

鱼腥蓝细菌 PCC 7120 对 Mn^{2+} 的吸附

李 敏 徐韶足 陈雯莉 王 莉

华中农业大学农业微生物学国家重点实验室, 武汉 430070

摘要 为寻找新型生物吸附剂用于重金属污染环境的修复, 本研究通过设置不同时间、质量浓度以及氮源缺乏等条件, 检测了鱼腥蓝细菌 PCC 7120 对 Mn^{2+} 的吸附情况。结果表明: 在 Mn^{2+} 质量浓度低于 10 mg/L 时, PCC 7120 对 Mn^{2+} 的去除率最高能达到 80%, 并且 PCC 7120 对 Mn^{2+} 的吸附过程符合 Freundlich 等温吸附模型和准二级吸附动力学方程。缺氮后, PCC 7120 对 Mn^{2+} 的耐受力降低且吸附能力大大减弱。

关键词 鱼腥蓝细菌; Mn^{2+} ; 重金属污染; 生物吸附

中图分类号 Q 93-33 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2018)01-0001-06

随着世界经济的快速发展, 工农业发展规模迅速扩大, 由此引发的环境污染问题特别是重金属污染已成为 21 世纪人们关注的焦点。重金属污染主要是未经处理的工农业废水直接排入环境, 并进一步通过食物链的传递对动植物和人类造成日益严重的危害^[1]。国家标准 GB 5749-2006 规定生活饮用水卫生标准锰含量 0.1 mg/L, 而地表水中的锰经常季节性、突发性地出现超标现象 (0.1~5.0 mg/L), 甚至在某些水库的夹缝中达到 10~20 mg/L。近些年来, 在我国湖南、广东、浙江、福建、上海等很多地区都出现了地表水锰超标的情况。长期使用含锰超标的水, 会造成人体锰的慢性中毒, 使人头晕、头痛、肢体酸痛、下肢无力和心悸等。为去除水环境中的重金属, 传统的治理方法主要采用物理化学法如化学还原法、化学沉淀法、萃取法、膜分离法、活性炭吸附法等^[2-3]。这些方法虽有一定效果, 然而多数成本高、消耗大、操作过程复杂, 从经济效益和环境保护角度来看, 都非长久之计。而生物修复重金属污水则受到越来越多的关注, 特别是利用微生物处理重金属污水的研究逐渐成为该领域的热点^[4-5]。

微生物种类繁多、数量庞大、分布范围广泛、环境适应能力强, 是自然界中最为丰富的生物资源。对于不同重金属, 一般都会有相应的微生物能进行吸附^[6]。细菌是地球上最丰富的微生物, 细菌对重金属的耐受机制是多方面的, 往往综合运用多种机

制来对抗重金属的毒害作用。如细胞外部沉淀机制, 通过分泌胞外物质改变环境条件等使重金属沉淀; 细胞表面吸附机制, 通过各种作用将重金属离子吸附固定在细胞表面, 减少细胞内部的吸收; 细胞内部解毒机制等^[7]。

蓝细菌是一群种类繁多、分布广泛的光能营养菌, 螺旋蓝细菌属、念珠蓝细菌属和鱼腥蓝细菌属中的一些菌株对重金属有良好的吸附能力。鱼腥蓝细菌 PCC 7120 是一种革兰氏阴性菌, 能进行产氧光合作用, 在缺氮后能形成异形胞执行固氮功能, 并将氮源传递给营养细胞, 营养细胞则提供碳素营养给异形胞, 两者互为补充。

本研究以水体中广泛存在的鱼腥蓝细菌 PCC 7120 为材料, 考察了它对锰离子的吸附能力并模拟其吸附动力学规律, 同时比较了缺氮后 PCC 7120 对 Mn^{2+} 吸附能力的变化, 以期对微生物修复重金属污染寻找优良菌种材料。

