

# 不同生长阶段氧化亚铁硫杆菌的 $\text{Cu}^{2+}$ 吸附研究

丁雨<sup>1</sup>, 陆现彩<sup>1</sup>, 陆建军<sup>1</sup>, 屠博文<sup>2</sup>, 李娟<sup>1</sup>, 徐兆文<sup>1</sup>

(1. 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210093;  
2. 南京大学医学院, 江苏南京 210093)

**摘要:** 通过不同生长阶段的氧化亚铁硫杆菌对  $\text{Cu}^{2+}$  的吸附实验研究, 发现对数期和稳定期的氧化亚铁硫杆菌的  $\text{Cu}^{2+}$  吸附容量存在一定差别, 对数生长期比稳定期的氧化亚铁硫杆菌吸附量略高。同时,  $\text{Cu}^{2+}$  的吸附量与溶液的 pH 值之间存在显著的负相关关系, 说明在吸附过程中,  $\text{Cu}^{2+}$  与氧化亚铁硫杆菌的表面存在的化学基团发生了质子交换反应。对数生长期的氧化亚铁硫杆菌和稳定期的氧化亚铁硫杆菌吸附过程均符合 Freundlich 吸附模型, 表明氧化亚铁硫杆菌细胞的表面化学非均质性较强。不同生长阶段细菌的吸附性能差异可能与细胞表面的化学结构存在差异有关。

**关键词:** 生长阶段; 氧化亚铁硫杆菌;  $\text{Cu}^{2+}$  吸附作用

中图分类号: X172

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2009)06-0559-06

## An experimental study of $\text{Cu}^{2+}$ adsorption on *Acidithiobacillus ferrooxidans* of different growth stages

DING Yu<sup>1</sup>, LU Xian-cai<sup>1</sup>, LU Jian-jun<sup>1</sup>, TU Bo-wen<sup>2</sup>, LI Juan<sup>1</sup> and XU Zhao-wen<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. Medical School, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

**Abstract:** The adsorption of heavy metals on bacteria is often employed in the remediation of various contaminations. Nevertheless, the difference in the adsorption behaviors of the bacteria of different growth stages has not yet been systematically studied. Based on the adsorption experiments of  $\text{Cu}^{2+}$  on *Acidithiobacillus ferrooxidans* at different growth stages, it is found that the adsorption capacity of the bacteria at the logarithmic stage is slightly higher than that of the stationary stage. The adsorption on the bacteria at the logarithmic stage and at the stationary stage can be described by Freundlich equations, implying its high surface heterogeneity. In addition, a negative correlation between the adsorption amount of bacteria and the pH of solution can be observed. Therefore, the displacement reaction between  $\text{Cu}^{2+}$  and surface proton of the bacteria may constitute the adsorption mechanism. The changes in surface chemistry of the bacteria at different growth stages are considered to be responsible for the difference in adsorption behaviors.

**Key words:** growth stage; *Acidithiobacillus ferrooxidans*;  $\text{Cu}^{2+}$ ; adsorption

随着工业废水的排放和矿山开采活动的增加, 自然界中重金属离子的富集现象愈发明显, 对自然生态及人类健康造成严重威胁(尹华等, 2004)。研究表明, 可溶态的重金属元素具有较高的迁移能力和生物毒性, 所以通过生物技术降低重金属迁移能力和化学活性用以达到降低生物毒性, 无疑对重金属污染环境的修复有着重要意义。在过去的 20 年里, 国内

外发展了利用细菌等微生物来处理被水体重金属污染的生物修复技术(王亚雄等, 2001; 周立祥等, 2001; 曹德菊等, 2004)。

细菌多为微小的生物体, 其表面的细胞壁含有多种有机基团, 会与环境中的重金属离子发生化学交换反应, 表现为化学吸附作用。细胞壁的主要成分是肽聚糖、脂多糖、磷壁酸和

收稿日期: 2009-09-01; 修订日期: 2009-09-29

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2007CB815603)

