

趋磁细菌培养及用于吸附分离重金属离子

孙长江¹ 尹晓红^{1*} 马伟¹ 孙津生² 卢德志¹

(1. 天津理工大学 化学化工学院 天津 300191)

(2. 天津大学 化工学院 天津 300072)

摘 要: 生物吸附是有效处理含较低浓度重金属离子废水的廉价方法之一。本文通过对污水处理厂活性污泥的富集和培养, 经过分离、纯化活性污泥中的细菌, 最终得到了趋磁细菌 MTB-11s。通过 16S rDNA 鉴定, 菌株 MTB-11s 属于代尔夫特菌属。对趋磁细菌的生物吸附性能进行了研究, 实验结果表明, 趋磁细菌 MTB-11s 对不同金属离子具有选择吸附特性, 其对银离子的吸附表现为快速过程, 温度对其吸附性能的影响较小, pH 值为 4–8 时吸附率较高; 随着干菌浓度的增加, 吸附率不断升高, 最终趋于平稳; 随着银离子初始浓度的增加, 吸附率呈现先升高后降低的趋势。在菌量充足或金属离子浓度较低时, 铜、钴离子的存在能促进银离子的吸附, 其他范围则表现为竞争吸附。

关键词: 生物吸附, 活性污泥, 趋磁细菌, 重金属离子

Cultivation of Magnetotactic Bacteria and Use for Biosorption of Heavy and Precious Metal Ions

SUN Chang-Jiang¹ YIN Xiao-Hong^{1*} MA Wei¹ SUN Jin-Sheng² LU De-Zhi¹

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300191, China)

(2. School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Biosorption is one of the high performance and low cost methods for treating wastewater contained low concentration of heavy metal ions. In this paper, the activated sludge from sewage treatment plant was treated by enrichment and cultivation in first step, and then magnetotactic bacteria MTB-11s were obtained by separating and purifying the bacteria obtained in former step. The 16S rDNA analysis showed that the strain of the MTB-11s belonged to Delftia. The results of batch adsorption experiments over magnetotactic bacteria indicated that the magnetotactic bacteria MTB-11s had significant selective adsorption to different metal ions, the adsorption of Ag (I) was a rapid process and almost independence on the temperature. The optimal pH for the adsorption of Ag (I) was 4–8, and the adsorption rate increased with the increase of dry cell concentration and approached to stable finally. With the increase of the initial concentration of Ag (I), the adsorption rate increased to a maximum and then decreased. The Cu (II) or Co (II) coexisted with Ag (I) could promote the adsorption of Ag (I) in the condition of adequate bacteria or low initial concentration of metal ions, otherwise competitive adsorption was found.

Keywords: Biosorption, Activated sludge, Magnetotactic bacteria, Heavy and precious metal ions

基金项目: 天津市自然科学基金项目(No. 07JCYBJC06800)

*通讯作者: ✉ yinxiaohong@tjut.edu.cn

收稿日期: 2009-08-04; 接受日期: 2009-12-03

重金属广泛应用于航天、航空、航海、冶金、建材、石油化工和计算机技术等领域,随着工业用量的不断增加,废弃的贵金属对水体的污染日趋严重。治理水污染,同时还原其应有的价值,是含重金属离子废水处理的资源化方向。目前此类废水的处理过程过于繁琐而且伴随着二次污染^[1],尤其当金属离子浓度较低时,操作费用和原材料成本相对较高。为了开发更加环保和高效低耗的废液治理技术,国内外学者逐渐将研究重点转向能够处理低浓度贵金属废水的生物吸附技术^[2-3]。

趋磁细菌(Magnetotactic bacteria, MTB)^[4]是一类体内形成纳米磁性颗粒并能在外磁场的作用下定向运动的一类细菌,自1975年美国科学家Blakemore^[5]发现趋磁细菌以来,由于其体内含有颗粒大小均匀、直径为30 nm-100 nm的磁小体(Magnetosomes),并且具有稳定晶形,在微弱的地球磁场作用下沿磁力线呈链状排布,使细胞具有永磁偶极矩和磁定向性^[6],吸附了金属离子的趋磁细菌能通过磁分离装置有效地与溶液分离^[7],从而引起了科学家的高度重视。

目前,国内外已经发现多种细菌、真菌、藻类等对多种重金属离子有吸附作用,如地衣芽孢杆菌吸附钡离子^[8]、啤酒酵母吸附铅离子^[9]等等。当然,也不乏对银离子吸附的研究^[10],但利用趋磁细菌处理含银废水的研究较为罕见。

