農業資材對環境之影響研討會論文集　民國81年 4月
Proceeding of the Workshop on the Effects of Agricultural Resources and Materials in the Environment, April 1992

鉛污染台灣各類土壤與作物生長關係之研究

李豔琪*、王銀波**
*台灣省農業試驗所農化系
**國立中興大學土壤學研究所

摘　要

本研究主要目的在探討重金屬鉛污染土壤後，對作物造成的影響，選紅壤，砂頁岩酸性沖積土，黏板岩鹼性沖積土，砂頁岩鹼性沖積土，臺灣黏土，黏板岩酸性沖積土及片岩沖積土等七類台灣分佈面積較廣的農耕土壤，進行土壤中鉛對蔬菜和水稻生長的研究，以探討鉛在不同土壤中對作物的臨界毒害濃度及其在植體累積轉移的情形。

七種供試土壤各添加 50、150、450、和1350 $mgkg^{-1}$Pb，並設不加鉛爲對照組，重複四次，依次盆栽青江白菜和水稻。結果顯示青江白菜乾物產量除粘板岩鹼性沖積土受鉛的影響較小外，其餘土壤生長之青江白菜乾物產量均隨添加鉛量之增加而遞減，受鉛影響最巨者爲砂頁岩酸性沖積土和紅壤，次爲片岩沖積土。產量減少 10% 時，土壤鉛濃度(0.1M HCl萃取的酸可溶性鉛量)依土類而異，自105～2080 $mgkg^{-1}$ Pb。水稻受土壤鉛含量的影響較小,稻穀產量亦隨添加鉛量之增加而遞減，其中以粘板岩和砂頁岩鹼性沖積土之稻穀產量受鉛影響較大，次爲片岩沖積土。稻穀產量減少10%時土壤鉛濃度因土類而異，除砂頁岩沖積土無法計算外，其餘自 210～20220 $mgkg^{-1}$Pb (0.1M HCl之萃取量)。青江白菜莖葉中的鉛含量因土壤性質不同而異，但多隨土壤鉛添加量之增加而增加，尤其以酸性土壤增加吸收的鉛量最多，鉛在葉菜類之莖葉含量多，對生物的毒害大。水稻植物體內各部分鉛含量之大小順序爲稻根＞＞莖葉＞稻殼、糙米、白米。鉛在水稻植體內的移動很慢，大多累積在根部，移動到莖葉的部分很少，稻根及莖葉中的鉛含量受土壤性質的影響較大，以酸性土壤吸收的較多，但白米和糙米的鉛含量很少，較不受土壤性質之影響，對生物的毒害較小。青江白菜葉片鉛量主受砂粒(Sand)、酸鹼值(pH)、電導度(EC)、有機質(O.M.)、鹽基總量(total base)和氧化鐵影響，水稻莖葉中的鉛含量主受土壤的酸鹼值(pH)、電導度(EC)和氧化錳影響，故若能適當的改良或控制這些因子，則植體葉片中的鉛含量應可適當地被控制。

關鍵詞：鉛、土類、蔬菜、水稻、臨界濃度、累積轉移

英 文 摘 要

Study of Relationships between Crop Growth and Leab Contaminated Soil in Taiwan

Y.C. Lee　　Y.P. Wang

Summary

This subject is to investigate the impacts of heavy metal (copper) contaminationon soils and crops. To study soil copper infulence on·growth of vegetables and rice, seven wide area agricultual soil in Taiwan, latosol, sandstone-shale acid alluvial soil, slate alkline alluvial soil, sandstone-shale alkaline alluvial soil, Taiwan clay, slate acid alluvial soil and schist alluvial soil are used as materials. Thus, the critical toxic concentration of copper in various soil sand its translocation within plants can be determined.

Seven kind soils for test were treated with 0, 20, 40, 80, 160 and 320 $mgkg^{-1}$ Cu individually. There were 4 replications in each treatment. They were planted rape and rice on pots. The results showed that the dry weight yield of rape was gradually reduced with increasing added. The sandstone-shale acid alluvial soil was most obviously influenced by copper, and slate acid alluvial soil the next. When the yield of rape reduced 10%, the soil copper concentration were diverse with various soil series from 8 to 27 $mgkg^{-1}$Cu ,(extracted with 1M NH_4OAc, pH4.5) or 27 to 37 $mgkg^{-1}$ Cu (extracted with 0.1M HCl).

While copper amount applied over 160 $mgkg^{-1}$, the dry matter yield of rice reduced obviously. Taiwan clay soil cultivated rice was most influenced by copper, and sand shale alkline alluvial soil the next. When the yield of rice reduced 10%, the soil copper concentrations were various with different soil series, with slate acid alluvial soil 674 $mgkg^{-1}$Cu exceptional, the extent is from 20 to 35 $mgkg^{-1}$Cu (extracted with 0.1M HCl).

The copper contents in several plant parts of rice are in the order as followings: root>>stem and leaf>grain. The movement of copper within rice was very slow, most of the copper was accumulated in roots, and that in stem and leaf parts was minor. The copper content of leaf was less influenced by soil properties and had little toxicity on animals and plants. But the movement of copper invegetables was faster than in rice. The leaf copper content of the rape depended on pH、EC、and free aluminum oxides, and pH was the most important factor. So the leaf copper content of vegetables could be moderately contralled as long as all the factors mentioned above be ameliorated or controlled.

