

空氣污染與植物監測

徐慈鴻 李貽華

前 言

隨著工業科技的發達，伴隨而來之環境污染問題也日益嚴重，許多國家，由於農業區與其他用地劃分清楚，較少有地區性公害糾紛爭執，在鑑定上較為簡單，空氣污染為害農林作物只是單純的植物保護的一部份。空氣污染對農業環境及作物之影響研究，在歐美國家則多偏重於長期性之影響，如對森林族群或生態系各成員之影響等。台灣地區由於過去長期在追求經濟發展的目標下，忽略了環保之重要性，再加上台灣地區地窄人稠，農工漁牧業雜處，農田與工廠常毗鄰而立，污染危害農作物之糾紛發生頻繁。

利用儀器監測環境品質雖可定性及定量，但儀器監測在經費上所費不貲，維護及管理上所須之技術及人力不易普及，因而使空氣品質監測較不能普遍化，以空氣品質監測為例，至 2005 年 12 月，環保署在台灣地區共設置 58 個一般空氣品質監測站，4 個工業空氣品質監測站(頭份、線西、台西、前鎮)，5 個交通空氣品質監測站(鳳山、三重、中壢、永和及復興)，2 個國家公園空氣品質監測站(恆春及陽明)，4 個背景空氣品質監測站(萬里、觀音、三義、橋頭)，8 個光化學測站(萬華、土城、崇倫、竹山、草屯、潮州、橋頭、鳳山)(環保署，2006)。農業區並未設空氣品質監測站，因此農業區之空氣品質資料並不易取得，在污染危害發生後常很難取得當時的環境品質資料。

環境因子可控制生物之出現或成活，故某一生物存在時對物理環境即具有指示作用，因此利用生物個體、族群或群落對環境所產生的反應可闡釋環境之狀況。影響生物存活之環境因子包括有溫度、溼度、雨量、光照及污染物等。例如五節芒、大黍、蒲公英、瓊麻、落地生根、仙人掌等耐旱植物佔優勢，即可知本區域屬乾旱地區；發現濱刀豆、馬鞍藤、濱刺麥、海埔姜、蟻其菊等耐鹽植物普遍出現時則表示已近海邊。污染環境下亦會產生具代表性之指標植物，一般而言，空氣污染環境下，植物會因吸收污染物而產生不同之反應，由植物之受害情形可推知空氣污染種類。在污染物的長期作用下，植物群落的組成亦可能發生變化，一些敏感性較高之植物種類會減少或消失，而抗性強的植物種類

會保存下來，甚至得到一定程度的發展而成為優勢種，由植物群落變化之情形亦可反應環境污染程度。植物在地球上分佈普遍，其不移動的特性可運用於闡釋環境狀況，因此利用植物對空氣污染物的反應(受害徵狀或生理反應)，可監測空氣中污染物的成分和含量以了解空氣品質狀況，即所謂空氣污染之指標植物。

空氣污染物之種類

依據空氣污染防治法及相關規定所定義，空氣污染物可分為四大項目，分別為氣狀污染物(包括硫氧化物、一氧化碳、氮氧化物、碳氫化合物、氯氣、氯化氫、氟化物、氯化烴、有機污染物等)、粒狀污染物(包括懸浮微粒、金屬煙塵、黑煙、酸霧、落塵等)、二次污染物(secondary pollutants，指污染物在空氣中再經光化學反應產生之污染，包括光化學霧、光化學性高氧化物，如：臭氧及過氧乙醯硝酸酯等)及惡臭物質(包括氯氣、硫化氫、硫化甲基、硫醇類、甲基胺類)等。

台灣地區曾發生對農作物造成影響的空氣污染物主要有：(硫氧化物、氮氧化物、氯氣、氯化氫、氟化物、氯化烴等)、粒狀污染物(水泥塵、黑煙及鹽沫)及二次污染物(飄散過程中因化學變化轉變成其他化合物，謂之二次污染物，如：臭氧、過氧乙醯硝酸酯等)，其主要污染來源可歸納見表 1。

