植物乳杆菌 X7021 吸附重金属和降解亚硝酸盐能力的研究

张奕吉, 杜 磊*, 谢静莉

(华东理工大学生物反应器工程国家重点实验室, 生物工程学院食品科学与工程系, 上海 200237)

摘 要: 目的 研究植物乳杆菌 X7021 吸附重金属与降解亚硝酸盐的能力。**方法** 采用分光光度法检测 Cu^{2+} 和亚硝酸盐含量, 采用石墨炉原子吸收分光光度法检测 Cd^{2+}和 Pb^{2+}含量。探讨 pH、温度、吸附时间和离子浓度等因素对植物乳杆菌 X7021 吸附重金属能力的影响, 以及亚硝酸盐浓度对其生长和降解能力的影响。**结果** 植物乳杆菌 X7021 对重金属的吸附率和吸附量均受到吸附条件的影响。首先, 吸附量随着金属离子浓度的增加而增加, 而吸附率呈现出先快速下降后趋于平缓的趋势。其次, 吸附率和吸附量均随吸附时间增加而增加, 且植物乳杆菌 X7021 对 Pb^{2+}的吸附量明显优于 Cu^{2+}和 Cd^{2+}。第三, Cu^{2+}、Cd^{2+}和 Pb^{2+}的最大吸附率分别在 pH=7、7 和 6; 且温度为 37 ℃时, Cu^{2+}和 Cd^{2+}的吸附率和吸附量均达到最大。除此之外, 植物乳杆菌 X7021 在 24 h 内几乎完全降解 100 mg/L $NaNO_2$, 且可耐受浓度高达 700 mg/L 的亚硝酸盐。**结论** 植物乳杆菌 X7021 能够有效吸附 Cu^{2+}、Cd^{2+}、Pd^{2+}等重金属离子, 且对亚硝酸盐有较强的降解和耐受能力, 在发酵食品及益生菌领域具有潜在的应用前景。

关键词: 植物乳杆菌 X7021; 重金属; 吸附; 亚硝酸盐; 降解

Study on the ability of *Lactobacillus plantarum* X7021 in the adsorption of heavy metals and degradation of nitrite

ZHANG Yi-Ji, DU Lei*, XIE Jing-Li

(*State Key Laboratory of Bioreactor Engineering*, *Department of Food Science and Engineering*, *School of Biotechnology*, *East China University of Science and Technology*, *Shanghai* 200237, *China*)

ABSTRACT: Objective To explore the abilities of *Lactobacillus plantarum* X7021 on adsorbing heavy metals and degrading nitrites. **Methods** Cu^{2+} and nitrites content was detected by spectrophotometry, and Cd^{2+} and Pb^{2+} content was detected by graphite furnace atomic absorption spectrophotometry. Furthermore, the effects of time, pH, temperature and heavy metal ions concentration on the adsorption ratio and capacity and effects of nitrite concentration on its growth and degradation ability were investigated. **Results** Both the adsorption ratio and capacity of *L. plantarum* X7021 on heavy metal ions were affected by many factors. Firstly, the adsorption capacity increased with the increase of the metal ions concentration, while the adsorption ratio showed a rapid decline firstly and then came to stable. Secondly, the adsorption ratio and capacity increased with increasing adsorption time, and

基金项目: 国家自然科学基金项目(31801489)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (31801489)

***通信作者:** 杜磊, 博士, 主要研究方向为亲水胶体, 生物活性肽, 益生菌高密度发酵及冻干保护。E-mail: dulei@ecust.edu.cn

***Corresponding author:** DU Lei, Ph.D, East China University of Science and Technology, 130# Meilong Road, Shanghai 200237, China. E-mail: dulei@ecust.edu.cn

the adsorption capacity of Pb^{2+} by *Lactobacillus plantarum* X7021 was significantly higher than Cu^{2+} and Cd^{2+}. Thirdly, the maximum adsorption ratio of Cu^{2+}, Cd^{2+} and Pb^{2+} were at pH 7, 7 and 6, respectively, and the adsorption ratio and capacity of Cu^{2+} and Cd^{2+} reached the maximum at 37 ℃. In addition, *L. plantarum* X7021 almost degraded 100 mg/L $NaNO_2$ within 24 h completely, and could tolerate nitrite with a concentration up to 700 mg/L. **Conclusion** *L. plantarum* X7021 can effectively adsorb Cu^{2+}, Cd^{2+} and Pd^{2+}, and has a strong ability to degrade and tolerate nitrite, so it has a promising application in fermented food and probiotics.

KEY WORDS: *Lactobacillus plantarum* X7021; heavy metals; adsorption; nitrite; degradation

0　引　言

近年来, 重金属污染引起的食品安全问题已经引起了人们的广泛关注, 通过污染食品对人体产生危害的重金属主要包括铜、汞、镉、铅等[1]。食品中的重金属一般通过消化道进入体内并不断积蓄, 对人的神经系统、生殖系统、心血管系统、骨骼和免疫系统都存在毒性作用, 甚至具有致癌、致畸和致突变作用[2], 因此, 如何有效地清除重金属, 降低其对人体的影响成为新的研究焦点, 微生物吸附法去除重金属逐渐为研究者所关注。