作者简介: 丁雨(1985-), 女, 硕士研究生, 地质微生物学专业; 通讯作者: 陆现彩, E-mail: xcljun@nju.edu.cn

胞外多糖 (Beveridge, 1989), 且羧基、磷酸基、羟基等带负电荷的化学基团丰富 (Schultz-Lam *et al.*, 1996; Burnett *et al.*, 2007) 因此, 细菌往往表现出显著的亲金属特性 (Fein *et al.*, 1997, 2001; Burnett *et al.*, 2007)。细菌通过表面化学络合的方式吸附并富集金属离子, 能够显著影响流体环境中金属的活动性, 甚至在细胞壁或细胞内外聚合物的诱导作用或模板作用下形成矿物沉淀, 从而使重金属离子固定下来 (谢先德等, 2001), 降低重金属的生理毒性 (Yee *et al.*, 2002)。大量研究表明, 微生物具有吸附能力强、耐环境冲击、可操作性强、降低二次污染等优越性 (魏复盛, 1993; Sze *et al.*, 1996; 刘月英等, 2000; 郭学军等, 2002; 徐永健等, 2007), 所以生物吸附法已经越来越多地被应用到治理重金属污染环境的问题中。

已有研究发现, 不同的微生物类型具有不同的吸附选择性和吸附容量, 同种微生物在不同的生长阶段也表现出不同的表面化学性质 (Pandiripally *et al.*, 2002)。但是, 不同生长阶段的微生物吸附重金属离子的差异却鲜有研究。氧化亚铁硫杆菌 (*Acidothiobacillus ferrooxidans*) 为金属硫化物矿山环境中发现的最具有代表性的氧化细菌, 常见于尾矿库表面和酸性矿山排水, 细菌的吸附作用对环境流体中重金属的活动性有着重要影响。本文选择对数生长期和稳定期两个生长阶段的氧化亚铁硫杆菌, 开展了  $\text{Cu}^{2+}$  的吸附实验, 获得了  $\text{Cu}^{2+}$  的吸附等温线, 建立了吸附模型, 初步探讨了不同生长阶段细菌的吸附性能差异。

## 1 实验材料与设计

### 1.1 氧化亚铁硫杆菌

氧化亚铁硫杆菌 (*Acidothiobacillus ferrooxidans*, 简称 *A. f.*), 化能自养, 革兰氏阴性菌, 好氧嗜酸。属于原核生物界, 化能营养原核生物门, 最适合生长的温度为  $30^\circ\text{C}$ , pH 值为 2.5, 当培养基中 pH 值超过 3.0 时溶液会产生  $\text{Fe}^{3+}$  的沉淀物, 覆盖到细菌表面影响 *A. f.* 对各种形态的  $\text{Fe}^{2+}$  的氧化。该菌常见于金属硫化物矿床和煤炭矿床的酸性矿坑水中, 以  $\text{CO}_2$  为碳源,  $\text{NH}_4^+$  为氮源, 通过氧化  $\text{Fe}^{2+}$ 、元素 S 以及还原态的化合物等来获得生命过程中所需的能量。

使用的细菌分离纯化自安徽铜陵酸矿坑水。9 K 培养基, pH=2.0, 分别经过湿热灭菌和过滤灭菌后在无菌操作台上接种氧化亚铁硫杆菌。然后放入  $30^\circ\text{C}$ 、150 r/min 的全温摇瓶箱中培养 6 d、10 d 后取出, 分别对应的时期为细菌生长的对数生长期、稳定期 (图 1), 分离出的细菌放入冰箱待用。利用显微镜计数法, 此时这两个生长阶段细菌的菌液浓度分别为  $6.24 \times 10^7$  个/mL 和  $6.8 \times 10^7$  个/mL。

### 1.2 吸附实验

用电子天平分别称量 9.766 6、3.906 8 和 0.390 4 g 的  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , 使用 1 000 mL 的容量瓶, 用去离子水配制了  $[\text{Cu}^{2+}]$

