

蒋沙沙, 霍永红, 李德海, 等. 大米中主要重金属污染分析及风险评估研究现状 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(2): 417–426. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022010215

JIANG Shasha, HUO Yonghong, LI Dehai, et al. Analysis of Heavy Metal Pollution in Rice and Its Status of Risk Assessment[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(2): 417–426. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022010215

· 专题综述 ·

大米中主要重金属污染分析及风险评估研究现状

蒋沙沙¹, 霍永红¹, 李德海^{1,*}, 马 莺², 王荣春², 卢卫红²

(1. 东北林业大学林学院, 黑龙江哈尔滨 150040;

2. 哈尔滨工业大学化工与化学学院, 黑龙江哈尔滨 150090)

摘要: 大米不仅在人们的日常饮食中扮演着重要角色, 而且对我国农产品贸易贡献巨大。然而大米中重金属污染已经成为威胁我国大米生产与人体健康的主要危害之一。本文概括了大米中重金属污染的主要来源、存在形式、以及检测分析方法, 主要陈述了大米中重金属污染现状以及防控措施, 并对大米中重金属的风险评估做出总结, 以期为大米重金属污染防控及污染风险评估提供理论参考。

关键词: 大米, 重金属, 残留, 危害, 风险评估

中图分类号: TS211.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)02-0417-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022010215



本文网刊:

Analysis of Heavy Metal Pollution in Rice and Its Status of Risk Assessment

JIANG Shasha¹, HUO Yonghong¹, LI Dehai^{1,*}, MA Ying², WANG Rongchun², LU Weihong²

(1. School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;

2. School of Chemistry and Chemical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: Rice not only plays an important role in people's daily diet, but also makes a huge contribution to China's agricultural products trade. However, heavy metal contamination in rice has become one of the main hazards about rice production and human health in China. In this paper, the main sources, existing forms, detection and analysis methods of heavy metal contamination in rice are reviewed, furthermore, the current situation, prevention and control measures, risk assessment of heavy metal contamination in rice are summarized. This review would provide a theoretical reference for the effective prevention and control, and the accurate risk assessment of heavy metal contamination in rice.

Key words: rice; heavy metals; residues; hazards; risk assessment

水稻(*Oryza sativa*)是草本稻属的一种, 所结子实成熟后即稻谷, 除去稻谷外表的壳后称大米或米, 是世界主要粮食农作物之一, 在粮食中稻属属于最主要而且历史悠久的一种。全世界约二分之一的人口将大米作为就餐主食, 亚洲人口的主食对水稻的依赖程度甚至超过 90%^[1]。中国水稻种植面积占全国粮

食作物的四分之一, 预计到 2050 年, 大米产量需要增长 60%~70% 才可以满足届时亚洲人口增长对主食的需求^[2]。大米中含有丰富的蛋白质, 其具有较高的赖氨酸、脂肪, 以及丰富的 B 族维生素等, 具有极高的营养价值^[3]。近年来, 我国农业政策推广以及广大农民种植水稻的积极性提高, 水稻的种植面积和产量

收稿日期: 2022-01-28

基金项目: 十三五国家重点研发计划 (SQ2017YFC160090-01); 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (2572019BA04); 哈尔滨市科技局创新研究基金项目 (2017RAQXJ091)。

作者简介: 蒋沙沙 (1992-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品安全与检测, E-mail: ssjiang139@163.com。

* 通信作者: 李德海 (1976-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品化学及植物有效成分研究, E-mail: lidehaineau@163.com。

持续增长。同时,随着官方媒体对“毒大米”、“镉大米”等大米安全事件的不间断报道,大米安全问题越来越受到研究者和消费者的关注。

大米中重金属残留量超标是影响大米安全的主要问题之一,随着我国经济迅速发展,工业领域制造、生产、排放等过程中造成大量的废气、废水、废渣逐渐进入了水稻种植环境中^[4]。同时以蓄积方式通过生物链累积到大米中,迫使重金属富集,出现大米中重金属含量过高,品质下降等问题^[5]。由于机体对重金属自排能力有限,随着重金属在体内累积,就会和机体中的蛋白质以及各种酶相互作用,造成蛋白质变性,在器官组织中大量沉积,造成中毒,严重者还造成各种系统性疾病。所以,在大米产业发展中,需要充分认识到重金属残留的危害性及主要形成原因,并在大米形成的各个环节进行有效规范,降低重金属残留。

随着国际以及国内消费市场大米需求量的增加和安全意识的增强,其重金属含量是否超标及质量是否安全等成为食用者倍受关注的问题。目前国内许多研究针对大米中重金属含量进行大量研究,但是针对大米中重金属含量超标的来源以及原因分析较少。大米是水稻从农田到餐桌的重要过程,所以对大米中重金属含量超标问题进行归纳总结,可以从主要环节有效地阻断大米中重金属的残留。本文从解决大米中重金属安全问题出发,对大米中重金属存在形式、以及检测分析方法进行简要介绍,主要提出了大米中重金属污染源以及防控措施,并就国内外重金属残留风险评估在大米中的研究进展进行了总结,以一个比较完整的体系预防大米中重金属含量超标问题,以期对大米中重金属控制及污染风险评估提供参考。

1 大米中重金属污染概述

近年来,我国对大米重金属污染导致的食用安全问题越来越重视。比较常见的重金属有汞、铅、砷、镉、镍、铬、银等 40 多种,其中砷、汞、铅、镉是大米中典型的 4 种重金属污染元素,易被大米吸收并积累^[6]。在国家食品安全标准 GB 2761-2017《食品安全国家标准食品中污染物限量》^[7]中规定了大米中砷、铅、镉的限量均为 0.2 mg/kg,汞为 0.02 mg/kg。大米主产区,居民习惯将大米作为一日三餐必不可少的主食之一^[8],这就增加重金属在人体内累积的风险。

1.1 大米中重金属的污染源

水稻生长过程受土壤、水、大气以及仓储加工过程的影响,都能使重金属在稻米中累积,成为稻米中重金属污染的主要来源^[9]。首先,水稻生长的土壤环境。水稻通过根系吸收积累在土壤中的重金属,有研究对广西岩溶与非岩溶地区的大米中的重金属含量做出对比,得到岩溶地区汞超标率为 1%,镉的超标率为 1.5%^[10]。这说明大米中重金属残留量受水稻种植土壤的影响;其次,水稻生长的水环境。有研究通

过改变灌溉水的 pH 以及水分的干湿条件,验证水稻吸收重金属镉的量随 pH 升高而变小,水分湿度越大其镉含量越高^[11]。再者,工业污染排放在大气中的漂浮重金属离子也会通过茎叶的呼吸作用在水稻中累积。Sun 等^[12]研究大气中镉金属对水稻生长的影响,发现稻早期对镉的吸收量比稻晚期增加了 12.3%,这就有可能导致大米中重金属含量的增加。最后,大米贮藏、运输和加工所用的金属器皿、包装材料等也会导致大米中重金属含量的增加。Luo 等^[13]研究采用金属仓中的重金属残留对大米贮藏的影响,大米中重金属离子的含量随时间增加而增加。大米中重金属污染来源是预防其含量超标的主要依据,针对水稻不同生长环境采取相应的优化措施可进一步控制大米中重金属的残留量。

