

食品中镉污染的来源、危害及其治理技术研究进展

王金菲 李宇杭 郝思雨 张悦然 高妍 高云*

辽宁科技大学化学工程学院, 辽宁鞍山 114051

摘要: 围绕食品安全领域中镉污染问题的持续关注, 本研究聚焦食品体系内镉的迁移来源、毒性效应及控制路径, 对近年相关研究成果进行系统梳理。在来源层面, 分析工业排放、农业投入及食物链累积等多途径输入特征; 在危害层面, 归纳其对人体多系统的损伤表现及分子作用路径, 并结合膳食暴露模型评估潜在风险水平; 在技术层面, 总结检测手段的灵敏度演进及源头控制、过程调控与终端去除等多维治理策略的应用进展, 研究表明镉污染呈现来源复杂化与控制多环节化特征, 未来需强化协同治理与精准调控, 以提升食品安全保障能力。

关键词: 镉污染; 膳食暴露; 毒性机制; 降镉技术

DOI: 10.64649/yh.shygl.issn3105-0085.202605016

0 引言

食品安全领域对重金属风险的关注持续升温, 其中镉因其生物蓄积性与长期毒性特征而成为重点研究对象, 农田生态系统与工业活动的叠加作用, 使镉在食物链中的迁移行为更加复杂, 进而加剧膳食摄入的不确定性。在风险管控需求不断提升的背景下, 传统控制路径已难以覆盖多源输入与多环节传递特征, 相关研究逐渐向机制解析与过程调控并重的方向拓展, 这一趋势推动食品中镉污染研究从单一问题识别转向系统性风险治理。

1 食品中镉污染的来源

1.1 工业排放与环境介质来源

工业活动是食品中镉污染的重要外源输入端, 尤其集中于有色金属采选、冶炼、电镀、化工、蓄电池制造及含镉材料加工等行业, 上述生产过程中产生的含镉废气、废水和固体废弃物, 若在收集、处置或排放环节控制不足, 镉便会进入大气、水体和土壤等环境介质。大气颗粒物中的镉可随沉降作用进入农田表层土壤, 工业废水中的可溶态镉则更易沿灌溉系统扩散, 并在黏粒、有机质及铁锰氧化物表面吸附累积, 由于镉在土壤中迁移性较强, 酸性条件下活化程度升高, 作物根系吸收风险随之增加, 因而邻近矿区、冶炼厂及工业园区的农产品往往表现出较高镉残留水平, 其本质并非单一排放造成, 而是大气沉降、水体输入与土壤累积长期叠加后的结果。

1.2 农业投入与种植过程来源

农业生产环节中的镉输入具有持续性和隐蔽性, 其中磷肥、有机肥、污泥农用、农药残留及灌溉水质量均可能成为镉进入农田系统的途径。部分磷矿原料本身伴生镉, 长期施用低品质磷肥会造成土壤背景值缓慢抬升, 同时畜

禽粪肥和污泥若未经重金属限量筛查, 亦可能将镉重新带入耕作层, 种植过程中土壤 pH、氧化还原状态、阳离子交换量和根际分泌物共同影响镉的有效态比例, 此外水稻田在淹水与落干交替条件下, 镉的形态转化更为敏感, 落干阶段土壤氧化增强, 吸附态或硫化态镉可能重新释放, 增加稻根吸收量^[1]。不同作物及品种对镉的转运能力存在明显差异, 水稻、叶菜类和根茎类作物因吸收部位、蒸腾强度及转运蛋白表达不同, 容易形成差异化污染风险。

1.3 食物链富集及加工环节来源

镉进入食品体系后, 并不局限于初级农产品表面残留, 而是可伴随生物吸收、组织分配和食物链传递发生累积。植物性食品中, 镉通常经根系吸收后向茎叶和籽粒转运, 水稻籽粒中的镉积累与根部吸收、木质部运输及韧皮部再分配密切相关; 动物性食品中, 镉更多富集于肝、肾等代谢器官, 贝类、甲壳类及底栖鱼类因生活环境与摄食方式特殊, 也较易积累水体和沉积物中的镉。食品加工环节虽不是最主要输入源, 但在清洗水、加工设备、金属容器、包装材料或辅料控制不严时, 仍可能带来二次污染, 谷物碾磨、蔬菜清洗、发酵、热处理等过程会改变镉在食品中的分布形态与可迁移比例, 因此加工环节既可能降低部分可去除镉, 也可能因工艺和接触材料不当放大终端暴露风险。

2 食品中镉污染的危害

2.1 镉对人体健康的毒性效应

当含镉食品进入膳食结构后, 消化吸收环节会将部分可溶态镉转运至血液系统, 并在肝脏完成初步结合与转运调控, 随后逐步向肾脏等靶器官富集, 长期低剂量摄入条件下, 肾近曲小管细胞首先受到损伤, 表现为蛋白重吸收