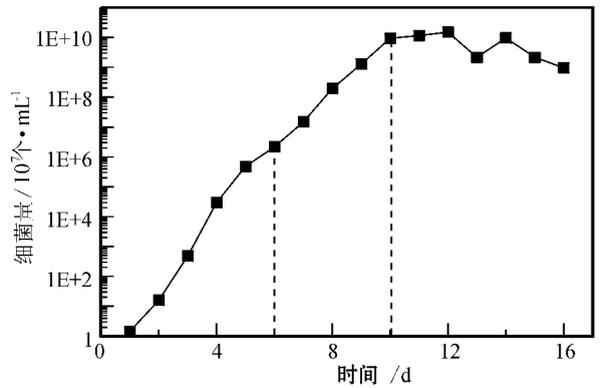


图 1 氧化亚铁硫杆菌的生长曲线图

Fig. 1 Growth curve of *Acidothiobacillus ferrooxidans*

分别为 2.5、1.0 和 0.1 g/L 的  $\text{CuSO}_4$  溶液备用。取 8 支试管, 用移液枪移取不同体积的浓度为 2.5、1.0 和 0.1 g/L 的  $\text{CuSO}_4$  溶液, 配制  $[\text{Cu}^{2+}]$  不等的 8 mL 的溶液体系, 然后每个试管中加入 2 mL 的菌液。待 20 min 平衡后 (丁雨等, 2007), 倒入离心管中, 以 3 500 r/min 的速度离心 10 min, 收集上清液倒入试管中, 分别稀释 10 倍或 100 倍后倒入容量管中保存待测定, 测定无菌平衡溶液的 pH 值和 Cu 含量, 以获得  $\text{Cu}^{2+}$  的吸附等温线。

溶液的 pH 值测定为 Zetasizer nano 附 pH 仪, 具有 Ag/AgCl 内标溶液, 测量误差为 0.01。溶液的 Cu 含量分析在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成, 所用仪器为电感耦合等离子体发射光谱 (ICP-AES JY38S 型), 功率 0.94 W, 频率 40.68 MHz, 焦距 1 m, 实际分辨率 0.005 nm, 波长范围 165 ~ 800 nm, 检测下限 0.01 ~ 0.1  $\mu\text{g}/\text{mL}$ , 精密度  $\text{RSD} \leq 2\%$ 。

## 2 吸附等温线和吸附模型

### 2.1 吸附等温线

不同生长阶段的氧化亚铁硫杆菌吸附  $\text{Cu}^{2+}$  的吸附等温线如图 2 所示。图 2 显示,  $\text{Cu}^{2+}$  的吸附量与初始浓度呈显著的正相关, 随着  $\text{Cu}^{2+}$  初始浓度的增加, 氧化亚铁硫杆菌对其的吸附量也随之增加。这与多粘芽孢杆菌 (*Paenibacillus polymyxa*) 吸附  $\text{Cu}^{2+}$ 、矽藻菌 (*Schizomeris leibleinii*) 吸附  $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  离子以及根霉 (*Rhizopus arrhizus*) 吸附  $\text{Zn}^{2+}$  的实验 (Özer *et al.*, 1999) 相似, 即提高环境流体中的重金属浓度与生物量的比率能够增加生物体的吸附 (吸收) 量。

Giles 等 (1960) 根据稀溶液条件下固体材料吸附金属离子的吸附等温线斜率将等温线细分为 S 型、L 型、H 型和 C 型 4 类, 对数生长期和稳定期的氧化亚铁硫杆菌吸附  $\text{Cu}^{2+}$  的吸附等温线为 S 型等温线。S 型等温线是起始阶段斜率较小, 并凸向浓度轴的曲线。即起始时, 溶液中  $\text{Cu}^{2+}$  浓度较小时吸

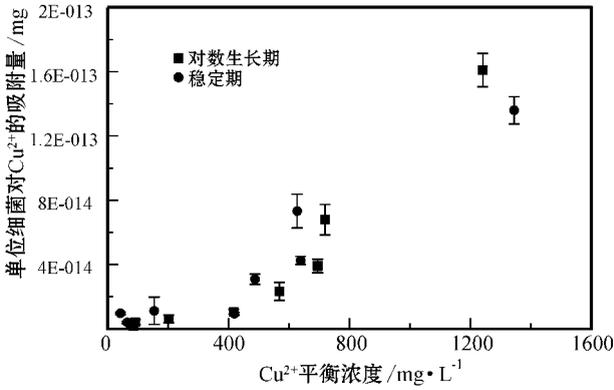


图 2 对数生长期和稳定期氧化亚铁硫杆菌对 Cu<sup>2+</sup> 的吸附等温线

Fig. 2 Adsorption isotherm of Cu<sup>2+</sup> on *Acidithiobacillus ferrooxidans* in logarithmic phase and stationary phase

附现象并不明显,当随着 Cu<sup>2+</sup> 浓度增加时吸附等温线有一较快速升高的区域,此时是由于被吸附 Cu<sup>2+</sup> 大量被氧化亚铁硫杆菌表面吸引所造成的。