Key Words: critical concentration, accumulation and translocation , 1M NH_4OAc(pH4.5), 0.1M HCl

前　言

在諸多重金屬中，銅是動物和植物生理系統及營養上的必要元素，銅爲動植物體中某些酵素和蛋白質之重要成份，缺乏或過量均將阻礙作物生育（Price等，1972），銅對人體有益，並可作消毒劑，缺乏會阻礙生長，過量造成肝中毒，但銅對植物的毒性大，較少經過食物鏈抵達人體（林秋裕，1985），栽培作物時，缺銅會導致生理併發症,過量則引起毒害。Kofoed (1980) 指出土壤中銅大於 20 $mgKg^{-1}$ 時,作物便有毒害症狀產生，若大於50 $mgKg^{-1}$，蚯蚓數目減少，活力亦受影響。王銀波（1985）指出銅對農耕土壤毒害之臨界濃度爲 80～150$mgKg^{-1}$（0.1M HCl 抽出），臨界濃度隨作物不同而異。Purves (1985) 亦指出，不論輕質地或重質地土壤，當 EDTA 抽出銅大於40 $mgKg^{-1}$時，苜蓿生長受到抑制。

目前在臺灣，銅常用於工業材料、建築材料、電鍍、紡織顏料中----等，故工業廢水中銅之污染頗爲普遍（徐玉標，1975），可能進而造成土壤污染(王銀波，1977)，導致作物減產及產品品質降低。但由於土壤種類繁多，土壤性質不同，會影響重金屬的溶解度，進而對作物之毒害臨界濃度發生變化，有鑑於此，本研究以台灣主要耕地土壤—紅壤、砂頁岩酸性沖積土、砂頁岩鹼性沖積土、粘板岩酸性沖積土、粘板岩鹼性沖積土、片岩沖積土和台灣粘土等七種土類，探討重金屬銅與作物（水稻與旱作）生育之關係，求出不同土壤栽培作物之臨界毒害含量。

材 料 與 方 法

一、供試土壤的採集和理化性質分析

根據中興大學與農試所土壤詳測報告（包括桃園縣、台中縣、彰化縣、台南縣、高雄縣、屏東縣和花蓮縣）(王，1969,1975；孫，1971,1976；陳，1976,1979)，選取本省主要農耕土壤，有桃園楊梅紅壤（可能相當於美國新分類土壤中的 Kandiperox ，謝及王，1989）爲平鎮系；台中北溝砂頁岩酸性沖積土(Hapludults或 Dystrochrepts)爲六股村系；彰化鹿港粘板岩鹼性沖積土 (Haplaquepts) 爲鹿港系;台南學甲砂頁岩鹼性沖積土 (Udifluvents) 爲岸內系；高雄吊雞林臺灣粘土 (Fragiaqualfs) 爲太康系；屏東內埔粘板岩酸性沖積土(Haplaquepts) 爲內埔系；和花蓮吉安片岩沖積土(Udifluvents，陳，1984) 爲吉安系等七種土壤。

採土壤表土(0-30cm)，經風乾磨碎過 2 mm 篩網；按下述方法分析土壤的理化性質，分析結果列於表一：

1.pH值：土:水 = 1:1 (W/V)，平衡一小時後用pH計測定(McLean,1982)。
2.粒徑分析：ASTM Bouyoucos scale 比重計法(Gee及Bauder,1986)。
3.質地：U.S.D.A.法 (Gee 和 Bauder，1986)。
4.電導度：土:水 = 1:2 (W/V)，充分攪拌後，放置 1 小時並間隔攪拌兩次,平衡後，以Suntey SC-17A型電導度計測定 (Rhoades,1982)。

5.有機質：重鉻酸鉀氧化法（Walkley-Black method）(Nelson及Sommer，1982）。

6.陽離子交換能量（CEC）和交換性陽離子(鈣、鎂、鉀、鈉)：醋酸銨法（1M NH_4OAc，pH7.0）(Rhoades, 1982)。

7.黏土礦物：X光繞射法（Jackson，1979)。

8.游離鐵、鋁、錳測定：取 2g 土，加 100 ml Tamm's solution(0.1M 草酸和 0.175M 草酸銨，pH 3.25)，混合後置入熱水浴(～100°C)，鐵和錳用原子吸光儀測定，鋁用比色法測定(Sampath, 1980)。

二、盆栽試驗：

七種土壤除分別設對照組外，每公斤土壤添加銅 20、40、80、160、320毫克，共六種處理，每種處理重複四次共計 168 盆，其中一盆裝不銹鋼網，以便根系照相觀察及清洗，採完全逢機設計。銅以氯化銅溶液添加到土中，重金屬與土壤均勻混合，經濕乾三次每次約二星期，共約六星期，平衡後土壤裝盆種植，77年1月7日種植青江白菜，每盆種五株，蔬菜採收後，再於3月8日種植水稻，每盆種 1叢（共5 株）。青江白菜與水稻生長期間之肥料用量與用法按一般的施肥量及施肥法。

三、土壤和植物體的採樣及分析：

採取作物種植前後的土壤，風乾並磨碎，過 2 mm 篩網。作10:1之全量分析（HNO_3-$HClO_4$=5:2，V/V）和用不同萃取劑（10:1之0.1MHCl; 10:1 之1M NH_4OAc，pH4.5; 2:1之 0.005M DTPA，pH7.3 和 2:1之蒸餾水）(農林水產技術會議事務局，1972; Baker等，1982)，分析各主要土類不同形態之的銅含量。植物體亦經過 70°C 乾燥磨碎，利用硝酸及過氯酸濕灰化法分解後(農林水產技術會議事務局，1972;Tucker，1974)，以原子吸光儀分別分析青江白菜莖葉，水稻稻根、莖葉、稻殼、糙米和白米之銅全量。

