

嗜麦芽糖寡养单胞菌 H002 对铀的生物吸附

陈天宇, 孙 敏, 冯 红
(四川大学生命科学学院, 成都 610065)

摘 要: 为处理铀元素造成的大规模水体污染,本研究拟采取生物治理的策略,以微生物吸附的方法来达到去除铀污染的目的. 本实验从 142 株具有辐射抗性的细菌分离物中,筛选并鉴定到一株对重金属铀具有高度耐受能力的菌株 H002;经 16s rRNA 和生理生化鉴定,确定 H002 属于嗜麦芽糖寡养单胞菌(*Stenotrophomonas maltophilia*). 通过不同参数条件下的吸附实验表明,该菌在 TGY 培养基中培养 12 h 的细胞,对铀的吸附量最大;其中细胞表面的羧基参与铀的吸附;此外,不同阴、阳离子和表面活性剂会影响 H002 细胞对铀的吸附,其中十二烷基硫酸钠(Sodium dodecyl sulfate)可以促进对铀的吸附,而高浓度 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 离子则抑制铀的吸附. 本研究最终得到了一株具有铀耐受能力并能吸附铀的菌株 H002,具有作为清除铀污染生物材料的潜力.

关键词: 嗜麦芽糖寡养单胞菌; 铀; 生物吸附; 生物治理

中图分类号: Q93 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19907/j.0490-6756.2021.056002

Biosorption of uranium by *Stenotrophomonas maltophilia* H002

CHEN Tian-Yu, SUN Min, FENG Hong
(College of Life Sciences, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In order to deal with the large-scale water pollution caused by uranium, a strategy of biological treatment, and a method of microbial adsorption is used to achieve the purpose of removing uranium pollution in this research. In this study, a strain H002 with high tolerance to heavy metal uranium was selected from 142 isolates of radiation-resistant bacteria, which can stably tolerate up to 150 mg/L U (VI). After 16s rRNA, physiological and biochemical identification, it was determined the H002 belonged to *Stenotrophomonas maltophilia*. Adsorption experiments under different parameters showed that the maximum adsorption capacity of uranium by H002 cells reached 240 mg/g (dry weight cells) when the cells were collected from 12 h-culture in TGY. The carboxyl group on the cell surface was shown to contribute to uranium adsorption by H002. In addition, different anions, cations and surfactants could affect the adsorption of uranium by H002 cells. Among them, sodium dodecyl sulfate could promote the adsorption of uranium, while high concentrations of CO_3^{2-} and HCO_3^- ions inhibited adsorption. This study finally obtained a *Stenotrophomonas maltophilia* H002 that can tolerate and adsorb uranium, which has the potential to be a biological material for clearing uranium pollution.

Keywords: *Stenotrophomonas maltophilia*; Uranium; Biosorption; Biological treatment

收稿日期: 2021-02-08
基金项目: 四川省支撑计划项目(2016NZ0106)
作者简介: 陈天宇(1994—), 男, 四川成都人, 硕士研究生, 研究方向为分子遗传学与基因工程. E-mail: 851803678@qq.com
通讯作者: 冯红. E-mail: hfeng@scu.edu.cn

1 引言

铀的原子序数为 92,元素符号为 U,相对原子质量 238.03 Dalton,属锕系金属,是在自然界中能找到的最重的金属物质^[1]. 铀的天然同位素有三种,分别是 U235、U234 和 U238 且都具有放射性,三者中丰度最高的 U238 为 99.28%,最低的 U234 为 0.006%. 这三种同位素都有极长的半衰期,分别为 (U238) 4.51×10^9 、(U235) 7.09×10^8 和 (U234) 2.35×10^5 年^[2].

铀作为一种重要的核燃料,是核工业不可缺少的重要资源,但是铀也是一种具有强烈化学毒性和放射性的元素,其污染对自然环境和生物可能带来较大的危害. 近年来,随着核工业的发展,对铀的需求越来越多,可溶性铀带来的原位污染及其容易进入其他环境的迁移性^[3],已成为人类所面临的重大环境挑战. 现有的铀污染治理方法可分为物理修复和化学修复,物理修复法主要依靠土壤封埋来处理污染物,而化学修复法则主要是通过化学物质淋洗的方式来处理铀污染^[4-5]. 但无论是化学修复法还是物理修复法,都因其成本、有效程度、易造成二次污染等原因存在着局限. 因此,为了更好的实现对铀污染的控制,生物修复的方法逐渐开始进入人们的视线.

