

伊犁蒙其古尔铀矿床含矿层砂岩中黄铁矿形成机制 及对铀成矿的指示意义*

丁波¹, 刘红旭^{1**}, 张宾¹, 李平¹, 蒋宏², 张虎军², 谢希良³, 郭春杰³

(1 中核集团铀资源勘查与评价重点实验室, 核工业北京地质研究院, 北京 100029; 2 核工业二一六大队, 乌鲁木齐 830011 新疆; 3 新疆中核天山铀业有限公司, 伊宁 835000 新疆)

摘要 蒙其古尔铀矿床为伊犁盆地南缘大型层间氧化带砂岩型铀矿床, 为查明该矿床含矿层中黄铁矿成因及其形成机制, 探讨微生物参与铀成矿过程。文章对含矿层砂岩中黄铁矿与铀矿物矿物学特征、黄铁矿 S 同位素与碳酸盐胶结物的 C-O 同位素开展细致研究。研究表明: ① 蒙其古尔铀矿床中铀主要以铀矿物与吸附铀形式存在, 吸附铀主要为有机质吸附铀, 铀矿物以沥青铀矿为主, 多与黄铁矿、炭屑共生; ② 蒙其古尔铀矿床含矿层砂岩中黄铁矿主要以自形晶、草莓状和不规则状集合体产出, 多与沥青铀矿、碳酸盐胶结物共生, 其中黄铁矿 S 同位素($\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}} = -68.4\text{‰} \sim -22.1\text{‰}$)与碳酸盐胶结物的 C-O 同位素($\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}} = -10.2\text{‰} \sim -7.4\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}} = -9.6\text{‰} \sim -5.8\text{‰}$)分析表明黄铁矿具有细菌硫酸盐还原(BSR)与有机物热解 2 种成因, 并探讨了这 2 种不同成因黄铁矿的形成机制。③ 结合前人研究成果, 认为硫酸盐还原菌(SRB)参与蒙其古尔铀矿床铀成矿过程, 以间接还原方式为主, 在有机质、黏土矿物与颗粒表面吸附 U(VI)的基础上, 通过硫酸盐还原菌(SRB)还原 SO_4^{2-} 产生的 H_2S 将 U(VI)被还原成 U(IV), 形成铀矿物。

关键词 地球化学; 沥青铀矿; 黄铁矿; 硫酸盐还原菌(SRB); 铀成矿; 蒙其古尔铀矿床

中图分类号: P619.14

文献标志码: A

Mineralogical and isotopes evidence for origin of pyrite: Implication for formation mechanism of pyrite and its relationship with uranium mineralization in Mengqigu'er uranium deposit, Yili Basin

DING Bo¹, LIU HongXu¹, ZHANG Bin¹, LI Ping¹, JIANG Hong², ZHANG HuJun², XIE XiLiang³ and GUO ChunJie³

(1 CNNC Key Laboratory of Uranium Resources Exploration and Evaluation Techniques, Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China; 2 Geological Party No.216, CNNC, Urumqi 830011, Xinjiang, China;

3 Xinjiang Tianshan Uranium Co., Ltd., CNNC, Yining 835000, Xinjiang, China)

Abstract

The Mengqigu'er uranium deposit in Yili Basin is a typical interlayer oxidation zone type uranium deposit. In order to investigate the origin and formation mechanism of pyrite in ore-bearing sandstone and discuss the process in which microorganisms was involved in uranium mineralization, the authors conducted the detailed analysis of mineralogical characteristics of pyrite and uranium minerals as well as S isotopes of pyrite and C-O isotopes of carbonate cement. The results show that the uranium occurrence of Mengqigu'er uranium deposit is mainly adsorption uranium giving priority to organic adsorption, and uranium mineral mostly is pitchblende closely

* 本文得到国家科技部 973 计划项目(编号: 2015CB453004)、中核集团集中研发项目“伊犁盆地南缘东段砂岩型铀矿定位预测与靶区优选(编号: 地 LTD1612-4)和国家预先研究项目(编号: 3210402)联合资助

第一作者简介 丁波, 男, 1991 年生, 工程师, 研究方向为矿产普查与勘探。Email: 18773485100@163.com

** 通讯作者 刘红旭, 男, 1977 年生, 研究员, 主要从事砂岩型铀矿成矿作用、成矿规律及成矿预测等方面的工作。Email: lhx100029@163.com

收稿日期 2018-08-29; 改回日期 2019-06-18。赵海杰编辑。

associated with pyrite and charcoal. The pyrites occurring as euhedral, framboidal, and anhedral forms in the ore-bearing sandstone of Mengqigu'er uranium deposit are more closely associated with pitchblende and carbonate cement. The $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ ($-68.4\text{‰}\sim 22.1\text{‰}$) of pyrite and $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ ($-10.2\text{‰}\sim -7.4\text{‰}$), $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$ ($-9.6\text{‰}\sim -5.8\text{‰}$) of carbonate cement provide direct evidence for bacterial sulfate reduction (BSR) and organic pyrolysis of pyrite. Moreover, the formation mechanism of pyrite of different genesis is also described. Sulfate-reducing bacteria were involved in the uranium mineralization process of Mengqigu'er uranium deposit. On the basis of the adsorption U (VI) of organic matter, clay minerals and particle surface, sulfate ion (SO_4^{2-}) was partially or even totally reduced into H_2S by heterotrophic SRB using reactive OM as a source of energy which would reduce U (VI) into U (IV) and form uranium and uranium deposits.

Key words: geochemistry, pitchblende, pyrite, bacterial sulfate reduction (BSR), uranium mineralization, Mengqigu'er uranium deposit

砂岩型铀矿中铀在氧化还原过渡带富集通常被认为是地下水中U(VI)被还原成U(IV),形成铀矿物而沉淀的结果,所需要的还原剂主要为砂岩中残留的碳化植物残屑和硫化物,特别是黄铁矿(陈祖伊等,2007)。砂岩型铀矿中常见的铀矿物产于黄铁矿周围与裂隙中,或交代黄铁矿产出。大量的学者从实验与理论的角度研究认为上述现象反映的是结晶顺序,实际上是 E_h 值降低时或酸化时黄铁矿早于铀矿物发生沉淀的结果,当然在无氧介质中,黄铁矿可与水反应产生 H_2S ,造成介质 E_h 值的急剧下降,从而使溶液中的U(VI)被还原沉淀,其还原机制主要通过 H_2S 实现(赵凤民,1982;陈祖伊等,2007)。此外,大量学者通过对砂岩型铀矿含矿砂岩中黄铁矿的研究认为,黄铁矿的形成与硫酸盐还原菌(SBR)关系密切,硫酸盐还原菌(SBR)作用过程产生大量的 H_2S ,能将U(VI)被还原成U(IV),形成铀矿物,造成硫酸盐还原菌(SBR)参与铀成矿过程(Lovley, 1993; 赵瑞全等, 1998; 尹金双等, 2005; 乔海明等, 2006; 刘正义等, 2010; Min et al., 2015; Bonnetti et al., 2015; 2017)。

对于伊犁盆地南缘砂岩型铀矿而言,铀矿化主要发育在中下侏罗统水西沟群($J_{1-2}sh$)暗色含煤碎屑岩建造中,含矿层不同地球化学分带砂岩(氧化带、氧化-还原过渡带、还原带)与煤层中均发育大量黄铁矿。目前对伊犁盆地砂岩型铀矿的研究主要侧重于铀源、构造、岩性岩相、地下水动力和地球化学障等成矿条件和控矿因素方面(李胜祥等,1996;2006;陈戴生等,1997;古抗衡,1997;阿种明,2000;李细根,2002;陈肇博等,2002;王金平,2003;王正其等,2006;韩效忠等,2004;2008;张金带等,2005;王谋等,2006;李宝新等,2008;王冰等,2009;刘红旭,

2015;2017;丁波等,2016;2017;2018),这些成矿条件的相互耦合是层间氧化带和铀矿体形成和发育的基础,但是对含矿层不同地球化学分带砂岩中黄铁矿成因、形成机制及与铀成矿的关系仍不清楚,制约了对该富大矿床成因机制的深入研究。本文通过系统研究蒙古古尔铀矿床含矿层砂岩中黄铁矿矿物学及S同位素与碳酸盐胶结物C-O同位素特征,来查明黄铁矿成因及其形成机制,并结合该矿床中铀赋存状态研究,来探讨微生物参与铀成矿过程,为该富大矿床成因及形成过程提供依据,对砂岩型铀矿成矿机理研究提供了新启发。

1 成矿地质背景

伊犁盆地是在石炭纪—二叠纪裂谷基础上发展演化而成的陆内中新生代山间断陷-坳陷复合型盆地,呈西宽东窄的三角形夹持于天山造山带内(中国境内段),归属哈萨克斯坦-准噶尔板块南部中天山隆起带中的伊犁-中天山微地块(张国伟等,1999)。伊犁盆地铀矿床主要位于狭义的伊犁盆地南部斜坡带之上,自西向东发育有洪海沟、库捷尔太、乌库尔其、扎吉斯坦、蒙古古尔等铀矿床,组成东西长约70 km的铀成矿带,是中亚地区南巴尔喀什-伊犁铀矿省的重要组成部分,这些矿床的成因类型皆为典型的层间氧化带型。

