

土壤铜胁迫对不同籼型水稻品种产量和品质的影响

袁玲花¹, 徐加宽², 颜士敏¹, 韩妍¹, 赵江宁¹, 王余龙¹, 董桂春¹, 杨连新¹

(1. 扬州大学 江苏省作物遗传生理国家重点实验室培育点, 江苏 扬州 225009; 2. 江苏省常州市农林局, 江苏 常州 213001)

摘要:盆栽土培条件下,以壤土为试验土壤,以6个籼稻品种(组合)为供试材料,研究土壤铜含量 $400\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 对水稻产量和品质的影响。结果表明,土壤铜处理使供试品种稻谷、糙米和精米产量均下降,降幅为14%~27%,依据减产的显著性可将所有供试品种划分为不显著减产($P>0.05$)、显著减产($P<0.05$)和极显著减产($P<0.01$)3种类型。土壤铜处理对稻米加工品质(糙米率和精米率)、外观品质(垩白米率、垩白率和垩白度)、蒸煮和食味品质(直链淀粉含量和胶稠度)以及卫生品质(铜含量)均无显著影响,但使蛋白质含量显著增加,由于子粒减产幅度明显大于蛋白质含量增加的幅度,蛋白质总量极显著降低。铜在子粒不同部位的分布差异很大,浓度分布:糠层中铜浓度大约是谷壳、精米的2倍;积累量:谷壳、糠层和精米中铜积累量平均分别占子粒总积累量的13%、12%和75%,即稻谷经精加工后,其铜总量下降1/4左右。

关键词:水稻;土壤铜处理;产量;品质;铜含量

中图分类号:Q945.78 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)02-0435-07

Effects of Soil Cu Stress on Grain Yield and Quality of Indica Rice cultivars

YUAN Ling-hua¹, XU Jia-kuan², YAN Shi-min¹, HAN Yan¹, ZHAO Jiang-ning¹, WANG Yu-long¹, DONG Gui-chun¹, YANG Lian-xin¹

(1.State Key Lab of Crop Genetic Physiology of Jiangsu Province, Yangzhou University, Jiangsu, Yangzhou 225009, China; 2. Changzhou Bureau of Agriculture, Jiangsu, Changzhou 213001, China)

Abstract:In order to investigate the effect of soil Cu stress ($400\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) on the rice yield and quality, pot experiments were conducted using indica rice cultivars. Main results showed that paddy rice, brown rice and polished rice productivities were all decreased by 14%~27%. According to the significance of the decrease, it could be divided into three groups: none significantce ($P>0.05$), significantce ($P<0.05$) and very significantce ($P<0.01$). Milling quality (brown rice percentage, milled rice percentage), appearance quality (chalky grain percentage, chalkiness area, chalkiness degree), cooking quality (amylose content, gel consistency) and sanitation quality (Cu concentration) were not significantly affected under Cu stress. The content of protein concentration of brown rice increased significantly ($P<0.05$) compared with the control, but its the total content of protein decreased very significantly ($P<0.01$) because of its more seriously decreased yield productivity. Cu concentration differed greatly in different parts of grain structure. On the concentration distribution, it was about 2-fold in cortex (embryo) than in chaff and polished rice. With regard to Cu quantities accumulated in the rice grain, about 13% of the total Cu in grain was in chaff, about 12% in cortex (embryo), and about 75% in polished rice. So, about 1/4 of the Cu in grain was eliminated after grain processing (chaff, cortex and embryo were removed).

Keywords: Rice; Soil Cu stress; productivity; quality; Cu concentration

自20世纪以来,随着工农业生产的迅速发展,农田土壤中铜污染日益加重,植物受铜毒害的报道和研究逐渐增多^[1-18]。水稻是我国最重要的粮食作物,因此

对其在铜胁迫下的响应研究显得尤为重要。铜能使水稻生长发育明显迟缓,生育期推迟,生长量不足,产量下降^[1-5,15-17]。目前关于土壤中铜污染对水稻的影响评价,多以产量作为主要指标,对稻米诸品质指标重视不够,对加工品质、外观品质、蒸煮和食味品质的研究未见报道,同时关于铜在稻米内积累的研究结果也不尽一致^[3-5,15-17]。本研究选择6个籼稻品种,在 $400\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土壤铜处理条件下进行盆栽比较试验,观察

收稿日期:2007-06-27

基金项目:江苏省社会发展科技计划(BS2006019);2007年常州市农业科技成果转化(重点项目)

