

土壤铜污染对水稻产量形成的影响:5 年定位试验

赵江宁¹, 王云霞¹, 沈春晓^{1,2}, 杨连新^{1*}, 王余龙^{1*}

(1.扬州大学江苏省作物遗传生理重点实验室, 江苏 扬州 225009; 2.光明种业有限公司, 上海 崇明 202150)

摘 要:2006 年选用清洁粘质壤土(对照,铜浓度 $32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)制备 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 铜污染土壤,在土培池群体栽培条件下,以“矮仔占”和“两优培九”为供试材料,进行持续 5 年的长期定位试验,研究水稻产量的年度变化规律及其可能原因。2007—2010 年的测定结果表明: 200 、 $400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 铜处理使前两年水稻成熟期平均分别推迟 2~5 d 和 6~7 d,但后两年无明显变化。土壤铜污染抑制水稻分蘖的发生,抑制程度逐年减小,两品种趋势一致。 200 、 $400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 铜处理使 2007 年水稻产量分别平均减少 17%、24%,随着时间推移减产幅度明显下降,后两年处理间没有差异,两品种趋势一致。铜污染条件下水稻减产主要与单位面积穗数和每穗颖花数减少有关,而结实率和千粒重均无显著变化。相关分析表明,水稻成熟期土壤可交换态铜浓度与铜胁迫下对应生长季水稻抽穗和成熟期推迟的天数以及茎蘖发生、单位面积穗数、每穗颖花数和产量的下降幅度均呈显著或极显著正相关。以上结果说明,土壤铜污染抑制水稻分蘖的发生和生长,使单位面积穗数和每穗颖花数下降进而使水稻减产;土壤铜污染对水稻生长和产量的影响逐年减小,这可能与土壤中可交换态铜含量持续降低有关。

关键词:水稻;土壤铜污染;生长;产量;定位试验

中图分类号:X503.231 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)11-2073-09

Effect of Soil Copper Contamination on Rice Yield Formation: A 5-Year Located Experiment

ZHAO Jiang-ning¹, WANG Yun-xia¹, SHEN Chun-xiao^{1,2}, YANG Lian-xin^{1*}, WANG Yu-long^{1*}

(1.Key Laboration of Crop Genetics and Physiology of Jiangsu Province, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 2.Bright Seed Industry Co Ltd, Chongming, Shanghai 202150, China)

Abstract: In order to investigate the long-term effects of soil copper(Cu) contamination on yield formation of rice, a 5-year(2006—2010) experiment was conducted in cement tanks. Clay loam soil was treated with 3 different Cu levels (CK, $32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) in 2006, the first year of this long-term trial. No further Cu was added into the experiment plots in the following years. A indica rice variety Aizizhan and a two-line hybrid combination Liangyoupeijiu were used as the testing materials. High Cu treatments delayed rice phenology in the early stage of trial, namely 2007 and 2008. The maturing date was delayed by 2~5 days and 6~7 days for the soil Cu levels of $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. No phenology changes were observed in the late stage of trial. The tillering ability of two varieties were inhibited by soil Cu contamination, but the inhibition declined by years. An average yield reduction of 17% by $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cu treatment and 24% by $400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cu treatment were observed in 2007. The rice yield reduction became smaller in the following years, and no treatment effects were detected in the latter 2 years. The rice yield reduction under Cu contaminated conditions were mainly due to the decrease of panicles per unit area and spikelet number per panicle, since Cu treatments did not change filled grain percentage and grain weight of rice. Correlation analysis showed that exchangeable Cu concentrations(ECC) in top soil were significantly correlated with the phenology delay, tiller number, panicle number per unit area, spikelet number per panicle and grain yield. These results indicated that soil Cu contamination could inhibit rice growth and tillering, reduce panicle number and number of spikelets per panicle, and eventually lead to rice yield decrease; The negative effects of soil Cu contamination on rice growth and yield were reduced by years, and it could be attributed to the continuous reduction of ECC in top soil.

Keywords: rice; soil copper contamination; growth; yield; located experiment

收稿日期:2012-07-04

基金项目:江苏高校优势学科建设工程资助项目;江苏省科学技术厅社会发展计划(BS2006019);江苏省“333 高层次人才培养工程”项目(2009);江苏省“六大人才高峰”项目(07-G-023)

作者简介:赵江宁(1984—),男,江苏涟水人,博士研究生,主要从事土壤重金属污染、水稻逆境生理方面研究。E-mail:zhaojn@foxmail.com

* 通信作者:王余龙 E-mail:ylwang@yzu.edu.cn;杨连新 E-mail:lxyang@yzu.edu.cn

由于冶炼工业废弃物管理不善、农用化学品以及污水、污泥的不当使用等原因,很多国家和地区农田土壤重金属污染问题日趋严重^[1-3]。中国约 1/5 的农田遭受不同程度的重金属污染,每年因此造成 1000 多万吨粮食减产^[4]。铜(Cu)元素是植物生长的必需元素,但过量的铜会对植物产生毒害作用^[5-6]。我国现行《GB 15618—1995 土壤环境质量标准》将铜列为 8 个重金属污染元素之一^[7],前人关于土壤铜浓度升高对水稻生长发育与产量形成的影响已有较多研究,但这些研究多是在盆栽条件下,利用当季制备的污染土壤在单个生长季内进行^[8-13]。本研究于 2006 年在土培池中模拟 200、400 mg·kg⁻¹ 土壤铜污染,参照标准的大田作物管理技术,以“矮仔占”和“两优培九”为供试材料进行了连续 5 年的长期定点试验(一次性处理,试验期间未追加外源铜)。我们前文^[14]报道了耕作层土壤中各种形态铜含量的动态变化,发现外源铜进入土壤后,易被水稻吸收利用的可交换态浓度在试验期间持续大幅降低,其他形态因不同年度和不同耕作方式而相互转化。本文在此基础上进一步分析供试水稻品种不同生长季生育进程、茎蘖动态以及产量和产量构成因素的响应动态,并结合土壤不同形态铜浓度的变化,探讨其可能原因。明确铜污染土壤对水稻产量形成影响的年度变化规律及其原因,有利于对铜污染土壤的客观评价和合理利用,对土壤铜污染地区的稻作生产更具现实指导意义。

