K_2d$ )、新近系(N)及第四系(Q)。其中水西沟群以冲积扇-扇三角洲沉积为主, 主体为一套陆相含煤碎屑岩建造(出露岩性主要为砂岩、砂砾岩、粉砂岩、泥岩及煤线等), 是盆地内主要的含矿层位, 进一步可划分为八道湾组( $J_1b$ )、三工河组( $J_{1s}$ )、西山窑组( $J_{2x}$ )。古近系-第四系为一套红色磨拉石建造, 中侏罗统头屯河组与下侏罗统水西沟群呈平行不整合接触, 与上白垩统东沟组呈低角度不整合接触(李胜富等, 2006; 陈奋雄等, 2016c; 黄广文, 2017)。蒙古古尔铀矿床中目前共揭露有4层工业铀矿化, 铀矿体分别赋存于三工河组下段( $J_{1s1}$ )、三工河组上段( $J_{1s2}$ )、西山窑组下段( $J_{2x1}$ )和西山窑组上段( $J_{2x2}$ )砂体中。在平面上矿带整体呈近NE向展布, 且矿体由西南向北东埋深逐渐增大。矿体形态各异, 受层间氧化带控制明显, 各矿带在投影平面上相互叠加, 呈长卷状、板状、透镜状等形态展布。

## 3 岩相学特征

八道湾组岩性主要为灰白色含砾岩屑粗砂岩(图2a), 岩石整体松散程度较高, 发育含砾砂状结构(图2b), 块状构造。碎屑主要由石英、长石及岩屑组成, 砾石以多晶石英、凝灰岩、燧石为主, 胶结物为钙质(方解石), 局部见少量泥质胶结物; 杂基由黏土物质及细粉砂组成, 重矿物多为黄铁矿(图2c)。碎屑支撑类型为颗粒支撑, 胶结类型为基底式-孔隙式胶结。碎屑占全岩含量的79%, 胶结物10%, 杂基10%, 重矿物含量约1%。岩石整体分选性及磨圆度差, 结构成熟度与成分成熟度低( $Q/F+L=0.72$ )。石英呈次棱角状-一次圆状, 粒径0.45~1.68 mm, 部分晶体边部被溶蚀呈港湾状, 且发育明显“炸裂纹”, 表明该部分石英主要来源于中酸性火山岩, 局部少数颗粒间呈缝合线接触, 可见波状消光, 石英端员含量占碎屑含量的42%(单晶石英 $Q_m=34%$ , 多晶石英及燧石 $Q_p=8%$ )。钾长石呈次棱角-一次圆状, 粒径0.48~1.75 mm, 整体表面“脏杂”, 黏土化强烈; 斜长石呈次棱角状, 粒径0.34~0.79 mm, 隐约见聚片双晶发育, 双晶单体宽细不等, 可能来源于盆地南部出露的中酸性火山岩及侵入岩; 长石端员占碎屑含量的12%。岩屑见石英片岩岩屑、石英岩岩屑、燧石及凝灰岩岩屑。石英片

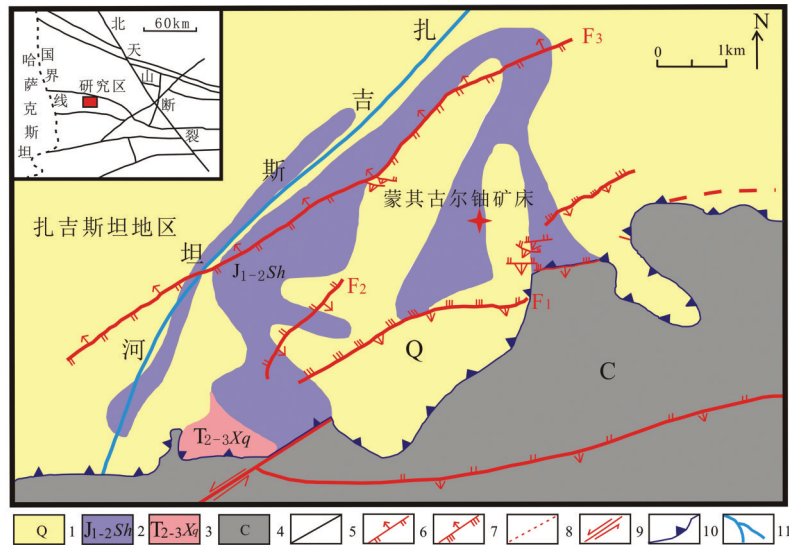


图1 蒙其古尔地区地质简图(据黄广文等,2017)

1—第四系松散堆积物;2—中一下侏罗统水西沟群灰色砂砾岩、砂岩、粉砂岩;3—中—上三叠统小泉沟群灰色、杂色砂砾岩及泥岩;  
4—石炭系中酸性火山岩;5—区域断层;6—逆断层;7—逆冲断层;8—推测断层;9—走滑断层;10—盆地边界;11—河流

Fig.1 Geological sketch map of the Mengqiguer region(after Huang Guangwen et al.,2017)

1—Quaternary loose deposits; 2—Middle-lower Jurassic Shuixigou Group gray conglomerate, sandstone and siltstone; 3—Middle-Upper Triassic Xiaogongou Group gray and variegated glutenite and mudstone; 4—Carboniferous moderate-acidic volcanic rocks;  
5—Regional fault; 6—Overfault; 7—Thrust fault; 8—Predicted fault; 9—Strike-slip fault; 10—Boundary of the basin; 11—River

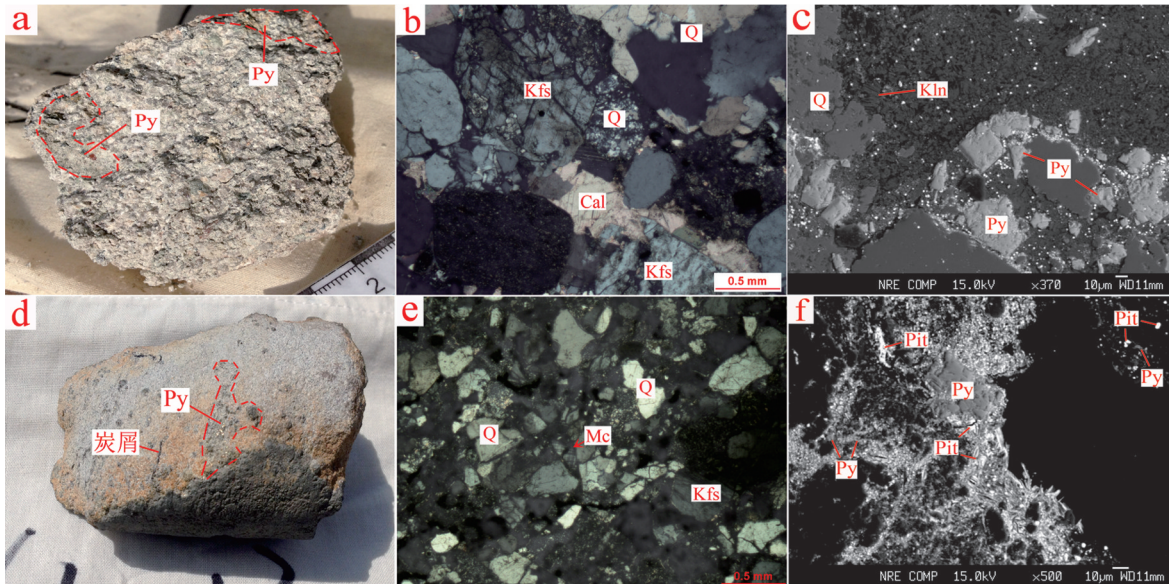


图2 蒙其古尔铀矿床代表性样品岩相学特征

a—八道湾组灰白色含砾岩屑粗砂岩;b—八道湾组岩石发育(含砾)砂状结构,碳酸盐化、黏土化较强;c—八道湾组碎屑岩中黄铁矿(Py)显微特征(BSE图像);d—西山窑组灰白色中细粒岩屑砂岩;e—西山窑组岩石发育砂状结构,石英(Q)边部被熔蚀呈港湾状;f—西山窑组碎屑岩中黄铁矿与沥青铀矿(Pit)显微特征(BSE图像),二者密切共生(或伴生);Kfs—钾长石;Cal—方解石;Kln—高岭石;Mc—微斜长石;Pit—沥青铀矿

