

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2019061301

林欣颖, 谭祎, 厉红波. 稻米镉积累的影响因素与阻控措施[J]. 环境化学, 2020, 39(6): 1530-1543.

LIN Xinying, TAN Yi, LI Hongbo. A review on drivers and mitigation strategies for elevated cadmium concentration in rice[J]. Environmental Chemistry, 2020, 39(6): 1530-1543.

## 稻米镉积累的影响因素与阻控措施\*

林欣颖 谭 祎 厉红波\*\*

(南京大学环境学院, 南京, 210023)

**摘 要** 长期高镉暴露能引发“痛痛病”等疾病, 镉的人体健康危害不容小视. 目前我国镉污染较为严重, 因其容易富集于水稻等粮食作物而备受当前环境、食品领域的关注. 镉污染大米(也称为“镉米”)摄入是目前人体镉暴露的最重要来源, 探究“镉米”的形成及影响因素, 并针对影响因素提出相应的阻控措施对保障食品安全和人体健康具有重要意义. 本文针对土壤—水稻体系, 简介了当前我国稻田镉污染现状, 分析了土壤理化性质、全球变暖、水稻品种、水稻根系结构、水稻根系基因对水稻镉吸收的影响, 总结了镉被吸收后在水稻植株内的分布和迁移过程及相关调控基因, 探讨了土壤修复、基因调控、稻米加工、膳食摄入等措施降低大米镉含量及人体健康风险的效果. 本文揭示了稻米镉积累的关键影响因素, 并对今后“镉米”阻控措施的发展方向进行了展望.

**关键词** 镉, 大米, 影响因素, 阻控措施.

## A review on drivers and mitigation strategies for elevated cadmium concentration in rice

LIN Xinying TAN Yi LI Hongbo\*\*

(School of the Environment, Nanjing University, Nanjing, 210023, China)

**Abstract:** Long-term exposure to cadmium (Cd) can cause Itai-Itai disease and other diseases, therefore the associated health risks cannot be ignored. Currently, environmental Cd contamination is quite serious in China. Cadmium is easy to be taken up and accumulated in rice and other food crops, so Cd contamination in the environment is raising increasing concern. It is well accepted that intake of Cd-contaminated rice (also known as “Cd rice”) is the most major source of Cd exposure for humans. Thus, to ensure food safety and human health, it is important to explore factors influencing Cd accumulation in rice and to develop mitigation strategies to decrease Cd concentration in rice. This review introduces the status of Cd contamination in Chinese rice paddy fields, analyzes effects of soil physical and chemical properties, global warming, rice varieties, rice root structure, and rice root genes on Cd uptake by rice, and discusses Cd distribution and transportation in rice plants following uptake and the related regulatory genes. In addition, mitigation strategies including soil remediation, rice gene regulation, rice processing, and dietary intake to reduce rice Cd

2019年6月13日收稿(Received: June 13, 2019).

\* 国家自然科学基金(21507057, 41673101, 21637002), 江苏省自然科学基金(BK20150573)和国家重点研发计划项目(2016YFD0800807)资助.

**Supported by** the National Natural Science Foundation of China (21507057, 41673101, 21637002), Jiangsu Provincial Natural Science Foundation (BK20150573), and the National Key Research and Development Program of China (2016YFD0800807).

\*\* 通讯联系人, E-mail: hongboli@nju.edu.cn

**Corresponding author**, E-mail: hongboli@nju.edu.cn

concentration and human health risks are discussed. This review reveals key factors controlling rice Cd accumulation and prospects the future research directions for developing mitigation strategies.

**Keywords:** cadmium, rice, influence factors, mitigation strategies.

镉是我国重点监测的五种金属污染物(砷、铅、铬、镉、汞)之一,在环境介质中广泛存在.镉在工业中具有重要应用,比如制作镉黄(主要成分:硫化镉)、高效电池、减缓核裂变反应的装置等.但过量镉进入环境会严重危害人体健康.比如 20 世纪 60 年代在日本富山出现的“痛痛病(Itai-Itai disease)”,正是由于炼锌厂排放的含镉废水污染了当地的耕地和水源,镉通过饮食进入人体引起的.

在我国南方以及亚洲大部分地区,当地人群以水稻及其制品为主食.据统计,2017 年我国稻谷播种面积为 30747 千公顷,约占粮食作物播种面积的 26%;稻谷产量为 21268 万吨,约占粮食总产量的 32%<sup>[1]</sup>.然而,镉易在水稻中富集,增加了这些区域人群的镉暴露风险.2008 年全国市场销售大米调查显示,约 10%的稻米镉含量超过国家食品安全限值  $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[2]</sup>.在我国南方有色金属生产区域,稻米镉含量超标更为严重<sup>[3]</sup>.比如 Du 等发现,在湖南北部某县城,大米镉超标率达 60%,11%的大米镉含量超过  $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[3]</sup>.Zhu 等发现湖南省中东部 76%的大米样品镉含量超标,最大镉浓度达  $4.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[4]</sup>.因此,研究稻米镉积累的影响因素,并针对影响因素提出相应的阻控措施对保障食品安全和人体健康具有重要意义.

国内外对于镉在大米中积累的研究很多,内容涵盖“镉米”形成的各个环节,复杂而多样.然而目前尚缺乏对稻米镉积累的影响因素与阻控措施的归纳和总结.本文总结了我国目前稻田镉污染现状,针对“镉米”形成过程中的各影响因素和机制进行介绍,并将主要减控措施的研究进展进行归类总结,旨在对“镉米”问题进行阐述和讨论,为今后我国“镉米”问题的解决提供借鉴和帮助.

## 1 我国稻田镉污染现状(The status of cadmium contamination in rice fields in China)

受快速工业化和城市化发展的影响,我国面临的稻田镉污染问题日益严重.Liu 等<sup>[5]</sup>通过在中国知网(CNKI,China National Knowledge Infrastructure)和 ISI Web of Knowledge 上进行文献检索,对 2000 至 2015 年间文献中报道的我国表层(0—20 cm)水稻土镉含量进行了统计,发现我国稻田土壤中镉浓度范围为  $0.01—5.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,中值为  $0.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,镉浓度中值最高的是湖南( $0.73 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、广西( $0.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )和四川( $0.46 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )(图 1).人类活动是我国稻田土壤镉污染的主要原因,包括采矿、冶金、工业生产、污水灌溉和电子废弃物处理等.Zhang 等<sup>[6]</sup>讨论了我国耕地土壤镉污染的三个主要来源(采矿冶金、污水灌溉和城市活动),指出受采矿冶金污染的土壤中镉含量显著高于其它来源.除了矿业活动直接导致农田土壤镉污染外,污水灌溉对土壤镉的贡献同样不容忽视<sup>[7]</sup>,尤其在南方双季稻地区,灌水灌溉是农田土壤镉积累的主要来源.

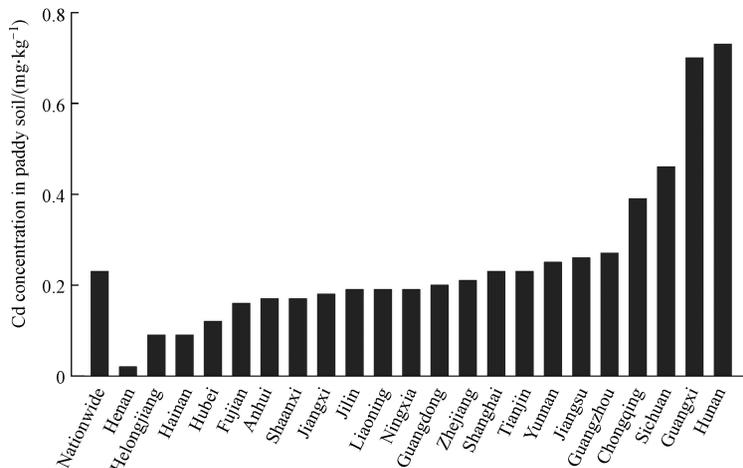


图 1 我国不同省份稻田土壤中镉含量的中值<sup>[5]</sup>

Fig.1 Median values of Cd concentrations in paddy soils from different provinces, China<sup>[5]</sup>

## 2 稻米镉积累的影响因素 (Factors influencing cadmium accumulation in rice)

与其它重金属相比,镉在土壤中的生物有效性较高,很容易被水稻吸收.对于这一途径,我们将其分成两部分来进行探讨,首先是水稻对土壤镉的吸收,其次是镉在水稻植株内部的分布和迁移.

### 2.1 水稻对土壤镉的吸收

水稻对镉的吸收受到土壤理化性质、外界温度、水稻品种、水稻根系结构及水稻根系基因的影响.

#### 2.1.1 土壤理化性质的影响

镉在土壤中的生物有效性受到很多土壤理化性质的影响,包括硫离子含量、土壤有机质、土壤 pH 值及水分管理模式等.

**土壤硫** 硫是土壤中重要的一种非金属元素,主要以有机硫存在,无机硫较少(仅占总量的 5%),然而无机硫中的负二价硫离子对重金属的生物有效性具有重要影响,能与多数重金属离子发生沉淀作用而引起重金属生物有效性的降低<sup>[8]</sup>.水稻种植的最大特点是伴随着频繁的淹水和排水,土壤的氧化还原环境会频繁发生变化,显著影响土壤中镉的形态和生物有效性<sup>[8]</sup>.当水稻土处于还原状态时,硫酸盐被还原成 $S^{2-}$ ,与镉反应生成难溶态的硫化镉,导致镉的生物有效性显著降低,因此长期淹水种植条件会降低水稻籽粒中镉的含量<sup>[9-10]</sup>.