本文通过对取自天津市纪庄子污水处理厂的活性污泥进行富集培养、磁分离、纯化、扩大再培养等一系列过程,得到趋磁细菌MTB-11s。以趋磁细菌MTB-11s作为生物吸附剂,对含银离子溶液进行吸附实验,以期趋磁细菌吸附分离重金属离子的实际应用提供理论依据。

1 实验方法

1.1 实验仪器

LRH-250型生化培养箱,上海恒科技有限公司;BS-IE型振荡培养箱,国华企业;TDL60B型台式离心机,上海安亭科学仪器厂;HVE-50高压灭菌锅,北京北方华粤贸易有限公司;SP-3803型原子吸收分光光度计,上海光谱仪器有限公司;PB-10型酸度计,赛多利斯科学仪器(北京)有限公司。

1.2 趋磁细菌的富集培养

将取自天津市纪庄子污水处理厂的活性污泥,

与已经过灭菌降至室温的富集培养基按1:2的体积比混合均匀,放入广口瓶中,用已灭菌的纱布封住瓶口,每隔2 d更换培养基,28°C静置避光培养30 d。

1.3 趋磁细菌的收集方法

当富集液泥水界面出现红褐色菌膜时^[11],用自制的如图1所示的趋磁细菌收集装置,对已富集培养30 d的混合样进行趋磁细菌的收集。

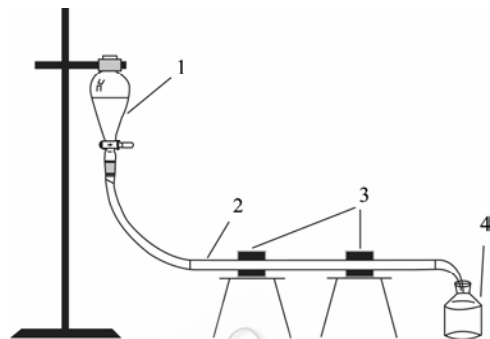


图1 趋磁细菌分离收集装置

Fig. 1 Device for separating and collecting magnetotactic bacteria

注:1: 储液瓶;2: 直管收集器;3: 磁铁;4: 接收瓶。

Note: 1: Separating funnel; 2: Straight pipe separator; 3: Magnets; 4: Receiver.

整套分离装置须提前灭菌,然后将活性污泥培养基混合液加入到储液瓶中,旋动活塞,使得混合液缓慢滴落,进入水平放置的直管收集器,收集器两侧放置永磁铁,磁铁S极向上,趋磁细菌通过收集器时,在磁场的作用下沉积在收集器的器壁上;待混合液全部流下后,将一定量无菌蒸馏水加入到储液瓶中,旋动活塞,使蒸馏水以3倍于混合液的速度滴下,对被收集在收集器中的样品进行清洗;待蒸馏水全部流下后,小心地撤下磁铁,将废液瓶更换为已灭菌的接收瓶,将一定量无菌蒸馏水加入到储液瓶中,旋动活塞,用蒸馏水将已分离所得样品冲至接收瓶中。

1.4 趋磁细菌的纯化

将分离得到的细菌加入到已灭菌的选择培养基^[12]中,28°C静置避光培养3 d。取50 μL培养所得菌液涂布于固体培养基上,28°C静置避光再培养3 d。用显微镜观察固体培养基上是否为单一菌落,若为单一菌落,则将菌落接种到选择培养基中,28°C静置避光培养3 d,即得到所需趋磁细菌。若有

杂菌, 则需再次分离、纯化, 直至得到单一菌落。在纯化过程中, 经过多次磁分离基本可以确定所得细菌具有趋磁性, 但为确保所得的是趋磁细菌, 本文采用姜伟等^[12]提出的磁小体的分离及检测方法对所得趋磁细菌进行检测, 从而避免筛选过程出现的假阳性。

采用16S rDNA分子生物学方法对所得的趋磁细菌菌株进行鉴定, 得出所得细菌的类型。

1.5 趋磁细菌理化实验

对分离纯化得到的趋磁细菌, 进行革兰氏染色、接触酶、淀粉水解、硝酸盐还原、柠檬酸盐利用、甲基红实验、明胶水解等实验, 测定其生化活性。

对菌株 MTB-11s 的生长曲线进行测定, 培养条件为: 将 200 μ L MTB-11s 的细菌培养液加入到 200 mL 已灭菌的选择培养基中, 28 $^{\circ}$ C 避光静置培养, 定时取出一定量菌液使用可见紫外分光光度计进行测定。

