

硒与黄腐酸组配对水稻镉吸收的影响

刘波^{1,2}, 黄道友², 周建利¹, 朱奇宏², 龙世方^{1,2}, 许超², 王帅²

(1. 长江大学农学院, 湖北 荆州 434025; 2. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125)

摘要: 以 Cd 污染水稻土为研究对象, 采用盆栽试验研究不同用量 Se(0.5, 1.0 mg/kg) 与黄腐酸(0.6, 1.2 g/kg) 组配对水稻吸收积累镉的影响, 并探讨其作用机理, 以为 Cd 污染稻田的安全利用提供科学依据。结果表明: 单施 Se 可使土壤 pH 提高 0.08~0.23 个单位, 土壤 CaCl₂ 提取态 Cd 含量降低 8.6%~20.9%, 水稻地上部各器官 Cd 含量显著降低 29.4%~39.5%, 单施 Se 能有效降低水稻吸收 Cd, 并阻控 Cd 向地上部以及籽实中的转运。单施黄腐酸能显著降低土壤 pH, 但对土壤 CaCl₂-Cd 含量、水稻各器官 Cd 和 Se 含量(除低量黄腐酸处理叶片和糙米 Cd 含量外)及水稻各器官 Cd 的分配无显著影响。Se 与黄腐酸组配对对土壤 pH 的影响取决于二者的用量, 黄腐酸与高量 Se 组配处理显著降低 CaCl₂ 提取态 Cd 16.5%~21.9%。Se 与黄腐酸组配处理能显著减少水稻 Cd 的吸收及向地上部和籽粒的转运, 更为有效地降低稻米 Cd 含量, 高量 Se 与黄腐酸组配的 2 个处理与对照相比, 稻米 Cd 含量分别降低 38.1% 和 50.2%。总体来看, 施 Se 能有效降低稻米 Cd 含量, 而 Se 与黄腐酸配合施用降 Cd 效果更佳。

关键词: 硒; 黄腐酸; 镉; 水稻

中图分类号: X53

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)02-0350-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.02.053

Effects of Combined Application of Selenium and Fulvic Acid on Cadmium Accumulation in Rice

LIU Bo^{1,2}, HUANG Daoyou², ZHOU Jianli¹, ZHU Qihong²,

LONG Shifang^{1,2}, XU Chao², WANG Shuai²

(1. College of Agriculture, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434025; 2. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125)

Abstract: Taking Cd contaminated rice soil as the research object, a pot experiment was conducted to study the effects of various combination application of selenium (Se, 0.5 and 1.0 mg/kg) and fulvic acid (FA, 0.6 and 1.2 g/kg) on the uptake and accumulation of cadmium (Cd) in rice and the mechanism, and to provide a scientific basis for the safe utilization of rice contaminated by Cd. The results showed that single application of Se increased soil pH by 0.08 to 0.23 units, reduced CaCl₂ extractable Cd in soil by 8.6% to 20.9%, decreased the concentration of Cd in aboveground organs of rice by 29.4% to 39.5%. Additionally, single application of Se could effectively reduce the accumulation of Cd in rice and inhibited the translocation of Cd to above ground tissues and rice grain. For the treatments applied FA only, soil pH was significantly decreased, while the concentrations of soil CaCl₂-Cd, the Cd and Se in rice organs (except the Cd concentration in leaves and brown rice treated with low amount of FA), and the Cd distribution in different organs were not significantly influenced. The effect of combined application of Se and FA on soil pH was related to the dosage of two. High amount of Se combined with FA significantly reduced the CaCl₂ extractable Cd in soil by 16.5% to 21.9%. Combined application of Se and FA significantly inhibited the translocation of Cd to aboveground organs and rice grain, and was more effectively in reducing the accumulation of Cd in brown rice. Compare with the control, Cd concentrations of rice in the two treatments applied with high amount of Se combined with FA were significantly decreased by 38.1% and 50.2%, respectively. In conclusion, the application of Se could effectively reduce the accumulation of Cd in brown rice, while the combined application of Se and FA had better effect.

Keywords: selenium; fulvic acid; cadmium; rice

收稿日期: 2018-09-11

资助项目: 公益性(农业)行业专项(201403015); 湖湘青年英才项目(2017RS3057); 国家自然科学基金项目(41877138)

第一作者: 刘波(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤重金属污染修复研究。E-mail: lb70282@163.com

通信作者: 朱奇宏(1982—), 男, 研究员, 主要从事土壤与环境生态研究。E-mail: qhzhz@isa.ac.cn

土壤是人类赖以生存的三大自然资源之一。近年来,土壤重金属污染已成为全球性的环境问题^[1]。据 2014 年《全国土壤污染状况调查公报》^[2]显示,全国耕地土壤点位超标率高达 19.4%,土壤 Cd 点位超标率高达 7.0%,居无机污染物之首。Cd 是生物毒性最强的重金属元素,经食物链在人体内蓄积,诱发肝、肾和骨骼病变,还会导致人体致畸、致癌和突变^[3]。水稻作为我国主要的粮食作物之一,是全国 60% 人口的主要口粮^[4],也是 Cd 富集性很强的大宗谷类作物^[5]。根据农业部的调查结果,我国部分地区稻米 Cd 含量的超标比例高达 10.0%,稻米 Cd 超标问题严重^[6-7],人民的身体健康受到威胁^[8]。因此,如何减少农作物吸收土壤 Cd、缓解或抑制受 Cd 的毒害作用是亟待解决的重要科学问题。