作者简介:袁玲花(1983—),女,硕士研究生,主要从事作物栽培生理生态方面的研究。

通讯作者:杨连新 E-mail:lyyang@yzu.edu.cn

不同粳型水稻品种产量、品质的响应情况,以及其稻米对铜的吸收积累特点。以期为土壤铜污染地区育种工作提供种质资源。

1 材料与方法

1.1 材料与试验设计

供试材料为常规粳稻:IR24、IR8、扬稻 6 号;杂交粳稻:丰优香占、两优培九、汕优 63。

2005 年在扬州大学农学院网室内进行。供试盆为塑料盆,供试土壤为壤土,土壤 pH 为 7.1,碱解氮、 P_2O_5 、 K_2O 、全铜含量分别为 80.5、10.2、82.1 和 $51.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。5 月 20 日装过筛土,每盆风干土 10 kg,移栽前一个月根据供试土壤重金属含量用 $\text{CuCl}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 进行添加,使供试土壤中全铜含量达 $400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,确保移栽时添加到土壤中的铜达到动态平衡。大田育秧,5 月 18 日播种,6 月 15 日单本移栽,每盆 3 穴,每穴 1 本,每处理 18 盆(重复 3 次)。6 月 21 日每盆施基肥 N 2.0 g、 P_2O_5 1.2 g、 K_2O 2.0 g,8 月每盆施穗肥 N 0.5 g。全生育期保持 4 cm 左右浅水层。

1.2 测定内容与方法

1.2.1 产量测定

成熟期每处理取 6 盆(每个重复 2 盆),手工脱粒后,采用水漂法分饱粒(沉入水底者)和空秕粒,饱粒风干后称重,计算产量。饱粒风干后按农业部颁标准《米质测定方法》和国家粮油检测标准^[19],用出糙机(OHYA-25,日本)脱壳获得糙米,糙米用 JMNJ-3 型精米机精加工,去除米糠层(果皮、种皮、糊粉层及胚),获得精米。

1.2.2 品质测定

按照中华人民共和国农业部颁标准(NY 147—88)米质测定方法测定稻米加工品质(糙米率和精米率)、外观品质(垩白米率、垩白率和垩白度)、蒸煮和食味品质(直链淀粉含量和胶稠度)。

1.2.3 铜元素的测定

所有样品在 70°C 烘至恒重,然后磨碎、过 100 目筛、称重,经微波高压密闭消解系统(MARS, CEM, 美国)利用 3 mL HNO_3 +5 mL 去离子水+3 滴 H_2O_2 消解后,用原子吸收光谱仪(AA, Thermo Elemental, 美国)石墨炉部分测定谷壳、糠层、精米铜元素的含量^[20]。为保证分析方法的准确性,采用国家标准物茶叶样品(GBW07605)进行质量控制。

1.2.4 统计方法

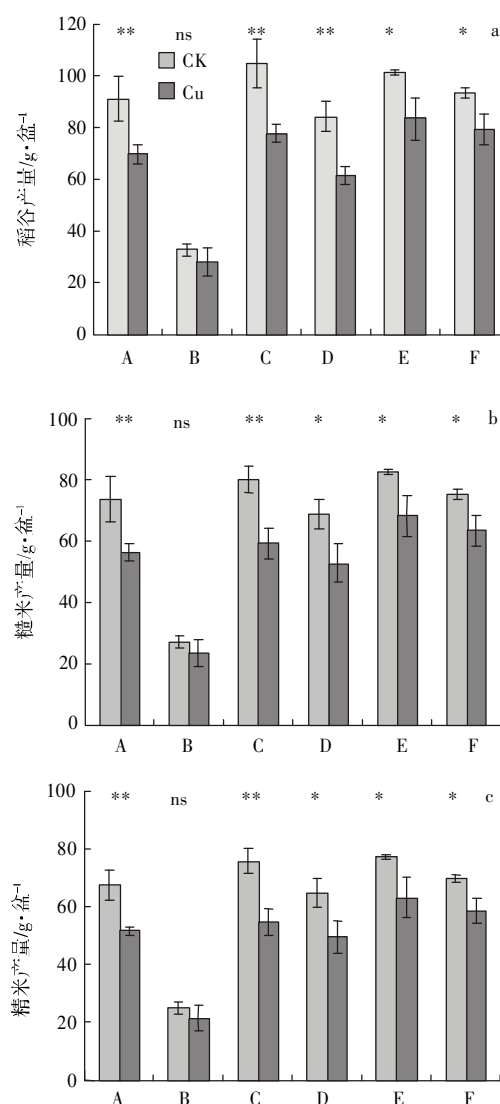
采用 SPSS 13.0 软件进行统计分析,作图采用

Excel 作图软件。

2 结果

2.1 对产量的影响

土壤铜胁迫对供试品种稻谷、糙米和精米产量的影响示于图 1。图 1(a)表明,6 个供试品种平均,铜胁迫使稻谷产量平均下降 20.7%,达极显著水平($P < 0.01$,表 1),但下降幅度不同品种间差异较大($P_{\text{铜} \times \text{品种}} < 0.05$,表 1):两优培九(-26.8%)、丰优香占(-25.8%)



A: IR24; B: IR8; C: 丰优香占; D: 两优培九; E: 汕优 63; F: 扬稻 6 号;
ns: 差异不显著; *0.05 水平下显著; **0.01 水平下显著。
A: IR24; B: IR8; C: Fengyouxiangzhan; D: Liangyoupeijiu; E: Shanyou63;
F: Yangdao6hao; ns: no significant; *significant at 0.05 level;
** significant at 0.01 level.

