

田茂苑,何腾兵,付天岭,等. 稻田土壤和稻米镉含量关系的研究进展[J]. 江苏农业科学,2019,47(8):25-28,40.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.08.005

稻田土壤和稻米镉含量关系的研究进展

田茂苑¹,何腾兵^{1,2},付天岭²,成剑波²,张庭艳^{1,3}

(1. 贵州大学农学院,贵州贵阳 550025; 2. 贵州大学新农村发展研究院,贵州贵阳 550025;

3. 贵州省开阳县南江布依族苗族乡人民政府,贵州开阳 550300)

摘要:稻田土壤镉造成的稻米镉污染已成为危害人类健康的制约因子,摸清稻田土壤和稻米镉的含量关系,可以为稻米安全生产和维护人类健康作出重要贡献。通过从稻田土壤和稻米镉污染现状,稻田土壤和稻米镉的含量关系,土壤 pH 值、有机质对稻米镉含量的影响等方面总结稻田土壤和稻米镉含量关系的研究进展,并进行展望。我国稻田土壤和稻米镉污染现象形势严峻,主要体现在稻田土壤镉污染逐年增加、稻米超标率高等方面;稻田土壤和稻米镉含量关系复杂,因外界环境的不同,存在正相关性和非正相关性;土壤 pH 值、有机质对稻米镉含量具有显著性影响,增加或降低土壤 pH 值和有机质均可改变稻米对镉的吸收与累积。下一步可通过大量的调查研究,有针对性、全面地对稻田土壤和稻米镉含量的关系开展协同调查,建立不同环境条件下稻田土壤和稻米镉含量的耦合关系,以期对稻米安全生产和镉污染土壤修复治理提供科学依据。

关键词:稻田土壤;稻米;镉;含量;相关关系;有机质;pH 值

中图分类号: X53;S511.06 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)08-0025-04

随着近年来重金属污染呈扩展之势,重金属污染已成为影响我国粮食生产与食品安全的制约因素之一。我国耕地土壤重金属的污染率为 16.67%,由重金属造成的耕地污染面积约占总耕地面积的 17%,在所有重金属污染中,又以镉的污染形势最为严峻,其污染率为 25.20%,全国有 14 个省(市、区)的耕地土壤是重金属污染的多发区域^[1]。镉是农田土壤重金属中主要的污染物质,在所有重金属中镉是对人类健康威胁最大的有害元素之一^[2],我国每年因重金属污染造成的粮食减产超过 1 000 万 t,每年被重金属污染的粮食也达 1 200 万 t 之多^[3]。稻米作为我国居民的主要粮食作物之一,全国有 65% 以上的人口以稻米为主食^[4],稻米质量的安全与否在很大程度上反映了我国粮食安全的总体情况。

稻米中重金属主要从其生长的土壤环境中来,本研究通过稻田土壤镉和稻米镉污染现状、稻田土壤和稻米镉的含量关系、土壤 pH 值、有机质对稻米镉含量的影响等方面对稻田土壤和稻米镉含量关系研究进展进行了概述,旨在为稻米安全生产和下一步的研究方向提供参考依据。

1 稻田土壤和稻米镉的污染现状

1.1 稻田土壤镉污染现状

近年来,由于工业化、城市化的快速发展,人与自然矛盾日益显著,带来的固废、液废、气废不断增加,农业生产中自生污染加剧以及对废弃物质的处理不善等原因,导致农田土壤

中有毒重金属含量都在逐年增加,由此造成的土壤生产力下降、农产品污染以及生态环境受到严重破坏等问题已成为阻碍农业生产发展、生态环境安全的主要因素之一^[5]。

关于我国农田土壤镉污染的研究,学者们从 20 世纪 70 年代中后期就开始关注,1980 年我国受镉污染的农田土壤面积为 9 333 hm²^[6]。据不完全统计^[3],我国受镉、汞、铅、砷、铬等重金属污染的耕地面积约为 2 000 万 hm²,约占耕地总面积的 20%,其中尤以镉的污染最为严重,镉污染耕地面积为 1.27 万 hm²,并有 11 个省份污灌区土壤镉含量达到了生产“镉米”的程度^[7]。2014 年环境保护部和国土资源部发布的全国土壤污染状况调查公报显示,镉的点位超标率为 7% 左右,我国土壤环境质量状况不容乐观^[8]。

