

# 谷物中重金属来源、检测技术及 膳食风险研究进展

李俊生<sup>1</sup>, 郭小瑞<sup>1,2</sup>, 綦 峥<sup>2\*</sup>

(1. 哈尔滨商业大学食品工程学院, 哈尔滨 150028; 2. 哈尔滨商业大学教育部  
药物工程技术研究中心, 哈尔滨 150076)

**摘 要:** 随着工业化的快速发展, 谷物作为人类主要的食物来源之一, 受到重金属污染的风险日益加剧。其中, 铅、镉、铬、砷和汞等重金属对人体健康有潜在的危害, 长期随谷物摄入可能导致中毒和慢性疾病。由于谷物广泛应用于各类饮食和加工食品中, 重金属的积累可能对人体健康造成长期影响。本文综述了重金属污染农作物的自然途径和人为途径来源、谷物中重金属检测方法及相关法规和标准, 同时针对谷物中重金属的膳食风险进行评估, 进而阐述谷物中重金属污染的控制措施和技术手段。通过评估谷物中重金属污染对膳食安全构成的潜在风险, 明晰谷物质量安全的潜在威胁, 以期为我国粮食安全和人体健康提供理论依据和实践指导。

**关键词:** 谷物; 重金属; 食品安全; 膳食风险

## Advances in heavy metal sources, detection techniques and dietary risks in cereals

LI Jun-Sheng<sup>1</sup>, GUO Xiao-Rui<sup>1,2</sup>, QI Zheng<sup>2\*</sup>

(1. College of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China; 2. Engineering Research  
Center for Medicine, Ministry of Education, Harbin University of Commerce, Harbin 150076, China)

**ABSTRACT:** As industrialization continues to expand, cereals, a primary food source for humans, face an increasing risk of contamination with heavy metals. Key heavy metals such as lead, cadmium, chromium, arsenic, and mercury pose significant health hazards. Prolonged consumption of cereals contaminated with these metals can lead to poisoning and chronic diseases. Given the widespread use of cereals in food processing and diets, the accumulation of heavy metals in these grains is a matter of serious concern for long-term human health impacts. This paper summarized the natural and artificial sources of heavy metal pollution in crops, the detection methods of heavy metals in grains, relevant regulations and standards, and evaluated the dietary risk of heavy metals in grains, and then expounded the control measures and technical means of heavy metal pollution in grains. By evaluating the potential threat of heavy metal pollution in grain to food safety, clarified the potential threat of grain quality safety, so as to provide a theoretical basis and practical guidance to protect food safety and human health in China.

**KEY WORDS:** cereals; heavy metal; food safety; dietary risk

基金项目: 黑龙江省重点研发计划指导项目(GZ20220108)、哈尔滨商业大学青年创新人才培养计划(XL0146)

Fund: Supported by the Heilongjiang Provincial Program on Key Basic Research Project (GZ20220108), and the Harbin University of Commerce Young Innovative Talents Training Program (XL0146)

\*通信作者: 綦峥, 博士, 研究员, 主要研究方向为食品安全检测。E-mail: 18645039597@163.com

\*Corresponding author: QI Zheng, Ph.D, Professor, Harbin University of Commerce, Engineering Research Center for Medicine, Harbin 150076, China. E-mail: 18645039597@163.com

## 0 引言

食品安全是全球可持续发展的首要任务。近年来,重金属在环境中的持久性和难降解的特性,使之易在土壤和水体中累积,并通过食物链进入人体,对食品安全构成严重威胁。根据世界卫生组织的报告,重金属如铅、镉和汞的全球性污染导致每年大约有 100 万人遭受慢性中毒<sup>[1]</sup>。这一问题主要由快速的城市化、土地利用模式的变化以及工业化进程推动,特别是在高人口密度的发展中国家中更为明显。例如,在某些发展中国家,土壤中重金属含量已经超过了国际安全标准的 5 倍<sup>[2]</sup>。在工业革命和经济全球化带来的驱动下,粮食消费量迅猛增加。食品和饲料加工行业对玉米、水稻、小麦等主要粮食的需求也持续攀升。因此,未能妥善管理和控制谷物中的重金属含量将直接影响食品安全。长期摄入含有重金属的谷物可能会增加患癌症的风险,特别是增加了消化系统癌症的发病率<sup>[3]</sup>。谷物作为人类日常饮食中的重要组成部分,其安全问题尤为关键。谷物中的重金属残留研究对食品安全的影响、对保障公共健康、维护食品安全具有重要意义。其污染主要来源于土壤、水体、大气以及农业生产过程中使用的农药和肥料等<sup>[4]</sup>。一旦谷物受到重金属污染,这些有害物质就会通过食物链进入人体,对人体健康造成严重威胁。例如长期摄入含镉的食物可能会导致骨骼疾病和肾功能衰竭<sup>[5]</sup>。由于各种自然和人为因素的叠加作用,谷物中重金属残留的逐渐增加已经引起了广泛的关注。

