

應用AOT40(Accumulate exposure over a threshold of 40 ppb)評估農園作物受臭氧為害之潛勢

廖秀婷、徐慈鴻

前 言

對流層的臭氧屬於二次污染物，其前驅物如氮氧化物(NO_x)、揮發性碳氫化合物(VOCs, volatile organic hydrocarbons)及一氧化碳(CO)等經一系列光化反應後生成臭氧，隨著人類的經濟活動及全球環境變遷，臭氧濃度呈現提升的情形(Air quality in Europe, 2011)。根據APCEN (Air Pollution Crop Effect Network)評估資料顯示，泰國、印尼、菲律賓、緬甸等亞洲地區水稻生產國皆出現可能導致作物受害的臭氧濃度記錄(Emberson, 2007)，我國環保署空氣品質監測資料顯示，目前臺灣地區的臭氧成為污染指標(Pollutant standard Index, PSI)的天數有逐年增加的趨勢，1999至2010年10月份環保署中彰雲嘉4縣市空氣品質監測網站的臭氧濃度平均值有逐年上升的情形(行政院環境保護署，2012、顏有利，2010)，2007年7月份在嘉義新港測站曾記錄到高達221 ppb的臭氧濃度(行政院環境保護署，2012)。面對氣候變遷的衝擊，目前臭氧為被關注之空氣污染物，因臭氧為溫室氣體，且會傷害有助於吸收二氧化碳的植物而加速全球暖化(Booker et al., 2009；Felzer et al., 2005；Sitch et al., 2007)。

臭氧經由葉片氣孔進入植株的細胞壁和葉肉細胞時，會快速發生劇烈的氧化作用(oxidative burst)產生大量的活性氧族(reactive oxygen species, ROS)，造成植物葉片表面出現紅褐色細斑，嚴重時葉片呈現黃化壞疽(Mudd, 1997；Benton et al., 2000；Booker et al., 2009)。劇烈的氧化反應造成植物生理、生化作用改變，對光合作用造成重大影響，並且也改變同化產物的分配，導致作物產量及品質受到影響(Booker et al., 2009；Fiscus et al., 2005)。

臭氧對作物產量的影響國外已有多年研究，1980年代美國國家作物減產評估網計畫(National Crop Loss Assessment Network, NCLAN) (Heck, 1989)、歐洲頂開式燻

氣計畫(European OTC program) (Heagle, 1989)及氣候變遷對馬鈴薯產量與品質的研究計畫(Changing Climate and Potential Impacts on Potato Yield and Quality, CHIP) (Vandermeiren, 2005)的研究資料皆指出臭氧會造成多種作物的產量下降。1990至2006年間歐洲地區記錄到臭氧造成植物葉片出現病徵或造成作物減產資料已高達644筆，其中有39%為作物(27種)、38.1%為半自然植被(95種)、22.9%為灌木(49種)，普遍分佈在義大利、西班牙、瑞士、瑞典、比利時等國家(Mills et al., 2011)。臭氧濃度不斷提升的情況下，未來可能會對作物產量造成嚴重的影響，模式預測2030年小麥可能減產9%-18%，而水稻則有4%-8%之減產率(Van Dingenen et al., 2009)。

目前國外已發展AOT40 (accumulate exposure over a threshold of 40 ppb)來評估臭氧對不同種類之作物及森林植物造成為害的潛勢(Air quality in Europe, 2011; Booker et al., 2009; Fuhrer et al., 1997; Karlsson et al., 2004; Liu et al., 2009; Matyssek et al., 2004; Mills et al., 2007; Mills et al., 2011)，AOT40之定義為「白天日照光度 $\geq 50 \text{ W m}^{-2}$ 的情況下，每小時臭氧實際濃度扣除臨界濃度40 ppb後的濃度值累計總和」，以公式表示為：

$$\text{AOT40} = \sum_{i=1}^n ([\text{O}_3] - 40)_i \text{ for } [\text{O}_3] > 40 \text{ ppb.}$$

Fuhrer等人(1997)將3個月(5-7月)累積之AOT40與相對產量(例如：relative grain yield)做直線回歸分析，相關係數 $R^2 = 0.88$ ，顯示此AOT40與春小麥產量相關性高，因此可根據AOT40推估春小麥的產量受臭氧影響的情形(Fuhrer et al., 1997)；除春小麥外，Mills等學者進一步分析，包括：棉花、番茄、萵苣、大豆及水稻等農園作物的相對產量與AOT40的相關性，作為評估臭氧所造成的農業損失之依據(Mills et al., 2007)；對於AOT40的計算需考慮植物的生長期，農作物可依3個月、森林植物依6個月的生長期來累積計算(WHO, 1996; Beck et al., 1998)；研究顯示敏感作物在生長期累積之AOT40超過3 ppm.h，則可能出現5%產量損失；而森林敏感植物(樹木)在生長期累積之AOT40超過5 ppm.h，則可能受到為害(Karlsson et al.; 2004)。

臺灣地區空氣中的臭氧濃度呈現逐年增加之趨勢，但目前臺灣空氣品質標準主要以人體健康所受到的影響為考量而訂定(行政院環境保護署，2012)，並未考慮到對作物的影響；歐盟環保署(European Environment Agency)已利用AOT40劃分歐洲各國的空氣品質做為植物保護之依據(European Environment Agency, 2011)，