我国土壤重金属的分布情况具有明显的地域特征,张小敏等收集了全国近 138 个镉的研究数据,得出西南地区土壤中重金属含量较高,其他地区含量相对较低^[9],在西部地区和南部地区镉的平均值最高,稻田土壤中镉的含量超过背景值的现象尤为明显^[10],在调查涉及的区域,重金属污染态势逐年升高,重金属超标区多分布在工矿区及元素高背景区,且镉的污染状况尤为突出,土壤镉污染指数已达到 4.05,尤其是贵州属镉重污染区,辽宁省农田土壤中镉含量超出背景值最高,超出其背景值 23.02 倍。我国大多数城市近郊农田土壤都受到不同程度的镉污染,如广西稻田耕层土壤中全镉含量平均值为 0.53 mg/kg,调查对象 157 个土壤样品中有 55 个土壤样品镉含量超过国家 GB 15618—1995《土壤环境质量标准》的二级标准,稻田土壤镉生态风险为中高等风险^[11]。广东大宝山矿山地区稻田土壤镉含量平均值为 2.19 mg/kg,以镉污染为主^[12],贵州丹寨金汞矿区稻田土壤镉的含量平均值为(0.426±0.136) mg/kg,大部分点位高于贵州省土壤镉背景值,研究区域内 85% 的土壤面临镉的轻微污染或轻污染^[13]。贵州万山汞矿区某农田土壤镉含量为 0.43 mg/kg,研

收稿日期:2018-08-14

基金项目:国家自然科学基金委员会-贵州喀斯特科学研究中心 2016 年度项目子课题(编号:U1612442-6-2)。

作者简介:田茂苑(1993—),男,贵州松桃人,硕士研究生,主要从事土壤学方向研究。E-mail:1058163432@qq.com。

通信作者:何腾兵,教授,主要从事土壤学、环境科学的教学与研究。

E-mail:hetengbing@163.com。

究区内 25% 的点位存在镉超标现象^[14]。贵州中部山区煤矿石堆场周边污染的水稻土壤镉含量为 5.51 ~ 5.59 mg/kg, 远远高于国家土壤环境质量二级标准限值^[15]。湖南攸县煤矿区、工厂区和煤矿工厂区 3 类典型区域农田土壤中的镉含量超过了土壤环境质量标准 0.3 mg/kg^[16]; 贵州典型铅锌矿区水稻土壤镉的单因子污染指数 > 1, 土壤中镉的含量超过标准值 84.92 倍, 水稻土壤镉已经严重超标^[17]; 杭州地区稻田土壤中镉的单项污染指数为 2.97, 属于中度污染状况, 稻田土壤中镉污染现象明显, 农作物受镉污染的风险不容忽视^[18]。

总体来说, 我国稻田土壤镉污染现象较为普遍, 稻田土壤镉污染现状不容乐观, 土壤镉污染日益加剧。稻田土壤镉污染情况受地域性差异影响变化较大, 污染区域多出现在且多存在于城郊交界处、工业排污区和矿区。目前, 关于稻田土壤镉污染的研究现状, 学者多从局部区域对稻田土壤镉污染现状开展研究, 且由于稻田土壤重金属监测数据大多在未公布前属于国家秘密, 公开的数据量较少, 连贯性的数据信息较为缺乏, 有针对性的对大范围内关于稻田土壤镉污染程度及现状的研究结果还鲜有报道, 我国稻田土壤还存在镉污染底数不清的情况, 亟须摸清稻田土壤镉污染底数, 为稻米安全生产提供科学依据。

1.2 稻米中镉的污染现状

土壤是稻米中镉的主要来源, 水稻对重金属镉具有较强的生理耐受性机制和较强的吸附性, 稻田土壤镉是造成稻米镉污染的最大因子^[19], 当土壤镉含量为 2.21 mg/kg 时, 糙米中镉含量可达 2.64 mg/kg。2002 年中华人民共和国农业部(现名农业农村部)对全国市场稻米的安全性进行抽检, 得到稻米中镉的超标率已十分严重, 其超标率为 10.3%。2015 年全国有超过 10% 的稻米受到镉污染^[20], 重金属污染产出的粮食对人体健康具有潜在风险。