迄今为止, 许多研究已经证实了乳酸菌的重金属吸附能力。KINOSHITA 等[3]从泡菜、清酒和乳酪中筛选获得的 *Weissella viridescens* MYU 205 能有效清除 MRS 培养基中的汞; BHAKTA 等[4]从污水和受污染的土壤中共分离 103 株乳酸菌, 筛选出了砷清除效果较好的菌株 *Pediococcus acidilactici* As102-4; BHAKTA 等[5]从鱼肠道中筛选出具有良好黏着力菌株 *Lactobacillus reuteri* Cd70-13, 其对 MRS 培养基中的镉清除率达到 25%; HALTTUNEN 等[6]研究了 *Lactobacillus rhamnosus* GG 对镉的吸附能力, 发现其对浓度为 50 mg/L 镉溶液中镉的清除达到了 22.1%左右; BISANZ 等[7]研究了 *Lactobacillus rhamnosus* GR-1 发酵酸奶对坦桑尼亚重金属中毒潜在人群中孕妇及儿童的影响, 首次证明了乳酸菌的体内解毒作用, 使乳酸菌作为重金属解毒剂的潜在价值获得了认可。虽然目前已经发现了许多能够吸附重金属的微生物, 但它们大多来源于食品或医药工业的废水、废渣、土壤、污泥, 特别是重金属镉的生物吸附剂通常为条件致病菌或绝对致病菌, 无法应用于食品行业[8]。因此, 寻找到一株能够应用于食品工业, 且能够吸附多种重金属的可食用微生物吸附剂十分有必要。

除重金属外, 亚硝酸盐是一种常见的食品添加剂, 存在于许多发酵和保藏性食品中。由于亚硝酸盐在食品中的广泛存在[9], 人体大量摄入亚硝酸盐可引起急性中毒和致癌作用[10]。前期研究表明, 乳酸菌对人为添加和发酵过程中产生的亚硝酸盐可进行有效降解, 如 *Lactobacillus brevis*、*Lactobacillus fermentum*、*Lactobacillus acidophilus* 和 *Lactobacillus plantrum*[11]。因此, 筛选具有降解亚硝酸盐能力的可食用菌株意义重大。

植物乳杆菌 X7021(*Lactobacillus plantarum* X7021)筛选于臭豆腐卤液, 该菌株保存于中国典型培养物保藏中心(NO: M2015039), 已完成全基因组测序(GenBank as No. CP025412.1)。本研究主要研究了不同吸附条件下该菌株对重金属铜、镉、铅离子的吸附特性, 以及该菌株的亚硝酸盐降解和耐受能力, 为该菌株作为益生菌及食品发酵剂的潜在应用提供了一定的科学依据。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

二乙基二硫代氨基甲酸钠、柠檬酸铵、盐酸萘乙二胺、四丁基氢氧化铵、对氨基苯磺酸[分析纯, 阿拉丁试剂(上海)有限公司]; 乳化剂 OP、十二烷基磺酸钠、吐温–80、硝酸、氢氧化钠、亚硝酸钠、高氯酸、冰乙酸(分析纯, 上海凌峰化学试剂有限公司); 乙二胺四乙酸二钠盐(ethylenediaminetetraacetic acid disodium salt, EDTA 二钠盐)、浓氨水、三水合硝酸铜、四水合硝酸镉和硝酸铅(分析纯, 上海泰坦科技股份有限公司); MRS 培养基(北京奥博星生物技术有限公司)。

缓冲-掩蔽剂: 称取 100 g 柠檬酸铵溶于 200 mL 水中, 加入 25 g EDTA 二钠盐, 加水定容至 500 mL。

1.2　仪器与设备

HT-1300 洁净工作台(苏州安泰空气技术有限公司); BS-1E 恒温培养箱(常州市凯航仪器有限公司); VB-7 pH 计(美国丹佛仪器公司); TU-1810 紫外可见分光光度计(北京普析通用仪器有限责任公司); 3000 石墨炉原子吸收分光光度计(美国 Thermo Fisher Scientific 公司); YB601N 电子天平(上海精科天平仪器厂)。

1.3　实验方法

1.3.1　菌体的培养和收集

将植物乳杆菌 X7021 接入 10 mL MRS 液体培养基(2%, *V*:*V*)中活化, 再以同比例转接于 250 mL MRS 扩大培养, 37 ℃摇床培养 18 h。在 4 ℃, 3000 r/min 离心 10 min, 去除上清液并收集菌体, 生理盐水洗涤离心 3 次后加入生理盐水重悬, 使菌液浓度为 100 g/L(湿重)。

1.3.2 重金属含量检测

铜、铅、镉等金属离子含量的检测参照之前的研究[12−13]。其中, 重金属吸附率和吸附量计算公式见公式(1)和公式(2):

$$吸附率(\%)=\frac{M_0-M_1}{M_0}\times 100\% \quad (1)$$

$$吸附量(mg/g)=\frac{M_0-M_1}{m} \quad (2)$$

式中, M_0 为溶液中初始重金属含量, mg; M_1 为乳酸菌吸附后溶液中重金属含量, mg; m 为添加植物乳杆菌 X7021 湿菌体重量, g。

1.3.3 重金属离子浓度对乳酸菌吸附能力的影响

参照之前的研究[14−15], 配制质量浓度为 20、40、60、80、100、150、200、250、300 mg/L 的 Cu^{2+}溶液, 加入菌悬液使菌体终质量浓度为 5 g/L。37 ℃培养 2 h, 3000 r/min 离心 10 min, 取上清液测定其残余 Cu^{2+}浓度。Cd^{2+}的检测方法同 Cu^{2+}, 而 Pb^{2+}的离子浓度范围为 10、30、50、70、90、100 mg/L, 测试过程同 Cu^{2+}。

