



东胜砂岩型铀矿床中硫酸盐还原菌成矿作用模拟研究

耿海波, 师明川, 付世骞, 安丽平

引用本文:

耿海波, 师明川, 付世骞, 等. 东胜砂岩型铀矿床中硫酸盐还原菌成矿作用模拟研究[J]. 沉积学报, 2021, 39(4): 886–893.

GENG HaiBo, SHI MingChuan, FU ShiQian, et al. Simulation Study of Mineralization of Sulfate-reducing Bacteria in Dongsheng Sandstone-type Uranium Deposit[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(4): 886–893.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

楚雄盆地北部桂花铜矿区晚白垩世含矿岩系沉积环境

Sedimentary Environments of Late Cretaceous Ore-bearing Sequences at the Guihua Copper Ore Field in the Northern Chuxiong Basin, Yunnan Province, SW China

沉积学报. 2019, 37(3): 491–501 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.153>

开鲁盆地陆家堡凹陷绍根地区早白垩世裂陷期后沉积构造演化与铀矿化特征

Sedimentary Tectonic Evolution and Uranium Mineralization of Post Late Cretaceous in Shaogen Area of Lujiapu Sag, Kailu Basin

沉积学报. 2018, 36(1): 20–32 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-0550.2018.005>

铀矿沉积学研究与发展

Study and Prospect for Sedimentology of Uranium Deposit

沉积学报. 2017, 35(5): 1044–1053 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2017.05.015>

成岩作用与油气侵位对砂岩铀成矿的约束——以淮南硫磺沟地区头屯河组砂岩铀成矿为例

Impact of Diagenesis and Hydrocarbon Charging on Sandstone Uranium Mineralization: An example of Toutunhe Formation in Liuhuangou area, southern Junggar Basin

沉积学报. 2016, 34(2): 250–259 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2016.02.004>

楚雄盆地六苴铜矿床容矿砂岩孔隙演化对成矿的制约

The Pore Evolution of Ore-bearing Sandstone and Its Restriction to Mineralization in Liuju Copper Deposit in Chuxiong Basin, Yunnan

沉积学报. 2015, 33(3): 512–523 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2015.03.009>

文章编号:1000-0550(2021)04-0886-08

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2020.068

东胜砂岩型铀矿床中硫酸盐还原菌成矿作用模拟研究

耿海波¹, 师明川², 付世骞², 安丽平^{3,4}

1. 石家庄职业技术学院食品与药品工程系, 石家庄 050081

2. 河北省地矿局第六地质大队, 石家庄 050085

3. 河北中医学院基础医学院, 石家庄 050200

4. 河北省心脑血管病中医药防治研究重点实验室, 石家庄 050200

摘要 通过对东胜砂岩型铀矿床中岩石样品的生物学分析,发现铀矿各区域分布着不同种属的硫酸盐还原菌(SRB),其分布规律和矿床环境因素密切相关;通过对地下水中铀的还原实验和SRB—水—岩模拟实验,研究了SRB的生长、繁殖、代谢和铀矿形成之间的相互作用,认为SRB通过产生还原作用形成有利于自身生存的微生态环境,改变了铀的价态和溶解度,直接参与了东胜砂岩型铀矿床的形成。

关键词 砂岩型铀矿床;厌氧;SRB;模拟成矿

第一作者简介 耿海波,男,1979年出生,硕士,副教授,应用微生物学,E-mail: genghb@126.com

通信作者 安丽平,女,讲师,E-mail: anan08@126.com

中图分类号 P619.14 **文献标志码** A

0 引言

微生物在生物圈中起着重要的作用,特别是在元素的生物转化和生物地球化学循环、金属和矿物转化、分解、生物风化、土壤和沉积物形成等领域。金属—矿物—微生物三者之间的相互作用可以被认为是地质微生物学框架内的一个重要课题,它可以简单地定义为微生物在地质过程中的作用,此类地质微生物过程的核心是金属和矿物转化。微生物具有多种特性,可以影响金属形态、流动性、矿物形成或矿物溶解等变化,这种机制是金属的天然生物地球化学循环的重要组成部分^[1-2]。

层间氧化带砂岩型铀矿因其矿量大、开发成本低、对环境污染小、产出效益高的特点,成为近些年国际上最有发展前景和市场竞争力铀矿类型,也是我国铀矿勘查和开发的重点对象^[3]。国内外对此类铀矿研究时发现微生物在成矿过程中扮演着重要的作用, Woolfolk *et al.*^[4]在1962年的研究表明, *Micrococcus lactilyticus* (*Veillonella alcalescens*)在厌氧的条件下利用氢做电子供体发生反应,可将U(VI)还

