

乳酸菌对重金属吸附作用的研究进展

李畅¹ 贾原博² 赵晓峰^{1,3} 贺银凤^{1*}

(1. 内蒙古农业大学食品科学与工程学院 内蒙古 呼和浩特 010018)

(2. 内蒙古财经大学计算机信息管理学院 内蒙古 呼和浩特 010070)

(3. 内蒙古财经大学旅游学院 内蒙古 呼和浩特 010070)

摘要: 重金属污染是人们关注的食品安全问题热点之一,使用食品安全级乳酸菌吸附重金属成为了新的研究方向。本文在分析环境和食品中汞、镉、铅污染的来源及对人类危害的基础上,对微生物与重金属的相互作用进行介绍,重点归纳了乳酸菌作为重金属吸附剂的潜能,以及吸附重金属的作用机制和研究现状,为研发高效吸附重金属的乳酸菌吸附剂提供了可行性的思路。

关键词: 重金属污染, 乳酸菌, 吸附

Research progress in the adsorption of heavy metals by lactic acid bacteria

LI Chang¹ JIA Yuan-Bo² ZHAO Xiao-Feng^{1,3} HE Yin-Feng^{1*}

(1. College of Food Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China)

(2. College of Computer Information Managements, Inner Mongolia University of Finance and Economics, Hohhot, Inner Mongolia 010070, China)

(3. College of Tourism, Inner Mongolia University of Finance and Economics, Hohhot, Inner Mongolia 010070, China)

Abstract: Heavy metals pollution is one of the hot issues in food safety. The use of food grade lactic acid bacteria to adsorb heavy metals has become a new research area. In this review article, we introduce the sources and harms of mercury, cadmium, and lead pollutions in the environment and food. We also summarize the potential application and mechanisms of adsorbing heavy metals using lactic acid bacteria. This review provided a feasible way to develop efficient adsorbent for lactic acid bacteria adsorbing heavy metals.

Keywords: Heavy metal contamination, Lactic acid bacteria, Biosorption

Foundation item: Natural Science Foundation of Inner Mongolia (2015MS0345)

***Corresponding author:** Tel: 86-471-4309231; E-mail: heyinf6468@163.com

Received: October 31, 2017; **Accepted:** February 12, 2018; **Published online** (www.cnki.net): March 23, 2018
基金项目: 内蒙古自然科学基金(2015MS0345)

***通信作者:** Tel: 86-471-4309231; E-mail: heyinf6468@163.com

收稿日期: 2017-10-31; 接受日期: 2018-02-12; 网络首发日期(www.cnki.net): 2018-03-23

重金属会导致各种健康危害,由于生物富集,被低浓度重金属污染的食物也会对人体和动物健康产生不利影响^[1]。受污染的食品主要包括粮食、水产品、果蔬等。据相关报道,我国每年因重金属污染所造成的经济损失超过200亿元人民币^[2]。由于重金属对环境造成巨大的潜在危害,因此,对环境中重金属的移除就显得尤为重要。对比传统物理化学修复法,微生物修复法具有高效、经济、简易、可行性高等特点,因此应用前景较为广阔^[3-4]。而乳酸菌是人肠道内优势菌群,广泛应用于食品加工和生产、保健品开发、疾病治疗和微生态制剂等领域。近年来,越来越多的学者发现乳酸菌具有吸附重金属的能力,可以有效吸附食物中的重金属,因此,深入分析乳酸菌对重金属的吸附机制在保障食品安全、提高食品营养价值方面具有重要意义。

在多种重金属中,汞、镉、铅对环境和食物的污染占主要部分,所以本文对环境和食品中汞、镉、铅污染的来源及对人类的危害进行概述。对微生物与重金属的相互作用进行介绍,重点分析乳酸菌作为重金属吸附剂的潜能以及同重金属作用的机制,并对乳酸菌吸附重金属的研究现状进行归纳,以期研发高效、绿色、环保食品中的重金属吸附剂提供借鉴与参考。

1 重金属及其毒性概述

1.1 环境和食品中重金属的来源

重金属指的是密度大于 5 g/cm^3 的金属元素。在自然界中,重金属通常以化合物的形式存在,含量很低。但伴随着工农业的规模生产和科学技术的不断发展,重金属资源的开发及其化合物的应用也在逐步扩大,因而对生态环境造成了极大的污染和破坏,并通过食物链的生物放大作用,在机体内富集,影响人体健康。

食品中的镉主要来源于有色金属冶炼、电镀、合金制造以及玻璃制造等所排放的工业“三废”,镉污染物通过植物根部吸收进入植物性食品,也可通

过生物富集方式进入动物性食品^[5]。含汞农药及化肥的使用及含汞产品的生产和工业生产中电石法的使用,都会造成汞在水体、土壤和空气中的累积,使其直接或通过食物链进入到农产品中^[6]。铅在自然界中含量丰富,是造成环境污染最严重的重金属污染物之一^[7]。自然环境污染的铅来源于有色金属冶炼、汽车尾气、工业“三废”排放和含铅农药,食品加工中的铅主要来源于包装材料、食品容器以及食品添加剂及配料^[8]。

1.2 重金属的危害

重金属主要通过消化系统和呼吸系统进入机体,在体内不断富集,超过一定的限量会干扰人体正常生理功能,造成慢性中毒^[9]。对人体的神经系统、造血系统、呼吸系统、骨骼及肝脏等造成损害,同时也具有一定致畸、致癌、致突变的作用^[10]。

