

文章编号: 1000-0550(2006) 03-0394-05

# 十红滩铀矿床中微生物及其成矿作用实验研究<sup>1</sup>

黄建新<sup>1</sup> 耿海波<sup>1</sup> 乔海明<sup>2,3</sup> 张复新<sup>2</sup>

(1. 西北大学生命科学学院 西安 710069 2. 西北大学地质学系 西安 710069

3. 核工业二零三研究所 陕西咸阳 712000)

**摘要** 利用生物学方法对新疆十红滩铀矿床各亚带中的微生物进行了分离和鉴定, 利用矿床中赋存的硫酸盐还原菌对矿床地下水中的铀进行了还原实验, 并设计了水-岩-菌三相实验系统对铀矿床中的微生物成矿作用进行了模拟实验。结果表明: 十红滩铀矿不同亚带岩石中主要微生物类群的分布特征不同, 呈现出明显的生物地球化学分带性。其中优势菌硫酸盐还原菌能够通过代谢作用将矿床地下水中的铀还原沉淀。硫酸盐还原菌也可利用岩石中的有机碳作为营养物质进行生长繁殖, 并将铀还原沉淀。

**关键词** 十红滩铀矿床 微生物 分离鉴定 硫酸盐还原菌 生物成矿

**第一作者简介** 黄建新 1956 年出生 女 副教授 应用微生物学

**中图分类号** P611 Q939.99 **文献标识码** A

微生物是地球表层最活跃、最强大的地质营力之一, 它不仅对大气圈、水圈和岩石圈产生强大的影响, 而且也对地球上矿产资源的形成起着显著的作用。微生物的活动及其代谢作用, 一方面可以通过改变成矿的物理和化学环境, 直接参与元素的氧化还原过程, 促进金属元素的迁移和富集; 另一方面, 微生物机体及其生命活动可吸附和吸收成矿元素并矿化而在有利成矿部位直接沉淀和聚集成矿, 而这些过程往往又与水-岩-微生物之间的各种变化密切相关<sup>[1]</sup>。

砂岩型铀矿是我国具有工业意义的铀矿床类型之一, 是核工业目前主要勘查类型, 其成矿作用的研究也越来越被人们所重视<sup>[2]</sup>。但国内有关铀矿中微生物成矿作用的研究还较少, 赵瑞全等<sup>[3]</sup>对伊犁盆地南缘西段的 512 砂岩型铀矿床中微生物和有机质在成矿中的作用进行了初步探讨; 闵茂中等<sup>[4,5]</sup>在研究新疆 511 铀矿床时发现, 矿石中存在已铀矿化的微生物化石, 可视为微生物参与砂岩型铀矿成矿的初步证据, 并模拟新疆某层间氧化带砂岩型铀矿床主要物理化学条件, 采用厌氧菌 *Shewanella putrefaciens* 还原 U(VI), 在菌胞外壁生成了沥青铀矿沉淀, 并推测该菌是通过代谢性还原、富集铀的。其它有关微生物参与铀矿床成矿的实验研究还未见报导。本文对十红滩铀矿床不同亚带岩石中的微生物类群进行了全面的研究, 并在国内首次利用从铀矿床中分离的硫酸盐还原菌对铀矿床地下水中的铀的还原作用, 以及硫酸

盐还原菌利用岩石中的有机物作为营养物质还原沉淀铀的作用进行了实验研究。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品来源与处理

为研究铀矿床中主要微生物类群特征, 在十红滩铀矿的氧化带、氧化-还原过渡带和矿石带(还原带)采集了一套具有代表性的样品, 它们均为新鲜的钻孔岩芯样。样品袋在采集前经过了严格的灭菌处理, 采样过程中尽量避免了样品的污染, 将新鲜的钻孔岩芯样装入袋内, 再用经高温灭菌后的纸袋包裹, 备用。样品特征及其中的铀和有机碳含量如表 1 所示。

上述样品取回后置超净工作台内, 在紫外灯下照射 15 分钟后, 无菌操作去除样品四周表层约 1.0 cm。取内部岩芯部分在无菌研钵内磨成细粉, 每个岩样分别取 10 g 按照各种细菌的富集和分离方法进行培养。

