

從植物對二氧化硫之 反應看空氣污染

游碧瑱·饒連財



一、緒言

二、硫與植物

三、二氧化硫之濃度、曝露時間與植物受害程度

四、植物個體對二氧化硫之反應

(1) 在形態上之影響

(2) 對次細胞級 (Subcellular level) 之影響

(3) 導致鉀離子之流失與細胞膜差異通透性 (Permeability) 之改變

(4) 對氣孔之生理影響

(5) 對光合作用之影響

(6) 對呼吸作用之影響

(7) 對酵素之影響

(8) 對蛋白質合成及胺基酸組成之影響

(9) 對固氮作用 (Nitrogen Fixation) 之影響

(10) 對生長與發育之影響

五、二氧化硫之致毒機制

六、植物群落 (Plant Community) 對二氧化硫之反應

七、二氧化硫與其它污染物混合時對植物之影響

八、二氧化硫影響植物之實驗

(1) 供試模式 (Model)

(2) 供試植物與濃度

九、以植物作為二氧化硫污染之指標 (Indicator)

十、結語

十一、參考文獻

※ 1. 台灣植物保護中心毒理組綜合論述第14號。
2. 台灣植物保護中心毒理組研究助理及技正。

一、緒 言

二氧化硫是石化燃料——目前最大量使用的能源，燃燒後的產物。很多金屬礦中若含硫，在冶煉過程中也會產生二氧化硫。除了二氧化硫本身外，其衍生物如三氧化硫及其酸類、塩類亦為空氣污染物質。隨著工業的不斷成長，空氣污染對生態環境之威脅與日俱增。目前本省之空氣污染物中，二氧化硫佔了三分之一⁽⁴⁸⁾。

二氧化硫以氣態或水溶液形態污染環境：氣態二氧化硫可直接傷害到人類及其它動植物。人類若長期接觸低濃度的二氧化硫會增加呼吸系統及心臟病罹病率⁽¹⁵⁾；以天竺鼠(Guinea pigs)試驗 54 ~ 113 小時，其 LD_{50} 為 112 ppm⁽³⁶⁾；水溶液態乃由於二氧化硫與大氣中之水氣作用成硫酸或亞硫酸而以酸霧(Acid aerosol)或酸雨(Acid rain)的形態降落地面，影響土壤、湖泊、河流、植物乃至整個生態系。

植物對二氧化硫之反應(Resp-
onse)遠比動物敏感得多，不止是植株的生理、形態、代謝受到影響，整個植物群落(Plant community)亦為之改觀：如種組成(Species composition)、種相異度(Diversity)及水生生態系之改變等。(本文主要根據 Varshney (1979), Plant responses to sulfur dioxide

Pollution⁽⁴⁴⁾一文再稿及其它參考文獻)。

二、硫與植物

硫為植物之必要元素：有機硫存於胱胺酸(Cystine)及甲硫胺酸(Methionine)，其硫氫基(SH Group)在蛋白質合成及一些輔酶如輔酶A(Coenzyme A)、維生素B₁(Vitamin B₁)之活性上扮演極重要角色；無機硫可維持細胞之膠體結構(Colloidal structure)，增加同化活性並促進碳水化合物之合成。植物可由根自土壤吸收硫酸根離子或由葉自大氣中吸收二氧化碳而獲得硫，一般植物葉內約含硫 500~14,000 PPM。微量的二氧化硫是植物的營養源，但超過某一定濃度則對植物造成危害。大多數高等植物不受二氧化硫危害之界閥濃度(Threshold concentration)約在 0.15 ppm(429 ug/m³空氣)以下^(17, 25, 38, 44)。

三、二氧化硫之濃度、曝露時間與植物受害程度

植物對二氧化硫之反應隨暴露時間與濃度差異而不同。O'Gara (1922)⁽³⁵⁾以紫苜蓿(Medicago sativa)為材料，指出濃度(C)·時間(t)之常數(k)為造成植物傷害之兩大要素： $(C-C_R) \cdot t = k$ 並提出了界閥濃度 C_R 之觀念，認為只有達到某一定

濃度時才足以造成傷害，在這界閥濃度內不論薰蒸時間久暫，污染物均不致對植株造成危害。Thomas 及 Hill (1935)⁽⁴³⁾以紫苜蓿 (Alfalfa) 為材料找出濃度、時間與受害程度間之關係：