在铀污染的治理材料中,微生物拥有得天独厚的优势,微生物生长迅速,几小时即可繁殖一代,且不具化学毒性不会对环境造成二次污染. 有报道称微生物中藻类、细菌、真菌和酵母都可以对金属元素进行吸附,可以发展成为一种环保、高效的铀污染治理材料^[6-8]. 微生物细胞的表面吸附通常是指作为阳离子的铀酰离子与细胞表面的阴离子配体结合,该过程主要涉及静电吸附与表面络合. 部分微生物可以通过代谢活动在自身的细胞壁外产生名为胞外聚合物(EPS)的大分子物质,EPS 主要由多糖、蛋白质、腐殖质、糖醛酸、核酸和脂质组成,并且含有羧基、磷酸基团等官能团^[9-11]. 它可以作为细胞抵御恶劣外部环境的屏障,也能为螯合铀离子提供潜在的结合位点. 除了 EPS 之外,细胞表面自身还含有丰富的官能团,这也有助于对铀元素的吸附. 本研究通过对 142 株具有辐射抗性的细菌分离物进行筛选,得到了一株好氧的、具有较高辐射抗性并能够高效吸附可溶性铀的嗜麦芽糖寡氧单胞菌 H002,并分析了其与铀的相互作用,为发展铀污染的生物治理提供帮助.

2 材料和方法

2.1 材料

2.1.1 菌种 嗜麦芽糖寡养单胞菌(*Stenotrophomonas maltophilia*) H002 菌株由本实验室从⁶⁰Co 辐照场中分离所得,并保存.

2.1.2 试剂及培养基 TGY 培养基(1 L):蛋白胨 5 g,酵母粉 3 g,葡萄糖 1 g.

偶氮胂Ⅲ溶液(0.1% w/v):将 100 mg 的偶氮胂Ⅲ [2,7-双(2-苯胂酸-1-偶氮)变色酸]试剂溶解在 100 mL 的 10%乙醇中.

标准铀溶液(1 g/L):1.78 g 乙酸铀酰加水溶解后定容至 1 000 mL.

其它试剂:乙酸铀酰购于奥克公司;Trizol 试剂购于 Invitrogen;溶菌酶购于上海懋康生物科技有限公司;DNase I 购于大连宝生物;Taq DNA 聚合酶购于南京诺唯赞.

2.2 方法

2.2.1 耐铀细菌分离物的筛选 将活化后的 142 株细菌分离物按 1%的接种量接种到 1 mL 至于 96 孔深孔板的含铀 TGY 培养基中,并设置不加铀的空白对照,每隔 12 h 取 100 μ L 菌液用酶标仪测定其 600 nm 波长处的光密度值,以此绘制 0~72 h 的细菌分离物生长曲线,通过比较生长情况筛选耐铀的细菌分离物.

2.2.2 H002 分离物 16S rRNA 扩增及比对 使用细菌 16S rRNA 的保守引物(27F: 5'-AGAGTTTGATCMTGGCTCAG-3'; 1492R: 5'-TACGGYTACCTTGTTACGACTT-3'),挑取少许菌落细胞,采用 PCR 扩增 H002 分离物的 16 s rRNA 基因. 反应条件:95 $^{\circ}$ C 预变性 5 min,94 $^{\circ}$ C 变性 30 s,52 $^{\circ}$ C 退火 30 s,72 $^{\circ}$ C 延伸 120 s,30 个循环,最后 72 $^{\circ}$ C 延伸 10 min. 将 PCR 产物送擎科生物科技有限公司进行 DNA 测序,并与 Ezbiocloud 数据库^[12]进行比对.

2.2.3 *S. maltophilia* 生长曲线的测定 在 50 mL TGY 培养基中接入 0.5 mL 过夜活化的菌液,将培养基置于 200 r/min 的摇床中 30 $^{\circ}$ C 培养,每隔 12 h 取 1 mL 菌液,经适当稀释后用酶标仪测定 600 nm 波长处的光密度值,以此表示细胞密度. 然后将培养不同时间的细胞密度作图,绘制细菌细胞的生长曲线.

