

乳酸菌吸附重金属的影响因素、机理及应用研究进展

张梦梅¹, 刘书亮^{1,2,*}

(1.四川农业大学食品学院, 四川 雅安 625014; 2.四川农业大学食品加工与安全研究所, 四川 雅安 625014)

摘要: 重金属是环境的主要污染物之一, 其难以在环境中转化, 易通过食物链蓄积, 严重威胁人体健康。已有研究证明乳酸菌具有去除重金属的能力。本文概述了乳酸菌吸附重金属的影响因素和机理, 并对吸附菌株的应用进行总结, 深入研究其吸附机理, 并对其在食品中的应用进行展望, 以期对乳酸菌吸附重金属的深入研究提供参考。

关键词: 乳酸菌; 重金属; 生物吸附; 影响因素; 机理; 应用

Progress in Research on the Biosorption of Heavy Metals by Lactic Acid Bacteria: Influencing Factors, Mechanism and Application

ZHANG Mengmei¹, LIU Shuliang^{1,2,*}

(1. College of Food Science, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China;

2. Institute of Food Processing and Safety, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China)

Abstract: Heavy metals are one of the principal environmental pollutants. They are hard to transform in the environment and are easy to accumulate through the food chain, thus endangering human health. Heavy metals have been proven to be well absorbed by lactic acid bacteria. This article summarizes the factors influencing the adsorption of heavy metals by lactic acid bacteria (LAB) and the underlying mechanisms as well as the applications of heavy metal absorbing LAB strains in foods. We expect that this review will provide valuable information for further studies on the adsorption of heavy metals by lactic acid bacteria.

Keywords: lactic acid bacteria; heavy metals; biosorption; factors; mechanism; application

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201815046

中图分类号: TS201.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2018) 15-0316-07

引文格式:

张梦梅, 刘书亮. 乳酸菌吸附重金属的影响因素、机理及应用研究进展[J]. 食品科学, 2018, 39(15): 316-322.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201815046. <http://www.spkx.net.cn>

ZHANG Mengmei, LIU Shuliang. Progress in research on the biosorption of heavy metals by lactic acid bacteria: influencing factors, mechanism and application[J]. Food Science, 2018, 39(15): 316-322. (in Chinese with English abstract)

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201815046. <http://www.spkx.net.cn>

重金属是环境中最主要的污染物之一, 国内外许多地区的土壤、地表水、地下水、污泥中都存在重金属污染问题^[1]。重金属在其存在的环境中很难被转化, 可以通过工业废水、城市生活废水、医疗废水以及矿山废水向自然环境中释放, 并沿食物链逐步富集, 导致严重的生态和健康问题。研究发现, 重金属影响生物体的免疫、繁殖、遗传、代谢、血液循环等功能^[2-3]。因此, 重金属的清除对人类健康起着至关重要的作用。近年发展起来的生物吸附技

术是指利用生物体本身的化学结构和成分特性吸附金属离子, 是一种较为新颖的去除重金属的方法, 具有高效、绿色、低成本、易控制等优点。植物、动物、微生物都可作为生物吸附的材料。而微生物吸附因其种类繁多、来源广泛等优点, 受到了学者的广泛关注。

乳酸菌是人体与动物消化道正常菌群的重要成员之一, 具有多种生理功能^[4-9], 包括缓解乳糖不耐症、改善便秘和腹泻、促进营养物质的吸收、预防和治疗疾病、

收稿日期: 2017-05-25

基金项目: 四川省农业科技成果转化资金项目 (14NZ0012)

第一作者简介: 张梦梅 (1991—), 女, 硕士研究生, 研究方向为食品微生物。E-mail: zhangmengmei07@163.com

*通信作者简介: 刘书亮 (1968—), 男, 教授, 博士, 研究方向为食品微生物与发酵工程。E-mail: lsliang999@163.com

增强机体免疫力等。许多种类的乳酸菌是安全的食品级微生物^[10], 以其为基础的发酵剂已广泛应用于食品、医药行业中。已有许多文献证明乳酸菌可以吸附重金属^[11-13]。目前, 国内外对于乳酸菌吸附重金属的研究多集中于吸附菌株的筛选、影响因素分析上, 但对吸附机理的研究还不够系统、透彻和全面, 尤其对分子机制的研究相对较少。研究发现乳酸菌可用于去除食品中的重金属, 也可用于预防、缓解重金属对生物的毒性^[11]。本文聚焦于乳酸菌吸附重金属的影响因素、机理及应用研究进展, 并进行了综述与展望。

1 吸附重金属的乳酸菌及影响其吸附的因素

1.1 吸附菌株

目前已发现乳酸杆菌属 (*Lactobacillus*)、肠球菌属 (*Enterococcus*)、双歧杆菌属 (*Bifidobacterium*)、明串珠菌属 (*Leuconostoc*)、魏斯氏菌属 (*Weissella*) 等乳酸菌具有吸附重金属的能力。这些菌株多来源于土壤、发酵食品、动物肠道内容物及排泄物。研究表明, 具有吸附能力的菌株对重金属有一定的耐受性^[11], 但也有部分菌株对重金属的去除能力与耐受性无相关性, 如糊精片球菌 (*Pediococcus dextrinicus*) 和乳酸片球菌 (*P. acidilactici*)^[12]。表1列举了部分近年来国内外分离得到的具有重金属吸附能力的乳酸菌株信息。