镉主要通过消化道和呼吸道进入人体,与含羟基、氨基、巯基的蛋白质分子结合,形成镉-蛋白质,抑制巯基酶活性,从而对人体的免疫系统、肾脏及骨骼造成损害,同时镉对人体还有一定的“三致”作用^[11]。汞对人体的损伤主要是通过抑制蛋白质、破坏线粒体功能等损害人体的神经系统,对中枢神经系统的损害尤为严重^[12]。人体主要通过饮食和呼吸两大途径摄入铅。铅进入人体后与体内相关蛋白质、酶等结合,对人体各系统和器官均有毒害作用,主要造成神经、造血系统和血管方面的功能障碍^[13]。

2 微生物对重金属吸附作用的研究

2.1 微生物吸附剂

随着工农业和科学技术的发展,重金属污染日益严重。但与其他污染物不同,重金属不能被环境中的微生物有效降解,不能通过化学反应分解,也不能通过物理方法灭活。因此,对重金属污染的治理只能通过改变其存在形式或将其从环境和食品中转移,其毒性无法直接消除^[14]。微生物吸附作用是指利用某些微生物本身所具有的化学成分和结构特性来吸附周围环境中的重金属离

子^[15]。相较于传统的物理化学修复方法,微生物修复方法在治理重金属污染方面展现出菌种来源丰富、成本低廉、无二次污染等方面的优势^[16]。微生物吸附剂基本都是耐受目标金属离子的微生物,具有较强的金属吸附能力。早在1980年就有研究发现枯草芽孢杆菌能与铜、铁、镁、铅等一系列重金属相互作用^[17]。随后研究发现,真菌、藻类、放线菌及细菌等也均可有效吸附重金属^[18-20]。具有吸附食品中重金属能力的微生物主要包括真菌和细菌两大类,真菌包括青霉、曲霉、木霉、酵母和木耳等^[21-22],细菌包括假单胞菌属、葡萄球菌属、芽孢杆菌属和乳酸菌等^[23]。

2.2 微生物吸附重金属的机理

微生物对重金属的吸附是一个非常复杂的过程,其中涉及很多同时进行的机制。在微生物与重金属的反应过程中,一般分为生物吸附和生物积累2个阶段。生物吸附包括胞外沉淀、表面络合及离子交换^[24-26]等作用,主要是一些微生物表面蛋白质、多糖、脂类等物质上的化学基团(如-COOH、-NH₂、-SH和-OH等)及细胞表面含有的一些离子与金属相互作用形成金属络合物,金属被吸附固定在细胞表面,是被动、快速、无能量消耗且可逆的吸附过程^[27];而生物积累包括跨膜运输、胞内积累、细胞生理代谢和自身调节机制等^[28-30],是较胞外吸附更主动、缓慢、需要能量且不可逆的调控过程^[31]。研究表明,菌体灭活后得到的死细胞对重金属也具有吸附作用,且主要为第一阶段吸附,无法对金属离子进行主动吸收^[27]。在现阶段的研究中,对真菌、细菌和藻类的亚细胞结构、生理生化反应、分子生物学特性的研究较为详尽,尤其以真菌和细菌居多^[32]。

3 乳酸菌与重金属相互作用的研究

3.1 乳酸菌作为金属吸附剂的潜能

乳酸菌(Lactic acid bacteria, LAB)中的大部分被认为是非致病性的、安全级的(Generally recognized as safe, GRAS)微生物,参与众多体内的代谢活动,具有重要的益生特性。如缓解乳糖不耐

症、降低胆固醇、改善免疫功能、抗氧化以及抑制某些病原体的粘附^[33-35]。重金属暴露会导致机体氧化应激损伤,破坏肠道屏障改变肠道通透性,使得重金属可以通过肠道屏障被机体吸收^[36]。研究发现乳酸菌具有良好的抗氧化活性,如 *Lactobacillus rhamnosus* GG 可以改善酒精引起的肠道氧化应激^[37]; *Lactobacillus fermentum* ME-3 可以降低过氧化脂蛋白的水平,提高总抗氧化活性^[38]。乳酸菌还能够修复各种因素对肠道造成的氧化应激损伤,提高宿主肠道的屏障功能^[39-40],从而可以保护宿主肠道屏障并抑制重金属在肠道内的吸收,减少重金属在机体内的蓄积,消除重金属危害。对铬暴露的小鼠饲喂 *Lactobacillus plantarum* TW1-1 的结果表明, TW1-1 作为肠道微生物调节剂,有助于铬酸盐的还原,减少组织中铬的积累,增加粪便中铬的排泄,还可以减轻铬暴露引起的氧化应激和组织病理变化^[41]。

由于大众期望从更安全、更高效的角度减轻重金属污染,乳酸菌作为食品安全级别的益生菌,其吸附重金属的特性越来越受到关注。若在含重金属的食品中添加乳酸菌作为重金属吸附剂将其移除,或作为膳食补充摄入体内,在肠道吸收重金属之前抢先与之结合,通过粪便将重金属排出体外,可以抑制重金属对机体的毒性损伤^[7,42]。因此,乳酸菌作为重金属吸附剂具有巨大潜力。

3.2 乳酸菌吸附重金属的机理

作为典型的革兰氏阳性菌,乳酸菌细胞壁主要由肽聚糖、磷壁酸、多糖和蛋白质组成,这些细胞壁的组分在与重金属结合过程中起关键性作用^[43]。乳酸菌对重金属的吸附过程中,胞外吸附占主要部分^[44]。肽聚糖和磷壁酸组成的致密网状结构有利于吸附重金属离子。乳酸菌细胞表面的蛋白质和多糖含有-COOH、-NH₂、-SH和-OH等官能团,能与重金属阳离子发生表面络合作用,从而有效结合。翟齐喏^[45]研究发现,带负电荷的-COOH和-NH₂具有结合镉离子的特性,将菌体表面羧基进行甲基