**土壤有机质** 土壤有机质(soil organic matters, SOM)是土壤中重要的一类物质,分子结构复杂多变,具有丰富的有机官能团和较强的重金属络合能力,从而具有降低重金属的生物有效性的能力<sup>[11-13]</sup>.SOM 还能促进土壤微生物的生长,减轻重金属对土壤微生物的毒性<sup>[14]</sup>.然而,SOM 也可能会有有一定的“活化”作用<sup>[15-16]</sup>.研究报道指出 SOM 与镉离子络合后形成了含镉有机物,能够被高粱等植物的根系吸收并进入了植物体内<sup>[17]</sup>.

**土壤 pH 值** 土壤 pH 值显著影响土壤中金属元素的赋存形态.多数重金属在碱性甚至是中性环境下生成氢氧化物或氧化物沉淀,导致生物有效性的下降.田间试验显示,水稻土中镉的生物有效性与土壤 pH 呈现显著负相关关系,络合态镉则与土壤 pH 呈现显著正相关<sup>[15,18-19]</sup>.酸性的红壤土种植的水稻体内镉的含量显著高于同条件下生长在碱性水稻土的水稻,镉生物富集系数(bioaccumulation factor, BCF)是碱性水稻土的 2—7 倍<sup>[11]</sup>.Chaney 等认为,当土壤的 pH 值 $<6.0$ 时,pH 值是影响水稻等植物吸收镉的决定性因素<sup>[20]</sup>.一些 pH 值较低的非镉污染水稻土生产的稻米中镉的含量会高于 pH 值较高的镉污染土壤所产稻米<sup>[21]</sup>,可见土壤的 pH 值是决定水稻吸收镉的重要因素.

**稻田水分管理** 水稻的生长过程分为分蘖期、孕穗期、抽穗期、乳熟期、蜡熟期.在不同生长时期进行稻田排水处理,对稻米含镉量能产生显著影响.常规的水分管理方法(“深水返青,浅水分蘖,够苗晒田,后期干湿交替”原则)能获得最优的产量,但会提升稻米中镉的含量<sup>[22]</sup>,因此探究合适的水分管理模式对保障稻米安全具有重要意义.陈光辉等<sup>[22]</sup>发现相比于全生育期淹水处理,各生长期的排水处理均会使得稻米中镉含量上升,其中抽穗期排水处理后收获的稻米中镉的含量是对照的 4 倍.纪雄辉等<sup>[23]</sup>探究了稻田水分管理模式影响水稻镉积累的机理,将水分管理模式分成长期淹水、间歇灌溉和间湿润灌溉 3 种,潮泥田和黄泥田长期淹水灌溉处理的水稻根膜中的铁分别比湿润灌溉处理增加了 12.6 倍和 8.5 倍;经过长期淹水处理后的水稻根、茎、籽粒的镉含量均极显著低于相应的湿润灌溉处理,其中糙米中镉的平均含量比间歇灌溉低了 41.3%,比湿润灌溉低了 70.7%.纪雄辉等分析认为,长期淹水的还原条件下  $Cd^{2+}$  与其它二价金属离子( $Mn^{2+}$ 、 $Fe^{2+}$  等)之间会竞争离子转运吸收蛋白,同时土壤中的硫酸根离子还原生成的硫离子也会与  $Cd^{2+}$  发生共沉淀反应,使得土壤镉的生物有效性明显降低<sup>[23]</sup>.研究指出,在水稻分蘖时进行适当的浅水保田,在抽穗期进行淹水处理,而在蜡熟期进行晒田,能在一定程度上兼顾到稻米产量和稻米低镉含量<sup>[22,24-25]</sup>.

#### 2.1.2 温度的影响

全球变暖已经成为不同学科的重要研究课题,其对环境问题的潜在影响亦值得深入探讨和研究,特别是在环境质量和粮食安全方面.Ge 等<sup>[26]</sup>研究了不同变暖幅度、日间变暖和夜间变暖、不同生长期气温变暖对水稻富集镉的影响,发现在  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  两种全天的升温模式下,根、茎叶和稻米都呈现镉含量上升的结果,特别是稻米中镉的含量在两种升温处理下分别为对照组的 1.45 倍和 2.31 倍;其次,在对夜间和日间升温模式,发现夜间和白天变暖均显著提高了镉的转运因子以及从茎叶到谷粒的百分比,白天

主导了镉从根到茎的转运;对水稻进行不同生长期升温处理,结果显示成熟阶段升温使得稻米中镉的含量增幅在 20%—30%,揭示了营养期温度升高促进了镉从根到地上部的转运,而成熟期温度升高进一步增加了镉的吸收和谷物积累.这一研究结果可为全球变暖的气候背景下土壤-水稻系统中镉的归趋提供新的认识.

### 2.1.3 水稻品种的影响

水稻经长期的杂交培育和基因改良,品种已愈加丰富.我国南方主要种植的是籼型水稻,包括常规稻、杂交籼稻和超级杂交水稻<sup>[27]</sup>;我国北方主要种植粳型水稻,以常规粳稻为主<sup>[27]</sup>.不同类型的水稻所产的籽粒中镉含量具有显著的差异<sup>[27-30]</sup>,整体表现为杂交籼稻>杂交粳稻>常规籼稻>常规粳稻<sup>[31-32]</sup>,杂交稻高于常规水稻,籼稻高于粳稻.这一趋势变化与不同类型水稻的根系活性有关<sup>[33]</sup>.根系对镉的吸收能力差异以及镉在水稻植株内的迁移率高低是不同品种水稻籽粒镉含量差异的决定性因素<sup>[33-36]</sup>.总体上粳稻对镉的吸收能力弱,吸收后向籽粒运输的能力也较差.

### 2.1.4 水稻根系结构的影响

水稻通过根系吸收水和各种离子,根尖是最有效的吸收部位.有报道称,阳离子只能通过根尖部区域和侧根非质外体通路进入木质部<sup>[37-38]</sup>.Huang 等<sup>[39]</sup>研究了根表面积(RSA, root surface area)和根尖数量(NRTs, number of root tips)对于水稻镉吸收和转运的影响,发现单位根表面积上根尖数量较少的水稻植株对于镉的吸收较弱<sup>[39]</sup>.除了 RSA 和 NRTs 之外,根孔隙度也是水稻根系形态中重要的一个参数.根孔隙度是衡量水稻抵抗金属元素在体内积累的一个重要特征,具有较大孔隙度的水稻植物倾向于具有较低的镉吸收和转运能力<sup>[39]</sup>.也有报道称,水稻可以通过从根部向根际释放氧气从而在根表形成保护性氧化区(根表铁膜)来防止金属离子进入植物<sup>[40-41]</sup>,一定程度上对重金属吸收具有抵御作用.

### 2.1.5 水稻根系基因的调控作用

镉离子从水稻根表进入到根系中,有两种途径:一是共质体途径,即通过跨膜过程进入到由根部细胞通过胞间连丝连接而成的连续体(共质体)中;二是质外体途径,即在浓度梯度的作用下,以被动扩散的形式进入质外空间.在植物根部表皮与根中心的维管柱之间是皮层,皮层的最内一层称为内皮层,排列紧密、整齐,有的部位有局部栓质化的带状加厚,也称为凯氏带.凯氏带使得从根表皮吸收到质外空间的水分和离子几乎无法通过,因此水分和离子要想进入内部的维管柱只能通过共质体途径.因此水稻根系吸收镉离子应当是通过消耗能量通过转运蛋白转运进入根细胞内,然后通过胞间连丝从根表皮细胞向中柱发生横向运输,随后在中柱薄壁细胞发生木质部装载,进入导管发生运移,最终通过木质部长距离运送到叶肉细胞<sup>[42-43]</sup>.

在这过程中,根系细胞的转运蛋白基因表达对镉的吸收扮演着重要角色.在植物和哺乳动物体内已经发现了诸多金属转运蛋白<sup>[44]</sup>,在哺乳动物体内发现的 ZIP8 和 ZIP14 具有转运  $Mn^{2+}$ 、 $Zn^{2+}$ 、 $Fe^{2+}$  以及  $Cd^{2+}$  的重要作用<sup>[45-46]</sup>.最早在植物中发现的  $Cd^{2+}$  转运蛋白是在拟南芥(*Arabidopsis thaliana*)根系表达的 *AtIRT1*<sup>[47-48]</sup>.在水稻根部表达的 *OsIRT1* 和 *OsIRT2* 也具有转运  $Fe^{2+}$ 、 $Cd^{2+}$  的能力,并且在水稻的脱水期,  $Fe^{2+}$  的浓度降低会诱导 *OsIRTs* 的转运作用<sup>[49-50]</sup>.Lee 和 An<sup>[51]</sup> 的研究表明 *OsIRT1* 可能参与根对镉的吸收,但其贡献程度上受环境(土壤)条件的影响.

近年来的研究表明,介导水稻根部镉吸收的主要转运蛋白是 *Nramp* 蛋白,能够转运  $Mn^{2+}$ 、 $Zn^{2+}$ 、 $Cu^{2+}$ 、 $Fe^{2+}$ 、 $Cd^{2+}$ 、 $Al^{3+}$  等金属离子<sup>[52-54]</sup>.Akimasa 等<sup>[55]</sup>报道了 *Nramp* 家族中的 *OsNramp5* 参与了 Mn 的摄取.通过定量实时 RT-PCR 技术确定 *OsNramp5* 的表达水平,发现其主要在水稻根部表皮、外层以及木质部周边表达,具体定位于细胞的外侧质膜上.Akimasa 等<sup>[55]</sup>将水稻幼苗培养在缺乏相应营养元素的营养液中,研究了缺乏植物必需元素 Zn、Fe、Mn、Cu 对 *OsNramp5* 表达的影响,发现 *OsNramp5* 受到 Zn、Fe 缺乏的轻微抑制,而几乎不受 Mn、Cu 缺乏的影响.