表1 乳酸菌对重金属的吸附情况
Table 1 Published studies on heavy metal biosorption by lactic acid bacteria

重金属	菌种	菌株	重金属质量浓度-吸附率/吸附量	文献
铅	罗伊氏乳杆菌 (<i>L. reuteri</i>)	21008	600 mg/L-83.7%	夏爽等 ^[11]
	植物乳杆菌 (<i>L. plantarum</i>)	CCFM8661	50 mg/L-36.66%	Yin Ruijie等 ^[13]
	植物乳杆菌 (<i>L. plantarum</i>)	CCFM639	5 mg/L-64.54%	Yu Leilei等 ^[14]
	德氏乳杆菌 (<i>L. delbrueckii</i>)	KLDS1.0207	9.6 mg/L-95.17%	于上富等 ^[15]
镉	屎肠球菌 (<i>E. faecium</i>)	Pb12	0.046 mg/g	Bhakta等 ^[16]
	罗伊氏乳杆菌 (<i>L. reuteri</i>)	Cd70-13	10 mg/L-25%	Bhakta等 ^[17]
	植物乳杆菌 (<i>L. plantarum</i>)	CCFM8610	50 mg/L-31.34%	Zhai Qixiao等 ^[18]
	长双歧杆菌 (<i>B. longum</i>)	46	54.7 mg/g	Halttunen等 ^[19]
铜	发酵乳杆菌 (<i>L. fermentum</i>)	ATCC9338	40 mg/L-71.8%	倪奕弘 ^[20]
	布氏乳杆菌 (<i>L. buchneri</i>)	DSM 20057	46.17 μ g/g	Schut等 ^[21]
	芽孢乳杆菌 (<i>L. sporogenes</i>)	—	1 mg/mL-45%	Bezawada等 ^[22]
	屎肠球菌 (<i>E. faecium</i>)	—	106.4 μ g/g	Yilmaz等 ^[23]
锌	肠膜明串珠菌 (<i>L. mesenteroides</i>)	—	27.10 mg/g	Mrvčić等 ^[24]
锰	发酵乳杆菌 (<i>L. fermentum</i>)	CCFM436	50 mg/L-24.34%	Tong Yanjun等 ^[25]
砷	干酪乳杆菌 (<i>L. casei</i>)	DSM20011	312 μ g/g	Halttunen等 ^[26]
汞	绿色魏斯氏菌 (<i>W. viridescens</i>)	MYU 205	1 mg/L-80%	Kinoshita等 ^[27]

注: 一文中没有提及。

1.2 影响乳酸菌吸附的因素

1.2.1 pH值

pH值是影响乳酸菌吸附重金属的重要因素, 溶液pH值影响金属离子的溶解性和细胞表面基团的电离状态。

pH值较低时: 溶液中 H^+ 浓度增加, 与金属离子竞争结合位点; 同时, 细胞表面的官能团被质子化, 所带正电荷增加, 使得重金属离子的吸附减少。pH值升高时, 细胞表面暴露出更多的羧基、磷酸基、氨基等负电基团, 与带正电荷的金属离子结合。但溶液pH值增加到一定程度时, 金属离子可能会形成氢氧化物沉淀^[21], 此时溶液中游离的金属离子减少, 从而抑制吸附的进行。

1.2.2 温度

温度对吸附的影响主要表现在以下3个方面: 1) 影响活性菌体的生理代谢活动; 2) 影响金属-微生物复合物的稳定性; 3) 影响细胞壁的结构与其吸附物质的电离。

1.2.3 接触时间

重金属的微生物吸附过程一般可分为两个阶段。反应初期细胞表面存在大量可用的结合位点, 因此该阶段金属离子可快速被吸附。随着反应时间的延长, 吸附率的增加逐渐变缓, 最终达到平衡。鼠李糖乳杆菌 (*L. rhamnosus*) LC-705在吸附重金属镉时, 5 min时吸附量开始缓慢上升, 1 h时达到平衡, 吸附量在1~4 h内无明显变化^[28]。也有研究发现, 吸附量在后期略有下降的趋势^[20]。这是因为随着时间的延长, 受试菌表面的吸附活性位点逐渐饱和, 吸附的过程中也可能存在解吸现象。

1.2.4 重金属浓度

通常在较低浓度下生物吸附率大, 随着浓度升高, 吸附量增加, 高浓度时生物吸附量趋于平衡, 吸附率明显降低。这是因为较高的初始浓度使得细胞与底物之间相互作用的可能性更高, 从而导致底物的吸附量随浓度的增加而增加。当重金属的结合位点数量一定时, 其浓度升高, 而结合位点趋近饱和, 不足以完全地吸附有毒有害物质, 吸附率逐渐下降。

1.2.5 微生物用量

一定范围内, 重金属的吸附量随微生物用量的增加而增加^[29], 到达平衡点后, 吸附量会随微生物用量的增加而降低。随着微生物用量的增加, 可用于吸附目标物质的活性位点随之增加^[24]; 微生物用量过大时, 部分菌体细胞产生絮凝作用^[30-31], 无法充分分散在体系中, 减少了吸附位点和吸附的表面积。

