

# 空氣污染與森林毀滅之謎

高 銘 木\*

## 前 言

過去六年來，歐洲廣大的森林正面臨一場空前所未有的浩劫。這些森林正暴露於某些空氣污染與自然環境壓迫（包括氣候因子、養分失調及病蟲害等）的雙重打擊。最近類似現象也出現在北美洲的高緯度森林地帶。根據北卡羅萊那大學森林病理學教授布魯克(R. Bruck)指出，三年前的北美洲森林仍十分正常健康，但是現在許多山頂上都被一片瀕臨死亡或已死亡的樹木所覆蓋。美國東部最高峯華盛頓峯(Mt. Washington)山頂上到處聳立著光禿乾枯的針樅林，顯得十分淒涼。

## 生態偵測調查

西元一九八〇年，歐洲首次出現這種可能造成廣大森林滅絕的浩劫時，西德科學家稱它為「Waldsterben」，意思為「死亡森林」。這種現象到底是由一種抑或多種因子所引起，可能是本世紀極具挑戰性的生態偵測工作。但由令人困惑的症狀與蔓延的迅速，不禁讓人懷疑可能是多種因子所造成。目前初步證據指向係由多種空氣污染與某些自然環境因子互相加成(synergism)或颉抗(antagonism)作用的綜合結果。這些污染物質分別來自能源工廠化學工業或車輛等所排放的廢氣。最近的研究指出酸雨(acid rain)不是元兇，而許多不同污染物質可能涉嫌重大。

這種「死亡森林」的破壞力令人吃驚。到目前為止，歐洲地區包括西德、奧地利、捷克、波蘭等國大約六百萬公頃的森林正受到嚴重影響。此外，東德、匈牙利、羅馬尼亞、瑞士、荷蘭、法國、比利時、瑞典甚至美國也相繼發生類似問題，總計約有七百萬公頃森林正面臨「死亡森林」的威脅。

「死亡森林」最早發生於西元一九八〇年西德的慕尼黑森林地帶，剛開始祇有百分之八受到傷害，到一九八三年驟增到百分之三十四，八四年變為百分之五十，八五年更有百分之五十二的森林出現典型的症狀，受感染的罹病樹木在五週到三年內，樹枝首先逐漸轉呈黃棕色、樹葉開始脫落，生長停頓，最後整株樹木頂端光禿，植株矮小，根部及樹幹開始扭曲並萎縮，乾枯而死亡。西德政府因而每年造成十億美元的重大損失。進一步調查發現「死亡

\* 臺灣糖業研究所研究員

「森林」不僅發生於針葉林，闊葉樹也無法倖免。罹患的樹木常被一些真菌及地衣所覆蓋，對病害的抵抗力減弱，同時遇風容易倒伏及折斷。

罹患的樹木深深地影響樹林的生理作用。受害的樹木對寒冷、強風、昆蟲的抵抗力大減。有些松柏樹雖能形成松球（cones）或種子，也無助於發芽或繁殖。

### 「死亡森林」的化學病因學

由於「死亡森林」的症狀十分複雜，到目前為止仍然沒有一種完全被人接受的學說能夠充分詮釋「死亡森林」的真正原因。因此下列幾個假設被認為是造成「死亡森林」的兇手：（表一）

第一，臭氧（ozone）與其他光化學氧化物（photochemical oxidants）如過氧化乙醯硝酸鹽（peroxyacetyl nitrate, PAN），過氧化丙醯硝酸鹽（peroxypropionyl nitrate, PPN）及過氧化氫（hydrogen peroxide）傷害：試驗證明若樹木暴露於每立方米含有 100 到 200  $\mu\text{g}$  上述氣體濃度下六小時以上，樹木即顯著受害。臭氧對美國作物的損害每年估計損失十到二十億美元。雖然目前仍無法估計臭氧對美國森林的損害程度，但可以預料將十分驚人。

臭氧的形成主要是由於空氣中的氮氧化物（nitrogen oxides）及揮發性碳氫化合物在日光下，特別在強烈紫外線下，與氧起化學反應而生成的。這些化學前驅物的主要來源係來自石化工廠、工業製程、車輛所排放廢氣及有機溶劑或燃料等。