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部位,受南部山前控盆断裂和盆缘扎基斯坦河断裂控制,矿床整体位于扎基斯坦向斜东部构造单元,夹持于 F_1 断裂和 F_3 断裂之间(图1)。 F_1 、 F_2 和 F_3 阻水逆冲断裂组合决定了地下水补径排体系,控制了层间氧化带和铀

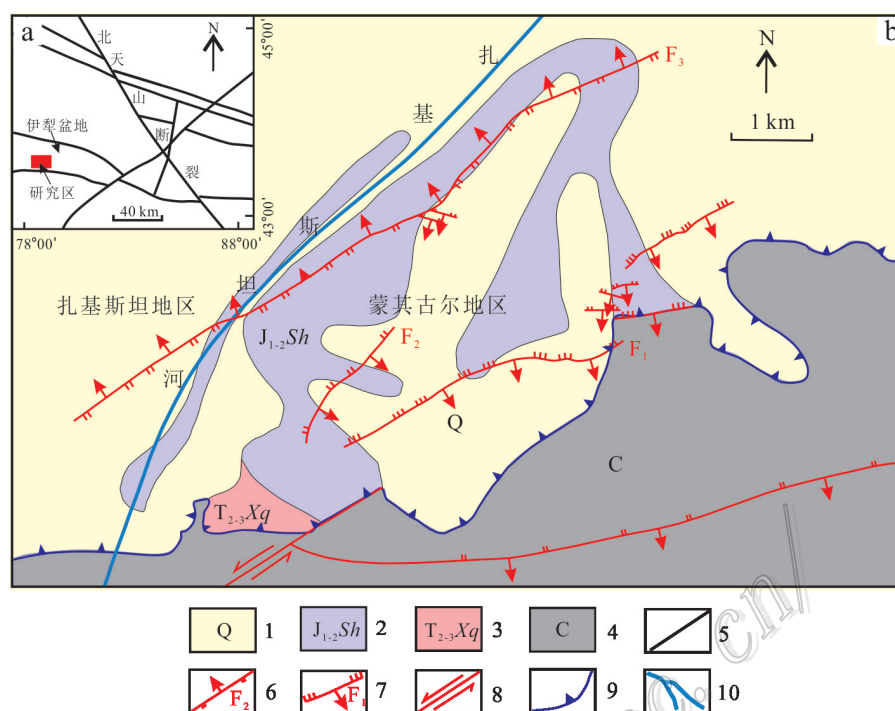


图1 蒙古尔地区构造位置简图(a)及地质简图(b,据丁波等,2016)

1—第四系;2—中-下侏罗统水西沟群灰色砂砾岩、含砾粗砂岩、中细砂岩、泥岩、夹煤层;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、火山凝灰岩;5—区域断裂;6—逆断裂及编号;7—逆冲断裂及编号;8—走滑断层;9—盆地边界;10—河流

Fig. 1 Simplified geological map of Mengqiguer area (after Ding et al., 2016)

1—Quaternary; 2—Middle-Lower Jurassic Shuixigou Group conglomerate and sandstone with gravel; 3—Middle-Upper Triassic Xiaoqiangou Group gray and variegated conglomerate and mudstone; 4—Carboniferous intermediate-felsic volcanic rock and volcanic tuff; 5—Regional fault;
6—Reverse fault and its number; 7—Thrust fault and its number; 8—Strike-slip fault; 9—Basin boundaries; 10—River

矿体的产出范围和规模,并在铀后期富集过程中起着重要的作用。含矿建造为中下侏罗统水西沟群($J_{1-2}Sh$),为一套灰色含煤碎屑岩沉积建造,又可进一步分为八道湾组(J_{1b})、三工河组(J_{1s})和西山窑组(J_{2x}),其中铀矿化分别赋存于三工河组(J_{1s})与西山窑组(J_{2x})砂体中(图2)。含矿层砂体主要岩性为粗砂岩、含砾粗砂岩和砂砾岩,呈(浅)黄色、褐色、(浅)红色、绿色、灰(白)色,成分主要有石英、岩屑、少量长石,常见白云母、少量的重矿物、炭屑。含矿层砂体蚀变较强,主要包括黏土化、碳酸盐化、硅化及金属矿化,其中黏土化蚀变以高岭石化为主(刘红旭等,2017;丁波等,2016;2017;2018)。

2 样品与分析方法

本文所有样品均采于伊犁盆地南缘蒙古尔铀矿床层间氧化带不同地球化学分带(氧化带、氧化-还原过渡带、还原带)钻孔岩芯砂岩,具体样品位置、

岩性等特征见图2。首先将样品制成光薄片,在对光薄片仔细观察的基础上,选择适合的样品进行扫描电镜、电子探针、S同位素与C-O同位素等分析测试。

扫描电子显微镜分析在中国石油勘探开发研究院石油地质实验研究中心完成,所用仪器型号为TES-CAN-VEGA/LMU,检测方法执行SY/T 5162-1997行业标准,分析条件为:电温度22℃,湿度35%。

电子探针测试在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成,所用仪器型号为日本电子JXA-8100,检测方法执行GB/T 15074-2008行业标准,分析条件为:加速电压为20 kV,电流为10 nA,束斑直径2 μm。

稳定同位素测试由核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。S同位素测试方法是先将样品进行粉碎筛选,选取80~100目粒级,然后用水进行浮选,初步提取出其中的黄铁矿,再用重液进一步提纯;在双目镜下去除其中存留的杂质,将黄铁矿放入玛瑙钵中磨成200目以下的粉末,称取0.1 mg的黄铁矿粉末

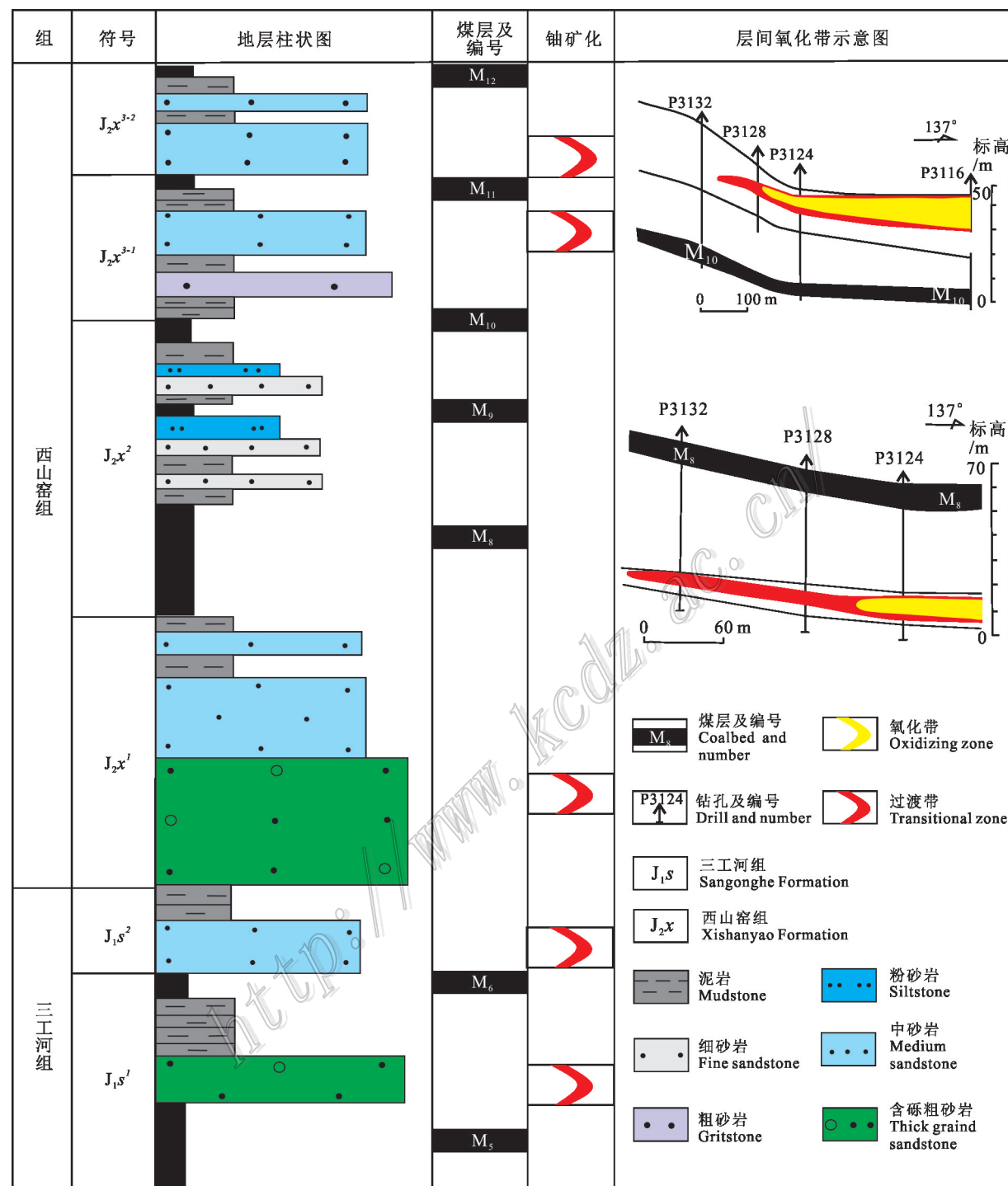


图2 蒙其古尔铀矿床含矿层柱状图(据丁波等,2016)
Fig. 2 The ore-bearing histogram of Mengqiguer uranium deposit(after Ding et al., 2016)