Fig.2 Petrographic characteristics of representative samples from the Mengqiguer uranium deposit

a—Badaowan Formation gray-white gravelly lithic coarse sandstone; b—Badaowan Formation have sand-like structures with strong carbonation and clayization; c—Microscopic characteristics (BSE image) of pyrite in Badaowan formation clastic rocks; d—Xishanyao Formation gray-white medium fine-grained lithic sandstone; e—Xishanyao Formation have a sand-like structure, and the edge of quartz was melted into a harbor; f—Microscopic characteristics (BSE image) of pyrite and pitchblende in Xishanyao Formation detrital rocks, which are closely associated with each other. Kfs—K-feldspar; Cal— Calcite; Kln— Kaolinite; Mc—Microplagioclase; Pit—Pitchblende

岩呈次圆状,粒径0.62~1.10 mm,粒状变晶结构,主要由石英及绢云母组成,整体定向排列。燧石呈次圆状展布,多数重结晶作用向微晶石英岩过渡;凝灰岩呈次棱角一次圆状,发育脱玻化作用向长英质微晶转变,局部微晶石英以球粒状展布。多晶石英发育两期重结晶作用,前期向梳状石英过渡,后期向微晶石英演化,可能原产物为燧石;岩屑端员占碎屑含量的46%。钙质胶结物方解石呈他形粒状,具高级白干涉色,少数机械双晶发育。岩石中长石、岩屑及泥质等不稳定组分多向叶片状高岭石、伊利石及绿泥石化过渡。黄铁矿呈不规则状他形粒状,局部呈半自形立方体晶(个别颗粒粒径稍大)或以星点状展布,其中不规则粒状晶及半自形立方体黄铁矿多分布于碎屑石英及岩屑周围,星点状黄铁矿多分布于胶结物及杂质周围,且BSE图像显示星点状黄铁矿周围展布有较多黏土矿物(如高岭石等)。八道湾组砂岩中分布大量黄铁矿晶体,间接指明其砂体环境为还原环境。

西山窑组(J<sub>3x</sub>)整体为三角洲沉积相,具体划分为下、中、上三段,下段为三角洲平原亚相,中段为三角洲前缘亚相,上段是曲流河亚相(修晓茜等,2015a;黄广文等,2017)。岩性以中—粗粒长石岩屑砂岩、中细粒岩屑砂岩为主,岩石呈灰白色,发育中细(粗)粒砂状结构(图2d),块状构造。碎屑主要由石英、长石、岩屑、云母及少量炭屑组成;重矿物见黄铁矿,偶见锆石等。杂基以黏土物质为主,其次见少量细粉砂组成。胶结物以铁质、泥质为主,岩石整体分选性差、磨圆度差,成分成熟度与结构成熟度低(Q/F+L=0.92)。岩石发育不同程度的高岭石化、碳酸盐化、伊利石化、水云母化及绿泥石化(黄广文等,2017)。碎屑占全岩含量的74%,胶结物占全岩含量的16%,杂基占全岩含量的8%,副矿物占全岩含量的2%。碎屑石英呈次棱角状,少数呈次圆状,粒径0.20~0.90 mm,少数晶体呈熔蚀港湾状(图2e),平行消光,表明部分碎屑颗粒可能来源于中酸性火山岩,石英端员(单晶石英Q<sub>m</sub>=40%,多晶石英及燧石Q<sub>p</sub>=8%)占碎屑含量的48%。长石主要为钾长石和斜长石,钾长石呈次棱角状,粒径0.24~0.68 mm,少数格子双晶发育(图2e),黏土化强烈;斜长石呈次棱角状,粒径0.14~0.38 mm,聚片双晶发育,长石端员占碎屑含量的4%。云母主要为

白云母及黑云母,呈细鳞片状展布,多数受压实作用,晶体弯曲变形明显(黄广文等,2017);黑云母发育较强绿泥石化,多蚀变为具靛蓝色、锈褐色异常干涉色的叶绿泥石(黄广文等,2017)。岩屑出露有凝灰岩、花岗岩及少量变质岩(片岩、石英岩)等,多数呈次棱角状,个别为次圆状,粒径集中于0.48~1.27 mm,其中局部凝灰岩岩屑发育不完全脱玻化作用,向微晶石英过渡,岩屑端员占碎屑含量的48%。炭屑呈细脉状、不规则状展布,受压实作用整体弯曲变形,局部见有细胞腔发育。蒙古古尔铀矿床含矿砂体中的硫化物主要为黄铁矿,多呈他形不规则粒状、星点状展布于岩屑周围及炭屑炭屑细胞腔内(黄广文等,2017),BSE图像显示黄铁矿与星点状、叶片状及不规则状沥青铀矿密切共生(图2f),且见局部黄铁矿边缘或核部出露有星点状沥青铀矿,同时周围分布有较多有机质炭屑及煤线,间接表明它们的出露为后期铀的富集提供了良好的容矿建造和充足的还原剂及吸附剂。另外,西山窑组内砂体在成岩过程中发育有大量的高岭石化、伊利石化、水云母化及绿泥石化等蚀变现象,这些黏土矿物的蚀变主要为岩石内长石、岩屑等不稳定组分经历溶蚀作用下的产物,从而进一步改变了赋矿砂体的地球化学环境(黄广文等,2017),在成岩成矿过程中,新生的蚀变矿物(伊利石、高岭石、绿泥石等)在铀富集沉淀是表现出了吸附作用,在黄铁矿还原作用下,为铀提供了良好的沉淀富集条件。

## 4 样品与分析方法

本次研究测试的黄铁矿样品均采自蒙古古尔铀矿床的不同钻孔内,共计6件(表1)。黄铁矿寄主岩石主要为灰白色岩屑砂岩(西山窑组,4件)和灰白色含砾岩屑粗砂岩(八道湾组,2件),所采样品在空间上呈近北东向展布,且南西向北东砂体埋深逐渐增大,样品最小埋深为140.06 m,最大埋深为981.28 m。

首先将采集的样品经室内清洗自然晾干后进行粉碎筛选,选取40~80目粒级,利用人工重砂方法从样品中选取黄铁矿,在双目镜下剔除其中存留的杂质后进一步挑选出纯度较高(>99%)的黄铁矿,将其放置于玛瑙钵中研磨至200目以下的粉末后送至实验室测试。黄铁矿微量元素和稀土元素含量

表1 样品特征及采样位置

Table 1 Sample characteristics and sampling location in the Mengqiguer uranium deposit

序号	样号	岩性	层位	钻孔编号	采样深度/m
1	YL-6	灰白色岩屑粗砂岩	西山窑组(J <sub>3x</sub> )	14401	981.28
2	YL-12	灰白色岩屑砂岩	西山窑组(J <sub>3x</sub> )	1609	634.00
3	YL-13	灰白色中细粒岩屑砂岩	西山窑组(J <sub>3x</sub> )	0809	464.00
4	YL-14	灰白色岩屑砂岩	西山窑组(J <sub>3x</sub> )	P4911	462.89
5	YL-15	灰白色含砾岩屑粗砂岩	八道湾组(J <sub>1b</sub> )	P1131	138.20
6	YL-16	灰白色(含砾)岩屑粗砂岩	八道湾组(J <sub>1b</sub> )	P1131	140.06

测试分析均在广州澳实矿物实验测试中心完成,应用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)进行试验测试,相关测试分析方法及详细测试流程见文献(刘亚轩等,2006),电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)型号为Agilent 7700x,其精密控制相对偏差(RD) < 10%,准确度控制相对误差(RE) < 10%。黄铁矿硫同位素分析在东华理工大学核资源与环境国家重点实验室同位素实验室进行,称取黄铁矿粉末20~100 μg,在1020℃下氧化为SO<sub>2</sub>,用Flash-EA与MAT-253质谱仪联机测试分析,精度为δ<sup>34</sup>S ≤ 0.2‰。

## 5 分析结果

### 5.1 稀土元素

蒙其古尔铀矿床中黄铁矿的稀土元素含量分析结果和特征值见表2,球粒陨石标准化配分模式见图3,球粒陨石的稀土含量引自Sun and Mcdonough (Sun and Mcdonough,1989;吴德海等,2019a)。