因此,明确谷物中重金属的来源和迁移规律,掌握其在食品中的残留情况,对于科学评估重金属对食品安全和人体健康的影响,制定有效的防控措施具有重要意义。虽然我国和其他国际机构已经制定了一系列针对重金属的限量标准和管理措施<sup>[6]</sup>,然而重金属来源广泛,食品安全隐患依然突出。本文旨在通过全面分析谷物中重金属的来源及其在食品中的残留情况、检测方法和膳食风险,以期为食品安全管理提供科学依据和有效策略,同时为确保谷物产品的食品安全和保护消费者健康提供理论依据和实践指导。

## 1 谷物中重金属的来源与检测方法

### 1.1 重金属的来源与污染途径

重金属污染通常源于自然和人为两大类。自然来源包括岩石风化、火山爆发和土壤侵蚀等过程,这些过程释放铅、镉、汞等重金属到环境中。然而,人为来源才是重金属污染的主要原因,尤其在工业化和城市化进程中。工业活动,如采矿、金属冶炼、化工生产和废物处理,是重金属排放的主要来源。例如,镉通常在锌矿石开采和处理过程中产生,而铅和汞则常见于燃煤电厂和金属加工厂的排放。此外,农业活动也是一个重要的污染源。使用含有重

金属的农药和肥料,如含镉的磷肥,可导致土壤和水体污染。城市废水和垃圾填埋场的渗漏也会向环境中排放重金属(表 1)。重金属一旦进入环境,就会通过各种途径传播和积累。在土壤中,重金属可以被植物吸收,进入食物链,最终影响人类健康。水体污染是另一重要途径,重金属通过地表径流和地下水流入河流、湖泊和海洋,影响水生生态系统。大气沉降也是一种重要的污染途径,重金属通过工业排放进入大气后,可以通过雨水和风吹沉降到地面,污染土壤和水体。这些污染物对环境的影响是长期和累积的,随着时间的推移可能会导致生态系统和人类健康的严重问题。因此,明确重金属来源和控制污染途径是保护环境和公共健康的关键。

表 1 土壤中重金属背景值及来源

Table 1 Background values and sources of heavy metals in soils

| 重金属 | 背景值<br>(mg/kg) | 来源               | 参考文献 |
|-----|----------------|------------------|------|
| 铅   | 35             | 矿山开采、含铅电池和汽油回收   | [7]  |
| 砷   | 15             | 木材中铜铬防腐剂物质的使用    | [8]  |
| 汞   | 0.15           | 燃煤电厂排放           | [9]  |
| 镉   | 0.2            | 电子垃圾、污水灌溉、粪便堆肥   | [8]  |
| 铬   | 90             | 制革厂废水排放          | [9]  |
| 锌   | 100            | 畜牧业饲料添加剂         | [10] |
| 铜   | 35             | 畜牧业饲料添加剂         | [10] |
| 镍   | 40             | 矿山开采、电子垃圾、交通尾气排放 | [10] |

重金属在农业生产区的积累是一个重要的关注点。例如,中国的珠三角地区由于工业化程度高,土壤和水体重金属污染严重,导致当地农产品,特别是水稻中铅和镉含量超标的情况时有发生。这些农产品的重金属污染源头主要是周边工业活动和历史遗留问题,如废水排放和工业废渣。在食品的包装和运输过程中,使用的材料也可能成为重金属污染的一个来源。例如,一些包装材料中可能含有铅、铬等重金属,这些材料在与食品接触过程中可能释放出重金属<sup>[11]</sup>。在长途运输中,如果食品与这些材料长时间接触,可能会导致重金属含量的升高。食品加工过程中使用的设备和添加剂也可能是重金属污染的来源之一。例如,一些老旧的食品加工设备可能含有铅或镉,这些重金属可能在加工过程中迁移到食品中。此外,某些食品添加剂也可能含有微量的重金属,虽然这些添加剂的使用通常符合安全标准,但长期累积也可能对人体健康构成风险。除此之外,非有机肥料尤其是含磷肥料,是农田土壤重金属污染的一个重要来源<sup>[12]</sup>。磷肥中的重金属,如镉,可以在农田土壤中累积,并通过植物被吸收,最终进入食物链。这种污染不仅影响作物质量,还可能对人体健康造成威胁。