1.3.4 吸附时间对乳酸菌吸附重金属的影响

分别取 100 mg/L 的重金属离子溶液, 加入菌悬液使终浓度为 5 g/L, 37 ℃培养 5、10、20、30、60、90、120、240 min, 取样, 3000 r/min 离心 10 min, 测量每个时间点重金属的残余浓度。

1.3.5 pH 对乳酸菌吸附重金属的影响

调节重金属离子溶液 pH, 使最终 pH 分别为 2.0、3.0、4.0、5.0、6.0、7.0、8.0, 菌浓为 5 g/L, 37 ℃培养 2 h, 取样, 3000 r/min 离心 10 min, 取上清液测定残余金属离子浓度。

1.3.6 温度对乳酸菌吸附重金属的影响

取 100 mg/L 的重金属离子溶液, 加入菌悬液使其质量浓度为 5 g/L, 分别在 4、10、20、30、37 ℃下培养 2 h, 取样, 3000 r/min 离心 10 min, 取上清液测定残余离子浓度。

1.3.7 亚硝酸盐降解能力研究

$NaNO_2$ 的含量检测方法采用 GB 5009.33—2016《食品安全国家标准 食品中亚硝酸盐与硝酸盐的测定》。取活化的 *L. plantarum* X7021, 以 2% (*V*:*V*) 的比例接种到 MRS-$NaNO_2$ 培养基中, 其中亚硝酸盐浓度为 80 mg/L, 37 ℃摇动培养 3 d, 并在 0、4、6、8、12、16、20、24 h 时取样, 8000 r/min 离心 10 min, 取上清液检测其 pH 和 $NaNO_2$ 含量。

取活化的 *L. plantarum* X7021, 以 2% (*V*:*V*)的比例接种入含有 100、200、300、400、500、600、700 mg/L $NaNO_2$ 的液体 MRS 培养基中, 在 37 ℃条件下进行培养, 分别在 0、4、6、8、12、16、20、24 h 时取样, 测定培养基的 OD_{600} 值和 $NaNO_2$ 的含量并计算其降解率。对照组为不接种乳酸菌的 MRS-$NaNO_2$ 培养基。

亚硝酸盐降解率计算公式如下:

$$NaNO_2降解率(\%)=\frac{样品组上清中的亚硝酸盐含量}{空白组上清中的亚硝酸盐含量}\times 100\%$$

1.3.8 数据处理

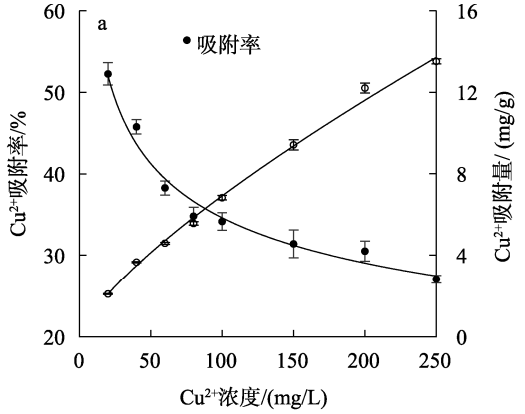
实验均进行 3 次重复实验, 结果用平均值±标准偏差表示, 绘图采用 Excel 2018。

2 结果与分析

2.1 重金属离子浓度对植物乳杆菌 X7021 吸附重金属的影响

如图 1 所示, 随着重金属离子浓度增加, 吸附率逐渐下降。对于 Cu^{2+}而言, 浓度小于 100 mg/L, 吸附率下降较快, 随后下降速度放缓, Cd^{2+}和 Pd^{2+}吸附率也表现出相似趋势, 在 20~150 mg/L 之间, Cd^{2+}吸附率下降较快, 150 mg/L 后吸附速率下降减慢; 而 Pd^{2+}在 10~50 mg/L 时吸附率下降较快, 随后吸附率下降减慢(图 1b, 1c)。这可能是由于当重金属离子浓度较低时, 菌体的表面结合位点大于金属离子的量, 结合未达到饱和, 因此吸附率较高, 而随着重金属离子浓度的升高, 菌体表面的结合位点逐渐饱和, 因此吸附率逐渐降低[16]。其次, 当 Cu^{2+}、Cd^{2+}和 Pb^{2+}的初始浓度为 100 mg/L 时, 植物乳杆菌 X7021 的吸附率分别达到了 34%、32%和 38%, 陈宇凌等[17]报道了一株耐镉绿色魏斯菌在含有 100 mg/L 的镉溶液中的吸附率达为 40%, 赵晓峰等[18]研究发现一株铅乳酸菌海氏肠球菌在初始 Pb^{2+}浓度为 100 mg/L 时的吸附率约为 33%, 李冉等[14]从泡菜中分离出一株植物乳杆菌, 其对初始浓度为 100 mg/L 的 Pb^{2+}和 Cu^{2+}的吸附率分别约为 5%和 40%。可见, 植物乳杆菌 X7021 在重金属吸附方面具有一定的优势。

