

551-556

第19卷第4期
1999年7月生态学报
ACTA ECOLOGICA SINICAVol. 19, No. 4
July, 1999

稻草和紫云英对土壤外源铜的形态及生态效应的影响

S154.4

王果, 陈建斌, 高山, 许光明, 黄功标

(福建农业大学土地与环境学系, 福州 350002)

摘要: 研究稻草和紫云英对红壤和潮土中外源铜的形态及其对水稻有效性的影响。结果表明稻草和紫云英均显著降低了交换铜的含量, 提高了紧有机结合态和无定形氧化铁结合态铜的含量, 交换态铜含量与土壤 pH 值及有机态铜含量呈显著负相关。稻草和紫云英显著地抑制了水稻根对铜的吸收, 但在一定程度上促进了根铜向茎叶及茎叶铜向谷粒迁移。稻草显著降低了糙米中铜的含量, 紫云英降低潮土处理糙米中铜的含量但对红壤处理的糙米的铜含量则没有显著影响。

关键词: 稻草; 紫云英; 土壤; 铜; 形态; 生态效应

Influence of application of rice straw and Chinese milk vetch on the species and ecological effect of added copper in two soils

WANG Guo, CHEN Jian-Bin, GAO Shan, XU Guang-Ming, HUANG Gong-Biao (Dept. of Land & Environmental Science, Fujian Agricultural University, Fuzhou, 350002, China)

Abstract: The effect of application of rice straw and Chinese milk vetch on the species and ecological effect of added copper in a red soil and a fluvo-aquic soil was studied by pot experiments. The two organic materials both significantly reduced the content of exchangeable Cu while increased stably organic-bound Cu and amorphous Fe-bound Cu. The contents of exchangeable Cu were negatively correlated with pH and the contents of stably organic-bound Cu. Rice straw and Chinese milk vetch significantly inhibited the Cu absorption of rice root whereas enhanced the migration of Cu from root to stem and leaves, and from stem and leaves to grains to some extent. Cu contents in grains were decreased by applying rice straw. Applying Chinese milk vetch did not affect Cu contents in grains by red soil treatments while lowered those by fluvo-aquic soil treatment.

Key words: application; rice straw; Chinese milk vetch; rice; ecological effect; copper; soil

文章编号: 1000-0933(1999)04-0551-06 中图分类号: X131.3 文献标识码: A

铜既是重金属污染元素又是必要的营养元素。过量的土壤铜不仅影响农作物的生长及其产量, 更为严重的是将通过食物链对人畜的健康产生危害。有机物料是改良污染土壤的常用物质。由于铜与有机肥相互作用较强, 所以有机物料对土壤中的铜的化学行为及其在土壤-植物系统、乃至整个生态系统中的迁移均具有较显著的影响。施用有机物料常被认为是抑制土壤铜活性、降低植物对铜吸收、控制过量铜在生态系统中转移的措施之一。但已有的一些研究表明, 有机物料对土壤铜活性及其在土壤-植物系统中迁移的影响比较复杂, 它们可能降低土壤铜的有效性, 也可能增加土壤铜的有效性或没有明显影响^[1-4]。有机物料的不同效应可能与有机物料及土壤的性质、铜的水平和植物种类等因素均有关系, 但目前对不同条件下有机物料对铜的生物有效性的研究仍有限。为了进一步了解有机物料对土壤铜化学活性及生物有效性的影响, 对我国水田常用的有机质-稻草和紫云英对铜在淹水条件下的形态及其对水稻的有效性进行了研究。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 49671048)

收稿日期: 1997-10-02; 修订日期: 1998-06-06

1 材料与方法

1.1 供试土壤与有机肥

1.1.1 供试土壤 供试土壤分别为红壤(南平市夏道镇,花岗闪长岩母质)和潮土(福州市乌龙江边,冲积母质),取样深度均为20cm。土壤风干后研碎备用。供试土壤的基本性状见表1。