并用锡箔纸包好,通过自动进样系统将该样品送入元素分析-质谱仪联机(EA-MS)系统中。样品在高温下与CuO反应形成SO₂,通过气相色谱仪分离提纯SO₂,然后经由氦气流带至MAT253质谱仪上测试,测试结

果以V-CDT为标准,记为 $\delta^{34}S_{V-CDT}$ (精度优于0.2‰),测试结果见表1。黄铁矿样品的标准为GB04414($\delta^{34}S_{V-CDT} = -0.07 \pm 0.13\text{‰}$)与GB04415($\delta^{34}S_{V-CDT} = 22.15 \pm 0.14\text{‰}$)。

C-O 同位素测试方法是在除去样品中炭屑及有机质的基础上,用 100% 的磷酸在 25℃ 下反应 4 h,提取出胶结物碳酸盐中的 CO₂ 气体,将收集的 CO₂ 充入 MAT-253 型质谱仪上进行测试,测试结果以 V-PDB 为标准,记为 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ (精度优于 0.1‰)与 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$ (精度优于 0.2‰),测试结果见表 2。碳酸盐样品的标准为 GBW04416 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}=1.61\pm 0.03$; $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}=-11.59\pm 0.11$) 和 GBW04417 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}=-6.06\pm 0.06$; $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}=-24.12\pm 0.19$)。

3 分析结果

3.1 黄铁矿与铀矿物的矿物学特征

蒙古尔铀矿床含矿层砂岩与煤中发育大量黄铁矿集合体,主要呈浸染状、块状、结核状与条带状产出(图 3a、b)。显微镜与扫描电镜下经细致观察发现,黄铁矿微观形态主要有自形晶体、草莓状和不规则状集合体 3 种类型:① 自形晶体:自形黄铁矿晶型

表 1 蒙古尔铀矿床含矿层中铀矿物电子探针分析结果
Table 1 Electron microprobe analytical results of uranium mineral in ore-bearing sandstone of Mengqigu'er

uranium deposit				
组分	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4
	<i>w(B)/%</i>			
Na ₂ O	0.233	0.050	0.140	0.004
SiO ₂	0.021	0.860	0.051	0.030
K ₂ O	0.035	0.084	0.021	0.002
UO ₂	1.914	82.596	11.180	0.160
As ₂ O ₅	0.003	-	0.033	-
MgO	0.050	0.065	0.289	0.006
CaO	0.600	5.605	4.731	0.011
P ₂ O ₅	-	1.036	0.025	0.071
Al ₂ O ₃	0.016	-	0.033	0.010
FeO	0.404	0.052	-	0.017
SO ₃	4.547	0.176	18.122	0.004
Y ₂ O ₃	0.006	-	-	0.013
PbO	0.028	0.032	-	0.006
TiO ₂	0.022	1.292	0.088	0.001
Cr ₂ O ₃	0.023	0.131	0.087	0.009
ThO ₂	-	-	-	0.044
MnO	-	0.327	0.081	-
总和	7.902	92.306	34.881	0.388
含铀有机质	沥青铀矿	富铀有机质	含铀有机质	

注:“-”代表未检测到。

主要呈立方体、四面体状、八面体状与五角十二面体。其中立方体状黄铁矿粒径范围在 2~200 μm 之间,呈分散状产于粒间孔隙中,可见立方体黄铁矿围绕富铀有机质产出(图 3c);五角十二面体、八面体状与四面体黄铁矿多成群分布于粒间孔隙中,粒径约 0.5 μm,颗粒大小相近,晶型发育较完整(图 3d、e、g);② 草莓状集合体:草莓状或似草莓状(莓球状)黄铁矿粒径约 5~20 μm,莓球表面由紧密簇集的八面体黄铁矿微晶构成的,微晶多呈无规律的紧密排列,也可以呈平行带状排列,在同一球内大小近似相等,不同球内的八面体自形程度及大小均不相同,有的八面体上还生长了次一级的小八面体(图 3d~g),可见少量沥青铀矿以球状细小颗粒形式产于草莓状黄铁矿表面(图 3i);③ 不规则形态集合体:多呈胶状

表 2 蒙古尔铀矿床含矿层砂岩中黄铁矿 S 同位素测试结果
Table 2 The S isotopes of pyrite in ore-bearing sandstone of Mengqigu'er uranium deposit

蚀变分带	样品编号	岩性	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}/\%$	数据来源
弱氧化带	P4943-1	灰白色含砾粗砂	-28.0	
	P111-4	砾岩,见褐铁矿化	-10.3	本文
	平均值		-19.2	
	P5515-9	灰白色砾岩	-17.3	本文
氧化-还原 过渡带	P1312-1	灰白色中砂岩	-3.9	本文
	P5511-3	灰白色中砂岩	-7.5	本文
	P5516-8	灰白色含砾粗砂岩	-1.4	本文
	P1116-1		-57.2	
	P1116-2		-57.6	
	P1116-3		-58.5	
	P1116-4		-58.8	
	P1116-5		-56.8	
	P1116-6		-57.3	刘俊平等
	P1116-7		-56.5	(2015)
	P1116-8		-56.7	
	P2703-1		-68.1	
	P2703-2		-62.0	
	P2703-3		-60.8	
	P2703-4		-68.4	
	平均值		-46.8	
原生带	P111-5	灰黑色中细砂岩	-6.6	
	P1324-10	灰色中细砂岩	1.2	
	P1324-11	灰色粗砂岩	-9.2	
	P5516-3	灰色中砂岩	-9.2	本文
	P4736	灰色细砂岩	-3.5	
	P5132-3	灰色细砂岩	-2.6	
	P4911-3	灰色细砂岩	22.1	
	平均值		-1.1	

