

科學農業 33(1-2)60-67,1985

空氣污染對農作物之影響

I、SO₂之影響*

李 貽 華 李 國 欽**

一、前言

隨著工業科技的發達，工廠的建立，而使得空氣污染問題日益嚴重。空氣污染所造成之困擾包括危害人體健康⁽¹²⁾，污染生存環境及影響植物之生長。一般來說，植物比動物更易因環境的改變而受到傷害，因其暴露在空氣污染物下毫無退避餘地可言。二氧化硫是目前大量使用之石化燃料的燃燒產物，故二氧化硫的發生量頗多。在英國，二氧化硫是主要污染物之一⁽⁷⁾，而在本省之空氣污染物中二氧化硫佔三分之一⁽⁸⁾，故二氧化硫之污染問題是不容忽視的，其對植物之為害更須加以注意並嚴加防範。

茲將二氧化硫的來源，其與植物體之關係，對植物所造成之徵狀及可能的為害機制，與對作物產量之影響，影響植物體對二氧化硫感應之因素等分別介紹如下：

二、二氧化硫之來源

在活火山地區有天然產生的 SO_2 。而人為的二氧化硫污染來源主要是煤炭及石化燃料的燃燒；除燃燒外，含硫之礦石於冶煉過程中；石油及天然氣之生產、精製、利用；硫磺與硫酸之製造等皆會放出 SO_2 。 SO_2 除了在農業區造成很大的經濟損害外，嚴重者會腐蝕表土，很難恢復農田的生產能力。

三、硫與植物

硫是植物生理代謝上所必須的元素之一，如氨基酸、蛋白質、維生素及酵素中都含有硫，健康葉片的硫含量約為 $500 \sim 14000\text{ppm}/\text{乾重}$ ⁽²⁶⁾，視種類而異。有些植物於低濃度 SO_2 下可直接從大氣中吸收 SO_2 而利用之，此反倒有助於植物之生長⁽²⁹⁾。 SO_2 對植物之影響可分很多方面來看，如 SO_2 會影響光合作用、呼吸作用及其他基本之生理作用等，因而在形態上發生改變而產生病徵。

硫進入植物體內之途徑有三：1.以硫酸根離子形式經由根部進入植物體；2.以氣態 SO_2 形式經氣孔而進入植物體中，其可溶於葉肉細胞中而解離出 H^+ ， HSO_3^- ， SO_3^{2-} 等離子；3.或溶於水中成亞硫酸根而被吸收。此三種形式的硫都可被植物吸收而利用之，這些離子是否會傷害到植物的代謝作用，視其存在的形式與量而定，如 SO_3^{2-} 之毒性遠比 SO_4^{2-} 強^(40,45)。 SO_3^{2-} 可經由sulphite oxidase的作用而氧化成 SO_4^{2-} ，因而減弱其對植物之毒性，此酵素發現存在於豌豆之粒線體中⁽⁴⁴⁾。 SO_3^{2-} 有多少量會經由酵素作用而氧化成 SO_4^{2-} ，在細胞中又有多少 SO_3^{2-} 可直接氧化成 SO_4^{2-} 而減弱毒性，至今尚未完全明瞭。

植物細胞具有緩衝能力（buffering capacity），可將 H_2SO_3 所造成之酸性中和之⁽²⁶⁾，以減少 SO_2 所造成之為害。甜菜葉片可暴露於 0.186ppm 之 SO_2 下，每天5.2小時，連續60天後仍無受害情形產生，此乃因其具緩衝能力，因而可忍受 SO_2 之薰蒸⁽²⁸⁾。MacLeod⁽²⁵⁾證明在低濃度下，硫可加入一般之代謝作用中而不產生受害症狀，但進入植物體的量若超過植物所須，則不論其進入植物體內的速度有多慢，仍會造成慢性傷害，葉會逐漸萎黃而呈現黃化之現象。若硫進入植物體之速度太快，則植物體之代謝系統會受到干擾而產生急性為害，受害部位最先呈浸水狀並呈軟弱感，繼而組織遭受破壞，葉尖、

