

稻米富硒降镉的研究进展

黄军根^{1,2}, 古志华³, 胡婕伦¹, 王海娃¹, 聂少平^{1*}

(1. 南昌大学食品学院, 江西南昌 330047) (2. 江西省质量和标准化研究院, 江西南昌 330200)

(3. 深圳市标准技术研究院, 广东深圳 518033)

摘要: 硒是人体必需的微量元素, 在抗氧化、抗癌、调节激素等方面具有重要作用, 而我国成人膳食硒平均摄入量仅为 39.0 $\mu\text{g}/\text{d}$, 远低于中国营养学会推荐的膳食硒摄入量范围 60~400 $\mu\text{g}/\text{d}$ 。水稻是我国的主要粮食作物, 利用富硒土壤种植富硒大米是解决我国居民硒摄入不足的重要手段。然而富硒区土壤镉污染严重, 在此环境下生产的富硒大米常出现镉含量超标的现象, 这严重危害着中国的粮食安全, 阻碍富硒农业的发展。该文综合最新文献研究, 首先介绍了硒和镉对人体健康的影响, 随后对中国的缺硒和镉污染状况、中国富硒稻米研究以及水稻对硒和镉的吸收研究进行了总结, 最后对硒镉互作机制进行了系统性综述, 以期在天然富硒区生产健康、安全、优质的富硒稻米提供科学依据和理论参考。

关键词: 稻米; 土壤; 富硒; 降镉; 互作机制

文章编号: 1673-9078(2025)06-376-383

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.6.0470

Research Progress on Selenium Enrichment and Cadmium Reduction in Rice

HUANG Jungen^{1,2}, GU Zhihua³, HU Jielun¹, WANG Haiwa¹, NIE Shaoping^{1*}

(1. College of Food Science & Technology, Nanchang University, Nanchang 330047, China)

(2. Jiangxi Provincial Institute of Quality and Standardization, Nanchang 330200, China)

(3. Shenzhen Institute of Standards and Technology, Shenzhen 518033, China)

Abstract: Selenium is an essential trace element for the human body, and plays significant roles in antioxidation, anticancer, and hormone regulation. However, the average dietary selenium intake by the adults in China is only 39.0 $\mu\text{g}/\text{d}$, which is far lower than the recommended dietary selenium intake range (60~400 $\mu\text{g}/\text{d}$) recommended by the Chinese Nutrition Society. Rice is the main staple food crop in China, and cultivating selenium-rich rice in selenium-rich soil is an important approach to address the insufficient selenium intake for Chinese residents. However, cadmium contamination of the soil in the selenium-rich regions is severe cadmium, and the cadmium content of selenium-rich rice produced in such an environments frequently exceeds the standard limit for cadmium content, which poses a serious threat to China's food security and hinders the development of selenium-rich agriculture. Based on the latest literature research, this paper firstly introduces the impacts of selenium and cadmium on human health, then summarizes the selenium deficiency and cadmium contamination status in

引文格式:

黄军根,古志华,胡婕伦,等. 稻米富硒降镉的研究进展[J].现代食品科技,2025,41(6):376-383.

HUANG Jungen, GU Zhihua, HU Jielun, et al. Research progress on selenium enrichment and cadmium reduction in rice [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(6): 376-383.

收稿日期: 2024-04-12

基金项目: 深圳食品安全研究智库服务委托研究课题; 江西省食品安全研究智库服务委托研究课题

作者简介: 黄军根 (1985-), 男, 在读博士, 高级工程师, 研究方向: 营养健康工程, E-mail: 804866357@qq.com

通讯作者: 聂少平 (1978-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品化学与分析技术、食品营养与安全、食品复杂碳水化合物, E-mail: spnie@ncu.edu.cn

China, as well as research on selenium-rich rice in China, and studies on the absorption of selenium and cadmium by rice. Finally, the selenium-cadmium interaction mechanisms, are systematically reviewed, in order to provide scientific basis and theoretical reference for the production of healthy, safe, and high-quality selenium-rich rice in naturally selenium-rich areas.