原为U(IV),美国学者 Lovley *et al.*^[5-6]团队研究发现硫酸盐还原菌(SRB)和铁还原菌可以将U(VI)还原为U(IV)并从中获取能量。 Abdelouas *et al.*^[7]的研究发现 *Shewanella putrefaciens* 同样对铀具有还原作用,史维浚^[8]在1989年的研究表明好氧的硫铁杆菌能将FeS₂氧化Fe(III),进而又促进了Fe(III)对U(IV)的氧化作用,使铀发生强烈的水迁移。在此基础上的研究重点主要集中在利用SRB对金属的还原能力进行污水治理和尾矿的生物修复等方面^[9-10]。国内对于铀矿的微生物成矿作用研究主要集中在新疆十红滩砂岩型铀矿床,西北大学黄建新^[11-13]团队研究表明矿床围岩和地下水中赋含SRB、氧化硫杆菌、铁细菌、硝化细菌、反硝化细菌等多种微生物,并在成矿中扮演不同的角色。核工业203研究所乔海明^[14-15]结合矿床水文地质条件的研究证明微生物的分布和数量具有明显的球生物化学分带性。前人对于鄂尔多斯北部东胜铀矿的研究表明铀矿石中具有微化石^[16],矿石中脂肪酸的研究也间接证明了生物参与了成矿过程^[17],直罗组同生沉积建造水承担了铀成矿的主要流体,是微生物参与成矿的环境因素^[18]。

收稿日期:2020-04-23; 收修改稿日期:2020-07-30

基金项目:河北省教育厅青年基金项目(QN2016137)[**Foundation:** Science Foundation for Youths of the Higher Education Institutions of Hebei Province, No. QN2016137]

本研究团队前期对东胜不同矿区的研究中分离得到了多种好氧和厌氧微生物,本文主要对东胜铀矿中赋存的SRB分布进行统计,并在国内首次通过模拟实验验证细菌在东胜铀矿成矿过程中的作用机制,为生物找矿和铀污染治理提供参考。

1 地质背景

东胜地区砂岩型铀矿赋存于侏罗系直罗组,分为上、下两个岩性段,它们在沉积时处于两种截然不同的沉积环境,其中下段上部为灰绿色泥岩和灰绿色砂岩,下部为灰色中砂岩,是主要铀矿化层位,控矿地层是多期辫状河砂体;直罗组上段为泥岩、紫红色细砂岩和灰绿色砂岩,岩石结构疏松,砂体厚度为20~40 m。含矿层中含有较多的碳屑和植物残骸等有机质^[19-20]。含砂矿体自北向南依次发育了氧化带—氧化还原带—还原带的岩石地球化学分带。氧化

带在地表为褐黄色,钻孔中为浅灰绿色、浅灰蓝色,氧化还原前锋线平面上总体呈东西向展布,形态为复杂的蛇曲状;氧化还原过渡带呈灰色、浅灰色,富含有机质和结核状黄铁矿;还原带呈灰色,富含有机质,可见结晶状黄铁矿。铀矿化产于层间氧化还原带前锋线附近,铀矿体呈卷状、板状和透镜状^[21](图1)。

2 材料与方法

2.1 样品来源与处理

研究样品采自东胜铀矿床直罗组下段含矿砂岩层及顶板围岩,他们分别分布于氧化带、氧化—还原带和还原带,采集后置于无菌包装袋中带回实验室进行成分分析和菌类分离鉴定和成矿模拟实验。样品特征及其中的铀和有机碳含量如表1所示。

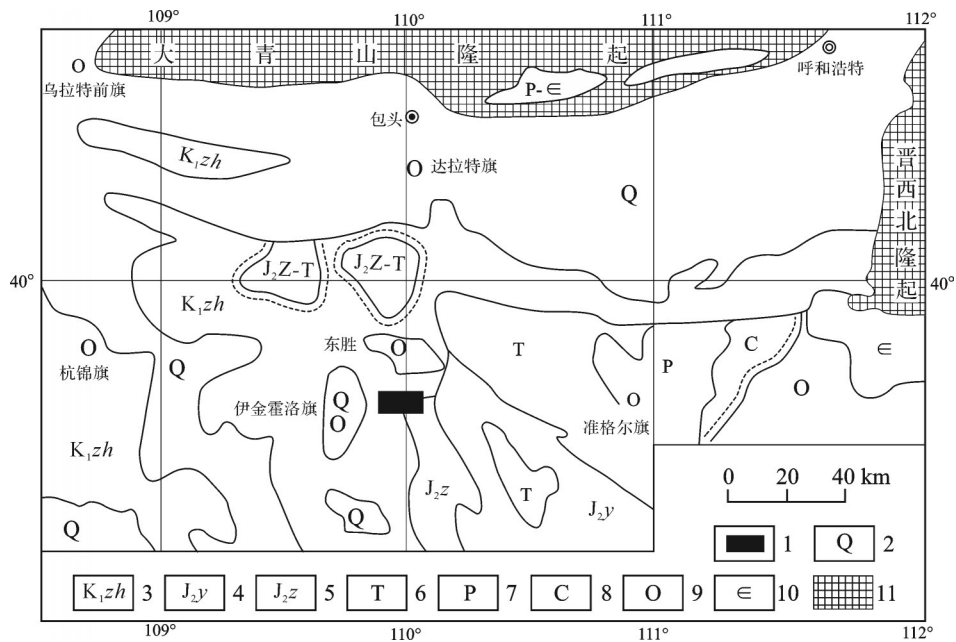


图1 鄂尔多斯盆地东胜地区地质略图^[21]

