

文章编号: 1000-0550(2005)04-0626-05

新疆十红滩铀矿床中微生物类群特征 及其成矿作用探讨^①

耿海波¹ 黄建新¹ 乔海明^{2,3} 张复新²

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 203 研究所 陕西咸阳 712000)

摘要 在国内首次利用生物学方法对新疆十红滩铀矿床中的微生物进行了分离和鉴定。结果表明,十红滩铀矿不同氧化程度岩石中主要微生物的分布特征不同,氧化—还原过渡带微生物的活动很活跃,存在大量的好氧和厌氧细菌,矿石带细菌种类较单一,以厌氧的硫酸盐还原菌为主。同时结合主要微生物类群对其参与铀的成矿和改变成矿环境等方面的作用进行了探讨。

关键词 十红滩铀矿床 微生物 硫酸盐还原菌 分离鉴定 生物成矿

第一作者简介 耿海波 男 1979 年出生 硕士研究生 应用微生物学

中图分类号 P57 P611.2⁺2 文献标识码 A

生物成矿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^[1]。微生物成矿是生物成矿中的一个新学科分支,它是近年来发展起来的。微生物成矿作用是指微生物及其代谢作用所产生的有机质参与成矿或分异、聚集元素形成矿床或矿化菌体自身直接堆积形成有用矿床的作用^[2]。1991 年 4 月 4 日出版的 Nature 杂志公布了美国学者 Lovley 等有关微生物还原六价铀的实验研究结果^[3],首次揭示某些细菌能从还原 U(VI)成为 U(IV)过程中获得生存能,从而开辟了研究铀—微生物作用的新时代。但对于铀矿中微生物种类、铀与微生物之间的作用,以及微生物对铀成矿的实际作用等,至今在国内外尚无研究报道^[4]。本文首次对新疆十红滩铀矿不同区带的微生物类群进行研究分析,以期对矿床的形成机制和勘探提供新的有益参考。

1 地质背景和采样

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^[4]。新疆十红滩铀矿床属层间氧化带型砂岩铀矿床,位于吐—哈自流水盆地南缘的艾丁斜坡带上(图 1),含矿含水层赋存于中侏罗统水西沟群西山窑组含煤碎屑岩中(图 2),

主要岩性为砾岩、含砾粗、中粒长石石英砂岩,赋存孔隙承压水,现代地下水流向总体由南向北,地下水为高矿化度的 Cl-SO₄-Na 型水,地下水中铀含量最高可达 2.2451×10^{-3} g/L,其主要以 UO₂(CO₃)形式迁移。区域上有利的地下水补—径—排系统是形成该矿床的前提条件,局部构造作为局部补给源影响着地下水的流向,进而控制层间氧化带及铀矿化的形成及展布方向,铀矿化主要产于含水层渗透性相对较好的疏松砂岩中。铀矿床的形成经历了成岩过程的预富集和后期层间氧化带成矿作用两个阶段。至今,铀成矿作用仍处于发展演化过程中。

为研究铀矿床中主要微生物类群特征,在十红滩铀矿主要含矿层的氧化—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样品的污染。样品特征及其中的铀和有机碳含量如表 1 所示。

2 新疆十红滩铀矿床中的主要微生物类群及分布特征

2.1 各类细菌培养基成分

(1) Starkey 培养基(STK 培养基),用于分离硫

① 973 项目 2003CB214603 资助

收稿日期: 2005-01-18 收修改稿日期: 2005-03-14

酸盐还原菌。

K_2HPO_4 , 0.5g NH_4Cl 1.0g Na_2SO_4 1.0g $CaCl_2 \cdot 2H_2O$, 0.1g $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, 2.0g 70%的乳酸钠溶液, 50ml 蒸馏水, 1000ml pH=7.0~7.5 另配 1%硫酸亚铁铵 ($FeSO_4 \cdot (NH_4)_2SO_4 \cdot 6H_2O$) 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。

NH_4NO_3 , 0.5g $NaNO_3$, 0.5g K_2HPO_4 , 0.5g $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, 0.5g $CaCl_2 \cdot 6H_2O$, 0.2g 柠檬酸铁铵, 10.0g 蒸馏水, 1000ml