1 材料与方法

1.1 实验设计

试验于 2006—2010 年在扬州大学网室进行(32°23.3'N,119°25.0'E),年平均气温为 14.8℃,年日照 2140 h,年均降水量 1020 mm。供试土壤为粘质壤土,主要理化性状为:全氮 1.5 g·kg⁻¹,全磷 0.64 g·kg⁻¹,全钾 12.2 g·kg⁻¹,碱解氮 143 mg·kg⁻¹,速效磷 11.4 mg·kg⁻¹,速效钾 109 mg·kg⁻¹,砂粒(0.05~2 mm)545 g·kg⁻¹,粉砂粒(0.002~0.05 mm)223 g·kg⁻¹,粘粒(<0.002 mm)232 g·kg⁻¹,pH=7.1。土壤背景铜含量 32 mg·kg⁻¹,符合 GB 15618—1995 一级农田土壤标准^[7]。供试水稻品种为常规籼稻“矮仔占”和两系粳稻杂交组合“两优培九”。

本试验在土培池中进行,每个土培池长 3.8 m、宽 1.3 m、深 0.45 m(面积 5.1 m²、体积 2.3 m³)。铜处理设对照(CK,不添加铜)、200、400 mg·kg⁻¹ 3 个水平,重复 2 次。土壤制备方法如下:2006 年 4 月,将供试土壤晾干、打碎过筛,去除杂物,测定土壤容重和含水

量,根据土培池体积计算各处理土壤重量;结合土壤铜背景值、土壤重量和目标浓度分别计算 200、400 mg·kg⁻¹ 铜处理所需污染物(CuCl₂ 水溶液)的总量,一次性与土壤均匀混合(一堆土壤随机 5 个样点铜浓度变异系数<1%),实测其总铜浓度分别为 202.2、400.8 mg·kg⁻¹,CK 土壤不添加铜污染物;2006 年 5 月,将同一处理浓度土壤平均分装到两个土培池中,加水平衡 4 周后,参照当地大田生产常规肥水管理方式进行稻麦轮作。为防止因水分渗漏或漫溢造成铜元素流失,试验开始前对水泥池进行防水处理,试验进行期间阴雨天气酌情进行遮挡。试验材料基本处于开放环境中。

1.2 材料培育

2006—2010 年水稻均采用大田育秧,5 月 13 日播种,6 月 4 日移栽。株行距为 13.3 cm×21.1 cm,单本栽插。氮肥总施用量 250 kg·hm⁻²(纯氮),氮肥施用时期及比例分别为:6 月 2 日施基肥,占总施氮量的 50%,6 月 9 日施分蘖肥,占总施氮量的 10%,8 月 5 日施穗肥,占总施氮量的 40%。磷、钾肥用量均为 75 kg·hm⁻²(以 P₂O₅ 和 K₂O 计),且均作为基肥施用。6 月 2 日—7 月 10 日保持 3~5 cm 水层,7 月 10 日—8 月 4 日多次轻搁田,8 月 5 日到抽穗后 10 d 保持 3 cm 水层,后进行间隙灌溉,直到收割前 7 d 断水。

1.3 测定内容与方法

1.3.1 茎蘖动态与生育期的测定

每小区固定一行(8 穴),移栽到抽穗期每隔 7 d 定点测定 1 次茎蘖数。2006 年,部分铜处理小区因秧苗存活率低而进行补、换苗,本文仅对该季水稻移栽 28 d 以后的数据进行分析说明。

水稻抽穗后每日调查 1 次各小区出穗数,以 50% 穗抽出为抽穗期。大部分稻穗穗轴、全部谷粒变黄,米粒坚硬(黄熟期),且未出现自然落粒判定为成熟期。

1.3.2 产量及其构成因素的测定

成熟期每小区取 15 穴,调查株高、单位面积穗数;将植株分为根系、茎鞘、叶片和稻穗,稻穗进行手工脱粒,水漂法区分饱粒(沉入水底者)和空秕粒,分别计数后计算结实率;饱粒经 80℃烘干至恒重(一般为 72 h)后称重,计算千粒重,根据上述产量构成因素计算水稻籽粒产量。2006 年由于灌浆期褐飞虱爆发,水稻植株大面积枯死,导致该年度产量相关数据不可靠,本文没有列出。

1.4 数据分析

所有数据经 Excel 处理和绘制图表,用 SPSS (V19.0) 进行统计分析。多重比较采用 SPSS 提供的

LSD 法($\alpha=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 生育期

土壤铜污染对供试品种生育期的影响列于表 1。两品种各年度平均,200、400 mg·kg⁻¹ 铜处理使成熟期分别推迟 1.8、3.4 d,均达极显著水平。从不同品种看,200 mg·kg⁻¹ 铜处理使“矮仔占”、“两优培九”成熟期分别推迟 0.25、3.4 d,400 mg·kg⁻¹ 铜处理分别推迟 2.0、4.8 d,除“矮仔占”200 mg·kg⁻¹ 铜处理外均达显著水平。从不同年度看,200 mg·kg⁻¹ 铜处理使 2007、2008 年成熟期分别推迟 2.3、5.0 d,400 mg·kg⁻¹ 铜处理使 2007、2008 年分别推迟 6.5、7.0 d,均达极显著水平,但两个铜污染处理对 2009、2010 年成熟期均无显著影响。统计分析表明 Cu 与品种或年度的互作对水稻全生育期天数的影响均达显著水平。铜污染对水稻移栽至抽穗期天数的影响与全生育期天数的影响趋势一致。

以上结果说明,土壤铜污染使水稻生育进程延长,试验前期更为明显,且对两优培九的影响较大。

2.2 单位面积穗数

土壤铜污染对水稻单位面积穗数的影响示于图 1。两品种各年度平均,200、400 mg·kg⁻¹ 铜处理使水稻单位面积穗数分别减少 4.0%和 8.4%,均达显著水平。从不同品种看,200 mg·kg⁻¹ 铜处理使“矮仔占”、“两优培九”单位面积穗数分别减少 4.3%和 3.5%,400 mg·kg⁻¹ 铜处理分别减少 7.7%和 9.5%,其中后者达极显著水平。从不同年度看,200 mg·kg⁻¹ 铜处理使 2007、2008、2009、2010 年穗数分别下降 10.0%、4.7%、2.6%、-3.1%,2007 年达显著水平;400 mg·kg⁻¹ 铜处理使对应年度分别减少 13%、8.6%、6.8%和

