

贝类重金属脱除技术的研究现状与进展

张双灵, 张 忍, 于春娣, 姜文利, 王世清*

(青岛农业大学食品科学与工程学院, 青岛 266109)

摘 要: 海洋贝类由于滤食性特点而极易受到重金属的污染。近年来我国海洋贝类普遍出现重金属超标问题, 严重影响了我国贝类食品安全和出口贸易, 因此重金属的脱除技术逐渐受到重视。本文综述了海洋贝类的污染现状, 介绍了海洋贝类重金属脱除技术与方法, 包括活体贝类脱除法和蛋白酶解液脱除法, 同时对脱除技术的未来发展进行了展望。

关键词: 镉; 重金属污染; 脱除; 暂养; 酶解液

Current status and advances on heavy metal removal technology in shellfish

ZHANG Shuang-Ling, ZHANG Ren, YU Chun-Di, JIANG Wen-Li, WANG Shi-Qing*

(College of Food Science and Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China)

ABSTRACT: Marine shellfish are easily polluted by heavy metal because of its characteristic of filter-feeding. In recent years the problems of heavy metal over standard level polluting Chinese shellfish have emerged prevalently, which has seriously affected the food safety and export trade of China. Thus, the removal technology of heavy metal is getting more and more concern. This review summarized the current status of cadmium pollution in marine shellfish, introduced cadmium removal technologies including live shellfish removal method and protease hydrolyzate removal method. At last the paper suggests a prospect of the development on removal technology.

KEY WORDS: cadmium; heavy metal pollution; removal; temporary rearing; protease hydrolyzate

我国贝类资源十分丰富, 产量很高, 常见的主要有牡蛎、生蚝、贻贝、蛤仔、蛭等。贝类不仅营养丰富, 而且美味可口, 越来越受到消费者的喜爱。我国的贝类远销韩国、日本、欧美等国家。然而, 随着我国经济和工业的迅猛发展, 重金属对环境尤其是对水体的污染越来越严重, 加之贝类属于滤食性动物, 移动范围有限且对重金属有较强的吸附蓄积能

力, 极易造成重金属含量超标情况。人们若食用了此类贝类就会引起不同程度的中毒现象^[1]。近几年, 我国“重金属中毒事件”屡次出现并被媒体大肆报道, 引起了消费者的恐慌, 已成为食品安全领域的热门话题。受重金属污染的贝类, 不仅对人类的健康造成严重威胁, 而且也影响海产品出口贸易, 使地方经济遭受了巨大的损失。因此, 如何控制贝类中重金属的

基金项目: 国家自然科学基金项目(31271963)、山东省高等学校科技计划项目(J12LD05)、“十二五”国家科技支撑计划课题(2012BAK17B05)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (31271963), Science and Technology Research Program for Colleges and Universities in Shandong Province(J12LD05), 12th Five-Year National Key Technology R&D Program(2012BAK17B05)

*通讯作者: 王世清, 博士, 教授, 主要研究方向为食品安全保藏。E-mail: wangshiqing@126.com

***Corresponding author:** WANG Shi-Qing, Professor, College of Food Science and Engineering, Qingdao Agricultural University, No.700, Changcheng Road, Chengyang District, Qingdao 266109, China. E-mail: wangshiqing@126.com

超标问题成为亟待解决的重大问题,许多学者对此进行了大量的研究。鉴于贝类的重金属脱除技术对保障消费者饮食安全、促进我国经济健康发展均具有重要的现实意义,现就贝类的重金属脱除技术做系统的分析和综述。

1 重金属污染现状

所谓重金属污染是指由铅、铬、汞、镉等重金属及其化合物所引起的环境污染,其具有来源广泛、残毒时间长、蓄积性、能沿食物链转移富集、污染后不易被发现、难于恢复等特点^[2]。近半个世纪以来,随着现代工农业生产的快速发展,特别是沿海地区重、轻工业以及旅游业的迅速发展,大量的重金属随“三废”进入到了附近的水体,流经江河而汇入了近海海域^[3]。水体中的贝类主要通过食物链及生物的富集作用对重金属产生蓄积。