化处理后, *L. plantarum* CCFM8610 对镉离子的吸附能力下降了约 18%; 将氨基甲基化后, *L. plantarum* CCFM8610 对镉离子的吸附能力下降了约 42%。此外, 许多乳酸杆菌表面含有丰富的 S-层蛋白和大量的负官能团, 因此能选择性地结合重金属离子^[46]。Åvall-Jääskeläinen 等发现 *Lactobacillus brevis* 的 S-层蛋白具有使细菌细胞表面结合 Cd^{2+} 的能力^[47]。

在乳酸菌结合重金属的稳定性方面, Halttunen 等使用超纯水、 HNO_3 和 EDTA 对吸附铅、镉后的 *Bifidobacterium longum* 46 进行解吸实验, 发现菌体经超纯水洗涤后解吸率低($\leq 3\%$), 而经稀 HNO_3 和 EDTA 洗涤 3 次后, 菌体结合的铅、镉离子基本被完全洗脱, 说明酸性解析剂处理菌体后, 去除了菌体表面的一些组分(如蛋白质、多糖等), 使得吸附效果受到影响, 也进一步说明在铅吸附过程中可能涉及到静电吸附、无机沉淀等过程^[48]。殷瑞杰在与 Halttunen 实验的相同条件下对 *L. plantarum* CCFM8661 吸附铅的稳定性进行研究, 发现超纯水对菌体几乎没有解吸效果($\leq 1\%$), 而使用酸性解吸剂洗脱了 55.12% 与菌体结合的铅离子, *L. plantarum* CCFM8661 表现出良好的铅吸附稳定性, 也表明菌体对铅离子的吸附过程中生物积累效应起到了一定的作用^[49]。

乳酸菌代谢产物——乳酸还可以将重金属离子还原, 形成金属沉淀物。Teemu 等使用透射电镜对铅、镉吸附前后的菌体进行观察, 发现在吸附铅后的菌体表面出现沉淀, 而在吸附镉后的菌体表面未见沉淀, 推断这是由于铅(II)发生还原反应的标准电极电势高于丙酮酸生成乳酸的电极电势, 铅(II)被乳酸还原为铅, 从而产生金属沉淀物, 而镉(II)发生还原反应的标准电极电势低于丙酮酸生成乳酸的电极电势, 因此乳酸无法将镉(II)还原为镉^[50]。代谢产生的多糖、蛋白质等物质表面含有的带负电荷官能团可以与重金属离子发生静电吸附作用^[51]。Lin 等发现乳杆菌属的多糖水解产物可将银(I)还原

为银, 并固定在细胞表面, 以减轻重金属对细胞的毒害作用, 维持细胞正常代谢^[52]。对于通过离子通道进入细胞的重金属, 乳酸菌可以合成具有结合重金属能力的胞内蛋白, 从而减轻重金属对细胞的毒害作用, 降低胞内金属的生物有效性, 这是乳酸菌内部重要的解毒机制^[53]。

除此以外, 国内外学者运用分子生物学方法进一步深入研究了乳酸菌对金属的吸附机制。Tong 等^[54]对 *L. plantarum* CCFM436 吸附锰(II)的机制进行了研究, 发现菌体的氨基和羧基在吸附过程中起主要作用; 高效液相色谱分析表明, 富含氨基/羧基的氨基酸(天冬氨酸、谷氨酸、精氨酸和赖氨酸)水平下降, 半胱氨酸增加, 有利于菌体对锰的吸附; 通过 PCR 测序鉴定了锰运输操纵子(*mnt*)和锰转运子(*mntH1/mnt2/mnt3*), 并进行了 qRT-PCR 分析, 证明 MntH1-3 是潜在的输送蛋白, 并受 MntR 的负调控。在对 *Lactobacillus lactis* IL1403 吸附铜的机制研究中发现, 铜诱导 *L. lactis* IL1403 的 *copRZA* 操纵子编码的 CopR 和 CopB 为阻遏蛋白, CopZ 为铜伴侣结合蛋白, CopA 为铜 ATP 酶, 负责铜的输出^[55]。在铜浓度降低的情况下, 锌与 CopR 形成二聚体复合物, 为阻止转录的发生, 会与 *copRZA* 操纵子和 *copB* 基因前面的 *cop* 系统结合; 当铜浓度升高时, CopZ 与细胞内多余的铜结合, 然后将铜(I)传递给 CopA 用于输出或输送给 CopR, 把每个 CopR 上的锌(II)替换下来, CopR 结构改变被释放, 启动下游基因的转录, CopA 再把铜输出细胞质^[56]。

3.3 乳酸菌吸附重金属的研究现状

3.3.1 乳酸菌对汞的吸附作用

Jadán-Piedra 等^[57]研究发现, 在模拟胃肠消化液条件下, *Lactobacillus casei* BL23 对食品和水中汞(II)和甲基汞具有良好的吸附效果, 对 2 种物质的吸附率分别达到 72%–98% 和 74%–97%。Kinoshita 等^[42]从牛肠和猪肠、酸乳酪、日本泡菜和清酒、韩国泡菜等食品中共分离出 11 株对重金属具有良好吸附特性的乳酸菌菌株; 其中 *Lactobacillus sakei* MYU 10 对汞表现出良好的吸附效果, 吸附率