硒(Se)是人和动物必需的微量营养元素。国内外研究^[9]证实,适量外源硒能有效削减植物对 Cd 的吸收和累积。有研究^[10]表明,土施 0.25 mg/kg Se 可显著降低花生地上部和根系 Cd 含量 12.7%~21.0% 和 36.0%~46.1%。在寒地水稻上也呈现相似结果,在土壤 Cd 含量为 0~8 mg/kg 条件下,随 Se 施用量的增大(≤ 0.14 mg/kg),水稻营养器官和稻米中 Cd 含量逐渐降低,精米 Cd 含量最大降幅可达 31.5%^[11]。然而,土壤中 Se 的形态和有效性受土壤腐殖酸的影响,外源腐殖酸施用能有效提高土壤 Se 的植物有效性^[12]。

黄腐酸是腐殖酸中一个分子量低、功能团密集的级分,相比于大分子量的腐殖酸,黄腐酸具有更强的生理活性,在农业生产应用中备受关注^[13]。诸多研究^[14-16]结果显示,黄腐酸能有效促进作物生长发育,提升作物对土壤养分吸收和水分利用效率;同时在一定程度上影响作物吸收 Cd。但受土壤条件的制约,在 pH 较低的土壤上呈现降低作物吸收 Cd 的效果,但在 pH 较高的土壤上则促进作物对 Cd 的吸收^[17]。目前,虽然有不少关于硒或黄腐酸对作物吸收镉的影响研究报道,但两者组配效果机理研究较少。基于此,本研究以镉污染水稻土为对象,分析 Se 与黄腐酸配合施用对水稻 Cd 吸收积累的影响,并探讨其作用机理,以期 Cd 污染稻田的安全利用提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

供试土壤为发育于花岗岩的麻沙泥,采自长沙县北山镇,土壤 pH 5.18,有机质含量 45.91 g/kg,全氮含量 2.03 g/kg,全磷含量 0.96 g/kg,全钾含量 43.99 g/kg,全镉含量 2.62 mg/kg,全硒含量 0.56 mg/kg。供试水稻品种为“H 优 518”,为三系杂交籼稻,由湖南农业大学和湖南省衡阳市农业科学研究所选育。供试黄腐酸由作物秸秆制备而成,系山东泉林嘉有肥料有限公司提供,

黄腐酸含量 45.3%。氮肥采用尿素,磷钾肥采用磷酸二氢钾,Se 采用分析纯亚硒酸钠。

1.2 试验设计

试验于 2017 年 7—11 月在耕地重金属污染长期定位观测试验中心站(长沙)盆栽场进行,采取盆栽试验方法,使用直径为 25 cm,高为 25 cm 的塑料盆,装土 5 kg/盆,每盆栽水稻 3 穴,每穴 1 株。Se 和黄腐酸均设 3 个浓度处理,采取全因子试验设计,共 9 个处理,每个处理重复 3 次,具体试验处理及用量见表 1。尿素和磷酸二氢钾作基肥一次性施用,每盆用量均为 2.5 g。装盆前将肥料均匀拌入土壤中,再将亚硒酸钠配成溶液与黄腐酸(液体)均匀喷洒在土壤中,混合均匀后装盆,淹水平衡 3 天后移栽水稻幼苗。

表 1 试验处理与用量

处理	硒/ (mg · kg ⁻¹)	黄腐酸/ (g · kg ⁻¹)
CK	0	0
X1	0.5	0
X2	1.0	0
H1	0	0.6
H2	0	1.2
X1+H1	0.5	0.6
X1+H2	0.5	1.2
X2+H1	1.0	0.6
X2+H2	1.0	1.2

1.3 测定指标与方法

在水稻成熟期,将整盆植株收获,先后用自来水和去离子水清洗干净,再将整株分为根、茎、叶和籽粒,茎、叶于 105 ℃ 下杀青 30 min,80 ℃ 下烘干至恒重。籽粒使用小型砻谷机脱壳,制成糙米;再将根、茎、叶和糙米样品粉碎,分别收集待测。

水稻植株样品镉含量的测定:称取 1.000 0 g 水稻样品干样,加混酸 HNO₃—HClO₄(V:V 为 5:1) 12 mL 消解,滤液用电感耦合等离子光谱发生仪(ICP—OES,720ES)测定。

水稻植株样品硒含量的测定:称取 0.500 0 g 水稻样品干样于 50 mL 大口三角瓶中,加混酸 HNO₃—HClO₄(V:V 为 4:1)10 mL 消解,消解完全后转移到 25 mL 比色管中,定容,取上清液用原子荧光光度计(AFS—830)测定。

土壤有效态镉含量采用 0.01 mol/L CaCl₂ 提取,称 5.00 g 过 20 目的土样加 25 mL 0.01 mol/L CaCl₂ 溶液在 25 ℃、160 r/min 的条件下振荡 2 h,滤液用电感耦合等离子原子发射光谱仪(ICP—OES,720ES)测定。