1.6 趋磁细菌吸附实验

趋磁细菌对金属离子的选择吸附性能的实验: 配制金属离子浓度为 50 mg/L 的 Ag^+ 、 Cu^{2+} 、 Co^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Mn^{2+} 6 种金属离子溶液, 每种金属离子溶液取 30 mL 置于 100 mL 带胶塞密封的锥形瓶, 将一定量的湿菌分别加入到各金属离子溶液中, 混合均匀后放入振荡培养箱以 130 r/min 的频率、25 $^{\circ}$ C 恒温振荡 1 h, 取出混合液, 4800 r/min 离心分离 6 min, 取上层清液, 使用原子吸收分光光度计测定金属离子的浓度。

趋磁细菌对金属离子的吸附性能的实验: 取 30 mL 一定初始浓度和 pH 值的金属离子溶液置于 100 mL 带有胶塞密封的锥形瓶中, 将一定量的湿菌加入到上述溶液中, 混合均匀后放入振荡培养箱以 130 r/min 的频率、25 $^{\circ}$ C 恒温振荡 1 h, 取出混合液, 4800 r/min 离心分离 6 min, 取上清液, 使用原子吸收分光光度计测定其金属离子的浓度。采用单因素多水平的方法分别考察吸附实验中溶液 pH 值、温度、干菌浓度、金属离子初始浓度、吸附时间对吸附效果的影响。

吸附率 Y 的计算公式如下:

$$Y(\%) = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中, C_0 、 C_1 分别为吸附前后溶液中金属离子的浓度。

2 实验结果与讨论

2.1 趋磁细菌的表征

经过富集培养、分离、纯化最终得到趋磁细菌 MTB-11s, 对 MTB-11s 进行磁小体检测, 确定所得细菌为趋磁细菌。其光学显微镜及扫描电镜照片如图 2、3 所示, 由图中可以明显看出所得 MTB-11s 为杆状细菌, 长度约为 2.7 μ m。

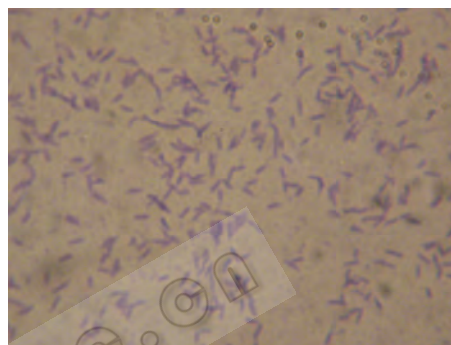


图2 MTB-11s的光学显微镜照片

Fig. 2 Optical microscope photograph of MTB-11s

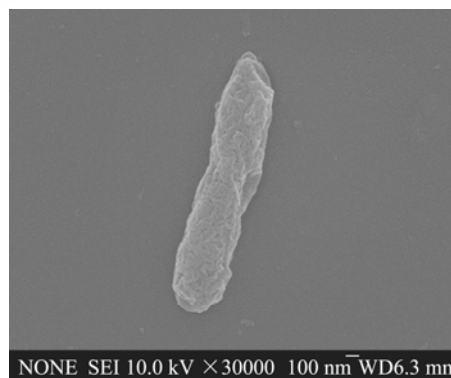


图3 MTB-11s的扫描电镜照片

Fig. 3 SEM image of MTB-11s

通过对 MTB-11s 进行 16S rDNA 的鉴定, 得出 MTB-11s 为代尔夫特(Delftia)菌属。

对所得的 MTB-11s 进行了生化实验, 测定出如图 4 所示的生长曲线。接种后, MTB-11s 需要约 18 h 的延滞期以适应生长环境; 之后吸光值迅速增加, 进入对数生长期; 38 h 左右吸光值达到最大并逐渐趋于稳定, 进入稳定期; 54 h 后由于营养不足或溶氧限制等原因 MTB-11s 逐渐进入衰亡期。

通过在不同 pH 值条件下对趋磁细菌进行培养,

得到菌株 MTB-11s 适宜生长的 pH 值范围为 6–8。

实验得到 MTB-11s 的部分常规生理生化反应特征, 如表 1 所示。

2.2 趋磁细菌的选择吸附性能

趋磁细菌对多种重金属离子的吸附效果如图 5 所示, MTB-11s 对金属离子的吸附率从高到低为: $\text{Ag}^+ > \text{Cu}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Co}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Mn}^{2+}$ 。MTB-11s 对 Ag^+ 和 Cu^{2+} 的吸附率较高, 对 Co^{2+} 和 Ni^{2+} 的吸附率不到 10%, 而对 Mn^{2+} 的吸附率更低, 几乎不吸附。由此可见趋磁细菌 MTB-11s 对不同金属离子具有明显的选择吸附性, 这将为今后选择回收