利用 RNA 干扰技术(RNA interference, RNAi)获得敲除 *OsNramp5* 基因的实验株系,种植实验和对照株系(野生型)水稻,发现实验组与对照组水稻地上部分中 Zn 和 Cu 的浓度没有差异,然而实验株系根部和地上部分 Mn 的浓度显著低于野生型系,实验株系地上部分 Fe 的浓度也低于野生型水稻.在水稻成熟期,实验株系茎秆部分镉的浓度( $1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ BW}$ )低于野生型稻( $7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ BW}$ ),而 Fe、Zn 和 Cu 的浓度略微降低甚至没有改变,说明了植株对于镉的吸收因为 *OsNramp5* 的敲除而被极大地降低<sup>[55]</sup>,揭示

了水稻镉的吸收受到 *OsNramp5* 基因的调控,对未来培育低镉积累水稻品种具有重要指导意义<sup>[55]</sup>.研究也报道了水稻体内其它金属离子转运蛋白对镉的转运和积累的影响.Takahashi 等发现 *OsNramp1* 作为一种在根系细胞质膜上表达的铁离子转运载体,对镉离子内流进入水稻有着重要的影响<sup>[56]</sup>.有研究显示 *OsNramp1* 在籼稻品种中的高表达,可能与籼稻中镉的积累程度高于粳稻有一定关系,因为过量表达 *OsNramp1* 的水稻植株根中的镉积累降低,而在地上部分中的积累升高<sup>[44-56]</sup>.

## 2.2 镉在水稻植株内部的分布、迁移及相关功能基因

### 2.2.1 镉在水稻植株内的分布和迁移

Nocito 等<sup>[57]</sup>发现镉被吸收后的 49%—79% 存在于根部,具有潜在移动能力的镉约占总量的 24%.田间试验显示,水稻各个组织器官中镉含量的高低顺序为籽粒<叶片<茎秆<根部,储存营养物质的器官中镉的积累量低于新陈代谢旺盛的器官<sup>[46,58-61]</sup>.将多个水稻品系种植在不同镉污染土壤,分析水稻各部位间的转运系数,一般呈现为土-根>茎-叶>茎-糙米>根-茎的规律<sup>[58,62]</sup>.对于单独的籽粒而言,其各部分的镉含量也有不同.将稻谷分离为精米、颖壳、糠层等 3 部分,分析各部分镉含量,结果显示精米、颖壳、糠层中镉的含量呈现依次增大的趋势,人们食用的精米的含镉量约占其原本籽粒的 30%,精米内胚中镉的浓度显著高于胚乳,但胚乳占精米质量的绝大部分,因此就镉总量分布而言,胚乳高于胚<sup>[63-64]</sup>.

从镉被水稻根系吸收到最终分布至不同的组织器官是一个复杂的过程.在水稻齐穗期前(未长出籽粒时),镉被根系吸收后经木质部运输,由茎运送至植株的地上部分(如叶片)进行储存;在齐穗期后,镉还会通过相同的途径进入籽粒中<sup>[65]</sup>.Fujimaki 等利用正电子同位素放射技术揭示了镉被水稻吸收后的迁移行为<sup>[66]</sup>.首先,镉通过茎秆迅速从根部运移到枝芽上,但镉倾向于留存在茎节中.在经过 7 h 的镉处理后,镉优先沉积在稻穗部分而不是叶片,说明茎节是重新定向镉迁移方向的重要组织,具体的机制可能是将镉从木质部转移到韧皮部,而韧皮部被证实介导了将近 100% 的籽粒镉积累的过程<sup>[66-67]</sup>.Feng 等利用转录组学与离子组学手段,发现水稻的根和茎是镉进入水稻地上部分的主要阻碍,这两个部位富集了较高浓度的镉<sup>[68]</sup>.水稻的茎秆上的节和维管束系统结构复杂,能对重金属离子在水稻内的迁移起到阻碍作用<sup>[66]</sup>.但也有研究表明,部分基因型的水稻并不会在茎部富集储存镉,仅仅起到通道的作用<sup>[69]</sup>.总而言之,由于根和茎的作用,通过土壤吸收的镉进入籽粒的部分并不多,水稻在抽穗到成熟期吸收的大部分镉被滞留在了各茎节.

在籽粒中积累的镉主要来自于齐穗期后水稻各器官富集的镉的再迁移,称为“再活化”过程,这些再活化的镉会首先被转运至穗颈处的韧皮部,在成熟阶段再转运至稻米中<sup>[66,70]</sup>.Kato 等<sup>[71]</sup>分析了韧皮部中镉的结合态,发现其不再是导管中的水溶态,而是与一些大的蛋白质或硫化化合物形成复合物,这种形态有利于其在韧皮部筛管中的迁移.Kashiwagi 等<sup>[72]</sup>发现齐穗期后籽粒中的镉主要来自于水稻其它组织和器官在生长前期积累的镉,主要是叶片和茎秆起主要作用.茎秆会一直向籽粒中输送镉,直至蜡熟期停止;水稻叶片中镉的浓度在齐穗期后不断降低,说明一直在向籽粒输送镉<sup>[64]</sup>.相关的同位素示踪手段显示,在水稻生长后期,籽粒中的镉也有一部分直接来源于从土壤吸收和运输而来<sup>[66]</sup>.这两种镉积累途径处于动态平衡,当土壤中可供吸收的有效镉含量较高时,直接从土壤吸收和运输到籽粒中的镉的量也可能占主导地位<sup>[62,65]</sup>.相关报道称<sup>[70]</sup>,水稻籽粒中总镉的 60% 来自于开花期前水稻植株中积累的镉,而剩余的 40% 来自花后生长期从土壤的摄取.

由于存在从叶片到籽粒的镉“再活化”过程,叶片镉暴露也会影响到籽粒中镉的富集.大气沉降被认为是植物体内重金属积累的来源之一,因为植物叶表皮细胞能够吸收来自大气中的重金属元素<sup>[62]</sup>.对水稻叶面喷施镉溶液,灌浆期水稻的叶片镉输出量、籽粒中镉的含量都显著高于空白处理<sup>[62]</sup>.镉元素通过叶表皮细胞进入叶片后,沉积在细胞壁和胞间间隙中,在达到一定的积累量后,镉会进入共质体中贮存在细胞液等结构中,在齐穗期后进一步转运到籽粒中.这方面的研究在整个镉米问题中最容易被忽视,应当引起学者的关注.

综上所述,镉在水稻植株内分布和迁移的主要特征为镉在水稻植株内存在两个“汇”即茎和叶片,这两个“汇”在生长前期将从根部吸收的镉进行储存,在生长后期又扮演“源”的角色,成为籽粒中镉元素的重要来源.揭示不同生长期镉在水稻不同器官内的迁移行为,能为采取农艺调控措施解决镉米问题提供科学指导.

## 2.2.2 影响镉在水稻植株内的分布和迁移的相关基因

众多基因调控着镉在水稻植株内的分布和迁移. 首先, 镉进入根系细胞后要发生木质部装载, 进入导管内才能随着水分上升到地面以上部分. 对于木质部装载机制的研究不多, 但 Miyadate 等<sup>[73]</sup> 在一种名为“日本晴 (*Nipponbare*)”的水稻体内发现了一个影响木质部装载过程的基因 *OsHMA3*, 该基因主要在水稻的根部表达, 定位于细胞液泡膜上, 其影响着镉向木质部迁移、装载的过程, 它所编码的  $P_{1B}$ -ATPase 转运蛋白具有将镉隔离在根系细胞液泡中的能力, *OsHMA3* 的过表达能降低低镉积累品种水稻籽粒中镉的含量. Miyadate 等<sup>[73]</sup> 进一步实验发现 *OsHMA3* 的突变体丧失了这种隔离能力, 突变体籽粒中镉的含量明显升高. Luo 等<sup>[74]</sup> 克隆了一个编码植物防御素类似蛋白的基因 *CAL1*, 其定位在水稻根部外皮层和木质部中柱薄壁细胞内, *CAL1* 编码的蛋白在中柱薄壁细胞处与镉发生螯合后被分泌到细胞外, 进入导管发生迁移.

其次, 对于镉在茎节处发生由木质部到韧皮部的转移和从叶片到籽粒的镉“再活化”过程, 研究也揭示了相关基因的调控机制. Uraguchi 等发现了一种参与韧皮部镉迁移过程的基因 *OsLCT1*, 与小麦低亲和力和阳离子转运蛋白的编码基因同源, 并确定其能介导水稻茎节中镉从木质部向韧皮部的运输<sup>[75-76]</sup>. *OsLCT1* 基因在细胞的质膜上编码外排转运蛋白, 其在籽粒成熟阶段的叶片和茎节中表达程度很高, 在大维管束细胞及分散的维管束中表达<sup>[75]</sup>. Uraguchi 等<sup>[75]</sup> 利用 RNA 干扰技术关闭 *OsLCT1* 基因的表达, 在形成的 RNAi 株系中, *OsLCT1* 的 mRNA 水平仅为对照组的 30—50%, 镉积累研究显示 RNAi 株系木质部汁液中镉浓度没有明显变化, 而植株叶片和籽粒中的镉含量显著低于对照组, 仅为对照组 Cd 含量的 50%, 说明韧皮部介导的“再活化”过程受到了抑制. 水稻籽粒中镉的富集主要来源于经过韧皮部发生的“再活化”过程, 因此探究调控韧皮部“再活化”过程中的基因有助于选育低镉积累的水稻品种.

## 2.3 镉米的形成过程总述

结合上述各影响因素, 镉米形成过程可以归纳为图 2 中所示的几个环节: (1) 土壤理化性质影响着水稻根部对于镉的吸收, 同时根部吸收过程又受到一些基因如 *OsNramp5* 等的调控; (2) 在进入根部后, *OsNramp5*、*OsHMA3* 等基因调控着镉在根部皮层中的运输过程; (3) 运输至中柱薄壁细胞处时, 在 *CAL1* 蛋白作用下发生木质部装载进入导管, 进而向地上部分运输; (4) 运输茎节处后, 由 *OsLCT1* 介导, 发生木质部向韧皮部的运输; (5) 进入韧皮部后被运送至叶片和籽粒中累积, 并在籽粒成熟期发生叶片镉的“再活化”, 在 *OsLCT1* 的作用下, 镉由叶片转移至籽粒中, 最终在导致镉在大米中的积累.

