

刘星星,倪才英,刘鑫,等. 稻虾共生系统低镉积累水稻品种选择 [J]. 江西师范大学学报(自然科学版) 2023 47(1):91-98.
LIU Xingxing, NI Caiying, LIU Xin et al. The selection of rice varieties with low cadmium accumulation in rice-crayfish symbiotic system [J]. Journal of Jiangxi Normal University(Natural Science) 2023 47(1):91-98.

文章编号:1000-5862(2023)01-0091-08

稻虾共生系统低镉积累水稻品种选择

刘星星¹,倪才英^{1*},刘鑫¹,肖罗长¹,童金炳²,翁小林²,刘方平³,徐涛³

(1. 江西师范大学地理与环境学院 江西 南昌 330022; 2. 江西省国营恒湖综合垦殖场 江西 南昌 330123;

3. 江西省灌溉试验中心站江西省高效节水与面源污染防治重点实验室 江西 南昌 330201)

摘要:该文选择江西省湖滨地区稻虾轮作田块,对 11 种适合稻虾共生的水稻品种进行了筛选。研究结果表明:11 种水稻品种稻米 Cd 含量均未超过国家粮食安全食用标准,其中,野香优莉丝稻米的 Cd 含量最低。按照稻米对重金属 Cd 的累积能力差异将不同水稻品种分成 3 类:Ⅰ类水稻(稻米对 Cd 累积相对较低的水稻品种)有野香优莉丝、华晶;Ⅱ类水稻(稻米对 Cd 累积相对中等的水稻品种)有丰山丝苗、美香占、黄华占、靓占、野香优明月丝苗、鄂丰丝苗、两优 336、野香优巴丝;Ⅲ类水稻(稻米对 Cd 累积相对较高的水稻品种)有农香 42。在试验中,在水稻成熟期,野香优莉丝、丰山丝苗、靓占 3 种品种出现倒伏。综合考虑产量、水稻 Cd 积累和抗倒伏能力,推荐野香优明月丝苗、两优 336、美香占、黄华占、鄂丰丝苗为南方地区稻虾共生适宜栽种的水稻品种;野香优莉丝、丰山丝苗和靓占 3 种水稻品种因其产量高、Cd 低积累,可考虑在南方丘陵地区风较小的稻虾田中种植。

关键词:水稻品种;Cd;累积特征;筛选

中图分类号:X 171.5 **文献标志码:**A **DOI:**10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2023.01.12

0 引言

基于“十三五”中国稻渔综合种养产业发展报告,江西省稻渔综合种养产业发展迅速,水稻和水产品的产量大幅增长,创造了巨大的经济收益,具有良好的发展前景^[1]。稻虾是江西省主要的种养模式,生产面积从 2016 年的 2.04 万 hm^2 提高到 2020 年的 8.78 万 hm^2 ,龙虾产量从 2016 年的 3.2 万 t 提高到 2020 年的 8.2 万 t^[2]。经调查,在 2020 年江西省稻渔种养中稻虾占比为 70.77%,平均增收 5.30 万元 $\cdot \text{hm}^{-2}$ ^[3]。在调查的综合种养田块类型中低洼地、冷浸田所占比例为 15.27%,因其具有蓄水、保水的特点,满足综合种养稻田对水质、水量的要求,是发展稻渔综合种养的重要田块类型,从而使低洼地和冷浸田得到了有效的开发利用^[3-5]。但是随着稻虾种养面积的扩大,许多农户在生产过程中存在着“重虾轻稻”“盲目跟风”“重经济轻生态”等思想

和行为,过度加宽小龙虾养殖沟、投入大量饵料,追求小龙虾带来的经济效益,忽视水稻生产,从而导致水稻产量下降,影响粮食安全。且过多的饵料投入会造成农田环境的污染,制约着稻虾种养的持续健康发展^[6-7]。

水稻是中国主要的粮食作物之一,水稻质量的好坏关系到粮食安全。关于稻米 Cd 污染事件在中国、日本、美国和欧洲等地均有报道,Cd 在人体内累积到一定程度可损伤人体器官,甚至导致癌症或死亡,Cd 超标稻米已经成为影响食品安全的主要问题之一。文献[8]分析结果表明:2014 年中国土壤总点位超标率为 16.1%,耕地土壤点位超标率为 19.4%,耕地土壤主要污染物为重金属,其中 Cd 点位超标率最高为 7.0%。文献[9]研究结果表明:中国农田土壤 Cd 污染面积约为 1.33 万 hm^2 ,涵盖中国大约 1/2 的省(市)共 25 个地区。江西省土壤重金属污染程度高于全国平均水平,在江西省 11 个设区市中,有 9 个受到重金属污染,涉及 41 个自然村,

收稿日期:2022-08-14

基金项目:国家自然科学基金(42167006),江西省现代农业产业技术体系建设专项(JXARS-42-质量安全与环境控制)和江西省水利厅科技课题(202223YBKT37)资助项目。