1.1.2 供试有机肥 供试有机肥包括稻草和紫云英。

稻草,1995年取自本校实验地晚稻稻草。经风干,70~80℃烘干,粉碎,备用。紫云英,1996年春取自闽侯县城关,经风干,70~80℃烘干,粉碎,备用。

1.2 研究方法

1.2.1 盆栽试验 试验对红壤和潮土分别设3个处理,各处理重复6次。每盆加风干土1.2kg,干有机质加入量为土重的2%,Cu的加入量为100mg/kg土。将土壤、有机质和CuCl₂溶液搅拌均匀,加水至田间持水量的60%,搅拌均匀,装盆,室内培养1周后移至玻璃房,加入去离子水和NPK营养液(三要素加入量:N=0.15g/kg;P=0.044g/kg;K=0.125g/kg),保持2~

3cm的水层,培养1周后插秧(1996-08-06播秧,汕优63,早育秧,秧龄38d),每盆2株。整个生育期均用去离子水浇灌,并始终保持2~3cm的水层。各处理分别在分蘖盛期(9月上旬)和成熟期(11月上旬)各取两盆进行土壤重金属形态和植株重金属含量分析,其余两盆备用。

1.2.2 土壤和植株分析 整盆(植株带土)端回室内,将土壤和稻株倒入一干净瓷盘中,小心将土壤与稻根分离。土壤的一半晾干,研细备用;另一半置于一干净烧杯中,供土壤铜形态测定用。将稻株分成根、茎叶和籽粒(成熟期)等部分。根系先用自来水洗净,再用蒸馏+离子交换水冲净。茎叶先用稀盐酸擦洗,再用蒸馏+离子交换水冲净。籽粒先用自来水洗净,再用蒸馏+离子交换水洗净。所有植株样品均在70℃下烘干,备用。烘干籽粒用手剥去谷壳,备用。

土壤铜形态采用新鲜土壤进行。将烧杯中的新鲜土壤制成含水量约为100%的土浆(最后须再烘干法准确测定含水量),然后用连续提取法测定下列形态铜含量。交换态(含水溶态)铜,用1mol/L MgCl₂溶液(pH7.0)提取;松有机质结合态铜,用0.1mol/L Na₄P₂O₇+0.5mol/L Na₂SO₄混合溶液(pH9.5)提取;氧化锰结合态铜,用0.1mol/L NH₂OH·HCl(pH2.0)提取;紧有机质结合态铜,用浓H₂O₂(pH2.0)提取;无定形铁结合态铜,用0.175mol/L(NH₄)₂C₂O₄+0.14mol/L H₂C₂O₄(pH3.25)提取;残余态(含晶形铁结合态)铜用残余土样烘干、称重、磨细后,HCl-HNO₃-HClO₄消化测定。具体分析程序见文献[6]。植株各部分用HNO₃-HClO₄消化后测定。铜含量用原子吸收分光光度计测定。分析所用器皿均用硝酸溶液浸泡过夜。所有分析均两次重复。数理统计均在SAS软件上进行^[7]。

2 结果与讨论

2.1 土壤中铜形态分布

2.1.1 分蘖期土壤铜形态分布 从表3可知,在不添加有机物的条件下(JKU处理),分蘖期外源铜在潮土中主要以松有机结合态存在,其次是交换态、紧有机结合态、无定形铁结合态和氧化锰结合态,这表明外源铜主要与结构较简单的有机物质结合形成易被提取的有机-铜络合物。红壤在未添加有机物的条件下(XKU处理),各形态铜分配顺序是:交换态>松有机结合态>无定形铁结合态>紧有机结合态>氧化锰

表1 供试土壤的基本性状*

Table 1 Basic properties of the soils studied*

土壤性状 Soil properties	红壤 Red soil	潮土 Fluvo-aquic soil
pH(H ₂ O)	5.01	5.78
粘粒 Clay(g/kg)	437.0	138.9
有机质 O. M. (g/kg)	15.3	11.4
CEC (cmol/Kg)	6.13	5.67
游离铁 Free Fe(g/kg)	27.94	20.87
全铜 Total Cu(mg/Kg)	23.20	22.15

*表中数据为<1mm土壤的分析结果。The data in this table were those of <1mm fractions. 粘粒 Clay <0.002mm.

