

# 大氣臭氧濃度及其對水稻生長之影響

(國立台灣大學生化科技學系 楊盛行

國立台灣大學農藝學系 朱鈞、盧虎生)

## 一、前言

在全球環境變遷中，臭氧是目前公認最嚴重的空氣污染項目之一，臺灣地區空氣監測的結果顯示臭氧與懸浮微粒是臺灣目前主要的空氣污染物。臭氧主要是大氣中的氮氧化合物與碳氫化合物，經光化反應而形成。在強日照、低風速的氣候下，臭氧易累積至高濃度，尤其是人口密集、汽機車使用頻繁的都會區更為嚴重，容易造成臭氧的累積而形成對生物的危害 (柳中明, 1993)。依環保署所提供的 1988 至 1992 年臭氧濃度資料加以分析，可知台灣北部地區只要氣象條件與光化學污染形成條件符合，四季皆有出現高污染的可能 (蔡孟君, 1994)。臭氧污染不只對健康有害 (Goldsmith 和 Friberg, 1982)，對植物亦容易造成急性或慢性的傷害。在低濃度長時間的情形下，雖然不會造成作物立即的死亡，但卻會影響作物提早落葉，或是造成生理反應的改變，光合作用能力的降低等，甚至會導致作物外表形態的改變以適應環境的不良；而高濃度的臭氧會造成植物嚴重的受害並造成死亡。面對臭氧的傷害，植株擁有抗氧化物與抗氧化酵素的作用來減輕影響，但這些都會增加植物的負擔，而減少其他正常生理功能的進行，如吸收二氧化碳的光合作用下降，造成對生長發育的影響 (Kangasjarvi 等, 1994; Schraudner 等, 1996; Sharma 和 Davis, 1997)。臭氧主要是經由氣孔進入植株，因此具有調控氣孔關閉的 *abscisic acid* (ABA) 可能減少臭氧對植株的傷害。目前本省的種植作物中，水稻為一主要的作物，由朱鈞等 (1997)、楊政國等 (2000) 和林韶凱等 (2002) 的研究結果可知梗稻較秈稻對臭氧具有耐性且有不同的生理反應。

臭氧是目前世界上為害植物相當嚴重的空氣污染物 (Skarby 和 Sellden, 1984)，雖然臭氧會對植物造成傷害，但植物亦能吸收臭氧達到淨化空氣的作用。植物與外界氣體的交換是被動式的擴散作用，當氣孔開啓時，內外的氣體分子便可藉由濃度梯度產生擴散，使氣孔化的污染性氣體流入，並散出植物內的水及氧氣。Thomas 和 Hill 在 1935 年開始研究植物對空氣污染物的吸收 (Thomas 和 Hill, 1935)，而 Hill 於 1971 年廣泛地探討植物對空氣污染物的吸收速率，及環境因子污染物化性對吸收速率的影響 (Hill, 1971)。臭氧為一種化性活潑的物質，其除了可藉由植物體吸收外 (Bennett 和 Hill, 1973; Leuning 等, 1979a、1979b)，亦可被非生物物質所吸收 (Reiss 等, 1994)，但非生物物質對空氣污染物之吸收能力不如植物來得高 (Turner 等, 1974)，故地表植被仍為降低地表臭氧污染之最重要所在。

臭氧直接或間接的造成作物之減產 (Heck 等, 1986)，急性病徵為上表皮出現紅紫色或褐色的斑點，嚴重者則會出現褐色的塊斑及脫水的現象 (Jacobson 和 Hill, 1970; Heck 等, 1986)。慢性病徵分佈於老葉 (Heggestad 和 Middleton, 1959)，植物成熟葉片有黃化或提早脫落的現象 (Heggestad 和 Middleton, 1959; Kasana, 1991; Wiltshire 等, 1993)。在評估臭氧對植物的損害程度上，一般常以葉部傷害比作為基準 (Heck 等, 1978; Heggestad, 1991; Kupra 等, 1993)，產生葉部傷害的可能原因是葉綠素含量的減少 (Keudson 等, 1977; Mehlhorn 等, 1991) 及乙烯釋放量的增加 (Mehlhorn 等, 1991)。



在作物產量方面，根據美國 NCLAN (National Crop Loss Assessment Network) 長期評估臭氧對經濟作物產量之影響，發現作物在生長季中曝露在高於一定劑量 (120 ppb) 的臭氧下，便會影響作物的產量 (Heck 等，1988)，且產量隨濃度的增高而減少，亦有學者指出臭氧在高二氧化碳的濃度下，一樣會造成作物減產，推測二氧化碳與臭氧之間有相互作用存在 (Mulpuri 等，1995)。由我國現有之臭氧監測研究，證實台灣地區的確有臭氧問題，而且已對作物造成威脅 (Sun，1990)，其作物減產率約在 3% 至 18% 之間 (蔡孟君，1994)。至於對本省最大農作物水稻的影響如何，極待試驗證實。

臭氧對作物造成傷害的機制一般認為是由於作物吸收臭氧所致 (Grantz 等，1994)，國際間對植物吸收臭氧的研究，多集中在溫帶及寒帶的森林方面 (Carney 等，1978；Polle 等，1995；Weinstein 等，1991)，在作物方面較少研究，尤其水稻方面更為缺乏。此外植物吸收臭氧的現象被認為是淨化臭氧的方式之一，台灣的耕地面積約為 87 萬公頃，其中水稻有 36.6 萬公頃，約佔 42%，是本省最重要的作物，所以水稻對臭氧的吸收作用對氣候變遷和環境影響甚巨，惟需要確實的實驗加以評估。本文主要介紹水稻對臭氧的吸收與代謝及臭氧對水稻生理的影響。

當臭氧進入植株後，植物會誘發本身的防禦系統，以減少傷害。細胞內消除自由基之抗氧化防禦系統有低分子量非酵素類，如 ascorbate、GSH、 $\alpha$ -tocopherol、及 carotenoid，高分子量抗氧化酵素類：超氧歧化酵素 (superoxide dismutase)、過氧化酵素 (catalase) 及 peroxidase 等，此外，植物亦會誘導產生如過敏等防禦系統作用 (Schraudner 等，1996；Sharma 和 Davis，1997；Sandermann 等，1998)。這些對抗自由基之系統的能力可能與