2.2.4 偶氮胂Ⅲ法测定铀离子浓度 取铀标准溶液(1.0 g/L),分别稀释至 10 mg/L、20 mg/L、

30 mg/L、40 mg/L、50 mg/L,按照 1:1:1 依次加入 0.5 N 盐酸、偶氮肿Ⅲ试剂,室温显色 3 min,用酶标仪测量 652 nm 的光密度值,根据其 OD_{652} 的数值,绘制标准曲线。

2.2.5 H002 细胞吸附铀的分析测定 将活化后的 *S. maltophilia* 按照 1% 的接种量接入 TGY 液体培养基中 30 ℃,200 r/min 扩大培养 12 h,然后在 4 ℃、5 000 r/min 离心 15 min 收集菌体,并用灭菌的 1 mmol/L 的 NaCl 溶液洗涤三次,将细胞重新悬浮于水,调整细胞浓度到相当于 2 g/L 干重(测定细胞含水量约为 90%)。

然后,在细胞悬液中加入终浓度分别为 200 mg/L、400 mg/L、600 mg/L 的 U(VI)溶液。将菌、铀混合物置于 30 ℃,200 r/min 条件下吸附 24 h。在此期间,定点取样,10 000 r/min 离心 2 min 去除细菌细胞,取上清按照 1:1:1 的比例依次加入 0.5 N 盐酸、偶氮肿Ⅲ试剂,室温显色 3 min,用酶标仪测量 652 nm 的光密度值,根据其 OD_{652} 的数值,按照 2.2.4 所绘制的标准曲线计算铀含量。同时设置不加细胞的对照。按照下列公式计算铀的去除率。

$$\text{铀的去除率} = (\text{对照中铀浓度} - \text{样品残留铀浓度}) / \text{对照铀浓度} \times 100\%$$

2.2.6 细胞不同生长状态对铀吸附的影响 将在 TGY 中活化后的 *S. maltophilia* 细胞,按照 1% 的接种量接入 TGY 液体培养基中,30 ℃,200 r/min 进行扩大培养,分别在培养 8 h、12 h 和 24 h 三个时间点离心收集菌体(4 ℃,5 000 r/min 离心 15 min),用灭菌的 1 mmol/L NaCl 溶液洗涤三次洗去残存培养基。然后配制 500 mg/L 的标准铀溶液,分别与相当于干重 1 g/L 的细菌细胞混合。最后将反应体系放在 30 ℃,200 r/min 的条件下作用 4 h 后测定上清中的铀含量。

2.2.7 共存离子对铀吸附的影响 配制标准铀浓度 300 mg/L,分别加入终浓度为 1 mmol/L 和 5 mmol/L 的 K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Mn^{2+} 阳离子和 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2+} 、 HCO_3^- 阴离子,然后与 H002 细胞(相当于 1 g/L 的干重)混合,30 ℃,200 r/min 反应 14 h。最后,取样测定上清中残余的铀含量。

2.2.8 不同表面活性剂对铀吸附的影响 使用铀浓度为 300 mg/L 的铀(VI)溶液分别配置 0.1% 和 0.5% 的 SDS、Triton-X100、Tween-80 溶液,将

S. maltophilia 按照 1 g/L 的干重加入到上述溶液中 30 ℃,200 r/min 作用 14 h,取样测定残余铀浓度。

2.2.9 羧基酯化反应 将 5.4 mL 浓盐酸和 10 mL 无水乙醇混合均匀,与相当于干重为 0.1 g 的 *S. maltophilia* 细菌混合,放置于 37 ℃摇床中,200 r/min 反应 4 h,再用灭菌的超纯水反复洗涤三次,离心收集细胞沉淀,再用 250 mg/L 的 U(VI)溶液重新悬浮,置于 37 ℃,200 r/min 反应 24 h,最后取样,测定上清中残留的铀浓度。

2.2.10 氨基乙酰化反应 将乙醇和乙酸酐按照 10:1 的比例混合,取 10 mL 混合液加入到相当于干重 0.1 g 的 *S. maltophilia* 的细菌中,混合均匀,置于 37 ℃摇床中,200 r/min 反应 4 h,用灭菌的超纯水反复洗涤三次,离心沉淀细胞,然后与 250 mg/L 的 U(VI)混合均匀,于 37 ℃,200 r/min 反应 24 h,然后取样测定上清中的铀浓度。

2.2.11 X 射线光电子能谱分析(XPS) 离心收集吸附铀以后的 *S. maltophilia* 细胞(吸附条件:300 mg/L 铀浓度,1 g/L 菌量,12 h 培养的细胞),用超纯水洗涤三次,经-80 ℃预冻,-58 ℃抽真空(真空度 0.180 mbar)主冻 48 h,获得冻干细胞样品,然后使用 XSAM800 X 射线光电子能谱仪分析。