結 果 與 討 論

一、銅對作物生長之影響

青江白菜和水稻爲兩種極端不同的作物，分別代表旱田與水田的兩種不同土壤條件下的作物，且可食用的部位亦不相同，七類土壤盆栽青江白菜和水稻，產量及受害程度隨銅添加濃度與土類不同而有所差異，在生長過程中觀察銅對青江白菜和水稻之影響，並記錄其發生毒害症狀的情況，分別敘述如下：

1.蔬菜：發芽率降低，植株矮小，葉肉黃化，但葉脈仍保持綠色，根長及根密度顯著減少，且根的顏色隨處理銅濃度的增加由乳白色逐漸變成褐色。由表二可知當銅添加濃度達 160 $mgKg^{-1}Cu$ 以上時，各土類中生長的白菜均受此濃度銅的影響，而影響最巨者爲砂頁酸性沖積土和紅壤，次爲黏板岩酸性沖積土。其中生長在紅壤的青江白菜乾物產量最低，此可能是因青江白菜不適合強酸性土壤生長，再加上土壤中銅之毒害所致。

2.水稻：當銅添加濃度達 80 $mgkg^{-1}$ Cu 以上時，分蘖數降低，生長速度逐漸降低，稻葉黃化，葉尖枯萎，根長及根密度亦隨銅添加量之增加而減少

表一、供試土壤的物理與化學性質
Table 1. The physical and chemical properties of studied soils

土壤種類 Soil group	土系 Soil series	質地 Texture sand (%)	silt (%)	clay (%)	有機物 Organic matter (g/kg)	pH 1:1 H_2O	可交換陽離子 Exchangeable cation K cmol(+)/kg of soil	Na cmol(+)/kg of soil	Ca cmol(+)/kg of soil	Mg cmol(+)/kg of soil	陽離子交換能量(CEC_7) cmol(+)/kg of soil	鹽基飽和度 BSP (%)	游離氧化鐵錳鋁 Free oxide Fe (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Al (mg/kg)
紅壤 Latosols	平鎮系 (Pc)	9.4	36.6	54.0 粘土(C)	10.1	4.7	0.02	0.09	0.95	0.53	8.66	18.4	21667	728	48.9
粘板岩鹼性沖積土 Slate alkaline alluvial soil	鹿港系 (Lu)	4.4	45.0	50.6 坋質粘土(SiC)	30.3	7.5	0.02	0.10	10.24	1.74	14.79	81.8	17166	208	26.7
粘板岩酸性沖積土 Slate alkaline alluvial soil	內埔系 (Np)	9.4	54.0	36.6 坋質粘壤土(SiCL)	16.1	6.4	0.01	0.09	4.76	0.91	5.95	96.9	14155	442	26.7
砂頁岩鹼性沖積土 Sandstone and shale alkaline alluvial soil	岸內系 (An)	33.4	48.0	18.6 壤土(L)	14.5	7.7	0.02	0.11	11.90*1	1.36	8.26	161*2	17767	312	182.2
砂頁岩酸性沖積土 Sandstone and shale acid alluvial soil	六股村系 (TLa)	63.4	25.0	11.6 砂質壤土(SL)	13.8	4.9	0.02	0.08	1.67	0.64	6.57	36.7	9620	234	0
片岩沖積土 Schist alluvial soil	吉安系 (Ca)	19.4	61.0	19.6 坋質壤土(SiL)	22.3	6.2	0.02	0.09	5.71	0.72	7.40	88.4	11960	104	31.1
台灣粘土 Taiwan clay (Tk)	太康系 (Tk)	2.4	29.0	68.6 粘土(C)	22.7	7.7	0.05	0.15	12.14	5.20	21.45	81.8	23400	494	33.3

*1:可交換性Ca大於CEC,因分析時Free carbonate 溶出所致。
*2:土壤之鹽基飽和度＞100%，可能土壤位於海邊或有石灰質母質所致。

表二、銅對青江白菜和水稻之乾重相對產量之影響
Table 2. Effect of copper on ralative yield of dry matter in rape and rice