3.9%,前两年达显著水平。方差分析表明,Cu 与品种或年度的互作对穗数的影响均未达显著水平。

水稻穗数与茎蘖发生密切相关。由图 2 可知,同一生长季铜处理水稻茎蘖数占 CK 的百分比逐渐减小,占 CK 比例达到最低值(Ratio_{min})后又逐渐增加,呈“V”字形变化趋势,不同年度趋势一致。两品种五年平均,200、400 mg·kg⁻¹ 铜处理的 Ratio_{min} 分别为 72%、57%,其中“矮仔占”分别为 75%、58%，“两优培九”分别为 70%、55%,均达极显著水平。从不同年度看,200 mg·kg⁻¹ 铜处理 2006、2007、2008、2009、2010 年的 Ratio_{min} 平均值分别为 37%、62%、76%、78%和 89%,400 mg·kg⁻¹ 铜处理对应生长季的 Ratio_{min} 分别为 26%、42%、48%、57%和 75%,均达显著水平。方差分析表明,Cu 和年度的互作对水稻茎蘖发生有显著影响,但 Cu 与品种间没有互作效应。

综上所述,土壤铜污染抑制分蘖的发生进而使水稻单位面积穗数降低,但降低幅度逐年减小,品种间趋势一致。

2.3 每穗颖花数

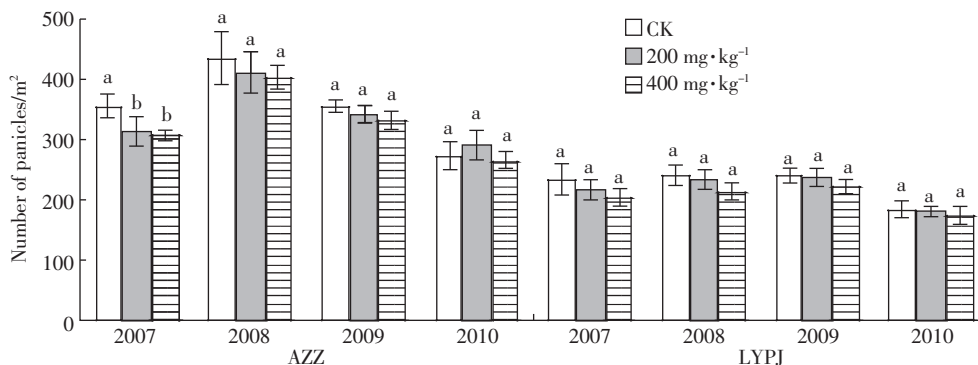
土壤铜污染对水稻每穗颖花数的影响如图 3 所示。两品种各年度平均,200、400 mg·kg⁻¹ 铜处理使水稻每穗颖花数分别减少 1.9%($P=0.44$) 和 4.7%($P=0.07$)。就不同品种而言,200、400 mg·kg⁻¹ 铜处理使“矮仔占”每穗颖花数分别减少 1.4%($P=0.51$)和 6.1%($P=0.02$),使“两优培九”分别减少 2.1%($P=0.56$)和 4.0%($P=0.29$)。从不同年度看,2007 年 200、400 mg·kg⁻¹ 铜处理分别使水稻每穗颖花数减少 6.2%($P=0.18$)、11%($P=0.03$);2008—2010 年,铜处理条件下水稻每穗颖花数略有减少,甚至部分年份低浓度铜处理有所增加,但与 CK 均无显著差异。方差分析表明,Cu 和品种或年度的互作对水稻每穗颖花数的影响均

表 1 土壤铜污染对“矮仔占”(AZZ)和“两优培九”(LYPJ)不同年度生育期天数的影响

Table 1 Effect of soil copper contamination on phenology of Aizizhan(AZZ) and Liangyoupeijiu(LYPJ) in different years

品种 Cultivars	年度 Years	移栽至抽穗期天数 Days from transplanting to heading/d			移栽至成熟期天数 Days from transplanting to mature/d		
		CK	200 mg·kg ⁻¹	400 mg·kg ⁻¹	CK	200 mg·kg ⁻¹	400 mg·kg ⁻¹
矮仔占 AZZ	2007	69	69	72.5	109	110	116
	2008	72	72	73	118	118	119
	2009	70	70	70	114	114	114
	2010	67	67	68	115	115	115
两优培九 LYPJ	2007	80	83	85	131	134.5	137
	2008	78	78	79.5	125	135	138
	2009	76.5	77	77	128	128	128
	2010	76.5	76.5	77	132	132	132

注:表中所示为两个土培池的平均值。



图中所示为两个土培池的平均值及标准误;标注的字母不同表示差异显著($P < 0.05$)。下同
The columns marked by different letters represent significant difference at 0.05 level. Bars show standard error, $n=2$. The same below.

图1 土壤铜污染对“矮仔占”(AZZ)和“两优培九”(LYPJ)不同年度单位面积穗数的影响

Figure 1 Effect of soil copper contamination on number of panicles per square meter of Aizizhan (AZZ) and Liangyoupei (LYPJ) in different years

