

永久性及其长期渍水的水稻土中铜的 供给情况和铜肥的效果*

徐俊祥

董文瑞

(中国科学院南京土壤研究所)

(安徽省旌德县农业局)

摘 要

本试验于 1982 年在皖南山地丘陵区进行,结果表明: 1. 永久性渍水的水稻土上用 0.1% 的硫酸铜沾秧根或 0.5 公斤/亩作基肥,对水稻均有明显的增产效果,增产幅度为 5.2—41.4%,平均每亩增产稻谷 45 公斤。2. 施铜增产的永久性渍水水稻土通常 Eh 更低(74mV); 有机质分解缓慢而含量高(3.99%);有效铁含量也很高(317ppm);有效铜含量低(1.24ppm) 3. 铜与铁有显著的拮抗作用,即水稻植株中铜、铁含量有较好的直线负相关($r = -0.7725^{**}$),土壤中有有效 Fe/Cu 比值与植株体内的 Fe/Cu 比值有极好的直线正相关($r = 0.9470$)。这两个 Fe/Cu 比值同样与施铜增产效果有极好的正相关($r = 0.9308, r = 0.9801$),土壤 Fe/Cu 比值 > 120 的 8 块试验田施铜均有增产效果。4. 施用铜肥除了补充铜的不足外,同时还能减少水稻对铁的吸收,降低了水稻的 Fe/Cu 比值,减轻亚铁毒害,达到了增产的目的。

铜是植物生长发育所必须的微量营养元素,在大多数土壤中,铜与有机质的络合及螯合作用是控制铜的化学性状的主要反应,因而缺铜土壤主要是有机质含量高的土壤,像泥炭土和沼泽土等。

我国南方诸省山区和丘陵低洼地,以及沿江地区分布着大面积的低产水稻土,其中深田、冷浸田和沅田,仅 6 省统计有 3000 万亩¹⁾,这类低产水稻土渍水时间长或终年渍水,土壤处于强还原状态,有机质分解缓慢而积累,亚铁和还原性物质含量高,土壤条件使一些微量元素的形态不利于作物的吸收,鉴于在 pH 值和有机质含量较高的水稻土上,锌肥效果良好,而铜与锌在水稻土中的化学性状有相似的地方,供给也可能不足。因此,我们对上述类型水稻土中铜的供应状况和施用铜肥的效果进行了试验和研究,结果报道如下。

一、试验设计和方法

自 1982 年起在皖南山地丘陵区的旌德县进行了多点水稻田间试验,试验田土壤分两种类型,即永久渍水的水稻土(烂泥田)和长期渍水的水稻土。前者终年渍水,无法排干,每年种植一季水稻;后者地下水位高,冬季排干,每年种二季作物,例如水稻和油菜。由于丘陵区垅田面积小,肥力不均匀,小区的排列采用对照—处理—对照,依次类推的单行间隔式排列,另有 6 块大田对比试验。铜处理方法为

* 本工作在刘静研究员指导下进行,尹楚良、黄益斌、钟颜胜等同志参加了部分工作,特此致谢。

1) 谢建昌、于天仁,1961: 冷浸田的主要类型及低产原因(资料)。

0.10%CuSO₄·5H₂O 沾秧根。8号田铜处理为0.5kg CuSO₄·5H₂O/亩作基肥,对照区施用等硫量的硫酸铵,观察硫的影响。另外在安徽休宁县和无为县布置了硫酸铜沾秧根小区试验,这三块水稻土原为长期渍水的水稻土,现已排水改良,作为对比,编号为31,32,33。

试验田在水稻移栽和施肥前采集土样,用0.1mol HCl及DTPA溶液提取测定土壤中的有效铜、DTPA溶液提取有效铁。铜、铁用原子吸收分光光度计测定。土壤有机质用K₂Cr₂O₇容量法测定。部分水稻植株样品(地上部分)在孕穗前收集,于450℃灰化,用原子吸收分光光度计测定铜、铁含量^[1]。