1.2 大米中重金属的分布以及形态

目前国内各个地区生产的大米中重金属残留的含量不一,可能是由于各地区的种植环境不一而导致。从 2014~2021 年我国各地区代表性城市抽检大米中重金属含量如表 1 所示。从表 1 中可以看出,我国各个地区都会有重金属残留,但是大部分地区残留量在安全可控范围之内。另外,重金属在稻米中以不同的形式存在,且分布不均。重金属可通过与不同形式的蛋白质形成表观分子质量为 5.5×10^3 和 5.45×10^3 螯合物,比如砷与谷蛋白、镉与球蛋白结合^[14]。螯合物经高温或蛋白酶分解后的小分子结合体具有更稳定的形态,就导致了重金属在稻米中长期贮存^[15]。另外,陈义芳等^[16]针对稻米不同部位,针对镉和铅在大米中的分布以及含量进行分析,发现在稻米中的糊粉层积累量都比较大,胚中含量高于胚乳,颖壳和皮层中的含量最低^[17]。这与魏帅^[18]对镉元素在稻米中的富集部位相似。据报道,汞在水稻中毒性高低取决于其存在形态,大约 57% 有机汞积聚在麸皮中,43% 积聚在抛光大米(胚乳)中,而甲基汞 77% 集中在精米,23% 在麸皮^[19]。由此可知重金属在大米蛋白质较高的部位含量较高,并于之形成复合物。对水稻种植过程中重金属分布形态以及含量进行有效的分析检测,有效提出预防重金属残留超标的方案。

1.3 大米中重金属分析检测方法

检测大米中的重金属的方法有很多,近年来又层出不穷许多快速检测方法,无论那种方法都能够判断大米中重金属是否超标。分析其含量是否是在可控制的范围内,其常用的检测分析方法如表 2 所示。

1.4 大米中重金属超标对人体的危害

重金属是指原子密度不小于 5 g/cm^3 的金属,而在人体中累积达到一定程度就会造成中毒,镉、铅、砷、汞四种元素也是大米中对人体产生生物毒性比较显著的重金属^[39]。长期食用废水污染的“镉米”会引起身体不适,从而引发多种慢性疾病,最主要的病理表现就是“骨痛病”和“贫血”,还会损害人体肾脏功能、骨骼和消化系统,也对人体产生一定的“三效”

表 1 不同地区大米样品中重金属含量
Table 1 Contents of heavy metals in rice samples from different areas

地区	省以及自治区	大米类别	重金属含量平均值(mg/kg)				参考文献
			镉(Cd)	铅(Pb)	砷(As)	汞(Hg)	
东北地区	黑龙江省	黑龙江精米	0.004	0.085	0.114		[20]
	吉林省	吉林大米	0.04	0.07	0.05	0.01	[21]
	辽宁省	辽宁地区市面大米	0.244	0.21			[22]
华北地区	河北省	邯郸大米	0.15	0.28			[23]
	山东省	山东大米	0.06	0.06	0.03	0.01	[21]
	湖南省		0.076		0.027	0.011	[24]
华中地区	湖北省	湖北产地大米	0.087	0.028			[24]
	江西省		0.09	0.13	0.10	0.14	[21]
	江苏省	南京市销大米	0.031	0.067			[25]
华东地区	安徽省	安徽中部地区大米	0.01	0.031	0.027	0.004	[26]
	浙江省	浙江大米	0.08	0.12	0.07	0.13	[18]
	广东省	广州产地大米	0.13	0.15	0.16	0.01	[18]
华南地区	广西省		0.084	0.06	0.033	0.021	[24]
	福建省	福建产地大米	0.003	0.014	0.015	0.05	[24]
西北地区	甘肃省	甘肃产地大米	0.05	0.03	0.02	0.01	[21]
	宁夏				0.012	0.016	[24]
	云南省		0.04		0.019		[24]
西南地区	重庆市	江津区大米	0.032		0.176		[27]
	贵阳市	市售大米	0.073	0.021	0.007		[24]

表 2 大米中重金属分析检测方法
Table 2 Methods for determination of heavy metals in rice

方法	作用原理	金属	优点	缺点	参考文献
水提法	使大米中部分淀粉和蛋白质溶出, 重金属则以游离态转移至浸泡液中。	铜、锰、锌	操作简单, 无化学残留。	重金属不易从大米中分离, 具有一定的局限性。	[28]
酸浸提法	低浓度的酸在特定温度下浸泡稻米一段时间, 使其中的重金属元素游离出来, 再直接取上清液上机检测。	镉、铅	操作简单, 成本低廉。	风味、口感较差, 破坏营养成分。	[29]
微波消解法		镉、汞	可高压密封, 化学试剂消耗少、准确度高。	设备较为昂贵, 一次处理样品数量较少, 能耗较高。	[30]
电化学分析法	根据电化学性质来对物质中重金属的组成和含量进行测定。	砷、铜	具有灵敏度高、重现性好、成本低和分析范围广的优点。		[31]
原子吸收光谱法(AAS)	测定样品中需要检测的微量重金属元素在受到特定刺激后, 产生特征反应。	镉、铅	灵敏度高, 操作简单, 检测限低。	仪器设备价格较高, 干扰比较严重, 不能同时测定多种元素。	[32]
原子荧光光谱法(AFS)	特定的基态吸收特定频率的辐射, 检测器测定原子发出的荧光而实现对元素的测定。	铅、砷	灵敏度高, 方法简单, 选择性强, 可同时测定多种金属元素。	检测设备较昂贵, 应用面窄, 分析周期较长, 且测定时受散射光影响较为严重。	[33]
电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)	利用色谱柱将重金属离子与有机试剂发生反应形成的络合物分离成单个成分, 再通过检测器对其进行检测。	镉、汞、铅	灵敏度高, 线性范围宽, 可同时测定多种元素。	测定结果不够准确, 价格较贵, 样品的前处理繁琐, 易受污染。	[34]
能量色散X射线荧光光谱法	利用不同元素辐射X射线荧光光子能量的不同来进行元素的鉴定。	镉、汞	无损检测, 分析速度快, 含量分析范围宽且对环境要求低。	准确度不够, 只能用于初筛和现场快检。	[35]
酶联免疫吸附快速检测法(ELISA)	设计合成重金属的半抗原, 结合载体蛋白合成人工抗原, 然后通过免疫动物获得相关特异性抗体, 制得相应检测卡。	镉、铅	方法快速、简便、灵敏、价廉, 时间短。		[36]
试纸比色检测法(CTP)	一种直接将显色剂涂抹于试纸表层, 与试液接触, 可以通过试纸颜色变化直接判断结果的方法。		仪器体积小, 携带方便。	无法精确测定含量。	[37]
石墨炉原子吸收光谱法(GFAAS)	大米灰化或者酸消解后注入一定量样品液于原子吸收分光光度计石墨炉中, 检出即为金属离子含量。	镉、铅、砷、汞	准确度、灵敏度高, 精密度高, 可用于少量样品的直接分析。		[38]

作用^[40]。镉的急性毒性表现为急剧的胃肠刺激症状, 慢性毒性表现为抑制巨噬细胞的吞噬功能^[41]。可溶性镉化合物通过抑制人体代谢过程中的各种巯基酶, 使组织代谢系统异常变化, 损伤局部组织细胞, 严重者引起炎症和水肿^[42]。另外对于人体血液运输系统, 绝大部分的镉进入血液后会与血红蛋白结合并存在