土壤基本理化性质指标采用常规测定方法^[18]进行分析。

1.4 数据分析

转运系数(TF_{ij})=水稻 i 部位镉浓度(mg/kg)/水稻 j 部位镉浓度(mg/kg)

试验数据采用 Microsoft Excel 2010 进行处理,采用 SPSS 19.0 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 硒与黄腐酸组配对土壤 pH 和提取态 Cd 含量的影响

由表 2 可知,水稻成熟期对照(CK)处理土壤 pH 为 5.22。与 CK 相比,单施 Se 处理土壤 pH 提高 0.08~0.23 个单位,而单施黄腐酸处理土壤 pH 则降低 0.08~0.18 个单位。Se 与黄腐酸组配处理的土壤 pH 低于相应浓度单施 Se 处理,而高于相应浓度单施黄腐酸处理,其与 CK 的差异取决于 Se 和黄腐酸的用量。

0.01 mol/L CaCl_2 提取态 Cd 常用来评价土壤中 Cd 的生物有效性。总体来看,土壤 CaCl_2 -Cd 含量与 pH 呈极显著负相关关系($r = -0.627, P < 0.01$)。与对照相比,单施 Se 处理土壤 CaCl_2 -Cd 含量降低 8.6%~20.9%,单施黄腐酸处理无显著变化,但 CaCl_2 -Cd 含量最高的处理为低量 Se(X1)与黄腐酸组配的 2 个处理,增幅达到 11.8%和 22.5%,与单施低量 Se 相比,低量 Se 与黄腐酸组配施用,使土壤 CaCl_2 -Cd 含量显著增加 41.4%~55.0%;而高量 Se(X2)与黄腐酸组配使 CaCl_2 -Cd 含量降幅为 16.5%~21.9%,相比于单施高量 Se,其土壤 CaCl_2 -Cd 含量降幅为 8.6%~14.5%。当黄腐酸施加量一定时,土壤 CaCl_2 -Cd 含量随着施 Se 量的增加而显著降低($P < 0.05$),其中施用低量黄腐酸时降低 36.2%,而高量黄腐酸时降低 25.3%。

表 2 硒与黄腐酸组配对土壤 pH 和 CaCl_2 提取态 Cd 含量的影响

处理	pH	CaCl_2 -Cd/(mg·kg ⁻¹)
CK	5.22c	0.764±0.03c
X1	5.45a	0.604±0.09e
X2	5.30b	0.698±0.06d
H1	5.14c	0.773±0.02c
H2	5.04d	0.766±0.03c
X1+H1	5.16c	0.936±0.03a
X1+H2	5.06d	0.854±0.01b
X2+H1	5.32b	0.597±0.04e
X2+H2	5.17c	0.638±0.02de
X	21.530**	16.080**
F 值 H	53.645**	3.962*
X×H	8.529**	16.080**

注:表中数据后不同字母表示处理间差异显著;*表示在 $P < 0.05$ 水平上有显著性差异;**表示在 $P < 0.01$ 水平上有显著性差异。下同。

2.2 硒与黄腐酸组配对水稻各器官镉含量的影响

从图 1 可以看出,水稻不同器官 Cd 含量的变化规律基本呈现为根>茎>叶>糙米。由于土壤镉污染程度较为严重,对照处理水稻根、茎、叶和糙米 Cd 含量较高,分别为 2.04,2.15,0.93,0.47 mg/kg。单施 Se 显著降低水稻地上部各器官 Cd 含量,降低幅度为 29.4%~39.5%($P < 0.05$);而单施黄腐酸处理水稻各器官 Cd 含量与对照之间无显著差异(除低量黄腐酸处理叶片和糙米 Cd 含量外)。Se 与黄腐酸组配显著提高水稻根 Cd 含量,增幅为 34.4%~123.2%($P < 0.05$)。低量 Se 与黄腐酸组配处理对水稻茎和叶 Cd 含量无显著影响($P > 0.05$),但降低糙米 Cd 含量,其中 X1+H2 处理糙米 Cd 含量显著降低 26.9%($P < 0.05$)。高量 Se 与低量黄腐酸(H1)组配可显著降低水稻茎和叶 Cd 含量($P < 0.05$),而与高量黄腐酸(H2)组配对水稻茎和叶 Cd 含量无显著影响($P > 0.05$),但高量 Se 与 2 个用量的黄腐酸组配均显著降低糙米 Cd 含量,降幅为 38.1%和 50.2%($P < 0.05$)。低量 Se 与黄腐酸组配处理相比于相应浓度单施 Se 处理,水稻根、茎和叶 Cd 含量均显著增加($P < 0.05$);而高量 Se 与黄腐酸组配处理的水稻根和茎 Cd 含量均高于相应浓度单施 Se 处理。Se 与黄腐酸组配处理的糙米 Cd 含量均低于相应浓度单施黄腐酸处理,且黄腐酸用量一定时,随施 Se 含量的增加,糙米 Cd 含量呈现下降趋势,且低量黄腐酸时达到显著差异。