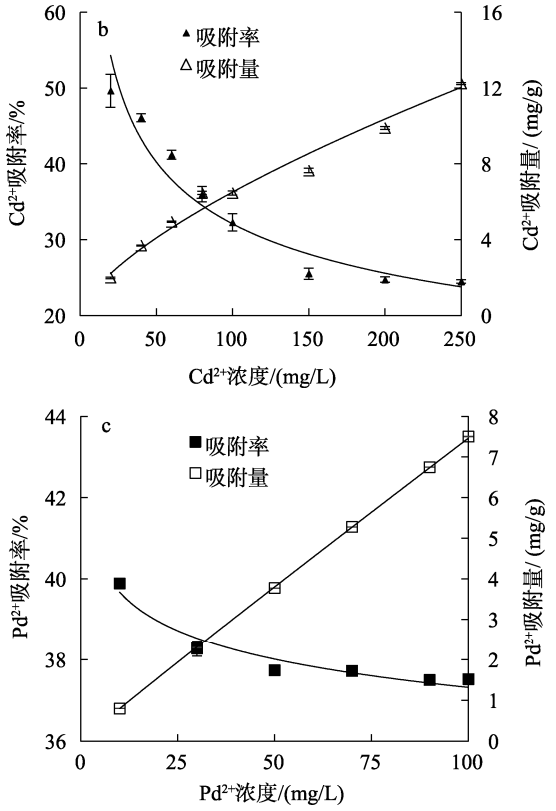
随着重金属离子浓度的增加, 吸附量呈上升趋势(图 1), 且当离子浓度到达 250 mg/L 时, 植物乳杆菌 X7021 的重金属吸附量仍在增加, 这可能是由于重金属浓度的升高, 静电作用使重金属离子与菌体表面吸附位点的碰撞机率增大, 使单位菌体吸附量增加[17]。



注: a Cu^{2+}; b Cd^{2+}; c Pd^{2+}。

图 1 重金属离子浓度对植物乳杆菌 X7021 吸附能力的影响(n=3)

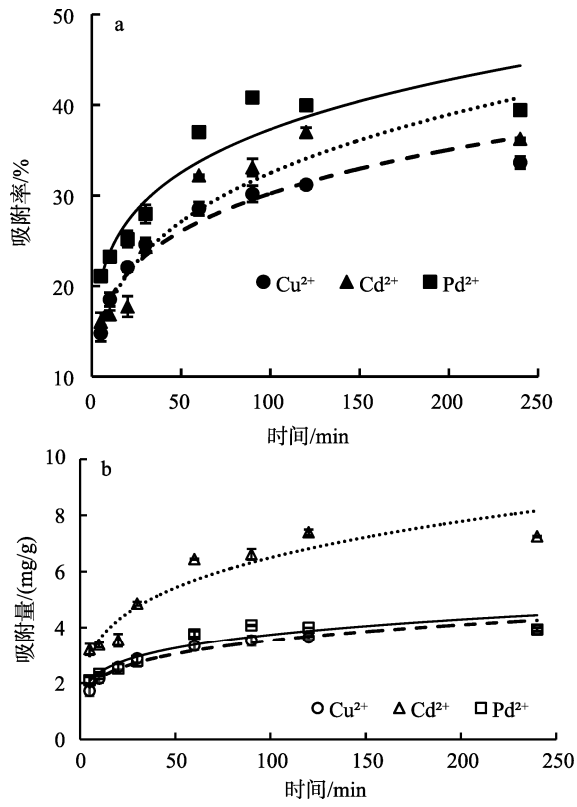
Fig.1 Effect of heavy metal ions concentration on the adsorption ability of *L. plantarum* X7021 (n=3)



注: a Cu^{2+}; b Cd^{2+}; c Pd^{2+}。

图 1(续)　重金属离子浓度对植物乳杆菌 X7021 吸附能力的影响(n=3)

Fig.1　Effect of heavy metal ions concentration on the adsorption ability of *L. plantarum* X7021 (n=3)



注: a 吸附率; b 吸附量。

图 2　吸附时间对植入乳杆菌 X7021 吸附重金属 Cu^{2+}、Cd^{2+}、Pd^{2+} 的影响(n=3)

Fig.2　Effect of time on the Cu^{2+}, Cd^{2+}, Pd^{2+} adsorption ability of *L. plantarum* X7021 (n=3)

2.2　吸附时间对植物乳杆菌 X7021 吸附重金属的影响

由图 2 可知, 植物乳杆菌 X7021 对 Cu^{2+}、Cd^{2+}和 Pd^{2+} 可在 5 min 内快速吸附。随着吸附时间延长, 吸附率和吸附量均呈现出先快速上升, 后趋于平稳的趋势, 且在 240 min 之后, 吸附率和吸附量仍在小幅增加。此吸附规律与文献报道相符[18]。这可能是由于 *L. plantarum* X7021 对铜、镉、铅等离子的吸附过程以胞外吸附为主, 通过细胞表面的官能团(羟基、羧基、磷酸基等)及大分子物质(多糖、蛋白等)与金属离子结合, 而使吸附量逐渐增加, 当结合位点饱和时, 吸附逐渐趋于平衡[19]。