植物淨化空氣能力彼此相關。臭氧主要是經由氣孔進入細胞，因此氣孔的反應對植物能否抵抗臭氧是具有一定的影響。一般來說，對臭氧具有耐性的品種可以較快的關閉氣孔以減少臭氧的進入，而敏感的品種則有較慢的反應或是不會關閉氣孔 (Engle 和 Gabelman，1966；Hassan 等，1994)。Darrall (1989) 綜合比較學者的研究發現低的臭氧濃度下大部份植物的氣孔開度不會受到影響，仍舊可以維持一定的開度進行氣體交換及維持光合作用反應，然而在 200 ppb 以上的臭氧處理下，大多數的植物都會關閉氣孔以減少有害的臭氧進入體內；Salam 和 Soja (1995) 也證實隨著臭氧濃度的增加，氣孔的關閉也越顯著。Hill 和 Littlefield (1969) 的研究指出，臭氧會降低葉片的氣孔導度而導致植物光合作用減少，但 Pell 等 (1992) 的研究則是認為臭氧所誘導的光合作用減少發生的時間遠早於氣孔關閉的時間，因此氣孔的關閉應該是光合作用受到損害造成二氧化碳累積而產生的結果。Hassan 等 (1994) 提出敏感與具耐性的植物在臭氧處理下，其氣孔開閉的反應情形是不同的，在臭氧處理之下較敏感植物的氣孔開度會增加，因為臭氧破壞氣孔附近的表皮細胞，瓦解的表皮細胞失去其對氣孔保衛細胞的支撐力，因而造成氣孔被動的打開，然而控制氣孔開閉的保衛細胞本身並沒有受到臭氧的傷害。因此氣孔開度的調節，便成為影響植物是否對臭氧具有耐性的一個因素。學者們的研究發現外加 ABA 可以減少臭氧對植物的傷害，而對臭氧較具耐性的水稻品種之 ABA 含量亦較敏感的品種高，因此離層酸對氣孔的調節可能是參與植物面對臭氧逆境的一個調適反應 (Jeong 等，1980；Jeong 和 Ota，1981；Downton 等，1988；Kangasjarvi 等，1994)。

水稻對臭氧的吸收減量能力，會受其對臭氧的耐性及抗氧化系統的作用能力所影響，因此本研究除了於水稻田間監測臭氧濃度的變

化，並在臭氧薰氣處理前 24 小時添加 10  $\mu\text{M}$  的 ABA，期望 ABA 的前處理能提昇水稻對臭氧耐性及抗氧化酵素的活性，以評估水稻在臭氧污染下外加 ABA 的生理狀況，以及水稻處於臭氧之環境下對光合作用、產量的影響，和對其他溫室氣體減量的能力。

## 二、環保署監測站臭氧濃度

環保署古亭監測站臭氧濃度在二期水稻生長期間上午 7 時在未耕作前為  $7.8\pm 3.1$  ppb、浸水期為  $5.5\pm 2.2$  ppb、幼苗期為  $12.3\pm 5.8$  ppb、分蘖盛期為  $9.7\pm 7.4$  ppb 和抽穗期為  $12.5\pm 8.9$  ppb。中午 12 時在未耕作前為  $10.1\pm 8.5$  ppb、浸水期為  $29.6\pm 3.2$  ppb、幼苗期為  $18.8\pm 10.5$  ppb、分蘖盛期為  $14.1\pm 7.4$  ppb 和抽穗期為  $47.2\pm 18.9$  ppb。下午 5 時在未耕作前為  $13.5\pm 4.5$  ppb、浸水期為  $24.2\pm 7.5$  ppb、幼苗期為  $13.6\pm 10.5$  ppb、分蘖盛期為  $11.7\pm 6.6$  ppb 和抽穗期為  $27.5\pm 12.5$  ppb (朱鈞等, 1997)。

環保署古亭監測站臭氧濃度在二期水稻生長期間上午 7 時在未耕作前為  $2.2\pm 0.2$  ppb、浸水期為  $2.6\pm 0.3$  ppb、幼苗期為  $3.7\pm 1.2$  ppb、分蘖盛期為  $7.4\pm 4.3$  ppb、抽穗期為  $7.5\pm 6.0$  ppb、開花期為  $12.1\pm 7.1$  ppb 和成熟期為  $15.7\pm 6.4$  ppb。中午 12 時在未耕作前為  $42.5\pm 26.8$  ppb、浸水期為  $53.1\pm 15.1$  ppb、幼苗期為  $39.2\pm 31.5$  ppb、分蘖盛期為  $35.1\pm 26.2$  ppb、抽穗期為  $33.5\pm 17.7$  ppb、開花期為  $12.9\pm 5.6$  ppb 和成熟期為  $19.0\pm 9.7$  ppb。下午 5 時在未耕作前為  $10.3\pm 3.6$  ppb、浸水期為  $20.5\pm 13.3$  ppb、幼苗期為  $13.8\pm 9.9$  ppb、分蘖盛期為  $14.3\pm 7.9$  ppb、抽穗期為  $6.0\pm 2.7$  ppb、開花期為  $9.8\pm 1.3$  ppb 和成熟期為  $21.6\pm 5.7$  ppb (朱鈞等, 1997)。