通信作者:倪才英(1968—),女,江西鹰潭人,教授,博士,主要从事土壤重金属污染修复研究。E-mail:ncy1919@126.com

人口约为2.2万人^[10]。余进祥等^[11]在江西省水稻优势产区采集的1000个样本中发现农田土壤主要污染物为Cd、Cu、As、Hg,其中Cd的超标率最大,为4.7%。程钊等^[12]对鄱阳湖及其周边经济区7个地级市表层土壤Cd含量进行监测发现,土壤Cd含量显著高于江西省土壤背景值。田威等^[13]对江西省稻渔综合种养区的29个土壤样品和14个稻谷样品进行检测分析发现,土壤Cd含量变化范围为0.12~0.77 mg·kg⁻¹,土壤平均Cd含量高于江西省背景值3.3倍,稻谷Cd含量变化范围为0.10~1.70 mg·kg⁻¹,稻谷平均Cd含量超过标准限值(0.2 mg·kg⁻¹)。部分种养区土壤和稻谷存在Cd污染的风险。此外,一些经济较为发达的地区由于大力发展工业使得其土壤Cd污染形势变得愈加严峻^[14]。目前,对Cd污染土壤的改良方法较多,如物理修复技术的客土法、换土法等;化学修复技术的固定化/稳定化技术等;生物修复技术的植物修复、微生物修复等。虽然这些方法都有一定的修复效果,但存在成本高、二次污染、工程量大、修复不彻底、修复周期长以及效果缓慢等局限性^[15-17]。而且,稻虾种养作为一种绿色生态种养模式,对土壤改良剂的要求较高,既不能添加具有污染风险的土壤改良剂(如污泥等),又要避免大规模翻动土壤。所以,考虑到修复效果、生产成本、经济效益、环境保护等方面,在稻虾共生重金属Cd污染区种植Cd低积累水稻品种,是实现水稻安全生产最具有发展前景和重要价值的技术方法^[18]。因此,本文分析了在稻虾轮作模式下11种水稻品种在Cd轻度污染土壤下稻米对Cd的吸收累积情况,阐明水稻对Cd吸收、转运和分配的差异性,及其与稻米Cd累积之间的相关性,以期筛选出适宜在南方地区稻虾田推广种植的Cd低积累水稻品种,为江西省Cd轻度污染稻田发展稻虾共作提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验于2021年6—10月进行,试验区位于江西省南昌市新建区恒湖垦殖场稻虾种养基地,地理坐标为116°04′~116°10′E,28°50′~29°03′,地处南昌市北郊赣江下游、鄱阳湖畔,属于鄱阳湖冲积平原,土地肥沃,水生动植物资源丰富,气候温和,雨量充沛,年平均气温为17.3℃,年降水量为1609.8 mm,年无霜期为279 d。研究区土壤基本理化性质如下:pH值4.35,有机质7.57 g·kg⁻¹,有效磷16.47 mg·kg⁻¹,速效钾47.59 mg·kg⁻¹,碱解氮154.9 mg·kg⁻¹,Cd

0.43 mg·kg⁻¹。

1.2 试验处理

供试水稻品种为丰山丝苗、农香42、华晶、鄂丰丝苗、美香占、靓占、黄华占、野香优莉丝、野香优明月丝苗、野香优巴丝、两优336。杂交水稻品种有野香优莉丝、野香优明月丝苗、野香优巴丝、两优336,下文统称为A类;常规水稻品种有丰山丝苗、农香42、华晶、鄂丰丝苗、美香占、靓占、黄华占等,下文统称为B类。水稻种子由恒湖农垦局提供,复合肥料(N-P₂O₅-K₂O,15-15-15,总养分≥45%)购买自河南农心肥业有限公司。

本试验共设计11个处理,每个处理种植1种水稻品种,共11种水稻品种,每个处理小区面积为58 m²。每个处理水稻品种的浸种、催芽、播种及田间水肥管理保持一致。在水稻催芽后采用直播的方式于7月18日均匀播撒到试验田中。杂交水稻品种播种量为37.5 kg·hm⁻²,常规水稻品种播种量为75.0 kg·hm⁻²。只在播撒前撒施1次复合肥为底肥,用量为225 kg·hm⁻²。其他田间管理措施(如防治病虫害、灌溉等)与试验地区稻虾共作模式相同。在水稻成熟期采集水稻植株和土壤样品进行分析测试,并进行水稻测产。

1.3 样品的采集与分析

用5点取样法采集耕作层0~20 cm混合土壤以及土壤点位对应的水稻植株。土壤样品经自然风干后研磨(在风干过程中适时翻动土壤样品并去除石块和植物残体等杂质),过100目尼龙筛后装袋保存。水稻植株用超纯水洗净晾干,放入烘箱于105℃杀青30 min,60℃烘干至恒质量,将水稻各部位分离;稻谷使用精米机脱壳成稻米,水稻各部位分别用聚乙烯自封袋保存备用。土壤和水稻植株Cd含量采用微波消解-电感耦合等离子体质谱法测定。

每个小区采集1 m×1 m水稻样方,重复3次,用水稻脱粒机分离水稻植株和稻谷,在稻谷烘干后称其质量并计算产量。

1.4 数据计算及处理

水稻根系富集系数(B_{CF})和水稻植株各部位间Cd转运系数(T_F)计算公式^[19]为

富集系数(B_{CF}) = 水稻根系重金属含量/土壤重金属含量,

转运系数(T_F) = 水稻茎/叶/稻米重金属含量/(水稻根/茎重金属含量)。

参照土壤单因子污染指数法^[20],采用单因子累积指数(P_i)评价水稻对重金属Cd的累积能力,其

计算公式^[21]为 $P_i = C_i/S_i$, 其中 P_i 为单因子累积指数, C_i 为稻米 Cd 含量测定值, S_i 为在稻米中 Cd 的限量值. 按照 GB 2762—2017《食品安全国家标准 食品中污染物限量》^[22], 在稻米中 Cd 限量值为 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

单因子累积指数等级划分参照 NY/T 398—2000《农、畜、水产品污染监测技术规范》^[23] 制定的农、畜、水产品中质量分级标准, 划分为 3 个质量等级评价(见表 1).