### 1.2 各类细菌培养基成分

(1) Starkey 培养基 (SIK 培养基), 用于分离硫酸盐还原菌。

$K_2HPO_4$ , 0.5 g  $NH_4Cl$ , 1.0 g  $Na_2SO_4$ , 1.0 g  $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ , 0.1 g  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ , 2.0 g 70% 的乳酸钠溶液, 5.0 ml 蒸馏水, 1000 ml pH = 7.0~7.5 另配 1% 硫酸亚铁铵 ( $FeSO_4 \cdot (NH_4)_2SO_4 \cdot 6H_2O$ )

<sup>1</sup> 973 项目 2003CB214603 资助。

收稿日期: 2005-07-07 收修改稿日期: 2005-09-15

的溶液,临用前,每 100 mL 的培养基内加 5 mL

(2) Winogradsky 培养基,用于分离铁细菌。

$\text{NH}_4\text{NO}_3$ , 0.5 g  $\text{NaNO}_3$ , 0.5 g  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ , 0.5 g  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , 0.5 g  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , 0.2 g 柠檬酸铁铵, 10.0 g 蒸馏水, 1 000 mL

表 1 样品特征一览表

Table 1 The characteristics of the samples

样品号	样品位置 (钻孔深度 /m)	岩性	铀品位 / $10^{-6}$	有机碳 /%
1	氧化带 (213m)	褐黄中砂岩	6.0	0.01
2	氧化—还原过渡带 (199m)	灰色夹黄色斑点砂砾岩	11.0	0.03
3	氧化—还原过渡带 (200m)	灰色夹黄色斑点含砾粗砂岩	29.4	0.09
4	矿石带(还原带) (202m)	灰色中砂岩	245.1	0.19
5	矿石带(还原带) (163m)	灰色中砂岩	212.8	0.08
6	矿石带(还原带) (165m)	灰色砂砾岩	91.3	0.12

(3) 硫杆菌类分离培养基:排硫硫杆菌、氧化硫硫杆菌、脱氮硫杆菌、氧化亚铁硫杆菌培养基分别按参考文献 6、7 配制。

(4) 硝化细菌分离培养基:亚硝化细菌,硝化细菌分别按文献 6、7 配制。

### 1.3 各类细菌计数方法

采用最大可能数量计数法(MPN 法)进行计数<sup>[6]</sup>。

### 1.4 各类细菌分离和鉴定方法

细菌分离方法参照文献 6、7 进行;细菌鉴定依据《伯杰细菌鉴定手册》(第八版)进行。

### 1.5 硫酸盐还原菌对地下水中铀的还原作用

实验系统组成:

(1) 硫酸盐还原菌菌种是从研究区氧化—还原过渡带岩石样中分离的混合菌种;

(2) 实验液相为研究区的地下水,其中加入不含硫酸亚铁铵的 SIK 培养基(地下水:SIK 为 4:1),作

为硫酸盐还原菌生长代谢营养所需,调节 pH 至 7.2 高温灭菌处理。

共设计了两组实验,一组是有硫酸盐还原菌的实验系统(地下水+培养基+菌),另一组是无菌的化学作用实验系统(地下水+培养基),以对比生物和纯化学作用的强度和差异。为减小实验的偶然性,分别选用 1<sup>#</sup>和 2<sup>#</sup>两种矿层地下水(成分分析见表 2)进行实验,作用 40 天后进行检测。

### 1.6 水—岩—菌成矿模拟实验

实验系统组成:

(1) 硫酸盐还原菌菌种是从研究区氧化—还原过渡带岩石样中分离的混合菌种;

(2) 实验液相为蒸馏水,其中加入  $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (浓度为:100  $\mu\text{g/L}$ ),高温灭菌处理;

(3) 实验固相成分为研究区的围岩样,并将样品用研钵研成细粉,高温灭菌处理。

共设计了两组实验,一组是有硫酸盐还原菌的水—岩—菌实验系统,另一组是无菌的水—岩化学作用实验系统,以对比生物和纯化学作用的强度和差异。为减小实验的偶然性,选取两种不同的岩石(岩 1 铀品位:  $4.9 \times 10^{-6}$ ,有机碳:0.04%;岩 2 铀品位:  $4.1 \times 10^{-6}$ ,有机碳:0.01%)进行实验,作用 60 天后进行检测。