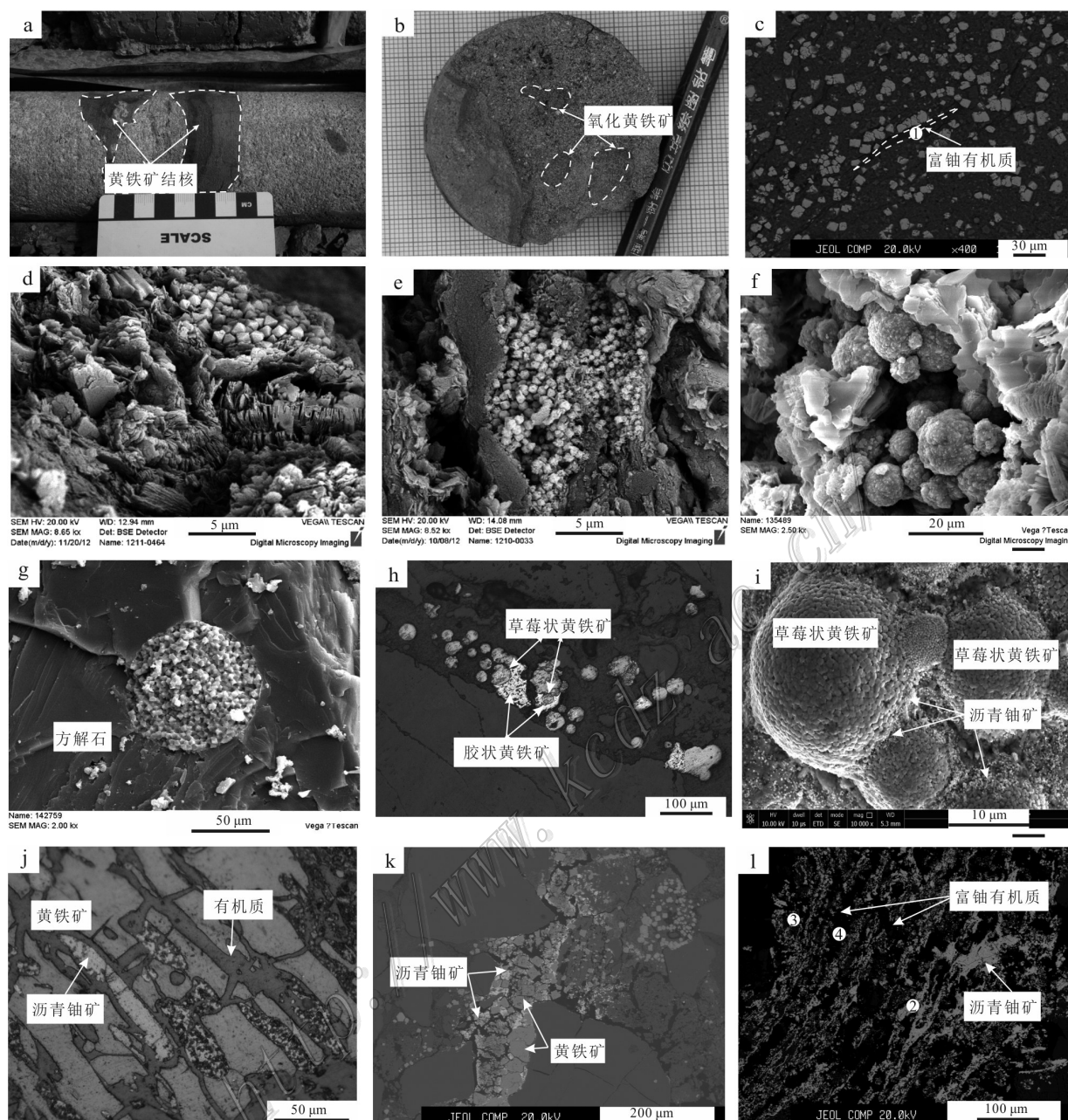


图3 蒙其古尔铀矿床含矿层砂岩中黄铁矿与铀矿物的矿物学特征

a. 灰白色砂岩中黄铁矿结核; b. 灰色砂岩, 浸染状黄铁矿褐铁矿化; c. 电子探针, 含铀有机质条带及周围发育的立方体黄铁矿, 标点为电子探针分析位置及编号, 余同; d. 扫描电镜, 孔隙间四面体、八面体黄铁矿; e. 扫描电镜, 孔隙间八面体、五角十二面体黄铁矿; f. 扫描电镜, 草莓状黄铁矿与周围片状高岭石; g. 电子探针, 草莓状黄铁矿发育于方解石中; h. 反射光, 草莓状黄铁矿与外部胶状黄铁矿; i. 反射光, 扫描电镜, 草莓状黄铁矿及其表面发育的细小球状沥青铀矿; j. 反射光下, 有机质胞腔内发育的沥青铀矿与胶状黄铁矿; k. 电子探针, 沥青铀矿胶结充填立方体与胶状黄铁矿; l. 电子探针, 富铀有机质纤维中发育的沥青铀矿

Fig. 3 The mineralogical characteristics of pyrite and uranium minerals in ore-bearing sandstone of Mengqigu'er uranium deposit

a. Pyrite nodules in grayish white sandstone; b. Disseminated pyrite ferritization in gray sandstone; c. Uranium-bearing organic bands and surrounding cubic pyrite, the sign stands for the location and number of microprobe analysis, the latter is same; d. Tetrahedral and octahedral pyrite in pores; e. Octahedral and pentagonal dodecahedral pyrite in pores; f. Strawberry pyrite and surrounding slice kaolinite; g. Strawberry pyrite in calcite; h. Strawberry pyrite and surrounding colloidal pyrite; i. Strawberry pyrite and surface surrounding fine globular pitchblende; j. Pitchblende and colloidal pyrite in the organic cells; k. Pitchblende cemented cube and colloidal pyrite;

l. Pitchblende in uranium-bearing organic

或浸染状分布于岩石裂隙中或围绕草莓状黄铁矿外围发育(图3h,j,k),常可见胶状黄铁矿与沥青铀矿、有机质相伴生(表1),如沥青铀矿交代或围绕胶状与立方体黄铁矿产出(图3k)、沥青铀矿与胶状黄铁矿产于有机质胞腔(图3j)与碳化植物纤维内(图3l),说明胶状黄铁矿与铀成矿关系密切。

3.2 同位素分析结果

蒙古尔铀矿床含矿目的层砂岩中黄铁矿S同位素测定结果表明, $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 分布范围为 $-68.4\text{‰}\sim 22.1\text{‰}$,变化较大,平均值为 -31.8‰ ,极差值为 90.5‰ ;其中弱氧化带中黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 在 $-28.0\text{‰}\sim 10.3\text{‰}$,平均值为 -19.2‰ ;氧化-还原过渡带中黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 在 $-68.4\text{‰}\sim -1.4\text{‰}$ 之间,平均值为 -46.8‰ ;还原带中黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 在 $-9.2\text{‰}\sim 22.1\text{‰}$ 之间,平均值为 -1.1‰ (表2)。碳酸盐胶结物C-O同位素测试结果显示,碳酸盐胶结物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 在 $-10.2\text{‰}\sim -7.4\text{‰}$ 之间,平均值为 -9.3‰ ; $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$ 在 $-9.6\text{‰}\sim -5.8\text{‰}$,平均值为 -7.9‰ (表3)。

4 讨论

4.1 黄铁矿成因

黄铁矿的微观形貌及其S同位素记录着不同作用过程(包括生物或非生物过程)的信息,是响应环境变化的结果,故可以通过黄铁矿微观形貌及其S同位素组成研究来探讨黄铁矿成因。前人研究发现黄铁矿(FeS_2)中硫主要来源于细菌硫酸盐还原作用(BSR)、有机物热解(TDS)、热化学硫酸盐还原作用(TSR)、无机还原作用(玄武岩与海水)。考虑到蒙古尔地区含矿目的层经历的最大古温度不超过 100°C (熊利平,2003),且在盆地演化过程中未经历岩浆热作用,可以排除无机还原作用与热化学硫酸盐还原作用(TSR)形成。

细菌硫酸盐还原作用(BSR),在 $\leq 50^\circ\text{C}$ 条件下,厌氧细菌使硫酸盐 SO_4^{2-} 还原成 H_2S ,后者与金属离子结合形成硫化物,这种循环过程造成自然界中最大的S同位素分馏,S同位素分馏一般在 $4\text{‰}\sim 46\text{‰}$ 之间,平均为 21‰ (Canfield et al., 1996; Habicht et al., 1997),最高可达 65‰ (Canfield et al., 1994; Greenwood et al., 2013)。此外,体系开放与封闭的条件差异,可造成不同的 H_2S 的S同位素分馏效果,在对硫酸盐开放的体系中,硫酸盐得到源源不断的补充,即还原速率远小于供给速率,还原作用过程中 SO_4^{2-} 与 H_2S 质量浓度可基本保持不变,此时只要环境条件不发生较大变化,动力同位素分馏可保持在一定范围内,硫酸盐的 $\delta^{34}\text{S}$ 为常数,在这种条件下由硫还原细菌还原生成的 H_2S 的S同位素很轻(富 $\delta^{32}\text{S}$)。例如黑海的海底淤泥中硫酸盐被缓慢还原时,新鲜硫酸盐不断从上覆水层通过扩散补给进来,这种环境下由现代海洋硫酸盐还原形成的硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 为 $-20\text{‰}\sim -40\text{‰}$ 。

有机硫(包括石油或者干酪根中的硫)的热降解(TDS),当温度高于 50°C 时,细菌活动急剧减少,但含硫有机物(如石油)可受热分解,生成 H_2S 。热分解时,含 $\delta^{32}\text{S}$ 的键比含 $\delta^{34}\text{S}$ 的键容易破裂,造成产物的 $\delta^{34}\text{S}$ 比原始物质低, $\delta^{34}\text{S}$ 在 $-17.0\text{‰}\sim 10.0\text{‰}$ 之间。

蒙古尔铀矿床含矿目的层砂岩中黄铁矿S同位素($\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$)分布范围为 $-68.4\text{‰}\sim 22.1\text{‰}$,变化较大,平均值为 -31.8‰ ,极差值为 90.5‰ ,以 $\delta^{34}\text{S}=-17.0\text{‰}$ 为界可为2组,其中 $\delta^{34}\text{S}<-17.0\text{‰}$ 的黄铁矿中 S^{2-} 主要为细菌硫酸盐还原作用(SRB)形成,而 $\delta^{34}\text{S}>-17.0\text{‰}$ 的黄铁矿中 S^{2-} 主要为含S有机物热解(TDS),故认为黄铁矿的形成与细菌硫酸盐还原(BSR)与有机物热解(TDS)作用关系密切(图4)。修晓茜等(2015)研究认为蒙古尔矿区含煤系地层

表3 蒙古尔铀矿床含矿层砂岩中碳酸盐胶结物C-O同位素测试结果

样品编号	深度/m	岩性	测试对象	$\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}/\text{‰}$
P731-20	296.0	灰白色细砂岩	胶结物	-9.9	-8.5
P731-29	385.0	灰白色砾岩	胶结物	-10.2	-5.8
P4916-2	466.7	灰白色砂砾岩	胶结物	-9.1	-6.9
P4932-1	468.8	灰色含砾粗砂岩	胶结物	-7.4	-9.6
P4932-2	479.2	灰色含砾粗砂岩	胶结物	-9.9	-9.3
P731-28	380.0	灰色粗砂岩	胶结物	-9.6	-7.4
P1915-8	452.5	灰色粗砂岩	胶结物	-9.0	-7.5