1.2.6 共存物质

研究表明, 其他阳离子的存在一定程度上影响了菌株对目标金属的吸附。 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Fe^{2+} 不会影响发酵乳杆菌 (*L. fermentum*) 对 Pb^{2+} 的吸收, 但 Fe^{2+} 的存在明显抑制了长双歧杆菌 (*B. longum*) 对 Pb^{2+} 的吸附效果^[32]。

1.2.7 菌体预处理

乳酸菌吸附主要作用于细胞表面, 对细胞进行预处理能够不同程度地改变其与金属离子结合的能力。常用的预处理手段包括加热、煮沸、冷冻、干燥等物理方法, 或用无机、有机试剂及酶处理菌体, 如酸、碱、

盐、甲醇、丙酮、溶菌酶、蛋白酶等。通过破坏细胞壁,改变菌体细胞表面结构,从而增加菌体表面的有效吸附位点,达到提高菌体吸附能力的目的。胺化的干酪乳杆菌(*L. casei*) DSM20011可以通过将带负电的羧基转变为带正电的氨基以快速吸附水中的 As^{5+} ,而未处理的和甲基化的菌体无吸附 As^{5+} 的能力^[26]。

2 乳酸菌吸附重金属的机理

2.1 吸附机理研究方法

乳酸菌吸附重金属机理的探索可以从以下几个方面进行:1)细胞各组分吸附能力;2)细胞表面形态学分析;3)参与吸附的官能团;4)细胞内主要氨基酸变化。

研究各细胞组分的吸附能力常采用组分分离法和逐层剥离法。这两种处理方式均可研究胞外多糖(exopolysaccharides, EPS)、细胞壁、细胞壁磷壁酸(teichoic acid, TA)、细胞壁肽聚糖(peptidoglycan, PG)、细胞周质及原生质体对重金属的吸附能力。扫描电子显微镜和透射电子显微镜则是通过观察细胞形态及微观结构的变化来分析吸附机理。邵鑫等^[33]采用扫描电子显微镜分析鼠李糖乳杆菌(*L. rhamnosus*) ATCC 53103吸附镉前后的细胞微观结构,发现 Cd^{2+} 能使细胞微观结构受到严重破坏,低质量浓度(25 mg/L)处理后观察到细胞出现变性、扭曲、凹陷、皱褶等现象,高质量浓度(300 mg/L)处理后明显观察到细胞壁穿孔、丝状黏连物增多。通过透射电子显微镜及能量色散X射线分析,可知乳酸菌对重金属的吸附发生于细胞内和细胞外^[34]。

吸附过程中作用官能团的判定可以采用傅里叶变换红外光谱或拉曼光谱,同时也可采用化学掩蔽法进行分析。Singh等^[35]利用红外光谱对未吸附/吸附 As^{3+} 的嗜酸乳杆菌(*L. acidophilus*)菌体进行比较,发现O—H和C—O处的峰发生位移,推测羟基和羧基参与了吸附。Gerbino等^[36]首次将拉曼光谱用于微生物吸附重金属的研究,结果表明高加索乳杆菌(*L. kefir*) CIDCA 8348和JCM 5818对重金属的吸附主要依靠细胞表面的羧酸盐、磷酸盐和多糖。殷瑞杰^[37]利用化学掩蔽法研究植物乳杆菌(*L. plantarum*) CCFM8661菌体吸附 Pb^{2+} 过程中主要作用基团,发现羧基和氨基分别经盐酸-甲醇溶液、甲醛-甲酸溶液处理后,菌体对铅离子的吸附率分别下降了79.11%和81.41%。

Tong Yanjun等^[25]通过高效液相色谱法分析了细胞内游离氨基酸的变化,发现随着 Mn^{2+} 浓度上升,精氨酸、赖氨酸、天冬氨酸和谷氨酸含量下降,推测这4种氨基酸可能参与合成絮凝 Mn^{2+} 的胞外蛋白。

2.2 乳酸菌吸附重金属机理

一般认为,微生物吸附分为生物吸附和生物积累

两个阶段^[24]。生物吸附又称细胞表面吸附、被动吸附,该阶段通过细胞表面的官能团及胞外产物进行结合,此过程快速、可逆且无能量消耗。生物积累又称主动吸收,通过细胞表面的一些转运蛋白将表面吸附的重金属转移至胞内,并在细胞中积累,此过程用时长、速率慢、不可逆、需消耗能量。Mrvčić等^[38]认为肠膜明串珠菌(*L. mesenteroides*) ID9261和短乳杆菌(*L. brevis*) ID9262对 Cu^{2+} 的吸附过程可分为两个阶段:第一阶段为前3 h,吸附快速,重金属主要结合于细胞壁;第二阶段用时长、吸附速率慢,金属被转运至胞内。Mrvčić等^[24]进一步通过傅里叶变换红外光谱和电子显微镜研究肠膜明串珠菌(*L. mesentero*)、短乳杆菌(*L. brevis*)和植物乳杆菌(*L. plantarum*)对 Zn^{2+} 的吸附,结果表明 Zn^{2+} 的去除同时包含被动吸附和主动摄入两个过程,被动吸附过程主要将重金属结合于细胞壁,而主动摄入过程中重金属则因内源性代谢进入胞质。