### 1.7 铀的分析测定方法

铀含量测定依据 GB/T6768-1986 进行。

## 2 结果与讨论

### 2.1 各亚带岩石样品中各类细菌的分布

对各亚带岩石样品中的微生物种类分布和数量进行研究。结果见表 3。

#### 2.1.1 硫酸盐还原菌的分布规律

硫酸盐还原菌为异养细菌,广泛分布于各亚带岩石样中,有机质的存在是其生长和繁殖的前提条件。对岩石中赋存的有机质含量和硫酸盐还原菌数量进行对比分析可以发现,硫酸盐还原菌的数量与岩石中有机物的含量呈正相关的关系,说明岩石中有机碳含量是影响硫酸盐还原菌数量的一个重要因素。

表 2 铀矿地下水成分分析

Table 2 Analysis of groundwaters in uranium deposit

地下水样号	$\text{Ca}^{2+}$ /(mg/L)	$\text{Mg}^{2+}$ /(mg/L)	$\text{K}^+$ /(mg/L)	$\text{Na}^+$ /(mg/L)	$\text{Cl}^-$ /(mg/L)	$\text{SO}_4^{2-}$ /(mg/L)	$\text{HCO}_3^-$ /(mg/L)	pH	U /( $\mu\text{g/L}$ )
1	561	289	18.4	1959	2748	2626	185	8.17	25.67
2	578	294	20.8	2137	2907	2820	185	8.18	29.78

表 3 十红滩铀矿岩石样品中微生物分布和数量 ( cell/g)

Table 3 Distribution and abundance( cell/g) of microorganisms in the Shongtan uranium deposit

分带性	岩石号	硫酸盐 还原菌	铁细菌	脱氮 硫杆菌	氧化亚铁 硫杆菌	排硫 硫杆菌	硝化细菌	亚硝化 细菌	有机 碳含量 /%
氧化带	1	< 10	450	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	0.01
氧化—还	2	25	160	< 10	< 10	未检出	未检出	未检出	0.03
原过渡带	3	35	200	< 10	< 10	未检出	未检出	未检出	0.09
矿石带 (还原带)	4	95	25	未检出	未检出	未检出	未检出	未检出	0.19
(还原带)	5	45	15	未检出	未检出	未检出	未检出	未检出	0.08
(还原带)	6	65	20	未检出	未检出	未检出	未检出	未检出	0.12

2.1.2 铁细菌的分布规律

铁细菌也广泛分布于各带的岩石样中,但从分布规律来看,从氧化带到过渡带再到矿石带,铁细菌数量明显减少,氧化带和氧化—还原过渡带比矿石带要高一个数量级,这是由于氧化带和过渡带比矿石带有较高的氧化电位,含氧量较充裕<sup>[3]</sup>,以及矿层中含有的 Fe(⊕)等因素,为好氧的铁细菌的生长和繁殖创造了良好的条件。

2.1.3 硫杆菌和硝化细菌的分布规律

除硫酸盐还原菌和铁细菌以外,从氧化带还分离出硫杆菌(包括脱氮硫杆菌、排硫硫杆菌和氧化亚铁硫杆菌)和硝化细菌(包括硝化细菌和亚硝化细菌),从氧化—还原过渡带中分离到少量的脱氮硫杆菌和氧化亚铁硫杆菌,而矿石带则未检测出,分离的这些细菌中,除脱氮硫杆菌为兼性厌氧菌外,其它均为好氧菌。从细菌的分布规律来看,从氧化带到矿石带,好氧菌种类逐渐减少;而从矿床中氧气分布规律来分析,从氧化带到矿石带,氧气含量逐渐减少,这说明这些菌的分布和含矿含水层中的氧气含量是一致的,说明氧气含量是好氧菌的主要影响因素,控制着这些菌在矿床中的分布。

从以上结果可以看出,有机碳含量和水中溶氧含量是影响砂岩型铀矿床中微生物类群分布的重要因素。有机质为微生物的生长和繁殖提供了丰富的养分,同时,微生物的发育又加剧了有机质分解,砂岩型

铀矿床所赋存的含水砂岩层位中的这种有机质和微生物的相互关系,促使了微生物的大量繁殖。微生物在其生命过程中的一系列地球化学作用,改变了含水砂岩层的 pH 值和 Eh 值,在铀的迁移和沉淀过程中发挥了重要作用。

2.2 硫酸盐还原菌对地下水中铀的还原作用结果

由表 4 结果可见,在无菌的实验系统中,培养基对 U(V)具有一定程度的还原作用。但在含菌实验系统中,U(V)还原率分别比无菌对照高出 7.82% 和 6.69%,硫酸盐还原菌还原实验系统中的 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>形成 H<sub>2</sub>S 并导致 pH 上升、Eh 下降,形成了有利于 U(V)沉淀富集的还原环境。此实验结果说明铀矿中存在的硫酸盐还原菌对含矿含水层中的 U(V)具有还原沉淀作用。