于红细胞中,还会影响铜、锌等微量元素的代谢,阻碍血红蛋白的合成,所以镉中毒者常有贫血症状的发生。铅的急性中毒表现为胃肠刺激症状,慢性毒性表现多为功能损伤,比如肝肿大、高血压、黄疸等。铅和镉中毒表现往往也会导致贫血,其原因之一是铅可以打破钙和铁的平衡,通过取代亚铁螯合酶中的铁从而破坏铁与血红蛋白的结合。四乙基铅是铅化合的一种形态,一旦中毒后攻击人体的免疫系统就会使白细胞数减少,导致白细胞的吞噬能力下降,从而降低机体的免疫力^[43]。人体中砷的积累会引起组织损害和机体障碍,主要集中在神经系统。砷中毒主要表现为急性胃肠炎,慢性砷中毒的主要表现为神经系统病变^[44]。砷在人体内可转化成As(III)而增强毒性,并且在细胞的代谢活动中与过氧化酶(GPx)、谷胱甘肽还原酶(GR)、谷胱甘肽转移酶(GST)等结合,直接或间接地影响细胞活动中的氧化、还原以及代谢去毒性等过程,从而影响人体代谢途径。大米中残留的重金属会对人体产生一定的生理毒性。长期食用重金属超标的大米会产生一系列的健康问题,使人体长期处于健康风险之中,就会引发各种疾病。

2 影响大米中重金属污染因素

大米中重金属污染主要在于水稻的生长环境的影响因素,比如土壤、水资源以及大气环境等,其次是水稻自身调控系统,再者,大米储藏、烹饪过程。在自然条件下,土壤中的重金属一般以低浓度存在,而来自工业活动、农业活动和运输的大气中颗粒物(PM)的沉积,如采矿活动、废水灌溉,农药和化肥的施用是主要的人为来源,不断将重金属引入稻田。迫使水稻生长过程吸收过多的重金属,最终使大米中重金属含量超标。

2.1 土壤中重金属含量对大米的影响

土壤是生物圈的实质性组成部分,作为水稻正常生长的一个重要载体,其直接关系到大米质量安全^[45]。土壤理化性质,如pH、土壤有机质(SOM)、阳离子交换能力(CEC)、土壤质地和粘土含量都会影响稻谷中重金属的积累^[46]。土壤酸化使土壤-作物体系运输重金属的功能降低,促进重金属在水稻体内积累^[47]。此外,在2014年《全国土壤污染状况调查公报》中显示^[48],我国土壤重金属污染超标率达到7.0%。农业部和农村地区稻米及其产品质量监督检查中心报告,中国11个省25个地区耕地土壤重金属污染,每年造成粮食损失1200多万吨,直接经济损失300多亿元,这也对大米的市场经济造成严重的损失。水稻种植过程中使用的化肥多由化石原料制得,通常含有重金属物质。磷矿石常有铬、镉、砷等造成土壤中重金属的积累,从而能够在水稻中累积^[49]。这都破坏了水稻种植的土壤环境,不仅使大米产量大大减少,还给重金属在大米中的污染带来了一定的风险。

2.2 水资源对大米中重金属含量的影响

在水稻生长过程中,水资源是影响水稻安全的重要因素。灌溉水直接影响水稻的生长发育,Phuc等^[50]探究了西北三角洲灌溉水中镉、砷、汞横向迁移过程中的迁移规律、赋存状况以及分布特征,通过水稻对灌溉水的吸附、解吸、定量拟合,污染物含量受沿程水资源、雨水冲刷的影响。另外,甲基汞对氨基酸中的巯基配体有很高的亲和力,这会导致蛋白质结构的改变^[51]。河、湖周边的工业区不合理排放污水,灌溉水稻后会导致重金属含量的增加。Rahman等^[52]收集28个织机染料排放水样本,分别用无污染、不合格与合格的织机染色排放水对水稻进行灌溉,通过分析,在不合格排放水中生长的水稻幼苗体内重金属含量超出2.08%,水稻重金属含量随着灌溉水中重金属含量的增加而增加。水资源污染最大的源头是缺乏对人类废弃物的充分处理,以及对工业和农业废弃物的不当管理。所以,需要加强水质管理,减弱水稻灌溉水中重金属离子的吸附。

2.3 大气中的重金属含量对大米的影响

近年来,由于工业排放的重金属粉尘污染对公众健康和可持续发展构成了一定的风险,使我国乡村农业受各种重金属污染危害的形势更加严峻。并且大气颗粒物中镉、铅含量与土壤-农作物中镉、铅的含量存在正相关^[53]。而大气中的重金属可以通过质子泵,共转运蛋白和抗转运蛋白以及离子通道的方式在大米中的富集^[54]。赵多勇^[55]采用铅同位素指纹方法对西北某工业区周边水稻中铅含量进行了分析,其贡献率在90%以上,表明空气中沉降物中所含铅是工业区水稻中铅污染的主要来源。另外,Wei等^[56]研究大气沉降引入的重金属对稻米的影响,得出污染区露天种植水稻比农村大棚种植水稻茎叶和谷壳重金属含量高。说明大米中重金属含量受种植大气环境的影响。采矿业使用低效的冶炼厂,大量的汞释放到大气中,然后通过湿或干沉降沉积到附近的稻田^[57]。所以,要加强大气排放的管理,尤其是相关水稻生长区域的大气排放,以减少大气中重金属离子的漂浮。

2.4 其他

有一部分重金属会在稻米表面残留,稻米的加工过程中分别会将杂质、谷壳和米糠等部分依次去除。因此稻米加工过程也是一种大米降重金属的方法^[58]。田阳^[59]以糙米为材料,对稻壳进行镉含量测定,结果表明,稻壳中镉含量大致为麸皮>颖壳>外胚乳>中胚乳>核心胚乳,并且,随着碾米精度的提高,稻米中镉的含量逐渐降低。另外,洗脱也能减少大米中重金属的残留。Sharafi等^[60]通过研究水稻浸泡大米后镉含量变化,浸泡时间从1~12 h,镉的脱除率提高到了16.6%,但是也有研究表明仅靠清洗的办法难以去除大米本身重金属污染^[61]。大米饭烹饪方法也影响熟米饭中总有机砷的含量,在高温条件下可能

导致砷与大米中的蛋白质发生螯合作用^[62]。

3 预防大米中重金属超标的主要措施

预防大米中重金属超标, 主要通过减少它们在生产环境中重金属的浓度。通过修复、改良技术对重金属在稻田中的残留进行固定或转化, 并根据稻田特点通过基因手段选定适合的水稻品种, 最终减少重金属在大米中的累积。

3.1 土壤中不同改良剂对金属离子的吸附

改良剂具有孔隙率高和表面积大的特点, 通过沉淀、吸附、阳离子交换和表面络合的方式来固定重金属, 使其适合从受污染的水溶液中吸附重金属^[63]。生物炭是很好的土壤改良剂, 能够将重金属保留在土壤中, 使重金属固定在原位^[64]。Seleiman 等^[65] 研究报道镉污染土壤施用土壤改良剂(PAM)后, 通过影响土壤氮、磷和钾等元素的循环转化, 提高土壤各养分元素的活性。还有研究显示改良剂的比表面积和阳离子交换量较大, 且富含羧基、羟基、羰基、和酮基等含氧活性官能团, 这些官能团解离释放出质子, 通过静电引力吸附土壤中的 Cu^{2+} 和 Cd^{2+} ^[66]。此外, 各官能团中的氢、氮、氧、磷和硫可作为配位原子与土壤中的 Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 发生配位络合反应使其被吸附固定, 从而减少重金属在水稻上的吸附^[67]。Rehman 等^[68] 研究了石膏改良剂在镉污染水稻田中的应用, 显著降低了水稻秸秆对镉的吸收和富集, 提高了水稻产量。改良剂能使重金属固定在土壤中, 显著提高土壤团聚体稳定性、土壤透气性和保水的能力, 减少了水稻对重金属的吸收进而降低了重金属的生物毒性。通过施加改良剂对重金属污染进行治理与修复已经越来越受到国内外诸多学者的关注, 并取得了一定的研究成果。

