

叶菜重金属污染风险评估与预防修复 关键技术研究现状及展望

张舜¹, 陈焕丽¹, 马丽², 王芳³, 张鹤¹, 杨海龙¹, 张晓炎¹, 刘程宏¹

(1. 郑州市农业科技研究院 郑州 450015; 2. 商丘师范学院生物与食品学院 河南商丘 476000;
3. 滕州市农业技术推广中心 山东滕州 277599)

摘要: 重金属污染主要来自于大气沉降、农业污染、工业污染等, 与其他蔬菜种类相比, 叶菜对重金属的吸收富集量较高, 研究叶菜对重金属的吸收、累积、富集规律, 提出叶菜重金属污染预防与修复措施对降低叶菜重金属污染风险具有重要意义。国内外对叶菜重金属点源污染的研究较多, 而对面源污染的研究较少, 且对叶菜重金属影响人体健康的评估研究不成熟。查阅分析了国内外主要蔬菜与叶菜重金属污染文献, 比较不同种类蔬菜重金属污染情况, 发现叶菜重金属污染最严重, 不同种类叶菜重金属污染情况差别较大。针对叶菜重金属污染存在的问题, 建议选择重金属污染较轻的耕地种植, 并进一步研究露地与设施叶菜重金属污染规律, 通过选择适宜的叶菜品种, 并采取适当的栽培技术, 以减少叶菜重金属污染物含量, 为降低叶菜重金属污染风险提供依据。

关键词: 叶菜; 重金属; 污染; 预防; 修复技术

中图分类号: S636

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2025)07-017-08

Research status and prospect on risk assessment and key technologies for the prevention and remediation of heavy metal pollution in leafy vegetables

ZHANG Shun¹, CHEN Huanli¹, MA Li², WANG Fang³, ZHANG He¹, YANG Hailong¹, ZHANG Xiaoyan¹, LIU Chenghong¹

(1. Zhengzhou Agricultural Science and Technology Research Institute, Zhengzhou 450015, Henan, China; 2. College of Biology and Food Science, Shangqiu Normal University, Shangqiu 476000, Henan, China; 3. Tengzhou Agricultural Technology Extension Center, Tengzhou 277599, Shandong, China)

Abstract: Demonstrate significant heavy metal contamination risks predominantly from atmospheric sedimentation, agrochemical applications, and industrial pollution, etc. Compared with other vegetable taxa, leafy vegetables have a significantly elevated bio-accumulation of heavy metals. It is crucial for reducing such contamination risks to elucidating the absorption, accumulation, and enrichment patterns of heavy metals in leafy vegetables, coupled with developing targeted phytoremediation strategies against contamination. While extensive research has been conducted across global agricultural systems on point-source heavy metal contamination in leafy vegetables, investigations into non-point source pollution mechanisms and associated human health risk assessments remain significantly understudied. A comprehensive review and analysis of the literature on heavy metal pollution in major vegetables and leafy vegetables, both domestic and international was conducted. The heavy metal pollution situations of different vegetable types were compared. It was revealed that leafy vegetables were subject to the most severe heavy metal pollution, and there were marked inter-species divergence in heavy metal pollution among different kinds of leafy vegetables. To address heavy metal contamination in leafy vegetables, strategic cultivation in low-contamination farmlands is advised. Research should prioritize elucidating contamination dynamics in open-field versus facility-grown systems, while concurrently selecting low-accumulation cultivars and implementing tailored agronomic practices. This integrated approach effectively reduces contaminant levels and establishes a scientific framework for risk mitigation.

Key words: Leafy vegetable; Heavy metal; Pollution; Prevention; Repair technology

收稿日期: 2025-02-13; 修回日期: 2025-04-16

基金项目: 郑州市劳模和工匠人才创新工作室; 2024年度郑州市科技惠民计划项目(2024KJHM0042)

作者简介: 张舜, 男, 高级农经师, 研究方向为蔬菜栽培技术及农业经济。E-mail: 411173996@qq.com

通信作者: 陈焕丽, 女, 副研究员, 主要从事蔬菜育种、栽培技术研究及示范推广工作。E-mail: chl200808@126.com

随着城镇化与工业化的迅速发展,土壤环境、水环境、大气环境重金属污染时有发生,重金属污染物从环境进入蔬菜各器官,降低了蔬菜的品质^[1-2]。耕地质量、灌溉水质量、空气质量与蔬菜安全生产关系密切,蔬菜安全生产已经引起了社会各界的高度关注^[3-4]。重金属污染源有工业生产污染、农业生产污染、车辆尾气污染、生活垃圾渗出生物污染等^[5-6]。大气沉降的重金属不但污染蔬菜叶片,也污染菜地土壤与地下水,土壤中的重金属经由根系被蔬菜吸收^[7]。蔬菜从大气沉降、土壤与浅层地下水吸收积累重金属物质后进入食物链,在人体中逐渐积累,危害人类健康,因此探明叶菜重金属污染规律,对降低叶菜重金属污染风险具有重要意义。

蔬菜是主要菜篮子产品之一,叶菜产量占我国蔬菜主产区蔬菜总产量的32%左右。蔬菜对重金属元素的吸收、迁移、富集等是农业环境生态研究的热点之一^[8-9],叶菜重金属污染主要来自于大气交通污染、农业污染、工业污染等,与其他蔬菜种类相比,叶菜对重金属的吸收富集敏感性比其他类别蔬菜更高^[10]。研究叶菜对重金属吸收、累积、富集机制,对降低叶菜重金属污染风险、生产优质叶菜具有重要的现实意义。笔者旨在深入探讨叶菜重金属污染状况与叶菜重金属污染健康风险评估,提出菜地重金属污染预防措施与菜地污染后的修复技术,并对叶菜重金属污染防治存在的问题及对策进行探讨,同时对叶菜重金属污染风险评估与预防修复技术研究进行了展望。