2.3 水—岩—菌成矿模拟实验结果

从表 5 结果可以看出,含菌实验体系在培养 60 天后,硫酸盐还原菌的数量明显增多,表明硫酸盐还原菌可以在不加入任何外来营养物质的情况下,利用岩石中的有机物进行生长繁殖。由于硫酸盐还原菌的大量代谢和繁殖,导致了实验系统的 pH 上升、Eh 下降,并有 H<sub>2</sub>S 气体产生,形成了有利于铀沉淀的还原环境,而无菌对照实验系统中的这些测试参数无明显变化,证明了这些参数的变化是由菌的作用产生的。

实验中最主要的测试参数:铀浓度在两组实验系统中也有明显的差异。在无菌对照系统中,由于水—

表 4 硫酸盐还原菌对地下水中 U(V)的还原作用

Table 4 Reduction of U(V) in groundwaters by sulfate reducing bacteria

系统组成	U 还原率 /%	菌数 <sub>初</sub>	菌数 <sub>终</sub>	pH <sub>初</sub>	pH <sub>终</sub>	Eh <sub>初</sub>	Eh <sub>终</sub>	H <sub>2</sub> S
		/( cell/ml )	/( cell/ml )					
水(1) + STK + 菌	25.92	520	3500	7.20	8.28	169.5	-70.5	59.31
水(2) + STK + 菌	25.24	520	5500	7.20	8.39	188.3	-76.55	102.41
水(1) + STK	18.10	-	-	7.20	7.30	170.4	172.5	0.94
水(2) + STK	18.55	-	-	7.20	7.25	188.6	189.5	0.71

表 5 硫酸盐还原菌对 U(V) 的还原作用

Table 5 Reduction of U(V) by sulfate reducing bacteria

系统组成	U 还原率 /%	SRB <sub>初</sub> /(cell/ml)	SRB <sub>终</sub> /(cell/ml)	pH <sub>初</sub>	pH <sub>终</sub>	El <sub>初</sub> /mV	El <sub>终</sub> /mV	H <sub>2</sub> S /(mg/L)
水 + 岩 (1) + 菌	47.1	450	3000	7.20	8.14	-3.8	-48.2	6.40
水 + 岩 (2) + 菌	41.0	450	2500	7.20	8.02	-4.2	-43.8	6.20
水 + 岩 (1)	11.0	-	-	7.20	7.25	-3.8	-3.9	0.14
水 + 岩 (2)	5.5	-	-	7.20	7.31	-4.2	-4.5	0.17

岩之间的相互作用, 铀浓度分别降低了 11.0% 和 5.5%, 而含菌实验系统中分别降低了 47.1% 和 41.0%, 说明硫酸盐还原菌的存在对铀的还原沉淀作用有很大的影响。

微生物富集铀的机制可以分为代谢性富集和非代谢性富集<sup>[4]</sup>, 硫酸盐还原菌在铀矿床中的成矿机制属于哪一种, 还是兼而有之, 尚需进一步研究和探讨。

### 3 结论

(1) 十红滩铀矿不同地球化学环境带岩石中主要微生物类群的分布特征不同, 呈现出明显的生物地球化学分带性, 从氧化带到还原带, 好氧菌数量逐渐减少, 厌氧菌数量递增, 各带细菌的分布受容矿层中有机碳含量、铁的存在形式及含量、所赋存地下水的溶解氧和硫酸盐含量等的控制。硫酸盐还原菌和铁细菌是整个矿床中的优势菌群。

(2) 硫酸盐还原菌作为成矿作用的主要菌群, 尤其是在矿石带中大量存在。通过水-菌和水-岩-菌实验, 证实了硫酸盐还原菌一方面氧化消耗围岩中的有机碳, 另一方面可以还原含矿含水层中的硫酸盐, 代谢产生硫化氢气体, 为水中铀还原沉淀析出形成铀矿化提供了强的还原地球化学环境。

### 参考文献 (References)

1 阎葆瑞, 张锡根. 微生物成矿学. 北京: 科学出版社, 2000 1~70  
[Yan Baorui, Zhang Xigen. Microbial Metallogeny. Beijing: Science

Press, 2000. 1~6]