达到 99.1%，平均每个细胞吸附 0.198 pg 汞。Kinoshita 等^[58]应用已知菌株 *W. viridescens* MYU 205 对 MRS 培养基中汞、锌、铜的吸附作用进行研究，结果表明 *W. viridescens* MYU 205 对汞的吸附效果最好，吸附率达到 77.8%±3.6%，且吸附过程具有先下降后上升的趋势；相较于其他重金属(镉、锌)，*W. viridescens* MYU 205 对汞的吸附率高，可能是与菌株表面重金属结合蛋白的亲合力有关。

3.3.2 乳酸菌对镉的吸附作用

Kinoshita 等^[58]研究发现 *Weissella viridescens* MYU 205 对柠檬酸缓冲液(pH 6.0)中镉(II)的吸附量达到 10.46 μg，平均每个细胞吸附 5.25 fg 镉(II)。Halttunen 等^[48]研究发现 *B. longum* 46 对镉的最大吸附量为 54.7 mg/g 干菌体；Topcu 等^[59]从水中分离得到 2 株对镉具有良好吸附效果的菌株 *Enterococcus faecium* EF031、M74，其中 EF031 对水介质中镉吸附率可达 77.3%–98.1%，M74 的吸附率达到 53.5%–91.0%，并且这是一个快速的过程，反应 1 h 即可吸附 60.0%的镉。翟齐啸研究发现 *L. plantarum* CCFM8610 湿菌体对镉的最大吸附率为 31.34%±0.14%^[45]；在后续研究中发现，*L. plantarum* CCFM8610 可有效吸附新鲜的苹果、西红柿和黄瓜等 9 种水果和蔬菜汁中 67%–82%的镉，应用 *L. plantarum* CCFM8610 对果蔬汁进行发酵(36 h)也显著降低了果汁中的镉浓度(56%–81%)^[60]。Bhakta 等^[61]从受重金属污染的淤泥样品中分离到具有良好益生特性和肠道黏附特性的 *Lactobacillus reuteri* Cd70-13，它对 MRS 培养基中的镉吸附率为 25%。Halttunen 等^[62]研究发现菌株 *L. rhamnosus* GG 可通过细胞表面静电作用对磷酸盐缓冲液(PBS, pH 7.0)中的镉进行吸附，吸附率为 22.1%–49.1%。

3.3.3 乳酸菌对铅的吸附作用

Topcu 等^[59]研究发现 *E. faecium* EF031、M74 对水介质中铅的吸附率分别达到 66.9%–98.9%和 42.9%–93.1%。Halttunen 等^[48]对 *B. longum* 46 研究发现其对于铅的最大吸附量为 175.7 mg/g 干物质量。田丰伟研究发现 *L. plantarum* CCFM8661

活菌体和死菌体对铅均有较强的吸附能力，活菌体吸附量达到 49.55 mg/g 干菌体，死菌体吸附量达到 53.02 mg/g 干菌体^[63]；将 *L. plantarum* CCFM8661 应用于动物实验，设置干预组和治疗组，在铅暴露期间或暴露后，使用活菌和死菌饲养 90 只雄性小鼠的结果发现，*L. plantarum* CCFM8661 能显著降低血液、胃、肝等组织中的铅浓度，干预组对小鼠的保护功能明显强于治疗组，死菌和活菌对铅的去除并无显著性差异^[64]。后续实验中，将 *L. plantarum* CCFM8661 作为膳食补充剂应用于尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)饲养的结果表明，*L. plantarum* CCFM8661 改善了鱼的生长性能，防止了由于铅暴露导致的鱼死亡，并有效降低了鱼肾、肝、性腺、脑、鳃和肌肉中的铅积累，具有良好的铅结合能力^[65]。Bhakta 等^[61]从受重金属污染的淤泥样品中分离出的 *L. reuteri* Pb71-1 对 MRS 培养基中的铅吸附率为 59%。夏爽等^[66]从新鲜猪粪便中分离得到的 *L. reuteri* 21008 对铅具有良好的吸附能力，吸附率可达到 84.23%。满兆红等^[67]从鸡的肠道内容物和排泄物中分离得到 8 株对铅具有较高吸附性乳酸菌，其中 *E. faecium* JT1 对铅的吸附率可达 66.95%。Bhakta 等^[68]从沿海水产养殖地污泥中分离筛选出具有较好抗铅能力的乳酸菌菌株 *E. faecium* Pb12，它通过细胞的表面吸附作用能够有效吸附鱼肠道内 0.046 mg/(h·g) 铅。贾原博等^[69]从包头尾矿库和白云鄂博稀土矿区的 17 个样品中分离得到 62 株对铅具有一定耐受能力的乳酸菌，不同菌株对铅的耐受能力不同，所分离出的菌株对铅最大耐受浓度为 8 400 mg/L，后续实验中所分离出的高耐铅菌株也表现出良好的铅吸附能力。