### 2.2 吸附模型分析

固体物质自稀溶液中的吸附常用 Langmuir 吸附模型和 Freundlich 吸附模型描述,通过模型分析可了解吸附质在特定吸附剂上的吸附行为。

Langmuir 吸附模型假定吸附是单分子层的,体相溶液和吸附层均可视为理想溶液,即吸附质分子之间不存在任何形式的相互作用。自稀溶液吸附的 Langmuir 等温式有多种形式,其中之一为方程式(1):

$$\frac{1}{Q} = a \frac{1}{C} + b \quad (1)$$

式中:Q 为吸附量,C 为吸附平衡时的溶液浓度,a、b 均为常数,用作图法或线性最小二乘法均可以求出。

Freundlich 吸附模型描述的是非均质固体表面的吸附行为。若固体表面是不均匀的,交换吸附平衡常数将与表面覆盖度有关,即 b 与覆盖度 θ 有关,从而可导出 Freundlich 等温式如方程式(2):

$$n_2^s = aC^{1/n} \quad (2)$$

式中:n<sub>2</sub><sup>s</sup> 为饱和吸附量,C<sub>0</sub> 为初始浓度,又有 n<sub>2</sub><sup>s</sup> =  $\frac{V(C_0 - C)}{m}$ ,V、m 在本次实验中均为常数,故有

$$\ln(C_0 - C) = \frac{1}{n}C + \ln \frac{a^{1/n}V}{m} \quad (3)$$

式中 a、n 为常数,可根据吸附等温线数据拟合获得。

图 3、图 4 分别为 Langmuir 吸附模型和 Freundlich 吸附模型模拟不同生长阶段的氧化亚铁硫杆菌吸附 Cu<sup>2+</sup> 的拟合结果。可见,这两种吸附模型对对数生长期的吸附数据有较好的拟合结果,信度系数分别为 0.72 和 0.91。这表明两种模型均能在一定程度上反映对数生长期的细菌的表面吸附行为,但是 Freundlich 吸附模型拟合的信度更高。即在极低

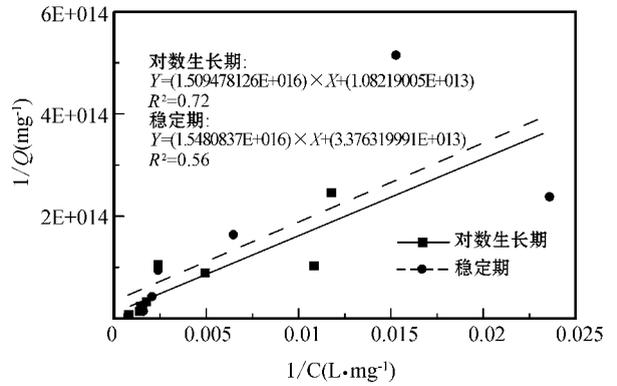


图 3 氧化亚铁硫杆菌吸附 Cu<sup>2+</sup> 的 Langmuir 模型拟合

Fig. 3 Langmuir fitting of Cu<sup>2+</sup> adsorption on *Acidithiobacillus ferrooxidans*

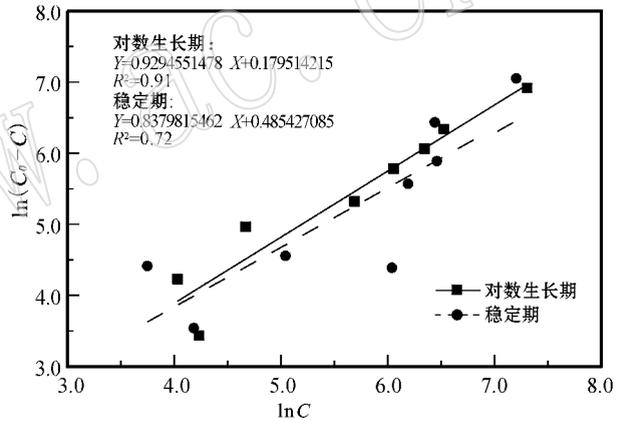


图 4 氧化亚铁硫杆菌吸附 Cu<sup>2+</sup> 的 Freundlich 模型拟合

Fig. 4 Freundlich fitting of Cu<sup>2+</sup> adsorption on *Acidithiobacillus ferrooxidans*