Fig.1 Brief geological map of the Dongsheng area^[21]

表1 岩石样品参数

Table 1 Parameters of the samples

样品编号	样品位置	岩性	铀品位/ 10^{-6}	有机碳/%
ZHH-01	氧化带	泥岩	5.80	3.23
ZHH-02	氧化带	碳质泥岩	18.60	11.35
SJL-01	氧化—还原带	泥质粉砂岩	29.40	2.58
SJL-02	氧化—还原带	灰白色中砂岩	180.30	0.89
SSGT-01	还原带	灰色矿化砂岩	245.10	0.68
SSGT-02	还原带	灰绿色砂砾岩	212.80	0.36

2.2 SRB的富集培养

依据参考文献配制硫酸盐还原菌培养基: Starkey 培养基(STK)^[22-23],富集得到菌体后利用微生物方法进行分离鉴定工作。

2.3 SRB的计数

最大可能数量法(MPN法)^[24]。

2.4 生长曲线的制作

依据测定硫离子浓度制作SRB生长曲线^[25]。

2.5 SRB的分离、鉴定

细菌分离方法参照文献[22-23]进行,并依据《伯杰细菌鉴定手册》(第八版)进行鉴定。

2.6 实验系统中各成分的分析测定方法

(1) 岩石中铀的测定方法

依据 EJ 349.2—1988 岩石中微量铀的分析方法进行检测。

(2) 水中铀的测定方法

依据 GB/T6768—1986 水中微量铀分析方法进行检测。

(3) 岩石中有机碳测定方法

依据 DZ48—1987 岩石中有机碳分析方法进行检测。

(4) pH值测定方法

依据 DZ/T0064.5—1993 地下水水质检测方法进行检测。

(5) Eh值测定方法

依据 DZ/T0064.7—1993 地下水水质检测方法进行检测。

(6) H₂S测定方法

用醋酸锌溶液吸收H₂S,再用碘量法滴定。

2.7 SRB对铀矿地下水水质影响

为验证SRB对铀矿地下水中的铀具有还原作用,从研究区三个点取地下水样(成分分析见表2),立即放入高压灭菌过的BOD(生物需氧量)瓶中,以防止与空气接触。带回实验室等比混合后,再按体积比例加入20%STK培养基,为SRB提供其生长代谢所需营养成分,同时可提高实验速度,置灭菌锅

121℃灭菌30min,消除水中其他微生物的因素干扰,冷却后在超净工作台分别接种分离得到的各种SRB,以比较它们对铀的还原能力。同时做无菌实验液空白对照,以排除STK培养基的非生物因素干扰。用无菌液体石蜡隔氧情况下28℃恒温静置培养,45天后进行检测。

2.8 SRB对铀的固定机制实验

2.7实验完成后,取部分菌液,用离心机4000rpm离心20min,获取细胞后检测菌体细胞携带的铀含量。

2.9 SRB—水—岩成矿模拟实验

为模拟矿床天然状态下菌—水—岩的生物地球化学反应在成矿中的作用,分别在表1不同岩石样中按照固液比1:1加入地下水混合液,121℃灭菌30min后,定量接入SRB混合菌液;同时做无菌的水—岩空白对照,以排除实验体系中非生物因素的干扰。用无菌液体石蜡液封后置28℃恒温静置培养,60天后对各成分进行检测。

3 结果与讨论

3.1 各亚带岩石样品中SRB的分布

对各亚带岩石样品中的SRB种类分布和菌株数量进行研究。结果见表3。

从铀矿岩石样品中共分离得到了68株SRB,对它们分纯后鉴定至种,可知它们分别属于脱硫弧菌属(*Desulfovibrio*)的脱硫脱硫弧菌(*D. densulfuricans*)和普通脱硫弧菌(*D. vulgaris*),以及脱硫肠状菌属(*Desulfotomaculum*)的东方脱硫肠状菌(*D. orientis*) (图2)。其中*D. densulfuricans*和*D. vulgaris*尺寸为(0.5~1)×3 μm,弯杆状或弧形,单端丛生鞭毛,不形成芽孢,革兰氏染色阴性,有机化能异养菌,以厌氧呼吸还原硫或其它可还原的硫化物为H₂S获取能量,能使含铁盐的培养基变黑,常和沉淀的FeS有关,在含有过量亚铁盐的硫酸盐洋菜中,可产生全黑的圆形菌落,最适生长温度25℃~30℃,但与菌体所生

表2 铀矿地下水成分分析

Table 2 Analysis of groundwater composition in uranium deposit

成分	Ca ²⁺ /(mg·L ⁻¹)	Mg ²⁺ /(mg·L ⁻¹)	K ⁺ /(mg·L ⁻¹)	Na ⁺ /(mg·L ⁻¹)	Cl ⁻ /(mg·L ⁻¹)	SO ₄ ²⁻ /(mg·L ⁻¹)	HCO ₃ ⁻ /(mg·L ⁻¹)	pH	U/(μg·L ⁻¹)
水样-1	496	215	15	1 459	2 120	2 319	168	7.57	22.49
水样-2	571	248	19	1 837	2 384	2 693	193	8.08	25.15
水样-3	583	251	17	1 618	2 243	2 542	155	7.90	22.20
混合液	550	238	17	1 638	2 249	2 518	172	7.85	23.28

