

蔬菜重金属污染与防治研究综述

刘希元, 吴春燕*, 张广臣, 杨璐 (吉林农业大学园艺学院, 吉林长春 130118)

摘要 随着工业化和城市化的推进, 蔬菜也受到不同程度的污染, 其中包括重金属对蔬菜的污染。在前人研究的基础上, 总结了重金属对蔬菜生长发育影响的 4 个方面及富集规律, 从土壤和大气 2 个方面归纳重金属的来源, 进而提出 4 种缓解蔬菜重金属污染的措施, 为更好地治理农田重金属污染、进一步研究重金属在蔬菜作物中的分子机理等提供参考。

关键词 蔬菜; 重金属; 来源; 生理影响; 富集规律

中图分类号 X53 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2019)15-0010-03

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2019.15.003



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Study on Heavy Metal Pollution and Control of Vegetables

LIU Xi-yuan, WU Chun-yan, ZHANG Guang-chen et al (College of Horticulture, Jilin Agricultural University, Changchun, Jilin 130118)

Abstract With the advancement of industrialization and urbanization, vegetables are also polluted to different degrees, including heavy metal pollution of vegetables. Based on the previous studies, this paper summarized the four aspects of the effects of heavy metals on the growth and development of vegetables and their enrichment, and summarized the sources of heavy metals from soil and atmosphere, and then put forward four measures to alleviate heavy metal pollution in vegetables, in order to provide a reference for better controlling heavy metal pollution in farmland, further studying on the molecular mechanism of heavy metals in vegetable crops and other issues.

Key words Vegetables; Heavy metals; Source; Physiological effects; Enrichment law

近年来, 土壤重金属污染问题日益受到人们的关注, 重金属能富集在蔬菜中, 影响蔬菜生长发育, 导致其产量和品质降低, 最终危害人类健康。据 2014 年 4 月 17 日环保部和国土资源部联合发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示, 在所有受污染的调查点位中, 污染类型以无机型为主, 占全部超标点位的 82.8%, 其中镉、镍、砷位居前三位, 分别超标 7.0%、4.8%、2.7%, 此外铅、汞、铜、铬、锌等都有不同程度的超标。与其他土壤污染物相比, 重金属的性质稳定, 不会被微生物降解, 能通过食物链进入人体, 在人体内不会立即产生危害, 但经过一段时间的积累会对人体造成慢性损伤。

在各种农产品中, 蔬菜含有丰富的维生素和无机盐, 是人们日常饮食的必需品。由于蔬菜生产基地大多数在城市郊区选址, 这里同时也是工业“三废”和城市垃圾处理的集中地点, 导致蔬菜中重金属含量极易超标, 蔬菜的生长发育受到严重威胁, 品质下降。目前随着人民生活水平的提高, 消费者对无公害蔬菜的需求量也越来越高。笔者综述了蔬菜重金属的来源、对蔬菜生长发育的影响、蔬菜对重金属的富集规律以及相关修复措施, 旨在为解决蔬菜重金属污染的更好方法, 进一步研究重金属在蔬菜作物中的分子机理等提供参考。

1 蔬菜重金属污染的来源

1.1 土壤 土壤重金属污染主要来源于农田的污水灌溉, 塑料薄膜老化分解释放重金属离子, 有机肥的大量施用。我国是一个水资源相对匮乏的国家, 因而城市污水作为一种潜

在的可利用水资源在农业灌溉上广泛应用, 已成为重要水源之一。尤其随着工业化的加快, 污水灌溉面积也随之迅速扩大。由于我国污水处理技术较落后, 甚至部分污水未经处理直接用于灌溉, 污水中的重金属在土壤中逐渐积累, 进而影响蔬菜的生长。朱雪超等^[1]对保定市污水灌溉区蔬菜重金属污染进行评价, 结果显示, 10 种蔬菜中有 5 种蔬菜综合污染指数为 1.0~2.0, 属于轻度污染, 其中香菜和大白菜综合污染指数较大, 重金属元素中以镉污染程度最严重, 超标 75%^[1]。