## 3 阻控措施 (Mitigation strategies)

“镉米”问题的解决可以从多方面提出有效的阻控措施: 从“阻”的角度, 可以从污染土壤修复治理和从基因层面阻止水稻吸收镉, 达到降低大米中镉含量的目的; 从“控”的角度, 面对已经出现的镉米, 可以通过对稻米进行合理的加工以及开发合理的膳食调控措施, 达到降低人群镉暴露的目的.

### 3.1 土壤修复措施

土壤镉是稻米中镉的主要来源, 通过土壤修复措施降低土壤中镉的生物有效性是解决“镉米”问题的重要途径.

#### 3.1.1 物理修复

物理修复是指通过各种物理过程将污染物从污染土壤中去除或分离的技术<sup>[77]</sup>. 镉污染土壤的物理修复方法主要有排土、客土、深耕翻土等传统物理方法以及电修复技术、洗土法等. 污染土壤物理修复技术适用于大多数污染物土壤, 修复效果较稳定、彻底, 是一种常用的、治本的土壤修复措施. 但费时费力, 修复成本高, 易使土壤肥力降低, 较适用于小面积的重度土地污染区<sup>[78]</sup>. 早在 1984 年, 吴燕玉等<sup>[79]</sup> 在张士灌区调查时发现去除表层土可使稻米中镉含量降低 50% 左右. Tang 等<sup>[80]</sup> 开发了基于电动土工合成材料 (EKG) 的新型土壤修复设备, 用于从稻田土壤中原位分离金属, 效果显著, 可以彻底隔离水稻土中的金属.

#### 3.1.2 化学修复

化学修复措施主要采用改良剂、螯合剂及化学淋溶剂等, 通过提高土壤 pH、降低镉迁移性或生物活性等作用, 达到抑制水稻吸收镉的目的, 主要采用土壤钝化法修复镉污染稻田. 化学钝化治理方法是向土壤中投入钝化剂 (抑制剂、改良剂), 通过增加土壤有机质、氧化物及粘粒的含量, 改变土壤阳离子交

换量、氧化还原电位、pH 值和电导等物理化学性质,来降低土壤中镉等重金属的生物有效性,达到降低作物体内镉浓度的方法.

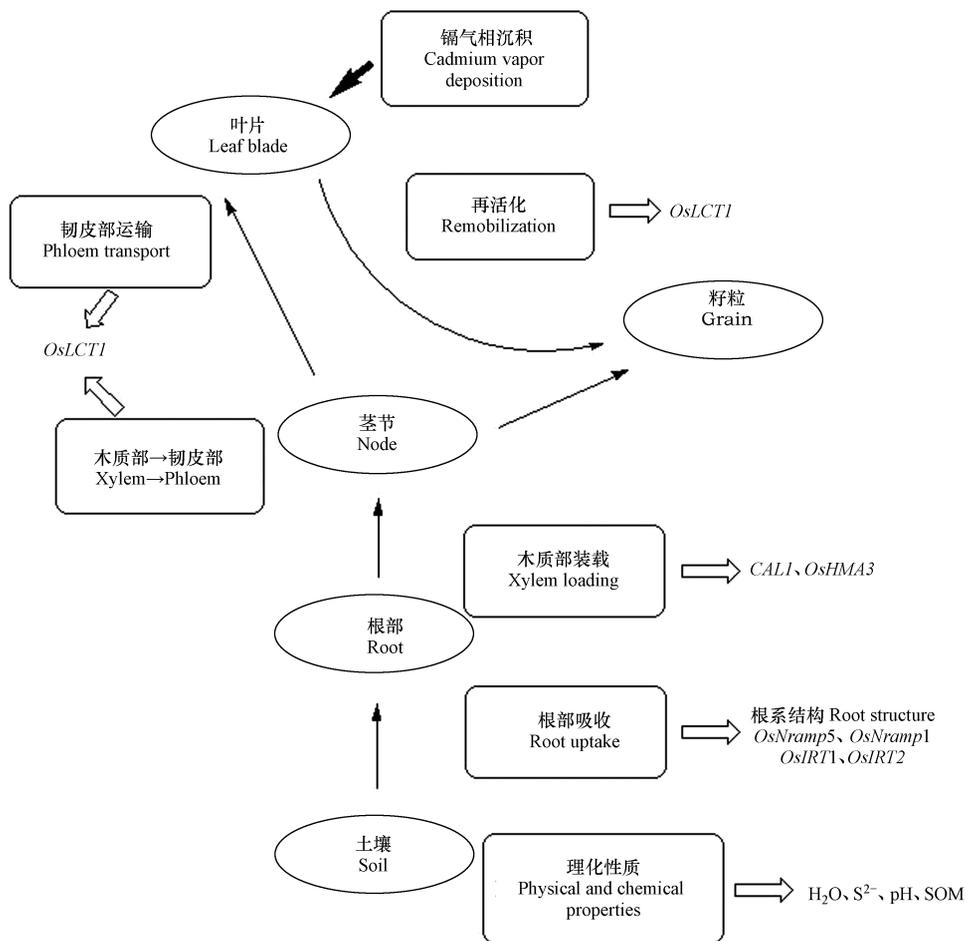


图 2 镉从土壤到籽粒的迁移示意图

Fig.2 A flow chart showing cadmium transport processes from soil to rice grains

施用有机质 He 等<sup>[13]</sup>进行了历时三年的盆栽实验,探究生物炭对稻米和土壤镉含量的影响,结果显示生物炭的施用主要通过降低可交换部分镉来降低土壤中镉的生物有效性,减少了水稻中镉的积累.宋波等<sup>[12]</sup>探究了土壤有机质对土壤中镉活性的影响,指出土壤有机质能使镉从活性较高向活性较低的赋存形态转变,降低土壤镉的离子交换态和氧化结合态,增加镉的有机质结合态.

施用硅肥 Wang 等<sup>[81]</sup>进行田间试验,发现施用不同硅肥包括硅钾肥(KSi)、硅钙肥(CaSi)、半成品硅钾肥(S-KSi)都可以降低稻米中镉的含量,其中硅钙肥施用量为  $9000 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  对稻米镉浓度的降低效果最佳,高达 73%. 一个原因是硅酸盐施加引起的土壤 pH 值增加降低了土壤中有效镉含量,另一个重要原因为硅限制了镉从根部到地上部的运输.在水稻中,硅作为细胞壁的结构成分发挥着重要作用.细胞壁中形成的胶体二氧化硅与重金属有很强的亲和力,镉可以通过镉和硅的共沉淀作用而沉积在细胞壁中<sup>[81]</sup>.通过硅-镉络合在细胞壁中共沉淀,是施加硅降低镉从根向地上部迁移,从而减缓水稻籽粒中镉积累的关键机制之一.此外在内胚层附近的硅沉积可以部分阻断质外体旁路流过根并使镉从根到地上部分的质外体传输失活<sup>[81]</sup>.

施用铁和锌肥 铁元素是动植物生长发育中十分重要的微量元素,在地壳含量中排在第四位,但在许多的石灰性(碱性)土壤环境下,能供给植物吸收的有效态铁很少.因此在长期的生物演化过程中,包括水稻等在内的很多植物都进化出了铁转运系统和铁营养代谢途径<sup>[82-83]</sup>.研究表明植物对土壤镉的吸收、转运与植物铁营养代谢途径密切相关,在铁有效态水平很低时,植物会大量表达一些转运蛋白<sup>[50,84]</sup>(如膜转运蛋白 IRT1 等),以此来增加 Fe 元素的吸收,但与此同时一些与铁离子相似的重金属离子也

会藉由这些膜转运系统进入植物体<sup>[85]</sup>.对水稻施用铁肥的原理正是基于影响水稻植株的铁营养代谢途径来实现.通过提高土壤或者植株内铁浓度,与镉等重金属产生竞争吸收作用,抑制相关转运蛋白的表达,从而减少对镉的吸收.

邵国胜等<sup>[85]</sup>将不同形态铁肥( $\text{FeSO}_4$ 和 EDTA 二钠亚铁即  $\text{EDTA}\cdot\text{Na}_2\text{Fe}$ )通过土壤添加和叶面喷施的方式作用于水稻,发现对土壤施用或对植株喷施铁肥不会对土壤的 pH 产生影响,施用  $\text{EDTA}\cdot\text{Na}_2\text{Fe}$  可以显著地提高土壤中有效态铁的含量,极显著地降低了水稻根系、地上部以及稻米(糙米和精米)中镉的含量,降低幅度高于 75%.Duan 等<sup>[86]</sup>在土壤中施用生石灰,同时在穗起始阶段对水稻叶面施用  $\text{EDTA}\cdot\text{Na}_2\text{Fe}$  溶液或  $\text{ZnSO}_4$  溶液 2 次,发现相比于对照组中稻米中镉的含量  $0.63\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,土施生石灰与叶面施用  $\text{EDTA}\cdot\text{Na}_2\text{Fe}$  和  $\text{ZnSO}_4$  溶液联用的实验组稻米镉含量为  $0.47\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $0.22\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,降幅 25.4% 和 65.1%.

施用石灰 Yang 等<sup>[87]</sup>的研究显示,在微酸性土壤中施加生石灰可减少可交换的 Fe、Mn、Zn 和 Cd 含量,使得土壤中这些元素的生物有效性下降,诱导了水稻根部中 *OsNramp5* 和 *OsIRT1* 基因表达水平的升高,转运蛋白的表达水平随之上升.Yang 等<sup>[87]</sup>发现在土壤中施用  $0.60\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  石灰可以减少水稻镉积累而不损害水稻.

