

Cd 对不同品种水稻微量元素累积特性及其相关性的影响

李 军¹, 梁吉哲¹, 刘侯俊^{1*}, 韩晓日¹, 黄元财², 芦俊俊¹, 赵 曦³

(1.沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110866; 2.沈阳农业大学农学院, 沈阳 110866; 3.辽宁辐洁环保技术咨询有限公司, 沈阳 110031)

摘 要:采用土培盆栽试验方法,以东北地区大面积种植的 32 个水稻品种为试验材料,在土壤中未添加(0 mg·kg⁻¹ Cd)和添加 Cd (5 mg·kg⁻¹ Cd)的条件下,研究不同品种水稻籽粒、颖壳、茎叶和根系中 Cd、Fe、Mn、Cu、Zn、Si 几种微量元素的累积分布特征以及它们之间的相关关系。结果表明,几种微量元素在根系和茎叶中的含量大于籽粒和颖壳,其中 Cd、Fe 在根系和茎叶中的累积远远高于其他元素。水稻不同部位各微量元素之间大多数表现为正相关关系,加 Cd 处理后元素之间的相关性变得更明显,尤其是籽粒中 Cd 与其他元素之间从未加 Cd 时不相关到加 Cd 后达到极显著相关水平。从微量元素含量来看,3 号品种(越路早生)籽粒中 Cd 和其他有益微量元素含量相对较低,而 8(千重浪-1)和 27(吉 03-2843)号品种含量较高。从营养价值和食品安全角度综合考虑,在无污染的农田土壤上,宜选择 3、8、27 号作为理想的水稻品种。

关键词:水稻;微量元素;镉;不同品种

中图分类号:X503.231 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)03-0441-07

Influence of Cd on Microelements Accumulation and Their Correlation in Different Rice Cultivars of North-eastern China

LI Jun¹, LIANG Ji-zhe¹, LIU Hou-jun^{1*}, HAN Xiao-ri¹, HUANG Yuan-cai², LU Jun-jun¹, ZHAO Xi³

(1.College of Soil and Environment, Shenyang Agriculture University, Shenyang 110866, China; 2.College of agronomy, Shenyang Agriculture University, Shenyang 110866, China; 3.Liaoning Fujie Environmental Technology Consulting Co. Ltd., Shenyang 110031, China)

Abstract: A soil pot experiment was conducted to investigate the influence of Cd on several microelements accumulation and their correlation in different parts of 32 rice cultivars, which collected from Northeastern China. Two uniform rice seedlings cultivated previously were selected and transplanted to soil amended with 0 mg·kg⁻¹ or 5 mg·kg⁻¹ Cd (as 3CdSO₄·8H₂O) in May 26 and harvested in September 30 in 2009. After harvest, the concentrations of Cd, Fe, Mn, Cu, Zn and Si were determined in root, shoot, glume and grain of rice. Results showed that concentrations of these microelements in root and shoot were higher than those in glume and grain, especially for Cd and Fe. In most cases, the relationship between elements showed positive correlation, which was intensified in treatment supplied with 5 mg·kg⁻¹ Cd. Especially in grain, concentrations of Cd and other microelements showed significant positive correlation at Cd5 treatment, whereas no correlation was observed at Cd0 treatment. In general, the cultivars with higher Cd concentrations in grain also contained higher concentrations of microelements, such as Qianchonglang-1(8) and J 03-2843(27), whereas the cultivars with lower Cd concentrations in grain had lower microelements concentrations, such as Yueluzaosheng(3). Concerning the nutritive value and food safety of rice grain, Yueluzaosheng(3), Qianchonglang-1(8) and J 03-2843(27) were recommended to plant in non-polluted agriculture soils.

Keywords: rice; microelements; cadmium; different cultivars

人体正常生理代谢需要至少 49 种微量元素^[1],任何元素的缺乏均可能导致人体健康受到严重危害。

收稿日期:2011-09-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41001192),辽宁省自然科学基金资助项目(20072129)

作者简介:李 军(1963—),男,博士,教授,研究方向为土壤改良、环境工程、农业环境与生态。

* 通讯作者:刘侯俊 E-mail:liuhoujun_0@163.com

据统计目前全球有 30 亿人口正在遭受着微量元素缺乏引发的各种疾病的困扰,而且这个数目还在持续上升^[2-3]。人体微量元素的主要来源就是食物摄取,而稻米是世界三大重要粮食作物之一,是人体能量和营养的重要来源,所以稻米中微量元素含量状况直接关系到人类的健康^[4]。由于遗传特性存在着差异,不同植物品种自身累积微量元素的能力也不同^[5-8],这在水