1 菜地重金属污染

1.1 重金属污染物种类及其危害

重金属是指化学密度大于 $4.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的金属,包括 Hg、Pb、Cd、Cr、Zn、Cu、Ni、Mn 等^[11],由于 As 的化学性质、对环境的危害和重金属类似,因此通常被列入重金属。重金属共有 45 种,其中 Cd、Hg、Pb、Cr、As 含量是评估农产品质量安全的首要重金属污染指标^[12-13]。进入土壤的重金属会降低叶菜品质,影响菜地各类土壤生物的繁殖与代谢,并沿食物链转移,在人体中富集,对人体健康产生不良影响^[14-16]。叶菜中重金属主要来自于大气干湿沉降和土壤中重金属的积累、转移与转化。菜地重金属污染特点是多种重金属复合污染,污染持续时间长、隐蔽、范围广,无法被生物降解,有的重金属虽然可以被蔬菜吸收转化,但会导致蔬菜生理功能紊乱、营养失调,有的可在蔬菜器官中富集,也可能转化为毒害性更大的甲基化合物^[17-18]。主要重金属污染物种类及其危害详见表 1。

1.2 重金属污染源

叶菜类蔬菜中的重金属污染来源广泛,包括交通污染、农业污染、工业污染和生活垃圾污染等(表 2)。

1.2.1 交通污染 交通污染是由汽车尾气中所含的重金属沉降造成的,汽车尾气中含有 Pb、Cu、Zn 等,这些重金属随风飘落进入道路两侧菜地,造成重金属污染,距离道路较远的菜地土壤重金属污染相对较轻,据测算,大气沉降的影响范围为 10~110 km,

表 1 菜地主要重金属污染物种类及其危害

Table 1 Types and hazards of main heavy metal pollutants in vegetable fields

重金属种类 Type of heavy metal	对人体的危害 Hazard to human health
Pb	摄入人体的 Pb,90% 存在于骨骼中,10% 则随着血液流动至人体各器官,进而对人的红细胞、脑、肾以及神经系统功能产生不良影响 Ninety percent of lead which was ingested into the human body can be accumulated in the skeletal system, while the remaining 10% of lead are circulated through the bloodstream to various organ systems. This distribution pattern adversely impacts erythrocyte functionality, cerebral and renal physiology, as well as neurological performance
Hg	Hg 是一种非常危险的重金属元素,含有 Hg 的废水会严重污染环境,并对人体健康造成不可逆的损害 Mercury is a highly dangerous heavy metal element. Mercury in wastewater containing can severely pollute the environment and cause irreversible harm to human health
Cd	Cd 化物可经呼吸被肝或肾脏吸收并造成危害,还可造成骨质疏松与软化 Cadmium compounds can be absorbed by the liver or kidneys through respiration and potentially can cause harm to people, including osteoporosis and softening
Cr	过量的 Cr 将严重破坏土壤结构,对人体健康造成极大的威胁 The excessive chromium will seriously damage soil structure and pose a great threat to human health
As	长期接触 As 将导致神经衰弱、皮肤损伤,大量接触 As 将引起急性 As 中毒,出现胃肠与呼吸紊乱等现象 Long-term exposure to arsenic can lead to neurasthenia and skin damage, whereas excessive exposure may cause acute arsenic poisoning as well as gastrointestinal and respiratory disorders

表2 重金属污染源
Table 2 Pollution sources of heavy metal

污染源 Pollution source	重金属污染方式 Mode of heavy metal pollution	重金属污染物种类 Type of heavy metal pollutant
交通污染 Traffic pollution	汽车尾气中所含的重金属沉降可造成菜地污染 The deposition of heavy metals from car exhaust can cause pollution in vegetable fields	Pb、Cu、Zn
农业污染 Agriculture pollution	化肥与化学农药中含有一定数量的重金属元素,大量使用会导致菜地土壤重金属污染 Fertilizers and chemical pesticides contain certain amounts of heavy metal elements, and their excessive use can result in heavy metal pollution of vegetable soil	Cd、Cr、Pb、Hg、As、Cu、Zn
工业污染 Industry pollution	工业三废中的重金属及其化合物未经处理,进入菜地可造成重金属污染 Untreated heavy metals and their compounds in industrial waste can lead to heavy metal pollution when they enter vegetable fields	Pb、Hg、Cd、Cr
生活垃圾污染 Domestic garbage pollution	废弃的旧电池、破碎的灯管、残留的化妆品、彩釉旧碗碟等都含有少量的重金属,生活垃圾中的重金属在雨水淋洗后进入菜地可造成重金属污染 Abandoned old batteries, broken light tubes, residual cosmetics, glazed old dishes, and other items all contain small amounts of heavy metals. When these heavy metals from household waste are washed into vegetable fields by rainwater, they can cause heavy metal pollution	Cd、Hg、Cu、Pb、Cr、Zn