表 1 农、畜、水产品质量分级标准^[24]

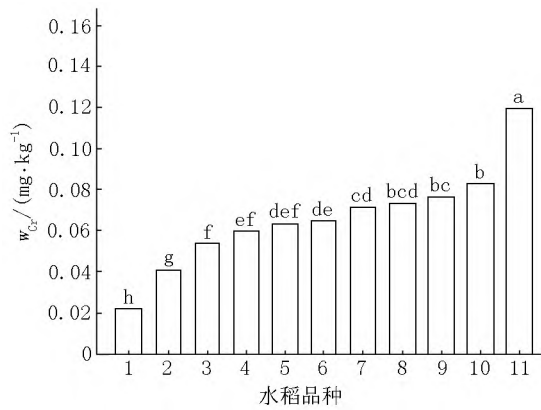
产品等级划分	单因子累积指数	污染水平	质量安全
I 级	$P_i \leq 0.6$	有污染物残留产品, 污染物含量接近背景值或略高于背景值	安全
II 级	$0.6 < P_i < 1.0$	污染物残留较多的产品	轻度污染
III 级	$P_i \geq 1.0$	污染物含量超过国家食品卫生标准, 产品受到污染质量下降, 产品的食用、出口等受到影响	重度污染

试验数据采用 Microsoft Excel 2016 进行统计分析, 使用 SPSS 26.0 进行单因素 ANOVA 检验和聚类分析, 采用 Origin 2021 绘图和相关性分析.

2 结果与分析

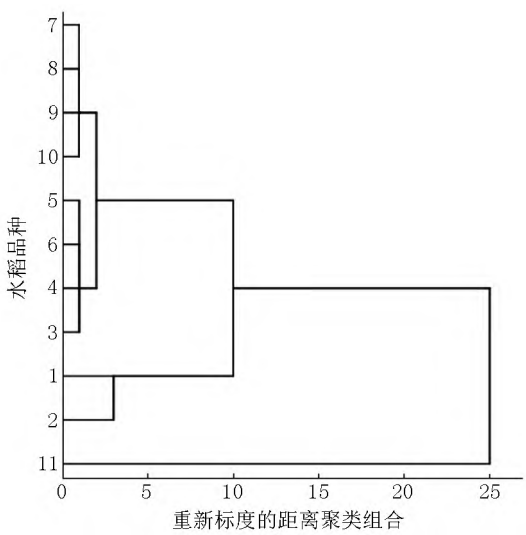
2.1 不同品种水稻稻米 Cd 积累特征分析

2.1.1 不同品种水稻稻米 Cd 含量 由图 1 可知: 试验的不同品种水稻稻米 Cd 含量为 $0.023 \sim 0.121 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 不同品种水稻稻米 Cd 含量间具有在统计学意义上差异显著水平; 供试所有水稻品种稻米 Cd 含量均未超过国家标准限量值. 稻米 Cd 含量最低的品种是野香优莉丝, 其次是华晶, 分别为 $0.023 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.042 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 2 者 Cd 含量显著低于其他水稻品种; 稻米 Cd 含量最高的品种是农香 42, 其次是野香优巴丝, 分别为 $0.121 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.083 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 显著高于其他水稻品种. 其中, 野香优巴丝和野香优莉丝属于 A 类水稻; 农香 42 和华晶为 B 类水稻. 经统计对比发现: 在供试的 11 种水稻品种中, B 类水稻稻米平均 Cd 含量大于 A 类水稻稻米平均 Cd 含量.



注: 1 为野香优莉丝 2 为华晶 3 为丰山丝苗 4 为美香占 5 为黄华占 6 为靓占 7 为野香优明月丝苗 8 为鄂丰丝苗 9 为两优 360 10 为野香优巴丝 11 为农香 42.
图 1 不同品种水稻稻米 Cd 含量

2.1.2 不同品种水稻稻米 Cd 含量聚类分析 根据系统聚类分析方法, 按照稻米 Cd 含量的大小, 将不同品种水稻对 Cd 积累能力的高低分成 3 类, 第 I 类为水稻品种对 Cd 积累相对较低, 第 II 类为水稻品种对 Cd 积累相对中等, 第 III 类为水稻品种对 Cd 积累相对较高^[25]. 根据图 2, 系统聚类将 11 种水稻按照稻米 Cd 含量的大小分成了 3 类, I 类水稻品种有野香优莉丝、华晶; II 类水稻品种有丰山丝苗、美香占、黄华占、靓占、野香优明月丝苗、鄂丰丝苗、两优 336、野香优巴丝; III 类水稻品种有农香 42. 根据系统聚类分析结果可知试验用的 11 种水稻对 Cd 积累的能力差异显著. 因此, 在轻度 Cd 污染农田选择种植的水稻品种时, 应当首选聚类分析为第 I 和第 II 类的水稻品种^[26]. 本试验种植的 11 种水稻稻米 Cd 含量均未超过国家标准限量值, 但因各地土壤基础、水肥管理条件不同, 所以建议轻度污染区稻虾种植户尽量选择低积累品种.