空氣污染物因其處理及釋放方式的差異其擴散影響範圍不同(Krupa, 1997)，依影響範圍之大小可分為：1.小區域性，多屬操作意外發生之外洩，僅發生在工廠周邊一定範圍內，如氨氣、氯氣、氯化氫、乙烯、二氧化氮等；2.區域性，因廢氣處理作業不完善所造成之污染，多發生於工廠周邊，視工廠煙囪高度、風向及風速而決定影響區域範圍，如粗氣體微粒、氯化氫、二氧化硫、有機污染物(多氯聯苯類、多環芳香族碳氫化合物、戴奧辛類)等；3.地區性 - 大陸性，污染物在飄散過程中可能因化學變化轉變成其他化合物，如酸雨、臭氧、過氧乙醯硝酸酯等；4.全球性，如二氧化碳、細氣體微粒、臭氧等。

表1. 台灣地區常見空氣污染物之主要污染來源

空氣污染物種類	主要污染來源
二氧化硫(SO ₂)	含硫的煤炭及石化燃料之燃燒、石油瀝青及天然氣工廠、金屬煉製或煉青煉廠、硫磺與硫酸之製造等
氟化氫(HF)	煉鋁廠、鋼鐵廠、磷酸工廠、磚窯廠、陶瓷廠、玻璃纖維工廠等
氯氣(Cl ₂)及氯化氫(HCl)	石油瀝青煉廠、玻璃廠、塑膠焚燒、廢料燃燒、廢水處理場、氯氣貯槽意外外洩
氨(NH ₃)	肥料工廠、石化工業區、硝酸工廠及冷凍工廠，牲畜飼養場等(此類污染多為工廠操作不當時外漏)
乙烯(C ₂ H ₄)及碳氫化合物	交通工具、垃圾燃燒、煤炭及石油之燃燒、天然氣加熱外漏
粒狀物(PM)	煤炭或石化燃料之燃燒、工廠廢棄物之燃燒、木材燃燒、水泥工廠之水泥灰、金屬之熔煉溶解或煉製等
有機化合物(OCs, 包括戴奧辛類、多氯聯苯類及多環芳香族碳氫化合物等)	廢棄物燃燒、石化工業石油的熱裂解、溶劑、變壓器絕緣體、防火劑、冷煤、去污劑、汽車廢氣等
氮氧化物(含NO ₂ 及NO)	交通工具、天然氣或煤炭或石油燃燒、石油瀝青煉、天然氣壓縮、有機廢棄物之焚燒
臭氧(O ₃)	大氣中之光化產物，主要前驅物為氮氧化物及碳氫化合物
過氧乙酰硝酸酯(PAN)	大氣中之光化產物，主要為烯類及醛類碳氫化合物經光化反應並與NO ₂ 反應而生成。

空氣污染之植物監測

利用植物監測(plant biomonitoring)空氣污染物，直接由植物之反應來扮演空氣污染的「見證者」，根據植物對污染物的反應可進一步區分為「預警植物」及「監測植物」二類。對污染物很快地顯現出受害徵候之敏感植物可作為「預警」之用(李國欽、李貽華，1984)。利用對空氣污染物極敏感且可產生非常明顯病徵之植物作為生物指標(bioindicators)，預先警告此區域之空氣品質將達到危害植物之程度，進一步做防患處理以減少空氣污染對農作物之危害。根據文獻資料，包括二氧化硫、氯氣、氟化物、臭氧及 PAN 等空氣污染物已開發有不同的預警植物。二氧化硫危害植物一般常見的病徵是於葉緣及葉脈間變白，漂白部分隨接觸時間而逐漸擴展至葉脈，葉脈則仍呈綠色，漂白部分會逐漸枯乾；可作為二氧化硫污染之指標植物有紫花苜蓿、大波斯菊、矮牽牛等。氟化