3.2 对稻田使用水管理

水稻灌溉也是水稻中重金属污染的重要来源。研究表明, 施用磷灰石、石灰稻草、硅肥、富硒叶面肥和多羟基氨基酸螯合剂等, 并结合土壤 pH 调节灌溉, 可以大大降低稻米中重金属的残留^[69]。最主要的是对灌溉措施进行调整。Peng 等^[70] 采用干湿交替法(AWD)将 As(III)转化为 As(V), As(V)水溶性较低, 因此植物吸收较少, 抽穗前后淹水降低镉浓度, 而好氧条件增加水稻镉浓度, AWD 条件限制了甲基化微生物的活性, 导致稻谷中的 MeHg 和 THg 浓度降低。自然灾害会改变水稻-水系统的酸度平衡, 也会影响部分重金属的吸收。Pan 等^[71] 研究发现当洪水期使水稻土-水系统处于缺氧状态, 促进了水稻土-水系统中铁矿物的还原溶解, 并释放出 As(III), 水中的胶体颗粒表面的 Eh 负电荷随 pH 的增加而增加, 使 As(III)和 As(V)在水稻种植溶液中的解吸。所以, 要保证水稻生长安全不但要考虑水质安全性, 也需要考虑灌溉水使用的方法以及极端环境条件对稻田-水系的影响。

3.3 对重金属污染进行修复技术

水稻重金属污染修复方法众多, 最常用的治理方法包括物理修复、化学修复、微生物修复以及植物修复^[72]。Li 等^[73] 采用土壤补充 2% 的镉修复, 稻谷镉和铅的含量分别下降 85% 和 77%。对于化学修复, 土壤中的 pH 和 Eh 是影响水稻镉吸收的重要环境因子, 在碱性和还原性(低 Eh 值)条件下, 促进了土壤对镉的吸附, pH 的升高, 降低了土壤镉的迁移性和生物有效性, 从而抑制了水稻对镉的吸收^[74]。生物修复被认为是最有应用前景的土壤修复技术, 主要包括细菌、真菌、藻类、放线菌等。Lin 等^[75] 得到 3 株耐镉细菌能显著减少镉污染土壤中水稻籽粒中镉的积累。微生物具有羧基(COOH^-)、氨基(NH_2)、羟基(OH^-)等功能基团, 通过表面络合作用在细胞壁上去除溶液中的 Cd^{2+} , 可以减少镉在稻米中的积累^[76]。另外, 水生植物对水稻的水环境也起到净置作用, 通过种植梭鱼草、狐尾藻、轮叶黑藻 3 种水生植物, 得出对稻田灌溉水中镉具有较好的去除能力, 镉的平均去除率分别高达 65%、70% 和 91%, 可有效降低湿地系统中重金属镉浓度^[77]。

3.4 利用遗传学降低重金属在大米中的累积

选择和培育低重金属积累的水稻品种是降低稻米中重金属积累的有效方法, 相关基因也能够选择性的控制水稻中重金属含量。Suriyagoda 等^[78] 研究 *OsABCC1* 基因可以通过将砷隔离在弥漫维管束的韧皮部伴细胞的液泡中来限制其在稻粒中的分布^[79]。并且, *OsHAC1;1*、*OsHAC1;2*、*OsHAC4* 这些基因有助于将砷酸盐转化为亚砷酸盐, 促进亚砷酸盐从根部向土壤外排, 降低砷含量^[80-81]。水稻植株的蛋白表达水平也会影响重金属在稻米颗粒中的累积。Lsi2 就是这种硅外排转运蛋白, 可介导 As(III)外排到水稻植物的木质部。减少在芽和籽粒中的积累^[82]。因此, 转基因或非转基因水稻(突变体)可以成为降低水稻中重金属水平的潜在技术, 并减少重金属在稻米中的沉积。另外, 育种调控措施也是利用分子生物学和遗传方法实现育种调控, 培育出低镉水稻品种, 从源头上控制稻米的镉含量。刘芬等^[83] 通过转基因技术使水稻植株多代回交, 最终克隆出正向调控水稻叶片镉含量的基因 *CAL1*, 能够与镉特异螯合, 这些螯合态的镉经木质部位长距离运输, 最终在叶片中大量积累, 但不向水稻籽粒积累, 会大大减少大米中镉的含量。

4 大米中重金属污染风险评估

具有持久性和生物蓄积性的重金属是中国食品安全最危险的污染, 重金属可能会构成重大的膳食与健康风险。近年来重金属的水稻风险评估在中国得到了广泛的研究, 因此, 了解重金属在水稻中的污染状况并评估其健康危害具有深远的意义。而典型的“农田到餐桌”链条的风险评估方法如图 1 所示。

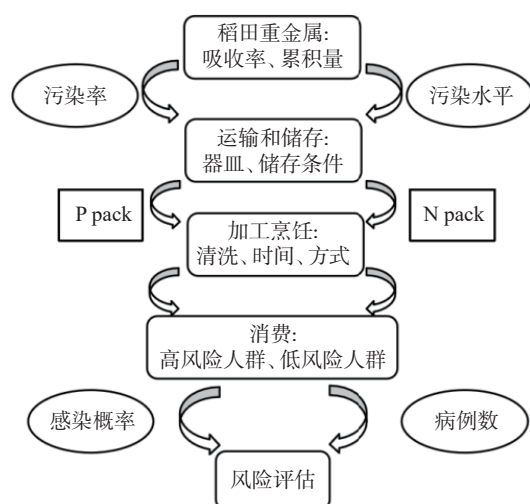


图1 大米中从“农田到餐厅”风险评估

Fig.1 Risk assessment of rice from “farm to restaurant”

4.1 大米中重金属风险评估的方法

大米中重金属风险评估的关键是将重金属预测暴露水平与预测无效应水平的浓度、剂量进行比较,计算危害指数(HI)以评估潜风险。目前国内外评价稻米中重金属污染风险的常用方法有单因子污染指数法、综合因子污染指数法等^[84]。单因子污染指数法是通过计算超标指数来确定评价等级的方法。袁余洋等^[85]采用单因子污染指数法对重庆江津区自产大米中重金属的健康风险进行评估,其中镁、锰、铜的单因子污染指数均小于1,属于清洁水平,但镉、砷、汞属于轻度污染,存在食用风险。综合因子污染指数法是选取多个指标,在综合污染的多因素指标影响条件下进行统计,用对应数值来评价污染状况。有研究就用综合因子污染指数法评估了奥莫尔稻田土壤、稻粒中潜在有毒金属的形态和人类健康风险。以汞、铅、镉、砷含量为检测指标,得出数(P_m) ≤ 0.7 安全域,表明其没有暴露可能的风险^[86]。由此可见,这两种主要的评估方法只是从不同的评价参数或者评价范围,来对大米中重金属的含量进行风险评估。

