

Cu 污染土壤-水稻系统中 Cu 的分布特征

胡正义, 沈宏, 曹志洪(中国科学院南京土壤研究所土壤圈物质循环开放实验室, 南京, 210008 E-mail: zhyhu@issas.ac.cn)

摘要: 对太湖流域某地误用硫酸铜废水灌溉导致的污染土壤和作物体铜(Cu)含量分析表明: Cu 主要富集于表层土壤, 受 Cu 污染的表层土壤 Cu 含量是该地区非污染区的 1.6~5.1 倍. 受 Cu 污染的农田种植水稻其糙米、稻壳和稻草中 Cu 含量分别是非污染区的 11.1~4.6、18.3~3.7 和 9.3~2.3 倍. Cu 在水稻植株体分配是: 稻草> 稻壳> 糙米. 土壤 Cu 含量与稻草和稻壳 Cu 含量之间符合指数函数关系, 与糙米 Cu 含量之间符合线性函数关系. Cu 污染导致水稻减产 18%~25%; 主要是由于水稻 Cu 中毒影响水稻根系生长发育, 抑制水稻分蘖和减少有效穗数. 如果不采取治理措施, 使受 Cu 污染土壤 Cu 含量下降到该地区非污染区水平至少需要 15~92a. 因此, 对污染土地采取治理是必要的.

关键词: Cu, 土壤, 水稻, 污染, 分布, 相关性.
中图分类号: X131.3 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2000)02-0062-04

Distribution of Cu in Soil-Crop System Polluted by Cu

Zhengyi Hu, Hong Shen, Zhihong Cao(LMCP, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, 210008 E-mail: zhyhu@issas.ac.cn)

Abstract: The results of analysis of copper (Cu) in crop and soil polluted by irrigation water contained CuSO₄(12 mg·kg⁻¹) indicated that Cu was enrich in top-layer soil, and the content of Cu in polluted soil was about 1.6~5.1 times as much as that in unpolluted soil. Content of Cu in brown, shell and straw of rice grown in polluted soil were 11.1~4.6, 18.3~3.7, 9.3~2.3 times as much as that in unpolluted soil respectively. Distribution of Cu content: straw > shell > brown rice. Index equation (line equation) of relationship between content of Cu in soil and that in straw and shell of rice (brown rice) were found. Cu pollution resulted in 18%~25% decrement of rice yield because Cu poisoning of rice affected on growth of root, restrained effective tiller and decreased effective tassel. It is necessary to administer the soil polluted by Cu, otherwise it will take about 15~92 years to renew unpolluted soil under natural condition.
Keywords: Cu, soil, rice, pollution, distribution, relationship.

铜(Cu)污染引起的生态环境问题已受到人们的高度重视^[1]. 国外研究发现土壤受 Cu 轻度污染时 Cu 主要富集在表层土壤^[2]. 而偶用低浓度含 Cu 废水灌溉农田引起的土壤-作物 Cu 轻度污染则少有报道. 本研究以 1997 年江苏省太湖地区某地发生误用含 Cu 废水污灌农田导致的土壤 Cu 污染为研究对象, 研究该污染条件下土壤-植物系统 Cu 分布特征, 为制定这种条件 Cu 污染土壤修复方案和农产品处理提供依据.

1 研究方法

与非污染区水稻分蘖期生长状况比较, 将

污染区分成: 污染区(僵苗、叶发黄、分蘖少、植株高较正常区稍低; 52hm²)和重污染区(严重僵苗并有死苗、无分蘖、植株矮小; 12hm²). 分蘖期在非污染区、污染区和重污染区分别采集 3、4 和 14 个耕层土壤混合样(0~10cm)及水稻植株样品和 4 个土壤剖面样(0~10、10~20、20~40cm). 水稻成熟期在上述 3 种区分别采集水稻植株混合样 3~5 个, 分别选择 3 个 2m²小区调查水稻产量. 并抽样调查分蘖期和成熟期水稻生长性状. 土壤和植株经 HNO₃-HClO₄ 消化, 原子吸收分光光度法分别测定植株和土壤

作者简介: 胡正义(1964~), 男, 生态学博士
收稿日期: 1999-05-17

消化液中全 Cu 含量^[3].