稻作物上也很普遍^[9]。

微量元素的积累不仅受植物遗传因素的影响,还受外部环境条件的制约。土壤中重金属离子的存在是影响微量元素吸收运输的一个重要因素^[10]。东北地区是重要的老工业基地, Cd 污染现状非常严峻, 稻米常有 Cd 超标的现象^[11-12]。土壤中的 Cd 不仅能够在水稻籽粒中积累直接导致稻米遭受 Cd 的污染, 而且在一定程度上影响着稻米对有益微量元素的吸收和运输^[13]。然而, 目前关于东北地区常用水稻品系或品种对微量元素的富集差异, 尤其在 Cd 存在条件下微量元素的累积特征报道较少, 这对培育籽粒富含微量元素的水稻品种来说是需要积累的第一手资料。

基于以上设想, 本试验选择东北地区广泛种植的 32 个水稻品种作为研究对象, 以 Cd 污染作为外部影响因素, 在前期分析这些品种对 Cd 的累积特性的基础上^[14], 本文将报道不同品种水稻的籽粒、颖壳、茎叶和根系中 Fe、Mn、Cu、Zn、Si 几种微量元素的累积分布特征以及 Cd 对这些元素累积的影响。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

试验于 2009 年 5 月至 10 月在沈阳农业大学土地与环境学院网室内进行, 供试土壤为无污染棕壤, 采集自沈阳农业大学稻作所试验基地, 均采自 0~20 cm 耕层。土壤运回网室后风干, 过 3 mm 筛, 用于种植水稻。取部分土样, 进一步磨碎, 分别过 1 mm 和 0.25 mm 尼龙筛, 用于测定土壤基本性质。测定结果为: pH 值 6.7; 全氮 1.24 g·kg⁻¹; 全磷 0.38 g·kg⁻¹; 全钾 12.6 g·kg⁻¹; 碱解氮 58 mg·kg⁻¹; 速效磷 6.5 mg·kg⁻¹; 速效钾 96 mg·kg⁻¹; 有机质 23.1 g·kg⁻¹; 全镉 0.04 mg·kg⁻¹。以上指标均采用常规方法测定。

1.2 供试水稻

供试水稻幼苗由稻作所提供, 32 个水稻品种均为粳稻, 选自东北亚地区不同地域(辽宁、吉林、黑龙江以及日本), 且遗传背景差异较大。这些品种分别为 ①沈农 265, ②沈农 9741, ③越路早生, ④中辽 9052, ⑤辽粳 371, ⑥辽星 1 号, ⑦辽粳 9, ⑧千重浪-1, ⑨辽粳 294, ⑩辽粳 454, ⑪辽盐 241, ⑫辽粳 326, ⑬辽粳 5, ⑭辽盐 2, ⑮辽盐 16, ⑯营 8433, ⑰辽盐 283, ⑱盐粳 68, ⑲辽恢 190, ⑳沈恢 32, ㉑沈稻 9 号, ㉒沈稻 3 号, ㉓沈稻 6 号, ㉔京租, ㉕吉 2843, ㉖台粳 9, ㉗吉 03-2843, ㉘秋田小町, ㉙里坎, ㉚农林 315, ㉛广锦, ㉜沈稻 12(下文图表中 1~32 号品种均按照以上顺序

编号)。稻种催芽后, 先在不污染的稻田育秧, 后将带蘖秧苗移栽到塑料盆内, 每盆插秧 2 株。

1.3 试验布置与管理

将氮(N 0.2 g·kg⁻¹)、磷(P₂O₅ 0.15 g·kg⁻¹)、钾(K₂O 0.2 g·kg⁻¹) 基肥以溶液的形式拌入少量风干土壤, 用手搓匀后过筛, 将筛出的土粒再搓匀、过筛, 如此反复 3 次, 保证基肥与土壤充分混合, 将此拌入基肥的少量土壤混入所有供试土壤, 反复混匀。装盆时, 按每盆称量 3.0 kg 土壤, 并将 Cd 也以溶液的形式拌入土壤。先称取 3CdSO₄·8H₂O 化合物 3.286 1 g, 用去离子水配制成 1 920 mL 溶液, 加镉的处理用移液管取 20 mL 配好的溶液倒入 3.0 kg 土壤中, 使得土壤中镉含量达到 5.0 mg·kg⁻¹。之后将土壤充分搓匀、过筛, 反复 3 次。每个水稻品种均设置未加镉(Cd 0 mg·kg⁻¹)和加镉(Cd 5 mg·kg⁻¹)两个处理, 每个处理重复 3 次, 共 192 盆。将加入基肥和镉的土壤装入 30 cm×20 cm×15 cm 塑料盆中, 用自来水将盆中的土壤湿润后, 平衡 4 周。5 月 26 日将育好的水稻幼苗移栽到土壤中, 每盆 2 株, 同时淹水, 水稻整个生长期保持水面 2~3 cm, 收获前两周停止加水。水稻于 9 月 30 日收获。