结果表明,蒙其古尔铀矿床中矿床黄铁矿稀土元素总量总体较低( $\sum \text{REE} = 1.79 \times 10^{-6} \sim 62.30 \times 10^{-6}$ ),轻稀土富集明显( $\text{La}_N/\text{Yb}_N = 4.27 \sim 9.82$ ),除样品YL-12( $\delta\text{Eu} = 1.03$ )无明显铕异常外,其余样品均具明显的铕负异常( $\delta\text{Eu} = 0.50 \sim 0.71$ );样品YL-12和YL-15具弱的铈负异常( $\delta\text{Ce}$ 分别为0.83和0.63),其余样品均无明显的铈异常特征( $\delta\text{Ce} = 0.93 \sim 1.04$ )。八道湾组岩石中的黄铁矿稀土总量( $\sum \text{REE}$ 平均值= $31.79 \times 10^{-6}$ )高于西山窑组岩石中的黄铁矿

稀土总量( $\sum \text{REE}$ 平均值= $22.23 \times 10^{-6}$ ),但西山窑组岩石中黄铁矿轻重稀土的分馏程度( $\text{La}_N/\text{Yb}_N = 7.17 \sim 9.82$ )略高于八道湾组( $\text{La}_N/\text{Yb}_N = 4.27 \sim 5.30$ ),因此,西山窑组岩石中黄铁矿的稀土元素球粒陨石标准化配分曲线的“右倾”程度较八道湾组的明显(图3)。此外,西山窑组岩石样品YL-12中的黄铁矿因其稀土总量明显较其他样品的稀土总量低、Eu和Ce异常均不明显以及强烈Er负异常特征而区别于其他样品(从该样品的元素含量特征和配分模式来看,这可能是测试问题所致)。整体而言,八道湾组和西山窑组岩石中黄铁矿的稀土元素表现为相似的特征,即LREE明显较HREE富集、明显的负铕异常和基本无铈异常的特征,球粒陨石标准化配分模式为“右倾”型(图3),暗示了蒙其古尔铀矿床中的黄铁矿具类似的物质来源。

### 5.2 微量元素

蒙其古尔铀矿床中黄铁矿的微量元素含量分析结果见表3。总体而言,矿床中黄铁矿的微量元素含量相比于地壳中相应元素的丰度(Taylor,1964),总体特征如下:

(1)富集As、Ag、Sb、Se、Fe、S和Mo等元素,各元素变化范围分别为As:低于检测限至 $95.60 \times 10^{-6}$ (均值为 $46.40 \times 10^{-6}$ ,地壳丰度 $1.80 \times 10^{-6}$ ),Ag: $0.03 \times 10^{-6} \sim 0.36 \times 10^{-6}$ (均值为 $0.15 \times 10^{-6}$ ,地壳丰度 $0.07 \times 10^{-6}$ ),Sb: $0.05 \times 10^{-6} \sim 11.60 \times 10^{-6}$ (均值为 $3.01 \times 10^{-6}$ ,地壳丰

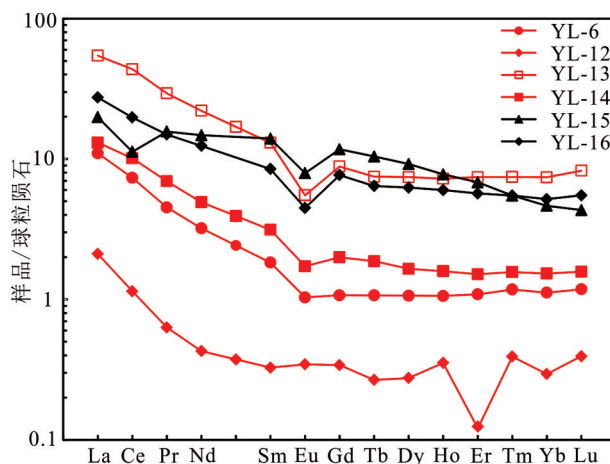


图3 黄铁矿的稀土元素球粒陨石标准化配分模式  
(标准化数据引自Sun and Mcdonough, 1989)

Fig.3 Chondrite-normalized REE distribution pattern of pyrite  
(Chondrite-normalized REE data are from Sun and Mcdonough, 1989)

表2 蒙古古尔铀矿床黄铁矿的稀土元素含量( $10^{-6}$ )及其特征值  
Table 2 REE compositions and characteristic values of pyrites from the Mengqiguer uranium deposit( $10^{-6}$ )

层位 样号	西山窑组 YL-6	西山窑组 YL-12	西山窑组 YL-13	西山窑组 YL-14	八道湾组 YL-15	八道湾组 YL-16
La	2.60	0.50	12.90	3.10	4.70	6.50
Ce	4.50	0.70	26.70	6.20	6.90	12.1
Pr	0.43	0.06	2.79	0.66	1.49	1.42
Nd	1.50	0.20	10.30	2.30	6.90	5.80
Sm	0.28	0.05	2.00	0.48	2.14	1.30
Eu	0.06	0.02	0.32	0.10	0.46	0.26
Gd	0.22	0.07	1.82	0.41	2.41	1.58
Tb	0.04	0.01	0.28	0.07	0.39	0.24
Dy	0.27	0.07	1.89	0.42	2.34	1.59
Ho	0.06	0.02	0.41	0.09	0.44	0.34
Er	0.18	0.02	1.23	0.25	1.13	0.94
Tm	0.03	0.01	0.19	0.04	0.14	0.14
Yb	0.19	0.05	1.26	0.26	0.79	0.88
Lu	0.03	0.01	0.21	0.04	0.11	0.14
Y	1.70	0.30	11.30	2.60	9.80	9.10
ΣREE	10.39	1.79	62.30	14.42	30.34	33.23
LREE	9.37	1.53	55.01	12.84	22.59	27.38
HREE	1.02	0.26	7.29	1.58	7.75	5.85
LREE/ HREE	9.19	5.88	7.55	8.13	2.91	4.68
La <sub>N</sub> / Yb <sub>N</sub>	9.82	7.17	7.34	8.55	4.27	5.30
δEu	0.71	1.03	0.50	0.67	0.62	0.55
δCe	0.95	0.83	1.04	1.01	0.63	0.93

注:分析检测单位为广州澳实矿物实验测试中心;仪器型号为ICP-MS, Agilent 7700X。

度 $0.20 \times 10^{-6}$ ), Se:  $1.00 \times 10^{-6} \sim 188.00 \times 10^{-6}$  (均值为 $45.00 \times 10^{-6}$ , 地壳丰度 $0.08 \times 10^{-6}$ ), S:  $> 10 \times 10^{-2}$  (地壳丰度 $0.026 \times 10^{-2}$ ), Fe:  $27.80 \times 10^{-2} \sim 43.9 \times 10^{-2}$  (均值为 $36.90 \times 10^{-2}$ , 地壳丰度 $0.63 \times 10^{-2}$ ), Mo:  $3.54 \times 10^{-6} \sim 39.30 \times 10^{-6}$  (均值为 $17.05 \times 10^{-6}$ , 地壳丰度 $1.50 \times 10^{-6}$ )。

(2) 贫 Cu、Zn、Sn、Bi、Ni、Mn、Co、W、U 和 Th 等元素, 其变化范围为 Cu:  $1.90 \times 10^{-6} \sim 340.00 \times 10^{-6}$  (除样品 YL-6 中 Cu 元素含量为  $340.00 \times 10^{-6}$  显著富集外, 其余 5 个样品均值为  $8.90 \times 10^{-6}$ , 均远低于地壳丰度  $55.00 \times 10^{-6}$ ), Zn:  $3.00 \times 10^{-6} \sim 339.00 \times 10^{-6}$  (Zn 元素的地壳丰度  $70.00 \times 10^{-6}$ , 其中八道湾组岩石中黄铁矿的 Zn 含量为显著富集, 西山窑组岩石中黄铁矿的 Zn 含量相对于地壳平均含量显著亏损), Sn:  $0.20 \times 10^{-6} \sim 2.10 \times 10^{-6}$  (均值为  $0.90 \times 10^{-6}$ , 地壳丰度  $2.00 \times$