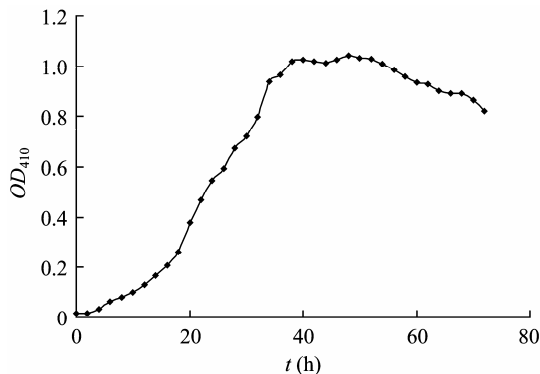


图4 MTB-11s的生长曲线

Fig. 4 Growth curve of MTB-11s

表 1 菌株 MTB-11s 的常规生理生化反应特征	
Table 1 Tradition taxonomical properties of the strain MTB-11s	
鉴定指标	鉴定结果
Identification index	Identification result
革兰氏染色	-
Gram staining	-
1% NaCl 生长	+
Growth of 1% NaCl	+
明胶水解试验	-
Gelatin hydrolysis test	-
淀粉水解试验	+
Starch hydrolysis test	+
硝酸盐还原	+
Nitrate reduction	+
柠檬酸盐利用试验	+
Citrate utilization test	+
接触酶试验	+
Catalase test	+
甲基红试验	-
Melthy red test	-
产 H_2S 试验	-
H_2S production test	-

污水中的特定金属离子奠定基础, 但趋磁细菌对不同金属离子的吸附性差异如此之大, 其原因有待于进一步考查。

2.3 趋磁细菌对银离子的吸附特性

2.3.1 温度对趋磁细菌吸附银离子的影响: 本实验主要测定了 16°C–40°C 条件下, 趋磁细菌 MTB-11s 对 Ag^+ 的吸附性能。实验结果如图 6 所示, 总体来看, 温度对趋磁细菌吸附 Ag^+ 的影响较小, 但温度过低或过高也使吸附率有所下降, 所以 25°C–30°C 的室温条件下最适宜趋磁细菌吸附 Ag^+ 。同时, 此实验也表明趋磁细菌 MTB-11s 具有较强的环境适应能力, 对温度的要求较低, 这为此细菌广泛应用到重金属离子废水处理中奠定了基础。

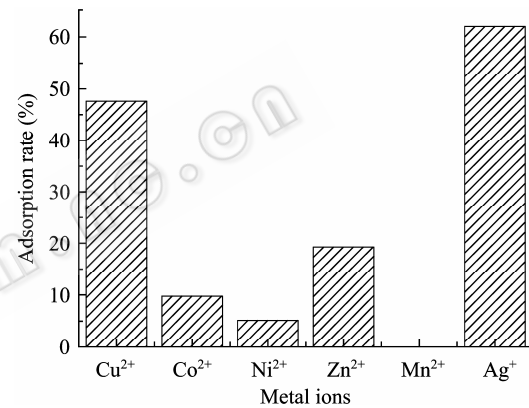


图5 MTB-11s对不同金属离子的吸附效果

Fig. 5 Adsorption of different metal ions by MTB-11s

Note: Dry cell concentration = 0.54 g/L; pH = 5; $C_0 = 50 \text{ mg/L}$; $t = 1 \text{ h}$; $T = 25^\circ\text{C}$.

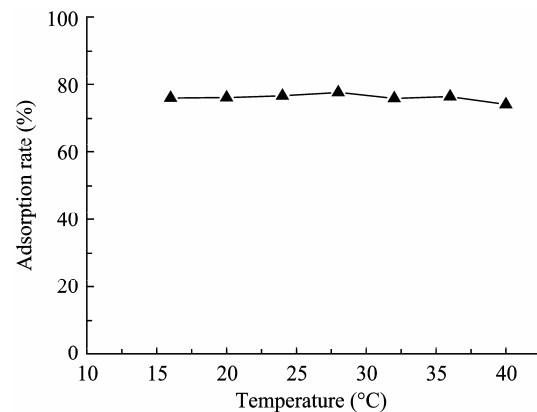


图6 温度对MTB-11s吸附 Ag^+ 的影响

Fig. 6 Influence of temperature on the biosorption of Ag^+ by MTB-11s

Note: Dry cell concentration = 0.6833 g/L; pH = 5; $C_0 = 50 \text{ mg/L}$; $t = 1 \text{ h}$.

