

微生物法脱除重金属技术的研究进展

张丽娜¹,解万翠^{1,2},杨锡洪^{1,3,*},章超桦¹,李子琪²

(1.广东海洋大学食品科技学院,广东省水产品加工与安全重点实验室,水产品深加工广东普通高等学校重点实验室,国家贝类加工技术研发分中心(湛江),广东湛江 524088;

2.青岛科技大学化工学院,山东青岛 266042;

3.青岛科技大学化学与分子工程学院,山东青岛 266042)

摘要:工业科技发展带来的负面问题——重金属污染问题日趋突出,严重威胁了生态环境平衡和人体健康,如何缓解重金属污染是目前环保领域关注的焦点问题之一。本文在简介物理、化学和生物法等脱除重金属技术的基础上,综述了生物法中的微生物法,总结了微生物法脱除重金属的显著优势。重点介绍了常见的微生物脱除剂,并分析其作用机理,探讨了国内外利用微生物法处理重金属的应用成果,最后展望了微生物法脱除重金属的未来发展趋势。

关键词:微生物,脱除,重金属,机理,应用

Research progress in the removal of heavy metals via microbial method

ZHANG Li-na¹, XIE Wan-cui^{1,2}, YANG Xi-hong^{1,3,*}, ZHANG Chao-hua¹, LI Zi-qi²

(1.College of Food Science and Technology, Guangdong Ocean University, Guangdong Provincial Key Laboratory of Aquatic Products Processing and Safety, Key Laboratory of Advanced Processing of Aquatic Products of Guangdong Higher Education Institution, National Research and Development Branch Center for Shellfish Processing (Zhanjiang), Zhanjiang 524088, China;

2.College of Chemical Engineering, Qingdao University of Science & Technology, Qingdao 266042, China;

3.College of Chemistry and Molecular Engineering, Qingdao University of Science & Technology, Qingdao 266042, China)

Abstract: Heavy metal pollution problem caused by the development of industrial science and technology was significant, which have exerted serious threat to the ecological balance and human health. How to resolve the problem of heavy metal pollution was one of the emphasis of the current environmental protection. In this paper, the physical, chemical and biological method for the removal of heavy metals were reviewed, and the significant advantage of microbiological method on reducing heavy metal were pointed out. The microbial scavengers and its action mechanism were then elaborated. Afterwards, the application results of microbial treatment at home and abroad were investigated. Finally, the existing deficiencies and suggestions on further study of the proposed microorganism bioremoval technology were discussed.

Key words: microorganism; removal; heavy metal; mechanism; application

中图分类号: TS201.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2015)24-0356-05

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2015.24.070

重金属污染是一个全球性的环境问题,近年来引起广泛的社会关注。重金属污染主要来自工业“三废”的排放以及生活污水的使用等,以游离或结合态的形式存在于大气、水体和土壤中,并不断积累、迁移。一旦进入食物链会严重威胁生态环境平衡和人体健康,引发如日本水俣病、痛痛病以及我国的“镉米”、“血铅”等公共污染事件^[1]。因此,如何除去环境介质中的重金属污染,成为环境领域重要的研究课题。

依据脱除机理的差异,重金属脱除方法主要分

为物理法、化学法和生物法。物理法是指在保持金属化学形态不变的情况下将其排除,如通过离子交换、溶剂萃取以及膜分离等技术进行废水处理,化学固化、电动修复和土壤淋洗等技术实现土壤修复。化学法是通过改变重金属在水体、污泥或土壤中的存在状态而将其除去,如利用化学沉淀、氧化还原及电解等技术处理废水,通过外加改良剂、抑制剂等改良土壤。生物法是利用动物、植物或微生物对重金属的吸附、转化、富集等作用降低或消除环境中的金属浓