因此本文期能將臭氧指標—AOT40應用在臺灣農業上，並評估臺灣農作區受臭氧為害的潛勢。

資料來源及分析方法

一、1997-2011年不同空品區之年平均臭氧濃度變化趨勢

自行政院環境保護署空氣品質監測網下載臺灣地區1997至2011年不同空品區之每日24小時臭氧濃度資料，並計算年平均臭氧濃度，各空品區分別為北部空品區(台北市、基隆市、新北市、桃園縣)、竹苗空品區(新竹市、新竹縣、苗栗縣)、中部空品區(台中市、彰化縣、南投縣)、雲嘉南空品區(雲林縣、嘉義市、嘉義縣、台南市)、高屏空品區(高雄市、屏東縣)、宜蘭空品區(宜蘭縣)及花東空品區(花蓮縣、台東縣)等。

二、1997-2001年及2007-2011年之農作區周邊代表性測站AOT40分析

(一)代表性測站選擇

臺灣地狹人稠，西部有許多大型工業區鄰近重要作物生產區，為評估農業區受臭氧為害潛勢，本文挑選北中南共13處測站，包括：北部空品區-觀音測站、桃竹苗空品區-湖口測站、中部空品區-大里、二林測站、雲嘉南空品區-崙背、台西、新港、善化測站、高屏空品區-橋頭、大寮、林園、潮州測站、花東空品區-花蓮測站等進行每個月AOT40的計算，測站之地理位置及資訊詳如表1。

(二)AOT 40計算

本文將上述各測站之1997-2001年間及2007-2011年間每日白天(8至17時)所記錄之臭氧濃度以公式計算每月AOT40，並比較各測站之1997-2001年間及2007-2011年間AOT40之差異(將各測站資料分為1997-2001年間及2007-2011年間兩群，分別將五個年度間之每月AOT40平均)。此外，由於水稻是我國最重要的作物，因此根據水稻的營養生長及生殖生長的時期，選擇一期作(3至5月)和二期作(9至11月)各3個月的生長期作為AOT40的累計月份，以比較1997-2001年間及2007-2011年間3-Month AOT40之差異(將各測站資料分為1997-2001年間及2007-2011年間兩群，分別將五個年度間之3至5月或9至11月之AOT40累計值平均)。

表1. 選擇評估AOT40之測站資訊

區域	測站	備註
北部空品區	觀音	鄰近的新屋鄉為桃園地區水稻最大產區 觀音鄉內有工業區
桃竹苗空品區	湖口	農作物產區，鄰近新竹工業區西區
中部空品區	大里	水稻產區，鄰近本所
	二林	水稻產區，鄰近芳苑工業區
雲嘉南空品區	崙背	水稻產區，觀察台塑工業園區污染物是否飄移
	台西	鄰近台塑工業園區
	新港	鄰近南亞新港廠區、民雄工業區、頭橋工業區
	善化	水稻產區，鄰近南部科學園區
高屏空品區	橋頭	鄰近岡山工業區
	大寮	鄰近大發工業區
	林園	鄰近林園石化工業區
	潮州	農作區，觀察高雄地區污染物是否飄移
花東空品區	花蓮	農作區，作為東西部地區之對照

結 果

一、1997-2011年間不同空品區之年平均臭氧濃度變化趨勢

蒐集行政院環境保護署空氣品質監測網臺灣地區1997-2011年間各空品區之臭氧濃度資料，自1998年後各空品區之年平均臭氧濃度皆出現逐漸升高之趨勢(圖1.)，1997-2011年間年平均臭氧濃度以高屏空品區(高雄市、屏東縣)濃度為最高，雲嘉南空品區(雲林縣、嘉義市、嘉義縣、台南市)次之，其他依序為竹苗空品區(新竹市、新竹縣、苗栗縣)、北部空品區(基隆市、台北市、新北市、桃園縣)、中部空品區(台中市、彰化縣、南投縣)、宜蘭空品區(宜蘭縣)及花東空品區(花蓮縣、台東縣)。然而相較於1997年的年平均濃度，北部空品區及竹苗空品區為1999-2011年平均臭氧濃度增加幅度較多之區域(圖2.)，中部及宜蘭空品區則自2003年起臭氧濃度增加的幅度較明顯；雖然花東部地區之年平均臭氧濃度較其他地區低(圖1.)，然而自2006年起年平均臭氧濃度也呈現明顯的增加幅度(圖2.)。

二、1997-2001年及2007-2011年之農作區周邊代表性測站AOT40之變化

比較13個測站之1997-2001年間及2007-2011年間每月AOT40之差異，結果顯示無論是1997-2001年間或2007-2011年間，各測站之3至5月(春季)及9至11月(秋季)AOT40皆為年度高峰期，而6至8月為整年度中AOT40較低之季節(圖3.)；除觀音、潮州測站外，其他11個測站，在2007-2011年間3至5月之AOT40較1997-2001年間呈現增加的情形；而9至10月以湖口、大里、二林、崙背、台西及新港等測站在2007-2011年間之AOT40則略微增加，雖然善化、橋頭、林園、大寮及潮州測站在2007-2011年間之AOT40呈現略微下降的情形，但與其他測站相較下，這些測站的AOT40仍相對較高(圖3.)。比較每月份各測站在1997-2001年間或2007-2011年間AOT40之差異，結果顯示3至8月各測站的AOT40有相近的變化趨勢：圖4.顯示無論是1997-2001年間或2007-2011年間，西部地區各測站在1至3月及10至12月之AOT40呈現由北(觀音站)往南(潮洲站)的增加趨勢，花蓮測站每月AOT40皆明顯低於其他測站。