2.3.2 细菌浓度对趋磁细菌吸附银离子的影响: 本实验主要测定了干菌浓度为 0–1.8 g/L 条件下, 趋磁细菌 MTB-11s 对 Ag^+ 的吸附性能。实验结果如图 7 所示, 随着趋磁细菌浓度的不断增大, 吸附率不断增加, 当细菌浓度为 1.26 g/L 时, 吸附率达到 92.79%, 随后呈现趋于平稳趋势。

当菌体浓度较低时, 菌体接触的金属离子量较大, 可以使单位菌体吸附更多的金属离子, 但鉴于菌体对 Ag^+ 的吸附能力有限, 致使吸附率较低。当菌体浓度较高时, 菌体接触的金属离子量较小, 单位菌体吸附较少的金属离子, 但由于菌量的增加使得吸附率增高。由于趋磁细菌吸附 Ag^+ 是一个动态吸附平衡过程, 所以当趋磁细菌浓度增大到一定值时, 吸附率趋于平稳。

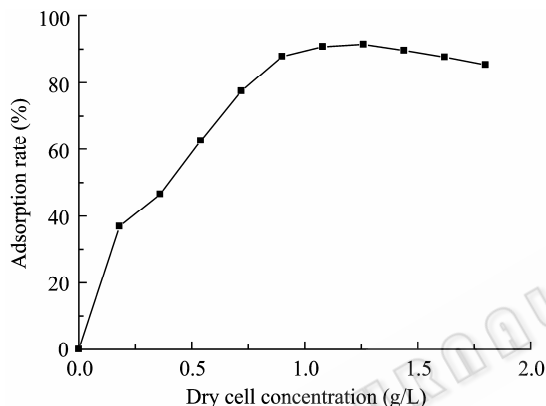


图7 干菌浓度对MTB-11s吸附 Ag^+ 的影响

Fig. 7 Influence of dry cell concentration on the biosorption of Ag^+ by MTB-11s

Note: $C_0 = 50 \text{ mg/L}$; $\text{pH} = 5$; $t = 1 \text{ h}$; $T = 25^\circ\text{C}$.

2.3.3 吸附时间对趋磁细菌吸附银离子的影响: 本实验主要测定了吸附时间对趋磁细菌 MTB-11s 吸附 Ag^+ 的影响。实验结果如图 8 所示, 在 $t = 0\text{--}2 \text{ min}$ 时, 趋磁细菌对 Ag^+ 的吸附率迅速增大, 之后吸附率缓慢增大并最终趋于平稳。这说明趋磁细菌对 Ag^+ 的吸附是一个快速的过程, 可以在很短的时间内达到吸附平衡。用动力学模型对吸附过程进行分析后发现, MTB-11s 对 Ag^+ 的吸附过程基本符合拟二级动力学方程。

2.3.4 溶液的 pH 值对趋磁细菌吸附银离子的影响: 本实验主要测定了 pH 为 1–8 条件下, 趋磁细菌 MTB-11s 对 Ag^+ 的吸附性能。实验结果如图 9 所示, pH 值的变化对菌体吸附金属离子的影响很大, 当

pH 为 1–4 时, 趋磁细菌对 Ag^+ 吸附率随 pH 值增大而升高, 当 $\text{pH} > 4$ 时, 吸附率趋于平稳。在酸性条件下, 由于氢离子占据了细胞表面的阳离子结合位点, 阻止金属阳离子在细胞表面的结合, 使得生物吸附量降低。在碱性条件下, 银离子会产生沉淀, 影响菌体对银离子的吸附。所以, 趋磁细菌 MTB-11s 吸附银离子最适宜的 pH 范围是 4–8。同时, 实验中也发现当 pH 值较低时, MTB-11s 对铜、钴等离子基本不吸附, 而此时对银离子却有一定的吸附。因此, 可以在较低 pH 值条件下选择吸附特定离子, 从而达到分离的目的。

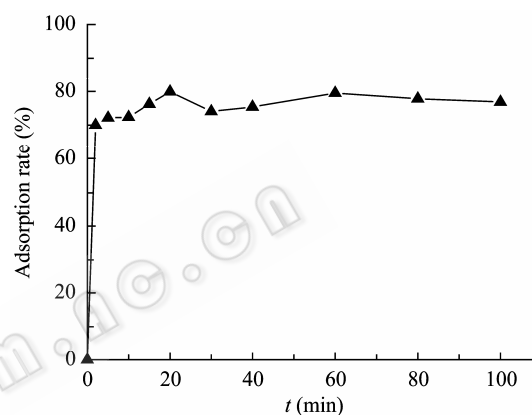


图8 吸附时间对MTB-11s吸附 Ag^+ 的影响

Fig. 8 Influence of adsorption time on the biosorption of Ag^+ by MTB-11s

Note: Dry cell concentration = 0.72 g/L; $\text{pH} = 5$; $C_0 = 50 \text{ mg/L}$; $T = 25^\circ\text{C}$.

