

農地污染及其防治

李國欽 林浩潭

前 言

由於工、農業生產的發展，廢氣、廢水及廢渣的排放，加上農業化學品如：農藥、化學肥料之投入量日益增加（Winteringham, 1985），從 1940 年代開始，環境污染日漸惡化，不但使農業受到很大之衝擊，更由於作物被污染而導致食品中污染物之含量也有逐漸增加之趨勢，而使吾人對某些污染物之取食量已接近人體可攝取之限值（見表 1.）。

表 1. 由米類、蔬菜類、麵類及魚貝類所攝取之重金屬量與人體可攝取限值之比較^{c)}

重金屬	每人每日攝取量 ($\mu\text{g}/\text{person}/\text{day}$)	人體可攝取限值 ($\mu\text{g}/\text{person}/\text{day}$)
砷 ^{a)}	23.2	100
鎘	32.8	48-60
鉻	30.7 ^{b)}	--
銅	1,857	--
汞	4.5	35.5
鎳	202.7 ^{b)}	--
鉛	339.6	357.5
鋅	7,555 ^{b)}	12,500

^{a)}經換算成 As_2O_3 。

^{b)}僅米類、蔬菜類及麵類。

^{c)}摘自：林浩潭等(1992)。

土壤提供人類之食、衣、住、行、育樂，為人類生存所必需，主要由固體、液體及氣體所組成，其中固體包含了無生命之有機物、無機物（如土壤礦物）及有生命之微生物、動物（如蚯蚓）、植物（如藻類）等。正常之土壤應具備化學性及物理性之物質平衡以及生物性之生態平衡，但由於外來物

質及能源之加入，以及農耕地之開發，使土壤之物理性、化學性及生物性（生態之多元化）遭受破壞而逐漸降低或失去其功能。為防止農地污染繼續惡化，必需對土壤污染之來源、污染物對作物之危害、污染物經由作物吸收進入食物鏈而對動物、人體造成之危害，以及防治之對策有充份的瞭解，本文乃就上述數點分別敘述如下：

農地污染來源及污染物

土壤污染主要為人類活動所造成，根據統計，經由水污染所引起者佔 80%，經由空氣污染者佔 13%，其餘有 7% 為農業資材不當施用或廢棄物處置不當所引起(日本環境廳土壤農藥課, 1973)。

工業廢水中之污染物如：重金屬、鹽類、有機物、油脂、清潔劑等有機或無機之化學物質、都市之固體廢棄物，以及廢水之過酸及過鹼，都會改變土壤之正常功能（阪井 弘, 1974）。

更有甚者，農業本身之活動也會改變農地之正常功能，譬如化學肥料之使用，使土地持續酸化（連深, 1991）。近年來倡導有機農業，但有機農業如利用污染物含量偏高之有機肥，又會引入不少毒性物質，根據農業藥物毒物試驗所（林浩潭等, 1994）之調查，市售有機肥料中重金屬之含量推算，若長期使用重金屬含量偏高之有機肥，不但會影響土質造成作物減產，且進一步會影響到農產品之品質安全（見表 2.）。

表 2. 施用有機肥致使作物受土壤重金屬毒害之估算時間(年)

	砷	鎘	鉻	銅	汞	鎳	鉛	鋅
速率 1 ^{a)}	268	57.8	8.10	26.7	340	353	241	27.4
速率 2 ^{b)}	21	3.12	0.28	1.94	28.3	29.4	21	1.77

^{a)}以有機肥中重金屬平均含量估算。

^{b)}以有機肥中重金屬最高含量估算。

農藥的使用可提高農作物產量與品質，但如使用不當也常會破壞土壤之生物相，因而間接的破壞土壤性質以及降低土壤肥力（李國欽等, 1989），譬如殺草劑之使用，因雜草之去除，自然界物質循環因而破壞，可能造成土壤肥力大量流失，尤以山坡地果園較為嚴重。

許多極為穩定之化合物進入土壤後，因不易分解而能累積於土壤中達十數年之久，其中有些化合物會藉作物之吸收而污染動物飼料及人類之食品，早期（1940至1960年代）使用之有機氯殺蟲劑即為一例，該類之殺蟲劑1973年即被政府明令禁止使用，但根據農業藥物毒物試驗所之調查，除1973年、1982年在台灣農地土壤中都有發現外，某些殺蟲劑及其初級代謝物直到1994年仍被發現（見表3.），而該等藥劑禁止於農田使用已有21年之久。