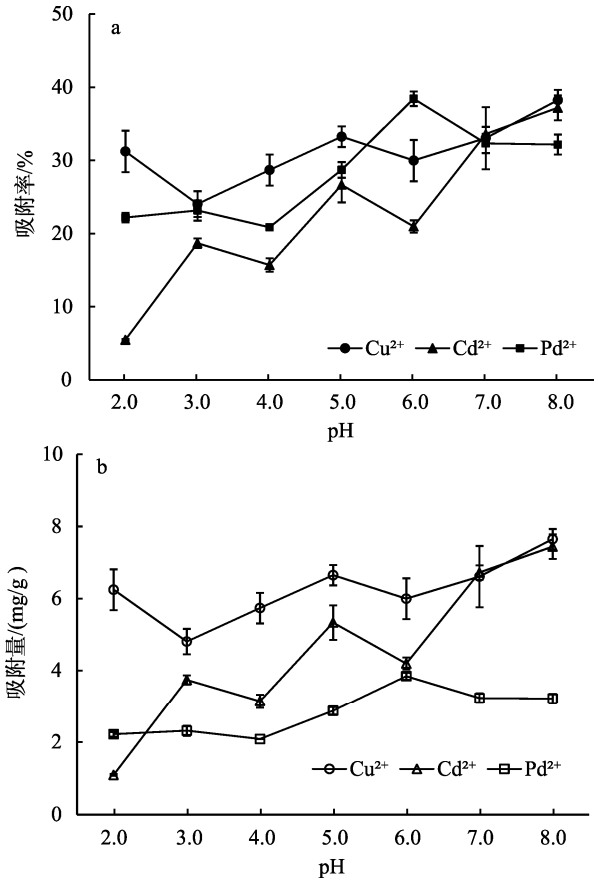
2.3　pH 对植物乳杆菌 X7021 吸附重金属的影响

由图 3 可知, 随着 pH 增加, 植物乳杆菌 X7021 对重金属离子的吸附率有所增加, 当 pH 为 6.0 时, Pb^{2+}的吸附率和吸附量达到最大(38%, 3.8 mg/g); Cu^{2+}和 Cd^{2+}吸附率在 pH 为 7.0 时分别为 33%和 34%, 而当 pH 为 8.0 时, 二者的吸附率有所增加, 分别为 38%和 37%。但是在 pH=8 条件下, 重金属离子可能会形成氢氧化物沉淀, 导致表观吸附率虚高。

pH 和吸附率之间不存在明显的正反比关系, 当 pH 过高或过低时, 植物乳杆菌 X7021 的吸附效率均会下降, 这主要是由于重金属阳离子和 H^+离子会竞争吸附微生物细胞结合位点 [20]。当 pH 较低时, 细菌表面的结合位点会被 H_3O^+占据, 导致重金属的吸附率降低, 当 pH 较高时, 金属离子会形成氢氧化物沉淀, 导致表观吸附率上升, 但金属离子和细菌的实际结合率降低(图 3, pH=8)。在最适 pH 下, 细胞表面的官能团通过脱质子化暴露出更多活性位点, 与金属离子结合, 吸附率较高[21]。

2.4　温度对植物乳杆菌 X7021 吸附重金属的影响

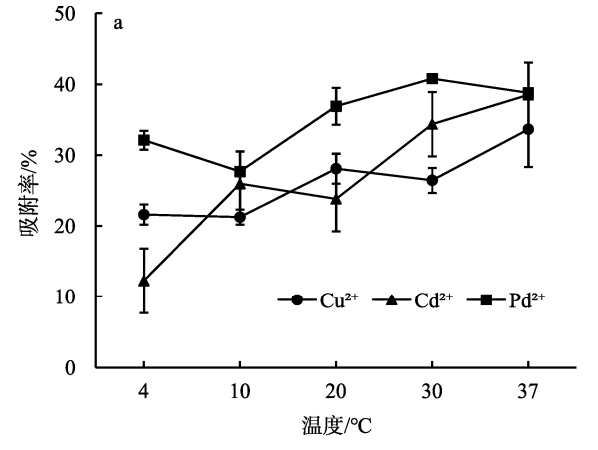
图 4 为不同温度下, 植物乳杆菌 X7021 对重金属离子的吸附率和吸附量结果。由图可知, 在 4~37 ℃内, 随着温度升高, 重金属吸附率和吸附量逐渐增加, 这可能是由于温度升高, 提高了植物乳杆菌 X7021 的生物活性, 使菌体表面暴露出更多的活性位点, 从而提高菌株的吸附能力。Cu^{2+}和 Cd^{2+}的吸附率在 37 ℃达到最大, 分别为 34%和 38%。而 Pd^{2+} 的吸附率在 30 ℃时最高, 为 41%。由此可见, 提升温度能够通过增加细胞表面活性和溶质流动性来提高吸附效率, 然而温度太高会使微生物失去活性, 同理, 温度过低会使微生物的活力降低或损害微生物细胞[22]。



注: a 吸附率; b 吸附量。

图 3 pH 对植物乳杆菌 X7021 吸附重金属 Cu^{2+}、Cd^{2+}、Pd^{2+}的影响(n=3)

Fig.3 Effect of pH on the Cu^{2+}, Cd^{2+}, Pd^{2+} adsorption ability of *L. plantarum* X7021 (n=3)



注: a 吸附率; b 吸附量。

图 4 温度对植物乳杆菌 X7021 吸附重金属 Cu^{2+}、Cd^{2+}、Pd^{2+}离子的影响(n=3)

Fig.4 Effect of temperature on the Cu^{2+}, Cd^{2+}, Pd^{2+} adsorption ability of *L. plantarum* X7021 (n=3)

2.5 植物乳杆菌 X7021 降解亚硝酸盐能力研究

植物乳杆菌 X7021 降解亚硝酸盐的能力及亚硝酸盐耐受性结果如图 5~7 所示。由图 5 可知, 在 24 h 内, 接种了植物乳杆菌 X7021 的培养基 pH 值随生长时间的延长逐渐下降, 培养基中 $NaNO_2$ 的浓度也逐渐下降, 在 24 h 时, pH 降至 4.1, $NaNO_2$ 降至 0.7 mg/L, 实验组培养基中的亚硝酸盐几乎被完全降解, 说明该菌株对亚硝酸盐具有较强的降解能力。

