



松針在空氣污染監測上的利用

文 ■ 葉若馨 ■ 林業試驗所木材纖維組助理研究員

一、前言

環境污染物的檢測分析以及環境品質的監測是環保工作的重要基礎。傳統上，對於環境污染物之檢測分析，係利用化學儀器來進行組成分析，然而環境污染物種類繁多，取樣的基質差異也很大，是化學分析上必須克服的難題，在長期監測上則是以間隔一段時間加以採樣，以多次的採樣點表示長時間的狀態。反之，將生物技術應用於環境污染物的檢測，係利用生物自環境中承受的污染物質，具有在生物體內累積的效應或造成生物生理反應，更能反應實際長期監測的結果，同時可表現污染物對生物之毒性，以及對人體健康與生態環境之影響。因此如何利用生物指標（Bioindicator）與生物標記（Biomarker）來反應對生物之毒性，達到生物監測（Biomonitoring）的目的顯得格外重要。

早在70年代德國科學家就提出以地衣作為生物指標監測空氣品質，地衣愈茂盛，就代表該地區的空氣品質愈佳，而利用喬木做為生物指標則利用其生長期長、對污染物的

抵抗力較高等特性，以做為污染物長期監測的素材，而針葉樹的常綠少落葉的特性則可觀測污染物累積的情形。

本篇文獻回顧主要是針對以松針做為作為空氣污染監測的試驗材料，偵測其在污染環境下，松針的型態或解剖構造的顯現的差異，或者萃取分析松針成分，包括累積污染物或生理代謝物，以明瞭污染物對松樹的效應。

二、試驗材料—松針

松科植物是裸子植物中種類最多的一科，同時是林產利用上最有用之一科，如木材、木材纖維、紙漿、松香、松節油及精油等皆為此科的林產物。所謂的Pinus係指松屬植物，多分佈於北半球寒帶、溫帶及熱帶高山，葉為針狀，二針、三針或五針成簇，故葉子特稱為松針。由於松樹的分佈廣泛，可適用於不同區域環境監測的比較，又因其為同時具備都市綠化及林木生產功能的樹種，故在都市及山林中皆有栽植，可做為比對污染地區與非污染地區的差異。

來自不同國家的研究者會選擇該地區常見的松樹，常被選用的試驗材料如阿拉伯松（*Pinus halepensis* Mill.），此為地中海區域廣泛栽植的樹種，而蘇格蘭松（*Pinus sylvestris* L.）則是北歐國家的優勢樹種之一。

由於植物的生長會受到季節、樹齡、生長部位、立地環境等因子所影響，嚴謹的學者在松針的採集上，必針對試驗的需求有一定的規範。如每年固定的月份採集，採集樹體一年生的枝樞等。

三、空氣污染物

在以松針作為空氣污染監測的研究中，根據對植物體的作用不同可大致分為兩大類，其一是對松樹生長及生理作用產生明顯影響的污染物，如一氧化氮（NO）、二氧化氮（NO₂）、氮氧化物（NO_x）、二氧化硫（SO₂）及臭氧（O₃），此類污染物即一般大氣污染物中的有害氣體，主要來源為燃料的燃燒和工業生產製程的副產物，主要的為害對人體表現在呼吸道疾病，對植物可使其生理機制受抑制，生長不良，並對氣候產生影響，造成酸雨；另一類則是利用污染物在植物體的累積作用，探討在環境中不易分解的污染物質，如多氯聯苯（PCBs）、多氯二聯苯戴奧辛（PCDDs）、多氯呋喃（PCDFs）、多環芳香烴（PAHs）等，以及重金屬，銅、鉛、鋅等，此類物質不易為生物體所排出，往往進入食物鏈在生物體中層層累加，具有毒性及致癌性。

四、監測環境

監測環境的選定與條件的控制可分為天然環境與實驗環境，所謂天然環境是在未經人工控制的環境下選擇適當的樣區，樣區的選擇及背景值的取得就顯得十分的重要，對於實驗其他控制因子較無法掌控，但可反應出真實的環境狀態；實驗環境則運用各種控制技術，可準確地控制各項實驗因子，一般是將污染物以煙薰的方式導入實驗環境，實驗環境依環境開放程度可分為密閉式、頂開式、開放式，其中密閉式由於空間的限制較不適用於高大的木本植物，而開放式的環境控制因污染物易逸散，須更完善的技術及更高的成本。

五、監測方法

監測方法根據檢測的項目不同可區分為三大類：一、植物體生長的型態與生理作用。二、污染物的累積。三、植物體面對環境壓力的代謝變化。

檢測環境污染物對松樹的生長狀態與生理作用的影響受到相當多學者的關注，然而不單是環境學者，對於森林學者而言，影響松樹的生長意味著影響林產物的生產，其論述並非針對其作為生物指標的可能性加以探討，而是以對林木生長的影響為主軸，可作為發展松針作為空氣污染指標的參考資料。評估植物生長狀態的方法很多，有表示生長量的樹高、胸徑、當年芽生長長度、全植物體的生質量（Biomass）、根/芽乾重比等，或評估植物生長的活力，如呼吸率



(Apparent respiration rates, ARR_s)、氣孔通導率 (Stomatal conductance)，以及觀察松針的微細構造，測定植物基本元素 (氮、鉀、鈣、鎂、磷) 的含量等，都可以提供植物生長狀態變化的訊息，此種監測方法須較長時間才能觀測出其變化。