按照 GB 2762—2012《食品中污染物限量》, 稻米中镉含量的限制标准为 0.2 mg/kg, 超过该值后, 极易引起食品安全问题。近年来, 我国稻米存在镉污染风险, 且风险不容忽视, 稻米镉污染现象主要发生在矿区超标土壤、高镉背景值区及工业活动频繁区域。1989 年沈阳某灌区糙米中平均含镉量为 1.06 mg/kg, 严重超过了我国无公害稻米中重金属的含量标准^[6]。涂杰峰等调查了福建全省 1 458 份稻米镉的含量情况, 发现有 5% 左右的样品镉含量超出了我国食品卫生标准值, 福建稻米镉潜在风险较大^[21]。江西省大余县与赣州、广西某矿区、辽宁沈阳、湖南株洲、湖南安化、湖南衡东、湖南常宁等地的稻米中镉平均含量均大于 1 mg/kg, 最大值达到 9.36 mg/kg, 上述区域的稻米受镉污染已十分严重^[22]。云南省稻米镉的超标率为 2.5%, 该省部分区域的居民可能通过食用大米途径发生镉超量积累的风险^[23]。安徽某地稻米中镉含量的平均值为 0.21 mg/kg, 已经超出我国食品污染物镉含量的限定值 0.2 mg/kg^[5]。湖南北部某镇稻米重金属镉污染极其严重, 研究区内稻米镉全部超标, 且“镉米”的产出率达 53%, 研究区稻米存在很大的安全风险^[24]。贵州典型铅锌矿区精米中镉含量超标严重, 超标率高达 68% 以上, 矿区生产的稻米已对人体健康造成潜在风险^[17]。织金某煤矿区土壤受到重金属镉的污染, 稻米镉超标率为 30%^[25]。贵州

兴仁煤矿区糙米镉含量超过食品安全标准 4.0 ~ 7.7 倍, 长期食用污染区域稻米将对人体健康造成极大风险问题^[26]。

由此可见, 我国稻米受镉的污染已相当严重, 且我国稻米镉污染现象主要发生在矿区超标土壤、高镉背景值区及工业活动频繁区域, 从区域上看, 稻米镉污染现象呈现南部区域高于中部及北部, 在我国南方城市如湖南、广东、福建、浙江存在稻米镉超标现象, 我国中部及北部地区稻米镉超标的报道较少。目前, 在稻米镉污染情况研究方面还存在着稻米镉污染底数不清、稻米镉监测数据量少以及研究数据不集中的局限性, 下一步可从摸清稻米镉污染底数入手, 对大范围稻米镉污染情况开展研究, 以期对稻米安全生产提供数据支撑与科学指导。

2 稻田土壤与稻米镉的含量关系

土壤是作物生长的主要基质, 作物中的成分与土壤成分密切相关, 水稻对重金属镉具有较强的生理耐受性机制和较强的吸附性, 据报道, 当土壤镉含量为 2.21 mg/kg 时, 糙米中镉含量可达 2.64 mg/kg, 稻田土壤镉是造成稻米镉污染的最大因子^[19]。与其他重金属相比, 镉在土壤中具有较高的植物有效性, 并且土壤镉的浓度在达到毒害植物之前就可以使可食部分镉含量超过食用标准而危害人类健康^[27]。要减少镉从稻田土壤向稻米中的传递, 首要任务是摸清稻田土壤与稻米镉之间的关系。摸清稻田土壤与稻米镉含量之间的关系, 对降低稻米镉含量及保障人类安全健康具有极其重要的意义。

关于稻田土壤和稻米镉之间的相关关系, 目前主要有 2 种观点, 一是稻田土壤和稻米镉含量呈极显著正相关关系。王梦梦等研究表明, 在田间条件下, 土壤全镉与稻米镉含量达到了极显著相关水平, 其相关性系数为 0.392, 稻米镉含量与土壤镉含量的相关性出现减弱现象^[28]。彭华等研究表明, 稻田土壤与稻米镉含量呈显著正相关关系, 在没有超标的土壤环境条件下生长的稻米仍可能产生镉超标现象, 土壤中镉含量越高, 稻米超标的风险就越严重^[29]。赵雄等研究得出, 糙米镉累积量随土壤添加镉浓度的增大而增加, 稻米镉含量与土壤镉总量呈现显著正相关性^[30]。Schuhmacher 等得到稻米镉浓度与土壤镉浓度呈正相关性, 在其他外界条件不变的情况下, 土壤含镉量越高就越容易生产出高镉含量的稻米^[31]。任荣富等研究表明, 稻田土壤和稻米中镉存在良好的相关性, 当土壤镉含量达 308 mg/kg 时, 有 75% 的稻米的镉含量达到 0.32 mg/kg^[32]。