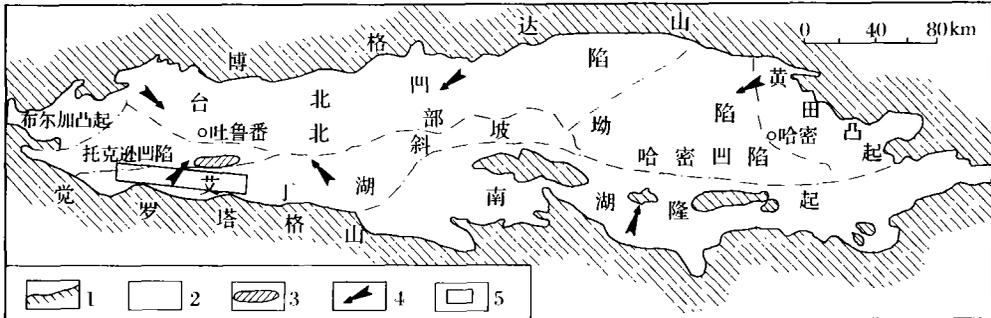


图 1 吐哈盆地区域水文地质图 (2002 据权志高修改)

Fig 1 Regional hydrogeological map in Tuha basin

1. 基岩裂隙水分布区; 2. 孔隙水分布区; 3. 湖泊; 4. 地下水流向; 5. 研究区;

1. The distribution area of bedrock crevice water; 2. The distribution area of pore water; 3. Lake; 4. Flow direction of groundwater; 5. Study area;

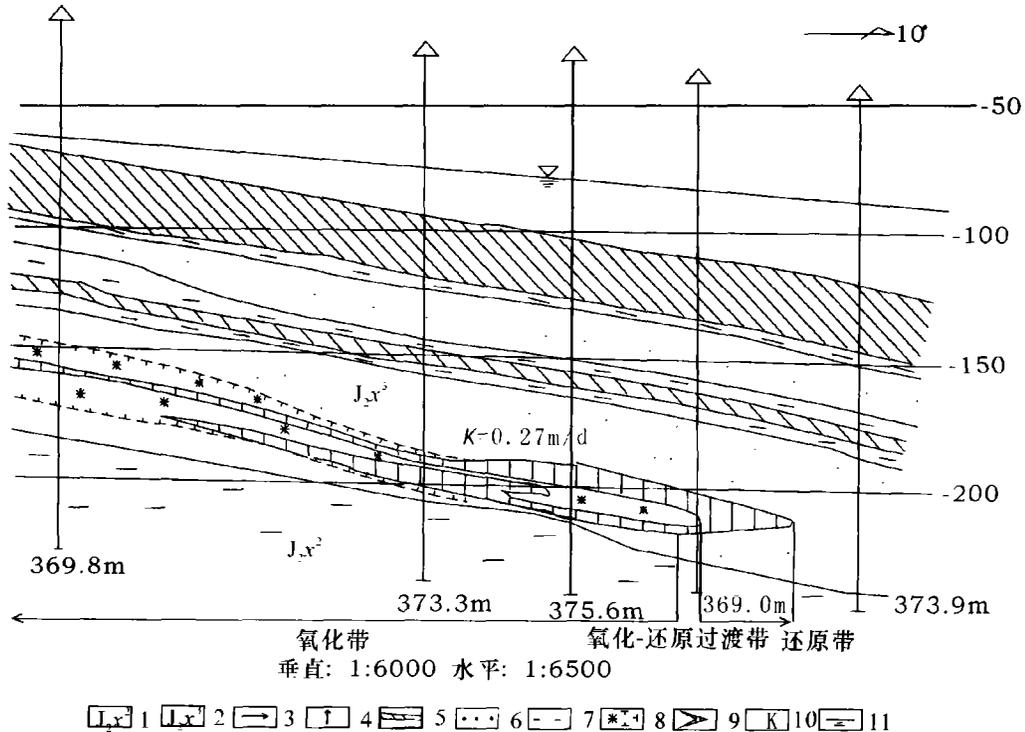


图 2 十红滩铀矿床水文地质剖面图

Fig 2 Hydrogeologic profile of Shihongtan uranium deposit

1. 西山窑组中部岩性段; 2. 西山窑组上部岩性段; 3. 地下水流向; 4. 钻孔; 5. 煤层; 6. 砂岩; 7. 泥岩; 8. 层间氧化带; 9. 矿体; 10. 渗透系数; 11. 承压水位;

1. Middle member of Xishanyao formation; 2. Upper member of Xishanyao formation; 3. Flow direction of groundwater; 4. Drill; 5. Coalbed; 6. Sandstone; 7. Mudstone; 8. Interlayer oxidation zone; 9. Uranium ore body; 10. Coefficient of permeability; 11. Pressure head