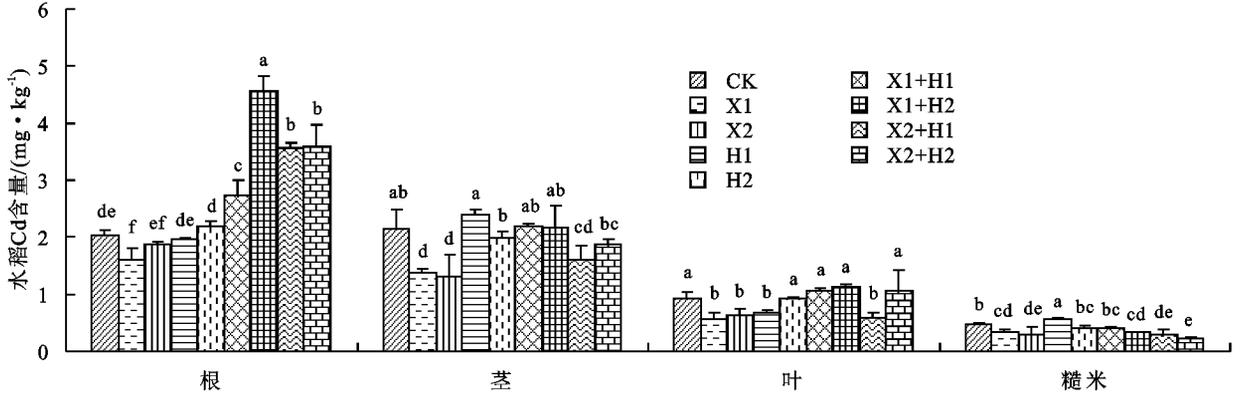
Se 与黄腐酸组配对水稻各器官 Cd 含量的变异性分析结果(表 3)显示,单施 Se 对水稻根、茎和糙米 Cd 含量影响极显著($P < 0.01$),对叶 Cd 含量影响不显著($P > 0.05$)。施用黄腐酸对水稻根、茎和叶 Cd 含量影响均呈极显著($P < 0.01$),对糙米 Cd 含量影响不显著($P > 0.05$)。施 Se 和黄腐酸的交互作用对水稻根和茎 Cd 含量影响极显著($P < 0.01$),对叶 Cd 含量影响显著($P < 0.05$),对糙米 Cd 含量影响不显著($P > 0.05$)。

2.3 硒与黄腐酸组配对水稻各器官硒含量的影响

从图 2 可以看出,与对照相比,单施 Se 处理显著增加水稻各器官 Se 含量(除低量 Se 处理糙米 Se 含量外),增加幅度为 118.3%~509.2%($P < 0.05$);而单施黄腐酸处理水稻各器官 Se 含量与对照相比均无显著差异($P > 0.05$)。低量 Se 与黄腐酸组配对水稻地上部各器官 Se 含量无显著影响($P > 0.05$),但显著提高水稻根的 Se 含量($P < 0.05$)。高量 Se 与黄腐酸组配显著增加水稻各器官 Se 含量,其中水稻根的增加幅度最大。与单施 Se 相比,低量 Se 与黄腐酸组配处理的水稻根、茎、叶 Se 含量均低于相应的单施

Se, 但糙米 Se 含量则呈现增加的趋势。而高量 Se 与黄腐酸组配处理的水稻各器官 Se 含量则高于相应浓

度单施 Se, 表明黄腐酸的施加可以影响水稻器官中的 Se 含量。



注: 图中不同小写字母表示水稻同一器官不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

图 1 硒与黄腐酸组配对水稻各器官 Cd 含量的影响

表 3 硒与黄腐酸组配对水稻各器官 Cd 含量的变异性分析

效应	根	茎	叶	糙米
硒(X)	44.293**	15.423**	2.847	18.771**
黄腐酸(H)	98.314**	8.535**	14.128**	0.930
X×H	32.222**	7.266**	4.510*	1.548

2.4 硒与黄腐酸组配对水稻镉转运系数的影响

镉的转运系数 (TF) 是反映镉在水稻植株内的分配, 判断水稻吸收、分配和转运镉的一个重要指标。与对照相比, 单施 Se 显著降低水稻 Cd 的 $TF_{茎/根}$, 降低幅度为 17.9%~33.9% ($P < 0.05$), 但对 $TF_{叶/茎}$ 和 $TF_{米/茎}$ 影响不显著 ($P > 0.05$) (表 4)。单施黄腐酸对

水稻 Cd 转运系数无显著影响 ($P > 0.05$)。Se 与黄腐酸组配显著降低 $TF_{茎/根}$, 降低幅度为 23.5%~57.5% ($P < 0.05$)。Se 与黄腐酸组配对 $TF_{叶/茎}$ 无显著影响 ($P > 0.05$), 但 Se 与黄腐酸组配降低 $TF_{米/茎}$, 降低幅度为 13.6%~45.5%。Se 与黄腐酸组配的 $TF_{米/茎}$ 与相应浓度单施 Se 相比显著降低, 也显著低于相应浓度单施黄腐酸处理。低量 Se 与高量黄腐酸组配处理水稻 Cd 的 $TF_{茎/根}$ 显著低于单施低量 Se, 高量 Se 与黄腐酸组配水稻 Cd 的 $TF_{茎/根}$ 与单施高量 Se 相比显著降低 ($P < 0.05$)。