Key words: rice; soil; selenium enrichment; cadmium reduction; interaction mechanism

硒是人体必需的微量元素，在抗氧化、调节激素等方面具有重要作用。中国是大面积缺硒国家，约有 72% 的市（县）出现不同程度的土壤缺硒现象^[1]。稻米作为中国的第一大主食，是 60% 以上居民的每日主食，因此，利用富硒土壤资源种植富硒稻米是有效的人体硒补充载体^[2]。

近年来，随着国家对耕地质量调查项目的推进，越来越多的富硒土地被发现。2015 年在新疆、湖北、陕西、江西、福建、广西等地新发现五千余万亩绿色富硒耕地^[3]。然而，天然富硒土壤中的硒资源往往与重金属如镉等共存^[4-6]造成镉污染，极大地限制了天然硒资源的开发利用。

粮食安全是国家安全的重要基础，是我国经济社会发展的“压舱石”，其中稻米是我国的主要粮食之一。据估算，中国约 7% 的地区存在不同程度镉污染^[7]，导致粮食每年减产约一千万吨，直接经济损失超千亿元人民币^[8]。大宗谷类作物之一稻米对镉具有很强的吸收^[9]。一项对我国市售的 160 份稻米样品研究检测，发现超过国家镉含量限量标准 0.2 mg/kg 的样品有 10%，其中 3.8% 的样品镉含量甚至超过 0.4 mg/kg^[10]。稻米镉污染是影响国家粮食安全的重大问题之一，国民硒摄入不足是影响人们健康的重大问题之一，针对这些情况，研究人员对天然富硒区种植富硒低镉稻米开展了大量研究，但并没有适宜性广的成熟方法。因此，如何高效且安全地开发和利用天然富硒土壤资源，以生产符合安全标准的富硒稻米，已成为一个亟待解决的实际问题。

1 硒和镉对人体健康的影响

1.1 硒对人体健康的影响

硒（Selenium, Se）是人体必需的微量营养元素之一，肾脏中含量最高^[11]。硒是人体必需的微量元素，对于构成多种含硒蛋白和含硒酶至关重要。谷胱甘肽过氧化物酶（Glutathione Peroxidase, GPx）是最早发现的含硒酶之一，它在提高机体抗氧化能

力方面起着关键作用。由于人体无法长期储备硒，因此必须通过食物等途径定期补充。

临床研究表明硒在人体中参与多种生物与免疫学功能，硒具有提高免疫力、保护心脏、延缓衰老、预防癌症等多种功效^[12]，硒醇、硒氰等硒化合物有助于治疗食道癌、肺癌、肠癌等癌症^[13]。人体对硒的摄入量需保持在适宜水平，摄入量不足或过量均可能引发健康问题，导致身体处于亚健康状态甚至发展成疾病。硒的缺乏会导致心肌病、白内障和克山病等多种疾病^[14,15]，硒摄入过多会引起胃肠不适、脱发、指甲白色斑点、轻度神经损伤等症状^[16]，甚至导致瘫痪乃至死亡的现象^[17]。因此摄入适宜的硒元素对国民健康尤为重要。

硒的生物活性与其元素形态有关^[16]。硒在自然界中以多种形态存在，包括硒代胱氨酸（SeCys2）、甲基硒代半胱氨酸（MeSeCys）、硒代蛋氨酸（SeMet）、硒代乙硫氨酸（SeEt）、硒的四价形式（Se(IV)）和硒的六价形式（Se(VI)）等^[18,19]。有机硒对机体的利用率大于对无机硒的利用率^[20]，无机硒 Se(IV) 和 Se(VI) 为毒性较大，生物有效性低，会导致生物体病变有机硒毒性小，生物利用率高，则是人类从食物中摄入硒的重要来源^[21]。

1.2 镉对人体健康的影响

镉（Cadmium, Cd）是一种非过渡金属，具有在生物体内显著的累积特性^[22]，被国际癌症研究机构（International Agency for Research on Cancer, IARC）和美国国家毒理学计划（National Toxicology Program, NTP）分类为第一类致癌物质，即确认的人类致癌物。当前，食品中镉的污染主要源自环境污染物、农药残留以及食品在加工和运输过程中的污染^[23]。

长期暴露在镉污染环境中致使少量镉进入人体，经生物放大和生物积累作用，对肾、肺、肝、睾丸、脑以及血液系统均可产生毒性，并具有一定的致癌和致突变性，将导致人体骨质疏松、软骨症、骨折，造成一般不可逆的肾损伤，甚至生殖障碍而

影响子代发育和智力以及引起基因损伤增加人类致癌率^[24]。

各国和不同组织对农产品中镉含量的允许标准存在细微差异。国际食品法典委员会(Codex Alimentarius Commission, CAC)设定的大米中镉的最大允许含量为 0.4 mg/kg, 而我国的标准更为严格, 规定大米中镉的最大允许含量为 0.2 mg/kg, 与欧盟、新加坡、韩国一致^[21]。