功能下降及 $\beta 2$ -微球蛋白排泄升高,这一变化通常被视为早期肾毒性标志,但随体内蓄积量增加,镉对骨代谢的干扰逐渐显现,钙磷代谢失衡与骨矿化不足共同作用,可能诱发骨质疏松甚至骨痛症状。流行病学研究显示,持续暴露还与心血管系统异常及内分泌紊乱存在相关性,其机制涉及血管内皮功能受损及激素调节轴干扰,值得注意的是,镉在人体内半衰期较长,一旦累积至一定水平,即便外源暴露降低,组织损伤仍可能持续发展。

2.2 镉致毒的分子机制与路径

镉在细胞水平的毒性表达通常由多条分子通路协同驱动,其中氧化应激反应是最核心的触发环节之一,镉并不直接参与氧化还原反应,但可通过干扰线粒体电子传递链及抑制抗氧化酶活性,引发活性氧过量生成,进而导致脂质过氧化和细胞膜结构破坏^[2]。在金属离子稳态方面,镉与锌、钙等必需元素存在竞争关系,能够替代其在酶活性中心或信号通路中的位置,从而影响蛋白质构象与功能表达,进一步的研究表明,镉还可通过调控MAPK、NF- κ B等信号通路,诱导炎症反应及细胞凋亡程序启动,同时对DNA修复机制产生抑制作用,增加基因突变风险,这些分子层面的改变在长期暴露背景下逐步累积,最终转化为组织与器官功能损伤。

2.3 膳食摄入风险与暴露评估

围绕食品中镉的健康风险识别,膳食摄入量评估通常结合食物消费数据与污染水平测定结果进行量化分析。不同人群因饮食结构差异,其镉暴露水平呈现明显分层特征,例如以稻米为主食的人群,其膳食摄入贡献中谷物占比显著高于其他食物类别,风险表征过程中,多采用每日或每周摄入量与耐受摄入限值进行比值计算,从而判断潜在健康影响程度,而对于儿童与孕妇等敏感人群,由于体重基数较小且生理调节能力尚未完善,即便在相同污染水平下,其单位体重暴露剂量往往更高。近年来研究逐渐引入生物标志物监测与暴露模型耦合分析,以提高评估精度,使风险判定不再局限于外源摄入量估算,而是向体内负荷与健康效应关联方向延伸。

3 食品中镉污染的检测与治理技术

3.1 食品中镉污染检测方法进展

食品中镉污染检测通常以样品前处理、仪器测定和结果质控为核心环节展开,实践中较多采用微波消解联合石墨炉原子吸收光谱法、原子荧光光谱法及电感耦合等离子体质谱法。对于稻米、蔬菜、贝类等基质复杂样品,前处理阶段往往决定检测结果的稳定性,硝酸-过氧化氢体系微波消解适宜于破坏有机基质并释放结合态镉,可减少干法灰化造成的元素损失;

ICP-MS因检出限低、线性范围宽、可实现多元素同步测定,较多用于风险监测和标准限量判定,但其对实验条件、基体干扰校正及运行成本要求较高^[3]。基层监管场景中,阳极溶出伏安法、免疫传感器和纳米材料修饰电化学传感器逐渐受到关注,这类方法更侧重快速筛查,适宜于批量样品初检,为提升检测可信度,实际应用中往往采用快速筛查与精密仪器复核相结合的路径,即先在流通环节识别高风险样品,再通过标准方法完成确证分析,从而兼顾检测效率与结果准确性。

3.2 农田土壤镉污染源控制头控制技术

农田土壤镉污染源头控制的关键在于降低外源输入与削减土壤中镉的生物有效性,实践中通常围绕污染源识别、土壤钝化和安全利用分区展开。对于受矿山、冶炼和工业沉降影响的农田,治理前需判定镉的空间分布、形态组成及作物吸收风险,避免单纯依据总量作出修复决策,在中轻度镉污染耕地中,石灰、钙镁磷肥、生物炭、海泡石、膨润土及含铁锰改良剂较多用于原位钝化,它们可通过提高土壤pH、增强表面吸附、促进沉淀生成或改变镉赋存形态,降低可交换态镉比例;石灰改良对酸性稻田见效较快,但过量施用可能影响养分平衡;生物炭具有孔隙结构和含氧官能团,适合与有机培肥结合使用,但不同原料和热解温度会影响固定能力。对于高污染地块,单一钝化难以保证食用农产品达标,往往倾向于采取种植结构调整、休耕轮作、超积累植物提取或非食用作物替代等措施,使污染耕地从“末端超标治理”转向“分区分类安全利用”。

3.3 农业生产过程调控与阻控技术

农业生产过程中的镉阻控核心在于削弱根际界面中镉的活化水平并抑制作物体内转运效率,具体实施往往需围绕作物生理特性与土壤理化条件进行协同调控。水稻生产中,水分管理是较具操作性的调控手段,持续淹水可促进土壤还原环境形成,使镉与硫化物结合并降低其有效性,但长期淹水又可能提高砷迁移风险,因此实践中更适宜采用关键生育期控水策略,尤其在分蘖期至灌浆期维持适度还原状态;养分调控方面,硅肥可通过增强细胞壁结构与形成硅沉积屏障阻碍镉进入维管束,锌肥则通过竞争ZIP转运蛋白位点减少镉吸收,而铁肥在根表形成的铁膜可吸附并固定部分游离态镉离子,有机物料的引入则通过络合作用及微生物调节改变根际化学环境;品种选择环节中,低镉积累型品种通常表现出较低的OsNramp5等转运蛋白表达水平或更强的根部滞留能力,从而限制镉向籽粒分配^[4]。实际应用过程中,生产体系往往采用“品种筛选—水分调控—营养调节—改良剂配施”的组合路径,以在复杂田间条件下实现产量稳定与镉含量控制的动态平衡。