乳酸菌对重金属的吸附效果如表 1 所示，乳杆菌属、肠球菌属、魏斯氏菌属、双歧杆菌属对重金属均表现出良好的吸附特性，不同菌株对重金属的吸附效率不同。

表 1 乳酸菌对重金属的吸附情况

Table 1 Effect of lactic acid bacteria to absorb different heavy metals

重金属 Heavy metals	乳酸菌 Lactic acid bacteria	吸附率(%)/ 吸附量(mg/g) Adsorption rate (%)/ Adsorption quantity (mg/g)	清除介质 Removal medium	来源 Source	参考文献 References
Mercury	<i>Lactobacillus casei</i> BL23	72.0%–98.0% 74.0%–97.0%	Food and water	Food and water	[57]
	<i>Lactobacillus sakei</i> MYU 10	99.1%	MRS broth	Japanese pickles	[42]
	<i>Weissella viridescens</i> MYU 205	77.8%±3.6%	MRS broth	Bovine intestines	[58]
Cadmium	<i>Weissella viridescens</i> MYU 205	10.46 µg	PBS	Bovine intestines	[58]
	<i>Bifidobacterium longum</i> 46	54.7 mg/g	Water	Standard strain	[48]
	<i>Enterococcus faecium</i> EF031	77.3%–98.1%			[59]
	<i>Enterococcus faecium</i> M74	53.5%–91.0%			
	<i>Lactobacillus plantarum</i> CCFM8610	31.34%±0.14%			[45]
		82.28%	Apple		[60]
		74.59%	Tomato		
	82.87%	Cucumber			
	56.0%–81.0%	Fruit and vegetable juice			
	<i>Lactobacillus reuteri</i> Cd70-13	25.0%	MRS broth	Fish intestines	[61]
	<i>Lactobacillus rhamnosus</i> GG	22.1%–49.1%	PBS	Standard strain	[62]
Lead	<i>Enterococcus faecium</i> EF031	66.9%–98.9%	Water	Standard strain	[59]
	<i>Enterococcus faecium</i> M74	42.9%–93.1%			
	<i>Bifidobacterium longum</i> 46	175.7 mg/g			[48]
	<i>Lactobacillus plantarum</i> CCFM8661	49.55 mg/g			[63]
	<i>Lactobacillus reuteri</i> Pb71-1	59.0%	MRS broth	Fish intestines	[61]
	<i>Lactobacillus reuteri</i> 21008	84.23%	Water	Pig manure	[66]
	<i>Enterococcus faecium</i> JT1	66.95%		Chicken manure	[67]
	<i>Enterococcus faecium</i> Pb12	0.046 mg/(g·h)		Sludge	[68]

4 展望

重金属污染已成为我国环境污染的主要问题之一。环境中的重金属通过生物富集作用进入农产品中, 导致食品存在重金属残留问题, 使食品安全性受到威胁, 也给消费者带来巨大风险。乳酸菌是人体胃肠道的主要菌群之一, 在人体生理代谢中起着不可或缺的作用。它来源广泛、生存能力强、开发空间大等优势也使其在环境治理、医药保健和食品发酵中都具有高价值的应用前景。作为食品安全级别的益生菌, 目前已有不少研究证明如魏斯氏菌属、乳杆菌属、链球菌属、肠球菌属和双歧杆菌属等乳酸菌类群对食品和水中重金属(汞、镉、铅、铜等)具有良好的吸附和清除效果。所以, 深入分析乳酸菌对重金属的吸附机制在保障食品安全、提高食品营养价值方面具有重要意义。

现有对于乳酸菌吸附重金属的研究还只局限于耐受重金属乳酸菌的筛选、作用机制方面, 并且乳酸菌对重金属的吸附也存在菌株特异性, 不同菌株对重金属的吸附机制不尽相同。本课题组在前期实验中从被重金属污染的土壤中分离得到 62 株对铅具有良好抗性的菌株, 一些菌株在后续实验中也表现出良好的铅吸附特性, 但对吸附机理的研究尚不明确。因此, 在后续研究中需要从以下方面深入探索: (1) 不断挖掘和筛选对重金属具有良好吸附特性的乳酸菌菌株, 建立优势菌种库; (2) 进一步从分子角度探讨乳酸菌在重金属胁迫下的生存机制, 探明乳酸菌吸附重金属过程中的关键性基因和蛋白质及其功能作用; (3) 探究多种重金属离子共存情况下乳酸菌对重金属的吸附机制; (4) 将实验室分离筛选的菌株推广到规模化的食品生产中。