2 中国缺硒和镉污染现状

2.1 中国人口硒营养现状

中国是典型的硒资源分布极不均匀的国家, 超过一半的国土区域硒含量低于标准水平, 硒缺乏地区的人群若不接受任何膳食补充剂, 均无法满足由中国营养学会发表的《中国居民膳食营养素参考摄入量(2023)》推荐的膳食硒摄入范围 60~400 $\mu\text{g}/\text{d}$ ^[25]。最新发布的 2015~2017 年中国 18 岁及以上成人膳食硒的摄入状况也指出, 我国成人膳食硒平均摄入量仅为 39.0 $\mu\text{g}/\text{d}$, 远低于中国营养学会推荐的膳食硒摄入范围^[26]。一般情况下, 人体的硒元素主要通过食物摄取, 而食物中硒元素主要从富硒土壤吸收。然而通过单一的富硒土壤生产的作物不能满足富硒产品的要求, 因此大部分通过施用硒肥增加农作物总硒含量, 以提高人均硒摄入量。

随着化肥的大量施用, 农作物中的硒含量下降, 目前, 多个省份, 包括湖北、陕西、广西、浙江、福建、江西、湖南和贵州, 已经把开发富硒耕地作为推动农业发展策略的关键组成部分。通过积极推进富硒耕地的开发, 形成了具有特色的农产品产业链, 这不仅带来了经济上的收益, 也产生了积极的社会影响^[27]。而如何针对不同富硒水平的土壤以及各类农产品的硒形态代谢特征选取适合种植的农产品, 成为迫切需要解决的问题。

2.2 中国富硒地区土壤镉污染现状

黑色岩系(黑色页岩、碳质硅质板岩、碳质板岩、石煤等)中国天然富硒区域的土壤中, 硒元素往往与重金属如镉共存。这种情况严重制约了天然富硒土壤资源的安全开发与利用。

袁知洋等^[28]对恩施市典型富硒区主要农作物硒含量的结果表明, 约 80% 的农作物(稻米、茶叶、魔芋)达到国家或地方富硒标准, 但镉含量超标的农作物有 10%~40%。类似的现象广泛存在于其他富

硒区。例如, 安徽池州石台县的天然富硒区土壤中硒含量达到富硒标准(富硒土壤标准为 0.4 mg/kg), 但所有调查样品中镉元素含量均超过中国农用地镉污染标准(依据 GB 15618-2018)^[29]; 陕南富硒耕作土土壤中硒含量范围为 0.50~16.96 mg/kg, 但镉含量却高达 0.63~14.88 mg/kg, 约 89% 的土壤样品中镉含量超标(依据 GB15168-2018), 17% 的农作物样品超标(依据 GB 2762-2017)^[5]。即使在目前发现的最大的天然富硒区的广西, 土壤镉超标问题也十分严峻。

3 中国富硒稻米研究现状

3.1 富硒农产品发展现状

富硒农产品指的是通过动植物在生长过程中吸收环境中的硒元素, 经过生物转化和富集作用, 生产出具有高含量有机硒的功能性农产品^[30]。合格的富硒农产品需要满足“优质、安全、健康”的要求。富硒农产品可根据其所属产业类型划分为三类, 即植物类富硒农产品、动物类富硒农产品和加工类富硒农产品^[31]。富硒农产品中的硒与氨基酸结合稳定, 且不会因所施硒肥的不同而改变富硒农产品中的硒形态^[32]。

目前, 为提高居民平均膳食硒摄入量, 许多国家大力发展富硒农产。国外富硒农业的起源较早, 并且在这一领域的发展上处于领先地位^[33]。芬兰是全球首个运用生物强化技术培育富硒农产品的国家, 该技术在提升国民的膳食硒摄入量方面取得了明显的成效。20 世纪 70 年代, 芬兰居民的日均硒摄入量大约为 25 $\mu\text{g}/\text{d}$, 这一数值显著低于欧洲食品安全局(ESFA)推荐的成人每日硒摄入范围 70~255 $\mu\text{g}/\text{d}$ ^[34]。然而, 自 1984 年芬兰要求肥料中添加硒元素的强制性法案通过后, 到 2001 年生产的富硒农产品总硒含量提升了十倍以上, 居民的膳食硒摄入量也随之提高到了 125 $\mu\text{g}/\text{d}$ ^[35]。

进入 21 世纪以来, 我国富硒农业市场不断拓展, 富硒产品呈现多元化趋势, 富硒产业逐步实现规模化发展^[36]。目前我国富硒产品种类繁多, 包括富硒稻米、茶叶、果蔬、饲料以及保健品等, 主要以富硒稻米和茶叶等农产品为主^[37]。对于富硒农产品的研究开发, 中国农业大学近年来开发了多种优质富硒农产品, 如富硒果蔬汁(硒含量 0.014 mg/L)、富硒全籽粒超微粉碎全麦粉(硒含量 1.98 mg/kg)、富硒发酵糙米米粉(硒含量 0.178 mg/kg)等^[38]。但我