3.4 食品加工过程中的降镉技术

食品加工阶段的降镉技术主要针对已进入原料体系的镉进行削减,其效果受食品种类、镉结合形态和工艺条件影响较大。谷物加工中,镉在稻米中的分布并非均匀,糠层和胚部含量通常高于胚乳,适度碾磨能够降低部分镉含量,但过度精加工会造成膳食纤维、矿物质和维生素损失,因此更适宜与原料分级和批次管控配套使用;蔬菜加工环节,清洗、焯烫和酸化浸泡可去除表面附着或部分可溶态镉,但对细胞内结合态镉作用有限,工艺上需控制浸泡液pH、温度和时间,避免营养品质显著下降;水产品尤其是贝类和甲壳类食品中,镉常富集于内脏组织,去除肝胰腺等高积累部位是较直接的风险降低方式。近年来,发酵、酶解和吸附分离技术逐渐用于加工降镉研究,乳酸菌、酵母细胞壁多糖及改性膳食纤维能够借助羧基、羟基等官能团结合镉离子,并在液态或半固态食品中降低其游离比例,但在实际生产中,终端降镉不宜替代源头控制,而适合作为原料筛选后的补充措施,用于降低加工食品中的残留风险。

4 食品中镉污染研究的主要问题与发展趋势

当前食品中镉污染治理仍面临从实验效果向规模应用转化不足的问题,尤其在农田源头控制和食品加工降镉环节表现较为突出。

土壤钝化材料在盆栽或小区试验中往往能降低镉有效态,但进入连续种植条件后,pH回落、有机质矿化、淹水落干交替等因素会削弱固定效果,导致作物可食部位镉含量出现反弹,

部分改良剂还可能改变土壤养分供应或影响微生物群落,后续研究适宜加强多年定位试验和作物品质联动评价;农业生产阻控方面,低镉品种、水分管理和锌硅肥调控已具备较强实践基础,但不同地区土壤母质、污染形态和种植制度差异较大,统一技术模式难以精准适配,未来更倾向于建立“地块风险分级—品种匹配—农艺调控—收获检测”的闭环管理体系;食品加工降镉技术则需突破去除率与营养品质之间的矛盾,吸附、发酵和组织分离等工艺不宜只评价镉含量下降,还应同步考察蛋白质、矿物质、风味物质及生物可及性的变化^[5]。未来检测技术发展方向也将从单一终点检测转向现场筛查与实验室确证联动,借助电化学传感、便携式质谱和数据模型提高流通环节风险识别效率。总体来看,镉污染治理的重点将由末端削减转向全过程精准管控,在源头减量、生产阻控、加工优化和风险预警之间形成更稳定的技术组合。

5 结语

围绕食品体系中镉污染的来源识别、毒性表达及控制路径展开系统梳理后,可见其风险形成贯穿环境输入、生产调控与加工处理多个环节,单一措施难以实现稳定达标,实际应用更依赖多技术协同与分区管理。现有研究在检测灵敏度、土壤钝化材料及低积累品种筛选方面已形成一定基础,但在机制层面仍存在区域差异解释不足与长期稳定性评价缺乏的问题,后续研究往往倾向于将分子机制解析与田间实践结合,推动精准调控策略构建,同时在绿色修复材料及全过程风险评估模型方面深化应用。

参考文献:

- [1] 国际食品法典委员会拟制定预防和减少食品中镉污染的操作规范[J]. 食品与机械, 2024,40(02):8.
- [2] 张灼晖,朱凤,谢雨晨,等. 深圳市南山区市售食品中镉污染情况及暴露风险评估[J]. 现代预防医学, 2024,51(03):439-444.
- [3] 蒋伟,胡平国,曹璐. 简述食品中镉元素的危害及前处理方法[J]. 四川农业科技, 2024,(05):134-137.
- [4] 姚雪漫,张秋萍,蒋建荣,等. 动物性海产品中镉的健康风险评估的研究进展[J]. 预防医学论坛, 2022,28(11):872-875+880.
- [5] 伍世杰. 食品中重金属污染的来源追踪与治理策略研究[J]. 食品安全导刊, 2025,(08):190-192.

作者简介: 王金菲(2005.09—),女,汉,山西长治人,本科在读,研究方向:环境工程领域。

通讯作者: 高云(1969.11—),女,汉,辽宁鞍山人,硕士,教授,研究方向:生物化工。

项目信息: 辽宁省自然科学基金面上项目(项目编号:2024LNYKJ27)、国家级大学生创新创业训练计划项目(项目编号:202510146040)和辽宁科技大学大学生创新创业训练计划项目(项目编号:202610146136)资助。