

潘荣庆,蓝清琛,何卿姮,等. 不同地区叶面施用调理剂对水稻累积镉的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(3):205-211.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.03.030

不同地区叶面施用调理剂对水稻累积镉的影响

潘荣庆,蓝清琛,何卿姮,何 焯,蒋代华,黄智刚

(广西大学农学院/广西农业环境与农产品安全重点实验室,广西南宁 530004)

摘要:为探究有机硒、有机硅调理剂对不同地区水稻产量、镉含量和土壤 pH 值、镉含量的影响。研究选用含有机硒、有机硅 2 种叶面调理剂及桂香 12 和桂香 18 这 2 个水稻品种,分别在广西百色市德保县、广西百色市田东县、广西来宾市忻城县开展田间试验。结果表明,德保、田东、忻城 3 个地区水稻叶面施用调理剂后,水稻产量增加了 5.0% ~ 8.8%;叶面施用调理剂后,在德保、田东地区水稻稻米镉含量下降了 14.5% ~ 42.9%,富集系数下降了 3.3% ~ 44.8%,但在忻城地区对稻米镉含量无显著效果。德保地区水稻叶面施用含有机硒调理剂后,可以显著降低水稻叶对镉的富集能力,水稻叶镉含量下降了 32.0% ~ 38.7%,富集系数下降了 33.6% ~ 37.6%,3 个地区其他处理对水稻叶镉含量降低效果不明显。叶面施用调理剂后,非根际土壤镉含量下降了 0% ~ 7.2%,根际土壤镉含量下降了 1.5% ~ 10.3%,土壤镉含量虽有所下降,但降低效果不显著,叶面施用调理剂土壤 pH 值未显著升高。研究表明,在不同地区施用叶面调理剂均可以提高水稻产量,不同地区施用叶面调理剂对水稻降镉效果差异较大,叶面调理剂不能有效改变土壤 pH 值及降低土壤镉含量。

关键词:叶面调理剂;重金属;镉;水稻;田间试验

中图分类号:S511.06;X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)03-0205-07

我国南方地区以水稻为主食,因此水稻在南方地区种植面积非常广。水稻是易富集重金属镉(Cd)的植物之一,对土壤中的镉元素有很强的富集吸附能力^[1]。镉是一种具有很强的生物毒性的重金属元素,在土壤中易于流动,当土壤镉含量超过限定值时会造成土壤重金属污染,抑制水稻等作物生长^[2-3]。镉污染水稻田不仅会影响水稻的生长,还会降低水稻产量,土壤镉浓度过高时,会破坏水稻的新陈代谢过程,从而抑制水稻的生长,甚至会导致水稻死亡^[4]。目前针对南方水稻田土壤 Cd 活性高、迁移性强,易于在水稻中累积,造成水稻 Cd 含量过高的问题^[5],开展不同地区叶面施用调理剂对水稻镉累积的影响研究,对降低镉污染稻田水稻镉含量,保障粮食安全具有十分重要的意义。

目前针对重金属镉污染水稻田治理方法较多,常见的治理方法包括筛选和推广种植镉低积累品种、施用土壤钝化剂、施用叶面调理剂、水分调控

等,但大部分治理方法成本较高^[6]。施用叶面调理剂技术成本相对较低,因此施用叶面调理剂在水稻田镉污染治理中是较为常用的方法^[6-7]。文典等在研究中发现,通过叶面喷施调理剂和结合种植低积累水稻品种的农田污染修复治理技术,可以有效降低稻米 Cd 含量,Cd 含量相对降低了 40% ~ 70%^[7]。有学者研究发现,水稻植株叶面喷施硅肥是防控稻米 Cd 污染的有效措施,在重金属污染的水稻田,稻叶面施用硒肥也可降低 Cd 对水稻植株的毒害作用,水稻叶面喷施硅肥、硒肥均可以显著降低稻米中 Cd 含量^[8-10]。且龙思斯等研究表明,水稻施用叶面调理剂可以有效降低水稻重金属镉的含量,但不同水稻品种和叶面调理剂的种类对水稻积累 Cd 的影响有所不同^[11]。水稻叶面施用适量的硒(Se)肥可提高水稻的抗氧化和抵御恶劣环境的能力,促进水稻生长提高产量,起到增产的作用^[12]。李林峰等在研究中发现,适量施用硅肥可以增加水稻产量,这是由于水稻叶面施用适量的硅肥不仅可以增强水稻的抗逆性的能力,还可使水稻根系保持良好的环境,进而促进水稻对氮素的吸收^[13-14]。

