

水稻中镉积累状况及控制的研究进展

曾德永, 尹一淑, 熊毅, 张英春*, 卢卫红*

(哈尔滨工业大学医学与健康学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 镉(Cd)是一种释放到农业环境中的有毒金属,会导致植物生长和生理发生许多变化。水稻中Cd的积累及其随后向食物链的转移是世界范围内的主要环境问题之一,严重威胁着人类的粮食安全。剖析Cd在水稻中的积累机制,将有助于减少Cd在水稻中的积累,提高大米品质。本文首先回顾了我国水稻中Cd积累的原因,包括灌溉水、施肥、土壤酸化、土壤氧化还原电位变化。接下来讨论了减少水稻Cd积累的方法,包括水稻新品种的选育、土壤修复、田间管理、改变耕作模式等。将有助于解决Cd在水稻中的积累问题,确保我国的食品安全,减少Cd对国民的健康风险。

关键词: 水稻; 镉; 食品安全; 修复

Research progress on cadmium accumulation condition and control in rice

ZENG De-Yong, YIN Yi-Shu, XIONG Yi, ZHANG Ying-Chun*, LU Wei-Hong*

(School of Medicine and Health, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

ABSTRACT: Cadmium is a toxic metal released into the agricultural environment, which can cause many changes in plant growth and physiology. The accumulation of cadmium in rice and its subsequent transfer to the food chain are major environmental problems worldwide, which seriously threatens human food security. Analyzing the accumulation mechanism of Cd in rice will help reduce the accumulation of Cd in rice and improve the quality of rice. This article first reviewed the causes of Cd accumulation in rice in China, including irrigation water, fertilization, soil acidification, and changes in soil redox potential. Next, methods to reduce the accumulation of cadmium in rice are discussed, including the breeding of new rice varieties, soil restoration, field management, and changing farming patterns. It will help solve the problem of Cd accumulation in rice, ensure food safety in China, and reduce the health risks of Cd to the people.

KEY WORDS: rice; cadmium; food safety; restoration

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2017YFC1601900)、黑龙江头雁计划项目(HITTY-20190034)

Fund: Supported by the National Key Research and Development Program of China in the 13th Five Year Plan (2017YFC1601900), and the Heilongjiang Touyan Team Program (HITTY-20190034)

*通信作者: 张英春, 副教授, 主要研究方向为天然产物营养健康与食品安全。E-mail: zyc229@163.com

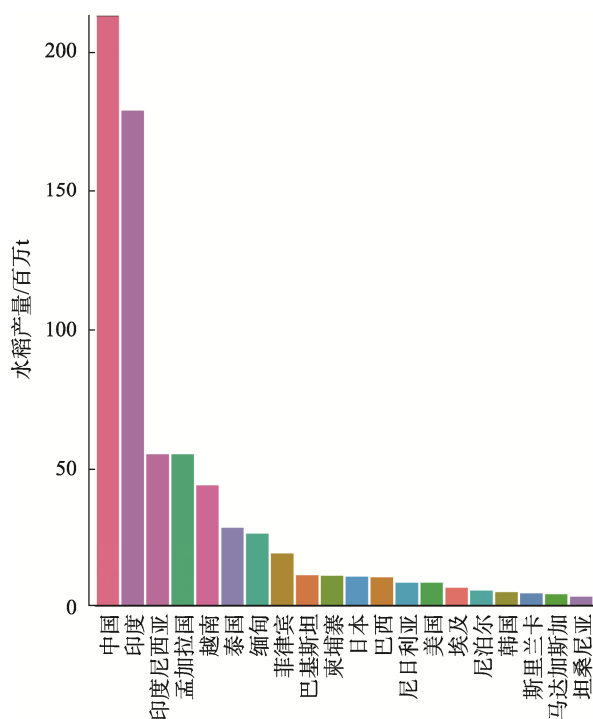
卢卫红, 教授, 主要研究方向为天然产物营养健康与食品安全。E-mail: lwh@hit.edu.cn

*Corresponding author: ZHANG Ying-Chun, Associate Professor, School of Medicine and Health, Harbin Institute of Technology, Xidazhi Street No.92, Mingde Biuding, Harbin 150001, China. E-mail: zyc229@163.com

LU Wei-Hong, Professor, School of Medicine and Health, Harbin Institute of Technology, Xidazhi Street No.92, Mingde Biuding, Harbin 150001, China. E-mail: lwh@hit.edu.cn

0 引言

水稻是地球上消费最广泛的谷物, 世界上有一半的人以水稻为主食。根据世界粮农组织的最新数据, 2019 年全世界的水稻产量超过了 7.57 亿 t。中国、印度、印度尼西亚、孟加拉国、越南是世界上水稻产量最高的几个国家, 且中国的水稻产量占世界水稻总产量的 27.91%(图 1)。我国是世界上最大的水稻生产国和消费国, 约有 20% 的耕地被用来种植水稻, 比例高于其他农作物。但是随着人口的增长, 如果人均大米消费量保持在当前水平, 中国到 2030 年需要多生产约 20% 的大米才能满足国内需求^[1]。但是目前我国水稻的生产还面临着很多安全问题, 如化肥和农药的过度使用、重金属的污染等。在我国过去几十年的快速工业化进程中, 土壤受到重金属污染的问题越来越严重, 这导致我国大米中的镉(Cd)浓度远远超过了规定含量 (0.2 mg/kg), 尤其是在中国南方的一些地区^[2]。因此控制我国水稻中 Cd 的含量对于保障我国粮食安全及世界粮食安全是非常重要的。



注: 来源于 2019 年世界粮农组织统计数据。

图 1 水稻产量排名前 20 的国家

Fig.1 Top 20 countries in rice production

Cd 是一种最具流动性且能被植物利用的重金属元素之一。目前尚不清楚 Cd 对植物的生长发育是否是必须的, 但作物可以通过其根部吸收 Cd 并运送到地上的组织中, Cd 被吸收的多少取决于土壤中该元素的含量及作物的种类^[3-4]。Cd 已经被列为第 1 类人类致癌物^[5], 具有致突变性和弱基因毒性, 导致人体骨骼损伤、高钙尿症、高血压、