施用硒肥 施用硒肥来降低土壤中金属的生物有效性有过多报道.Malik 等<sup>[88]</sup>研究利用硒肥限制砷的吸收和增强抗氧化作用来减轻砷对绿豆(*Phaseolus aureus Roxb*)的毒性作用.Wang 等<sup>[89]</sup>发现在 Hg 污染的土壤中添加硒可以帮助生产富含硒并且含有较低总汞和甲基汞的糙米.Hu 等<sup>[90]</sup>向镉和铅污染土壤中施加  $0.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  的硒肥( $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  亚硒酸钠),发现硒的施用显著提高了水稻籽粒中硒的积累量,并显著降低了水稻各组织中镉和铅的含量;在糙米样品中,硒的施用使镉含量降低了 44.4%,但对铅的积累没有显著影响.Wan 等<sup>[91]</sup>向湖南镉污染土壤施加亚硒酸盐( $0.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),发现亚硒酸盐添加降低了土壤溶液和成熟水稻中的镉的浓度和镉的生物富集系数.

### 3.1.3 生物修复

生物修复技术是一种以某些特定的动、植物和微生物为载体,对土壤中的污染物进行吸除或降解从而净化土壤的修复技术.在重金属污染土壤的修复工作中,研究和培育超积累植物是十分重要的课题,目前已有许多镉超积累植物的报道.Long 等<sup>[92]</sup>通过对我国东部铅锌矿区耐性植物的调查和营养液培养实验,首次发现了新的锌超积累植物——东南景天(*Sedum alfredii* H),填补了我国锌超积累物种的空白.熊愈辉等<sup>[93]</sup>人对东南景天进行镉吸收研究,发现东南景天在  $500\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  浓度以下的镉营养液中的生长状况不会受到抑制,植株地上部镉积累量可达每株  $3.29\text{ mg}$ ,茎、叶中镉含量分别为  $5.27\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $5.68\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,地上部镉的含量已经超过干重的 0.01%,可以认为是镉超积累植物.进一步的研究还显示东南景天对镉、铜复合污染具有较强的耐性和超量积累的能力<sup>[94]</sup>.近年来,对于东南景天超积累能力的研究已经拓展到了分子生物学层面,涵盖转录组测序、重金属转运相关基因的克隆及功能研究等<sup>[95-96]</sup>.除东南景天之外,其它具有镉积累能力的植物也有部分报道,包括鬼针草、黑麦、印度芥菜、金盏菊、龙葵等<sup>[97-99]</sup>.然而目前关于利用镉积累植物降低水稻镉吸收的报道还不多见.

## 3.2 从水稻基因角度出发的减控措施

前文已经介绍了 *OsNramp5*、*OsHMA3* 等基因对水稻吸收镉的影响机制,通过分子手段改变相关基因,能从基因水平开发出降低稻米镉积累的调控措施.Ishikawa 等和 Ishimaru 等<sup>[100-101]</sup>通过碳离子辐照育种,产生了 3 个水稻突变体,并在种植收获后分析稻米中的镉含量,相较于辐照前的母体稻米的镉含量(平均  $1.73\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),突变组的稻米镉含量均低于  $0.05\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ .随后通过基因鉴定,确定了引起这些突变体基因的位置<sup>[101]</sup>,显示这些突变体都具有 *OsNramp5* 基因的变异;功能分析表明,由这些变异 *OsNramp5* 基因编码的金属离子转运蛋白是有缺陷的,这些缺陷大大降低了根部对于镉的吸收,导致了秸秆和稻米中镉含量的减少<sup>[100]</sup>.Ishikawa 等<sup>[100]</sup>的进一步实验表明,在镉污染农田生长时,突变体的稻米粒中几乎检测不到镉并且没有表现出农业或经济上不利的性状(包括株重下降、产量减少等).Tang 等<sup>[102]</sup>也提出使用 CRISPR/Cas9 系统敲除 *OsNramp5*,可在不影响产量的情况下产生低镉积累籼稻.Ishikawa 等<sup>[100]</sup>开发 DNA 标记的方法以便于辅助选择携带有利的 *OsNramp5* 的栽培种,利于将来量产化.由于离子束辐射产生的突变体不是转基因植物,可能更容易被消费者所接受,这将为未来水稻选种育种

提供重要指向。

南京农业大学赵方杰教授团队与日本冈山大学马建锋教授合作<sup>[103]</sup>,采用转基因技术,将水稻内的 *OsHMA3* 基因在南方主栽籼稻品种中嘉早 17 过量表达,并在温室盆栽条件下,将转基因株系与野生型种植于镉污染水稻土中,实验结果表明野生型稻米镉含量超过国家食品安全标准 ( $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 3—10 倍,而转基因株系稻米镉含量降低 94%—98%,仅为  $0.01—0.04 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,并且转基因株系的性状和必需微量元素含量无显著变化。值得一提的是, *OsHMA3* 过表达还增加了一些 *OsZIP* 基因的表达<sup>[103]</sup>。籼稻稻米镉含量普遍较高,种植面积广,亟需开发低镉积累籼稻品种。利用 *OsHMA3* 的过表达,将镉隔离在根系液泡中,成功阻止了镉向地上部分的运输,对培育低镉积累籼稻品种具有十分重要的意义。

### 3.3 稻米加工工艺对成品米中镉含量的影响

有研究表明,在镉进入水稻体内由茎叶向籽粒运输迁移的过程中,镉会选择性地与蛋白质以络合物的形式结合<sup>[104-105]</sup>,也就是说镉容易富集在蛋白质含量高的部位。日常食用的大米是已经脱去了米糠的稻米,主要食用部分是稻米的胚乳部分,而米糠层蛋白含量最高,胚乳部分蛋白含量较低。因此脱糠的加工过程实际上是一个降低镉含量的过程,其处理工艺将起到很大的除镉作用。

砻谷、碾米是大米生产的主要工序。砻谷是脱除稻谷颖壳(谷粒外包的干燥鳞状的保护壳)的过程;碾米指采取物理方法剥除糙米籽粒表面糠层(皮层和胚)及部分胚乳的过程。魏帅等<sup>[106]</sup>通过对砻谷、碾米的时间长度等进行研究,稻米经砻谷加工后镉含量降低,同时随着碾米精度提高,精米中镉含量也呈现逐渐降低,在碾米精度为 23.8% 时(碾米时间 2.5 min),达到最佳效果。但他们也发现镉含量高于  $0.32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的稻米无法通过一般的砻谷碾米加工工艺获得镉含量达标的大米<sup>[106]</sup>。但从营养学角度,砻谷碾米是在不断地破坏稻米原有的营养,所以砻谷碾米的工艺存在一定弊端。

### 3.4 从膳食角度降低大米中镉的健康风险

在植物根系施用铁肥和锌肥,能增强  $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$  与  $\text{Cd}^{2+}$  的竞争,从而减少水稻对镉的吸收。在动物体内也具有类似的减控镉暴露的过程,具体机制为动物对  $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$  与  $\text{Cd}^{2+}$  等的吸收也是通过共有转运蛋白实现的<sup>[17]</sup>。Zhao 等<sup>[107]</sup>开展小鼠试验,研究了向镉污染大米 ( $0.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ Cd}$ ) 添加矿物营养物质对大米中镉的相对生物有效性 (Cd relative bioavailability, Cd-RBA) 的影响,结果发现,小鼠只进食镉污染大米时, Cd-RBA 为  $43 \pm 5.3\%$ ,在硝酸盐补充剂中,  $150—5000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的钙补充量可将 Cd-RBA 降低至  $8.5\%—29\%$ ,降低镉吸收的效果最为显著;高铁补充剂 ( $80—200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 也可使 Cd-RBA 降低至  $26\%—27\%$ ,但低于  $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的铁补充剂量对 Cd-RBA 几乎没有影响;然而,与添加硝酸钙相反,添加氯化钙反而会一定程度上增强 Cd-RBA。对欧美人群膳食的调查研究发现,他们食用的果园食品往往容易富集铁、钙以及少部分镉,这些食品能够一定程度上减少人体对镉的吸收<sup>[108-109]</sup>。

## 4 结论与展望 (Conclusion and prospect)

现阶段对于“镉米”成因的研究较多、较复杂,主要关注土壤中镉的形态和生物有效性和水稻本身对镉的吸收能力以及镉在植株内的分布和迁移过程。这些过程受多方面因素的影响,包括水稻的根系结构、水稻基因调控、种间差异以及环境因素等。这些影响因素小到水稻根细胞内的某个控制转运蛋白表达的基因点位,大到全球变暖带来的气温升高,覆盖范围广,涉及的研究学科和研究手段众多。

上述关于“镉米”形成的几方面介绍也指引了解决“镉米”问题的关键措施:1) 从影响镉的生物有效性角度来说,可以采用化学、生物修复方法,例如施用铁肥、锌肥、生石灰、有机质等进行化学处理;2) 从水稻本身对镉的吸收特性来看,可以利用先进的基因修饰技术、杂交水稻培育技术,培育具有较少的镉离子转运蛋白、镉积累量低并且生长情况、产量不受影响的优势水稻品种;3) 可以通过对稻米的种植工艺、加工工艺进行优化,开发合理的水分管理模式,降低镉在籽粒的积累量,或者利用优化后的砻谷、碾米工艺去除稻米中含镉多的部位;4) 从人体摄入的角度,通过膳食补充矿物质等,减少在摄入稻米时可能带来的镉暴露风险。

国内外对于“镉米”的成因等的研究已经趋于完备和成熟,未来的研究精力应当投入到“镉米”阻控措施开发以及人体健康风险评价工作中。修饰水稻基因、培育低积累品种等研究展现出了非常出色的潜力。在未来可能日趋严重的土壤重金属污染的背景下,通过分子手段开发能够定向吸收生长发育所

需营养成分, 而同时不会吸收重金属离子的水稻品种是非常重要的解决途径之一. 其它的手段当然也有各自不同的适用情况和发展空间, 亦值得未来进一步深究和探讨.