## 1.2 谷物中重金属检测方法

在谷物中重金属检测领域, 多种方法各有优劣, 共同推动了这一领域的发展。原子吸收光谱法(atomic absorption spectroscopy, AAS)以其精确性和低成本广受欢迎, 但需要复杂的样品前处理; 而电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma-mass spectrometry, ICP-MS)和电感耦合等离子体原子发射光谱法(inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry, ICP-AES)则以高灵敏度和准确性著称, 尽管设备成本和技术要求较高。X 射线荧光光谱法(X-ray fluorescence spectrometry, XRF)和便携式 XRF 分析仪提供快速、无损检测, 尽管其精确度和灵敏度可能较低。激光诱导击穿光谱法(laser-induced breakdown spectroscopy, LIBS)以快速分析和简便操作为优势, 但在灵敏度和分辨率上有待提升。同位素稀释质谱法(isotope dilution mass spectrometry, IDMS)和高分辨率质谱法则提供极高的精确度, 但操作复杂且成本高昂。

此外, 未来的发展趋势将更加专注于纳米传感器、生物传感器, 以及机器学习和大数据分析的应用。纳米传感器和生物传感器因其超高灵敏度、快速响应和小型化优势, 将成为重金属检测的前沿技术。这些传感器能够在微量级甚至纳米级进行检测, 使得在早期阶段就能够识别和量化重金属污染。生物传感器, 特别是基于特定生物识别元素的传感器, 如抗体和酶, 提供了高度特异性的检测方法, 可以用于快速筛查和现场检测。纳米生物传感器的应用多个领域已显示出显著的效果。例如, 它们已被用于分析土壤的肥力、pH、水分含量、矿物质浓度、害虫的存在以及在疾病发生前检测土壤中矿物质的缺失<sup>[13]</sup>。RAI 等<sup>[14]</sup>及 SEKHON<sup>[15]</sup>已报告使用这

些传感器来分析水分、肥力和生长激素浓度, 进而评估土壤的生产力。此外, 在食品工业中, 纳米生物传感器的应用也正迅速增长。它们被广泛用于谷物检测, 以确保在生产和包装过程中的谷物安全, 以及用于检测重金属或病原体。最近的一项研究由 ALVARADO 等<sup>[16]</sup>提出, 建议将纳米生物传感器与信息技术结合使用, 以造福偏远地区的农民。通过将纳米生物传感器与全球定位系统相连接, 可以实现传感系统的进一步发展, 这一系统有望大大帮助偏远地区的农民管理化肥、杀虫剂、杀菌剂、水位以及物理和化学压力, 并且在田间作物出现疾病和重金属威胁之前进行预防。

机器学习和大数据分析的应用也在重金属检测领域呈现出巨大的潜力。通过收集和分析大量的样品数据, 这些技术可以帮助识别污染模式, 预测污染风险, 并优化检测方法。机器学习算法能够处理复杂数据集, 提高检测方法的准确性和效率, 尤其是在处理多元素污染和复杂样品矩阵时。大数据和机器学习, 作为两种先进的高性能计算技术, 正在开辟数据分析和理解复杂农业过程的新领域。这些技术在环境分析、天气管理、气象预报、灾害响应、水资源管理、能源管理以及遥感领域中得到了广泛应用<sup>[17]</sup>。特别地, FENU 等<sup>[18]</sup>利用机器学习模型来提升对作物病害的检测能力, 尤其是那些由重金属引发的疾病。为了实现这一目标, 分析了特定地区农业数据, 以确定导致疾病的主要重金属种类。而 TOMBE<sup>[19]</sup>则采用作物图像来评估其健康状况, 并辅助识别疾病和杂草, 这一方法融合了计算机视觉技术, 助力于智能农业的发展。这些创新表明, 结合高性能计算和数据分析技术, 可以在农业领域实现更加高效和准确的管理与决策。相关检测方法的优缺点比较见表 2。

表 2 重金属检测方法的优缺点  
Table 2 Advantages and disadvantages of heavy metal detection methods