* 臺灣植物保護中心農藥殘量組綜合論述第10號，
收稿日期：73年5月22日

** 臺灣植物保護中心農藥殘量組研究助理及中心主任

葉緣逐漸枯乾，葉脈間呈壞疽現象。

四、二氧化硫為害植物之機制

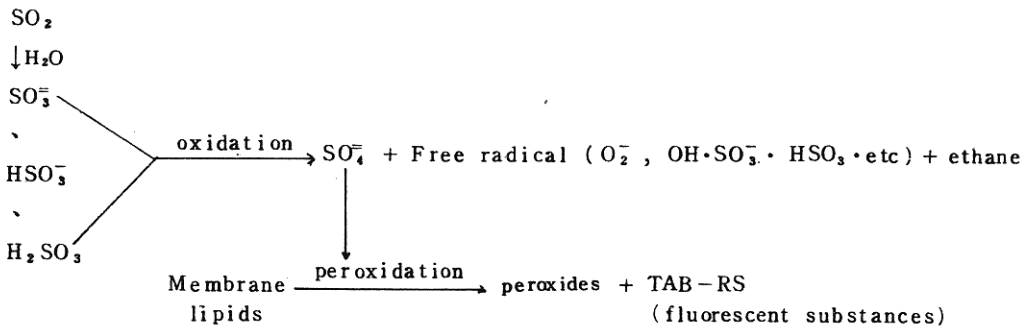
一般評定污染物之植物毒害時，皆是以其可見之病徵為主，但有些作物雖無病徵出現，然其生長及產量卻減少⁽⁴⁶⁾，此可證明污染物確實會干擾細胞的代謝作用。SO₂為害植物的作用主要有以下幾種：

(一)影響細胞膜的通透性及某些酵素的作用

多數之生化反應都是發生在細胞膜包圍住之組織中，故任何污染物要影響植物之代謝作用時

，首先必須先進入這些組織中，亦即必須先通過細胞膜，細胞膜之通透性是具選擇性的，若以離子強度而言，SO₂及H₂SO₃較SO₃⁼易通過。SO₂進入細胞後會轉變成H₂SO₃及H₂SO₃⁼，而使細胞內之酸性提高而影響細胞之生理。

SO₂會破壞細胞膜之結構及其通透性⁽⁴⁹⁾。Yu⁽⁵⁰⁾發現SO₂會影響細胞膜上脂質(lipid)之過氧化作用(oxidation)及細胞膜之通透性。SO₃⁼會打斷S-S鍵，因而破壞蛋白質及細胞膜之結構⁽⁷⁾，而影響了通透性。Prasad⁽³⁶⁾測定經SO₂薰蒸後之植物體中蛋白質含量，發現



蛋白質含量減少很多。

葉綠體之膜上含有許多光合色素及酵素，而此膜之結構很微細，故極易被SO₂所破壞⁽⁴⁹⁾，因而影響了光合作用及一些生化作用。

SO₂會干擾酵素之活性而影響代謝作用之進行，如SO₂會抑制glutamate dehydrogenase, glutamate pyruvate transaminase之活性而影響氨基酸及氮之代謝⁽⁷⁾。SO₂會刺激peroxidase及polyphenol oxidase之氧化作用，而使植物對SO₂產生感應。Pierre發現SO₂會影響iso-citrate dehydrogenase, malate dehydrogenase, aspartate aminotransferase, glutamate dehydrogenase, peroxidase等酵素之活性⁽³⁵⁾。

(二)對光合作用之影響

光合作用是植物最重要之生化反應之一，很多報告指出其對SO₂甚為敏感^(6,7,10)。Takemoto⁽⁴⁷⁾證明0.50, 0.75 ppm SO₂下即可使大豆之光合作用速率顯著地降低然對其為害機制仍不甚了解。一般而言，SO₂對光合作

用之影響可分幾方面來說明：

1. 二氧化碳之固定：Ziegler⁽⁵¹⁾的報告中指出，SO₃⁼會抑制光合作用中CO₂之固定，此乃因為SO₃⁼會與CO₂競爭ribulose, 5-diphosphate carboxylase(以下簡稱RuBPase)上之作用點，此點乃固定CO₂之中心，但SO₃⁼之濃度太高時其反會失去競爭力。Hällgren⁽¹⁴⁾發現SO₂薰蒸後，植物體內RuBPase之活性顯著地減弱，光合作用亦受到抑制，且光合作用率、RuBPase之活性與SO₂之濃度又呈相關關係。Ziegler⁽⁵²⁾發現當CO₂濃度增加時，SO₃⁼之取代CO₂會變為困難，而減少SO₃⁼之為害。

Osmond證明亞硫酸鹽化合物會抑制光合作用中CO₂之固定⁽³²⁾，即會干擾phosphoenol pyruvate carboxylation system，主要是因其抑制了phosphoenol pyruvate carboxylase及malate dehydrogenase之作用，Lüttge於1972年證明了亞硫酸鹽化合物對植物之影響可代表SO₂之影響⁽²⁴⁾。