菜地中 As、Hg、Pb、Ni 主要来自交通污染,交通运输对重金属污染的贡献率约为 39.26%^[19-20]。

1.2.2 农业污染 过量使用化肥和化学农药会造成土壤重金属污染,质量较低劣的磷肥,包括过磷酸钙、磷矿粉常常含有一定数量的 As、Cd,过量施用这些肥料会造成这 2 种重金属在菜地土壤中的积累,在某些地区,施用化肥是造成菜地土壤中 Cd 污染的主要途径之一。此外,一些有机肥中含有较多的 Cu、Zn,菜地大量施用有机肥会提高土壤中 Cu、Zn 含量。化学农药中含有 Cr、Cd、Pb、Hg、Cu、Zn 等,过量使用存在污染隐患,我国农药每年使用量达 13 万 t,为全世界平均水平的 2.5 倍,农药的实际利用率不到 30%,其余 70%以上均作为污染物排放到环境,未被利用的农药中的重金属将污染菜地土壤,因此菜地过量使用化肥、普通有机肥料与农药也是菜地重金属污染物的重要来源,农业生产污染重金属综合贡献率约为 17.23%^[21]。

1.2.3 工业污染 在工业生产中,废渣、废水、废气中的重金属及其化合物未经处理,进入附近菜地将造成重金属污染。在金属采矿及冶炼过程中产生的废弃物含有类别较多的重金属,并且含量较高,采矿废弃物未经处理直接排放,将造成比较严重的重金属污染。工业废水中含有的重金属主要有 Pb、Hg、Cd、Cr 等,这些重金属对生物体的毒性较强,微量的重金属即可对蔬菜生态系统造成严重危害,工业污染对重金属污染的贡献率约为 43.51%^[22]。

1.2.4 生活垃圾污染 城乡生活垃圾中的废电池、碎灯管、残留化妆品、彩釉旧碗碟等都含有一定数量的重金属污染物,在降水后,其中的重金属将随雨水进入土壤或地下水,对地表水或地下水造成重

金属污染,如果用重金属污染的地下水灌溉菜地,将造成菜地重金属污染。生活垃圾中所含的 Cd 与 Hg 对蔬菜的危害最大,重金属生态风险依次为 Cd>Hg>Cu>Pb>Cr>Zn。城市生活垃圾收集后一般在郊区集中焚烧处理,有些农村生活垃圾也在收集后集中焚烧处理,垃圾焚烧后一部分重金属随着烟尘进入大气,然后沉降到菜地,导致菜地重金属污染;有些区域生活垃圾随意堆放,在降雨后,其中的重金属污染物随雨水进入地下水,造成地下水重金属污染,用地下水灌溉菜地后将提高菜地土壤重金属含量^[23]。通过精细处理回收垃圾中的金属资源,合理填埋防止重金属渗入土壤,可减轻重金属污染。

1.3 国内外菜地重金属污染研究情况

由于交通运输、农业生产、工业生产、生活垃圾等因素影响,导致菜地重金属含量超标^[10]。国内外对菜地重金属污染状况进行了研究,包括菜地重金属污染的特征、重金属污染风险评估、重金属污染防治修复等内容^[24]。

我国蔬菜重金属污染较为严重,北京市蔬菜重金属污染类型主要是 Pb、Cd、Hg、As,其中蔬菜 Pb 超标率最高,达到了 11.39%^[25];上海市郊蔬菜生产基地菜地 Cd、Hg、Zn 的累积指数要远高于土壤背景值;珠三角约 40%的菜地土壤重金属含量超标,其中约 10%的菜地重金属含量严重超标^[26];我国其他地区也有菜地重金属含量超标的报道,可见菜地重金属污染较为普遍^[24]。

国外对污水灌溉、交通运输等产生的重金属污染进行研究,发现菜地中出现多种重金属污染物。由于污水灌溉,印度瓦拉纳西的菜地土壤被 Cd、

Cu、Mn 污染^[27];对位于澳大利亚伍伦布市以南的亚肯布拉港附近的菜地土壤检测结果表明,菜地受到了 Cu 污染^[17];乌干达首都坎帕拉高架桥周围的菜地重金属检测结果显示,Pb、Zn 含量较高^[28]。菜地重金属主要来源于污灌、固体废弃物淋溶、肥料与农药、大气沉降等^[27-28]。

2 重金属污染对不同种类蔬菜的影响

2.1 土壤污染对蔬菜重金属含量的影响

不同的重金属化学性质差别较大,土壤受重金属污染后,在蔬菜各器官中重金属含量也不同,其中 Pb 与 Cd 含量较高。如菜地土壤 Pb 含量越高,蔬菜对 Pb 的吸收与累积量越大。在菜地土壤 Pb 背景值相同的情况下,叶菜类的 Pb 含量最高,根茎类中等,瓜果类最低^[29]。通常蔬菜茎中 Pb 含量要高于根和叶,叶菜根的 Pb 含量低于叶,其原因是 Pb 难以在蔬菜器官中移动,在大气沉降、污水灌溉、施肥及其他土壤污染情况下,Pb 在叶菜茎中逐渐累积,导致各器官中 Pb 含量不断提升。瓜果类蔬菜对土壤中 Cd 的吸收量、累积量小于叶菜类与根茎类蔬菜。Cd 在蔬菜体内移动性较强,在蔬菜生长发育的过程中 Cd 不断迁移,离土壤越远、迁移路径越远的蔬菜器官,Cd 的累积量越小,因此在蔬菜中 Cd 含量表现为根>茎>叶^[30]。

2.2 大气沉降对蔬菜重金属含量的影响

大气沉降是蔬菜重金属污染的另一种重要途径。大气沉降主要来自于汽车尾气、工业废气、生活垃圾焚烧等,大气沉降物中含有的重金属会污染蔬菜。大气中的重金属可直接沉降到蔬菜的叶茎,主要被叶片吸收,重金属也可沉降到土壤中被蔬菜吸收,又可以沉降到地表水中,用地表水灌溉蔬菜后被根系吸收。