另一观点是由于外界环境的复杂性, 稻米与稻田土壤镉含量除了呈现正相关性外, 还有其他相关关系。张建辉等发现, 稻米镉含量与土壤总镉含量呈开口向上的二次曲线关系, 稻米镉与土壤有效态镉含量呈正相关, 稻米镉含量受到土壤有效态镉含量的促进^[33]。稻米富集土壤中的镉受到土壤镉形态变化的显著影响, 糙米镉含量与土壤可交换态镉呈极显著正相关, 与有机物结合态镉呈极显著负相关^[34]。Suzuki 等对德克萨斯州稻田土壤及稻米镉含量关系的研究中发现, 稻米与土壤中镉之间没有明显的相关关系^[35]。喻凤莲等发现, 在不同环境下, 土壤镉与稻米镉之间的关系响应不一, 在酸性环境下, 土壤镉与稻米镉呈现显著正相关关系, 相关系数为

0.971,在碱性条件下,土壤镉与稻米镉呈弱正相关性,在中性条件下,土壤镉与稻米镉的相关性不显著^[36]。

总体而言,稻米镉与稻田土壤镉关系复杂,除呈现正相关性外,还存在其他关系。要想降低稻米中镉的含量,首要做法就是摸清稻田土壤与稻米镉含量之间的相关关系,就目前公布的研究数据而言,多是局部区域的数据,如前文提到的王梦梦等用 60 个点位研究了 14 个乡(镇)稻田和稻米镉含量,用于说明二者的定量关系^[28],Fang 等用 92 份稻米样品来说明我国主要种植水稻区域镉的健康风险^[37],这些数据难以全面、准确揭示稻米与土壤镉的关系。针对土壤环境质量工作,国家层面十分重视,如农业农村部(原农业部)于 2012—2016 年开展的“农产品产地土壤重金属污染防治普查”工作,目前在全国范围内开展的“土壤污染防治行动计划”涉及的系列工作,主要针对耕地土壤及主要粮食作物(南方水稻、北方小麦)重金属污染情况,目的是摸清全国农产品产地土壤重金属的污染情况、土壤环境质量的污染底数和污染分布,但由于重金属数据在未公布前皆属于秘密数据,相关研究数据尚未向社会公布,目前所获得的信息多是定性不定量,难以全面、系统地反映实际情况。待数据向社会公布后,对于说明稻米与土壤镉之间的相关关系具有极其重要的意义。

3 土壤 pH 值、有机质对稻米镉含量的影响

3.1 土壤 pH 值对稻米镉含量的影响

土壤理化性质如土壤有机质、土壤质地、土壤类型对稻米镉的吸收系数产生影响,但影响远远小于土壤 pH 值对稻米镉吸收的影响^[34]。易亚科等通过研究土壤酸碱度对水稻生长及稻米镉含量的影响得到,土壤 pH 值、品种及二者之间交互作用下对水稻农艺性状及产量的影响均达到显著水平($P < 0.05$),其中土壤 pH 值影响最大^[38]。土壤 pH 值变化对稻米镉吸收有显著影响,研究表明,当 pH 值在 5~6 时,稻米对土壤镉的吸收能力最强,pH 值为 6~7 时吸收系数下降明显,两者差异在 1.4~7.4 倍之间^[35]。当土壤 pH 值为 5.0 时,稻米中镉含量达最高值,为 0.32 mg/kg,当 pH 值为 5.65 时,稻米镉含量为 0.02 mg/kg,随着土壤酸度值的增加稻米镉含量呈降低趋势,且稻米镉含量与土壤酸度值呈现良好的线性关系^[33]。当土壤 pH 值大于 6.97 时^[39],土壤处于中偏碱性时,稻米镉含量受 pH 值及土壤镉含量的影响,pH 值升高,稻米镉含量下降,土壤镉含量升高,稻米镉含量也随之升高,在酸性和中性条件下^[36],土壤 pH 值与稻米镉含量均呈显著正相关关系,在碱性环境下,土壤 pH 值与稻米镉含量呈负相关性。通过施用生石灰降镉发现,土壤 pH 值平均提升 0.16 个单位,稻米镉平均含量由对照的 0.29 mg/kg 降至 0.13 mg/kg^[40]。