表 1 样品特征一览表

Table 1 The characteristics of the samples

| 样品号 | 样品位置 | 岩性 | 铀品位 ($\times 10^{-6}$) | 有机碳 % |
|-----|----------|--------------|--------------------------|-------|
| 1 | 氧化-还原过渡带 | 灰色夹黄色斑点砂砾岩 | 11.0 | 0.03 |
| 2 | 氧化-还原过渡带 | 灰色夹黄色斑点含砾粗砂岩 | 29.4 | 0.09 |
| 3 | 矿石带(还原带) | 灰色中砂岩 | 245.1 | 0.19 |
| 4 | 矿石带(还原带) | 灰色中砂岩 | 212.8 | 0.08 |
| 5 | 矿石带(还原带) | 灰色砂砾岩 | 91.3 | 0.12 |

(3) 硫杆菌分离用选择培养基^[5,6]: 排硫硫杆菌培养基, 氧化硫硫杆菌培养基, 脱氮硫杆菌培养基, 氧化亚铁硫杆菌培养基。

2.2 不同样品中细菌计数方法

最大可能数量法 (MPN 法)^[5]。

2.3 各类细菌分离方法

(1) 硫酸盐还原菌的分离纯化

各样品经无菌粉碎后加入 STK 液体培养液中, 于 30°C 深层厌氧富集培养, 如有黑色沉淀出现, 则说明有硫酸盐还原菌的存在, 将富集液接入不含硫酸亚铁铵的 STK 培养液中, 经过 4~5 天的厌氧培养后, 移接入含有硫酸亚铁铵的琼脂平板中, 采用二重叠皿法, 于 30°C 厌氧培养至平板上出现黑色菌落, 挑取不同单菌落接入 STK 培养基中, 重复操作直至得到纯的菌株。

(2) 铁细菌的分离纯化

各样品经富集培养后采用连续涂布的方法, 分离出单菌落, 移接斜面。并取少量菌用 2% $K_3Fe(CN)_6$ 和 10% 盐酸各一小滴制成水浸片观察, 形成普鲁氏蓝者即为铁细菌。

(3) 硫杆菌的分离纯化

用不同的硫杆菌选择培养基, 将富集培养的各样品中的菌分别置于硅胶固体平板上, 连续涂布直至分出单菌落。

(4) 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。

2.4 样品中分离到的微生物菌属组成及生化特征

2.4.1 硫酸盐还原菌

从不同位置的样品中共分离出 76 株硫酸盐还原菌, 它们均为严格的厌氧菌, 且均能还原 SO_4^{2-} 为 H_2S 。 H_2S 与培养基中的 $Fe(II)$ 结合形成 FeS 沉淀, 使培养基呈现黑色。镜检所分离的菌株的形态特征表现为不同的两类, 按照《伯杰细菌分类手册》鉴定分属于不同的两个属, 结果见表 2。

表 2 硫酸盐还原菌的特征与分类

Table 2 The characteristics and classification of sulfate reducing bacteria

| 菌体形态 | 菌体大小 μm | 革兰氏染色 | 芽孢 | 鞭毛 | 分类 | 分离株数 |
|-------|--------------------------|----------------|----|----|---------------------------------------|------|
| 弧形、S形 | 0.5~1.0 \times 3.0~5.0 | G ⁻ | - | 极生 | 脱硫弧菌属 (<i>Desulfotribrio</i>) | 25 |
| 杆状 | 0.3~0.5 \times 3.0~6.0 | G ⁻ | + | 周生 | 脱硫肠状菌属 (<i>Desulfotomaculum</i>) | 51 |

硫酸盐还原菌最适宜在 30~35°C 中性或偏碱性 (pH 值 7.0~7.5) 和氧化还原电位较低 (Eh 值 -100mV 或更低) 的环境下生长。它们以有机质作为氧化介质, 氧化放出的电子可使 SO_4^{2-} 还原为 H_2S 并从中获得其生长代谢所需能量^[3]。

2.4.2 铁细菌

铁细菌能利用低铁盐为营养, 将 $Fe(II)$ 氧化成 $Fe(III)$ 从而形成高铁沉淀, 并从中获得生长所需能量。根据此特点, 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, 结果见表 3。

表 3 铁细菌的特征与分类

Table 3 The characteristics and classification of iron bacteria

| 菌体形态 | 菌体大小 μm | 革兰氏染色 | 荚膜 | 鞭毛 | 分类 | 分离株数 |
|------|--------------------------|----------------|-------------------------|----|--------------------------------|------|
| 杆状 | 0.5~1.0 \times 2.0~4.0 | G ⁻ | 透明色, 细胞含 Fe^{2+} | 极生 | 赭色菌属 (<i>Ochrobium</i>) | 21 |
| 卵圆 | 0.3~0.5 \times 3.0~6.0 | G ⁺ | 成团, 含 Fe^{2+} , 外呈浅褐色 | 极生 | 鞘铁菌属 (<i>Siderocapsa</i>) | 11 |