收稿日期: 2015-03-23

作者简介: 张丽娜(1991-),女,在读硕士研究生,研究方向:食品质量与安全控制, E-mail: zhanglina_elena@yeah.net。

* 通讯作者: 杨锡洪(1963-),男,博士,教授,研究方向:海洋多糖化学, E-mail: yangxihong63@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31271938);现代农业产业技术体系专项(GARS-48);国家级大学生创新训练项目(201510426027)。

度,进而改善环境、维护生态。其中,物理法处理后的水质好且可回收利用,但存在成本高的问题;化学法虽然简单快速,但去除不彻底、效率低且易造成二次污染^[2];生物法(微生物法、植物修复等)来源广泛,处理重金属效果好,尤其对轻度重金属污染问题更有效,且选择性强,不造成二次污染,可重复利用^[3]。而生物法中的微生物脱除技术应用较广,是近年来广受关注的新型高效重金属脱除技术^[4]。

1 微生物脱除剂的种类

微生物脱除剂来源于实验室的培养、发酵工业的废弃微生物或取自于污染水体或土壤环境等,主要包括细菌、真菌和微型藻类。

1.1 细菌

长久生存于金属污染环境中的细菌对重金属有一定的耐受性(也称抗性),其细胞壁中肽聚糖、羧基和氨基的含量丰富,吸附脱除重金属的能力较强^[5]。常见抗重金属细菌主要有芽孢杆菌属(*Bacillus*)^[6]、假单胞杆菌属(*Pseudomonas*)^[7]、硫杆菌(*Thiobacillus*)^[8]和趋磁细菌(*Magnetotactic bacterium*)^[9]等。曾景海等^[10]发现蜡状芽孢杆菌HQ-1对 Ag^+ 有强吸附能力,吸附量高达91.75 mg/g。毛雪慧等^[11]曾研究固定化菌体(*Rhodospseudomonas sphaeroides*)对含镉废水的作用效果,发现在生物反应器中其对初始浓度为92.61 mg/L的含镉电镀废水作用3 h,镉的清除率为98.80%,经4轮吸附-解吸循环实验表明:固定化菌体可循环使用三次,且在第三次时镉清除率仍高达51.20%。Liu等^[12]研究发现,在40 °C条件下,每克干重土著氧化硫硫杆菌(*Indigenous Thiobacillus thiooxidans*)在pH为6.0对 Zn^{2+} 的平衡吸附量高达172.4 mg, pH为5.0对 Cu^{2+} 的平衡吸附量为39.84 mg,提高温度也可促进其对 Zn^{2+} 、 Cu^{2+} 的吸附。Qu等^[13]研究趋磁细菌对废水中 Cr^{6+} 的脱除效果,发现在温度29 °C, pH6条件下,作用10 min, Cr^{6+} 的脱除率可达77%。

1.2 真菌

真菌包括霉菌、酵母菌和产生子实体的大型真菌,其细胞壁中含有大量的几丁质和葡聚糖等成分,对重金属具有潜在的吸附脱除能力^[14]。利用这些真菌处理水体或土壤中的重金属,不仅能节约成本,还可提高发酵工业中废弃菌丝体的利用率。B. Preetha等^[15]研究了少根根霉(*Rhizopus arrhizus*)生长过程中对铬、铜、镍的抗性和蓄积能力,当三种金属元素初始浓度均为25 mg/L时,根霉对铬、铜、镍的去除率依次可达93.84%、95.52%和61.44%。肖宁等^[16]发现当处于最佳吸附条件时,酵母菌Y17对二价铜离子的吸附率高达82.7%,并初步判定Y17细胞壁表面的氨基、羧基基团对其吸附 Cu^{2+} 发挥关键作用。许多大型野生真菌能有效吸附有毒重金属并在其子实体内富集,如Borovicka J等^[17]发现松果鹅膏菌(*Amanita strobiliformis*)和角鳞白鹅膏菌(*Amanita solitaria*)对Hg具有超富集的能力,其中前者对Hg的积累可高达1253 mg/kg干重。