## 三、大氣臭氧濃度量測

台大農業試驗場一期水稻生長期間在空田區未耕作前大氣臭氧濃度  $7.3\pm 1.1$  ppb (上午 7 時)、 $9.8\pm 4.5$  ppb (中午 12 時) 和  $13.1\pm 3.5$  ppb (下午 5 時)。基隆路旁大氣臭氧濃度  $7.3\pm 2.1$  ppb (上午 7 時)、 $10.5\pm 5.5$  ppb (中午 12 時) 和  $13.6\pm 3.8$  ppb (下午 5 時)。在水稻田植冠頂端高度大氣臭氧濃度  $7.5\pm 1.5$  ppb (上午 7 時)、 $9.9\pm 3.6$  ppb (中午 12 時) 和  $13.2\pm 2.6$  ppb (下午 5 時)。水稻田區離地面 10 cm 處大氣臭氧濃度  $7.5\pm 1.5$  ppb (上午 7 時)、 $9.9\pm 3.6$  ppb (中午 12 時) 和  $13.2\pm 2.6$  ppb (下午 5 時)。浸水期在空田區大氣臭氧濃度  $5.2\pm 1.2$  ppb (上午 7 時)、 $28.6\pm 2.2$  ppb (中午 12 時) 和  $21.2\pm 6.2$  ppb (下午 5 時)。基隆路旁臭氧濃度  $5.9\pm 3.5$  ppb (上午 7 時)、 $28.7\pm 3.4$  ppb (中午 12 時) 和  $24.6\pm 6.1$  ppb (下午 5 時)。在水稻田植冠頂端高度及離地面 10 cm 處臭氧濃度皆為  $4.8\pm 2.1$  ppb (上午 7 時)、 $29.0\pm 2.4$  ppb (中午 12 時) 和  $20.9\pm 5.8$  ppb (下午 5 時)。幼苗期在空田區大氣臭氧濃度  $11.4\pm 5.3$  ppb (上午 7 時)、 $18.5\pm 10.3$  ppb (中午 12 時) 和  $13.7\pm 9.9$  ppb (下午 5 時)。基隆路旁大氣臭氧濃度  $11.7\pm 5.4$  ppb (上午 7 時)、 $18.5\pm 9.6$  ppb (中午 12 時) 和  $13.4\pm 8.5$  ppb (下午 5 時)。在水稻田植冠頂端高度大氣臭氧濃度  $11.4\pm 4.9$  ppb (上午 7 時)、 $18.4\pm 9.3$  ppb (中午 12 時) 和  $13.9\pm 8.2$  ppb (下午 5 時)。水稻田區離地面 10 cm 處大氣臭氧濃度  $11.3\pm 3.4$  ppb (上午 7 時)、 $18.8\pm 7.8$  ppb (中午 12 時) 和  $13.7\pm 5.7$  ppb (下午 5 時)。分蘖盛期在空田區大氣臭氧濃度  $9.8\pm 6.8$  ppb (上午 7 時)、 $13.3\pm 5.5$  ppb (中午 12 時) 和  $11.2\pm 2.2$  ppb (下午 5 時)。基隆路旁大氣臭氧濃度  $9.4\pm 6.1$  ppb (上午 7 時)、 $13.7\pm 5.7$  ppb (中午 12 時) 和  $11.4\pm 4.5$  ppb (下午 5 時)。在水稻田植冠頂端高度大氣臭氧濃度  $9.6\pm 6.1$  ppb (上午 7 時)、 $13.5\pm 5.3$  ppb (中午 12 時) 和  $11.4\pm 3.3$  ppb (下午 5 時)。水稻田區離地面 10 cm 處大氣臭氧濃度  $8.9\pm 3.5$  ppb (上午 7 時)、 $13.2\pm 7.1$  ppb (中

午 12 時) 和  $10.9 \pm 5.9$  ppb (下午 5 時)。抽穗期在空田區大氣臭氧濃度  $12.3 \pm 5.8$  ppb (上午 7 時)、 $47.0 \pm 15.6$  ppb (中午 12 時) 和  $26.4 \pm 10.6$  ppb (下午 5 時)。基隆路旁大氣臭氧濃度  $11.9 \pm 7.2$  ppb (上午 7 時)、 $46.7 \pm 7.5$  ppb (中午 12 時) 和  $28.3 \pm 10.1$  ppb (下午 5 時)。在水稻田植冠頂端高度大氣臭氧濃度  $12.2 \pm 6.2$  ppb (上午 7 時)、 $46.9 \pm 15.2$  ppb (中午 12 時) 和  $26.3 \pm 9.6$  ppb (下午 5 時)。水稻田區離地面 10 cm 處大氣臭氧濃度  $11.9 \pm 5.1$  ppb (上午 7 時)、 $45.6 \pm 12.5$  ppb (中午 12 時) 和  $26.1 \pm 10.5$  ppb (下午 5 時)(朱鈞等, 1997、1998)。

在基隆路旁二期水稻生長期間上午 7 時未耕作前大氣臭氧濃度  $1.9 \pm 0.2$  ppb、浸水期為  $2.5 \pm 0.4$  ppb、幼苗期為  $3.6 \pm 1.1$  ppb、分蘗盛期為  $6.5 \pm 3.3$  ppb、抽穗期為  $7.0 \pm 3.4$  ppb、開花期為  $11.2 \pm 4.3$  ppb、成熟期為  $14.8 \pm 5.5$  ppb。中午 12 時分別為  $42.2 \pm 22.4$  ppb、 $53.3 \pm 14.8$  ppb、 $40.6 \pm 12.8$  ppb、 $34.2 \pm 16.4$  ppb、 $35.2 \pm 20.4$  ppb、 $13.0 \pm 5.1$  ppb 和  $19.5 \pm 8.1$  ppb。下午 5 時則分別為  $10.1 \pm 3.1$  ppb、 $20.2 \pm 12.9$  ppb、 $14.6 \pm 5.4$  ppb、 $14.2 \pm 3.9$  ppb、 $6.6 \pm 3.1$  ppb、 $10.5 \pm 1.8$  ppb 和  $22.2 \pm 3.9$  ppb。在空田區上午 7 時未耕作前大氣臭氧濃度  $3.6 \pm 0.8$  ppb、浸水期為  $1.8 \pm 0.2$  ppb、幼苗期為  $3.3 \pm 0.9$  ppb、分蘗盛期為  $7.1 \pm 2.8$  ppb、抽穗期為  $7.3 \pm 3.1$  ppb、開花期為  $10.3 \pm 4.1$  ppb、成熟期為  $15.0 \pm 4.2$  ppb。中午 12 時分別為  $32.6 \pm 12.4$  ppb、 $51.2 \pm 13.4$  ppb、 $39.1 \pm 10.6$  ppb、 $34.1 \pm 18.6$  ppb、 $34.9 \pm 20.6$  ppb、 $12.9 \pm 5.6$  ppb 和  $20.2 \pm 7.7$  ppb。下午 5 時則分別為  $13.2 \pm 2.8$  ppb、 $19.5 \pm 11.1$  ppb、 $14.2 \pm 4.3$  ppb、 $7.2 \pm 2.9$  ppb、 $6.5 \pm 3.1$  ppb、 $9.9 \pm 1.3$  ppb 和  $22.6 \pm 4.2$  ppb。在水稻田植冠頂端高度上午 7 時未耕作前大氣臭氧濃度  $3.5 \pm 0.9$  ppb、浸水期為  $1.6 \pm 0.1$  ppb、幼苗期為  $3.1 \pm 0.8$  ppb、分蘗盛期為  $7.0 \pm 2.1$  ppb、抽穗期為  $7.1 \pm 4.2$  ppb、開花期為  $10.3 \pm 5.2$  ppb、成熟期為  $14.8 \pm 3.5$  ppb。中午 12 時分別為  $31.5 \pm 10.3$