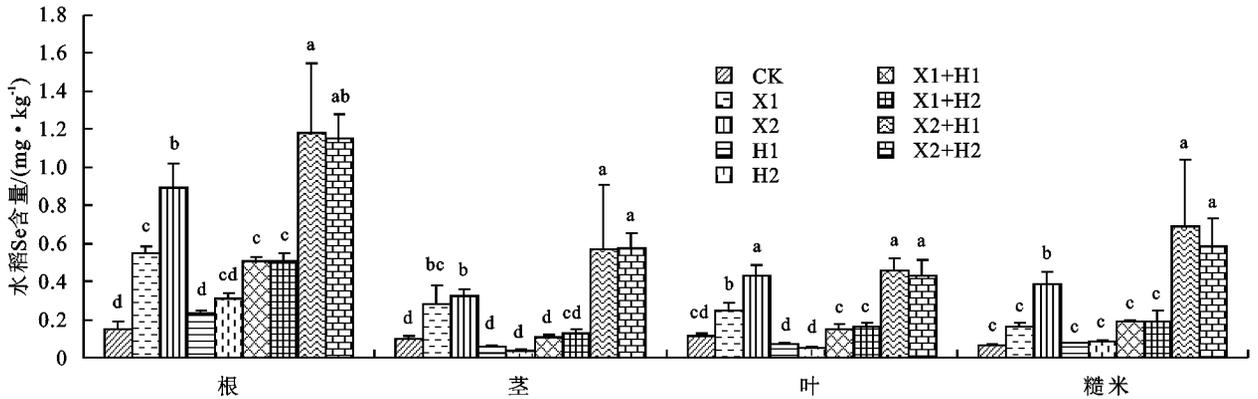


图 2 硒与黄腐酸组配对水稻各器官 Se 含量的影响

表 4 硒与黄腐酸组配对水稻镉转运系数的影响

处理	$TF_{茎/根}$	$TF_{叶/茎}$	$TF_{米/茎}$
CK	1.06 ± 0.19ab	0.44 ± 0.02abc	0.22 ± 0.02ab
X1	0.87 ± 0.13c	0.41 ± 0.09abc	0.24 ± 0.04a
X2	0.70 ± 0.22d	0.54 ± 0.26a	0.22 ± 0.04ab
H1	1.22 ± 0.05a	0.29 ± 0.02c	0.24 ± 0.01a
H2	0.91 ± 0.02bc	0.47 ± 0.02ab	0.20 ± 0.01abc
X1+H1	0.81 ± 0.10cd	0.48 ± 0.01ab	0.19 ± 0.01bcd
X1+H2	0.47 ± 0.06e	0.53 ± 0.08a	0.16 ± 0.03de
X2+H1	0.45 ± 0.08e	0.37 ± 0.02bc	0.17 ± 0.03cd
X2+H2	0.53 ± 0.09e	0.56 ± 0.16a	0.12 ± 0.01e

注: 表中数据后不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

2.5 硒与黄腐酸组配对水稻硒转运系数的影响

由表 5 可知, 各处理水稻 Se 从根到茎的转运 ($TF_{茎/根}$) 与对照相比均显著降低, 降低幅度为 27.8%~83.3% ($P < 0.05$), 但各处理对水稻 Se 从茎到叶 ($TF_{叶/茎}$) 的转运均无显著差异 ($P > 0.05$)。单施黄腐酸和单施高量 Se 显著提高水稻 Se 的 $TF_{米/茎}$ ($P < 0.05$)。Se 与黄腐酸组配显著提高水稻 Se 的 $TF_{米/茎}$ (除了高量 Se 与高量黄腐酸组配外), 增加幅度为 86.6%~167.2% ($P < 0.05$)。低量 Se 与黄腐酸组配的 $TF_{茎/根}$ 相比于相应浓度单施 Se 显著降低, 而 $TF_{米/茎}$ 却显著增加。高量 Se 与黄腐酸组配的 $TF_{茎/根}$ 相比于单施高量 Se 提

大幅度达 24.3%~37.8%。表明黄腐酸可以在一定程度上影响水稻 Se 的转运。

表 5 硒与黄腐酸组配对水稻硒转运系数的影响

处理	$TF_{茎/根}$	$TF_{叶/茎}$	$TF_{米/茎}$
CK	0.72±0.25a	1.15±0.22ab	0.67±0.12ef
X1	0.52±0.19b	0.94±0.37ab	0.66±0.33f
X2	0.37±0.05bc	1.32±0.29ab	1.18±0.15cd
H1	0.23±0.03cd	1.38±0.27a	1.46±0.32bc
H2	0.12±0.01d	1.44±0.12a	2.26±0.17a
X1+H1	0.21±0.02cd	1.43±0.29a	1.79±0.21b
X1+H2	0.25±0.05cd	1.40±0.57a	1.50±0.32bc
X2+H1	0.46±0.10b	1.12±0.75ab	1.25±0.13cd
X2+H2	0.51±0.11b	0.74±0.08b	1.03±0.37de