三、代表性測站3個月累積AOT40 (3-Month AOT40) 平均值之變化

各測站3個月累積AOT40 (3-Month AOT40) 平均值之變化圖(圖5.)，顯示除花蓮測站外，其餘測站無論是3至5月或9至11月的3-Month AOT40平均值，在1997-2001年間和2007-2011年間皆大幅超過小麥臨界值3.3 ppm.h (表2.) (Mills et al., 2007)；但若與水稻的3-Month AOT40臨界值12.8 ppm.h (表2.) (Mills et al., 2007) 比較，在1997-2001年間包括：橋頭、善化、林園、大寮及潮州等測站，3至5月或9至11月之3-Month AOT40平均值有出現超過水稻臨界值的情形，潮洲測站尤其明顯，而大里、台西及新港測站之3-Month AOT40平均值則接近水稻臨界值；在2007-2011年間包括：大里、新港、善化、橋頭、林園、大寮、潮州等測站，在3至5月及9至11月之3-Month AOT40平均值都出現超過水稻臨界值的情形，而二林、崙背及台西等測站之3-Month AOT40平均值則出現超過或接近水稻臨界值的情形。比較各測站1997-2001年間和2007-2011年間之3-Month AOT40平均值差異，顯示除潮州測站外，其他所有測站2007-2011年間3至5月之3-Month AOT40平均值較1997-2001年間高，然而9至11月之3-Month AOT40平均值則呈現湖口、大里、二林、崙背、台西及新港等測站以2007-2011年間較1997-2001年間高，但善化、橋頭、大寮、潮州等測站則以1997-2001年間較2007-2011年間高的情形。

討 論

臺灣地區每年春、秋兩季季節交換之際，由於陽光充足，加上季節天候特性、地形影響及低風速機率增加，造成大氣擴散稀釋能力的弱化，若無降雨對空氣污染物產生沖刷洗滌作用，則可能因較強的光化學反應作用而產生高濃度的臭氧(林文印，2007)；另一方面臺灣地區的臭氧濃度變化，在冬季會受到源自西伯利亞及蒙古地區高層空氣，由西北往東南方向進行中，因出海後高度驟降，將高層的高濃度臭氧及途經中國大陸時將臭氧的前驅物傳送至洋面促成臭氧的生成，傳送並影響我國的臭氧濃度；在夏季時經由南方太平洋與南海海域的海洋性空氣之長程傳送臭氧前驅物，也會使我國的臭氧濃度受到影響(柳中明等人，2004)。

高濃度的臭氧累積會造成作物受到為害的潛勢增加，一旦發生臭氧為害，容易導致跨區域性大面積作物受害(Benton et al., 2000)。統計結果顯示，臺灣地區無論是1997-2001年間或2007-2011年間春季(3至5月)及秋季(9至11月)AOT40為高峰期(圖3、圖4)，顯示此時期臭氧敏感作物受臭氧為害的機會較其它季節高。此外，相較於1997-2001年間，湖口、二林、崙背、台西等地區2007-2011年間春季之AOT40明顯較高(圖3)，2007-2011年間秋季時湖口、大里、二林、崙背、台西、新港等地區則有略微增加之情形(圖3)，顯示臭氧敏感作物受為害的可能性漸增，本所資料顯示2010年10月雲林縣元長鄉、褒忠鄉、北港鄉、麥寮鄉等鄉鎮種植之落花生葉片的異常徵狀係臭氧為害所導致；此外，彰化部分地區的秈稻葉片上出現紅褐色細斑的徵狀，與開頂式燻氣室中水稻的臭氧模擬燻氣試驗後所產生的徵狀類似(何笠維等人，2011)，推測彰化地區秈稻葉片的徵狀可能與臭氧有關。

Mills等人(2007)曾收集1976-2001年多篇有關臭氧造成多種作物減產的期刊論文資料，並透過AOT40劑量反應函數評估農作物產量之損失(表2)。由於每種作物對臭氧之敏感程度不同，因此作物減產5%之3-Month AOT40臨界值也有所差異，臭氧敏感作物，如：西瓜、大豆及萵苣，其臨界值分別為1.6、4.3及4.6 ppm.h，而對臭氧中度敏感的作物，如：馬鈴薯、水稻及玉米，其臨界值分別為8.9、12.8及13.9 ppm.h (表2)。臺灣地區近年來(2007-2011年間)大里、二林、崙背、台西、新港、善化、橋頭、林園、大寮及潮州等地區的3-Month AOT40呈現接近甚至超過水稻臨界值12.8 ppm h的情形，顯示大氣中的臭氧濃度已達可能為害農園作物的潛勢。