$10^{-6}$ ), Bi:  $0.06 \times 10^{-6} \sim 2.96 \times 10^{-6}$  (除样品 YL-6 中 Bi 元素含量为  $2.96 \times 10^{-6}$  显著富集外, 其余 5 个样品均值为  $0.10 \times 10^{-6}$ , 均低于地壳丰度  $0.17 \times 10^{-6}$ ), Ni:  $19.50 \times 10^{-6} \sim 79.30 \times 10^{-6}$  (均值为  $45.50 \times 10^{-6}$ , 地壳丰度  $75.00 \times 10^{-6}$ ), Mn:  $5.00 \times 10^{-6} \sim 424.00 \times 10^{-6}$  (均值为  $118.50 \times 10^{-6}$ , 地壳丰度  $950.00 \times 10^{-6}$ ), Co:  $2.10 \times 10^{-6} \sim 26.70 \times 10^{-6}$  (均值为  $11.00 \times 10^{-6}$ , 地壳丰度  $25.00 \times 10^{-6}$ ), W:  $0.50 \times 10^{-6} \sim 1.27 \times 10^{-6}$  (均值为  $0.80 \times 10^{-6}$ , 地壳丰度  $1.50 \times 10^{-6}$ ), U:  $0.20 \times 10^{-6} \sim 14.9 \times 10^{-6}$  (U 元素的地壳丰度  $2.70 \times 10^{-6}$ , 其中八道湾组岩石中黄铁矿的 U 含量相对富集, 西山窑组岩石中黄铁矿的 U 含量相对亏损), Th:  $0.10 \times 10^{-6} \sim 4.48 \times 10^{-6}$  (均值为  $1.70 \times 10^{-6}$ , 地壳丰度  $9.60 \times 10^{-6}$ )。

### 5.3 硫同位素特征

黄铁矿硫同位素测试结果详见表4。测试结果表明, 黄铁矿的  $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$  值变化较大, 分布范围为  $-17.30\text{‰} \sim 3.90\text{‰}$ , 除 2 个样品  $\delta^{34}\text{S}$  为正值外 ( $1.70\text{‰} \sim 3.90\text{‰}$ ), 其余样品均呈负值 ( $-17.30\text{‰} \sim -1.40\text{‰}$ ), 平均值为  $-5.73\text{‰}$ , 极差为  $21.20\text{‰}$ 。

## 6 讨论

### 6.1 微量元素对黄铁矿成因及成矿流体性质的指示

Co、Ni 与 Fe 为同族元素, 它们具备相似的化学行为, Co、Ni 元素常以类质同象的方式替代 Fe 而进入黄铁矿晶格内形成  $\text{CoS}_2$  和  $\text{NiS}_2$ , 前人利用黄铁矿中的 Co/Ni 比值来探讨矿床成因类型及黄铁矿的形成环境 (Bralia et al., 1979; 严育通等, 2012; 吴亚飞等, 2013; 吴德海等, 2019a)。Bralia et al. (1979) 针对不同成因类型的黄铁矿中 Co、Ni 含量研究后发现, 沉积黄铁矿的 Co/Ni 比值往往偏低, 其  $\text{Co/Ni} < 1.00$ ; 岩浆热液黄铁矿的 Co/Ni 比值范围一般多在  $1.00 \sim 5.00$ ; 变质热液黄铁矿的 Co/Ni 比值  $\approx 1.00$ ; 火山块状硫化物矿床中黄铁矿的 Co/Ni 比值变化较大, 其范围为  $5.00 \sim 50.00$ , 且具备高 Co (平均含量为  $480 \times 10^{-6}$ )、低 Ni ( $< 100 \times 10^{-6}$ )、高 Co/Ni 比值的特征 (Bralia et al., 1979; 吴德海等, 2019a)。蒙古古尔铀矿床中黄铁矿的 Co、Ni 比值范围变化较大, 其中 Co 含量介于  $2.10 \times 10^{-6} \sim 26.70 \times 10^{-6}$ , 平均含量为  $10.97 \times 10^{-6}$ , Ni 含量为  $19.5 \times 10^{-6} \sim 79.30 \times 10^{-6}$ , 均值为  $45.48 \times 10^{-6}$ , Co/Ni 比值为  $0.07 \sim 0.88$ , 均值为  $0.28$ , 即研究区黄铁矿整体呈现出低 Co、Ni 含量及低 Co/Ni 比值的

表3 蒙其古尔铀矿床黄铁矿的微量元素含量( $10^{-6}$ )

层位 样品号	西山窑组 YL-6	西山窑组 YL-12	西山窑组 YL-13	西山窑组 YL-14	八道湾组 YL-15	八道湾组 YL-16	地壳丰度 (克拉克值)
Cu	340.00	1.90	5.80	14.30	4.50	18.10	55.00
As	62.00	-	53.20	95.60	8.90	12.50	1.80
Zn	40.00	3.00	15.00	9.00	339.00	153.00	70.00
Ge	0.22	0.20	0.18	0.20	0.42	0.78	1.5
Ag	0.36	0.03	0.08	0.27	0.04	0.12	0.07
Cd	0.44	-	0.04	0.03	0.07	0.07	0.2
Sn	2.10	0.20	1.00	0.50	0.30	1.20	2.00
Sb	1.77	0.05	1.57	11.60	1.33	1.71	0.20
Se	2.00	1.00	1.00	2.00	74.00	188.00	0.08
Bi	2.96	0.12	0.09	0.09	0.06	0.12	0.17
S	>10.00	>10.00	>10.00	>10.00	>10.00	>10.00	0.026
Fe	39.80	38.00	27.80	33.70	43.90	38.00	0.63
Cr	4.00	1.00	25.00	12.00	2.00	8.00	100
Ni	19.50	20.30	79.30	72.50	50.90	30.40	75.00
Mn	424.00	5.00	66.00	152.00	24.00	40.00	950.00
Co	3.10	2.10	10.20	5.20	18.50	26.70	25.00
Mo	3.54	13.30	22.70	5.84	39.30	17.60	1.50
V	8.00	3.00	15.00	9.00	8.00	24.00	135.00
W	1.20	0.40	1.00	0.60	0.50	0.90	1.50
Ba	40.00	70.00	180.00	50.00	1630.00	1820.00	430.00
U	0.50	0.20	1.10	0.30	14.90	6.70	2.70
Th	1.41	0.10	4.48	1.21	0.89	2.11	9.60
Hf	0.60	-	5.90	0.50	0.50	2.20	3.00
Zr	26.00	-	243.00	20.00	24.00	90.00	165.00

注：“-”表示含量低于检测限，S元素和Fe元素的单位为%；分析测试单位：广州澳实矿物实验测试中心；仪器型号：ICP-MS, Agilent 7700x。

特征，指示研究区的黄铁矿为沉积成因；将黄铁矿的Co、Ni组成投在Co-Ni关系成因图解(图4)，投影点均落在沉积与沉积改造区内，进一步表明该矿床中的黄铁矿为沉积成因。

Keith(2016)发现黄铁矿中所含微量元素的种类和含量受控于温度的高低，即黄铁矿形成温度越高，则所含微量元素种类越多，含量也越高，反之，温度越低，其所含微量元素种类和含量也越少。在黄铁矿的成分方面，郇伟静等(2011)发现，在高温型黄铁矿中 $Co > 1000 \times 10^{-6}$ ，中温型黄铁矿中Co含量为 $100 \times 10^{-6} \sim 1000 \times 10^{-6}$ ，低温型黄铁矿中 $Co < 100 \times 10^{-6}$ 。蒙其古尔铀矿床中黄铁矿的Co含量介于 $2.10 \times 10^{-6} \sim 26.70 \times 10^{-6}$ ，平均含量为 $10.97 \times 10^{-6}$ ，较低的Co含量特征指示了低温环境。另外，As作为一种低温元素，多富集于低温流体中，而蒙其古尔铀矿床中黄铁矿的As含量介于 $8.90 \times 10^{-6} \sim 95.60 \times 10^{-6}$ ，平均含量为 $38.7 \times 10^{-6}$ ，明显高于大陆地壳As平均含量( $1.8 \times 10^{-6}$ ) (Taylor, 1964)，呈明显富集趋势，也指示了低温环境。总之，蒙其古尔铀矿床的成矿流体温度为低温，即该矿床为低温热液铀矿床，这一结论与前人运用流体包裹体所得出的蒙其