国富硒土壤大多处于我国经济发展较为贫瘠的边远地区，整体尚处于起步阶段，存在统计数据缺失和经济需求分析不足等问题^[39]。此外，我国的天然富硒区的土壤中往往伴生大量重金属，富硒农业发展仍然面临巨大的挑战。

3.2 中国富硒稻米标准的发展

通过食用富硒农产品来为人体补充日常所需的硒元素是目前公认最安全、简单且有效方法。稻米作为中国大多数居民的主食，每人每天平均从稻米中摄入的硒仅为 6.25~12.5 μg，远低于推荐的硒摄入量^[40]。

目前，我国主要使用国标《GB/T 22499-2008 富硒稻谷》规定的硒含量（0.04~0.30 mg/kg）定义富硒大米，部分使用行业标准规范富硒大米的流通（《富硒农产品 GH/T 1135-2017》）。我国多个地区也根据当地富农产品的分布特征陆续颁布了富硒稻米的地方标准（表 1）。然而，这些地方标准之间差别较大，如江苏富硒大米标准硒含量为 0.07~0.10 mg/kg，江西为 0.07~0.30 mg/kg，河北为 0.10~0.80 mg/kg，湖北为 0.15~0.30 mg/kg。但是这些地方标准的制定存在几个显著问题。首先，这些标准缺乏对不同人群需求的充分考量，未能有效地满足多样化的消费者需求。

其次，标准的制定缺乏相应的营养和安全评价依据，这导致了标准的制定过程缺乏科学性和可靠性。因此，当前我国富硒稻米标准的制定亟需改进，以更好地适应不同人群的需求，同时确保标准的科学性和可行性。

3.3 富硒稻米中硒及其形态研究进展

富硒水稻中的硒元素主要分为无机硒和有机硒两种形态，而水稻细胞中的硒元素经过一系列生化反应，参与构成蛋白质并储存于富硒水稻的籽粒中。因此，富硒稻米中的硒元素主要以有机硒的形式存在，常见以 SeMet、SeCys2、SeCys、SeMeSeCys 等硒形态，其中 SeMet 和 SeMeSeCys 是有效的抗癌物质^[41]。邵威鹏^[42]在对富硒区水稻的硒形态研究中发现，水稻籽粒中硒主要以 SeMet 形态存在，约占总硒含量的 80%。然而无机硒具有毒性，可能对人的身体产生危害。现在富硒稻米产品多种多样，但并非所有富硒稻米的总硒含量都能达到国家标准，若中有机硒占比偏低，甚至会对消费者的生命健康产生威胁。因此，在利用天然富硒土壤资源种植农作物的程中，既要关注总硒含量，也要关注其中的硒形态，实现天然硒资源的高效开发与安全利用。

表 1 全国各地富硒大米中的硒含量标准
Table 1 Selenium content standards in selenium-rich rice across the country

地区	总硒含量/(mg/kg)	引用标准
中华人民共和国国家标准	0.04~0.30	富硒稻谷 GB/T 22499-2008
中华人民共和国供销合作行业标准	0.10~0.50	富硒农产品 GH/T 1135-2017
江苏省地方标准	0.07~0.10	富硒稻米 DB32/T 706-2004
青海省地方标准	≥0.08	东部农业区农畜产品硒含量分类标准 DB63/T 1147-2012
湖南省地方标准	0.15	富硒农产品生产技术规程 DB43/T 816-832-2013
重庆市地方标准	0.04~0.30	富硒农产品 DB50/T 705-2016
宁夏回族自治区地方标准	0.04~0.30	宁夏富硒农产品标准(水稻、玉米、小麦与枸杞干果)DB64/T 1221-2016
江西省地方标准	0.07~0.30	富硒食品硒含量分类标准 DB36/T 566-2017
河北省地方标准	0.10~0.80	富硒农产品硒含量要求 DB13/T 2702-2018
陕西省地方标准	≥0.15	富硒含硒食品与相关产品硒含量标准 DB61/T 556-2018
四川省宜宾市地方标准	0.03~0.30	富硒农产品硒含量要求 DB5115/T 17-2020
宁夏回族自治区食品安全地方标准	≥0.04	食品安全地方标准 富硒食品硒含量要求 DBS64/ 007-2021
广西壮族自治区地方标准	0.10~0.50	天然富硒农产品硒含量鉴别与分类 DB45/T 2578-2022
湖北省食品安全地方标准	0.15~0.30	富有机硒食品硒含量要求 DBS42/ 002-2022