图 1 土壤铜胁迫 ($400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 对不同粳型水稻品种产量 ($\text{g} \cdot \text{盆}^{-1}$) 的影响

Figure 1 Effects of soil Cu stress ($400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) on grain yield of indica rice cultivars ($\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$)

稻谷产量下降达极显著水平($P < 0.01$); 扬稻 6 号(-15.4%)、IR24(-23.6%)、汕优 63(-17.6%) 产量下降达显著水平($P < 0.05$), 而铜胁迫对 IR8 的产量没有影响; 不同籼稻品种间稻谷产量的差异达极显著水平(表 1), 汕优 63、丰优香占和扬稻 6 号的稻谷平均产量较高($90 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ 左右), IR8 的稻谷平均产量较低($31 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$), 其它两个品种介于两者之间($75 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ 左右); 土壤铜胁迫对籼稻品种糙米产量(图 1b, 表 1)和精米产量(图 1c, 表 1)的影响与对稻谷产量的影响基本一致。

2.2 对稻米品质的影响

2.2.1 加工品质

糙米率为单位重量稻谷加工出的糙米的质量百分率。土壤铜胁迫对各籼稻品种稻谷糙米率的影响列于图 2(a)。结果表明, 铜胁迫使所有供试品种稻谷糙米率平均增加 0.7%, 其中 IR24、扬稻 6 号、丰优香占糙米率分别比对照降低 0.2%、0.4%、0.5%, 汕优 63、IR8、两优培九分别比对照增加 0.5%、0.6%、4.4%, 均未达显著水平(表 1); 不同品种间稻谷糙米率的差异达显著水平(表 1), 变幅在 76.8%~83.8%。

精米率为单位重量稻谷加工出的精米的质量百分率。图 2(b)表明, 土壤铜胁迫使所有供试品种稻谷精米率平均增加 0.1%, 其中汕优 63、扬稻 6 号、丰优香占精米率分别比对照降低 0.8%、0.9%、2.6%, IR24、IR8、两优培九精米率分别比对照增加 0.1%、0.5%、4.0%, 均未达显著水平(表 1); 不同品种间稻谷精米率的差异达显著水平(表 1), 变幅在 71.6%~78.6%。

表 1 铜处理、品种及其交互效应对籼稻品种产量和品质性状影响的显著性检验

Table 1 Significance test of Cu, cultivar and their interaction on grain yield and quality properties of indica rice cultivars

项目	铜	品种	交互效应
稻谷产量/ $\text{g} \cdot \text{盆}^{-1}$	**	**	*
糙米产量/ $\text{g} \cdot \text{盆}^{-1}$	**	**	ns
精米产量/ $\text{g} \cdot \text{盆}^{-1}$	**	**	*
糙米率/%	ns	*	ns
精米率/%	ns	*	ns
垩白米率/%	ns	**	**
垩白率/%	ns	**	ns
垩白度/%	ns	**	ns
直链淀粉含量/%	ns	**	**
胶稠度/cm	ns	**	**
蛋白质含量/%	*	**	ns
蛋白质总量/ $\text{g} \cdot \text{盆}^{-1}$	**	**	ns
稻谷铜含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	ns	**	**
糙米铜含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	ns	**	**

2.2.2 外观品质

垩白米率是整精米中垩白米粒所占的百分比。图 3(a)表明, 所有品种平均, 土壤铜胁迫使垩白米率增加 2.7%, 未达显著水平, 但不同供试品种存在一定差异(表 1); 土壤铜胁迫对 IR24、IR8、丰优香占、两优培九、扬稻 6 号垩白米率无显著影响, 但使汕优 63 垩白米率极显著增加(+35.9%)。垩白米率不同品种间存在极显著差异(表 1), 最高达 93.4%(IR8), 最低仅为 14.7%(IR24)。

垩白率是垩白占整粒米投影面积的百分比。图 3(b)表明, 土壤铜胁迫使所有供试品种垩白率平均降低 2.3%, 未达显著水平。其中丰优香占、IR8、IR24 垩白率分别比对照增加 0.8%、6.1%、16.7%, 两优培九、汕优 63、扬稻 6 号分别比对照降低 1.3%、2.2%、33.7%, 均未达显著水平(表 1); 不同品种间垩白率的差异达极显著水平(表 1), 变幅在 14.3%~44.0%。