1 材料与方法

1.1 菌株与培养条件

鱼腥蓝细菌使用硝酸盐培养基 BG11 或 BG11₀ (缺氮培养基) 培养。液体培养一般在 30 °C、120 r/min、光强 50~100 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的光照摇床上培养。缺氮培养在 BG11₀ 培养基中进行^[8]。

收稿日期: 2017-05-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(31570048); 中央高校基本科研业务费专项(2014PY003)

李 敏, 硕士研究生. 研究方向: 蓝细菌分子生物学. E-mail: 1529375355@qq.com

通信作者: 王 莉, 博士, 副教授. 研究方向: 蓝细菌分子生物学. E-mail: wangli@mail.hzau.edu.cn

1.2 鱼腥蓝细菌 PCC 7120 对 Mn^{2+} 吸附能力的测定与计算

将鱼腥蓝细菌 PCC 7120 在 BG11 或 BG11₀ 培养基中培养至相应时期,添加不同浓度的 Mn^{2+} ,一定时间后,取 2 mL 样品置于离心机中,12 000 r/min 离心 2 min,取上清液,稀释至 3 mg/L 以下,利用原子火焰分光光度计测定样品中 Mn^{2+} 浓度:

$$q_e = V(C_i - C_e)/m \quad (1)$$

$$R_e = C_i - C_e / C_i \quad (2)$$

式中, q_e 是吸附剂对重金属离子的吸附量, mg/g; V 为收集样品体积, L; m 为样品质量, g; C_i 则表示溶液中重金属离子的初始质量浓度, mg/L; C_e 表示吸附平衡时溶液中重金属离子的质量浓度, mg/L; R_e 为重金属去除率 (removal rate), %。

1.3 吸附动力学模型

常用的动力学模型为 Lagergren 准一级和准二级动力学方程。

准一级动力学方程表示为:

$$dq_t/dt = k_1(q_e - q_t) \quad (3)$$

其线性方程为:

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - (k_1 \cdot t / 2.303) \quad (4)$$

方程式(3)、(4)中的 q_e 和 q_t 分别为吸附平衡和时间为 t 时吸附剂对重金属离子的吸附量, mg/g; k_1 是准一级动力学方程的常数。如果 $\ln(q_e - q_t)$ 与 t 之间符合线性关系,那么吸附过程符合准一级动力学方程。事实上,整个吸附实验过程中只有部分时段的实验数据可以很好地符合 Lagergren 准一级动力学方程。

准二级动力学方程表示为:

$$dq_t/dt = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (5)$$

其线性方程为:

$$t/q_t = 1/(k_2 \cdot q_e) + t/q_e \quad (6)$$

方程式(5)、(6)中的 q_e 和 q_t 分别为吸附平衡和时间为 t 时吸附剂对重金属离子的吸附量, mg/g; k_2 是准二级动力学方程的常数。如果 t/q_t 与 t 之间符合线性关系,那么吸附过程符合准二级动力学方程^[9-11]。

1.4 吸附等温模型

在生物吸附过程中,一般会达到吸附平衡状态。吸附平衡时溶液中金属离子的平衡浓度 (C_e) 与吸附剂对重金属的吸附量 (q_e) 之间的关系可以用吸附等温模型 Langmuir 模型和 Freundlich 模型拟合。

Langmuir 方程表示为:

$$q_e = q_m \cdot b \cdot C_e / (1 + b \cdot C_e) \quad (7)$$

式中, q_m 表示最大吸附量, mg/g; b 是 Langmuir 吸附常数,它的大小反映了生物吸附剂与重金属离子间的亲和力的强弱,即吸附能力的大小。

Langmuir 模型的假设吸附是单分子层的,而 Freundlich 模型的吸附是多分子层的吸附,方程为

$$q_e = kC_e^{1/n} \quad (8)$$

这些模型能够为菌体对重金属吸附能力的判断提供参考^[12-13]。

1.5 显微观察

使用 Nikon Eclipse 80 i 荧光显微镜,在 100× 油镜下分别观察细胞形态。

2 结果与分析

2.1 鱼腥蓝细菌 PCC 7120 对 Mn^{2+} 的吸附

1) 菌体生长密度与细胞干质量的关系。收集 20 mL 不同 D_{750} 的鱼腥蓝细菌 PCC 7120 菌体,采用测定菌体干质量的方式来绘制 D_{750} 与菌体干质量之间的标准曲线。将收集到的菌体用清水洗 2~3 次,离心后去除上清液,于高温烘箱中过夜干燥至恒质量后,称量菌体干质量,测得标准曲线(图 1)。