1.3 微藻类

微型藻类是水生生态系统中的重要组成成分之

一,其细胞壁或一些胞外产物中含有丰富的多糖、蛋白质和脂类,具有粘性并带有一定的负电荷,可与金属离子结合,具有很强的吸附重金属能力^[18]。工业废弃的活性藻体,能选择性地修复不同条件下的重金属污染水体(城市污水、工业废水等)^[19]。姜晶等^[20]曾研究蛋白核小球藻对二价铅和镉的吸附热力学,用Langmuir模型进行拟合,经计算,发现对每克Pb、Cd最大吸附量分别为0.373、0.249 mmol。Reza Tabaraki等^[21]研究发现在一元和三元体系中,褐藻冬青叶马尾藻(*Sargassum ilicifolium*)有效吸附 Zn^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Ni^{2+} 的次序为 $Zn^{2+} > Cu^{2+} > Ni^{2+}$ 。

以上三种微生物脱除剂中,细菌占地球总生物量(约 10^8)的绝大部分,是地球上最丰富的微生物,对其重金属脱除方面的研究最多。真菌的分布很广,其中霉菌、酵母和菌菇类在脱除重金属中起到关键作用。微藻类是近年来兴起的新型重金属脱除剂,在重金属脱除方面的应用研究较少^[22]。无论活性或非活性微生物都具有较强的重金属脱除能力,相对活性微生物而言,非活性的无生长条件的限制,不受重金属毒害,而且成本更低,吸附更快,但富集效果不及活性微生物^[23]。

2 微生物法脱除重金属的基本原理

微生物法脱除重金属的机理因微生物种类、金属元素及外界因素的不同而存在差异。综合文献资料,微生物(包括活体或非活体)脱除重金属的机理主要有:吸附作用(表面吸附和体内富集)、转化作用、淋滤作用以及微沉淀作用等,如图1所示。

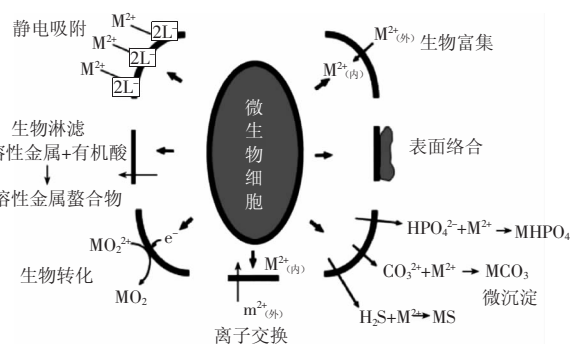


图1 微生物与重金属之间的相互作用^[24]

Fig.1 The interaction between microorganisms and heavy metals^[24]

注: M^{2+} 、 m^{2+} : 不同种类金属离子。

2.1 吸附作用

2.1.1 表面吸附 表面吸附是一种被动的方式,微生物主要通过离子交换、表面络合和静电吸附三种形式吸附重金属。不同微生物吸附金属离子时起主导作用的官能团和吸附方式有所不同(表1),但都具备快速、可逆、不依赖细胞代谢能量的特性,且无论活性、非活性的菌体或细胞代谢产物均有吸附重金属的功能。

2.1.2 生物富集 微生物富集重金属的过程是一个主动的,需消耗能量,并与其新陈代谢相关的过程。通过吸收、吸附、胞吞等方式从所在环境中累积某些金属元素,常易被富集的金属离子有二价镉、二价

表1 不同微生物表面吸附重金属离子时起主导作用的官能团和吸附方式^[25]Table 1 The functional groups and adsorption methods in the surface adsorption of heavy metal ions by different microbial^[25]