| 重金属检测方法     | 优点                | 缺点                  | 样品前处理                  | 参考文献 |
|-------------|-------------------|---------------------|------------------------|------|
| AAS         | 成本低、操作简单、适合单一元素分析 | 无法检测多种重金属           | 研磨、称重后, 采用酸消解, 高压、高温条件 | [20] |
| ICP-MS      | 灵敏度高、可多元素分析、检出限极低 | 设备成本高、操作要求高         | 封闭容器酸消解                | [21] |
| ICP-AES     | 灵敏度高、可多元素分析、准确度高  | 设备成本高、操作要求高、样品纯度要求高 | 封闭容器酸消解                | [21] |
| XRF         | 非破坏性分析、快速、操作简单    | 灵敏度较低、检出限较高、易受干扰    | 研磨后压片或制成薄膜             | [22] |
| 便携式 XRF 分析仪 | 快速、现场操作、无需样品前处理   | 深度信息有限、可能受到样品矩阵影响   | 研磨后压片或制成薄膜             | [22] |
| LIBS        | 高灵敏度、快速、可以远程操作    | 需要专家进行数据解读、设备相对昂贵   | 研磨后压片                  | [23] |
| IDMS        | 高度精确、能够测量微量元素     | 需要昂贵的同位素、操作过程复杂     | 酸消解, 使用稀释技术并加入稳定的同位素   | [24] |
| 高分辨率质谱法     | 提供详细信息、适用于复杂样品    | 设备昂贵、需要专家进行操作和数据解读  | 液相萃取和固相萃取              | [25] |
| 无标记检测方法     | 简化操作流程、减少干扰       | 可能需要更高的检测灵敏度        | 样品液化、稀释或过滤             | [26] |
| 多模态成像和分析    | 获得全面信息、增强数据准确性    | 结合不同技术可能导致操作复杂、成本增加 | 切片、涂片或研磨               | [27] |
| 机器学习和大数据分析  | 改进数据解释、提高检测准确性    | 需要大量的训练数据、模型可能过度拟合  | 不涉及样品的前处理              | [28] |
| 纳米传感器和生物传感器 | 高度灵敏、具有选择性        | 对于某些干扰物可能存在交叉反应     | 样品液化, 需要过滤或稀释          | [29] |

未来的发展重点将集中在提高检测技术的灵敏度、降低成本、简化操作流程,以及提升现场检测的能力。此外,集成多种检测技术的系统将成为一个重要的发展方向,以实现更全面和精确的重金属检测。加强数据共享和协作也是未来发展的关键,这将有助于建立更全面的重金属污染数据库,为全球食品安全监管提供更强大的支持。随着这些技术的不断进步和完善,期待实现更为精准和高效的谷物中重金属检测,从而更好地保护公共健康和食品安全。

## 2 谷物中重金属的健康潜在风险与管控措施

### 2.1 谷物中重金属摄入对健康的潜在风险

重金属如砷、铅、镉、汞对人体有显著毒性,而铜、锌和铁是人体所需微量元素,但过量摄入亦有风险。RUI 等<sup>[30]</sup>的研究显示燃煤电厂影响下的作物叶片和种子的汞污染比根部严重,指出食用这些谷物种子有风险。埃及部分村庄<sup>[31]</sup>居民使用的石磨固定剂含铅,导致面粉受污。在中国,镉大米问题是威胁人类健康的一大难题,并且电子垃圾拆解地区的大米危险性增加了 60%。食物中的铬主要是低毒的三价铬,但在某些条件下可能转化为有毒的六价铬。研究显示铬对葡萄糖代谢有影响<sup>[32]</sup>。SINGH 等<sup>[33]</sup>的研究指出印度某地区水、土壤和食物中的砷浓度超过世界卫生组织建议标准。对于重金属污染,全球正面临显著的食物安全和健康风险。这种污染已在多个地区影响到作物和水源安全,亟需采取有效措施应对政策以确保生态环境的健康和安全。

重金属如铅、汞、镉和砷在环境和食物链中的长期积累可能导致健康风险增加。表 3 显示了吉林省中谷物样品中重金属的含量,采用了平均值来对数据进行统计分析,

并参照了国家标准《中国卫生部关于谷物中重金属最大允许浓度(maximum allowable concentration, MAC)的推荐值》(GB 2715—2005《粮食卫生标准》)。研究结果显示,在 9 种粮食样本中,大部分重金属的含量都低于国家标准规定的限值。然而,镉的含量却超出了该标准。一项研究<sup>[34]</sup>显示,尽管水和食物中的砷含量低于标准,但人体毛发中的砷含量却已经达到慢性中毒的水平。另一项研究<sup>[35]</sup>表明,一个村庄的癌症发病率与土壤、食物和头发中的重金属污染显著相关,特别是砷、铅和镉。因此,对谷物中重金属进行检测以达到减少重金属通过食物链进入人体的有效途径。