ppb、 $47.8 \pm 8.4$  ppb、 $38.6 \pm 9.5$  ppb、 $32.3 \pm 16.6$  ppb、 $33.8 \pm 7.8$  ppb、 $12.7 \pm 3.8$  ppb 和  $20.3 \pm 6.3$  ppb。下午 5 時則分別為  $14.0 \pm 3.1$  ppb、 $19.4 \pm 9.1$  ppb、 $7.1 \pm 5.1$  ppb、 $6.3 \pm 1.5$  ppb、 $5.9 \pm 2.3$  ppb、 $9.6 \pm 1.4$  ppb 和  $21.9 \pm 4.8$  ppb。水稻田區離地面 10 cm 處上午 7 時未耕作前大氣臭氧濃度  $3.5 \pm 0.9$  ppb、浸水期為  $1.6 \pm 0.1$  ppb、幼苗期為  $2.9 \pm 0.2$  ppb、分蘗盛期為  $6.4 \pm 2.1$  ppb、抽穗期為  $6.4 \pm 2.0$  ppb、開花期為  $9.5 \pm 3.7$  ppb、成熟期為  $14.2 \pm 5.1$  ppb。中午 12 時分別為  $31.5 \pm 10.3$  ppb、 $47.8 \pm 8.4$  ppb、 $37.9 \pm 11.3$  ppb、 $32.4 \pm 10.2$  ppb、 $31.6 \pm 6.5$  ppb、 $10.8 \pm 4.7$  ppb 和  $19.1 \pm 2.6$  ppb。下午 5 時則分別為  $14.0 \pm 3.1$  ppb、 $19.4 \pm 9.1$  ppb、 $6.8 \pm 2.6$  ppb、 $5.9 \pm 0.8$  ppb、 $5.4 \pm 1.3$  ppb、 $9.8 \pm 1.3$  ppb 和  $20.6 \pm 3.5$  ppb (朱鈞等, 1997、1998)。

#### 四、水稻對臭氧吸收速率

台大農業試驗場八種水稻中, 高雄秈 7 號臭氧吸收速率最高為  $0.100 \pm 0.002$   $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ , 依次為台中秈 10 號  $0.099 \pm 0.002$   $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、台農秈 20 號  $0.096 \pm 0.001$   $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、台中在來 1 號  $0.094 \pm 0.001$   $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、台中秈 3 號  $0.088 \pm 0.001$   $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、台農秈 19 號  $0.087 \pm 0.001$   $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、台農秈 14 號  $0.079 \pm 0.003$   $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、最低為台中秈 17 號  $0.069 \pm 0.001$   $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 。十六種粳稻, 台中 65 號吸收臭氧速率最高為  $0.062 \pm 0.001$   $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、依次為台南 9 號  $0.052 \pm 0.005$   $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、台梗 2 和 5 號  $0.046 \pm 0.002$   $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、台農 67 號  $0.045 \pm 0.001$   $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、高雄 141 號  $0.042 \pm 0.001$   $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、台中 189 號  $0.040 \pm 0.001$   $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、台梗 9 號  $0.038 \pm 0.003$   $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、台梗 3 號  $0.036 \pm 0.001$   $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、越光  $0.031 \pm 0.003$   $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、台梗 1 號  $0.028 \pm 0.002$   $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、台梗 4 號  $0.027 \pm 0.001$   $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、台梗 8 號  $0.026 \pm 0.003$   $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、

台梗 10 和 6 號  $0.022\pm 0.002 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、而台梗 7 號最低為  $0.020\pm 0.001 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  (朱鈞等, 1997、1998)。

## 五、水稻生長時臭氧濃度之變化

台中區農業改良場 1998 年一期作水稻在分蘖盛期, 於 4 月 3 日平均氣溫  $20.9^\circ\text{C}$ , solar radiation  $11.68 \text{ MJ}/\text{m}^2/\text{d}$ , 在馬路旁臭氧濃度介於 1-65 ppb, 在 12 時-下午 5 時最高, 而清晨 0-5 時最低。而在稻田中臭氧濃度略低, 介於 1-56 ppb 之間, 亦在中午 12-下午 5 時較高, 而清晨較低。1998 年 5 月 23 日一期水稻孕穗期, 平均氣溫  $28.3^\circ\text{C}$ , solar radiation  $17.96 \text{ MJ}/\text{m}^2/\text{d}$ , 在馬路旁臭氧濃度介於 1-70 ppb, 在下午 1 時最高, 清晨 4 時最低。而在稻田中, 臭氧濃度略低, 介於 1-60 ppb 之間, 亦在下午 1 時較高, 清晨 4 時最低。1998 年 6 月 21 日一期作水稻乳熟期, 平均氣溫  $29.4^\circ\text{C}$ , solar radiation  $15.15 \text{ MJ}/\text{m}^2/\text{d}$ , 在馬路旁臭氧之濃度介於 1-80 ppb 之間, 在下午 2 時最高, 而清晨 3 時最低。而在稻田中, 臭氧濃度較低, 介於 1-60 ppb, 在下午 2 時最高, 而清晨時最低。1999 年 3 月 30 日一期作水稻在分蘖盛期, 於上午 10 時至下午 6 時在馬路旁臭氧濃度介於 20-87 ppb, 中午 12 時-下午 1 時最高, 而下午 6 時最低。在稻田中, 臭氧濃度較低, 介於 10-32 ppb, 中午 12 至下午 1 時較高, 而下午 4 時最低。1999 年 4 月 27 日一期水稻孕穗期, 於上午 10 時至下午 6 時, 在馬路旁臭氧之濃度介於 70-162 ppb 之間, 在下午 2 時最高, 下午 6 時最低。在稻田中, 臭氧濃度較低, 介於 21-40 ppb 之間, 中午 12 時最高, 下午 2 時最低 (朱鈞和盧虎生, 2000)。

## 六、臭氧對水稻幼苗之影響

經 400 ppb 臭氧熏 4 h, 氣孔導度台農 67

號由  $136.3 \mu\text{mol H}_2\text{O}/\text{cm}^2/\text{s}$  降為  $71.74 \mu\text{mol H}_2\text{O}/\text{cm}^2/\text{s}$ 。台中在來 1 號由  $152.6 \mu\text{mol H}_2\text{O}/\text{cm}^2/\text{s}$  降為  $63.98 \mu\text{mol H}_2\text{O}/\text{cm}^2/\text{s}$ 。台農 67 號水稻在開花期以 200 ppb 臭氧熏 7 天, 二氧化碳吸收力由  $3.94\pm 1.54 \mu\text{mol}/\text{cm}^2/\text{s}$ , 降為  $2.01\pm 1.95 \mu\text{mol}/\text{cm}^2/\text{s}$ , 台中在來 1 號二氧化碳吸收力由  $5.02\pm 1.12 \mu\text{mol}/\text{cm}^2/\text{s}$ , 降為  $1.37\pm 2.38 \mu\text{mol}/\text{cm}^2/\text{s}$ 。台農 67 號水稻在開花期以 200 ppb 臭氧熏 7 天, 每株穗數由  $6.5\pm 1.0$  穗增加為  $7.2\pm 0.8$  穗, 一穗粒數則由  $81.4\pm 15.6$  粒降為  $70.9\pm 8.4$  粒。千粒重由  $23.6\pm 0.8 \text{ g}$  增加為  $24.3\pm 0.4 \text{ g}$ , 穗實率由  $63.8\pm 12.0\%$  提高為  $64.2\pm 10.0\%$ 。台中在來 1 號水稻在開花期以 200 ppb 臭氧熏 7 天, 每株穗數由  $7.3\pm 1.8$  穗增加為  $9.7\pm 2.0$  穗, 一穗粒數則由  $51.7\pm 4.3$  粒降為  $62.7\pm 9.2$  粒。千粒重由  $22.8\pm 1.0 \text{ g}$  降為  $21.0\pm 1.9 \text{ g}$ , 穗實率由  $66.3\pm 14.5\%$  提高為  $85.3\pm 8.8\%$  (朱鈞和盧虎生, 2001)。