3.4 富硒稻米检测技术

随着富硒稻米产业的发展,稻米中硒元素的分析检测技术也备受关注。目前富硒稻米中硒的检测方法主要针对于总硒含量的测定。例如,氢化物发生-原子荧光光谱法(HG-AFS),电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)、原子吸收光谱(AAS)等,不同的检测方法各有其优缺点^[43]。其中HG-AFS是目前测定总硒含量较为成熟的技术,具有检出限较低、灵敏度高、运行成本低的优点。但是随着对天然条件下富硒稻米中的硒形态检测的深入研究,ICP-MS与高效液相色谱、离子色谱等技术的联合使用愈发广泛,这种方法呈现出HG-AFS所不具备的优势:能够测定总硒含量的同时对硒的形态进行分析。

4 水稻对硒和镉的吸收

4.1 水稻对硒的吸收

土壤中的硒主要以硒酸盐(SeVI)和亚硒酸盐(SeIV)两种无机硒形态被水稻根系吸收利用^[44],硒酸盐被根系吸收后通过质外体和共质体径向运输至韧皮部^[41],而亚硒酸盐被根系吸收后在质体内转化为SeMet和少量SeMeSeCys的有机硒形态进行运输^[45]。而Anne-Marie Carey研究发现SeMet和SeMeSeCys仅通过韧皮部运输到籽粒,而无机硒则通过韧皮部和木质部转运到籽粒中^[46]。在水稻中硒转运机制的进一步研究中发现,亚硒酸盐则通过Pht1磷酸盐转运蛋白转运至根细胞,硒酸盐主要受到高亲和力的H⁺/硫酸盐共转运蛋白进入根细胞^[47]。此外,在水稻作物对硒吸收的影响因素研究中发现,土壤的pH值、铁氢化物也影响着水稻对硒的吸收,一般情况下,碱性土壤有利于硒的溶解促进水稻对硒的吸收利用^[48]。

4.2 水稻对镉的吸收

目前研究认为,根系是水稻吸收重金属镉的主要途径,镉由根系细胞吸收后,通过两种途径积累在籽粒中:(1)将根系处的镉通过木质部运输直接运输至籽粒;(2)重新活化茎秆、旗叶等其他组织中的镉,并经韧皮部转运至籽粒^[49]。近年来,有学者在水稻对镉吸收机制研究中确定了与镉转运相关的基因,如OsHMA2、OsZIP7、OsCAL1、OsNRAMP5、OsLCT1、OsHMA3等^[50]。这些基因对镉在水稻根系的吸收、由根部向地上部的转移、

木质部到韧皮部的转运、液泡隔离等过程中发挥着不同的作用,其中OsNRAMP5基因的过量表达可以减少镉向地上部的转运,进而显著减少籽粒中镉含量,为降低富硒稻米中镉积累了提供潜在的稻种改良策略^[51]。此外,水稻种植的土壤条件也是影响水稻吸收重金属镉的重要因素,例如土壤pH值较高时,镉的流动性会降低从而导致稻米中镉积累量下降^[52]。

5 水稻中硒与镉的互作机制

水稻中硒与镉的相互作用机制主要分为协同作用机制和拮抗作用机制两类,具体情况如下表2所示。

5.1 硒与镉的协同作用机制

水稻对镉具有较强的富集能力,而富硒区土壤存在镉污染的现象,导致水稻从土壤中吸收镉并积累在稻米中,随后经日常饮食进入人体,从而对人体产生生物毒性,给人体带来潜在的健康风险。研究发现,富硒稻米中的硒镉伴生现象涉及多种基因的复杂调控。在硒和镉浓度较高的情况下,水稻细胞内的磷酸转运蛋白基因及硫酸盐转运蛋白基因的表达水平上升,这增强了水稻细胞对硒元素的吸收能力。与此同时,与天然抗性相关的巨噬细胞蛋白基因,以及锌和铁的转运蛋白基因也呈现出表达上调的趋势,这进一步促进了水稻细胞对镉的吸收。上述机制的激活导致了水稻细胞中镉积累量的明显增加,并可能触发氧化应激^[53]。

5.2 硒对镉的拮抗作用机制

5.2.1 硒抑制水稻细胞对镉的吸收

Cui等^[54]研究发现硒能够调控水稻细胞中木质素合成基因的表达,促进木质素的合成,导致水稻细胞壁厚度增加,提高细胞壁的机械强度,使镉积累在硒处理的细胞壁上,从而实现硒对镉向水稻细胞扩散的抑制作用。在水稻的水培实验中,在含镉的环境中添加硒可以显著降低水稻的细根比例,增加粗根比例,从而减少了水稻对镉的吸收^[55]。此外,研究还发现,在淹水土壤的环境下,硒可以促进水稻根系表面铁菌斑形成,而铁菌斑通常是在根表面产生由亚铁转变为铁和氧化铁的沉淀,这种铁菌斑可以通过将镉隔离、吸附或共沉淀,最终抑制水稻根部对镉的吸收^[56]。