垩白度是垩白米率与垩白面积既垩白率的乘积。图 3(c)表明, 土壤铜胁迫使所有供试品种稻谷垩白度平均增加 8.1%, 未达显著水平。其中两优培九比对照增加 44.3%达极显著水平(表 1), 其余品种响应均不显著; 不同品种间稻谷垩白度的差异达极显著水平(表 1), 变幅在 2.1%~40.0%之间。

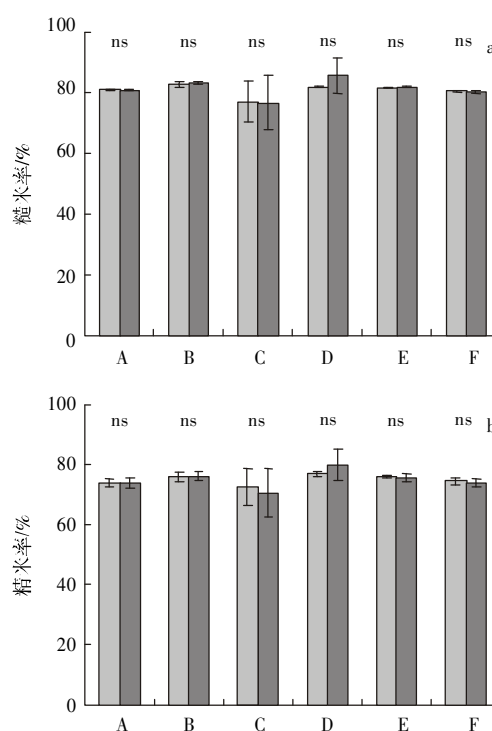


图 2 土壤铜胁迫($400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)对不同籼型水稻品种糙米率(% , a)和精米率(% , b)的影响

Figure 2 Effects of soil Cu stress ($400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) on percentage of brown rice (% , a) and polished rice (% , b) of indica rice cultivars

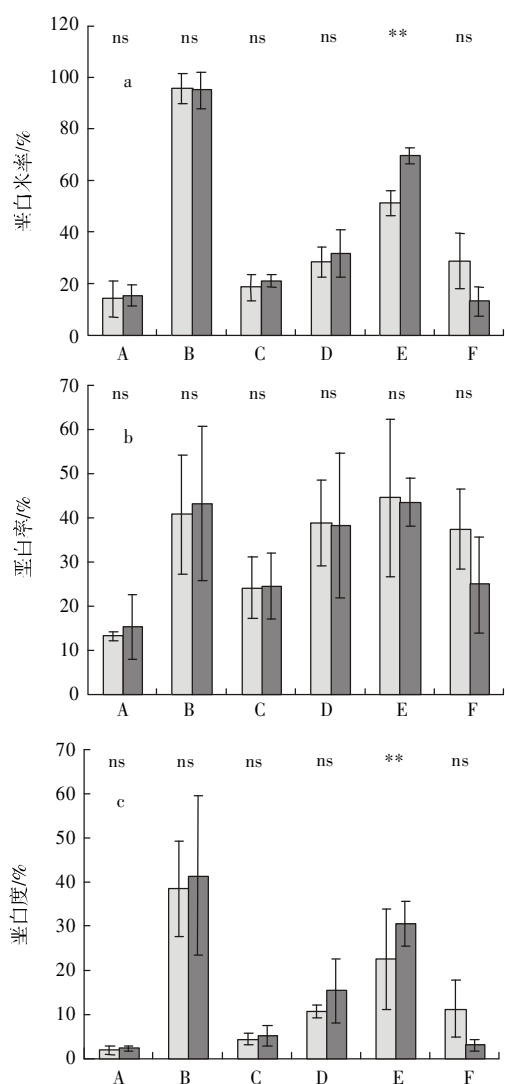


图3 土壤铜胁迫($400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)对不同粳型水稻品种外观品质的影响(%)

Figure 3 Effects of soil Cu stress ($400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) on appearance quality of indica rice cultivars (%)

2.2.3 蒸煮和食味品质

土壤铜胁迫对各粳稻品种整精米直链淀粉含量的影响示于图4(a):土壤铜胁迫使所有供试品种直链淀粉含量平均比对照下降2.5%,未达显著水平,但响应幅度不同品种间差异较大($P_{\text{铜} \times \text{品种}} < 0.01$,表1)。铜胁迫下IR24、IR8、丰优香占、两优培九、汕优63直链淀粉含量无显著影响,但扬稻6号直链淀粉含量显著降低(-2.2%)。不同品种间稻谷直链淀粉含量的差异达极显著水平(表1),变幅在12.7%~21.6%。

胶稠度是0.1000 g 精米粉在沸水浴中充分糊化形成4.4%的米胶,经冰水冷却后,在室温下水平标准试管中米胶流淌的长度。图4(b)表明,土壤铜胁迫下所有供试品种胶稠度平均下降6.5%。IR24、IR8、丰优