土壤	銅添加量 ($mgkg^{-1}$)	青江白菜 乾重 (g)	青江白菜 相對產量 (%)	水稻 稻谷乾重 (g)	水稻 相對產量 (%)
紅壤	0	0.5_a	100.0	23.5_a	100.0
	20	0.3_b	57.7	22.5_a	95.6
	40	0.3_b	59.6	23.4_a	99.6
	80	0.2_c	36.5	22.7_a	96.5
	160	0.0_d	7.7	9.6_b	40.8
	320	0.0_c	0.0	1.6_c	6.8
砂頁岩酸性沖積土	0	2.0_a	100.0	26.3_a	100.0
	20	0.6_b	27.5	23.8_a	90.2
	40	0.1_c	3.4	26.9_a	102.0
	80	0.1_c	2.9	29.0_a	110.0
	160	0.1_c	2.5	14.6_b	55.5
	320	0.0_c	0.5	2.0_c	7.5
粘板岩鹼性沖積土	0	2.5_a	100.0	20.1_a	100.0
	20	2.2_a	88.0	15.5_b	77.2
	40	2.6_a	104.8	13.9_{bc}	69.3
	80	2.1_a	82.9	12.5_c	62.5
	160	2.1_a	82.9	15.8_b	78.6
	320	0.2_b	8.0	0.6_d	3.1
砂頁岩鹼性沖積土	0	5.0_a	100.0	29.5_a	100.0
	20	3.8_b	76.4	21.4_b	72.6
	40	4.0_b	78.8	16.2_c	55.1
	80	4.1_{ab}	82.4	15.3_c	51.8
	160	2.0_c	38.9	4.4_d	15.0
	320	0.3_d	6.2	0.0_d	0.0
台灣粘土	0	3.5_b	100.0	22.6_a	100.0
	20	3.9_b	109.9	20.0_b	88.4
	40	4.5_a	126.4	19.6_b	86.9
	80	3.8_b	108.0	21.9_a	97.2
	160	1.9_c	54.0	0.0_c	0.0
	320	0.8_d	6.7	0.0_c	0.0
粘板岩酸性沖積土	0	3.1_a	100.0	22.5_a	100.0
	20	3.6_a	115.7	14.0_b	62.1
	40	3.6_a	115.7	15.9_b	70.5
	80	2.7_a	87.2	18.8_{ab}	83.5
	160	0.5_b	17.0	14.1_b	62.6
	320	0.1_c	2.9	18.8_{ab}	83.4
片岩沖積土	0	4.7_a	100.0	21.3_a	100.0
	20	4.6_a	97.2	14.4_{bc}	67.7
	40	4.3_a	91.3	16.8_b	78.8
	80	4.4_a	93.0	16.4_{bc}	77.0
	160	2.1_b	45.0	12.6_c	59.4
	320	0.4_c	9.2	3.3_d	15.5

註：1.不同英文字母表處理間彼此有差異且達5%顯著水準。
2.字母相同表處理間差異很小且未達5%顯著水準。

，鬚根顯著減少，嚴種時只剩下細短的粗根，此乃因高濃度的環境下，鬚根的生長受到抑制或死亡，剩下較大但量小的主根(王淵欽，1981)。由表二知水稻似應比白菜受抑制生長程度少。而各土類中生長的水稻受銅濃度影響最巨者爲臺灣黏土，次爲砂頁岩鹼性沖積土。由於水稻生長與土壤性質有很大的關係，其最適生長的pH約爲6.6（由浸水土壤之溶液所測得者）（郭魁士，1983），而台灣粘土由於pH較高，加上質地粘重，土壤的硬度較大，且通氣不良，導致氧化還原電位(Eh)下降，pH升高，加上銅的毒害，造成水稻生長受到嚴重抑制。

二、銅在作物體內的吸收分佈情形

1.青江白菜

由收穫後地上部植物體分析結果如表三得知，即使作物不添加銅，但因土壤內含有有效性銅量的影響，植體組織仍可從土壤吸收一些有效性銅，又青江白菜葉片的銅含量隨土壤中銅添加量之增加而增加（表三），產量則因植物體銅含量增加而下降，嚴重者甚至死亡，尤其以強酸性的砂頁岩酸性沖積土和紅壤最嚴重。在添加銅量達 160 $mgkg^{-1}$ 時，紅壤的青江白菜葉片之銅含量達 97 $mgkg^{-1}$，砂頁岩酸性沖積土次之，爲 74 $mgkg^{-1}$，其他五種土壤之青江白菜葉片銅含量亦隨添加量增加而增加，但吸收量較少，自43～59 $mgkg^{-1}$，爲紅壤的一半 ，以台灣粘土最少，只有 43 $mgkg^{-1}$ ，此種現象可能與土壤的酸鹼度和質地有關。可見蔬菜在酸性土壤環境下，不但生長不良，又易在植體中累積多量的銅，在鹼性土壤中銅易被粘粒吸附(Tirsch等 ，1979) 或發生沉澱作用(Harter, 1979) ，不易爲作物吸收，植體較不易累積多量的銅。生長於盆栽中的青江白菜由於根細易斷不易收集，無法求出白菜植物體中Cu的轉移情形。

2.水稻

收穫後植物體分析結果如表三。水稻莖葉和稻穀含銅量，受銅添加量的影響少於根，在不同耕地土壤下，莖葉與稻穀之銅含量，隨土壤銅添加量增加至20～80 $mgkg^{-1}Cu$ 仍然增加莖葉或稻穀含量。但根累積吸收多量的銅，且隨添加銅量之增加而增加，此種增加量隨土類不同而濃度有所不同。例如當土壤添加銅量達80 $mgkg^{-1}Cu$ 時，根部含銅量，最高爲紅壤達375 $mgkg^{-1}Cu$，＞砂頁岩鹼性沖積土和砂頁岩酸性沖積土＞片岩沖積土＞粘板岩鹼性沖積土和粘板岩酸性沖積土，最低爲台灣粘土達 112 $mgkg^{-1}$ Cu。此可能因土壤質地和酸鹼值不同影響土壤內的銅溶解度及被吸附量所造成。植體各部分（根、莖葉、稻殼、糙米、白米)吸收的銅含量分佈比例如表四所示,隨著土壤銅添加量的增加，根吸收銅量所佔的比例隨之增加，如土壤銅添加量由 0 $mgkg^{-1}Cu$ 增至160 $mgkg^{-1}$ Cu 時，根中銅量所佔比例由 60.1%增至94.4%(七種農耕土壤之平均值)，而地上部（莖葉、稻殼、糙米、白米）吸收的銅量所佔之比例則隨添加銅量的增加而減少，由 40.9%減少至5.6%。可知銅在植體內的移動性很小，大部份累積在根部，當其累積量超過植株所能忍受之最大值時，即會造成根部機能的障礙，影響植株的生長(王銀波,1985)，因土壤中的銅可經由植物根毛吸收，儲存於根部細胞之細胞壁，故轉移至地