肺功能低下、肝损伤、肾功能障碍和神经系统疾病^[6]。与其他作物相比, 水稻往往会积累更多的 Cd, 是以大米为主食人群膳食摄入 Cd 的主要来源^[7]。显然控制稻米中 Cd 的吸收和积累对降低以稻米为主的饮食人群的潜在健康风险非常重要。本文探讨了水稻中镉升高的原因, 并提出了降低水稻中镉的方法, 以期对农田 Cd 污染修复提供参考。

1 水稻中 Cd 浓度升高的原因分析

中国约有 2000 万公顷的耕地被 Cd 污染, 约占耕地总量的 20%^[8]。Cd 很少以纯金属的形式存在于环境中, 其主要与硫化锌基矿石伴生, 并且也作为杂质存在于铅和铜矿石中, 水稻中 Cd 浓度升高的原因是多方面的, 主要包括我国工业化进程的加快而导致的环境污染、化肥的大量使用、土地酸化、土壤氧化还原电位的变化等原因。

1.1 工业化进程加大了稻田中 Cd 的积累

过去几十年里, 我国工业化的迅猛发展加大了对矿物材料的需求, 由此带动了我国矿业的发展。在此过程中, 规模比较小的开采企业为了追求利润最大化, 无视环境保护相关条例, 不计成本地污染环境。我国的 Cd 矿资源大量分布在南方的湖南、广西、江西、贵州、浙江等省份, 除此之外, 这些省份还分布着大量的有色金属矿, 这些地区也是我国水稻的主要种植地。在金属矿的开发过程中, 金属矿石的浸出和加热过程会导致酸和重金属流入土壤和水系中, 这样就导致了土壤的重金属污染。此外, 农田灌溉使用了被污染的水资源, 这是稻田被重金属污染的一个主要因素。采矿和冶炼以及化石燃料燃烧排放的 Cd 粉尘会通过大气沉降而污染土壤和水系^[9]。矿业生产产生的重金属除了污染地表水, 还能进入地下水中, 在我国南方, 饮用水多为地下水资源, 这就导致了重金属直接通过饮用水进入人体。因此, 我国的环保部门和自然资源部门应该加大执法力度、监管到位, 确保我国的土地及水资源安全。

1.2 土壤酸化导致了水稻中 Cd 的积累

土壤酸化是导致谷物 Cd 浓度升高的一个重要过程。土壤在自然条件下缓慢酸化, 主要与矿物风化、土壤母质和降雨有关。然而过度施用氮肥, 作物对碱性阳离子的吸收和去除增强, 当地酸雨、工业气候条件、工业化进程加快都会加速土壤酸化^[10]。pH 是控制土壤中 Cd 的形态、溶解度、迁移率和植物有效性参数的重要因素, 该因素有时甚至比土壤总 Cd 浓度更重要。较低的土壤 pH 会导致 Cd²⁺吸附减弱, 从而增加 Cd 的溶解度。研究表明, 吸附作用是控制土壤中天然 Cd 溶解度的主要过程, Cd 的浓度通常为 0.1~10 mg/kg^[11]。土壤酸化可显著增加 Cd 的溶解度。例如, pH 降低 1 个单位会导致 Cd 溶解度增加 4~5 倍^[12]。土壤中可交换 Cd 通常会随着 pH 的增加而线性下降, 土壤 pH 降低时水稻 Cd 与土壤

Cd 浓度比显著增加; 例如, 土壤 pH 为 7.0 时, 它们的比值仅为 0.1, 当土壤 pH 值降至 5.5 以下时, Cd 比值会增加至 1.0^[10]。过量施用氮肥特别是尿素或铵(NH₄⁺)形式的化学氮肥导致了我国土壤的酸化^[13], 近 30 年来土壤 pH 值降低了近 1 个单位^[10]。据预测, 按照目前的氮肥施用量, 到 2050 年, 我国土壤酸化可能导致谷物产量损失高达 24%^[14]。显然, 氮肥的使用是导致我国土壤酸化的一个主要原因之一。在保证水稻产量的基础上, 开发一种新型的氮肥, 以保证土壤正常 pH 可能是一种有效的方法。此外, 也可以考虑使用某种缓冲剂来矫正土壤的 pH 以降低水稻中的镉积累。

1.3 土壤的氧化还原状态影响了水稻中 Cd 的积累

土壤氧化还原状态的周期性变化对稻田土壤中 Cd 的溶解度和形态有重大影响。水分管理可以改变土壤氧化还原状态, 从而影响土壤中 Cd 的状态和随后的水稻中 Cd 积累^[15-16]。稻田是一种典型淹排水过程, 在水稻营养期需要不断灌溉, 但是在水稻成熟前 2~3 周时, 需进行排水。这种排水也会导致土壤 Cd 的流动显著增加, 从而导致谷物 Cd 浓度升高。研究表明水稻中 Cd 的浓度在抽穗后排水时为 0.40 mg/kg, 而连续灌溉则为 0.08 mg/kg^[17]。因此, 通过连续淹水或延迟排水来固定土壤中的 Cd, 以降低水稻中 Cd 的积累。

2 降低水稻中 Cd 积累的有效方法

大米中 Cd 的平均浓度分别是小麦和其他谷物的 3 倍和 8 倍, 因此大米是膳食 Cd 摄入的主要来源, 占中国普通人群 Cd 总摄入量的 56%^[18]。目前已经有报道在日本因过多摄入 Cd 污染的稻米引发“痛痛病”的案例。日本最近的研究表明, Cd 在人体中的含量在 0.27~0.56 mg/kg 时会引起“痛痛病”^[19], 但是按照我国目前膳食 Cd 摄入量的速度, 一般人群平均需要 100 年以上的时间才能达到 0.27 mg/kg 的累积 Cd 摄入量, 而在我国受污染的地区只需 47~76 年即可达到这一水平。显然, 我国亟需制定有效的策略来减少水稻中 Cd 的积累, 以减少膳食 Cd 摄入量及其对国民的相关健康风险。

