

# 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

李正文<sup>1</sup>, 张艳玲<sup>1</sup>, 潘根兴<sup>1\*</sup>, 李久海<sup>1</sup>, 黄筱敏<sup>2</sup>, 王吉方<sup>2</sup> (1. 南京农业大学农业资源与生态环境研究所, 南京 210095; 2. 江苏省昆山农业科技示范园区, 昆山 215300)

**摘要:**采用田间试验法, 研究了江苏省 57 个水稻品种籽粒对太湖地区乌栅土中 Cd、Cu、Se 的吸收积累. 结果表明水稻籽粒的 Cd、Cu、Se 含量的变化范围分别为  $0.099 \pm 0.039$ ,  $4.86 \pm 2.595$ ,  $0.035 \pm 0.007$  mg/kg, 指示不同水稻品种对同一土壤中 Cd、Cu、Se 的吸收及其在籽粒中的积累存在有显著的差异. 不同品种籽粒对 Cu 和 Cd 的吸收积累有同步的趋势, 而高 Se 品种显示出抑制重金属 Cu 和 Cd 积累的倾向. 不同品种籽粒中重金属含量的差异可能影响到人类重金属食物摄取的健康风险, 57 个品种中 92% 的样品的 Cd 含量超出 USEPA 推荐的人类摄取的籽粒临界含量. 因此, 在土壤重金属污染地区, 必须密切注意高 Cd、Cu 吸收积累品种的大规模栽培, 而筛选高 Se 低 Cu、Cd 的水稻品种进行品质育种是可能的.

**关键词:**水稻重金属吸收; 镉; 铜; 硒; 籽粒积累; 品种差异

中图分类号: R994.6, X503.231 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2003)03-04-0112

## Grain Contents of Cd, Cu and Se by 57 Rice Cultivars and the Risk Significance for Human Dietary Uptake

Li Zhengwen<sup>1</sup>, Zhang Yanling<sup>1</sup>, Pan Genxing<sup>1\*</sup>, Li Jiuhai<sup>1</sup>, Huang Xiaomin<sup>2</sup>, Wang Jifang<sup>2</sup> (1. Institute of Resource, Ecosystem and Environment of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Agricultural Technology Demonstration Farm, Kunshan City, Jiangsu Province 215300, China)

**Abstract:** Field experiment on uptake and accumulation of Cd, Cu and Se in grains by 57 rice cultivars grown on a single Wuzhatu (a black heavy soil) in Jiangsu Province were conducted. The grain concentrations of Cd, Cu and Se varied in the range of  $0.099 \pm 0.039$ ,  $4.86 \pm 2.595$ ,  $0.035 \pm 0.007$  mg/kg respectively, demonstrating remarkable inter-species difference in heavy metal accumulation in rice grains. Cd uptake and accumulation in grains followed that of Cu by the studied cultivars. However, high Se uptake and accumulation tended to suppress Cu and Cd uptake and accumulation in grains. By calculation using the R<sub>d</sub> values recommended by USEPA and WHO respectively, human health risk was shown to be possible from consuming the rice grains from these varieties by a Chinese diet. The Cd concentration of 92% of the varieties was found over the permissible limit recommended by USEPA. Thus, attention must be paid to extensive cultivation of high Cd accumulation cultivars of rice in polluted rice soils. For grain accumulation of Se was usually associated with low Cu and Cd accumulation, rice breeding with improvement of rice Se level would be possible for production of high quality of rice.

**Keywords:** heavy metal uptake by rice; Cd; Cu; Se; grain accumulation; genotype difference

一般认为, 人类摄取的重金属主要通过土壤-作物-食物途径<sup>[1]</sup>. 最近 10 年来, 关于土壤环境中重金属的生物有效性研究已由有环境化学制约性转向植物制约性研究, 并试图按照不同作物对不同元素的生育期全程积累特点进行估计<sup>[2]</sup>. 20 世纪 90 年代以来, 国际上对于重金属元素的环境标准越来越严<sup>[3]</sup>. 最近, 提出了通过土壤-作物污染物迁移分配模型结合食物结

构进行人类污染物的食物摄取的风险评价方法<sup>[4]</sup>. 明确不同作物及不同品种对土壤环境重金属的吸收积累的差异, 对于制定农产品安全生产和保障食物安全是十分迫切的任务. 有文

基金项目: 教育部重点研究项目资助(2002012)

作者简介: 李正文(1964~), 男, 湖南冷水江人, 博士生, 主要从事植物生物化学与环境效应研究.