大气沉降是叶菜叶茎 Pb 污染的一个主要来源,借助叶片吸收的大气沉降 Pb 含量大于从土壤中吸收的 Pb 含量^[31]。对大型炼 Zn 厂周围的菜地,蔬菜重金属含量检测结果表明,测试的蔬菜样品 Zn 含量均超过了无公害蔬菜的限量标准;蔬菜叶中 Zn 含量远比根大,因此蔬菜叶片中的 Zn 主要来自于大气沉降^[32]。

对上海市郊工业区周围露地和设施生菜、苋菜、空心菜中的重金属检测结果显示,露地蔬菜的重金属含量均高于设施蔬菜,露地蔬菜可食用器官中 Zn、Cr、Cu、Pb、Cd、Hg、As 的含量(w,后同)分别为 7.32、0.91、0.52、0.007、0.029、0.002、0.014 mg·kg⁻¹,

其中 Zn、Cr、Cu、Cd、Hg 分别比设施蔬菜高 26.4%、28.45%、44.4%、33.9%、14.0%^[33]。

综上,对菜地土壤重金属污染、大气沉降重金属污染研究结果表明,与其他种类蔬菜相比,叶菜重金属含量较高。

3 重金属污染对不同种类叶菜的影响

3.1 不同叶菜的重金属积累量

盆栽种植小白菜、空心菜、苋菜、菠菜重金属试验结果表明,可氧化态是叶菜中 Pb 的主要形态,可交换态与可还原态是叶菜中 Cd 的主要形态,可交换态和可还原态为叶菜器官中的活性重金属形态,因此,Cd 对叶菜的毒害作用大于 Pb。重金属抑制了空心菜、苋菜、菠菜种子发芽,重金属浓度增加抑制了叶菜的生长发育,使生长周期变长、产量降低^[34]。

选择易产生重金属污染的 14 种叶菜,通过盆栽试验研究不同叶菜对重金属的吸收积累规律,结果发现,Cd 在叶菜中的富集系数为 3.208,Zn、Cu、Ni、Cr、Pb 的富集系数低于 1;Cd 在小白菜、油菜、茴香、茼蒿、韭菜体内的积累量较低;Zn 在生菜、芹菜、小白菜、油麦菜、茼蒿、空心菜、苦苣、油菜、茴香的积累量较低;Cu 在小白菜、油菜、油麦菜、生菜体内的积累量较低;Ni 在油菜、小白菜、油麦菜体内的积累量较低;Cr 在茼蒿、空心菜、苋菜、苦苣、茴香、芹菜体内的积累量较低;Pb 在香菜、茴香、苋菜、茼蒿体内的积累量较低。根据不同叶菜类品种对不同重金属富集能力的差异,可在污染较为严重的菜地选择种植重金属低富集的叶菜种类^[35]。

3.2 大气沉降对叶菜重金属含量的影响

在空气污染比较严重的地区,大气中的 PM_{2.5} 可以负载 Cd、Pb、As 等重金属,大气中的 PM_{2.5} 负载 Pb 荷载量分别为 Cd、As 荷载量的 42.6 倍、8.4 倍,可见 PM_{2.5} 沉降的最重要重金属污染物是 Pb,可吸入颗粒物沉降到露地种植叶菜的叶片上后,这些颗粒物荷载的重金属易被植物吸收,并累积在叶菜的茎叶中。几种叶菜田间试验结果表明,Cd、Pb、As 低积累型叶菜有茼蒿、小白菜、菠菜,Cd、Pb 低积累型叶菜为茴香。如果土壤重金属含量未超标,设施栽培的菠菜、油麦菜、生菜、小白菜、茼蒿、茴香叶茎中 Cd、Pb、As 含量均未超过食品安全国家标准,无健康风险,但是茼蒿茎叶中 As 的累积对成人与儿童均可产生明显的健康风险,除茴香外,其他 5 种叶菜茎叶 Cd 的累积对成人和儿童均有明显的健康

风险^[36]。叶菜可食部分重金属含量与大气降尘关系密切,大气沉降与扬尘是蔬菜中 As、Pb 的主要来源,而叶菜中的 Cd、Zn 主要来自于土壤。苋菜对 Zn、Hg、As、Cd 富集能力最强,空心菜对 Pb 的富集能力最强。受大气沉降影响,除空心菜外,大棚内叶菜比露地叶菜污染轻,摄入健康风险小^[20,37-38]。

选择上海市郊叶菜种植区,用大田试验与沉降室降水模拟试验方法,研究了大气湿沉降对露地与设施叶菜重金属的污染情况,结果表明,Zn、Cu、As、Cr、Hg、Cd 的沉降通量分别为 189.07、22.41、11.08、4.28、3.00、0.76、0.71 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。露地种植的叶菜重金属平均含量均高于大棚,除 Cu、As 外,叶菜其他重金属含量均高于重金属污染限值。从叶菜幼苗期到成熟期,参试的叶菜茎叶 Pb 积累量不断降低,Hg 积累量则先升高后降低,Cu 积累量不断降低。叶菜根部对重金属的积累量变化规律不明显^[39]。

3.3 施肥对叶菜重金属含量的影响

化肥中的重金属杂质会通过施肥进入土壤,进而被叶菜吸收,导致重金属含量增加。不同类型的有机肥对叶菜重金属含量的影响亦不同,在纯鸡粪、纯猪粪及其他商品有机肥施用量不同的情况下,小白菜的产量随有机肥施用量的增加而提高,但菜地土壤和叶菜中的重金属积累量也随之增加。因此,施用精制有机肥可降低菜地与叶菜重金属含量^[5]。