3 讨论

李文蔚等^[19]通过盆栽试验研究发现,腐殖酸添加量为 10.0 g/m² 时,糙米中 Cd 含量比对照降低 40%。而 Zhang 等^[17]研究指出,腐殖酸对植物 Cd 吸收的影响受腐殖酸种类及土壤条件制约,在黄壤上施用腐殖酸和富里酸均能显著降低烟草镉吸收量,但在褐土上施用富里酸可使烟草镉含量提高 46.4%。本试验结果表明,单施黄腐酸对水稻吸收 Cd 的影响较弱,但能显著降低土壤 pH,土壤 CaCl₂ 提取态 Cd 含量却未发生显著变化,这可能是由于供试黄腐酸 pH 较低,提高了土壤镉活性;而同时黄腐酸分子量较小,含有丰富的羧基和酚羟基,能通过螯合作用固定土壤中的镉,在一定程度上又降低 Cd 的有效性;也可能是因为 CaCl₂ 主要提取土壤中水溶态以及部分交换态的重金属,这部分重金属在土壤中活性最强^[20]。赵庆圆等^[21]的研究表明,土壤施加腐殖酸可以促进 Cd 由活性较高的弱酸提取态向活性较低的残渣态转化。所以 CaCl₂ 提取能力的差异可能是导致本研究中施加黄腐酸土壤 CaCl₂ 提取态 Cd 含量未显著增加的原因。因此,施加黄腐酸对水稻吸收 Cd 的影响较弱。

有研究^[22]显示,在低 Cd 污染水平(0.5 mg/kg)下,0.25 mg/L 的 Se 可显著降低小白菜地上部对 Cd 的吸收;李虹颖等^[23]的研究结果表明,土壤全 Cd 为 2 mg/kg 条件下,随着施 Se 量的增加(≤1.2 mg/kg),水稻各器官 Cd 含量均显著降低,降低幅度最大达到 47.1%;郭峰等^[24]的研究结果显示,施 Se 可以有效抑制菠菜根部对 Cd 的吸收、富集和向地上部的转运,使菠菜地上部和根部 Cd 含量显著降低,分别降低 65.77%,75.92%(Cd 水平为 0.5 mg/kg)和 46.11%,70.01%(Cd 水平为 2 mg/kg)。这与本研究的结果基本一致,即单施 Se 显著降低水稻地上部各器官 Cd 含量,且显著降低水稻 Cd 的 $TF_{茎/根}$ 。相关分析表明,水稻糙米 Cd 含量与水稻各器官 Se 含量均呈极显著负相关关系,相关系数 r 为 -0.810~

-0.501($P<0.01$),而水稻根 Cd 含量与根部和糙米 Se 含量呈显著正相关关系,相关系数 r 分别为 0.398($P<0.05$)和 0.437($P<0.01$)。进一步说明外源 Se 的施加能够减少水稻籽实 Cd 含量,并且能够阻控水稻根 Cd 向籽实的转运。目前的研究^[25-26]认为,外源 Se 主要通过抑制植物根系对重金属的吸收或降低重金属从根系向地上部的迁移转运^[27-28]等方面影响植物对重金属的吸收积累。此外,还有研究^[25,28-30]认为,可能的机制是在植物体内的 Se 能与 Cd 结合生成一种低毒性、较稳定的复合物,且不易被植物吸收或者积累在植物根部,从而减少植物对 Cd 的吸收和转运。Schützendubel 等^[31]的研究发现,Se 和 Cd 都会与某些蛋白质中半胱氨酸(Cys-teine)的巯基部分结合,而 Se 又是谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)的组成部分,外源 Se 的供应可能会使水稻体内 GSH-Px 的底物之一 GSH 含量增加,促进 Cd 与巯基的结合,降低 Cd 的毒性,从而使水稻地下部 NPT 含量增加。而 NPT 是植物重金属解毒机制中的主要物质之一,可钝化细胞内的 Cd,将其转运至液泡内储存,从而达到解毒和降低转运的目的^[32]。Dutilleul 等^[33]在拟南芥中发现,一种硒结合蛋白(selenium binding protein, SBP)能够与 Cd 络合,减少向地上部转运;由此推断水稻中可能也有类似 SBP 的结构。目前关于 Se 对植物 Cd 吸收的影响机制至今仍未完全被阐明,需要进一步深入研究。

本研究中 Se 与黄腐酸组配显著增加水稻根 Cd 含量,但显著降低水稻糙米 Cd 含量和水稻 Cd 的 $TF_{茎/根}$ (除了低量 Se 与低量黄腐酸组配外)。这可能是因为 Se 和黄腐酸组配增加水稻根对 Cd 的吸收,将大部分的 Cd 固定在水稻根中,减少其向糙米中的转运。有研究^[34]表明,与富里酸结合的硒有效性高,易被植物所吸收,黄腐酸中的富里酸含有多种活性官能团,如羧基和酚羟基等,这些官能团能与 Se 络合,形成生物活性高的硒化合物,提高土壤硒的有效性^[12]。可见黄腐酸的添加可以活化土壤 Se,提高植物对 Se 的吸收,Se 的增多在一定程度上又能起到降低水稻 Cd 含量及减少 Cd 向水稻糙米的转运。因此,Se 与黄腐酸组配降低水稻糙米 Cd 的作用可能主要取决于 Se,而黄腐酸可能起到一个载体的作用,即通过增加土壤有效 Se 含量,进而增加植物对 Se 的吸收。