2. 光合色素：Hawksworth⁽¹⁷⁾ 指出 SO₂ 對地衣之分佈有很強之影響力，其主要的侵襲目標是光合作用過程。將地衣暴露於致死濃度下（5 ppm），結果葉綠素（chlorophyll）被分解成 phaeophytin 及 Mg⁺⁺ 離子，而 phaeophytin 會促使葉片提早老化⁽²²⁾。其他尚有許多報告指出 SO₂ 會破壞葉綠素而影響光合作用之進行^(4,13)。

弱酸下，氫可取代葉綠素中鎂離子之位置而轉變成 phaeophytins，但其他的酸（如 HF，HCl）亦具有此作用⁽²⁶⁾，故葉綠素被 SO₂ 分解成 phaeophytin 及 Mg⁺⁺ 並不具專一性，故無法利用測定 phaeophytins 的量來鑑定 SO₂ 之為害。

Shimazaki⁽³⁸⁾ 發現 SO₂ 除會破壞葉綠素外，尚會破壞類胡蘿蔔素（carotenoids）。有些植物的葉綠素雖未受到破壞，然其光合作用量卻減少了，由此可知，影響光合作用的因素很多。Puckett⁽³⁷⁾ 指出 SO₂ 對地衣之毒性決定於其具氧化或還原的性質，在低 pH 值下其毒性增強，而在氧化過程中會破壞葉綠素。

Malhotra⁽²⁸⁾ 測定液態 SO₂ 對葉綠素之影響，結果發現 100ppm 下尚不影響葉綠素 a 與 b，250ppm 下葉綠素 a 較葉綠素 b 敏感。繼而測定 phaeophytin a 與 b 的量，結果在低濃度下（10~100ppm）phaeophytin a 與 b 的量並無改變，然於高濃度時（250~500ppm），phaeophytin a 的量卻顯著地增加，但 phaeophytin b 的量仍然不變，可知液態 SO₂ 可使葉綠素 a 轉變成 phaeophytin a，而高濃度 SO₂ 下葉綠素 b 的量亦減少了，故可知葉綠素 b 並未轉變成 phaeophytin b，是否轉變成其他物質呢？乃繼續測定 chlorophyllide a 與 b 的量，結果 chlorophyllide a 的量不變，而 chlorophyllide b 的量則隨 SO₂ 的濃度增高而增多，但濃度高至 500ppm 時則不再繼續增加。並且發現低濃度之 SO₂ 可使 chlorophyllase 之活性增加，而高濃度時（100~500ppm）此酵素之活性則降低，而 chlorophyllase 可將 chlorophyll 轉變為 chlorophyllide，此可說明 chlorophyllide b 增加之原因。當作物長時間暴露於 SO₂ 下，其酵素系統——如 chlorophyllase ——受到影響，當

chlorophyllase 將 chlorophyll 破壞而轉變成 chlorophyllide，則會出現病徵。

SO₂ 會與鐵蛋白（ferredoxin）及細胞色素（cytochromes）中之鐵離子結合而抑制光合作用之進行，即 SO₂ 使光合作用中攜帶電子者失去作用⁽³⁹⁾。

3. 其他：SO₂ 會影響光合作用中之電子傳遞及光合磷酸化作用（photophosphorylation）⁽⁷⁾。Shimazaki⁽³⁹⁾ 發現光照下 SO₂ 薰蒸會抑制莖葉片光反應系統 II（photosystem II）之活力，而不影響光反應系統 I（photosystem I）。即抑制非環式光合磷酸化作用（noncyclic photophosphorylation）及電子流動。而 Silvius⁽⁴⁰⁾ 發現 SO₂ 會抑制環式與非環式之光合磷酸化作用。

Harvey⁽¹⁵⁾ 發現 SO₂ 薰蒸後，葉片內之 ATP 含量降低，此乃因 SO₂ 會抑制粒線體中 ATP 之形成。

(三) 對一般代謝之影響

Asada⁽³⁾ 發現 SO₂ 會促使 α-hydroxysulphonates 之形成而抑制了乙醇酸氧化酶（glycolic acid oxidase）之作用，亦即影響乙醇酸（glycolic acid）之代謝。Tanaka⁽⁴²⁾ 亦指出 SO₂ 可促使大麥葉片形成 glyoxylate bisulphite，而抑制乙醇酸代謝反應的進行，繼而影響了植物體中其他代謝作用的進行，如甘氨酸（glycine）、絲氨酸（serine）的合成⁽⁴³⁾，其以實驗證明了暴露於 SO₂ 下之植物其絲氨酸的合成減少了 50%。亦有報告指出 SO₂ 會干擾 Calvin cycle 的進行⁽⁷⁾。