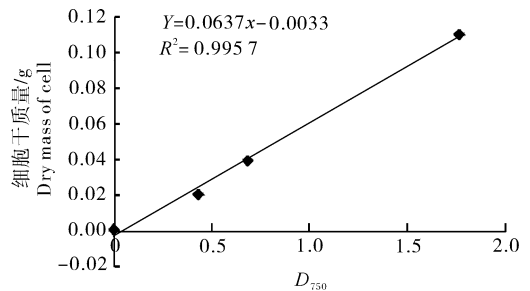


图 1 PCC 7120 不同 D_{750} 的细胞干质量标准曲线

Fig.1 The standard curve of dry mass of PCC 7120 under the different D_{750}

2) 吸附时间对 PCC 7120 吸附 Mn^{2+} 的影响。鱼腥蓝细菌 PCC 7120 在 D_{750} 为 0.8~1.0 时,菌体生长处于稳定期,菌体数量达到最大值,选定在该菌体数量下进行吸附实验。由于环境中大部分 Mn^{2+} 质量浓度为 0~5 mg/L,因此,设定 Mn^{2+} 质量浓度 5 mg/L、菌体 $D_{750} = 0.8$ 时,6 h 内(设置 0~480 min 不同时间点,每组设 3 个重复)测定吸附平衡时间。从图 2 可以看出,0~30 min 能够快速吸附,50~70 min 达到吸附平衡状态,此时对 Mn^{2+} 的吸附量约为 2.45 mg/g。

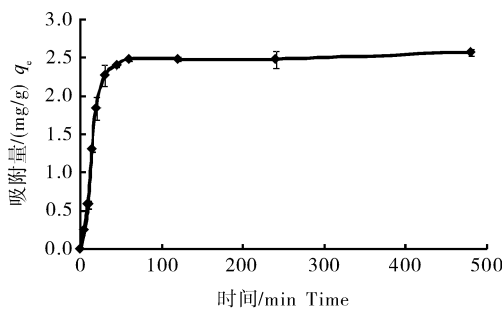
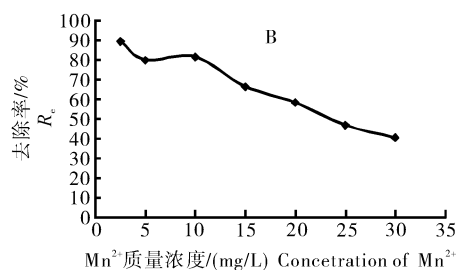
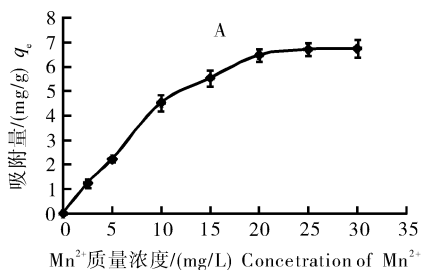


图2 吸附时间对鱼腥蓝细菌 PCC 7120 吸附 Mn^{2+} 能力的影响 ($D_{750}=0.8, Mn^{2+} 5 \text{ mg/L}, 120 \text{ r/min}, 30 \text{ }^\circ\text{C}$)

Fig.2 Effect of contact time on biosorption capacity of *Anabaena* PCC 7120 for Mn^{2+} ($D_{750}=0.8, Mn^{2+} 5 \text{ mg/L}, 120 \text{ r/min}, 30 \text{ }^\circ\text{C}$)