表3. 1973年、1981年、1994年土壤中有機氯殺蟲劑平均含量($\mu\text{g}/\text{kg}$)

農藥名稱	1973		1981		1994	
	表土	裏土	表土	裏土	表土	裏土
Aldrin	11.3	1.6	0.5	0.8	1.88	0.80
Dieldrin	17.8	11.7	0.5	1.7	0.30	0.33
DDE	20.3	7.4	14.9	5.3	5.82	3.54
DDT	17.1	2.2	2.8	1.5	ND	0.06
Endrin	--	--	ND	trace	0.12	0.02
Hepatchlor	1.2	0.5	ND	0.1	0.10	0.17
Heptachlor epoxide	2.1	2.1	0.5	0.8	0.12	0.01
Lindane	11.8	4.7	0.7	3.1	1.10	0.43

註:1.ND=檢測不到。

2.1973年未檢測 Endrin,土樣之表土深度為0-12公分，裏土深度為12-24公分。

3.1981年、1994年土樣之表土深度為0-15公分，裏土深度為15-30公分。

4.1973年、1981年、1994年之土壤樣品數分別為112,136,204。

5.摘自：林浩潭等(1996)。

污染物對作物之危害

一、重金屬

工業、農業上常用之重金屬有砷、鎘、鉻、銅、汞、鎳、鉛、鋅等8種，電鍍、皮革、化工、電子、電池工廠廢水中可能含高量重金屬，一旦排入農田，則會引起重金屬污染。重金屬對作物之危害機制為：(一)改變作物之生理，(二)與微量元素如鐵或必需元素和氮、磷等產生競爭作用。

作物受重金屬毒害常發生幼葉葉片黃白化，但葉脈仍呈綠色，嚴重者葉緣產生壞疽（缺鐵症狀），或呈紅紫色條紋（缺磷症狀），根系生長受阻，鬚根無法生長，根系呈刺鐵絲狀，產量下降。

重金屬對作物之毒害以旱田較易發生，因旱田土壤通氣良好，呈氧化狀態，土中重金屬為硫酸態；反之，水田土壤因淹水而呈還原狀態，重金屬為硫化物型態。硫酸態之重金屬化合物較易分解而為作物吸收，因此以旱田之受害症狀較明顯；但砷為例外，因三價砷（還原態）之毒性大於五價砷（氧化態）。李國欽等人（1980）發現土壤含砷量過高時，水稻常會不稔。

二、鹽類

鹽類係指銨鹽、氯離子、氟離子、硫酸鹽、硝酸鹽等，土壤中鹽類過剩，則會產生高滲透壓，作物根部之吸水作用受抑制。高濃度、短時間鹽害會引起稻株枯萎，低濃度、長時間鹽害會引起根腐敗、變黑，下葉枯萎，作物無法結實，被作物吸收之鹽類亦會干擾作物之生理作用。

鹽類過剩之原因為：(一)過度施用化學肥料，(二)家庭廢水污染，(三)養殖廢水污染，(四)海水倒灌。設施園藝或高經濟作物生產專業區，由於作物價格高，農民捨得施用大量化學肥料，或因設施阻隔雨水，無法將過剩之營養鹽排除，往往造成土壤受到鹽類污染。

三、酸或鹼

金屬表面處理、電鍍、食品工廠、製革、紡織、化工、製紙工廠之廢水、酸雨等可能為高或低 pH 值，一旦排入農田，土壤變酸後，土中之鐵、鋁大量溶出，產生作物之鐵、鋁毒害；磷之吸收亦會受抑制，作物葉面發生斑點，葉先端卷曲，根呈暗褐色。土壤酸化亦會影響土壤微生物之活性，而抑制氮化及硝化作用，但可因土壤之物化性質而異。

土壤如變鹼，則土壤中之鐵、錳、銅、鋅等微量元素形成不溶解化，不易為作物吸收，引起微量元素缺乏，產生生育障害。

四、有機物

有機物係指碳水化合物、蛋白質及動植物體之分解物等，一般存在於醱酵、化工、石油化學、食品、屠宰、製革等廢水中。大量有機物經由灌溉水進入土壤後，會造成氮素過剩及土壤還原障害。作物之氮素過剩症狀為生長過份繁茂、葉色變濃、作物體組織軟弱、易倒伏、易引起病蟲害之侵入、稔實不良等。