2.1 选育 Cd 积累不敏感型水稻新品种

不同品种水稻对 Cd 的吸收和转运可能存在显著差异, 这使得采用自交、杂交、分子育种技术等方法来选育低 Cd 水稻成为可能。使用生物技术可以成为降低稻谷中 Cd 含量的有效途径, 但较少数量的候选基因将成为产生更多耐 Cd 基因型的限制因素。近年来, 随着在水稻 Cd 的吸收和随后向谷粒的转运方面取得的突破性进展, 目前已鉴定出水稻中的多种基因在 Cd 转运和积累中起作用。此外许多基因调控因子, 如激酶、转录因子、小肽、miRNA 等被报道也参与了谷物 Cd 的积累^[20]。许多研究表明, 锰(Mn)、铁(Fe)或锌(Zn)的转运蛋白在植物中 Cd 的吸收和转运中起主要作用, 锰转运蛋白 OsNRAMP5 介导了水稻根部对 Cd 的吸收, 敲除 OsNRAMP5 显著降低 Cd 吸收能力。但是 OsNRAMP5

对 Mn 吸收至关重要, OsNRAMP5 的突变是否可以在不影响植物生长和谷物产量的情况下减少 Cd 积累存在相互矛盾的报道^[21-22]。OsHMA3 也是参与 Cd 转运的蛋白, OsHMA3 在 OsHMA2 启动子控制下过表达将增加水稻中 Cd 螯合到根和节的液泡中, 从而减少水稻籽粒中 Cd 的积累^[23]。OXIDATIVE STRESS 3 同系物通过各种方式降低了水稻籽粒中 Cd 的积累及整个植株的积累, 而不会损害籽粒产量或 Mn、Fe、Zn 和 Cu 的含量^[24]。OsLCT1 小麦低亲和力和阳离子转运蛋白 1 的水稻同源物, 目前的研究已经证实了 OsLCT1 介导 Cd 和某些其他元素从叶片到谷物的易位, 从而导致 Cd 在谷粒中积累^[25]。通过基因编辑技术敲除或过表达这些与 Cd 积累相关的基因, 为选育低 Cd 水稻成为现实。使用 QTL 将有利于我们发现更多的与 Cd 积累相关的基因, 该技术通常使用分子标记来寻找水稻品种的遗传组成。

目前, 关于转基因技术的安全性备受争议, 因此杂交育种和诱变育种似乎更容易被人们所接受。据报道, 我国科学家利用杂交育种技术已经选育了低 Cd 积累的水稻, 包括深优 957、隆平 602、威优 402、株两优 168、T-优 535、杰丰优 1 号等水稻品种。此外使用重离子辐射也可以产生低 Cd 积累的水稻新品种, ISHIKAWA 等^[26]使用重离子辐射产生了 3 个低 Cd 积累水稻突变体, 在 Cd 污染的农田中生长时, 这些突变体在谷物中几乎检测不到 Cd 含量, 并且对农艺性状没有影响。此外 ISHIKAWA 还在 2019 年使用了剂量为 40 Gy 碳离子对水稻进行诱变, 并成功开发了一种低 Cd 积累水稻“Koshihikari Kan No.1”^[27], 这说明重离子诱变培育低 Cd 积累品系水稻是可行的。众所周知, 空间环境是一种具有射线和微重力在内的特殊环境, 比地面环境有着更高的突变效率, 目前我国已经利用空间诱变育种的方法培育了许多具有优良性状的水稻, 如: 航育 1 号、华航 1 号、华航 31 号、宇航 2 号、华航丝苗、金航丝苗等品种, 虽然这些品种不是与 Cd 积累相关, 这可能是由于我国在发展空间诱变育种时 Cd 污染还没进入人们的视野, 但这些结果说明了空间诱变育种是可行的。由于此前空间飞行机会难得及成本较高, 限制了我国空间诱变育种的发展, 但是随着我国空间站的建成, 通过空间诱变选育具有低 Cd 积累的水稻指日可待。此外, 采用化学试剂诱变育种也是常用的方法, 比如我国科学家应用甲磺酸乙酯诱变技术开发了一种水稻作物极低 Cd 积累突变体 LCD1^[28]。这些非转基因育种由于其安全性更容易被国民所接受, 具有巨大的实际应用潜力。

2.2 养分和水分管理

在农业生产中化肥是必不可少的。然而不同施肥方式、施肥量和施肥种类不仅会影响土壤中 Cd 的积累, 还会导致作物中 Cd 浓度发生变化^[29-30]。在长期试验中, 土壤中的 Cd 含量因施用有机肥而增加, 并因施用钾(K)肥料而降低^[31], 同时施用化肥增加了土壤中总 Cd 和有效 Cd 的含量, 促进了作物对 Cd 的吸收^[32]。此外磷肥的 Cd 浓度变化