土壤酸碱度是控制稻米吸收土壤镉的基本地球化学因素,直接影响生物对重金属的吸收,降低土壤酸碱度能促进或刺激稻米吸收土壤中更多的镉,土壤中镉的活性和形态与土壤 pH 值密切相关,提高土壤 pH 值能有效降低土壤有效态镉含量和稻米镉含量的累积,增加土壤 pH 值是防治耕地镉污染的重要有效措施^[41]。pH 值是影响稻米镉积累的重要因子,改变土壤 pH 值可以调节稻米对镉的吸收,在不同酸碱度环境下,pH 值对稻米的响应不一致。总体而言,在酸性偏中

性条件下,稻米对镉的响应积极,在碱性条件下,稻米吸收镉效率降低。稻米镉含量除受 pH 值影响外,还受到其他因素的影响,下一步,可通过大量数据,综合考虑其他因素对稻米镉的影响,建立多因素与稻米之间的线性关系,为镉污染稻田修复治理提供理论依据。

3.2 有机质对稻米镉含量的影响

从土壤有机质的组成成分上看,有机质本身不含重金属,增加土壤有机质含量并不会增加重金属的来源,但因其含有大量的含氧官能团及其他官能团,能与土壤中的重金属发生离子交换、螯合反应,改变土壤溶液中的化学性质及重金属的存在状态从而抑制或促进重金属在土壤中的含量,减少或增加农产品对重金属的吸附^[42]。陈浩等研究表明,有机质含量与土壤镉含量呈显著正相关关系,有机质与重金属离子易形成络合物,降低重金属离子的活性,减少重金属有效态在土壤中的含量^[43]。何腾兵等研究表明,不同母岩发育的土壤中有有机质与重金属的相关性不一致,白云岩、钙质砂页岩、河流冲积物发育而来的土壤镉含量与有机质不存在相关性,石灰岩、砂岩、石岩发育而来的土壤镉含量与有机质存在一定的相关性,砂页岩和老风化壳发育而来的土壤镉与有机质存在极显著相关关系^[44]。

有机质与稻米镉含量关系密切,土壤有机质是影响水稻土吸附镉的主要因素,有机质去除后,Cd²⁺的吸附量会减少 20%^[45]。有机质与植物吸收的镉含量呈显著相关^[46],生长在有机质含量高的土壤上的作物更容易吸收更高含量的镉,稻米镉含量随有机质的增加而增加,添加颗粒有机质可以提高水稻籽粒生物量,促进水稻对 Cd 的吸收,显著影响 Cd 在籽粒中的分布,当颗粒有机质添加量 ≤ 1.0 g/kg 时,Cd 在籽粒中的分布降低,当颗粒有机质添加量达到 2.5 g/kg 时,镉在籽粒中的分布显著增加^[47]。所以利用有机物质作为镉污染土壤的改良剂也存在风险^[48],有机物质在刚施入土壤时能够增加土壤中镉的吸附和固定,从而降低土壤镉的有效性和生物活性,但后期有机物质在土壤中容易矿化和分解成有机酸等物质而增加作物对金属的吸收。

有机质是影响稻米对镉累积的重要因子,根据外界环境影响因子,有机质既可促进也可抑制稻米对镉的吸收,目前,利用有机质修复重金属污染土壤的研究较多,王秀梅等研究表明,有机物料的修复材料可以显著降低土壤中有效镉含量,土壤有效镉含量与土壤有机质含量之间不具备显著相关性,分析其原因可能受土壤总镉、pH 值、有机质的共同影响^[49]。在利用有机质开展修复时,在研究有机质对镉的影响上,要综合考虑外界环境如温度、pH 值、阳离子交换量(CEC)、母岩性质等条件,尤其是 pH 值和有机质,才能利用环境中大量的有机物质治理镉污染土壤。

4 结论与展望

通过从稻田土壤和稻米镉的污染现状,稻田土壤和稻米镉的含量关系,土壤 pH 值、有机质对稻米镉含量的影响等方面总结稻田土壤和稻米镉含量关系的研究进展,提出了下一步的研究方向。

(1)我国稻田土壤和稻米镉污染现象形势严峻,主要体现在稻田土壤镉污染逐年增加,稻米超标率高。目前,关于对

稻田土壤和稻米镉污染现状的研究还存在公开数据量少、现有数据表现出的研究范围不大以及底数不清的问题,下一步可利用国家层面已开展的研究详细了解全国稻田土壤和稻米镉的污染情况,摸清镉污染底数,为稻米安全生产提供科学依据。