二、结果与讨论

(一) 铜肥的增产效果

田间试验结果表明,在永久和长期渍水的水稻土上铜肥有良好的效果(表1),15个小区试验点中施用铜肥增产占67%,增产幅度为5.2—41.4%,增产稻谷28—58公斤/亩,平均每亩增产45公斤。平产占33%。其中9块永久渍水的烂泥田有89%的点增产,经t测试,6个点达到5%显著平准。6块永久渍水的水稻土上6个点中二个点增产,增产幅度为5.2—7.7%。小区试验和对比试验中,有增产效果的16个点,均发育在花岗岩的土壤

表1 铜肥对水稻的增产效果

Table 1 Effect of Cu fertilizer on yield increase of rice

土壤类型 Type of soil	成土母质 Parent material of soil	田号 Field No.	试验地点 Locality	产 量 Yield (kg/mu)		增 产 Yield increase	
				CK	Cu	kg/mu	%
永久渍水水稻土 (小区试验)	花岗闪长岩	1	庙首乡	140	198	58	41.4*
	花岗闪长岩	2	庙首乡	151	181	30	19.9*
	花岗闪长岩	3	兴隆乡	241	291	50	20.8*
	花岗闪长岩	4	兴隆乡	277	318	41	14.8
	花岗闪长岩	5	庙首乡	304	346	42	13.8*
	花岗闪长岩	6	庙首乡	209	263	54	25.8
	花岗闪长岩	7	庙首乡	531	575	44	8.3*
	花岗闪长岩	8	孙村乡	270	302	32	11.9*
	花岗闪长岩	9	华坦乡	384	402	18	4.7
长期渍水水稻土 (小区试验)	花岗闪长岩	10	庙首乡	364	392	28	7.7
	河流冲积物	11	县农科所	521	531	10	1.9
	河流冲积物	12	县农科所	419	410	-9	-2.2
	河流冲积物	13	三溪乡	509	525	16	3.1
	河流冲积物	14	华坦乡	452	469	17	3.8
永久渍水水稻土 (对比试验)	花岗闪长岩	15	旌阳乡	560	589	29	5.2
	花岗闪长岩	16	双河乡	138	190	52	37.7
	花岗闪长岩	17	旌阳乡	488	537	49	10.0
	花岗闪长岩	18	旌阳乡	436	487	51	11.7
	花岗闪长岩	19	云乐乡	334	362	28	8.4
	花岗闪长岩	20	华坦乡	325	358	33	10.2
	花岗闪长岩	21	华坦乡	378	410	32	8.5

* 达5%显著平准。

表 2 铜肥试验考苗结果
Table 2 Effect of Cu fertilizer on growth of rice seedings

土壤类型 Type of soil	田号 Field No.	处理 Treatment	平均株高 (cm) Average plant height	平均株重 (g) Average plant weigh	顶叶面积 (cm ²) Top leaf area	顶叶叶绿素含量 (mg/g)* Chlorophyll content of top leaf
永久性渍水	1	CK	55.4	0.69	11.5	0.254
		Cu	73.8	1.43	17.1	0.276
水稻土	2	CK	46.0	0.54	11.7	0.204
		Cu	50.7	0.80	13.0	0.247
平均值		CK	50.7	0.62	11.6	0.229
		Cu	62.3	1.12	15.1	0.262
增加 (%)			22.9	80.6	30.2	14.4
长期渍水	11	CK	27.3	—	9.4	0.264
		Cu	28.4	—	10.5	0.261
水稻土	12	CK	39.6	—	12.2	—
		Cu	39.3	—	13.6	—
平均值		CK	33.5	—	10.8	—
		Cu	33.9	—	12.1	—
增加 (%)			1.2	—	12.0	—

* 鲜重。

上,显然与花岗岩中铜含量较低有关。沾秧根每亩需 0.1 公斤硫酸铜,作基肥每亩 0.5 公斤。按每亩平均增产 45 公斤稻谷计算,每亩净增 9 元多的收益,因此经济效益也很显著。

铜对水稻的作用主要表现在促进生长,增加种子产量及降低空瘪粒。水稻分蘖盛期的考苗结果列于表 2。在二块施铜效果极显著的永久渍水田上,施用铜肥后株高平均增加 22.9%,平均每株干重增加 80.6%,顶叶面积,叶绿素含量均有增加,在长期渍水田上,除叶面积增加外,株高和叶绿素含量几乎无差异。永久渍水田施用铜肥后株高平均增加 10.8%,每株粒数平均增加 5.7%,千粒重平均提高 4.0%,空瘪粒平均减少 14.1% (表 3)。因此可以认为铜肥具有促进水稻生长和有利于籽实形成的作用。