3) 重金属不同浓度对吸附的影响。对于活性生物吸附剂而言,重金属浓度同样能够影响其吸附量和吸附效率。超过一定浓度,菌体生长受到抑制,吸



A: Mn^{2+} 质量浓度对鱼腥蓝细菌 PCC 7120 菌体吸附 Mn^{2+} 能力的影响; B: Mn^{2+} 质量浓度与 R_e 关系示意图。A: Effect of Mn^{2+} concentration on biosorption capacity of *Anabaena* PCC 7120 for Mn^{2+} ; B: The schematic relationship between Mn^{2+} concentration and R_e .

图3 Mn^{2+} 质量浓度对吸附能力及去除率的影响

Fig.3 Effect of Mn^{2+} concentration on biosorption capacity and removal rate

4) 菌株 PCC 7120 对 Mn^{2+} 吸附的动力学特征。以 $D_{750}=0.8$ 时菌体质量浓度作为吸附剂用量, 5 mg/L Mn^{2+} 质量浓度下吸附时间为 6 h 的实验组数据进行吸附动力学分析,拟合得到的准一级和准二级动力学模型见图 4。通过准一级和准二级动力学模型计算所得到的吸附平衡时 Mn^{2+} 吸附量 q_e 分别是 249 mg/g 和 2.56 mg/g ,准二级动力学预测值与实验所得的吸附平衡时 Mn^{2+} 的吸附量 (2.48 mg/g) 更接近,而且准二级动力模型对 Mn^{2+} 吸附的实验数据拟合 $R^2=0.9875$,准一级动力模型与实验数据的拟合效果相对较差, $R^2=0.114$ 。可以推断,准二级动力学模型更好地拟合了鱼腥蓝细菌 PCC 7120 对 Mn^{2+} 的生物吸附。

5) 菌株 PCC 7120 对 Mn^{2+} 的等温吸附模型。将不同质量浓度 Mn^{2+} 条件下 PCC 7120 吸附的各

附效率降低。在前期实验中,探知 Mn^{2+} 对鱼腥蓝细菌 PCC 7120 的最小抑制质量浓度约为 40 mg/L ,此时菌体开始逐渐发黄。因此,设定 Mn^{2+} 质量浓度 $0 \sim 40 \text{ mg/L}$ 、菌体 $D_{750} \approx 0.8$ 、吸附时间 2 h ,测定在不同质量浓度下对 Mn^{2+} 的吸附值,每组 3 个重复。由图 3A 可知,随着 Mn^{2+} 质量浓度的增加,生物吸附量也随之增加, Mn^{2+} 质量浓度为 30 mg/L 时,吸附逐渐趋于平衡状态,此时最大吸附量为 6.75 mg/g 。由图 3B 也可以看出,在锰离子质量浓度低于 10 mg/L 时,即在大部分 Mn^{2+} 质量浓度环境中,鱼腥蓝细菌 PCC 7120 对 Mn^{2+} 的去除率达到 80% 以上,因此,鱼腥蓝细菌 PCC 7120 对 Mn^{2+} 的应用前景比较广阔。随着 Mn^{2+} 质量浓度的增加,蓝细菌吸附能力逐渐趋于饱和,去除率也随之下降。

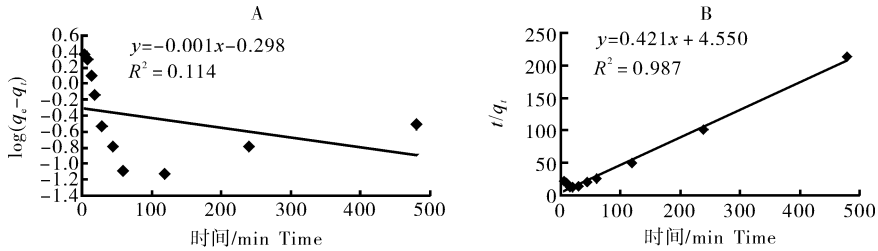
项数据分别模拟 Langmuir 和 Freundlich 吸附模型,结果见图 5。Langmuir 模型预测的 q_m 值为 6.31 , R^2 为 0.6453 ; Freundlich 方程预测的对 Mn^{2+} 的最大吸附量为 6.67 mg/g , R^2 达到 0.95 ,与实验所得数据 $q_m(6.75)$ 非常接近,说明 PCC 7120 对 Mn^{2+} 的吸附更有可能是多分子层吸附而不是单分子层吸附。