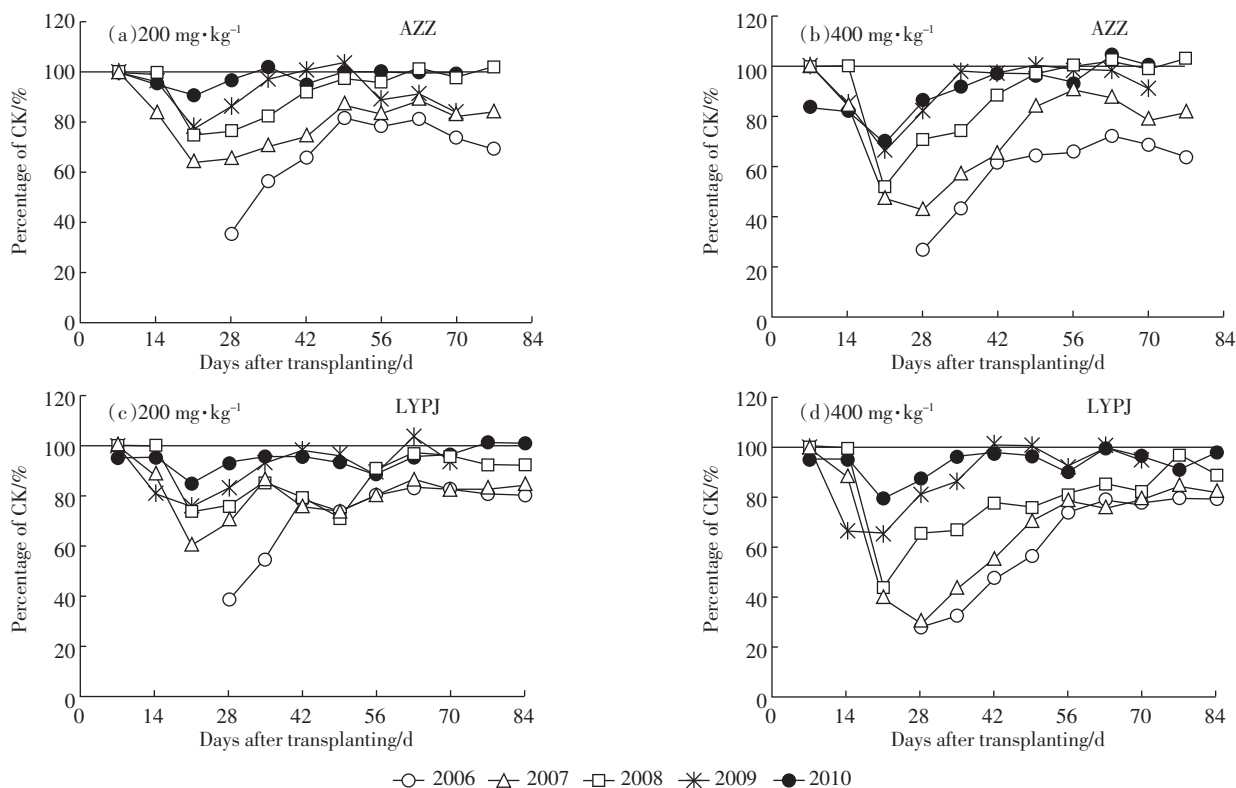


图2 土壤铜污染对“矮仔占”(AZZ)和“两优培九”(LYPJ)茎蘖发生的影响

Figure 2 Effect of soil Cu contamination on tillering dynamics of Aizizhan (AZZ) and Liangyoupei (LYPJ) in different years

未达显著水平。可见,土壤铜污染对水稻每穗颖花数的影响前期较大。

2.4 结实率和千粒重

水稻结实率和千粒重反映籽粒的结实能力。两品种各年度平均,200、400 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 铜处理使水稻结实率和千粒重略有增加,幅度为0.5%~1.2%(图4),均未达显著水平。方差分析表明Cu和品种、Cu和年度之间的互作对这两个参数的影响均未达显著水平。可

见,土壤铜污染对水稻结实能力的影响较小,且不同年度、不同品种趋势基本一致。

2.5 籽粒产量

土壤铜污染对水稻籽粒产量的影响如图5所示。两品种各年度平均,200、400 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 铜处理使水稻产量分别减少4%和11%,后者达显著水平。从不同品种看,200、400 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 铜处理使矮仔占分别减产2%和11%,两优培九分别减产6%和12%,其中高浓

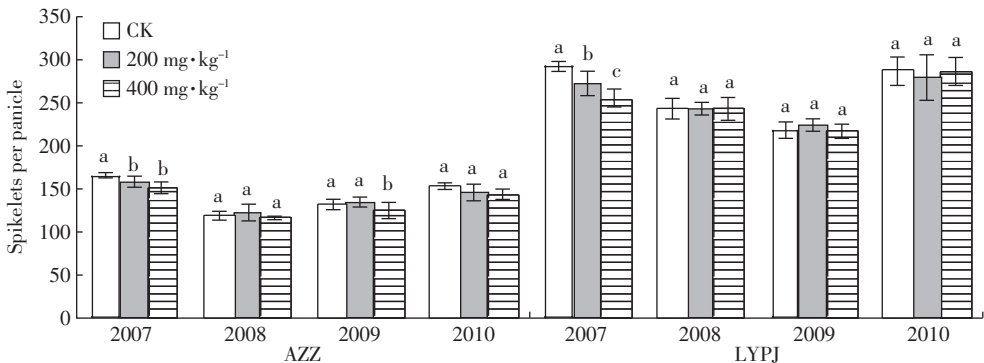


图 3 土壤铜污染对“矮仔占”(AZZ)和“两优培九”(LYPJ)不同年度每穗颖花数的影响

Figure 3 Effect of soil Cu contamination on spikelets per panicle of Aizizhan (AZZ) and Liangyoupeijiu (LYPJ) in different years