在叶菜生产中,为了追求高产,化肥施用量高,导致菜地土壤和叶菜重金属含量较高。施用有机肥可提高有益微生物活性,改善土壤微生物学性质,通过土壤微生物的吸附、转化作用,降低菜地土壤的 pH 等,从而降低 Pb、Hg 的生物有效性,改善叶菜的生物学性状。从土壤有效 Pb、叶菜生物学性状及品质来看,精制有机肥配合化肥施用,土壤有益微生物的活性增强。因此施用精制有机肥料,配施化肥与生物肥料,可提高土壤养分的有效性,为叶菜及时提供均衡的营养,并降低重金属的有效性^[40]。

4 重金属污染风险评估

4.1 菜地土壤重金属污染评估

菜地土壤重金属污染评估是土壤环境质量评估的重要内容之一,是科学制定土地利用计划的前提^[41]。选用科学的土壤质量评估标准是菜地土壤重金属污染评估的关键。土壤环境质量评估常用的方法包括富集因子法、内梅罗指数法、潜在生态危

害指数法、地累积指数法,不同方法各有优缺点,可根据研究目的,选择合适的土壤环境质量评估方法^[42]。

4.2 重金属摄入量的健康风险评估

国外对重金属摄入风险进行了深入研究,联合国粮农组织和世界卫生组织下属的食品添加剂联合专家委员会将食品重金属污染风险项目作为优先的评估项目,欧盟也对食品重金属污染进行常态的专项评估,并提出了农产品重金属限量值。1976年,美国环保局根据土壤中阳离子交换量的差异,提出了土类的重金属容许量^[42]。

在国内,黄泽春等^[42]运用数学模型,对北京菜地土壤及蔬菜各器官 Zn 含量进行了研究,预测了 Zn 对人体的健康风险。秦普丰等^[43]对湖南株洲工业区土壤与风景区土壤重金属含量进行了对比分析。黄勇等^[44]集中研究了珠江三角洲土壤重金属污染分布规律,对重金属污染产生的健康风险开展了初步评估。

由于食品安全越来越受到社会各界的关注,研究者越来越多地把重金属风险评估研究成果应用到重金属风险管理之中。国外构建的重金属风险评估模型较多,国内相关研究较少,并且较多地停留在概念性的描述与运用简单的评估模型上,对重金属污染风险评估方法的研究较少,对人体食用蔬菜后重金属摄入量评估的研究较少,也不太成熟^[41-43]。因此可加强叶菜重金属污染对人体健康影响的研究,确定科学的叶菜重金属限量标准,也要加强重金属面源污染研究,进一步探讨重金属污染途径、迁移规律等。表 3 中重金属污染评估标准、评估方法和评估指标可以作为叶菜重金属风险评估的依据。

5 叶菜重金属污染预防与修复技术

5.1 重金属污染预防

5.1.1 严格监管污染源 严格监管重金属污染源排污情况,加强源头重金属污染物无害化处理设备的研发与应用,采用重金属消减技术与控制技术,减少重金属污染物的排放量,研究菜地重金属污染物的承载容量与重金属污染状况,确保菜地土壤重金属污染不超标^[45]。

5.1.2 合理选择叶菜品种 不同的叶菜品种对重金属的吸收积累量情况也不相同,可选择种植对重金属吸收积累量较低的叶菜品种。如依据不同叶菜对 Cd 吸收积累量的差异,可选择种植 Cd 低积累

表3 重金属污染风险评估

Table 3 Heavy metal pollution risk assessment

重金属污染评估 Heavy metal pollution assessment	评估标准 Assessment criteria	评估方法或评估指标 Assessment methods or indicators
土壤重金属污染评估 Soil heavy metal pollution	土壤环境质量评估标准 Soil environmental quality assessment standards	富集因子法、内梅罗指数法、潜在生态危害指数法、地累积指数法 The enrichment factor method, Nemerow index method, potential ecological hazard index method, and land accumulation index method
叶菜重金属污染评估 Heavy metal pollution in leafy vegetables	《食品安全国家标准 食品中污染物限量(GB 2762—2022)》 National Food Safety Standard-Limits of Contaminants in Food (GB 2762—2022)	标准规定了食品中 Pb、As、Hg、Cd、Ni、Sn、Cr、硝酸盐、亚硝酸盐、多氯联苯、苯并[a]芘、N-二甲基亚硝胺、3-氯-1,2-丙二醇的限量指标 The standard specifies lead, arsenic, mercury, cadmium, nickel, tin, chromium, limit indicators for nitrate, nitrite, polychlorinated biphenyls, benzo [a] pyrene, N-dimethylnitrosamine, and 3-chloro-1,2-propanediol
重金属摄入量健康风险评估 Health risk of heavy metal intake	以健康风险度作为评估标准 Using health risk as the evaluation criterion	根据试验数据,用数学模型定量评估食品重金属污染对人体健康的风险 Based on experimental data, the risk of heavy metal pollution in food to human health are quantitatively evaluated using mathematical models

量叶菜品种^[46]。

5.1.3 合理布局蔬菜基地 随着城镇化进程的快速发展,蔬菜生产基地要考虑重金属污染,可选择远离重金属污染源的耕地种植蔬菜,并进行新建菜地环境质量评估,观测菜地及周围环境质量,大气颗粒物中的重金属含量、灌溉水与土壤的重金属含量均不可超标,不可在车流量较大的公路附近建设蔬菜基地。在空气污染严重区域,可在设施中种植叶菜,减轻叶菜重金属污染^[47]。