随着设施农业的兴起, 大棚蔬菜种植面积不断提高, 塑料薄膜的使用也随之增多。农田塑料薄膜在塑料加工过程中采用的热稳定剂均是镉、铅化合物, 加之这种塑料薄膜稳定性差, 使用年限久, 在此过程中, 在自然因素和人为因素的共同作用下, 加速薄膜的老化分解, 通过土壤富集于蔬菜, 导致人食用后危害身体健康^[2]。

有机肥中重金属超标现象较普遍。黄绍文等^[3]对全国 20 个省市 126 份商品有机肥样品的重金属含量进行测定, 结果表明各种有机肥中, 以镉、铅、铬和砷超标为主, 镉的超标率最高, 达 20.0%。程旭艳等^[4]测定了我国 10 个地区 118 份有机肥样品的重金属含量, 按照我国重金属限量标准进行对比, 镉、铬、砷、铅的超标率分别为 3.39%、4.24%、13.56%、0.85%。

1.2 大气 工矿活动、交通运输等排入大气中的重金属一方面可通过沉降进入土壤, 造成土壤重金属污染, 另一方面蔬菜也可以通过叶片从空气中吸收重金属元素。倪玮怡^[5]对上海市宝山钢铁厂、吴泾化工厂附近的蔬菜生产基地的样品进行采样, 结果表明除铜和砷外, 青菜和杭白菜可食用部分重金属均有不同程度地超出国家食品安全标准值。汽车尾气中的污染元素主要是铅, 铅能抑制植物某些酶的活性, 从而影响光合作用、呼吸作用等生理过程。詹凤平等^[6]对

基金项目 国家重点研发计划项目(2017YFD0801104); 省、市、自治区科技项目“优质红辣椒集约化育苗与规范化种植技术示范与推广”(2017051)。

作者简介 刘希元(1994—), 男, 吉林白城人, 硕士研究生, 研究方向: 蔬菜生理生态及设施园艺。* 通信作者, 副教授, 硕士生导师, 从事设施农业科学与工程研究。

收稿日期 2019-03-12; 修回日期 2019-04-16

G209 国道凤凰县小溪桥路段两侧 35 m 以内的蔬菜进行铅含量的测定,发现其铅含量超出国家食品卫生标准,且比对照区蔬菜铅含量高 2.9~17.1 倍。

2 重金属对蔬菜生长发育的影响

2.1 影响蔬菜生长 当重金属含量超过蔬菜的最大忍耐剂量时,蔬菜生长受到明显的抑制。姜蒙^[7]研究了不同 Cd⁶⁺ 浓度下辣椒幼苗的生长状况,结果表明 0.20 g/kg 及以上处理的幼苗直接死亡,0.01 和 0.05 g/kg 浓度下辣椒生长旺盛,0.001 和 0.10 g/kg 浓度下辣椒长势与对照组基本一致,说明一定浓度的重金属会促进辣椒的生长,当超出限值时,对辣椒造成损害甚至死亡。不同重金属种类对蔬菜的毒害作用不同,镉处理下小白菜叶片出现发黄现象,并未出现萎蔫情况,而铅处理下小白菜的叶片形态与镉处理相反^[8]。

2.2 影响光合作用 重金属主要从破坏叶绿素的结构、使光合色素含量下降以及降低光合作用相关酶活性 3 个方面影响光合速率。重金属通过使叶绿体膨大、类囊体排列顺序改变从而破坏叶绿体膜系统。刘传娟^[9]测定了镉对 7 种蔬菜叶绿素的影响,随着镉浓度的变化,叶绿素含量也随之发生变化,其中 10.0 mg/L 浓度下,小白菜、豇豆的叶绿素含量分别比对照组低 35.30%、58.70%。Mobin 等^[10]研究发现镉会抑制叶绿素和胡萝卜素的合成。铅与镁、锌等性质相似,容易取代镁、锌从而抑制与叶绿素合成相关酶的活性,如 Rubisco 酶在卡尔文循环中起到固定二氧化碳的作用,而铅会降低 Rubisco 酶活性从而影响光合作用^[11]。