乳酸菌吸附重金属的过程中可能同时存在着几种机理,由多种基团、多种细胞组分共同作用。如发酵乳杆菌(*L. fermentum*) ME3和长双歧杆菌(*B. longum*) 46主要通过离子交换和沉淀反应吸附镉和铅^[32]。粪肠球菌(*E. faecalis*) RW 2-4与镉结合的机制包括离子交换、静电引力、络合反应、胞内扩散,作用官能团包括羟基、羧基、磷酸基、酰胺基、烃基,参与的细胞组分包括蛋白、多糖、脂肪酸和核酸^[39]。

2.2.1 吸附的主要部位及组分

2.2.1.1 细胞壁

细胞壁是细胞与外界环境直接接触的第一场所,同时也是与重金属结合的主要场所。乳酸菌为革兰氏阳性菌,细胞壁主要由PG、(脂)TA、蛋白质和多糖组成。PG中含有较多的TA和糖醛酸TA(teichuronic acid, TUA)。PG、TA和TUA都含有大量的羧基、羰基和磷酸二酯键等负电荷基团,可作为与重金属的结合位点。

多数乳酸菌,尤其是乳杆菌,细胞壁表面存在S层蛋白(表层蛋白)^[40]。S层蛋白能通过其表面的羧基、磷酸基等负电基团有效结合金属离子。研究表明,去除S层蛋白后希尔加德氏乳杆菌(*L. hilgardii*) DSM 20176对 Cu^{2+} 、 Fe^{2+} 的吸附量减少,对 Zn^{2+} 、 Mn^{2+} 的吸附量增加^[21]。Gerbino等^[41]通过傅里叶变换红外光谱对高加索乳杆菌(*L. kefir*)的S层蛋白与重金属间的交互作用进行了分析,结果表明其交互作用主要通过天冬氨酸和谷氨酸残基侧链上的羧基实现。但Gerbino等^[42]比较了完整菌体、去除S层蛋白菌体和S层蛋白三者的吸附能力以及有/无S层蛋白的菌体与 Pb^{2+} 作用前后的存活率,最终认为高加索乳杆菌(*L. kefir*)的S层蛋白主要作用是保护菌体细胞抵抗 Pb^{2+} 的不利影响,而不是参与对 Pb^{2+} 的吸附。

2.2.1.2 EPS

EPS是天然的生物分子混合物,可参与调节胃肠道功能和机体免疫。乳酸菌产生的EPS种类较多,化学结构存在明显差异,不同的菌株对重金属的吸附能力也有所不同。有研究表明,重金属可被EPS截留并快速运输至细胞膜内,之后逐步释放,细胞内的金属随着时间延长而减少^[17]。而植物乳杆菌(*L. plantarum*) CCFM8610菌体的EPS不参与Cd²⁺的吸附^[43]。

EPS对重金属的吸附主要通过金属离子与EPS酸性功能团的负电荷之间的静电相互作用实现的。热处理会破坏或改变EPS对金属离子的吸附。当温度由15℃升至30℃时,源自泡菜的植物乳杆菌(*L. plantarum*) 70810的EPS对Pb²⁺的吸附量从10.11 mg/g增至21.15 mg/g,但当温度增加至45℃时,其吸附量仅为12.36 mg/g^[44]。

2.2.1.3 其他

Kinoshita等^[45]通过金属亲和层析柱获得了绿色魏斯氏菌(*W. viridescens*) MYU 205的一个分子质量为14 kDa的Hg²⁺结合蛋白,该蛋白有一个NAD(P)结合位点和CXXC模体。CXXC是金属硫蛋白的典型序列之一,可结合Cu²⁺、Zn²⁺、Cd²⁺、Hg²⁺、Co²⁺等金属^[46-47]。普遍认为金属硫蛋白与重金属结合能力为Hg²⁺≥Ag²⁺>Cu²⁺>Cd²⁺>Pb²⁺>Zn²⁺^[45]。另有学者认为,胞内游离氨基酸可能也会参与锰的细胞内吸附^[25]。

2.2.2 吸附机理

目前,对乳酸菌吸附重金属的机理研究尚未完全清晰,根据已有研究可知其吸附机理主要包括离子交换、表面络合、金属转化作用、无机微沉淀等。

2.2.2.1 离子交换

离子交换是微生物细胞壁上原本结合的金属离子被另一些结合能力更强的金属离子竞争取代,从而使溶液中的目标金属离子浓度降低的过程。离子交换受溶液pH值的影响,其最佳反应pH值为3~6。Halttunen等^[19]在吸附实验中发现,发酵乳杆菌(*L. fermentum*) ME3、长双歧杆菌(*B. longum*) 46和乳双歧杆菌(*B. lactis*) Bb12的吸附能力随着pH值的改变而变化,pH 6时对镉、铅的吸附量最大,因此推测该过程涉及离子交换机制。随后,Halttunen等^[32]报道Mg²⁺、Ca²⁺、Fe²⁺、Zn²⁺、Pb²⁺会不同程度地抑制长双歧杆菌(*B. longum*) 46对Cd²⁺的吸附。