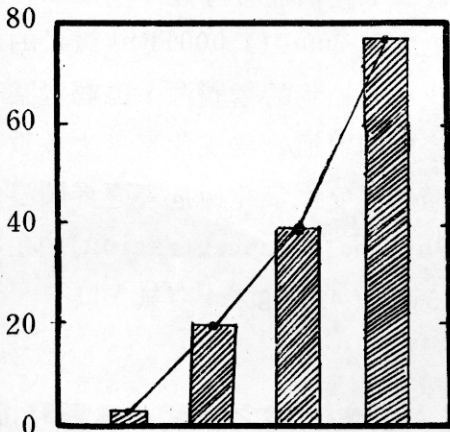
$$(C-0.24) \cdot t = 0.94 \text{ 葉輕微壞疽}$$

$$(C-1.40) \cdot t = 2.10 \text{ 葉50\%壞疽}$$

$$(C-2.60) \cdot t = 3.20 \text{ 葉100\%壞疽}$$

Haut (1961)⁽¹⁹⁾以胡蘿蔔為材料發現濃度、時間之常數對植物造成的傷害並不一致 (圖 1)，高濃度、短時間要比低濃度、長時間的危害大。

受害面積%



濃度 (mg/hr) 3 6 9 12

時間 (hr) 12 6 4 3

濃度 × 時間 = 常數 36

圖 1：固定二氧化硫濃度與時間對胡蘿蔔葉之危害情形。

Guderian (1960)⁽¹⁷⁾提出了界閥濃度與界閥時間 (Threshold time) 之觀念及污染物之危害與生物生理年齡及生長之內在、外在條件有關：

$$t - t_R = [e^{-a(c-C_R)}] \cdot k$$

式中：t 為曝露時間

t_R 為界閥時間——造成傷害所需之最短時間

c 為曝露濃度

C_R 為界閥濃度——造成傷害所需之最低濃度

a 為內在與外在因子影響之總和
K 為生長時間

以上，是以植物受害葉之可見症狀面積百分率來看污染程度，事實上，在低濃度狀況下，植物雖未見受害症狀，生長已受抑制。一般多將污染物對植物之危害分為：急性傷害 (Acute injury)、慢性傷害 (Chronic injury) 及生理生化傷害 (Physiological and/or biochemical injury)。急性傷害為短時間內植物吸收高濃度 (1 ppm 以上) 污染物所受之傷害、慢性傷害乃植物長期曝露在低濃度 (0.2 ppm 以下) 或曝露在 0.2~1.0 ppm 幾天至幾週內所呈現之受害情形，生理生化傷害雖在外表上未見任何癥狀，但生理機制受影響、生長受限制。植物種類不同、個體不同，由於基因上的差異，對污染物之反應程度亦不同。外在環境因子的改變如季節變化、光週期、光度、氣候、土壤及營養狀況等均會影響植物對污染物之反應程度。^(4,8,27,37,42) 例如高溫、高濕會增加二氧化硫對植物之危害：圖 2、3 為花豆 (Pinto bean) 在不同溫、濕度時葉

