

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

# 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

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

1) 西北大学地学系, 西安, 710069; 2) 西北大学生命科学学院, 西安, 710069

3) 核工业二零三研究所, 陕西咸阳, 712000

**内容提要:** 通过样品采集、细菌培养和鉴定等, 首次在中国大型的十红滩层间氧化带砂岩型铀矿床容矿层中发现不同种群的细菌。氧化带主要分布铁细菌、硫杆菌、硝化菌等好氧菌, 矿石带主要分布厌氧的硫酸盐还原菌, 其种类和数量上具明显的生物地球化学分带性, 并与岩石的地球化学分带性一致。首次利用容矿层的硫酸盐还原菌在室内进行了硫酸盐还原试验。根据细菌的代谢特征, 结合硫酸盐还原菌还原试验, 分析了细菌在层间氧化带形成、铀氧化迁移和还原成矿过程中的作用。

**关键词:** 厌氧菌; 好氧菌; 地球化学分带; 层间氧化带砂岩型铀矿床; 十红滩; 吐鲁番—哈密盆地; 新疆

微生物成矿作为生物成矿作用一个分支是当今地学的前沿学科, 是国际成矿作用研究领域的新动向、新热点。1983年Krumbein在其专著《Microbial Geochemistry》中论述了微生物地球化学循环、微生物的风化作用和微生物的成岩成矿作用, 标志着生物地球化学的诞生。大量的研究表明: 一方面微生物能改变成矿的物理化学环境, 促进元素的迁移和富集; 另一方面微生物及其生命活动可吸附和吸收成矿元素, 并在有利的部位直接沉淀和聚集成矿(陈骏, 2004)。有关微生物还原6价铀的试验研究(Lovley D R et al., 1993), 证明了细菌不仅能在富含有毒元素U的环境下生存, 并且很可能在铀矿化的形成过程中发挥了重要的作用。本文通过对吐鲁番—哈密盆地十红滩铀矿床容矿层岩石的系统采样、细菌培养和分离, 研究了不同地球化学分带中细菌的分布特征, 并对不同细菌的生命代谢特征与铀的迁移、富集成矿的关系进行了分析和探讨。

## 1 十红滩铀矿床的地质特征

十红滩铀矿床属于典型的层间氧化带砂岩型铀矿床, 位于中国新疆东部吐鲁番—哈密盆地西南缘的艾丁湖斜坡带上(权志高等, 2002; 彭新建等, 2003; 朱西养等, 2004; 杨殿忠等, 2004; 王金平等,

2005; 乔海明等, 2005; Cai Gengqing et al., 2005)。含矿主岩分别为中侏罗统西山窑组( $J_2x$ )第一、三岩性段的辫状河流相砂体, 属潮湿环境下的含煤碎屑岩建造, 砂体主要为粗、中、细粒长石砂岩, 部分为岩屑砂砾岩或者砾岩。主要矿物成分为: 石英, 长石类, 黑云母, 其他自生矿物有水云母、高岭石、方解石、黄铁矿等。岩屑成分较为复杂, 主要为凝灰岩、板岩、片岩等, 其次为中基性火山岩、糜棱岩、酸性火山岩、花岗斑岩、变质岩等。砂体上覆、下伏湖泊沼泽相泥岩、粉砂岩、煤层等, 构成有利于层间渗入水运动和层间氧化带发育的泥—砂—泥组合。

层间氧化带控制着十红滩铀矿床的形成和铀矿床的分布范围, 沿着承压含水层中的透水砂体发育, 走向断续延伸上百公里, 倾向延伸0.5~5km, 埋深32~264m, 颜色以褐黄色为主, 次为玫瑰红色。氧化—还原过渡带为灰色—深灰色, 夹淡黄色、黄色斑点, 含少量炭屑。原生带为灰色—深灰色, 含炭屑和黄铁矿。

矿体以卷状、似卷状赋存于层间氧化带前锋线上, 其中位于第一岩性段的矿体长度1~2km, 宽度200~300m, 厚度3.5~8.4m, 矿石品位0.0124%~0.1176%, 平米铀量5.00kg/m<sup>2</sup>。位于第三岩性段的矿体延伸长度6km, 宽度250~500m, 厚度0.5~