4.2 健康风险评估

在对大米中的重金属进行风险评估的四个部分中,危害识别和危害特征描述主要以重金属为对象,针对大米的定量暴露评估和风险特征进行描述^[87]。定量暴露评估是暴露量的数值型描述,风险特征描述是根据前三个部分的结果,对风险结果进行估计和输出的过程。吴科堰等^[88]根据GB 15618-2018中的污染风险筛选值。采用阶层分析了研究区农用地表层土壤中重金属Zn、Cr、Pb、Ni、As、Cu、Cd和Hg的平均含量。也有研究根据污染指数结果分析,研究区内砷和镉已受不同程度污染,8种重金属元素的危害指数(R)值为69.00,表明研究区水稻土壤存在轻微的生态危害^[89]。再者,依据健康风险评价模型,评价江津区大米中重金属的年人均非致癌和致癌风险系数,分别为 $1.7E-07$ 和 $7.1E-08$,远小于USEPA

推荐的风险水平(10^{-6})。可见,经大米摄入的重金属非致癌健康风险处于安全范围^[90]。Gao等^[91]对大米中重金属风险评估表明,非致癌风险主要由Cr引起,成人平均HI值为6.48,儿童为39.01。因此,儿童对土壤中的重金属面临更高的威胁。健康风险评估对重金属污染的控制和环境管理提供了基础信息,为了保证人体最大摄入重金属水平量,需要对大米中重金属进行健康风险评价,用以确定大米的食用健康。

4.3 膳食暴露评估

膳食暴露风险评估方法以公式计算消费者摄入重金属的分量,并与联合国粮食及农业组织/世界卫生组织联合食品添加剂专家委员会(JECFA)的每周可耐受摄入量作比较,以评估从大米摄入重金属的风险^[92]。目前,有关膳食摄入量的风险评估方法主要有参数概率评估和简单分布评估法等^[93]。叶文慧等^[94]用概率评估研究了大米中镉的膳食暴露情况。结果显示,稻谷经一次和两次漂洗后,镉暴露平均值分别为0.034和0.033 $\mu\text{g/kg}$,对一般人群不构成健康风险,但是,对敏感人群的健康风险概率分别为0.09%和0.06%。从镉暴露值与健康风险概率分析得出对于敏感人群(婴幼儿、病患者、老年人)具有一定的健康风险。把污染数据和食物消费量结合起来,提供可靠的摄入量数据,以便对重金属摄入量进行定性或定量评估。蒋玉艳等^[95]对广西居民39类大米中镉的膳食暴露风险进行评估。采用简单分布评估法并参考镉的暂定每月可耐受摄入量(PTMI),得出镉的平均含量为0.086 mg/kg ,说明了广西居民膳食大米中镉的暴露水平较高,应引起重视。大米是逐步成为全国的主粮之一,应加强对大米重金属污染从农田到餐桌全环节的研究,从源头控制污染风险,做出合理评估。

5 结语与展望

大米中重金属的含量、类型和形态与水稻品种、生长环境、水稻对重金属的积累能力以及途径有关。大米中重金属的主要来源是在水稻的生长过程中就会伴随着重金属的积累,所以对其重金属的防控需要从水稻的生长环境出发。当然,大米的储藏运输、加工销售、食用环节也会产生一定的影响。因此,根据水稻的特点,科学处理各种栽培条件,探索切实有效的方法来减少水稻对重金属的吸收。评估大米中重金属膳食、健康风险。

首先,从水稻生长周围环境入手,改变土壤的氧化还原环境,净化灌溉用水,减少大气排放。另外,从水稻本身出发,筛选一些吸重金属能力低的现有水稻品种或改良水稻品种的基因类型,以减少重金属的吸收,在未来是一个研究热点。

其次,大米应选择不锈钢器皿在阴凉通风处储存与销售。加工过程在使用金属材质仪器上面应加一层防护垫,从而减少大米中重金属不必要的残留量

超标,并有效减少对人体健康的危害。

再者,必须对大米中的重金属含量进行系统行风险评估,从人体摄入量评估开始,规避其对重金属富集作用而产生的健康风险。

最后,根据风险评估结果,利用模型选择风险区并进行风险区划,给出定性的风险评级。构建稻米中重金属多介质污染物变化模型,明确污染物的变化情况、流动情况以及土壤表面暴露情况。从而预估重金属对大米的危害风险,最大程度减少对人体的伤害。

参考文献

- [1] HUANG J, GUO S, ZENG G M, et al. A new exploration of health risk assessment quantification from sources of soil heavy metals under different land use[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 243: 49–58.
- [2] 杨文蕾, 沈亚婷. 水稻对砷吸收的机理及控制砷吸收的农艺途径研究进展[J]. *岩矿测试*, 2020, 39(4): 475–492. [YANG W L, SHEN Y T. Mechanism of arsenic uptake by rice and agronomic approaches to control arsenic uptake[J]. *Rock Test*, 2020, 39(4): 475–492.]
- [3] 孔宪琴, 张小惠, 李春生, 等. 水稻等重要作物种子的保存与管理体系探究[J]. *中国稻米*, 2018, 24(4): 91–95. [KONG X Q, ZHANG X H, LI C S, et al. Study on seed conservation and management system of rice and other important crops[J]. *China Rice*, 2018, 24(4): 91–95.]
- [4] NAG R, OROURKE S M, CUMMINS E. Risk factors and assessment strategies for the evaluation of human or environmental risk from metal(loid)s—a focus on Ireland[J]. *Sci Total Environ*, 2021, 24(8): 149839.
- [5] YANG D Q, LIU S X, XIA S P, et al. Effects of cadmium stress on the growth of rice seedlings[J]. *Agricultural Science & Technology*, 2019, 20(3): 11–16.
- [6] 魏益民, 魏帅, 郭波莉, 等. 含镉稻米的分布及治理技术概述[J]. *食品科学技术学报*, 2013, 31(2): 1–6. [WEI Y M, WEI S, GUO B L, et al. Distribution and control techniques of rice containing cadmium[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2013, 31(2): 1–6.]
- [7] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 国家食品药品监督管理总局. GB 2761-2017 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. [National Health and Family Planning Commission. China Food and Drug Administration. GB 2761-2017 National standard for food safety. Limits for contaminants in food[S]. Beijing: China Standard Press, 2017.]
- [8] JIANG K, DENG X, ZHOU H N, et al. Health risk assessment of Cd pollution in irrigated paddy field system: A field investigation in Hunan Province, China[J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2021, 27(2): 352–367.
- [9] DENG MEIHUA, MALIK A, ZHANG Q, et al. Improving Cd risk managements of rice cropping system by integrating source-soil-rice-human chain for a typical intensive industrial and agricultural region[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 313: 127883.
- [10] QIONG Y, ZHONG F Y. Ecological risk assessment of Cd and other heavy metals in soil-rice system in the karst areas with high geochemical background of Guangxi, China[J]. *Science China (Earth Sciences)*, 2021, 64(7): 1126–1139.
- [11] 王玥. pH 和淹水条件对水稻与东南景天间作体系中水稻吸收镉的影响[D]. 广州: 华南农业大学, 2018. [WANG Y. Effects of pH and flooding conditions on cadmium uptake by rice in intercropping system with sedum alfredii[J]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2018.]
- [12] SUN L J, WANG J, SONG K, et al. Transcriptome analysis of rice (*Oryza sativa* L.) shoots responsive to cadmium stress[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1–2): 10177.
- [13] LUO Y, HUANG D, WU L, et al. The impact of metal silos on rice storage and storage losses in China[J]. *Food Sec*, 2021, 14(1): 81–92.
- [14] KONG F, LU S. Soil inorganic amendments produce safe rice by reducing the transfer of Cd and increasing key amino acids in brown rice[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2022(1): 1001–0742.
- [15] 郑涵. 稻田土壤中 Cd 形态与有效性主要影响因子与调控关键技术[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020. [ZHENG H. Main influencing factors and key regulation techniques of Cd form and availability in paddy soil[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020.]
- [16] 陈义芳, 周卫东, 刘爱平, 等. 水稻籽粒不同部位 P 与 Al、Cd、Pb 含量的关系[J]. *江苏农业学报*, 2007(2): 93–97. [CHEN Y F, ZHOU W D, LIU A P, et al. Relationship between P and Al, Cd, Pb contents in different parts of rice grain[J]. *Jiangsu Agricultural Journal*, 2007(2): 93–97.]
- [17] HAO X H, ZENG M, WANG J, et al. A node-expressed transporter OsCCX2 is involved in grain cadmium accumulation of rice[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 476.
- [18] 魏帅. 稻米中镉元素分布部位及赋存形态研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016. [WEI S. Distribution and speciation of Cd in rice[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016.]
- [19] WILLIAMS P N, ZHANG H, DAVISON W, et al. Organic matter solid phase interactions are critical for predicting arsenic release and plant uptake in Bangladesh paddy soils[J]. *Environ Technol*, 2011, 45(14): 6080–6087.
- [20] 张昌. 黑龙江主产区土壤-水稻系统重金属转移建模及风险评估[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2020. [ZHANG C. Transfer modeling and risk assessment of heavy metals in soil-rice system in main production areas of Heilongjiang[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2020.]
- [21] YONG F, SUN X, YANG W, et al. Concentrations and health risks of lead, cadmium, arsenic, and mercury in rice and edible mushrooms in China[J]. *Food Chemistry*, 2014, 147(15): 147–151.
- [22] 韩晶. 辽宁地区大米中重金属检测探析[J]. *食品安全导刊*, 2021(36): 109–111, 115. [HAN J. Detection of heavy metals in rice in Liaoning province[J]. *Food Safety Guide*, 2021(36): 109–111, 115.]
- [23] 李颖, 刘国, 谢强, 等. 邯郸市某冶炼厂周边小麦体内重金属含量研究[J]. *四川环境*, 2017, 36(4): 43–46. [LI Y, LIU G, XIE