### 参考文献 (References)

- [ 1 ] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.  
National Bureau of Statistics. China Statistics Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2018 (in Chinese).
- [ 2 ] 甄燕红, 成颜君, 潘根兴, 等. 中国部分市售大米中 Cd、Zn、Se 的含量及其食品安全评价[J]. 安全与环境学报, 2008(1): 119-122.  
ZHEN Y H, CHENG Y J, PAN G X, et al. Cd, Zn and Se content of the polished rice samples from some Chinese open markets and their relevance to food safety[J]. Journal of Safety and Environment, 2008(1): 119-122 (in Chinese).
- [ 3 ] DU Y, HU X F, WU X H, et al. Affects of mining activities on Cd pollution to the paddy soils and rice grain in Hunan Province, Central South China[J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2013, 185(12): 9843-9856.
- [ 4 ] ZHU H, CHEN C, XU C, et al. Effects of soil acidification and liming on the phytoavailability of cadmium in paddy soils of central subtropical China[J]. Environmental Pollution, 2016, 219: 99-106.
- [ 5 ] LIU X, TIAN G, JIANG D, et al. Cadmium (Cd) distribution and contamination in Chinese paddy soils on national scale [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(18): 17941-17952.
- [ 6 ] ZHANG X, CHEN D, ZHONG T, et al. Assessment of cadmium (Cd) concentration in arable soil in China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(7): 4932-4941.
- [ 7 ] ZHAO F J, MA Y, ZHU Y G, et al. Soil contamination in China: Current status and mitigation strategies[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(2): 750-759.
- [ 8 ] 陈伟康. 硫肥对水稻根际中镉的生物有效性及微生物群落结构的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.  
CHEN W K. Effect of sulfur fertilizer on the bioavailability of cadmium in rice rhizosphere and the characteristics of rhizosphere microbial community[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018 (in Chinese).
- [ 9 ] CHEN Y X, WANG Y P, LIN Q, et al. Effect of copper-tolerant rhizosphere bacteria on mobility of copper in soil and copper accumulation by *Elsholtzia splendens*[J]. Environment International, 2005, 31: 861-866.
- [ 10 ] AHMED H P, SCHOENAU J J, KING T, et al. Effects of seed-placed sulfur fertilizers on canola, wheat, and pea yield; sulfur uptake; and soil sulfate concentration over time in three prairie soils [J]. Journal of Plant Nutrition, 2017, 40: 543-557.
- [ 11 ] 孙聪, 陈世宝, 宋文恩, 等. 不同品种水稻对土壤中镉的富集特征及敏感性分布(SSD)[J]. 中国农业科学, 2014, 47(12): 2384-2394.  
SUN C, CHEN S B, SONG W E, et al. Accumulation characteristics of cadmium by rice cultivars in soils and its species sensitivity distribution[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(12): 2384-2394 (in Chinese).
- [ 12 ] 宋波, 曾炜铨. 土壤有机质对镉污染土壤修复的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(4): 1018-1024.  
SONG B, ZENG W Q. Effects of organic matter on the remediation of cadmium-contaminated soil: A review[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(4): 1018-1024 (in Chinese).
- [ 13 ] HE T, MENG J, CHEN W, et al. Effects of biochar on cadmium accumulation in rice and cadmium fractions of soil: A three-year pot experiment[J]. BioResources, 2016, 12(1): 622-642.
- [ 14 ] ZORNOZA R, FAZ A, CARMONA D M, et al. Plant cover and soil biochemical properties in a mine tailing pond five years after application of marble wastes and organic amendments[J]. Pedosphere, 2012, 22(1): 22-32.
- [ 15 ] 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, 23(3): 120-123.  
ZONG L G, XU X Y. Cadmium absorption of rice from soils and remediations[J]. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23(3): 120-123 (in Chinese).
- [ 16 ] LI T Q, DI Z Z, YANG X E, et al. Effects of dissolved organic matter from the rhizosphere of the hyperaccumulator *Sedum alfredii* on sorption of zinc and cadmium by different soils[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 192(3): 1616-1622.
- [ 17 ] PINTO A P, MOTA A M, DE V A, et al. Influence of organic matter on the uptake of cadmium, zinc, copper and iron by sorghum plants [J]. Science of the Total Environment, 2004, 326(1-3): 239-247.
- [ 18 ] 丁疆华, 温琰茂, 舒强. 土壤环境中镉、锌形态转化的探讨[J]. 城市环境与城市生态, 2001, 14(2): 47-49.  
DING J H, WEN Y M, SHU Q. Fraction transformation of cadmium and zinc in soils[J]. Urban Environment and Urban Ecology, 2001, 14(2): 47-49 (in Chinese).
- [ 19 ] 刘文菊, 张西科, 尹君, 等. 镉在水稻根际的生物有效性[J]. 农业环境保护, 2000, 19(3): 47-49.  
LIU W J, ZHANG X K, YIN J, et al. Cadmium bioavailability in rhizosphere of paddy soil[J]. Agro-environmental Protection, 2000, 19(3): 47-49 (in Chinese).
- [ 20 ] CHANEY R L, WHITE M C, SIMON P W. Plant uptake of heavy metals from sludge use on land[A]. In: Proc. 2nd Natl. Conf. on Management of Municipal Wastewater Sludges[C]. Silver Spring, MD: Information Transfer Inc., 1975, 169-178.
- [ 21 ] TAKIJIMA Y, KATSUMI F, TAKEZAWA K. Cadmium contamination of soils and rice plants caused by zinc mining, II. Soil conditions of contaminated paddy fields which influence heavy metal contents in rice[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 1973, 19(3): 173-182.
- [ 22 ] 陈光辉, 周森林, 易亚科, 等. 不同生育期脱水对稻米镉含量的影响[J]. 中国农学通报, 2018, 34(3): 1-5.  
CHEN G H, ZHOU S L, YI Y K, et al. Effects of drought stress in different growth stages on grain cadmium content of rice[J]. Chinese

- Agricultural Science Bulletin, 2018, 34(3): 1-5 (in Chinese).
- [23] 纪雄辉, 梁永超, 鲁艳红, 等. 污染稻田水分管理对水稻吸收积累镉的影响及其作用机理[J]. 生态学报, 2007, 27(9): 3930-3939.  
JI X H, LANG Y C, LU Y H, et al. The effect of water management on the mechanism and rate of uptake and accumulation of cadmium by rice growing in polluted paddy soil [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(9): 3930-3939 (in Chinese).
- [24] 杨定清, 雷绍荣, 李霞, 等. 大田水分管理对控制稻米镉含量的技术研究[J]. 中国农学通报, 2016, 32(18): 11-16.  
YANG D Q, LEI S R, LI X, et al. Controlling cadmium concentration in rice by field water management technology [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(18): 11-16 (in Chinese).
- [25] 张雪霞, 张晓霞, 郑煜基, 等. 水分管理对硫铁镉在水稻根区变化规律及其在水稻中积累的影响[J]. 环境科学, 2013, 34(7): 2837-2846.  
ZHANG X X, ZHANG X X, ZHENG Y J, et al. Accumulation of S, Fe and Cd in rhizosphere of rice and their uptake in rice with different water managements [J]. Environmental Science, 2013, 34(7): 2837-2846 (in Chinese).
- [26] GE L Q, CANG L, ATA-UL-KARIM S T, et al. Effects of various warming patterns on Cd transfer in soil-rice systems under free air temperature increase (FATI) conditions [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 168: 80-87.
- [27] 詹杰, 魏树和, 牛荣成. 我国稻田土壤镉污染现状及安全生产新措施[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(7): 1257-1263.  
ZHAN J, WEI S H, NIU R C. Advances of cadmium contaminated paddy soil research and new measure of its safe production in China: a review [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(7): 1257-1263 (in Chinese).
- [28] 周静, 杨洋, 孟桂元, 等. 不同镉污染土壤下水稻镉富集与转运效率[J]. 生态学杂志, 2018, 37(1): 89-94.  
ZHOU J, YANG Y, MENG G Y, et al. Cadmium accumulation and translocation efficiency of rice under different cadmium-polluted soils [J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(1): 89-94 (in Chinese).
- [29] 李正文, 张艳玲, 潘根兴, 等. 不同水稻品种籽粒 Cd、Cu 和 Se 的含量差异及其人类膳食摄入风险[J]. 环境科学, 2003, 24(3): 112-115.  
LI Z W, ZHANG Y L, PAN G X, et al. Grain contents of Cd, Cu and Se by 57 rice cultivars and the risk significance for human dietary uptake [J]. Environmental Science, 2003, 24(3): 112-115 (in Chinese).
- [30] 刘建国. 水稻品种对土壤重金属镉铅吸收分配的差异及其机理研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2004.  
LIU J G. Variation among rice cultivars in the uptake and translocation of cadmium and lead from soil, and the mechanisms [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2004 (in Chinese).
- [31] 杨祥田, 周翠, 何贤彪, 等. 田间试验条件下不同基因型水稻对 Cd 和 Pb 的吸收分配特征[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(3): 438-444.  
YANG X T, ZHOU C, HE X B, et al. Uptake and partition of Cd and Pb among rice genotypes in contaminated paddy soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(3): 438-444 (in Chinese).
- [32] 李军, 梁吉哲, 刘侯俊, 等. Cd 对不同品种水稻微量元素累积特性及其相关性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(3): 441-447.  
LI J, LIANG J Z, LIU H J, et al. Influence of Cd on microelements accumulation and their correlation in different rice cultivars of Northeastern China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(3): 441-447 (in Chinese).
- [33] 刘利成, 刘三雄, 黎用朝, 等. 水稻镉积累与调控研究进展[J]. 中国农学通报, 2016, 32(24): 1-5.  
LIU L C, LIU S X, LI Y C, et al. Research progress of cadmium accumulation and regulation in rice [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(24): 1-5 (in Chinese).
- [34] 吴启堂, 陈卢, 王广寿. 水稻不同品种对 Cd 吸收累积的差异和机理研究[J]. 生态学报, 1999, 19(1): 104-107.  
WU Q T, CHEN L, WANG G S. Differences on Cd uptake and accumulation among rice cultivars and its mechanism [J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(1): 104-107 (in Chinese).
- [35] LI Y, PANG H D, HE L Y, et al. Cd immobilization and reduced tissue Cd accumulation of rice (*Oryza sativa* Wuyun23) in the presence of heavy metal-resistant bacteria [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, 138: 56-63.
- [36] LIU B, CHEN L, CHEN S B, et al. Subcellular Cd accumulation characteristic in root cell wall of rice cultivars with different sensitivities to Cd stress in soil [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2016, 15: 2114-2122.
- [37] MOORE C A, BOWEN H C, SCRASE-FIELD S, et al. The deposition of suberin lamellae determines the magnitude of cytosolic  $Ca^{2+}$  elevations in root endodermal cells subjected to cooling [J]. Plant Journal: For Cell and Molecular Biology, 2002, 30(4): 457-465.
- [38] WHITE P J. The pathways of calcium movement to the xylem [J]. Journal of Experimental Botany, 2001, 52: 891-899.
- [39] HUANG L, LI W C. Effects of root morphology and anatomy on cadmium uptake and translocation in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Journal of Environmental Sciences, 2019, 75(1): 296-306.
- [40] MEI X Q, YE Z H, WONG M H. The relationship of root porosity and radial oxygen loss on arsenic tolerance and uptake in rice grains and straw [J]. Environmental Pollution, 2009, 157: 250-255.
- [41] WANG M Y, CHEN A K, WONG M H, et al. Cadmium accumulation in and tolerance of rice (*Oryza sativa* L.) varieties with different rates of radial oxygen loss [J]. Environmental Pollution, 2009, 159: 1730-1736.
- [42] 朱智伟, 陈铭学, 牟仁祥, 等. 水稻镉代谢与控制研究进展[J]. 中国农业科学, 2014, 47(18): 3633-3640.  
ZHU Z W, CHEN M X, MOU R X, et al. Advances in research of cadmium metabolism and control in rice plants [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(18): 3633-3640 (in Chinese).
- [43] 杨肖娥, 龙新宪, 倪吾钟. 超积累植物吸收重金属的生理及分子机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(1): 8-15.