铁细菌是好氧性细菌, 在 pH 值接近中性的环境中发育。铁细菌的存在可以大大加快铁的氧化反应速度^[2]。

2.4.3 硫杆菌

对不同样中的硫杆菌进行分离, 共分离出两类硫杆菌, 它们均为革兰氏阴性, 专性自养, 大小为 0.5

$10^4 \sim 10^6$ cell/g。按照其生理特性进行鉴定分别为兼性厌氧的脱氮硫杆菌 (*T. denitrificans*) 和专性好氧的氧化亚铁硫杆菌 (*T. ferrooxidans*)。其中脱氮硫杆菌生长的最适 pH 值为 7.0~7.4 在好氧条件下与一般硫杆菌相似, 能将元素 S 和硫酸盐氧化为 H_2SO_4 , 在厌氧条件下利用硝酸盐为最终电子受体, 还原硝态氮为游离氮。该菌能利用硫酸盐还原菌产生的 H_2S 从而抑制 H_2S 的积累。氧化亚铁硫杆菌最适生长温度 $15 \sim 20^\circ C$, 最适 pH 值 2.5~5.8 能够利用亚铁作为能源, 氧化 $Fe(II)$ 成 $Fe(III)$, 同时利用氨作为氮源, 但利用硝酸盐缓慢^[4]。

2.5 微生物分布特征

对不同位置样品中的微生物种类分布和数量进行研究。结果见表 4。

表 4 十红滩铀矿岩石样品中微生物分布和数量 (cell/g)
Table 4 Distribution and abundance (cell/g) of microorganisms in the Shihongtan uranium deposit

| 样品号 | 硫酸盐还原菌 | 铁细菌 | 脱氮硫杆菌 | 氧化亚铁硫杆菌 |
|-----|--------|-----|-------|---------|
| 1 | 25 | 160 | < 10 | < 10 |
| 2 | 35 | 200 | < 10 | < 10 |
| 3 | 95 | 18 | 未检出 | 未检出 |
| 4 | 45 | 12 | 未检出 | 未检出 |
| 5 | 65 | 14 | 未检出 | 未检出 |

由表可以看出, 微生物具有明显的地球化学分带性, 从不同带的样品中均分离到硫酸盐还原菌, 数量从 25~95 cell/g 不等, 且硫酸盐还原菌的数量与有机物的含量基本上呈正相关关系, 其中脱硫肠状菌广泛分布于各岩石样中, 而脱硫弧菌数量较少, 这可能是由于具有芽孢的脱硫肠状菌有更强的适应环境的能力。铁细菌也广泛分布于各带的岩石样中, 但从数量分布来看, 氧化—还原过渡带比矿石带要高一个数量级, 这是由于过渡带比矿石带有较高的氧化电位, 含氧量较充裕^[8], 为好氧的铁细菌的生长和繁殖创造了良好的条件。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, 而还原带则未检测出, 这和氧化—还原带氧气的存在有很大关系。

从整体水平来看, 氧化—还原过渡带微生物的种类和数量较多, 好氧菌与厌氧菌共存, 但相对而言, 好氧微生物发育旺盛, 耗氧量大, 而厌氧细菌数量却明显偏少, 表明该带的地下水中尚有一定量的溶解氧存在, 处于氧化—还原过渡环境, 且与样品的地球化学

环境相匹配。矿石带中主要的微生物类群为厌氧的硫酸盐还原菌, 这是因为矿石带地下水中明显缺氧, 且富含供其生长的硫酸盐和有机碳。不同样品中均分离出铁细菌, 说明铀矿床中 $Fe(II)$ 的普遍存在, 这和铀矿中普遍伴生的黄铁矿是一致的^[7]。各样品中均分离出大量的硫酸盐还原菌和铁细菌, 说明它们是铀矿中的优势菌群, 在铀生物成矿作用中起着重要的作用。

微生物在自然界的种类和数量分布特征取决于微生物的营养类型、代谢类型和影响因子 (温度、压力、酸碱度、渗透压、湿度、盐度、通气情况、矿质成分、有机质含量和种类) 等多种因素^[9]。影响本区微生物类群特征的因素主要为: 氧气供给, 铀矿的矿物学特征, 有机质的含量和种类等。