SO₂ 與 H₂SO₄ 可將 disulphide enzymes 或蛋白質轉變成 thiosulphonate 及 thiols，即可將 polypeptide 之 S-S 鍵打斷，因而破壞了酵素及蛋白質的性質。植物會因 SO₂ 污染而造成 HSO₃⁻ 及 SO₃⁼ 之聚集，以致破壞氧化態硫及蛋白質中所必須之 glutathione 與 cystein 中 sulphydryl 的平衡，而影響了代謝作用的進行⁽⁷⁾。

SO₂ 會抑制 diastase，peroxidase，catalase 等酵素之作用，而 pH 值又會對 SO₃⁼ 之作用產生很大之影響，SO₃ 在酸性狀況下會抑

制酵素之活性，在碱性下則有刺激作用。 SO_2 對不同酵素之活性其抑制力亦不同，如 peroxidase 對 SO_2 遠較 glucosidase 敏感。對楓樹及樺樹而言， SO_2 先抑制 catalase 之作用，繼而 peroxidase，polyphenoloxidase。

SO_3^{2-} 具親核性，可與 NAD 結合形成 hydroxyridine 4-sulphonic acid，其又可與一些去氫酶（dehydrogenase）——如 lactate dehydrogenase，malate dehydrogenase——形成錯合物，因而抑制了氫離子之轉換。

豌豆種子中之 glutamate dehydrogenase 以 7 種不同型式存在，經 SO_2 薰蒸後只剩一種，由此可知 SO_2 會使 glutamate dehydrogenase 在構造上發生改變⁽³³⁾。

SO_3^{2-} 可與游離基（free radical）作用而打斷 DNA 的 phosphodiester 鍵，故 SO_2 之毒性亦可能因 SO_2 使 DNA 或 m-RNA 失去作用而造成⁽¹⁸⁾。

高等植物之氣體交換都是經由氣孔而進行，Mansfield 於 1970 年最早發現 SO_2 可促使氣孔開張⁽²⁸⁾，以後在玉米、豌豆、蘿蔔、菸草上亦發現有此情形⁽⁴⁴⁾；但有些報告却指出 SO_2 會促使氣孔關閉，如 Kondo 在花生、番茄、菠菜上發現此現象⁽²⁰⁾，Furutawa 亦發現 SO_2 可促使稻米、胡瓜的氣孔關閉，然促使氣孔關閉的現象似乎都發生在高濃度時。接觸 SO_2 後多久方會使氣孔產生感應，視植物種類而異，從 10 分鐘至 4 小時不一。污染物影響氣孔開張是決定受害程度的重要關鍵，第一，其會影響光合作用之 CO_2 的吸收速率；第二，影響水分的蒸散， SO_2 促使氣孔開張而致水分蒸散太快，因而 SO_2 之為害徵狀與失水現象很相似；第三，影響污染物進入葉肉組織到達作用點的量及速度。故有些人認為可由氣孔之感應來估測可能受害之程度。

SO_2 對呼吸作用之影響有多種說法：1. 沒影響；2. 只有些微的影響；3. 會減低呼吸速率；4. 增加呼吸活力。然至今尚無試驗可直接證明何者為正確。

Prasad⁽³⁸⁾ 發現經 SO_2 薰蒸後之植物體其硫的含量增高。Linzon⁽²³⁾ 亦曾指出，經 SO_2 處理後，含硫量高者其敏感性亦強，且植物體吸收

SO_2 之量與其敏感度有直接的關係。

SO_2 亦可能因改變土壤之 pH 值而影響地衣類氮的固定。

(四) 對細胞構造之影響

SO_2 之急性為害會造成細胞之原生質分離⁽²⁶⁾，Wellburn⁽⁴⁹⁾ 指出，長時間暴露於 SO_2 下會使葉肉細胞發生原生質分離而遭到破壞，而 SO_2 之為害通常最先發生於葉綠體上。繼而以電子顯微鏡觀察蠶豆葉綠體之結構，發現 SO_2 (0.25 ppm, 2hr) 薰蒸後，葉綠體間之 thylakoid 產生膨脹現象，而葉綠體並無受害情形發生，除去污染源後，thylakoid 即恢復原狀，當 thylakoid 受到破壞或變形時會影響 CO_2 之同化作用。Black⁽⁵⁾ 發現 SO_2 會使保衛細胞中之葉綠體產生膨脹。Malhotra⁽²⁷⁾ 發現 SO_2 會使粒線體之構造發生改變。 SO_2 亦可能影響花粉的發芽及花粉管的延長^(9,11)。