- YANG X E, LONG X X, NI W Z. Physiological and molecular mechanisms of heavy metal uptake by hyperaccumulating plants[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2002, 8(1): 8-15 (in Chinese).
- [44] URAGUCHI S, FUJIWARA T. Cadmium transport and tolerance in rice: Perspectives for reducing grain cadmium accumulation[J]. Rice, 2012, 5:5.
- [45] HE L, GIRIJASHANKER K, DALTON K P, et al. ZIP8, member of the solute-carrier-39 (SLC39) metal-transporter family: Characterization of transporter properties[J]. Molecular Pharmacology, 2016, 70: 171-180.
- [46] HIMENO S, YANAGIYA T, FUJISHIRO H. The role of zinc transporters in cadmium and manganese transport in mammalian cells[J]. Biochimie, 2016, 91(10):1218-1222.
- [47] CONNOLLY E L, FETT J P, GUERINOT M L. Expression of the *IRT1* metal transporter is controlled by metals at the levels of transcript and protein accumulation[J]. Plant Cell, 2002, 14(6): 1347-1357.
- [48] VERT G, GROTZ N, DEDALDECHAMP F, et al. *IRT1*, an Arabidopsis transporter essential for iron uptake from the soil and for plant growth[J]. Plant Cell, 2002, 14(6):1223-1233.
- [49] ISHIMARU Y, SUZUKI M, TSUKAMOTO T, et al. Rice plants take up iron as an  $Fe^{3+}$ -phytosiderophore and as  $Fe^{2+}$  [J]. Plant Journal, 2006, 45(3):335-346.
- [50] NAKANISHI H, OGAWA I, ISHIMARU Y, et al. Iron deficiency enhances cadmium uptake and translocation mediated by the  $Fe^{2+}$  transporters *OsIRT1* and *OsIRT2* in rice[J]. Soil Science & Plant Nutrition, 2006, 52(4): 464-469.
- [51] LEE S, AN G. Over-expression of *OsIRT1* leads to increased iron and zinc accumulations in rice[J]. Plant Cell & Environment, 2009, 32(4): 408-416.
- [52] COLANGELO E P, GUERINOT M L. Put the metal to the petal: Metal uptake and transport throughout plants[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2006, 9(3): 322-330.
- [53] NEVO Y, NELSON N. The *NRAMP* family of metal-ion transporters[J]. Biochimica Et Biophysica Acta Molecular Cell Research, 2006, 1763(7): 609-620.
- [54] XIA J, YAMAJI N, KASAI T, et al. Plasma membrane-localized transporter for aluminum in rice[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107(43): 18381-18385.
- [55] AKIMASA S, NAOKI Y, KENGO Y. *Nramp5* is a major transporter responsible for manganese and cadmium uptake in rice[J]. The Plant Cell, 2012, 24(5): 2155-2167.
- [56] TAKAHASHI R, ISHIMARU Y, SENOURA T, et al. The *OsNRAMP1* iron transporter is involved in Cd accumulation in rice[J]. Journal of Experimental Botany, 2011, 62(14): 4843-4850.
- [57] NOCITO F F, LANCILLI C, DENDENA B, et al. Cadmium retention in rice roots is influenced by cadmium availability, chelation and translocation[J]. Plant, Cell and Environment, 2016, 4(6): 994-1008.
- [58] 周静, 杨洋, 孟桂元, 等. 不同镉污染土壤下水稻镉富集与转运效率[J]. 生态学杂志, 2018, 37(1): 89-94.
- ZHOU J, YANG Y, MENG G Y, et al. Cadmium accumulation and translocation efficiency of rice under different cadmium-polluted soils [J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(1): 89-94 (in Chinese).
- [59] 赵雄, 李福燕, 张冬明, 等. 水稻土壤镉污染与水稻镉含量相关性研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(11): 2236-2240.
- ZHAO X, LI F Y, ZHANG D M, et al. Relationship between paddy soils cadmium pollution and cadmium content in rice[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(11): 2236-2240 (in Chinese).
- [60] 张锡洲, 张洪江, 李廷轩, 等. 水稻镉耐性差异及镉低积累种质资源的筛选[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(11): 1434-1440.
- ZHANG X Z, ZHANG H J, LI T X, et al. Differences in Cd-tolerance of rice and screening for Cd low-accumulation rice germplasm resource[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(11): 1434-1440 (in Chinese).
- [61] SHI X, ZHANG C, WANG H, et al. Effect of Si on the distribution of Cd in rice seedling[J]. Plant and Soil, 2005, 272(1-2): 53-60.
- [62] 文志琦, 赵艳玲, 崔冠男, 等. 水稻营养器官镉积累特性对稻米镉含量的影响[J]. 植物生理学报, 2015, 51(8):1280-1286.
- WEN Z Q, ZHAO Y L, CUI G N, et al. Effects of cadmium accumulation characteristics in vegetative organs on cadmium content in grains of rice[J]. Plant Physiology Journal, 2015, 51(8):1280-1286 (in Chinese).
- [63] 赵步洪, 张洪熙, 奚岭林, 等. 杂交水稻不同器官镉浓度与累积量[J]. 中国水稻科学, 2006, 20(3): 306-312.
- ZHAO B H, ZHANG H X, XI L L, et al. Concentrations and accumulation of cadmium in different organs of hybrid rice[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2006, 20(3): 306-312 (in Chinese).
- [64] 查燕, 杨居荣, 刘虹, 等. 污染稻麦籽实中镉和铅的分布及其存在形态[J]. 北京师范大学学报:自然科学版, 2000, 36(2): 268-273.
- ZHA Y, YANG J R, LIU H, et al. Distribution and existing forms of cadmium and lead in polluted seeds of rice and wheat[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2000, 36(2): 268-273 (in Chinese).
- [65] 喻华, 上官宇先, 涂仕华, 等. 水稻籽粒中镉的来源[J]. 中国农业科学, 2018, 51(10): 1940-1947.
- YU H, SHANGGUAN Y X, TU S H, et al. Sources of cadmium accumulated in rice grain[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(10): 1940-1947 (in Chinese).
- [66] FUJIMAKI S, SUZUI N, ISHIOKA N S, et al. Tracing cadmium from culture to spikelet: Noninvasive imaging and quantitative characterization of absorption, transport, and accumulation of cadmium in an intact rice plant[J]. Plant Physiology, 2010, 152(4): 1796-1806.
- [67] TANAKA K, FUJIMAKI S, FUJIWARA T, et al. Quantitative estimation of the contribution of the phloem in cadmium transport to grains in rice plants (*Oryza sativa* L.) [J]. Soil Science & Plant Nutrition, 2007, 53(1): 72-77.