物污染的徵狀是在葉尖及葉緣處出現枯乾，通常在健康及死亡的組織間會有一條明顯之分界線；可作為氟化物污染之指標植物包括唐菖蒲、落花生、牽牛花等(Gao *et al.*, 1992；謝慶芳, 1989)。氯氣具強氧化作用，接觸植物後葉面會產生不同顏色之斑點，斑點之顏色有棕色、銹色或白色，視植物種類而異；可作為氯氣污染之指標植物有白菜、菠菜、番茄等。植物受臭氧為害之病徵最先出現在成熟新葉尖端，首先呈浸水狀，繼而逐漸變乾而呈小斑點之徵狀，隨葉子之成長而逐漸擴散至整個葉面，同一植株上老葉對臭氧之容忍受性較大，成熟新葉較敏感；可作為臭氧污染之指標植物有菸草、菠菜等(Heggestad, 1991)。PAN 對植物所造成之徵狀多出現於葉片之下表面，葉下表面出現亮銅斑；可作為 PAN 之指標植物有龍葵及劍葉萵苣(孫岩章, 1996)。大氣中若含過量之乙烯會造成葉片黃化或落葉、花芽脫落或花型變小、果實早熟或落果；對乙烯敏感之植物有金魚草、番茄及豌豆等(Krupa, 1997)。

與預警植物不同，監測植物對污染物通常具有相當忍受性或累積性，監測植物可存活於污染的環境下並具累積污染物的能力，由其受害徵狀的比例及累積的污染物量可推測污染物存在環境中的時間及污染物擴散的範圍，並可由植體中污染物之含量推測環境品質的變化情形。根據文獻資料，包括氟化物、氯化物、重金屬、及有機化合物(如：戴奧辛、多環芳香族碳氫化合物及多氯聯苯)等污染物已利用不同的監測植物探討其在植體中之累積的情形。歐洲許多國家是利用多花黑麥草(*Lolium multiflorum*)植體中的氟含量來推估空氣中氟化物的含量以監測空氣品質；Haidouti(1993)依據煉鋁廠周圍野生植物受害徵狀的嚴重程度(壞疽、黃化及無徵狀)及氟化物在葉片的累積量來區分，受害嚴重(壞疽)植物之分佈範圍在工廠周邊約 2.5 公里內，植物葉片之氟含量在 200~400ppm，受害中等(黃化)植物的分佈範圍在工廠周圍 2.5~7.5 公里內，葉片氟含量在 100~200ppm，至距工廠 15 公里處植物葉片無受害徵狀，葉片中之含氟量為 50ppm。Wegener(1992)即利用泥炭蘚監測煉鋁工廠周界空氣品質，探討重金屬及 PAHs 之擴散污染範圍，結果顯示，泥炭蘚中之 PAHs 及重金屬含量隨著與工廠距離增加而減低。Lodovici 等(1994)在義大利佛羅倫斯之調查顯示，空氣中 PAHs 含量與月桂樹葉片 PAHs 含量呈正相關，所以利用當地植物葉片之 PAHs 含量可反映空氣品質，此方法適用於大面積之 PAHs 污染調查，包括城市、郊區及鄉村等，以建立人類生活區域大氣中 PAHs 之背景資料。Nakajuma 等(1995)之調查顯示，東京二個不同交通狀況地區之空氣及杜鵑葉片中 PAHs 濃度，交通頻繁地區之杜鵑葉片中 PAHs 濃度較高，空氣中 PAHs 含量與杜鵑葉片 PAHs 含量呈正相關。根據藥毒所之調查報告顯示，磚窯廠或

磁磚廠周邊植物受大氣中氟污染之影響，不論是農作物或野生植物其植體中皆有氟累積及氟為害徵狀(圖 1.)，累積量隨著與污染源距離增加而減少。1996 年起農林廳(現農糧署)利用唐菖蒲、番石榴及落花生等為監測植物(圖 2.)，建立農業地區之空氣污染監測體系，分設於 11 縣市共 24 站，利用植物的徵狀反應、植體中氟及硫含量來監測空氣品質。

另有利用植物群落的種類、數量及結構變化亦可推估環境污染程度，即環境污染之「生態指標」；耐污染植物對污染物具忍受性而成優勢種，則可作為環境污染之生態指標。歐美地區利用苔蘚及地衣出現之種類、種類數及出現率可初步了解該區之環境品質，一般而言，愈近污染源地區因受污染物之影響，多數地衣不易存活，僅具耐性之地衣方可存活下來，因此愈近污染源存活之地衣種類數愈少，量(覆蓋度)亦普遍較其他地區為少。英國利用地衣種類劃分空氣污染帶，如SO₂濃度在高於35μg/m³以上時松蘿屬地衣(usura)則不易存活；SO₂濃度高於60μg/m³以上時，生長於樹上之灌木狀地衣(fruticose)不易存活；SO₂濃度高於70μg/m³以上時，生長於樹上之葉狀地衣(foliose)不易存活，隨著濃度增高，可存活之地衣種類愈來愈少，因此由存活之地衣種類可推估SO₂濃度。然而台灣地區地小人稠，影響植物生態之因素頗多，工廠附近之植物除受污染物影響外還有耕作因素(施藥、施肥、整地等)的影響，因此不易尋得適當的環境污染生態指標應用於監測空氣污染物。