五、二氧化硫對產量之影響

SO_2 對產量之影響與濃度間是否呈相關關係？Sprugel⁽⁴¹⁾ 證明大豆的產量與 SO_2 之濃度呈相關關係(表 1)。Heggestad⁽¹⁹⁾ 亦試驗證明 SO_2 會影響四季豆之產量(表 2)，並發現產量與 SO_2 濃度呈直線關係(圖 1)。Haase⁽¹⁶⁾ 於 1980 年統計出 Arizona 一家煉銅廠附近 43 年來作物之產量，結果發現：(1) 若無病徵出現則產量不會受到影響；(2) 產量損失率低於葉面受害百分率；(3) SO_2 所造成之葉面傷害並不一定會影響產量。根據李國欽等⁽¹⁾ 之試驗結果發現當水稻葉面有輕微受害徵狀出現時並不影響其產量。故由葉面受害面積之大小並無法估計其產量損失會有多少⁽⁷⁾。產量與 SO_2 濃度間之關係可能視作物種類而異，因 SO_2 對不同植物的為害機制皆有所差異，故對產量之影響亦可能有很大的差異，因此，若想估計空氣污染對作物產量之影響，須有足夠的資料，例如： SO_2 對每一種作物之為害機制，其受害徵狀，葉面受害面積與 SO_2 濃度及作物產量之關係，如此方有可能對田間作物之產量做一預估。

表 1 在開放式薰蒸條件下，不同 SO₂ 濃度對大豆減產之影響⁽⁴¹⁾

試驗規劃	平均濃度 (ppm)	每小時 薰蒸量 (ppm-hr)	產 處 理 組	量 對 照 組	產量減少百分率 (%)
1977					
Ambient	0.005 - 0.015	-	2.566 ± 77	2.577 ± 73	0.3 ± 4.2
Low	0.12	13.3	3.052 ± 92	3.478 ± 101	12.3 ± 4.3
Medium	0.30	34.2	2.482 ± 65	3.140 ± 48	20.5 ± 3.1
High	0.79	89.6	1.636 ± 52	2.992 ± 120	45.3 ± 3.7
1978					
Low 1	0.09	6.8	2.370 ± 27	2.531 ± 47	6.4 ± 2.1
Low 2	0.10	7.8	2.256 ± 40	2.379 ± 43	5.2 ± 2.5
Medium 1	0.19	13.5	2.191 ± 65	2.492 ± 41	12.2 ± 3.1
Medium 2	0.25	18.9	2.008 ± 27	2.485 ± 42	19.2 ± 2.0
High	0.36	26.1	1.859 ± 48	2.209 ± 45	15.9 ± 3.0

表 2 不同狀況下二氧化硫之薰蒸對四季豆產量之影響⁽¹⁹⁾

處 理 情 形			植株重量 (kg/plot, 1.3 m ²)	產 量 (kg/plot, 1.3 m ²)	葉面受害指數 (0 to 10)
二氧化硫 (ppm)	室內氣體種類	臭 氧			
0	CF	Low	3.91 a	1.41 a	0 a
0	NF	Ambient	3.68 a	1.39 a	1.0 b
0.30 ± 0.03	CF	Low	3.51 a	1.19 a	1.7 b
0.30 ± 0.03	NF	Ambient	2.63 b	0.79 a	2.9 c

$$Y = a + m [SO_2]$$

Cultivar

BBL 290	1.39	-2.27	-.99
BBL 274	1.62	-2.02	-.91
Astro	1.18	-1.76	-.83
Mean	1.40	-2.02	-.99

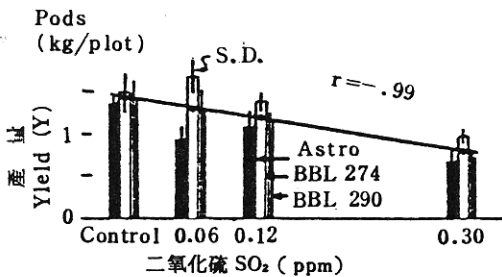


圖 1 二氧化硫濃度與三種不同品系四季豆個別產量以及平均產量之關係⁽¹⁹⁾

六、影響植物敏感度之因素

Prasad 發現豆科植物對 SO₂ 較穀類作物敏感⁽³⁶⁾，然影響其敏感度的因素尚不太清楚，可能與植物體的生理、遺傳有關。植物體的發育狀況亦會影響其敏感度，如生長完全或近於生長完全之葉片對 SO₂ 較為敏感，展開葉較未完全展開