古尔铀矿床成矿流体温度为 $65 \sim 75^\circ\text{C}$ (低温)(吴柏林等, 2007; 修晓茜等, 2015a, 2015b; 丁波等, 2016)相符。

表4 蒙其古尔铀矿床黄铁矿硫同位素测试结果

Table 4 Sulfur isotope composition of pyrite from the Mengqiguer uranium deposit

序号	样品 编号	岩性	采样深 度/m	测试 矿物	$\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}/\text{‰}$
1	YL-6	灰白色岩屑 粗砂岩	981.28	黄铁矿	3.90
2	YL-13	灰白色中细粒 岩屑砂岩	464.00	黄铁矿	-12.30
3	YL-14	灰白色岩屑砂岩	462.89	黄铁矿	1.70
4	YL-15	灰白色含砾岩 屑粗砂岩	138.20	黄铁矿	-2.10
5	YL-16	灰白色(含砾) 岩屑粗砂岩	140.06	黄铁矿	-3.80
6*	P5515-9	灰白色砾岩	498.80	黄铁矿	-17.30
7*	P5516-3	灰色中砂岩 灰白色	581.40	黄铁矿	-9.20
8*	P5516-8	含砾粗砂岩	586.70	黄铁矿	-1.40
9*	1324-11	灰色粗砂岩	459.40	黄铁矿	-9.20

注：带\*号数据引自张晓(2012)；分析测试单位：东华理工大学核资源与环境国家重点实验室同位素实验室；仪器型号：Flash-EA与MAT-253质谱仪联机测试。



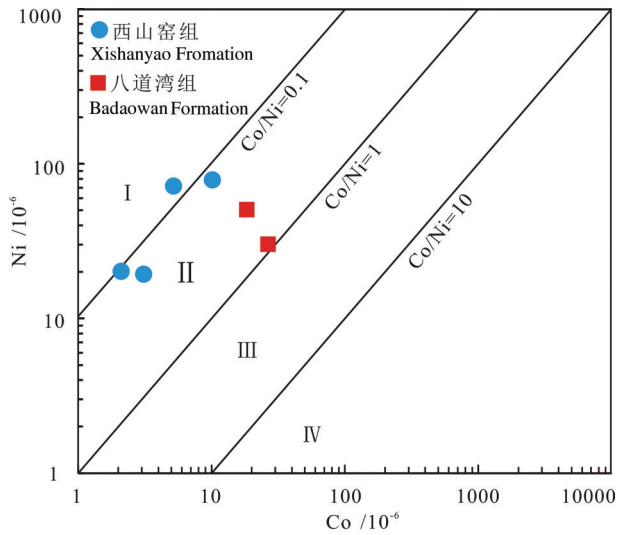


图4 蒙古古尔铀矿床黄铁矿 $\text{Co-Ni}$ 含量分布图(底图据 Bajwah et al.,1987 修改)

I、II—沉积和沉积改造区, III、IV—岩浆和热液区

Fig.4  $\text{Co-Ni}$  distribution diagram of pyrites from the Mengqiguer uranium deposit (base map after Bajwah et al.,1987)

I、II—Sedimentary and depositional modification areas, III、IV—Magmatic and hydrothermal areas

## 6.2 硫同位素对成矿物质来源和成矿环境的指示

自然界中通常有4种不同 $\delta^{34}\text{S}$ 储存库,即幔源硫、现代海水硫、地史上海相硫酸盐和还原硫,其中幔源硫的 $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围介于 $0\pm 3\text{‰}$ (Chaussidon et al.,1990);现代海水硫的 $\delta^{34}\text{S}$ 多趋于正值,通常为 $20\text{‰}$ ;地史上海相硫酸盐的 $\delta^{34}\text{S}$ 大多介于 $9\text{‰}\sim 32\text{‰}$ ;还原硫也称生物硫,由于生物沉积作用常常会使 $\delta^{34}\text{S}$ 值比原始 $\delta^{34}\text{S}$ 值降低 $20\text{‰}\sim 60\text{‰}$ ,致使其硫同位素组成变化范围较大,生物硫的典型特征是会出现较大负值,且 $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围介于 $-40\text{‰}\sim 50\text{‰}$ (Ohmoto and Goldhaber, 1997)。一般情况下,沉积岩内的硫化物、煤及石油的 $\delta^{34}\text{S}$ 多为负值,且变化范围相对较大。

蒙古古尔铀矿床中的硫化物主要为黄铁矿,且矿物组合较为单一。表3除2个样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 为正值外,其余样品均为负值,其 $\delta^{34}\text{S}$ 值介于 $-1.40\text{‰}\sim -17.30\text{‰}$ ,极差为 $21.20\text{‰}$ ,从黄铁矿硫的来源判定图解(图5)可见,研究区内黄铁矿中硫的 $\delta^{34}\text{S}$ 主要分布在沉积硫化物、煤和油气中硫的 $\delta^{34}\text{S}$ 范围内,暗示了沉积硫化物、煤和少量油气可能为矿床中硫的主要来源。闵茂中等(2003)在新疆可地浸砂岩型铀矿床中首次发现沥青铀矿、次生铀矿物(铀石等)与

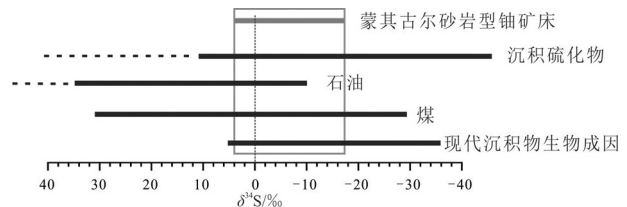


图5 蒙古古尔铀矿床中黄铁矿硫的来源判定图(底图据丁波等,2017 修改)

Fig.5 Diagram showing the discrimination for sulfur source of pyrite from the Mengqiguer uranium deposit (modified from Ding Bo et al., 2017)

古细菌、芽孢、古真菌等存在空间和成因上的联系,黄铁矿在空间上与铀矿物密切共生,也暗示了区内硫化物黄铁矿具备生物成因的特点。蒙古古尔铀矿床中出露有大量炭屑及煤线等有机质,尤其西山窑组内夹有6层煤线( $M_7\sim M_{12}$ ),八道湾组内夹有3层煤线( $M_1, M_3, M_5$ ),说明在成岩过程中,大量有机质的存在使厌氧细菌大量繁殖,发育大规模代谢作用,对硫酸盐进行还原,并产生大量还原剂 $\text{H}_2\text{S}$ ,最终形成不规则粒状、草莓状黄铁矿(张晓,2012)。大量厌氧细菌在活动中导致硫同位素较强分馏,使生物成因硫化物中 $\delta^{34}\text{S}$ 值趋于很小(王正其等,2005)。另外,伊犁盆地内油气资源多集中于巩留凹陷带及伊宁凹陷带内,本区内尚未发现有油迹方面的相关报道。另外,程相虎(2019)利用原位微区SIMS法定年得出蒙古古尔铀矿床成矿年龄主体为中中新世中期( $13.8\pm 3.0$  Ma),其次为更新世( $1.678\pm 0.35$  Ma),表明其成矿具有较强的继承性。刘红旭等(2015)提出中亚典型层间氧化带砂岩型铀矿床主成矿作用集中于新近纪以来。程相虎(2019)指出矿区自古近纪(大约24 Ma)以来发育有多期的新构造运动,主要为中新世、上新世末—早更新世、中更新世等时期差异性隆升剥蚀,从而得出的成矿年龄( $13.8\pm 3.0$  Ma)、( $1.678\pm 0.35$  Ma)与盆地南缘新构造运动有较好的耦合性。中新世、上新世末—早更新世、中更新世等时期构造抬升期携带铀源的大气降水性质的层间地下水进入侏罗系水西沟群目的层中,形成含铀含氧常温—低温、局部为中低温的地下水流体作用,在层间氧化带混染有机酸等酸性流体下最终形成了本区的层间氧化带型铀矿床(丁波等,2017;程相虎,2019)。综上所述,蒙古古尔铀矿床中的黄铁矿在形成过程中受到明显细菌催化作