2 结果与讨论

2.1 土壤铜含量

由表 1 可见: 污染区和重污染区表层土壤 Cu 含量分别为 19.6~ 31.5mg/kg 和 66.8~ 151.6mg/kg; 均值分别是非污染区 Cu 含量的 5.1 和 1.6 倍. 由图 1 可见, 随着剖面深度增加

土壤 Cu 含量有减少的趋势, 特别是重污染区和污染区更为明显. 重污染区、污染区和非污染区表层、次表层和第三层土壤 Cu 含量之比分别为 7.4: 1.5: 1.2. 2: 1.3: 1 和 1.3: 1.2: 1. 综上, 重污染区和污染区土壤 Cu 主要累积于表层. 该结果与国外报道 Cu 轻度污染时 Cu 在土壤剖面分布特征一致.

2.2 植株体 Cu 含量

表 1 不同程度污染区表层土壤全 Cu 含量/mg· kg⁻¹

项 目	重污染区			污染区			非污染区		
	含量范围	样本	均值	含量范围	样本	均值	含量范围	样本	均值
含量(a)	66.8~ 151.6	9	90.6	19.6~ 31.5	4	28.2	17~ 18.8	3	17.6
a/非污染区			5.1			1.6			

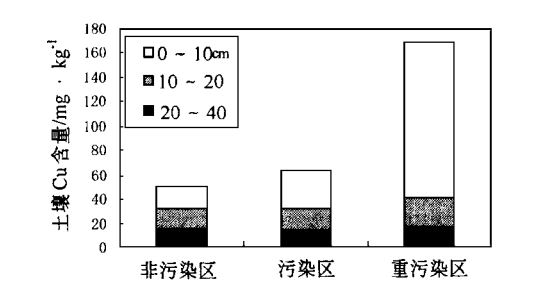


图 1 Cu 在土壤剖面中分布

由表 2 可见: 污染区和重污染区分蘖期水稻植株 Cu 含量分别为 34.2~ 66.3mg/kg 和 101.4~ 226.5mg/kg, 其均值分别是非污染区水稻植株 Cu 含量 3.5 和 12.5 倍. 一般植物 Cu 中毒时植株 Cu 含量为 20mg/kg^[4]. 因此, 污染区和重污染区生长的水稻已处于 Cu 中毒状态. 水稻分蘖期植株 Cu 含量与

表层土壤全 Cu 含量之间符合指数函数关系 (图 2). 据此可推算出该地区土壤生长的水稻 Cu 过剩时土壤全 Cu 含量大约为 27mg/kg, 相当于非污染区表层土壤 Cu 含量 1.5 倍(表 1).

由表 3 可见, 重污染区和污染区种植的水稻, 其糙米 Cu 含量分别为 18.2~ 13.0mg/kg 和 4.4~ 11.2mg/kg; 其均值分别是非污染区种植的水稻糙米 Cu 含量的 11.1 和 4.6 倍, 是太湖流域糙米 Cu 含量背景值 4.4 和 1.8 倍^[1], 重污染区和污染区种植的水稻, 其稻壳 Cu 含量分别为 114.5~ 151.9mg/kg 和 9~ 25.3mg/kg; 其均值分别是非污染区种植的水稻稻壳 Cu 含量的 18.3 和 3.7 倍. 重污染区和污染区种植的水稻, 其稻草 Cu 含量分别为 68.3~ 134.4mg/kg 和 27.8~ 40mg/kg; 其均值分别

表 2 不同程度污染区水稻分蘖期植株 Cu 含量/mg· kg⁻¹

项 目	非污染区			污染区			重污染区		
	含量范围	均值	样本	含量范围	均值	样本	含量范围	均值	样本
Cu 含量(A)	11.8~ 13.6	12.7	4	34.2~ 64.3	44.9	2	101.4~ 226.5	159	5
A/非污染区				3.5			12.5		

表 3 不同程度污染区成熟期水稻植株铜含量/mg· kg⁻¹

污 染 区	糙 米			稻 壳		稻 草		植株体铜分配 稻草: 稻壳: 糙米	
	Cu 含量(a)	a/Cu背景值 ¹⁾	a/Cu非污染区	Cu 含量(b)	b/Cu非污染区	Cu 含量(c)	c/Cu非污染区		
重污染区	15.5(18.2~ 13) ²⁾	4.4	11.1	133.2(114.5~ 152)	18.3	134.4(68.3~ 134)	9.3	8.7:	8.6: 1
污染区	6.4(4.4~ 11.2)	1.8	4.6	26.8(9~ 25.3)	3.7	33.9(27.8~ 40)	2.3	5.3:	4.2: 1
非污染区	1.4(1.1~ 1.6)	0.4		7.3(5.6~ 9.1)		14.5(11.8~ 14.5)		10.5:	5.3: 1

1) 太湖流域糙米 Cu 含量背景值为 3.5, 2) 括号内数据为 Cu 含量范围

是非污染区种植的水稻草 Cu 含量的 9.3 和 2.3 倍.