2.3 影响抗氧化酶系统 自由基是植物体正常代谢产物,过量的重金属会导致自由基在植物体内大量积累,扰乱植物生理代谢过程。超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)等构成了保护酶系统。经过大量试验证明,受到重金属胁迫时,SOD、POD、CAT 活性总体表现为先升高后降低的趋势。但这 3 种酶对重金属的敏感度不同,韩承华^[12]研究发现豆瓣菜中 SOD 和 POD 活性最大时铅浓度为 150 mg/L,CAT 活性最大时铅浓度为 200 mg/L。随着铅浓度继续增加,3 种抗氧化酶活性均显著下降^[12]。

2.4 影响蔬菜根系微生物活力 土壤微生物具有降解、转化环境污染的能力,但重金属会抑制土壤微生物群落的分布、活性甚至改变生物的遗传特性,从而影响土壤功能。这也与土壤类型、重金属浓度、种类有关^[13]。张涪平等^[14]研究发现,随着土壤重金属含量的增加,土壤微生物量 C、N 和 P、可矿化 N 均逐渐降低,矿区中心污染土壤微生物生物量碳降低至对照土壤的 72%。梁伊等^[15]用镉+清水处理小白菜、萝卜和辣椒的根系土壤,通过对土壤 PLFA 主成分分析发现,微生物群落结构总变异率为 67.82%,尤其对萝卜根际土壤微生物群落结构影响最大。

3 蔬菜重金属富集规律

不同种类蔬菜对不同重金属的富集能力有差异。研究表明,重金属在蔬菜中的含量由高到低依次为叶菜类、根茎类、瓜果类。镉、铜、锌、铅是常见的重金属元素,杨梦昕等^[16]研究发现,镉在 3 类蔬菜中富集系数与锌、铜相当,铅在 3 类

蔬菜中富集系数最低,说明在土壤-蔬菜系统中,镉、锌、铜的移动性大于铅。贾丽等^[17]对大蒜、菠菜、茼蒿、大葱、马铃薯、黄瓜这 6 种蔬菜的重金属富集能力进行分析,发现菠菜和马铃薯富集系数较大,黄瓜最不容易积累重金属。蔬菜对各重金属元素吸收表现为锌>镉>铅>铜>铬。

同种蔬菜的不同品种对重金属的富集能力有所不同。研究不同品种蔬菜对重金属的积累吸收差异有助于从中筛选出低积累品种。井彩巧^[18]将 38 份大白菜品种种植在含镉、铅的土壤中,进行品种对比试验,结果表明,丰源 2 号对镉、铅的吸收量分别为 0.0487、0.0273 mg/kg,而裕日强力对镉、铅的吸收量分别为 0.038 7、0.059 0 mg/kg,38 种白菜经过差异显著性分析可以划分为高富集品种类群和低富集品种类群。狄广娟^[19]对 4 个水芹品种进行试验,发现水芹易受镉的污染,其中无锡水芹镉积累、富集系数最大,扬州白芹最小。

蔬菜的不同器官对重金属的富集量也有差异,总体而言,蔬菜地下部分重金属含量高于地上部分,因为重金属主要存在土壤中,蔬菜先通过根系吸收营养物质,故重金属先在根部积累,再运往地上部。吴琦等^[20]研究了 2 种土壤条件下蔬菜对铅和镉的累积特征,发现蔬菜茎中的累积量显著高于叶,其中茎中的铅平均含量分别是叶的 3.86、2.02 倍,镉平均含量分别是叶的 3.58、4.73 倍。李海华等^[21]对马铃薯、萝卜、大白菜、番茄、茄子 5 种蔬菜各个器官镉的积累量进行测量,结果表明根中含镉最高的是马铃薯、番茄、大白菜,然后依次为茎、绿叶、块茎、果实等器官。萝卜和茄子茎和绿叶中镉含量最高,其次是根。