4 结论

(1)外源 Se 显著提高土壤 pH,降低土壤有效态 Cd (CaCl₂-Cd)含量。单施 Se 显著降低水稻地上部各器官 Cd 含量,并且阻控水稻 Cd 向地上部及籽实的转运。

(2)单施黄腐酸显著降低土壤 pH,但土壤有效态 Cd

(CaCl₂-Cd)含量无显著变化。单施黄腐酸对水稻吸收 Cd 的影响较弱,且对水稻各器官 Cd 分配无显著影响。

(3)Se 与黄腐酸组配处理的土壤 pH 低于相应浓度单施 Se 处理,而高于相应浓度黄腐酸处理,其土壤有效态 Cd(CaCl₂-Cd)含量与 CK 的差异取决于 Se 和黄腐酸的用量。Se 与黄腐酸组配显著降低水稻米 Cd 含量,且降低水稻 Cd 向地上部和籽实的转运。

(4)单施 Se 具有一定降低水稻吸收镉的效果,而 Se 与黄腐酸组配降镉效果更佳。

参考文献:

[1] Cao X, Wahbi A, Ma L, et al. Immobilization of Zn, Cu, and Pb in contaminated soil using phosphate rock and phosphoric acid[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 164(2/3): 555-564.

[2] 中华人民共和国环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. (2014-04-17)[2018-08-01]. <http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417-270670.htm>.

[3] Li J, Xu Y. Immobilization of Cd in a paddy soil using moisture management and amendment [J]. *Chemosphere*, 2015, 122: 131-136.

[4] 朱德峰, 张玉屏, 陈惠哲, 等. 中国水稻高产栽培技术创新与实践[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(17): 3404-3414.

[5] Chaney R L, Reeves P G, Ryan J A, et al. An improved understanding of soil Cd risk to humans and low cost methods to phytoextract Cd from contaminated soils to prevent soil Cd risk[J]. *Biomaterials*, 2004, 17(5): 549-553.

[6] 朱智伟, 陈学铭, 牟仁详, 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.

[7] 彭殿, 铁柏清, 叶长城, 等. 稻米镉关键积累时期研究[J]. *农业资源与环境学报*, 2017, 34(3): 272-279.

[8] 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.

[9] Gao M, Zhou J, Liu H, et al. Foliar spraying with silicon and selenium reduces cadmium uptake and mitigates cadmium toxicity in rice[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 631/632: 1100-1108.

[10] 卞威尔斯, 闫家普, 崔良, 等. 施硒对花生镉吸收与抗性及其化学形态的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(6): 1094-1101.

[11] 刘春梅, 罗盛国, 王孟雪, 等. 硒对镉胁迫下寒地水稻 Cd、Zn、Fe、Cu、Mn 含量的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(6): 136-142.

[12] 安梦鱼, 张青, 章赞德, 等. 不同用量腐植酸对土壤有效硒含量和硒的形态以及大蒜硒吸收的影响[J]. *农业资*

源与环境学报, 2017, 34(2): 128-133.

- [13] 韩玉国, 任树梅, 李云开, 等. 黄腐酸(FA)旱地龙在苹果节水生产中的应用效果研究[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(6): 93-97.
- [14] 张丽丽, 刘德兴, 史庆华, 等. 黄腐酸对番茄幼苗适应低磷胁迫的生理调控作用[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(8): 1547-1555.
- [15] Priya B N V, Mahavishnan K, Gurumurthy D S, et al. Fulvic acid (FA) for enhanced nutrient uptake and growth: Insights from biochemical and genomic studies [J]. *Journal of Crop Improvement*, 2014, 28: 740-757.
- [16] 郭世文, 李品芳, 芦凉, 等. 不同土壤水分条件下施用黄腐酸与保水剂对玉米生长耗水及水分利用效率的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2017, 22(1): 1-11.
- [17] Zhang Y, Yang X, Zhang S, et al. The influence of humic acids on the accumulation of lead (Pb) and cadmium (Cd) in tobacco leaves grown in different soils [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2013, 13: 43-53.
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [19] 李文蔚, 张沁怡, 罗亚成, 等. 腐殖酸和水旱轮作对镉污染土壤种植的稻糙米品质的影响[J]. *湖南农业科学*, 2014, 22(3): 31-33.
- [20] 章明奎, 方利平, 周翠. 污染土壤重金属的生物有效性和移动性评价: 四种方法比较[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(8): 1501-1504.
- [21] 赵庆圆, 李小明, 杨麒, 等. 磷酸盐、腐殖酸与粉煤灰联合钝化处理模拟铅镉污染土壤[J]. *环境科学*, 2018, 39(1): 389-398.
- [22] 刘达, 涂路遥, 赵小虎, 等. 镉污染土壤施硒对植物生长及根际镉化学行为的影响[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(3): 999-1005.
- [23] 李虹颖, 唐杉, 王允青, 等. 硒对水稻镉含量及其在亚细胞中的分布的影响[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(2): 320-326.
- [24] 郭峰, 樊文华, 冯两蕊, 等. 硒对镉胁迫下菠菜生理特性、元素含量及镉吸收转运的影响[J]. *环境科学学报*, 2014, 34(2): 524-531.
- [25] Feng R W, Wei C Y, Tu S X, et al. A dual role of Se on Cd toxicity: Evidences from the uptake of Cd and some essential elements and the growth responses in paddy rice [J]. *Biological Trace Element Research*, 2013, 151(1): 113-121.
- [26] 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 and Experimental Botany*, 2012, 77: 242-248.