目前尚无糙米 Cu 允许含量食品卫生标准,不能按标准严格评判污染水稻食用价值.一般水稻糙米 Cu 含量范围为 0.8~6mg/kg,稻谷 Cu 含量范围为 9.6~13.9mg/kg^[4].据此,污染区水稻尚可食用,而重污染土壤生长水稻的稻谷和糙米铜含量都远大于此范围,因此,重污染区稻谷可能已失去直接食用价值.为了减少损失,重污染区稻谷可作为添加剂加入饲料中.一般稻草 Cu 含量范围为 2.9~3.8mg/kg^[4].该地区非污染区种植的水稻稻草 Cu 含量都超过此范围,可能与该地区建有较多铜铎厂有关.该地区非污染区稻草是否可长期用于牲畜饲料有待探讨,污染区和重污染区稻草不应作为牲畜(如牛)饲料,以免发生牲畜 Cu 中毒.

水稻植株体 Cu 含量分配规律是:稻草>稻壳>糙米(表 3).该结果与国外已有报道一致^[5,6].单位面积稻草 Cu 输出量占水稻植株体地上部分 Cu 输出量 80%左右(表 5).因此,应加强污染区稻草管理,建议污染区稻草集中在一处(如砖瓦厂)焚烧,以防稻草直接还田而延缓污染土地恢复.

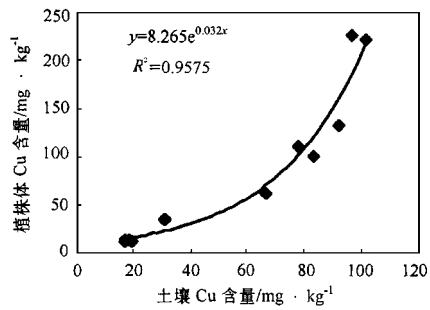


图 2 土壤 Cu 含量与分蘖期水稻植株体 Cu 含量关系

由图 2、3 可见,水稻分蘖期植株体 Cu 含

量、成熟期稻草和稻壳 Cu 含量与土壤 Cu 含量都符合指数函数关系,糙米 Cu 含量与土壤 Cu 含量则符合直线函数关系.这些有助于探讨土壤 Cu 污染与作物生长之间数量关系,根据糙米 Cu 含量食用标准、稻草作饲料 Cu 含量标准可推出该地土壤允许 Cu 含量范围.

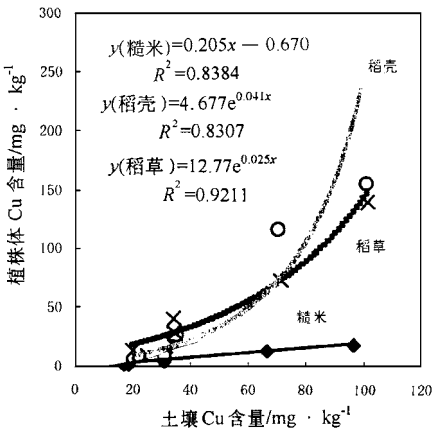


图 3 土壤 Cu 含量与成熟期水稻植株体 Cu 含量关系

2.3 土壤铜污染对水稻生长及产量影响

由表 4 可见,重污染区和污染区稻谷产量分别是非污染区的 75% 和 82%.Cu 污染减产原因是由于 Cu 过量影响水稻根系生长发育、正常分蘖和水稻生长.本研究发现重污染区和污染区分蘖期根数是正常区 31.5% 和 79%,这可能是 Cu 过量引起的有毒物质过氧化氢增加的缘故^[7].重污染区和污染区水稻白根率显著低于正常区,可能是硫化铜在根表沉积.因为本次 Cu 污染是由于误用硫酸铜废水引起,在厌氧条件下硫化铜易形成.污染区水稻无分蘖,这是导致铜污染生长水稻有效穗数减少 20% 的主要原因(表 4).重污染区和污染区分蘖期水稻株高分别是非污染区 53% 和 82%;成熟期水稻株高是非污染区 78% 和 93%(表 4).这是由