5.1.4 改变土地利用方式 把重金属污染严重的菜地用于建设用地、造林、建苗圃与花圃、作为仓储用地等,选择环境质量较高的耕地种植叶菜^[48]。

5.2 重金属污染修复技术

5.2.1 物理修复技术 物理修复技术是根据土壤表层重金属污染的特性,采用物理方法将重金属污染的土壤表层去掉后,活化下层未被污染的土壤,或采用覆盖法修复重金属污染的土壤,缺点是工作量大,成本高。物理修复方法有去表土、换土、客土、深耕翻土、热处理、电动修复、玻璃化技术等^[49]。

5.2.2 化学修复技术 重金属化学修复技术主要是向土壤中加入适量的化学试剂,使被污染土壤中的重金属转变为不易吸收的形态,降低重金属生物有效性,或者使土壤中重金属活化,提升重金属的生物有效性,增加生物对土壤重金属的吸收量,从土壤中移除重金属污染物。化学修复技术主要有固化、重金属螯合剂修复、重金属拮抗剂修复、表面活性清洗剂修复、重金属提取等;石灰和生物炭体积比 1:2 混施 $0.9 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和石灰 $0.3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 处理均可明显提高土壤 pH,降低菜地土壤中有效态 Hg、Cd、Cr、Pb 含量, $0.225 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 腐殖酸肥料处理可明显降低菜地土壤中有效态 Hg 含量。石灰和生物炭体积比 1:2 混施 $0.9 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 处理降低了叶菜 Hg、

Cd、Cr 含量^[50]。

5.2.3 生物修复技术 植物修复是将重金属从土壤转移到植物体内,然后采收加工植物地上部分,从而降低土壤中重金属含量^[51-52]。现在已发现了 500 多种重金属超富集植物,其中 Cd 超富集植物有圆锥南芥^[53]、龙葵^[54]等植物;Pb 超富集植物有麻疯树^[55]、裂叶荆芥^[56]等。但是由于大多数植物在重金属污染严重土壤中无法正常生长,植株小、生长慢,难以达到提取土壤重金属的目的。动物修复是运用土壤中的动物吸收积累重金属,从而实现降低土壤重金属含量的目标。

5.2.4 微生物修复技术 借助微生物细胞代谢、生物大分子吸收转运、生物吸附、沉淀、氧化还原等,降低土壤重金属的迁移与转化率,达到修复土壤重金属的目的。菌根也可以降低宿主植物重金属的危害,提高土壤重金属的提取速度^[57]。

5.2.5 生态修复技术 重金属生态修复技术充分利用生物的自身抗逆性,辅之以物理与化学技术,降低重金属污染物对生物的胁迫作用。可通过种植能够吸收重金属的叶菜去除土壤中的重金属,如油菜和韭菜等植物被证明能够有效吸收土壤中的 Cd、Pb。亦可筛选重金属低积累叶菜品种与超积累植物间作、套作或轮作,结合优化施肥措施和微生物、纳米材料的应用,实现叶菜生产与土壤修复的双重效果^[58]。

6 存在问题与展望

6.1 存在问题

由于工农业生产与人类活动的增加,菜地土壤重金属污染时有发生。叶菜因可食部位与大气和菜地土壤表面直接接触,容易吸收并积累重金属,在食用重金属污染较为严重的叶菜后,将威胁人体

健康。长期摄入受重金属污染的叶菜会对人体造成多种健康风险,如Pb、Cd等会对人的神经系统、肝肾功能造成损害,尤其是儿童长期摄入微量重金属可能影响智力发育。

虽然国内外对叶菜重金属污染进行了广泛的研究,并取得了一定的成果,但是对重金属点源污染研究较多,对面源污染研究较少,导致无法全面掌握叶菜重金属污染规律。当前对重金属与人体健康的影响评估研究不成熟,对重金属人体摄入量值的研究不够深入和细致。同时,现有重金属污染修复技术成本高,在发生重金属污染事件后,这些修复技术难以应用。

6.2 展望

建议把重金属污染预防作为重点工作来抓,减少重金属污染物进入叶菜生产系统的数量。加强重金属面源污染研究,结合现有重金属点源研究成果,客观量化精确描述重金属污染情况,选择重金属污染不严重的耕地种植叶菜,防止叶菜生产中重金属含量超标,重金属污染严重的菜地可作为林地、花圃、建筑用地等。加强重金属污染对人体健康的影响研究,精确制定重金属人体摄入量值等,为重金属污染防治与相关标准的制订提供科学依据。

在风险评估方面,可综合应用多学科技术,深入分析重金属的各种形态、价态以及在叶菜体内的迁移转化机制,借助物联网、大数据与人工智能深度融合,实现对叶菜生长全周期重金属污染风险的实时动态精准监测与预警,构建全方位数字化评估体系。

研究不同叶菜在露地与设施中种植后对重金属的吸收、积累、富集规律,选择适宜的叶菜品种,并采取适宜的叶菜栽培技术,降低环境中重金属对于人体的危害。可在大气污染较严重区域,使用大棚或者温室生产叶菜,降低大气沉降对叶菜重金属含量的影响。

可加强重金属生态修复技术研究及应用,不断提高重金属污染修复效率。物理修复有望在降低成本和减少环境扰动的前提下实现高效修复,如开发新型环保的土壤淋洗技术;化学修复会聚焦于研发绿色、靶向性强的螯合剂与钝化剂,减少二次污染并提高修复效果持久性;生物修复利用基因编辑技术培育高效降解重金属的微生物菌剂,结合合成生物学可设计构建智能生物修复体系,如能根据重金属浓度自动调节修复功能的微生物群落,即可大幅提升修复效率。同时,把物理、化学、生物修复技术有机结合起来,完善高效、环保、低成本的综合修复