注: 本文为国家重点基础研究发展规划项目(编号2003CB214604)、国家计委I类重点资助项目(编号97031101)的成果。

收稿日期: 2005-09-27; 改回日期: 2006-03-06; 责任编辑: 章雨旭。

作者简介: 乔海明, 男, 1963年生。1986年毕业于华东地质学院, 现为核工业二零三研究所研究员级高级工程师, 西北大学博士研究生。主要从事铀矿床水文地质研究。通讯地址: 712000, 陕西省咸阳市11号信箱; 电话: 0910-3577379; Email: qhm1963@yahoo.com.cn。

7.8m, 矿石品位 0.0108%~0.0824%, 平米铀量 2.61kg/m<sup>2</sup>。铀的主要存在形式有两种, 即铀矿物和吸附形式铀, 两者各占 50%左右, 吸附状铀与矿石中的粘土矿物、粉末状黄铁矿、白铁矿、炭屑的吸附有关(权志高等, 2002)。铀矿物主要有沥青铀矿、铀石、含铀钛铁氧化物等<sup>①</sup>。

## 2 样品采集与细菌的培养、鉴定

样品均为十红滩铀矿床容矿层的新鲜钻孔岩心样, 分别按氧化带、弱氧化带和矿石带(还原带)进行采样(样品特征见表 1)。样品采集并剔除泥皮后装

表 1 取样位置和样品特征

Table 1 The characteristics of the samples and sample location

样号	地球化学环境	岩性	U (×10 <sup>-6</sup> )	Fe <sup>3+</sup> / Fe <sup>2+</sup>	orgc (%)
136	氧化带	浅黄色中砂岩	9.4	1.95	0.03
127	弱氧化带	灰夹褐黄色斑点砂砾岩	11.0	1.06	0.03
128	弱氧化带	灰夹褐黄色斑点粗砂岩	28.4	0.76	0.09
130	矿石带	灰色砾岩	91.3	1.15	0.12
001	矿石带	灰白色中砂岩	248	0.97	0.19
002	矿石带	灰色中砂岩	468	0.98	0.08

入经灭菌箱灭菌处理的样品袋中, 尽快送到实验室。细菌培养及分离由西北大学生命科学学院完成, 鉴定前, 在无菌室内剥离岩心的外层, 用中间部分进行细菌培养。根据《伯杰细菌鉴定手册》(第八版), 分别对分离纯化的菌株进行菌落形态、个体形态、革兰氏染色、芽孢、鞭毛染色及生理生化检测, 将菌株鉴定到属, 硫酸盐还原菌鉴定到种。采用最大可能数量法(MPN 法)进行计数。岩石中 U、Fe<sup>3+</sup>/Fe<sup>2+</sup>、orgc 及还原试验水中 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、H<sub>2</sub>S、Eh 等项目的测试由核工业 203 所分析测试中心完成。

## 3 容矿层岩石中的细菌种群和生化特征

### 3.1 硫酸盐还原菌

硫酸盐还原菌主要分布于矿石中, 鉴定出两个属, 分别为脱硫弧菌属(*Desulfovibrio*)和脱硫肠状菌属(*Desulfotomaculum*), 其中脱硫弧菌又可分为三个种, 它们分别为 *D. densulfuricans*、*D. salexigens* 和 *D. gigas*。脱硫肠状菌属分为两个种, 分别为 *D. ruminis*、*D. orientis*。硫酸盐还原菌的特征见表 2, 脱硫肠状菌属特征见图 1。