4 农田重金属污染修复措施及修复实例

2017 年 7 月,全国人大常委会首次审议的《土壤污染防治法(草案)》明确指出,须对污染农田土壤进行风险评估和修复治理示范。治理农田重金属污染从根本上而言,需要人们提高意识,必须从源头上断绝重金属流入农田。从原理而言,概括为两方面:一是改变重金属在土壤中的存在形式或者与土壤相结合方式,二是将重金属与土壤分离。实际上农田重金属污染的修复十分具有挑战性,因为一般情况是由 2 种或 2 种以上的重金属复合污染,它们之间可能存在协同作用以及对生态效应的综合影响。治理大面积的农田重金属污染往往需要多种措施共同实施,以安徽省阜阳市临泉县耕地为例,该地区共有 130.27 hm² 不同程度受污染的农田和 4 980 m³ 重污染河道淤泥,经过多次试验论证,最终选定“农田钝化+农艺调节+固化稳定化+河道生态治理”的修复技术路线。

4.1 农田重金属污染修复措施 近年来,我国农田重金属污染修复措施不断完善,可以归纳为物理修复、化学修复、生物修复和农业生态修复四大类。较成熟的物理修复方法有客土、深耕翻土、热解吸、电动修复、玻璃化技术等。此类方法虽实施简便,周期短,但工程量大,成本高^[22]。使用较成熟的化学修复有化学淋洗、钝化技术。其中钝化技术成本低,操作简便,能使重金属向低毒形态转化,是当前治理我国

重金属污染农田较好的方法之一^[23]。钝化剂主要包括黏土矿物、含磷物质、有机物质等^[24]。黄雅曦等^[25]研究了沸石和草炭对重金属离子的吸附特性,结果表明,随着重金属浓度的增加,钝化剂对重金属离子的吸附量越多。殷飞等^[26]用钢渣、木炭、磷矿粉和坡缕石4种钝化剂对土壤重金属的生物有效性进行转化,结果表明20%的添加浓度下,能使土壤中铅、镉、铜、锌、砷5种重金属生物有效性降低。

较成熟的生物修复方法主要包括植物修复和微生物修复,其中植物修复是一种新兴高效、绿色廉价的修复途径。佟秀春等^[27]的盆栽试验结果表明,龙葵对于镉和铅具有超富集作用。乔云蕾^[28]研究发现黑麦草对高浓度镉污染土壤具有较强的富集作用。刘冉等^[29]以淡水养殖基地为试验地点,发现混生的美人蕉、鸢尾、芦苇和再力花对不同元素富集具有明显的互补性,混合种植能够对污水进行修复。但植物修复技术仍存在缺点,如有些富集植物只有在适宜的环境条件下才能生长,必须进行品种的改良^[30],因此植物修复技术研究的重心逐渐由发现和筛选超富集植物向提高其修复效率转变^[31]。金羽等^[32]研究了耐铅产碱菌(*Alcaligenes* sp.)联合蜈蚣草对铅污染土壤的修复,结果发现,在土壤中铅含量为600 mg/kg时,接种组(蜈蚣草+菌液)对铅的吸收较对照组(蜈蚣草+无菌水)提高93.4%,接种组蜈蚣草叶绿素含量比对照组蜈蚣草叶绿素含量少下降0.16 mg/kg,且接种组的下降趋势也较平缓,接种耐铅产碱菌能够明显降低铅对土壤过氧化氢酶、磷酸酶及转化酶活性的影响。