注: 1 为野香优莉丝 2 为华晶 3 为丰山丝苗 4 为美香占 5 为黄华占 6 为靓占 7 为野香优明月丝苗 8 为鄂丰丝苗 9 为两优 360 10 为野香优巴丝 11 为农香 42.
图 2 不同品种水稻稻米 Cd 含量聚类分析

2.1.3 不同品种水稻 Cd 的累积特征 经单因子累积指数(P_i)评价,不同品种水稻对 Cd 的累积能力结果如表 2 所示。

由表 1 和表 2 可知:野香优莉丝、华晶、丰山丝苗、美香占、黄华占、靓占、野香优明月丝苗、鄂丰丝苗、两优 336、野香优巴丝的单因子累积指数均小于 0.6,属于 I 级产品,质量评价为安全;农香 42 的单因子累积指数为 0.604 > 0.6,属于 II 级产品,质量评价为轻度污染。

表 2 不同品种水稻 Cd 的单因子累积指数

品种	C_i	S_i	P_i
野香优莉丝	0.023	0.20	0.114
华晶	0.042	0.20	0.209
丰山丝苗	0.054	0.20	0.271
美香占	0.061	0.20	0.305
黄华占	0.064	0.20	0.320
靓占	0.066	0.20	0.331
野香优明月丝苗	0.072	0.20	0.360
鄂丰丝苗	0.074	0.20	0.369
两优 336	0.077	0.20	0.386
野香优巴丝	0.083	0.20	0.417
农香 42	0.121	0.20	0.604

2.2 不同品种水稻的产量

低累积水稻品种的筛选除了要关注稻米重金属的含量外还必须兼顾水稻产量^[26]。据以往的调查研究,该试验基地原稻虾田块水稻平均产量为 6 750.00 kg · hm⁻²^[27-28]。在本研究中,11 种供试水稻品种产量见表 3。由表 3 可见:不同品种水稻的产量存在着一定差异,产量变幅为 5 152.65 ~ 10 430.25 kg · hm⁻²,均值为 8 222.25 kg · hm⁻²;其中野香优莉丝、丰山丝苗、美香占、黄华占、靓占、鄂丰丝苗产量较高。经统计分析,B 类水稻的平均产量大于 A 类水稻的平均产量,这可能是因为 B 类水稻的播种量大于 A 类水稻;其中产量最高的是丰山丝苗(10 430.25 kg · hm⁻²),产量最低的是华晶(5 152.65 kg · hm⁻²)。在 A 类水稻中,野香优莉丝的产量高于 11 种水稻的平均产量(8 222.25 kg · hm⁻²),而野香优明月丝苗、两优 336 高于试验基地原稻虾田块水稻平均产量(6 750.00 kg · hm⁻²)。在 B 类水稻中,丰山丝苗、美香占、黄华占、靓占、鄂丰丝苗的产量均高于 11 种水稻的平均产量(8 222.25 kg · hm⁻²),农香 42 高于试验基地原稻虾田块水稻平均产量(6 750.00 kg · hm⁻²)。在试验过程中发现野香优莉丝、丰山丝苗、靓占出现了倒伏现象。水稻植株倒伏后不仅会降低

作物的产量和质量,还会给水稻收割造成一定的难度,造成收割成本增加^[29-30]。综合产量、倒伏情况以及水稻对 Cd 的积累等因素,A 类水稻品种推荐野香优明月丝苗、两优 336,B 类水稻品种推荐美香占、黄华占、鄂丰丝苗在南方平原风较大地区稻虾田种植,这既可以确保水稻的安全产生,又可以提高水稻产量。此外,综合地形因素、水稻产量、稻米 Cd 含量,可考虑在南方丘陵地区风较小的稻虾田中种植野香优莉丝、丰山丝苗、靓占等水稻品种。

表 3 不同品种水稻的产量

类型	品种	样方产量/ kg ⁻¹	产量/ (kg · hm ⁻²)
A 类 水稻	野香优巴丝	0.66	6 578.25f
	野香优明月丝苗	0.70	7 003.50ef
	两优 336	0.80	8 008.50de
	野香优莉丝	0.85	8 454.30cd
B 类 水稻	华晶	0.52	5 152.65g
	农香 42	0.72	7 228.65ef
	黄华占	0.90	9 029.55bcd
	鄂丰丝苗	0.93	9 304.65abc
	美香占	0.93	9 329.70abc
	靓占	0.99	9 930.00ab
	丰山丝苗	1.04	10 430.25a

2.3 不同品种水稻各部位 Cd 含量及其吸收转运特征

为了解不同品种水稻根、茎、叶对 Cd 的积累和转运情况,对水稻各部位 Cd 含量进行了分析,结果如表 4 所示。从表 4 可以看出:在水稻植株中的 Cd 主要集中在根系,有少量向地上部分迁移。由表 4 和图 1 可知:Cd 在水稻不同部位的含量为根 > 茎 > 叶 > 稻米。富集系数可以用来表征在水稻体内 Cd 元素富集的难易程度,富集系数越大表明富集能力越强^[31]。由图 3 可见:不同品种水稻 Cd 的富集系数为 2.772 ~ 7.898,其中富集系数最小的是野香优莉丝,富集系数最大的是两优 336。本次试验的所有水稻品种的富集系数均大于 1,这表明 11 种水稻品种的根系对 Cd 的吸收富集能力均较强。

转运系数可表示 Cd 在水稻不同部位间的迁移能力。由表 5 可知:根系-茎的转运系数为 0.135 ~ 0.644,茎-叶片的转运系数为 0.111 ~ 0.694,茎-稻米的转运系数为 0.087 ~ 0.279。这表明水稻根、茎、叶之间 Cd 的转运能力强于茎中 Cd 向稻米的转运能力。由于稻米距离水稻根系较远,各种物质向上的运输距离长,所以稻米中 Cd 含量最低,转运系数也最小,而茎-叶片的转运系数较大可能是在蒸腾作用下,离子态和螯合态的 Cd 随其他植物所需的金属