利用松針作為污染物生物累積體 (Bioaccumulator)，測定松針中的污染物累積量，直接反應出空氣污染的程度，以做為環境污染物的監測。在有機污染物方面，Zhu等人利用正己烷萃取松針，以矽膠層析管柱預處理萃取液，再以氣相層析儀分析所含的PCBs；Lang等人則是以超臨界萃取法處理新鮮松針及枯落松針，再以氣相層析質譜儀分析PAHs，兩者的PAHs含量差異不大，但枯落松針中低分子量的PAHs部分流失，相對地使得高分子量的PAHs略微提高；Ok等人則是採集南韓五個主要城市的松針，松針所測得的PCDDs / DFs和環境中的背景值是一致的，表示可利用松針做為南韓PCDDs / DFs污染的指標。另一方面，在重金屬污染的監測方面，利用松針的累積亦不失為一簡便的方法，隨機取樣各地區的松針，利用原子吸收光譜儀測定金屬的含量，可繪製出重金屬污染物分佈圖，發現銅和鉛會限制植被的生長。

檢測松針中的生理代謝物，在環境壓力下所產生的變化，即利用生物標記的概念，運用於環境污染物的監測。此種生理學上的變化較形態學和解剖學上的症狀更早出現，可提供環境品質惡化的早期警訊。如何

選擇與欲檢測污染物有關的生理代謝物，探求兩者間的相互關係，是該類監測方法的重要關鍵。

Rosemann等人測定松針中所含二苯乙炔銀松素 (stilbenes PS)、銀松素3-甲醚 (PSM)，以及測定二苯乙炔合成酶 (STS) 的活性做為生物標記，由於PS和PSM是松屬植物心材中特有的成分，在松樹受傷或真菌侵入時亦會在邊材中累積，紫外光照射和感染真菌則會誘發STS的反應，以O₃作為壓力源 (stressor)，處理蘇格蘭松苗木，PS、PSM的累積和STS的活性在O₃的處理下增加，此外，在二苯乙炔合成基礎的黃酮類合成途徑中，關鍵性的二種酵素苯丙氨酸解氨酶、查爾酮合成酶，兩者的活性亦在O₃的激發下增加了兩倍，顯示二苯乙炔可在松樹作為O₃的生物標記。

酚類化合物也常被作為生物標記，因為其在植物生態的毒他 (Allelopathic) 作用扮演重要角色，以及造成不好的氣味避免植物被草食動物所啃食，並參予植物對環境壓力 (如同種或異種間的競爭、空氣污染) 的反應。Karolewski等人分別採樣1年、2年、3年生的蘇格蘭松苗木，以乙醇萃取松針，監測在二氧化硫和氯化物的污染環境下，其總酚量 (Total phenols) 及o-聯苯酚的量的變化。Pasqualini等人選擇五種不同空氣污染物 (NO、NO₂、NO_x、SO₂、O₃) 的樣區，採集相同樹齡、樹體部位的松針，測定其Total phenols，以及進一步以高效液相層析儀 (HPLC) 定量簡單酚類物質 (Simple phe-

nols)，暴露在SO₂之下會使Total phenols提高，在NO_x之下反而使Total phenols降低，但*p*-香豆酸、丁香酸、4-羥基苯甲酸等Simple phenols物質的濃度反而增高，而沒食子酸、香草醛在SO₂或O₃的污染環境下均降低；在相同取樣的另一篇研究中除了Total phenols，另外探討了總原花青素（Total proanthocyanidins）和總黃酮醇（Total flavonols）、簡單黃酮醇（Simple flavonols），Total flavonols和O₃的濃度具明顯的正相關性，Total proanthocyanidins和O₃的濃度具明顯的負相關性，Total flavonoids（Total flavonols和proanthocyanidins）可作為O₃的生物標記，槲皮酮、異鼠李素、山茶酚等Simple flavonols與SO₂呈顯著的負相關性，可作為SO₂污染的生物標記。

測試與抗氧化有關的生化因子如過氧化酶活性、抗壞血酸鹽、硫氫基含量，亦可作為生物標記。在臭氧暴露下，過氧化酶活性適用於短期的監測，硫氫基含量則適用於長期的監測，抗壞血酸鹽含量無論長期或短期的監測都適用。Schulz等人則研究NO_x、SO₂、O₃等對抗氧化劑的效應，如超氧化歧化酶（SOD）、抗壞血酸、穀甘朮、穀甘朮還原酶等，雖然在污染區的松針中穀甘朮的含量在1、2年生時高於非污染區，然而卻持續地減少，SOD、抗壞血酸則沒有改變，以抗氧化劑作為生物標記可發現成齡木在污染區中承受較大的氧化壓力。

色素也是一個重要的生物標記，由於受

污染物影響的植物會發生黃化、萎凋、組織壞死等病徵，表示可能會抑制色素的代謝。可測定葉綠素的螢光量，發現污染區的採樣含較高的色素含量。臭氧亦會影響色素前驅物的代謝，Shamay等人利用放射性同位素標定色素的前驅物5-[4-¹⁴C]-含氨基果糖酸、L-[¹⁴C(U)]-穀氨酸、D,L-[2-¹⁴C]-甲羥戊酸，並以薄層層析法（TLC）及高效液相層析法（HPLC）分離出葉綠素及胡蘿蔔素，並測定其活性，以瞭解臭氧對色素生合成路徑的影響。Utriainen等人則分析松針所含的葉綠素、胡蘿蔔素、核酮糖二磷酸縮化酶、澱粉的含量，發現臭氧的處理對當年並無顯著效應，葉綠素在第二年些微增加，第三年則又減少。

六、結語

根據上述利用松針做為空氣污染監測的各研究來看，以及臺灣的中低海拔亦有數種常見的松樹栽植，如馬尾松、臺灣二葉松、琉球松、日本黑松、臺灣五葉松等，可運用於發展長期空氣污染監測，其中臺灣五葉松為工業區綠化的推薦樹種，分佈的海拔較低，同時有耐旱、耐寒、耐鹽等特性，具備成為指標植物的潛能，有賴相關學者進行研究。▲