由于大田生产条件下受外界环境影响更为严重,加上管理较为困难,目前关于大田条件下,有机

收稿日期:2022-04-07

基金项目:广西创新驱动发展专项(编号:桂科 AA17204078)。

作者简介:潘荣庆(1997—),男,广西百色人,硕士研究生,从事农业面源污染与生态治理研究。E-mail:2017392027@st.gxu.edu.cn。

通信作者:黄智刚,博士,副教授,主要从事农业面源污染与生态治理研究。E-mail:19950048@gxu.edu.cn。

硒、有机硅处理对多种水稻品种累积重金属的影响报道较少,且关于水稻对重金属镉的吸收特征以室内盆栽试验为主,但研究表明室内试验水稻对重金属元素的吸收、积累和野外环境条件下具有一定的差异性,同时大田试验也以单个地区为主,针对调理剂对不同地区水稻累积镉的影响研究较少^[15]。本研究在广西德保、田东、忻城受镉污染水稻田开展田间试验,探究不同地区叶面施用含有机硒、有机硅调理剂对不同水稻品种各个部位累积重金属镉的影响及对水稻产量和土壤 pH 值及土壤镉含量的影响,为治理土壤镉污染和保障粮食安全提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2020 年 7—12 月在广西壮族自治区德保县、田东县、忻城县 3 个地区进行。德保县位于广西西部(106°09′~106°59′E,23°01′~23°39′N),地处北回归线以南,海拔高度差异较大,在 50~1 600 m 之间,冬温夏热、降水丰沛。年平均气温 17.2~21.3℃,最高气温 37℃,最低气温 -2.6℃,年均降水量约 1 500 mm。田东县位于右江河谷中心(106°53′~107°26′E,23°16′~24°01′N),地处北回归线上,热量丰足、光照充沛,年均气温 20~22℃,日最高温 40℃,日最低温 3.8℃,年均降水量约 1 000 mm。忻城县位于红水河下游(108°24′~109°7′E,23°40′~24°23′N),大部分地区地处北回归线以北,雨季长、雨量充沛,光照充足,年平均气温 21~21.6℃,最低温度 0℃左右,最高温度 35.5~36.8℃,年降水量 1 400~2 000 mm。3 个地区均属亚热带季风气候区,但海拔、年降水量和年均气温各不相同。

1.2 试验材料

供试晚稻品种桂香 12 和桂香 18(桂香 12 在当地农资店购买,桂香 18 由广西农业科学院提供),含有机硒调理剂主要成分为有机硒(含量为 85 g/L),其余组分为水不溶物(≤10 g/L)、Na(≤10 g/L),购自某环保科技有限公司;含有机硅调理剂主要成分为有机硅(含量为 120 g/L),其余组分为 N、P₂O₅、K₂O(N+P₂O₅+K₂O 含量≥170 g/L),购自某生态科技有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 试验设计 试验在德保、田东、忻城 3 个地

区同时进行,每个地区均选用桂香 12 和桂香 18 2 个品种,每个品种设置 3 个处理分别为叶面施用含有机硒调理剂(A)、叶面施用含有机硅调理剂(B)和对照(CK)(具体处理编号如表 1 所示),每个处理面积约为 20 m²,处理重复 4 次。水稻于 2020 年 7 月在当地进行育秧,2020 年 8 月 1—4 日进行人工移植,每个处理间铺设地膜。2020 年 9 月 21—23 日,在水稻处于分蘖期时采用人工的方式对叶面喷施调理剂,3 个地区用药量均为每个区组 3.0 mL,稀释 100 倍后进行喷洒,大约 20 d 后进行第 2 次喷洒。试验田按照当地的施肥和用药习惯(由当地土肥站工作人员针对水稻出现的病虫害情况进行针对性施用农药)对试验田进行管护(雇佣当地村民对试验田进行日常管护)。

表 1 不同处理编号

地区	处理	编号	
		桂香 12	桂香 18
德保	有机硒	D1A	D2A
	有机硅	D1B	D2B
	CK	D1CK	D2CK
田东	有机硒	T1A	T2A
	有机硅	T1B	T2B
	CK	T1CK	T2CK
忻城	有机硒	X1A	X2A
	有机硅	X1B	X2B
	CK	X1CK	X2CK

1.3.2 样品采样方法 2020 年 11—12 月,采用 5 点取样法分批采集进入成熟期小区的水稻样品,在采集水稻样品的同时原位采集水稻根际土壤混合样品,同时采集 1 份非根际土壤混合样品,另外通过特定的工具在小区内划定 1.0 m² 面积,采集区域内稻谷,将稻谷自然晾干后测量水稻产量。水稻洗净后将茎、叶、稻穗分开,将茎、叶放入烘箱 105℃杀青 30 min 后,70℃下烘干至恒质量,稻穗自然晒干至恒质量后进行脱壳处理,所有植物样品粉碎后用自封袋保存。土壤样品自然风干,研磨过筛后装入自封袋备用。