(2)稻田土壤和稻米镉含量关系复杂,因外界环境的不同,存在正相关性和非正相关性。要想降低稻米中镉的含量,首要做法就是摸清稻田土壤与稻米镉含量之间的相关关系,就目前公布的数据而言,数据量少且多是对局部区域的污染研究,由于数据量少的局限性,难以全面、准确揭示稻米与土壤镉的关系。下一步应有针对性、全面性地对稻田土壤和稻米镉含量关系开展协同调查。

(3)土壤pH值、有机质对稻米镉含量具有显著影响,增加或降低土壤pH值和有机质均可改变稻米对镉的吸收与累积。在研究土壤pH值、有机质对稻米镉的影响上,要综合考虑其他因素如温度、CEC、质地、母岩性质等条件,下一步可通过开展关于多因素对稻米镉含量的影响,建立多因素与稻米镉含量之间的线性关系,为镉污染稻田修复治理提供理论依据。

参考文献:

- [1]宋伟,陈百明,刘琳. 中国耕地土壤重金属污染概况[J]. 水土保持研究,2013,20(2):293-298.
- [2]黄冬芬. 水稻对土壤重金属镉的响应及其调控[D]. 扬州:扬州大学,2008.
- [3]Wu G, Kang H B, Zhang X Y, et al. A critical review on the bio-removal of hazardous heavy metals from contaminated soils: issues, progress, eco-environmental concerns and opportunities[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 174(1/2/3):1-8.
- [4]陈凤霞,吕杰,史元,等. 我国稻米质量安全生态环境的现状与发展对策[J]. 生态经济,2015,31(2):109-112.
- [5]姜羽翔. 安徽某地稻田土壤及稻米中重金属调查研究[D]. 合肥:安徽农业大学,2012.
- [6]吴燕玉,陈涛,张学询. 沈阳张士灌区镉污染生态的研究[J]. 生态学报,1989,9(1):21-26.
- [7]顾继光,周启星,王新. 土壤重金属污染的治理途径及其研究进展[J]. 应用基础与工程科学学报,2003,11(2):143-151.
- [8]环境保护部 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[R/OL]. (2014-04-17)[2018-08-14]. http://www.gov.cn/xinwen/2014-04/17/content_2661765.htm.
- [9]张小敏,张秀英,钟太洋,等. 中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究[J]. 环境科学,2014,35(2):692-703.
- [10]侯彦林. 中国农田重金属污染预警系统研究[J]. 农业环境科学学报,2012,31(4):697-705.
- [11]陈桂芬,雷静,黄雁飞,等. 广西稻田镉污染状况及硅对稻米镉的消减作用[J]. 南方农业学报,2015,46(5):772-776.
- [12]许超,夏北成,秦建桥,等. 广东大宝山矿山下游地区稻田土壤的重金属污染状况的分析与评价[J]. 农业环境科学学报,2007,26(增刊1):549-553.
- [13]喻子恒,黄国培,张华,等. 贵州丹寨金汞矿区稻田土壤重金属分布特征及其污染评估[J]. 生态学杂志,2017,36(8):2296-2301.
- [14]湛天丽,黄阳,滕应,等. 贵州万山汞矿区某农田土壤重金属污染特征及来源解析[J]. 土壤通报,2017,48(2):474-480.