1.4 样品采集与分析

水稻成熟后, 将整个植株从盆钵中取出, 使植株与土壤脱离, 用不锈钢刀将根系和地上部分分开, 地上部称鲜重后直接装入纸袋, 105 °C 杀青 20 min, 70 °C 烘干。新鲜根系连同少量土壤一起装入尼龙网袋, 先用自来水冲洗, 将根系与粘在根上的土壤分离, 然后用蒸馏水将根系冲洗 3 遍, 用吸水纸吸干水分, 再杀青并烘干。将烘干的根系和地上部取出, 称量干重, 两者相加记作总生物量, 取下植株穗上的籽粒并称重, 记作籽粒产量, 籽粒进一步脱壳, 分为精米和颖壳。分别将根、茎叶、精米和颖壳粉碎, 过 0.25 mm 尼龙筛, 供化学分析用。

采用硝酸、硫酸、高氯酸(比例为 1:1:8)三酸消煮植株样品, 称样品 0.5 g 左右, 置于 50 mL 三角瓶中, 加入 10 mL 混合酸, 冷消化过夜。次日, 将烧杯置于电热板上, 先低温(100 °C 左右)消煮 1 h, 后高温(200 °C 左右)砂浴消煮至溶液颜色变为无色并冒白烟后, 再继续蒸发至体积 2 mL 左右, 冷却, 加 20 %稀硝酸 2 mL, 溶解沉淀, 定容至 25 mL 容量瓶。消煮液中微量元素含量用等离子发射光谱仪 ICP-OES (VISTA-MPX, USA)测定。为了保证样品消煮和测定过程的准确性, 空白试剂和西红柿叶片标准样品(GSB 072126422000, Chinese National Certified Reference

Material)与试验样品进行同步消煮和测定。标准样品测定值均在标准值范围之内。

1.5 数据处理与统计分析

采用 SAS 统计软件和 Excel 进行数据处理。

2 结果与分析

2.1 水稻不同部位微量元素含量范围

水稻籽粒、颖壳、茎叶和根系中 Cd、Cu、Fe、Mn、Zn 和 Si 含量见表 1。无论土壤中加镉(Cd5)还是未加镉(Cd0)处理,Cu 元素在水稻每个部位的含量均最低,Fe 在籽粒中含量也较低,但在茎叶和根系中含量却是最高。土壤中加 Cd 后水稻各部位 Cd 含量、茎叶和根系中 Fe 含量以及根系中 Cu 和茎叶中 Zn 含量显著增加,而根系中 Si 含量则显著降低。从表 1 进一步看出,Cd、Fe 两种元素在根系和茎叶中的含量远远高于籽粒和颖壳,根系中 Cd、Fe 含量是籽粒中的 1 000 倍左右,是颖壳中的几百倍。加 Cd 处理,Cd 在茎叶中的含量显著高于未加 Cd 处理,说明加 Cd 处理后茎叶也成为 Cd 的重要累积场所。对于 Fe 而言,加 Cd 处理后根系中的含量显著高于未加 Cd 处理。其他元素 Cu、Mn、Zn、Si 的含量也表现出根系和茎叶中大于籽粒和颖壳,但相差倍数只在几到十几的范围内,远远低于 Cd 和 Fe,并且在加 Cd 和未加 Cd 处理中未表现出明显差异,说明这些元素在水稻体内的含量处于相对稳定的状态。