2.2 缺氮后鱼腥蓝细菌 PCC 7120 对 Mn^{2+} 的吸附

1) 缺氮后鱼腥蓝细菌 PCC 7120 对 Mn^{2+} 的耐受力。PCC 7120 能进行固氮生长,在缺氮后能形成异形胞执行固氮功能,但此时细胞的生理状态会发生很大的改变。营养细胞分化形成异形胞,异形胞表面形成了由糖脂层(HGL)和多糖层(HEP)组成的胞被^[14]。为了确定这种改变是否会影响 PCC 7120 对 Mn^{2+} 的吸附,首先检测了缺氮后

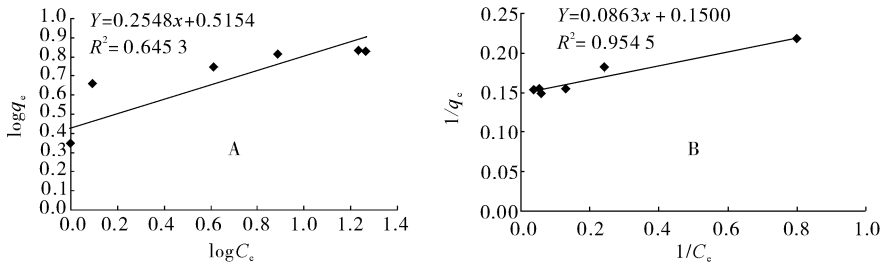
PCC 7120对 Mn^{2+} 的耐受能力。在前期实验中已知 Mn^{2+} 对正常条件下 PCC 7120 的最小抑制质量浓度为 40 mg/L, 在不同 Mn^{2+} 质量浓度下, 缺氮后, PCC 7120 的生长状况见图 6, 可见 Mn^{2+} 为 10

mg/L时, 缺氮 24 h 菌体开始泛黄, 48 h 菌体断裂严重, 异形胞脱落, 菌体死亡, 表明在该质量浓度下, Mn^{2+} 对菌体生长已产生抑制效果, 也表明缺氮后 PCC 7120 对 Mn^{2+} 的耐受能力降低。



A: 鱼腥蓝细菌 PCC 7120 吸附 Mn^{2+} 准一级吸附动力学模拟图; B: 鱼腥蓝细菌 PCC 7120 吸附 Mn^{2+} 准二级吸附动力学模拟图。
A: Pseudo-first-order kinetic model for Mn^{2+} biosorption by *Anabaena* PCC 7120 biomass; B: Pseudo-second-order kinetic model for Mn^{2+} biosorption by *Anabaena* PCC 7120 biomass.

图 4 吸附动力学模拟 (5 mg/L Mn^{2+} , $D_{750} = 0.8, 120$ r/min, 30 °C)
Fig.4 Kinetic model (5 mg/L Mn^{2+} , $D_{750} = 0.8, 120$ r/min, 30 °C)



A: 鱼腥蓝细菌 PCC 7120 对 Mn^{2+} 吸附的 Langmuir 等温吸附模型模拟图; B: 鱼腥蓝细菌 PCC 7120 对 Mn^{2+} 吸附的 Freundlich 等温吸附模型模拟图。A: Langmuir adsorption isotherm of Mn^{2+} on *Anabaena* PCC 7120 biomass; B: Freundlich adsorption isotherm of Mn^{2+} on *Anabaena* PCC 7120 biomass.