1.3.3 样品测定 土壤 pH 值采用电位法(水土比为 2.5:1)测定,水稻茎、叶通过 X 荧光重金属分析仪(XRF)采用荧光光谱法测定重金属总镉含量,土壤和稻米交由广西西大检测有限公司测定总镉含量。

1.4 数据分析

本研究通过 IMB SPSS 19.0 软件进行数据分析

统计和显著差异性分析 (Duncan's 法)。采用 Microsoft Office Excel 2016 进行表格制作。

镉的富集系数按下列公式计算:

镉富集系数 (BCF) = 水稻 (茎、叶、稻米) 镉含量 (mg/kg) / 土壤镉含量 (mg/kg)

2 结果与分析

2.1 不同处理对水稻产量的影响

由表 2 看见,在 3 个地区施用含有机硒、有机硅叶面调理剂后,水稻产量均有明显增产,且产量均显著高于其 CK 处理。施用含有机硒、有机硅叶面调理剂后,在 3 个地区水稻增产率有所不同,但差异

不显著;施用含有机硒调理剂后,水稻的增产率要略高于相同情况下施用含有机硅调理剂,但两者差异均不显著。施用有机硒调理剂后,水稻增产率在 6.7% ~ 8.8% 之间,其中在德保地区种植的品种桂香 18 和忻城地区种植的桂香 12 增产率最高;施用有机硅调理剂后,水稻增产率在 5.0% ~ 8.4% 之间,其中在忻城地区种植的桂香 12 增产率最高;桂香 12 和桂香 18 在施用含有机硒、有机硅叶面调理剂后增产效果差异不大。综上所述,施用含有机硒、有机硅叶面调理剂后可以有效提高水稻产量,且在不同地区和不同品种间效果差异不明显。

表 2 不同处理对水稻产量的影响

处理	水稻产量 (kg/hm)	比 CK 增 (%)	处理	水稻产量 (kg/hm)	比 CK 增 (%)
D1A	7 429.5 ± 245.9a	8.6	D2A	7 314.0 ± 130.1a	8.8
D1B	7 344.0 ± 57.9a	7.3	D2B	7 248.0 ± 169.9a	7.8
D1CK	6 843.4 ± 133.5b	—	D2CK	6 721.5 ± 71.3b	—
T1A	6 336.4 ± 91.7a	6.7	T2A	6 304.5 ± 28.0a	8.2
T1B	6 229.9 ± 61.3a	5.0	T2B	6 184.5 ± 79.7a	6.1
T1CK	5 935.9 ± 102.8b	—	T2CK	5 829.0 ± 106.3b	—
X1A	6 522.4 ± 120.7a	8.8	X2A	5 682.0 ± 176.9a	7.6
X1B	6 499.5 ± 227.2a	8.4	X2B	5 605.9 ± 132.3a	6.1
X1CK	5 993.3 ± 382.3b	—	X2CK	5 283.0 ± 104.6b	—

注:同列不同字母表示同一地区同一品种不同处理差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

2.2 不同处理对水稻镉含量的影响

由表 3 看见,不同地区施用叶面调理剂后水稻稻米镉含量存在明显差异。在田东、德保地区,施用含有机硒、有机硅叶面调理剂后,桂香 2 和桂香 18 稻米镉含量均有所降低,除桂香 12 施用有机硅处理 (T1B) 外,2 个地区其他处理相较于其 CK 处理稻米镉含量下降均超过 30%,且显著低于其 CK 处理。在忻城地区施用叶面调理剂后,除桂香 18 施用有机硒处理 (X2A) 稻米镉含量相较其 CK 处理下降 14.0% 外,其他处理稻米镉含量均未下降。在施用有机硒叶面调理剂后,除田东地区种植的桂香 18 (T2A) 叶镉含量相较于其 CK 处理未下降之外,3 个地区水稻叶镉含量相较于其 CK 处理均有下降,其中对德保地区种植的桂香 12 作用效果最明显,水稻叶镉含量相较于其 CK 处理下降了 38.7%,德保地区种植的桂香 18 水稻叶镉含量下降也超过了 30%,且显著低于其 CK 处理。与有机硒的作用效