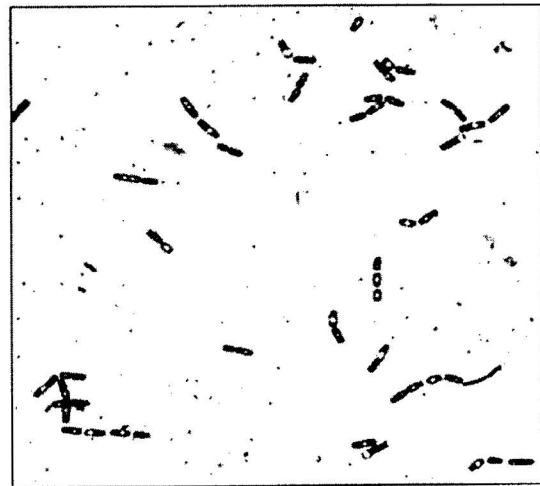


图 1 脱硫肠状菌属(986×1009)

Fig. 1 Desulfotomaculum (986×1009)

这两个属的细菌严格由恶氧活动的杆菌组成, 含有细胞色素, 它们利用硫酸盐和其他若干氧化态硫化物(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>、S<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>2-</sup>、某些 S<sup>0</sup>)作为电子接受者, 使之还原为 H<sub>2</sub>S, 这种 H<sub>2</sub>S 作为呼吸的最终产物而被排除, 仅有很少一部分被细胞所同化(阎保瑞等, 2000)。该细菌最适宜的生长环境温度为 30~35℃, 环境为缺氧环境(Eh 为 -100mV 或更低), 介质条件为中性或偏碱性(pH 为 7.0~7.5)(郑士民等, 1983)。

### 3.2 铁细菌

铁细菌是好氧性细菌, 在 pH 值接近中性的环

表 2 容矿层岩石中硫酸盐还原菌的特征与分类

Table 2 The characteristics and classification of sulfate reducing bacteria

属	种	菌体形态	菌体大小(μm)	革兰氏染色	芽孢	鞭毛
脱硫弧菌属 ( <i>Desulfovibrio</i> )	<i>D. densulfuricans</i>	短弧型	0.5~1.0×3.0~5.0	G <sup>-</sup>	-	极生
	<i>D. salexigens</i>	弧形弯曲	0.5~1.0×3.0~5.0	G <sup>-</sup>	-	极生
	<i>D. gigas</i>	大弧形	1.2~1.5×5.0~10.0	G <sup>-</sup>	-	极生
脱硫肠状菌属 ( <i>Desulfotomaculum</i> )	<i>D. ruminis</i>	直到弯杆状	0.5×3.0~6.0	G <sup>-</sup>	+	周生
	<i>D. orientis</i>	粗杆状	0.5×3.0~6.0	G <sup>-</sup>	+	周生

境中发育,利用低铁盐为营养,将  $Fe^{2+}$  氧化成  $Fe^{3+}$  形成高铁沉淀,并从中获得生长所需的能量,可以大大加快铁的氧化反应速度。通过普鲁兰反应测定,从不同样中分离出菌落特征明显的铁细菌 32 株,镜检其形态特征并根据《伯杰细菌分类手册》将它们鉴定至属,分别为赭色菌属、鞘铁菌属、球衣菌属和瑞曼氏菌属,其特征见表 3 和图 2。

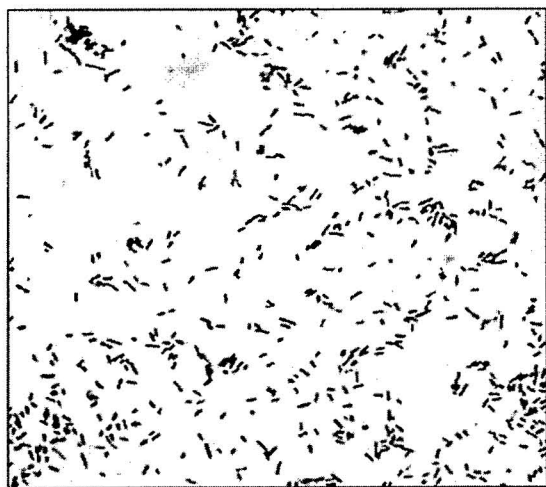


图 2 赭色菌属(986×1009)

Fig. 2 Ochrobium (986×1009)