2.2.2.2 表面络合

细胞壁中的羟基、羧基、酰胺基、磷酸基、氨基、巯基等含O、N、S的官能团能与重金属离子配位,发生络合反应。已证明源自植物乳杆菌(*L. plantarum*) 70810的EPS中的一些官能团(羟基、羧基、羰基和氨基)参与了Pb²⁺的生物吸附^[44]。

2.2.2.3 金属转化作用

乳酸菌菌体中的一些组分具有氧化还原能力,可以改变吸附在其上的金属离子的价态,使该金属毒性降低。该机制使得乳酸菌能在较高的金属浓度下存活,获得一定的抗性,并降低介质的毒性。在生物吸附过程中,来自细胞壁上的还原性糖上的半缩醛基团中的自由醛基能作为电子供体,使Ag⁺还原为Ag,同时醛被氧化成相应的酸^[48]。

2.2.2.4 无机微沉淀

重金属离子通过物理或化学作用在微生物的细胞壁上形成无机沉淀的过程就是无机微沉淀,该过程受pH值、温度、共存离子等因素的影响。某些金属能以硫酸盐、磷酸盐或碳酸盐等沉淀物的形式沉积于细胞壁或细胞内部。熊婧^[39]利用透射电子显微镜比较了屎肠球菌(*E. faecium*) MT 3-5和高浓度Cd²⁺水溶液培养后的细胞形态,发现吸附后的细胞形态发生了明显的变化,细胞壁上有黑色小颗粒附着,推测是Cd²⁺与磷酸基团形成的微沉淀。

2.2.2.5 分子机制

目前对乳酸菌吸附重金属的分子机制研究较少。粪肠球菌(*E. faecalis*) LZ-11中对Cd²⁺的抗性及相关基因为ppx、cadA和dsbA。推测LZ-11对Cd²⁺的吸附机制为: Cd²⁺通过Mg²⁺、Zn²⁺、Ca²⁺转运系统进入菌体细胞;进入胞内的Cd²⁺一部分由P型ATP酶转运至胞外与Ppx分泌的PO₄³⁻形成沉淀,一部分在细胞内与PO₄³⁻形成磷酸盐沉淀;同时DsbA蛋白在细胞质中结合游离的Cd²⁺离子以防止Cd²⁺与游离的巯基结合,保护硫氧还蛋白和其他蛋白,提高菌株的镉耐受性^[34]。Tong Yanjun等^[25]发现植物乳杆菌(*L. plantarum*) CCFM436的mntH基因转录表达的转运蛋白MntH 1-3可能促进了Mn²⁺的跨膜运输,同时该转运蛋白也受MntR的反向调控,以此来维持细胞内Mn²⁺的平衡。

3 乳酸菌吸附重金属的应用

3.1 食品中重金属的去除

重金属能通过多种途径污染食品,导致食品中有毒重金属含量超标,食用后在体内蓄积,严重威胁人体健康。对于动物性食品而言,在饲料中添加具有吸附能力的乳酸菌可以降低其中的重金属含量。在肉鸡日粮中添加以乳酸菌属为活性成分的益生菌,并同时饲喂铅含量分别为160 mg/kg和320 mg/kg的水,发现添加益生菌剂后血清铅质量浓度分别下降13 μg/dL和19 μg/dL^[49]。Bhakta等^[16-17]考察了重金属吸附菌株屎肠球菌(*E. faecium*) Pb12^[16]、罗伊氏乳杆菌(*L. reuteri*) Cd 70-13和Pb 71-1^[17]在鱼肠道内的存活能力和定植能力,发现该菌株可以添加到鱼类饲料中,以去除鱼类肠道内的重金属。

对于植物性食品而言,可从外源生长环境(灌溉水及土壤)对重金属进行控制,也可直接采取一些方法对食品原材料和加工成品进行处理,如以乳酸菌、酵母菌为发酵体系,利用大米发酵液进行发酵降镉^[50],或除去液体食品中的重金属。研究表明,乳酸菌用于果汁发酵可以提高果汁的感官和防腐特性,且具有一定的保健功效^[51-53]。Zhai Qixiao等^[54]将植物乳杆菌(*L. plantarum*) CCFM8610用于去除水果汁和蔬菜汁中的镉,2 h时的去除率为67%~82%。