从图 6 可知, 随着 $NaNO_2$ 浓度的增加, 植物乳杆菌 X7021 的生长逐渐被抑制, 在 $NaNO_2$ 浓度为 100 mg/L 时, 24 h 后, 其生长仅被抑制了 19.2%, 而当浓度为 500 mg/L 时, 生长也只被抑制了 40.8%, 且当 $NaNO_2$ 浓度增加到 700 mg/L 时, 菌株仍未被完全抑制。同时, 在植物乳杆菌 X7021 生长过程中 $NaNO_2$ 也逐渐被降解(图 7), 当 $NaNO_2$ 浓度为 500 mg/L 时, 24 h 后其降解率仍有 17.7%。由此可见, 植物乳杆菌 X7021 具有良好的亚硝酸盐耐受和降解能力。

乳酸菌对亚硝酸盐的降解一般为酸降解和酶降解 2 个阶段, 在发酵液 pH 值高于 4.5 时, 以酶降解为主, 当发酵液 pH 值低于 4.0 时, 则主要是酸降解[23], 其中, 亚硝酸盐还原酶是酶降解途径中的关键酶, 在厌氧条件下, 具有该酶的乳酸菌可将亚硝酸盐还原成 NO_2、N_2O 或 N_2, 同时乳酸菌对亚硝酸盐的耐受能力也被认为与亚硝酸盐还原酶有关[24]。由植物乳杆菌 X7021 全基因序列分析得知, 该菌株具有编码亚硝酸盐还原酶的基因序列, 且乳酸菌具有强烈的产酸能力。由此推测, 菌株植物乳杆菌 X7021 降解亚硝酸盐的方式既有酶降解也有酸降解。

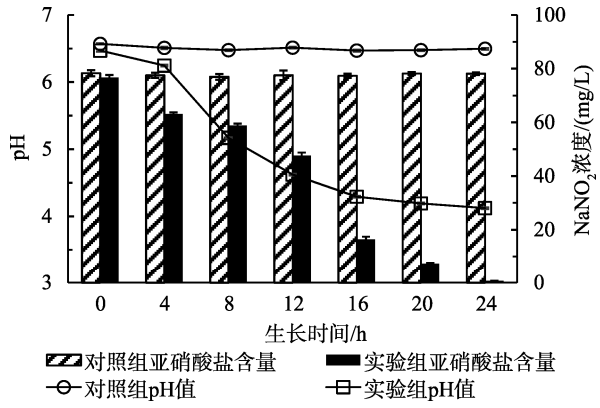


图 5　含 $NaNO_2$ 的 MRS 培养基实验组(含植物乳杆菌 X7021)和对照组(无植物乳杆菌 X7021)的 pH 和 $NaNO_2$ 浓度随时间变化结果(n=3)

Fig.5　Variation of pH and $NaNO_2$ concentration of $NaNO_2$-MRS culture in experimental and control groups with the growth time of *L. plantarum* X7021 (n=3)

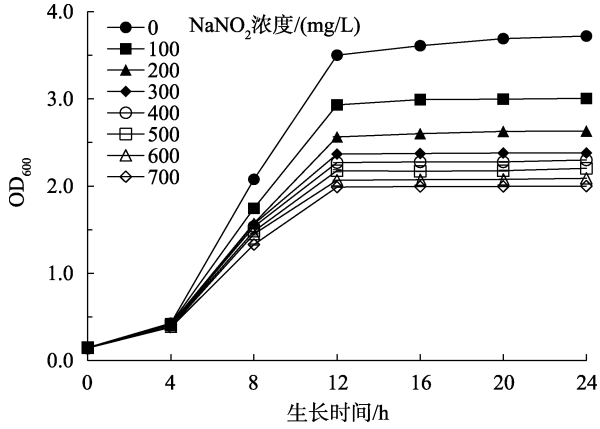


图 6　植物乳杆菌 X7021 在含不同浓度亚硝酸盐 MRS 培养基中生长情况(n=3)

Fig.6　Growth of *L. plantarum* X7021 in MRS containing different concentration of $NaNO_2$ (n=3)

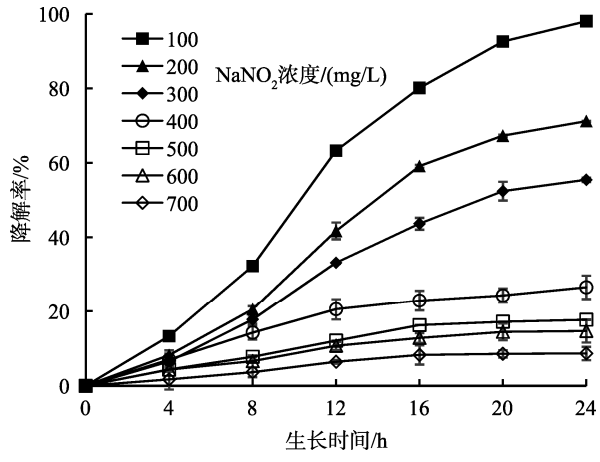


图 7　植物乳杆菌 X7021 对不同浓度亚硝酸盐的降解情况(n=3)

Fig.7　Degradation ratio of $NaNO_2$ by *L. plantarum* X7021 under different concentration of $NaNO_2$ (n=3)