### 3.3 硫杆菌

对岩石中培养出来的硫杆菌进行分离,共分离

表 3 容矿层岩石中铁细菌的特征与分类

Table 3 The characteristics and classification of Iron bacteria

属	菌体形态	菌体大小( $\mu\text{m}$ )	革兰氏染色	荚膜	鞭毛
赭色菌属( <i>Ochrobium</i> )	杆状	0.5~1.0×1.5~4.0	G <sup>-</sup>	透明色,细胞含 $Fe^{2+}$	极生
鞘铁菌属( <i>Siderocapsa</i> )	卵圆	0.4~0.6×0.8	G <sup>+</sup>	含 $Fe^{2+}$ ,外呈浅褐色	极生
球衣菌属( <i>sphaerolilus</i> )	直杆状	0.7~2.4×3.0~5.0	G <sup>-</sup>	无铁的氧化物包裹	极生
瑞曼氏菌属( <i>Cnaumamiella</i> )	直杆状	1.0×2.0	G <sup>-</sup>	黄色,含 $Fe^{2+}$	极生

表 4 容矿层岩石中硫杆菌的特征与分类

Table 4 The characteristics and classification of thiobacillus

属	菌体形态	菌体大小( $\mu\text{m}$ )	革兰氏染色	鞭毛
排硫硫杆菌( <i>Thiobacillus thioparasus</i> )	细短杆状	0.5×1.0~3.0	G <sup>-</sup>	极生
脱氮硫杆菌( <i>Thiobacillus denitrificans</i> )	短杆状	0.5×1.0~3.0	G <sup>-</sup>	极生
氧化亚铁硫杆菌( <i>Thiobacillus ferrooxidans</i> )	短杆状	0.7~2.4×3.0~5.0	G <sup>-</sup>	极生

表 5 容矿层岩石中硝化菌的特征与分类

Table 5 The characteristics and classification of nitrobacteraceae

属	菌体形态	菌体大小( $\mu\text{m}$ )	革兰氏染色	鞭毛
亚硝化单胞菌属( <i>Nitrosomonas</i> )	椭圆或短杆状	0.6~0.8×1.0~2.0	G <sup>-</sup>	极生
硝化杆菌属( <i>Nitrobacter</i> )	短杆状	0.8~0.9×1.0~2.0	G <sup>-</sup>	极生

出三类硫杆菌,它们均为革兰氏阴性,专性自养,大小为  $0.5 \times 1.0 \sim 3.0 \mu\text{m}$ 。按照其生理特性进行鉴定分别为兼性厌氧的脱氮硫杆菌(*Thiobacillus denitrificans*)和专性好氧的氧化亚铁硫杆菌(*Thiobacillus ferrooxidans*)、排硫硫杆菌(*Thiobacillus thioparasus*),特征见表 4。

硫杆菌是以一种或多种还原态或部分还原态的硫化物作为能源,以氧化态硫化物( $H_2S$ 、 $S$ 、 $S_2O_3^{2-}$ 、 $SO_3^{2-}$ )进行生长的细菌,氧化作用的最终产物为  $H_2SO_4$ ,最终电子受体为  $O_2$ 。其适合在中性和碱性环境下生存,但它们的适应范围也宽,如氧化亚铁硫杆菌在 pH:2.0~3.5 也能生存。最适合的生长温度一般为  $28 \sim 30^\circ\text{C}$ ,在  $8 \sim 30^\circ\text{C}$  均能生长。脱氮硫杆菌在好氧条件下与一般硫杆菌相似,而在厌氧条件下,则利用硝酸盐为最终电子受体,以其中的氧化硫、硫代硫酸盐、硫化物进行厌气性生活,还原硝态氮为游离氮,同时利用硫酸盐还原菌产生的  $H_2S$ ,从而抑制  $H_2S$  的积累。氧化亚铁硫杆菌不但能氧化元素硫和其他还原性硫化物,而且能够利用亚铁作为能源,氧化  $Fe^{2+}$  成  $Fe^{3+}$ ,同时利用氨作为氮源,但利用硝酸盐缓慢(郑士民等,1983)。