REFERENCES

- [1] Yu LL, Zhai QX, Tian FW, et al. *Lactobacillus plantarum* CCFM639 can prevent aluminium-induced neural injuries and abnormal behaviour in mice[J]. *Journal of Functional Foods*, 2017, 30: 142-150
- [2] Yang C. Review on remediation and safety utilization of heavy metal pollution of farmland soil in China[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2017(3): 164-167 (in Chinese)
杨辰. 我国农田土壤重金属污染修复及安全利用综述[J]. *现代农业科技*, 2017(3): 164-167
- [3] Suranjana AR, Manas KR. Bioremediation of heavy metal toxicity-with special reference to chromium[J]. *Al Ameen Journal of Medical Sciences*, 2009, 2(2): 57-63
- [4] Zhao QL, Zhang ND, Lu WR. Research review and prospect on soil heavy metals pollution II — research focus and analysis based on three major disciplines[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 33(7): 102-106,137 (in Chinese)
赵庆龄, 张乃弟, 路文如. 土壤重金属污染研究回顾与展望 II ——基于三大学科的研究热点与前沿分析[J]. *环境科学与技术*, 2010, 33(7): 102-106,137
- [5] Xiao X. Application of heavy metal hyperaccumulator endophytes in heavy metal decontamination[D]. Changsha: Doctoral Dissertation of Hunan University, 2011 (in Chinese)
肖潇. 基于镉超累积植物内生菌的重金属污染修复研究[D]. 长沙: 湖南大学博士学位论文, 2011
- [6] Sun YZ, Chen Y, Lan H, et al. Study on pollution sources, cause of mercury pollution and its control technical roadmap in China[J]. *Environmental Chemistry*, 2013, 32(6): 937-942 (in Chinese)
孙阳昭, 陈扬, 蓝虹, 等. 中国汞污染的来源、成因及控制技术路径分析[J]. *环境化学*, 2013, 32(6): 937-942
- [7] Zhang L, Gao J, Li X. Lead intakes by different age-sex population groups from Chinese total diet study in 2000[J]. *Journal of Hygiene Research*, 2007, 36(4): 459-467
- [8] Cao XZ, Zeng J. Situation of lead contamination and its harms in foods in China[J]. *Journal of Public Health and Preventive Medicine*, 2014, 25(6): 77-79 (in Chinese)
曹秀珍, 曾婧. 我国食品中铅污染状况及其危害[J]. *公共卫生与预防医学*, 2014, 25(6): 77-79
- [9] Zhang M. Discussion on the source and harm of heavy metals in food[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2015, 42(23): 131,141 (in Chinese)
张敏. 浅谈食品中重金属的来源和危害[J]. *广东化工*, 2015, 42(23): 131,141
- [10] Leng JS, Gao XM, Wang LX. Hazards of heavy metal pollution in food and progress in study on analysis technologies[J]. *Farm Products Processing*, 2015(12): 50-53 (in Chinese)
冷进松, 高雪梅, 王磊鑫. 食品中重金属污染的危害及其检测技术研究进展[J]. *农产品加工*, 2015(12): 50-53
- [11] Deng X, Wen LL, Chi XS. Cadmium hazards to human health and the prevention and treatment research[J]. *National Medical Frontiers of China*, 2010, 5(10): 4-5 (in Chinese)
邓新, 温璐璐, 迟鑫妹. 镉对人体健康危害及防治研究进展[J]. *中国医疗前沿*, 2010, 5(10): 4-5
- [12] Liu Y, Li QL. Research advances in neurotoxicity of mercury and its compounds and mechanism[J]. *Henan Journal of Preventive Medicine*, 2006, 17(1): 46-47 (in Chinese)
刘英, 李全乐. 汞及其化合物的神经毒性及机制研究进展[J]. *河南预防医学杂志*, 2006, 17(1): 46-47
- [13] Zhou LB, Zhang M. Present situation of common heavy metal pollution in food and preventive measures[J]. *Strait Journal of Preventive Medicine*, 2013, 19(1): 15-17 (in Chinese)
周禄斌, 张蒙. 食品中常见重金属污染的现状与防控措施[J]. *海峡预防医学杂志*, 2013, 19(1): 15-17
- [14] Zhou LY. Screening of cadmium-tolerant bacteria from rice rhizosphere soil and its cadmium-tolerance mechanism[D]. Fuzhou: Master's Thesis of Fujian Agriculture and Forestry University, 2012 (in Chinese)
周丽英. 水稻根际土壤耐镉细菌的筛选及其耐镉机理研究[D]. 福州: 福建农林大学硕士学位论文, 2012
- [15] Xiong J. Mechanism of cadmium resistance of lactic acid bacteria[D]. Guangzhou: Master's Thesis of Jinan University, 2015 (in Chinese)
熊婧. 乳酸菌对重金属镉的耐受性和吸附机制研究[D]. 广州: 暨南大学硕士学位论文, 2015
- [16] Wang JL, Chen C. Research advances in heavy metal removal by biosorption[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(4): 673-701 (in Chinese)
王建龙, 陈灿. 生物吸附法去除重金属离子的研究进展[J]. *环境科学学报*, 2010, 30(4): 673-701
- [17] Beveridge TJ, Murray RG. Sites of metal deposition in the cell wall of *Bacillus subtilis*[J]. *Journal of Bacteriology*, 1980, 141(2): 876-887
- [18] Wang JL, Chen C. Biosorbents for heavy metals removal and their future[J]. *Biotechnology Advances*, 2009, 27(2): 195-226
- [19] Davis TA, Volesky B, Mucci A. A review of the biochemistry of heavy metal biosorption by brown algae[J]. *Water Research*, 2003, 37(18): 4311-4330
- [20] Albarracín VH, Amoroso MJ, Abate CM. Isolation and characterization of indigenous copper-resistant actinomycete strains[J]. *Chemie der Erde-Geochemistry*, 2005, 65(Supplement 1): 145-156
- [21] Aksu Z, Dönmez G. Comparison of copper(II) biosorptive properties of live and treated *Candida* sp.[J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 2001, 36(3): 367-381
- [22] Chaturvedi AD, Pal D, Penta S, et al. Ecotoxic heavy metals transformation by bacteria and fungi in aquatic ecosystem[J]. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 2015, 31(10): 1595-1603
- [23] Wang ZH, Wang M, Cai ZK, et al. Research advances on biosorption and detoxification mechanisms of heavy metals by bacteria[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2016, 32(12): 13-18 (in Chinese)