## 七、臭氧對水稻葉綠素含量之影響

經 300 ppb 臭氧處理 24h, 台中在來 1 號葉綠素含量比對照組減少 40.4% 最高, 其次為台中秈 17 號 36.5%、台中秈 10 號 33.3%、台農秈 20 號 31.2%、台中秈 3 號 27.9%、台農秈 19 號 25.9%、高雄秈 7 號 25.5% 和台農秈 14 號 24.3%。在梗稻方面台梗 6 號比對照組減少 25.3% 最高, 其次為台梗 8 號 22.4%、台中 65 號 21.4%、高雄 141 號 18.7%、台中 189 號 18.2%、台梗 5 號 17.2%、台梗 9 號 15.7%、台梗 2 號 14.0%、台農 67 號及越光 13.4%、台梗 4 號 11.4%、台梗 1 號 11.2%、台梗 3 號 11.0%、台梗 10 號 10.3%、台南 9 號 9.8% 和台梗 7 號 9.0% (朱鈞等, 1997、1998)。

## 八、臭氧對水稻光合作用之影響

臭氧進入植物體內所生成的自由基可能



造成光合作用系統的傷害，進而使光合作用效率下降。在水稻開花期間，以 200 ppb 的臭氧濃度處理七天後，台農 67 號及台中在來 1 號的光合作用皆顯著下降，且台中在來 1 號下降的程度較台農 67 號來的大，台農 67 號在臭氧的環境下光合作用速率下降約 49%，而台中在來一號則下降約 73%。因此在臭氧污染的環境下，水稻雖可維持一定的生長並進行光合作用，但對二氧化碳吸收的效果卻不如處於乾淨空氣下的水稻（朱鈞和盧虎生，2001）。

### 九、臭氧對水稻抗氧化酵素活性之影響

台農 67 號在臭氧處理下，SOD (superoxide dismutase) 活性所受到的抑制作用可經由 ABA (abscisic acid) 的處理消除，使 SOD 的活性保持與對照組相同的狀態，但台中在來 1 號被臭氧所促進的 SOD 活性則會受到 ABA 抑制，同時 ABA 還會稍微抑制台中在來 1 號的 SOD 活性，但有一天的延遲時間。APOD (ascorbate peroxidase) 的活性會被臭氧促進清除產生的自由基，ABA 也有相同的促進作用，臭氧處理促進台農 67 號 APOD 活性為對照組的 1.21 倍，ABA 處理可增加 1.84 倍；而 ABA 對 APOD 的促進作用在台中在來 1 號則是與臭氧處理效果差不多；這樣的趨勢於 ABA 移除後便逐漸消失。臭氧會促進台農 67 號與台中在來 1 號 GR (glutathion reductase) 活性，而 ABA 處理同樣會增進台農 67 號 GR 活性為對照組的 1.5 倍，但台中在來 1 號的 GR 活性則不會受到 ABA 的促進，同時 ABA 前處理還會抑制臭氧處理對 GR 之促進作用。ABA 對台農 67 號 GR 活性的促進作用與 APOD 的情形一樣，更換不含 ABA 的水耕液後就消失。ABA 能有效減少臭氧對 CAT

(catalase) 的抑制作用，使 CAT 活性保持與對照組差不多。但臭氧所促進的 POD (peroxidase) 活性則會被 ABA 所抑制，這樣的抑制作用於更換不含 ABA 水耕液 24 小時後仍然持續表現，台農 67 號 POD 活性降為對照組的 80%，台中在來 1 號則降為 55% (朱鈞和盧虎生，2001)。

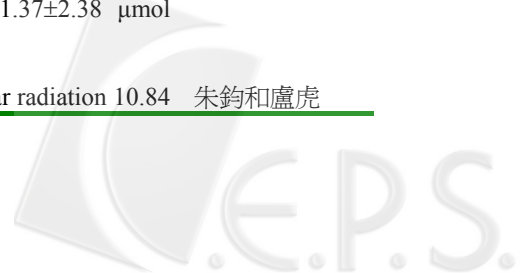
### 十、水稻對臭濃度之影響

1999 年第二期作水稻開花期 10 月 27 日，平均氣溫 25.1，solar radiation 10.84 MJ/m<sup>2</sup>/d，在台中區農業改良場水稻田之馬路旁其大氣臭氧濃度在下午 2 時最高為 72 ppb，次高為下午 5 時 55 ppb，而在水稻田間，其 O<sub>3</sub> 濃度較低，在下午 2 時最高為 68 ppb，而下午 5 時 48 ppb。而在 10 月 28 日平均氣溫為 26.2，solar radiation 為 10.84 MJ/m<sup>2</sup>/d，水稻田之馬路旁之 O<sub>3</sub> 濃度亦比水稻田之 O<sub>3</sub> 高，在下午 2 時也最高為 60 ppb，而水稻田之 O<sub>3</sub> 則為 53 ppb，在下午 4 時為次高。台中地區臭氧濃度的監測結果顯示，不論是那個時期水稻田區的臭氧濃度都比馬路邊的臭氧濃度低，成熟期稻田區降低尤為明顯，同時臭氧濃度較高的時間即中午 12 時到下午 4 時左右更有顯著的效果，此結果與朱鈞等 (1998) 於台灣大學農業試驗場所測的結果相同，因此水稻對於大氣中的臭氧應該有一定的減量效果，對空氣品質的改善具有正面的影響。不過有關水稻田之臭氧濃度變化，仍要進一步研究較多之數據和區分水稻本身和水田間及和環境如溫度、光照、氣候等相互間之影響，則對臭氧減量效果有較深入的瞭解 (朱鈞和盧虎生，2001)。