表3 铀矿岩石样品中SRB分布
Table 3 Distribution of SRB in the uranium deposit

标准种名		脱硫脱硫弧菌 <i>D. densulfuricans</i>	普通脱硫弧菌 <i>D. vulgaris</i>	东方脱硫肠状菌 <i>D. orientis</i>
菌株数	氧化带	9	7	6
	氧化—还原带	5	0	15
	还原带	0	0	26

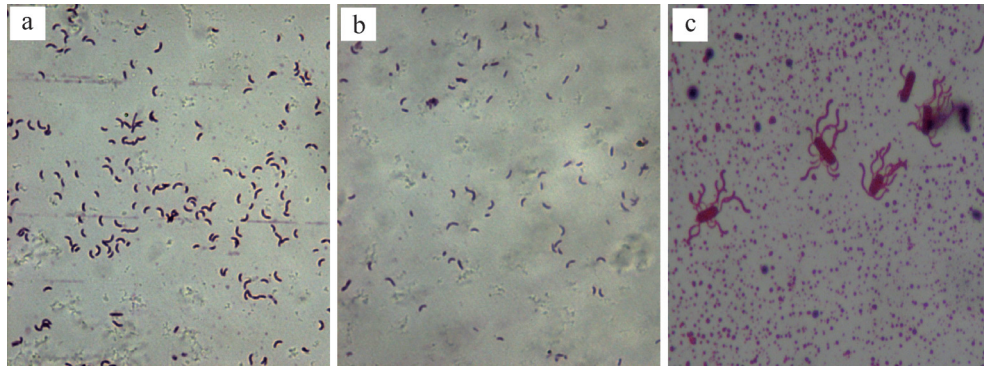


图2 SRB显微摄像图(×1000)

(a) *Desulfovibrio densulfuricans*; (b) *D. vulgaris*; (c) *D. orientis*

Fig.2 Microphotographs of SRB(×1000)

环境有关。*D.orientis*呈直杆状,约 $3\ \mu\text{m}\times 6\ \mu\text{m}$,周生鞭毛,为严格厌氧的革兰氏阴性菌,同样可在含硫酸盐培养基中可产生 H_2S ,最适生长温度 $35\ \text{℃}\sim 55\ \text{℃}$,最高可达 $70\ \text{℃}$,可在 $30\ \text{℃}$ 以下生长。

从表3中数据可以看出,三者分布具备一定的生物地球化学分带性,*D.densulfuricans*主要分布于氧化带和氧化—还原带,还原带未有分布,*D.vulgaris*仅在氧化带有分布,而*D.orientis*在三个亚带均有分布,而且数量相比较前两者更大。结合它们各自的理化特点可以发现,两个属的菌差别主要在最适生长温度和是否可产生芽孢两方面,每种微生物都有自己的最适生长温度,*D.orientis*具有更宽的最适温度范围,同时对于高温的耐受能力明显强于*D.densulfuricans*和*D.vulgaris*,而对于高温的耐受能力和其自身可产生芽孢有关,芽孢的独特结构有助于菌体抵抗高温、电离辐射和有毒成分等不良环境,为菌体能在矿床的广泛存在提供了保障,不具备芽孢结构的菌体,在遇到不适合自身生长的环境时,其适应力明显不足,尤其是在还原带含铀量高的环境,铀的毒性和电离辐射导致其在还原带不易存活。另外菌体的分布也和矿石的含碳量有关,氧化带有机碳含量丰富,为各种SRB的生长繁殖提供了物质基础,所以菌体种类较多。

3.2 SRB对地下水中铀的还原结果分析

从表4中实验数据可以看出,无菌的STK本身可影响铀的还原率,扣除此非生物因素后,仍然可以明显看到SRB对铀的还原作用,菌体利用STK中的营养成分繁殖,在代谢过程中导致环境pH上升,Eh下降,产生 H_2S 。三个有菌实验体系比较而言,还原能力最强的为*D.orientis*,这是因为其菌体结构决定了其具备更强的环境适应能力,保证其大量增殖后具备群体的数量优势,是东胜铀矿床中的优势种群。

此实验证明微生物的活动可以通过改变自然水环境的化学性质(pH、氧化还原电位, H_2S),通过产生还原作用或通过直接在细胞上或细胞内积累来影响铀的状态^[26]。

为研究分离到的三个种的菌株的生长规律,在实验过程中,每隔5天检测试验系统中菌体数量,求对数后对时间做菌体对数生长曲线,如图3所示,从图中可知分离纯化后的SRB可能因失去了共生微生物的协同作用,它们在地下水中生长繁殖速度相对常见微生物要慢,延滞期为10~20天,*D.orientis*因具有芽孢结构,适应力较强,延滞期相对较短,大约10天后菌体适应了含铀环境,进入增速很快的对数期,并且将数量优势一直保持到试验结束,这和它导致的铀的高还原率的实验结果相符;对数期是菌体最为活跃的时期,代谢活跃,新生成的数量远大于死