應用AOT40可評估空氣中之臭氧濃度變化對作物產量的影響，並可得知我國

不同農作區受臭氧為害的潛勢；此外，AOT40也可提供環保單位做為監控大氣臭氧濃度的參考，並制訂相關法令控制臭氧前驅物的生成，除可提升空氣品質外，也期望能降低農園作物受臭氧為害的情形發生。

表2. 國外研究農、園藝作物之AOT40產量反應方程式及作物減產5%之3-Month AOT40臨界值 (Mills et al., 2007)

Table 1
AOT40-based yield response functions and critical levels (AOT40 for 5% yield reduction, ppm h) for agricultural and horticultural crops

Crop	Yield based on weight of	Critical level (ppm h, 3 months)	No. of cultivars	No. of points	Function (y = relative yield, x = AOT40 in ppm h)	r ²	References used
<i>Sensitive to ozone</i>							
Watermelon	Fruit	1.6	1	4	$y = -0.0321x + 0.97$	0.94	Gimeno et al. (1999)
Pulses	Pods	3	10	43	$y = -0.0165x + 0.96$	0.30	Tonnejck and Van Dijk (1998), Sanders et al. (1992a, b), Adaros et al. (1990), Heck et al. (1988), Temple (1991)
Cotton	Cotton	3.1	5	17	$y = -0.016x + 1.07$	0.69	Heagle et al. (1986a), Temple (1990b)
Wheat	Grain	3.3	9	52	$y = -0.0161x + 0.99$	0.89	Fuhrer et al. (1997), Gelang et al. (2000)
Tumip	Root	3.5	2	14	$y = -0.0144x + 1.07$	0.70	Heagle et al. (1985), McCool et al. (1987)
Onion	Bulb	4.1	2+	9	$y = -0.0121x + 1.01$	0.60	McCool et al. (1987), Temple et al. (1990)
Soybean	Seed	4.3	7	50	$y = -0.0116x + 1.02$	0.61	Heagle et al. (1986b), Heggstad et al. (1985, 1988), Mulchi et al. (1995), Heggstad and Lesser (1990), Heagle et al. (1987a, 1998), Fiscus et al. (1997)
Lettuce	Foliage	4.6	5	18	$y = -0.0108x + 1.04$	0.33	McCool et al. (1987), Temple et al. (1990)
Tomato ^a	Fruit	6	14	44	$y = -0.0083x + 1$	0.48	Hassan et al. (1999), McLean and Schneider (1976), Reinert et al. (1997), Temple and Taylor (1985), Temple (1990a), Bermejo (2002), Calvo (2003)
<i>Moderately sensitive to ozone</i>							
Sugar-beet	Root	8.6	5	14	$y = 0.0058x + 1.0$	0.30	Bender et al. (1999), McCool et al. (1987)
Oilseed rape	Seed	8.9	2	23	$y = -0.0056x + 0.9$	0.17	Ollerenshaw et al. (1999), Adaros et al. (1991a)
Potato	Tubers	8.9	3	14	$y = -0.0057x + 0.99$	0.38	Skärby and Jönsson (1988), Köllner and Krause (2000), Donnelly et al. (2001), Lawson et al. (2001), Pleijel et al. (2002, 2004), Pell et al. (1988), Finnan et al. (2002)
Tobacco	Foliage	9.9	1	6	$y = -0.0055x + 1.04$	0.77	Heagle et al. (1987b)
Rice	Grain	12.8	6	32	$y = -0.0039x + 0.94$	0.20	Kobayashi et al. (1995), Maggs and Ashmore (1998), Kats et al. (1985)
Maize	Grain	13.9	1	19	$y = -0.0036x + 1.02$	0.35	Rudorff et al. (1996), Mulchi et al. (1995), Kress and Miller (1985)
Grape	Fruit	16.7	1	4	$y = -0.003x + 0.99$	0.73	Soja et al. (1997)
Broccoli	FLORETS and stems	20	4	12	$y = 0.0025x + 0.91$	0.01	Temple et al. (1990)
<i>Resistant to ozone</i>							
Fruit	Fruit (strawberry and plum)	62	2	12	$y = 0.0008x + 0.94$	0.01	Drogoudi and Ashmore (2000), Takemoto et al. (1988), Retzlaff et al. (1997)
Barley	Grain	83.3	6+	47	$y = 0.0006x + 0.96$	0.00	Skärby et al. (1992), Adaros et al. (1991b), Fumagalli et al. (1999), Temple et al. (1985)

^aTime period for calculation of AOT40 is 3.5 months.