大量的调查结果表明,我国贝类的重金属问题尤为突出,主要表现在镉和铅超标现象严重,绝大部分贝类的镉含量都超过“人体卫生消费标准”^[4]。王美珍等^[5]通过对杭州湾南岸滩涂贝类养殖环境进行调查研究后发现,人工养殖的泥螺、彩虹明樱蛤、缢蛏和青蛤等贝类体内铅、镉、铬、汞、铜等重金属的残留量都出现不同程度的超标现象。阮金山等^[6]对贝类养殖区的海水、表层沉积物和贝类体内重金属的含量分布进行调研,结果表明:僧帽牡蛎体内铜和泥蚶体内镉的含量都存在超标问题。王许诺等^[7]根据广东沿海4种贝类养殖区90个样品的检测结果,深入研究了贝类体内重金属的累积过程和含量的变化,发现部分近江牡蛎体中镉和铜的含量已经超标。

2 脱除方法

由于目前我国的贝类重金属污染现象严重,已经对人类健康造成了不同程度的危害,因此必须生产过程中对贝类的重金属进行脱除及净化处理,以确保其食用安全性。现阶段对重金属污染的贝类尚未开发出快速且有效的脱除技术,但已有多种方法可降低贝类重金属的危害程度,例如:加强工业镉的三废治理力度、强化食品的镉污染监测手段以及倡导尽可能少食或不食含镉量高的贝类产品等^[8-9]。而此类方法,仅能转移其存在位置或改变重金

属的存在方式,并不能彻底消除其毒性,因此其应用受到了限制^[10]。近些年来,海洋贝类重金属的控制与脱除技术的研究开始受到重视,各种脱除技术推陈出新,对其的研究也逐步深入。目前,脱除方法的研究主要分为活体贝类脱除技术和蛋白酶解液脱除技术两个方向。

2.1 活体贝类脱除技术

活体贝类脱除技术^[11]是指通过将贝类置于洁净的水环境中暂养,依靠贝类自身代谢过程将其体内的重金属等排出体外并最终达到安全标准的过程。贝类暂养是目前活体贝类脱除重金属的唯一手段,由于该方法所需成本较高,耗时长,暂养损耗率往往超过50%以上,且会对暂养区水质造成一定程度的二次污染等问题,其在经济上可行性不大,难以大规模推广应用。研究发现,贝类体内的重金属往往与亲和力最强的生物蛋白结合形成稳定的结合体^[12],因其配位结合非常稳定。因此,为了提高暂养过程中的脱除效果,有学者建议在暂养海水中添加维生素C、特定饵料和金属配合物等来提高俘获、脱除重金属的能力。

2.1.1 添加壳寡糖-金属配合物

一些学者在海水中加入金属配合物促进贝类重金属的脱除,这样不仅能有效脱除贝类体内重金属,还能减少暂养时间。孙继鹏^[13]报道了壳寡糖钙(COS-Ca)、壳寡糖镁(COS-Mg)配合物对栉孔扇贝体内镉的脱除作用,经COS-Ca、COS-Mg处理净化,3d内栉孔扇贝体内镉含量分别降低了46%和41.8%。黄国清^[14]报道了以太平洋牡蛎为实验对象,研究壳寡糖(COS)相对分子质量及脱乙酰度对COS-金属配合物脱镉效果的影响,并对其应用条件进行优化。结果表明,在COS-Ca、COS-Mg、COS-Zn和COS-Ree四种配合物中,COS-Mg的脱镉效果最好。COS的相对分子质量和脱乙酰度对COS-Mg的脱镉效果均有显著影响。

2.1.2 添加特定饵料

国内外许多学者研究了通过在贝类养殖过程中向饵料里加入添加剂以降低贝类体内重金属残留量,并取得了一系列成果。许梓荣等^[15]公开了一种降低畜禽、水产品重金属残留的纳米饲料添加剂的制备方法,其中主要原料为壳聚糖、氯化钠和纳米蒙脱石。该饲料添加剂对铅、镉、砷、汞、镍、锡和锑等均有

较强的吸附效果; 不受肠道 pH 的干扰; 在饲料中的添加量少, 仅为 0.01%~0.1%; 动物体内无残留。该饲料添加剂的应用可消除重金属对鱼和虾等的毒害。

2.1.3 添加维生素 C

维生素 C 可促进重金属离子(铅、镉、汞等)排出体外, 且有阻止生成致癌物质(亚硝酸胺)的作用^[16]。其功能机制是: 维生素 C 是强还原剂, 能使体内氧化型谷胱甘肽转变成还原型谷胱甘肽, 还原型谷胱甘肽则可以与砷、铅等重金属离子结合而排出体外, 从而避免巯基酶的-SH 基与重金属离子结合而失去活性。所以维生素 C 具有解毒和维持动物机体正常新陈代谢的作用。