土壤中過量之有機物如在還原狀態下分解，會產生硫化氫、二價鐵、甲烷、有機酸、醇類等，使作物之根部腐爛，營養、水份吸收受阻，終至枯萎。

五、油脂

輸油管破裂或化工、機械廠廢水排入農田，其中之油脂能直接浸入作物體或根部，形成半透明狀，繼而腐爛。油脂亦屬有機物，其毒害症狀與有機物類似，油脂如覆蓋於表土，則會阻止土壤氣體之進出，造成土壤還原障害。

六、清潔劑

家庭廢水或工業廢水中之清潔劑如排入土壤中，會對作物產生毒害。清潔劑會使土壤粒子上吸著之銨態氮游離，造成土壤中銨態氮之流失，使作物發生缺氮症狀。

七、固體廢棄物

建築廢土、垃圾進入土壤會破壞土壤之物理性，致使耕作困難。砂石廠、醱酵、製革、食品、製紙廠等廢水中含過量之懸浮固體物，進入農田後，會滲入土壤孔隙中，使土壤之透水、透氣等物理性惡化，造成地力減退，作物根之分化降低，生長停滯、受阻。

土壤污染物與農產品品質安全

土壤污染物因黏附及吸收作用而進入植物體，進入植物體後又在植物體中運行而達到食用部份，進而影響農產品之安全品質。

比較不同作物中重金屬含量與土壤中重金屬含量之比，發現以米類吸收重金屬較多，蔬菜類其次；以重金屬來看，則以鎘、鋅、銅等較多（見表 4.）。

表 4. 作物中重金屬含量與土壤中重金屬含量之比值^{a)b)}

重金屬	米 類		果 菜 類		葉 菜 類		根 菜 類	
	表土	裏土	表土	裏土	表土	裏土	表土	裏土
砷	2	2	0.4	0.4	0.2	0.2	0.6	0.6
鎘	10	9	3	4	4	4	3	4
鉻	1	1	0.3	0.3	0.01	0.01	0.04	0.04
銅	11	12	3	3	3	3	4	4
汞	1	1	3	3	2	2	5	5
鎳	2	2	7	7	0.7	0.7	1	2
鉛	2	2	1	2	2	3	2	2
鋅	29	29	5	6	4	4	7	7

^{a)}以鮮重為基準之作物中重金屬含量/以乾重為基準之土壤中重金屬全量 x 100。

^{b)}摘自(Gwo-Chen Li *et al.*, 1994)

重金屬中，鎘易為作物所吸收運行而達到食用部份，因此，在土壤受鎘污染之農田，可能生產鎘含量偏高之稻米（李國欽等, 1990），當稻米中之鎘含量超過食品衛生標準——0.5 mg/kg 時，經食用後可能影響人體健康。

農田污染防治

農田污染之防治首先必須具備：(一)污染物之標準值，(二)污染物之環境容量，(三)污染等級，以為污染判定與防治之依據，繼而進行污染之處理（王煥校, 1990）。

一、污染物之標準值

為確定一區之農田是否已遭受污染，必需有標準可據，而標準之訂定有以農產品衛生安全為標的——食品衛生標準，或以對作物生長為害為標的者——作物毒害標準。

土壤中污染物主要通過水、食用植物、動物進入人體，因此，常採用生長在其上的作物的可食性部份做為容許量，即土壤中某毒物超過一定限度，就使作物的可食性部份中某毒物濃度超過質量標準（衛生標準）。聯合國糧食及農業組織（FAO）和世界衛生組織（WHO）規定了食品（糧食、肉類、乳類、蛋類、瓜果、蔬菜、食油等）中的農藥殘留量；美國、日本、我國等也有相關規定。

我國頒布的食品衛生標準中，對食品中汞、砷等有毒物質和一些農藥等規定了最高容許量，主要目的在防止食物受污染，間接保護人體健康。

以作物危害為標的者，如日本土壤中銅含量標準為 125mg/kg（0.1 M HCl 可萃取者），砷含量標準為 15mg/kg（1 M HCl 可萃取者），藉以保護農作物免受銅、砷之危害（Asami, 1981）。

林浩潭（1991）評估砷、鎘、鉻、銅、汞、鎳、鉛、鋅等 8 種重金屬對作物毒害濃度，以及在食物中之容許含量（如表 5.），發現汞、鉛不易為作物吸收，而砷、鉻、銅、鎳、鋅等對作物之毒性高於對人類及動物之毒性。當土壤中含過量之此類重金屬時，作物無法生長，人類及動物不致經由食物鏈而受害；但鎘易為作物所吸收，且鎘對作物之毒性低，對人類及動物之毒性高，土壤中之鎘可經作物之吸收，再經食物鏈而對人類及動物產生為害；因此，建議土壤中重金屬標準之訂定依據，鎘應以農產品衛生安全為主，以保護人體健康；而其他重金屬則應以對作物危害為主，以保護農作生產。