3　结论与讨论

本研究从金属离子浓度、吸附时间、pH、温度等因素对重金属吸附效果的影响揭示了植物乳杆菌 X7021 吸附重金属的特性，从亚硝酸盐浓度对其生长和降解能力的影响揭示了该菌株的亚硝酸盐耐受和降解能力。结果显示：植物乳杆菌 X7021 的重金属吸附率受吸附条件的影响，随着重金属离子浓度的增加呈现出先快速下降后趋于平缓的趋势；植物乳杆菌 X7021 吸附重金属是一个快速吸附过程，5 min 内就有吸附，且吸附量和吸附率均随吸附时间增加而增加；其次，Cu^{2+}、Cd^{2+}和 Pb^{2+}的最大吸附率分别在 pH=7、7 和 6; Cu^{2+}和 Cd^{2+}的最大吸附率在 37 ℃，而 Pd^{2+}则在 30 ℃。

植物乳杆菌 X7021 湿菌体对 100 mg/L 的 Cd^{2+}的吸附率达到 38.5%，与陈宇凌等[17]报道的耐镉绿色魏斯菌 40%镉吸附率相当，高于邵鑫等[25]报道的 31.40%镉吸附率，表明该菌株对于 Cd^{2+}有较高的吸附能力。其次，该菌株对 100 mg/L Pb^{2+}的吸附率达到了 38%，高于李冉等[14]报道的源于泡菜的植物乳杆菌 5%的 Pb^{2+}吸附率。此外，有研究报道，在筛选高吸附性能的菌株时，吸附率大于 18%则可以认为该菌株具有高吸附性[26]，因此，植物乳杆菌 X7021 在重金属吸附方面具有一定的优势。目前所报道的对重金属具有较高耐受性的微生物大都是从环境中筛选得到的，很少从食品中分离获取，本研究中植物乳杆菌 X7021 是源于臭豆腐卤液的可食用微生物，深入研究其重金属吸附特性和机制，有利于挖掘其在发酵食品及益生菌等方面潜在的应用。其次，植物乳杆菌 X7021 具有良好的亚硝酸盐降解能力，能够在 24 h 内几乎完全降解 100 mg/L $NaNO_2$，且能够耐受高达 700 mg/L 的亚硝酸盐，这可能与其基因组具有编码亚硝酸盐还原酶的序列相关。

综上所述，植物乳杆菌 X7021 能够有效吸附 Cu^{2+}、Cd^{2+}、Pd^{2+}等重金属离子，且具有良好的亚硝酸盐降解能力。然而其吸附重金属和降解亚硝酸盐的分子机制，有待进一步深入、系统的研究；同时，在不同食品发酵环境和消化道等多种因素的共同影响下，该菌株是否能发挥其有效的吸附与降解作用仍需进一步探索。本研究为筛选源于传统发酵食品的具有重金属高耐受、高吸附能力及良好亚硝酸盐降解能力的乳酸菌菌株，建立相关优势菌种库，开发其在环境、食品等领域的潜在应用提供了一定的研究支持。

参考文献

[1] 李营，孙海录，魏利民，等. 食品中的重金属污染及其检测技术研究[J]. 现代食品, 2019, (8): 158–159.
LI Y, SUN HL, WEI LM, *et al*. Study on the detection technology of heavy metal contaminants in food [J]. Mod Food, 2019, (8): 158–159.

[2] 白英，孙悦，王纯玮. 乳酸菌对重金属离子吸附能力的研究进展[J]. 中国乳品工业, 2021, 49(1): 39–45.
BAI Y, SUN Y, WANG CW. Research progress on the adsorption capacity

of lactic acid bacteria to heavy metal ions [J]. Chin Dairy Ind, 2021, 49(1): 39–45.

[3] KINOSHITA H, OHTAKE F, ARIGA Y, *et al*. Comparison and characterization of biosorption by *Weissella viridescens* MYU 205 of periodic group 12 metal ions [J]. Anim Sci J, 2016, 87(2): 271–276.

[4] BHAKTA JN, MUNEKAGE Y, OHNISHI K, *et al*. Isolation and characterization of cadmium-and arsenic-absorbing bacteria for bioremediation [J]. Water Air Soil Poll, 2014, 225(10): 1–10.

[5] BHAKTA JN, MUNEKAGE Y, OHNISHI K, *et al*. Isolation and identification of cadmium and lead-resistant lactic acid bacteria for application as metal removing probiotic [J]. Int J Environ Sci Technol, 2012, 9(3): 433–440.

[6] HALTTUNEN T, COLLADO MC, El NEZAMI H, *et al*. Combining strains of lactic acid bacteria may reduce their toxin and heavy metal removal efficiency from aqueous solution [J]. Lett Appl Microbiol, 2008, 46(2): 160–165.

[7] BISANZ JE, ENOS MK, MWANGA JR, *et al*. Randomized open-label pilot study of the influence of probiotics and the gut microbiome on toxic metal levels in Tanzanian pregnant women and school children [J]. MBIO, 2014, 5(5): 1–7.

[8] JALIL VN, AKHGAR A, ALIKHANI HA, *et al*. Removal of heavy metals zinc, lead, and cadmium by biomineralization of urease-producing bacteria isolated from Iranian mine calcareous soils [J]. J Soil Sci Plant Nut, 2020, 20: 206–219.

[9] ORTEGA-BLU R, MARTÍNEZ-SALGADOMM, OSPINA P, *et al*. Nitrate concentration in leafy vegetables from the central zone of chile: Sources and environmental factors [J]. J Soil Sci Plant Nut, 2020, 20(3): 964–972.