很大, 从接近零到 300 mg/kg 不等, 这取决于所用磷矿的来源及其加工程序^[33]。然而并不是所有的肥料都会使 Cd 积累, 最近的研究发现通过施用叶面 Fe 肥料可以降低水稻对 Cd 的吸收和毒性, 水稻中的 Cd 浓度与 Fe 浓度呈负相关, 叶片中较高的 Fe 营养状态降低了 Cd 从根向其他组织的转运, 表明高 Fe 供应可能通过抑制 Cd 的运输来降低 Cd 含量^[34]。因此在保证粮食产量的前提下, 选择施用合适的化肥及施用方式对减少 Cd 的积累是非常重要的。灌溉方法的性质也会影响土壤中 Cd 的生物有效性, 通常采用连续灌溉的方式可有效降低稻谷中的 Cd 浓度, 但是会导致砷浓度急剧增加, 且能达到 mg/kg 单位的浓度水平^[16,35]。相反, 采用替代灌溉技术(即所谓的“有氧”、“间歇”或“氧化”方法)时经常观察到相反的结果。在间歇灌溉方法中有喷头喷洒和土壤的周期性饱和 2 种情况。喷头喷洒的灌溉方式能使 26 种基因型谷粒中的 Cd 浓度减少 20%, 然而采用周期性饱和灌溉的稻米中 Cd 浓度异常增加^[36], 因此在选择灌溉方式时应尽量选择喷洒式的间接性灌溉。此外, 灌溉水来源也对降低水稻中 Cd 积累尤为重要, 选择没有被污染的水源作为灌溉水。同时尽量减少灌溉水中氯化物的存在, 因为氯化物与 Cd 形成可溶性复合物, 使得 Cd 更容易被植物吸收^[9]。显然, 采用合理的灌溉方式和没有污染的灌溉水对于减少水稻中镉的积累是极其重要的。

2.3 无机纳米材料对 Cd 污染土壤的修复

纳米材料具有优异的吸附能力、较小的粒径、显著的稳定性和环境友好性, 在捕获重金属离子方面取得了很大进展。目前一系列纳米材料, 包括碳纳米材料、金属基纳米材料、纳米矿物材料已被用于减轻土壤中的 Cd 污染, 这些纳米材料在去除 Cd 污染物和原位修复土壤环境方面具有巨大潜力。

生物炭是一种富碳产品, 由植物和动物生物质的热化学转化产生。生物炭在提高土壤 pH 和有机碳含量、提高土壤持水能力、减少重金属的有效含量、提高农作物产量、抑制重金属的吸收和积累方面发挥着重要作用。生物炭类型、热解温度、加热速率和停留时间等不同条件是决定生物炭性能特征的关键因素。受生物炭 pH 和溶解有机碳、灰分含量的影响, 生物炭与 Cd 的相互作用机制主要包括络合、还原、阳离子交换、静电吸引和沉淀^[37]。通过稻草、稻壳和麸皮制备的生物炭能降低水稻芽中 98% 的 Cd 积累^[38]。BIAN 等^[39]在 350~550 °C 之间的温度热解成功获得了小麦秸秆生物炭, 将该生物炭以 40 t/公顷用于受污染的农田时, 稻米中的 Cd 含量降低了 20%~90%。然而科学家们并没有觉得这种吸附效果是最佳的, 于是通过搅拌生物炭、氢氧化钠、二氧化硫和硫酸亚铁的混合物制备硫改性生物炭(S-BC)和硫铁改性生物炭(SF-BC), 经过 3 个月的盆栽试验, 当 S-BC 和 SF-BC 的施用量为 1% (W:W) 时, 土壤中可交换 Cd 的含量分别下降了 29.71% 和 18.53%^[40]。这些研究表明

生物炭经过硫改性后, 含硫的生物炭可以与 Cd 进行配位, 从而抑制 Cd 向植物的运输^[41]。Fe/Mn 改性生物炭使土壤中有效 Cd 的浓度降低了 66.7%~74.1%, 并促进了水稻根表面铁斑的形成, 从而使糙米中的 Cd 浓度降低到 0.12 mg/kg^[42]。虽然生物炭对土壤中 Cd 的去除有一定的作用, 但生物炭的加入会导致土壤 pH 升高^[43], 在酸性土壤中使用生物炭有利于改善土壤的 pH, 改变 Cd 在土壤中的状态。

最近的一些研究表明, 金属和碳基纳米材料对减轻污染物引起的非生物胁迫和毒性都有积极影响。据报道 ZnO、Fe₃O₄、ZnO 和 TiO₂ 等多种金属氧化物纳米材料已被用于 Cd 污染土壤的修复。ZnO 纳米粒子在受金属共同污染的稻田中生长时, 可以显著减少水稻组织中 Cd 和 As 的积累^[44]。Fe₃O₄ 和 Fe₂O₃ 纳米颗粒附着在根表面细胞壁上并诱导铁斑形成^[45], 铁斑具有两性胶体的特性, 可以影响水稻中有毒金属的吸收、分布和积累^[46]。一些研究表明, 铁斑可以增强水稻根部对 Cd 的保留并减少其向糙米的转运^[47-48]。使用纳米 Fe₃O₄ 改性生物炭(BC-Fe)使土壤中 Cd 降低了 6.81%~25.0%, 并使糙米中的 Cd 浓度降低了 35.6%~48.9%, 这表明 BC-Fe 对水稻根部铁斑的形成和 Cd 截留的影响是显著的^[49], 此外该改性材料还具有促进水稻根系铁斑形成和 Cd 固定化^[50]。

此外还有纳米羟基磷灰石、FeS 纳米颗粒、纳米氢氧化镁、纳米矿物材料被用于土壤中 Cd 修复。纳米材料具有比表面积大、表面活性位点丰富、去除率高、利用率高等优点, 对土壤中的 Cd 离子具有优异的吸附能力等优点, 因此在 Cd 污染土壤的修复受到世界范围的关注。但是在修复 Cd 污染土壤的过程中也存在一些问题, 首先一些纳米材料不稳定, 容易聚集, 在实际应用中会形成较大的颗粒, 降低去除能力, 造成二次污染。其次当纳米材料加入到土壤中时, 土壤与纳米材料、植物根系和土壤之间的界面会发生变化, 这对植物的产量及品质的影响是未知的。再者, 纳米材料可能随土壤胶体迁移到地表径流和地下水中, 或通过食物链进入人体并积累到一定数量, 对人体健康造成潜在危害^[51]。