用,其硫源主要为煤和沉积硫化物,且具备微生物成因特征,进一步证实区内含矿砂岩形成环境为还原性环境。

### 6.3 黄铁矿在铀成矿过程中的作用

在热液流体中,铀的迁移、沉淀主要受热液流体的氧逸度控制,在迁移时主要以六价铀酰络合物形式存在,在还原环境中,迁移态的  $U^{6+}$  被还原为  $U^{4+}$  从而富集沉淀形成铀矿物(Joël Brugger et al., 2016; Liu et al., 2018; 吴德海等, 2019b; Wu et al., 2019)。具备生物成因特征的黄铁矿( $FeS_2$ )形成于生物体内有机质产生的还原环境中,是环境中  $SO_4^{2-}$  被还原后的产物与  $Fe^{2+}$  结合形成(李洪星等, 2012)。蒙其古尔铀矿床中出露黄铁矿多为不规则他形粒状黄铁矿,部分充填于有机质炭屑周围及细胞腔内,部分分布于石英凹坑及胶结物中,常与沥青铀矿相伴生,两者存在极为密切的关系(黄广文等, 2017)。课题组对区内不规则他形粒状黄铁矿进行电子探针微区分析时发现,其S/Fe平均比值为2.12(另文发表),表明黄铁矿在形成过程中所需的溶解氧浓度充足(李洪星等, 2012),能够为铀成矿提供有利的氧化还原环境。蒙其古尔铀矿床南部蚀源区出露有大面积石炭—二叠纪中酸性火山凝灰岩。张晓(2012)测得蚀源区主体岩石中铀含量高达  $12.90 \times 10^{-6}$ ,表明该类火山凝灰岩为该区外部铀源体的主要组成部分。早中侏罗世( $J_{1-2}$ ),随着盆地的不断伸展断陷,矿床南部蚀源区中酸性火山凝灰岩及花岗岩等碎屑陆续搬运至盆地沉积区,形成一套富铀的含煤碎屑岩系,砂体中富含有机质炭屑、煤线及黄铁矿等还原物质,为后期铀的富集提供了有利条件,且碎屑埋深的不断加大,含矿层位进入封闭体系,砂体内有机质在厌氧菌(古细菌、古真菌等)作用下发育脱羟基作用,形成有利于铀富集的有机酸及  $CH_4$  等气体(张晓, 2012),  $CH_4$  等还原性气体可在硫酸盐还原菌的作用下与含水层中的  $SO_4^{2-}$  反应,生成大量的  $H_2S$  气体,造成强还原环境,亦可形成黄铁矿,大大地提高了砂体的还原容量,促使铀不断富集、沉淀,形成铀矿床,并造成黄铁矿与铀矿物共生(伴生)的现象。丁波等(2017)提出研究区成矿流体中水溶液主要为大气降水,即大气降水中含有大量氧气,进一步为铀活化迁移提供了重要介质;伊犁盆地南缘经历了多期多阶段挤压—

伸展构造作用,致使区内成矿砂体中形成大量裂隙及层间小断层,来自蚀源区具有大气降水性质的含铀含氧水形成富铀流体从构造补给窗渗入成矿砂体内,同时黄铁矿中  $Fe^{2+}$ 、煤线(煤层)及炭屑有机质作为还原剂(还原性地球化学障),将含铀含氧水及富铀流体内的  $U^{6+}$  还原为  $U^{4+}$ ,最终在有利地区沉淀富集形成沥青铀矿及铀石等矿石矿物。

## 7 结 论

(1)蒙其古尔铀矿床西山窑组和八道湾组中的黄铁矿具相似的稀土元素配分特征,表明矿床中的黄铁矿具有相似的成矿物质来源;黄铁矿微量元素较低的Co、Ni含量和Co/Ni比值特征指示了黄铁矿为沉积成因,形成于低温环境,As含量明显富集,暗示成矿流体为低温热液流体。

(2)蒙其古尔铀矿床中黄铁矿的硫同位素组成特征指示了矿床黄铁矿形成于还原环境,硫主要源于具微生物成因特征的煤和沉积硫化物。

(3)综合蒙其古尔铀矿床黄铁矿的稀土元素、微量元素和硫同位素组成特征,结合区内成矿地质背景,认为蒙其古尔铀矿床中的黄铁矿和炭屑等有机质为区内铀成矿作用提供了发生氧化还原反应所需的还原剂和还原性地球化学障,继而使砂岩中还原容量大大增强,最终使  $U^{4+}$  快速沉淀富集形成沥青铀矿及铀石等。

## References

- Bajwah Z U, Seccombe P K, Offler R. 1987. Trace element distribution, Co/Ni ratios and genesis of the Big Cadia iron-copper deposit, New South Wales, Australia[J]. *Mineralium Deposita*, 22: 292–303.
- Bralia A, Sabatini G, Troja F. 1979. A revaluation of the Co/Ni ratio in pyrite as geochemical tool in ore genesis problems[J]. *Mineralium Deposita*, 14(3): 353–374.
- Chaussidon M, Lorand J P. 1990. Sulphur isotope composition of orogenic dpinel lherzolite massifs from Ariege (North– Eastern Pyrenees, France): An ion microprobe study[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(10):2835–2846.
- Chen Daisheng, Wang Ruiying, Li Shengxiang, Zhang Kefang. 1996. The mineralization mechanism and model of sandstone type uranium deposit in Yili Basin[J]. *Journal of East China Geological Institute*, 19(4):321–331(in Chinese with English abstract).
- Chen Fenxiong, Nie Fengjun, Zhang Chengyong. 2016a. Mesozoic structural styles and their relationship with uranium deposits in the