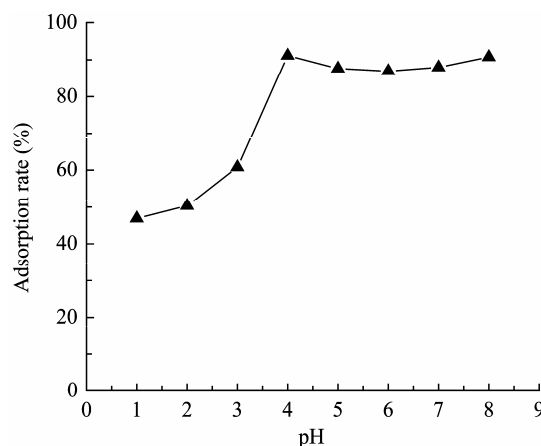


图9 pH值对MTB-11s吸附 Ag^+ 的影响

Fig. 9 Influence of pH values on the biosorption of Ag^+ by MTB-11s

Note: Dry cell concentration = 0.8833 g/L; $C_0 = 50 \text{ mg/L}$; $T = 25^\circ\text{C}$; $t = 1 \text{ h}$.

2.3.5 银离子的初始浓度对趋磁细菌吸附银离子的影响: 本实验主要测定了不同银离子初始浓度条件下, 趋磁细菌 MTB-11s 对 Ag^+ 的吸附性能。实验结果如图 10 所示, 当 $C_0 = 5\text{--}40\text{ mg/L}$ 时, 吸附率随初始浓度的增大而增大, 当 $C_0 = 40\text{ mg/L}$ 时达到最高点 91.95% 后, 吸附率呈现下降的趋势。这是因为, 当菌量一定时, 随金属离子初始浓度的提高, 细菌的吸附量增加, 但当吸附位点饱和后, 由式(1)可知, 吸附率反而降低。

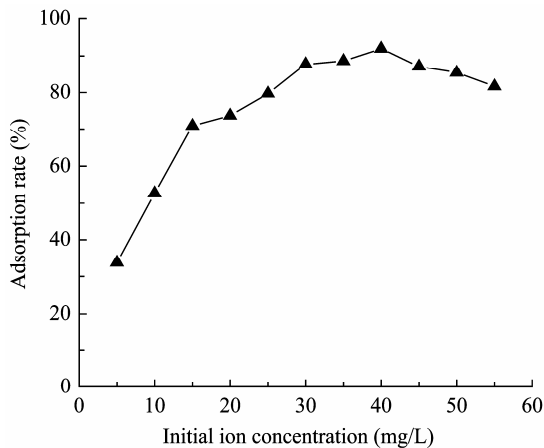


图10 金属离子初始浓度对MTB-11s吸附 Ag^+ 的影响

Fig. 10 Influence of initial ion concentration on the biosorption of Ag^+ by MTB-11s

Note: Dry cell concentration = 0.8833 g/L; pH = 5; $T = 25^\circ\text{C}$; $t = 1\text{ h}$.

2.4 其他金属离子对趋磁细菌吸附银离子的影响

2.4.1 铜离子对趋磁细菌吸附银离子的影响: 本实验主要测定了在银离子溶液中加入等量铜离子的情况下, 趋磁细菌 MTB-11s 对 Ag^+ 的吸附性能。实验结果如图 11 所示, Ag^+ 的吸附率先增大再减小, Cu^{2+} 的吸附率不断降低。将单元体系的吸附实验结果图 10 中的曲线绘于图 11 中, 比较后便不难发现, 当离子浓度较低时, Ag^+ 的吸附率有所增大, 而离子浓度较高时, 吸附率有所下降。由此可见, 干菌浓度一定的情况下, 当溶液中金属离子浓度较低, 亦即菌量充足时, Cu^{2+} 的存在对 Ag^+ 的吸附有促进作用; 随着金属离子浓度不断增大, 菌量越发不足, 此时, Cu^{2+} 和 Ag^+ 之间表现为竞争吸附, 致使 Ag^+ 相对于单元体系吸附率下降。