表三、盆栽收穫期青江白菜和水稻植體中不同部位銅含量
Table 3. Copper contents of upper parts for rape and rice on harvest

土壤	銅添加量	植體中不同部位銅含量					
		青江白菜	水稻				
		莖葉	白米	糙米	稻殼	莖葉	稻根
		mgkg^{-1}					
紅壤	0	8.5	4.55	5.64	4.48	8.37	13.1
	20	55.9	8.05	10.57	8.82	19.78	88.3
	40	70.5	7.63	10.01	7.99	20.00	298.8
	80	77.0	6.90	8.86	6.54	12.50	375.0
	160	96.6	4.94	--	5.39	8.00	450.0
	320	234.3	6.44	--	6.86	13.50	1192.0
砂頁岩酸性沖積土	0	7.6	5.07	6.55	5.39	8.36	33.0
	20	18.0	8.05	10.57	6.51	16.23	131.0
	40	24.6	7.00	9.17	7.00	8.00	297.5
	80	66.9	5.60	6.37	6.09	14.50	209.0
	160	73.8	4.69	6.02	5.74	12.00	400.0
	320	--	4.62	--	3.92	14.00	1862.0
粘板岩鹼性沖積土	0	9.0	4.31	4.13	2.80	5.58	23.8
	20	16.6	5.25	6.37	4.97	10.14	63.8
	40	30.7	4.38	5.53	4.62	8.00	75.3
	80	37.5	5.43	--	4.90	12.00	150.0
	160	58.2	5.53	--	5.39	14.50	370.0
	320	75.1	3.36	--	14.00	41.00	1268.0
砂頁岩鹼性沖積土	0	8.0	2.35	3.12	2.42	4.06	18.0
	20	11.8	3.81	5.11	3.50	6.09	57.0
	40	18.9	4.62	6.44	4.27	9.50	137.0
	80	40.0	4.69	6.09	4.83	10.50	228.0
	160	51.8	5.60	--	6.23	18.00	528.4
	320	80.7	--	--	--	--	--
台灣粘土	0	7.1	3.92	4.69	2.87	5.58	17.0
	20	10.4	4.62	6.23	3.43	8.11	55.0
	40	13.7	6.02	7.77	5.53	11.00	78.0
	80	30.3	6.30	7.91	5.32	11.00	112.0
	160	43.6	--	--	--	--	--
	320	68.6	--	--	--	--	--
粘板岩酸性沖積土	0	11.1	4.55	4.94	4.90	7.52	22.6
	20	19.9	4.90	7.63	3.64	14.20	104.3
	40	26.5	5.25	6.79	5.74	12.00	120.0
	80	43.0	5.78	6.86	7.07	18.00	153.0
	160	49.4	7.84	10.92	7.42	28.50	554.0
	320	76.0	7.70	8.40	7.70	20.50	608.0
片岩沖積土	0	9.5	4.62	5.74	4.27	8.11	50.0
	20	16.1	6.16	5.88	4.69	9.13	105.5
	40	24.6	4.97	6.51	4.34	9.50	155.6
	80	43.0	4.83	5.67	4.41	9.50	209.0
	160	56.1	6.37	--	6.30	15.00	840.0
	320	83.3	--	--	--	--	1361.0

註:--:表示未收得植體或收穫量太少不夠分析。

上部的部份相對的減少。以土壤添加銅量達 80 mgkg^{-1} Cu爲例,銅在水稻植體各部份的含量大小順序爲稻根（佔總吸收量的88%）＞＞莖葉(6%)＞稻殼(2.6%)＞糙米(1.8%)＞白米(1.5%)。可見重金屬銅在水稻植體的移動很慢，吸收後之分佈以最下部的稻根最多，稻葉次之，最上面的稻穀最少，稻穀重金屬量轉移進入量少，對人體所造成的影響較小。由表三所示,在銅污染的土壤中，青江白菜莖葉可吃部份的含銅量較水稻莖葉高很多，可見銅在青江白菜的植體中的移動比水稻快，累積積在地上部可吃部份的量亦多，經由食物鏈對人體造成不利的影響可能較大。

三、土壤銅添加量與作物產量及植物體銅含量之關係

1.蔬菜

經盆栽青江白菜試驗結果之各處理乾物重如表二所示，青江白菜植株之重量在各類土壤中均因銅添加量而遞減，受影響最大的是紅壤和砂頁岩酸性沖積土，次爲粘板岩酸性沖積土。當添加銅量達160 mgkg^{-1}Cu或以上時，除粘板岩鹼性沖積土外，其餘土壤青江白菜之相對產量均降至50%以下，並達統計上之顯著水準。