2.4 生物方法对 Cd 污染土壤的修复

各种传统技术已被用于从自然资源 and 受污染场地中去除 Cd。最常用的常规技术是基于化学氧化和还原、溶剂萃取、化学沉淀、过滤、离子交换、反渗透过程、电化学处理、蒸发回收和用螯合化合物洗涤土壤^[52]。然而这些常规修复在技术上存在一定的缺点, 且修复成本比较高。因此, 生物修复成为了一种修复 Cd 污染土壤的有效途径。细菌、真菌、蓝藻经常被用来修复受 Cd 污染的土壤。细菌通过生物积累和生物吸附过程修复受 Cd 污染的土壤^[53]。绿假单胞菌、施氏假单胞菌、枯草芽孢杆菌、肺炎克雷伯菌、球状红杆菌、伯克霍尔德菌等细菌被证明是一些最有效的 Cd 生物修复微生物^[53-56]。一些细菌可以产生代谢物来固定 Cd, 包括具有氨基、羧基、羟基、巯基和磷酸盐、

草酸盐、聚合物和硫化物的小分子^[57]。比如,台湾铜锈菌 KKU2500-3 能够将 Cd^{2+} 转化为不溶性 CdS, 最终降低水稻幼苗中 Cd^{2+} 的积累^[58]。值得注意的是, 相比于化学方法合成纳米粒子, 生物合成纳米粒子已被认为是一种环境友好且具有成本效益的生物修复方法。一些细菌可以生物合成 Cd 纳米颗粒(CdNPs), 如海洋细菌铜绿假单胞菌 JP-11 和硫酸盐还原菌^[59-60]。最近的研究发现菌株 XL8 中与 Cd 转运和结合相关的 Cadmium-translocating P-type ATPase (CADA)和 Metallothionein (BMTA)基因表达随着 Cd 暴露显著上调, 且这 2 个基因促进了细胞内 Cd 纳米颗粒(CdNPs)的合成, XL8 明显减轻了水稻幼苗中 Cd 的毒性和积累。此外, 最近还有研究报道了伯克霍尔德菌通过增加必需养分吸收和优先吸收 Cd 来抑制水稻中 Cd 的积累^[61]。

与其他微生物相比, 真菌对金属离子表现出极大的亲和力和力。它们可以通过物理化学和生物机制从外部环境中积累重金属^[62]。最近科学家报道稻镰状瓶霉(*Falciophora oryzae*)将 Cd 隔离在液泡和厚壁孢子中, 赋予水稻 Cd 耐受性, 降低谷物中的 Cd 含量, 这种对 Cd 的耐受性与 *Falciophora oryzae* 中 *Syntaxin 1* 基因表达相关^[63]。丛枝菌根真菌在重金属污染土壤的植物/生物修复中得到了更多的关注。丛枝菌根真菌是关键的土壤微生物, 与大多数植物物种形成共生关系。它们可以通过增加水分和养分吸收来促进植物发育, 增强植物在重金属、干旱和盐胁迫等各种胁迫下的耐受性^[47,64]。目前的研究已经报道了丛枝菌根真菌减少植物中 Cd 积累的机制包括: 改变金属转运蛋白基因的表达水平^[65]; 提高植物对氮和磷的吸收, 从而增加整体植物生物量, 导致植物中金属浓度水平低^[66]; 通过将金属固定在真菌菌丝上来降低金属的植物有效性^[67]; 最近的研究提了一个观点, 丛枝菌根真菌通过诱导细胞壁修饰增强水稻根系中 Cd 的固定。该研究发现丛枝菌根真菌减轻了 Cd 对水稻生物量、株高和根长的影响, 且水稻根和芽中的 Cd 浓度显著降低, 积累的 Cd 主要分布在根细胞壁的 HC1 和果胶成分中。HC1 含量与 HC1 中 Cd 水平呈正相关, 果胶也有类似的发现。这说明 HC1 和果胶含量的升高会促进木质素的合成, 提高了苯丙氨酸解氨酶(phenylalanine ammonia lyase, PAL)和果胶酯酶(pectinesterase, PME)的活性, 并产生更多的羟基和羧基基团, 这对于 Cd 结合是至关重要的^[68]。

2.5 改变传统的耕作模式来降低 Cd 含量

间作是一种传统的农业和生产性种植系统, 为世界提供了 15%~20% 的粮食, 几个世纪以来一直是我国常见的种植系统^[69-70]。普通作物通过与不同作物品种或富 Cd 植物间作, 来减少待收获作物中 Cd 的积累, 增加其他植物中 Cd 的积累^[71-72], 目前已报道了水稻通过与菠菜轮作能有效降低水稻中 Cd 积累^[73]。最近的研究表明, 大多数水稻品种在间作系统中的产量优势和 Cd 下降, 长良优 772

的籽粒 Cd 与相邻水稻的籽粒 Cd 呈负相关, 与增加铁斑块相比, 增加土壤 pH 减少了更多的根吸收 Cd。间作降低 Cd 积累的主要机制是它们增加了土壤的 pH, 导致 Cd 的生物有效性降低, 同时它们增强了铁斑块^[74]。

3 结束语

Cd 由于其不可生物降解的性质而存在于环境中并成为食物链的一部分。环境中较高浓度的 Cd 会对人类、植物和动物产生各种类型的毒性。食用大米是 Cd 进入人体的主要途径, 我国作为一个水稻生产大国, 年水稻产量约占世界水稻总量的 27.91%, 且我国的水稻种植区和我国的金属矿区重叠, 这导致了我国水稻受到 Cd 污染的几率极大, 因此降低我国水稻 Cd 积累对于保证粮食安全尤为重要。影响 Cd 在水稻中积累的因素很多, 其中包括施肥、灌溉水、土壤 pH、土壤氧化还原状态等因数。开发低 Cd 积累水稻新品种, 采用化学方法、纳米技术、生物方法, 及改变耕作方式, 严格水管理和施肥成为降低 Cd 在水稻中积累的有效方法。为了更好地解决 Cd 在水稻中积累的问题, 未来的研究应集中解决: (1)深挖 Cd 在水稻中积累与转运机制, 明确控制 Cd 积累与转运的关键基因。(2)寻找更多能降低水稻 Cd 积累的微生物, 加大对内生真菌的筛选, 这对于环境友好非常重要。(3)使用现代的分子标记技术与空间诱变育种技术相结合, 选育更多低 Cd 积累水稻新品种, 这有利于解决转基因的安全问题。(4)明确如何更好将纳米粒子运用于土壤的修复过程。