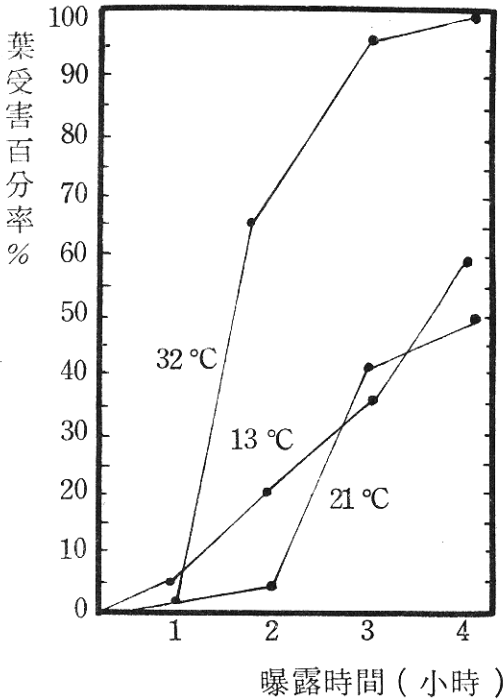


圖 2：不同溫度及曝露時間，花豆 (Pinto bean) 受二氧化硫 (0.9 ppm) 傷害之影響⁽³⁷⁾

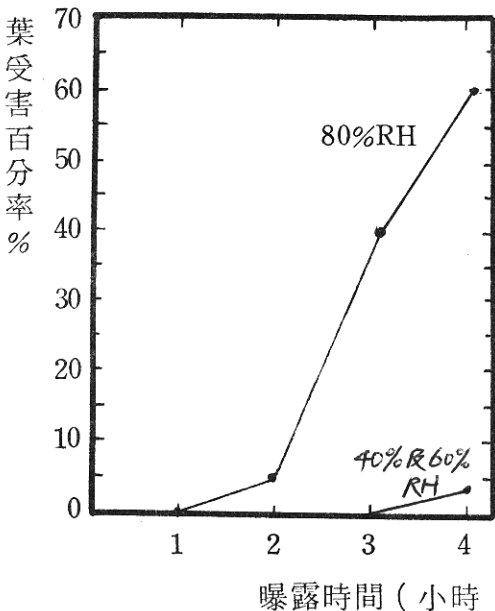


圖 3：不同濕度及曝露時間，花豆 (Pinto bean) 受二氧化硫 (0.9 Ppm) 傷害之影響⁽³⁷⁾

之受害面積百分比比較情形⁽³⁷⁾。

四、植物個體對二氧化硫之反應

(1) 在形態上之影響：

氣態二氧化硫主要經由氣孔進入葉內，少部分由角質層 (Cuticle) 吸收，含硫之酸霧則嚴重腐蝕覆於葉面之保護層如角質層及上皮細胞 (Epidermis)，使植物對外來壓力 (Stress) 的抵抗力變脆弱。地衣及蘚苔類對二氧化硫比高等植物更敏感，一旦受害，非死亡即不孕。高等植物以葉部最敏感，症狀也最明顯：首先出現斑點、黃化、漸漸紅色壞疽，嚴重時斑點擴大為斑塊，葉緣捲曲，但葉脈仍維持綠色，發生順序由葉尖端向中間位置再向整個葉身延伸，以幼葉較敏感^(5, 17, 24)。

(2) 對次細胞級 (Subcellular level) 之影響：

氣態二氧化硫 1 ppm_(g) 之效應相當於水溶液態 1,000 ppm_(aq) 之濃度。10~50 ppm 水溶液態二氧化硫對多數植物尚無影響，當濃度達於 100 ppm_(aq) 時使葉綠體失去活性，500 ppm_(aq) 時，則可明顯看到葉綠餅膜 (Granum thylakoids) 腫脹且葉綠體之間膜連繫遭破壞。以 0.25 ppm_(g) 二氧化硫處理蠶豆 (Vicia faba) 一小時後即見葉綠餅膜囊兩端鼓脹。此種改變會影響光合作用之正常進行^(40, 44)。

(3) 導致鉀離子之流失與細胞膜差異通透性 (Permeability) 之改變:

Beckerson(1980)⁽³⁾ 以豆類為供試材料發現二氧化硫會使細胞中之鉀離子流失, 導致膜的滲透性增加, 很多營養物質隨之流失。此可能因二氧化硫改變了細胞膜上蛋白質的結構而致無法維持原來之差異通透性。

(4) 對氣孔之生理影響

氣孔為二氧化硫進入植物體之門戶, 二氧化硫會促使植物氣孔張開速度快、孔徑大, 尤以白天為然, 但達到某一定濃度及時間時, 氣孔即關閉。將蠶豆、玉米、大麥、榆樹及銀杏等以 1 ppm 二氧化硫處理八小時可見氣孔張大, 電導度 (Conductance) 增加^(12, 33, 44)。二氧化硫促使氣孔張大, 相對地加快了蒸散作用, 植物需水量大增, 易使植株凋萎死亡。由於多量二氧化碳 (CO₂) 在植物體內之聚積能促使氣孔關閉, 隨著二氧化硫的刺激氣孔張開, 二氧化碳也會進入植物體內, 因此當二氧化硫污染達到某一定濃度及時間時, 反而使氣孔關閉。因此當大氣中二氧化碳濃度增加時可減少二氧化硫之危害。使用抗蒸散劑如 OED green (Oxyethylene decosanol) 迫使氣孔關閉亦能減少二氧化硫危害⁽⁴⁴⁾。

(5) 對光合作用之影響:

光合作用是植物最重要之生化反應, 對二氧化硫污染非常敏感。二氧

化硫影響土壤或水中的 PH 值, 而光合作用則會因 PH 之降低而受抑制。藻類在 PH 7.1 時, 以 0.5 ppm 二氧化硫處理十天, 光合作用不受顯著影響, 但在 PH 6.0 時, 1 ppm 之二氧化硫在 24 小時內即完全抑制光合作用⁽⁴⁵⁾ 在 0.1, 1.0 及 3.0 ppm 之濃度下, 豆類之光合作用分別減少了 0, 13 及 73 %⁽³⁴⁾。