微生物	重金属离子	官能团	吸附方式
嗜酸性细菌 <i>Acidophilic bacterium</i>	Cd ²⁺	-NH ₂ 、-COOH、-OH	静电吸附、无机微沉淀
螺旋藻 <i>Spirulina sp.</i>	Cr ³⁺ 、Cd ²⁺ 、Cu ²⁺	-COOH、-OH、-PO ₄ ³⁻	物理吸附、离子交换
变形假单胞菌 <i>Pseudomonas plecoglossicida</i>	Cd ²⁺	-NH ₂ 、-OH、-CH ₂ 、-CONH ₂	离子交换、静电吸附
果冻型真菌菌丝体	Cd ²⁺ 、Cu ²⁺ 、Pb ²⁺	-COO ⁻ 、-NH ₂ 、-OH、-PO ₄ ³⁻ 、C-N-C	离子交换、表面络合
EDTA型磁性螯合树脂	Cr ⁶⁺	-NH ₂ 、-NH	螯合、静电吸附

锌、二价铜等。这些可溶性金属在细胞膜的作用下从胞外被转运到胞内,在胞内被隔离分开或与胞内蛋白结合。这里所说的胞内蛋白是指金属硫蛋白(MT)、谷胱甘肽(GSH)、植物凝集素等,具有存储、调节及净化细胞内金属离子的功能,可降低或消除其对微生物自身的毒害作用^[26]。如W X Bi等^[27]研究发现GSH对酵母体内铜和镉具有不同程度的解毒作用。但当水体、土壤中的重金属离子浓度较大时,会抑制微生物的增殖,且重金属在微生物体内富集是一个漫长的过程,故生物富集在实际应用方面所受限制很大。

2.2 转化作用

微生物转化作用是指重金属元素在细胞内或外经过一系列化学变化(氧化还原、甲基化等)从高毒性转变成低毒性甚至无毒性物质,进而达到解毒效果,使环境污染状况得以改善^[28]。陈亚刚等^[29]曾报道金属还原细菌能使Fe³⁺、Mn⁴⁺依次转化为Fe²⁺和Mn³⁺,从而使其从难溶性氧化物中释放出来。Chang等^[30]分析获得的一株嗜硫酸盐细菌可使电镀废水中的Cr⁶⁺还原成难溶低毒的Cr³⁺,减弱了电镀水中镉的毒性。此外一些抗亚砷酸盐的细菌可将毒性较高的亚砷酸离子氧化成较低毒性的砷酸盐。通过微生物转化作用,金属元素可在活性相与非活动相两者之间相互转换,但不可避免存在转化后金属毒性增强,甚至致癌、致畸的问题,所以在采用该技术时,应考虑所处理水质中的重金属种类。

2.3 淋滤作用

淋滤作用是利用某些微生物新陈代谢产生的一些有机酸,如甲酸、乙酸、柠檬酸等,将固相(底泥、污泥、固态食品等)中难溶性的重金属溶解,使之进入水体成为可溶性的金属离子,然后对污泥进行脱水,从而脱出重金属^[31],该技术已在解决实际重金属污染问题(尤其是处理污泥)中得到广泛应用。如张军等^[32]利用从酸性矿井水中分离的菌株ATF-1对城市污泥进行摇瓶沥滤效果分析,发现经过15 d沥滤后,污泥中锌、铅、镍、铜、镉和铬的脱除效果均较好。张祥楠^[33]用以氧化硫杆菌为主的混合硫杆菌对污水处理厂浓缩污泥进行生物淋滤,发现淋滤效果较好,重金属浓度明显降低。

3 微生物法脱除重金属的应用

3.1 水体及底泥中重金属的处理

水体和底泥中的重金属的毒性大,极难分解破坏,唯有通过转移其存在位置或改变存在状态的方式降低或消除重金属的毒性。大量文献表明应用微

生物法处理是一个有效的解决方法。

李中华等^[34]采用固定化耳葡萄球菌流化床工艺处理实际矿山废水,对废水中浓度小于10 mg/L的镉、铬、镍、铅元素,去除率可高达100%,对浓度为579.2 mg/L铁进行脱除,去除率也高达56.6%。Peng等^[35]利用生物淋滤与动电技术结合处理污泥中的Cu、Zn,经生物沥滤,结合态的锌和铜均转变为可溶性离子态;动电过程中,铜离子、锌离子聚集到电极区,利于回收处理。