3.2 预防、缓解重金属毒性

某些具有吸附能力的安全级微生物可以作为用于动物饲料或食品中的重金属清除剂,也可加入到膳食中通过日常饮食对重金属毒性起到预防和缓解作用,但目前仍停留在实验阶段,未能推广应用。当饲料中镉质量分数不高于0.02‰时,加入乳杆菌复合菌能明显降低镉对肉鸡器官(肝脏、肾脏)及组织(鸡腿肉、鸡胸肉)中铁分布的负面影响^[55]。Jama等^[56]通过小鼠肝细胞体内及体外实验发现,在食物中添加一定量的鼠李糖乳杆菌(*L. rhamnosus*)、嗜酸乳杆菌(*L. acidophilus*)和长双歧杆菌(*B. longum*)冻干菌剂可以减轻镉诱发的基因毒性,其主要机制可能为实验菌株对镉的吸附。研究表明,植物乳杆菌(*L. plantarum*) CCFM8661不但具有良好的铅结合能力,而且能有效降低实验鼠血液及组织中铅含量,恢复血液中氨基酮戊酸脱水酶的活性,维持谷胱甘肽的含量、谷胱甘肽过氧化物酶和超氧化物歧化酶的活力,降低活性氧、丙二醛的含量,并且表现出比二巯基丁二酸更好的保护效果^[57]。Zhai Qixiao等^[58]利用具有镉吸附特性的植物乳杆菌(*L. plantarum*) CCFM8610开发出了一款酸豆乳产品,该产品能有效缓解慢性镉暴露对小鼠造成的毒性损伤。

4 结 语

重金属污染潜伏期长,不易从环境中去除,会通过水源、气体和土壤进入到食物链,最终进入人体。现阶段,关于乳酸菌去除重金属离子的影响因素和机理已有研究,其中吸附机理的研究一直是学者探索的一个重要领域,但至今仍没有形成一个完整、详细的理论体系,尤其是在基因水平调控机理的研究上相对薄弱。乳酸菌吸附法在去除食品中的重金属以及预防、缓解重金属毒性等方面具有较大的潜力,尤其是具有重金属吸附能力的益生菌在食品中的应用将是今后研究的重要方向。对此内容展开深入研究,并结合重金属胁迫技术和基因工程技术,对于系统全面地揭示微生物对重金属的吸附机理、驯化和构建具有高耐受能力、高吸附能力的菌株并有效应用于实际具有重要意义。

大多数乳酸菌能安全地应用于食品中。对于无需发酵的食品,可添加灭活的乳酸菌菌体用于去除其中的重金属,吸附结束后采用离心、过滤等方法分离菌体,对食品质量和消费者无风险;对于发酵食品而言,可将乳酸菌作为发酵剂添加于食品中。另一方面,可制成乳酸菌类微生态制剂用于人体或动物,以预防、缓解重金属蓄积带来的不良影响。乳酸菌对水溶液中的重金属有较好的吸附能力,但在食品体系中吸附能力有不同程度地下降^[21]。食品体系成分复杂,pH值、有机酸、脂类、酚类物质等均有可能影响乳酸菌对重金属的吸附率,不仅如此,人体消化道环境也极其复杂,在多种因素影响下乳酸菌是否能发挥其吸附作用还需进一步探索,乳酸菌作为重金属吸附剂的应用还应进行更为全面和深入的研究。

参考文献:

- [1] 李钰婷, 代朝猛, 张亚雷, 等. 环境介质中重金属的污染现状研究[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(20): 10549-10553. DOI:10.3969/j.issn.0517-6611.2012.20.066.
- [2] 张传永, 刘庆, 陈燕妮. 重金属对水生生物毒性作用研究进展[J]. 生命科学仪器, 2008, 6(11): 3-7.
- [3] MALIK A. Metal bioremediation through growing cells[J]. Environment International, 2004, 30(2): 261-278. DOI:10.1016/j.envint.2003.08.001.
- [4] BERMÚDEZ-HUMARÁN L G. *Lactococcus lactis* as a live vector for mucosal delivery of therapeutic proteins[J]. Human Vaccines, 2009, 5(4): 264-267. DOI:10.4161/hv.5.4.7553.
- [5] ELMADFA I, KLEIN P, MEYER A L. Immune-stimulating effects of lactic acid bacteria *in vivo* and *in vitro*[J]. Proceedings of the Nutrition Society, 2010, 69(3): 416-420. DOI:10.1017/s0029665110001710.
- [6] 张宏志, 马艳弘, 黄开红, 等. γ -半乳糖苷酶乳酸菌的筛选及酶法合成低聚半乳糖的GC-MS分析[J]. 现代食品科技, 2015, 31(12): 355-361. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.12.053.
- [7] 王昕, 侯聚敏, 付丽丽, 等. γ -半乳糖苷酶乳酸菌的筛选及其益生性研究[J]. 中国乳品工业, 2012, 40(8): 20-23. DOI:10.3969/j.issn.1001-2230.2012.08.005.
- [8] CAREVIĆ M, VUKAŠINOVIĆ-SEKULIĆ M, GRBAVČIĆ S, et al. Optimization of β -galactosidase production from lactic acid bacteria[J]. Chemical Industry/Hemijaska Industrija, 2015, 69(3): 305-312. DOI:10.2298/HEMIND140303044C.
- [9] VINCENT V, AGHAJARI N, POLLET N, et al. The acid tolerant and cold-active β -galactosidase from *Lactococcus lactis* strain is an attractive biocatalyst for lactose hydrolysis[J]. Antonie van Leeuwenhoek, 2013, 103(4): 701-712. DOI:10.1007/s10482-012-9852-6.
- [10] CANO-GARRIDO O, SÁNCHEZ-CHARDI A, PARÉS S, et al. Functional protein-based nanomaterial produced in microorganisms recognized as safe: a new platform for biotechnology[J]. Acta Biomaterialia, 2016, 43: 230-239. DOI:10.1016/j.actbio.2016.07.038.
- [11] 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. DOI:10.16656/j.issn.1673-4696.2015.12.008.
- [12] BHAKTA J N, OHNISHI K, MUNEKAGE Y, et al. Isolation and probiotic characterization of arsenic-resistant lactic acid bacteria for uptaking arsenic[J]. International Journal of Chemical and Biological Engineering, 2010, 3(4): 167-174.