- Q, et al. Study on heavy metal contents in wheat around a smelter in Handan[J]. *Sichuan Environment*, 2017, 36(4): 43–46.]
- [24] 覃焱, 韦燕燕, 顾明华. 中国市售大米重金属含量及健康风险评估[J]. *食品工业*, 2020, 41(11): 332–335. [TAN Y, WEI Y Y, GU M H. Heavy metal content and health risk assessment of rice sold in China[J]. *Food Industry*, 2020, 41(11): 332–335.]
- [25] 何露露, 贾非然, 李欣童, 等. 南京市市售大米、蔬菜中6种微量元素含量调查及健康风险评估[J]. *职业与健康*, 2020, 36(24): 3364–3367. [HE L L, JIA F R, LI X T, et al. Investigation and health risk assessment of 6 micronutrient in rice and vegetables sold in Nanjing[J]. *Occupation and Health*, 2020, 36(24): 3364–3367.]
- [26] 刘文慧. 安徽某地农田土壤重金属生态风险评价[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020. [LIU W H. Ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils in Anhui province[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020.]
- [27] 邹勇, 曾卓华, 方立魁, 等. 优质重庆高山贡米筛选及其理化成分与食味特性关系研究[J]. *中国粮油学报*, 2022, 37(3): 17–24. [ZOU Y, ZENG Z H, FANG L K, et al. Screening of high-quality Gongmi from Chongqing mountain and study on the relationship between its physicochemical components and eating characteristics[J]. *Chinese Journal of Grain and Oil*, 2022, 37(3): 17–24.]
- [28] MIHUCZ V G, SILVERSMIT G, SZALOKI I, et al. Removal of some elements from washed and cooked rice studied by inductively coupled plasma mass spectrometry and synchrotron based confocal micro-X-ray fluorescence[J]. *Food Chemistry*, 2010, 121(1): 290–297.]
- [29] FENG W, FAN D, LI K, et al. Removal of cadmium from rice grains by acid soaking and quality evaluation of decontaminated rice[J]. *Food Chemistry*, 2021, 371: 131099.]
- [30] 余雅芹. 食品中铅污染状况及其健康风险评估研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2014. [YU Y C. Study on the status and health risk assessment of lead contamination in food[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2014.]
- [31] SIRIANG K W, ITTICHAN P, PONHONG K, et al. Stripping voltametric determination of trace cadmium and lead in Thai organic unpolished rice after ultrasound-assisted digestion[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2017, 59: 145–152.]
- [32] 黄晓玮. 原子吸收光谱法及重金属快速检测在大米镉含量检测中的应用对比[J]. *食品安全导刊*, 2017(30): 108–109. [HUANG X W. Comparison of the application of atomic absorption spectroscopy and heavy metals in the determination of cadmium in rice[J]. *Food Safety Guide*, 2017(30): 108–109.]
- [33] 李金桥. 原子荧光法测定镉元素的技术研究[J]. *生物化工*, 2020, 6(1): 91–93. [LI J J. A technical study on the determination of cadmium by atomic fluorescence spectrometry[J]. *Biochemical Engineering*, 2020, 6(1): 91–93.]
- [34] KAARE J, AMUND M, SKAAR N H, et al. Determination of arsenic, cadmium, mercury, and lead by inductively coupled plasma/mass spectrometry in foods after pressure digestion: NMKL interlaboratory study[J]. *Journal of AOAC International*, 2017(3): 846–858.]
- [35] 温丹华. 基于EDXRF技术对大米中Cd检测方法的研究[D]. 太原: 山西大学, 2019. [WEN D H. Research on the detection method of Cd in rice based on EDXRF technology[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2019.]
- [36] 刘艳梅, 钟辉, 黄建芳, 等. 直接竞争ELISA检测大米样品中的重金属镉[J]. *免疫学杂志*, 2015, 31(6): 528–532. [LIU Y M, ZHONG H, HUANG J F, et al. Direct competitive ELISA for the detection of cadmium in rice samples[J]. *Journal of Immunology*, 2015, 31(6): 528–532.]
- [37] 韩晓红. 食品中镉、铁离子可视化快速检测方法研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2018. [HAN X H. Study on visualized rapid detection method of cadmium and iron in food[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2018.]
- [38] 彭斓兰, 陈季旺, 陈超凡, 等. GFAAS法测定大米中无机锡的前处理条件优化[J]. *武汉轻工大学学报*, 2019, 38(1): 1–8. [PENG L, CHEN J W, CHEN C F, et al. Optimization of pretreatment conditions for determination of inorganic tin in rice by GFAAS[J]. *Wuhan Polytechnic University*, 2019, 38(1): 1–8.]
- [39] MUDILA H, PRASHER P, KUMAR M, et al. An insight into cadmium poisoning and its removal from aqueous sources by graphene adsorbents[J]. *International Journal of Environmental Health Research*, 2018: 1–21.]
- [40] 刘斌, 黎天勇, 蔡扬尧. “镉大米”的现状、危害及修复方法简述[J]. *现代食品*, 2018(21): 86–89. [LIU B, LI T Y, CAI Y Y. Status harm and remediation of cadmium rice[J]. *Modern Food*, 2018(21): 86–89.]
- [41] 李艳飞, 谢昌平, 李德洁, 等. 柳州地区自产大米中镉、铅和砷污染状况及其健康风险评估[J]. *中国卫生检验杂志*, 2020, 30(24): 3026–3029. [LI Y F, XIE C P, LI D J, et al. Contamination status and health risk assessment of cadmium lead and arsenic in home-grown rice in Liuzhou[J]. *Chinese Journal of Health Inspection*, 2020, 30(24): 3026–3029.]
- [42] FREIJE A M. Heavy metal, trace element and petroleum hydrocarbon pollution in the Arabian Gulf: Review[J]. *Journal of the Association of Arab Universities for Basic & Applied Sciences*, 2015(17): 90–100.]
- [43] XU X, ZHAO Y, ZHAO X, et al. Sources of heavy metal pollution in agricultural soils of a rapidly industrializing area in the Yangtze delta of China[J]. *Ecotoxicology & Environmental Safety*, 2014(108): 161–167.]
- [44] LI H, ZHANG H, YANG Y, et al. Effects and oxygen-regulated mechanisms of water management on cadmium (Cd) accumulation in rice (*Oryza sativa*) [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 846: 157484.]
- [45] ZOU M M, ZHOU S L, ZHOU Y J, et al. Cadmium pollution of soil-rice ecosystems in rice cultivation dominated regions in China: A review[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 280: 116965.]
- [46] HE M, SHEN H, LI Z, et al. Ten-year regional monitoring of soil-rice grain contamination by heavy metals with implications for target remediation and food safety[J]. *Environ Pollut*, 2019(244): 431–439.]
- [47] ZHANG X F, YU H Y, LI F B, et al. Behaviors of heavy metal(loid)s in a contaminated alkaline paddy soil throughout the growth period of rice[J]. *Total Environ*, 2020, 7(16): 136–204.]