3.2 土壤中重金属的去除

重金属在土壤中滞留时间久、不能降解,且导致土壤肥力下降,破坏田地区域生态系统稳定性,此外,土壤污染与水体污染、大气污染密切相关,土壤重金属污染修复不好,水体和大气中的也很难根除。因此,土壤重金属污染问题亟待解决,而利用微生物法处理该问题具有很大潜力^[36]。

常文越等^[37]分析比较了土著微生物还原Cr⁶⁺污染土壤前后土壤中有有效铬的量。结果显示,还原后土壤中的水溶性和可交换态Cr的含量明显减少,同时其浸出液中的Cr⁶⁺持续降低,表明还原得到的物质毒性小且稳定性较好。白红娟等^[38]在Pb、Cd及克百威复合污染的土壤样品中施加光合细菌液后种植南瓜、丝瓜和西葫芦,发现这三种蔬菜中Pb、Cd及克百威含量都未达到蔬菜污染物限量标准,表明了光合细菌可显著降低其对土壤中的Pb、Cd及克百威的吸收,确保瓜类蔬菜的食用安全性。

3.3 食品中重金属的脱除

由于农作物和水产品的富集作用或是在生产加工、贮藏运输过程中受到金属元素的污染,导致食品中有毒重金属含量超标,严重威胁人体健康^[39]。活体水产品通常采取净水暂养使其体内的重金属排出,农作物类是从改善生长环境和后期处理两方面控制其重金属含量。相比其他方法,微生物法在脱除食品中重金属方面具有很大潜力,但目前仍停留在实验阶段,未能推广应用。

刘文磊^[40]曾采用三种不同形态(冻干粉、固定化、活性)的鲁氏酵母作为吸附剂,对鲑鱼内脏酶解液中Cd进行去除,发现鲁氏酵母冻干粉、固定化以及活性的鲁氏酵母对Cd的去除率分别可达25.78%、17.02%、28.36%。将其接种到鲑鱼内脏酶解液和鱼露中发酵培养,培养液中初始Cd浓度约为10 mg/L,发酵完成后两种产品中的Cd去除率分别达到了21.5%、26.24%。张金硕等^[41]研究发现酿酒酵母对锦鲤鱼体内汞和镉的去除性能显著,可使鱼肉中许多重金属

元素脱除,但对铜的去除作用不明显。Haltunen等^[42]研究特定乳酸菌对饮用水中镉、铅的脱除作用,发现长双歧杆菌46、发酵乳杆菌ME3和乳双歧杆菌Bb12三种乳酸菌对镉、铅的脱除效果最好,其中每克干重长双歧杆菌46对镉和铅的最大脱除量分别为54.7、175.7 mg。傅亚平等^[43]以植物乳杆菌、戊糖片球菌(体积比2:1)为菌种,利用发酵技术对400目精米中的镉(0.6479 mg/kg)进行脱除,当接种量3%、温度40.8℃、发酵23.4 h时,镉的脱除率为85.73%,此时大米粉中的镉残留量(0.0925 mg/kg)低于国家限量标准(0.2 mg/kg)。

4 展望

近年来,微生物法脱除重金属的研究很多,成果也很显著,但该技术仍处于起步阶段,吸附机理未完全明确,固定化技术不成熟,微生物易中毒、耗时长、受处理环境限制等问题尚未得到很好解决。为了加速微生物法脱除重金属技术在重金属污染防治中的工程应用,发挥其重要作用,未来应着重以下几方面的发展:研发更多低廉、吸附量大的生物吸附剂,并开发新型的具备金属结合性质的物质,如金属结合蛋白的类似物,金属亲和力强的多肽,这将显著增强微生物法修复环境的水平;培育新型菌种,筛选对有毒金属元素脱除量大、耗时短的微生物体应用于工业化;重视高效固定化生物反应器的开发,不断优化处理工艺,尽可能的提高微生物利用效率;应用益生菌脱除食品中的重金属具有巨大潜力,是未来微生物法脱除重金属研究的一个重要方向。