3 结果

3.1 耐铀嗜麦芽糖寡养单胞菌 H002 的筛选与鉴定

本实验室从⁶⁰Co 辐照环境中分离获得了 142 株具有不同辐射抗性的细菌分离物。为了探讨这些抗性细菌在治理放射性重金属离子中的应用潜力,对这 142 株细菌分离物耐受重金属铀的能力进行了筛选。在接种有细菌分离物的 TGY 培养基中,分别加入终浓度为 80 和 150 mg/L 的六价金属铀 [U(VI)],进行了两轮筛选,发现只有细菌分离物 H002 能够在不同程度上,耐受测试的 2 个铀浓度。图 1 显示在 80 mg/L 的 U(VI)胁迫条件下,细菌分离物 H002 细胞的生长动态,从中可以看出,在此浓度的铀并未抑制 H002 细胞的生长。因此,认为 H002 具有耐受 U(VI)的能力。

为了确定筛选到的细菌分离物 H002 的属种,方便后续研究,本研究通过测定 H002 的生理生化特性和 16S rRNA 序列对 H002 进行了鉴定。利用细菌 16S rRNA 保守引物,通过 PCR 技术,扩增出

H002 全长的 16S rRNA 序列,并与 Ezbiocloud^[12] 数据库中的序列进行比对. 结果如图 2 所示, H002 的 16S rRNA 与嗜麦芽糖寡养单胞菌(*Stenotrophomonas maltophilia*)聚类在一起,其序列与 *S. maltophilia* MTCC434 (type) 的 16S rRNA 相似度高达 99% 以上. 因此,根据 16S rRNA 序列初步判断 H002 的分类学地位应属于嗜麦芽糖寡养单胞菌(*S. maltophilia*).

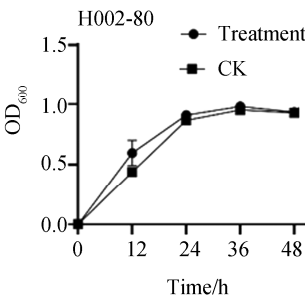


图 1 H002 分离物在 80 mg/L 铀胁迫下的生长曲线
Fig. 1 Growth curves of bacteria isolate H002 under uranium stress (80 mg/L)

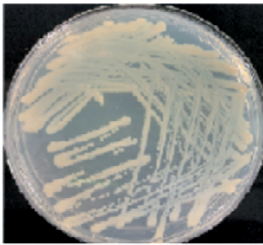
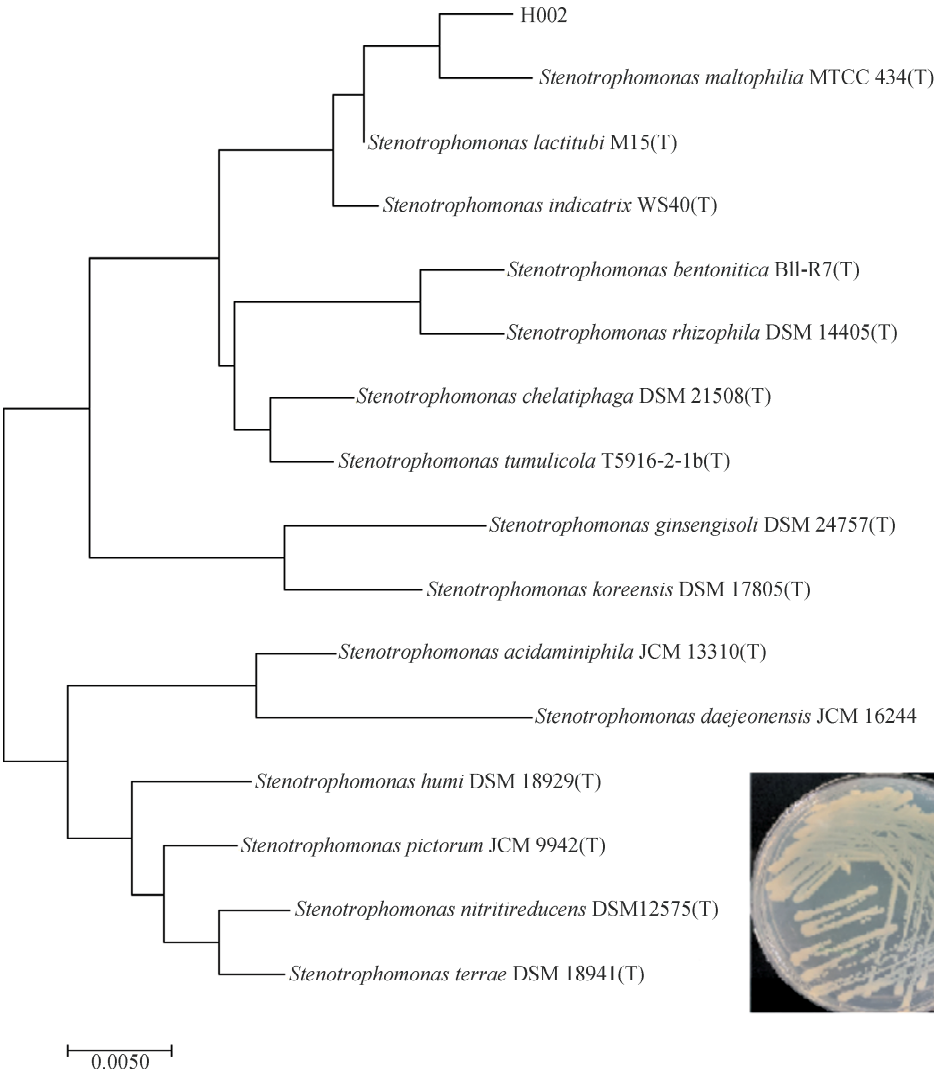