有机质Ro在0.4%~0.74%之间,整体处于未成熟-低成熟阶段,正值煤系地层有机质发生脱羧基作用阶段,此阶段产生大量有机物热解(TDS)成因的 H_2S 等气体,为黄铁矿有机物热解(TDS)成因提供证据。此外,蒙其古尔地区含矿目的层经历的最大古温度不超过 $100^{\circ}C$,同时含矿层发育大量的有机质,这种环境适合细菌的大量发育(Stevens et al., 1993; Colwell et al., 1997),为黄铁矿的生物成因提供基础。在硫酸盐还原菌(SRB)将硫酸盐等其他高价态硫化物还原成 H_2S ,并与 Fe^{2+} 形成大量生物成因黄铁矿过程中,也能形成相应生物成因的碳酸盐矿物,如方解石、菱铁矿、白云石等(Machel, 2001),形态呈现莓球状、哑铃状结构(Lian et al., 2006; Wang et al., 2010)。蒙其古尔铀矿床含矿层中碳酸盐胶结物的C-O同位素成因判别(图5)分析表明,存在与细菌硫酸盐还原作用(BSR)有关的碳酸盐胶结物,间接证明黄铁矿为细菌硫酸盐还原作用(BSR)形成。

4.2 黄铁矿形成机制

结合蒙其古尔铀矿床含矿目的层黄铁矿矿物学与S同位素特征研究,阐述该区不同成因黄铁矿的形成机制(图6):

(1) 细菌硫酸盐还原作用(BSR)黄铁矿:主要以

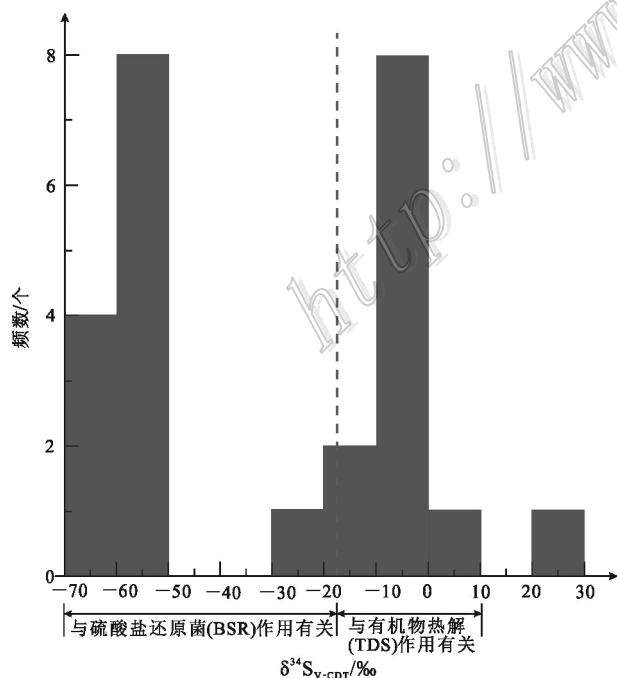


图4 蒙其古尔铀矿床含矿层砂岩中黄铁矿成因判别图

Fig. 4 Genetic discrimination of pyrite in ore-bearing sandstone of Mengqigu'er uranium deposit

草莓状黄铁矿及胶状黄铁矿为主,是在含矿目的层抬升至地表时,来自蚀源区的含铀含氧水从层间渗入砂体中,能带入一定量的活性铁、硫酸盐还原菌、 SO_4^{2-} 与U(VI)。有机质能在厌氧的硫酸盐还原菌的作用下与砂体介质中的 SO_4^{2-} 反应生成的 H_2S ,在活性铁浓度较高的情况下, H_2S 首先与含铀含氧水带入的活性铁及易溶蚀的基性岩屑溶解产生的Fe离子相互作用,形成四方硫铁矿(Fe_9S_8),四方硫铁矿通过结构中铁的散出转变为胶黄铁矿(Fe_3S_4),胶黄铁矿为磁性矿物,在磁性吸引力的作用下,将那些胶黄铁矿颗粒聚合形成草莓状,同时受到后期成岩作用的影响,部分或全部草莓状黄铁矿发生过大生长,形成微晶为五角十二面体、八面体的草莓状黄铁矿与自形黄铁矿(Sweeney et al., 1973; Raiswell, 1982; Morse et al., 1987; 唐跃刚等, 1996; Wilkin et al., 1997; 曹丰龙等, 2015)。而后 H_2S 将U(VI)还原成U(IV)形成铀矿物,造成铀矿物围绕黄铁矿产出的现象,为黄铁矿早于铀矿物发生沉淀的结果。当然在无氧介质中,前期黄铁矿可与水反应产生 H_2S ,造成介质 E_h 值的急剧下降,从而使溶液中的U(VI)

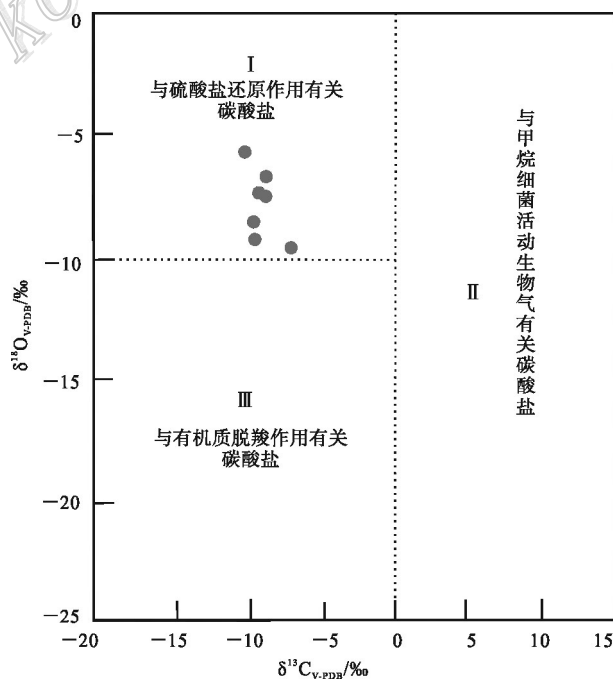


图5 蒙其古尔铀矿床含矿层砂岩中碳酸盐胶结物成因判别(底图据郭宏莉等, 1999)

Fig. 5 Genetic discrimination of carbonate cement in ore-bearing sandstone of Mengqigu'er uranium deposit (base map after Guo et al., 1999)

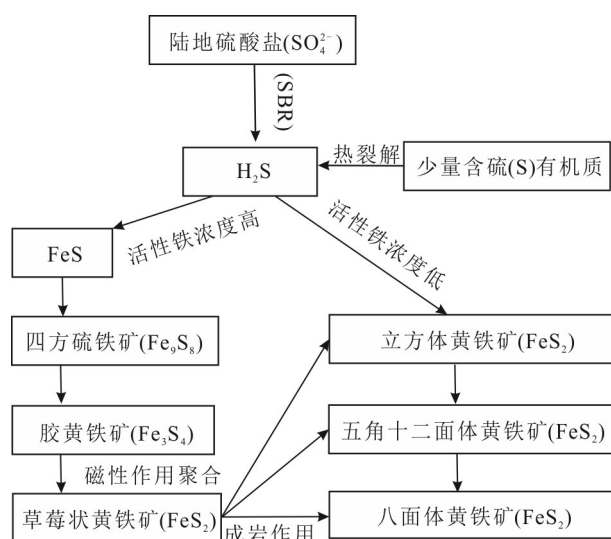


图6 蒙古尔铀矿床含矿层砂岩中黄铁矿形成机制
Fig. 6 The formation mechanism of pyrite in ore-bearing sandstone of Mengqigu'er uranium deposit

被还原沉淀,其还原机制主要通过 H_2S 实现。此外,细菌硫酸盐还原过程能产生的 CO_3^{2-} 、 CO_2 与活性铁相互作用,与硫酸盐还原作用有关的碳酸盐胶结物(球状菱铁矿)。

(2) 有机物热解成因黄铁矿:主要以自形晶体黄铁矿为主,是含矿目的层在埋藏较深时,古温度高于 $50^{\circ}C$ 时,细菌活动减少,细菌的硫酸盐还原作用相对减弱,含硫有机物可受热分解,形成 H_2S 。在活性铁的浓度较低条件下,细菌的硫酸盐还原作用与含硫有机物可受热分解产生的 H_2S 与黑云母蚀变、黏土矿物相互转化产生的少量的 Ca^{2+} 、 Fe^{2+} 反应,直接从溶液中快速结晶形成自形黄铁矿,而不需要从任何铁的硫化物母体中转变而来(Howarth, 1978; Luther et al., 1982; Giblin et al., 1984; 唐跃刚等, 1996; 曹丰龙等, 2015),晶形常见立方体(a)、五角十二面体(e)、八面体(o),并按照立方体→五角十二面体→八面体状的序列演化。