2.1.4 添加 EDTA

Hiraoka^[17]报道了人工海水中加入 0.5% 的 EDTA 来脱除养殖的牡蛎中的重金属, 经过 48 h 净化后, 与对照组(人工海水)相比, 试验组(人工海水加 0.5% EDTA)中铁、砷的含量均有明显的降低, 铅和锰出现下降的趋势, 镉和铜的含量呈略低水平。海水养殖中常用 EDTA 的钠盐改良水质, 预防和处理重金属污染。如 Na_2EDTA 和 CaNa_2EDTA , 常用来脱除养殖水中铅、汞、铜、锌等重金属以改良水质, 一定程度上可以降解动物体内毒性, 促进水产养殖动物的健康生长。

2.2 蛋白酶解液重金属脱除技术

该技术指通过蛋白酶将海洋动物蛋白制备为液态酶解液后进行重金属脱除的技术^[18]。利用该技术将海洋贝类蛋白质酶解成可溶性成分的氨基酸、多肽等小分子, 能够有效地提高海洋贝类的资源利用率和经济附加值, 是制备海洋制品的重要途径, 因为液态介质酶解液更利于重金属的脱除, 如今已有蛋白酶解液中重金属脱除技术的报道。此外, 还有其它领域去除重金属方法的研究, 特别是一些脱除材料的改性技术, 具有良好的借鉴作用。综合各领域, 可应用于酶解液中重金属的去除方法有: 壳聚糖法、螯合树脂法、络合法、吸附法和絮凝法等。

2.2.1 壳聚糖法

壳聚糖是天然生物高分子化合物甲壳素的脱乙酰基产物, 无毒、无污染。壳聚糖分子的氨基和羟基可络合金属离子, 具备生物降解的特点, 因而更适用食品工业。Muzzsrelli^[19]曾对壳聚糖与金属离子作用

机制进行研究后指出, 金属离子主要通过离子交换、物理吸附与螯合 3 种方式与壳聚糖结合, 目前该结论也得到了学术界的普遍认可。

如今已有许多利用壳聚糖对蛋白酶解液介质中的重金属脱除的研究报告, 如梁鹏^[20]优化了壳聚糖吸附重金属镉离子的最佳条件, 在 6 h 吸附时间、pH 8 的条件下贝肉匀浆液中的镉离子吸附率超过 98%, 这一结果表明壳聚糖对贝类水解液中的镉具有较强的吸附性能。戴志远^[21]用壳聚糖在 pH 6.5~8.0、温度 60~80 °C 条件下降低了贻贝蒸煮液中重金属含量, 且脱除过程中较好地保持了贻贝蒸煮液中的营养成分。壳聚糖价格低廉、易于改性, 且无毒环保的特点使其成为未来研究重点, 尤其是开展可再生的改性壳聚糖树脂的研究, 增强壳聚糖对重金属的选择性, 更具有广阔的发展前景。

2.2.2 螯合树脂法

螯合树脂是一类能与金属离子形成多配位络合物的交联功能高分子材料。螯合树脂以交联聚合物为骨架, 连接以特殊功能基构成。树脂上的功能原子通过配位作用与金属离子发生反应, 形成类似小分子螯合物的稳定结构, 使之与金属离子有很强的结合力, 选择性也更高。相对于其它方法, 螯合树脂有操作简便、与金属离子的结合力强、选择性好、吸附容量大、容易再生等优势。2006 年日本一专利使用 D401 大孔螯合树脂对海产品蒸煮液进行重金属脱除研究, 控制 pH 在 5.5 左右, 过柱检测重金属镉的脱除率超过 80%, 营养物质的保留率也达到了 70% 以上^[22]。张井^[23]利用大孔螯合树脂, 分别采用静态吸附与过柱方法对北太平洋鱿鱼内脏酶解液中重金属镉的脱除进行了研究, 脱除率大于 90%, 将重金属有效地控制在限定范围之内。