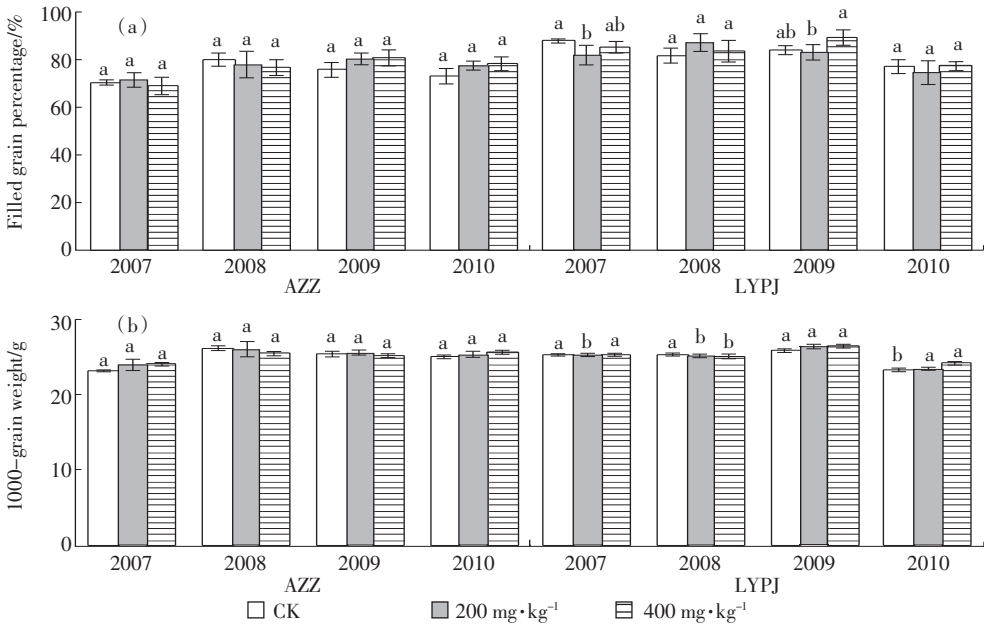


图 4 土壤铜污染对“矮仔占”(AZZ)和“两优培九”(LYPJ)不同年度结实率(a)和千粒重(b)的影响

Figure 4 Effect of soil Cu contamination on filled grain percentage (a) and 1000-grain weight (b) of Aizizhan (AZZ) and Liangyoupeijiu (LYPJ) in different years

度铜处理达极显著水平。从不同年度看,200、400 mg·kg⁻¹铜处理使2007年水稻分别减产17% ($P<0.01$)、24% ($P<0.01$),使2008年分别减产1% ($P=0.14$)、12% ($P=0.10$),使2009和2010年水稻产量略有增加或减少,但均未达0.1显著水平。尽管Cu和品种的互作对水稻产量没有影响,但Cu和年度间的互作达极显著水平。由此可见,土壤铜污染使水稻籽粒产量明显下降,但降幅逐年减少,不同品种趋势一致。

3 讨论

土壤铜污染对水稻生育期的影响报道甚少。苏流坤等大田试验发现150~250 mg·kg⁻¹土壤铜处理使特青抽穗及成熟期延缓^[15];徐加宽等单季盆栽试验表明200、400 mg·kg⁻¹铜处理使武香粳14抽穗期分别推

迟1、11 d^[10]。本研究土培池5年长期定位试验发现土壤铜胁迫下水稻抽穗期和成熟期明显推迟,铜处理浓度越大推迟越为明显(表1)。研究还发现,铜胁迫对水稻生育期的影响还因品种和年度而异(表1)。以成熟期为例,200、400 mg·kg⁻¹铜处理使“两优培九”平均分别推迟3.4、4.8 d,“矮仔占”平均分别推迟0.25、2.0 d,对“两优培九”生育进程的影响明显大于“矮仔占”;从不同年度看,200、400 mg·kg⁻¹铜处理使2007和2008年供试品种成熟期平均分别推迟2~5 d和6~7 d,但后两年无明显变化。铜胁迫条件下水稻的生育进程推迟与本试验观察到的处理水稻生长后期叶片褪色慢、SPAD值高于对照一致(数据未列出),亦与徐加宽等报道的铜处理水稻抽穗后吸氮能力和植株含氮率提高一致^[16],这可能是水稻在胁迫条件下一种

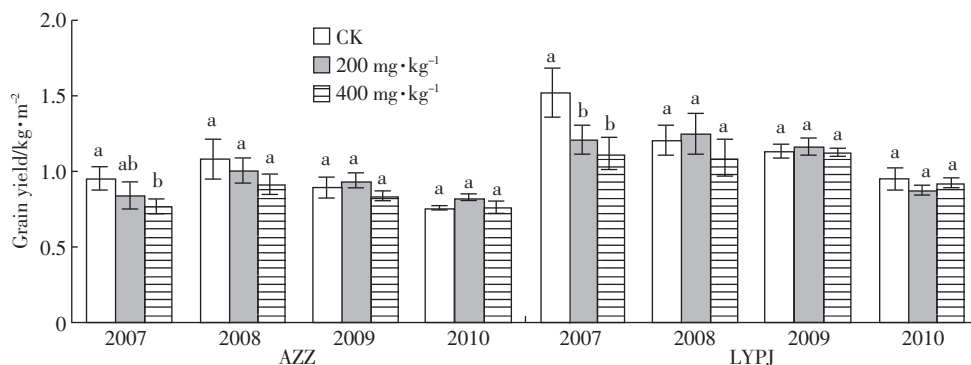


图5 土壤铜污染对“矮仔占”(AZZ)和“两优培九”(LYPJ)不同年度籽粒产量的影响

Figure 5 Effect of soil Cu contamination on grain yield of Aizizhan(AZZ) and Liangyoupei(LYPJ) in different years

补偿机制。

前人单季盆栽试验表明,土壤铜污染对水稻穗数的影响因污染程度和供试品种而异^[10-11,13]。本研究土培试验发现 200、400 mg·kg⁻¹ 铜处理使 2007 年(试验第 2 年)水稻单位面积穗数平均显著下降 10%、13%,不同品种趋势一致(图 1),这与徐加宽等^[10]的结果相似,但与 Yan 等^[11]和颜士敏等^[13]的报道不同。本试验还发现,两个水平铜处理对水稻单位面积穗数的影响均随时间推移明显减弱,例如 400 mg·kg⁻¹ 铜处理使 2007、2008、2009、2010 年穗数分别减少 13%、9%、7% 和 4%,其中后两年未达显著水平(图 1)。水稻穗数与茎蘖发生动态密切相关。本研究表明,土壤铜污染对茎蘖发生的影响均有一个逐渐变大,达到峰值后又逐渐变小的过程,铜污染越重影响就越大(图 3),这种变化趋势前人亦有报道^[10]。说明土壤铜污染对水稻生育前期茎蘖发生有强烈的抑制作用,但随着生育进程的推移,水稻对铜胁迫逐渐适应,表现出明显的生长补偿作用。本研究观察到的另一个突出现象就是土壤铜污染对水稻生育前期分蘖发生的影响逐年减小。200 mg·kg⁻¹ 铜处理对 2006、2007、2008、2009、2010 年供试品种分蘖的最大抑制率平均分别为 63%、37%、24%、22% 和 11%,400 mg·kg⁻¹ 铜处理对对应年度分蘖的最大抑制率分别为 74%、56%、50%、34% 和 24%,均达显著水平(根据图 2 计算)。这种年际变化趋势与穗数的响应基本一致。