### 3.4 硝化菌

共分离出两类硝化细菌,分别为亚硝化单胞菌属和硝化杆菌属,均分布于氧化带砂岩中,菌株数量较少,不到 10 个,形状为短杆状和椭圆形,大小  $0.5$

$\times 1.0 \sim 3.0 \mu\text{m}$ ,也为革兰氏阴性,专性自养,是引起硝化作用的主要细菌,能将氨和含氮的有机化合物氧化为亚硝酸和硝酸, $O_2$  作为最终的电子受体,从而获得其生长所需的能量。亚硝化单胞菌属生长的 pH 范围为  $5.8 \sim 8.5$ ,适宜生长温度为  $5 \sim 30^\circ\text{C}$ 。硝化杆菌属生长的 pH 范围  $6.8 \sim 8.5$ ,适宜生长温度为  $5 \sim 40^\circ\text{C}$ (郑士民等,1983)。特征见表 5。

## 4 不同地球化学环境细菌的分布特征及地球化学意义

### 4.1 不同地球化学环境细菌的组合特征

由表 6 可以看出,十红滩铀矿床容矿层岩石中细菌的分布具有明显的生物地球化学分带性,并与岩石的地球化学分带具很好的一致性。完全氧化带细菌的分布最为丰富,除了好氧的铁细菌达到每克岩石 450 个外,还有好氧的氧化亚铁硫杆菌、排硫硫杆菌、硝化细菌和亚硝化细菌及兼气的脱氮硫杆菌,而厌氧的硫酸还原菌仅每克岩石 9 个,构成以好氧菌为主,兼有少量厌氧菌的细菌组合特征,表明完全氧化带地下水赋存有充足的溶解氧、且水温不高于 30℃,容矿层岩石中富含 Fe<sup>2+</sup>、硫化物(H<sub>2</sub>S、S、S<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>2-</sup>、SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>)、氨和含氮的有机化合物等,有利于这些细菌生长和繁殖。而弱氧化带好氧菌数量和种类明显降低,厌氧菌数量相对增高,这是因为随着地下水从氧化带向还原带的径流,在细菌的参与下,氧化作用大量消耗地下水中的溶解氧,使地下水中溶解氧含量大幅度降低,其含量不足维持大量好氧菌的生长,构成好氧菌与厌氧菌共存的细菌组合特征。相比之下,矿石带厌氧菌数量明显增高,达到最大值,而好氧菌种属和数量明显降低,细菌以厌氧的硫酸盐还原菌为主,兼有少量好氧菌生存的细菌组合特征,表明矿石带岩石中有较高的有机质存在,同时地下水中有较高含量的硫酸盐,溶解氧含量很低,有利于在缺氧环境下脱硫酸作用的发生和进行。

表 6 容矿层岩石中微生物分布和数量

(单位:细菌数目/g 岩石)

Table 6 Distribution and abundance of microorganisms in ore hosting bed (cell/g)

样品号	地球化学环境	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
136	完全氧化带	9	450	<10	<10	<10	<10	<10
127	不完全氧化带	25	160	<10	<10	—	—	—
128	不完全氧化带	35	200	<10	<10	—	—	—
130	矿石带	65	14	—	—	—	—	—
001	矿石带	95	18	—	—	—	—	—
002	矿石带	45	12	—	—	—	—	—