表2 供试有机物料元素含量

Table 2 Contents of some elements of the organic materials

有机物料 Organic material	Cu	Cd	Zn	Fe	Mn	Ca	C	N
	(mg/kg)			(g/kg)				
稻草 Rice straw	34.29	tr.	99.75	0.26	0.87	3.12	385.2	7.90
紫云英 Chinese mulk vetch	23.38	1.53	102.9	0.28	0.17	5.86	435.3	40.9

结合态。比较XKU和JKU两个处理可知,两种土壤的交换态、松有机结合态、紧有机结合态和无定形铁结合态铜含量均存在显著差异。XKU处理中,铜在松有机结合态和紧有机结合态的分配比例比潮土低,但在交换态和无定形铁的分配比例则比潮土高。从表1可知,潮土无论是有机质全量或腐殖酸、胡敏酸的含量都低于红壤,因此其较高的有机结合态铜很可能与潮土较高的pH有关,即潮土较高的pH值促进了有机质与铜的结合。红壤的CEC和游离铁含量均高于潮土(表1),故红壤的交换态和无定形铁结合态铜的分配比例均高于潮土。潮土添加稻草后(JDU处理),松有机结合态铜含量显著下降,而紧有机结合态铜则显著升高,这表明稻草在潮土中有利于紧有机结合态铜的形成。红壤添加稻草后(XDU处理),松有机结合态铜含量略有升高,紧有机结合态则显著升高。可见稻草在两种土壤中均显著地促进了紧有机结合态铜的形成,但对松有机结合态铜的影响在两种土壤中却不同,这可能与稻草在不同土壤条件下的分解产物不同有关。稻草显著地提高了潮土中无定形铁结合态铜的分配比例,但显著地降低了红壤中无定形铁结合态铜的分配比例,这进一步证明同种有机物料在不同土壤条件下对铜形态分布的不同影响。添加稻草对两种土壤氧化锰结合态铜含量均未产生显著影响。添加紫云英对铜的形态变化的影响与稻草有很大不同。潮土和红壤添加紫云英后,交换态铜均呈极显著下降,表明紫云英比稻草更能有效地降低交换态铜含量。添加紫云英使潮土松有机结合态,紧有机结合态和无定形铁结合态铜含量均显著升高,使红壤的松有机结合态和无定形铁结合态铜显著降低。从表3可见,稻草和紫云英对交换态和松有机结合态铜含量影响有显著差异。

表3 分蘖期新鲜土壤各形态铜含量(mg/kg)*

Table 3 Cu contents of various forms of fresh soil samples in tillering stage

处理**	交换态	松有机结合态	紧有机结合态	无定形铁态	氧化锰结合态	pH
Treatment	Exch.	Lob.	Sob.	Am Fe.	Mn.	(H ₂ O)
JKU	27.39bB	41.90bB	22.01cC	7.30dC	0.84abA	5.05
JDU	14.47cC	20.37eE	47.03aA	17.77abA	0.96aA	5.84
JZU	0.78dD	46.56aA	34.94bB	16.07abAB	0.37bB	5.86
XKU	35.04aA	28.23cC	10.34dD	18.96aA	0.96aA	5.39
XDU	17.59cC	31.36cC	39.71bAB	10.54dcBc	0.47abA	5.44
XZU	3.79dD	24.34dD	49.80bA	14.17bcAB	0.54abA	6.23

* 多重比较采用Duncan法,小写字母为0.05显著水平,大写字母为0.01显著水平,处理之间有相同字母者差异不显著。Duncan's Multiple Range test was used to determine differences among treatments. All values in the same column with the same capital or small letter are not significantly different at the 1% or 5% level of significance, respectively.