4.3 硫酸盐还原菌(SRB)参与铀成矿过程

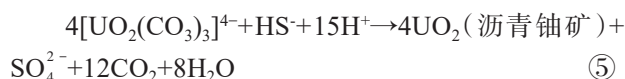
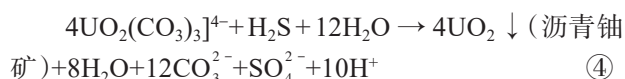
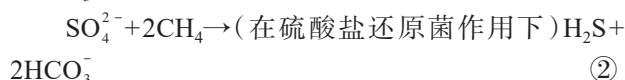
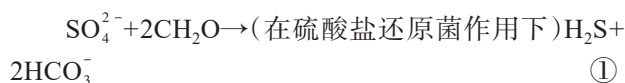
伊犁盆地南缘砂岩型铀矿床为典型的层间氧化带型铀矿,铀矿形成主要受铀源、构造、岩性岩相、地下水动力和地球化学障等成矿条件控制(李胜祥等, 1996; 2006; 陈戴生等, 1997; 古抗衡, 1997; 阿种明, 2000; 李细根, 2002; 陈肇博等, 2002; 夏毓亮等, 2002; 王金平, 2003; 王正其等, 2006; 韩效忠等, 2004; 2008; 刘陶勇, 2004; 刘陶勇等, 2006; 张金带

等, 2005; 王谋等, 2006; 李宝新等, 2008; 王冰等, 2009; 刘红旭, 2015; 2017; 丁波等, 2016; 2017; 2018),这些成矿条件的相互耦合是层间氧化带和铀矿体形成和发育的基础。此外,闵茂中等(2003)在国内首次发现伊犁盆地南缘扎吉斯坦铀矿床中的沥青铀矿、铀石与古真菌、古细菌、蓝藻、芽孢等存在空间和成因上的联系,为该区存在微生物参与铀成矿提供了直接证据。本次研究蒙古尔铀矿床含矿砂岩中黄铁矿 $\delta^{34}S_{V-CDT}$ 在 -68.4‰ ~ -1.4‰ 之间,平均值为 -46.8‰ ,原生砂体中黄铁矿 $\delta^{34}S_{V-CDT}$ 在 -9.2‰ ~ 22.1‰ 之间,平均值为 -1.1‰ ,含矿砂岩黄铁矿 $\delta^{34}S$ 值远远低于原生砂岩中的黄铁矿 $\delta^{34}S$ 值,说明铀成矿与细菌硫酸盐还原作用(BSR)关系密切,间接为硫酸盐还原菌参与铀成矿提供证据。此外,铀矿物多围绕与细菌硫酸盐还原作用(BSR)成因黄铁矿产出同样说明硫酸盐还原菌(SRB)在U(VI)被还原成U(IV)的过程中起到了重要的作用。

前人研究表明,硫酸盐还原菌(SRB)还原U(VI)的方式有2种:①间接还原成矿,如由硫酸盐还原菌(SRB)还原 SO_4^{2-} 产生的 H_2S 将U(VI)被还原成U(IV)形成铀矿物(赵瑞全等, 1998),此过程中U(VI)必须要预富集,即反应前U(VI)要先吸附-浓缩到一定的浓度才能被还原(Rackley, 1972; Reynolds et al., 1982; Goldhaber et al., 1987);②直接还原,即微生物利用新陈代谢作用,直接利用电子转移获得生物能,使U(VI)被还原成U(IV),形成铀矿物(Lovley et al., 1991; 1992; Spear et al., 1999; Sani et al., 2004)。

前人研究表明,成矿溶液的pH值往往是控制U(VI)吸附的最重要因素,在溶液中最大量U(VI)的吸附发生在pH值接近6的环境,随着pH值的增加吸附量大大减小(Goldhaber et al., 1987),这是因为当pH值大于7时,U(VI)和碳酸根强烈形成水化物(Langmuir, 1997),抑制了U(VI)的吸附或沉淀。考虑到含矿砂岩中广泛发育的高岭石化与部分沥青铀矿与自生高岭石共生(刘红旭等, 2017),表明成矿流体可能是偏酸性的,有利于U(VI)吸附过程,造成有机质、黏土矿物与颗粒表面吸附一定量的U(VI),当其达到一定浓度后被BSR产物 H_2S 还原,即BSR间接还原U(VI)(公式①②④),形成以胶状形式产于有机质胞腔内的沥青铀矿,同时该区含矿层中普遍发育的富铀有机质的存在为这一过程提供了证据;当环境介质中含Fe离子时, H_2S 优先与其反应形成黄铁矿(公式①②③)(陈祖伊

等, 2007), 而后黄铁矿及 H_2S 将 U(VI) 被还原成 U(IV) (公式④⑤), 造成胶状沥青铀矿围绕立方体与草莓状黄铁矿生长的微观现象。



5 结 论

(1) 蒙其古尔铀矿床中铀主要以铀矿物与吸附铀形式存在, 其中吸附铀主要为有机质吸附铀, 铀矿物主要以沥青铀矿为主, 多以胶状形成围绕黄铁矿与有机质产出、以胶状产于有机质胞腔与碳化植物纤维内, 少量以球状细小颗粒产于草莓状黄铁矿表面, 多与黄铁矿、炭屑共生。

(2) 蒙其古尔铀矿床含矿目的层砂岩中黄铁矿主要以自形晶体、草莓状和不规则状集合体产出, 多与沥青铀矿、碳酸盐胶结物共生, 其中黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 为 $-68.4\% \sim -22.1\%$ 与碳酸盐胶结物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 为 $-10.2\% \sim -7.4\%$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$ 为 $-9.6\% \sim -5.8\%$ 为黄铁矿的硫酸盐还原作用(BSR)成因与有机物热解成因提供了直接证据, 并阐述了不同成因黄铁矿形成机制, 认为硫酸盐还原作用(BSR)成因黄铁矿与铀成矿关系密切。

(3) 硫酸盐还原菌(SRB)参与蒙其古尔铀矿床铀成矿过程, 以间接还原方式为主, 在有机质、黏土矿物与颗粒表面吸附 U(VI) 的基础上, 通过硫酸还原菌(SRB)还原 SO_4^{2-} 产生的 H_2S 将 U(VI) 被还原成 U(IV) 形成铀矿物。

致 谢 感谢核工业二一六大队在野外样品采集过程中所提供的帮助, 感谢审稿专家提出了宝贵的意见。

References

A Z M. 2000. Analysis on ore-controlling factors of Zhajistan uranium

deposit, Xinjiang[J]. Uranium Geology, 16(3): 136-142(in Chinese with English abstract).

Bonnetti C, Liu X D, Yan Z B, Cuney M, Michels R, Malartre F, Mercadier J and Cai J F. 2017. Coupled uranium mineralisation and bacterial sulphate reduction for the genesis of the Baxingtu sandstone-hosted U deposit, SW Songliao Basin, NE China[J]. Ore Geology Reviews, 82: 108-129.

Bonnetti C, Cuney M, Michels R, Truche L, Malartre F, Liu X and Yang J. 2015. The multiple roles of sulfate-reducing bacteria and Fe-Ti oxides in the genesis of the Bayinwula roll front-type uranium deposit, Erlian Basin, NE China[J]. Econ. Geol., 110: 1059-1081.

Cao F L and Wei H Y. 2015. Two causes for the low abundance of framboidal pyrite in the Permian in Enshi area in Hubei Province[J]. Journal of East China Institute of Technology (Natural Science), 38(2): 158-166(in Chinese with English abstract).

Chen Z Y and Guo Q Y. 2007. Mechanism of U-reduction and concentration by sulphides at sandstone type uranium deposits[J]. Uranium Geology, 23(6): 321-328(in Chinese with English abstract).

Chen Z B, Li S X, Cai Y Q and Chen D S. 2002. Geologic evolution and uranium metallogenic regularity in Yili basin[J]. Mineral Deposits, 21(S1): 849-852(in Chinese with English abstract).

Colwell F S, Onstott T C, Delwiche M E, Chandler D, Fredrickson J K, Yao Q J, Mckinley J P, Boone D R, Griffiths R, Phelps T J, Ringelberg D, White D C, LaFreniere L, Balkwill D, Lehman R M, Konisky J and Long P E. 1997. Microorganisms from deep, high temperature sandstones: Constraints on microbial colonization[J]. FEMS Microbiology Reviews, 20(3-4): 425-435.

Cheng D S, Wang R Y and Li S X. 1997. Metallogenic model of the sandstone-type uranium deposits in interlayer oxidation zone of Yili basin[J]. Uranium Geology, 13(3): 327-335(in Chinese with English abstract).

Canfield D E and Thamdrup B. 1994. The production of ^{34}S -depleted sulfide during bacterial disproportion action of elemental sulfur[J]. Science, 266(5193): 1973-1975.

Canfield D E and Teske A. 1996. Late Proterozoic rise in atmospheric oxygen concentration inferred from phylogenetic and sulphur-isotope studies[J]. Nature, 382: 127-132.