图 5 等温吸附模型模拟图 ($D_{750} = 0.8, 30$ °C、120 r/min, 2 h)
Fig.5 Langmuir adsorption isotherm ($D_{750} = 0.8, 30$ °C, 120 r/min, 2 h)

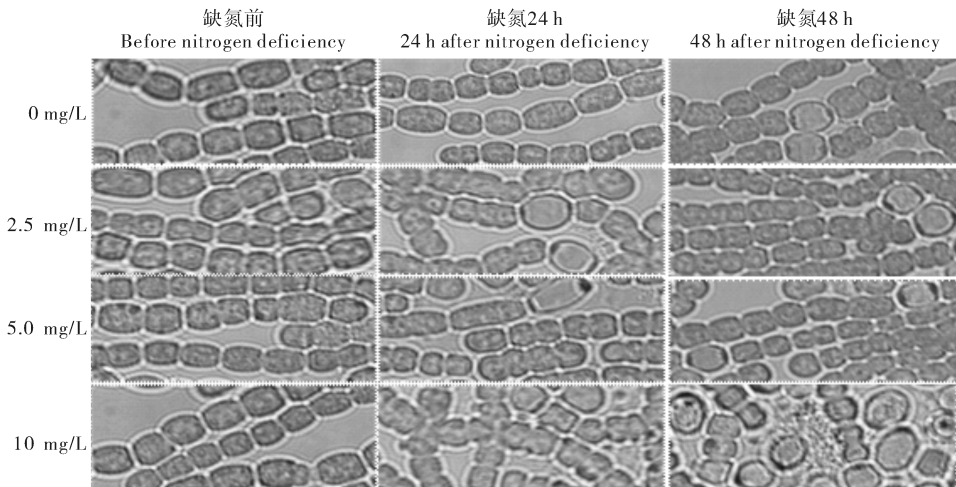


图 6 Mn^{2+} 不同质量浓度下缺氮前后 PCC7120 菌体生长情况
Fig.6 Micrographs of the PCC 7120 under different Mn^{2+} concentration

2) 缺氮后鱼腥蓝细菌 PCC 7120 对 Mn^{2+} 的吸附能力。缺氮后 PCC 7120 对 Mn^{2+} 耐受力降低, 为了确定其对 Mn^{2+} 的吸附能力是否也受影响, 测定了处于相同 D_{750} 的 PCC 7120 在 Mn^{2+} 质量浓度为 2.5 mg/L 时对 Mn^{2+} 的吸附能力。在相同的 D_{750} 下比较缺氮前后体系内 Mn^{2+} 质量浓度的变化(图 7), 可以看出, 缺氮后 PCC 7120 对 Mn^{2+} 的吸附能力大大下降。为了探明缺氮后 PCC 7120 对 Mn^{2+} 的吸附能力下降的原因, 检测了 2.5 mg/L Mn^{2+} 下 PCC 7120 缺氮后异形胞的分化频率(表 1), 可以看出: 缺氮后, Mn^{2+} 在一定程度上抑制异形胞的发育, 从而影响其生长, 进而可能影响到菌体对 Mn^{2+} 的吸附。

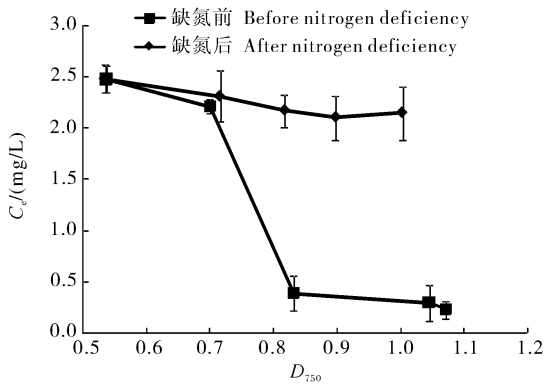


图 7 PCC 7120 下缺氮前后的 C_t 。

Fig.7 The C_t of PCC 7120 after nitrogen deficiency

表 1 异形胞频率统计

Table 1 The percentage of heterocysts

项目 Items	Mn^{2+} 质量浓度/(mg/L) Concentration of Mn^{2+}			
	0		2.5	
诱导时间/h Induced time	24	48	24	48
异形胞频率/% Percentage of heterocysts	12.1±0.3	15.2±0.6	10.1±0.5	11.8±0.3
异形胞数目 Numbers of cells	n>3 000			