- [48] LUO J S, HUANG J, ZENG D L, et al. A defensin-like protein drives cadmium efflux and allocation in rice[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 645.
- [49] XU P, WU J, WANG H, et al. Long-term partial substitution of chemical fertilizer with green manure regulated organic matter mineralization in paddy soil dominantly by modulating organic carbon quality[J]. *Plant Soil*, 2021, 48(1-2): 459-473.
- [50] PHUC H D, KIDO T, OANH N T P, et al. Effects of aging on cadmium concentrations and renal dysfunction in inhabitants in cadmium-polluted regions in Japan[J]. *Journal of Applied Toxicology*, 2017, 37(9): 1046-1052.
- [51] SCHAEFER J K, ROCKS S S, ZHENG W, et al. Active transport, substrates specificity and methylation of Hg(I) in anaerobic bacteria[J]. *Proc Nat Acad*, 2011(108): 8714-8719.
- [52] RAHMAN M A, SAHA B K, CHOWDHURY M H, et al. Public perception and health implication of loom-dye effluent irrigation on growth of rice (*Oryza sativa* L.) and red amaranth (*Amaranthus tricolor* L.) seedlings[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(16): 19410-19427.
- [53] 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. [ZHOU X X, BI C J, WANG M, et al. Effects of atmospheric deposition on heavy metals in leafy vegetables and their health risks[J]. *Proceedings of the East China Normal University: Natural Science*, 2018(2): 141-150.]
- [54] ASHRAF U, KANU A S, MO Z W, et al. Lead toxicity in rice effects, mechanisms and mitigation strategies-a mini review[J]. *Environ Pollut Res*, 2015, 22(23): 18318-18332.
- [55] 赵多勇. 工业区典型重金属来源及迁移途径研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012. [ZHAO D Y. Source identification apportionment and transfer route of typical heavy metal in an industrial area [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012.]
- [56] WEI X, GAO B, WANG P, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in street dusts from different functional areas in Beijing, China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015(5): 186-192.
- [57] ROTHENBERG S E, FENG X, ZHOU W, et al. Environment and genotype controls on mercury accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) cultivated along a contamination gradient in Guizhou China[J]. *Total Environ*, 2012, 426(1): 272-280.
- [58] 许继平, 胡进, 叶宏, 等. 加工过程对稻麦重金属含量影响研究进展[J]. *现代食品科技*, 2019, 35(11): 300-309. [XU J P, HU J, YE H, et al. Effects of processing on heavy metal contents in rice and wheat[J]. *Modern Food Technology*, 2019, 35(11): 300-309.]
- [59] 田阳. 稻米加工技术对产品镉含量的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2013. [TIAN Y. Study on the effect of rice processing on the cadmium concentration of products[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013.]
- [60] SHARAFI K, YUNESIAN M, MAHVI A H, et al. The reduction of toxic metals of various rice types by different preparation and cooking processes: Human health risk assessment in Tehran households, Iran[J]. *Food Chemistry*, 2019, 175: 128-137.
- [61] 谢国雄, 楼旭平, 姜铭北, 等. 大气沉降对水稻各器官铅镉汞砷积累的影响[J]. *中国农学通报*, 2020, 36(22): 86-91. [XIE G X, LOU X P, JIANG M B, et al. Effects of atmospheric deposition on accumulation of Pb Cd, HG and as in organs of rice[J]. *Bulletin of Chinese Agronomy*, 2020, 36(22): 86-91.]
- [62] LAPARRA J M, VELEZ D, BARBERA R, et al. Bioavailability of inorganic arsenic in cooked rice: Practical aspects for human health risk assessments[J]. *Agric Food Chem*, 2005(53): 8829-8833.
- [63] AGRAFIOTI E, KALDERIS D, DIAMADOPOULOS E, et al. Ca and Fe modified biochars as adsorbents of arsenic and chromium in aqueous solutions[J]. *Environ Manag*, 2014(146): 444-450.
- [64] GU H H, QIU H, TIAN T, et al. Mitigation effects of silicon rich amendments on heavy metal accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) planted on multi-metal contaminated acidic soil[J]. *Chemosphere*, 2011(83): 1234-1240.
- [65] SELEIMAN M F, KHEIR A M S. Heavy metals uptake and their availability in contaminated clay and sandy alkaline soils as affected by inorganic and organic amendments[J]. *Chemosphere*, 2018(204): 514-522.
- [66] AMAN U. 保障镉、砷、铬和铅污染土壤中稻米安全生产的高效钝化剂的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020. [AMAN U. Study on high efficiency passivator for rice safety production in CD AS Cr and PB contaminated soil[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020.]
- [67] SARFRAZ R, SHAKOOR A, ABDULLAH M, et al. Impact of integrated application of biochar and nitrogen fertilizers on maize growth and nitrogen recovery in alkaline calcareous soil[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2017, 63(5): 488-498.
- [68] REHMAN M Z, RIZWAN M, GHAFOR A, et al. Effect of inorganic amendments for in situ stabilization of cadmium in contaminated soils and its phyto-availability to wheat and rice under rotation[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(21): 16897-16906.
- [69] DENG F, LI W, WANG L, et al. Effect of controlled-release fertilizers on leaf characteristics, grain yield, and nitrogen use efficiency of machine-transplanted rice in southwest China[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2021, 67(13): 1739-1753.
- [70] PENG X, LIU F, WANG W X, et al. Reducing total mercury and methyl mercury accumulation in rice grains through water management and deliberate selection of rice cultivars[J]. *Environ Poll*, 2012(162): 202-208.
- [71] PAN W S, WU C, XUE S G, et al. Arsenic dynamics in the rhizosphere and its sequestration on rice roots as affected by root oxidation[J]. *Environ*, 2014(26): 892-899.
- [72] 宗良纲, 徐晓炎. 水稻对土壤中镉的吸收及其调控措施[J]. *生态学杂志*, 2004(3): 120-123. [ZONG L G, XU X Y. Cadmium absorption of rice from soils and remediations[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004(3): 120-123.]
- [73] LI H, LUO N, LI Y W, et al. Cadmium in rice: Transport mechanisms, influencing factors, and minimizing measures[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 224: 622-630.
- [74] 刘利, 郝小花, 田连福, 等. 植物吸收、转运和积累镉的机理研究进展[J]. *生命科学研究*, 2015, 19(2): 176-184. [LIU L,