過去二十年來，在東西德的上空，臭氧濃度有明顯增加的趨勢。從西元一九六六到一九七八年，臭氧的主要前驅物氧化氮，增加百分之五十。

因為臭氧及其他光化學氧化物直接傷害樹木的葉片組織，降低葉面光合作用能力、養分保存與運輸及生長。同時減低葉片對害蟲抵抗力，最後導致根部腐爛而死亡。雖然臭氧不是

表一 歐美地區「森林死亡」的症狀及其可能疑兇

可 能 疑 具	症 狀
1. 臭氧	樹枝頂端的針葉黃化，嚴重者脫落。
2. 臭氧、二氧化硫	樹木生長停頓，但無明顯症狀。
3. 酸雨、臭氧、乾旱	葉片黃化，自內而外，由下而上，由老葉先發生。
4. 氣候因子（生物、非生物性）	樹木死亡，由新葉開始或由頂端先死亡。
5. 肥料	有益微生物，例如菌根菌數目大減，根系活力減弱。
6. 重金屬、有機化合物	受害樹木附近的草類死亡。
7. 有機化合物	葉片雖然仍然維持綠色，但極易脫落，葉片的形狀大小不正常。
8. 氮肥過剩	種子與松球形成過剩，但不發芽。

直接殺死樹木，但卻間接減弱樹木的活力，導致其他因子侵入樹木組織而死亡。

另一種假說認為臭氧暴露於酸性霧滴下，會形成酸雨 (acid rain) 或酸霧 (acid fog)，增加對樹木葉片養分淋洗的能力，導致嚴重缺鎂與鈣離子，減低光合作用能力與根系活力，葉片黃化，植體內因缺鈣而呈酸化現象，阻礙正常新陳代謝的功能。

第二，二氧化硫傷害 (sulfur dioxide damage)：氣態二氧化硫 ( $\text{SO}_2$ ) 是石化工業燃燒過程中的重要產物，它若遇到氮氧化物則形成酸雨。歐洲與北美洲每年估計約有一億一千萬噸的二氧化硫產生，雖然數量如此鉅大，但是二氧化硫對森林的傷害僅侷限於主要二氧化硫生成區域附近而已。

二氧化硫是從樹木葉片中的氣孔 (stomata) 或針尖 (needles) 進入，與組織內的水份起化學反應生成硫酸，在細胞壁上形成薄膜，葉綠素被破壞，葉片被漂白而呈灰白色，針葉呈紅褐色。

二氧化硫的污染若轉趨嚴重，會導致樹木生長停頓，甚至死亡。典型的二氧化硫傷害會發生在加拿大的安大略省，那兒有全世界最大產生二氧化硫的工廠（每年產生六十五萬噸氣態二氧化硫），結果鄰近的作物幾乎完全呈灰白化且大量死亡。相似的現象也會出現於東德及捷克。

第三，過多的銨態與硝酸態氮累積：農業用肥料是空氣中氮素的主要來源，此外來自化學肥料工廠、廢水污泥處理及車輛所排放的廢氣也會產生大量氮素。研究人員發現全世界所有施用的氮肥中百分之十最後終必揮發到大氣中。這些在大氣中的氮素隨著下雨降落在不同地區，據調查結果顯示在歐洲及美國中西部地區每年每公頃地面平均接受三十公斤氮素，而其他較乾旱地區則僅接受一公斤氮素。

過多氮素累積會傷害樹木的原因有二：一為樹木由於氮素過多導致過度生長，生長期因而延長，使得樹木沒有足夠時間適應過冬；另一為樹木因攝取過量氮素，引起植體內碳素及其他養分間的平衡。這些養分平衡的失調，造成樹木傾向於易受線蟲、真菌或昆蟲的侵犯。另一方面，由於樹木的過度長成，連帶大量攝取其他養分，造成土壤養分的枯竭。因而迫使根部萎縮，減少對乾旱抵抗力與抗風力。

根據植物生態學家的預測，如果森林地區每年每公頃接受三十公斤的氮素，估計二十到二十五年後，森林土壤將達到氮素飽和的限度，上述症狀即可能呈現。目前許多中歐及高緯度北美地區都已達到氮素飽和的程度。

第四，農藥及其他有機化合物：到目前為止，仍無人確實知道農藥及其他有機化合物對森林死亡所扮演的角色。單以西德而言，每年大約有一百五十萬噸農藥或其他有機化合物被釋放到自然界中。其中某些化學物質會干擾樹木荷爾蒙的形成或其他新陳代謝作用。