关于水稻每穗颖花数受土壤铜污染的影响,本研究发现 200、400 mg·kg⁻¹ 铜处理使 2007 供试品种每穗颖花数分别平均减少 6.2% 和 11%,后者达显著水平,两个供试品种表现一致(图 3),这一结果与徐加宽等^[10]基本一致,但与 Yan 等^[11]和颜士敏等^[13]的报道不尽相同,这种差异可能与供试土壤、品种类型以及材料培育方式不同有关。本研究还发现铜处理对供试品

种每穗颖花数的影响亦表现出逐年下降的趋势(图 3),尽管这种趋势没有穗数那么明显(图 1)。水稻每穗颖花数与茎蘖生长密切相关,本试验观察到的铜污染条件下每穗颖花数减少可能与分蘖发生推迟、小分蘖成穗率提高有关,数据表明不同年度铜处理水稻抽穗和成熟期单茎干重均呈明显的下降趋势(数据未列出)。

与单位面积穗数和每穗颖花数不同,本研究发现土壤铜污染对“矮仔占”和“两优培九”结实率和千粒重的影响均很小,不同年度一致(图 4),这与徐加宽等^[10]对武香粳 14 的单季试验结果相同。水稻生长中后期是决定结实率和千粒重的主要时期,此时水稻具有较强的抗胁迫能力:除了生育期延长(表 1)和分蘖的恢复性生长外(图 2),本试验还发现铜污染条件下水稻灌浆期干物质向籽粒转运的比例提高(数据未列出)。这种生长补偿作用可能是铜污染下水稻结实能力没有变化的主要原因。

前人单季盆栽试验表明土壤铜胁迫使水稻产量下降^[10,12-13],这主要与每穗颖花数^[10],或穗数和每穗颖花数^[10],或穗数和结实率^[13]的下降有关。本研究 2007 年第一次测产数据表明,200、400 mg·kg⁻¹ 铜处理使供试品种平均分别减产 17% 和 24%,两品种趋势一致(图 5),铜胁迫下水稻减产主要与穗数和每穗颖花数共同减少有关,且穗数的影响大于每穗颖花数(图 1 和图 3)。水稻产量对土壤铜污染响应的年际变化未见报道。本研究发现铜胁迫下水稻减产的幅度逐年降低:200、400 mg·kg⁻¹ 铜处理条件下 2007 年供试品种的平均产量损失均达极显著水平($P < 0.01$),2008 年的产量损失明显减少($P = 0.1$),而后两年水稻产量没有损失甚至还略有增加($P < 0.1$)。水稻产量响应的这种年际变化与穗数和每穗颖花数的趋势基本一致。虽然 2006 年产量数据缺失,但从茎蘖动态(图 2)以及株高的变化(数据未列出)可见二者受到的影响明显大于

随后的生长季。因此,可以推知铜处理对2006年水稻穗数、每穗颖花数进而对产量的影响也是最大的。

本试验最明显的一个结果就是土壤铜污染对水稻生长发育和产量的影响逐年减小。在对重金属污染土壤进行评价时,其总浓度是一个重要的指标^[7,17]。本研究中土壤铜污染物于试验开始前一次性添加,与前人采用当季污染土壤的试验方法不同,且土壤总铜浓度在5年试验期间变幅很小^[14],因此本试验不适用土壤总铜浓度的变化来解释水稻响应的年际差异。前人研究认为,重金属污染物的生物毒性、生物可利用性与其在土壤中的形态密切相关^[18-23],外源重金属加入土壤后存在老化过程(Aging process),其可浸提性、可交换性以及生物有效性/生物毒性随时间逐渐降

低^[24-26]。笔者等^[14]亦发现本研究铜污染土壤中各形态铜元素浓度因不同年度及土壤利用方式不同而不断变化,其中可交换态铜浓度(Exchangeable copper concentration, ECC, $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ MgCl}_2$ 提取)持续显著降低。本文进一步将铜处理下水稻生育期推迟天数(d)和产量相关参数的响应值(%)与对应生长季成熟期表层土壤 ECC 作相关分析,结果发现,无论两品种单独还是合并分析,成熟期土壤 ECC 与铜污染下水稻抽穗期推迟天数($r=0.689^{**}$,两品种合并分析结果,下同)、成熟期推迟天数($r=0.507^{**}$)、茎蘖最大抑制率($r=0.859^{**}$)、单位面积穗数($r=0.716^{**}$)、每穗颖花数($r=0.428^{*}$)和籽粒产量($r=0.564^{**}$)的降幅均呈显著或极显著正相关(图6),而与结实率($r=0.161$)和千