参考文献

- [1] PENG S, TANG Q, ZOU Y. Current status and challenges of rice production in China [J]. *Plant Prod Sci*, 2009, 12(1): 3-8.
- [2] 许肖博, 安鹏虎, 郭天骄, 等. 水稻镉胁迫响应机制及防控措施研究进展[J]. *中国水稻科学*, 2021, 35(5): 415-426.
XU XB, AN PH, GUO TJ, *et al.* Research progress on cadmium stress response mechanism and control measures in rice [J]. *Chin Rice Sci*, 2021, 35(5): 415-426.
- [3] LI J, LIU YR, ZHANG LM, *et al.* Sorption mechanism and distribution of cadmium by different microbial species [J]. *J Environ Manage*, 2019, 237: 552-559.
- [4] ROBERTS TL. Cadmium and phosphorous fertilizers: The issues and the science [J]. *Proc Eng*, 2014, 83: 52-59.
- [5] 刘发欣, 伍钧, 高怀友, 等. 菜地土壤和蔬菜中 Cd 暴露的人体健康风险分析[J]. *农业环境科学学报*, 2007, (5): 1860-1864.
LIU FX, WU J, GAO HY, *et al.* Human health risk analysis of Cd exposure in vegetable soil and vegetables [J]. *J Agric Environ Sci*, 2007, (5): 1860-1864.
- [6] 周江明. 中国耕地重金属污染现状及人为污染源浅析[J]. *中国土壤与肥料*, 2020, (2): 83-92.
ZHOU JM. Analysis of heavy metal pollution status and anthropogenic pollution sources in cultivated land in China [J]. *Chin Soil Fertil*, 2020, (2): 83-92.
- [7] 胡莹, 黄益宗, 段桂兰, 等. 镉对不同生态型水稻的毒性及其在水稻体内迁移转运[J]. *生态毒理学报*, 2012, 7(6): 664-670.