- [15]刘璐璐,高彦征,刘方,等. 贵州中部山区煤矸石堆场周边污染水稻土重金属的释放特征[J]. 地球与环境,2015,43(2):152-158.
- [16]张敏,王美娥,陈卫平,等. 湖南攸县典型煤矿和工厂区水稻田土壤镉污染特征及污染途径分析[J]. 环境科学,2015,36(4):1425-1430.
- [17]吴迪,杨秀珍,李存雄,等. 贵州典型铅锌矿区水稻土壤和水稻中重金属含量及健康风险评估[J]. 农业环境科学学报,2013,32(10):1992-1998.
- [18]吴龙,金铨,龚立科,等. 杭州地区稻田土壤中镉、铅、汞、砷、铬和镍的污染状况[J]. 中国卫生检验杂志,2017,27(11):1621-1623,1630.
- [19]汤春芳. 镉胁迫和植物抗氧化系统、营养元素相互关系的研究以及多胺的调控作用[D]. 长沙:湖南大学,2005.
- [20]Li J R, Xu Y M. Immobilization of Cd in paddy soil using moisture management and amendment[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(7):5580-5586.
- [21]涂杰峰,刘兰英,罗钦,等. 福建省稻米镉含量及其健康风险[J]. 农业环境科学学报,2015,34(4):695-701.
- [22]崔力拓,耿世刚,李志伟. 我国农田土壤镉污染现状及防治对策[J]. 现代农业科技,2006(11):184-185.
- [23]林昕,黎其万,杜丽娟,等. 云南省大米中重金属镉含量及其健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报,2016,7(9):3841-3847.
- [24]蒋逸骏,胡雪峰,舒颖,等. 湘北某镇农田土壤-水稻系统重金属累积和稻米食用安全研究[J]. 土壤学报,2017,54(2):410-420.
- [25]耿丹. 织金县煤矿区土壤-农作物重金属污染特征及农作物食用风险评估研究[D]. 贵阳:贵州师范大学,2015.
- [26]陶秀珍,唐常源,吴攀,等. 贵州煤矿区成熟期水稻中重金属的分布特征及风险评估[J]. 生态环境学报,2017,26(7):1216-1220.
- [27]McLaughlin M J, Parker D R, Clarke J M. Metals and micronutrients - food safety issues[J]. Field Crops Research, 1999, 60(1/2):143-163.
- [28]王梦梦,何梦媛,苏德纯. 稻田土壤性质与稻米镉含量的定量关系[J]. 环境科学,2018,39(4):1918-1925.
- [29]彭华,戴金鹏,纪雄辉,等. 稻田土壤与稻米中的镉含量关系初探[J]. 湖南农业科学,2013(7):68-72.
- [30]赵雄,李福燕,张冬明,等. 水稻土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.
- [31]Schuhmacher M, Domingo J L, Llobet J M, et al. Cadmium, chromium, copper, and zinc in rice and rice field soil from southern Catalonia, Spain[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 1994, 53(1):54-60.
- [32]任荣富,葛送来,解怀生,等. 重金属铬和镉在土壤与稻米中的分布及其相关性[J]. 浙江农业科学,2011(1):138-141,170.
- [33]张建辉,王芳斌,汪霞丽,等. 湖南稻米镉和土壤镉锌的关系分析[J]. 食品科学,2015,36(22):156-160.
- [34]潘杨. 土壤镉污染与稻米镉富集关联性研究[D]. 北京:中国农业科学院,2015.
- [35]Suzuki S, Iwao S. Cadmium, copper, and zinc levels in the rice and rice field soil of Houston, Texas[J]. Biological Trace Element Research, 1982, 4(1):21-28.

量逐渐降低,均在 24 h 时出现最小值。试验结果表明,泛素基因沉默以及泛素的表达量下调,对 TLR4/NF- κ B 信号通路起到了抑制作用,各下游分子的表达量均出现降低,其抑制作用很可能是通过抑制泛素化降解 I κ B 而实现的。

参考文献:

- [1] Corn J E, Vucic D. Ubiquitin in inflammation; the right linkage makes all the difference[J]. *Nature Structural & Molecular Biology*, 2014, 21(4): 297–300.
- [2] Akutsu M, Dikic I, Bremm A. Ubiquitin chain diversity at a glance[J]. *Journal of Cell Science*, 2016, 129(5): 875–880.
- [3] Grice G L, Nathan J A. The recognition of ubiquitinated proteins by the proteasome[J]. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 2016, 73(18): 3497–3506.
- [4] Pickart C M, Eddins M J. Ubiquitin: structures, functions, mechanisms[J]. *Biochimica et Biophysica acta*, 2004, 1695(1/2/3): 55–72.
- [5] Mukhopadhyay D, Riezman H. Proteasome-independent functions of ubiquitin in endocytosis and signaling[J]. *Science*, 2007, 315(589): 201–205.
- [6] Popovic D, Vucic D, Dikic I. Ubiquitination in disease pathogenesis and treatment[J]. *Nature Medicine*, 2014, 20(11): 1242–1253.
- [7] 成 军. 现代细胞自噬分子生物学[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 276.
- [8] Moore C B, Guthrie E H, Huang M T H, et al. Short hairpin RNA (shRNA): design, delivery, and assessment of gene knockdown[J]. *Methods Mol Biol*, 2010, 629: 141–158.
- [9] Staskiewicz L, Thorburn J, Morgan M J. Inhibiting autophagy by shRNA knockdown: cautions and recommendations[J]. *Autophagy*, 2013, 9(10): 1449–1450.