- [68] FENG X M, HAN L, CHAO D Y, et al. Ionic and transcriptomic analysis provides new insight into the distribution and transport of cadmium and arsenic in rice[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 331: 246-256.
- [69] 李正翔. 不同基因型水稻剑叶中镉向籽粒再分配差异性研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.  
LI Z X. Effects of cultivar on cadmium redistributed from blade leaf to grains[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014 (in Chinese).
- [70] RODDA M, LI G, REID R. The timing of grain Cd accumulation in rice plants: The relative importance of remobilization within the plant and root Cd uptake post-flowering[J]. *Plant Soil*, 2011, 347: 105-114.
- [71] KATO M, ISHIKAWA S, INAGAKI K, et al. Possible chemical forms of cadmium and varietal differences in cadmium concentrations in the phloem sap of rice plants (*Oryza sativa* L.)[J]. *Soil Science & Plant Nutrition*, 2010, 56(6): 839-847.
- [72] KASHIWAGI T, SHINDOH K, HIROTSU N, et al. Evidence for separate translocation pathways in determining cadmium accumulation in grain and aerial plant in rice[J]. *BMC Plant Biology*, 2009, 9: 8.
- [73] MIYADATE H, ADACHI S, HIRAIZUMI A, et al. OsHMA3, a PIB-type of ATPase affects root-to shoot cadmium translocation in rice by mediating efflux into vacuoles[J]. *New Phytologist*, 2011, 189(1): 190-199.
- [74] 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: 645.
- [75] URAGUCHI S, KAMIYA T, SAKAMOTO T, et al. Low-affinity cation transporter (*OsLCT1*) regulates cadmium transport into rice grains [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(52): 20959-20964.
- [76] CLEMENS S, ANTOSIEWICZ D M, WARD J M, et al. The plant cDNA *LCT1* mediates the uptake of calcium and cadmium in yeast[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1998, 95(20): 12043-12048.
- [77] 邹明英, 苑蓉, 张宇, 等. 不同土地利用方式下土壤重金属污染修复技术研究[J]. *环境科学与管理*, 2015, 40(2): 160-163.  
ZOU M Y, YUAN Y, ZHANG Y, et al. Remediation techniques for heavy metal polluted soils under different land use patterns[J]. *Environment Science and Management*, 2015, 40(2): 160-163 (in Chinese).
- [78] 张海欧, 韩霁昌, 王欢元, 等. 污染土地修复工程技术及发展趋势[J]. *中国农学通报*, 2016, 32(26): 103-108.  
ZHANG H O, HAN J C, WANG H Y, et al. Engineering technology and development trend of polluted land restoration[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32(26): 103-108 (in Chinese).
- [79] 吴燕玉, 陈涛, 孔庆新, 等. 张土灌区镉污染及其改良途径[J]. *环境科学学报*, 1984, 4(3): 275-283.  
WU Y Y, CHEN T, KONG Q X, et al. Cadmium contamination of Zhangshi irrigation area and ways of improving[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1984, 4(3): 275-283 (in Chinese).
- [80] TANG X, LI Q, WANG Z, et al. Improved isolation of cadmium from paddy soil by novel technology based on pore water drainage with graphite-contained electro-kinetic geosynthetics[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(14): 14244-14253.
- [81] WANG H Y, WEN S L, CHEN P, et al. Mitigation of cadmium and arsenic in rice grain by applying different silicon fertilizers in contaminated fields[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 23(4): 3781-3788.
- [82] CURIE C, BRIAT J F. Iron transport and signaling in plants[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2003, 54: 183-206.
- [83] SCHMIDT W. Iron solutions: Acquisition strategies and signaling pathways in plants[J]. *Trends in Plant Science*, 2002, 8(4): 188-193.
- [84] CURIE C, ALONSO J M, LE J, et al. Involvement of *NRAMP1* from *Arabidopsis thaliana* in iron transport[J]. *Biochemical Journal*, 2000, 347: 749-755.
- [85] 邵国胜, 陈铭学, 王丹, 等. 稻米镉积累的铁肥调控[J]. *中国科学(C辑: 生命科学)*, 2008, 38(2): 180-187.  
SHAO G S, CHEN M X, WANG D, et al. Using iron fertilizer to control Cd accumulation in rice plants: A new promising technology[J]. *Science in China Series C: Life Sciences*, 2008, 38(2): 180-187 (in Chinese).
- [86] DUAN M M, WANG S, HUANG D Y, et al. Effectiveness of simultaneous applications of lime and zinc/iron foliar sprays to minimize cadmium accumulation in rice[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 165: 510-515.
- [87] YANG Y J, CHEN J M, HUANG Q N, et al. Can liming reduce cadmium (Cd) accumulation in rice (*Oryza sativa*) in slightly acidic soils? A contradictory dynamic equilibrium between Cd uptake capacity of roots and Cd immobilisation in soils[J]. *Chemosphere*, 2018, 193: 547-556.
- [88] MALIK J A, GOEL S, KAUR N, et al. Selenium antagonises the toxic effects of arsenic on mungbean (*Phaseolus aureus* Roxb.) plants by restricting its uptake and enhancing the antioxidative and detoxification mechanisms[J]. *Environmental & Experimental Botany*, 2012, 77: 242-248.
- [89] WANG X, TAM N F, FU S, et al. Selenium addition alters mercury uptake, bioavailability in the rhizosphere and root anatomy of rice (*Oryza sativa*) [J]. *Annals of Botany*, 2014, 114: 271-278.
- [90] HU Y, GARETH J N, DUAN G L, et al. Effect of selenium fertilization on the accumulation of cadmium and lead in rice plants[J]. *Plant Soil*, 2014, 384: 131-140.
- [91] WAN Y N, CAMARA A Y, YU Y, et al. Cadmium dynamics in soil pore water and uptake by rice: Influences of soil-applied selenite with different water managements[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 240: 523-533.
- [92] LONG X X, YANG X E, YE Z Q, et al. Differences of uptake and accumulation of zinc in four species of *Sedum* [J]. *Acta Botanica Sinica*, 2002, 44(2): 152-157.
- [93] 熊愈辉, 杨肖娥, 叶正钱, 等. 东南景天对镉、铅的生长反应与积累特性比较[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2004, 32(6): 101-106.  
XIONG Y H, YANG X E, YE Z Q, et al. Comparing the characteristics of growth response and accumulation of cadmium and lead by

- Sedum alfredii* Hance[J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forest (Natural Science Edition), 2004, 32(6): 101-106 (in Chinese).
- [94] YE H B, YANG X E, et al. Growth response and metal accumulation of *Sedum alfredii* to Cd/Zn complex-polluted ion levels[J]. Acta Botanica Sinica, 2003, 45(9): 1030-1036.
- [95] 梁俊. 东南景天镉解毒相关代谢过程及关键基因克隆[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.  
LIANG J. Metabolic process related to cadmium detoxification and key gene cloning of *Sedum alfredii*[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017 (in Chinese).
- [96] 高晓宇. 镉超积累植物东南景天 *SaPCR1* 和 *SaPCR2* 基因的克隆及功能分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.  
GAO X Y. Cloning and functional analysis of *SaPCR1* and *SaPCR2* from Zn/Cd hyperaccumulator *Sedum alfredii*[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018 (in Chinese).
- [97] 刘沙沙, 李兵, 冯翔, 等. 3种植物对镉污染土壤修复的试验研究[J]. 中国农学通报, 2018, 34(22): 103-108.  
LIU S S, LI B, FENG X, et al. Three kinds of plants: remediation on soil contaminated by cadmium[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, 34(22): 103-108 (in Chinese).
- [98] 刘家女, 周启星, 孙挺, 等. 花卉植物应用于污染土壤修复的可行性研究[J]. 应用生态学报, 2007, 18(7): 1617-1623.  
LIU J N, ZHOU Q X, SUN T, et al. Feasibility of applying ornamental plants in contaminated soil remediation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(7): 1617-1623 (in Chinese).
- [99] 殷永超, 吉普辉, 宋雪英, 等. 龙葵(*Solanum nigrum* L.)野外场地规模 Cd 污染土壤修复试验[J]. 生态学杂志, 2014, 33(11): 3060-3067.  
YIN Y C, JI P H, SONG X Y, et al. Field experiment on phytoremediation of cadmium contaminated soils using *Solanum nigrum* L[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(11): 3060-3067 (in Chinese).
- [100] ISHIKAWA S, ABE T, KURAMATA M, et al. A major quantitative trait locus for increasing cadmium-specific concentration in rice grain is located on the short arm of chromosome 7[J]. Journal of Experimental Botany, 2010, 61(3): 923-934.
- [101] ISHIMARU Y, TAKAHASHI R, BASHIR K, et al. Characterizing the role of rice *NRAMP5* in manganese, iron and cadmium transport [J]. Scientific Reports, 2012, 2: 286.
- [102] TANG L, MAO B, LI Y, et al. Knockout of *OsNramp5* using the CRISPR/Cas9 system produces low Cd-accumulating indica rice without compromising yield[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 14438.
- [103] LU C N, ZHANG L X, TANG Z, et al. Producing cadmium-free *Indica* rice by overexpressing *OshMA3*[J]. Environmental International, 2019, 126: 619-626.
- [104] SUZUKI K T, SASAKURA C, OHMICH M. Binding of endogenous and exogenous cadmium to glutelin in rice grains as studied by HPLC/ICP-MS with use of a stable isotope[J]. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 1997, 11: 71-76.
- [105] 杨居荣, 何孟常, 查燕, 等. 稻麦籽实中 Cd 的结合形态[J]. 中国环境科学, 2000, 20(5): 404-408.  
YANG J R, HE M C, ZHA Y, et al. Binding forms of Cd in the rice and wheat seeds[J]. China Environmental Science, 2000, 20(5): 404-408 (in Chinese).
- [106] 魏帅, 田阳, 郭波莉, 等. 稻谷加工工艺对产品镉含量的影响[J]. 中国食品学报, 2015, 15(3): 146-150.  
WEI S, TIAN Y, GUO B L, et al. Effect of hulling and milling process on cadmium concentration in rice product[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2015, 15(3): 146-150 (in Chinese).
- [107] ZHAO D, ALBERT L J, LUO J, et al. Mineral dietary supplement to decrease cadmium relative bioavailability in rice based on a mouse bioassay[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(21): 12123-12130.
- [108] LIN Y S, CAFFREY J L, LIN J W, et al. Increased risk of cancer mortality associated with cadmium exposures in older Americans with low zinc intake[J]. Journal of Toxicology & Environmental Health, Part A, 2013, 76: 1-15.
- [109] REEVES P G, CHANEY R L. Bioavailability as an issue in risk assessment and management of food cadmium: A review[J]. Science of the Total Environment, 2008, 398: 13-19.