为了排除硫的影响,在 8 号试验田中,对照区施用与硫酸铜等硫量的硫酸铵(同时保持等氮量),产量显然低于施铜区,说明试验区施用硫酸铜使水稻增产是铜的效果,不是硫的作用。

(二) 铜肥增产的土壤条件

1. 土壤中铜的供给情况: 测定土壤有效铜时,酸性土壤和中性土壤用 0.1mol HCl 提取,石灰性土壤和有机质高的土壤用 DTPA 溶液提取(表 4)。这二种提取剂所提取的有效态铜含量除 10 号田外均高于缺铜的临界含量(0.1 mol HCl 提取时临界含量为 2.0ppm, DTPA 溶液提取时为 0.2ppm,均适用于旱地),但永久渍水水稻土中有效态铜

表 3 铜肥对水稻生长的影响
Table 3 Effect of Cu fertilizer on growth of rice

田号 Field No.	处 理 Treatment	株高 (cm) Plant height	每穗粒数 Grain/ear	空瘪粒(%) Empty shrunken grain	千粒重(g) Thousand grain weight
1	CK	75.2	62.6	25.6	23.5
	Cu	86.6	75.9	20.1	24.8
2	CK	58.8	77.6	27.0	20.8
	Cu	64.3	79.8	22.5	22.4
3	CK	69.1	86.7	31.2	24.6
	Cu	76.0	91.6	31.0	24.8
8	CK	87.0	88.9	18.5	21.8
	Cu	94.3	86.8	14.5	22.5
平 均	CK	72.5	79.0	25.6	22.7
	Cu	80.3	83.5	22.0	23.6
增 加(%)		10.8	5.7	-14.1	4.0

表 4 试验田土壤的铜与铁的含量
Table 4 Content of available Cu and Fe in soil of trial-fields

土壤类型 Type of soil	田号 Field No.	pH	有机质 (%) Organic matter	铜含量 (ppm) Cu content		DTPA-Fe (ppm)	Fe/Cu*	铜肥增产(%) Yield increase by Cu fertilizer
				0.1mol HCl	DTPA			
永久性渍水 水稻土	1	5.6	4.73	2.80	0.95	353	372	41.4
	2	5.3	4.00	3.50	1.50	333	222	19.9
	3	5.3	3.44	3.70	1.27	281	221	20.8
	4	5.6	3.41	3.25	1.26	311	247	14.8
	5	5.4	2.59	3.05	1.33	305	229	13.8
	16	4.9	5.77	5.10	1.11	318	286	37.7
平 均			3.99	3.57	1.24	317	263	
长久渍水 水稻土	10	5.3	2.33	1.50	0.88	128	145	7.7
	11	5.6	2.44	5.01	2.41	262	109	1.9
	12	5.3	3.38	5.75	3.20	227	71	-2.2
	13	5.8	3.40	6.50	2.81	232	83	3.2
	14	5.6	2.56	6.25	2.74	324	118	3.8
	17	5.2	2.58	2.30	1.03	195	189	10.0
平 均			2.78	4.55	2.18	228	119	
改良的渍水 水稻土	31	6.9	3.03	3.70	1.64	31	19	-1.7
	32	6.8	2.51	6.06	3.10	41	13	-2.1
	33	7.0	2.53	8.20	2.88	21	7	-0.7
	平 均			2.69	5.99	2.54	31	13

* DTPA 溶液提取。

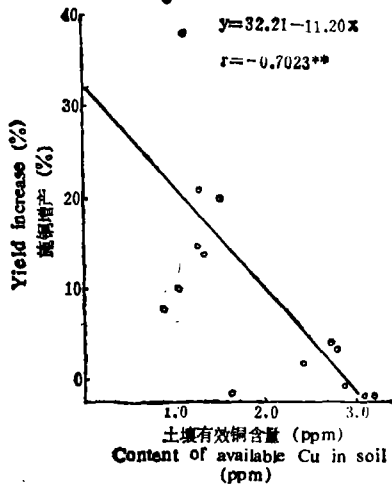


图1 DTPA 提取的有效铜与施铜增产幅度的关系

Fig. 1 Correlation between the available Cu extracted with DTPA and percentage of yield increase by Cu fertilization