表4 SRB对地下水中U(VI)的还原作用
Table 4 Reduction of U(VI) in groundwaters by SRB

系统组成	U还原率/%	菌体携U率/%	菌数 _初 /(个·mL ⁻¹)	菌数 _终 /(个·mL ⁻¹)	pH _初	pH _终	Eh _初 /mV	Eh _终 /mV	H ₂ S/(mg·L ⁻¹)
H ₂ O+STK	16.29	—	—	—	7.20	7.15	179.50	180.30	0.85
H ₂ O+STK+ <i>D.densulfuricans</i>	26.40	2.85	500	6 500	7.20	8.38	175.30	-69.30	63.52
H ₂ O+STK+ <i>D.vulgaris</i>	23.16	2.59	500	5 500	7.20	8.29	176.50	-65.10	58.21
H ₂ O+STK+ <i>D.orientis</i>	47.33	4.26	500	13 000	7.20	8.73	175.70	-95.80	125.73

亡的数量,它们充分利用环境中的营养成分合成自身所需成分;随着菌体数量的增加和环境中营养成分的降低,新生成的菌体数量和死亡的菌体逐渐呈现动态平衡,活菌数达到最高峰,此时期是菌群对环境改造能力最强的时期;随着时间推移,环境中营养成分已经不足以满足菌体的大量需求,同时菌体代谢后形成的副产物越来越多,菌体进入衰亡期,并最终完成完整的生命周期。需要说明的是,实验设计的系统为静止和封闭的环境,不存在和外界的物质和能量传递,和天然状态下的动态稳定的环境存在较大差别,这种差别类似于微生物的分批培养和连续培养。自然状态的环境处于相对动态的平衡,可为SRB持续的提供营养成分,同时把有害物质稀释,其稳定期会持续更久,所以它们对成矿的贡献应大于模拟实验检测的数据。

3.3 SRB对铀的固定机制结果分析

研究表明,微生物群体有固定金属的能力。不同微生物固定金属的机制主要包括:1)沉淀代谢物于细胞内或者细胞表面及胞外聚合物内;2)与表面吸收或离子吸附有关的被动积累;3)与磷酸盐等无机配体反应沉淀;4)促进不溶化合物沉淀于细胞外部;5)还原可溶性金属形成无机矿物^[27-29]。

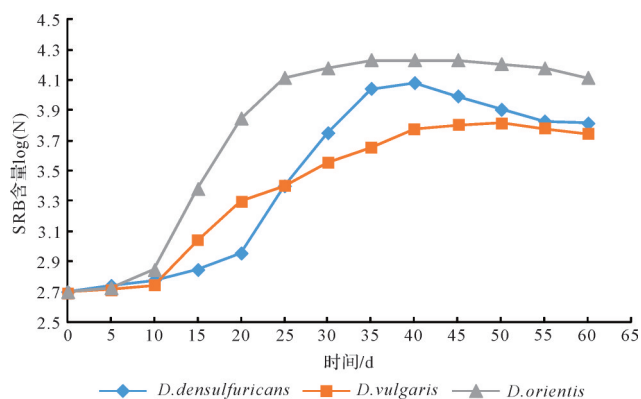
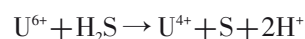
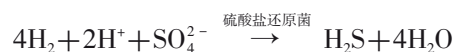


图3 SRB生长曲线(SRB含量随时间的变化情况)

Fig.3 SRB growth curve (SRB content changes vs. time)

为验证SRB在成矿中的机制,将还原铀实验液经离心后收集细胞,检测铀在菌体细胞内外的携带量,数据表明菌体细胞中铀的携带量仅为液体中铀减少量的10%左右,再排除纯化学作用在成矿中的影响因素,基本可以确定SRB通过产生的H₂S的还原作用,促使铀从地下水向岩石中沉淀富集,是微生物成矿中的主要影响因素。

SRB适合在pH中性或偏碱性的环境中存在。它们以环境中赋存的有机质作为氧化介质,氧化放出的电子将周围的SO₄²⁻还原为H₂S,从中获取其生长繁殖和代谢所需要的能量^[30]。产生的H₂S能将U(VI)还原为U(IV)。



这种菌—铀相互作用机制的存在,不仅通过氧化还原或改变流动性、溶解度来改善铀的环境分布,而且保证了微生物在不断变化的环境中的适应性。所有这些相互作用机制最终改变了铀的流动性^[31]。

3.4 SRB—水—岩成矿模拟实验结果分析

从表5中数据可以看出,6个矿石样分别做了有菌/无菌对照试验,有菌组对照无菌组数据进行比较,铀的还原率明显更高,对有菌实验组菌数量级进行定量计算,发现6组中的菌数均呈现数倍增长,说明SRB可以利用岩石中赋存的营养成分进行生长繁殖,在其生命过程中改变环境诸多因素,如pH上升、氧化还原电位下降、产生H₂S气体等有规律可循的现象,而无菌对照组各数据实验前后未发现明显改变。