果不同,在施用有机硅叶面调理剂后,仅有田东县种植的桂香 12 与德保地区种植的桂香 18 叶镉含量相较于其 CK 处理分别下降了 9.4%、0.8%,其他处理水稻叶镉含量均未降低。不同地区施用含有机硒、有机硅叶面调理剂后,有 4 个处理水稻茎镉含量低于其 CK 处理,且施用有机硅叶面调理剂后,3 个地区种植的品种桂香 18 茎镉含量均低于其 CK 处理,但相较于其 CK 处理差异均不显著。综上说明,叶面调理剂在不同地区作用效果差异明显,在田东、德保 2 个地区 2 种调理剂均能有效降低桂香 12 和桂香 18 稻米镉含量,但在忻城地区,仅有施用有机硒调理剂对桂香 18 作用效果较为明显。与水稻稻米作用效果不同,3 个地区仅德保地区水稻叶面施用有机硒调理剂后,水稻叶镉含量降低效果明显,施用有机硅后,部分处理水稻叶镉含量低于 CK 处理,但效果不明显。3 个地区施用调理剂后水稻茎镉含量均没有明显降低。

表 3 不同处理对水稻重金属镉含量的影响

处理	茎		叶		稻米	
	镉含量(mg/kg)	比 CK 增(%)	镉含量(mg/kg)	比 CK 增(%)	镉含量(mg/kg)	比 CK 增(%)
D1A	0.248 ± 0.085a	-9.8	0.095 ± 0.010b	-38.7	0.090 ± 0.014b	-33.3
D1B	0.298 ± 0.069a	8.4	0.167 ± 0.015a	7.7	0.083 ± 0.015b	-38.5
D1CK	0.275 ± 0.042a	—	0.155 ± 0.020a	—	0.135 ± 0.017a	—
T1A	0.373 ± 0.017a	27.3	0.243 ± 0.064a	-8.3	0.103 ± 0.025b	-34.8
T1B	0.310 ± 0.070a	5.8	0.240 ± 0.021a	-9.4	0.135 ± 0.023ab	-14.5
T1CK	0.293 ± 0.048a	—	0.265 ± 0.095a	—	0.158 ± 0.029a	—
X1A	0.188 ± 0.129a	1.6	0.180 ± 0.033a	-5.3	0.138 ± 0.025a	16.9
X1B	0.208 ± 0.057a	12.4	0.205 ± 0.038a	7.9	0.118 ± 0.035a	0
X1CK	0.185 ± 0.054a	—	0.190 ± 0.020a	—	0.118 ± 0.033a	—
D2A	0.310 ± 0.018a	5.1	0.163 ± 0.032b	-32.0	0.108 ± 0.009b	-33.7
D2B	0.290 ± 0.034a	-1.7	0.238 ± 0.017a	-0.8	0.093 ± 0.009b	-42.9
D2CK	0.295 ± 0.062a	—	0.240 ± 0.033a	—	0.163 ± 0.032a	—
T2A	0.368 ± 0.018a	-1.3	0.263 ± 0.025a	4.0	0.143 ± 0.020b	-39.9
T2B	0.348 ± 0.038a	-6.7	0.305 ± 0.031a	20.6	0.163 ± 0.073b	-31.5
T2CK	0.373 ± 0.025a	—	0.253 ± 0.022a	—	0.238 ± 0.047a	—
X2A	0.285 ± 0.031a	11.8	0.205 ± 0.023a	-8.1	0.110 ± 0.033a	-14.0
X2B	0.228 ± 0.054a	-10.5	0.258 ± 0.032a	15.7	0.145 ± 0.054a	13.3
X2CK	0.255 ± 0.098a	—	0.223 ± 0.045a	—	0.128 ± 0.066a	—

2.3 不同处理对水稻富集镉的影响

镉富集系数(BCF)是指水稻茎、叶、稻米各部位镉含量与土壤中镉含量的比值,能够反映水稻各部位富集镉的情况,水稻镉的富集系数越大说明富集镉的能力越强。由表 4 看见,在 CK 处理中,田东地区茎、叶、稻米镉的富集系数均高于其他 2 个地区相同品种,德保地区水稻对镉的富集系数最低;在桂香 12 和桂香 18 2 个品种中,稻米对镉的富集系数均低于茎、叶对镉的富集系数,其中茎对镉的富集系数最高;在相同地区 CK 处理中,桂香 12 茎、叶、稻米镉的富集系数均低于桂香 18。综上说明,不同地区水稻对镉的富集能力不同,不同品种间富集能力也存在明显差异,在地上部位水稻镉主要富集在茎部。在田东、德保地区,水稻施用含有机硒、有机硅叶面调理剂后,均能有效降低水稻稻米对镉的富集能力,除田东地区种植的桂香 12 品种处理(T1B)外,其他处理稻米镉的富集系数较其 CK 处理下降超过 30%。在德保地区施用有机硒叶面调理剂后,桂香 12 和桂香 18 水稻叶镉的富集系数分别为 0.043 ± 0.005、0.077 ± 0.017,相较于其 CK,处理 D1CK(0.069 ± 0.011)、D2CK(0.116 ± 0.022)富集系数分别下降了 33.7% 和 33.6%,显著低于其 CK 处理。3 个地区种植的 2 个品种水稻施用含有机