表 2 硒与镉的相互作用

Table 2 Interactions between Selenium and Cadmium

作用类型	影响	作用机制	参考文献
协同作用	水稻细胞中镉积累量增加	高浓度硒促进相关基因表达上调，增强细胞对镉的吸收	[53]
	抑制镉向水稻细胞扩散	硒促进水稻细胞木质素合成基因表达，使得水稻细胞壁厚度和机械强度增大，阻碍镉向水稻细胞扩散	[54]
	减少水稻对镉的吸收	显著降低水稻比例，增加粗根比例	[55]
拮抗作用	抑制水稻根部对镉的吸收	硒促进水稻根系表面形成铁菌斑，将镉隔离、吸附或共沉淀	[56]
	缓解镉对水稻的毒害作用	硒抑制镉诱导的超氧化物歧化酶和过氧化物酶活性，增加过氧化氢酶活性，缓解镉诱导的氧化应激	[57]
	抑制水稻中镉的转运	硒增强镉在液泡中的区域化作用，减少镉从根部向地上部分的转运	[58]

5.2.2 硒抑制水稻中镉的毒害作用

Lin 等^[57]通过水培试验研究了硒缓解水稻镉毒害作用的生理机制，研究发现水稻中的镉胁迫会引起氧化应激，提高叶片和根系的超氧化物歧化酶（SOD）和叶片的过氧化物酶（POD）活性，而添加硒可以抑制镉诱导的超氧化物歧化酶和过氧化物酶活性，增加过氧化氢酶（CAT）、H⁺-ATPase 和 Ca²⁺-ATPase 活性，同时在硒存在时，一部分氧化自由基可能以非酶促的方式被除去，实现硒对水稻中镉毒性的抑制作用。

5.2.3 硒抑制水稻中镉的转运

硒与镉的拮抗作用机制，Wan 等^[58]提出硒通过改变镉在水稻中的亚细胞分布，增加镉在液泡中的区域化作用，减少了镉从根部向地上部分的转运，同时引起了镉氧化胁迫产生的活性氧水平降低以影响水稻对镉的积累；Guo 等^[59]在研究中观察到水稻根部存在 1:1 的硒和镉，并且硒比硫更容易与镉形成络合物，所以推测根部的硒可能与镉形成了难溶的硒镉络合物吸附于根部表面，减少了溶液中可利用的硒和镉的量，从而抑制了镉在水稻体内的吸收与转运。

6 结论与展望

目前，富硒稻米中硒镉协同和拮抗作用机制研究均取得了一定的进展，一方面，富硒稻米中硒镉的协同作用促进硒吸收镉，使富硒稻米中镉大量积累；另一方面，在一定条件下，富硒稻米中硒对重金属镉存在拮抗作用，促使硒通过改变水稻中的亚细胞分布，调节根系生长，促进铁菌斑形成等机理，可抑制富硒稻米对镉的吸收。同时在硒与镉相互作用机制的研究中发现，部分基因表达的变化可以影

响水稻细胞对镉的吸收、转运和积累。基因工程技术将会是未来富硒降镉的重要手段。

在实际生产中，如何在镉含量偏高的富硒区生产镉含量低的富硒稻米仍然是亟待解决的现实问题。然而，目前的技术和方法还存在不足，未来需要进一步发掘既能富集硒、又能减少重金属镉的富硒稻米生产的新方法和新技术，为在天然富硒区生产健康、安全、优质的富硒稻米提供技术支持。

参考文献

[1] 梁东丽,彭琴,崔泽玮,等.土壤中硒的形态转化及其对有效性的影响研究进展[J].生物技术进展,2017,7(5):374-380.

[2] TANG D, CHENG Z. From basic research to molecular breeding-Chinese scientists play a central role in boosting world rice production [J]. Genomics, Proteomics & Bioinformatics, 2018, 16(6): 389-392.

[3] 张泽洲.典型农作物中硒形态分析及其硒-镉相互作用研究 [D].武汉:中国地质大学,2019.

[4] 郭宇.恩施地区硒的地球化学研究及富硒作物栽培实验研究 [D].武汉:中国地质大学,2012.

[5] DU Y, LUO K, NI R, et al. Selenium and hazardous elements distribution in plant-soil-water system and human health risk assessment of Lower Cambrian, Southern Shaanxi, China [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2018, 40(5): 2049-2069.

[6] 龙家寰,刘鸿雁,刘方,等.贵州省典型污染区土壤中镉的空间分布及影响机制[J].土壤通报,2014,45(5):1252-1259.

[7] BAIFEI H, JUNLIANG X, HONGWEN D, et al. Effects of interaction between cadmium (Cd) and selenium (Se) on grain yield and Cd and Se accumulation in a hybrid rice (*Oryza sativa*) system [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(43): 9537-9546.