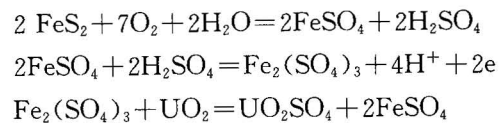
### 4.2 容矿层细菌的代谢活动与铀的成矿作用

#### 4.2.1 好氧菌的活动与层间氧化带的形成、铀的溶解迁移

层间氧化带在层间氧化带砂岩型铀矿床的形成

和找矿实践中具非常重要的意义,其不仅是该类型矿床最直接的找矿标志,而且作为成矿物质的供给区或者为成矿物质在水中的富积和迁移提供有利的水文地球化学环境。二价铁硫化物的氧化作用是层间氧化作用中最主要的反应。细菌的参与能加速和促进层间氧化带的形成,在金属硫化物的氧化和硫酸的形成过程中,细菌起着重大的作用。实验证明,通过无机方法发生的黄铁矿氧化过程只能使介质的 pH 下降到 3.1, Eh 值为 0.65V,而在细菌的参与下黄铁矿的氧化则能使介质的 pH 值降低到 2.0, Eh 升高到 0.85V(武汉地质学院地球化学教研室, 1979)。在氧化亚铁硫杆菌的作用下, Fe<sup>2+</sup> 很容易氧化为 Fe<sup>3+</sup>, 分子氧作为最终电子受体,而各种细胞色素作为电子传递链起着重要作用。对十红滩铀矿床容矿层不同地球化学环境岩石的地球化学指标统计表明,在细菌参与的氧化作用下,有机碳在氧化带仅为 0.06%,而在还原带高达 0.93%。由于二价硫被氧化为 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 随水迁出,岩石中的二价硫由还原带中的 0.19% 降低至氧化带的 0.01%,岩石的还原容量由还原带中的 43mV 降低至氧化带的 32mV<sup>①</sup>。岩矿鉴定和铁物相分析发现,在氧化带岩石中,有较高的三价铁化合物,主要以铁的氢氧化物—针铁矿、水针铁矿和水赤铁矿的混合物形式存在,二价铁化合物的含量较低。还原带二价铁的化合物的含量较高,主要存在形式为菱铁矿和黄铁矿<sup>②</sup>。

在好氧菌中,对铀氧化迁移影响最强烈的氧化亚铁硫杆菌,其能促使 FeS<sub>2</sub> 的氧化,形成酸性的含 Fe<sup>3+</sup> 水,进而又促进了 Fe<sup>3+</sup> 对 U<sup>4+</sup> 的氧化作用,使铀发生强烈的水迁移(史维俊,1989)。



由表 1 可以看出,由于 U<sup>4+</sup> 被氧化为 U<sup>6+</sup> 随水迁出,氧化带中的铀含量明显地低于弱氧化带。但由于含水围岩中含有大量的碳酸盐(乔海明,2005),作为缓冲剂,形成 Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 溶于水中,使地下水的 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 含量增大, pH 却没有明显的变化。因碳酸铀酰的络合稳定性远高于硫酸铀酰,形成的硫酸铀酰转化为碳酸铀酰随水向矿石带迁移。所以在十红滩铀矿床含矿含水层地下水中铀的主要存在形式为 UO<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, 其次 UO<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>3</sub><sup>2-</sup><sup>③</sup>。

#### 4.2.2 厌氧菌的活动与铀的还原成矿

闵茂中(2004)曾用自然界分布广泛的厌氧菌

*Shewanella putrefaciens* 进行 6 价铀的还原试验, 经过 7 昼夜即发现在该菌胞外壁生成纳米级的沥青铀矿, 分析认为微生物通过代谢和非代谢两种形式富集铀, 而推测该实验是籍代谢性还原、富集铀的。有机物很容易接受微生物的作用, 在无氧环境的有机物氧化作用过程中, 厌氧菌可促使有机物无氧分解作用加剧, 加速电子传递, 使有机物分解为  $\text{CH}_4$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{H}_2$  还原性气体等, 导致环境的氧化—还原电位降低、铀的还原沉淀(史维俊, 1989)。在十红滩铀矿床矿石中分布大量的厌氧菌—硫酸盐还原菌, 而且与氧化带、氧化—还原过渡带相比较, 数量明显增多。它们以岩石中的有机质(有机碳、烃类等)作为氧化介质, 而水中大量硫酸盐和其他氧化态硫化物等作为电子接受者, 被还原为  $\text{H}_2\text{S}$ , 使地下水的氧化—还原电位降至铀还原沉淀的临界电位以下, 6 价铀被还原为四价铀, 形成铀矿化。

把从矿石中分离出来的硫酸盐还原菌加入取自十红滩地区的地下水样中进行硫酸盐的还原实验(表 7)发现, 在常温下经过 24 d 的培养, 水中细菌、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 、Eh 等均有较大的变化, 尤其是加入培养基(Starkey 培养基)的水样, 由于增加了碳源, 水中  $\text{SO}_4^{2-}$  含量降低了 6.13%~10.40%,  $\text{H}_2\text{S}$  生成量为 59.31~102.41mg/l, 氧化—还原电位降低至 -76.55~-70.5mV。这一氧化—还原电位足以使地下水中 6 价铀被还原为四价铀, 沉淀析出形成铀矿化。