硒、有机硅叶面调理剂后茎镉的富集系数未显著低于其 CK 处理,且 T1A 处理水稻茎镉的富集系数为 0.241 ± 0.010,相较于 CK 处理(0.184 ± 0.065)上升超过 30%,但两者差异不显著。综上说明,在田东、德保 2 个地区水稻叶面施用含有机硒、有机硅叶面调理剂后,可以抑制稻米对镉的富集能力,且在德保地区水稻叶面施用有机硒调理剂也会抑制水稻叶对镉的富集能力。3 个地区叶面施用调理剂后,对水稻茎镉的富集能力不起抑制作用。

2.4 不同处理对土壤 pH 值及重金属镉含量的影响

不同处理对土壤镉含量及 pH 值的影响如表 5 所示,在施用含有机硒、有机硅叶面调理剂后,在田东和忻城地区土壤 pH 值较其 CK 处理略有升高,但差异均不显著。在施用调理剂后,除德保地区施用有机硒(D - A)处理外,其他处理土壤非根际土壤镉含量较其 CK 处理均有所降低,下降比率最高为 7.2%,但较其 CK 处理镉含量差异均不显著。与上述结果相似,根际土壤在施用调理剂后,较其 CK 处理镉含量均有所降低,其中下降比率最高为 10.3%,但与非根际土壤相同其镉含量相较于 CK 处理差异均不显著。综上所述,在施用含有机硒、有机硅 2 种叶面调理剂后,均不能改变土壤 pH 值,

表 4 不同处理对水稻重金属镉富集系数的影响

处理	茎		叶		稻米	
	镉富集系数	比 CK 增(%)	镉富集系数	比 CK 增(%)	镉富集系数	比 CK 增(%)
D1A	0.111 ± 0.035a	-9.8	0.043 ± 0.005b	-37.6	0.041 ± 0.006b	-31.6
D1B	0.138 ± 0.038a	12.2	0.077 ± 0.008a	11.6	0.038 ± 0.006b	-36.6
D1CK	0.123 ± 0.022a	—	0.069 ± 0.011a	—	0.060 ± 0.006a	—
T1A	0.241 ± 0.010a	31.0	0.157 ± 0.045a	1.3	0.066 ± 0.014b	-29.7
T1B	0.229 ± 0.063a	24.5	0.176 ± 0.020a	13.5	0.091 ± 0.009a	-3.3
T1CK	0.184 ± 0.065a	—	0.155 ± 0.048a	—	0.094 ± 0.009a	—
X1A	0.127 ± 0.086a	13.4	0.122 ± 0.028a	5.2	0.094 ± 0.026a	25.3
X1B	0.144 ± 0.035a	28.6	0.145 ± 0.034a	25.0	0.083 ± 0.025a	10.7
X1CK	0.112 ± 0.033a	—	0.116 ± 0.019a	—	0.075 ± 0.029a	—
D2A	0.147 ± 0.011a	4.5	0.077 ± 0.017b	-33.6	0.051 ± 0.006b	-34.6
D2B	0.135 ± 0.012a	-4.5	0.111 ± 0.015a	-4.3	0.043 ± 0.006b	-44.8
D2CK	0.141 ± 0.027a	—	0.116 ± 0.022a	—	0.078 ± 0.006a	—
T2A	0.276 ± 0.024a	0	0.198 ± 0.036a	5.9	0.106 ± 0.014b	-39.4
T2B	0.233 ± 0.057a	-15.5	0.202 ± 0.034a	8.0	0.103 ± 0.009b	-41.1
T2CK	0.276 ± 0.066a	—	0.187 ± 0.046a	—	0.175 ± 0.009a	—
X2A	0.184 ± 0.041a	16.5	0.131 ± 0.023a	-7.1	0.071 ± 0.026a	-9.0
X2B	0.142 ± 0.042a	-10.1	0.159 ± 0.027a	12.8	0.090 ± 0.025a	15.4
X2CK	0.158 ± 0.054a	—	0.141 ± 0.039a	—	0.078 ± 0.029a	—