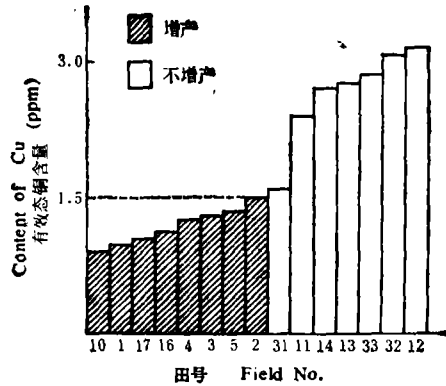


图2 DTPA 提取土壤铜的临界含量

Fig. 2 Critical content of copper of soil as extracted with DTPA solution

的平均含量则明显低于其他水稻土 ($P < 0.05$), 若把二种提取剂提取的有效铜含量与施铜后增产幅度作直线回归, 用 0.1mol HCl 提取时, 相关系数 $r = -0.4770$, 用 DTPA 溶液提取时, $r = -0.7023^{**}$ (图 1)。凡土壤有效铜含量低于 1.5ppm 的土壤施用铜肥均有增产效果(图 2)。由此可见, DTPA 溶液提取的铜更接近田间试验结果, 可用来评价渍水土壤铜的供应状况, 具有实际意义。目前以 0.2ppm 作为缺铜土壤的临界含量是有争议的^[2], 并且是针对旱地而言的, 对渍水土壤尚未进行过试验。本工作所提出的 1.5ppm 可作为渍水土壤试行的评价指标。

2. 有效态铁的含量: 在长年渍水的土壤上, 水稻常受到亚铁的毒害, 也是低产的原因之一。表 4 列出的铁含量为 DTPA 溶液提取的有效铁含量, 其含量在三类土壤间有明显的差异, 永久性渍水的水稻土是长期渍水水稻土的 1.4 倍 ($P < 0.05$), 是改良渍水水稻土的 10 倍。一般认为水稻土中亚铁含量超过 100ppm (也有认为 300ppm) 以上时, 水稻要受到毒害^[3], 就本工作的 15 个试验田中, DTPA 溶液提取的有效铁在 300ppm 以上的试验田有 6 个, 占 40%, 并且其中有 83% 的试验田施用铜肥有增产效果, 有效铁含量愈高时, 铜肥的效果愈好, 二者间呈直线正相关, $r = 0.6635^{**}$ 。

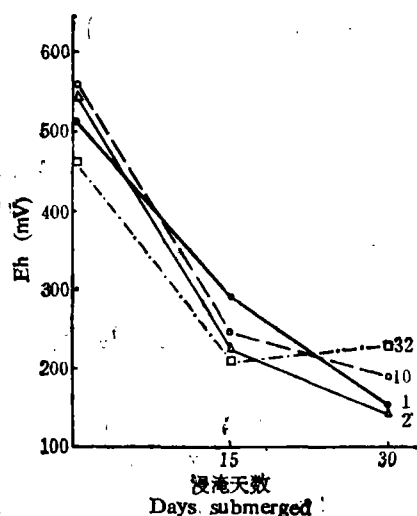
3. 氧化还原电位: 渍水时间长的水稻土, 处于强还原状态, 不利于水稻生长。为了明确永久和长期渍水的水稻土的氧化还原电位的高低, 对 7 块试验田于水稻移栽时测定其氧化还原电位, 列于表 5, 由表可见, 表土 10cm 处的 Eh 值有显著差异, 永久性渍水田比长期渍水田平均低 79mV ($P < 0.01$), 4 块永久性渍水田均在 100mV 以下。同一块田 10cm 与 15cm 处的 Eh 值无明显变化。为了搞清渍水时间相同时的 Eh 值, 将四个试验田土壤风干后加水培育观察 Eh 的变化(图 3), 证明 1、2 号(永久性渍水田)土壤在培

表 5 试验田 Eh 值

Table 5 Redox potential of soils of the trail fields

类 型 Type of soils	田 号 Field No.	Eh (mV)	
		Depth (cm)	
		10	15
永久渍水水稻土	2	90	94
	3	78	67
	4	55	39
	5	59	57
	平 均	71	64
长期渍水水稻土	9	117	104
	12	105	104
	13	227	190
	平 均	150	147