在十红滩铀矿床的富矿石中, 沥青铀矿和黄铁矿及少量的白铁矿共生在一起<sup>②</sup>。同位素测试发现, 黄铁矿的  $\delta^{34}\text{S}$  变化范围为 -39.2‰~18.8‰, 平均为 -5.3‰, 总体具有生物成因硫的特征(朱西养等, 2004), 表明细菌在硫化物形成过程中发挥了重要的催化作用。而硫同位素分散(极差达 58‰), 则与从沉积成岩阶段到后生氧化阶段, 在微生物的参与下硫酸盐和硫化物不断发生相互转化, 硫同位素发生了明显的分馏作用有关(朱西养等, 2004)。

## 5 结语

在十红滩铀矿床容矿层的不同地球化学环境的岩石中分布着不同种群的细菌, 这些细菌具有明显的生物地球化学分带性, 并与岩石地球化学分带性一致。在氧化带主要分布铁细菌、脱氮硫杆菌、氧化亚铁硫杆菌等好氧菌, 其对层间氧化带的形成和四

表 7 硫酸盐还原菌还原硫酸盐实验结果

Table 7 Test results of sulfates reduced by sulfate reducing bacteria

实验液组成	实验前			实验后			
	菌数 (个/ml)	$\text{SO}_4^{2-}$ (mg/l)	Eh (mV)	菌数 (个/ml)	$\text{SO}_4^{2-}$ (mg/l)	Eh (mV)	$\text{H}_2\text{S}$ (mg/l)
水+SRB	518	2820	322.5	1500	2745.1	189.5	0.71
水+STK+SRB	528	2820	322.5	25000	2647.0	-70.5	102.41
水+STK+SRB	548	2626	322.5	95000	2352.9	-76.55	59.31

注: SRB 为硫酸盐还原菌, STK 为培养基, 实验时间: 24d。

价铀被氧化为 6 价铀具有催化作用。而在矿石带主要分布厌氧的硫酸盐还原菌, 利用岩石中的有机碳, 还原容矿层地下水的  $\text{SO}_4^{2-}$  形成  $\text{H}_2\text{S}$ , 降低地下水的氧化还原电位, 促使 6 价铀被还原为四价铀沉淀析出形成铀矿化。

本文中的试验得到核工业 203 研究所分析测试中心研究员级高级工程师蔡金芳和其他同志的大力帮助, 文章编写过程中得到核工业 203 研究所总工程师徐高中、研究员级高级工程师王金平同志的热情指导, 在此深表谢忱!

## 注 释

- ① 李占游, 李保侠, 乔海明等. 2002. 新疆吐鲁番十红滩铀矿床南矿带 32~31 勘探线普查地质报告. 核工业 203 研究所. 内部资料。
- ② 彭新建. 2003. 新疆十红滩铀矿床成矿作用地球化学研究. 南京大学博士研究生学位论文。