为评估食用含有重金属的谷物对人类健康的风险,美国环境保护局制定了目标危险系数(target hazard quotient, THQ),用于估算长期接触谷物中重金属的相关潜在非致癌影响<sup>[36-37]</sup>。ZHAO 等<sup>[38]</sup>评估了中国安徽省淮河冲积平原地区铬、砷、铅、汞、镉和硒在谷物中的潜在健康风险,其中铬、铅、砷、汞的目标危险系数超过了限值,并且发现铅和汞分别与胃癌和肝癌发病率有统计学意义。YANG 等<sup>[39]</sup>测定了废水灌溉地区农田中的麦粒重金属含量,34.1%和 19.5%的麦粒被镉和铅污染,所有采样点的麦粒的 THQ 值超过限值,其中砷和镉是最重要的贡献者,存在相当大的健康风险。ALI 等<sup>[40]</sup>对巴基斯坦一个水稻种植区作物的铬污染进行了健康风险研究,结果表明,97.4%的谷物样品超过了中国国家食品标准,62.6%的稻田土壤样品超过了中国稻田土壤中铬浓度的自然背景阈值,证实了该研究地区普遍存在水稻土壤铬风险。综上所述,重金属暴露对人体健康会产生极大危害,并且长期低剂量的重金属暴露也可能在人体肿瘤发病中起诱导作用。

表 3 谷物中重金属浓度(mg/kg)  
Table 3 Concentration of heavy metals in cereals (mg/kg)

| 重金属  | 砷   |        | 铅   |       | 镉   |        | 汞    |       |
|------|-----|--------|-----|-------|-----|--------|------|-------|
|      | MAC | 平均值    | MAC | 平均值   | MAC | 平均值    | MAC  | 平均值   |
| 稻田   | 0.2 | 0.0379 | 0.2 | 0.003 | 0.2 | 0.008  | 0.02 | 0.012 |
| 春小麦  | -   | -      | 0.2 | 0.015 | 0.1 | 0.009  | -    | -     |
| 玉米   | -   | -      | 0.2 | 0.001 | 0.1 | 0.013  | -    | -     |
| 小米   | 0.2 | 0.013  | 0.2 | 0.042 | 0.1 | 0.0705 | -    | -     |
| 黑麦   | 0.2 | 0.087  | -   | -     | 0.1 | 0.017  | -    | -     |
| 去壳大米 | 0.2 | 0.037  | -   | -     | 0.1 | 0.002  | -    | -     |
| 小麦胚芽 | -   | -      | -   | -     | 0.1 | 0.011  | -    | -     |
| 高粱   | -   | -      | 0.2 | 0.016 | 0.1 | 0.002  | -    | -     |
| 花生   | -   | -      | -   | -     | -   | 0.013  | -    | -     |

注: -代表未检出,数据采集于吉林省。

## 2.2 谷物中重金属污染的控制措施和技术手段

我国新版的 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》于 2023 年 6 月 30 日正式施行, 其中规定了铅、镉、汞、铬、砷 5 种重金属在谷物中的安全限量。欧盟法规(EC) No 1881/2006 食品中污染物最高限量规定了铅、镉、锡、砷 4 种重金属在谷物中的限量要求<sup>[1]</sup>。国际食品法典委员会发布的 CXS 193—1995《食品和饲料中污染物的一般标准》列出了镉、砷两种重金属在谷物中被允许的最高水平, 如表 4 所示。

表 4 不同标准下的谷物中重金属限量标准(mg/kg)  
Table 4 Limits of heavy metals in cereals under different standards (mg/kg)

| 重金属 | GB 2762—2022 | (EC) No 1881/2006 | CXS 193—1995 |
|-----|--------------|-------------------|--------------|
| 铅   | 0.2          | 0.2               | -            |
| 锡   | -            | 50                | -            |
| 镉   | 0.1          | 0.1               | 0.1          |
| 汞   | 0.02         | -                 | -            |
| 砷   | 0.5          | 0.2               | 0.2          |
| 铬   | 1.0          | -                 | -            |

注: -表示该标准未规定重金属的限量要求。

重金属在谷物中积累, 并通过食物链转移给人类。因此, 减少谷物中的重金属含量是可持续农业和人类健康的一项重要举措。在谷物重金属污染的管控措施中, 可以采用以下 3 种举措: (1)源减少, 通过处理灌溉废水中的重金属可减少高达 85%的谷物中残留量<sup>[41]</sup>, 并优化土地利用, 减少城市路边灰尘和酸性采矿流域附近生产的作物的重金属污染风险<sup>[42]</sup>; (2)有机修正和微生物的外源应用, 例如应用蔬菜废料堆肥降低玉米中的镉含量<sup>[43]</sup>, 使用生物炭降低土壤中的重金属毒性。在重度污染地区, 推荐使用高富集植物进行生物修复<sup>[44]</sup>, 并通过外源微生物限制谷物对重金属的吸收<sup>[45-46]</sup>。例如, 接种铜绿假单胞菌和枯草芽孢杆菌降低水稻中的镉毒性和摄入量<sup>[47]</sup>。(3)施用无机改良剂, 如氮、锌、磷、硒等矿物元素<sup>[48]</sup>。例如, 施用磷酸铵降低小麦籽粒中的镉浓度<sup>[49]</sup>, 硅的应用减少小麦籽粒中的镉浓度<sup>[50]</sup>, 同时调控土壤 pH, 降低重金属的可溶性和生物可利用性<sup>[51]</sup>。通过这些措施, 可有效降低谷物中重金属含量, 保护消费者健康, 并推动可持续农业的发展。