育 1 个月后的 Eh 值比其他渍水的水稻土要低 35—90mV, 并且 Eh 值下降的趋势是永久性渍水水稻土比其他渍水水稻土要大 (图 3)。与这类土壤上有机质和还原性物质高有关。在如此强还原状态下, 可能会产生 CuS , 而降低铜的有效性。



注: 1, 2 为永久渍水水稻土; 10 为长期渍水水稻土; 32 为改良渍水水稻土。

图 3 风干土浸淹后的 Eh 值

Fig. 3 The Eh change after submergence

4. 有机质含量: 在长期渍水的水稻土中, 有机质分解缓慢, 含量较高, 可能对铜的有效性有不利影响。15 块试验田的有机质含量进行比较 (表 4), 永久性渍水水稻土比长期渍水水稻土高 44% ($P < 0.05$)。相反地, 永久性渍水水稻土的有效铜含量几乎只有长期渍水水稻土的一半 ($P < 0.05$), 说明高含量的有机质可能是造成缺铜的原因之一。土壤有机质含量与有效铜含量通常呈负相关, 本试验表明, 二者间也为负相关 ($r = -0.3599$), 不过相关系数较小。

(三) 铜、铁关系

由以上的土壤分析结果得知, 永久性渍水水稻土比其他水稻土有效铁含量高, 有效铜含量低, 铜肥效果与试验土壤中的有效铁、

铜含量分别存在着正负的相关, Dokiya 等(1968)在溶液培养中证实, 铁含量增加能够抑制水稻幼苗对铜的吸收^[6]; 在日本因缺铜而引起不结实的小麦, 成熟期的茎秆含铁量都很高, 其 Fe/Cu 比值在 125 以上, 而 Fe/Cu 比值在 100 以下时几乎没有因缺铜而不结实的现象发生^[4]。这些情况说明铜铁在植物营养中可能有拮抗关系存在, 但未曾就渍水土壤和对水稻生长进行过试验。为了验证这一关系, 我们将 8 块试验田水稻植株样品的铜、铁含量及 Fe/Cu 比值进行比较 (表 6), 同时与表 4 中土壤有效态铜、铁含量及 Fe/Cu 比值

表 6 水稻植株铜铁含量
Table 6 Content of Cu and Fe in rice plant.

土壤类型 Type of soils	田号 Field No.	对照植株含量 (ppm) Content of check plant			施铜植株含量 (ppm) Content of Cu treatment plant		
		Cu	Fe	Fe/Cu	Cu	Fe	Fe/Cu
永久渍水 水稻土	1	2.30	1904	827	3.38	962	285
	2	2.22	878	365	—	—	—
平均		2.26	1391	596	—	—	—
长期渍水 水稻土	11	3.65	612	168	6.70	526	79
	12	5.06	292	58	6.50	263	40
	10	4.89	491	100	—	—	—
平均		4.53	465	109	—	—	—
改良的渍水 水稻土	31	6.06	364	60	—	—	—
	32	6.08	298	49	—	—	—
	33	7.17	332	46	—	—	—
平均		6.44	331	52	—	—	—