2.2 水稻不同部位微量元素之间的相关性

表 2 分别列出不同品种水稻籽粒、颖壳、茎叶和根系中 Cd、Cu、Fe、Mn、Zn、Si 之间的相关系数($n=32$,

$r_{0.05}=0.349, r_{0.01}=0.449$)。从各相关系数可以看出,各微量元素之间大多数情况下表现为正相关关系,只有在根系和茎叶中有时表现为负相关关系,这可能是某些元素之间在根系吸收和向茎叶运输过程中存在着相互拮抗的作用,但在养分向籽粒转移的过程中,它们之间又表现为相互协同作用。元素之间的相关性还表现为籽粒中显著高于颖壳、高于茎叶和根系中,土壤中加 Cd 处理高于未加 Cd 处理,尤其是籽粒中 Cd 与其他元素之间从未加 Cd 时相关性不显著到加 Cd 后达到极显著相关水平。根系和茎叶中元素之间相关性变差可能与这两个部位的含量变化幅度大(见表 1 含量范围)有关。

2.3 不同品种水稻籽粒中微量元素含量

如前所述,元素之间的相关性表现为籽粒中显著高于颖壳、高于茎叶和根系,且土壤中加 Cd 处理后高于未加 Cd 处理。尤其值得注意的是,加 Cd 后籽粒中 Cd 与 Cu、Fe、Mn、Zn、Si 之间均达到显著正相关,而未加 Cd 处理均未达到显著相关。为了便于农业生产中选择籽粒微量元素含量高,而重金属元素含量低的水稻品种,需要进一步展示两种处理条件下 32 个水稻品种籽粒中各微量元素含量。如图 1 所示,在土壤中添加 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd 后,8、14、17、19、27 号品种 Cd 含量相对较高,30、22、5、24、32、3、31、6、4、13、23 号品种籽粒中 Cd 含量较低。对于其他元素,8 号和 27 号品种籽粒中 Cu、Fe、Zn、Si 含量较高,而 5、6、24、30 品种籽粒中 Cu、Fe、Zn、Si 含量均较低,这与籽粒中 Cd 含量的规律一致。说明水稻对 Cd、Cu、Fe、Mn、Zn、Si 的吸收具有同步性。

表 1 水稻不同部位微量元素的含量范围($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 1 Concentrations range of microelements in every part of 32 rice cultivars($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

元素 Elements	无镉处理(Cd0)				加镉处理(Cd5)			
	籽粒 Grain	颖壳 Glume	茎叶 Shoot	根系 Root	籽粒 Grain	颖壳 Glume	茎叶 Shoot	根系 Root
Cd	0.039	0.26	1.27	46.1	0.114**	0.44**	16.4**	113**
	0.012~0.102	0.14~0.43	0.20~4.53	15.7~109	0.022~0.285	0.19~1.04	9.20~24.8	48.9~214
Cu	5.24	4.34	12.2	20.5	5.39	4.35	13.5	36.4**
	3.51~6.40	3.44~6.47	3.38~21.2	12.9~32.1	3.59~8.77	3.19~5.52	7.62~17.4	13.4~88.2
Fe	8.52	59.9	923	9 682	9.76	61.4	1 137*	56 633**
	4.49~11.6	44.9~84.5	68.7~1 478	6 482~14 246	4.64~23.2	39.8~105	918~1 380	6 104~149 819
Mn	20.7	84.9	175	344	20.4	80.1	166	355
	15.6~24.5	60.1~130	109~310	225~478	12.7~26.1	51.4~121	97.4~266	184~523
Zn	33.0	47.7	37.1	78.0	33.2	45.8	49.6**	72.0
	20.2~57.7	31.6~102	20.8~61.4	52.3~140	13.2~70.5	28.9~73.4	26.9~104	34.4~125
Si	23.5	87.5	114	204	24.4	91.1	120	156*
	16.6~39.9	71.3~126	95.3~159	119~296	14.8~39.6	73.8~141	83.6~171	85.8~249

注:表中数据为平均值和变化范围($n=32$)。*表示水稻各部位 Cd 和 Cd5 处理元素含量之间存在显著差异;**表示上述两者之间存在极显著差异。

表 2 不同品种水稻植株部位微量元素之间的相关系数

Table 2 Correlation coefficient between microelements in different part of 32 rice cultivars