** JKU:潮土+铜 fluvo-aquic soil+Cu; JDU:潮土+稻草+铜 fluvo-aquic soil+rice straw+Cu; JZU:潮土+紫云英+铜 fluvo-aquic soil+Chinese milk vetch+Cu; XKU:红壤+铜 red soil+Cu; XDU:红壤+稻草+铜 red soil+rice straw+Cu; XZU:红壤+紫云英+铜 red soil+Chinese milk vetch+Cu.

表4的结果表明,分蘖期交换态铜与紧有机结合态存在较显著的负相关。把松有机结合态和紧有机结合态合为有机态进行统计,则交换态铜与有机态和无定形铁结合态呈显著的负相关。这表明在添加有机物料的条件下,交换态铜的消长与有机态和无定形铁结合态铜的消长有着较密切的关系,有机分解产物有可能与重金属形成难溶性的有机重金属络合物或形成硫化物而直接影响土壤重金属的形态分配^[8,9],也可能通过土壤酸度、氧化还原电位、CEC以及其它土壤化学性质(如土壤氧化铁、氧化锰和氧化硅的活性)而间接影响土壤重金属的形态分配^[10-12]。表4的结果还表明,分蘖期交换态铜含量与pH呈显著负相关。从表3和表5可知,添加有机物料提高了土壤的pH值。pH的升高促进了铜的沉淀,故交换态铜含量下降。

2.1.2 成熟期土壤铜的形态分布 从表5可见,JKU处理中各形态铜含量顺序是:紧有机结合态>松有机结合态>无定形铁结合态>交换态>氧化锰结合态。与分蘖期相比,交换态和松有机结合态铜的分配比例显著降低,紧有机态和无定形铁结合态的分配比例显著升高。这表明随着时间的推移,潮土中结合态铜逐渐向着紧有机结合态和无定形铁结合态转化;松有机结合态铜的减少则可能是原来结构较简单的有机铜化合物逐渐向着结构较复杂、更难被提取的紧有机结合态铜的转化。JDU处理与分蘖期相比,交换态含

量显著降低,无定形铁结合态含量显著升高,表明部分的交换态铜已向无定形铁结合态转化;松有机结合态和紧有机结合态变化不大,这可能反映了潮土中稻草分解产物性质在这一时期相对稳定。从分蘖期到成熟期,JZU处理的交换态铜比例略有提高,紧有机结合态铜和无定形铁结合态铜比例显著升高,松有机结合态铜比例显著降低,表明随着时间的推移,松有机结合态铜逐渐向紧有机结合态和无定形铁结合态转化。与分蘖期相比,XKU处理的交换态、松有机结合态和无定形铁结合态铜的含量显著降低,紧有机结合态铜的含量则大幅度升高(表3,表5)。随着时间的推移,红壤中的铜逐渐向紧有机结合态转化。与XKU相比,XDU处理的交换态、松有机结合态铜比例下降,而紧有机结合态和无定形铁结合态铜的比例则升高。与分蘖期相比,成熟期XDU处理的交换态和松有机结合态铜的含量显著降低,紧有机结合态的含量基本不变,而无定形铁结合态的含量则显著升高。与分蘖期相比,XZU处理的松有机结合态和紧有机结合态铜的含量显著降低,而无定形铁结合态铜的含量则大大提高。紫云英前期分散产物与铜结合而形成的松有机结合态铜,随着时间的推移逐渐向无定形铁结合态转化。从表5可知,在成熟期稻草和紫云英对两种土壤铜形态影响的差异均不显著。比较表3和表5可知,两种有机物料在分蘖期对铜形态的影响有较显著的差异,但这种差异随着时间的推移而逐渐淡化。从表4可知,成熟期交换态铜的含量仅与无定形铁结合态呈显著负相关,说明从分蘖期到成熟期,交换态铜的消长与无定形铁结合态铜的消长密切相关。表4还表明,成熟期交换态铜含量与pH呈极显著负相关,与分蘖期一样,pH的变化依然是交换态铜消长的重要影响因素。