若以生物有效性 (Bioavailability)考慮，在不同土壤內銅之生物有效性，由 0.1M HCl、1M NH_4OAc(pH4.5)、0.005M DTPA (pH7.3)和 dist.H_2O 萃取的土壤銅量與作物乾物產量的關係推測之相關大小如表五，其中以 1M NH_4OAc 和 0.1M HCl萃取土壤的銅含量與青江白菜之乾物產量相關最好且達 1% 極顯著水準。故可用0.1M HCl或1M NH_4OAc(pH4.5) 的酸可溶性或交換性銅含量爲土壤之生物有效性。而1M NH_4OAc(pH4.5) 和 0.1MHCl 萃取出的土壤銅含量(x)與各土壤之青江白菜乾物重(y)之關係可由直線式 ($y=a+bx$) 求得如表六，由此關係式可求得青江白菜產量減少10、20、50%時各土類之銅濃度如表六，當產量減少10%和50% 時，1M NH_4OAc萃取的可交換性銅各爲 8～27 與 40～134 mgkg^{-1}Cu，而 0.1M HCl 萃取之酸可溶性銅各爲20～37 與 100～181 mgkg^{-1} Cu。以減產10%爲對作物的臨界毒害濃度，青江白菜以 1M NH_4OAc (pH4.5)萃取土壤中的銅量，對作物的臨界毒害濃度：砂頁岩和黏板岩酸性沖積土爲 7～10 mgkg^{-1}Cu；紅壤、砂頁岩鹼性沖積土、台灣黏土爲 15～20 mgkg^{-1}Cu; 黏板岩鹼性沖積土和片岩沖積土爲 24～27 mgkg^{-1}Cu。

2.水稻

盆栽水稻之各處理乾物重如表四，水稻稻株及稻穀之乾物產量因土類種類及土壤內銅添加量而異，受影響最大的是台灣粘土，其次爲砂頁岩鹼性沖積土。當銅添加量達160 mgkg^{-1} Cu 或以上時，除粘板岩鹼性和酸性沖積土外，其餘土壤水稻之相對產量大都降至60%以下，其中以鹼性的台灣粘土和砂頁岩鹼性沖積土最爲嚴重，甚至枯死。而在相同的添加濃度下，白菜產量除粘板岩鹼性沖積土外，其他六種土壤之產量亦都降至60%以下，尤其以酸性的紅壤、砂頁岩酸性沖積土和粘板岩酸性沖積土最爲嚴重，甚至枯死。由此兩種不同結果顯示，當銅添加量在160 mgkg^{-1}Cu時，青江白菜和水稻生長均已嚴重受抑制，但受害程度的深淺則受土壤性質所控制，其中以pH爲主要影響因子 。

表四、水稻各部分植體吸收銅含量的分佈比例
(七種農耕土壤平均值)

Table 4. The sequence for the distribution rates of copper in rice

土壤銅添加量 ($mgkg^{-1}$)	各部分植體銅含量的分佈比例 (%) 白米	糙米	稻殼	稻葉	稻根
0	5.8	6.9	9.8	17.5	60.1
20	3.0	4.6	4.7	10.7	77.1
40	2.0	2.6	3.5	6.8	85.3
80	1.5	1.8	2.6	6.0	88.0
160	1.0	1.2	1.2	3.0	92.6

表五、 萃取劑抽取的土壤銅量與作物產量的關係

Table 5. The Relation between extractable copper of soil and crop yield

	萃取劑	a	b	r
蔬菜	0.1M HCl	3.01	-0.01	0.55**
	1M NH_4OAc	2.96	-0.02	0.58**
	0.005M DTPA	2.84	-0.01	0.48**
	Dist H_2O	2.31	-0.12	0.30*
水稻 (稻穀)	0.1M HCl	22.54	-0.08	0.81**
	1M NH_4OAc	21.10	-0.10	0.76**
	0.005M DTPA	21.34	-0.12	0.74**
	Dist H_2O	17.23	-1.20	0.41*

$y = a + b\,x$

水稻以0.1M HCl萃取土壤中的銅量與乾物產量相關最好，此時表示0.1M HCl萃取銅對水稻而言，最具生物有效性，故各類土壤之水稻稻穀產量(y)與0.1M HCl萃取出的土壤可溶性銅含量(x)之關係可由直線式 ($y = a + b\,x$) 求得如表七，由此關係式可求得水稻產量減少10、20、50%時各土類之銅濃度亦如表七，此減少10%和20%之臨界濃度分別爲 20～674 與 41～1348 $mgkg^{-1}Cu$ 。各類土壤水稻減產10%之臨界濃度 (以0.1M HCl萃取之濃度):

表六、台灣主要農耕土壤中1M NH_4OAc(pH4.5)與0.1M HCl抽出銅量對蔬菜乾重影響

Table 6. Effect of dry matter of rape on ertractable copper of 1M NH_4OAc(pH4.5) and 0.1 M HCl in major Taiwan arable soils

土類	產量減少10、20、50%時之濃度 10%	20%	50% ($mgkg^{-1}$)	a	b (克,5株/盆)	r^2
	1M NH_4OAc抽出量					
紅壤	18.0	36.0	90.0	0.36	-0.002	0.71*
砂頁岩酸性沖積土	7.9	15.8	39.5	0.79	-0.010	0.26
粘板岩鹼性沖積土	26.8	53.6	134.0	2.68	-0.010	0.86*
砂頁岩鹼性沖積土	15.4	30.9	77.2	4.63	-0.030	0.95**
台灣粘土	20.0	40.0	99.8	3.99	-0.020	0.84**
粘板岩酸性沖積土	9.6	19.2	48.0	3.84	-0.040	0.92**
片岩沖積土	24.5	49.0	122.5	4.90	-0.020	0.97**
	0.1M HCl抽出量					
紅壤	21.6	43.2	108.0	0.37	-0.002	0.74*
砂頁岩酸性沖積土	20.0	40.0	100.0	0.82	-0.004	0.27
粘板岩鹼性沖積土	36.2	72.4	181.0	2.75	-0.008	0.85*
砂頁岩鹼性沖積土	27.3	54.6	136.5	4.67	-0.017	0.94**
台灣粘土	28.2	56.4	141.0	4.23	-0.015	0.86**
粘板岩酸性沖積土	21.8	43.6	109.0	3.73	-0.017	0.85**
片岩沖積土	32.3	64.6	161.5	5.13	-0.016	0.96**