- southern margin of Yili Basin[J]. *Geology and Exploration*, 52(3): 480–488(in Chinese with English abstract).
- Chen Fenxiong, Nie Fengjun, Zhang Chengyong, Zhang Zhanfeng. 2016b. Distribution characteristics of interlayer oxidation zone and its main controlling factors of upper Xishanyao Formation in Honghaigou area, Yili Basin[J]. *Geological Science and Technology Information*, 35(3):105–111(in Chinese with English abstract).
- Chen Fenxiong, Nie Fengjun, Zhang Chengyong, Zhang Zhanfeng. 2016c. Sedimentary facies of the Lower Jurassic Sangonghe Formation and its relationship with uranium mineralization in Mengqiguer area of Yili Basin, Xinjiang[J]. *Journal of Palaeogeography*, 18(5): 833–842(in Chinese with English abstract).
- Cheng Xianghu. 2019. Geological Characteristics and Genetic Analysis of Sandstone Uranium deposits in Wukuerqi–Mongqiguer Area, Southern Margin of Yi Li Basin[D]. Xian: Northwest University(in Chinese with English abstract).
- Chinnasamy S S, Mishra B. 2013. Greenstone metamorphism, hydrothermal alteration, and gold mineralization in the genetic context of the granodiorite–hosted gold deposit at Jonnagiri, Eastern Dharwar Craton, India [J]. *Economic Geology*, 108 (5): 1015–1036.
- Ding Bo, Liu Hongxu, Li Ping, Wang Maomao, Jiang Hong, Zhang Xiao, Pan Dengyu, Xiu Xiaoqian. 2017. The organic–inorganic fluid coupling uranium mineralization in the southern margin of Yili Basin[J]. *Chinese Journal of Geology*, 52(3):871–894(in Chinese with English abstract).
- Ding Bo, Liu Hongxu, Xiu Xiaoqian, Liu Tao, Pan Dengyu, Zhang Xiao, Li Ping. 2016. Metallogenic fluid characteristics in relation to uranium mineralization in Mengqiguer uranium deposit, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 35(3): 559–572(in Chinese with English abstract).
- Hou Huiqun, Han Shaoyang, Ke Dan. 2010. Integrated evaluation of sandstone–hosted uranium metallogenic potential in the southern margin of Yili Basin, Xinjiang, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 29(10):1518–1525(in Chinese with English abstract).
- Huan Weijing, Yuan Wanming, Li Na. 2011. Study on the mineral electron microprobe evidence of the formation conditions and fission track of gold deposits in Ganzhi–Litang gold belt, western Sichuan Province[J]. *Geoscience*, 25(2):261–270(in Chinese with English abstract).
- Huang Guangwen. 2017. The Mineral Composition Debris Source Tracer Study of Mengqiguer Uranium Deposit in Yili Basin[D]. Nanchang: East China University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Huang Guangwen, Pan Jiayong, Zhang Zhanfeng, Huang Guangnan, Liao Zhiqian, Du Houfa. 2017. Study on petrological characteristics and distribution of uranium minerals of sandstones in Mengqiguer Uranium by electron microprobe, Xinjiang[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 36(2):209–220(in Chinese with English abstract).
- Huang Guangwen, Xue Wanwen, Pan Jiayong, Song Taizhong, Huang Guangnan, Zhang Chengyong, Bai Xudong, Zhang Tao, Hong Binyue. 2018. Provenance and tectonic setting of sandstone–type uranium deposit in Mengqiguer Area, Yili Basin: Evidence from zircon U–Pb chronology of evidence[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 42(6):1108–1120(in Chinese with English abstract).
- Joël Brugger, Liu W, Etschmann B, Mei Y, Sherman D M, Testemale D. 2016. A review of the coordination chemistry of hydrothermal systems, or do coordination changes make ore deposits? [J]. *Chemical Geology*, 447:219–253.
- Keith M, Häckel F, Haase K M, Schwarz–Schampera U, Klemd R. 2016. Trace element systematics of pyrite from submarine hydrothermal vents[J]. *Ore Geology Reviews*, 72(11):728–745.
- Li Hongxing, Lu Xiancai, Bian Lizeng, Ma Muye, Zhang Xuefen, Zhang Zhuangzhi, Ding Zijian. 2012. Geological significance of microcrystalline morphology and composition of framboids pyrite: A case study of marl of Chihsia Formation[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 32(3):443–448(in Chinese with English abstract).
- Li Shengfu, Yan Qiming, Wang Xinyu, Zhang Zhongwang, Qi Junrang. 2006. Research on the depositional system of alluvial fans and fan–deltas of the Shuixigou group in the south Yili Basin, Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology*, 24(3):297–304(in Chinese with English abstract).
- Li Shengxiang, Han Xiaozhong, Cai Yuqi, Zheng Enjiu, Wang Baoqun. 2006. Depositional system of the lower–middle Jurassic Shuixigou Group in the western of the southern margin of the Yili Basin and its controls on uranium mineralization[J]. *Geology in China*, 33(3): 582–590(in Chinese with English abstract).
- Liu G Q, Zhao K D, Jiang S Y, Chen W. 2018. In–situ sulfur isotope and trace element analysis of pyrite from the Xiawang uranium ore deposit in South China: Implication for ore genesis[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 7:1–17.
- Liu Hongxu, Zhang Xiao, Ding Bo, Pan Chengyu. 2015. Metallogenic model and prospecting oreintation of sandstone type uranium deposits in the southern margin of YiliBasin[J]. *Uranium Geology*, 31(S1):198–212(in Chinese).
- Liu Yaxuan, Zhang Qing, Huang Zhengyu, Wu Jianlin. 2006. Study on determination of 18 trace elements including As, Cr, Ge, V in geochemical samples by ICP–MS[J]. *Chemical World*, 1:16–20(in Chinese with English abstract).
- Min Maozhong, Peng Xinjian, Wang Jinping, Yi Lin, Zhang Guanghui, Xu Huifang, Li Pengfu. 2003. Progress in study on microbe–metallogenesis of uranium[J]. *Uranium Geology*, 19(5): 257–263 (in Chinese with English abstract).
- Ohmoto H, Goldhaber M B. 1997. Sulfur and Carbon Isotopes, in *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*[M]. New York: Wiley, 517–612.
- Qiu Yubo, Yi Haisheng, Wang Guo, Zhang Zhanfeng, Liu Junping,

- Jiang Hong, Luo Xinggang, Du Mo, Zhang Lei. 2014. Sedimentary characteristics of the Upper member of Middle Jurassic Xishanyao Formation and its relationship to uranium deposits in Honghaigou area of Yili Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 16(4):537–547 (in Chinese with English abstract).
- Schoonen M A. 2004. Mechanisms of sedimentary pyrite formation. Amend J P, Lyons T W. *Sulfur Biogeochemistry: Past and Present*[M]. New York: The Geological Society of America, 117–134.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[C]//Saunders A D and Norry M J(eds.). *Magmatism in the Ocean Basin*. Geological Society Special Publication, 42:313–345.
- Taylor S R. 1964. Trace element abundances and the chondritic earth model[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 28(12):1989–1998.
- Wang Bing, Kang Yong, Zhang Daxu. 2015. Preliminary origin of rich large ore body in Mongolian uranium deposit[J]. *Xinjiang Geology*, 33(3):358–361(in Chinese with English abstract).
- Wang Jun, Geng Shufang. 2009. Characteristics of the interlayer oxidation zone and the Kujieertai uranium deposit in Yili Basin[J]. *Geology in China*, 36(3): 706–713(in Chinese with English abstract).
- Wang Xun, Cai Yuqi, Zhang Zhanfeng, Liu Hongxu, Liu Junping. 2014. Relation of sedimentary characteristics of uranium strata to sandstone-type uranium mineralization in Mengqiguer Area[J]. *Uranium Geology*, 30(2): 93–99(in Chinese with English abstract).
- Wang Zhengqi, Cao Shuanglin, Pan Jiayong, Guan Taiyang, Zhang Guoyu. 2005. Trace element geochemistry of No. 511 uranium ore deposit in Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 24(4): 409–415(in Chinese with English abstract).
- Wei Liqiong, Huang Li, Cai Enqi. 2018. A research on typomorphic of pyrite in mining area[J]. *China's Manganese Industry*, 36(2): 148–151(in Chinese with English abstract).
- Wu Bolin, Liu Chiyang, Wang Jianqiang. 2007. Basic characteristics of fluid geological process of the interlayer oxidation zone sandstone type uranium deposits[J]. *Science in China*, 37(1): 157–165(in Chinese with English abstract).
- Wu D H, Pan J Y, Xia F, Huang G W, Lai J. 2019. The mineral chemistry of chlorites and its relationship with uranium mineralization from Huangsha uranium mining area in the Middle Nanling Range, SE China[J]. *Minerals*, 9(3):199.
- Wu Dehai, Pan Jiayong, Xia Fei, Mou Ping, Huang Guangwen, Lai Jing, Zhong Fujun. 2019a. Geochemical characteristics of trace elements and sulfur isotopes of pyrite from 221 uranium deposit, south Jiangxi Province: Implication for uranium Mineralization[J]. *Chinese Rare Earths*, 40(3):20–35(in Chinese with English abstract).
- Wu Dehai, Xia Fei, Pan Jiayong, Liu Guoqi, Huang Guolong, Liu Wenquan, Wu Jiayong. 2019b. Characteristics of hydrothermal alteration and material migration of Mianhuakeng uranium deposit in northern Guangdong Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(9): 2745–2764(in Chinese with English abstract).
- Wu Yafei, Zeng Jiannian, Li Jinwei. 2013. Geochemical characteristics of trace elements and their genetic significance of pyrite in the Hucun Cu–Mo deposit, Tongling, Anhui[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, S2: 620–621(in Chinese).
- Xiu Xiaoqian, Liu Hongxu, Zhang Yuyan, Suo Shixin. 2015a. A study of ore-forming fluid in Mengqiguer uranium deposit, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 34(3): 488–496(in Chinese with English abstract).
- Xiu Xiaoqian, Suo Shixin, Liu Hongxu, Meng Yunfei. 2015b. Research on fluid inclusions in the Mengqiguer uranium deposit[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 34(1): 201–207(in Chinese with English abstract).
- Yan Yutong, Li Shengrong, Jia Baojian, Zhang Na, Yan Lina. 2012. Composition typomorphic characteristics and statistic analysis of pyrite in gold deposits of different genetic types[J]. *Earth Science Frontiers*, 19(4): 214–226(in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiao. 2012. A Review on Genesis of Mengqiguer Uranium Deposit in the Southern Margin of Yili Basin, Xinjiang[D]. Beijing: Beijing Research Institute of Uranium Geology(in Chinese with English abstract).
- Zhang Xin, Nie Fengjun, Zhang Chengyong, Zhang Hujun, Dong Fangsheng, Dong Yadong, Lu Yayun. 2015. Study on uranium occurrence state of sandstone-type uranium deposits in Mengqiguer Deposit, Yili Basin[J]. *Science Technology and Engineering*, 15(33):18–47(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhanfeng, Jiang Hong, Wang Maomao. 2010. Metallogenic drive factors and its significance in prospecting practice of Mengqiguer uranium deposit[J]. *Mineral Deposits*, 29(S1):165–166 (in Chinese).