籽粒 Grain	Cd0						Cd5					
	Cd	Cu	Fe	Mn	Zn	Si	Cd	Cu	Fe	Mn	Zn	Si
Cd	1						1					
Cu	0.061	1					0.664**	1				
Fe	0.046	0.470**	1				0.352*	0.461**	1			
Mn	0.328	0.401*	0.379*	1			0.623**	0.362*	0.351*	1		
Zn	0.182	0.384*	0.362*	0.380*	1		0.614**	0.447*	0.513**	0.583**	1	
Si	0.048	0.368*	0.411*	0.226	0.046	1	0.539**	0.385*	0.664**	0.533**	0.642**	1
颖壳	Cd0						Cd5					
	Cd	Cu	Fe	Mn	Zn	Si	Cd	Cu	Fe	Mn	Zn	Si
Cd	1						1					
Cu	0.193	1					0.462**	1				
Fe	0.253	0.303	1				0.298	0.248	1			
Mn	-0.246	0.088	-0.072	1			0.461**	0.492**	0.154	1		
Zn	0.196	0.475**	0.440**	0.118	1		0.712**	0.667**	0.451**	0.622**	1	
Si	0.171	0.064	0.373*	-0.009	0.258	1	0.021	0.267	0.212	0.107	0.345	1
茎叶 Shoot	Cd0						Cd5					
	Cd	Cu	Fe	Mn	Zn	Si	Cd	Cu	Fe	Mn	Zn	Si
Cd	1						1					
Cu	0.398*	1					0.146	1				
Fe	0.410*	0.962**	1				0.185	0.625**	1			
Mn	-0.305	0.185	0.128	1			0.310	0.651**	0.581**	1		
Zn	-0.593**	-0.233	-0.195	0.296	1		-0.165	0.198	0.120	0.322	1	
Si	-0.188	-0.023	-0.051	0.209	0.131	1	0.267	0.265	0.174	0.291	0.312	1
根系 Root	Cd0						Cd5					
	Cd	Cu	Fe	Mn	Zn	Si	Cd	Cu	Fe	Mn	Zn	Si
Cd	1						1					
Cu	-0.042	1					0.737**	1				
Fe	-0.118	0.376*	1				0.766**	0.956**	1			
Mn	0.431*	0.408*	0.240	1			-0.222	-0.374*	-0.441*	1		
Zn	-0.071	0.254	0.458**	0.237	1		-0.156	-0.241	-0.311	0.672**	1	
Si	0.016	-0.110	-0.008	0.074	0.199	1	-0.480**	-0.638**	-0.681**	0.639**	0.471**	1

3 讨论与结论

3.1 微量元素在水稻体内的含量和分布

作物籽粒中微量元素含量的下降,导致人体微量元素缺乏已经成为人类面临的巨大的生存问题,也引起各国科学家的密切关注。国际水稻研究所(IRRI)的人员对不同品种、不同基因型水稻籽粒中 Fe、Zn 含量进行的考察,发现在 6 个基因类型 939 个水稻品种籽粒中 Fe 和 Zn 含量范围分别是 7.5~24.4 mg·kg⁻¹ 和 13.5~58.4 mg·kg⁻¹,品种之间的差异达到 3~4 倍^[6,9]。我们的研究表明,土壤中未加 Cd 条件下,籽粒中 Fe 的含量为 4.49~11.5 mg·kg⁻¹,平均为 8.52 mg·kg⁻¹,

Zn 的含量为 20.2~57.7 mg·kg⁻¹,平均为 33.0 mg·kg⁻¹, Cu、Mn、Si 的含量分别为 3.51~6.40、15.6~24.4、16.6~39.9 mg·kg⁻¹,平均含量分别为 5.24、20.7、23.5 mg·kg⁻¹。还有许多研究也报道了不同水稻品种中微量元素含量^[15-17],与本试验结果均相似。

对于不同元素在水稻不同部位的含量,本试验结果表明 Cd、Fe 两种元素在根系和茎叶中的含量远远高于籽粒和颖壳,根系中 Cd、Fe 含量是籽粒中的 1 000 倍左右,是颖壳中的几百倍,Cu、Mn、Zn、Si 的含量也表现出根系和茎叶中大于籽粒和颖壳。多数研究结果也表明,矿质元素在植物体内的分布遵循根系>茎叶>颖壳>籽粒的普遍规律^[18]。Fe、Cd 两元素在