图 2 H002 分离物 16S rRNA 基因序列比对
Fig. 2 The phylogenetic tree of 16S rRNAs of H002 isolate and the other *Stenotrophomonas species*

3.2 *S. maltophilia* H002 细胞对 U(VI) 的吸附作用及影响因素

生物吸附是从液相中去除重金属离子的一种重要手段,与其它治理重金属污染的方式相比,更为绿色环保,具有一定的应用前景. 为了探讨 *S. maltophilia* H002 在去除重金属离子污染方面的

可能性,首先在 1.0 g/L 干重的初始细胞悬液中,分别加入终浓度 200 和 600 mg/L 的 U(VI),在 30 ℃,200 r/min 振荡条件下,测定了细胞对铀的吸附动态(图 3a). 在初始的 1 h 以内,细胞吸附铀的速率快速增加,随着缓慢降低,4 h 后基本达到平衡. 截至 8 h,在铀的初始浓度为 200 mg/L 条件

下,1 g/L 干重的 H002 细胞能够基本上去除所有的 U(VI),去除率约为 80%;在 600 mg/L 的铀溶液下,去除率约 30%. 随后,进一步分析了 H002 不同培养时间的细胞对吸附铀的影响(图 3b),不同生长状态的细胞在 1 g/L 干重菌量和 300 mg/L 初始铀浓度的条件下,对 U(VI)的吸附能力存在很大的差异. 培养 12 h 的细胞,其生物吸附量比培养 8 h 细胞的吸附量高了将近 2.5 倍,比 24 h 提高约 1.5 倍. 由此可见,在利用微生物细胞吸附去除重金属时,应考虑细胞生长特性.

考虑到现实中的重金属污染环境有许多干扰微生物吸附铀的因素,比如外部现实环境中,大多会存在各种阴、阳离子等其它物质. 因此,分析了几种常见的阴阳离子和表面活性剂对铀生物吸附的影响,结果见图 3c. 在低浓度下,各种供试的阴、阳离子对 H002 吸附铀具有一定的促进作用;但是在高浓度 CO_3^{2-} 和 HCO_3^{1-} 的条件下,H002 细胞对铀的吸附量显著下降,这可能是由于 CO_3^{2-} 易与 UO_2^{2+} 形成络合. 此外,在供试的三种表面活性剂中,SDS 对 H002 细胞吸附铀具有明显的促进作用,无论是在高浓度(0.5%)还是低浓度(0.1%)下,H002 细胞的铀吸附量均较对照提高了近 1 倍;但 Triton 和 Tween 对 H002 的吸附影响不大,在低浓度下略有一定的促进作用.