收稿日期: 2002-12-11; 修订日期: 2003-01-03

\* 通讯联系人

献表明,不同植物无论在养分元素的吸收还是有毒污染物的吸收上都存在依植物种类和品种的差异(即生态型差异和基因型差异)<sup>[5]</sup>.稻米是我国人民的主要消费食物,栽培品种众多,但它们在污染物吸收上的广泛差异还很少报道.本文收集了江苏省目前用于生产栽培的 57 个中稻品种,在太湖地区主要水稻土(乌栅土)上进行田间比较试验,观察其对土壤环境重金属的吸收积累的特点,为土壤-水稻系统重金属生物有效性研究和水稻食品安全标准提供依据.

1 材料与方法

1.1 材料与试验设计

供试水稻品种 57 个,为江浙沪地区中粳稻.种子由江苏昆山市玉山镇种子站提供.试验于 2000 年在江苏省昆山市农业科技示范园区进行,土壤为太湖地区主要农业土壤之一的乌栅土,其耕层土壤的基本性质为:pH( H<sub>2</sub>O) 6.54,CEC18.81cmol/kg,有机碳 6.75g/kg,粘粒(<1 μm)含量 225g/kg, Cd、Cu、Se 全量分别为 0.427、30.62、0.336 mg/kg. 试验为 2 次重复,各小区面积 13.34 m<sup>2</sup>,稻谷分别单独收获晒

干,其它农事操作同常规大田生产.

1.2 分析方法

收获稻谷经风干、脱壳,用粉碎机粉碎,过 60 目筛,用 HClO<sub>4</sub>-HNO<sub>3</sub> 消化,待测液中 Cd、Cu 和 Se 含量分别用原子吸收光谱法和原子荧光光谱法测定<sup>[6]</sup>.以国家标准物质 GB W07603 (GS V-2)为内标控制分析质量.

2 结果和讨论

2.1 不同品种籽粒中 Cu、Cd 和 Se 的含量

供试品种籽粒 Cd、Cu、Se 含量的测定值的结果列于表 1.可见,57 个品种籽粒 Cd 含量的极差达 8 倍,Cu 达 3.5 倍,Se 为 3.7 倍.不同品种籽粒 Cd、Cu、Se 含量的变异系数分别为 39.4%、53.4%和 20%,说明不同的水稻品种间籽粒对 Cd、Cu、Se 含量的积累存在着明显的基因型差异,这种差异对籽粒 Cd 的影响最强,Cu 次之,Se 较小.将籽粒 3 种重金属元素的测定值的频率分布示于图 1.3 元素的籽粒含量分布均遵循正态分布规律.大多数品种籽粒 Cd 含量为 0.07~0.15 mg/kg,Cu 为 3.5~6.0 mg/kg,Se 为 20~45 μg/kg.

表 1 供试 57 个水稻品种籽粒中 Cd、Cu 和 Se 含量的变化范围/ mg·kg<sup>-1</sup>

| 元素                                 | Cd                          | Cu              | Se            |
|------------------------------------|-----------------------------|-----------------|---------------|
| 最大值( maximum)                      | 0.199( 勤优 56) <sup>1)</sup> | 7.41( 秋香粳)      | 0.056( 嘉优 99) |
| 最小值( minimum)                      | 0.026( 镇稻 5171)             | 2.96 ( HGD70)   | 0.015( 96-32) |
| 算术平均值( arithmetic mean)            | 0.099                       | 4.86            | 0.035         |
| 几何平均值( geometric mean)             | 0.091                       | 4.470           | 0.034         |
| 中值( middle value)                  | 0.097( 83001)               | 4.49( 99-83 武进) | 0.034( HGD70) |
| 标准差( standard error)               | 0.039                       | 2.595           | 0.007         |
| 变异系数( coefficient of variation)/ % | 39.4                        | 53.4            | 20            |