二氧化硫不但抑制了光合作用中循環 (Cyclic) 與非循環 (Noncyclic) 之光反應⁽³⁹⁾, 亦可經三途徑破壞葉綠素: I 漂白作用 (Bleaching), 即顏色消失; II 灰化作用 (Phaeophytinization), 葉綠素分子分解破壞而失去活性; III 變藍 (Blue shift), 由於 Mg⁺ 之轉移使色素無法吸光而變黑或變藍, 使葉內葉綠素含量降低, 光合速率減慢。^(2, 7, 44)

(6) 對呼吸作用之影響:

與光合作用相反, 二氧化硫加速了植物的呼吸速率⁽⁴⁷⁾。植物在將二氧化硫轉變為毒性較低的硫酸鹽 (Sulfate) 時, 需要額外的能量供應, 而二氧化硫也抑制了細胞內的氧化磷酸化作用 (Oxidative phosphorylation), 使 ATP 產量減少。因此植物必須增快呼吸速率供給能量^(7, 18)。

(7) 對酵素之影響:

二氧化硫能切斷酵素 S-S 鍵 (Sulfitolysis), 使其分子構形 (Conformation) 改變而失去活性,

Catalase 在低濃度之二氧化硫時，即因此而降低活性。二氧化硫亦能在 bicarbonate 位置上與 Ribulose-1, 5-diphosphate carboxylase 及 phosphoenol pyruvate carboxylase 競爭而抑制了酵素活性。此外，Glyceraldehyde-3-phosphate carboxylase, peroxidase, Distase 及 Glutamate-oxaloacetate transaminase (GOT) 等酵素均已被證實其活性確為二氧化硫所抑制。然而此種影響並非見於任何胞器 (Organel) 內，例如 GOT 在粒綫體內受二氧化硫所抑制，但在細胞質內則不然。(31, 32, 44)

(8) 對蛋白質合成及胺基酸組成之影響：

二氧化硫會減少葉內蛋白質及 RNA 之合成量，並減慢蛋白質合成速率。薰過二氧化硫之菜豆 (Phaseolus vulgaris) 葉內，游離胺基酸 (Free aminoacids) 含量增多，蛋白質減少。豌豆 (Pisum sativum) 體內則 Glutamate 含量減少 40~20%，而 glutamine 卻增加了 130~240%。二氧化硫改變了植物體內之胺基酸組成也改變其代謝過程。(2, 44)

(9) 對固氮作用 (Nitrogen fixation) 之影響：

固氮作用會受 PH 值影響，由於二氧化硫會改變土壤之 PH 值，間而影響到固氮作用。地衣之固氮作用受酸

雨影響而減少即為一例。(44)

(10) 對生長與發育之影響：

植物之生長發育受二氧化硫的危害程度與環境條件有關：當生長環境條件良好時，植物對二氧化硫之抗性 (Resistance) 就大。植物之生長過程包括株高、體重、開花、受精、結果乃至種子之發育均受相當濃度之二氧化硫所影響。大豆 (Soybeans)^(13, 20)、紅菜豆 (Red kidney bean)⁽³⁵⁾、蕃茄 (tomato)⁽³⁰⁾、牧草 (ryegrass)⁽¹¹⁾、及水稻 (Rice)⁽⁴¹⁾ 等在可見傷害濃度以下，生長已受阻；而產量則隨著可見傷害顯著減少。二氧化硫也抑制種子萌芽並促其腐爛⁽⁹⁾。

五、二氧化硫之致毒機制

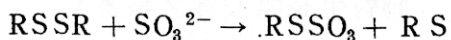
二氧化硫在細胞內水解為亞硫酸 (Sulfurous)。二氧化硫已被證實在馬鈴薯及兔肌肉之細胞中確以亞硫酸塩形態抑制 Phosphorylase 酵素之活性。其致毒機制大致可分為四種：

(1) 溶於細胞液內之二氧化硫轉變成亞硫酸後，會使葉綠素分子之紫環 (Tetrapyrrol ring) 失去鎂離子而喪失活性，乃致無法行光合作用。

(2) 基於氧化還原電位，亞硫酸根在細胞液內具強氧化力，使細胞內氫離子濃度增加，PH 值降低，影響細胞生理，也使葉綠素行不可逆的光氧化作用而失去活性。

(3) 亞硫酸根以下方程式切斷 S -

S 鍵，改變了蛋白質之



三級結構 (Tertiary structure)
，使一些酵素失去活性，也使細胞膜
上結構蛋白質 (Structural protein)
性質改變而無法維持原有之差異
通透性。

(4)過量的亞硫酸塩可與離子錯合
(Complex)，因此影響了正常的細胞
色素配對系統之電子傳遞及其它以金
屬致活之酵素的活性。二氧化硫與一
些酵素如 Ribulose - 1, 5 - dip-
hosphate carboxylase 競爭基質即
與其水解物之離子性有關。