(上接第 28 页)

- [36] 喻凤莲, 周成明, 邓 锐. 水稻籽实及其根系土壤中镉含量的相关性研究——以几个金土地工程土地整理区为例[J]. *四川地质学报*, 2012, 32(4): 468–471.
- [37] Fang Y, Sun X Y, Yang W J, et al. Concentrations and health risks of lead, cadmium, arsenic, and mercury in rice and edible mushrooms in China[J]. *Food Chemistry*, 2014, 147: 147–151.
- [38] 易亚科, 周志波, 陈光辉. 土壤酸碱度对水稻生长及稻米镉含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(3): 428–436.
- [39] 刘佳凤, 田娜娜, 赵玉杰, 等. 基于 Cubist 多元混合回归的稻米富集 Cd 模型构建研究[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(6): 1059–1065.
- [40] 胡召华, 靳 磊, 朱捍华. 石灰降低稻米镉含量的效果及其影响因素[J]. *湖南农业科学*, 2017(8): 20–23.
- [41] 范 健, 廖启林, 许宏铭, 等. 稻米与小麦吸收土壤重金属的基本特征[J]. *地质学刊*, 2016, 40(4): 701–709.
- [42] 陈子扬, 孙孝龙. 土壤中有有机质与重金属关系的研究进展[J]. *环境与发展*, 2017, 29(8): 141–142.

- [10] Golzio M, Escoffre J M, Teissié J. shRNA-mediated gene knockdown in skeletal muscle[J]. *Methods Mol Biol*, 2012, 798: 491–501.
- [11] 方 帅, 赵 博. 泛素化及相关疾病研究进展[J]. *生物化学与生物物理进展*, 2017, 44(5): 377–384.
- [12] 兰秋艳, 高 媛, 李衍常, 等. 泛素、泛素链和蛋白质泛素化研究进展[J]. *生物工程学报*, 2016, 32(1): 14–30.
- [13] Kimura Y, Tanaka K. Regulatory mechanisms involved in the control of ubiquitin homeostasis[J]. *Journal of Biochemistry*, 2010, 147(6): 793–798.
- [14] Verhelst K, Verstrepen L, Carpentier I, et al. Linear ubiquitination in NF- κ B signaling and inflammation; what we do understand and what we do not[J]. *Biochemical Pharmacology*, 2011, 82(9): 1057–1065.
- [15] Marfella R, D'Amico M, di Filippo C, et al. Increased activity of the ubiquitin-proteasome system in patients with symptomatic carotid disease is associated with enhanced inflammation and may destabilize the atherosclerotic plaque: effects of rosiglitazone treatment[J]. *Journal of the American College of Cardiology*, 2006, 47(12): 2444–2455.
- [16] Ishibashi Y, Hanyu N, Suzuki Y, et al. Quantitative analysis of free ubiquitin and multi-ubiquitin chain in colorectal cancer[J]. *Cancer Letters*, 2004, 211(1): 111–117.
- [17] Choongseob O, Soonyong P, Eun K L, et al. Downregulation of ubiquitin level via knockdown of polyubiquitin gene *Ubb* as potential cancer therapeutic intervention[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 2623.
- [18] Nicassio F, Corrado N, Vissers J H, et al. Human USP3 is a chromatin modifier required for S phase progression and genome stability[J]. *Current Biology*, 2007, 17(22): 1972–1977.
- [43] 陈 浩, 吉力力·阿不都外力, 刘 文, 等. 博尔塔拉河沿岸土壤重金属含量特征与有机质、pH 值的关系[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(5): 210–213.
- [44] 何腾兵, 董玲玲, 刘元生, 等. 贵阳市乌当区不同母质发育的土壤理化性质和重金属含量差异研究[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(6): 157–162.
- [45] 林大松, 徐应明, 孙国红, 等. 土壤 pH、有机质和含水氧化物对镉、铅竞争吸附的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(2): 510–515.
- [46] Eriksson J E. A field study on factors influencing Cd levels in soils and in grain of oats and winter wheat[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 1990, 53(1/2): 69–81.
- [47] 郭毅轩, 赵秀兰. 颗粒有机质对水稻镉吸收及转运的影响[J]. *环境科学*, 2018, 39(11): 5180–5188.
- [48] 余贵芬, 蒋 新, 孙 磊, 等. 有机质对土壤镉有效性的影响研究综述[J]. *生态学报*, 2002, 22(5): 682–688.
- [49] 王秀梅, 安 毅, 秦 莉, 等. 对比施用生物炭和肥料对土壤有效镉及酶活性的影响[J]. *环境化学*, 2018, 37(1): 67–74.