表一、水稻生長期間大氣臭氧濃度

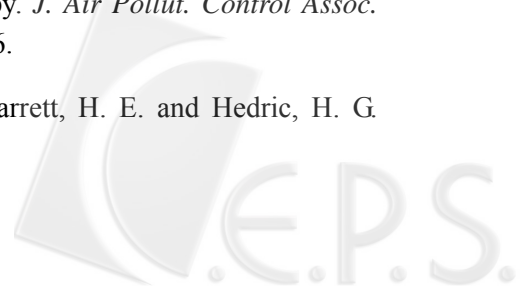
逸散源	研究成果	出處
台大農業試驗場	一期水稻生長期間在基隆路旁大氣臭氧濃度介於 5.9-11.9 ppb (上午 7 時), 10.5-46.7 ppb (中午 12 時) 和 11.4-28.3 ppb (下午 5 時)。在空田區臭氧濃度 5.2-12.3 ppb (上午 7 時), 9.8-47.0 ppb (中午 12 時) 和 11.2-26.4 ppb (下午 5 時)。在水稻田植冠頂端臭氧濃度介於 4.8-12.2 ppb (上午 7 時), 9.9-46.9 ppb (中午 12 時) 和 11.4-26.3 ppb (下午 5 時)。在水稻田區離地面 10 cm 處臭氧濃度介於 4.8-11.9 ppb (上午 7 時), 9.9-45.6 ppb (中午 12 時) 和 10.9-26.1 ppb (下午 5 時)。	朱鈞等, 1997。
台大農業試驗場	二期水稻在生長期間在基隆路旁大氣臭氧濃度介於 1.9-14.8 ppb (上午 7 時), 13.0-53.3 ppb (中午 12 時) 和 6.6-22.2 ppb (下午 5 時)。在空田區臭氧濃度介於 1.8-15.0 ppb (上午 7 時), 12.9-51.2 ppb (中午 12 時) 和 6.5-22.6 ppb (下午 5 時)。在稻作田間植冠頂端臭氧濃度介於 1.6-14.8 ppb (上午 7 時), 12.7-47.8 ppb (中午 12 時) 和 5.9-21.9 ppb (下午 5 時)。在稻作田區離地面 10 cm 處臭氧濃度介於 1.6-14.2 ppb (上午 7 時), 10.8-47.8 ppb (中午 12 時) 和 5.4-20.6 ppb (下午 5 時)。	朱鈞等, 1997。
台大農業試驗場	八種秈稻中, 高雄秈 7 號臭氧吸收速率最高為 $0.100 \pm 0.002 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ , 最低為台中秈 17 號 $0.069 \pm 0.001 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 。而在十六種梗稻, 台中 65 號吸收臭氧速率最高為 $0.062 \pm 0.001 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ , 而台梗 7 號最低為 $0.020 \pm 0.001 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 。	朱鈞等, 1997。
台中區農業改良場	1998 年一期作水稻在分蘖盛期, 於 4 月 3 日平均氣溫 20.9, solar radiation 11.68 MJ/m <sup>2</sup> /d, 在馬路旁 O <sub>3</sub> 濃度介於 1-65 ppb, 在 12 時-下午 5 時最高, 而清晨 0-5 時最低。而在稻田中 O <sub>3</sub> 濃度略低, 介於 1-56 ppb 之間, 亦在中午 12-下午 5 時較高, 而清晨較低。1998 年 5 月 23 日一期水稻孕穗期, 平均氣溫 28.3, solar radiation 17.96 MJ/m <sup>2</sup> /d, 在馬路旁 O <sub>3</sub> 濃度介於 1-70 ppb, 在下午 1 時最高, 清晨 4 時最低。而在稻田中, O <sub>3</sub> 濃度略低, 介於 1-60 ppb 之間, 亦在下午 1 時較高, 清晨 4 時最低。1998 年 6 月 21 日一期作水稻乳熟期, 平均氣溫 29.4, solar radiation 15.15 MJ/m <sup>2</sup> /d, 在馬路旁 O <sub>3</sub> 之濃度介於 1-80 ppb 之間, 在下午 2 時最高, 而清晨 3 時最低。而在稻田中, O <sub>3</sub> 濃度較低, 介於 1-60 ppb, 在下午 2 時最高, 而清晨時最低。1999 年 3 月 30 日一期作水稻在分蘖盛期, 於上午 10 時至下午 6 時在馬路旁 O <sub>3</sub> 濃度介於 20-87 ppb, 中午 12 時-下午 1 時最高, 而下午 6 時最低。在稻田中, O <sub>3</sub> 濃度較低, 介於 10-32 ppb, 中午 12 至下午 1 時較高, 而下午 4 時最低。1999 年 4 月 27 日一期水稻孕穗期, 於上午 10 時至下午 6 時, 在馬路旁 O <sub>3</sub> 之濃度介於 70-162 ppb 之間, 在下午 2 時最高, 下午 6 時最低。在稻田中, O <sub>3</sub> 濃度較低, 介於 21-40 ppb 之間, 中午 12 時最高, 下午 2 時最低。	朱鈞和盧虎生, 2000。
臭氧對水稻幼苗之影響	經 400 ppb O <sub>3</sub> 燻 4 h, 氣孔導度台農 67 號由 $136.3 \mu\text{mol H}_2\text{O}/\text{cm}^2/\text{s}$ 降為 $71.74 \mu\text{mol H}_2\text{O}/\text{cm}^2/\text{s}$ 。台中在來 1 號由 $152.6 \mu\text{mol H}_2\text{O}/\text{cm}^2/\text{s}$ 降為 $63.98 \mu\text{mol H}_2\text{O}/\text{cm}^2/\text{s}$ 。台農 67 號水稻在開花期以 200 ppb O <sub>3</sub> 燻 7 天, 二氧化碳吸收力由 $3.94 \pm 1.54 \mu\text{mol}/\text{cm}^2/\text{s}$ , 降為 $2.01 \pm 1.95 \mu\text{mol}/\text{cm}^2/\text{s}$ , 台中在來 1 號二氧化碳吸收力由 $5.02 \pm 1.12 \mu\text{mol}/\text{cm}^2/\text{s}$ , 降為 $1.37 \pm 2.38 \mu\text{mol}/\text{cm}^2/\text{s}$ 。每株穗數由 $6.5 \pm 1.0$ 穗增加為 $7.2 \pm 0.8$ 穗, 一穗粒數則由 $81.4 \pm 15.6$ 粒降為 $70.9 \pm 8.4$ 粒。千粒重由 $23.6 \pm 0.8$ g 增加為 $24.3 \pm 0.4$ g, 穗實率由 $63.8 \pm 12.0\%$ 提高為 $64.2 \pm 10.0\%$ 。台中在來 1 號水稻在開花期以 200 ppb O <sub>3</sub> 燻 7 天, 每株穗數由 $7.3 \pm 1.8$ 穗增加為 $9.7 \pm 2.0$ 穗, 一穗粒數則由 $51.7 \pm 4.3$ 粒降為 $62.7 \pm 9.2$ 粒。千粒重由 $22.8 \pm 1.0$ g 降為 $21.0 \pm 1.9$ g, 穗實率由 $66.3 \pm 14.5\%$ 提高為 $85.3 \pm 8.8\%$ 。	朱鈞和盧虎生, 2001。
臭氧對水稻光合作用影響	水稻於開花期經 200 ppb O <sub>3</sub> 燻氣處理 7 天, 台農 67 號光合作用由 $3.94 \pm 1.54 \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$ 降為 $2.01 \pm 1.95 \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$ , 光合作用速率下降約 49%。台中在來 1 號光合作用由 $5.02 \pm 1.12 \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$ 降為 $1.37 \pm 2.38 \mu\text{mol C}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{s}$ , 光合作用速率下降約 73%。	朱鈞和盧虎生, 2001。
水稻對臭	1999 年第二期作水稻開花期 10 月 27 日, 平均氣溫 25.1, solar radiation 10.84	朱鈞和盧虎