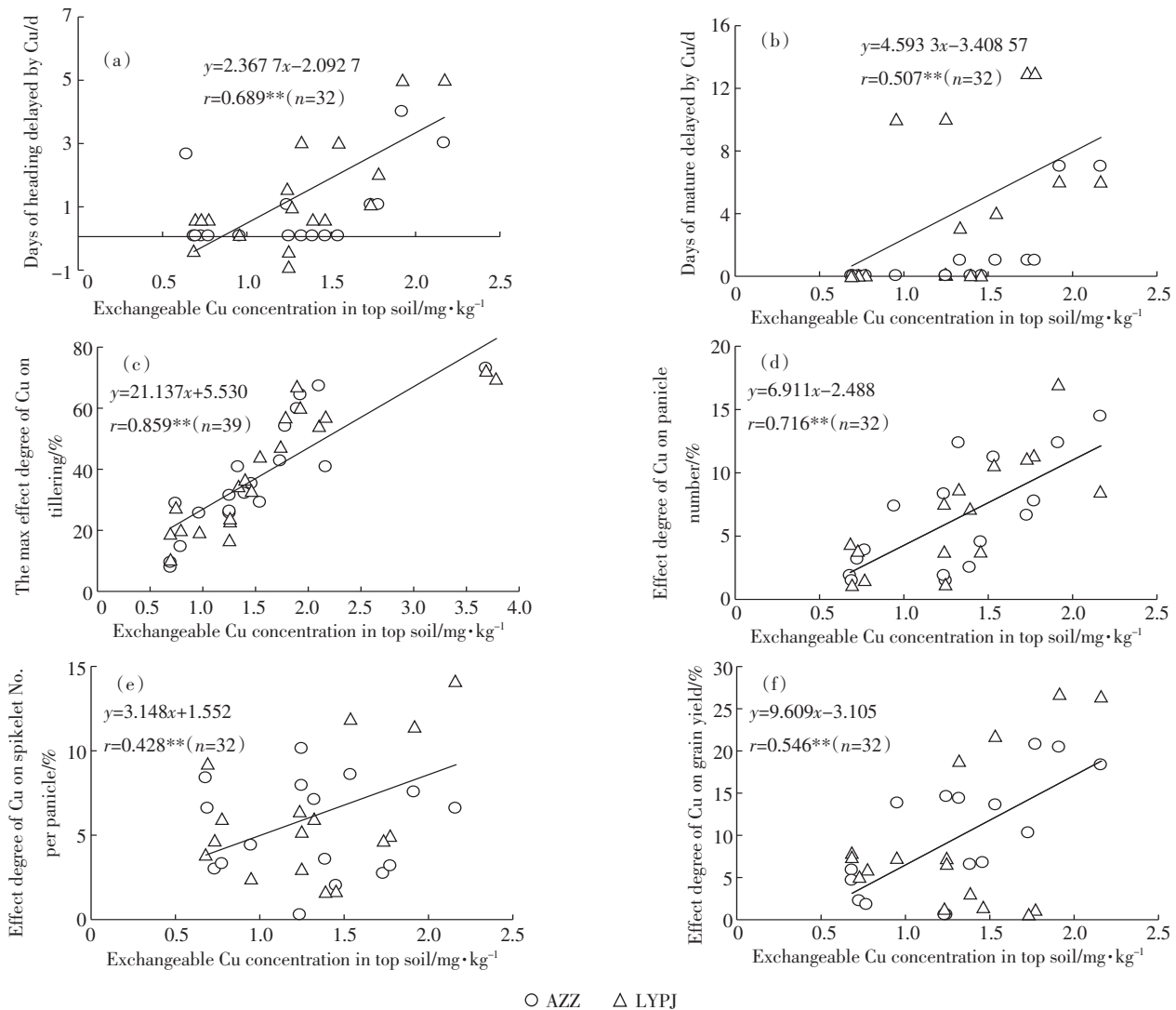


图6 铜污染条件下水稻抽穗期(a)、成熟期推迟的天数(b)以及茎蘖最大抑制率(c)、单位面积穗数(d)、每穗颖花数(e)、籽粒产量(f)的降幅(%)与成熟期表层土壤可交换态铜的关系

Figure 6 Relationship between exchangeable Cu concentration in top soil at maturity and absolute responses(day) of heading(a) and mature stage(b) or relative responses(%) of tillering(c), panicle number(d), spikelet number per panicle(e) and grain yield(f) of rice under Cu contaminated condition

粒重($r=0.219$)的变化关系不密切。说明土壤 ECC 的这种年际变化可能是铜污染土壤对水稻分蘖发生和颖花形成的影响逐年减小,进而使产量损失逐年减小的一个重要原因。这一结果表明,铜元素一次性污染土壤自身具有一定的钝化修复能力。

4 结论

连续 5 年(2006—2010 年)定位试验表明,在污染发生早期,200、400 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土壤铜污染对水稻茎蘖发生和生长均有较强的抑制作用,进而使单位面积穗数和每穗颖花数下降,最终导致水稻减产,但这种影响逐年减小,从第四年(2009 年)起,铜处理水稻产量与对照已无差异。相关分析表明,土壤可交换态铜浓度的降低可能是铜处理水稻减产幅度逐年减少的重要原因之一。

参考文献:

- [1] Hseu Z Y, Su S W, Lai H Y, et al. Remediation techniques and heavy metal uptake by different rice varieties in metal-contaminated soils of Taiwan: New aspects for food safety regulation and sustainable agriculture[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2010, 56(1): 31-52.
- [2] 辛术贞, 李花粉, 苏德纯. 我国污灌污水中重金属含量特征及年代变化规律[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(11): 2271-2278.
XIN Shu-zhen, LI Hua-fen, SU De-chun. Concentration characteristics and changes of heavy metals in irrigation sewage in China [J]. *Journal of Agro-environmental Science*, 2011, 30(11): 2271-2278.
- [3] 陈印军, 肖碧林, 方琳娜, 等. 中国耕地质量状况分析[J]. 中国农业科学, 2011, 44(17): 3557-3564.
CHEN Yin-jun, XIAO Bi-lin, FANG Lin-na, et al. The quality analysis of cultivated land in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(17): 3557-3564.
- [4] 赵其国. 土地资源 大地母亲: 必须高度重视我国土地资源的保护、建设与可持续利用问题[J]. 土壤, 2004, 36(4): 337-339.
ZHAO Qi-guo. Land resources, mother earth: Protection, construction and sustainable utilization of the land resources of China, issues that deserve high attention[J]. *Soils*, 2004, 36(4): 337-339.
- [5] 李文誉, 李德明. 盐碱及重金属对植物生长发育的影响 [J]. 北方园艺, 2010(8): 221-224.
LI Wen-yu, LI De-ming. Effects of salinization and heavy metals stress on plant growth and development[J]. *Northern Horticulture*, 2010(8): 221-224.
- [6] Marschner P. Mineral nutrition of higher plants[M]. Third Edition. San Diego: Academic Press, 2012: 206-212.
- [7] 中华人民共和国环境保护总局. GB 15618—1995 土壤环境质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
General Administration of Environmental Protection of P. R. China. GB 15618—1995 Environmental quality standard for soils [S]. Beijing: Chinese Standards Press, 1995.
- [8] 陈树元, 徐和宝, 谢明云, 等. 铜、砷在水稻-土壤体系中的迁移及其对水稻影响的研究[J]. 农村生态环境, 1995, 11(3): 7-11.
CHEN Shu-yuan, XU He-bao, XIE Ming-yun, et al. Study on movement of Cu and As in rice-soil system and its effects on rice[J]. *Rural Eco-environment*, 1995, 11(3): 7-11.
- [9] 胡正义, 沈 宏, 曹志洪. Cu 污染土壤-水稻系统中 Cu 的分布特征[J]. 环境科学, 2000(2): 62-65.
HU Zheng-yi, SHEN Hong, CAO Zhi-hong. Distribution of Cu in soil-crop system polluted by Cu[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2000(2): 62-65.
- [10] 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.
XU Jia-kuan, YANG Lian-xin, WANG Zhi-qiang, et al. Effects of soil Cu concentration on growth and development and yield formation of rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2005, 19(3): 262-268.
- [11] Yan Y P, He J Y, Zhu C, 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(10): 1690-1696.
- [12] 袁玲花, 徐加宽, 颜士敏, 等. 土壤铜胁迫对不同粳型水稻品种产量和品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(2): 535-441.
YUAN Ling-hua, XU Jia-kuan, YAN Shi-min, et al. Effects of soil Cu stress on grain yield and quality of indica rice cultivars[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(2): 435-441.
- [13] 颜士敏, 杨洪建, 杨连新, 等. 铜污染对不同水稻品种产量及其构成因子的影响[J]. 安徽农学通报, 2008, 14(6): 67-70.
YAN Shi-min, YANG Hong-jian, YANG Lian-xin, et al. Effect of Cu contamination on grain yield and yield components in different rice cultivars[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2008, 14(6): 67-70.
- [14] 赵江宁, 王云霞, 沈春晓, 等. 土壤外源铜形态的动态变化: 5 年定位试验[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(5): 926-933.
ZHAO Jiang-ning, WANG Yun-xia, SHEN Chun-xiao, et al. Dynamic variations of distribution forms of exogenous copper in soil: A 5-years located experiment[J]. *Journal of Agro-environmental Science*, 2012, 31(5): 926-933.
- [15] 苏流坤, 袁焕祥. 土壤中铜、砷对水稻生长发育影响的研究[J]. 热带亚热带土壤科学, 1997, 6(3): 194-197.
SU Liu-kun, YUAN Huan-xiang. Effect of Cu and As on growth or rice [J]. *Tropical and Subtropical Soil Science*, 1997, 6(3): 194-197.
- [16] 徐加宽, 杨连新, 王志强, 等. 土壤铜含量对水稻氮素吸收利用及其产量的影响 [J]. 扬州大学学报 (农业与生命科学版), 2008, 29(2): 72-76.
XU Jia-kuan, YANG Lian-xin, WANG Zhi-qiang, et al. Effects of soil copper concentration on nitrogen uptake and grain yield of rice [J]. *Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition)*, 2008, 29(2): 72-76.
- [17] Smith B A, Greenberg B, Stephenson G L. Bioavailability of copper and zinc in mining soils[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2012, 62(1): 1-12.
- [18] 韩春梅, 王林山, 巩宗强, 等. 土壤中重金属形态分析及其环境学意义[J]. 生态学杂志, 2005, 24(12): 1499-1502.
HAN Chun-mei, WANG Lin-shan, GONG Zong-qiang, et al. Chemical