Ding B, Liu H X, Li P, Zhang H J, Zhang B and Pan C Y. 2018. The feature of diagenetic alteration of ore-bearing sandstone in Mengqiguer uranium deposits, Yili Basin, and the effect of diagenetic and mineralization of its organic-Inorganic fluid[J]. Geological Review, 6(4): 150-165(in Chinese with English abstract).

Ding B, Liu H X, Li P, Wang M M, Jiang H, Zhang X and Pan C Y. 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 B, Liu H X, Xiu X Q, Liu T, Pan C Y, Zhang X and Li P. 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).

- Greenwood P F, Brooks J J, Grice K, Schwark L, Jaraula C M B, Dick J M and Evans K A. 2013. Organic geochemistry and mineralogy. I: Characterisation of organic matter associated with metal deposits[J]. *Ore Geology Reviews*, 50: 1-27.
- Guo H L and Wang D R. 1999. Stable isotopic composition and origin analysis of the carbonate cements within sandstone reservoirs of Tarim oil-gas bearing area[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 26(3): 31-35(in Chinese with English abstract).
- Gu K H. 1997. Discussion on uranium metallogenic feature and its forming geological conditions in Yili, Xinjiang[J]. *Journal of East China Geological Institute*, 20(1): 18-23(in Chinese with English abstract).
- Goldhaber M B, Hemingway B S, Mohagheghi A, Reynolds R L and Northrop H R. 1987. Origin of coffinite in sedimentary rocks by a sequential adsorption-reduction mechanism[J]. *Bulletin De Mineralogie*, 110(2-3): 131-144.
- Giblin A E and Howarth R W. 1984. Porewater evidence for a dynamic sedimentary iron cycle in salt marshes[J]. *Limnology and Oceanography*, 29(1): 47-63.
- Han X Z, Li S X and Cai Y Q. 2008. Uplift-denudation in the south margin and its sedimentary response in the southern Yili basin: Analysis apatite fission track method[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2447-2455(in Chinese with English abstract).
- Han X Z, Li S X and Cai Y Q. 2004. Neotectonic activity characteristics of Yili basin and its relation to the formation of sandstone-type uranium deposits[J]. *Xinjiang Geology*, 22(4): 378-381(in Chinese with English abstract).
- Habicht K H and Canfield D E. 1997. Sulfur isotope fractionation during bacterial sulfate reduction in organic rich sediment s[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(24): 5351-5361.
- Howarth R W. 1978. A rapid and precise method for determining sulfate in seawater, estuarine waters and sediment pore waters[J]. *Limnology and Oceanography*, 23(5): 1066-1069.
- Liu H X, Ding B, Liu Z Y, Zhang Xiao and Pan C Y. 2017. Genesis of strong kaolinization in ore-bearing sandstone from Mengqiguer uranium deposit, Yili Basin, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 37(1/2): 40-48.
- Liu H X, Zhang X, Ding B and Pan C Y. 2015. Metallogenic model and prospecting target of sandstone type uranium deposits in the southern Yili basin[J]. *Uranium Geology*, 31(Suppl.): 198-205(in Chinese with English abstract).
- Liu J P, Qiu Y B, Zhou J, Wen Z J, Fayek M and Zhang H J. 2015. Discussion on biogenic mineralization of sandstone-type uranium ore in Mengqiguer uranium mineral deposit[J]. *Science Technology and Engineering*, 15(26): 115-119(in Chinese with English abstract).
- Liu Z Y, Dong W M and Liu H X. 2010. Research development of the experiment on uranium microbial metallogenesis[J]. *World Nuclear Geoscience*, 27(2): 78-84(in Chinese with English abstract).
- Li B X, Xu J G, Wang B and Liu T Y. 2008. The structure characteristics of Cenozoic Era to control sandstone uranium action in south Yili basin, Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology*, 26(3): 297-300(in Chinese with English abstract).
- Li S X, Ou G X and Han X Z. 2006. Study on the relationship between oil-gas and ore-formation of the in-situ leachable sandstone-type uranium deposit in Yili basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 112-118(in Chinese with English abstract).
- Lian B, Hu Q N, Chen J, Ji J F and Teng H H. 2006. Carbonate biomineralization induced by soil bacterium *Bacillus megaterium*[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(22): 5522-5535.
- Liu T Y. 2004. The origin of interlayer oxidization zone sandstone-type uranium deposit—An example from the southern margin of the Yili basin[J]. *Xinjiang Geology*, 22(4): 382-385(in Chinese with English abstract).
- Liu T Y and Mao Y M. 2006. Study on the evolution of sedimentation system and uranium-containing attribute of Shuixigou group in South Yili basin in Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology*, 24(1): 64-66(in Chinese with English abstract).
- Li X G. 2002. Characteristics of sandstone-type uranium mineralization and ore-controlling factors in Wukurqi ore district at southern margin of Yili basin, Xinjiang[J]. *Uranium Geology*, 18(1): 28-35(in Chinese with English abstract).
- Li S X, Chen D S, Wang R Y and Zhang K F. 1996. Characteristics of sedimentary facies of coal-bearing series in Yili Basin and their relation to sandstone uranium deposit of interlayer oxidation zone type[J]. *Uranium Geology*, 12(3): 129-134(in Chinese with English abstract).
- Lovely D R, Philips E J P, Gorby Y A and Landa E R. 1991. Microbial reduction of uranium[J]. *Nature*, 350: 413-416.
- Lovely D R and Philips E J P. 1992. Reduction of uranium by desulfotomobium desulfuricans[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 58: 850-856.
- Lovley D R. 1993. Enzymatic iron and uranium reduction by sulfate-reduction bacteria[J]. *Marine Geology*, 113(1-2): 41-53.
- Luther G W, Giblin A and Howarth R W. 1982. Pyrite and oxidized iron mineral phases formed from pyrite oxidation in salt marsh and estuarine sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 46(12): 2665-2669.
- Langmuir D. 1978. Uranium solution-mineral equilibria at low temperatures with applications to sedimentary ore deposits[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 42: 547-569.
- Min M Z, Xu H F, Barton L L, Wang J P, Peng X J and Wiatrowski H. 2015. Biomineralization of uranium: A simulated experiment and its significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(1): 134-138.
- Min M Z, Peng X J and Wang J P. 2003. Progress in study on microbe-metallogenesis of uranium[J]. *Uranium Geology*, 19(5): 257-263(in Chinese with English abstract).
- Machel H G. 2001. Bacterial and thermochemical sulfate reduction in diagenetic settings: Old and new insights[J]. *Sedimentary Geology*, 140(1-2): 143-175.
- Morse J W, Millero F J and Cornwell J C. 1987. The chemistry of the hydrogen sulfide and iron sulfides systems in natural water[J].