- HAO X H, TIAN L F, et al. Research progresses on the mechanism of Cd absorption, transport and accumulation in plant[J]. *Life Science Research*, 2015, 19(2): 176–184.]
- [75] LIN X Y, MOU R X, CAO Z Y, et al. Characterization of cadmium-resistant bacteria and their potential for reducing accumulation of cadmium in rice grains[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 569: 97–104.
- [76] FATHOLLAHI A, KHAESTEGANAN N, COUPE S J, et al. A meta-analysis of metal biosorption by suspended bacteria from three phyla[J]. *Chemosphere*, 2021(268): 129290.
- [77] 刘寿涛. 表面流人工湿地对灌溉水源中镉的阻控机理及效果研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2019. [LIU S T. Mechanism and effect of surface-flow constructed wetland on the inhibition and control of cadmium in irrigation water source[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2019.]
- [78] SURIYAGODA L D B, DITTERT K, LAMBERS H. Mechanism of arsenic uptake, translocation and plant resistance to accumulate arsenic in rice grains[J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2018(253): 23–37.
- [79] SONG W Y, YAMAKI T, YAMA J N, et al. A rice ABC transporter OsABCC1 reduces arsenic accumulation in the grain[J]. *Proc Natl Acad*, 2014(111): 15699–15704.
- [80] XU J M, SHI S L, WANG L, et al. OsHAC4 is critical for arsenate tolerance and regulates arsenic accumulation in rice[J]. *New Phytol*, 2017, 215(3): 1090–1101.
- [81] SHI S, WANG T, CHEN Z, et al. OsHAC1;1 and OsHAC1;2 function as arsenate reductases and regulate arsenic accumulation[J]. *Plant Physiol*, 2016(172): 1708–1719.
- [82] GONZALEZ P S, TALANO M A, OLLER A L W, et al. Update on mechanisms involved in arsenic and chromium accumulation, translocation and homeostasis in plants[J]. *Transport and Accumulation in Plants*, 2014(33): 45–72.
- [83] 刘芬, 陈桂华, 王悦, 等. 水稻淡黄叶突变体 *xws* 的光合特性与基因定位[J]. *核农学报*, 2022, 36(6): 1080–1088. [LIU F, CHEN G H, WANG Y, et al. Photosynthetic characteristics and gene mapping of a yellow-leaf mutant *xws*[J]. *Journal of Nuclear Agriculture*, 2022, 36(6): 1080–1088.]
- [84] LONG Z, HUANG Y, ZHANG W, et al. Effect of different industrial activities on soil heavy metal pollution, ecological risk, and health risk[J]. *Environ Monit Assess*, 2021(20): 193.
- [85] 袁余洋, 刘属灵, 刘永林, 等. 重庆江津区自产大米和玉米中重金属的健康风险评估[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2021, 47(6): 677–683. [YUAN Y Y, LIU S L, LIU Y L, et al. Health risk assessment of heavy metals in locally grown rice and maize from Jiangjin District, Chongqing[J]. *Journal of Hunan Agricultural University*, 2021, 47(6): 677–683.]
- [86] IHEDIOHA J N, ABUGU. Ecological and human health risk evaluation of potential toxic metals in paddy soil, rice plants, and rice grains (*Oryza sativa*) of omor rice field[J]. *Nigeria. Environ Monit Assess*, 2021(193): 620.
- [87] WU J H, ZHANG Y X, ZHOU H. Groundwater chemistry and groundwater quality index incorporating health risk weighting in Ding Bian County Ordos basin of northwest China[J]. *Geochemistry*, 2020, 80(4): 1223–1238.
- [88] 吴科堰, 范成五, 刘桂华, 等. 黔西南某农用地土壤重金属风险评估与来源解析[J]. *西南农业学报*, 2021, 34(8): 1721–1727. [WU K Y, FAN CH W, LIU G H, et al. Risk assessment and source apportionment of heavy metals in soil of an agricultural land in southwest Guizhou[J]. *Journal of Southwest Agricultural Sciences*, 2021, 34(8): 1721–1727.]
- [89] NAG R, AUER A, MRAKEY B K, et al. Anaerobic digestion of agricultural manure and biomass—critical indicators of risk and knowledge gaps[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 690(NOV.10): 460–479.
- [90] 国家食品药品监督管理总局, 国家卫生和计划生育委员会. GB 2762-2017 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. [State Food and Drug Administration, National Health and Family Planning Commission. GB 2762-2017 National food safety standards. Pollutant limit in food[S]. Beijing: China Standards Press, 2017.]
- [91] GAO J, WANG L. Ecological and human health risk assessments in the context of soil heavy metal pollution in a typical industrial area of Shanghai China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(9): 27090–27105.
- [92] 张昌, 任晓雨, 崔航, 等. 黑龙江省水稻主产区大米中镉含量及膳食暴露评估[J]. *黑龙江八一农垦大学学报*, 2021, 33(2): 55–61. [ZHANG C, REN X Y, CUI H, et al. Assessment of cadmium content and dietary exposure in rice from the main rice-producing areas in Heilongjiang[J]. *Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University*, 2021, 33(2): 55–61.]
- [93] SONG Y, WANG Y, MAO W F, et al. Dietary cadmium exposure assessment among the Chinese population[J]. *PLoS One*, 2017, 12(5): e0177978.
- [94] 叶文慧, 张东杰, Monte Carlo. 对大米为来源的镉膳食暴露风险评估的初步研究[J]. *中国酿造*, 2008(10): 52–54. [YE W H, ZHANG D J, MONET C. Primary study on risk assessment of dietary cadmium exposure in rice by monte carlo simulation[J]. *China Brew*, 2008(10): 52–54.]
- [95] 蒋玉艳, 马宁, 蒙浩洋, 等. 广西居民重金属镉膳食摄入水平及其健康风险评估[J]. *中国食品卫生杂志*, 2021, 33(2): 191–195. [JIANG Y Y, MA N, MENG H Y, et al. Dietary intake and health risk assessment of heavy metal cadmium in Guangxi residents[J]. *Food Safety*, 2021, 33(2): 191–195.]