1) 括号内为水稻品种名

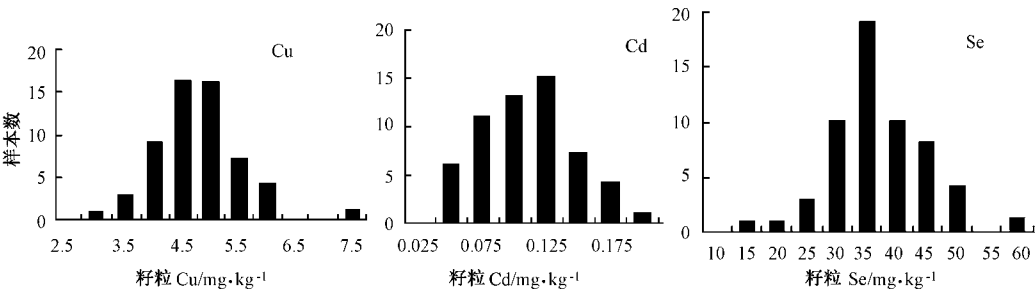


图 1 供试水稻品种籽粒中重金属元素含量的样本分布

Fig.1 Distribution of observations of heavy metal contents in rice grains

2.2 籽粒中重金属元素间的关系

对供试的所有品种籽粒的 3 个被测元素含

量分别进行两两对比,结果示于图 2.可见,籽粒 Cu、Cd 间存在明显的正相关关系,而 Se、Cu 间却反映出反相关关系.但是,Se、Cd 间的关系不十分明显.这说明,对同是二价阳离子的重金属来说,水稻表现出协同吸收的特点.而 Se 以阴离子  $\text{SeO}_3^{2-}$  或  $\text{SeO}_4^{2-}$  形态被吸收,水稻对 Se 的高吸收抑制了二价重金属的吸收与籽粒中的积累,这与文献上报道的 P-Cd 关系是吻合的<sup>[7]</sup>.二价重金属离子被根系较多的硒酸盐络合而阻抑于根系,这可能是某些品种基因型通过高硒吸收而主动抑制重金属吸收和向籽粒转运的机制.因此,在这些供试品种中,可以选育高硒低重金属铜、镉的水稻栽培型品系.

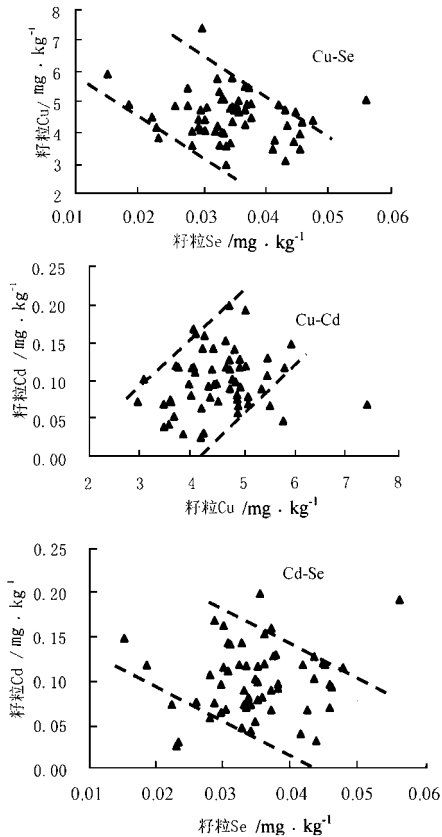


图 2 供试品种籽粒的 Cu、Cd、Se 含量的相互关系

Fig.2 Relationships between the grain contents of Cu, Cd and Se of the studied rice varieties