表4 土壤交换态铜与其它形态铜含量及pH之间的回归分析结果

Table 4 Regression analysis between Cu contents of exchangeable form and other forms and pH

生长期 Stage	回归方程** Regression equation	F	P	N
分蘖期 Tillering	$Y = 40.1587 - 0.6961X_2$	7.10	0.056	6
	$Y = 93.7630 - 0.9133X'_1 - 1.1946X_1$	28.34	0.011	6
	$Y = 160.3542 - 25.5269pH$	7.75	0.049	6
成熟期 Mature	$Y = 37.6795 - 1.1657X_3$	18.06	0.013	6
	$Y = 37.6795 - 1.1657X_4$	18.06	0.013	6
	$Y = 179.3812 - 28.1016pH$	41.54	0.003	6

* Y = 交换态 exchangeable Cu; X_1 = 松有机结合态 loosely organic-bound Cu; X_2 = 紧有机结合态 stably organic-bound Cu; X_3 = 无定形铁态 amorphous Fe-bound Cu; X_4 = 氧化锰态 Mn oxide-bound Cu; X'_1 = 松有机结合态 + 紧有机结合态 Lob-Cu + Sob-Cu; ** 用直线回归法对交换铜与pH之间的关系进行分析;其余用逐步回归法(stepwise regression)进行分析。Stepwise regression was used to determine the relationship between exch-Cu and other forms of Cu while linear regression was used to determine that between exch-Cu and pH.

表5 成熟期新鲜土壤各形态铜含量(mg/kg)

Table 5 Cu contents of various forms of fresh soil samples in mature stage

处理 Treatment	交换态 Exch.	松有机结合态 Lob.	紧有机结合态 Sob.	无定形铁态 Am Fe.	氧化锰结合态 Mn.	pH (H ₂ O)
JKU	18.70aAB	24.87aA	30.25cA	20.41abAB	1.20aA	5.61
JDU	1.76bC	18.34bcAB	50.94aA	30.41aA	0.62bDC	6.23
JZU	4.72bC	13.76cB	44.59abA	31.34aA	0.36cD	6.16
XKU	24.61aA	25.75aA	29.39cA	11.98bB	0.71bBC	5.63
XDU	4.05bBC	20.65abBC	41.65abcA	24.50abAB	1.02aAB	6.32
XZU	8.26bBC	17.33cB	33.72bcA	22.03aAB	0.98aAB	6.14

2.2 稻草和紫云英对铜的吸收及其运转的影响

稻草和紫云英均极显著地抑制分蘖期和成熟期水稻根对铜的吸收(表6),这些处理的水稻根系对土壤铜的富集能力极显著地降低(表7)。分蘖期根铜含量与土壤松有机结合态和紧有机结合态铜含量呈显著负

相关(表 8),表 4 结果表明分蘖期交换态铜与有机态铜含量呈显著负相关,添加稻草和紫云英提高了分蘖期有机态铜含量,降低了交换态铜含量,从而减少了水稻根系对铜的吸收。但不论是逐步回归或简单回归,分蘖期根铜含量与交换态铜含量均未达到显著相关,这可能与样品数偏少有关。成熟期根铜含量与氧化锰结合态和交换态铜呈显著正相关(表 8),表明交换态铜和氧化锰结合态铜对水稻吸收铜的贡献。不同处理条件下,进入水稻根系的铜往地上部转移的状况不同。从表 7 可知,添加稻草和紫云英促进了潮土处理的水稻根铜往茎叶以及茎叶铜往谷粒的迁移,由于稻草和紫云英大幅度地抑制了根系对铜的吸收,这两种处理谷粒的铜含量仍然显著地低于对照处理(表 6)。红壤的情况比较复杂,稻草降低了根系铜往茎叶的迁移但紫云英却促进了根系铜往茎叶的迁移,稻草和紫云英均促进了茎叶铜向谷粒的迁移。稻草显著降低红壤上糙米铜含量,而紫云英则未显著影响谷粒铜的水平(表 6)。逐步回归分析表明,糙米铜含量与茎叶铜含量呈极显著正相关($Y=6.3174+0.1265X_2, F=28.88, P=0.006$, Y :糙米铜含量, X_2 :茎叶铜含量)。