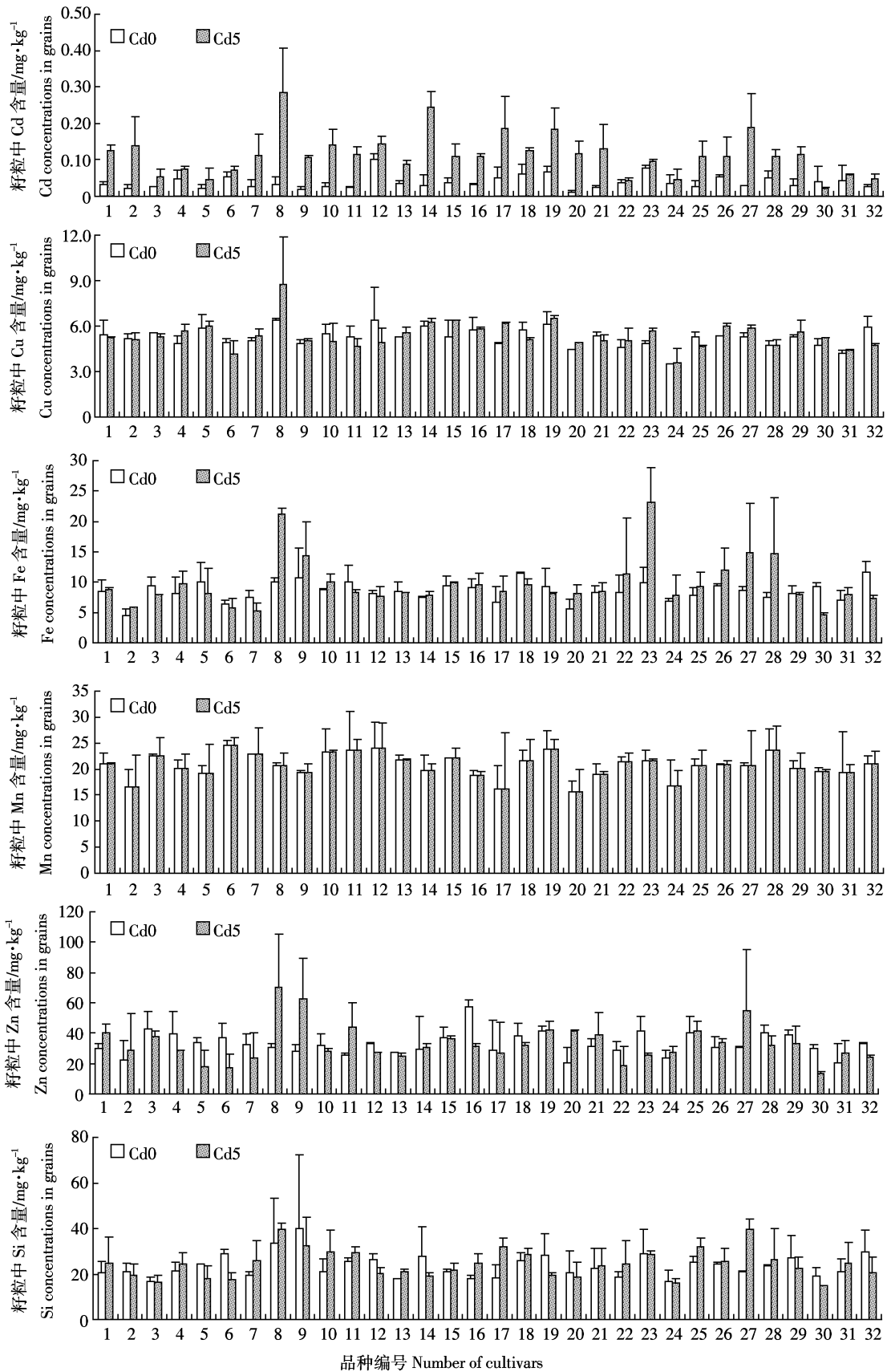


图1 不同品种水稻籽粒中微量元素含量
Figure 1 Concentration of microelements in grains of 32 rice cultivars

根中的含量远远高于其他元素,这可能与水稻根系的氧化作用有密切关系。在淹水条件下稻田土壤中氧化铁被还原为 Fe^{2+} , Fe^{2+} 又被水稻根系分泌的 O_2 氧化并沉积在根系表面和质外体空间,并形成明显的铁氧化物胶膜,所以水稻根系的 Fe 含量每千克可达几到几十克^[19-20]。根系表面形成的铁膜还能够通过共沉淀和吸附等作用与多种元素结合,增加元素在根系的沉积^[20-21],其中铁膜对 Cd 的吸附作用非常明显^[19,22]。