农业生态修复主要是合理施用肥料和选择适宜的种植模式。生俊丹^[33]以岷江下游普遍种植的4种植植模式为研究对象,4种模式土壤中的铅、锌、镉污染均有一定程度的降低,且不同模式作物组成的不同也影响重金属变化特征,其中以模式M₁(玉米+生姜-小白菜,“+”表示间作,“-”表示轮作)中镉降幅最大为39.72%,模式M₄(生姜-葱-莴笋)中铅降幅最大为33.94%。鲁洪娟^[34]研究发现适量有机肥与化肥配合施用能防止微量元素铜的亏缺,同时又不会对蔬菜重金属积累产生显著影响,是一种可持续发展的有效措施。

4.2 农田重金属污染修复实例 广东省粤北某镇,由于是电子垃圾处理集中地,当地农田受铜、镉、砷等重金属的严重污染,经过分析后采用表层土壤淋洗、深耕翻土、植物修复、钝化处理等技术联合治理,目前产出的蔬菜已经符合国家食品安全卫生标准^[35]。在加拿大的Sudbury市,受当地工矿活动的影响,30 hm²的土壤受到重金属污染,通过添加生石灰和有机肥使该地区植被得以恢复^[36]。位于西班牙Guadamar河附近的一块污染土壤,Madejón等^[37]进行了6年的生物固体堆肥、风化褐煤和糖酸盐等改良剂的大田试验,发现其中一些改良剂可显著降低土壤中重金属生物活性。

5 小结与展望

重金属对蔬菜作物的生理生化反应及相关酶活性等都有影响,但不是仅有抑制作用,一般在低浓度时有促进作用,浓度升高才逐渐显现出抑制作用,如叶绿素含量、根际微生物活性、抗氧化酶的活性等。蔬菜作物种类繁多、品种各异,

不同作物对重金属的吸收和积累在种间和品种间均存在显著差异,不同离子间可能存在协同作用或拮抗作用。因此,要想准确地测定重金属对蔬菜作物各方面影响的临界值,还需进一步系统研究。目前关于蔬菜重金属吸收和富集规律的研究虽然取得了一定的进展,但至今对其生理和分子机制仍处于探索阶段,还需要在分子层面进一步研究。

治理蔬菜重金属污染是一项复杂的工作,需要考虑多方面的因素。如土壤虽然是蔬菜吸收重金属的主要来源之一,但两者之间无显著相关关系,蔬菜从土壤中吸收重金属还取决于其他因素,如土壤重金属的生物有效性,植物生长状况,重金属在植物体内的分配和植物吸收重金属的基因型差异等。目前蔬菜重金属污染主要来源于人类活动,而人类活动是可以自我控制的。人们想要获得更高品质的蔬菜,需要考虑方方面面的细节,如在菜地的选址上,根据以往人们的经验尽量远离公路两侧,而实际上从公路上飘浮出来的粉尘并不是由近及远浓度逐渐减小的^[38]。此外,执行严格污水处理制度,及时清除残留在土壤中的薄膜;科学合理施用肥料及农药等这些常规措施,都有值得进一步考虑的细节。在未来,如何在合理利用污水/污泥/垃圾等废弃物的同时,有效降低其环境风险,是农业环境保护研究领域的重要课题。