表 5. 重金屬對作物毒害濃度以及在食物中之容許含量

重金屬	植物體地上部之含量 ^{a)}			食物中之容許含量	
	正常濃度	毒害濃度	毒害濃度(稻)	家畜 ^{a)}	人類 ^{b)}
無機砷	0.01-0.1	3-10	30-100	50	5
鎘	0.01-0.1	5-700	5-10	0.5	0.5
三價鉻	0.01-0.1	20	30-100	3000	--
銅	3-20	25-40	20-30	25-3000	100
汞	<0.01-0.09	1-3	0.5	0.5	0.5
鎳	0.1-5	50-100	20-50	50-300	--
鉛	2-5	--	50-2000	30	10
鋅	15-150	500-1500	100-300	300-1000	1000-5000

^{a)}含量單位為 mg/kg，以乾重為基準。

^{b)}含量單位為 mg/kg，以鮮重為基準。

二、土壤污染容量之計算

在某一特定範圍內及在規定之環境目標下，能容納某污染物之最大負荷量，是為污染物之環境容量。污染物排放標準中，雖已規定了各污染源排放標準，可是缺乏環境容納與淨化能力之考量，如有眾多污染源一起排放而超過環境之負荷，勢必造成環境污染，因此必須考慮環境之污染容量，而採行總量管制，以確保環境免受污染。

以保護作物生產為目的之環境容量，一般經由作物計算之，計算此等環境容量時，應以栽培面積廣，對污染最敏感的作物為主，同時考慮污染類型，如空氣污染以葉菜類較敏感，土壤污染以根莖類作物較敏感。茲舉重金屬環境容量之推算公式如下：

$$C = (S - B) \times M \times A$$

C：環境容量（毫克）

S：環境標準值（毫克／公斤）

B：環境背景值（毫克／公斤）

M：每公頃土壤重（公斤／公頃）

A：區域面積（公頃）

背景值之求得必須選擇地形、土壤、母質、耕作措施相同而沒有污染之區域進行。環境標準值即為上一節中所述及之衛生標準所推算出之土壤中重金屬之濃度或作物危害濃度。

三、土壤污染等級之訂定

土壤污染等級之訂定，依土壤污染物標準值種類之不同，而可區分為：

(一) 以作物生長危害而區分之等級：根據土壤中污染物之調查與分析所得之數據，進行污染物之分級如下：

I 級（正常級）：對作物不會產生為害之濃度，或少於此濃度加 2 倍標準偏差。

II 級（輕污染）： < 2 倍正常級濃度。

III 級（中污染）： < 3 倍正常級濃度。

IV 級（重污染）： > 3 倍正常級濃度。

V 級（嚴重污染）： > 4 倍正常級濃度。

(二) 以農產品衛生標準區分之等級：

I 級（非污染）：作物生長正常，品質優良，可食性部份污染物含量為非污染區之背景值或低於背景值。

II 級（輕度污染）：作物生長正常，但可食性部份污染物含量為中度污染值之半。

III 級（中度污染）：作物生長正常，但污染物含量與非污染區之背景值相比，在統計學上有顯著性差異（ $P > 0.01$ ）。

IV 級（重度污染）：作物生長發生障害，或作為食品之作物植株或子實中污染物含量已超過食品衛生標準。

上述二種標準區分等級中，輕度、中度污染者須採區域警戒，並進行監測及斷絕污染源等措施，以防止污染程度之擴大與加深；而 IV 級以上程度者，則必須進行休耕、復育等污染防治措施，以防止生態環境受害。

四、農田土壤污染之處理

土壤污染之防止，首先須防止水污染、空氣污染，設立專業區集中管理各種污染性較大之工廠，並適當處理廢棄物。農業資材如肥料、農藥之使用須適時、適量、適用。

受懸浮固體物為害之土壤可利用翻耕改良透氣性、透水性；有機物、油脂、清潔劑為害之土壤須連續進行灌水、曬田、翻耕等步驟，利用土壤微生物分解毒物質；酸土須施石灰改良；鹼土或含鹽類過高之土壤須長期以淡水灌溉、洗滌與排水，去除有毒物質；受重金屬為害之土壤須以排土、客土或翻土等方法，降低或除去重金屬。但進行上述各種改良對策前，除了必須考慮其經濟性外，尚須考慮是否會引起二次污染。