2.4.2 钴离子的存在对趋磁细菌吸附银离子的影响: 本实验主要测定了在银离子溶液中加入等量钴

离子的情况下, 趋磁细菌 MTB-11s 对 Ag^+ 的吸附性能。实验结果如图 12 所示, Ag^+ 的吸附率先增大再减小, Co^{2+} 的吸附率不断降低。与单元体系的吸附实验结果相比, 当离子浓度较低时, Ag^+ 的吸附率有所增大, 而离子浓度较高时, 吸附率有所下降。由此可见, 这些规律与 Cu^{2+} 对 MTB-11s 吸附 Ag^+ 的影响大致相同。由此可以得出结论, 当溶液中金属离子浓度较低, 亦即菌量充足时, 重金属离子 Cu^{2+} 、 Co^{2+} 等的存在对趋磁细菌 MTB-11s 吸附 Ag^+ 有促进作用; 随着金属离子浓度不断增大, Cu^{2+} 、 Ag^+ 及 Co^{2+} 、 Ag^+ 之间表现为竞争吸附作用, 致使 Ag^+ 相对于单元体系吸附率下降。

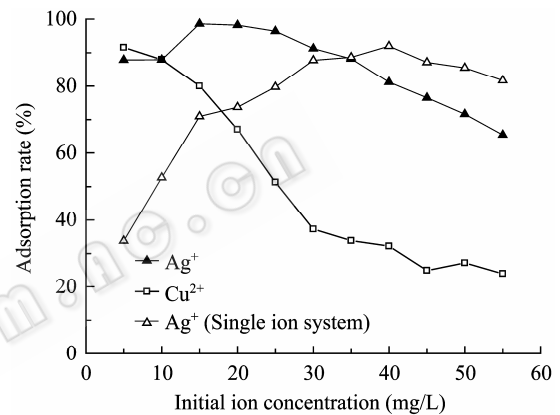


图11 Cu^{2+} 对MTB-11s吸附 Ag^+ 的影响

Fig. 11 Influence of Cu^{2+} on the biosorption of Ag^+ by MTB-11s

Note: Dry cell concentration = 0.8833 g/L; pH = 5; $t = 1\text{ h}$; $T = 25^\circ\text{C}$.

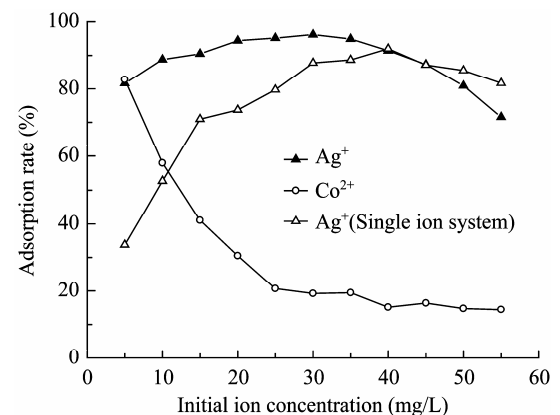


图12 Co^{2+} 对MTB-11s吸附 Ag^+ 的影响

Fig. 12 Influence of Co^{2+} on the biosorption of Ag^+ by MTB-11s

Note: Dry cell concentration = 0.8833 g/L; pH = 5; $t = 1\text{ h}$; $T = 25^\circ\text{C}$.

2.5 趋磁细菌 MTB-11s 的应用前景分析

与其他处理重金属废水的微生物或吸附剂相比,趋磁细菌 MTB-11s 具有如下优点:

(1) 对银离子有较强的吸附能力,MTB-11s 菌体对 Ag^+ 的最大吸附量可达 100 mg/g。而许多微生物或吸附剂对银离子的吸附量均不足 100 mg/g,如 Bakhti MZ^[13] 等人用链霉菌处理银离子的最大量为 63 mg/g; Akgul M^[14] 等人用沸石处理银离子的最大量为 33.23 mg/g。

(2) 对不同金属离子表现出明显的吸附选择性,对银离子的吸附量明显高于其他离子。

(3) 一般微生物或吸附剂并没有磁性,虽然对重金属有不错的处理效果,但难于从水溶液中分离出来,这使得其应用受到较大限制。而趋磁细菌由于有其独特的趋磁性,可以利用高梯度磁分离技术将吸附了重金属离子的趋磁细菌分离下来,经过脱附处理后再将趋磁细菌加入到污水中循环使用,而脱附下来的重金属离子可以回收利用。