2.2.3 络合法

络合法利用络合试剂对重金属的螯合能力, 用于重金属的脱除。常见的络合剂有 EDTA、植酸、柠檬酸等。EDTA 为比较传统的络合剂, 作为食品添加剂来控制重金属含量, 但由于 EDTA 的过量排放造成继发污染, 其应用受到了限制, 因而新型无污染络合材料的开发研究逐渐受到重视。目前比较受关注的是植酸, 因为其有羧基和磷酸基等大量的活性基团, 能够与多种阳离子形成稳定的螯合物^[23]。相对于 EDTA, 植酸除了具有 pH 适用范围更广、螯合能力更强等特点之外, 最大的优势在于

其本身无毒甚至对人体有益,且不会对贝类造成污染^[24]。

目前有关植酸应用于重金属脱除的研究已经有报道。戴志远^[25]尝试了用植酸法降低贻贝蒸煮液中的重金属,在贻贝蒸煮液中加入植酸,调节适宜 pH 与温度后反应一段时间,离心去除沉淀,结果发现贻贝蒸煮液中的镉含量降低了 95%,且蒸煮液中营养成分基本保留:蛋白质存留大于 78%;总糖存留率大于 50.7%。利用络合法处理重金属,尽管在选择性和脱除率方面有其优势,但脱除过程中固液分离较为困难。在实际生产过程中常采用离心进行固液分离,因此无法再生利用,这也限制络合法在工业生产中的应用,但络合法仍可以作为一种辅助的脱除方法而发挥作用。

2.2.4 吸附法

吸附法指利用吸附材料的吸附性能对重金属进行吸附,主要有活性炭吸附法和沸石吸附法。活性炭炭粒细微,比表面积大,微孔众多,因而能与杂质充分接触。通过这些微孔吸附,起到重金属等杂质的脱除作用。沸石是沸石族矿物的总称,呈架状结构,是一种含水的碱或碱土金属铝硅酸盐矿物。沸石对重金属的吸附主要是通过离子交换和表面络合吸附作用。

吸附法工艺简单、吸附容量大、可再生,且可以通过对吸附材料的修饰改性提高其吸附性能,如 Lu^[26]用 EDTA 在颗粒活性炭表面涂层的方法对活性炭进行了改性,制成新型 EDTA 包覆活性炭,其吸附能力是改性前的 18 倍。

2.2.5 絮凝法

絮凝法脱除重金属的原理主要是通过静电吸附、电性中和、黏附、架桥和交联作用破坏系统的稳定性,使微粒之间通过相互聚集而形成较大颗粒,在重力作用下沉降,最终达到分离的目的。絮凝剂来源比较广泛,能够比较理想的脱除多种重金属污染物,操作简单、方便、快捷,适宜工业生产。但由于海产品酶解后的酶解液中存在大量的蛋白质及氨基酸,且呈悬浊液形式,而絮凝法又不具选择性,因此在重金属去除的过程中也不可避免地使大量蛋白质、多肽絮沉。此外,无机絮凝剂、有机絮凝剂等部分絮凝剂的引入也会给体系中引入新的污染物质,引起新的食品安全问题。

3 结论与展望

贝类重金属污染问题越来越受到人们的关注,这不仅关系到居民的饮食健康,同时影响了我国贝类出口贸易。本文阐述的不同水产食品中重金属的脱除方法可以有效地解决贝类中的重金属超标问题,为解决我国食品重金属污染问题提供借鉴。其中螯合树脂法具有产业化的应用前景,将是未来研究的重点;而壳聚糖法因其来源广、无污染、易于改性等优势成为未来研究的热点,尤其是可再生利用的交联壳聚糖树脂将是重中之重。由于贝类重金属脱除过程中营养物质同时也被脱除,可以通过暂养过程中加入添加剂等方法降低营养物质的损失。另外,目前现有的脱除方法往往不能对于多种重金属进行同时脱除,如砷在食品中多以阴离子形式存在,用阳离子交换树脂无法进行脱除,因此多种方法协同脱除作用将是今后的研究重点。同时,国家应当重视沿海养殖区域的污染控制,加强法律监管力度,从源头抓起,为食品安全提供保障。