香占、两优培九、扬稻6号胶稠度对铜胁迫的响应均未达显著水平,只有汕优63比对照降低45.9%达极显著水平。

2.2.4 营养品质

土壤铜胁迫对各粳稻品种糙米蛋白质含量的影响示于图5(a)。铜胁迫使所有供试品种蛋白质含量平均增高4.5%,达显著水平($P < 0.05$,表1)。其中丰优香占、IR24、两优培九、IR8分别比对照增加5.1%、5.6%、5.7%、7.1%,扬稻6号比对照降低1.1%;降低1.1%;不同品种间蛋白质含量的差异达极显著水平(表1),变幅在8.0%~10.3%。

图5(b)表明,土壤铜胁迫使所有供试品种蛋白质总量下降,平均降低17.8%,达极显著水平($P < 0.01$,表1)。其中扬稻6号较对照降低15.7%,达极显著水平;丰优香占、两优培九较对照分别降低22.0%、23.0%,达显著水平;IR8、汕优63、IR24较对照分别降低6.3%、16.3%、19.5%,未达显著水平。IR8的平均蛋白质总量只有 $3 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ 左右,其他品种在 $7 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ 左右。

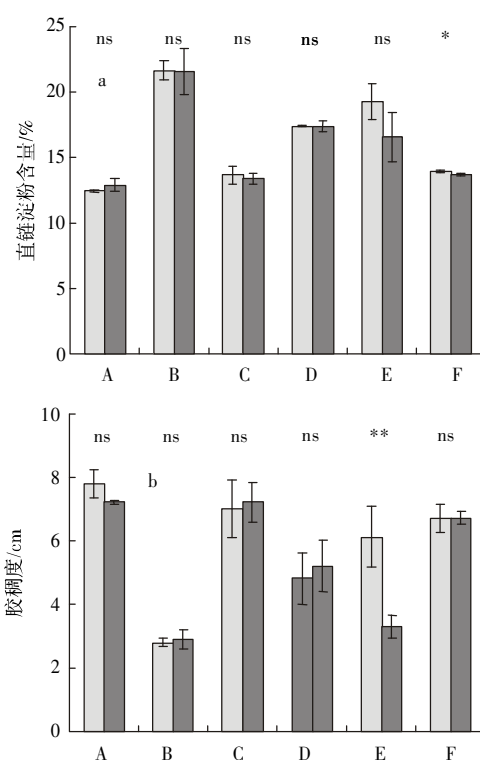


图4 土壤铜胁迫($400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)对不同粳型水稻品种整精米直链淀粉含量(a)和胶稠度(b)的影响

Figure 4 Effects of soil Cu stress ($400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) on amylose content (a) and gel consistency (b) of polished rice of indica rice cultivars

2.2.5 卫生品质

图 6(a)表明,土壤铜胁迫使所有供试品种稻谷铜含量平均增加 3.2%,未达显著水平(表 1),但不同品种对铜胁迫的响应存在一定差异:铜处理对 IR8、丰优香占、两优培九、汕优 63、扬稻 6 号这 5 个品种稻谷铜含量无影响,但对 IR24 影响达极显著水平,较对照下降 46.9%。不同品种间稻谷平均铜含量的差异达极显著水平,变化幅度在 $5.9\sim 19.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

图 6(b)表明,土壤铜胁迫使所有供试品种糙米铜含量平均增加 2.2%,未达显著水平(表 1),铜处理对 IR8、丰优香占、两优培九、汕优 63、扬稻 6 号这 5 个品种糙米铜含量无影响,但对 IR24 影响达极显著水平,较对照下降 45.8%。不同品种间糙米平均铜含量的差异达极显著水平,变化幅度为 $6.2\sim 20.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

2.3 稻米加工各产物中铜的分布

铜在稻米加工后各产物中的分布很不均匀(图 7)。从铜含量分布来说,6 个供试品种平均,谷壳、糠层、精米中铜含量分别为 $8.7、19.8、10.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,糠层>精米>谷壳;从各部位的铜累积量占子粒总累积量的比例来看,谷壳的平均干物质量占子粒干物质量的 18.7%,其平均铜累积量占子粒总累积量的 13.4%;糠层的平均干物质量占子粒干物质量的 6.3%,其平均铜累积量占子粒总累积量的 11.9%;精

米的平均干物质量占子粒干物质量的 75.1%,其平均铜累积量占子粒总累积量的 74.7%,即稻谷经精加工后,其铜总量平均下降 1/4。关于铜在稻米加工后各产物中的分配方面,不同品种间也存在差异。方差分析表明,谷壳、精米中铜含量及糠层和精米中铜累积量,品种间达极显著水平,糠层中铜含量及谷壳中铜累积量品种间达显著水平(图 7)。