$y = a + b\,x$

表七、台灣主要農耕土壤中0.1M HCl抽出銅量對水稻稻穀產量之影響

Table 7. Effect of dry matter of rice on ertractable copper of 0.1 M HCl in major Taiwan arable soils

土類	產量減少10、20、50%時之濃度 10%	20%	50% ($mgkg^{-1}$)	a	b (克,5株/盆)	r^2
	0.1M HCl抽出量					
紅壤	23.4	46.8	117.0	25.05	-0.107	0.92**
砂頁岩酸性沖積土	27.1	54.2	135.5	28.96	-0.107	0.88**
粘板岩鹼性沖積土	32.5	65.0	162.5	18.70	-0.058	0.76*
砂頁岩鹼性沖積土	22.2	44.4	111.0	23.15	-0.104	0.83**
台灣粘土	20.5	41.0	102.5	22.46	-0.110	0.78*
粘板岩酸性沖積土	673.9	1347.8	3369.5	17.52	-0.003	0.00
片岩沖積土	35.3	70.6	176.5	19.86	-0.056	0.86**

$y = a + b\,x$

台灣黏土、砂頁岩鹼性沖積土、紅壤、砂頁岩酸性沖積土爲 20～27 $mgkg^{-1}$ Cu; 粘板岩鹼性沖積土和片岩沖積土爲 32～35 $mgkg^{-1}$ Cu ; 黏板岩酸性沖積土爲 674 $mgkg^{-1}$Cu。

四、土壤性質對作物吸收銅量之影響

1.青江白菜由表八知蔬菜和水稻葉片銅含量與土壤性質有直線關係，隨處理銅濃度增加葉片含銅量亦隨之增加，但會因土壤性質不同葉片含銅量亦不同。因此以土粒大小、酸鹼度、鹽份含量、有機質、鹽基飽和度及游離鐵、鋁、錳氧化物等代表土壤特性之物質尋求關係，除土壤內銅含量外，由表八知青江白菜的銅含量與土壤的砂粒，坋粒和游離錳氧化物成正相關，但與粘粒、pH、EC(導電度)、O.M.(有機質)，tatal base(鹽基總和)，游離鐵和游離鋁氧化物成負相關，其中只有pH達 1%極顯著水準，此表示土壤性質中以pH爲控制青江白菜葉片銅含量的主要因子，pH越低，葉片銅含量越高。並由逐步迴歸方程式得知青江白菜葉片銅含量 y =110.52 − 21.13 pH+ 0.06 EC(μs/cm)+ 0.08 Al($mgkg^{-1}$)。在七種土壤生長之青江白菜葉片銅含量主受pH、EC和游離鋁氧化物影響，其中以pH最重要，故若能適當的改良或控制這些因子，則葉片中的銅量應可適當地被控制。

表八、 蔬菜和水稻葉片銅量與土壤性質之相關性
(土壤添加銅80 $mgkg^{-1}$ 時)

Table 8. The relation between copper content of floiage on rape and rice and soil properties

土壤 相關因子	青江白菜 葉片銅量	水稻 葉片銅量
	$mgkg^{-1}$	
Sand(%)	0.422	0.100*
Silt(%)	0.013	-0.089
Clay(%)	-0.464	-0.049**
pH	-0.935**	-0.341**
EC(μS/cm)	-0.821	-0.530*
O.M.(%)	-0.718	-0.321
total base (cmol/kg)	-0.867	-0.448*
游離Fe($mgkg^{-1}$)	-0.167	-0.304
游離Mn($mgkg^{-1}$)	0.407	0.257
游離Al($mgkg^{-1}$)	-0.209	-0.384

2.水稻

水稻葉片銅含量與土壤的砂粒和游離錳氧化物成正相關，但與坋粒，粘粒，pH，EC，O.M.，base，游離鐵鋁氧化物成負相關。並由水稻葉片銅量的逐步迴歸方程式 y = 0.48 + 0.16 sand(%) + 0.27 clay(%) + 7.40 pH − 0.03 EC(μs/cm) − 1.2 base(cmol/kg)。發現水稻葉片銅含量受土壤的 sand、clay、pH、EC 或 base 影響，雖達顯著水準，但其相關係數均在0.5以下，此可能因銅在水稻體內的移動性很小，大多聚集在根部，只有少部份移到莖葉，即使添加高量的銅，葉片的銅含量仍低，造成水稻葉片銅含量與土壤性質的相關性變小。