以上优点为趋磁细菌在水体中重金属离子回收领域的广阔应用提供了可能性,同时,趋磁细菌吸附重金属离子的研究对环境污染的治理与防治具有深远的意义。鉴于此项研究刚刚起步,许多疑点和问题仍有待于进一步考究。

3 结论

针对趋磁细菌 MTB-11s 的培养及吸附特性的实验研究,得出以下结论:

(1) 从天津市纪庄子污水处理厂活性污泥中获得的细菌,经过富集培养、分离纯化筛选可得到趋磁细菌 MTB-11s。经 16S rDNA 鉴定得出菌株 MTB-11s 为代尔夫特(*Delftia*)菌属。本文仅研究其生理和吸附特性,对其趋磁性,将另文阐述;

(2) 对比实验发现,MTB-11s 菌对 Ag^+ 和 Cu^{2+} 的吸附率较高,对 Co^{2+} 和 Ni^{2+} 的吸附率不到 10%,而对 Mn^{2+} 几乎不吸附。由此可见趋磁细菌 MTB-11s 对不同金属离子具有明显的选择吸附性;

(3) 趋磁细菌 MTB-11s 对 Ag^+ 的吸附是一个快速吸附的过程;温度对趋磁细菌 MTB-11s 吸附 Ag^+ 的影响较小,室温下较适宜 Ag^+ 的吸附;随着趋磁细菌浓度的不断增大,趋磁细菌 MTB-11s 对 Ag^+ 的吸附率不断增加,最终达到平稳;随金属离子的初始浓度提高,细菌的吸附量增加,但由于吸附位点的饱和度增加,吸附率反而降低;趋磁细菌

MTB-11s 吸附银离子最适宜的 pH 范围是 4-8;

(4) 在多元体系中,当溶液中金属离子浓度较低时,重金属离子 Cu^{2+} 、 Co^{2+} 等的存在对趋磁细菌 MTB-11s 吸附 Ag^+ 有促进作用;随着金属离子浓度不断增大, Cu^{2+} 、 Co^{2+} 与 Ag^+ 表现为竞争吸附作用。对吸附分子间表现出的协同作用,有待进一步研究;

(5) 实验获得的趋磁细菌 MTB-11s 对重金属离子的行为,具有潜在的应用价值。

参考文献

- [1] 徐根良,肖大松. 重金属废水处理技术综述. 水处理技术, 1991, 17(2): 77-86.
- [2] Veglio F, Beolchini F. Removal of metals by biosorption: a review. *Hydrometallurgy*, 1997, 44(3): 301-316.
- [3] 马贺伟,廖学品,王茹,等. 皮胶原纤维固化单宁膜的制备及其对水溶液中铅和汞的吸附. 化工学报, 2005, 56(10): 1907-1911.
- [4] Faivre D, Schuler D. Magnetotactic bacteria and magnetosomes. *Chemical Reviews*, 2008, 108 (11): 4875-4898.
- [5] Blakemore RP. Magnetotactic bacteria. *Science*, 1975(190): 377-379.
- [6] Bahaj AS, James PAB. Metal uptake and separation using magnetotactic bacteria. *IEEE Transaction on Magnetics*. 1994, 30(6): 4707-4709.
- [7] 刘珺,周培国. 趋磁细菌应用于重金属废水处理的研究进展. 环境科技, 2008, 21(6): 64-67.
- [8] 刘月英,李仁忠,张秀丽,等. 固定化地衣芽孢杆菌 R08 吸附 Pd^{2+} 的研究. 微生物学报, 2002, 42(6): 700-705.
- [9] 刘恒,王建龙,文湘华. 啤酒酵母吸附重金属离子铅的研究. 环境科学研究, 2002, 15(2): 26-29.
- [10] Korenevskii AA, Khamidova K, Avakyan ZA, et al. Silver biosorption by micromycetes. *Microbiology*, 1999, 68(2): 139-145.
- [11] 宋慧平,李鑫钢,孙津生,等. 趋磁细菌对金属离子的吸附特性研究. 化学反应工程与工艺, 2006, 22(6): 486-491.
- [12] 姜伟,卫杨保. 趋磁细菌 WD-1 的超微结构及批量培养方法. 微生物学通报, 2001, 28(3): 75-78.
- [13] Bakhti MZ, Selatnia A, Junter GA. Biosorption of Ag^+ from aqueous solution by *Streptomyces rimosus* biomass. *International Journal of Environment and Pollution*, 2008, 34(1/4): 297-307.
- [14] Akgul M, Karabakan A, Acar O, et al. Removal of silver (I) from aqueous solutions with clinoptilolite. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2006, 94(1/3): 99-104.