表 6 分蘖和成熟期水稻各部位铜含量(mg/kg)

Table 6 Cu contents of root, stem and leaf, and grain of rice in tillering stage and mature stage(mg/kg)

处理 Treatment	分蘖期 Tillering stage		成熟期 Mature stage		
	根 Root	茎叶 Stem-leaf	根 Root	茎叶 Stem-leaf	籽粒 Grain
JKU	405.0 aA	37.92 bB	231.9 bA	48.59 bABC	14.13 abA
JDU	51.55 eD	14.75 dD	27.10 dC	14.60 cC	7.60 cA
JZU	116.7 dDC	17.78 dD	58.89 cB	18.18 cC	7.37 cA
XKU	310.2 bB	65.39 aA	254.1 aA	63.78 aA	15.48 aA
XDU	159.4 cC	28.53 cBC	106.8 cB	26.22 cBC	10.30 bcA
XZU	103.6 dDC	27.38 cC	120.8 cB	57.68 bAB	14.52 abA

表 7 分蘖期和成熟期水稻根、茎叶和糙米对铜的富集系数及浓度化

Table 7 Cu enrichment coefficients (EC) and concentration ratios (CR) of different parts of rice in both tillering and mature stages

处理 Treatment	根富集系数(EC)*		浓度比(CR)**			
	分蘖期 Tillering	成熟期 Mature	分蘖叶/根 Leaf/root tillering	成熟叶/根 Leaf/root mature	糙米/根 Grain/root	糙米/茎叶 Grain/leaf
JKU	3.32 aA	1.90 aA	0.09 d	0.21 b	0.06 d	0.29 bc
JDU	0.42 eE	0.22 bB	0.29 a	0.54 a	0.28 a	0.52 a
JZU	0.95 dDC	0.48 bAB	0.15 dc	0.31 b	0.13 b	0.34 b
XKU	2.52 bB	2.06 aA	0.21 bc	0.33 b	0.06 d	0.19 c
XDU	1.29 cC	0.86 bAB	0.18 c	0.25 b	0.10 c	0.39 b
XZU	0.84 dDE	0.98 bAB	0.29 ba	0.48 a	0.12 b	0.30 b

* 富集系数=某器官铜含量/土壤总铜含量 Enrichment coefficient=Cu concentration in one part/Total Cu concentration in soil. ** 浓度比=茎叶(或糙米)铜含量/根铜含量 Concentration ratio=Cu concentration in one part/Cu concentration in root

表 8 水稻和部位铜含量与土壤各形态铜含量之间的逐步回归分析结果*

Table 8 Stepwise regression analysis between Cu contents of different rice parts and different soil forms

生长期 Stages	逐步回归方程 Stepwise regression equation	F	P	N
分蘖期 ^①	$Y=657.0718-7.6766X_2-14.5184X_3$	26.25	0.013	6
成熟期 ^②	$Y=-17.2458+8.8972X_1+71.6851X_5$	105.94	0.002	6

* Y =根铜含量 Cu in root; X_1 =交换态 exchangeable Cu; X_2 =松有机结合态 loosely organic-bound Cu; X_3 =紧有机结合态 stably organic-bound Cu; X_4 =无定形铁结合态 amorphous Fe-bound Cu; X_5 =氧化锰结合态 Mn oxide-bound Cu; ①Tillering stage ②Mature stage