- [13] YIN Ruijie, ZHAI Qixiao, YU Leilei, et al. The binding characters study of lead removal by *Lactobacillus plantarum* CCFM8661[J]. European Food Research and Technology, 2016, 242(10): 1621-1629. DOI:10.1007/s00217-016-2661-9.
- [14] YU Leilei, ZHAI Qixiao, LIU Xiaoming, et al. *Lactobacillus plantarum* CCFM639 alleviates aluminium toxicity[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2016, 100(4): 1891-1900. DOI:10.1007/s00253-015-7135-7.
- [15] 于上富, 徐敏, 丁秀云, 等. 一株乳酸菌吸附 Pb^{2+} 的条件优化[J]. 中国酿造, 2016, 35(2): 109-114. DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2016.02.025.
- [16] BHAKTA J N, 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 and Technology, 2012, 9(3): 433-440. DOI:10.1007/s13762-012-0049-3.
- [17] BHAKTA J N, 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. DOI:10.1111/j.1365-2672.2012.05284.x.
- [18] ZHAI Qixiao, YIN Ruijie, YU Leilei, et al. Screening of lactic acid bacteria with potential protective effects against cadmium toxicity[J]. Food Control, 2015, 54: 23-30. DOI:10.1016/j.foodcont.2015.01.037.
- [19] 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. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2006.10.040.
- [20] 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, 2014: 41-45.
- [21] SCHUT S, ZAUNER S, HAMPEL G, et al. Biosorption of copper by wine-relevant lactobacilli[J]. International Journal of Food Microbiology, 2011, 145(1): 126-131. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2010.11.039.
- [22] BEZAWADA M K, VANKA G R. Removal of Cu^{2+} and Pb^{2+} ions from aqueous solutions by free, immobilized and co-immobilized cells of *Saccharomyces cerevisiae* and *Lactobacillus sporogenes*[J]. International Journal of Science & Emerging Technologies, 2011, 2(3): 80-86.
- [23] YILMAZ M, TAY T, KIVANC M, et al. Removal of copper (II) ions from aqueous solution by a lactic acid bacterium[J]. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 2010, 27(2): 309-314. DOI:10.1590/S0104-66322010000200009.
- [24] MRVČIĆ J, PREBEG T, BARIŠIĆ L, et al. Zinc binding by lactic acid bacteria[J]. Food Technology & Biotechnology, 2009, 47(4): 381-388.
- [25] TONG Yanjun, WANG Gang, ZHANG Qiuxiang, et al. Systematic understanding of the potential manganese-adsorption components of a screened *Lactobacillus plantarum* CCFM436[J]. RSC Advances, 2016, 6: 102804-102813. DOI:10.1039/c6ra23877g.
- [26] HALTTUNEN T, FINELL M, SALMINEN S. Arsenic removal by native and chemically modified lactic acid bacteria[J]. International Journal of Food Microbiology, 2007, 120(1/2): 173-178. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2007.06.002.
- [27] 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]. Animal Science Journal, 2016, 87(2): 271-276. DOI:10.1111/asj.12425.
- [28] IBRAHIM F, HALTTUNEN T, TAHVONEN R, et al. Probiotic bacteria as potential detoxification tools: assessing their heavy metal binding isotherms[J]. Canadian Journal of Microbiology, 2006, 52(9): 877-885. DOI:10.1139/w06-043.
- [29] HALTTUNEN T, KANKAANPÄÄ P, TAHVONEN R, et al. Cadmium removal by lactic acid bacteria[J]. Bioscience and Microflora, 2010, 22(3): 93-97. DOI:10.12938/bifidus1996.22.93.
- [30] 王倩倩. 耐受重金属微生物的分离及其吸附 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 和 $Cr(VI)$ 作用研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2008: 37.
- [31] HALTTUNEN T, COLLADO M C, 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. DOI:10.1111/j.1472-765X.2007.02276.x.
- [32] HALTTUNEN T, SALMIMINEN S, MERILUOTO J, 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. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2008.03.041.
- [33] 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, 43(3): 48-53; 60. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.201703009.
- [34] WU G, SUN M, LIU P, et al. *Enterococcus faecalis* strain LZ-11 isolated from Lanzhou reach of the Yellow River is able to resist and absorb Cadmium[J]. Journal of Applied Microbiology, 2014, 116(5): 1172-1180. DOI:10.1111/jam.12460.
- [35] SINGH A L, SARMA P N. Removal of arsenic (III) from waste water using *Lactobacillus acidophilus*[J]. Bioremediation Journal, 2010, 14(2): 92-97. DOI:10.1080/10889861003767050.
- [36] GERBINO E, MOBILI P, TYMCZYSZYN E E, et al. Use of Raman spectroscopy and chemometrics for the quantification of metal ions attached to *Lactobacillus kefir*[J]. Journal of Applied Microbiology, 2012, 112(2): 363-371. DOI:10.1111/j.1365-2672.2011.05210.x.
- [37] 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: 22-24.
- [38] MRVČIĆ J, STANZER D, BACVUN-DRUŽINA V, et al. Copper binding by lactic acid bacteria (LAB)[J]. Bioscience and Microflora, 2009, 28(1): 1-6. DOI:10.12938/bifidus.28.1.
- [39] 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, 2015: 50-61.
- [40] 朱晓. 乳酸菌表层蛋白的性质、结构与功能[D]. 无锡: 江南大学, 2012: 2.
- [41] GERBINO E, MOBILI P, TYMCZYSZYN 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(1/2/3): 186-192. DOI:10.1016/j.molstruc.2010.12.012.
- [42] GERBINO E, CARASI P, ARAUJO-ANDRADE C, et al. Role of S-layer proteins in the biosorption capacity of lead by *Lactobacillus kefir*[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2015, 31(4): 583-592. DOI:10.1007/s11274-015-1812-7.
- [43] 翟齐啸. 乳酸菌减轻镉危害的作用及机制研究[D]. 无锡: 江南大学, 2015: 29-30.
- [44] FENG Meiqin, CHEN Xiaohong, LI Chengcheng, et al. Isolation and identification of an exopolysaccharide-producing lactic acid bacterium strain from Chinese paocai and biosorption of $Pb(II)$ by its exopolysaccharide[J]. Journal of Food Science, 2012, 77(6): T111-T117. DOI:10.1111/j.1750-3841.2012.02734.x.
- [45] 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. DOI:10.1016/j.resmic.2013.04.004.
- [46] 汤晓燕, 陈丽杰, 袁文杰. 金属硫蛋白应用于重金属吸附的研究进展[J]. 现代化工, 2014, 34(6): 32-36; 38. DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2014.06.001.