- 合模式拦截氮磷的研究[J]. 生态环境学报, 2017, 26(9):1577-1583.
- [17] 张修稳, 李锋民, 卢伦, 等. 10 种人工湿地填料对磷的吸附特性比较[J]. 水处理技术, 2014, 40(3):49-52.
- [18] Bartucca M L, Mimmo T, Cesco S, et al. Nitrate removal from polluted water by using a vegetated floating system[J]. Science of the Total Environment, 2016, 542:803-808.
- [19] Guo Y, Liu Y, Zeng G, et al. A restoration-promoting integrated floating bed and its experimental performance in eutrophication remediation[J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, 26(5):1090-1098.
- [20] 胡绵好, 奥岩松, 杨肖娥, 等. 不同 N 水平的富营养化水体中经济植物净化能力比较研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(2):147-150.
- [21] Li F M, Lu L, Zheng X, et al. Three-stage horizontal sub-surface flow constructed wetlands for organics and nitrogen removal: Effect of aeration[J]. Ecological Engineering, 2014, 68(1):90-96.
- [22] 刘波, 王文林, 凌芬, 等. 曝气充氧条件下污染河道氨挥发特性模拟[J]. 生态学报, 2012, 32(23):7270-7279.
- [23] Lee S, Maniquiz-Redillas M C, Kim L H. Setting basin design in a constructed wetland using TSS removal efficiency and hydraulic retention time[J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, 26(9):1791-1796.
- [24] 张嵘梅, 马博馨, 杨志杰, 等. 沉水植物苦草属在水体环境修复中的研究进展和应用现状[J]. 中国农学通报, 2016, 32(28):144-154.
- [25] 孙鸿, 杨斌武, 韩加寿, 等. 沸石和活性炭处理氨氮废水的实验研究[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(61):289-291.
- [26] Fried A, McKeen S, Sewell S, et al. Photochemistry of formaldehyde during the 1993 tropospheric OH photochemistry experiment[J]. Journal of Eophysical Research, 1997, 102(5):6283-6296.
- [27] 周玥, 韩玉国, 张梦, 等. 4 种不同生活型湿地植物对富营养化水体的净化效果[J]. 应用生态学报, 2016, 27(10):3353-3360.
- [28] He S B, Gao J W, Chen X C, et al. Nitrogen removal in micro-polluted surface water by the combined process of bio-filter and ecological gravel bed[J]. Water Science and Technology, 2013, 67(10):2356-2362.
- [29] 黄永芳, 杨秋艳, 张太平, 等. 水培条件下两种植物根系分泌特征及其与污染物去除的关系[J]. 生态学杂志, 2014, 33(2):373-379.
- (上接第 355 页)
- [27] Wan Y N, Yu Y, Wang Q, et al. Cadmium uptake dynamics and translocation in rice seedling; Influence of different forms of selenium[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2016, 133:127-134.
- [28] Wu Z L, Yin X B, Banuelos G S, et al. Indications of selenium protection against cadmium and lead toxicity in oilseed rape (*Brassica napus* L.) [J]. Frontiers in Plant Science, 2016, 7:1-7.
- [29] Lin L, Zhou W H, Dai H X, et al. Selenium reduces cadmium uptake and mitigates cadmium toxicity in rice[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 235:343-351.
- [30] Saidi I. Selenium alleviates cadmium toxicity by preventing oxidative stress in sunflower (*Helianthus annuus*) seedlings[J]. Journal of Plant Physiology, 2014, 171(5):85-91.
- [31] Schützendubel A, Schwanz P, Teichmann T, et al. Cadmium-induced changes in antioxidative systems, hydrogen peroxide content, and differentiation in Scots pine roots[J]. Plant Physiology, 2001, 127(3):887-898.
- [32] 庞晓辰, 王辉, 吴泽赢, 等. 硒对水稻镉毒性的影响及其机制的研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(9):1679-1685.
- [33] Dutilleul C, Jourdain A, Bourguignon J, et al. The Arabidopsis putative selenium-binding protein family; Expression study and characterization of SBP1 as a potential new player in cadmium detoxification processes [J]. Plant physiology, 2008, 147(1):239-251.
- [34] 陈雪龙, 王晓龙, 齐艳萍. 大庆龙凤湿地土壤理化性质与硒元素分布关系研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(4):159-162.