离子和水分经维管束向叶片中运输,最终在叶片中固定所致^[19]。不同品种水稻各部位转运系数大小顺序为野香优莉丝、华晶、美香占、野香优明月丝苗、两

优 336 的茎-叶片 > 根系-茎 > 茎-稻米; 鄂丰丝苗、靓占、农香 42、黄华占、野香优巴丝 的根系-茎 > 茎-叶片 > 茎-稻米。

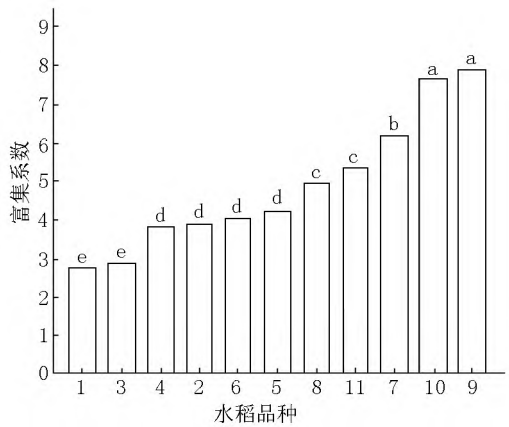
表 4 水稻成熟期植株各部位 Cd 含量 mg · kg⁻¹

品种	根	茎	叶
野香优莉丝	0.938 ± 0.026g	0.234 ± 0.027f	0.078 ± 0.005e
野香优明月丝苗	2.102 ± 0.096b	0.405 ± 0.037e	0.175 ± 0.017a
野香优巴丝	2.601 ± 0.048a	0.960 ± 0.029b	0.175 ± 0.017a
两优 336	2.673 ± 0.044a	0.360 ± 0.066e	0.111 ± 0.007d
丰山丝苗	0.984 ± 0.000g	0.204 ± 0.050f	0.137 ± 0.011bc
美香占	1.311 ± 0.036f	0.347 ± 0.062e	0.137 ± 0.013bc
华晶	1.328 ± 0.031ef	0.345 ± 0.002e	0.138 ± 0.005bc
靓占	1.377 ± 0.067ef	0.483 ± 0.029 b	0.080 ± 0.004e
黄华占	1.448 ± 0.099e	0.566 ± 0.011c	0.147 ± 0.007b
鄂丰丝苗	1.686 ± 0.098d	0.590 ± 0.028c	0.123 ± 0.003cd
农香 42	1.809 ± 0.115c	1.163 ± 0.062a	0.129 ± 0.006c

注: 同列处理不同小写字母表示样品间差异显著($P < 0.05$)。下同。

表 5 不同品种水稻转运系数

品种	根系-茎	茎-叶	茎-稻米
野香优莉丝	0.250 ± 0.027cd	0.334 ± 0.028cd	0.098 ± 0.009e
丰山丝苗	0.207 ± 0.051de	0.694 ± 0.143a	0.279 ± 0.084a
美香占	0.284 ± 0.040c	0.372 ± 0.059bc	0.167 ± 0.033bcd
华晶	0.260 ± 0.004cd	0.400 ± 0.015bc	0.121 ± 0.000cde
靓占	0.352 ± 0.035b	0.167 ± 0.017ef	0.137 ± 0.008cde
黄华占	0.392 ± 0.026b	0.260 ± 0.016de	0.113 ± 0.012de
鄂丰丝苗	0.351 ± 0.030b	0.209 ± 0.008e	0.125 ± 0.009cde
农香 42	0.644 ± 0.049a	0.111 ± 0.008f	0.104 ± 0.010e
野香优明月丝苗	0.193 ± 0.013e	0.433 ± 0.029b	0.178 ± 0.018bc
野香优巴丝	0.369 ± 0.012b	0.182 ± 0.017ef	0.087 ± 0.006e
两优 336	0.135 ± 0.024f	0.312 ± 0.043cd	0.220 ± 0.044b



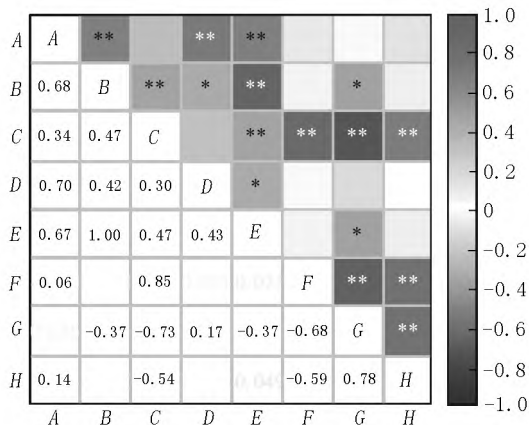
注: 1 为野香优莉丝 2 为丰山丝苗 3 为美香占 4 为华晶 5 为靓占 6 为黄华占 7 为鄂丰丝苗 8 为农香 42 9 为野香优明月丝苗 ,11 为两优 336。

图 3 不同品种水稻富集系数

2.4 水稻各部位 Cd 含量与富集转运系数的关系

不同基因型水稻品种对重金属的吸收转运差异势必影响水稻植株体内重金属的分布. 将供试水稻各部位根、茎、叶、稻米 Cd 含量与相应的富集、转运系数进行相关性分析(见图 4) 发现 稻米 Cd 含量与根系、叶片 Cd 含量及富集系数呈极显著正相关关系($P < 0.01$) 相关性系数分别为 0.68、0.70、0.67; 显著性最高的指标为叶片 Cd 含量, 这表明水稻叶片 Cd 含量显著影响稻米 Cd 含量的富集. 由图 4 可知: 根系 Cd 含量与茎 Cd 含量呈极显著正相关关系($P < 0.01$) 相关性系数为 0.47; 与叶片 Cd 含量呈显著正相关关系($P < 0.05$) 相关性系数为 0.42; 与茎-叶片转运系数呈显著负相关关系. 茎 Cd 含量与富集系数、根系-茎转运系数呈极显著正相关关系($P < 0.01$), 与茎-叶片转运系数、茎-稻米转运系数

呈极显著负相关关系. 叶片 Cd 含量与富集系数呈显著正相关关系 ($P < 0.05$). 这说明根对 Cd 的吸收富集与水稻植株各部位 Cd 的含量有直接相关性, 显著影响 Cd 向地上部茎、叶片、稻米的分配.