之葉片敏感⁽³⁰⁾。植物體之水分含量亦會影響其敏感度，因水分含量會影響氣孔的開張，繼而影響了 SO₂ 之吸收，Bressan 發現氣孔的開張是影響胡瓜對 SO₂ 抗性之主要因素⁽⁸⁾。

影響植物對 SO₂ 感應之環境因素很多，包括溫度、相對濕度、土壤濕度、營養等⁽²¹⁾。

(一)溫度：於低溫下，SO₂ 之毒性作用是最小的，例如松類植物於冬天時對 SO₂ 最具抗性。SO₂ 之毒性作用在一定溫度界限內隨溫度之升高而增加，但有報告指出在 18 ~ 40°C 間，溫度之差異並不影響植物對 SO₂ 之反應。

(二)相對濕度：濕度對氣孔之開張及植物對 SO₂ 之反應具明顯之影響力，植物於相對濕度 30% 時對 SO₂ 之抗性為相對濕度 100% 時的 3 倍。然相對濕度於 50% ~ 75% 間，其對植物之敏感度並無顯著之影響。

(三)土壤濕度：薰蒸時葉片之膨壓是影響其敏感度的重要因素，將 4 種植物之飽水及萎凋葉片薰蒸試驗之，此試驗中 SO₂ 之濃度範圍為 0.82 ppm (2,148 μg/m³) 至 4.0 ppm (10,480 μg/m³)，對飽水葉片之傷害程度由中度至嚴重，對

空氣污染對農作物之影響 I. SO₂之影響

表3 空氣混合污染物對植物作用的相互影響 (加成、協力、拮抗作用)

相互作用	混合情形	受害部位或受害機制	植物種類
Additive	SO ₂ + O ₃	Photosynthesis	<i>Euglena</i>
	SO ₂ + O ₃	Growth	Radish
	SO ₂ + HF		Orange
	SO ₂ + O ₃		Several
	SO ₂ + NO ₂	Photosynthesis	Pea
	SO ₂ + NO ₂	Growth	<i>Poa pratensis</i>
Synergistic	SO ₂ + O ₃	Leaf growth	<i>Ulmus americana</i>
	SO ₂ + O ₃	Leaf	Tobacco
	SO ₂ + O ₃	Leaf	Peanut
	SO ₂ + O ₃	Needle	Eastern white pine
	SO ₂ + NO ₂	Leaf	Tomato
	SO ₂ + NO ₂	Leaf	Several
	SO ₂ + particulates	Leaf	<i>Quercus</i>
	SO ₂ + NO ₂	Seedling growth	Eastern white pine
	SO ₂ + O ₃	Leaf	Alfalfa, radish, tobacco
	SO ₂ + O ₃	Needle	Eastern white pine
	SO ₂ + NO ₂	Photosynthesis	Alfalfa
	SO ₂ + O ₃	Growth	Soybean
	SO ₂ + NO ₂		Radish
	SO ₂ + NO ₂	Enzyme activity	Pea
	SO ₂ + O ₃	Leaf	Apple
	SO ₂ + F	Reproduction	Scots pine
	SO ₂ + O	Root growth	Soybean
	SO ₂ + NO ₂	Pollen-tube growth	Lily
	NO ₂ + O ₃		
	SO ₂ + NO ₂	Growth	Three grasses
	SO ₂ + HF		Lichens, mosses
SO ₂ + O ₃	Leaf	Cucumber, radish	
SO ₂ + O ₃	Photosynthesis	Tree species	
SO ₂ + O ₃	Needle	Scots pine	
SO ₂ + NO ₂ + O ₃	Photosynthesis	Sunflower	
Antagonistic	SO ₂ + O ₃	Growth	Radish
	SO ₂ + O ₃		Eastern white pine
	SO ₂ + O ₃		Alfalfa
	SO ₂ + O ₃	Fungal infection	Lilac
	SO ₂ + O ₃	Leaf and roof growth	Alfalfa
	O ₃ + PAN	Leaf	Ponderosa pine
	SO ₂ + O ₃	Leaf and leaf growth	White bean, Soybean
	SO ₂ + O ₃	Needle	Scots pine
	SO ₂ + O ₃		Soybean
	SO ₂ + O ₃		Soybean
	SO ₂ + O ₃		Apple
	Mixed	SO ₂ + O ₃	
SO ₂ + HF			Several
SO ₂ + O ₃			White bean tobacco
SO ₂ + O ₃			Rieger begonia
H ₂ S + O ₃		Photosynthesis, transpiration	Snap bean
SO ₂ + O ₃			Soybean
SO ₂ + O ₃			Grapevine
SO ₂ + O ₃		Nematode infection	Soybean, begonia