[10] BONDONNO CP, DALGAARD F, BLEKKENHORST LC, *et al*. Vegetable nitrate intake, blood pressure and incident cardiovascular disease: Danish diet, cancer, and health study [J]. Eur J Epidemiol, 2021: 1–13. DOI：10.1007/s10654-021-00747-3

[11] HUANG YY, JIA XZ, YU JJ, *et al*. Effect of different lactic acid bacteria on nitrite degradation, volatile profiles, and sensory quality in Chinese traditional paocai [J]. LWT-Food Sci Technol, 2021, 147(5): 111597.

[12] 王少玲, 丘秀珍, 彭翠红. 乳化剂 OP 增敏 DDTC 光度法测定大豆中微量铜(II)[J]. 韶关学院学报, 2013, 34(4): 39–42.
WANG SL, QIU XZ, PENG CH. Determination of trace copper (II) in soybean by DDTC spectrophotometric with co-enhanced sensitivity of OP [J]. J Shaoguan Univ, 2013, 34(4): 39–42.

[13] HUANG W, LIU ZM. Biosorption of Cd(II)/Pb(II) from aqueous solution by biosurfactant-producing bacteria: Isotherm kinetic characteristic and mechanism studies [J]. Colloid Surface B, 2013, 105(4): 113–119.

[14] 李冉, 欧杰, 代启虎, 等. 植物乳杆菌对重金属 Pb^{2+}、Cr^{6+}和 Cu^{2+}的耐受性与吸附作用相关性比较[J]. 微生物学杂志, 2019, 39(1): 52–58.
LI R, OU J, DAI QH, *et al*. Relativity comparison of tolerance and adsorption of *Lactobacillus plantarum* on heavy metals Pb^{2+}, Cr^{6+} and Cu^{2+} [J]. J Microbiol, 2019, 39(1): 52–58.

[15] 殷瑞杰. 植物乳杆菌 CCFM8661 吸附铅离子及缓解肠细胞铅毒性的机制解析[D]. 无锡: 江南大学, 2016.
YIN RJ. Mechanism of Pb^{2+} removal and cytotoxicity alleviation by *L. plantarum* CCFM8661 [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016.

[16] SHU G, ZHENG Q, CHEN L, *et al*. Screening and identification of *Lactobacillus* with potential cadmium removal and its application in fruit and vegetable juices [J]. Food Control, 2021, 126: 108053.

[17] 陈宇凌, 陈银元, 刘安倩, 等. 泡菜中高耐镉乳酸菌的选育及吸附特性[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(14): 27–33.
CHEN YL, CHEN YY, LIU AQ, *et al*. Screening and adsorption capability of cadmium tolerant lactic acid bacteria from pickles [J]. Food Ferment Ind, 2019, 45(14): 27–33.

[18] 赵晓峰, 贺银凤, 李畅, 等. 1 株耐铅乳酸菌的吸附铅特性研究[J]. 中国食品学报, 2021, 21(1): 58–64.
ZHAO XF, HE YF, LI C, *et al*. Study on the adsorption characteristics of a lead-tolerant lactic acid bacteria [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2021, 21(1): 58–64.

[19] IBRAHIM F, HALTTUNEN T, TAHVONEN R, *et al*. Probiotic bacteria as potential detoxification tools: Assessing their heavy metal binding isotherms [J]. Can J Microbiol, 2006, 52(9): 877–885.

[20] RAYES A. Field studies on the removal of lead, cadmium and copper by the use of probiotic lactic acid bacteria from the water for culturing marine tilapia *T. spilurus* [J]. NY Sci J, 2012, 5(11): 74–82.

[21] ARANDA-GARCIA E, MORALES-BARRERA L, PINEDA-CAMACHO G, *et al*. Effect of pH, ionic strength, and background electrolytes on Cr(VI) and total chromium removal by acorn shell of *Quercus crassipes* Humb. & Bonpl. [J]. Environ Monit Assess, 2014, 186(10): 6207–6221.

[22] PARK D, YUN YS, PARK JM. The past, present, and future trends of biosorption [J]. Biotechnol Bioproc E, 2010, 15(1): 86–102.

[23] HAN X, YI H, ZHANG L, *et al*. Improvement of fermented Chinese cabbage characteristics by selected starter cultures [J]. J Food Sci, 2014, 79(7): M1387–M1392.

[24] LIU DM, WANG P, ZHANG XY, *et al*. Characterization of nitrite degradation by *Lactobacillus casei* subsp. *rhamnosus* LCR 6013 [J]. PLoS One, 2014, 9(4): 1–9.

[25] 邵鑫, 孙凯, 熊婧, 等. 耐镉乳酸菌对重金属镉的吸附机制[J]. 食品与发酵工业, 2017, 3: 52–57, 64.
SHAO X, SUN K, XIONG J, *et al*. The cadmium removal mechanism of lactobacillus strains [J]. Food Ferment Ind, 2017, 3: 52–57, 64.

[26] ZHAI QX, YIN RJ, YU LL, *et al*. Screening of lactic acid bacteria with potential protective effects against cadmium toxicity [J]. Food Control, 2015, 54(10): 23–30.

(责任编辑: 郑 丽 于梦娇)

作者简介

张奕吉, 硕士, 主要研究方向为食品生物工程、益生菌。
E-mail: 1297206175@qq.com

杜 磊, 博士, 主要研究方向为亲水胶体, 生物活性肽, 益生菌高密度发酵及冻干保护。
E-mail: dulei@ecust.edu.cn