对6组有菌模拟实验系统横向对比可以发现,前三组模拟系统中菌数增长相对较多,后三组有增长但相对较少,结合岩石样成分及SRB生理特点进行分析,这些细菌在还原反应中多利用有机物作为电子供体,也有一些利用氢作为电子供体,因此岩样中

表5 SRB对U(VI)的还原作用
Table 5 Reduction of U(VI) by SRB

模拟系统组成	U还原率/%	SRB _初 /(个·mL ⁻¹)	SRB _终 /(个·mL ⁻¹)	pH _初	pH _终	Eh _初 /mV	Eh _终 /mV	H ₂ S/(mg·L ⁻¹)
H ₂ O+ZHH-01	1.30	—	—	7.20	7.23	-3.90	-4.10	0.05
H ₂ O+ZHH-01+SRB	8.50	500	2 500	7.20	8.03	-3.90	-39.50	5.22
H ₂ O+ZHH-02	0.80	—	—	7.20	7.22	-4.10	-4.50	0.03
H ₂ O+ZHH-02+SRB	12.6	500	4 000	7.20	8.23	-4.10	-52.60	7.45
H ₂ O+SJL-01	2.50	—	—	7.20	7.19	-4.20	-4.80	0.04
H ₂ O+SJL-01+SRB	9.30	500	3 000	7.20	8.12	-4.20	-43.00	5.79
H ₂ O+SJL-02	2.10	—	—	7.20	7.16	-4.00	-4.20	0.03
H ₂ O+SJL-02+SRB	4.50	500	1 500	7.20	7.45	-4.00	-15.80	3.35
H ₂ O+SSGT-01	2.50	—	—	7.20	7.18	-3.90	-4.10	0.04
H ₂ O+SSGT-01+SRB	4.20	500	1 500	7.20	7.54	-3.90	-23.60	3.68
H ₂ O+SSGT-02	2.40	—	—	7.20	7.26	-3.70	-3.80	0.05
H ₂ O+SSGT-02+SRB	3.90	500	1 500	7.20	7.61	-3.70	-18.30	3.29

有机物含量在一定程度上影响着SRB的生长和繁殖;同时菌体数目和铀含量呈反比,可见铀的浓度对SRB有一定影响。尽管铀对大部分生物有明显的毒性和放射性,但是在研究中发现许多微生物仍能存活,尤其是具芽孢的*D.orientis*,可在富含铀的环境中大量繁殖,应为长期共存对环境的适应后不断进化的结果。除具备被动适应能力外,SRB还通过自身生化反应来主动改变铀的可溶状态,促使菌体周围微环境中铀浓度减小,达到自我保护的目的,此过程导致铀的流动性减少并最终沉积于岩石中。这种金属元素在可溶相和不可溶相之间的转变也是金属生物地球化学的核心,为微生物反应和元素循环之间提供了直接的联系。由此可见,微生物与铀的相互作用是极其重要的,并且在成矿作用方面,成为除物理和化学外的第三大重要因素^[32]。

4 结论

矿物和岩石是微生物在各种维度上相互作用的最基本的地球物质,矿物质和岩石为微生物提供了营养和栖息地,微生物在与离子或者矿物元素及有机物的得失电子的作用(氧化还原作用)中完成它自己的新陈代谢活动进而得以生存,是地质化学过程中活跃物质的生产者和消费者,它们通过对矿物溶解度和物质迁移来影响岩石和矿物的风化和成岩作用。

(1) 通过对东胜砂岩型铀矿床中最主要的微生物类型——SRB的赋存种类以及它们在成矿过程中的模拟实验,发现SRB的分布与矿床分带性和围岩环境中各因素有密切关系,环境中营养物为菌体生

长繁殖的限制因子,SRB通过与矿床长期共存提高了自身对不良环境的适应能力,还能从环境中汲取所需营养时通过自身生化反应主动改变铀的价态和溶解度,改善菌体所处环境的微生态,最终促使了铀元素从地下水向岩石的沉淀、析出和矿化。

(2) 成矿作用包括了物理成矿、化学成矿和生物成矿以及它们的协同作用,微生物在成矿过程中发挥了多大的作用,还有待于通过多因素模拟实验进一步研究。微生物和物理、化学因素的协同成矿作用丰富了国内砂岩型铀矿成矿的理论,对于通过微生物分布规律找矿、铀矿地浸开采和退役铀矿地下水污染治理同样具有参考价值。

参考文献(References)