技术,针对不同污染程度与类型的土壤因地制宜地构建综合修复体系,用先进的重金属预防措施与科学的重金属修复技术保障叶菜的安全生产。

参考文献

- [1] YUE C, CUI K D, DUAN J, et al. The retention characteristics for water-soluble and water-insoluble particulate matter of five tree species along an air pollution gradient in Beijing, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 767: 145497.
- [2] 刘婷,赵长盛,陈庆锋,等.济南市春季大气颗粒物重金属的分布特征[J]. *环境科技*, 2020, 33(6): 53-57.
- [3] 袁升凯,赵李锋,李建武,等.优质秋菠菜高效栽培技术[J]. *中国瓜菜*, 2019, 32(9): 96-97.
- [4] 卓祖闯,闫耀民,董铁成,等.早春西瓜-花椰菜-生菜1年3茬栽培技术[J]. *中国瓜菜*, 2014, 27(2): 55-56.
- [5] 查燕,牛天新,汤婕.6种叶菜吸附颗粒物与叶片微形态特征研究[J]. *江西农业大学学报*, 2021, 43(6): 1443-1451.
- [6] 程珂,杨新萍,赵方杰.大气沉降及土壤扬尘对天津城郊蔬菜重金属含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(10): 1837-1845.
- [7] GAO P P, XUE P Y, DONG J W, et al. Contribution of PM_{2.5} Pb in atmospheric fallout to Pb accumulation in Chinese cabbage leaves via stomata[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 407: 124356.
- [8] 孙芯,高杨,周钰潇,等.重金属Cd在5种蔬菜-土壤系统中的富集差异及安全阈值研究[J]. *中国瓜菜*, 2025, 38(2): 157-163.
- [9] 邹素敏,杜瑞英,文典,等.不同品种蔬菜重金属污染评价和富集特征研究[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(4): 714-720.
- [10] 杜俊杰,李娜,吴永宁,等.蔬菜对重金属的积累差异及低积累蔬菜的研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(6): 1193-1201.
- [11] DAVYDOVA S. Heavy metals as toxicants in big cities[J]. *Microchemical Journal*, 2005, 79(1/2): 133-136.
- [12] TOKUNAGA S, HAKUTA T. Acid washing and stabilization of an artificial arsenic contaminated soil[J]. *Chemosphere*, 2002, 46(1): 31-38.
- [13] 中华人民共和国环境保护部,中华人民共和国国土资源部.全国土壤污染状况调查公报[R/OL]. (2014-04-17) [2024-07-23]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.htm.
- [14] YE X Z, XIAO W D, ZHANG Y Z, et al. Assessment of heavy metal pollution in vegetables and relationships with soil heavy metal distribution in Zhejiang province, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187(6): 378.
- [15] WANG L, CHEN L, TSANG D C W, et al. Recycling dredged sediment into fill materials, partition blocks, and paving blocks: Technical and economic assessment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 199: 69-76.
- [16] 袁林,赖星,杨刚,等.钝化材料对镉污染农田原位钝化修复效果研究[J]. *环境科学与技术*, 2019, 42(3): 90-97.
- [17] 文典.珠三角地区土壤中5种重金属在叶菜类蔬菜中的累积