逸散源	研究成果	出處
濃度之影響	MJ/m <sup>2</sup> /d, 在台中區農業改良場水稻田之馬路旁其大氣臭氧濃度在下午 2 時最高為 72 ppb, 次高為下午 5 時 55 ppb, 而在水稻田間, 其 O <sub>3</sub> 濃度較低, 在下午 2 時最高為 68 ppb, 而下午 5 時 48 ppb。而在 10 月 28 日期平均氣溫為 26.2 , solar radiation 為 10.84 MJ/m <sup>2</sup> /d, 水稻田之馬路旁 O <sub>3</sub> 濃度亦比水稻田之 O <sub>3</sub> 高, 在下午 2 時最高為 60 ppb, 而水稻田之 O <sub>3</sub> 則為 53 ppb, 在下午 4 時則為次高。	生, 2001。

## 參考文獻

- 朱 鈞、盧虎生、楊政國, 1997。臭氧與氣候變遷之關係影響及其對水稻生產之影響。 *台灣地區大氣環境變遷* (呂世宗、柳中明、楊盛行編), pp.225-267。國立台灣大學農業化學系和全球變遷中心, 台北, 台灣。
- 朱 鈞、盧虎生、楊政國、林岱瑩, 1998。臭氧與氣候變遷之關係影響及其對水稻之影響。 *台灣地區大氣環境變遷 (三)* (呂世宗、柳中明、楊盛行編), pp.151-188。國立台灣大學農業化學系和全球變遷中心, 台北, 台灣。
- 朱 鈞、盧虎生, 2000。水稻對臭氧及溫室氣體減量之影響。 *溫室氣體通量測定及減量對策 ( )* (楊盛行編), pp.173-191。國立台灣大學全球變遷中心、農業化學系和農業陳列館, 台北, 台灣。
- 朱 鈞、盧虎生, 2001。水稻對臭氧及二氧化碳減量之影響。 *溫室氣體通量測定及減量對策 ( )* (楊盛行編), pp.141-156。國立台灣大學全球變遷中心、農業化學系和農業陳列館, 台北, 台灣。
- 呂世宗、柳中明、楊盛行, 1997。 *台灣地區大氣環境變遷*。國立台灣大學農業化學系和全球變遷中心, 台北, 台灣。 pp.400。
- 呂世宗、柳中明、楊盛行, 1998。 *台灣地區大氣環境變遷 (三)*。國立台灣大學農業化學系和全球變遷中心, 台北, 台灣。 pp.322。
- 林岱瑩、楊政國、盧虎生、朱 鈞, 1999。水稻田對臭氧及溫室氣體減量之影響。 *溫室氣體通量測定及減量對策* (楊盛行編), pp.162-177。國立台灣大學農業化學系和全球變遷中心, 台北, 台灣。
- 林韶凱、梁家楨、林岱瑩、楊政國、盧虎生, 2002。植物對臭氧之生理反應。 *中華農藝雜誌*, 12: 79-91。
- 柳中明, 1993。台灣的光化污染分析。 *台灣地區空氣污染與農業氣象對作物生產影響研討會*, pp.261-275。台中, 台灣。
- 楊政國、盧虎生、朱鈞, 2000。水稻對臭氧耐性之生理反應 (一): 水稻田臭氧濃度變化及不同品種幼苗對臭氧濃度吸收能力之變異。 *中華農學會報新版*, 1: 159-170。
- 楊盛行, 1999。 *溫室氣體通量測定及減量對策*。國立台灣大學農業化學系和全球變遷中心, 台北, 台灣。 pp.220。
- 楊盛行, 2000。 *溫室氣體通量測定及減量對策 ( )*。國立台灣大學全球變遷中心、農業化學系和農業陳列館, 台北, 台灣。 pp.233。
- 楊盛行, 2001。 *溫室氣體通量測定及減量對策 ( )*。國立台灣大學全球變遷中心、農業化學系和農業陳列館, 台北, 台灣。 pp.239。
- 蔡孟君, 1994。 *臭氧對台灣地區植物之影響*。國立台灣大學植物病蟲害研究所碩士論文, 台北, 台灣。
- Bennett, J. H. and Hill, A. C. 1973. Absorption of gaseous air pollutants by a standardized plant canopy. *J. Air Pollut. Control Assoc.* 23: 203-206.
- Carney, J. I., Garrett, H. E. and Hedric, H. G.