## 参 考 文 献 / References

- 蔡根庆, 张子敏, 李胜祥. 2005. 吐哈盆地南缘十红滩砂岩型铀矿床层间氧化带的元素地球化学. 地质学报(英文版), 79(6): 835~842.
- 陈骏, 姚素平, 季峻峰, 等. 2004. 微生物地球化学及其研究进展. 地质论评, 50(6): 620~632.
- 闵茂中, 王汝成, 边立曾等. 2003. 层间氧化带砂岩型铀矿中的生物成矿作用. 自然科学进展, 13(2): 164~168.
- 闵茂中, 彭新建, 王金平等. 2003. 铀的微生物成矿作用研究进展. 铀矿地质, 19(5): 257.
- 闵茂中, Xu H F, Barton L L, 等. 2004. 厌氧菌 *Shewanella putrefaciens* 还原 U(VI) 的实验研究: 应用于中国层间氧化带砂岩型铀矿床. 中国科学, 34(2): 125~129.
- 闵茂中, 王金平, 彭新建, 陈佳, Hu Huifang, BARTON L L, WIATROWSKI H. 2005. 铀的微生物 *Desulfovibrio desulfuricans* DSM 642 成矿作用: 模拟实验及其意义. 地质学报(英文版), 79(1): 134~138.
- 彭新建, 闵茂中, 王金平, 贾恒, 魏观辉, 王建峰. 2003. 层间氧化带砂岩型铀矿床的铁物相特征及其地球化学意义——以伊犁盆地 511 铀矿床和吐哈盆地十红滩铀矿床为例. 地质学报, 77(1): 120~125.
- 乔海明, 张复新, 徐高中等. 2005. 吐哈盆地十红滩铀矿床的水文地质特征及矿床成因分析. 地质论评, 51(3): 257~263.
- 权志高, 李占双. 2002. 新疆十红滩砂岩型铀矿床基本特征及成因分析. 地质论评, 48(4): 430~436.



- 史维浚. 1989. 铀的水文地球化学循环与生物地球化学循环. 华东地质学院学报, 12(2): 79~86.
- 杨殿忠, 夏斌. 2004. 砂岩铀矿成矿过程中有机质作用的实验研究——以吐鲁番—哈密盆地十红滩铀矿床为例. 地质论评, 50(2): 218~222.
- 王金平, 闵茂中, 彭新建, 陈跃辉, 朱西养. 2005. 试论伊犁盆地库捷尔太铀矿床常量元素的活动性. 地质论评, 51(2): 143~150.
- 郑士民, 颜望明, 钱新民. 1983. 自养微生物. 北京: 科学出版社, 187~189.
- 朱西养, 彭新建, 王云量, 等. 2004. 新疆十红滩层间氧化带砂岩型铀矿同位素地球化学研究. 矿床地质, 23(4): 443~451.
- Cai Gengqing, Zhang Zimin, Li Shengxiang. 2005. Elemental geochemistry of the interlayer oxidation zone in the Shihongtan sandstone type uranium deposit, Xinjiang. Acta Geologica Sinica (English edition), 79(6): 835~842.
- Loveley D R, et al. 1993. Enzymatic iron and uranium reduction by sulfatereduction bacteria. Marine Geol., 113(1): 41~48.
- Min Mouzhong, Xu Huifang, Barton L L, Wang Jinping, Peng Xinjian, Wiatrowski. 2005. Biomineralization of uranium: A simulated experiment and its significance. Acta Geologica Sinica (English edition), 79(1): 134~138.

## 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

QIAO Haiming<sup>1,3)</sup>, ZHANG Fuxin<sup>1)</sup>, GENG Haibo<sup>2)</sup>, HUANG Jianxin<sup>2)</sup>, SHANG Gaofeng<sup>3)</sup>

1) *Geology Department, Northwest University, Xi'an, 710069;*

2) *Biological College, Northwest university, Xi'an, Shaanxi, 710069;*

3) *No. 203 Research Institute of Nuclear Industry, Xianyang, Shaanxi, 712000*

### Abstract

The distinct species of bacterial are first found in ore hosting bed rock of large Shihongtan interlayer oxidized zone type sandstone uranium deposit in Turpan—Hami Basin, northwest China, by means of sampling, bacterial cultured and distinguished. The aerobic bacterium including iron bacterium, thiobacillus, nitrobacteraceae, distribute in oxidizing zone, the anaerobic bacterium do in ore hosting bed rock. There are well zonation of biologic geochemistry in species and quantity. This zonation is in concordance with zonation of geochemistry. Based on metabolic characteristic and experimental result of sulfates reduced by sulfate reducing bacteria, the paper analyses role of bacterial in oxidized zone formed, uranium oxidized and solubilized, uranium reduced and metallogenesis.

**Key words:** aerobic bacterium; anaerobic bacterium; zonation of geochemistry; Interlayer oxidized zone type sandstone uranium deposit; Shihongtan; Turpan—Hami basin, Xinjiang