相思樹葉尖枯乾，枯乾部位不規則剝落，葉片之氟含量為 708 μg/g d.w.。



月桃葉尖、葉緣枯乾，枯乾部位易剝落，葉片之氟含量為 414 μg/g d.w.。

圖 1. 磚窯廠周邊野生植物受氟污染危害之徵狀。



圖 2. 利用唐菖蒲、番石榴及落花生等為監測植物監測農業地區之空氣污染。

植物監測空氣污染物之應用

利用植物監測田間空氣污染物可分為被動監測(passive biomonitoring)及主動監測(active biomonitoring)二種方式。

一、被動監測

被動監測是利用生長於監測區域現場之自生植物(native species)，分析現地野生植物植體組織累積的污染物成分以提供適切的訊息。被動監測的優點是自生植物對當地環境已產生極佳之適應性，可現場就地取材，是方便且直接之監測方法，目前多被應用於持久性之微量污染物長期累積情形之研究。其缺點是這些自生植物可能會因為人為因素(如除草劑噴施、機械剷除)或其他因素(如野火、天災)的影響消失，或者找不到適當的監測植物種類。

Yang等(1991)利用公路旁之草類為被動監測植物，自植體中檢出phenanthrene、anthrene、fluoranthrene及pyrene等4種PAHs，發現交通廢氣是PAHs污染之主要來源，空氣及植體中之PAHs濃度隨與公路距離增加而減少。Slaski等(2000)以兩種在加拿大Alberta分佈極普遍之自生植物 - 柱松(lodgepole pine)及油菜(canola)為被動監測指標植物探討PAHs之累積，並以*Sphagnum fusca* 做成之蘚袋(moss bags)為監測植物進行主動監測，分別利用被動監測及主動監測探討該區域受PAHs之影響情形，由植體中測得之PAHs為phenanthrene, pyrene及fluroanthene等3種，未發現具致癌性之benzo(a)pyrene，兩種類型監測植物合併利用可提供更充分之訊息。徐等(1999)利用磚窯廠周邊自生草本植物為被動監測植物，探討磚窯廠之氟污染情形之影響，由植體中氟累積量了解磚窯廠氟污染影響範圍。李等(2003)利用陶瓷廠周邊野生草類為被動監測植物探討陶瓷廠

氟污染情形範圍；結果發現周邊野生植物：昭和草、大花咸豐草、藿香薊及野塘蒿等具有耐氟及累積高量氟化物之特性，這些植物僅野塘蒿葉緣有輕微受害現象(圖3.)，其餘未出現受害徵狀，上述植物適合作為氟污染之本土性監測植物。其中之大花咸豐草對氟化物具高累積性，因其分佈普遍，在氟污染源周邊易取得，而可作為氟污染之被動監測植物(圖4.)。



圖 3. 陶瓷廠周邊自生植物 - 野塘蒿出現輕微受害徵狀。野塘蒿對氟污染具耐受性且可累積高量氟(5526 $\mu\text{g/g}$ d.w)，是被動監測植物很好的選擇。



圖 4. 大花咸豐草分佈普遍，對氟化物具高累積性，可選擇為氟污染之被動監測植物。

二、主動監測

主動監測是利用實驗室栽培或收集自非污染區之植物移植或置放於擬探討之地點，依植物之反應或植體中污染物含量分析而達空氣品質監測之目的，其優點是暴露時間、監測地點可視實驗或監測需要予以控制，但缺點是植物之管理不易，因此在植物之選擇上需慎加考量。