参考文献

- [1] Shuai JS, Wang L. Discussion about health impact of heavy metal and the countermeasure [J]. *Environ Exploit*, 2001, 16(4): 62-73.
- [2] Canli M, Fumess RW. Toxicity of heavy metals dissolved in seawater and influence of sex and size on metal accumulation and tissue distribution in the Norway lobster *Nephrops norvegicus* [J]. *Mar Eneiron Res*, 1993, 36(4): 217-236.
- [3] 张靓,王淑秋,谢琰,等. 辽河水系表层沉积物中重金属分布及污染特征研究[J]. *环境科学*, 2008, 29(9): 2413-2418.
Zhang J, Wang SQ, Xie Y, et al. Distribution and pollution character of heavy metals in the surface sediments of liao river[J]. *Environ Sci*, 2008, 29(9): 2413-2418.
- [4] 励建荣,徐辉. 海水双壳贝类的质量控制研究进展[J]. *食品科学*, 2005, 26(增刊 1): 128-134.
Li JR, Xu H. Advances in study on quality controlling of marine bivalve mollusks[J]. *Food Sci*, 2005, 26(suppl 1): 128-134.
- [5] 王美珍. 杭州湾南岸滩涂贝类养殖环境中污染物的调查[J]. *宁波大学学报*, 2005, 18(3): 323-328.
Wang MZ. A Study on contaminant residue of bethons in shellfish culture shoal of South bank in Hangzhou Bay[J]. *J Ningbo Univ*, 2005, 18(3): 323-328.
- [6] 阮金山. 厦门贝类养殖区海水、沉积物和养殖贝类体内重金属含量的初步研究[J]. *热带海洋学报*, 2008, 27(5): 47-54.