- [1] Xu J M, Sparks D L. Molecular environmental soil science[M]. Netherlands: Springer, 2013: 115-165.
- [2] 阎葆瑞,张锡根. 微生物成矿学[M]. 北京:科学出版社,2000: 1-70. [Yan Baorui, Zhang Xigen. Microbial metallogeny [M]. Beijing: Science Press, 2000: 1-70.]
- [3] 朱西养,汪云亮,王志畅,等. 东胜砂岩型铀矿微量元素地球化学特征初探[J]. 地质地球化学,2003,31(2):39-45. [Zhu Xi-yang, Wang Yunliang, Wang Zhichang, et al. Trace element geochemistry of sandstone-type uranium deposits in Dongsheng area [J]. Geology-Geochemistry, 2003, 31(2): 39-45.]
- [4] Woolfolk C A, Whiteley H R. Reduction of inorganic compounds with molecular hydrogen by *Micrococcus lactilyticus*. I. Stoichiometry with compounds of arsenic, selenium, tellurium, transition and other elements[J]. Journal of Bacteriology, 1962, 84(4): 647-658.
- [5] Lovley D R, Phillips E J P, Gorby Y A, et al. Microbial reduction of uranium[J]. Nature, 1991, 350(6317): 413-416.
- [6] Lovley D R. Dissimilatory metal reduction[J]. Annual Review

- of Microbiology, 1993, 47: 263-290.
- [7] Abdelouas A, Lu Y M, Lutze W, et al. Reduction of U(VI) to U(IV) by indigenous bacteria in contaminated ground water [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 1998, 35(1/2/3): 217-233.
- [8] 史维浚. 铀的水文地球化学循环与生物地球化学循环[J]. *华东地质学院学报*, 1989, 12(2): 79-86. [Shi Weijun. The hydrogeochemical circle and the biogeochemical circle of uranium [J]. *Journal of East China College of Geology*, 1989, 12(2): 79-86.]
- [9] Barton L L, Fauque G D. Biochemistry, physiology and biotechnology of sulfate-reducing bacteria [J]. *Advances in Applied Microbiology*, 2009, 68: 41-98.
- [10] Lloyd J R. Microbial reduction of metals and radionuclides [J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 2003, 27(2/3): 411-425.
- [11] 黄建新, 耿海波, 乔海明, 等. 十红滩铀矿床中微生物及其成矿作用实验研究 [J]. *沉积学报*, 2006, 24(3): 394-398. [Huang Jianxin, Geng Haibo, Qiao Haiming, et al. Microbe in the Shihongtan uranium deposit and their metallogenic significance [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2006, 24(3): 394-398.]
- [12] 冯晓异, 黄建新, 王士艳, 等. 铀的生物成矿作用及成矿过程中矿质元素循环 [J]. *微生物学杂志*, 2007, 27(3): 77-82. [Feng Xiaoyi, Huang Jianxin, Wang Shiyan, et al. Biomineralization of uranium and the cycle of mineral elements during the mineralization process [J]. *Journal of Microbiology*, 2007, 27(3): 77-82.]
- [13] 冯晓异, 黄建新, 乔海明. 十红滩铀矿床中微生物种类多样性及生态分布规律的研究 [J]. *矿物学报*, 2008, 28(3): 276-284. [Feng Xiaoyi, Huang Jianxin, Qiao Haiming. Study on microbial diversity and ecological distribution in the Shihongtan sandstone-type uranium deposit [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2008, 28(3): 276-284.]
- [14] 乔海明, 张复新, 耿海波, 等. 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*, 2006, 52(5): 636-641. [Qiao Haiming, Zhang Fuxin, Geng Haibo, et al. 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*, 2006, 52(5): 636-641.]
- [15] 乔海明, 徐高中, 张复新, 等. 层间氧化带砂岩型铀成矿过程中铁的地球化学行为: 以新疆吐鲁番盆地十红滩铀矿床为例 [J]. *沉积学报*, 2013, 31(3): 461-467. [Qiao Haiming, Xu Gaozhong, Zhang Fuxin, et al. Study on iron geochemical behavior in the interlayer oxidation zone sandstone-type uranium metallogenetic process: A case from Shihongtan uranium deposit in the Turpan-Hami basin of Xinjiang [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(3): 461-467.]
- [16] Cai C F, Dong H L, Li H T, et al. Mineralogical and geochemical evidence for coupled bacterial uranium mineralization and hydrocarbon oxidation in the Shashagetai deposit, NW China [J]. *Chemical Geology*, 2007, 236(1/2): 167-179.
- [17] 姜磊, 蔡春芳, 张永东, 等. 东胜铀矿床中发现硫酸盐还原菌和硫化菌类脂 [J]. *科学通报*, 2012, 57(12): 1028-1036. [Jiang Lei, Cai Chunfang, Zhang Yongdong, et al. Lipids of sulfate-reducing bacteria and sulfur-oxidizing bacteria found in the Dongsheng uranium deposit [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(12): 1028-1036.]
- [18] 冯晓曦, 滕雪明, 何友宇. 初步探讨鄂尔多斯盆地东胜铀矿田成矿作用研究若干问题 [J]. *地质调查与研究*, 2019, 42(2): 96-103, 108. [Feng Xiaoxi, Teng Xueming, He Youyu. Preliminary discussions on the metallogenesis of the Dongsheng uranium orefields in the Ordos Basin [J]. *Geological Survey and Research*, 2019, 42(2): 96-103, 108.]
- [19] 焦泉养, 陈安平, 王敏芳, 等. 鄂尔多斯盆地东北部直罗组底部砂体成因分析: 砂岩型铀矿床预测的空间定位基础 [J]. *沉积学报*, 2005, 23(3): 371-379. [Jiao Yangquan, Chen Anping, Wang Minfang, et al. Genetic analysis of the bottom sandstone of Zhiluo Formation, northeastern Ordos Basin: Predictive base of spatial orientation of sandstone-type uranium deposit [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2005, 23(3): 371-379.]
- [20] 薛伟, 薛春纪, 池国祥, 等. 鄂尔多斯盆地东胜砂岩型铀矿微量和稀土元素地球化学特征 [J]. *现代地质*, 2010, 24(4): 776-784. [Xue Wei, Xue Chunji, Chi Guoxiang, et al. Trace element and REE geochemical characteristics of sandstone-type uranium deposit in the Dongsheng area of the Ordos Basin, China [J]. *Geoscience*, 2010, 24(4): 776-784.]
- [21] 李金宝, 车明, 李鑫, 等. 鄂尔多斯盆地东胜铀矿成矿作用研究 [J]. *地球科学与环境学报*, 2006, 28(2): 37-40. [Li Jinbao, Che Ming, Li Xin, et al. Preliminary study on metallization of Dongsheng U ore in Ordos Basin [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2006, 28(2): 37-40.]
- [22] 陈绍铭, 郑福寿. 水生微生物学实验法 [M]. 北京: 海洋出版社, 1985: 87-239. [Chen Shaoming, Zheng Fushou. Experiment of aquatic microorganism [M]. Beijing: Ocean Press, 1985: 87-239.]
- [23] 郑士民, 颜望明, 钱新民. 自养微生物 [M]. 北京: 科学出版社, 1983: 187-189. [Zheng Shimin, Yan Wangming, Qian Xinmin. Autotrophic microorganism [M]. Beijing: Science Press, 1983: 187-189.]
- [24] Gooch J W. Encyclopedic dictionary of polymers [M]. New York: Springer, 2007.
- [25] 赵波, 李冬菊, 贺承祖. 根据生长过程中溶液硫离子浓度的变化测量硫酸盐还原菌的生长曲线 [J]. *新疆石油天然气*, 2012, 8(1): 86-89. [Zhao Bo, Li Dongju, He Chengzu. The determination of sulfate-reducing bacteria growth curve based on sulfur concentration changes in growth process [J]. *Xinjiang Oil & Gas*, 2012, 8(1): 86-89.]
- [26] Keith-Roach M J, Livens F R. Interactions of microorganisms with radionuclides [M]. London: Elsevier Sciences, 2002.