参考文献

- [1] 朱雪超,刘淑芳,侯冬利,等.保定市郊灌溉水质分析及灌区蔬菜质量评价[J].河北农业大学学报,2012,35(5):72-76.
- [2] 侯凤岩.农用残膜污染现状及治理措施[J].农业科技与装备,2009(2):108-109.
- [3] 黄绍文,唐继伟,李春花.我国商品有机肥和有机废弃物中重金属、养分和盐分状况[J].植物营养与肥料学报,2017,23(1):162-173.
- [4] 程旭艳,王定美,乔玉辉,等.中国商品有机肥重金属分析[J].环境污染与防治,2012,34(2):72-76.
- [5] 倪玮怡.上海市郊土壤-蔬菜系统中重金属来源及贡献研究[D].上海:华东师范大学,2016.
- [6] 詹凤平,江映翔,李明.汽车尾气中铅在沿路蔬菜中的富集和分布研究[J].能源与环境,2007(3):70-72.
- [7] 姜蒙.重金属Cu⁶⁷对辣椒生长和根围土壤细菌群落的影响研究[D].上海:华东理工大学,2014.
- [8] 郑琳.典型重金属对常见叶菜的生长影响及迁移特点研究[D].武汉:武汉工程大学,2016.
- [9] 刘传娟.不同种类蔬菜幼苗对镉(Cd)的敏感性研究[D].北京:中国农业科学院,2009.
- [10] MOBIN M, KHAN N A. Photosynthetic activity, pigment composition and antioxidative response of two mustard (*Brassica juncea*) cultivars differing in Photosynthetic capacity subjected to cadmium stress [J]. Journal of plant physiology, 2007, 164(5): 601-610.
- [11] RODRIGUEZ E, SANTOS C, AZEVEDO R, et al. Chromium (VI) induces toxicity at different photosynthetic levels in pea [J]. Plant physiology and biochemistry, 2012, 53: 94-100.
- [12] 韩承华. Cd, Pb, Cu, Zn 对3种水生叶菜生长的影响以及 Se 缓解效果的研究[D].扬州:扬州大学,2017.
- [13] 胥正钢,赵运林,周晓梅,等.重金属污染对土壤微生物影响的研究进展[J].江西农业学报,2014,26(4):53-55,60.
- [14] 张涪平,曹贵贵,李苹,等.藏中矿区重金属污染对土壤微生物学特性的影响[J].农业环境科学学报,2010,29(4):698-704.
- [15] 梁伊,施宠,李萍,等.重金属Cd对蔬菜根际土壤微生物群落的影响[J].北方园艺,2017(20):129-135.
- [16] 杨梦昕,杨东璇,李萌立,等.湘江长沙段沿岸常见农作物重金属污染研究——Zn, Cu, Pb 和 Cd 的富集规律及污染评价[J].中南林业科技大学学报,2015,35(1):126-131.
- [17] 贾丽,姜爱霞,王兆军,等.济南市石灰性菜地土壤和蔬菜重金属含量特征及健康风险评价[J].土壤通报,2015,46(3):733-738.

(下转第17页)