Wegener(1992)利用泥炭蘚為主動監測植物，將泥炭蘚以蘚袋栽培，然後依需要置於監測煉鋁工廠周界，探討多環芳香族碳氫化合物及重金屬之污染範圍。Klumpp等(1996)利用黑麥草(*Lolium multiflorum*)以盆栽栽培方式進行主動監測，由植體之氟累積量來探討肥料工廠之氟污染影響範圍。本所曾於磚窯廠周邊利用台灣地區常見雜草 - 大花咸豐草、野塘蒿及牛筋草以盆栽方式作為主動監測植物(圖5.)，探討農業地區是否受氟污染，結果發現，監測植物之葉片氟累積量隨著置放時間的增長而增加，葉片之氟累積以大花咸豐草 > 牛筋草 > 野塘蒿。大花咸豐草栽培管理容易，可栽培於盆鉢中於污染源周邊普遍設置，利用污染物在植體中之累積情形探討污染之影響範圍，視實驗需要決定放置地點及暴露時間進行主動監測(圖6.)。



圖 5. 磚窯廠周邊利用台灣地區常見雜草 - 大花咸豐草、野塘蒿及牛筋草為主動監測植物來探討農業地區是否受氟污染。



圖 6. 大花咸豐草栽培管理容易，可栽培於盆鉢中於污染源周邊普遍設置，亦是很好的主動監測植物。

空氣污染監測植物之特性

挑選預警植物或監測植物有不同的條件考量，作為「監測用」植物需具有：1.分佈普遍的，種子發芽須可達一致性且可快速長成健壯之幼苗。2.植株須有相當快之生長速率以提供適當之反應。3.植株對環境因子須具忍受性，在移植後之存活率很高等特性，而植物對污染物的反應程度與空氣中污染物的量有相關性，例如由植體中累積的污染物含量，可推估環境中該污染物的變化狀況。作為「預警用」植物，須具有：1.對污染物具敏感性。2.對污染物反應具一致性。3.反應十分清晰且徵狀具相當的專一性等特性。

指標植物不論是作為預警或監測用，其先決條件是須栽培管理容易，如此方能普及化。自生植物對當地環境已產生極佳之適應性，就地取材利用自生植物作為監測材料則不失為有利且直接之方法。尋找本土性之自生植物作為環境污染監測指標，在栽培管理上應更簡便可行，對環境品質監測當更有利。

結 語

相較於儀器監測的高成本及操作繁複，利用植物監測空氣污染物，除具有操作簡單、成本低之特性外，更可以由植物的外觀徵狀及植體累積的污染物分析結果直接反應出空氣污染物對植物所造成的影響。植物監測空氣污染物是近年來普遍被各國採用的方法之一，由於植物監測可以將植物大量佈設於田間、都會區或工業區附近，以直接長期監測污染物對作物或植物的影響。利用植物監測空氣污染物，除了需要尋找適當的預警或監測植物之外，植物受害徵狀觀察的判定技術及植體中污染物成分分析的技術也需要同步建立發展，以期更能兼具定性及定量的特色。