3.2 Cd 对水稻体内微量元素含量的影响

微量元素在植物吸收和运输过程中普遍存在着协同和拮抗的相互作用。本试验条件下,土壤中加 Cd 处理增加了水稻茎叶和根系中 Fe、根系中 Cu 和茎叶中 Zn 的平均含量,却减少了根系中 Si 的平均含量,而对颖壳和籽粒中微量元素的含量无明显影响。这与 Cheng 等的报道有所不同,他们的研究发现,土壤中添加 Cd 减少水稻籽粒中 Fe 和 Zn 的含量,增加 Pb 和 Cr 在茎叶中的累积^[23]。也有研究报道,营养液中加入 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd 后,减少了中小型大蒜叶片中 Cu、Fe、Mo 和 Zn 的含量^[10]。

对 32 个水稻品种各部位中微量元素含量进行相关性分析发现,Fe、Mn、Cu、Zn 四种微量元素之间大多数情况下均呈正相关关系,加 Cd 处理后这种相关性更加明显,同时籽粒中 Cd 与其他元素之间的相关性也从未加 Cd 时的不相关转变为加 Cd 后的极显著相关。由于加 Cd 后水稻各部分生物量均在一定程度上有所下降^[14],对元素浓度有一定的“浓缩效应”,可能会影响到元素之间的相关性。故在考虑“浓缩效应”的前提下,以元素吸收量做相关分析(数据未显示),发现元素之间的正相关关系依然存在,而且籽粒中 Cd 与 Cu、Zn、Si 之间也是从未加 Cd 时不相关到加 Cd 后达到显著或极显著相关。水稻籽粒中元素之间的正相关关系在前人的研究结果中也有报道,例如 Wang 等研究报道水稻籽粒中 Cu 和 Mn、Zn 和 Mn 之间呈现显著正相关关系^[15],Ren 等的结果也表明水稻籽粒中 Fe 与 Ca、As、Zn 与 Mg、Cu 以及 Mg 与 Cu 之间均呈现正相关关系^[16]。可见植物对二价离子的吸收和运输具有同步性^[24],但其详尽机理有待进一步研究。

3.3 水稻籽粒中微量元素含量与营养价值和食品安全的关系

本试验中,由于水稻对微量元素的吸收具有同步性,所以 Cd 含量较高的品种,其他微量元素含量也

较高,而 Cd 含量较低品种,其他微量元素含量也较低。在土壤中添加 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd 后,8、14、17、19、27 号品种 Cd 含量相对较高,30、22、5、24、32、3、31、6、4、13、23 号品种籽粒中 Cd 含量较低。而其他元素,8 号和 27 号品种籽粒中 Cu、Fe、Zn、Si 含量较高,5、6、24、30 品种籽粒中 Cu、Fe、Zn、Si 含量均较低。

在我们此前的报道中^[14]推荐越路早生品种(3 号)作为农业生产中较为理想的品种,主要是 3 号品种对 Cd 的富集能力强,而籽粒中 Cd 含量却相对较低。其他有益微量元素含量,3 号品种虽然相对较低,但不是最低,在综合考虑水稻籽粒营养价值和安全风险的前提下,3 号品种仍然可以作为农业生产中优先推荐品种。对于千重浪-1(8)、吉 03-2843(27)品种有益微量元素含量较高,其籽粒中 Cd 含量也高,在无污染土壤上是较为理想的水稻品种,但在污染土壤上,为了避免 Cd 通过食物链输入人体,只能牺牲其富集微量元素的生物学特征。

参考文献:

- [1] Welch R M, Graham R D. Breeding for micronutrients in staple food crops from a human nutrition perspective [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2004, 55(396): 353-364.
- [2] Welch R M, Combs Jr GF, Duxbury J M. Toward a 'Greener' revolution [J]. *Issues in Science and Technology*, 1997, 14: 50-58.
- [3] Mason J B, Garcia M. Micronutrient deficiency: The global situation [J]. *SCN News*, 1993, 9: 11-16.
- [4] 胡树林, 徐庆国, 黄启为. 香米品质与微量元素含量特征关系的研究 [J]. *作物科学*, 2001(4): 12-15.
HU S L, XU Q G, HUANG Q W. Relationship of sweet rice quality with the contents of microelements [J]. *Crop Research*, 2001(4): 12-15.
- [5] Beebe S, Gonzalez A, Rengifo J. Research on trace minerals in the common bean [J]. *Food and Nutrition Bulletin*, 2000, 21: 387-391.
- [6] Gregorio G B, Senadhira D, Htut H, et al. Breeding for trace mineral density in rice [J]. *Food and Nutrition Bulletin*, 2000, 21: 382-386.
- [7] 翁志强, 蔡若冰. 三种不同品种航天稻米微量元素含量比较分析 [J]. *广东微量元素科学*, 2010, 17(4): 47-51.
WENG Z Q, CAI R B. Analysis the contents of trace elements in three varieties of rice by space breeding [J]. *Guangdong Weiliang Yuansu Kexue*, 2010, 17(4), 47-51.
- [8] Zuo Y M, Zhang F S. Effect of peanut mixed cropping with gramineous species on micronutrient concentrations and iron chlorosis of peanut plants grown in a calcareous soil [J]. *Plant and Soil*, 2008, 306: 23-36.
- [9] Graham R, Senadhira D, Bebe S, et al. Breeding for micronutrient density in edible portions of staple food crops: Conventional approaches [J]. *Field Crops Research*, 1999, 60: 57-80.
- [10] Street R A, Kulkarni M G, Stirk W A, et al. Effect of cadmium on growth and micronutrient distribution in wild garlic (*Tulbaghia violacea*) [J]. *South African Journal of Botany*, 2010, 76: 332-336.

- [11] 刘 杨, 张 薇, 吉普辉, 等. 沈阳张士灌区六种蔬菜的镉污染[J]. 生态学杂志, 2011, 30(6):1229-1233.
LIU Y, ZHANG W, JI P H, et al. Cd pollution of six vegetable species in wastewater irrigation area of Zhangshi, Shenyang[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(6):1229-1233.
- [12] 尚 轶, 卢忠魁. 吉林省9市农产品铅镉污染监测分析[J]. 中国卫生工程学, 2010, 9(1):76-77.
SHANG Y, LU Z K. Monitor of Pb and Cd in agricultural products in 9 cities in Jilin Province[J]. *Chinese Journal of Public Health Engineering*, 2010, 9(1):76-77.
- [13] 杨春刚, 朱智伟, 章秀福, 等. 重金属镉对水稻生长影响和矿质元素代谢的关系[J]. 中国农学通报, 2005, 21(11):176-192.
YANG C G, ZHU Z W, ZHANG X F, et al. Relation of cadmium effect on growth and mineral concentration of rice plant[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(11):176-192.
- [14] 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.
LIU H J, LIANG J Z, HAN X R, et al. Accumulation and distribution of cadmium in different rice cultivars of Northeastern China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(2):220-227.
- [15] Wang L, Wu J P, Liu Y X, et al. Spatial variability of micronutrients in rice grain and paddy soil[J]. *Pedosphere*, 2009, 19(6):748-755.
- [16] Ren X L, Liu Q L, Wu D X. Variations in concentration and distribution of Health-Related Elements affected by environmental and genotypic differences in rice grains[J]. *Rice Science*, 2006, 13(3):70-78.
- [17] Shi J, Li L Q, Pan G X. Variation of grain Cd and Zn concentrations of 110 hybrid rice cultivars grown in a low-Cd paddy soil[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21:168-172.
- [18] Liu J G, Qian M, Cai G L, et al. Uptake and translocation of Cd in different rice cultivars and the relation with Cd accumulation in rice grain [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 143:443-447.
- [19] Liu H J, Zhang J L, Christie P, et al. Influence of iron plaque on uptake and accumulation of Cd by rice (*Oryza sativa* L.) seedlings grown in soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 394:361-368.
- [20] Hansel C M, La Force M J, Fendorf S, et al. Spatial and temporal association of As and Fe species on aquatic plant roots[J]. *Environmental Science and Technology*, 2002, 36(9):1988-1994.
- [21] Hansel C M, Fendorf S, Sutton S, et al. Characterization of Fe plaque and associated metals on the roots of mine-waste impacted aquatic plants [J]. *Environmental Science and Technology*, 2001, 35:3863-3868.
- [22] Peverly J H, Surface J M, Wang T. Growth and trace metal absorption by *Phragmites australis* in wetlands constructed for landfill leachate treatment[J]. *Ecological Engineering*, 1995, 5:21-35.
- [23] Cheng W D, Zhang G P, Yao H G, et al. The difference in growth and four microelement concentrations between two rice genotypes differing in grain cadmium-accumulating capacity[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2004, 3(6):416-424.
- [24] Rogers E E, Eide D J, Guerinot M L. Altered selectivity in an Arabidopsis metal transporter[J]. *PNAS*, 2000, 97(22):12356-12360.