## 3 结束语

在谷物中重金属污染对健康影响的研究中, 面临的是较多复杂而多维的科学挑战。考虑到谷物作为全球人口的主要食物来源, 这些挑战的解决不仅关系到食品的安全性, 更直接影响到全球公共健康的水平。当前和未来的研

究需集中于发展先进的重金属检测技术、制定更加严格和具体的食品安全标准, 以及探索有效的重金属污染防治策略。在这个全球化和技术快速发展的时代, 跨国界的科研合作、数据共享和技术转移对于应对全球食品安全挑战至关重要。同时, 公众教育和意识提升也是关键, 通过增强社会对这一问题的认识, 促进健康和安全的食品消费习惯, 以期确保人类健康和福祉的持续改善。

## 参考文献

- [1] 庞淑婷, 刘颖. 中外谷物及其制品中污染物限量要求分析[J]. 标准科学, 2021, (3): 70-76.  
PANG ST, LIU Y. Analysis of maximum level of contaminants in cereals and their products at home and abroad [J]. Stand Sci, 2021, (3): 70-76.
- [2] 王成. 长三角地区土壤-小麦系统微量元素迁移的地球化学特征[D]. 南京: 南京大学, 2013.  
WANG C. Geochemical characteristics of trace elements transfer in the soil-wheat system from the Yangtze River delta area [D]. Nanjing: Nanjing University, 2013.
- [3] 李彭, 沈典英, 宋歌, 等. 食品中重金属脱除技术的最新研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(9): 78-84.  
LI P, SHEN DY, SONG G, et al. Research overview of effects of heavy metals interactions on crops quality and metabolomics [J]. J Food Saf Qual, 2023, 14(9): 78-84.
- [4] 杨小俊. 重金属作用对作物品质及代谢的影响研究概述[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(20): 7995-8003.  
YANG XJ. Research overview of effects of heavy metals interactions on crops quality and metabolomics [J]. J Food Saf Qual, 2021, 12(20): 7995-8003.
- [5] 陆美斌, 王步军, 李静梅, 等. 电感耦合等离子体质谱法测定谷物中重金属含量的方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(8): 2234-2237.  
LU MB, WANG BJ, LI JM, et al. Research of heavy metals determination in cereals by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Spectrosc Spectral Anal, 2012, 32(8): 2234-2237.
- [6] 王彩霞, 郭蓉, 程国霞, 等. 陕西省谷物中重金属污染状况及健康风险评估[J]. 卫生研究, 2016, 45(1): 35-38, 44.  
WANG CX, GUO R, CHENG GX, et al. Dietary exposure and health risk assessment of heavy metal in grains of Shanxi Province [J]. J Hyg Res, 2016, 45(1): 35-38, 44.
- [7] 肖致美, 毕晓辉, 冯银厂, 等. 天津市大气颗粒物污染特征与来源构成变化[J]. 环境科学研究, 2014, 27(3): 246-252.  
XIAO ZM, BI XH, FENG YC, et al. Variations of characteristics and sources of ambient particulate matter pollution in Tianjin City [J]. Res Environ Sci, 2014, 27(3): 246-252.
- [8] 李晶, 徐玉玲, 黎桂英, 等. 兰州市交通道路主要乔灌木植物叶片重金属积累及生理特性的分析[J]. 生态环境学报, 2019, 28(5): 999-1006.  
LI J, XU YL, LI GY, et al. Analyses of heavy metal accumulation and physiological characteristics in leaves of main arbor and shrub plants in traffic roads of Lanzhou City [J]. J Ecol Environ, 2019, 28(5): 999-1006.
- [9] 梁敏静, 熊凡, 曾经文, 等. 广州郊区三类工业企业周边农田土壤重金