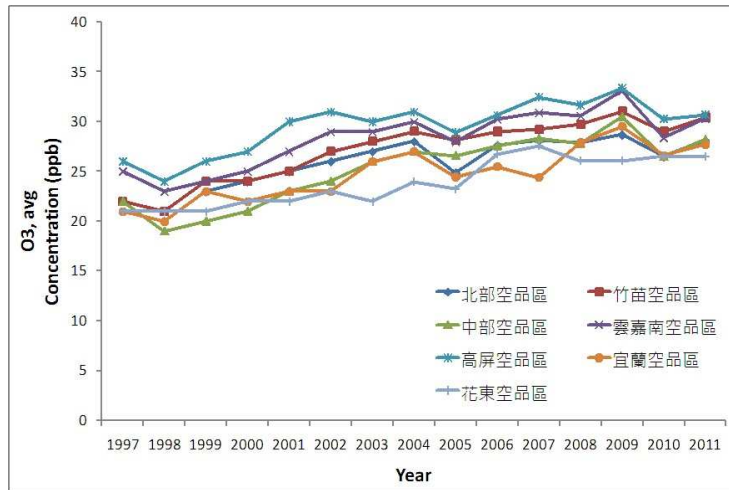


圖1. 1997-2011年間臺灣地區各空品區年平均臭氧濃度之變化。

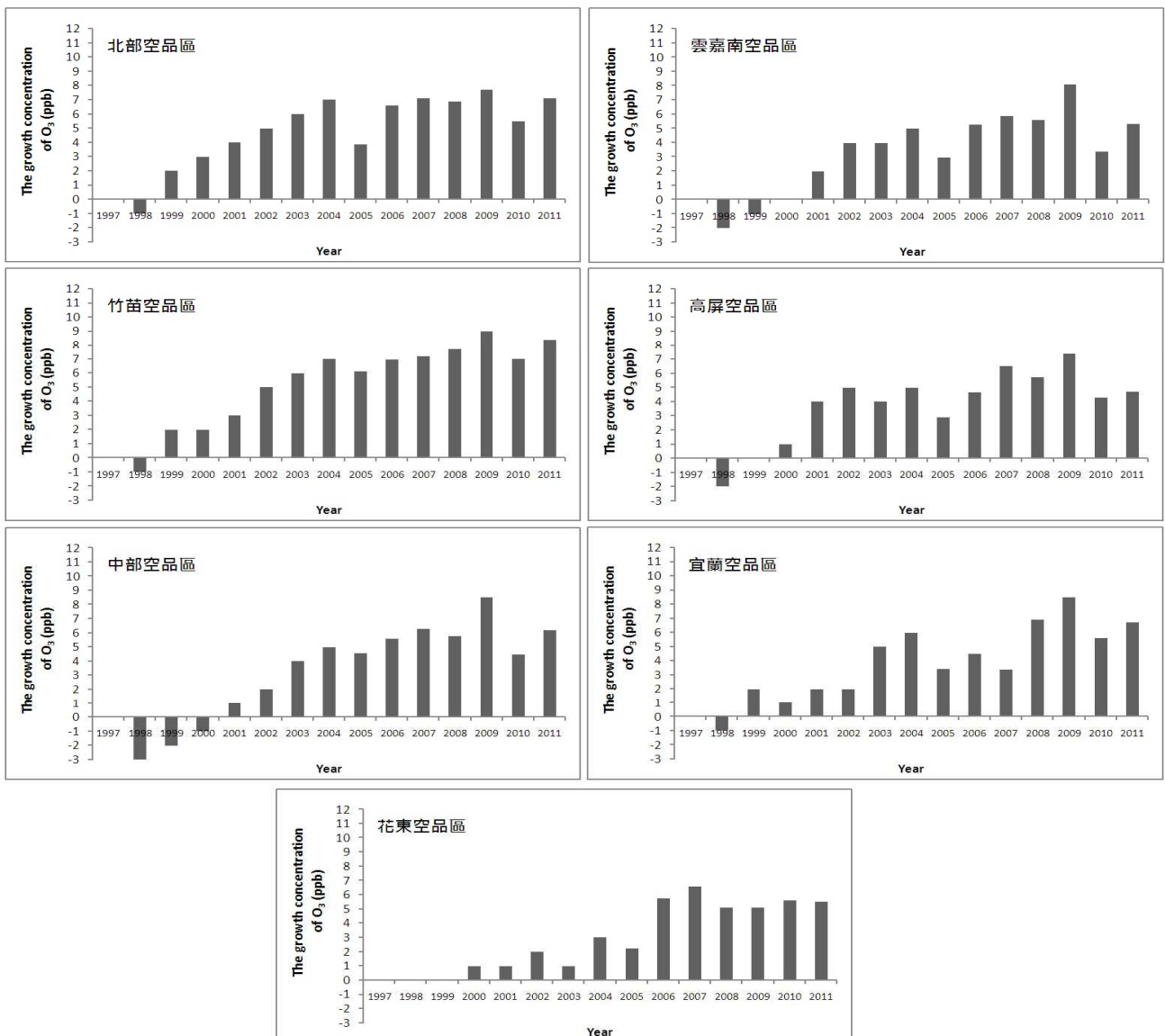


圖2. 與1997年相較，1997-2011年間臺灣地區各空品區年平均臭氧濃度成長之變化。北部空品區(台北市、基隆市、新北市、桃園縣)、竹苗空品區(新竹市、新竹縣、苗栗縣)、中部空品區(台中市、彰化縣、南投縣)、雲嘉南空品區(雲林縣、嘉義市、嘉義縣、台南市)、高屏空品區(高雄市、屏東縣)、宜蘭空品區(宜蘭縣)及花東空品區(花蓮縣、台東縣)。