Cu<sup>2+</sup> 浓度下,由于吸附位被占用的较少,表面化学的非均质性并不显著,在一定程度上可用 Langmuir 吸附模型描述;而在相对高浓度的溶液中则有多种类型的吸附位, Freundlich 吸附模型更为适宜。这一特征与 *Streptomyces coelicolor* A3 细菌吸附 Cu<sup>2+</sup> 和 Ni<sup>2+</sup> (Ozturk et al., 2004) 以及 *Aeromonas caviae* 细菌、*Spirulina* 菌吸附 Cd<sup>2+</sup> 的实验 (Loukidou et al., 2005; Doshi et al., 2007) 类似。在吸附量较低的情况下,细菌表面的吸附可以看成单层吸附,为化学吸附的常见形式 (Loukidou et al., 2005),吸附位的差异不明显;但随着吸附量的增加,细菌表面的不同化学基团先后发生吸附作用,则表现为更显著的非均值特征。鉴于 Freundlich 吸附模型拟合的信度系数明显高于 Langmuir 吸附模型,说明在对数生长期时,细菌表面是不均匀的,产生在细菌表面的交换吸附与细菌表面的覆盖度有关。根据 Langmuir 吸附模型计算,每个对数期氧化亚铁硫杆菌细胞吸附 Cu<sup>2+</sup> 的最大吸附容量为 9.24 ×

$10^{-14}$  mg, 这一吸附量实际上低于  $\text{Cu}^{2+}$  初始浓度为 2.5 g/L 时的吸附量, 从另外一个侧面也说明了该生长阶段细菌的吸附行为不完全是 Langmuir 型吸附, 更加符合 Freundlich 吸附模型。

而稳定期的氧化亚铁硫杆菌对于 Langmuir 吸附模型和 Freundlich 吸附模型两种吸附模型的拟合信度系数为 0.54 和 0.72, 所以同样, 稳定期的氧化亚铁硫杆菌的吸附模型明显更加符合 Freundlich 吸附模型, 说明在细菌的生长过程中, 细菌表面的化学基团发生了变化, 与对数期相比, 细菌表面的化学非均质性增强。在细菌吸附金属离子的过程中, 多种化学位均发生吸附作用, 吸附行为更为复杂。细胞表面结构和重金属表面吸附(或化学络合)之间的对应关系还有待进一步研究。

### 3 吸附机理讨论

图 5 展示了在两个生长阶段菌液的 pH 值与  $\text{Cu}^{2+}$  吸附量之间的关系, 随着吸附量的增加, 菌液的 pH 值从 4.5 左右下降至 3.2 左右, 说明随着细菌表面与  $\text{Cu}^{2+}$  结合, 溶液中的  $[\text{H}^+]$  增加。在低 pH 值条件下, 大量  $\text{H}^+$  的存在与金属离子竞争吸附位点, 使得吸附量较小。随着溶液中金属离子含量的升高, 吸附量显著增加, 溶液的 pH 值也相应下降。二者之间的负相关关系说明溶液的 pH 值对重金属活动性和生物吸附的行为有着不容忽视的联系, 溶液中的  $[\text{H}^+]$  可能是影响生物吸附的关键因素(王立娜等, 2009)。两个生长阶段的细菌在吸附行为与溶液 pH 值之间的关系略有差异。在吸附量相同时, 稳定期氧化亚铁硫杆菌的溶液 pH 值明显小于对数生长期。

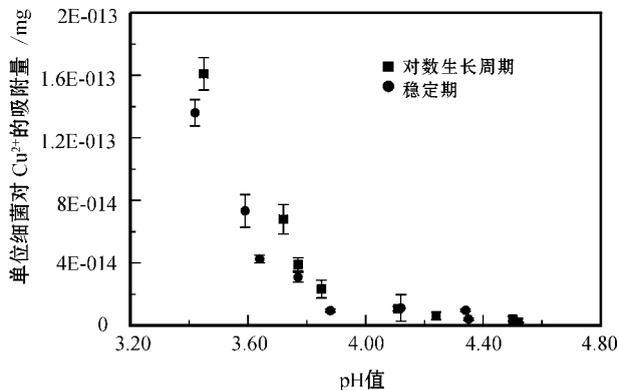
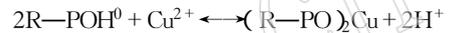


图 5  $\text{Cu}^{2+}$  吸附量与 pH 值之间的关系

Fig. 5 Variation of  $\text{Cu}^{2+}$  adsorption in relation to pH of the solution