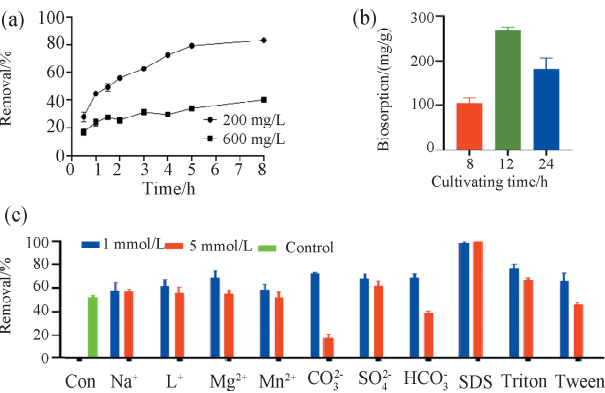


图 3 H002 对 U(VI) 的吸附能力和影响生物吸附的因素
(a)H002 在不同浓度 U(VI)中的吸附能力, (b)不同生长状态对 U(VI)生物吸附的影响, (c)共存离子和表面活性剂对 U(VI)吸附的影响
Fig. 3 The biosorption capacity of H002 and the factors affecting the adsorption
(a) Adsorption of *S. maltophilia* H002 on U(VI) with different concentrations, (b) the influence of different growing status on U(VI) biosorption, (c) the influence of coexisting ions and surfactant on U(VI) adsorption

3.3 *S. maltophilia* H002 细胞与 U(VI)作用的官能团

细菌表面有具有丰富的各种带电官能团,比如氨基和羧基. 这些官能团可能涉及 H002 细胞对铀的吸附. 为此,通过酯化反应和酰胺化反应分别屏蔽 H002 细胞表面的氨基和羧基,然后加入铀,分析了这两种基团对铀吸附的影响. 结果如图 4a 所示,在 250 mg/L U(VI)浓度和同样的菌量(1 g/L)条件下吸附 24 h,屏蔽羧基的 H002 细胞对铀的吸附与对照组相比,其去除率急剧下降;但是屏蔽氨基后,并不影响对铀的吸附,其去除率相差无几. 这说明羧基在 H002 菌株对 U(VI)的生物吸附中发挥了非常重要的作用,而氨基的作用可能很小.

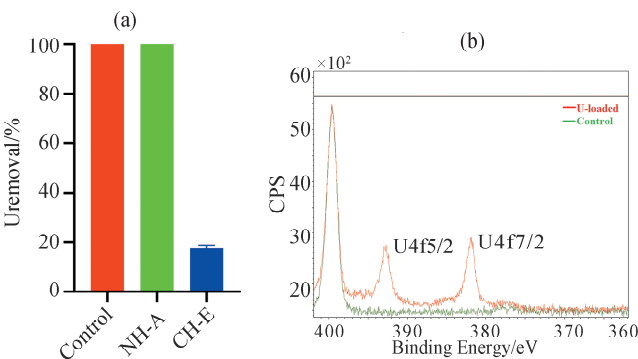


图 4 细胞表面官能团对六价铀吸附的影响(a)和 XPS 能谱分析(b)
Control: 未处理细胞; NH-A: 氨基乙酰化后的细胞; CH-E: 羧基酯化后的细胞
Fig. 4 Effect of functional groups of cell surface on U(VI) adsorption (a) and XPS spectra analysis (b)
Control: cells without treated; NH-A: cells after amino acetylation; CH-E: cells with carboxylic esterification

3.4 *S. maltophilia* H002 与 U(VI)作用的能谱分析

X 射线光电子能谱(X-ray photoelectron spectroscopy XPS)利用 X 射线辐射样品,使样品原子或分子的内层电子受激发射出来,通过测定这些受激发的光电子的能量,并结合脉冲强度即可得到光子能谱图,通过对光电子能谱图的分析就可以了解到样品的化学组成及化学状态的变化. 本研究采用 XPS 分析了与铀作用后的 H002 细胞以及未吸附铀的 H002 细胞. 结果如图 4b 显示,在吸附铀的细胞样品中,光电子能谱显示了在 U 4f5/2 和 U 4f7/2两个轨道都出现了代表 UO_2^{2+} 的特征峰,其结合能分别为 392.70 eV 和 381.95 eV;相反,未进行铀处理的细胞样品中没有出现明显的能谱峰. 这些结果证明 *S. maltophilia* H002 细胞确实吸附

了金属铀。

4 讨 论

在放射性废物中,铀元素因其容易迁移以及能造成长期污染的特性,一直被视为最主要和严重的污染物之一。微生物治理重金属污染作为一种新兴的治理方式,具有更绿色环保的特点。研究微生物与铀相互作用的机制,将有助于管理者制定合理的放射性废物处理策略,以及针对被损害环境的补救措施。