- Ruan JS. A preliminary study of heavy metal contents in sea water, sediments and cultured shellfish in shellfish culture areas of Xiamen[J]. *J Trop Oceanogr*, 2008, 27(5): 47-54.
- [7] 王许诺, 王增焕, 林钦, 等. 广东沿海贝类 4 种重金属含量分析和评价[J]. *南方水产*, 2008, 4(6): 83-87.
Wang XN, Wang ZH, Lin Q, *et al.* Analysis and assessment of the content of four heavy metals in shellfish along Guangdong coastal waters [J]. *South China Fish Sci*, 2008, 4(6): 83-87.
- [8] 张剑如, 叶金武, 徐立宏. 含镉废水处理研究进展[J]. *广东化工*, 2007, 34(2): 28-30.
Zhang JR, Ye JW, Xu LH. Progress of the research on the treatment of cadmium-contained wastewater [J]. *Guangdong Chem Ind*, 2007, 34(2): 28-30.
- [9] 刘发欣, 高怀友, 伍钧. 镉的食物链迁移及其污染防治对策研究[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(增刊 1): 805-809.
Liu FX, Gao HY, Wu J. Transfer of cadmium in food chain and its prevention and control from pollution [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2006, 25(suppl 1): 805-809.
- [10] 林海, 于晓波, 龚桦, 等. 海洋贝类摄取对人体重金属镉沉积的影响及绿藻、硒和锌干预性清排的机制[J]. *大连工业大学学报*, 2009, 28(2): 90-93.
Lin H, Yu XB, Gong H, *et al.* Investigations on heavy metal sedimentation of cadmium from marine shellfish and cadmium discharge by green algae, selenium and zinc[J]. *J Dalian Polytech Univ*, 2009, 28(2): 90-93.
- [11] 乔庆林, 蔡友琼, 等. 贝类净化技术研究和应用[J]. *现代渔业信息*, 2000, (15): 12.
Qiao QL, Cai YQ, *et al.* Research and application of shellfish purification technique[J]. *Mod Fish Inform*, 2000, (15): 12.
- [12] Wang WX, Nicholas SF. Effects of calcium and metabolic inhibitors on trace element uptake in two marine bivalves [J]. *J Exp Mar Biol Ecol*, 1999, 236(1): 149-164.
- [13] 孙继鹏, 汪东风, 李国云, 等. 壳寡糖钙、镁配合物对栉孔扇贝体内镉的脱除[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2010, 40(2): 33-37.
Sun JP, Wang DF, Li GY, *et al.* The removal of cadmium from *Chlamys ferrari* by chitosan oligosaccharide complexes with Ca and Mg [J]. *Periodical Ocean Univ China*, 2010, 40(2): 33-37.
- [14] 黄国清, 李志茹, 朱常龙, 等. 壳寡糖-金属配合物对太平洋牡蛎体内中 Cd 脱除效果的研究[J]. *中国食品学报*, 2012, 12(4): 121-125.
Huang GQ, Li ZR, Zhu CL, *et al.* Effect of chitosan oligosaccharide-metal complex on cadmium removal from oyster *Crassostrea gigas* [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2012, 12(4): 121-125.
- [15] 许梓荣, 夏枚生, 胡彩虹, 等. 降低畜禽、水产品重金属残留的纳米饲料添加剂制备方法[N]: 中国, CN02111101.4. 2002-10-2.
Xu ZR, Xia MS, Hu CH, *et al.* Preparation method of nanometer feed additives for reducing heavy metal residues in livestock and aquatic products[P]: China, CN02111101.4, 2002-10-2.
- [16] 李学鹏. 重金属在双壳贝类体内的生物富集动力学及净化技术的初步研究[D]. 浙江工商大学, 2008.
Li XP. Preliminary studies on the kinetics of bioconcentration and depuration of heavy metals in bivalves [D]. Zhejiang Gongshang University, 2008.
- [17] Hiraoka Y. Reduction of heavy metal content in Hiroshima Bay oysters (*Crassostrea gigas*) by purification [J]. *Environ Pollut*, 1991, (70): 209-217.
- [18] 杨小满, 戴文津, 孙恢礼. 海洋贝类酶解液重金属控制与脱除技术研究[J]. *海洋科学*, 2012, 36(3): 115-120.
Yang XM, Dai WJ, Sun HL. Heavy metal control and removal technology analysis in marine shellfish enzymatic hydrolysates[J]. *Mar Sci*, 2012, 36(3): 115-120.
- [19] Muzzarelli RAA. Carboxymethylated chitins and chitosans[J]. *Carbohydr Polym*, 1988, 8(1): 1-21.
- [20] 梁鹏, 吴晓萍, 徐慧, 等. 壳聚糖脱除牡蛎匀浆液中重金属镉的初步研究[J]. *食品工业科技*, 2010, 31(7): 107-109.
Liang P, Wu XP, Xu H, *et al.* Study on desorption of heavy metals of cadmium in oyster homogenate solution by chitosan[J]. *Sci Technol Food Ind*, 2010, 31(7): 107-109.
- [21] 戴志远, 梁辉. 用壳聚糖降低贻贝蒸煮液中重金属的方法[P]: 中国, CN200710066984.3, 2007-08-08.
Dai ZY, Liang H. Study on reducing content of heavy metal in mussels cooking liquid with chitosan [P]: China, CN200710066984.3, 2007-08-08.
- [22] 日本专利号 2006-42613 [P].
Japanese patent, 2006-42613 [P].
- [23] 张井. 北太平洋鱿鱼内脏酶解液中重金属镉的脱除研究[D]. 中国海洋大学, 2009.
Zhang J. Research of removing heavy metal cadmium in enzymatic hydrolysate liquid of *Todarodes pacificus*'s gut [D]. Ocean University of China, 2009.
- [24] Cheryan M. Phytic acid interactions in food system [J]. *Crit Rev Food Sci*, 1980, 13(4): 297-335.
- [25] Ekholm P, Virkki L, Ylinen M, *et al.* The effect of phytic acid and some nature chelating agents on the solubility of mineral elements in oat bran [J]. *Food Chem*, 2003, 80: 165-170.
- [26] 戴志远, 梁辉. 用植酸降低贻贝蒸煮液中重金属的方法[P]:

中国, 200710066983.9, 2007-08-08.

Dai ZY, Liang H. Study on reducing content of heavy metal in mussels cooking liquid with phytic acid [P]: China, CN200710066984.3, 2007-08-08.

- [27] Lu YJ, Subramanian KS, Chakrabarti CL, *et al.* Removal of trace cadmium(II) by edta-coated granular activated carbon [J]. *J Environ Sci Health A-Environ Sci Eng Toxic Hazard Subst Control*, 1993, A 28(1): 113-133.

(责任编辑: 佟丽)

作者简介



张双灵, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品质量与安全。

E-mail: zhshuanglicia@163.com



王世清, 博士, 教授, 主要研究方向为食品安全保藏。

E-mail: wangshiqing@126.com