3 讨论

本研究探讨了鱼腥蓝细菌 PCC 7120 对 Mn^{2+} 的吸附情况, 发现 Mn^{2+} 质量浓度在 10 mg/L 以下时, PCC 7120 对 Mn^{2+} 的去除率能达到 80% 以上。影响吸附效率的因素很多, 其中吸附时间是影响吸附的一个重要因素, 对于多数生物吸附剂, 达到吸附饱和的时间在 2~6 h^[15]。而本研究中 PCC 7120 对 Mn^{2+} 的吸附在 1 h 左右即可达到平衡状态(图 2), 效率较高, 主要是因为蓝藻细胞壁多含纤维素、果胶等, 携带有大量可与重金属结合的基因, 这种特殊的

细胞壁组成对许多金属具有较强的富集能力^[16]; 且丝状体蓝藻 PCC 7120 表面积与体积比较大, 从而提高了吸附效率。此外, 重金属质量浓度也能够影响吸附能力, 是由于随着重金属质量浓度的增加, 可以形成一种驱动力, 克服了吸附剂与金属离子之间的传质阻力, 从而引起吸附量的增加, 而当重金属质量浓度继续增加时, 由于吸附剂表面的位点达到了饱和, 吸附量将不再增加^[15]。本研究中 Mn^{2+} 浓度为 20~40 mg/L 时, 能达到最大吸附值(图 3)。通过等温吸附模型和吸附动力学数据拟合发现 PCC 7120 对 Mn^{2+} 的吸附能很好地符合 Freundlich 模型和准二级吸附动力学方程, 因此, PCC 7120 对 Mn^{2+} 的吸附更偏向于多分子层吸附而不是单分子层, 但该模型要在实践中应用仍需要进一步完善。本研究结果表明, 可以通过电镜扫描来研究重金属的富集部位, 通过分析细胞壁的成分来研究细胞对重金属的偏好, 建立数据库, 为高效处理重金属污染建立可行的方法。此外, 缺氮后 PCC 7120 对 Mn^{2+} 的耐受力降低, 而且缺氮后 PCC 7120 对 Mn^{2+} 的吸附能力大大减弱, 这可能是由于 Mn^{2+} 抑制了异形胞的发育从而影响了 PCC 7120 菌体的正常生长, 导致对 Mn^{2+} 吸附能力的降低; 但是有报道指出, 衰老分化的蓝藻细胞比活的细胞吸附能力更强, 这些细胞的细胞壁结构发生变化, 使得重金属更易进入细胞内^[17]。造成这一结果的差异可能是虽然蓝藻分化出异形胞, 但是, 此时异形胞细胞壁更厚^[18], 反而阻碍了重金属的进入, 然而更深层次的机制仍值得探究。

参 考 文 献

- [1] 孙东红, 于红凤, 邹宁. 鱼腥藻对重金属污水中 Zn^{2+} 的吸附研究[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(36): 164-166.
- [2] AKSU Z, EGRETLI G, KUTSAL T. A comparative study for the biosorption characteristics of chromium on Ca-alginate, agarose and immobilized *C. vulgaris* in a continuous packed bed column[J]. Environ Sci Health A, 1999, 34(2): 295-316.
- [3] ATKINSON B W, BUX F, KASAN H C. Consideration for application of biosorption technology to remediate metal-contaminated industrial effluents[J]. Water SA, 1998, 24(2): 129-135.
- [4] AHMAD I, ZAFAR S, AHMAD F. Heavy metal biosorption potential of *Aspergillus* and *Rhizopus* sp. isolated from wastewater treated soil[J]. Appl Sci Environ Manage, 2005, 9(12): 123-126.
- [5] GADD G M, SAYER A. Influence of fungi on the environmental mobility of metals and metalloids[M]// LOVLEY D R. Environmental microbe-metal interactions. Washington, DC: American Soci-