- [27] Ehrlich H L. Microbes as geologic agents: Their role in mineral formation [J]. *Geomicrobiology Journal*, 1999, 16 (2) : 135-153.
- [28] Gorby Y A, Lovley D R. Enzymatic uranium precipitation[J]. *Environmental Science & Technology*, 1992, 26(1): 205-207.
- [29] Renninger N, Knopp R, Nitsche H, et al. Uranyl precipitation by *Pseudomonas aeruginosa* via controlled polyphosphate metabolism[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2004, 70(12): 7404-7412.
- [30] 阎葆瑞,张锡根. 微生物成矿学[M]. 北京:科学出版社, 2000: 1-6. [Yan Baorui, Zhang Xigen. *Microbial metallogeny* [M]. Beijing: Science Press, 2000: 1-6.]
- [31] Gadd G M. Microbial influence on metal mobility and application for bioremediation [J]. *Geoderma*, 2004, 122 (2/3/4) : 109-119.
- [32] Gadd G M. Microbial role in global biogeochemical cycling of metals and metalloids at the interfaces in the earth's critical zone [M]//Xu J M, Huang P M. *Molecular environmental soil science at the interfaces in the earth's critical zone*. Berlin: Springer, 2010.

Simulation Study of Mineralization of Sulfate-reducing Bacteria in Dongsheng Sandstone-type Uranium Deposit

GENG HaiBo¹, SHI MingChuan², FU ShiQian², AN LiPing^{3,4}

1. Department of Food and Drug Engineering, Shijiazhuang University of Applied Technology, Shijiazhuang 050081, China

2. Sixth Geological Brigade, Hebei Geological and Mining Bureau, Shijiazhuang 050085, China

3. Basic Medical College, Hebei University of Chinese Medicine, Shijiazhuang 050200, China

4. Hebei Key Laboratory of Chinese Medicine Research on Cardio-Cerebrovascular Disease, Shijiazhuang 050200, China

Abstract: A biological analysis of rock samples in Dongsheng sandstone-type uranium deposits found that different species of sulfate-reducing bacteria (SRB) occurred in various regions of the uranium deposit. Their distributions are closely related to the environmental factors of the deposit. The interactions of growth, reproduction and metabolism of SRB and uranium ore formation was studied by carrying out reduction experiments of uranium in groundwater and simulated SRB-water-rock mineralization. These showed that SRB formed a micro-ecological reducing environment beneficial to its survival, which altered the valence and solubility of the uranium and directly led to the formation of the Dongsheng sandstone-type uranium deposit.

Key words: sandstone-type uranium deposit; anaerobic; SRB; simulated mineralization