3 微生物在铀矿形成中的作用

十红滩铀矿成矿环境中微生物的活动比较活跃, 且不同区带中微生物主要类群有所不同, 国外的一些试验也已证实了硫酸盐还原菌等微生物对铀的还原富集作用。因此很有必要探讨微生物在新疆十红滩铀矿形成中的作用。

3.1 硫酸盐还原菌在成矿中的作用

在自然界, 铀主要以六价和四价形式存在, 在水中六价铀具有较高的溶解度, 而四价铀溶解度则很低, 这一性质导致铀在氧化条件下的溶解迁移和在一定的还原环境下的沉淀析出。分散状的铀从蚀源区等地层中活化迁出, 在有利的水文地质、水文地球化学环境下沉淀富集成矿, 其中, 有机质和硫酸盐还原菌作用产生的硫化氢和硫化物对铀的还原和沉淀起着十分重要的作用。在缺氧的环境中, 硫酸盐还原菌还原 SO_4^{2-} 产生的 H_2S 造成一种强还原环境, 因此水溶液中的六价铀被还原成四价铀, 并聚集在有机质中。而某些硫酸盐还原菌还可以以铀 $U(VI)$ 为电子受体, 在籍其代谢酶还原 $U(VI)$ 的同时, 从中获得生长能^[1]。因此, 硫酸盐还原菌在铀的还原富集过程中起到非常重要的作用。

3.2 微生物的共同作用

微生物对铀矿成矿的影响是综合性的, 同时也受到各种环境因素的制约。微生物在新陈代谢过程中产生的有机酸等物质可改变环境的 Eh、pH 值。微生物之间也存在着共生、互生、竞争和拮抗的关系, 从而影响着矿床的发育。同时, 微生物体对铀存在着程度不同的吸附富集作用, 微生物细胞的负电位与带正电

荷的 UO_2^{2+} 离子间产生物理—化学作用, 或因溶液化学状态的改变, 可导致铀在胞内富集并沉淀^[1]。

4 结论

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, 氧化—还原过渡带微生物较活跃, 种类和数量较多, 但总体以好氧菌占优。矿石带细菌种类较单一, 以厌氧的硫酸盐还原菌为主。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。硫酸盐还原菌作为主要菌群, 尤其是在矿石带中大量存在, 一方面氧化消耗围岩中的有机碳, 另一方面还原含矿含水层地下水的硫酸盐, 产生的硫化氢气体等, 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。

以上是基于新疆十红滩铀矿床中主要微生物类群特征对矿床形成作用的探讨, 有关各种微生物对成矿的实际作用等研究也正在进行之中。通过本实验, 希望对铀矿的成矿机理以及通过微生物种类分析圈定矿床部位等研究有所帮助。

参考文献 (References)

1 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]

- 2 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. 1~70]
- 3 Lovley D R, Phillips E J B, Gorb Y A, *et al*. Microbial reduction of uranium. *Nature* 1991 350: 414~416
- 4 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 basin of China. *Acta Sedimentologica Sinica* 2003 21(1): 113~117]
- 5 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]
- 6 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]
- 7 张子敏, 马汉峰, 蔡根庆. 吐哈盆地西南缘艾丁湖斜坡带层间氧化带分带性及其地球化学特征. 世界核地质科学, 2004 21(1): 5~8 [Zhang Zimin, Ma Hanfeng, Cai Genqing. Zonation and geochemistry of interstratified oxidation zone of Aiding lake slope in the southwest Turpan Hami Basin. *World Nuclear Geoscience* 2004 21(1): 5~8]
- 8 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]
- 9 周德庆. 微生物学. 北京: 高等教育出版社, 1994 1~10 [Zhou Deqing. *Microbiology*. Beijing: Higher Education Press, 1994. 1~10]

Main Microbe Group in the Shihongtan Uranium Deposit in Xinjiang and Their Metallogenic Significance

GENG Hai bo¹ HUANG Jianxin¹ QIAO Haiming^{2,3} ZHANG Futxin²

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 for the first time at home. Results showed that the distribution of the main microbe groups changed with the level of oxidation of the rock samples. A great deal of aerobic and anaerobic bacteria were very active in the intermediate zone of oxidation and reduction while in the ore zone, the species was monotonous, mainly anaerobic sulfate-reducing bacteria. In addition, the function of microorganisms during the formation of uranium deposit and the effect on the metallogenic environment were also discussed.

Key words Shihongtan uranium deposit, microbe, sulfate-reducing bacteria, isolation and identification, biomineralization