六、植物群落 (Plant community) 對二氧化硫之反應：

污染物造成之衝擊，不止直接影
響植物個體，對整個植物群落亦不無
影響：其生物組成、產量、族群變化
、營養循環等等，無一不為之改觀。

在森林群落 (Forest community)
中，空氣污染首先危害到最高最佔
優勢的喬木，然後依次為灌木、蕨
類、蘚苔、地衣等，使植物消長退
化 (Retrogressive succession)
。由於不同種類對污染物抗性不同，
有些種類將逐漸自污染環境消失，其
優勢漸為其它種類所取代，以致改
變了原來群落中種的組成 (Species
Composition) 及雜異度 (Diversity)

。在嚴重污染地區，很多植物無法
存活下來，整個植物群落的生長受影
響，生態系之基礎生產量減少，間而
影響到微生物及一些動物族群之變遷。
微生物的改變亦間接造成環境營養
循環 (Nutrition Cycle) 速率的減
慢。(22,44)

河水及湖水之 PH 值會因酸雨或
酸氣之影響而降低。瑞典之 Stora
Skarsjon 湖之 PH 值即因而由 1943
年之 6.2 降至 1973 年之 4.5。加拿大
有些湖泊亦有類似的情況。由於湖
水之 PH 值降低，多量的氫離子會
與湖底土壤粒子進行陽離子交換
(Cation exchange) 而使一些營
養離子由土壤釋出，此將使湖水營
養過度而加速湖泊老化 (Eutrophication)
、微生物分解速率遲緩，營養物質
循環減慢，有機碎屑 (Organic debris)
沈積湖底，湖底泥土漸漸貧瘠
(Oligotrophication)。此種營養
狀況的改變大大影響浮游生物及一
些水中植物之雜異度與豐富度
(Abundance)。(7,44)

陸地土壤吸收二氧化硫後經雨水
淋洗，或直接經酸雨淋洗，也會因
氫離子與土壤粒子行離子交換而流
失一些養分。以人工酸霧處理植物
葉部，可見一些離子如 K^+ 、 Mg^{++} 、 Ca^{++}
等流失。(5,16,44,46)

七、二氧化硫與其它污染物混合 時對植物之影響：

事實上，污染物並非單獨存在，而是以幾種不同比例混合於環境中。數種重要的初級污染物 (Primary pollutants) 如二氧化硫、二氧化氮、一氧化碳、鹵化物、臭氧 (Ozone) …… 等在大氣中可經光化學反應產生次級污染物 (Secondary Pollutants) 如硫酸、三氧化硫、PAN (Peroxyacetyl nitrate) 等。混合的污染物彼此間可能有協力 (Synergistic)、拮抗 (Antagonistic) 或加成 (Additive) 等作用危害植物。植物對不同污染物所呈現的病癥均不同，如臭氧使植物呈現白色或棕色小斑點 (Fleck) 之病癥；而同時受二氧化硫與二氧化氮污染之植物葉片上表面呈現類似臭氧所致之病癥，但在下表面則呈紅色大斑點 (Spot)，有些斑點上略帶銀白色。^(2,3,14,20,21,26)

八、二氧化硫影響植物之實驗

二氧化硫為本省最嚴重之污染物⁽⁴⁸⁾。有關其污染與植物反應之研究報告雖多，但均為溫帶國家之地理、氣候條件。台灣地區之氣候、土壤等環境條件與溫帶地區迥異，這方面之資料亟待建立。

(1) 供試模式 (Model)

早期多在田間燃燒硫化物產生二氧化硫直接薰於植物，再根據距離污染源之遠近，調查比較植物之受害程度，此種方法污染源控制不善反而更

增添環境污染。以人工氣象室觀察固然最為精確，但成本高，也不盡符合田間條件，折衷辦法可將植物栽植於素燒盆 (Pot)，定時搬入透明之薰蒸室 (Chamber) 內，通入定量的二氧化硫與瀘過空氣之混合氣體，然後觀察植物之反應。確定污染物濃度可以二氧化硫測定儀 (SO₂ Analyzer) 來監視。較近的研究多以上空薰蒸室 (Open-top Chamber)，通以循環之定濃度的二氧化硫，由於二氧化硫密度大於空氣，故為沈降氣流，且此種薰蒸空氣較流通，植物在室內之生長條件較密閉式稍好。^(6,10,36)