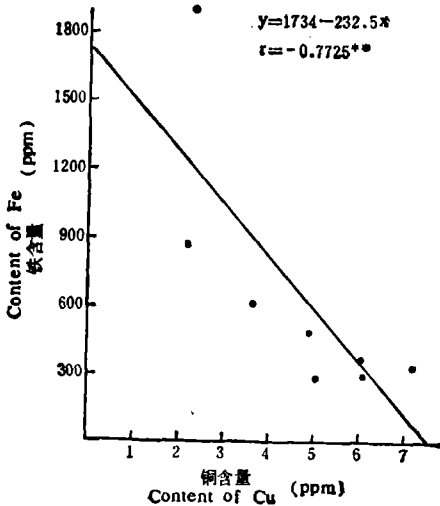


图 4 水稻植株铜铁含量的关系

Fig. 4 Correlation between the content of Cu and Fe in rice plant

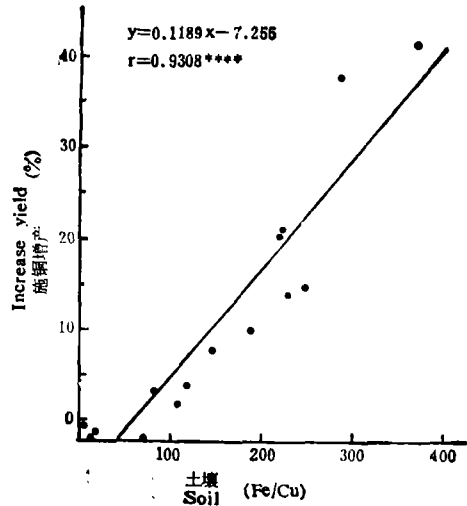


图 5 土壤有效 Fe/Cu 与水稻施铜增产幅度的关系

Fig. 5 Correlation between the available Fe/Cu in soil and percentage of yield increase of rice treated with Cu

一起讨论。

表 6 所示, 1、2 号永久性渍水田的水稻植株含铜量偏低, 仅为 2.22 及 2.23ppm; 而含铁量相反, 2 号田为 878ppm, 1 号田竟高达 1904ppm。一般认为水稻成熟期植株含铜量 < 6ppm 时, 视为铜的供应不足, 水稻分蘖期叶片含铁量超过 300ppm 时视为受铁的

表 7 水稻植株铜、铁含量与土壤有效态铜、铁的相关关系

Table 7 Correlation between the content of Cu, Fe in rice plant and available Cu, Fe in soil

相关因子 Correlation factor	相关系数 (r) Correlation coefficients
水稻植株铜含量与土壤有效铜含量	0.5613
水稻植株铁含量与土壤有效铁含量	0.7294**
水稻植株 Fe/Cu 与土壤有效 Fe/Cu	0.9470****

毒害^[7]。永久性渍水田上生长的水稻既存在着铜的供应不足,同时又受铁的毒害,而使水稻不能正常生长。图 4 表明,它们有显著的直线负相关 ($r = -0.7725^{**}$),显然是铁、铜拮抗关系在水稻植株体内的反映。由表 7 可见,土壤有效铜含量与植株含铜量和土壤有效铁含量与植株含铁量都呈正相关;而土壤的 Fe/Cu 比值与植株 Fe/Cu 比值则有更好的正相关 ($r = 0.9470$),这表明,水稻对铜、铁的吸收受土壤中铜、铁的拮抗作用的制约,无论铁、铜的多寡都会影响到另一元素的吸收。与此同时,土壤中 Fe/Cu 比值与铜肥增产的百分数也有极显著的正相关 ($r = 0.9308$) (图 5),比土壤有效铁或铜的含量与施铜增产百分数的相关性更好。若施铜增产 5% 计,解图 5 回归方程,则土壤的 Fe/Cu 比值应在 103。15 个试验田土壤的 Fe/Cu 比值 > 103 的有 10 个,施铜后有 80% 的点增产。若把 Fe/Cu 比值由低到高依次排(图 6),则凡是 Fe/Cu 比值在 120 以上的均有增产效果,与上面的比值较接近。表 5 水稻植株中的 Fe/Cu 比值与施铜增产效果也有极好的正相关 ($r = 0.9801$) (图 7),水稻植株 Fe/Cu 比值与日本缺铜小麦有相似的结果,即水稻植株 Fe/Cu 比值 < 100 的 4 块田铜肥无增产效果。