- HU Y, HUANG YZ, DUAN GL, *et al.* Toxicity of cadmium to different ecotypes of rice and its transport in rice [J]. *J Ecotoxicol*, 2012, 7(6): 664–670.
- [8] XUE D, JIANG H, DENG X, *et al.* Comparative proteomic analysis provides new insights into cadmium accumulation in rice grain under cadmium stress [J]. *J Hazard Mater*, 2014, 280: 269–278.
- [9] HU Y, CHENG H, TAO S. The challenges and solutions for cadmium-contaminated rice in China: A critical review [J]. *Environ Int*, 2016, 92: 515–532.
- [10] 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]. *Environ Poll*, 2016, 219: 99–106.
- [11] CHRISTENSEN TH. Cadmium soil sorption at low concentrations: I. effect of time, cadmium load, pH, and calcium [J]. *Water Air Soil Poll*, 1984, 21(1): 105–114.
- [12] WANG J, WANG PM, GU Y, *et al.* Iron-manganese (oxyhydro) oxides, rather than oxidation of sulfides, determine mobilization of Cd during soil drainage in paddy soil systems [J]. *Environ Sci Technol*, 2019, 53(5): 2500–2508.
- [13] CAI Z, WANG B, ZHANG L, *et al.* Striking a balance between N sources: Mitigating soil acidification and accumulation of phosphorous and heavy metals from manure [J]. *Sci Total Environ*, 2021, 754: 142–189.
- [14] ZHU Q, LIU X, HAO T, *et al.* Cropland acidification increases risk of yield losses and food insecurity in China [J]. *Environ Poll*, 2020, 256: 113–145.
- [15] CHEN H, ZHANG W, YANG X, *et al.* Effective methods to reduce cadmium accumulation in rice grain [J]. *Chemosphere*, 2018, 207: 699–707.
- [16] HONMA T, OHBA H, KANEKO-KADOKURA A, *et al.* Optimal soil Eh, pH, and water management for simultaneously minimizing arsenic and cadmium concentrations in rice grains [J]. *Environ Sci Technol*, 2016, 50(8): 4178–4185.
- [17] INAHARA M, OGAWA Y, AZUMA H. Countermeasure by means of flooding in latter growth stage to restrain cadmium uptake by lowland rice [*Oryza sativa*] [Z].
- [18] SONG Y, WANG Y, MAO W, *et al.* Dietary cadmium exposure assessment among the Chinese population [J]. *PLoS One*, 2017, 12(5): e0177978.
- [19] NOGAWA K, SAKURAI M, ISHIZAKI M, *et al.* Threshold limit values of the cadmium concentration in rice in the development of itai-itai disease using benchmark dose analysis [J]. *J Appl Toxicol*, 2017, 37(8): 962–966.
- [20] LI D, HAO X, CHEN L. Molecular breeding for lower cadmium accumulation in rice grain: Progress and perspectives [Z].
- [21] 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]. *Sci Rep-UK*, 2017, 7(1): 1–12.
- [22] YANG C, ZHANG Y, HUANG C. Reduction in cadmium accumulation in japonica rice grains by CRISPR/Cas9-mediated editing of OsNRAMP5 [J]. *J Integr Agric*, 2019, 18(3): 688–697.
- [23] SHAO JF, XIA J, YAMAJI N, *et al.* Effective reduction of cadmium accumulation in rice grain by expressing OsHMA3 under the control of the OsHMA2 promoter [J]. *J Exp Bot*, 2018, 69(10): 2743–2752.
- [24] BLANVILLAIN R, KIM JH, WU S, *et al.* OXIDATIVE STRESS 3 is a chromatin-associated factor involved in tolerance to heavy metals and oxidative stress [J]. *Plant J*, 2009, 57(4): 654–665.
- [25] LIU SM, JIANG J, LIU Y, *et al.* Characterization and evaluation of OsLCT1 and OsNramp5 mutants generated through CRISPR/Cas9-mediated mutagenesis for breeding low Cd rice [J]. *Rice Sci*, 2019, 26(2): 88–97.
- [26] ISHIKAWA S, ISHIMARU Y, IGURA M, *et al.* Ion-beam irradiation, gene identification, and marker-assisted breeding in the development of low-cadmium rice [J]. *Proc Nat Acad Sci*, 2012, 109(47): 19166–19171.
- [27] ISHIKAWA S, ABE T, KURAMATA M, *et al.* Development of low-cadmium-accumulating rice [Z].
- [28] CAO ZZ, LIN XY, YANG YJ, *et al.* Gene identification and transcriptome analysis of low cadmium accumulation rice mutant (*lcd1*) in response to cadmium stress using MutMap and RNA-seq [J]. *BMC Plant Biol*, 2019, 19(1): 1–13.
- [29] 张玉盛, 肖欢, 敖和军. 齐穗期施肥对水稻镉积累的影响[J]. *中国稻米*, 2019, 25(3): 49–52.
- ZHANG YS, XIAO H, AO HJ. Effects of fertilization at full heading stage on cadmium accumulation in rice [J]. *China Rice*, 2019, 25(3): 49–52.
- [30] 张玉盛, 肖欢, 吴勇俊, 等. 粒肥施用时期对水稻镉积累的影响初探 [J]. *华北农学报*, 2020, 35(2): 144–151.
- ZHANG YS, XIAO H, WU YJ, *et al.* Preliminary study on the effect of grain fertilizer application period on cadmium accumulation in rice [J]. *North Chin J Agric*, 2020, 35(2): 144–151.
- [31] OCIEPA E. The effect of fertilization on yielding and heavy metals uptake by maize and virginia fanpetals (*Sida hermaphrodita*) [J]. *Arch Environ Prot*, 2011, 37(2): 123–129.
- [32] SELLES F, CLARKE JM, ZENTNER RP, *et al.* Effects of source and placement of phosphorus on concentration of cadmium in the grain of two durum wheat cultivars [J]. *Can J Plant Sci*, 2003, 83(3): 475–482.
- [33] GRANT CA, SHEPPARD SC. Fertilizer impacts on cadmium availability in agricultural soils and crops [J]. *Hum Ecol Risk Assess*, 2008, 14(2): 210–228.
- [34] WANG X, DENG S, ZHOU Y, *et al.* Application of different foliar iron fertilizers for enhancing the growth and antioxidant capacity of rice and minimizing cadmium accumulation [J]. *Environ Sci Pollut*, 2021, 28(7): 7828–7839.
- [35] SUN L, ZHENG M, LIU H, *et al.* Water management practices affect arsenic and cadmium accumulation in rice grains [Z].
- [36] SPANU A, VALENTE M, LANGASCO I, *et al.* Sprinkler irrigation is effective in reducing cadmium concentration in rice (*Oryza sativa* L.) grain: A new twist on an old tale [J]. *Sci Total Environ*, 2018, 628: 1567–1581.
- [37] CHENG S, CHEN T, XU W, *et al.* Application research of biochar for the remediation of soil heavy metals contamination: A review [J]. *Molecules*, 2020, 25(14): 3167.
- [38] ZHENG RL, CAI C, LIANG JH, *et al.* The effects of biochars from rice residue on the formation of iron plaque and the accumulation of Cd, Zn, Pb, As in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings [J]. *Chemosphere*, 2012, 89(7): 856–862.
- [39] BIAN R, CHEN D, LIU X, *et al.* Biochar soil amendment as a solution to prevent Cd-tainted rice from China: Results from a cross-site field experiment [J]. *Ecol Eng*, 2013, 58: 378–383.
- [40] WU C, SHI L, XUE S, *et al.* Effect of sulfur-iron modified biochar on the available cadmium and bacterial community structure in contaminated soils [J]. *Sci Total Environ*, 2019, 647: 1158–1168.
- [41] NA GN, SALT DE. The role of sulfur assimilation and sulfur-containing compounds in trace element homeostasis in plants [J]. *Environ Exp Bota*, 2011, 72(1): 18–25.
- [42] ZHOU Q, LIN L, QIU W, *et al.* Supplementation with ferromanganese oxide-impregnated biochar composite reduces cadmium uptake by indica rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *J Clean Prod*, 2018, 184: 1052–1059.
- [43] DAI H, CHEN Y, WANG D, *et al.* Effect of biochar amendment on wheat emergence and seedling growth in alkaline soil [J]. *J Chin Agric Univ*,