- [14] DAMANIA P, PATEL R, SHAW R, et al. Development of antimicrobial packaging materials for food preservation using bacteriocin from *Lactobacillus casei*[J]. *Microbiology research*, 2016, 7(1): 19-22.
- [15] 鲍俊旺. 对虾多酚氧化酶的性质分析及一种复配保鲜剂的研发[D]. 厦门:集美大学, 2015.
- [16] 张昭其, 庞学群, 段学武, 等. 荔枝采后果皮花色苷的降解与花色苷酶活性变化[J]. *中国农业科学*, 2003, 36(8): 945-949.
- [17] VENKATACHALAM K, MEENUNE M. Changes in physiochemical quality and browning related enzyme activity of longkong fruit during four different weeks of on-tree maturation[J]. *Food chemistry*, 2012, 131(4): 1437-1442.
- [18] 段希宇, 叶陵, 刘成国, 等. 乳酸菌的抗氧化作用机制[J]. *微生物学杂志*, 2017, 37(3): 111-115.
- [19] 李柳水, 刘巧瑜, 陈海光, 等. 天然保鲜剂的研究进展[J]. *广州化工*, 2018, 46(15): 32-34.
- [20] DOU L X, LI B F, ZHANG K, et al. Physical properties and antioxidant activity of gelatin-sodium alginate edible films with tea polyphenols[J]. *International journal of biological macromolecules*, 2018, 118(PartB): 1377-1383.
- [21] XING Y G, XU Q L, YANG S X, et al. Preservation mechanism of chitosan-based coating with cinnamon oil for fruits storage based on sensor data[J]. *Sensors*, 2016, 16(7): 1-23.
- [22] 曹叶中. 微生物保鲜剂和蒸汽杀青技术提高绿茶保鲜作用的研究[D]. 南京:南京农业大学, 2006.
- [23] ASHRAFI A, JOKAR M, NAFCHI A M. Preparation and characterization of biocomposite film based on chitosan and kombucha tea as active food packaging[J]. *International journal of biological macromolecules*, 2018, 108: 444-454.
- [24] 陈柏, 颜敏华, 吴小华, 等. 5种保鲜剂对低温贮藏去青皮核桃感官品质的影响[J]. *甘肃农业科技*, 2018(6): 40-44.
- [25] 唐先谱, 李喜宏, 张彪, 等. 复合保鲜剂对鲜切苹果贮藏品质影响的研究[J]. *中国食品添加剂*, 2018(2): 138-143.
- [26] 潘承慧, 姚智颖, 朱雯雯, 等. 保鲜剂对冰鲜南美白对虾品质变化的影响研究[J]. *食品工业*, 2018, 39(4): 12-16.
- [27] 王梅, 徐俐, 王美芬, 等. 复合保鲜剂对鲜切山药保鲜效果的影响[J]. *食品与机械*, 2017, 33(5): 134-140.
- [28] 张莉会, 乔宇, 陈学玲, 等. 不同保鲜剂对桑葚贮藏期间品质的影响[J]. *现代食品科技*, 2018, 34(5): 47-55.
- [29] 范林林, 李萌萌, 冯叙桥, 等. 壳聚糖涂膜对鲜切苹果贮藏品质的影响[J]. *食品科学*, 2014, 35(22): 350-355.
- [30] SATHIVEL S, LIU Q, HUANG J Q, et al. The influence of chitosan glazing on the quality of skinless pink salmon (*Oncorhynchus gorbusha*) fillets during frozen storage[J]. *Journal of food engineering*, 2007, 83(3): 366-373.
- [31] 郑贺云, 张翠环, 耿新丽, 等. 果蔬天然保鲜剂研究进展[J]. *黑龙江农业科学*, 2018(7): 158-162.
- [32] 冯作山, 郑杰, 罗红霞, 等. 鲜肉保鲜剂的急性毒性试验研究[J]. *食品科学*, 2006, 27(3): 207-209.
- [33] 张茜, 李洋, 王磊明, 等. 生物保鲜剂在果蔬保鲜中的应用研究进展[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(6): 308-316.
- [34] 赵华. 溶菌酶在肉制品保鲜中的应用[J]. *肉类研究*, 2010(7): 31-35.
- [35] 胡晓亮, 沈建, 陈庆余. 对虾天然保鲜剂的研究进展[J]. *核农学报*, 2012, 26(9): 1284-1289.
- [36] 崔欣悦, 任虹, 安磊. 植物源保鲜剂的研究进展[J]. *中国调味品*, 2014, 39(9): 138-140.
- [37] 孙志青, 黄胜阳. 天然食品保鲜剂研究进展[J]. *智慧健康*, 2017, 3(6): 24-26.
- [38] 赖小龙, 李文平, 廖鹏运, 等. 生物源食品保鲜剂研究进展[J]. *食品与发酵科技*, 2013, 49(1): 79-84.
- [39] 王良玉, 郑朕, 熊波, 等. 几种新型食品保鲜技术的研究进展[J]. *农产品加工*, 2011(7): 134-136, 140.
- [40] 李文娟, 陈炼红. 新型可食性涂膜剂在鸡蛋保鲜技术中的应用[J]. *安徽农业科学*, 2014, 42(14): 4432-4435.
- [41] 朱海佩. 新型食品贮藏保鲜技术研究[J]. *现代食品*, 2017(5): 82-84.
- [42] 天然保鲜剂——茶多酚[J]. *企业技术开发*, 1994(1): 4.
- [43] 贝壳渣——一种新的食物保鲜剂[J]. *食品与发酵工业*, 2001, 27(12): 54.
- [44] 骆卢佳, 陈凌, 施昕磊, 等. 可食性复合膜在水蜜桃保鲜中的应用研究[J]. *轻工科技*, 2018, 34(5): 32-34, 96.