此外,铜还能减低亚铁的毒害,表 6 表明,三块试验田施铜后的水稻植株含铜量提高,

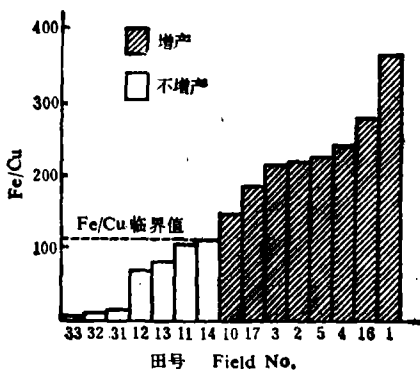


图 6 根据土壤 Fe/Cu 确定施铜临界值
Fig. 6 Critical level of available Fe/Cu in soil

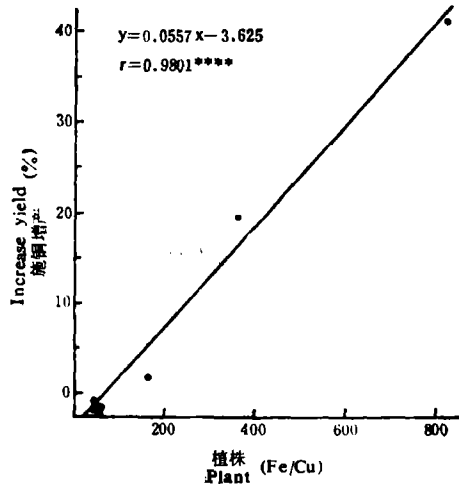


图 7 水稻植株 Fe/Cu 与施铜增产幅度的关系
Fig. 7 Correlation between the Fe/Cu in rice plant and percentage of yield increase of rice treatment with Cu

含铁量降低, Fe/Cu 比值不同程度的增加, 铁的毒害相应的减轻。

综上所述, 由于铁、铜的拮抗关系, 永久性渍水或长期渍水水稻土上, 用土壤中有效铁、铜含量的比值, 或用植株中铁、铜含量的比值, 比单独使用土壤有效铜含量来评价铜的供应状况, 更有实际意义。

参 考 文 献

- [1] 中国土壤学会农业化学专业委员会, 1983: 土壤农业化学常规分析方法。137—151 页, 科学出版社。
- [2] 中国农业科学院土壤肥料研究所编译, 1984: 农业中的微量元素。238—240 页, 农业出版社。
- [3] 袁可能, 1983: 植物营养元素的土壤化学。376—378 页, 科学出版社。
- [4] 唐贤述, 1984: 近年来日本在微量元素铜方面的一些研究情况。土壤学进展, 第 4 期, 19—22 页。
- [5] Surajit K. De Datta, 1981: Principles and Practices of Rice Production 350—360 John Wiley & Sons, New York.
- [6] Dokiya, Y. N. Owa and S. Mitsui, 1968: Manganese and Copper adsorption by Plants. III. Interaction between Fe, Mn and Cu on the absorption of elements by rice and berley Seedings. Soil. Sci. Plant Nutr., 14: 169—174.

COPPER STATUS OF PERMANENTLY WATERLOGGING AND LONG-TERMED WATERLOGGING PADDY SOILS AND RESPONSE OF RICE TO COPPER FERTILIZER

Xu Junxiang

(Institute of Soil Science, Academia Sinica, Nanjing)

Dong Wenrui

(Jingde Agricultural Bureau, Anhwei Province)

Summary

Response of paddy rice to copper fertilizer in permanently waterlogging and long-termed waterlogging paddy soils in hilly region of southern part of Anhwei Province is discussed in this paper. 67% of the field experiments showed response to copper fertilizer, with yield increase of 5.2—41.4% (45 kg/mu on average); while 89% of the field experiments conducted in permanently waterlogging paddy soils was responsive to copper fertilizer.

The available copper of permanently waterlogging paddy soils extracted with DTPA solution was 1.24 ppm on average; available iron extracted with the same solution was 317 ppm on average. In these soils the organic matter content averaged 3.99% and Eh 71 mV. It indicates that the available copper and Eh are lower, while available iron and organic matter are higher than those in long-termed waterlogging paddy soils and ameliorated paddy soil.

Plant and soil analysis revealed the antagonism between copper and iron. Iron and copper contents of the rice plants indicated that there existed a significant negative correlation between these two elements ($r = -0.7725$). The ratio of available Fe/Cu of soils was highly correlated with the ratio of Fe/Cu of rice plant ($r = 0.9470$). In the meantime, both the ratio of available Fe/Cu of paddy soils and the ratio of Fe/Cu in rice plants were highly correlated with yield increase caused by application of copper fertilizer with the correlation coefficients of 0.9308 and 0.9801 respectively, i.e. the ratio of Fe/Cu in plant was affected by the ratio of available Fe/Cu in soil. Paddy rice was responsive to copper fertilizer in waterlogging paddy soils, as available copper was less than 1.5 ppm, or the ratio of available Fe/Cu of soil was higher than 120.

Copper fertilization is proved to be beneficial to both growth and yield of paddy rice in the condition mentioned above. It can improve copper supply and iron toxicity in waterlogging paddy soils, and increase rice yield.