參考文獻

1. 李國欽、李貽華。1984。空氣污染為害植物之診斷。臺灣植物保護中心印，台中。
2. 李貽華、徐慈鴻、蔣慕琰。2003。磁磚廠周邊茶樹及雜草受氟害之徵候及氟累積量之研究。臺灣農業化學與食品科學期刊 41: 87~94。
3. 李貽華、徐慈鴻、蔣慕琰。2004。公害污染對植物之影響與鑑定案例介紹。145 頁。農業藥物毒物試驗所印行，台中。
4. 李貽華、徐慈鴻。2006。植物監測空氣污染之發展。農政與農情 163: 71-74。
5. 孫岩章、詹婷婷。1996。台灣地區光化學煙霧污染及其影響。農業氣象空氣污染與酸雨對農業生產影響及因應措施研討會論文專輯。p.34~40。臺灣省農業試驗所。
6. 徐慈鴻、李貽華、蔣慕琰。1999。磚窯廠周邊香蕉及檳榔氟化物累積及葉部傷害。中國農業化學會誌 37: 489-497。
7. 葉若鵬。2005。松針在空氣污染監測上的利用。台灣林業 31: 35-38。
8. 環保署。2006。空氣品質監測 <http://epa.gov.tw>。
9. 謝慶芳。1989。利用指標植物監測空氣污染。pp.7。台中區農業改良場特第 11 號。
10. Anderson, T. A., A. M. Hoylman, N. Edwards, and B. T. Walton. 1997. Uptake of polycyclic aromatic hydrocarbons by vegetation: a review of experimental methods. pp.451~480. *In* Plants for Environmental Studies. Wang, W., J. W. Gorsuch and J. S. Hughes, Eds. CRC Press.
11. Gao, X. P., H. B. Xu, S. Y. Chen, S. X. Zhao, M. Y. Xie and P. Wang. 1992. Screening monitoring plants for fluoride and a study of monitoring indices. *J. Plant Resources and Environ.* 1(3):28~34
12. Gombert, S. J. Asta and M. R. D. Seaward. 2006. Lichens and tobacco plants as complementary biomonitors of air pollution in Grenoble area. *Ecol. Indic.* 6:429-443.
13. Haidouti, C., A. Chronopoulou and J. Chronopoulou. 1993. Effects of fluoride emissions from industry on the fluoride emissions from industry on the fluoride concentration of soils and vegetation. *Biochem. System. Ecol.* 21:195-208.
14. Holoubek, I., P. Korínek, Z. Šeda., E. Schneiderová, I. Holoubková, A. Pacl, J. Tríska, P. Cudlín and J. Cáslavský. 2000. The use of mosses and pine needles to detect persistent organic pollutants at local and regional scales. *Environ. Pollut.* 109:283~292.
15. Klumpp, A., M. Domingos and G. Klumpp. 1996. Assessment of the vegetation risk by fluoride emissions from fertilizer industries at Cubatão, Brazil. *Sci. Total Environ.* 192: 219-228.
16. Krupa, S. V. 1997. Air quality and crops. *In: Air Pollution, People, and Plants. (An Introduction)*. pp. 95-116. APS (The American Phytopathological Society) Press, Minnesota, USA.
17. Lodovici, M, P. Dolara, S. Taiti, P.D. Carmine, L. Bernardi, L. Agati and S. Ciappeoano. 1994. Polynuclear aromatic hydrocarbons in the leaves of the evergreen tree *Laurus nobilis*. *Sci. Total Environ.* 153: 61-68.

18. Nakajuma, D., Y. Yoshida, J. Suzuki and S. Suzuki. 1995. Seasonal changes in the concentration of polycyclic aromatic hydrocarbons in azalea leaves and relationship of atmospheric concentration. *Chemosphere* 30(3):409-418.
19. Pandey, G. P. 1985. Effects of gaseous hydrogen fluoride on leaves of *Terminalia tomentosa* and *Buchanania lanzan* trees. *Environ. Pollut. (Ser. A)* 37:323~334.
20. Powell, R. L. 1997. The use of vascular plants as field biomonitors. pp.335~365. *In* Plants for Environmental Studies. Wang, W., J. W. Gorsuch and J. S. Hughes. Eds., CRC Press.
21. Slaski, J. J., D. J. Archambault and X. Li. 2000. Evaluation of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) accumulation in plants. The potential use of PAH accumulation as a marker of exposure to air emissions from oil and gas flares. ISBN 0-7785-1228-2. Report prepared for the Air Research Users Group, Alberta Environment, Edmonton, Alberta.
22. Wegener, J. W. M., M. J. M. van Schaik and J. Aiking. 1992. Active biomonitoring of polycyclic aromatic hydrocarbons by means of mosses. *Environ. Pollut.* 76:15-18.
23. Wenzel, K., L. Weibflog, E. Paladini, M. Gantuz, P. Guerreiro, C. Puliafito and G. Schuurmann. 1997. Emission pattern of airborne pollutants in Argentina and Germany. II. Biomonitoring of organochlorine compounds and polycyclic aromatics. *Chemosphere* 34(12):2505-2518.
24. Yang, S.Y. N., D. W. Connell, D. W. Hawker and S. I. Kayal. 1991. Polycyclic aromatic hydrocarbons in air, soil and vegetation in the vicinity of an urban roadway. *Sci. Total Environ.* 102: 229-240.