結　論

銅污染七種土類對作物生長之影響及作物減產10%之臨界濃度研究結果顯示：

(1).銅對作物的毒害程度，隨土壤和作物種類不同而有所差異，當土壤添加銅量達 80 $mgkg^{-1}$Cu或以上時，作物葉片開始黃化，生長降低。盆栽蔬菜時，土壤的 pH越低，受害越嚴重。盆栽水稻時,因浸水關係使土壤之pH提高，使得pH之影響減低。葉菜類蔬菜以生長在砂頁岩酸性沖積土受害最大，受害程度之大小順序依次爲砂頁岩酸性沖積土＞粘板岩酸性沖積土＞砂頁岩鹼性沖積土＞紅壤＞台灣粘土＞片岩沖積土＞粘板岩鹼性沖積土。在水稻方面則以在台灣粘土生長的水稻受害最重，各土類之水稻受害程度大小順序依次爲台灣粘土＞砂頁岩鹼性沖積土＞紅壤＞砂頁岩酸性沖積土＞粘板岩鹼性沖積土＞片岩沖積土＞粘板岩酸性沖積土。

(2).以土壤添加 80 $mgkg^{-1}$ Cu 時，水稻植物體各部分銅含量之大小順序爲稻根(佔總吸收量的88%)＞＞莖葉(6.0%)＞稻殼(2.7%)＞糙米 (1.8%)＞白米(1.5%)，銅在水稻體內的移動很慢，對動物造成的毒性較小。但銅在蔬菜類的移動較快，對動物毒性較大。

(3).由土壤的銅含量與作物乾物產量之相關性得知,葉菜類蔬菜以1M NH_4OAc (pH4.5)和0.1M HCl爲最佳萃取劑，而水稻以 0.1M HCl爲最佳萃取劑。當蔬菜產量減少10、20、50% 時，1M NH_4OAc (pH4.5)萃取土壤的交換性銅濃度分別爲 8～27、15～54、40～134$mgkg^{-1}$Cu ; 0.1M HCl萃取土壤的酸可溶性銅濃度自 20～37、40～73、100～181 $mgkg^{-1}$Cu。當水稻產量減少 10、20、50 % 時，0.1M HCl 萃取土壤的銅濃度除粘板岩酸性沖積土分別爲 674、1347、3369 $mgkg^{-1}$Cu 外，其餘土壤減產10、20、50%時，0.1M HCl萃取的酸可溶性銅分別爲 20～36、41～71、102～177 $mgkg^{-1}$Cu。

(4).七種土壤生長之青江白菜葉片銅量主受pH、EC和游離鋁氧化物影響，其中以pH最重要，故若能適當的改良或控制這些因子，則葉片中的銅量應可適當地被控制。而水稻植體中的銅大多累積在根部，移動到莖葉的部分少，故葉片的銅含量較不受土壤性質的影響。

20. Brazzez, F. A., G. L. Rolfe, and P. Windle. 1974. Differing sensitivity of corn and soybean photossynthesis and transpiration to lead contamination. J. Environ. Qual. 3:156-158.
21. Gee, G. W., and J. W. Bauder. 1986. Particle-size analysis. In A. Klute (ed.). Methods of soil analysis , Part 1. 2nd ed. Agronomy 9: 383-409.
22. Griffin, R. A., and N. F. Shimp. 1976. Effect of pH on exchange-adsorption or precipitation of lead from landfill leachates by clay minerals. Environ. Sci. Technol. 10:1256-1261.
22. Harter, R. D. 1983. Effect of soil pH on adsorption of lead, copper , zinc and nickel. Soil Sci.Soc. Am. J. 47:47-51.
23. Jackson, M. L. 1979. Soil chemical analysis-Advanced Course 2nd ed. Published by the author , University of Wiscons in , Madison , WI.
24. Lagerwerff, J. V. 1972. Lead, mercruy and cadmium as environ-mental contaminants. In: Micronutrients in Agriculture (J. J. Mortredt, P. M. Gordiano and W. L. Lindsay (ed)), Soil Sci. Amer., Madison, Wisconsin. P. 593-636.
25. McLean, E. O. 1982. Soil pH and lime requirement. In A.L. Page et al (ed.). Methods of soil analysis , Part 2. 2nd ed.Agronomy 9: 199 -224.
26. Miragaya, J. G., S. Castro, and J. Paiolini. 1981. Lead and zinc levels and chemical fractionation in roadside soils of caracas, renezuela. Water, Air, Soil Pollution 15:285-297.
27. Murry, J. W. 1974. The surface chemistry of hydrous manganese dioxide. J. of Colloid Interface Science. 46(3):357-371.
28. Nelson, D. W., and L. E. Sommer. 1982. Total carbon , organic carbon ,and organic meter. In A.L. Page et al.(ed.), Methods ofsoil analysis, part 2. 2nd ed. Agronomy 9: 539-577.
29. Rhoades, J.D. 1982. Cation exchange capacity. In A.L. Plage et al. (ed.). Methods of soil analysis, Part 2. 2nd ed. Agronomy 9:149-157 (1982).
30. Rhoades, J. D. 1982. Soluble salts. In A. L. Page et al. (ed.). Methods of soil analysis. Part 2. 2nd ed. Agronomy 9: 167-179.
31. Rolfe, G. L. 1973. Lead uptake by selected tree seedlings. J. Environ. Qual. 2:153-157.
32. Sampath, S. 1980. Distribution and plant available sources of copper , iron , manganese , and zinc in soils. Ph. D. diss.Virginia.
33. Santillan-Medrano, Javier, and J. J. Jurinak. 1975. The Chemistry of lead and cadmium in soil. solid phase formation. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 39:851-856.
34. Tucker, M. R. 1974. A modified heating block for plant tissue digestion. Comm. in Soil Sci. and Plant Analysis5(6): 539-546.
35. Underwood, E. J. 1977. Trace Element in Human and Animal Nutrient. 4th. edition p:411-421.