- Earth Science Reviews, 24(1): 1-42.
- Qiao H M, Zhang F X, Geng H B, Huang J X and Shang G F. 2006. The microbial geochemical characteristic of interlayer oxidized zone type sandstone uranium deposit and analyse on relation to metallogenesis of uranium—A case study of the Shihongtan uranium deposit in Turpan-Hami basin[J]. Geological Review, 52(3): 636-641(in Chinese with English abstract).
- Raiswell R. 1982. Pyrite texture, isotopic composition and the availability of iron[J]. American Journal of Science, 28(8): 1244-1263.
- Reynolds R L and Goldhaber M B. 1982. Biogenic and nonbiogenic-core-forming processes in the south Texas U district: Evidence from the Panna Maria deposit[J]. Econ. Geol., 77: 541-556.
- Rackley R I. 1972. Environment of Wyoming tertiary uranium deposits[J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 56: 755-774.
- Sani R K, Peyton B M, Amonette J E and Geesey G G. 2004. Reduction of uranium U(VI) under sulfate-reducing conditions in the presence of Fe(III)-(hydr)oxides[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 68(12): 2639-1648.
- Spear J R, Figueroa L A and Honeyman B D. 1999. Modeling the removal of uranium U(VI) from aqueous solutions in the presence of sulfate reducing bacteria[J]. Environment Science Technology, 33(15): 2667-2675.
- Stevens T O, McKinley J P and Fredrickson J K. 1993. Bacteria associated with deep, alkaline, anaerobic groundwaters in southeast Washington[J]. Microbial Ecology, 25(1): 35-50.
- Sweeney R E and Kaplan I R. 1973. Pyrite framboid formation: Laboratory synthesis and marine sediments[J]. Econ. Geol., 68(5): 618-634.
- Tang Y G and Ren D Y. 1996. The genesis of pyrites in coal[J]. Geological Reviews, 42(1): 64-70(in Chinese with English abstract).
- Wang H M, Zeng C P, Liu Q Y, Liu D, Qiu X and Gong L F. 2010. Calcium carbonate precipitation induced by a bacterium strain isolated from an oligotrophic cave in Central China[J]. Frontiers of Earth Science in China, 4(2): 148-151.
- Wang B, Kang Y and Zhang D X. 2009. Hydrogeochemical characteristics and the relationship with uranium mineralization in Mongolian area[J]. Uranium Geology, 27(4): 364-367(in Chinese with English abstract).
- Wang M and Li S F. 2006. Influences of structures on the interlayer oxidation zone sandstone-type uranium deposits on the southern margin of Yili basin[J]. World Nuclear Geoscience, 23(4): 199-203(in Chinese with English abstract).
- Wang Z Q, Li Z Y, Guan T Y and Zhang G Y. 2006. Geological characteristics and metallogenic mechanism of No. 511 sandstone-type uranium ore deposit in Yili Basin, Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 25(3): 302-311(in Chinese with English abstract).
- Wang J P, Min M Z and Chen H B. 2003. Petrological and geochemical characteristics of Shuixigou Group in Yili basin[J]. Uranium Geology, 19(1): 8-15(in Chinese with English abstract).
- Wilkin R T and Barnes H L. 1997. Pyrite formation in an anoxic estuarine basin[J]. American Journal of Science, 297(6): 620-650.
- Xiu X Q, Suo S X and Liu H X. 2015. 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).
- Xiong L P. 2003. The system analysis about oil and gas basin of Yili (PhD thesis) [D]. Tutor: Xiong L Q. Xi'an: Northwest University. 1-171(in Chinese with English abstract).
- Yin J S, Xiang W D and Ou G X. 2005. Sandstone type uranium mineralization with respect to organic matter, microbe, oil and gas[J]. Uranium Geology, 21(5): 287-295(in Chinese with English abstract).
- Zhang J D, Xu G Z, Chen A P and Wang C. 2005. Preliminary discussion on uranium metallogenic models of China's in-situ leachable sandstone-type uranium deposits[J]. Uranium Geology, 21(3): 139-245(in Chinese with English abstract).
- Zhang G W, Li S Z and Liu J X. 1999. Structural feature and evolution of Yili basin, Xinjiang[J]. Earth Science Frontiers, 6(4): 203-214(in Chinese with English abstract).
- Zhao R Q, Qin M K and Wang Z B. 1998. Effect of microorganism and organic matters on sandstone type uranium mineralizations in interlayer oxidation zone in deposit No. 512[J]. Uranium Geology, 14(6): 338-343(in Chinese with English abstract).
- Zhao F M and Shen C Q. 1986. Experimental researches on paragenetic condition for pyrite and pitchblende and its role in pitchblende formation process[J]. Uranium Geology, 2(4): 193-200(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 阿种明. 2000. 新疆扎吉斯坦铀矿床控矿因素分析[J]. 铀矿地质, 16(3): 136-142.
- 曹丰龙, 韦恒叶. 2015. 湖北省恩施地区二叠系低丰度草莓状黄铁矿的两种成因[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 38(2): 158-166.
- 陈祖伊, 郭庆银. 2007. 砂岩型铀矿床硫化物还原富集铀的机制[J]. 铀矿地质, 23(6): 321-328.
- 陈肇博, 李胜祥, 蔡煜琦, 陈戴生. 2002. 伊犁盆地地质演化与铀成矿规律[J]. 矿床地质, 21(S1): 849-852.
- 陈戴生, 王瑞英, 李胜祥. 1997. 伊犁盆地层间氧化带砂岩型铀成矿模式[J]. 铀矿地质, 13(6): 327-335.
- 丁波, 刘红旭, 李平, 张虎军, 张宾, 潘澄雨. 2018. 张晓伊犁盆地蒙古古尔铀矿床含矿砂岩成岩蚀变特征及其有机-无机流体成岩成矿效应[J]. 地质论评, 6(4): 150-165.
- 丁波, 刘红旭, 李平, 王毛毛, 蒋宏, 张晓, 潘澄雨. 2017. 修晓茜伊犁盆地南缘有机-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.
- 郭宏莉, 王大锐. 1999. 塔里木油气区砂岩储集层碳酸盐胶结物的同

- 位素组成与成因分[J]. 石油勘探与开发, 26(3):31-35.
- 古抗衡. 1997. 新疆伊犁盆地铀成矿特征及其形成地质条件[J]. 华东地质学院学报, 20(1):18-23.
- 韩效忠, 李胜祥, 蔡煜琦. 2008. 伊犁盆地南缘隆升剥蚀及其盆地南部的沉积响应—利用磷灰石裂变径迹分析[J]. 岩石学报, 24(10):2447-2255.
- 韩效忠, 李胜祥, 蔡煜琦. 2004. 伊犁盆地新构造运动特征及其与铀成矿关系[J]. 新疆地质, 22(4):378-381.
- 刘红旭, 丁波, 刘章月, 张晓, 潘澄雨. 2017. 伊犁盆地蒙古尔铀矿床含矿目的层强高岭石化成因[J]. 矿物学报, 37(1/2):40-48.
- 刘红旭, 张晓, 丁波, 潘澄雨. 2015. 伊犁盆地南缘砂岩型铀矿成矿模式与找矿方向[J]. 铀矿地质, 31(增刊):198-205.
- 刘俊平, 邱余波, 周剑, 文战久, Fayek M, 张虎军. 2015. 蒙古尔铀矿床砂岩型铀矿生物成矿作用探讨[J]. 科学技术与工程, 15(26):115-119.
- 刘正义, 董文明, 刘红旭. 2010. 铀的微生物成矿作用实验研究进展[J]. 世界核地质科学, 27(2):78-84.
- 李宝新, 徐建国, 王冰, 刘陶勇. 2008. 新疆伊犁盆地南缘新生代构造特征及其对砂岩型铀矿的控制作用[J]. 新疆地质, 26(3):297-300.
- 李胜祥, 欧光习, 韩效忠. 2006. 伊犁盆地油气与地浸砂岩型铀矿成矿关系研究[J]. 地质学报, 80(1):112-118.
- 李胜祥, 陈戴生, 王瑞英, 张克芳. 1996. 伊犁盆地含煤系地层沉积相特征及其与层间氧化带砂岩型铀矿成矿关系[J]. 铀矿地质, 12(3):129-134.
- 刘陶勇. 2004. 层间氧化带砂岩型铀矿床形成机理——以伊犁盆地南缘为例[J]. 新疆地质, 22(4):382-385.
- 刘陶勇, 毛永明. 2006. 新疆伊犁盆地南缘水西沟群沉积体系演化与赋铀性研究[J]. 新疆地质, 24(1):64-66.
- 李细根. 2002. 伊犁盆地南缘乌库尔其矿区砂岩型铀矿化特征及控矿因素[J]. 铀矿地质, 18(1):28-35.
- 闵茂中, 彭新建, 王金平. 2003. 铀的微生物成矿作用研究进展[J]. 铀矿地质, 19(5):257-263.
- 乔海明, 张复新, 耿海波, 黄建新, 尚高峰. 2006. 层间氧化带砂岩型铀矿床微生物地球化学特征及与铀成矿的关系研究——以吐鲁番—哈密盆地十红滩铀矿床为例[J]. 地质论评, 52(3):636-641.
- 唐跃刚, 任德贻. 1996. 煤中黄铁矿的成因研究[J]. 地质论评, 42(1):64-70.
- 王冰, 康勇, 张大绪. 2009. 蒙古尔地区水文地球化学特征与铀成矿关系[J]. 新疆地质, 27(4):364-367.
- 王谋, 李盛富. 2006. 构造作用对伊犁盆地南缘层间氧化带砂岩型铀矿床影响的探讨[J]. 世界核地质科学, 23(4):199-203.
- 王正其, 李子颖, 管太阳, 张国玉. 2006. 新疆伊犁盆地511砂岩型铀矿床成矿作用机理研究[J]. 矿床地质, 25(3):302-311.
- 王金平, 闵茂中, 陈宏斌. 2003. 伊犁盆地水系沟群岩石学和地球化学特征[J]. 铀矿地质, 19(1):8-15.
- 修晓茜, 所世鑫, 刘红旭. 2015. 蒙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.
- 熊利平. 2003. 伊犁含油气盆地综合分析(博士学位论文)[D]. 导师:柳益群. 西安:西北大学, 1-171.
- 尹金双, 向伟东, 欧光习. 2005. 微生物、有机质、油气与砂岩型铀矿[J]. 铀矿地质, 21(5):288-944.
- 张金带, 徐高中, 陈安平, 王成. 2005. 我国可地浸砂岩型铀矿成矿模式初步探讨[J]. 铀矿地质, 21(3):139-145.
- 张国伟, 李三忠, 刘俊霞. 1999. 新疆伊犁盆地的构造特征与形成演化[J]. 地学前缘, 6(4):203-214.
- 赵瑞全, 秦明宽, 王正邦. 1998. 微生物和有机质在512层间氧化带砂岩型铀矿成矿中的作用[J]. 铀矿地质, 14(6):338-343.
- 赵凤民, 沈才卿. 1986. 黄铁矿与沥青铀矿的共生条件及在沥青铀矿形成过程中所起作用的实验研究[J]. 铀矿地质, 2(4):193-200.