- forms of soil heavy metals and their environmental significance[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(12): 1499-1502.
- [19] 李云, 曹慧, 孙波. 施污土壤中铜的形态分布及其生物有效性[J]. 土壤, 2009(5): 836-839.
- LI Yun, CAO Hui, SUN Bo. Speciation and bioavailability of copper in sludge-amended soil[J]. *Soils*, 2009(5): 836-839.
- [20] Maderova L, Watson M, Paton G I. Bioavailability and toxicity of copper in soils: Integrating chemical approaches with responses of microbial biosensors[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(6): 1162-1168.
- [21] Guan T X, He H B, Zhang X D, et al. Cu fractions, mobility and bioavailability in soil-wheat system after Cu-enriched livestock manure applications[J]. *Chemosphere*, 2011, 82(2): 215-222.
- [22] Zhong X L, Zhou S L, Zhu Q, et al. Fraction distribution and bioavailability of soil heavy metals in the Yangtze River Delta: A case study of Kunshan City in Jiangsu Province, China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 198: 13-21.
- [23] 胡文. 土壤-植物系统中重金属的生物有效性及其影响因素的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2008.
- HU Wen. Heavy metal bio-availability and its affecting factors in soil-plant system[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2008.
- [24] Tang X Y, Zhu Y G, Cui Y S, et al. The effect of ageing on the bioaccessibility and fractionation of cadmium in some typical soils of China[J]. *Environment International*, 2006, 32(5): 682-689.
- [25] 王诗宇, 马义兵, 黄占斌. 外源铜和镍在土壤中的化学形态及其老化研究[J]. 中国土壤与肥料, 2009(6): 18-23.
- WANG Shi-yu, MA Yi-bing, HUANG Zhan-bin. Chemical forms of exogenous copper and nickel in field soils and the effect of aging[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2009(6): 18-23.
- [26] 周世伟, 徐明岗, 马义兵, 等. 外源铜在土壤中的老化研究进展[J]. 土壤, 2009, 41(2): 153-159.
- ZHOU Shi-wei, XU Ming-gang, MA Yi-bing, et al. Aging of exogenous copper in soils: A review[J]. *Soil*, 2009, 41(2): 153-159.

欢迎订阅 2013 年 《农业环境科学学报》

《农业环境科学学报》(原《农业环境保护》)是由农业部主管,农业部环境保护科研监测所、中国农业生态环境保护协会主办的全国性学术期刊。是中文核心期刊、中国科技核心期刊、中国科学引文数据库核心期刊,列于被引频次最高的中国科技期刊 100 名之内并入选《中国学术期刊(光盘版)》。本刊还被国外多家著名检索机构收录,如美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯《文摘杂志》(AJ),美国《剑桥科学文摘社网站:水系统、水科学与渔业文摘、环境工程、水资源文摘及环境科学与污染管理》等 7 种国际检索系统列为来源期刊。本刊主要刊登农业生态环境科学领域具有创新性的研究成果,包括新理论、新技术和新方法。读者对象为从事农业科学、环境科学、林业科学、生态学、医学和资源保护等领域的科技人员和院校师生。

《农业环境科学学报》为月刊,每月 20 日出版,大 16 开,224 页,每本定价 75.00 元,全年定价 900.00 元。国内外公开发行,全国各地邮局征订,邮发代号 6-64。如读者在当地邮局漏订,可通过邮局汇款至本刊编辑部补订。此外,编辑部存有 2010 年以前的各卷合订本,欢迎选购。

编辑部地址:天津市南开区复康路 31 号

邮编:300191

电话:(022)23674336

传真:(022)23674336

邮箱:caep@vip.163.com

网址:http://www.aes.org.cn