一般来说, 细菌表面的化学特征和被吸附的金属离子的特征是影响吸附作用的重要因素。阳离子的离子半径和带电荷量决定吸附能力的强弱(Maier *et al.*, 2004),  $\text{Cu}^{2+}$  作为过

渡族金属阳离子具有很高的络合能力。当细菌吸附  $\text{Cu}^{2+}$  的时候, 细菌的表面发生的离子交换为羧基、磷酸基、羟基等各有有机基团中  $-\text{COOH}$ 、 $-\text{POH}$ 、 $-\text{OH}$  所含的  $\text{H}^+$  与  $\text{Cu}^{2+}$  发生离子交换,  $\text{H}^+$  被置换释出, 这也是随着吸附量增加 pH 值下降的重要原因。 $\text{Cu}^{2+}$  与细胞表面的基团结合为化学吸附行为, 所以认为氧化亚铁硫杆菌吸附  $\text{Cu}^{2+}$  属于离子交换型化学吸附。由于细胞表面的化学基团数量丰富、类型复杂, 所以吸附行为并不能简单描述为单层吸附模式, 这就与无论在对数生长期还是稳定期氧化亚铁硫杆菌对  $\text{Cu}^{2+}$  的吸附模型更加符合 Freundlich 吸附模型相吻合。细菌对  $\text{Cu}^{2+}$  吸附是一个相对较快的过程, 大部分细菌可在 1 h 内达到吸附平衡(黄富荣等, 2004; 席宇等, 2005; 康铸慧等, 2006; 丁雨等, 2007), 说明细菌对  $\text{Cu}^{2+}$  的吸附以速率较快的化学反应吸附为主, 即以表面活性基团和  $\text{Cu}^{2+}$  的络合为主。



微生物生长不同阶段表现出的吸附行为差异, 说明不同生长阶段细菌的表面具有种类不同或数量不等的各类基团, 这对微生物吸附重金属离子有着重要的影响。尤其是当细菌生长到稳定期阶段时, 细胞表面的化学非均质性增强, 吸附行为偏离 Langmuir 吸附模型, 尽管吸附容量并没有升高, 但发生表面吸附的化学基团却更为复杂。二者表面化学的差异, 可能不仅仅与细胞壁结构发生变化有关, 更可能与细菌胞外聚合物更为发育、菌液中代谢产物增加有着密切的联系, 因为随着细菌的生长, 胞外聚合物的量会有所增加, 化学组成也会发生一定的变化(林娟等, 2007)。当然, 不同阶段细菌吸附行为的差异还可能与细胞的生物活性变化、发生细菌吸收和重金属离子局部矿化等现象有关, 有些生物化学过程与细菌的生长阶段也有着密切的联系(高健伟等, 2006)。

### 4 结论

(1) 对数生长期和稳定期的氧化亚铁硫杆菌吸附  $\text{Cu}^{2+}$  的吸附等温线为 S 型等温线。两个不同生长阶段的氧化亚铁硫杆菌对  $\text{Cu}^{2+}$  的吸附存在差别。对数生长期的氧化亚铁硫杆菌和稳定期的氧化亚铁硫杆菌均较符合 Freundlich 吸附模型, 表明其表面化学特征具有非均质性。

(2)  $\text{Cu}^{2+}$  在两个生长阶段细菌表面的吸附均可解释为离子交换化学吸附, 氧化亚铁硫杆菌的表面化学基团的多样性是细菌表现出显著的表面化学非均质性的原因, 而在不同生长阶段, 细菌细胞壁的结构和胞外聚合物的发育状况均有变化, 所以随着细菌的生长, 其对  $\text{Cu}^{2+}$  的吸附行为存在差异。