- 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
- [24] Fayaz AM, Girilal M, Rahman M, et al. Biosynthesis of silver and gold nanoparticles using thermophilic bacterium *Geobacillus stearothermophilus*[J]. Process Biochemistry, 2011, 46(10): 1958-1962
- [25] Bai J, Yang XH, Du RY, et al. Biosorption mechanisms involved in immobilization of soil Pb by *Bacillus subtilis* DBM in a multi-metal-contaminated soil[J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, 26(10): 2056-2064
- [26] Ye JS, Yin H, Xie DP, et al. Copper biosorption and ions release by *Stenotrophomonas maltophilia* in the presence of benzo[a]pyrene[J]. Chemical Engineering Journal, 2013, 219: 1-9
- [27] Huang F, Dang Z, Guo CL, et al. Biosorption of Cd(II) by live and dead cells of *Bacillus cereus* RC-1 isolated from cadmium-contaminated soil[J]. Colloids & Surfaces B: Biointerfaces, 2013, 107: 11-18
- [28] Wang XY, Chen ML, Xiao JF, et al. Genome sequence analysis of the naphthenic acid degrading and metal resistant bacterium *Cupriavidus gilardii* CR3[J]. PLoS One, 2015, 10(8): e0132881
- [29] Xia LJ, Hua L, Li XD. Research advances in bioremediation of heavy metal contamination mechanism[J]. Acta Agriculturae Nucleatae Sinica, 1998, 12(1): 59-64 (in Chinese)
夏立江, 华璐, 李向东. 重金属污染生物修复机制及研究进展[J]. 核农学报, 1998, 12(1): 59-64
- [30] Rahman Z, Singh VP. Cr(VI) reduction by *Enterobacter* sp. DU17 isolated from the tannery waste dump site and characterization of the bacterium and the Cr(VI) reductase[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2014, 91: 97-103
- [31] Zhang H, Li N, Dai YZ. Research about the bioremediation of heavy metal pollution[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2004, 23(5): 562-565,574 (in Chinese)
张慧, 李宁, 戴友芝. 重金属污染的生物修复技术[J]. 化工进展, 2004, 23(5): 562-565,574
- [32] Ni YH. Screening and characterization of copper-resistant *Lactobacillus*[D]. Guangzhou: Master's Thesis of Jinan University, 2014 (in Chinese)
倪奕弘. 耐受重金属铜的乳酸菌的筛选及其铜结合性能的研究[D]. 广州: 暨南大学硕士学位论文, 2014
- [33] Savaiano DA, Kotz C. Recent advances in the management of lactose intolerance[J]. Boletín De La Asociación Médica De Puerto Rico, 1989, 81(5): 188-192
- [34] Varma P, Dinesh KR, Menon KK, et al. *Lactobacillus fermentum* isolated from human colonic mucosal biopsy inhibits the growth and adhesion of enteric and foodborne pathogens[J]. Journal of Food Science, 2010, 75(9): M546-M551
- [35] Zhang G. Lactic Acid Bacteria—Foundation, Technology and Application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 330 (in Chinese)
张刚. 乳酸细菌——基础、技术和应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 330
- [36] Hyun JS, Satsu H, Shimizu M. Cadmium induces Interleukin-8 production via, NF- κ B activation in the human intestinal epithelial cell, Caco-2[J]. Cytokine, 2007, 37(1): 26-34
- [37] Forsyth CB, Farhadi A, Jakate SM, et al. *Lactobacillus* GG treatment ameliorates alcohol-induced intestinal oxidative stress, gut leakiness, and liver injury in a rat model of alcoholic steatohepatitis[J]. Alcohol, 2009, 43(2): 163-172
- [38] Kullisaar T, Songisepp E, Mikelsaar M, et al. Antioxidative probiotic fermented goats' milk decreases oxidative stress-mediated atherogenicity in human subjects[J]. British Journal of Nutrition, 2003, 90(2): 449-456
- [39] Demirer S, Uлуу NN, Aslim B, et al. Protective effects of *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* B3 on intestinal enzyme activities after abdominal irradiation in rats[J]. Nutrition Research, 2007, 27(5): 300-305
- [40] Nissen L, Chingwaru W, Sgorbati B, et al. Gut health promoting activity of new putative probiotic/protective *Lactobacillus* spp. strains: a functional study in the small intestinal cell model[J]. International Journal of Food Microbiology, 2009, 135(3): 288-294
- [41] Wu GF, Xiao XP, Feng PY, et al. Gut remediation: a potential approach to reducing chromium accumulation using *Lactobacillus plantarum* TW1-1[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 15000
- [42] Kinoshita H, Sohma Y, Ohtake F, et al. Biosorption of heavy metals by lactic acid bacteria and identification of mercury binding protein[J]. Research in Microbiology, 2013, 164(7): 701-709
- [43] Blackwell KJ, Singleton I, Tobin JM. Metal cation uptake by yeast: a review[J]. Applied Microbiology & Biotechnology, 1995, 43(4): 579-584
- [44] Tong YJ, Zhai QX, Wang G, et al. System-wide analysis of manganese starvation-induced metabolism in key elements of *Lactobacillus plantarum*[J]. RSC Advances, 2017, 7(21): 12959-12968
- [45] Zhai QX. Effects of lactic acid bacteria against cadmium toxicity and the involved protective mechanisms[D]. Wuxi: Doctoral Dissertation of Jiangnan University, 2015 (in Chinese)
翟齐啸. 乳酸菌减除镉危害的作用及机制研究[D]. 无锡: 江南大学博士学位论文, 2015
- [46] Gerbino E, Mobili P, Tymczynszyn E, et al. FTIR spectroscopy structural analysis of the interaction between *Lactobacillus kefir* S-layers and metal ions[J]. Journal of Molecular Structure, 2011, 987(1/3): 186-192
- [47] Åvall-Jääskeläinen S, Lindholm A, Palva A. Surface display of the receptor-binding region of the *Lactobacillus brevis* S-layer protein in *Lactococcus lactis* provides nonadhesive lactococci with the ability to adhere to intestinal epithelial cells[J]. Applied & Environmental Microbiology, 2003, 69(4): 2230-2236
- [48] Halttunen T, Salminen S, Tahvonen R. Rapid removal of lead and cadmium from water by specific lactic acid bacteria[J]. International Journal of Food Microbiology, 2007, 114(1): 30-35
- [49] Yin RJ. Mechanism of Pb²⁺ removal and cytotoxicity alleviation by *L. plantarum* CCFM8661[D]. Wuxi: Master's Thesis of Jiangnan University, 2016 (in Chinese)