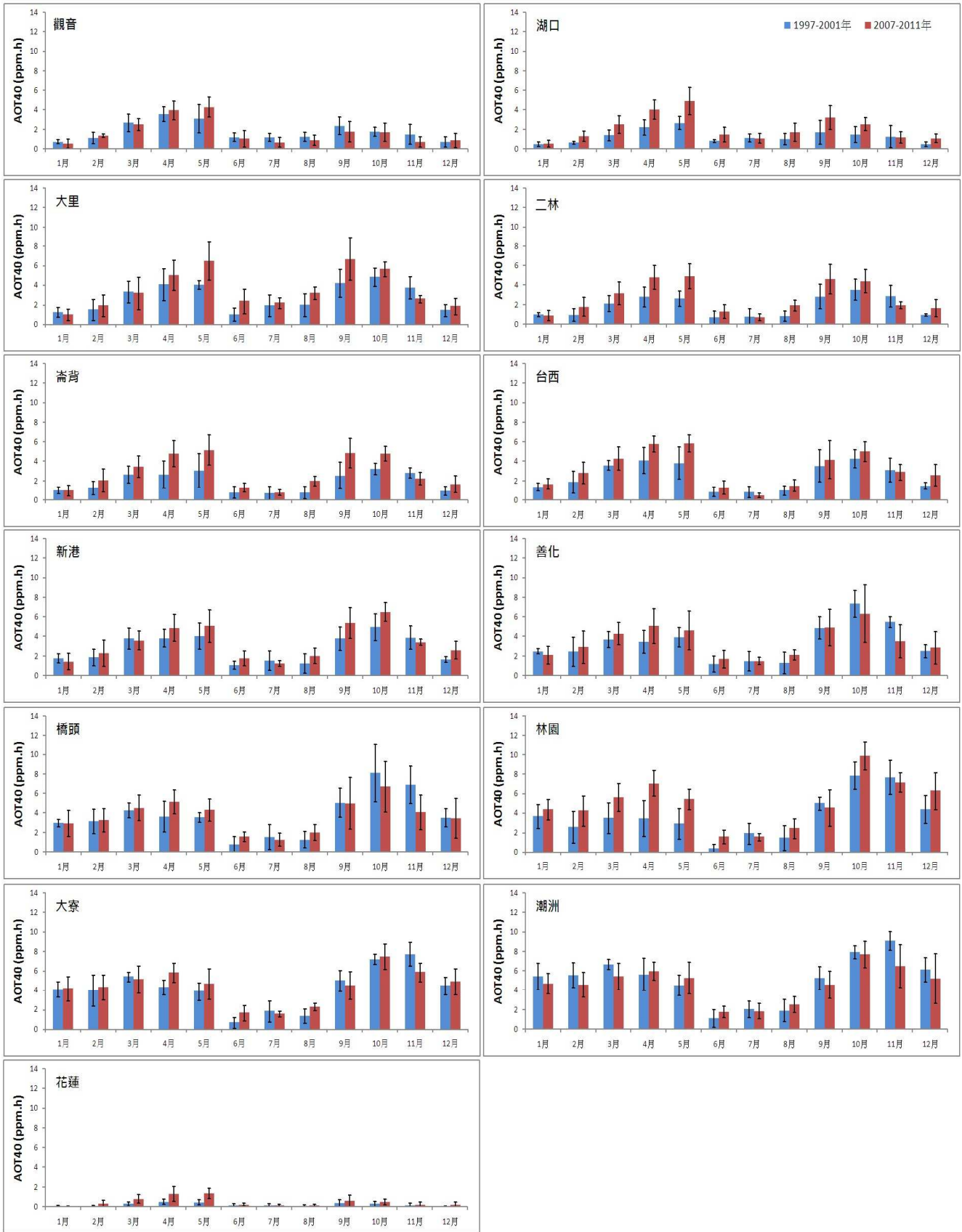


圖3. 臺灣地區 AOT40月變化。將挑選之測站1997-2001年間及2007-2011年間每日之8至17時所記錄之臭氧濃度以公式計算每月 AOT40，並比較1997-2001年間及2007-2011年間 AOT40之差異。(Mean±SD)