### References

Beveridge T J. 1989. Role of cellular design in bacterial metal accumula-

- tion and mineralization[J]. Annual Review of Microbiology, 43: 147~171.
- Burnett P G, Handley K, Peak D, et al. 2007. Divalent metal adsorption by the *thermophile Anoxybacillus flavithermus* in single and multimetal system[J]. Chemical Geology, 244: 493~506.
- Cao Deju and Cheng Pei. 2004. Bioremediation of Several Microorganisms Towards Cu and Cd by Adsorption[J]. Journal of Agro-environmental Science, 23(3): 471~474 (in Chinese with English abstract).
- Ding Yu, Lu Xiancai, Lu Jianjun, et al. 2007. Experimental Study on the Adsorption of  $\text{Cu}^{2+}$  on *Paenibacillus polymyxa*[J]. Geological Journal of China Universities, 13(4): 546~550 (in Chinese with English abstract).
- Doshi H, Ray A and Kothari I L. 2007. Biosorption of cadmium by live and dead *Spirulina*: IR spectroscopic, kinetics, and SEM studies[J]. Current Microbiology, 54(3): 213~218.
- Fein J B, Daughney C J, Yee N, et al. 1997. A chemical equilibrium model of metal adsorption onto bacterial surfaces[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 61: 3319~3328.
- Fein J B, Martin A M and Wightman P G. 2001. Metal adsorption onto bacterial surfaces: Development of a predictive approach[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 65: 4267~4273.
- Gao Jianwei, Zhang Dan, Chen Hong, et al. 2006. Biosorption of trace lead in aqueous solutions by dead biomass of macrofungi[J]. Industrial Water & Wastewater, 37(4): 23~26 (in Chinese with English abstract).
- Gile C H, Mac Evan T H, Nakhava S W, et al. 1960. Studies in adsorption. Part XI. A system of classification of solution adsorption isotherms, and its use in diagnosis of adsorption mechanisms and in measurement of specific surface areas of solids[J]. J. Chem. Soc., 3973.
- Guo Xuejun and Huang Qiaoyun. 2002. Effects of Microorganisms on the Mobility of Heavy Metals in Soil Environment[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 8(1): 105~110 (in Chinese with English abstract).
- Huang Furong, Yin Hua, Peng Hui, et al. 2004. Study of kinetics and desorption of copper biosorption by *Rhodospirillum*[J]. Ecology Science, 23(1): 35~37 (in Chinese with English abstract).
- Kang Zhuhui, Wang Lei, Zheng Guanghong, et al. 2006. Capability of  $\text{Cu}^{2+}$  Adsorption on Cell Surface of *Pseudomonas putida* 5-x[J]. Environmental Science, 27(5): 965~971 (in Chinese with English abstract).
- Lin Juan, Ma Cheng, Liu Shutao, et al. 2007. Characterization of *Ralstonia solanacearum* in different growth phases by high performance ion exchange liquid chromatography analysis[J]. Acta Microbiologica Sinica, 47(1): 145~149 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yueying, Fu Jingkun, Li Renzhong, et al. 2000. Studies on Biosorption of  $\text{Pd}^{2+}$  by Bacteria[J]. Acta Microbiologica Sinica, 40(5): 535~539 (in Chinese with English abstract).
- Loukidou M X, Karapantsios T D, Zouboulis A I, et al. 2005. Cadmium(II) biosorption by *Aeromonas caviae*: kinetic modeling[J]. Separation Science and Technology, 40(6): 1293~1311.
- Maier R M, Pepper I L and Gerba C P. 2004. Environmental Microbiology[M]. San Diego: Elsevier Science, 207~209, 536~543.
- Özer A, Ozer D and Ekiz H I. 1999. Application of Freundlich and Langmuir models to multistage purification process to remove heavy metal ions by using *Schizomeris leibleinii*[J]. Process Biochemistry, 34: 919~927.
- Ozturk A, Artan T and Ayar A. 2004. Biosorption of nickel(II) and copper(II) ions from aqueous solution by *Streptomyces coelicolor* A3(2)[J]. Colloids and Surfaces B-Biointerfaces, 34(2): 105~111.
- Pandiripally V, Gregory E and Cue D. 2002. Acquisition of regulators of complement activation by *Streptococcus pyogenes* serotype M1[J]. Infection and Immunity, 70(11): 6206~6214.
- Schultz-Lam S, Fortm D, Davis B S, et al. 1996. Mineralization of bacterial surface[J]. Chemical Geology, 132: 171~182.
- Sze K F, Lu Y J and Wong P K. 1996. Removal and recovery of copper ion from electroplating effluent by a bioreactor containing magnetite-immobilized cells of *Pseudomonas putida* 5-x[J]. Resour. Conserv. Recycl., 18(1): 175~193.
- Wang Lina, Zhao Ruixue, Zheng Xiaoqiu, et al. 2009. Research on adsorption of immobilized beer yeast on  $\text{Pb}^{2+}$ [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 32(1): 160~164 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yaxiong, Guo Jinlong and Liu Ruixia. 2001. Biosorption of heavy metals by bacteria isolated from activated sludge[J]. Chinese Journal of Environmental Science, 22(6): 72~75 (in Chinese with English abstract).
- Wei Fusheng. 1993. Water and Wastewater Monitoring Analysis Method[M]. Beijing: Chinese Environment Science Press, 237~315 (in Chinese).
- Xi Yu, Zhu Daheng, Liu Jiangtao, et al. 2005. Advances on Pseudoalteromonas Species and Their Extracellular Bioactive Compound[J]. Microbiology, 32(3): 108~112 (in Chinese with English abstract).
- Xie Xiande and Zhang Gangsheng. 2001. Environmental significance of the interaction between minerals and microbes[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 20(4): 382~386 (in Chinese with English abstract).
- Xu Yongjian, Le Guanzong and Zhang Youping. 2007. Comparison with several methods to isolate epiphytic bacteria from *Gracilaria lemaneiformis* (Rhodophyta)[J]. Microbiology, 34(1): 123~126 (in Chinese with English abstract).
- Yee N and Fein J B. 2002. Does metal adsorption onto bacterial surface inhibit or enhance aqueous metal transport: column and batch reactor experiments on Cd-*Bacillus subtilis*-quartz system[J]. Chemical Geology, 185: 303~319.
- Yin Hua, Ye Jinshao, Peng Hui, et al. 2004. Adsorbing Capability of Chromium-galvanized Waste Water by Yeast-Activated Sludge[J]. Chinese Journal of Environmental Science, 25(3): 61~64 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Lixiang and Wang Genmei. 2001. Bioleaching of heavy metals from sewage sludge[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 21(4): 504~506