- 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: 江南大学硕士学位论文, 2016
- [50] Teemu H, Seppo S, Jussi M, et al. Reversible surface binding of cadmium and lead by lactic acid and bifidobacteria[J]. International Journal of Food Microbiology, 2008, 125(2): 170-175
- [51] Solioz M, Mermod M, Abicht HK, et al. Responses of lactic acid bacteria to heavy metal stress[A]/Tsakalidou E, Papadimitriou K. Stress Responses of Lactic Acid Bacteria. Food Microbiology & Food Safety. Boston, MA: Springer, 2011: 163-195
- [52] Lin ZY, Zhou CH, Wu JM, et al. A further insight into the mechanism of Ag⁺ biosorption by *Lactobacillus* sp. strain A09[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2005, 61(6): 1195-1200
- [53] Wang XW, Yao GQ, Gao PF, et al. Bioremediation of heavy metal contamination by Lactic acid bacteria[J]. Chinese Journal of Microecology, 2014, 26(8): 968-972 (in Chinese)
王晓伟, 姚国强, 高鹏飞, 等. 乳酸菌对重金属污染的生物修复作用[J]. 中国微生物学杂志, 2014, 26(8): 968-972
- [54] Tong YJ, Wang G, Zhang QX, et al. Systematic understanding of the potential manganese-adsorption components of a screened *Lactobacillus plantarum* CCFM436[J]. RSC Advances, 2016, 6(104): 102804-102813
- [55] Magnani D, Barré O, Gerber SD, et al. Characterization of the CopR Regulon of *Lactococcus lactis* IL1403[J]. Journal of Bacteriology, 2008, 190(2): 536-545
- [56] Solioz M, Abicht HK, Mermod M, et al. Response of gram-positive bacteria to copper stress[J]. JBIC Journal of Biological Inorganic Chemistry, 2010, 15(1): 3-14
- [57] Jadán-Piedra C, Alcántara C, Monedero V, et al. The use of lactic acid bacteria to reduce mercury bioaccessibility[J]. Food Chemistry, 2017, 228: 158-166
- [58] Kinoshita H, Ohtake F, Ariga Y, et al. A comparison and characterization of biosorption by *Weissella viridescens* MYU 205 of periodic group 12 metal ions[J]. Animal Science Journal, 2016, 87(2): 271-276
- [59] Topcu A, Bulat T. Removal of cadmium and lead from aqueous solution by *Enterococcus faecium* strains[J]. Journal of Food Science, 2010, 75(1): T13-T17
- [60] Zhai QX, Tian FW, Wang G, et al. The cadmium binding characteristics of a lactic acid bacterium in aqueous solutions and its application for removal of cadmium from fruit and vegetable juices[J]. RSC Advances, 2016, 6(8): 5990-5998
- [61] 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]. International Journal of Environmental Science & Technology, 2012, 9(3): 433-440
- [62] 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]. Letters in Applied Microbiology, 2008, 46(2): 160-165
- [63] Tian FW. Screening, characterization, and functional investigation of lactic acid bacteria with oxidative stress-alleviating activities[D]. Wuxi: Doctoral Dissertation of Jiangnan University, 2012 (in Chinese)
田丰伟. 缓解氧化应激乳酸菌的筛选、表征和功能评价研究[D]. 无锡: 江南大学博士学位论文, 2012
- [64] Tian FW, Zhai QX, Zhao JX, et al. *Lactobacillus plantarum* CCFM8661 alleviates lead toxicity in mice[J]. Biological Trace Element Research, 2012, 150(1/3): 264-271
- [65] Zhai QX, Wang HC, Tian FW, et al. Dietary *Lactobacillus plantarum* supplementation decreases tissue lead accumulation and alleviates lead toxicity in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*)[J]. Aquaculture Research, 2017, 48(9): 5094-5103
- [66] Xia S, Gu SS, Guan NY, et al. Isolation and identification of Pb-resistance lactic acid bacteria with probiotic characteristics in animal intestine[J]. Chinese Veterinary Science, 2015, 45(12): 1254-1259 (in Chinese)
夏爽, 谷珊珊, 关乃瑜, 等. 动物肠道中具有益生特征的抗铅乳酸菌的分离与鉴定[J]. 中国兽医科学, 2015, 45(12): 1254-1259
- [67] Man ZH, Du QJ, Jiang YJ, et al. Isolation and identification of lead-resistant lactic acid bacteria from chicken[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2014, 46(2): 72-76,81 (in Chinese)
满兆红, 都启晶, 姜彦君, 等. 一株鸡源嗜铅乳酸菌的筛选鉴定[J]. 山东农业科学, 2014, 46(2): 72-76,81
- [68] Bhakta JN, Ohnishi K, Munekage Y, et al. Characterization of lactic acid bacteria-based probiotics as potential heavy metal sorbents[J]. Journal of Applied Microbiology, 2012, 112(6): 1193-1206
- [69] Jia YB, Zhao XF, He M, et al. Isolation, screening and identification of lactic acid bacteria tolerance to heavy metal lead[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(22): 244-247,253 (in Chinese)
贾原博, 赵晓峰, 贺敏, 等. 耐受重金属铅乳酸菌的分离筛选及鉴定[J]. 食品工业科技, 2016, 37(22): 244-247,253