3 讨论

3.1 水稻籽粒的 Cd、Cu、Se 积累及其与土壤 Cd、Cu、Se 含量的关系

积累系数可以反映一个元素在作物体内的

迁移积累程度.将籽粒中任一重金属元素的浓度除以土壤中的相应元素全量即计算得到籽粒的重金属元素的积累系数(PAF 值)<sup>[4]</sup>.计算表明,供试 57 个品种籽粒的 Cd、Cu、Se 的 PAF 值分别变动于 0.061 ~ 0.466、0.097 ~ 0.242、0.046 ~ 0.167.说明不同的水稻品种基因型对重金属 Cd、Cu 和 Se 的吸收积累强度的影响可分别差异 7 倍、3 倍和 4 倍.据陈怀满<sup>[8]</sup>报道的结果,谷物中 Cd、Cu 的 PAF 值范围分别介于 0.26 ~ 2.43 和 0.17 ~ 0.62;供试 57 个品种籽粒 Cd 和 Se 的 PAF 值分别比 Kabata-Pendias 报道的旱地谷物的平均值 0.03 和 0.01<sup>[9]</sup>要大得多,可能意味着水稻籽粒比旱作谷物更易吸收和积累重金属 Cu、Cd.同时,比较供试品种对不同元素的平均 PAF 值,从大到小为 Cd > Cu > Se,说明 Cd 相对较易在水稻籽粒中积累,Cu 次之,Se 不易在籽粒中积累.Cd 向籽粒迁移的量大约占作物体总量的 40 %<sup>[10]</sup>.

3.2 水稻籽粒的 Cd、Cu、Se 积累与人类食物摄取风险

对照卫生部最新修订待批准的粮食和卫生标准\*,供试水稻各品种籽粒 Cd、Cu 和 Se 的含量都没有超过 Cd 限量标准 0.2 mg/kg、Cu 限量标准 10 mg/kg 和 Se 限量标准 0.3 mg/kg 的水平.反之,作为动物必需的 Se,大部分品种籽粒 Se 含量在 40  $\mu\text{g/kg}$  以下,低于我国食品卫生标准.世界卫生组织规定成年人 Cd、Se 的最大允许摄入量  $R_fD$  值分别为 7 和 5  $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ <sup>[11]</sup>;根据我国平均食物消费结构\*\*,人均每年消费稻麦等谷类粮食作物 206 kg,设谷类全部为大米,则成人每天消费稻米 0.564 kg,计算出稻米中 Se 允许含量为 0.266 mg/kg,而 Cd 则为 0.372 mg/kg.不过,国际上 Cd 的环境标准日益严格<sup>[12]</sup>,USEPA 推荐的  $R_fD$  值 Cd 仅为 1  $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ <sup>[13]</sup>;按此计算,若在我国饮食中消费供试水

\* 中华人民共和国卫生部办公厅.关于征求对《粮食卫生标准》等 4 项卫生标准意见的函.2002 年 6 月  
\*\* 新华社北京 2001 年 10 月 16 日电(扬子晚报 2001 年 10 月 17 日 A3 版)

稻稻谷,则籽粒中 Cd 的允许含量仅为 0.053 mg/kg,因而有 92 %的供试品种的稻米 Cd 超过临界摄入值(图 3),吸收积累 Cd 强的品种(如 勤优 56 等)甚至超标 4 倍左右.因此,供试 57 个水稻品种大部分存在 Cd 的健康风险.也就是说,对于严格的环境标准来说,供试水稻对重金属的籽粒积累的品种差异可以带来明显不同的健康风险效应.江浙沪地区土壤 Cd 污染积累较明显,应十分注意高积累品种对土壤 Cd 的吸收积累现象<sup>[14,15]</sup>.不过,尽管品种间 Se 吸收积累差异明显,但计算表明即使食用含硒最高的品种嘉优 99(Se 0.056 mg/kg)的稻米,成人每天的硒摄入量只达 32 $\mu$ g,仍低于国家营养协会推荐的成人最低日摄入量 40 $\mu$ g<sup>[16]</sup>.因此,为了提高食物链硒水平,筛选高硒水稻仍是今后品质育种的方向.