(2) 供試植物與濃度

Guderian (1977)⁽¹⁷⁾ 及 Dugger (1974)⁽¹⁴⁾ 等之研究結果顯示：豆科植物對二氧化硫最為敏感，故可先以豆科植物薰以不同濃度之二氧化硫，先找出界閥濃度，然後篩試 (Screen test) 各種植物之反應，找出各種植物之反應與污染程度之關係。此關係可作為污染之指標也可藉以作為污染地區抗性作物之選植參考更可作為工廠周圍種植植被之參考。

九、以植物作為二氧化硫污染之指標 (Indicator)

植物對不同濃度二氧化硫敏感程度差異與固定生長之特性，可用來作為空氣污染之指標。低等植物如地衣、蘚苔類較高等植物對二氧化硫更為敏感，在 0.005 ~ 0.1 ppm 時，地衣、

蘚苔類已受危害而高等植物則多數尚無反應。吾人可以地衣等低等植物作為低濃度污染之指標，以高等植物為較高濃度污染之指標。

在英國，曾依地衣及蘚苔類對 0.005 ~ 0.06 ppm 二氧化硫之抗性 (Tolerance) 分為十個生物尺度 (Biological Scale)，而由一地區之地衣植相 (Lichen flora) 來判斷污染程度。美、加、日、西北歐各國多已仿效此法作污染指標。(28, 29, 44)

有些學者以生態系之植物分佈圖 (Distribution map) 及變異圖 (Diversity map) 來判斷該地區之污染程度。不過，這個需先了解各種植物之敏感程度。Guderian (1977) (17) 將植物對二氧化硫、氟化氫及氯化氫之敏感程度作表一。

表一：二氧化硫 (SO₂)、氟化氫 (HF) 及氯化氫 (HCl) 對植物之慢性傷害程度 * (Guderian 1977) (17)。

植物種類	SO ₂	HF	HCl
農作物			
穀類 (包括玉米)			
豆類、苜蓿、紫苜蓿			
十字花科、太陽葵			
馬鈴薯			
甜菜			
飼料植物 (牧草用)			
穀類及草類			
豆科 (包括秣草)			

十字花科、太陽葵			
甘藍及甘藍類蔬菜			
野生植物			
十字花科			
蝶形花科			
繖形科			
藜科			
葫蘆科			
菊科			
茄科			
百合科			
草類及草原			
一般草類			
類苜蓿植物			
果實類			
乾果類			
漿果類			
榛實			
葡萄			
草莓			
林木			
縱樹、赤松、白松、道格拉斯松			
澳洲松、側柏、扁柏、杜松			
觀賞植物			
百合科、鳶尾科、莧科			
毛茛科、薔薇科			
蝶形花科			
天竹葵			
五加目			

石竹科



菊科



⊗ ○ 非常輕微 (Very Slight)

○ 輕微 (Slight)

○ 中度 (Medium)

○ 嚴重 (Severe)

○ 非常嚴重 (Very severe)

以植物種為單位，由其個體之生理、生長反應如光合率之改變、生長速率之變化、產量、固氮程度，甚至外觀葉、花之受害程度，均可作為二氧化硫之污染指標。

十、結 語

二氧化硫為本省危害最嚴重的空氣污染物之一，不論其為氣態或水溶液態均影響動、植物之生活。植物個體之生長情形包括內部生理、生化反應與外觀癥狀、產量等均與二氧化硫之濃度與曝露時間相關，整個植物群落亦受二氧化硫濃度所影響。找出各種植物反應與二氧化硫危害之相互關係一則可藉以了解空氣污染程度，再則可藉以篩選抗性作物以適污染地區栽植。此外，抗性植物之篩選也可作為樹籬種類之選植參考，栽植於作物周圍保護作物或作為工業區周圍之植被以減輕污染物擴散。了解植物受二氧化硫之危害機制可作為釐訂保護作物對策之參考，例如明瞭二氧化硫促進氣孔張開之故，可利用抗蒸散劑如 OED green 來抑制部分氣孔張開以

減輕危害。事實上，空氣污染物以各種不同比例混合存在大氣中，其相互間可能有協力、拮抗或加成等作用關係，有關混合空氣污染對植物之危害，有待進一步探討。

參考文獻

1. Altman, P. L. and D. S. Dittmer(1973). Effects of air pollutant inhalation on mammals, in *Biology Data Book* 2nd, ed. Vol. II. Federation of American Societies for Experimental Biology PP. 985.
2. Beckerson, D.W. and G. Hofstra (1979) Effect of Sulfur dioxide and ozone singly or in combination on leaf chlorophyll, RNA, and protein in white bean. *Can J. Bot.* 57. 1940-1945.
3. Beckerson, D.W. and G. Hofstra (1980) Effects of sulfur dioxide and ozone, singly or in combination on membrane permeability. *Can J. Bot.* 58, 451-457.
4. Beckerson, D.W., G. Hofstra and R. Wukasch (1979) The relative sensitivities of 33 bean cultivars to ozone and sulfur dioxide singly or in combination in controlled exposures and to oxidants in the field. *Plant Dis. Reprtr.* 63(6), 478-482.
5. Black, C.R. and V. J. Black (1979). The effects of low concentrations of sulfur dioxide on stomatal conducta-