- 属污染及生态风险评估[J]. 广东农业科学, 2021, 48(7): 103–110.
- LIANG MJ, XIONG F, ZENG JW, *et al.* Heavy metal pollution and ecological risk assessment of farmland soil around three types of industrial enterprises in Guangzhou Suburb [J]. *Guangdong Agric Sci*, 2021, 48(7): 103–110.
- [10] QI Z, GAO X, QI Y, *et al.* Spatial distribution of heavy metal contamination in mollisol dairy farm [J]. *Environ Pollut*, 2020, 263: 114621.
- [11] WANG H, DONG Y, YANG Y, *et al.* Changes in heavy metal contents in animal feeds and manures in an intensive animal production region of China [J]. *J Environ Sci (China)*, 2013, 25(12): 2435–2442.
- [12] GE D, GAO H, GUO N, *et al.* Heavy metals in grains from Jilin Province, China, and human health risk [J]. *J Food Prot*, 2020, 83(12): 2193–2199.
- [13] THAKUR M, WANG B, VERMA ML. Development and applications of nanobiosensors for sustainable agricultural and food industries: Recent developments, challenges and perspectives [J]. *Environ Technol Innov*, 2022, 26: 102371.
- [14] RAI M, RIBEIRO C, MATTOSO L, *et al.* Nanotechnologies in food and agriculture [J]. *Environ Pollut*, 2020, 263: 114621.
- [15] SEKHON BS. Nanotechnology in agri-food production: An overview [J]. *Nanotechnol Sci Appl*, 2014, 20(7): 31–53.
- [16] ALVARADO K, BOLANOS M, CAMACHO C, *et al.* Nanobiotechnology in agricultural sector: Overview and novel applications [J]. *J Biomater Nanobiotechnol*, 2019, 10: 120–141.
- [17] FARAHAT A, EFFENBERGER F, VINCK M. A novel feature-scrambling approach reveals the capacity of convolutional neural networks to learn spatial relations [J]. *Neural Networks*, 2023, 167: 400–414.
- [18] FENU G, MALLOCI FM. An application of machine learning technique in forecasting crop disease [J]. *Assoc Comput Mach*, 2019, 23: 76–82.
- [19] TOMBE R. Computer vision for smart farming and sustainable agriculture [C]. In *Proc 2020 IST-Africa Conf*, Kampala, Uganda, 2020.
- [20] ELENA A, LOUISE FM, DEARBHÁILE M, *et al.* Evaluating the impact of heavy metals on antimicrobial resistance in the primary food production environment: A scoping review [J]. *Environ Pollut*, 2023, 320: 4741.
- [21] SUSAN M, DONALD C, FRANK T, *et al.* Biotransfer of heavy metals along the soil-plant-edible insect-human food chain in Africa [J]. *Sci Total Environ*, 2023, 881: 131–163.
- [22] FENG X, ZHANG HH, YU PQ. X-ray fluorescence application in food, feed, and agricultural science: A critical review [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2021, 61(14): 2340–2350.
- [23] NIU S, ZHENG L, QAYYUM KA, *et al.* Laser-induced breakdown spectroscopic (LIBS) analysis of trace heavy metals enriched by Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles [J]. *Appl Spectrosc*, 2019, 73(4): 380–386.
- [24] DIEMER J, HEUMANN KG. Development of an ICP-IDMS method for accurate routine analyses of toxic heavy metals in polyolefins and comparison with results by TI-IDMS [J]. *Fresen J Anal Chem*, 2000, 368(1): 103–108.
- [25] SHARMA P, PANDEY V, SHARMA MMM, *et al.* A review on biosensors and nanosensors application in agroecosystems [J]. *Nanoscale Res Lett*, 2021, 16(1): 136.
- [26] GIANNOUKOS S, LEE CP, TARIK M, *et al.* Real-time detection of aerosol metals using online extractive electrospray ionization mass spectrometry [J]. *Anal Chem*, 2020, 92(1): 1316–1325.
- [27] HONGRUI Y, KUAN H, KAI Z, *et al.* Predicting heavy metal adsorption on soil with machine learning and mapping global distribution of soil adsorption capacities [J]. *Environ Sci Technol*, 2021, 55(20): 14316–14328.
- [28] XIAOYU X, SHOUZHI Y, YUNING W, *et al.* Nanomaterial-based sensors and strategies for heavy metal ion detection [J]. *Green Chem*, 2022, 2: 100020.
- [29] PERRY WJ, WEISS A, VAN R, *et al.* Integrated molecular imaging technologies for investigation of metals in biological systems: A brief review [J]. *Curr Opin Chem Biol*, 2020, 55: 127–135.
- [30] RUI L, HAN W, JING D, *et al.* Mercury pollution in vegetables, grains and soils from areas surrounding coal-fired power plants [J]. *Sci Rep*, 2017, 7(1): 46545.
- [31] SHARIF ES, FISCHBEIN A, KONIJIN A, *et al.* Re-emergence of lead poisoning from contaminated flour in a West Bank Palestinian village [J]. *Int J Occup Environ Health*, 2000, 6(3): 183–186.
- [32] NATHANIEL MM. Cadmium confusion: Do consumers need protection? [J]. *Environ Health Perspect*, 2010, 118(12): 528–534.
- [33] SINGH SK, GHOSH AK. Entry of arsenic into food material-A case study [J]. *World Appl Sci J*, 2011, 13: 385–390.
- [34] XIULI W, HONGTAO Z, QI L. Effects of phosphate and silicate combined application on cadmium form changes in heavy metal contaminated soil [J]. *Sustainability*, 2023, 15(5): 4503.
- [35] MOHD F, VIMALA B, DN R, *et al.* 9-atomic absorption spectroscopy for food quality evaluation [J]. *Food Qual Prefer*, 2019. DOI: 10.1080/10942912.2017.1354016
- [36] BOUDEBBOUZ A, BOUDALIA S, BOUSBIA A, *et al.* Heavy metals levels in raw cow milk and health risk assessment across the globe: A systematic review [J]. *Sci Total Environ*, 2021, 751: 141830.
- [37] TONG S, YANG L, GONG H, *et al.* Bioaccumulation characteristics, transfer model of heavy metals in soil-crop system and health assessment in plateau region, China [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2022, 241: 113733.
- [38] ZHAO Q, WANG Y, CAO Y, *et al.* Potential health risks of heavy metals in cultivated topsoil and grain, including correlations with human primary liver, lung and gastric cancer, in Anhui Province, Eastern China [J]. *Sci Total Environ*, 2014. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.09.086
- [39] YANG S, FENG W, WANG S, *et al.* Farmland heavy metals can migrate to deep soil at a regional scale: A case study on a wastewater-irrigated area in China [J]. *Environ Pollut*, 2021, 281: 116977.
- [40] ALI W, ZHANG H, MAO K, *et al.* Chromium contamination in paddy soil-rice systems and associated human health risks in Pakistan [J]. *Sci Total Environ*, 2022, 826: 153910.
- [41] CAKMAKCI T, SAHIN U. Productivity and heavy metal pollution management in a silage maize field with reduced recycled wastewater applications with different irrigation methods [J]. *J Environ Manage*, 2021, 291: 112602.