- 特征及其环境安全临界值[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012.
- [18] 邱险辉, 黄奎付. 蔬菜重金属污染现状及研究进展[J]. 科协论坛, 2013(4): 129-130.
- [19] 邵莉, 肖化云. 公路两侧大气颗粒物中的重金属污染特征及其影响因素[J]. 环境化学, 2012, 31(3): 315-323.
- [20] 周泉潇, 毕春娟, 汪萌, 等. 大气沉降对叶菜重金属的污染效应及其健康风险[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2018(2): 141-150.
- [21] 刘辉, 邹继颖, 边红枫, 等. 菜地土壤重金属污染状况及对蔬菜安全性分析[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(22): 175-180.
- [22] 杜延军, 金飞, 刘松玉, 等. 重金属工业污染场地固化/稳定化处理研究进展[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 116-124.
- [23] 王瑜堂, 张军, 岳波, 等. 村镇生活垃圾重金属含量及其土地利用中的环境风险分析[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(8): 1634-1639.
- [24] 曾希柏, 李莲芳, 梅旭荣. 中国蔬菜土壤重金属含量及来源分析[J]. 中国农业科学, 2007, 48(11): 2507-2517.
- [25] 温雅君, 孙江, 高景红, 等. 北京市蔬菜基地土壤重金属含量的环境质量分析与评价[J]. 中国农学通报, 2013, 29(14): 129-133.
- [26] 王初, 陈振楼, 王京, 等. 崇明岛公路两侧蔬菜地土壤和蔬菜重金属污染研究[J]. 生态与农村环境学报, 2007, 23(2): 89-93.
- [27] SHARMA R K, AGRAWAL M, MARSHBALL F M. Heavy metal (Cu, Zn, Cd and Pb) contamination of vegetables in urban India: A case study in Varanasi[J]. Environmental Pollution, 2008, 154(10): 254-263.
- [28] NABULO G, ORYEM O H, DIAMOND M. Assessment of lead, cadmium and zinc contamination of roadside soils, surface films, and vegetables in Kampala city, Uganda[J]. Environmental Research, 2006, 101(5): 42-45.
- [29] 杨国义, 罗薇, 高家俊, 等. 广东省典型区域蔬菜重金属含量特征与污染评价[J]. 土壤通报, 2008, 39(1): 133-136.
- [30] 杜应琼, 何江华, 陈俊坚, 等. 铅、镉和铬在叶类蔬菜中的累积及其生长的影响[J]. 园艺学报, 2003, 30(1): 51-55.
- [31] 常鹏云, 谢英荷, 程红艳, 等. 镉对6种根菜类蔬菜生长状况及品质的影响研究[J]. 天津农业科学, 2012, 18(1): 126-130.
- [32] DE TEMMERMAN L, RUTTENS A, WAEGENEERS N. Impact of atmospheric deposition of As, Cd, and Pb on their concentration in carrot and celeriac[J]. Environmental Pollution, 2012, 166: 187-195.
- [33] 刘芳, 王书肖, 吴清茹, 等. 大型炼锌厂周边土壤及蔬菜的汞污染评价及来源分析[J]. 环境科学, 2013, 34(2): 712-717.
- [34] 刘慧. 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.
- [35] 任艳军, 任学军, 马为民, 等. 14种叶菜类蔬菜对土壤中重金属吸收累积差异的分析与评价[J]. 河北科技师范学院学报, 2019, 33(3): 23-34.
- [36] 董俊文, 高培培, 孙洪欣, 等. 设施叶菜类蔬菜重金属镉、铅和砷累积特征及健康风险评估[J]. 环境科学, 2022, 43(1): 481-489.
- [37] UZU G, SOBANSKA S, ALIOUANE Y, et al. Study of lead phytoavailability for atmospheric industrial micronic and sub-micronic particles in relation with lead speciation[J]. Environmental Pollution, 2009, 157(4): 1178-1185.
- [38] KONG S F, LU B, JI Y Q, et al. Risk assessment of heavy metals in road and soil dusts within PM_{2.5}, PM₁₀ and PM₁₀₀ fractions in Dongying city, Shandong province, China[J]. Journal of Environmental Monitoring, 2012, 14(3): 791-803.
- [39] 张焕焕. 上海市郊大气重合属干沉降对土壤-叶菜系统的污染效应[D]. 上海: 华东师范大学, 2015.
- [40] 林艳. 基于地统计学与GIS的土壤重金属污染评价与预测[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
- [41] 陈华. 环境健康风险评估方法探讨[J]. 科技资讯, 2009(34): 113-114.
- [42] 黄泽春, 宋波, 陈同斌. 北京市菜地土壤和蔬菜的锌含量及其健康风险评估[J]. 地理研究, 2006, 25(3): 439-448.
- [43] 秦普丰, 刘丽, 侯红, 等. 工业城市不同功能区土壤和蔬菜中重金属污染及其健康风险评估[J]. 生态环境学报, 2010, 19(7): 1668-1674.
- [44] 黄勇, 郭庆荣, 任海, 等. 珠江三角洲典型地区蔬菜重金属污染现状研究: 以中山市和东莞市为例[J]. 生态环境, 2005, 14(4): 559-561.
- [45] 冯韶华, 俞一帆, 张旭峰, 等. 中国农田土壤重金属污染源解析研究进展[J]. 环境污染与防治, 2023, 45(9): 1300-1306.
- [46] 黄东风, 王忠玮, 王利民. 蔬菜-土壤系统重金属污染现状及防治措施[J]. 科技资讯, 2016, 14(16): 75-76.
- [47] 梁富程. 蔬菜中重金属污染研究及防治措施[J]. 资源节约与环保, 2013(5): 132.
- [48] 王丽慧. 蔬菜重金属污染及其防治措施研究[J]. 现代化农业, 2023(1): 37-39.
- [49] 黄沉清, 杨元龙, 薛炜. 重金属污染场地物理化学修复技术研究与应用进展[J]. 广州化学, 2017, 42(6): 54-61.
- [50] 黄淼杰, 赵首萍, 张棋, 等. 常用钝化剂对叶菜类蔬菜重金属镉、汞、铅和铬积累的影响研究[J]. 农产品质量与安全, 2022(2): 56-61.
- [51] TANGAHU B V, ABDULLAL S R S, BASRI H, et al. A review on heavy metals (As, Pb, and Hg) uptake by plants through phytoremediation[J]. International Journal of Chemical Engineering, 2011, 4(1): 1-31.
- [52] BHARGA V A, LORS C, PONGE J F, et al. Metal immobilization and soil amendment efficiency at a contaminated sediment landfill site: A field study focusing on plants, springtails, and bacteria[J]. Environmental Pollution, 2012, 169(3): 1-11.
- [53] 汤叶涛, 仇荣亮, 曾晓雯, 等. 一种新的多金属超富集植物—圆锥南芥[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2005, 44(4): 135-136.
- [54] 魏树和, 周启星, 王新, 等. 一种新发现的镉超积累植物龙葵[J]. 科学通报, 2004, 49(24): 2568-2573.
- [55] 李清飞. 麻疯树对铅胁迫的生理耐性研究[J]. 生态与农村环境学报, 2012, 28(1): 72-76.
- [56] 聂俊华, 刘秀梅, 王庆仁. Pb(铅)富集植物品种的筛选[J]. 农业工程学报, 2004, 20(4): 255-258.
- [57] 杨雍康, 药栋, 李博, 等. 微生物群落在修复重金属污染土壤过程中的作用[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(5): 1322-1331.
- [58] 仪小梅. 国土空间生态修复背景下的重金属污染土壤植物修复及联合技术研究进展[J]. 现代化工, 2023, 43(9): 76-79.