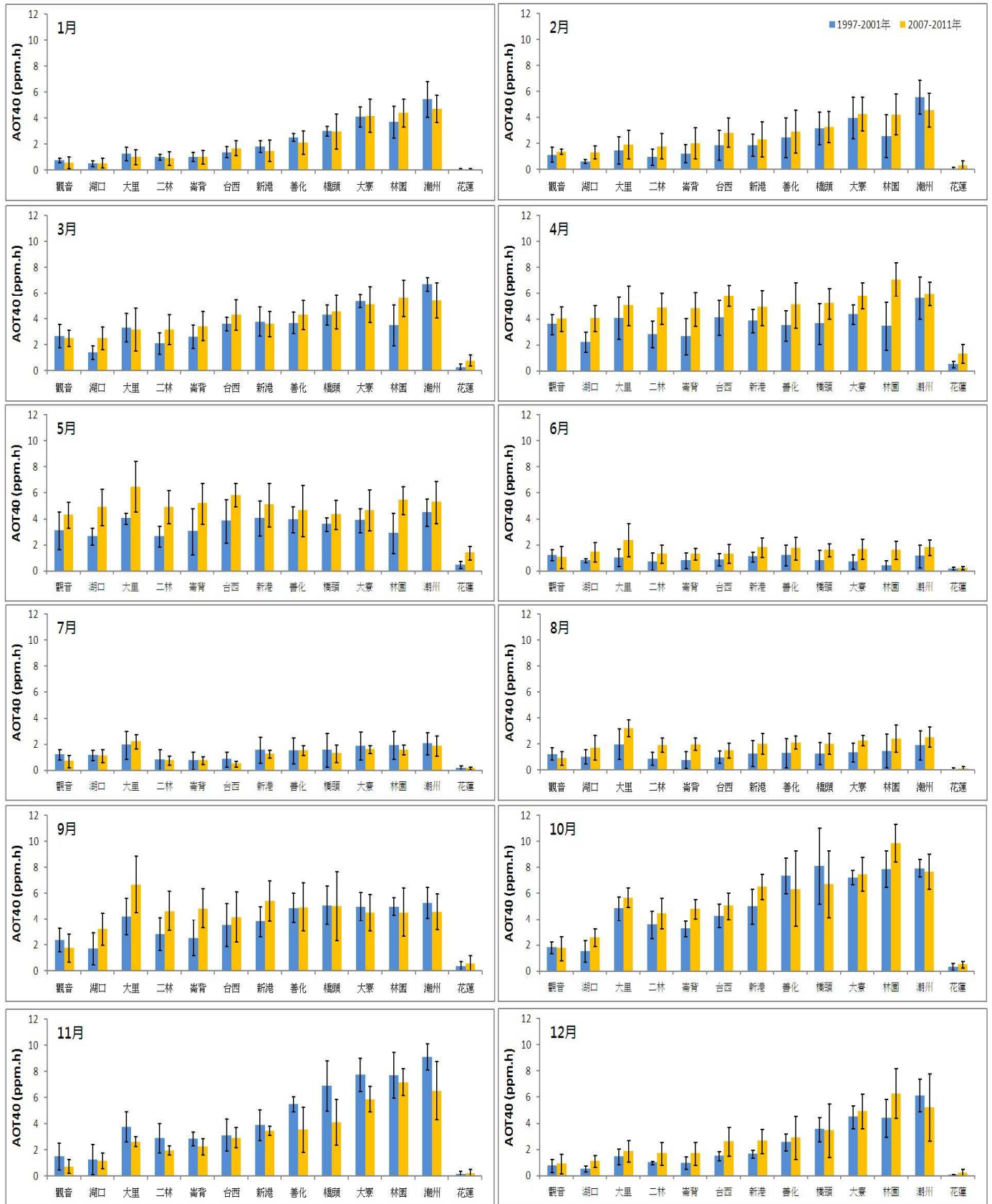


圖4. 臺灣地區每月份測站平均 AOT40之差異。將挑選之測站1997-2001年間及 2007-2011年間每日之8至17時所記錄之臭氧濃度以公式計算每月 AOT40，並比較1997-2001年間及2007-2011年間 AOT40之差異。(Mean±SD)

參考文獻

- 1.行政院環境保護署-空氣品質監測網。2012。 <http://taqm.epa.gov.tw/taqm/zh-tw/>
- 2.林文印。2007。台灣近年來臭氧污染趨勢及防治策略。環保資訊月刊網站。23 August 2012。 <http://www.fengtay.org.tw/periodical.asp?page=2007&num=88>
- 3.何笠維、張欽豪、徐慈鴻。2011。臭氧對水稻不同品種葉片為害之比較。植物保護學會會刊53：47-55。
- 4.柳中明、葉銘德、彭立新、吳俊傑、劉紹臣。2004。冬夏季長程傳送影響台灣海域背景臭氧之模擬探討。大氣科學32：1-21。
- 5.謝式垵鈺、蔡東纂、李國欽、王順成、蔡武雄、黃山內、黃益田、林慶喜、鄭榮賢、羅致遠、張益璋、游俊明、陳慶忠、蔣永正、林浩潭；黃瑞彰、劉達修編。2003。植物保護圖鑑系列-水稻保護。行政院農委會動植物防檢疫局。台北。418頁。
- 5.嚴有利。2010。六輕附近空氣品質變化分析。六輕計畫總體評鑑研討會議手冊資料。A。
- 6.Air quality in Europe — 2011 report. European Environment Agency. 17 September 2012. <http://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2011>
- 7.Beck, J.P., Krzyzanowski, M., Koffi, B. 1998. Tropospheric ozone in the European Union—the consolidated report, Topic report no. 8/1988. <http://reports.eea.eu.int/TOP08-98>
- 8.Benton, J., Fuhrer, J., Gimeno, B.S., Skärby, L., Palmer-Brown, D., Ball, G., Roadknight, C., Mills, G. 2000. An international cooperative programme indicates the widespread occurrence of ozone injury on crops. Agriculture, Ecosystems and Environment. 78 : 19-30.
- 9.Booker, Fi., R. Muntifering, M. McGrath, K. Burkey, D. Decoteau, E. Fiscus, W. Manning, S. Krupa, A. Chappelka and D. Grantz. 2009. Journal of Integrative Plant Biology. 51 : 337-351.
- 10.Emberson, L. 2007. Ground level ozone in the 21st century: Submission of evidence from the air pollution crop effect network(APCEN). International Society of Environmental Botanist 13(4). Stockholm Environment Institute, Univ. of York, UK.
- 11.European Environment Agency, 2011. 17 September 2012. <http://www.eea.europa.eu>
- 12.Felzer B, J. Reilly, J. Melillo, D. Kicklighter, M. Sarofim, C. Wang, R. Prinn and Q. Zhuang. 2005. Future effects of ozone on carbon sequestration and climate change policy using a global biogeochemical model. Climatic Change. 73 : 345–373.
- 13.Fiscus, E.L., F.L. Booker, and K.O. Burkey. 2005. Crop responses to ozone: uptake, modes of action, carbon assimilation and partitioning. Plant Cell Environ. 28 : 997-1011.
- 14.Fuhrer, J., Skärby, L., Ashmore, M.R. 1997. Critical levels for ozone effects on vegetation in Europe. Environmental Pollution. 97 : 91-106.
- 15.Heagle, A.S., M. B. Letchworth, C.A. Mitchell. 1983. Injury and yield Responses of Peanuts Chronic Doses of Ozone in Open-Top Field Chambers. Disease Detection and Crop Losses. 73 : 551-555.
- 16.Heagle, A.S. 1989. Ozone and crop yield. Annu. Rev. Phytopathol. 27 : 397-423.
- 17.Heck, W.W., W.W. Cure, J.O. Rawlings, L.J. Zaragoza, A.S. Heagle, H.E. Heggstad, Kohut, R.J., L.W. Kress, and P.J. Temple. 1989. Assessing impacts of ozone on agricultural crops: I. Overview. J. Air Pollut. Control Assoc. 34 : 729-735.