注: * 表示在 0.05 水平上显著相关; ** 表示在 0.01 水平上极显著相关. A 为稻米 Cd 含量; B 为根系 Cd 含量; C 为茎 Cd 含量; D 为叶片 Cd 含量; E 为富集系数; F 为根系-茎转运系数; G 为茎-叶片转运系数; H 为茎-稻米转运系数.

图 4 水稻各部位 Cd 含量与富集转运系数的相关性

3 讨论

在土壤中重金属元素的有效性和迁移受到多种因素的影响, 如土壤理化性状、土壤微生物、根际氧化膜、根际分泌物、耕作制度、重金属间的相互协同与拮抗作用等, 并且这些因素也会影响水稻对重金属元素的吸收和稻米对重金属元素的累积. 按照 GB 15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》^[32], 本文试验地土壤 Cd 含量 ($0.43 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 高于农用地土壤污染风险筛选值 ($0.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 存在一定 Cd 污染的风险, 但试验的 11 种水稻稻米 Cd 含量均未超过国家粮食安全标准中规定的稻米 Cd 限定标准值 ($0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 这与文献 [33-34] 在农田土壤有 Cd 污染风险的情况下生产的稻米仍不超标的研究结果一致, 说明供试的 11 种水稻品种适合在低污染稻田中进行稻虾共作系统栽种. 在试验中 B 类水稻品种稻米平均 Cd 含量大于 A 类水稻品种稻米 Cd 含量, 这与文献 [35] 的研究结果一致, 即杂交类水稻品种积累 Cd 比常规水稻少.

张成等^[36]通过不同水稻品种对土壤 Cd 吸收情况的研究发现, 水稻品种影响糙米对土壤 Cd 的吸收, 水稻品种间对 Cd 的积累和耐性具有显著的差异. 水稻除了品种间有差异外还存在品种类型间的差异, 在林小兵等^[25]的研究中发现, 三系杂交水稻 Cd 含量高于两系杂交水稻. 曾翔等^[37]的研究结果

也表明糙米对 Cd 的累积能力表现为三系杂交稻 > 两系杂交稻. 殷敬峰等^[38]的研究发现不同水稻品种糙米 Cd 含量存在明显差异, 两系杂交水稻对糙米 Cd 的累积能力低于三系杂交水稻. 在本文试验中, 野香优莉丝虽然是三系杂交水稻, 但在该品种稻米中的 Cd 含量却是所有供试品种最低的, 这与前述学者研究结论不同, 但与冯爱煌等^[26]在重金属累积水稻品种筛选试验的研究结果一致. 不同学者结论不同, 可能与不同学者所试土壤条件与水肥管理措施不同有关. 周歆^[39]研究发现不同的外界环境因素会对试验结果产生极大的影响. 所以不同地区筛选的低积累水稻品种适合推广范围应该因地制宜.

除了水稻品种会影响水稻产量外^[40-41], Cd 含量也会影响水稻产量. 王刚等^[42]研究发现在 Cd 胁迫处理下不同水稻品种产量间也存在显著差异. 因此, 筛选适宜在土壤 Cd 污染区种植的水稻品种时, 需同时关注水稻对 Cd 的累积情况和水稻产量.

水稻籽粒 Cd 含量的高低取决于水稻根系从土壤中吸收 Cd 的能力和 Cd 从根系向地上部运输的效率^[43]. 本试验水稻各部位 Cd 含量分布符合根 > 茎 > 叶 > 稻米的规律^[44-46]. 由 11 种水稻的富集系数和转运系数可知根系对 Cd 富集能力强, 从而抑制了 Cd 向籽粒转运.

Zhang Jingyi 等^[47]对水稻植株 Cd 含量进行相关性分析发现, 水稻叶片 Cd 含量与糙米 Cd 含量呈显著正相关关系, 这表明叶片 Cd 含量是糙米 Cd 的主要来源. 薛涛等^[48]通过相关性研究发现, 糙米 Cd 含量与颖壳、茎、叶、根 Cd 含量呈显著正相关关系 ($P < 0.05$), 相关性系数分别为 0.946、0.705、0.940、0.702. 本试验的相关性分析表明: 叶片 Cd 含量对稻米(精米) Cd 含量的影响最大, 其次是根系吸收的 Cd 含量. 这些研究表明水稻根、茎、叶是截留 Cd 的重要器官, 水稻在吸收累积 Cd 时会优先分配到根、茎或叶片中去, 从而减少 Cd 在水稻籽粒中的累积. 因此, 对于 Cd 低积累水稻品种的选育不仅要注重水稻植株的吸收量, 更要注意 Cd 在籽粒与根、茎、叶之间的分配比例问题^[49].