表 5 不同处理对土壤 pH 值及重金属镉含量的影响

处理	非根际土壤		根际土壤		土壤 pH 值	
	镉含量(mg/kg)	比 CK 增(%)	镉含量(mg/kg)	比 CK 增(%)	镉含量(mg/kg)	比 CK 增(%)
D-A	2.17 ± 0.076a	0	2.132 ± 0.056a	-1.5	8.05 ± 0.07a	0.5
D-B	2.16 ± 0.124a	-0.5	2.115 ± 0.131a	-2.3	8.05 ± 0.13a	0.5
D-CK	2.17 ± 0.131a	—	2.165 ± 0.146a	—	8.01 ± 0.13a	—
T-A	1.44 ± 0.155a	-7.1	1.374 ± 0.131a	-4.8	6.22 ± 0.10a	-0.2
T-B	1.46 ± 0.202a	-5.8	1.307 ± 0.236a	-9.5	6.22 ± 0.12a	-0.2
T-CK	1.55 ± 0.378a	—	1.444 ± 0.399a	—	6.23 ± 0.07a	—
X-A	1.55 ± 0.226a	-6.6	1.470 ± 0.229a	-4.5	6.25 ± 0.08a	0.6
X-B	1.54 ± 0.250a	-7.2	1.379 ± 0.230a	-10.3	6.24 ± 0.12a	0.5
X-CK	1.66 ± 0.343a	—	1.539 ± 0.365a	—	6.21 ± 0.11a	—

且根际和非根际土壤镉含量虽有降低,但效果不显著。

3 讨论与结论

硅、硒是对水稻生长有益的金属元素,能提高水稻的抗逆性,促进水稻生长与新陈代谢顺利进行,提高水稻抵御各种逆境胁迫的能力,提高水稻产量^[16-17]。与传统的土壤施肥方式相比,叶面施肥是作物吸收营养的方式之一,水稻叶面喷施硅和硒是增加水稻硅、硒营养来源的有效方式^[12,14,18]。水稻叶面适量施用硅、硒元素能提高水稻植株的抗氧

化能力,从而提高水稻抵御恶劣环境的能力促进水稻植株生长,增加水稻产量^[19]。研究发现,施用叶面调理剂可以提高水稻产量,在德保、田东、忻城 3 个地区水稻叶面施用含有机硒、有机硅叶面调理剂后,均可以增加水稻产量。施用有机硒调理剂,水稻增产率在 6.7% ~ 8.8% 之间,其中在德保地区种植的品种桂香 18 和忻城地区种植的桂香 12 增产率最高;施用有机硅调理剂,水稻增产率在 5.0% ~ 8.4% 之间,其中在忻城地区种植的桂香 12 增产率最高。

由于不同地区土壤环境以及季候环境不同对

水稻生长及重金属的富集有不同影响,土壤 pH 值的大小显著影响水稻对土壤镉的吸收和富集^[20]。研究发现,德保、田东、忻城 3 个地区中,德保地区水稻各部位对镉的富集能力明显低于其他地区,可能是由于德保试验区所在区域土壤 pH 值高于田东、德保地区。有研究表明,土壤中植物可吸收态 Cd 含量与 pH 值相关,酸性条件下土壤 Cd 易被植物吸收,pH 值升高会导致大量的镉离子生成稳定的镉络合物和硫化物结合态镉,降低植物可吸收态镉的含量,使得镉不易被植物吸收^[21]。Wang 等研究也发现水稻茎、叶、糙米富集镉的能力与 pH 值呈极显著负相关^[22]。低的 pH 值条件下,有利于铁锰氧化物的还原溶解,溶解出来的亚铁离子、锰离子可以与 Cd^{2+} 在土壤颗粒表面产生吸附竞争,从而增加土壤 Cd^{2+} 的浓度;高的 pH 值条件下, Cd^{2+} 易生成氢氧化镉沉淀,同时降低了 H^+ 与 Cd^{2+} 之间的竞争吸附,降低水稻对镉的累积^[23]。

研究表明,水稻叶面喷施调理剂能显著降低水稻对镉的吸收^[17]。在镉污染土壤上的水稻施用硒、硅在修复重金属镉污染农田方面取得了较好的效果^[18,24]。水稻叶面喷施硅、硒溶液可以有效阻止镉在水稻体内的迁移,显著降低水稻糙米对镉的积累^[25]。有研究表明,硅在水稻的生长周期发挥重要的作用,水稻吸收硅后可以抑制镉向水稻稻米迁移^[26-28],从而缓解重金属镉对水稻的毒害作用,降低镉向食物链和人体输出的风险^[29]。与上述研究结果相同,研究发现在田东、德保地区,叶面施用含有机硒、有机硅叶面调理剂后,均可以有效降低桂香 12 和桂香 18 稻米镉含量,抑制稻米富集镉的能力,且在德保地区叶面施用含有机硒调理剂后,桂香 12 和桂香 18 水稻叶镉含量均显著低于其 CK 处理,较 CK 处理含量减少超过 30%。但与上述结果不同的是,在忻城地区叶面施用调理剂后桂香 12 和桂香 18 稻米镉含量均未显著降低,可能是由于不同地区气候、温度等环境因素和施用天气不同所导致,也可能是不同地区应施用的调理剂适宜浓度不同所导致,有待试验进一步研究。