3 讨论

3.1 关于铜胁迫对稻米产量的影响

Yan 等^[15]研究表明铜处理浓度 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时绝大多数供试水稻品种盆栽条件下表现为产量下降,平均下降 17%。徐加宽等^[16]表明 $400\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 铜处理时常规粳稻品种武香粳 14 盆栽条件下稻谷产量下降 40%左右。本研究表明,铜处理浓度 $400\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,籼稻产量的降幅在 14%~27%,依据其减产的显著性可将所有供试品种划分为不显著减产、显著减产和极显著减产三种类型,说明不同品种在对铜胁迫的耐性上存在显著差异。进一步研究表明铜胁迫下水稻减产的原因因品种而异:两优培九、丰优香占、扬稻 6 号主要是由于穗数减少所造成,IR24 主要是由于每穗颖

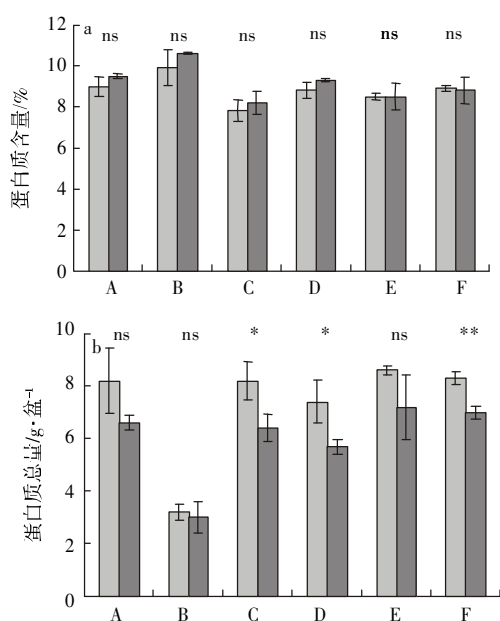


图 5 土壤铜胁迫 ($400\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 对不同籼型水稻品种糙米蛋白质含量(%,a)及总量($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,b)的影响

Figure 5 Effects of soil Cu stress ($400\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) on protein content of indica rice cultivars

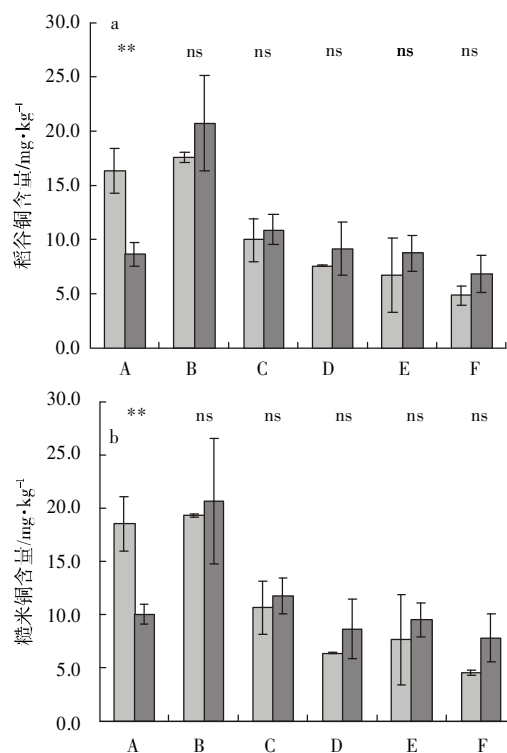


图 6 土壤铜胁迫 ($400\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 对不同籼型水稻品种稻谷和糙米铜含量的影响 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Figure 6 Effects of soil Cu stress ($400\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) on Cu concentration of paddy and brown rice of indica rice cultivars

花数减少造成,汕优 63 主要是由于结实率下降造成,铜胁迫对 IR8 产量无影响(数据未列出)。

3.2 关于铜胁迫对稻米品质的影响

有关铜胁迫对稻米加工品质、外观品质、蒸煮和食味品质的影响国内外均未有报道。本研究表明籼型水稻品种加工品质、外观品质、蒸煮和食味品质几乎

未受铜胁迫影响。稻米中的蛋白质含量虽然较低,但其极易为人体消化和吸收,是稻米主要的营养品质指标。郑文娟等^[18]研究表明,镉能降低小麦中蛋白质含量,而目前铜胁迫下有关水稻蛋白质含量的研究未有报道。本研究表明籼稻品种在 $400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土壤铜胁迫时糙米蛋白质含量相比对照平均增加 4.5%。这