一種叫做苯胺 (aniline) 的有機化合物已被證實會造成松樹不正常生長。它的主要症狀是針葉變為棕色而脫落，嚴重者整個植株死亡。

第五，酸性物質沉積：所謂酸性物質沉積係來自二氧化硫 ( $\text{SO}_2$ )、氧化氮 ( $\text{NO}, \text{NO}_2$ )，氯化氫 ( $\text{HCl}$ ) 及其他化合物與大氣中的氧 ( $\text{O}_2$ ) 與水蒸氣 ( $\text{H}_2\text{O}$ ) 結合而形成強酸性的稀薄溶液。這些酸性物質有時以酸雨 (acid rain)、雪狀、霧狀甚至酸性乾物降落到地面。酸性沉積物的來源主要是從石化火力發電廠及其他工業製程中所排放出來的上述廢棄物，以

及車輛所排放的氧化氮等廢氣。

根據北美地區的研究調查發現，pH 為 2.3 到 5.0 的酸雨能夠顯著的將楓樹、黃樺木及白針樅木針葉中的鉀、鈣及鎂淋洗出來。雖然有時候葉片養分的淋洗——被認為是樹木養分循環中的一種正常現象，但是至少養分間的平衡必須維持。因此，許多受酸雨影響的樹木，為了平衡葉片中的養分失調，大量自土壤中攝取某些養分來補充損失。如果養分攝取不足，樹木對外界氣候環境的變化即十分敏感。

此外，酸雨也會加速土壤酸化過程，酸雨不但淋洗土壤中一些必要的陽離子養分，也會造成鋁濃度增加，引起根部吸收過量而中毒，當土壤中鋁含量達 2 ppm 時，即能為害根部。在西德索嶺高原 (Solling Plateau) 榆樹林區的土壤中鋁含量達 6 ppm，而檜木區則高達 15 ppm。土壤層次愈薄，愈易受酸雨所傷害，土壤層次愈厚，因為有高量的鈣鉀等緩衝物質，受酸雨的影響較小。

土壤酸化與鋁中毒是酸雨所帶來的不良後果。在歐洲地區，尤其是中高緯度地帶，土壤大多為礦物性土壤，缺乏緩衝能力，受酸雨為害較為嚴重；相反的，北美東部高緯度地帶是高有機質土壤，緩衝能力強，因此較不受酸雨所影響。

第六，重金屬沉積：大氣中存在重金屬物質主要是來自石化火力發電或其他工廠燃燒與熔解金屬礦石所產生的蒸氣或微粒，此外，含鉛汽油也是空氣中鉛的主要來源。根據美國森林生態學家調查顯示沿著東部阿帕拉契山的森林土壤及樹葉植體中鉛、鎘、銅及鋅的含量激增。平均每平方米的森林地面（土壤及植物殘體）總共含有兩克的鉛，比美國其他地區高十倍之多。

美國環境保護總署研究結果指出當每克土壤中含有三到十微毫克 (3-10  $\mu\text{g}$ ) 鉛時，即顯著抑制植物根系生長。若植物長期處於上述鉛濃度下，進而引起鉛中毒的現象。

## 結 語

歐洲及北美洲「森林死亡」之謎，到目前為止被認為是由於許多不同種類空氣污染所造成。但是明顯的是這種現象因地區不同，甚至同一地區，它的污染物質各異，而森林樹木所呈現的症狀也不盡相同（表二）。此外，外界氣候因子，例如乾旱、寒冷及病蟲害則可能是幫兇。

未來如何防治「森林死亡」的威脅及蔓延，科學家正面臨極為嚴重的挑戰！

參考資料：Bioscience 1987. "The forest decline enigma" 37: 542-546.

表二 空氣污染在「森林死亡」中所扮演的重要角色

北美地區：（依重要性的順序排列）

1. 臭氧
2. 生物有效性氮素化合物， $\text{NH}_3$ ,  $\text{NH}_4$ ,  $\text{NO}_3$ -Nitrogen
3. 植物有毒氣體，包括  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NOx}$ ,  $\text{FI}$ ,  $\text{PAN}$  及  $\text{PPN}$  等
4. 有毒重金屬，特別是鉛、鎘、鋅、銅。
5. 酸性物質沉澱物、酸雨、 $\text{HCl}$ 。
6. 影響新陳代謝功能的有機化合物，乙烯及苯胺。

西歐地區：

1. 臭氧。
2. 酸性沉澱物，特別是酸雨及酸霧。
3. 氮素過多沉積。
4. 影響新陳代謝功能的有機化合物。

東歐地區：

1. 二氧化硫及氧化氮。
2. 臭氧及其他光化學氧化物。
3. 酸性沉澱物，特別是酸雨及酸霧。
4. 重金屬。