不同的水稻品种形态结构和生理特性之间存在一定差异,因此不同水稻品种对镉富集能力具有明显的差异,导致水稻对重金属元素的吸收和分配存在很大差异^[30]。研究表明,利用不同水稻品种对 Cd 的积累特性差异,可以筛选出适于中低 Cd 污染稻田的低累积型水稻品种^[31]。研究发现,桂香 12

茎、叶、稻米镉的富集系数低于桂香 18。在德保、田东、忻城地区,品种间对镉的富集能力的差异存在一定的稳定性。在 3 个地区相同处理中,桂香 12 茎、叶、稻米镉的富集系数均低于桂香 18。桂香 12 和桂香 18 水稻茎镉的富集系数均高于叶和稻米,稻米镉的富集系数最低,镉在水稻地上部位中的富集规律为茎 > 叶 > 稻米。陈慧茹等在研究中也发现了这一规律,镉在水稻茎、叶、籽粒各部位的累积量不相同^[32],不同部位镉含量遵循茎 \geq 叶 > 籽粒的规律^[33]。

张宇鹏等研究发现,水稻施用叶面肥调理剂后土壤 pH 值与对照处理差异不显著,土壤中镉含量与对照处理土壤中镉含量差异不显著,根系对镉的活化与吸收并未减少^[34]。上述研究成果与本研究成果一致,在喷施含有机硒、有机硅调理剂后,土壤根际土壤 pH 值未发生显著变化,施用调理剂后对根际土壤镉含量和非根际土壤镉未产生显著影响,但除德保地区施用有机硒处理(D - A)外,其他处理根际土壤镉含量和非根际土壤镉含量较其 CK 处理都有所降低,但差异不显著。

有机硒、有机硅可以增加水稻产量,水稻叶面喷施含有机硒、有机硅调理剂均可以起到很好地增产效益。不同地区施用叶面调理剂对水稻的降镉效果不同,在田东、德保地区水稻叶面施用调理剂后,可以很好地降低稻米镉含量,减少稻米对镉的富集能力,但在忻城地区对水稻镉含量无显著影响。相同地区施用不同种类叶面调理剂对水稻叶镉含量作用效果不同,在德保地区水稻叶面施用有机硒调理剂后,可以很好地抑制水稻叶镉含量,但施用有机硅后水稻叶镉含量未发生显著变化。不同水稻品种对镉的富集能力有所不同,桂香 12 水稻茎、叶、稻米对镉的富集能力均低于桂香 18;水稻不同部位富集镉的能力也不同,镉在水稻地上部位中的富集规律为茎 > 叶 > 籽粒。施用叶面调理剂后,土壤根际土壤 pH 值未发生显著变化,对根际土壤镉含量和非根际土壤镉未产生显著影响,根际土壤镉含量和非根际土壤镉含量虽有所降低,但效果不显著。

参考文献:

- [1]程菁靓,赵 龙,杨 彦,等. 我国长江中下游水稻产区铅污染分区划分方法研究[J]. 农业环境科学学报,2019,38(1):70-78.
- [2]李 超,艾绍英,唐明灯,等. 矿物调理剂对稻田土壤镉形态和水稻镉吸收的影响[J]. 中国农业科学,2018,51(11):2143-