萎凋葉片則只有些微的傷害，甚而不傷害⁽²¹⁾，即使於高濃度下亦然，這明顯之差異顯示出SO₂對植物之傷害至少與氣孔狀況有關。一般相信土壤濕度對敏感度之影響主要是因其影響了氣孔，當土壤濕度低時，氣孔關閉，而限制了SO₂之進入。

四營養：土壤中氮之供應充足時可減少SO₂對植物之毒害，葉面施用尿素可促進植物之生長、發育，而減低其受害程度，尿素在葉面上會形成氨(NH₃)，其可與SO₂結合形成硫酸銨((NH₄)SO₄)，而減弱了SO₂對植物之毒性⁽³⁴⁾。然亦有人認為尿素為一酸鹽基(mono-acid base)，可中和葉片內SO₂所造成之酸性，而減弱其毒性。

工廠附近產生之污染物有很多種，可同時混合存在或單一存在，這些污染物混合在一起時對植物之毒性是否有影響呢？各有許多不同的說法，氣體混合後對植物之毒性可能產生加成作用(additive effects)、或協力作用(synergistic effects)或拮抗作用(antagonistic effects)，見表3⁽³¹⁾。

由表3可看出，相同二種氣體混合後其對植物之毒害作用亦可能有所不同，而影響混合氣體對植物之毒性之因素又包括了污染物之濃度、暴露時間的長短、植物的種類及污染物種類等。

七、結 論

空氣污染對農作物之影響除在葉面上產生病徵外，亦會對許多植物之生理及代謝作用上產生

干擾，且對不同的植物其干擾機制亦不同，如SO₂會干擾酵素之活性，或破壞光合色素等等，因而影響到作物的品質及產量。而不同的環境因子又會影響其為害情形，因此，欲預估空氣污染對作物之品質及產量的影響並不容易，必須有充足的資料(如為害機制、環境因子之影響等等)方能對減產作一預估。

如何減輕空氣污染物對農作物之為害是大家最關心的問題，首先我們可選擇抗性品種來栽種，並且加強空氣品質管制，即在特定之農業區內對空氣污染源必須作嚴格的管制，防患於未然，以減少為害事件的發生。

八、摘 要

由於工業之發達，空氣污染為害農作物之事日益嚴重。空氣污染中尤以SO₂污染最為普遍。SO₂可以硫酸根之形態由土壤進入植物體中，或以SO₂之形式經氣孔而進入植物體，或溶於水中成亞硫酸根而被吸收。SO₂進入植物體之後會破壞細胞膜之結構，干擾許多酵素之活性，亦會破壞光合色素、干擾CO₂之固定而抑制光合作用之進行，同時SO₂亦會破壞DNA。不同濃度SO₂對作物減產之影響，常因作物種類的不同而有所差異，且病徵出現與否及病癥之嚴重性並不能作為產量減少之指標。為了解SO₂對作物產量之影響，必須先了解SO₂對該種作物之為害機制，才能對減產作一預估。

引 用 文 獻

1. 李國欽、李貽華，1983，SO₂為害水稻葉面對產量之影響。(未發表資料)。
2. 羅美綫，1980，臺灣省環境衛生試驗所編印。
3. Asada, K. & Z. Kasai. 1962. *Plant Cell Physiol.* 3:125-129.
4. Beckerson, D. W. & G. Hofstra. 1979. *Can. J. Bot.* 57:1940-1945.
5. Black, C. R. & V. J. Black. 1979. *Plant Cell Environ.* 2:329-333.
6. Black, V. J. & M. H. Unsworth. 1979. *J. Exp. Bot.* 30:473-484.
7. Black, V. J. 1982. In M. H. Unsworth and D. P. Ormord (ed.): *Effect of gaseous air pollution in agriculture and horticulture*, pp. 67-91. Butterworths, Cambridge.
8. Bressan, R. A., L. G. Wilson & P. Filner. 1978. *Plant Physiol.* 61:761-767.
9. DuBay, D. T. & W. H. Murdy. 1983. *J. Environ. Qual.* 12:147-149.
10. Echert, R. T. & D. B. Houston. 1980. *Can. J. For. Res.* 10:357-361.
11. Facteau, T. J. & K. E. Rowe. 1981. *Biol. Abstr.* 72:1311.
12. Fishelson, G. & P. Graves. 1978. *J. Air Pollut. Cont. Associ.* 28:785-789.
13. Grunwald, C. 1981. *Plant Physiol.* 68:868-871.
14. Hällgren, J. E. & K. Gezelius. 1982. *Physiol. Plant* 54:153-161.
15. Harvey, G. W. & A. H. Legge. 1979. *Can. J. Bot.* 57:759-764.
16. Haase, E. F., G. W. Morgan & J. A. Salem. 1980. In M. H. Unsworth and D. P.