- 2018, 23: 1–7.
- [44] MA X, SHARIFAN H, DOU F, *et al.* Simultaneous reduction of arsenic (As) and cadmium (Cd) accumulation in rice by zinc oxide nanoparticles [J]. *Chem Eng J*, 2020, 384: 123802.
- [45] PARDO T, MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ D, DELA FC, *et al.* Maghemite nanoparticles and ferrous sulfate for the stimulation of iron plaque formation and arsenic immobilization in *Phragmites australis* [J]. *Environ Poll*, 2016, 219: 296–304.
- [46] ANTONIADIS V, LEVIZOU E, SHAHEEN SM, *et al.* Trace elements in the soil-plant interface: Phytoavailability, translocation, and phytoremediation—A review [J]. *Earth Sci Rev*, 2017, 171: 621–645.
- [47] LI H, LUO N, LI YW, *et al.* Cadmium in rice: Transport mechanisms, influencing factors, and minimizing measures [J]. *Environ Poll*, 2017, 224: 622–630.
- [48] ZHOU H, ZHU W, YANG WT, *et al.* Cadmium uptake, accumulation, and remobilization in iron plaque and rice tissues at different growth stages [J]. *Ecotox Environ Saf*, 2018, 152: 91–97.
- [49] ZHANG JY, ZHOU H, GU J F, *et al.* Effects of nano-Fe₃O₄-modified biochar on iron plaque formation and Cd accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Environ Poll*, 2020, 260: 113970.
- [50] ZHANG JY, ZHOU H, ZENG P, *et al.* Nano-Fe₃O₄-modified biochar promotes the formation of iron plaque and cadmium immobilization in rice root [J]. *Chemosphere*, 2021, 276: 130212.
- [51] ZHANG Y, ZHANG Y, AKAKURU OU, *et al.* Research progress and mechanism of nanomaterials-mediated in-situ remediation of cadmium-contaminated soil: A critical review [J]. *J Environ Sci*, 2021, 104: 351–364.
- [52] XU J, LIU C, HSU PC, *et al.* Remediation of heavy metal contaminated soil by asymmetrical alternating current electrochemistry [J]. *Nat Commun*, 2019, 10(1): 1–8.
- [53] KUMAR A, SUBRAHMANYAM G, MONDAL R, *et al.* Bio-remediation approaches for alleviation of cadmium contamination in natural resources [J]. *Chemosphere*, 2021, 268: 128855.
- [54] CHELLAIAH ER. Cadmium (heavy metals) bioremediation by *Pseudomonas aeruginosa*: a minireview [J]. *Appl Water Sci*, 2018, 8(6): 1–10.
- [55] PENG W, LI X, SONG J, *et al.* Bioremediation of cadmium-and zinc-contaminated soil using *Rhodobacter sphaeroides* [J]. *Chemosphere*, 2018, 197: 33–41.
- [56] KUMAR A, CHATURVEDI AK, YADAV K, *et al.* Fungal phytoremediation of heavy metal-contaminated resources: Current scenario and future prospects [Z].
- [57] GADD GM. Metals, minerals and microbes: geomicrobiology and bioremediation [J]. *Microbiology*, 2010, 156(3): 609–643.
- [58] SIRIPORNADULSIL S, SIRIPORNADULSIL W. Cadmium-tolerant bacteria reduce the uptake of cadmium in rice: Potential for microbial bioremediation [J]. *Ecotox Environ Saf*, 2013, 94: 94–103.
- [59] QI P, ZHANG D, ZENG Y, *et al.* Biosynthesis of CdS nanoparticles: A fluorescent sensor for sulfate-reducing bacteria detection [J]. *Talanta*, 2016, 147: 142–146.
- [60] RAJ R, DALEI K, CHAKRABORTY J, *et al.* Extracellular polymeric substances of a marine bacterium mediated synthesis of CdS nanoparticles for removal of cadmium from aqueous solution [J]. *J Colloid Interf Sci*, 2016, 462: 166–175.
- [61] WANG C, HUANG Y, YANG X, *et al.* *Burkholderia* sp. Y4 inhibits cadmium accumulation in rice by increasing essential nutrient uptake and preferentially absorbing cadmium [J]. *Chemosphere*, 2020, 252: 126603.
- [62] ÇABUK A, ILHAN S, FILIK C, *et al.* Pb²⁺ biosorption by pretreated fungal biomass [J]. *Turk J Biol*, 2005, 29(1): 23–28.
- [63] SU ZZ, DAI MD, ZHU JN, *et al.* Dark septate endophyte *Falciphora oryzae* assisted alleviation of cadmium in rice [J]. *J Hazard Mater*, 2021, 419(10): 126435.
- [64] MIRANSARI M. Arbuscular mycorrhizal fungi and heavy metal tolerance in plants [Z].
- [65] CHEN XW, WU L, LUO N, *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungi and the associated bacterial community influence the uptake of cadmium in rice [J]. *Geoderma*, 2019, 337: 749–757.
- [66] CHEN XW, WU FY, LI H, *et al.* Phosphate transporters expression in rice (*Oryza sativa* L.) associated with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) colonization under different levels of arsenate stress [J]. *Environ Exp Bot*, 2013, 87: 92–99.
- [67] WU S, ZHANG X, HUANG L, *et al.* Arbuscular mycorrhiza and plant chromium tolerance [J]. *Soil Ecol Lett*, 2019, 1(3): 94–104.
- [68] GAO MY, CHEN XW, HUANG WX, *et al.* Cell wall modification induced by an arbuscular mycorrhizal fungus enhanced cadmium fixation in rice root [J]. *J Hazard Mater*, 2021, 416: 125894.
- [69] FRANCIS CA. Multiple cropping systems [M]. New York: Macmillan, 1986.
- [70] ALTIERI MA. The ecological role of biodiversity in agroecosystems [Z].
- [71] LIU YG, FEI YE, ZENG G, *et al.* Effects of added Cd on Cd uptake by oilseed rape and pai-tsai co-cropping [J]. *Trans Nonferrous Metal Soc*, 2007, 17(4): 846–852.
- [72] SU DC, LU XX, WONG JWC. Could cocropping or successive cropping with Cd accumulator oilseed rape reduce Cd uptake of sensitive Chinese cabbage? [J]. *Pract Period Hazard Toxic Rad Waste Managt*, 2008, 12(3): 224–228.
- [73] KANG Z, ZHANG W, QIN J, *et al.* Yield advantage and cadmium decreasing of rice in intercropping with water spinach under moisture management [J]. *Ecotox Environ Saf*, 2020, 190: 110102.
- [74] XU Y, FENG J, LI H. How intercropping and mixed systems reduce cadmium concentration in rice grains and improve grain yields [J]. *J Hazard Mater*, 2021, 402: 123762.

(责任编辑: 于梦娇 郑丽)

作者简介



曾德永, 博士研究生, 主要研究方向为空间生物学效应。

E-mail: 18B925086@stu.hit.edu.cn

张英春, 副教授, 主要研究方向为天然产物营养健康与食品安全。

E-mail: zyc229@163.com



卢卫红, 教授, 主要研究方向为天然产物营养健康与食品安全。

E-mail: lwh@hit.edu.cn