[8] RAFIQ M T, AZIZ R, YANG X, et al. Cadmium phytoavailability to rice (*Oryza sativa* L.) grown in

- representative Chinese soils. A model to improve soil environmental quality guidelines for food safety [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, 103(5): 101-107.
- [9] CLEMENS S, MA J F. Toxic heavy metal and metalloid accumulation in crop plants and foods [J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2016, 67: 489-512.
- [10] CHEN H, TANG Z, WANG P, et al. Geographical variations of cadmium and arsenic concentrations and arsenic speciation in Chinese rice [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 238: 482-490.
- [11] 张留圈, 陆柏益. 富硒农产品质量安全及其产业发展问题研究[J]. *农产品质量与安全*, 2020, 2: 3-9.
- [12] RAYMAN M P. Selenium and human health [J]. *The Lancet*, 2012, 379(9822): 1256-1268.
- [13] 李浩男, 谢晓宇, 王立平. 硒营养与人体健康[J]. *食品工业*, 2022, 43(3): 325-330.
- [14] BECKETT G J, ARTHUR J R. Selenium and endocrine systems [J]. *Journal of Endocrinology*, 2005, 184(3): 455-465.
- [15] COMBS G F. Selenium in global food systems [J]. *British Journal of Nutrition*, 2001, 85(5): 517-547.
- [16] KOLLER L, EXON J. The two faces of selenium-deficiency and toxicity--are similar in animals and man [J]. *Canadian Journal of Veterinary Research*, 1986, 50(3): 297.
- [17] ZHANG Z, SONG G. Roles of selenoproteins in brain function and the potential mechanism of Selenium in alzheimer's Disease [J]. *Frontiers in Neuroscience*, 2021, 8(15): 646518.
- [18] 胡银川, 谭欣, 钟洋, 等. 食品中硒形态的HPLC-ICP/MS测定方法[J]. *食品工业*, 2023, 44(9): 293-296.
- [19] 曾云想, 梁婷婷, 汤明河, 等. 超声辅助酶法提取-高效液相色谱-原子荧光光谱联用技术测定大米中6种硒形态[J]. *分析仪器*, 2020, 1: 20-24.
- [20] KUMAR N, GARG A K, DASS R S. Effect of dietary supplementation of inorganic and organic selenium on intake and utilization of nutrients in lambs [J]. *Animal Nutrition and Feed Technology*, 2009, 9: 253-260.
- [21] 王欣, 幸苑娜, 陈泽勇, 等. 高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱法检测富硒食品中6种硒形态[J]. *分析化学*, 2013, 41(11): 1669-1674.
- [22] 刘叶, 刘子祺, 陈雯, 等. 镉表观遗传毒性研究进展[J]. *中国公共卫生*, 2020, 36(8): 1152-1156.
- [23] CHUANWEI Z, HANJIE W, YUXU Z, et al. Isotopic geochemistry of cadmium: a review [J]. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 2015, 89(6): 2048-2057.
- [24] 徐培娟, 古桂雄. 环境镉对健康及生殖的危害[J]. *国外医学. 妇幼保健分册*, 2004, 1: 35-37.
- [25] 吕臣浩. 湖北省建始县土壤富硒特征及土壤硒安全利用研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022.
- [26] 蔡姝雅, 唐增煦, 赵丽云, 等. 2015—2017年中国18岁及以上成人膳食硒的摄入状况[J/OL]. *中国食物与营养*, 1-6[2024-05-21].
- [27] 李卫东, 万海英, 朱云芬, 等. 恩施州天然硒资源特征及其开发利用研究进展[J]. *生物技术进展*, 2017, 7(5): 545-550.
- [28] 袁知洋, 项剑桥, 吴冬妹, 等. 恩施富硒土壤区主要农作物硒镉特征以及和根系土硒镉关系研究[J]. *资源环境与工程*, 2017, 31(6): 706-712.
- [29] YANG B B, YANG C, SHAO Z Y, et al. Selenium (Se) does not reduce cadmium (Cd) uptake and translocation in rice (*Oryza sativa* L.) in naturally occurred Se-rich paddy fields with a high geological background of Cd [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2019, 103: 127-132.
- [30] 张亚利. 富硒农业产业化发展研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2022.
- [31] 徐聪, 刘媛媛, 孟凡乔, 等. 农产品硒含量及与土壤硒的关系[J]. *中国农学通报*, 2018, 34(7): 96-103.
- [32] RAYMAN M P. Food-chain selenium and human health: emphasis on intake [J]. *British Journal of Nutrition*, 2008, 100(2): 254-268.
- [33] 钱华. 关于富硒农业产业化发展研究[J]. *现代农业研究*, 2021, 27(7): 9-10.
- [34] Outcome of a public consultation on the draft scientific opinion of the EFSA panel on dietetic products, Nutrition and Allergies (NDA) on dietary reference values for selenium [J]. *EFSA Supporting Publications*, 2014, 11(10): EN670.
- [35] ALFTHAN G, EUROLA M, EKHOLM P, et al. Effects of nationwide addition of selenium to fertilizers on foods, and animal and human health in Finland: From deficiency to optimal selenium status of the population [J]. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2015, 31(2): 142-147.
- [36] QUINN N W. Information technology and innovative drainage management practices for selenium load reduction from irrigated agriculture to provide stakeholder assurances and meet contaminant mass loading policy objectives [J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(3): 484-492.
- [37] 吴素春, 胡梦娜, 蒙淑兰, 等. 我国富硒产业发展现状及影响因素研究[J]. *安徽农业科学*, 2021, 49(14): 212-216.
- [38] 吴继红. 优质富硒农产品高效创制关键技术及产业化[Z]. 北京: 中国农业大学, 2021-04-13.
- [39] ZHANG Z Y, YOU Y, GUO Q Q, et al. Preliminary study on the standard of selenium content in agricultural products [J]. *Asian Agricultural Research*, 2012, 4(10): 83-85.
- [40] 王亚萍. 外源硒施用方式对水稻富硒及稻米硒形态的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2021.
- [41] ZHANG L H, CHU C C. Selenium uptake, transport, metabolism, reutilization, and biofortification in rice [J]. *Rice*, 2022, 15(1): 30.
- [42] 邵鹏威. 硒元素形态分析方法及其在恩施富硒地区的应用研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2021.