## 附中文参考文献

- 陈戴生,王瑞英,李胜祥,张克芳. 1996. 伊犁盆地砂岩型铀矿成矿机制及成矿模式[J]. *华东地质学院学报*, 19(4):321–331.
- 陈奋雄,聂逢君,张成勇. 2016a. 伊犁盆地南缘中新生代构造样式与铀成矿关系[J]. *地质与勘探*, 52(3):480–488.
- 陈奋雄,聂逢君,张成勇,张占峰. 2016b. 伊犁盆地洪海沟地区西山窑组上段层间氧化带分布特征及其主控因素分析[J]. *地质科技情报*, 35(3):105–111.
- 陈奋雄,聂逢君,张成勇,张占峰. 2016c. 新疆伊犁盆地蒙古其古尔地区下侏罗统三工河组沉积相及其铀矿化的关系[J]. *古地理学报*, 18(5):833–842.
- 程相虎. 2019. 伊犁盆地南缘乌库尔其一蒙古其古尔地区砂岩型铀矿地质特征与成因分析[D]. 西安:西北大学.
- 丁波,刘红旭,李平,王毛毛,蒋宏,张晓,潘澄雨,修晓茜. 2017. 伊犁盆地南缘有机—无机流体耦合铀成矿作用[J]. *地质科学*, 52(3): 871–894.
- 丁波,刘红旭,修晓茜,刘涛,潘澄雨,张晓,李平. 2016. 新疆蒙古其古

- 尔铀矿床成矿流体特征及其与铀成矿的关系[J]. 矿床地质, 35(3):559-572.
- 侯惠群, 韩绍阳, 柯丹. 2010. 新疆伊犁盆地南缘砂岩型铀成矿潜力综合评价[J]. 地质通报, 29(10): 1518-1525.
- 郇伟静, 袁万明, 李娜. 2011. 川西甘孜—理塘金矿带形成条件的矿物电子探针与裂变径迹研究[J]. 现代地质, 25(02):261-270.
- 黄广文. 2017. 伊犁盆地蒙古古尔铀矿床矿石组分及碎屑物源示踪研究[D]. 南昌: 东华理工大学, 2017.
- 黄广文, 潘家永, 张占峰, 黄广楠, 张涛, 廖志权, 杜后发. 2017. 应用电子探针研究蒙古古尔铀矿床含矿砂岩岩石学特征及铀矿物分布规律[J]. 岩矿测试, 36(2):209-220.
- 黄广文, 薛明文, 潘家永, 宋泰忠, 黄广楠, 张成勇, 白旭东, 张涛, 洪斌跃. 2018. 伊犁盆地蒙古古尔砂岩型铀矿床源区体系与构造背景分析——来自碎屑锆石 U-Pb 年代学证据[J]. 大地构造与成矿学, 42(6):1108-1120.
- 李洪星, 陆现彩, 边立曾, 马牧野, 张雪芬, 张壮志, 丁子健. 2012. 草莓状黄铁矿微晶形态和成分的地质意义——以栖霞组含泥灰岩为例[J]. 矿物学报, 32(3):443-448.
- 李盛富, 颜启明, 王新宇, 张中旺, 齐军让. 2006. 伊犁盆地水西沟群冲积扇—扇三角洲沉积体系研究[J]. 新疆地质, 24(3):297-304.
- 李胜祥, 韩效忠, 蔡煜琦, 郑恩玖, 王保群. 2006. 伊犁盆地南缘西段中下侏罗统水西沟群沉积体系及其对铀成矿的控制作用[J]. 中国地质, 33(3):582-590.
- 刘红旭, 张晓, 丁波, 潘澄雨. 2015. 伊犁盆地南缘砂岩型铀成矿模式与找矿方向[J]. 铀矿地质, 31(增刊1):198-212.
- 刘亚轩, 张勤, 黄珍玉, 吴健玲. 2006. ICP-MS 法测定地球化学样品中 As、Cr、Ge、V 等 18 种微量痕量元素的研究[J]. 化学世界, (1): 16-20.
- 闵茂中, 彭新建, 王金平, 伊琳, 张光辉, 徐慧芳, 李鹏富. 2003. 铀的微生物成矿作用研究进展[J]. 铀矿地质, 19(5):257-263.
- 邱余波, 伊海生, 王果, 张占峰, 刘俊平, 蒋宏, 罗星刚, 杜默, 张磊. 2014. 伊犁盆地洪海沟地区中侏罗统西山窑组上段沉积特征及其与铀成矿的关系[J]. 古地理学报, 16(4):537-547.
- 王冰, 康勇, 张大绪. 2015. 蒙古古尔铀矿床富矿体成因初探[J]. 新疆地质, 33(3):358-361.
- 王军, 耿树方. 2009. 伊犁盆地库捷尔太铀矿床层间氧化带与铀矿化特征研究[J]. 中国地质, 36(3):706-713.
- 王勋, 蔡煜琦, 张占峰, 刘红旭, 刘俊平. 2014. 蒙古古尔地区赋铀层沉积特征及其与砂岩型铀矿的关系[J]. 铀矿地质, 30(2):93-99.
- 王正其, 曹双林, 潘家永, 管太阳, 张国玉. 2005. 新疆 511 铀矿床微量元素富集特征研究[J]. 矿床地质, 24(4):409-415.
- 魏丽琼, 黄丽, 蔡恩琪. 2018. 矿区黄铁矿成分标型特征研究[J]. 中国锰业, 36(2):148-151.
- 吴柏林, 刘池洋, 王建强. 2007. 层间氧化带砂岩型铀矿流体地质作用的基本特点[J]. 中国科学, 37(1):157-165.
- 吴德海, 潘家永, 夏菲, 牟平, 刘文泉, 黄广文, 赖静, 钟福军. 2019a. 赣南 221 铀矿床黄铁矿微量元素与硫同位素地球化学特征及其对铀成矿作用的指示[J]. 稀土, 40(3):20-35.
- 吴德海, 夏菲, 潘家永, 刘国奇, 黄国龙, 刘文泉, 吴建勇. 2019b. 粤北棉花坑铀矿床热液蚀变与物质迁移研究[J]. 岩石学报, 35(9):2745-2764.
- 吴亚飞, 曾键年, 李锦伟. 2013. 安徽铜陵胡村铜铅矿床黄铁矿微量元素地球化学特征及其成因意义[J]. 矿物学报, S2:620-621.
- 修晓茜, 刘红旭, 张玉燕, 所世鑫. 2015. 新疆蒙古古尔铀矿床成矿流体研究[J]. 矿床地质, 34(3):488-496.
- 修晓茜, 所世鑫, 刘红旭, 孟云飞. 2015. 蒙古古尔铀矿床流体包裹体研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 34(1):201-207.
- 严育通, 李胜荣, 贾宝剑, 张娜, 闫丽娜. 2012. 中国不同成因类型金矿床的黄铁矿成分标型特征及统计分析[J]. 地学前缘, 19(4): 214-226.
- 张晓. 2012. 伊犁盆地南缘蒙古古尔铀矿床成因研究[D]. 北京: 核工业北京地质研究院.
- 张鑫, 聂逢君, 张成勇, 张虎军, 董方升, 董亚栋, 卢亚运. 2015. 伊犁盆地蒙古古尔矿床砂岩型铀矿赋存状态研究[J]. 科学技术与工程, 15(33):18-47.
- 张占峰, 蒋宏, 王毛毛. 2010. 蒙古古尔铀矿床成矿驱动因素及其在伊犁盆地找矿实践中的意义[J]. 矿床地质, 29(S1):165-166.