- 2154.
- [3] Dwivedi S, Tripathi R D, Tripathi P, et al. Arsenate exposure affects amino acids, mineral nutrient status and antioxidants in rice (*Oryza sativa* L.) genotypes [J]. Environ Sci Technol, 2010, 44 (24): 9542–9549.
- [4] Clemens S, Aarts M G M, Thomine S, et al. Plant science: the key to preventing slow cadmium poisoning [J]. Trends in Plant Science, 2013, 18(2): 92–99.
- [5] 李心, 林大松, 刘岩, 等. 不同土壤调理剂对镉污染水稻田控镉效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(7): 1511–1520.
- [6] Wu H P, Lai C, Zeng G M, et al. The interactions of composting and biochar and their implications for soil amendment and pollution remediation: a review [J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2017, 37(6): 754–764.
- [7] 文典, 江棋, 李蕾, 等. 重金属污染高风险农用地水稻安全种植技术研究[J]. 生态环境学报, 2020, 29(3): 624–628.
- [8] 陈喆, 铁柏清, 雷鸣, 等. 施硅方式对稻米镉阻隔潜力研究[J]. 环境科学, 2014, 35(7): 2762–2770.
- [9] 王世华, 罗群胜, 刘传平, 等. 叶面施硅对水稻籽实重金属积累的抑制效应[J]. 生态环境, 2007, 16(3): 875–878.
- [10] 刘波, 黄道友, 周建利, 等. 硒与黄腐酸组配对水稻镉吸收的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(2): 350–355, 362.
- [11] 龙思斯, 杨益新, 宋正国, 等. 3 种类型阻控剂对不同品种水稻富集镉的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(5): 459–465.
- [12] 胡莹, 黄益宗, 黄艳超, 等. 硒对水稻吸收积累和转运锰、铁、磷和硒的影响[J]. 环境科学, 2013, 31(10): 4119–4125.
- [13] 李林峰, 王艳红, 李义纯, 等. 调理剂耦合水分管理对双季稻镉和铅累积的阻控效应[J]. 环境科学, 2022, 43(1): 472–480.
- [14] 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.
- [15] 王宇豪, 杨力, 康愉晨, 等. 镉污染大田条件下不同品种水稻镉积累的特征及影响因素[J]. 环境科学, 2021, 42(11): 5545–5553.
- [16] Yu H Y, Ding X D, Li F B, et al. The availabilities of arsenic and cadmium in rice paddy fields from a mining area: the role of soil extractable and plant silicon [J]. Environmental Pollution, 2016, 215: 258–265.
- [17] 戴青云, 刘代欢, 王德新, 等. 硅对水稻生长的影响及其缓解镉毒害机理研究进展[J]. 中国农学通报, 2020, 36(5): 86–92.
- [18] Oliver D P, Wilhelm N S, Tiller K G, et al. Effect of soil and foliar applications of zinc on cadmium concentration in wheat grain [J]. Australian Journal of Experimental Agriculture, 1997, 37(6): 677–681.
- [19] 杨莉, 郑家奎, 蒋开锋, 等. 微量元素硒对水稻影响的研究进展[J]. 现代农业科技, 2010(8): 11–12.
- [20] 陈怀满, 郑春荣, 王慎强, 等. 不同来源重金属污染的土壤对水稻的影响[J]. 农村生态环境, 2001, 17(2): 35–40.
- [21] 陈守莉, 孙波, 王平祖, 等. 污染水稻土中重金属的形态分布及其影响因素[J]. 土壤, 2007, 39(3): 375–380.
- [22] Wang M E, Chen W P, Peng C. Risk assessment of Cd polluted paddy soils in the industrial and township areas in Hunan, Southern China [J]. Chemosphere, 2016, 144: 346–351.
- [23] 李慧敏, 方圆, 唐翠荣, 等. 广西水稻土镉有效性、水稻镉富集系数与土壤性质的关系研究[J]. 西南农业学报, 2018, 31(12): 2678–2684.
- [24] 张志元, 张翼, 郭清泉, 等. 含硒植物营养剂对桃和梨吸收铅、镉、汞的拮抗作用[J]. 作物研究, 2011, 25(4): 368–369.
- [25] 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, 235/236(2): 343–351.
- [26] 高敏, 周俊, 刘海龙, 等. 叶面喷施硅硒联合水分管理对水稻镉吸收转运特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(2): 215–222.
- [27] 徐向华, 刘传平, 唐新莲, 等. 叶面喷施硒硅复合溶胶抑制水稻砷积累效应研究[J]. 生态环境学报, 2014, 23(6): 1064–1069.
- [28] 余侃, 肖秋水, 黄思思, 等. 生物有机硒对不同水稻品种主要性状、重金属含量及硒吸收的影响[J]. 南方农业学报, 2021, 52(5): 1206–1214.
- [29] 王世华. 叶面喷施纳米硅增强水稻抗重金属毒害机理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2007.
- [30] 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取风险[J]. 环境科学, 2003, 24(3): 112–115.
- [31] 林小兵, 周利军, 王惠明, 等. 不同水稻品种对重金属的积累特性[J]. 环境科学, 2018, 39(11): 5198–5206.
- [32] 陈慧茹, 董亚玲, 王琦, 等. 重金属污染土壤中 Cd、Cr、Pb 元素向水稻的迁移累积研究[J]. 中国农学通报, 2015, 31(12): 236–241.
- [33] 崔晓荧, 秦俊豪, 黎华寿. 不同水分管理模式对水稻生长及重金属迁移特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(11): 2177–2184.
- [34] 张宇鹏, 谭笑潇, 陈晓远, 等. 无机硅叶面肥及土壤调理剂对水稻铅、镉吸收的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29(2): 388–393.