表 4 Cu 污染对水稻生长及产量的影响

污 染 程 度	分蘖期					成熟期				
	分蘖数	株高/cm	根数	白根 ¹⁾ /%	最长根长/cm	株高/cm	穗长/cm	穗数/hm ²	结实粒	产量/t·hm ⁻²
非污染区	3	39	95	32	15	90	15.5	334.8	97	8.61
污染区	0	32	75	21	10	84	14.5	266.1	96	7.09
重污染区	0	21	30	20	5	70	15.2	271.2	94	6.44

1) 白根占总根数的百分数

表 5 铜污染土地自然恢复年限估算

项 目	非污染区			污染区			重污染区		
	糙米	稻壳	稻草	糙米	稻壳	稻草	糙米	稻壳	稻草
一季水稻产量/ $t \cdot hm^{-2}$	9.6	2.4	12.0	7.2	1.8	9.0	1.8	0.45	2.25
植株体铜浓度/ $mg \cdot kg^{-1}$	1.38	7.27	14.49	6.37	26.8	33.9	15.52	133.2	134
植株体铜含量/ $g \cdot hm^{-2}$	13.25	17.45	173.9	45.9	48.2	305	27.9	59.9	302
(占地上部分百分数)	(6.5)	(8.5)	(85.0)	(11)	(12)	(77)	(7)	(16)	(77)
植株体铜输出量/g		204.6			399.2			390.3	
耕层土壤铜浓度/ $mg \cdot kg^{-1}$		17.5			28.2			81.6	
耕层土壤 Cu 含量 ¹⁾ / $kg \cdot hm^{-2}$		39.4			63.5			183.6	
(污染区-非污染区)		0			24.1			144.2	
自然恢复年限 ²⁾					15			92	

¹⁾耕层土壤每 hm^2 按 2250t 计 ²⁾一年二季作物, 每年作物输出铜不变; 假定每年淋失铜相当于作物输出铜.

于铜中毒严重影响水稻根系生长发育, 从而影响水稻对养分吸收; 铜过量时导致水稻对养分不平衡吸收可能也是原因之一.

2.4 铜污染土地恢复措施探讨

由表 5 可见, 假如每年种二季作物, 即每年淋失的 Cu 与作物地上部分吸收的 Cu 含量相当. 使重污染区和污染区表层土壤 Cu 含量下降到非污染区水平分别需要 15a 和 92a. 因此, 有必要对 Cu 污染土地进行治理, 以发挥土地应有价值.

土壤 Cu 污染治理措施如施用改良剂、工程措施、生物措施和农业措施等^[8]. 调查发现污染区 Cu 污染程度较轻, 且 Cu 集中于 0~10cm 土层, 面积占总污染面积 80%. 建议采取工程与农业措施相结合方法. 如在污染区农田施一定量 EDTA 结合淹水, 使耕层铜淋洗到剖面下部; 也可采取翻土法使表层 Cu 分散到更深土层. 在此基础上结合农业措施, 如增施有机肥提高土壤环境容量, 选择抗 Cu 作物品种. 重污染区面积较小, 土壤 Cu 含量高, Cu 累积在表层和次表层土壤. 建议改为非农业用地或改变耕作制度, 如改种非食用植物(花卉、棉化等).

参考文献

1 陈怀满. 土壤-植物系统中的重金属污染. 北京: 科学出版社, 1996: 22~ 23, 168~ 189.

2 Lepp N W et al. Patterns of soil copper contamination and temporal changes in vegetation in the vicinity of a copper rod rolling factory. Environmental Pollution, 1997, **95** (3): 363~ 369.

3 刘光松. 中国生态系统研究网络观测与分析标准方法, 土壤理化分析与剖面描述. 北京: 中国标准出版社, 1996. 65~ 67.

4 刘铮. 微量元素的农业化学. 北京: 农业出版社, 1991. 250~ 252.

5 Lidon F C, Henriques F S. Effects of copper toxicity on growth and the uptake and translocation of metals in rice plants. Journal of Plant Nutrition, 1993, **16**(8): 1449~ 1464.

6 Abuzid M M, Obukhov A I. Copper pollution on plants and the uptake of heavy metals by corn seedlings. Moscow University Soil Science Bulletin, 1992, **47**(3): 37~ 39.

7 刘文彰, 孙典兰. 铜的过剩与不足对棉花幼苗生长、酶的活性及植物内铜的累积的影响. 河北农业大学学报, 1986, **9**(1): 45~ 50.

8 李永涛, 吴启堂. 土壤重金属污染治理措施综述. 热带亚热带土壤科学, 1997, **6**(2): 134~ 139.