- [42] HEIDARI M, DARJANI T, ALIPOUR V. Heavy metal pollution of road dust in a city and its highly polluted suburb; quantitative source apportionment and source-specific ecological and health risk assessment [J]. *Chemosphere*, 2021, 273: 129656.
- [43] HUSSAIN B, ASHRAF MN, SHAFEEQ-UR-RAHMAN, *et al.* Cadmium stress in paddy fields: Effects of soil conditions and remediation strategies [J]. *Sci Total Environ*, 2021, 754: 142188.
- [44] BASHIR S, BAKHSH GA, IQBAL J, *et al.* Comparative role of animal manure and vegetable waste induced compost for polluted soil restoration and maize growth [J]. *Saud J Biol Sci*, 2021, 28(4): 2534–2539.
- [45] ALAMRI SA, SIDDIQUI MH, AL-KHAISHANY MY, *et al.* Ascorbic acid improves the tolerance of wheat plants to lead toxicity [J]. *J Plant Interact*, 2018, 13: 409–419.
- [46] AHMED A, HASNAIN S. Extraction and evaluation of indole acetic acid from indigenous auxin-producing rhizosphere bacteria [J]. *J Anim Plant Sci*, 2020, 30: 1024–1036.
- [47] SANGTHONG C, SETKIT K, PRAPAGDEE B. Improvement of cadmium phytoremediation after soil inoculation with a cadmium-resistant *Micrococcus* sp [J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2016, 23(1): 756–764.
- [48] RIZWAN M, ALI S, ABBAS T, *et al.* Cadmium minimization in wheat: A critical review [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2016, 130: 43–53.
- [49] SHI GL, ZHU S, BAI SN, *et al.* The transportation and accumulation of arsenic, cadmium, and phosphorus in 12 wheat cultivars and their relationships with each other [J]. *J Hazard Mater*, 2015, 299: 94–102.
- [50] NGUGI MM, GITARI HI, MUUI CW, *et al.* Growth tolerance, concentration, and uptake of heavy metals as ameliorated by silicon application in vegetables [J]. *Int J Phytoremediat*, 2022, 24(14): 1543–1556.
- [51] REHMAN MZU, RIZWAN M, RAUF A, *et al.* Split application of silicon in cadmium (Cd) spiked alkaline soil plays a vital role in decreasing Cd accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) grains [J]. *Chemosphere*, 2019, 226: 454–462.

(责任编辑: 张晓寒 韩晓红)

### 作者简介



李俊生, 博士, 教授, 主要研究方向为食品安全检测。

E-mail: guoxiaorui0213@163.com



秦 峥, 博士, 研究员, 主要研究方向为食品安全检测。

E-mail: 18645039597@163.com