- nce and epidermal cell survival in field bean (*Vicia faba* L.) *J. Exp. Bot.* 30(115), 291-298.
6. Black, V.J. and M.H. Unsworth (1979) A system for measuring effects of sulfur dioxide on gas exchange of plants. *J. Exp. Bot.* 30(114) .81-88.
 7. Buiculescu, I., D. Popescu, M. Iordan, I.M. Peicea and G. Serbanescu (1978). The influence of air-polluting gases on some plant metabolism. *Rev. Roum. Biol-Biol. Veg.* 23(2), 187-193.
 8. Carter, W.P.L., A.M. Winter, K.R. Darnall and J.N. Pitts Jr. (1979). Smog chamber studies of temperature effects in photochemical smog. *Environm. Sci. & Tec.* 13(9), 1094-1099.
 9. Chakrabarti, A.G. (1979) Effects of air pollutants on seed germinability. *Bull Environm. Contam. Toxicol.* 21. 749-755.
 10. Constantinidou, H., T. T. Kozlowski and K. Jensen (1976) Effects of sulfur dioxide on *Pinus resinosa* seedlings in the cotyledon stage. *J. Environ. Qual.* 5(2), 141-144.
 11. Cowling, D.W. and M.J. Koziol (1978) Growth of ryegrass (*Lolium perenne* L.) exposed to SO₂. *J. Exp. Bot.* 29(112), 1029-1035.
 12. Coyné, P.I. and G.E. Bingham (1978) Photosynthesis and stomatal light responses in snap beans exposed to hydrogen sulfide and ozone. *J. Air Pollut. cont. Assoc.* 28(11), 1119-1123.
 13. Davis, C.R. (1972). sulfur dioxide fumigation of soybeans effect on yield. *J. Air pollut. Cont. Assco.* 22(12), 964-966.
 14. Dugger, M. (1974) Air Pollution Effects on Plant Growth. American Chemical Society. Washington, D.C. pp(x) 149.
 15. Fishelson, G. and P. Graves (1978) Air pollution and morbidity: SO₂ Damages. *J. Air pollut. Cont. Assco.* 28(8), 785-789.
 16. Gorham, E. and A.G. Gordon (1963) Some effects of smelter pollution upon aquatic vegetation near Sudbury, Ontario. *Can J. Bot.* 41, 371-378.
 17. Guderian, R. (1977) Air Pollution: Phytotoxicity of Acidic Gases and It's Significance in Air Pollution Control. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York. pp(VIII) 127.
 18. Harver, G.W. and A.H. Legge (1979) The effect of sulfur dioxide upon the metabolic level of adenosine triphosphate. *Can. J. Bot.* 57, 759-764.
 19. Haut, H. van (1961) Die Analyse von Schwefeldioxidwirkungen auf pflanzen in Laboratoriumsversuch. *stüb* 21. 52-56.
 20. Heagle, A.S. and J.W. Johnston (1979) Variable responses of soybeans to