- [43] 吕洪亮,张美燕,张永和,等.富硒食品中元素硒检测技术的应用研究进展[J].盐科学与化工,2024,53(4):9-13.
- [44] LEE S, WOODARD H J, DOOLITTLE J J. Effect of phosphate and sulfate fertilizers on selenium uptake by wheat (*Triticum aestivum*) [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2011, 57(5): 696-704.
- [45] LI H F, MCGRATH S P, ZHAO F J. Selenium uptake, translocation and speciation in wheat supplied with selenate or selenite [J]. New Phytologist, 2008, 178(1): 92-102.
- [46] CAREY A M, SCHECKEL K G, LOMBI E, et al. Grain accumulation of selenium species in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(10): 5557-5564.
- [47] WHITE P J. Selenium metabolism in plants [J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects, 2018, 1862(11): 2333-2342.
- [48] 戴志华,高菲,赵敏,等.作物对硒的吸收利用及合理施用硒肥[J].生物技术进展,2017,7(5):415.
- [49] 万亚男.硒对水稻吸收、转运及累积镉的影响机制[D].北京:中国农业大学,2018.
- [50] 张宏宇.胡敏酸对水稻吸收硒和镉的影响研究[D].武汉:中国地质大学,2021.
- [51] 常家东.OsNRAMPs在水稻镉吸收和转运中的作用研究[D].南京:南京农业大学,2021.
- [52] LI H, LUO N, LI Y W, et al. Cadmium in rice: transport mechanisms, influencing factors, and minimizing measures [J]. Environmental Pollution, 2017, 224(5): 622-630.
- [53] 张留圈.富硒农产品质量安全效益-风险评估及金属伴生机制研究[D].杭州:浙江大学,2020.
- [54] CUI J, LIU T, LI Y, et al. Selenium reduces cadmium uptake into rice suspension cells by regulating the expression of lignin synthesis and cadmium-related genes [J]. Science of the Total Environment, 2018, 644: 602-610.
- [55] DING Y, FENG R, WANG R, et al. A dual effect of Se on Cd toxicity: evidence from plant growth, root morphology and responses of the antioxidative systems of paddy rice [J]. Plant and Soil, 2014, 375: 289-301.
- [56] RIAZ M, KAMRAN M, RIZWAN M, et al. Cadmium uptake and translocation: selenium and silicon roles in Cd detoxification for the production of low Cd crops: a critical review [J]. Chemosphere, 2021, 273: 129690.
- [57] LIN L, ZHOU W, DAI H, et al. Selenium reduces cadmium uptake and mitigates cadmium toxicity in rice [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 235: 343-351.
- [58] WAN Y, WANG K, LIU Z, et al. Effect of selenium on the subcellular distribution of cadmium and oxidative stress induced by cadmium in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26: 16220-16228.
- [59] GUO Y K, MAO K, CAO H, et al. Exogenous selenium (cadmium) inhibits the absorption and transportation of cadmium (selenium) in rice [J]. Environmental Pollution, 2021, 268: 115829.