- [47] SITTHISAK S, KITTI T, BOONYONYING K, et al. McsA and the roles of metal-binding motif in *Staphylococcus aureus*[J]. FEMS Microbiology Letters, 2011, 327(2): 126-133. DOI:10.1111/j.1574-6968.2011.02468.x.
- [48] SINTUBIN L, DE WINDT W, DICK J, et al. Lactic acid bacteria as reducing and capping agent for the fast and efficient production of silver nanoparticles[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2009, 84(4): 741-749. DOI:10.1007/s00253-009-2032-6.
- [49] MUSTAFA N, ABDULLAH S. Effects of lead acetate and probiotic on some physiological parameters in broiler chicks[J]. Journal of Raf Sciences, 2009, 20(2): 1-7.
- [50] 刘也嘉, 林亲录, 肖冬梅, 等. 大米乳酸菌发酵降镉工艺优化[J]. 农业工程学报, 2016, 32(7): 276-282. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2016.07.039.
- [51] DI CAGNO R, SURICO R F, PARADISO A, et al. Effect of autochthonous lactic acid bacteria starters on health-promoting and sensory properties of tomato juices[J]. International Journal of Food Microbiology, 2009, 128(3): 473-483. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2008.10.017.
- [52] FILANNINO P, AZZI L, CAVOSKI I, et al. Exploitation of the health-promoting and sensory properties of organic pomegranate (*Punica granatum* L.) juice through lactic acid fermentation[J]. International Journal of Food Microbiology, 2013, 163(2/3): 184-192. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2013.03.002.
- [53] DI CAGNO R, CODA R, DE ANGELIS M, et al. Exploitation of vegetables and fruits through lactic acid fermentation[J]. Food Microbiology, 2013, 33(1): 1-10. DOI:10.1016/j.fm.2012.09.003.
- [54] ZHAI Qixiao, TIAN Fengwei, WANG Gang, 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. DOI:10.1039/c5ra24843d.
- [55] BATTIKH E, SAFA A, NICCOLA M K, et al. Effect of Cd and *Lactobacillus* levels on iron concentration in different organs and meat of broiler chicken[J]. Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy, 2011, 46(4): 381-388.
- [56] JAMA A M, MITIĆ-ĆULAFIĆ D, KOLAREVIĆ S, et al. Protective effect of probiotic bacteria against cadmium-induced genotoxicity in rat hepatocytes *in vivo* and *in vitro*[J]. Archives of Biological Sciences, 2012, 64(3): 1197-1206. DOI:10.2298/ABS1203197J.
- [57] TIAN Fengwei, ZHAI Qixiao, ZHAO Jianxin, et al. *Lactobacillus plantarum* CCFM8661 alleviates lead toxicity in mice[J]. Biological Trace Element Research, 2012, 150(1/2/3): 264-271. DOI:10.1007/s12011-012-9462-1.
- [58] ZHAI Qixiao, XIAO Yue, TIAN Fengwei, et al. Protective effects of lactic acid bacteria-fermented soymilk against chronic cadmium toxicity in mice[J]. RSC Advances, 2015, 5(6): 4648-4658. DOI:10.1039/C4RA12865F.