- ety for Microbiology Press, 2000: 237-256.
- [6] DAVIS T A, VOLESKY B, MUCCIB A. A review of the biochemistry of heavy metal biosorption by brown algae[J]. Water research, 2003, 38, 7(18): 4311-4330.
- [7] 王泽煌, 王蒙, 蔡昆争, 等. 细菌对重金属吸附和解毒机制的研究进展[J]. 生物技术通报, 2016, 32(12): 13-18.
- [8] 牛天彩, 胡胜, 陈雯莉, 等. 单交换法构建鱼腥蓝细菌 *ftsZ* 的 *gfp* 原位标记菌株[J]. 华中农业大学学报, 2016, 35(6): 30-36.
- [9] CORDERO B, LODEIRO P, HERRERO R, et al. Biosorption of cadmium by *Fucus spiralis* [J]. Environ Chem, 2004, 3(1): 180-187.
- [10] WANG J, CHEN K. Biosorbents for heavy metals removal and their future[J]. Biotechnol Adv, 2009, 27(2): 195-226.
- [11] FEBRIANTO J, KOSASIH A N, SUNARSO J, et al. Equilibrium and kinetic studies in adsorption of heavy metals using biosorbent[J]. Hazard Mater, 2009, 162: 616-645.
- [12] CORDERO B, LODEIRO P, HERRERO R, et al. Biosorption of cadmium by *Fucus spiralis* [J]. Environ Chem, 2004, 3(1): 180-187.
- [13] SAY R, DENNIZLI A, ARICA M Y. Biosorption of cadmium, lead and copper with the filamentous fungus *Phanerochaete chrysosporium* [J]. Bioresour Technol, 2001, 76(1): 67-70.
- [14] 樊贵安, 张巨源, 陈雯莉, 等. 鱼腥蓝细菌 PCC 7120 异形胞的分离[J]. 华中农业大学学报, 2016, 35(6): 25-29.
- [15] XU X J, LIU X, HUANG Q Y, et al. Biosorption of cadmium by a metal-resistant filamentous fungus isolated from chicken manure compost [J]. Environmental technology, 2011, 33(14): 1661-1670.
- [16] DONG Y L, XU X D. Purification of the outer membrane and identification of outer membrane proteins from *Anabaena* sp. PCC7120 [J]. Acta hydrobiologica sinica, 2009, 33(5): 247-250.
- [17] 李志勇, 郭祀远, 李琳. 利用藻类去除工业废水中的重金属[J]. 重庆环境科学, 2008, 19(6): 27-32.
- [18] MURO-PAASTOR A M, HESS W R. Heterocyst differentiation: from single mutants to global approaches [J]. Trends Microbiol, 2012, 20(11): 548-557.

Assaying Mn^{2+} biosorption of *Anabaena* sp. strain PCC 7120

LI Min XU Shaozu CHEN Wenli WANG Li

State Key Laboratory of Agricultural Microbiology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract Bacteria are widely used for studying the heavy metal biosorption recently. In the study, the removal rate of Mn^{2+} under normal concentration and law of biosorption about Mn^{2+} using PCC 7120 were obtained. The results showed that a high desorption efficiency (above 80%) was obtained under the low concentration (10 mg/L) of Mn^{2+} . The biosorption equilibrium data are fitted well with the Freundlich adsorption isotherm and kinetic studies, indicating that the biosorption follows the pseudo second-order model. The tolerance of PCC 7120 to Mn^{2+} is impaired and the adsorption capacity is greatly diminished after nitrogen deficiency.

Keywords *Anabaena* sp.; Mn^{2+} ; the heavy metal pollution; biosorption

(责任编辑: 张志钰)