参考文献

[1] 国冬梅,张立,周国梅. 重金属污染防治的国际经验与政策建议[J]. 环境保护,2010(1):74-76.
 [2] Demir A, Arisoy M. Biological and chemical removal of Cr(VI) from waste water: cost and benefit analysis[J]. Journal of Hazardous Materials,2007,147(1-2):275-280.
 [3] 咎逢宇,赵秀兰. 生物吸附剂及其吸附性能研究进展[J]. 青海环境,2004,14(1):15-18,40.
 [4] 林华山,黄伟,邱杨. 霉菌吸附污水中重金属的研究进展[J]. 现代食品科技,2013,29(6):1147-1154.
 [5] 程静. 枯草芽孢杆菌对水相中和的生物吸附[D]. 沈阳:东北大学,2008.
 [6] Mohammad Oves, Mohammad Saghir Khan, Almas Zaidi. Biosorption of heavy metals by *Bacillus thuringiensis* strain OSM29 originating from industrial effluent contaminated north Indian soil[J]. Saudi Journal of Biological Sciences,2013,20(2):121-129.
 [7] Isabelle Poiriera, Lauriane Kuhn, Christelle Caplat, et al. The effect of cold stress on the proteome of the marine bacterium *Pseudomonas fluorescens* BA3SM1 and its ability to cope with metal excess[J]. Aquatic Toxicology,2014(157):120-133.
 [8] 肖鑫. 土著氧化亚铁硫杆菌与土著氧化硫硫杆菌对尾矿重金属生物淋滤作用的研究[J]. 长沙:湖南大学,2011.
 [9] 孙长江,尹晓红,马伟,等. 趋磁细菌培养及用于吸附分离贵金属离子[J]. 微生物学通报,2010,37(3):394-400.

[10] 曾景海,齐鸿雁,杨建州,等. 重金属抗性菌 *Bacillus cereus* HQ-1对银离子的生物吸附-微沉淀成晶作用[J]. 环境科学,2008,29(1):225-230.
 [11] 毛雪慧,徐明芳,刘辉,等. 固定化球形红假单胞菌处理电镀废水中Cd和Cr的研究[J]. 生态与农村环境学报,2010,26(2):160-166.
 [12] Hsuan-Liang Liu, Bor-Yann Chen, Yann-Wen Lan, et al. Biosorption of Zn(II) and Cu(II) by the indigenous *Thiobacillus thiooxidans*[J]. Chemical Engineering Journal,2004,97(2-3):195-201.
 [13] Yingmin Qu, Xuemei Zhang, Jiao Xu, et al. Removal of hexavalent chromium from wastewater using magnetotactic bacteria[J]. Separation and Purification Technology,2014,136(5):10-17.
 [14] S Anahid, S Yaghmaei, Z Ghobadinejad. Heavy metal tolerance of fungi[J]. Scientia Iranica,2011,18(3):502-508.
 [15] B Preetha, T Viruthagiri. Bioaccumulation of chromium(VI), copper(II) and nickel(II) ions by growing *Rhizopus arrhizus*[J]. Biochemical Engineering Journal,2007,34(2):131-135.
 [16] 肖宁,陈强,裴浩言,等. 酵母菌Y17吸附Cu²⁺的影响因素及吸附机理研究[J]. 微生物学通报,2008,35(5):772-776.
 [17] Borovicka J, Randa Z, Jelinek E, et al. Hyperaccumulation of silver by *Amanita strobiliformis* and related species of the section *Lepidella*[J]. Mycological Research,2007,111(11):1339-1344.
 [18] 张阳,耿存珍. 天然藻类吸附重金属的研究[J]. 环境保护科学,2012,38(6):27-32.
 [19] 支田田,程丽华,徐新华,等. 藻类去除水体中重金属的机理及应用[J]. 化学进展,2011,23(8):1782-1794.
 [20] 姜晶,李亮,李海鹏,等. 蛋白核小球藻对Pb(II)和Cd(II)的生物吸附及其影响因素[J]. 生态学报,2012,32(7):1995-2003.
 [21] Reza Tabaraki, Ashraf Nateghi. Multimetal biosorption modeling of Zn²⁺, Cu²⁺ and Ni²⁺ by *Sargassum ilicifolium*[J]. Ecological Engineering,2014(71):197-205.
 [22] Jianlong Wang, Can Chen. Biosorbents for heavy metals removal and their future[J]. Biotechnology Advances,2009,27(2):195-226.
 [23] Lina Velásquez, Jenny Dussan. Biosorption and bioaccumulation of heavy metals on dead and living biomass of *Bacillus sphaericus*[J]. Journal of Hazardous Materials,2009,167(1-3):713-716.
 [24] 韦革宏,马占强. 根瘤菌-豆科植物共生体系在重金属污染环境修复中的地位、应用及潜力[J]. 微生物学报,2010,50(11):1421-1430.
 [25] Vahid Javanbakht, Seyed Amir Alavi, Hamid Ziloue. Mechanisms of heavy metal removal using microorganisms as biosorbent[J]. Water Science & Technology,2014,69(9):1775-1787.
 [26] 陈灿,王建龙. 酿酒酵母吸附重金属离子的研究进展[J]. 中国生物工程杂志,2006,26(1):69-76.
 [27] W X Bi, F Kong, X Y Hu, et al. Role of glutathione in