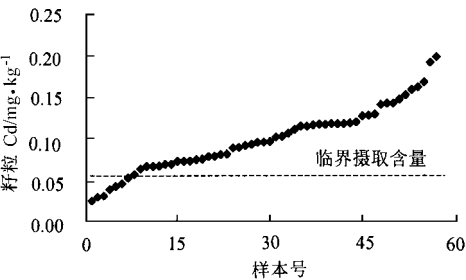


图3 供试 57 个品种的籽粒 Cd 含量[按  $R_fD$  值  $1\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{d})$  计算]与临界摄取含量的关系  
Fig.3 Grain Cd concentration of the 57 rice varieties compared to the critical uptake concentration [dashed line, calculated with the  $R_fD$   $1\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{d})$  as recommended by USEPA 2000]

4 结论

苏浙沪地区 57 个水稻品种在同种土壤条件下对重金属 Cu、Cd 和 Se 的吸收和籽粒积累存在明显的基因型差异.在大规模种植同一品种时可能对食物的 Cd 摄取构成明显健康风险,尤其在土壤污染较为严重的地区需密切注意避免高 Cd 积累品种的大规模种植生产.尽管品种间 Se 的吸收积累差异较大,但均不足以满足食物硒供应.不同品种籽粒对 Cu 和 Cd 的吸收积累有同步的趋势,而高硒品种显示出抑制重金属 Cu 和 Cd 积累的倾向.因此,筛选高硒而低 Cu、Cd 的水稻品种进行品质育种是可能的.本

研究说明在评价土壤环境重金属其生物有效性时应考虑到作物吸收积累的这种差异.在发展保障食物重金属安全的技术时,必须考虑不同品种间的差异可能带来的人类健康风险效应.

参考文献:

1 Dudka S et al. Accumulation of potentially toxic elements in plants and their transfer to human food chain. Journal of Environment Science and Health, 1999, **B34**(4): 681 ~ 708.

2 Peijnenburg W et al. Quantification of metal bioavailability for Lettuce (*Lactuca sativa* L.) in field soils. Environ. Cont. and Toxic., 2001, **35**:1463 ~ 1488.

3 Swartjes F A. Risk-based Assessment of Soil and Groundwater Quality in the Netherlands: Standards and Remediation Urgency. Risk Analysis, 1999, **19**(6): 1235 ~ 1249.

4 潘根兴, A C Chang, A L Page. 土壤-作物系统污染物迁移分配与食物安全的评价模型及其应用. 应用生态学报, 2002, **13**(7):584 ~ 588.

5 Laurie S H, J A Manthey. The chemistry and role of metal ion chelation in plant uptake processes. In: Manthey J A, Crowley D E, Luster D G (eds) Biochemistry of metal micronutrients in the rhizosphere. Lewis Publishers, Boca Raton F L, 1994. 165 ~ 182.

6 鲁如坤 主编. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999. 205 ~ 226.

7 杨志敏等. 植物体内磷与重金属元素锌、镉交互作用的研究进展. 植物营养与肥料学报, 1999, **5**(4):366 ~ 376.

8 郑春荣, 陈怀满. 重金属的复合污染. 见:陈怀满 主编. 土壤-植物系统中的重金属污染. 北京: 科学出版社, 1996. 294 ~ 308.

9 Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants. 3<sup>rd</sup> edition. Boca Raton. Florida, USA: CRC Press, 2001. 315.

10 王新, 吴燕玉. 重金属在土壤-水稻系统中的行为特性. 生态学杂志, 1997, **16**(4):10 ~ 14.

11 WHO Water, Sanitation and Health, Guidelines for Drinking Water Quality. 2<sup>nd</sup> ed. Vol 2 Health Criteria and Other Supporting Information. Geneva: 1999. 281 ~ 283. <http://www.who.int/water-sanitation-health/GDWQ/Summarytables/Sumtab.htm>.

12 Chang A C, Pan Genxing, A L Page et al. Developing human health-related chemical guidelines for reclaimed wastewater and sewage sludge applications in agriculture. Report for World Health Organization, Geneva: 2002.

13 USEPA, US Environment Protection Agency. Integrated Risk Information System. 2000, List of Substances. <http://www.epa.gov/ngispgm3/iris/subst/0006.htm>.

14 李恋卿, 潘根兴, 成杰民等. 估计太湖地区水稻土表层土壤 10 年尺度的重金属元素积累速率. 环境科学, 2002, **23**(3): 119 ~ 123.

15 庞金华. 上海粮食中元素的含量及土壤的安全值. 长江流域资源与环境, 1997, **6**(2):149 ~ 154.

16 胡秋辉. 硒的土壤生态环境. 生物地球化学与食物链的研究现状. 农村生态环境, 2000, **16**(4):54 ~ 57.