(上接第12页)

- [18] 井彩巧. 不同基因型大白菜镉和铅含量差异研究[J]. *园艺学报*, 2006, 33(2): 402-404.
- [19] 狄广娟. 水分管理对四个水芹品种吸收积累镉的影响[D]. 南京:南京林业大学, 2013.
- [20] 吴琦, 杨菲, 季辉, 等. 土壤重金属Pb和Cd在蔬菜中的累积特征及产地环境安全临界值[J]. *中国蔬菜*, 2010(10): 29-34.
- [21] 李海华, 刘建武, 李树人, 等. 土壤-植物系统中重金属污染及作物富集研究进展[J]. *河南农业大学学报*, 2000, 34(1): 30-34.
- [22] 刘刊, 王波, 权俊娇, 等. 土壤重金属污染修复研究进展[J]. *北方园艺*, 2012(22): 189-194.
- [23] 苏彬彬. 改良剂对重金属污染土壤的稳定化修复效果及健康风险评估[D]. 淮南:安徽理工大学, 2016.
- [24] 李剑睿, 徐应明, 林大松, 等. 农田重金属污染原位钝化修复研究进展[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(4): 721-728.
- [25] 黄雅曦, 李季, 李国学, 等. 钝化剂对重金属的吸附及其吸附机理的研究[J]. *东北农业大学学报*, 2008, 39(8): 53-58.
- [26] 殷飞, 王海娟, 李燕燕, 等. 不同钝化剂对重金属复合污染土壤的修复效应研究[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(3): 438-448.
- [27] 佟秀春, 王旭梅, 王红旗, 等. 可降解螯合剂及微生物强化植物吸收重金属的研究[J]. *东北农业大学学报*, 2011, 42(8): 101-107.
- [28] 乔云蕾. 几种植物对土壤重金属镉、铬污染的修复潜力研究[D]. 金华:浙江师范大学, 2016.
- [29] 刘冉, 甘淳丹, 赵海燕, 等. 四种大型湿地植物对水产养殖废水中矿质元素和重金属富集特征的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2017, 40(5): 859-866.
- [30] 邢艳帅, 乔冬梅, 朱桂芬, 等. 土壤重金属污染及植物修复技术研究进展[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(17): 208-214.
- [31] 廖晓勇, 陈同斌, 阎秀兰, 等. 提高植物修复效率的技术途径与强化措施[J]. *环境科学学报*, 2007, 27(6): 881-893.
- [32] 金羽, 曲娟娟, 朱超, 等. 一株产碱菌联合蜈蚣草对Pb污染土壤的生物修复[J]. *东北农业大学学报*, 2013, 44(8): 43-47.
- [33] 生俊丹. 不同种植模式对岷江下游重金属污染农业土壤生态修复效益评价[D]. 雅安:四川农业大学, 2012.
- [34] 鲁洪娟. 肥料管理对土壤-作物系统养分和重金属平衡的影响[D]. 杭州:浙江大学, 2010.
- [35] 李康敏, 罗娟, 李明枢. 农田土壤重金属修复技术应用实例[J]. *中国环保产业*, 2016(6): 24-25.
- [36] MADEJÓN P, PÉREZ-DE-MORA A, BURGOS P, et al. Do amended, polluted soils require re-treatment for sustainable risk reduction? Evidence from field experiments[J]. *Geoderma*, 2010, 159: 174-181.
- [37] WINTERHADLER K. Environmental degradation and rehabilitation of the landscape around Sudbury, a major mining and smelting area[J]. *Environ Rev*, 1996, 4(3): 185-224.
- [38] 赵彩凤. 西安周边高速公路两侧表层土壤重金属污染研究[D]. 西安:陕西师范大学, 2013.