51(4):1021-1023.

[40] Zerdin K, Rooney M L, Vermuë J. The vitamin C content of orange juice packed in an oxygen scavenger material[J]. Food Chemistry, 2003, 82(3):387-395.

[41] 徐斐, 蔡宝玉. 柑桔汁成分对其褐变的影响[J]. 食品工业, 1999(2):8-10.

[42] Kacem B, Matthews R F, Crandall P G, et al. Nonenzymatic browning in aseptically packaged orange juice and orange drinks. Effect of amino acids, deaeration, and anaerobic storage[J]. Journal of Food Science, 1987, 52(6):1665-1667.

[43] 张妍, 王可兴, 潘思轶. 外源因子对贮藏橙汁色泽影响研究[J]. 食品科学, 2006(11):74-77.

[44] Sharma S K, Juyal S, Rao V K, et al. Reduction of non-enzymatic browning of orange juice and semi-concentrates by removal of reaction substrate[J]. Journal of food science and technology, 2014, 51(7):1302-1309.

[45] Cortés C, Esteve M J, Frígola A. Color of orange juice treated by high intensity pulsed electric fields during refrigerated storage and comparison with pasteurized juice[J]. Food Control, 2008, 19(2):151-158.

[46] Tiwari B K, O'Donnell C P, Muthukumarappan K, et al. Ascorbic acid degradation kinetics of sonicated orange juice during storage and comparison with thermally pasteurised juice

[J]. LWT-Food Science and Technology, 2009, 42(3):700-704.

[47] Fustier P, St-Germain F, Lamarche F, et al. Non-enzymatic browning and ascorbic acid degradation of orange juice subjected to electroreduction and electro-oxidation treatments[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2011, 12(4):491-498.

[48] 刘春芝, 许洪高, 李绍振, 等. 柑橘类果汁货架期研究进展[J]. 食品科学, 2012, 33(13):292-298.

[49] 段绘叶, 李东立, 伊敏, 等. 吸氧型阻隔包装材料对橙汁品质的影响[J]. 食品工业科技, 2014, 35(3):275-278.

[50] 刘春芝, 许洪高, 高彦祥, 等. 包装技术与工程不同包装橙汁贮藏期间物理品质的变化[J]. 包装工程, 2012, 15:1-5, 20.