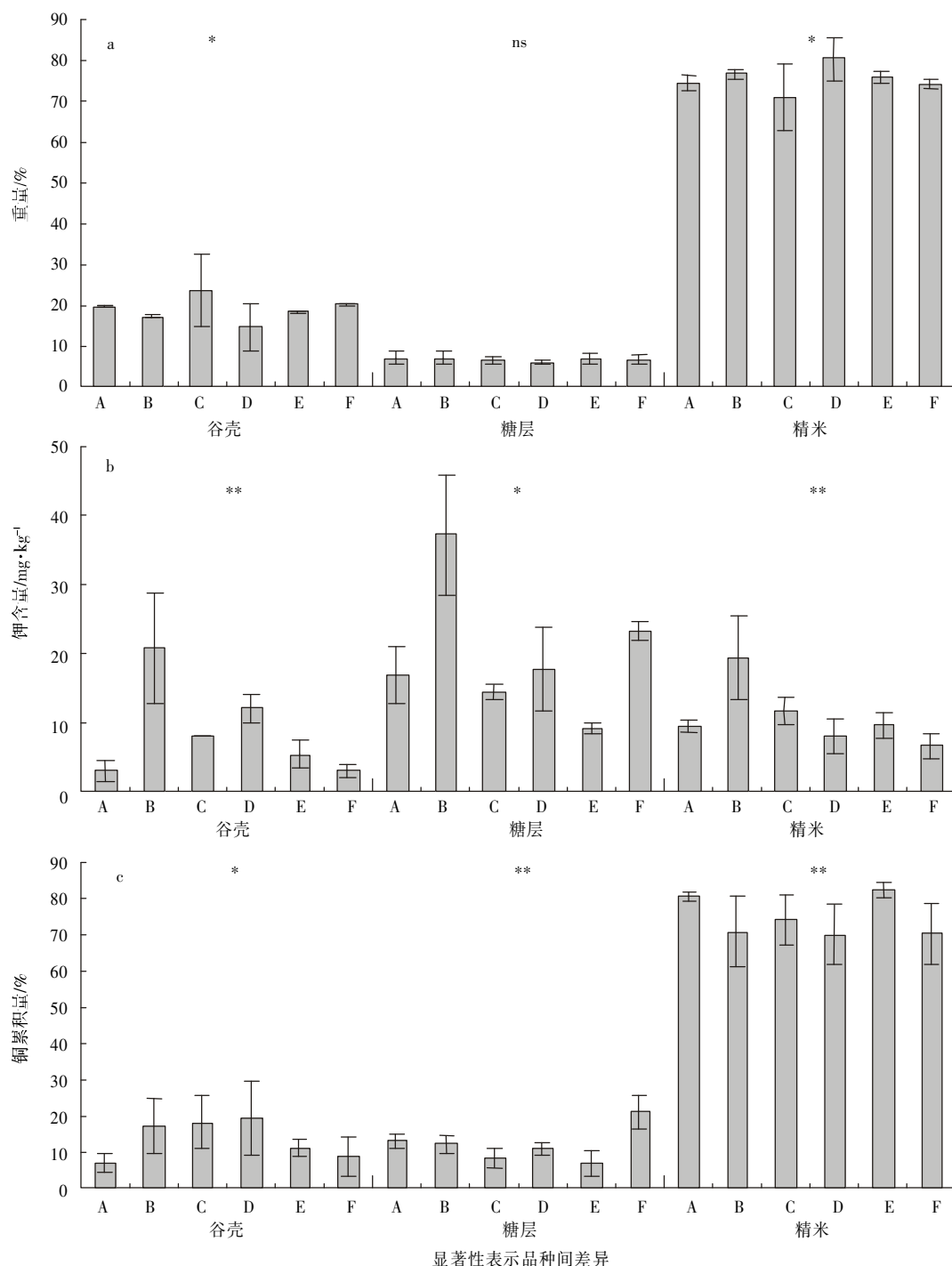


图 7 土壤铜胁迫下不同籼稻品种稻米加工各产物中的干物质积累量(%),铜含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),和铜累积量(%),c)
Figure 7 Effects of soil Cu stress ($400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) on the distribution of different products (%), Cu concentration ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), b) and Cu quantity (%), c) of rice grain processing

一点从本试验水稻叶色的变化亦可得到验证,即铜胁迫下,水稻生长前期的叶色明显较对照淡,而生育中后期则相反。铜胁迫下叶色的这种变化趋势与水稻中后期单位根重根系活性显著提高,吸 N 能力相对增强^[4],从而使该期植株含 N 率的提高有关。

关于铜在水稻子粒不同部位中的积累与分配, Cao 等^[5]研究表明化工厂污水灌溉条件下水稻谷壳中铜含量显著高于糙米;而杨居荣等^[17]对铜矿周围农地种植研究表明,水稻子粒中铜含量:皮层>谷壳>精米;徐加宽等^[16]研究表明化学试剂添加处理,铜浓度 $400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 条件下粳稻品种武香粳 14 子粒不同部位铜含量为:糠层>精米>谷壳。本研究表明化学试剂添加处理,铜浓度 $400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 条件下各籼稻品种铜含量多表现为糠层>精米>谷壳,与徐加宽等^[16]的研究结果基本一致,但与 Cao 等^[5]、杨居荣等^[17]的研究结果不一致。糠层主要是由富含蛋白质的胚和皮层等组成,由于铜易积累于蛋白质较多的地方^[17],因此,米糠中铜浓度表现为高于谷壳和精米。铜从低浓度谷壳向高浓度种皮再向精米中运转的机制是什么?有待进一步研究。