3 小结

3.1 施用稻草和紫云英对红壤和潮土中外源铜的形态有显著影响,显著降低了交换态铜,而显著提高了紧有机结合态和无定形铁结合态铜;稻草和紫云英对松有机结合态铜的影响在水稻分蘖期表现较复杂,而在水稻成熟期则显著地降低了松有机结合态铜的比例。

3.2 稻草和紫云英对土壤外源铜形态的影响随时间而变,从水稻分蘖期到水稻成熟期,稻草处理的土壤交换态铜含量逐渐减少,而紫云英处理的土壤交换态铜则逐渐升高;两种有机物料处理的土壤松有机结合态铜均减少,紧有机结合态铜有所升高,无定形铁结合态则显著升高。

3.3 交换态铜含量与pH值及有机结合态铜含量呈显著负相关,表明土壤交换态铜含量的变化与土壤pH值以及有机态铜含量的变化有较密切的关系。

3.4 稻草和紫云英对土壤外源铜的生态效应有显著影响,二者均显著地抑制了水稻根系对铜的吸收,但在一定程度上促进根铜向茎叶以及茎叶铜向谷粒转移。稻草显著降低了糙米中铜含量,紫云英对潮土处理糙米中铜含量影响较显著。从抑制铜吸收、减少土壤铜不良生态效应角度考虑,稻草比紫云英更为有效。

上述结果表明,以往的仅仅从有机物料本身或仅从土壤条件出发来考虑某种有机物料对铜污染土壤的改良效果是不全面的,应该将有机物料、土壤条件、作物条件、栽培条件以及产品性质综合起来考虑,才有可能确定合理的改良方案,获得较佳的改土效果和生态效应。

参考文献:

- [1] Payne G G, *et al.* Availability and the form of copper in three soils following eight annual applications of copper-enriched swine manure. *J Environ Qual.* 1988, 17:740~746.
- [2] Bijay Singh, *et al.* Effect of green manure, wheat straw and organic manures on DTPA extractable Fe, Mn, Zn and Cu in a calcareous sandy loam soil at field capacity and under water logged conditions. *J. of the Indian Society of Soil Science.* 1992, 40: 114~118.
- [3] Warman P R. Effects of animal manures and clover intercrops on bar ley and corn yields and on tissue and soil copper, manganese and zinc. *Biological Agriculture and Horticulture.* 1990, 6:313~324.
- [4] Elgala A M, Aly O M and Elsikhry E M. Effect of certain soil amendments on the availability of Fe, Mn, Zn and Cu to sorghum plants grown in sandy soil. *Egyptian J. of Soil Science,* 1990, 30: 301~312.
- [5] Chang C, Janzen H H and Entz T. Long-term manure application effects on nutrient uptake by barley. *Canadian J. of Plant Science.* 1994, 74:327~330.
- [6] 郑绍建,胡鸾堂.淹水对污染土壤铜形态转化的影响.环境科学学报,1995,15:142~147.
- [7] 卢蛟岱,金水高. SAS/PC 统计分析软件实用技术.北京:国防工业出版社,1996.
- [8] 莫尔维德特 J J, 林赛 W L, 吉尔达诺 P M. 见:中国农业科学院土壤肥料研究所编译.农业中的微量元素.北京:农业出版社,1984. 61~85.
- [9] McBride M B. *Environmental Chemistry.* New York, Oxford, Oxford University Press. 1994, 121~167.
- [10] Shuman L M. Effect of organic matter on the distribution of manganese, copper, iron, and zinc in soil fractions. *Soil Science.* 1988, 146:192~198.
- [11] Sims J L and Patrick Jr W H. The distribution of micronutrient cations in soil under conditions of varying redox potential and pH. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1978, 42: 258~262.
- [12] Lu K L, Pulford I D and Duncan H J. Influence of waterlogging and lime or organic matter additions on the distribution of trace metals in an acid soil; 2. zinc and copper. *Plant Soil.* 1981, 59:327~333.