- mixtures of ozone and sulfur dioxide. *J. Air Pollut. Cont. Assoc.* 29(7), 729-732.
21. Hofstra, G. and D.P. Ormrod (1977) Ozone and sulfur dioxide interaction in white bean and soybean. *Can J. Plant Sci.* 57, 1193-1198.
 22. Horsman, D. C. T.M. Roberts and A.D. Bradshaw (1978) Evolution of sulfur dioxide tolerance in perennial ryegrass. *Nature.* 276(30), 493-494.
 23. Howell, R.K., L.P. Rose, Jr. and R.C. Leffel (1980) Field testing soybeans for residual effects of air pollution and seed size on crop yield. *J. Environ. Qual* 9(1), 66-68.
 24. Huang, T.S.R., C.L. Mulchi and M.K. Aycock (1976) Correlations between air pollution injury and certain agronomic, chemical, and physical characteristics of Maryland tobacco. *J. Environ. Qual.* 5(4), 352-356.
 25. Koziol, M.J. and C.F. Jordan (1978) Changes in carbohydrate levels in red kidney bean (*Phaseolus Vulgaris* L.) exposed to sulfur dioxide. *J. Exp. Bot.* 29(112), 1037-1043.
 26. Labeda, V.P. and M. Alexander (1978) Effects of SO₂ and NO₂ on nitrification in soil. *J. Environ. Qual.* 7(4), 523-526.
 27. Laurence, J.A. (1979) Response of maize and wheat to sulfur dioxide. *Plant Dis. Rep.* 63(6), 468-471.
 28. LeBlanc, F. D.N. Rao and G. Comeau (1972) The epiphytic Vegetation of *Populus balsamifera* and its significance as an air indicator in Sudbury, Ontario. *Can. J. Bot.* 50, 519-528.
 29. LeBlanc, F. and J. Sloover (1970) Relation between industrialization and the distribution and growth of epiphytic lichen and mosses in Montreal. *Can. J. Bot.* 48, 1485-1496.
 30. Maclean, D.C. and R.E. Schneider (1976) Photochemical oxidants in Yonkers, New York: effects on yield of bean and tomato. *J. Environ. Qual* 5 (1), 75-78.
 31. Miszalski, Z. and I. Ziegler (1979) Increase in chloroplastic thiol groups by SO₂ and its effect on light modulation of NADP-dependent glyceraldehyde 3-phosphate dehydrogenase. *Planta.* 145, 383-387.
 32. Mukerji, S.K. and S.F. Yang (1974) Phosphoenolpyruvate carboxylase from spinach leaf tissue. *Plant Physiol.* 53, 829-834.
 33. Noland, T.L. and T. T. Kozlowski (1979) Effect of SO₂ on stomatal aperture and sulfur uptake of woody angiosperm seedlings. *Can. J. For. Res.* 9, 57-62.
 34. Noyes, R.D. (1980) The comparative effects of sulfur dioxide on photosynthesis and translocation in bean. *Physiol Plant Pathol.* 16, 73-79.
 35. O'Gara, P.J. (1922) Abstract

- of paper: sulfur dioxide and fume problems and their solutions. *Ind. Eng. Chem.* 14, 744 (from 17)
36. Oshima, R.J. (1978) The Impact of sulfur Dioxide on Vegetation: A Sulfur Dioxide-Ozone Response Model. Statewide Air Pollution Research Center. UC Riverside, CA. pp 91.
37. Rist, D.L. and D.D. Davis (1979) The influence of exposure temperature and relative humidity on the response of pinto bean foliage to sulfur dioxide. *Phytopathology* 69, 231-235.
38. Schwartz, C.C. W.K. Laurenroth, R.K. Heitschmidt and J.L. Dodd (1978) Effects of controlled levels of sulphur dioxide on the nutrient quality of western wheatgrass. *J. Appl Ecol.* 15, 869-874.
39. Silvius, J.E. M. Ingle and C. H. Baer (1975) Sulfur dioxide inhibition of photosynthesis in isolated spinach chloroplasts. *Plant Physiol.* 56, 434-437.
40. Smith, H.J. and D.D. Davis (1978) Histological change induced in scotch pine needles by sulfur dioxide. *Phytopathol.* 68, 1711-1716.
41. Taniyama, T. (1979) Studies on injurious effects of air pollutants on crop plants XIV effects of air pollutants on apparent photosynthesis of rice and corn plants. Rept. *Environm. Sci. Mie Univ.* (4), 77-83.
42. Thomas, M.D. (1951) Gas damage to plants. *Anual rev. Plant Physiol* 2, 293-322.
43. Thomas, M.D. and G.R. Hill (1935) Absorption of sulfur dioxide by alfalfa and it's relation to leaf injury. *Plant physiol.* 10, 291-307.
44. Varshney, C.K. and J.K. Gary (1979) Plant responses to sulfur dioxide pollution. *CRC Crit. Rev. Environm. Cont.* 27-49.
45. Wodzinski, R.S. and M. Alexander (1978) Effect of sulfur dioxide on algae. *J. Environ Qual.* 7(3), 358-360.
46. Wong, M.H. (1979) Sewage sludge as conditioner for improving soils affected by sulfur dioxide. *Bull Environm. Contam. Toxicol.* 23, 717-724.
47. 谷山鐵郎 (1979) 「作物の環境汚染をめぐる諸問題〔6〕——=酸化硫黄による作物の被害機作」農業および園藝 54(1), 81~85.
48. 羅美~~松~~等 (1980) 台灣省空氣污染影響農業實況調查改善及試驗研究計劃工作報告, 台灣省環境衛生實驗所編印。
49. 魏維新 (1978) 空氣污染傷害農作物, 台灣環境衛生第十卷第二期 44-59頁。