关于稻谷不同加工程度对铜去除率的影响,杨居荣等^[17]研究表明,稻谷经过深加工后,铜污染可得到明显减轻,精米中铜的去除率可达 59%,但杨居荣等^[17]的研究,品种和处理未列出。徐加宽等^[16]研究表明土壤中铜处理浓度 $400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时武香粳 14 铜去除率为 36%,米糠的铜去除率约是谷壳的 2 倍。本研究表明 $400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土壤铜处理条件下谷壳对铜的去除率大于糠层,加工成精米后精米中铜的去除率约为 25%左右,与徐加宽等的研究结果不尽一致,这可能与所选品种不同有关。

综合各项指标扬稻 6 号对照条件下产量较高,铜胁迫下产量下降较小,且其外观品质、蒸煮和食味品质以及营养品质受影响较小,同时精米的铜积累能力最弱,因此为铜污染地区相对适宜种植品种。

参考文献:

- [1] 宋阿琳,姜运生,梁永超.不同水稻品种对铜镉的吸收与耐性研究[J]. 中国农学通报,2006,22(9):408-411.
- [2] 李正文,张艳玲,潘根兴,等.不同水稻品种子粒 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.
- [3] 徐加宽,杨连新,王志强,等.土壤铜含量对水稻生长发育和产量形成的影响[J]. 中国水稻科学,2005,19(3):262-268.
- [4] 徐加宽,杨连新,王志强,等.土壤铜含量对水稻根系的影响及其与产量的关系[J].中国水稻科学,2005,19(5):427-433.
- [5] Z H Cao, Z Y Hu Copper contamination in paddy soils irrigated with wastewater[J]. *Chemosphere*, 2000, 41:3-6.
- [6] Chrysanthus Chukwuma, Sr. Evaluating baseline data for copper, manganese, nickel and zinc in rice, yam, cassava and guinea grass from cultivated soils in Nigeria[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1995, 53:47-61.
- [7] Alina Kabata-Pendias, Henryk Pendias. Trace Elements in Soils and Plants (Third Edition). Boca Raton London New York Washington, D.C., Chemical Rubber Company, 2001, 16.
- [8] The China Environmental Protection Bureau (国家环境保护局). GB15618-1995, Environment Quality Standard for soil. Beijing: The Standard Press of China. 1995.
- [9] Chien Teh Chen, Li-Men Chen, Chuan Chi Lin, et al. Regulation of proline accumulation in detached rice leaves exposed to excess copper [J]. *Plant Science*, 2001, 160:283-290.
- [10] 张潮海,华村章,邓汉龙,等.水稻对污染土壤中镉、铅、铜、锌的富集规律的探讨[J].福建农业学报,2003,18(3):147-150.
- [11] 谢 丹,徐仁扣,卞永荣,等.不同体系中不同土壤对 Cu(II)、Pb(II)和 Cd(II)吸附能力的比较[J]. 农业环境科学学报,2005,24(5):899-904.
- [12] 张纪伍,梁 伟,李德波,等.土壤铜铅锌复合污染对水稻的生态效应[J]. 农村生态环境,1997,13(1):16-20.
- [13] 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.
- [14] 谢 丹,徐仁扣,蒋 新,等.有机酸对 Cu Pb Cd 在土壤表面竞争吸附的影响[J]. 农业环境科学学报,2006,25(3):704-710.
- [15] YuPing Yan, JunYu He, Cheng Zhu, et al. Accumulation of copper in brown rice and effect of copper on rice growth and grain yield in different rice cultivars[J]. *Chemosphere*, 2006, 65:1690-1696.
- [16] Jakuan Xu, Lianxin Yang, Ziqiang Wang, et al. Toxicity of copper on rice growth and accumulation of copper in rice grain in copper contaminated soil[J]. *Chemosphere*, 2006, 62:602-607.
- [17] 杨居荣,查 燕,刘 虹.污染稻、麦籽实中 Cd、Cu、Pb 的分布及其存在形态初探[J]. 中国环境科学,1999,19(6):500-504.
- [18] 郑文娟,邓波儿. 铬和镉对作物品质的影响[J]. 土壤,1993,25 (6):324-326.
- [19] 粮油检测标准,米质测定方法 NY147—88,稻谷出糙率检验法, GB5495—85, 粗蛋白质测定法 GB5511—85, 直链淀粉测定法 GB15683—1995[S].北京:中国标准出版社,1997.
- [20] 粮油检测标准,谷物中铜、铁、锰、锌、镁的测定法原子吸收法, GB14609—93,粮油标准汇编—测定方法[S]. 北京:中国标准出版社,1997.