本实验室从 ^{60}Co 辐照场分离获得一批抗辐射的细菌分离物,经过筛选发现一个分离物 H002 具有一定的耐受铀的能力,经生理生化和分子鉴定为 *S. maltophilia*。嗜麦芽糖寡养单胞菌(*S. maltophilia*)是一种革兰氏阴性、好氧的细菌。菌体呈杆状,极生鞭毛,大小 $0.7\sim 1.8\times 0.4\sim 0.7\ \mu\text{m}$,略小于同属的其他成员。嗜麦芽糖寡养单胞菌广泛存在于自然界的水体、土壤或者植物体中,在人的肠道和呼吸道中也有发现^[13]。该菌作为一种条件致病菌,能感染免疫功能不全的人群,可造成严重的呼吸道和尿路感染,并且具有很强的耐药性,是一种临床治疗难度极大的医源感染病原菌^[14]。目前嗜麦芽糖寡养单胞菌主要作为病原微生物。研究其致病性、传染性、耐药性和一些流行病学特征,而涉及其他方面的研究较少。据报道,嗜麦芽糖寡养单胞菌具有耐受并吸附 Cd、Pb、Co、Zn、Hg、Ag、铀酰等重金属污染的能力^[15],有潜力治理重金属铀污染。

因此,本实验将 *S. maltophilia* H002 作为研究材料,着重分析研究了 H002 分离物对可溶性六价铀的吸附,以及共存离子、表面活性剂、细菌生长状态等对铀吸附的影响,并发现细胞表面羧基是吸附铀的主要官能团。 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 CO_3^{2-} 会通过铀结合的方式来影响对微生物对铀的去除^[16-17],本研究发现环境中 CO_3^{2-} 和 HCO_3^{1-} 的存在会影响 H002 对铀的去除能力,但其他的共存离子(包括 Mg^{2+})不影响 H002 的去除能力。这可能是因为 H002 并不是通过生物还原的机制去除铀,而 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等多是影响生物还原来降低铀的去除率。十二烷基硫酸钠(SDS)是一种常见的阴离子表面活性剂,本研究发现,SDS 的加入能显著地促进 *S. maltophilia* H002 细胞对 U(VI)的吸附,无论在低浓度(0.1%)还是在高浓度(0.5%)条件下,均可以将 *S. maltophilia* H002 细胞对 U(VI)的吸附能

力提高一倍以上。有研究表明,部分表面活性剂能够极大地改变 *S. maltophilia* 细胞表面的脂肪酸组成,增加其中的支链酸的含量^[18]。支链酸的增加也许可能提高表面羟基的数量,从而促进 H002 细胞对铀的吸附。

微生物表面的官能团能影响自身对铀的积累,其中很可能涉及到离子交换的过程^[8],直接对细胞表面官能团的屏蔽实验也表明,氨基、羧基、磷酸基团在微生物对 U(VI)的吸附过程中发挥着重要作用。通过电位滴定分析可知氨基和羧基都是 U(VI)的主要结合位点^[19],并且有研究发现在黑曲霉 *Aspergillus niger* 中屏蔽氨基和羧基会显著的影响它对 U(VI)的吸附^[20]。在本研究中屏蔽 *S. maltophilia* H002 细胞表面的羧基导致铀吸附下降 80%,但屏蔽氨基并没有影响细胞对 U(VI)的吸附。这说明在 *S. maltophilia* H002 的细胞表面的羧基官能团参与铀的吸附,但氨基则可能与铀的互作无关。

5 结 论

本实验从 142 株具有辐射抗性的细菌分离物中筛选获得了一株能够稳定耐受高浓度铀的嗜麦芽糖寡养单胞菌(*S. maltophilia*) H002 菌株,其具有辐射抗性的特点能使其能在具有放射性的实际污染环境中更好的发挥生物吸附作用。本实验分析研究了 H002 菌株对可溶性六价铀的吸附及影响的因素,发现在 TGY 培养基中培养 12 h 的 H002 细胞对铀具有最强的吸附能力;而且细胞表面的羧基在铀的吸附中扮演重要作用。这些分析与实验为进一步研究微生物对重金属的耐受机理提供了线索,也为发展利用微生物治理铀污染提供了一定的依据。

参考文献:

- [1] Katz J. The Chemistry of the Actinide and Transactinide Elements (Volumes 1-5) [M]. [S. l.]: Netherlands Springer Science & Business Media, 2007: 246.
- [2] Todorov P, Ilieva E. Contamination with uranium from natural and antropological sources [J]. Rom J Phys, 2006, 51: 27.
- [3] Abdelouas A. Uranium mill tailings: geochemistry, mineralogy, and environmental impact [J]. Elements, 2006, 2: 335.
- [4] Gavrilescu M, Pavel L V, Cretescu I. Characteriza-

- tion and remediation of soils contaminated with uranium [J]. J Hazard Mater, 2009, 163: 475.
- [5] Papathanasopoulou E, Beaumont N, Hooper T, *et al.* Energy systems and their impacts on marine ecosystem services [J]. Renew Sust Energ Rev, 2015, 52: 917.
- [6] Merroun M L, Selenska-pobell S. Bacterial interactions with uranium: an environmental perspective [J]. J Contam Hydrol, 2008, 102: 285.
- [7] Stylo M, Alessi D S, Shao P P, *et al.* Biogeochemical controls on the product of microbial U (VI) reduction [J]. Environ Sci Technol, 2013, 47: 12351.
- [8] Li X, Ding C, Liao J, *et al.* Biosorption of uranium on *Bacillus* sp. dwc-2: preliminary investigation on mechanism [J]. J Environ Radioactiv, 2014, 135: 6.
- [9] Wingerder J, Neu T, Flemming H. Microbial extracellular polymeric substances; characterization, structure and function [M]. Berlin: Germany Springer-Verlag, 1999, 127.
- [10] Lawson P, Sterritt R, Lester J. Factors affecting the removal of metals during activated sludge wastewater treatment II. The role of mixed liquor biomass [J]. Arch environ Con Tox, 1984, 13: 391.
- [11] Comte S, Guibaud G, Baudu M. Biosorption properties of extracellular polymeric substances (EPS) resulting from activated sludge according to their type: soluble or bound [J]. Process Biochem, 2006, 41: 815.
- [12] Berg G, Roskot N, Smalla K. Genotypic and phenotypic relationships between clinical and environmental isolates of *Stenotrophomonas maltophilia* [J]. J Clin Microbiol, 1999, 37: 3594.
- [13] Yoon S-H, Ha S M, Kwon S, *et al.* Introducing EzBioCloud: a taxonomically united database of 16S rRNA gene sequences and whole-genome assemblies [J]. Int J Syst Evol Micr, 2017, 67: 1613.
- [14] McGowan J R. Resistance in nonfermenting gram-negative bacteria; multidrug resistance to the maximum [J]. Am J Infect Control, 2006, 34: S29.
- [15] Pages D, Rose J, Conrod S, *et al.* Heavy metal tolerance in *Stenotrophomonas maltophilia* [J]. Plos One, 2008, 3: e1539.
- [16] Istok J, Senko J, Krumholz L R, *et al.* In situ bioreduction of technetium and uranium in a nitrate-contaminated aquifer [J]. Environ Sci Technol, 2004, 38: 468.
- [17] Brooks S C, Fredrickson J K, Carroll S L, *et al.* Inhibition of bacterial U (VI) reduction by calcium [J]. Environ Sci Technol 2003, 37: 1850.
- [18] Kaczorek E, Sałek K, Guzik U, *et al.* Cell surface properties and fatty acids composition of *Stenotrophomonas maltophilia* under the influence of hydrophobic compounds and surfactants [J]. New Biotechnol, 2013, 30: 173.
- [19] Merroun M L, Nedelkova M, Ojeda J J, *et al.* Bioprecipitation of uranium by two bacterial isolates recovered from extreme environments as estimated by potentiometric titration, TEM and X-ray absorption spectroscopic analyses [J]. J Hazard Mater, 2011, 197: 451.
- [20] Kapoor A, Viraraghavan T. Heavy metal biosorption sites in *Aspergillus niger* [J]. Bioresource Technol, 1997, 61: 221.

引用本文格式:

中文: 陈天宇, 孙敏, 冯红. 嗜麦芽糖寡养单胞菌 H002 对铀的生物吸附[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2021, 58: 056002.

英文: Chen T Y, Sun M, Feng H. Biosorption of uranium by *Stenotrophomonas maltophilia* H002 [J]. J Sichuan Univ; Nat Sci Ed, 2021, 58: 056002.