- Ormord (ed.): Effect of gaseous air pollution in agriculture and horticulture, pp. 248. Butterworths, Cambridge. **17.** Hawksworth, D. L. & F. Rose. 1970. *Nature* 227:145-147. **18.** Hayatsu, H. & R. C. Miller. 1972. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 46:120-130. **19.** Heggestad, H. E. & J. H. Bennett. 1981. *Science* 213:1008-1010. **20.** Kondo, N. & K. Sugahara. 1978. *Plant Cell Physiol.* 19:365-373. **21.** Lacasse, N. L. & M. Treshow. 1978. Diagnosing vegetation injury caused by air pollution. EPA, U. S. A. **22.** LeBlanc, F., D. N. Rao & G. Comeau. 1972. *Can. J. Bot.* 50:519-524. **23.** Linzon, S. N., P. J. Temple & R. G. Pearson. 1979. *J. Air Pollut. Control Ass.* 29:520-525. **24.** Lüttge, U. *et al.* 1972. *Plant Cell Physiol.* 13:145. **25.** MacLeod, R. M. *et al.* 1961. *J. Biol. Chem.* 236:1841-1845. **26.** Malhotra, S. S. & D. Hocking. 1976. *New Phytol.* 76:227-237. **27.** Malhotra, S. S. 1976. *New Phytol.* 76:239-245. **28.** Manofird, T. A. & O. Majernik. 1970. *Environ. Pollut.* 1:149-154. **29.** Maugh II, T. H. 1979. *Science* 205:383. **30.** Olszyk, D. M. & T. W. Tibbitts. 1982. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 107:266-271. **31.** Ormord, D. P. 1978. In M. H. Unsworth and D. P. Ormord (ed.): Effect of gaseous air pollution in agriculture and horticulture, pp. 310-313. Butterworths, Cambridge. **32.** Osmond, C. G. & P. N. Avadhani. 1970. *Plant Physiol.* 45:228-236. **33.** Pahlisch, E. 1972. *Planta* 104:78. **34.** Pandey, S. N. 1982. *Environ. Pollu. (series A)* 27:73-82. **35.** Pierre, M. & O. Queiroz. 1982. *Environ. Pollu. (series A)* 28:209-217. **36.** Prasad, B. J. & D. N. Rao. 1982. *Environ. Pollut. (series A)* 29:57-70. **37.** Puckett, K. J. *et al.* 1973. *New Phytol.* 72:141-154. **38.** Shimazaki, K. I. *et al.* 1980. *Plant Cell Physiol.* 21:1193-1204. **39.** Shimazaki, K. I. & K. Sugahara. 1980. *Plant Cell Physiol.* 21:125-136. **40.** Silvius, J. E., M. Ingle & C. H. Baer. 1975. *Plant Physiol.* 56:434-437. **41.** Sprugel, D. G. *et al.* 1980. *Phytopathology* 70:1129-1133. **42.** Tanaka, H., T. Takanashi & M. Yatazawa. 1972. *Water, Air, Soil Pollut.* 1:205-212. **43.** Tanaka, H. *et al.* 1972. *Water, Air, Soil Pollut.* 1:343-349. **44.** Tager, J. M. & N. Rautanen. 1956. *Physiol. Plant* 9:665. **45.** Taylor, O. C. 1973. In J. A. Naegele (ed.): Air pollution damage to vegetation, pp. 9-20. American Chemical Society, Washington, D. C. **46.** Tingey, D. T., W. W. Heck & R. A. Reinert. 1971. *J. AM. Soc. Hort. Sci.* 96:369. **47.** Tokemoto, B. K. & R. D. Noble. 1982. *Environ. Pollut. (series A)* 28:67-74. **48.** Unsworth, M. H., P. V. Biscoe & H. R. Pinckney. 1972. *Nature* 239:458-459. **49.** Wellburn, A. R., O. Majernik & F. A. M. Wellburn. 1972. *Environ. Pollut.* 3:37-49. **50.** Yu, S. W. *et al.* 1982. In M. H. Unsworth and D. P. Ormord (ed.): Effect of gaseous air pollution in agriculture and horticulture, pp. 507-508. Butterworths, Cambridge. **51.** Ziegler, I. 1972. *Planta* 103:155-163. **52.** Ziegler, I. 1973. *Phytochemistry* 12:1027-1030.