- 陈戴生, 李胜祥, 蔡煜琦. 我国中新生代盆地砂岩型铀矿研究现状及发展方向的探讨. 沉积学报, 2003, 21(1): 113~117 [Chen Daisheng, Li Shengxiang, Cai Yuyi. A discussion on research and development direction of sandstone-type uranium deposits in the Mesozoic-Cenozoic basin of China. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(1): 113~117]
- 赵瑞全, 秦明宽, 王正邦. 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. 铀矿地质, 1998, 14(6): 338~343 [Zhao Ruiquan, Qin Mingkuan, Wang Zhengbang. Effect of microorganism and organic matters on sandstone type uranium mineralizations in interlayer oxidation zone in deposit No. 512. Uranium Geology, 1998, 14(6): 338~343]
- 闵茂中, 王汝成, 边立曾, 等. 层间氧化带砂岩型铀矿中的生物成矿作用. 自然科学进展, 2003, 13(2): 164~168 [Min Maozhong, Wang Rucheng, Bian Liceng, et al. Effect of biomineralization on sandstone type uranium deposit in interstratified oxidation zone. Progress in Natural Science, 2003, 13(2): 164~168]
- 闵茂中, Xu H F, Barton L L, 等. 厌氧菌 *Shewanella putrefaciens* 还原 U(V) 的实验研究: 应用于中国层间氧化带砂岩型铀矿. 中国科学 D 辑, 2004, 34(2): 125~129 [Min Maozhong, Xu H F, Barton L L, et al. Reduction of U(V) by an aerobic bacteria *Shewanella putrefaciens* application on sandstone type uranium deposit in interstratified oxidation zone in China. Science in China (Series D), 2004, 34(2): 125~129]
- 陈绍铭, 郑福寿. 水生微生物实验法. 北京: 海洋出版社, 1985. 87~239 [Chen Shaoming, Zheng Fushou. Experiment of Aquatic Microorganism. Beijing: Ocean Press, 1985. 87~239]
- 郑士民, 颜望明, 钱新民. 自养微生物. 北京: 科学出版社, 1983. 187~189 [Zheng Shimin, Yan Wangming, Qian Xinmin. Autotrophic Microorganism. Beijing: Science Press, 1983. 187~189]

## Microbe in the Shihongtan Uranium Deposit and Their Metallogenic Significance

HUANG Jian-xin<sup>1</sup> GENG Hai-bo<sup>1</sup> QIAO Hai-ming<sup>2,3</sup> ZHANG Fu-xin<sup>2</sup>

(1) College of Life Science, Northwest University, Xi'an 710069; 2) Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069; 3) No. 203 Research Institute of Nuclear Industry, Xianyang, Shaanxi 712000)

**Abstract** By using biological method, microorganisms in the Shihongtan uranium deposit were isolated and identified.

fied and using sulfate-reducing bacteria effected on uranium in the deposit underwater. The simulation experiment of the function of microorganisms during the formation of uranium deposit could be done by the water-rock-bacteria three-phase experiment system. The result showed that the distribution of the main microbe groups in the subzones were different and the geochemical characteristics was obvious to show that uranium could be reduced and precipitated by sulfate-reducing bacteria through metabolism function. The result of the reductive reducing experiment indicated that sulfate-reducing bacteria could absorb organic carbon as nutrition materials to grow, at the same time, uranium was reduced and precipitated.

**Key words** Shongtan uranium deposit; microbe isolation and identification; sulfate-reducing bacteria; biomineralization

## 会议消息

### 第四届油气储层学术研讨会将在厦门召开

由中国地质学会沉积地质专业委员会、中国石油学会石油地质专业委员会、中国石油油气储层重点实验室联合发起并承办,“第四届油气储层研讨会”2006年11月将在厦门举办。本次会议将对内容广泛的储层地质、地球物理和地球化学问题,以及储层评价及预测技术方法展开讨论。

有关本次会议的详情和资料索取,可与如下机构联系:

① CNPC 油气储层重点实验室

联系地址:北京市学院路 20 号 910 信箱实验研究中心(邮编 100083),联系人:闫继红,联系电话:010-62098355, Email: yanjh@petrochina.com.cn

④ 中国地质学会沉积地质专业委员会

联系地址:北京市祁家豁子中国科学院地质与地球物理研究所(邮编 100029),联系人:纪徐,联系电话:010-62008145, Email: jixu@mail.jgcas.ac.cn