4 结论

1) 在供试的 11 种水稻品种中, 稻米 Cd 累积能力有明显差异, 据此可将这 11 种水稻品种划分为 I、II、III 等 3 类; 在轻度土壤 Cd 污染区进行品种选择时, 推荐选择第 I、II 类, 这更有利于保障稻米粮食安全.

2) 单因素累积指数 (P_i) 评价表明供试的 11 种

水稻品种除农香 42 外,其他水稻品种的 $P_i < 0.6$, 产品质量安全,无污染风险。

3) 综合考虑地形、产量、倒伏、水稻对 Cd 的积累以及富集转运系数等情况,野香优明月丝苗、两优 336、美香占、黄华占、鄂丰丝苗这 5 种水稻品种,因其抗倒伏、Cd 低积累特性,适合在南方平原地区风较大的稻虾田栽种;而野香优莉丝、丰山丝苗、靓占 3 种水稻品种因其产量高、低积累特性,可考虑在南方丘陵地区风较小的稻虾田种植。

5 参考文献

- [1] 全国水产技术推广总站,中国水产学会.“十三五”中国稻渔综合种养产业发展报告[J].中国水产,2022(1): 43-52.
- [2] 黄敏.江西省稻渔综合种养产业发展与技术协同推广研究[D].南昌:江西农业大学,2021.
- [3] 孟草,田威,文春根等.江西省稻渔综合种养产业发展特征及对策[J].中国稻米,2022,28(1):28-31,37.
- [4] 孙学标.稻虾共作种养生态农业模式及技术应用分析[J].农业与技术,2019,39(7):70-71.
- [5] 陈文辉,彭亮,刘莹莹等.江汉平原稻虾综合种养模式经济效益和生态效益分析[J].湖北农业科学,2019,58(14):160-166.
- [6] 唐建鹏,陈京都,温凯等.稻虾共作模式下不同优良食味粳稻物质生产及产量特征研究[J].作物杂志,2022(4):115-123.
- [7] 倪明理,邓凯,张文宇等.稻虾种养对水稻产量和粮食安全影响[J].中国生态农业学报(中英文),2022,30(8):1293-1300.
- [8] 陈能场,郑煜基,何晓峰等.《全国土壤污染状况调查公报》探析[J].农业环境科学学报,2017,36(9):1689-1692.
- [9] 张恒,张健,王焕等.农田土壤镉污染现状和修复技术探析[J].现代农业科技,2022(1):174-177.
- [10] 吕贵芬,杨涛,陈院华等.江西省土壤重金属污染治理研究进展[J].能源研究与管理,2016(2):16-18,57.
- [11] 余进祥,刘娅菲,尧娟.江西省水稻优势产区重金属污染及累积规律[J].江西农业学报,2008,20(12):57-60,65.
- [12] 程钊,江俊杰,李丹等.鄱阳湖及周边经济区土壤镉的含量与分布[J].地球与环境,2015,43(4):464-468.
- [13] 田威,李娜,倪才英等.江西省稻渔系统中土壤和稻谷重金属污染特征及健康风险评价[J].生态毒理学报,2021,16(3):331-339.
- [14] 蔡旭影.农田土壤重金属 As、Cd 污染的钝化剂修复效果及风险评价[D].北京:北京交通大学,2021.
- [15] 彭少邦,蔡乐,李泗清.土壤镉污染修复方法及生物修复研究进展[J].环境与发展,2014,26(3):86-90.
- [16] 富昊伟,张红梅,黄海明等.低镉吸收水稻在嘉兴大田的种植表现[J].浙江农业科学,2019,60(7):1094-1096.
- [17] 简敏菲,何旭芬,彭雨露等.生物炭对镉污染土壤中紫花地丁的生长及生理生态的影响[J].江西师范大学学报(自然科学版),2022,46(1):99-106.
- [18] 李静,姚晶晶,张惠贤等.湖北省五个鲜莲藕样品中重金属污染调查[J].湖北农业科学,2020,59(S1):194-195,245.
- [19] 刘巍.生物有机肥对红壤性水稻土的性质、Cd 形态与水稻植株迁移的影响[D].南京:南京农业大学,2020.
- [20] 王彩霞,郭蓉,程国霞等.陕西省谷物中重金属污染状况及健康风险评估[J].卫生研究,2016,45(1):35-38,44.
- [21] 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.
- [22] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会,国家食品药品监督管理总局.GB 2762—2017 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [23] 中华人民共和国农业部.NY/T 398—2000 农、畜、水产品污染监测技术规范[S].北京:中国标准出版社,2000.
- [24] 吴艾琳,罗书全,赵怡楠等.基于污染指数法对重庆市市售食品中重金属污染调查及评价[J].中国食品卫生杂志,2021,33(2):175-180.
- [25] 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.
- [26] 冯爱煊,贺红周,李娜等.基于多目标元素的重金属低累积水稻品种筛选及其吸收转运特征[J].农业资源与环境学报,2020,37(6):988-1000.
- [27] 封高茂,童金炳,雷恩思等.江西省国营恒湖综合垦殖场稻虾产业发展现状与对策[J].江西水产科技,2020(5):3-5,7.
- [28] 邱德荣,孟草,黄滨等.江西省稻渔综合种养产业的关键问题及发展对策研究[J].中国水产,2020(8):50-54.
- [29] 张志忠.水稻倒伏原因及预防对策[J].新农业,2021(21):11-12.
- [30] 史学岩.浅谈水稻倒伏的原因危害及综合防控[J].现代农业,2021(3):51-52.
- [31] 林华,张学洪,梁延鹏等.复合污染下 Cu、Cr、Ni 和 Cd 在水稻植株中的富集特征[J].生态环境学报,2014,23(12):1991-1995.
- [32] 中华人民共和国生态环境部国家市场监督管理总局.GB 15618—2018 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].北京:中国环境科学出版社,2018.
- [33] 代子雯,方成,孙斌等.地质高背景农田土壤下不同水稻品种对 Cd 的累积特征及影响因素[J].环境科学,2021,42(4):2016-2023.
- [34] 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.
- [35] 杜瑞英, 文典, 赵迪, 等. Cd、Pb 和 As 在不同品种水稻籽粒中的富集特征研究 [J]. 生物技术进展, 2016, 6(2): 85-90.
- [36] 张成, 李浩, 任树友, 等. 不同水稻品种籽粒对土壤镉吸收差异性的初步研究 [J]. 四川农业科技, 2016(8): 36-38.
- [37] 曾翔, 张玉烛, 王凯荣, 等. 不同品种水稻糙米含镉量差异 [J]. 生态与农村环境学报, 2006 22(1): 67-69 83.
- [38] 殷敬峰, 李华兴, 卢维盛, 等. 不同品种水稻糙米对 Cd、Cu、Zn 积累特性的研究 [J]. 农业环境科学学报, 2010 29(5): 844-850.
- [39] 周歆. 重金属低累积水稻品种筛选及稻田化学改良技术研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2013.
- [40] 刘琦, 胡剑锋, 周伟, 等. 四川盆地不同类型水稻品种机插栽培的干物质生产及产量特性分析 [J]. 中国水稻科学, 2019 33(1): 35-46.
- [41] 王清峰, 杨重法, 程子硕, 等. 不同水稻品种的干物质生产及产量形成特性的比较研究 [J]. 热带作物学报, 2014 35(9): 1699-1703.
- [42] 王刚, 孙梦飞, 钟雪梅, 等. 镉胁迫下不同水稻品种镉的累积与产量差异比较 [J]. 中国农学通报, 2017, 33(17): 76-81.
- [43] 刘侯俊, 梁吉哲, 韩晓日, 等. 东北地区不同水稻品种对 Cd 的累积特性研究 [J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(2): 220-227.
- [44] SHI Xinhui, ZHANG Chaochun, WANG He et al. Effect of Si on the distribution of Cd in rice seedlings [J]. Plant & Soil, 2005 272(1/2): 53-60.
- [45] 张悦妍, 郭兴强, 莫桂兰, 等. 重金属镉在土壤-水稻中迁移转化特征 [J]. 贵州农业科学, 2021 49(9): 143-149.
- [46] 杨寒雯, 刘秀明, 刘方, 等. 喀斯特高镉地质背景区水稻镉的富集、转运特征与机理 [J]. 地球与环境, 2021, 49(1): 18-24.
- [47] ZHANG Jingyi, ZHOU hang, GU Jiaofeng et al. Effects of nano-Fe₃O₄-modified biochar on iron plaque formation and Cd accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Environmental Pollution, 2020 260: 113970.
- [48] 薛涛, 廖晓勇, 王凌青, 等. 镉污染农田不同水稻品种镉积累差异研究 [J]. 农业环境科学学报, 2019 38(8): 1818-1826.
- [49] 周鸿凯, 何觉民, 陈小丽, 等. 大田生产条件下不同品种水稻植株中镉的分布特点 [J]. 农业环境科学学报, 2010 29(2): 229-234.