(in Chinese with English abstract).

### 附中文参考文献

- 曹德菊,程培. 2004. 3种微生物对Cu、Cd生物吸附效应的研究[J]. 农业环境科学学报, 23(3): 471~474.
- 丁雨,陆现彩,陆建军,等. 2007. 多粘芽孢杆菌(*Paenibacillus polymyxa*)吸附Cu<sup>2+</sup>的实验研究[J]. 高校地质学报, 13(4): 675~681.
- 高健伟,张丹,陈红,等. 2006. 蕈菌菌丝体死细胞对水溶液中微量铅离子的吸附[J]. 工业用水与废水, 37(4): 23~26.
- 郭学军,黄巧云. 2002. 微生物对土壤环境中重金属活性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 8(1): 105~110.
- 刘月英,傅锦坤,李仁忠,等. 2000. 细菌吸附Pd<sup>2+</sup>的研究[J]. 微生物学报, 40(5): 535~539.
- 黄富荣,尹华,彭辉,等. 2004. 红螺菌吸附铜的动力学与脱附研究[J]. 生态科学, 23(1): 35~37.
- 康铸慧,王磊,郑广宏,等. 2006. 恶臭假单胞菌 *Pseudomonas putida* 5-x 细胞壁膜系统的Cu<sup>2+</sup>吸附性能[J]. 环境科学, 27(5): 965~971.
- 林娟,马骋,刘树滔,等. 2007. 不同生长阶段青枯菌的高效离子交换色谱表征[J]. 微生物学报, 47(1): 145~149.
- 王立娜,赵瑞雪,郑笑秋,等. 2009. 固定化啤酒酵母菌吸附Pb<sup>2+</sup>的研究[J]. 长春理工大学学报, 32(1): 160~164.
- 王亚雄,郭瑾珑,刘瑞霞. 2001. 微生物吸附剂对重金属的吸附特性[J]. 环境科学, 22(6): 72~75.
- 魏复盛. 1993. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 237~315.
- 席宇,朱大恒,刘江涛,等. 2005. 假交替单胞菌及其胞外生物活性物质研究进展[J]. 微生物学通报, 32(3): 108~112.
- 谢先德,张刚生. 2001. 微生物-矿物相互作用之环境意义的研究[J]. 岩石矿物学杂志, 20(4): 382~386.
- 徐永健,乐观宗,张友平. 2007. 龙须菜体表附生细菌的几种分离方法比较[J]. 微生物学通报, 34(1): 123~126.
- 尹华,叶锦韶,彭辉,等. 2004. 酵母菌-活性污泥法吸附处理含铬电镀废水的性能[J]. 环境科学, 25(3): 61~64.
- 周立祥,王良梅. 2001. 污水污泥中重金属的细菌淋滤效果研究[J]. 农业环境科学学报, 21(4): 504~506.

www.yskw.ac.cn