18. Karlsson, P.E., J. Uddling, S. Braun, M. Broadmeadow, S. Elvira, B.S. Gimeno, D. Le Thiec, E. Oksanen, K. Vandermeiren, M. Wilkinson, L. Emberson. 2004. New critical levels for ozone effects on young trees based on AOT40 and simulated cumulative leaf uptake of ozone. *Atmospheric Environment*. 38 : 2283-2294.
19. Liu., F. X. Wang, Y. Zhu. 2009. Assessing current and future ozone-induced yield reductions for rice and winter wheat in Chongqing and the Yangtze River Delta of China. *Environmental Pollution*. 157 : 707-709.
20. Matyssek, R., G. Wieser, A.J. Nunn, A.R. Kozovits, I.M. Reiter, C. Heerd, J.B. Winkler, M. Baumgarten, K.-H. Haberle, T.E.E. Grams, H. Werner, P. Fabian, W.M. Havranek. 2004. Comparison between AOT40 and ozone uptake in forest trees of different species, age and site conditions. *Atmospheric Environment* 38 : 2271-2281.
21. Mills, G., A. Buse, B. Gimeno, V. Bermejo, M. Holland, L. Emberson, H. Pleijel. 2007. A synthesis of AOT40-based response functions and critical levels of ozone for agricultural and horticultural crops. *Atmospheric Environment*. 41 : 2630-2643.
22. Mills, G., F. Hayes, D. Simpson. L. Emberson, D. Norris, H. Harmens, P. Bükers. 2011. Evidence of widespread effects of ozone on crops and (semi-)natural vegetation in Europe (1990-2006) in relation to AOT40- and flux-based risk maps . *Global Change Biology* 17 : 592-613
23. Mudd, J.B. 1997. Biochemical basis for the toxicity of ozone p. 267-284. In: M. Yunus and M. Iqba (eds.). *Plant response to air pollution*. Wiley and Son, New York.
- Sitch, S., P.M. Cox, W.J. Collins, and C. Huntingford. 2007. Indirect radiative forcing of climate change through ozone effects on the land-carbon sink. *Nature*. 448 : 1-6.
24. Vandermeiren, K. 2005. Impact of rising tropospheric ozone on potato: effects on photosynthesis, growth, productivity and yield quality. *Plant Cell Environ*. 28 : 982-996.
25. Van Dingenen, R., Dentener, F. J., Raes, F., Krol, M. C., Emberson, L., and Cofala, J. 2009. The global impact of ozone on agricultural crop yields under current and future air quality legislation. *Atmospheric Environment*. 43 : 604-618.
26. WHO, 1996. Update and revision of the WHO air quality guidelines for Europe. Ecotoxic effects, ozone effects on vegetation. European centre for environment and health, Bilthoven, the Netherlands.

藥毒所專題報導

發行人：費雯綺
發行所：行政院農業委員會農業藥物毒物試驗所
地址：臺中市霧峰區舊正里光明路 11 號
網址：<http://www.tactri.gov.tw>
電話：(04)23302101
總編輯：蔡勇勝
編輯委員：李宏萍 蔣永正 何明勳 徐茲鴻
 曾經洲 蔡韙任 蘇文瀛

展售書局：

- 1.國家書店松江門市/臺北市松江路 209 號 1 樓 (02)25180207
網路書店/<http://www.govbooks.com.tw>
- 2.五南文化廣場/臺中市中山路 6 號 (04)22260330
網路書店/<http://www.wuanbooks.com.tw>

印刷：財政部印刷廠
地址：臺中市大里區中興路一段 288 號
電話：04-24953126

中華民國 101 年 10 月出版

定價：新台幣 30 元

GPN：2007600007

ISSN：1017-9569(平裝)

著作財產權人 行政院農業委員會農業藥物毒物試驗所
欲利用本書全部或部份內容者，須徵求著作財產權人同意。