The Selection of Rice Varieties with Low Cadmium Accumulation in Rice-Crayfish Symbiotic System

LIU Xingxing¹, NI Caiying^{1*}, LIU Xin¹, XIAO Luochang¹, TONG Jinbing², WONG Xiaoling², LIU Fangping³, XU Tao³
(1. School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang Jiangxi 330022, China; 2. Jiangxi State Owned Henghu Comprehensive Reclamation Farm, Nanchang Jiangxi 330123, China; 3. Jiangxi Key Laboratory of Agricultural Efficient Water-saving and Non-point Source Pollution Preventing, Jiangxi Central Station of Irrigation Experiment, Nanchang Jiangxi 330201, China)

Abstract: Eleven rice varieties suitable for rice-crayfish symbiosis system are screened in rice-crayfish rotation fields in lakeside area of Jiangxi province. The results show that the cadmium content in rice of eleven rice varieties doesn't exceed the national food safety standards. Among them, the content of Cd in Yexiangyoulisi rice is the lowest. Different rice varieties can be divided into three categories according to their accumulation capacity of heavy metal cadmium. Type I that accumulates cadmium relatively low includes Yexiangyoulisi and Huajing. Type II that accumulates cadmium moderately includes Fengshansimiao, Meixiangzhan, Huanghuazhan, Liangzhan, Yexiangyoumingyuesimiao, Efengsimiao, Liangyou336 and Yexiangyoubasi. Type III that accumulates cadmium high among 11 tested rice varieties includes Nongxiang 42 only. But during the ripening stage, Yexiangyoulisi, Fengshansimiao and Liangzhan occur lodging. Considering yield, cadmium accumulation and lodging resistance capability of rice, it is recommended that Yexiangyoumingyuesimiao, Liangyou336, Meixiangzhan, Huanghuazhan and Efengsimiao are the most suitable varieties for planting in the rice-crayfish symbiosis fields in southern China. However, the three rice varieties of Yexiangyoulisi, Fengshansimiao and Liangzhan can be planted in rice-crayfish fields in hilly with low wind area in the South because of their high yield and low accumulation.

Key words: rice varieties; cadmium; accumulation characteristics; selecting

(责任编辑: 刘显亮)