[51] Solomon O, Svanberg U, Sahlström A. Effect of oxygen and fluorescent light on the quality of orange juice during storage at 8 °C[J]. Food chemistry, 1995, 53(4):363-368.

[52] 王宇明, 钟瑞, 王鲁峰, 等. 加速实验条件下锦橙汁品质劣变关键指标评价[J]. 食品科学, 2012, 33(22):308-313.

[53] Burdurlu H S, Koca N, Karadeniz F. Degradation of vitamin C in citrus juice concentrates during storage[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 74(2):211-216.

[54] Petersen M A, Tønder D, Poll L. Comparison of normal and accelerated storage of commercial orange juice - Changes in flavour and content of volatile compounds[J]. Food Quality and Preference, 1998, 9(1):43-51.

(上接第359页)

detoxification of copper and cadmium by yeast cells having different abilities to express cup1 protein[J]. Toxicology Mechanisms and Methods, 2007, 17(6):371-378.

[28] Chad D Edwards, Joseph C Beatty, Jacqueline B R Loiselle, et al. Aerobic transformation of zinc into metal sulfide by photosynthetic microorganisms[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2013, 97(8):3613-3613.

[29] 陈亚刚, 陈雪梅, 张玉刚, 等. 微生物抗重金属的生理机制[J]. 生物技术通报, 2009(10):60-65.

[30] In Seop Chang, Byung Hong Kim. Effect of sulfate reduction activity on biological treatment of hexavalent chromium[Cr(VI)] contaminated electroplating wastewater under sulfate -rich condition[J]. Chemosphere, 2007, 68(2):218-226.

[31] Xinhui Denga, Liyuan Chaia, Zhihui Yang, et al. Bioleaching mechanism of heavy metals in the mixture of contaminated soil and slag by using indigenous Penicillium chrysogenum strain F1[J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, 248-249(15):107-114.

[32] 张军, 肖潇, 王敦球, 等. 一株嗜酸氧化亚铁硫杆菌的分离及沥滤效果研究[J]. 环境污染与防治, 2014, 36(3):1-2.

[33] 张祥楠. 生物淋滤法去除污泥中重金属[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2011.

[34] 李中华, 尹华, 叶锦韶, 等. 固定化菌体吸附矿山废水中重金属的研究[J]. 环境科学学报, 2007, 27(8):1245-1250.

[35] Guiqun Peng, Guangming Tian, Junzhi Liu, et al. Removal of heavy metals from sewage sludge with a combination of bioleaching and electrokinetic remediation technology [J]. Desalination, 2011, 271(1-3):100-104.

[36] 黄益宗, 郝晓伟, 雷鸣, 等. 重金属污染土壤修复技术及其修复实践[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(3):409-417.

[37] 常文越, 陈晓东, 王磊, 等. 土著微生物修复Cr(VI)污染土壤还原后有效铬分析及其稳定性的初步实验研究[J]. 环境保护科学, 2008, 34(2):78-98.

[38] 白红娟, 肖根林, 贾万利. 光合细菌减少蔬菜中Pb、Cd及呋喃丹污染的研究[J]. 中国土壤与肥料, 2013(2):84-99.

[39] 游勇, 鞠荣. 重金属对食品的污染及其危害[J]. 环境, 2007(2):102-103.

[40] 刘文磊. 耐盐鲁氏酵母脱除水溶液及鱿鱼内脏酶解液中重金属能力的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.

[41] 张金硕, 许晓曦, 滕国新. 酿酒酵母对锦鲤鱼体内铜、汞、镉三种重金属排除效果的比较研究[J]. 食品工业科技, 2011, 32(4):120-122.

[42] Halttunen T, Salminen S, Tahvonon 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.

[43] 傅亚平, 廖卢艳, 刘阳, 等. 乳酸菌发酵技术脱除大米粉中镉的工艺优化[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6):319-326.