1978. Influence of air pollutant gases (ozone, sulfur dioxide) on oxygen uptake of pine (*Pinus taeda*) roots with selected ectomycorrhizae (*Thelephora terrestris*, *Pisolithus tinctorius*). *Phytopathology* 68: 1160-1163.
- Darrall, N. M. 1989. The effect of air pollutants on physiological processes in plants. *Plant Cell Environ.* 12: 1-30.
- Downton, W. J. S., Loveys, B. R. and Grant, W. J. R. 1988. Stomatal closure fully accounts for the inhibition of photosynthesis by abscisic acid. *New Phytol.* 108: 263-266.
- Engle, R. L. and Gabelman, W. H. 1966. Inheritance and mechanism for resistance to O<sub>3</sub> damage in onion, *Allium cepa* L. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 89: 423-430.
- Goldsmith, J. R. and Friberg, L. T. 1982. Effect of air pollution on human health. In: *Air Pollution 2*: 251-263. Ed. by Stern, A. C., Academic Press, New York.
- Grantz, D. A., MacPherson, J. I., Massman, W. J. and Pederson, J. 1994. Study demonstrates ozone uptake by SJV crops. *Calif-Agric.* 48: 9-12.
- Hassan, I. A, Ashmore, M. R. and Bell, J. N. B. 1994. Effects of O<sub>3</sub> on the stomatal behaviour of Egyptian varieties of radish (*Raphanus sativus* L. cv. Baladey) and turnip (*Brassica rape* L. cv. Sultani). *New Phytol.* 128: 243-249
- Heck, W. W., Heagles, A. S. and Shriner, D. S. 1986. Effects on vegetation: Native, crops, forests. In: *Air Pollution.* 6: 178-186. Ed. by Stern, A. C., Academic Press, NY. USA.
- Heck, W. W., Philbeck, R. B. and Dunning, J. A. 1978. A continuous stirred tank reactor (CSTR) system for exposing plants to gaseous air contaminants. *Principles, Specifications, Construction, and Operation.* Agricultural Research Service, U.S.A.
- Heck, W. W., Taylor, O. C. and Tingey, O. T. 1988. Assessment of crop loss from air pollutants. *Proceeding of an International Conference.* October 25-29, 1987. Raleigh, North Carolina, USA.
- Heggstad, H. E. 1991. Origen of Bel-W3, Bel-W3, Bel-C and Bel-B tobacco varieties and their use as indicators of ozone. *Environ. Pollut.* 74: 264-291.
- Heggstad, H. E. and Middleton, J. T. 1959. Ozone in high concentrations as a cause of tobacco leaf injury. *Science* 129: 208-210.
- Hill, A. C. and Littlefield, N. 1969. Ozone: Effect on apparent photosynthesis, rate of transpiration, and stomatal closure in plants. *Environ. Sci. Technol.* 3: 52-56.
- Hill, A.C. 1971. Vegetation : a sink for atmospheric pollutants. *J. Air Pollut. Control Assoc.* 21: 341-346.
- Jacobson, J. S. and Hill, A. C. 1970. *Recognition of Air Pollution Injury to Vegetation: A Pictorial atlas.* Air Pollution Control Association, Pittsburgh, PA. USA.
- Jeong, Y. H., Nakamura, H. and Ota, Y. 1980. Physiological studies on photochemical oxidants injury in rice plants: I. Varietal difference of abscisic acid content and its relation to resistance to ozone. *Jpn. J. Crop Sci.* 49: 456-460.
- Jeong, Y. H. and Ota, Y. 1981. Physiological studies on photochemical oxidant injury in rice plants: II. Effect of abscisic acid (ABA) on ozone injury and ethylene production in rice plants. *Jpn. J. Crop Sci.* 50: 560-565.
- Kangasjarvi, J., Talvinen, J., Utriainen, M. and Karjalainen, R. 1994. Plant defence systems induced by ozone. *Plant Cell Environ.* 17: 783-794.
- Kasana, M. S. 1991. Sensitivity of three

- leguminous crops to O<sub>3</sub> as influenced by different stages of growth and development. *Environ. Pollut.* 69: 131-149.
- Keudson, L. L., Tibbitts, T. W. and Edwards, G. E. 1977. Measurement of ozone injury by determination of leaf chlorophyll concentration. *Plant Physiol.* 60: 606-608.
- Kupra, S. V., Manning, W. J. and Nosal, M. 1993. Use of tobacco cultivars as biological indicators of ambient ozone pollution: an analysis of exposure-response relationships. *Environ. Pollut.* 81: 137-146.
- Leuning, R., Neumann, H. N. and Thertull, G. W. 1979a. Ozone uptake by corn (*Zea mays* L.): a general approach. *Agric. Meteor.* 20: 115-135.
- Leuning, R., Unsworth, M. H., Neumann, H. N. and King, K. M. 1979b. Ozone fluxes to tobacco and soil under field conditions. *Atmos. Environ.* 13: 1155-1163.
- Mehlhorn, H., O Shea, J. M. and Wellburn, A. R. 1991. Atmospheric ozone interacts with stress ethylene formation by plants to cause visible plant injury. *J. Exp. Bot.* 42: 17-24.
- Mulpuri, V. R., Beverly, A. H. and Douglas, P. O. 1995. Amelioration of ozone-induced oxidative damage in wheat plants grown under high carbon dioxide. *Plant Physiol.* 109: 421-432.
- Pell, E. J., Eckardt, N. and Enyedi, A. J. 1992. Timing of ozone stress and resulting status of ribulose biphosphate carboxylase/oxygenase and associated net photosynthesis. *New Phytol.* 120: 397-405
- Polle, A., Wieser, G. and Havranek, W. M. 1995. Quantification of ozone influx and apoplastic ascorbate content in needle of Norway spruce trees (*Picea abies* L., Karst) at high altitude. *Plant Cell Environ.* 18: 681-688.
- Reiss, R., Ryan, P. B. and Koutrakis, K. 1994. Modeling ozone deposition onto indoor residential surfaces. *Environ. Sci. Technol.* 28: 504-513.
- Salam, M. A. and Soja, G. 1995. Bush bean (*Phaseolus vulgaris* L.) leaf injury, photosynthesis and stomatal functions under elevated ozone levels. *Water Air Soil Pollut.* 85: 1533-1538
- Sander mann, H., Ernst, D., Heller, W. and Langebartels, C. 1998. Ozone: an abiotic elicitor of plant defence reactions. *Trends Plant Sci.* 3: 47-50.
- Schraudner, M., Langebartels, C. and Sander mann, H. 1996. Plant defence systems and ozone. *Biochem. Soc. Trans.* 24: 456-461.
- Sharma, Y. K. and Davis, K. R. 1997. The effects of ozone on antioxidant responses in plants. *Free Radic. Biol. Med.* 23: 480-488.
- Skarby, L. and Sellden, G. 1984. The effects of ozone on crops and forests. *AMBIO.* 13: 68-72.
- Sun, E. J. 1990. Sorption of three major pollutants by bean plants. *J. Environ. Prot. Soc. ROC.* 13: 39-50.
- Thomas, M. D. and Hill, G. R. 1935. Absorption of sulphur dioxide by alfalfa and its relation to leaf injury. *Plant Physiol.* 10: 291-307.
- Turner, N.C., Waggoner, P. E. and Rich, S. 1974. Removal of ozone from the atmosphere by soil and vegetation. *Nature* 250: 486-489.
- Weinstein, D. A., Beloin, R. M. and Yanai, R. D. 1991. Modeling changes in red spruce carbon balance and allocation in response to interacting ozone and nutrient stresses. *Tree Physiol.* 9: 127-146
- Wiltshire, J. J., Wright, C. J., Unsworth, M. H. and Craigan, J. 1993. The effect of ozone-episodes on autumn leaf fall in apple. *New Phytol.* 124: 433-437.

