

一場持續了二十年的學術之爭

空氣污染與森林死亡

王巧萍 Joerg Priess

一、源起

近二十年來空氣污染如何危害森林生態系，已經是個陳腔老話。然而自從去年(1996年)九月初於德國弗萊堡大學所召開之“歐洲森林之生長趨勢”研討會中，由該校教授H.Spiecker提出，經由十二個國家二十二個樣點長期觀測的結果顯示，北自斯堪地那維亞南至西班牙，歐洲森林從1950年到1990年這四十年間，總材積量共增加了43%；衆人所恐懼的森林生長衰退甚至於大面積森林死亡等情形，非且並未發生，相反的森林生長得較以往更快。森林死亡的警鈴，應該可以解除了。這份報導立即引發各方駁閱之聲，由於事關環境政策與相關法令之制定，從嚴謹的學術辯證到尖酸刻薄的譏罵反諷，報章雜誌莫不以最快的速度大篇幅的加以討論。當然支持該學派的人馬也不甘示弱予以聲援，試圖扳回二十年來在森林生態學界被漠視的顏面，而為這場雖已冷卻但未曾間斷的學術戰火，重添新油。誠如南德日報所言：從來沒有一個話題能像“德國森林”這樣的激起群眾強烈的情緒，也從來沒有一個話題，有著如此兩極化的爭辯—究竟環境污染會不會導致森林死亡。但事實上就多年來各國學者努力研究的成果，我們已經

逐漸可以拼湊出人為污染對森林生態系所能造成的傷害及其機制。區域性的長期觀測，加上機制的動態模擬，大規模的資料整合指日可待，解開各種複雜作用程序的謎團，或許也不再是遙遙無期。然而，就在德國失業率節節上升、研究經費年年縮編這種不景氣的經濟狀況下，弗萊堡大學捲土重來，再次引發這場爭辯，其中所背負的政治意義不容忽視。只要控制環境污染的相關政策不制定，或制定的法令不盡完善，這場爭辯便一日不停止；只要這場爭辯不停止，政客便有理由坐壁上觀。因此對於回應這場爭辯的學者而言，就如同孟子當年所說的“予豈好辯哉，予不得已也”，而一路領導著德國森林生態學發展至今的B.Ulrich，在對抗污染二十多年後的今天也只能說“那些政客實在是太懦弱了”。類似的情形在各國屢見不鮮，臺灣傲人的經濟奇蹟背後隱藏著無數的環境危機，綠色團體與財團及政客之間僵持著許多環保問題，人們卻逐漸習慣以冷漠去面对荒謬，也厭倦於思考衝突的來源。他山之石可以攻錯，在此我們以德國森林死亡之爭為例，就其中學術報告的爭議處和政策發展的始末，做概括性的報導，提供研究生態問題與關心生活品質的諸位做一個參考。

二、森林死亡的學術辯證

對於森林死亡的學術辯證可以回溯到七〇年代初。1972年聯合國於斯德歌爾摩召開的第一屆地球環境會議中，北歐林業人員便提出，自從六〇年代末以來，芬蘭和瑞典的湖泊中出現了大量生物死亡且幾近滅絕的現象，森林生長也呈衰退的趨勢，其肇因可能與酸雨中的硫化物有關。雖然當時這份報告並未獲得媒體應有的重視，群眾也無緣得知，但科學家們卻已經開始著手從事各項研究，希望早日解開這場生態災難的謎團。當然，同樣的森林病癥及死亡情形也在德國出現，於是各式的研究也如雨後春筍般的湧入科學文獻中，據統計自1982年至1985年間，共出現167種與森林死亡相關的學說。

在當時，大部份的研究多致力於雨水pH值對生物的直接傷害及其化學組成對土壤養分供應之影響。但由於森林土壤之養分組成隨母岩種類、氣候條件、植被、微生物及地形而異，於是初期的研究中常有許多適用於甲地的理論卻不適用於乙地，甚至互相矛盾的結果。再加以不同樹種對於各種養分需求的最低限度不同，對抗污染的生化機能有異，更使得個中原因難以鑒定，因而出現對於“大面積”森林生長衰退及死亡見解不同的兩學派。其中以前哥廷根大學土壤所所長暨德國森林生態研究中心主任B.Ulrich及慕尼黑大學森林學教授P.Schuett為主的一方，堅信人為空氣污染是為原兇；另一方則以慕尼黑大學之植物學教授O.Kandler、森林土壤學教授K.E.Rehfuess、及弗萊堡大學土壤所所長H.Zoettl為首，認定乾旱及病蟲

害才是主嫌。

首先Kandler等人認為，德國許多不同地區之銀冷杉於同一時期相繼死亡，乃是乾旱與病蟲害所致。其中只有為數極少的一部份，則是因為鄰近污染源，受到極高濃度之二氧化硫所傷，由污染物質之多寡與森林受危害的程度之間，無法證明跨地域性的煙害是否存在。同樣的，Ulrich等人也同意大面積之直接煙害並未發生，但這些污染物經由降雨不斷進入林地，短期內雖有施肥效應，長期累積的結果將導致土壤酸化、養分淋溶流失、土壤動物生長受阻或消失、微生物量減少及群相改變，緊隨著的是有機質分解受阻、腐植質劣質化而堆積，礦質化作用降低及養分循環中斷；尤有甚者，若土壤繼續酸化並突破鹽基飽和度之緩衝能力時，其緩衝區域將從鹽基陽離子（鉀、鈣、鎂、鈉）進入酸性陽離子（氫、鋁、錳、鐵）。當土壤中的鋁被釋放至土壤水中後有兩種情形，濃度過高時會對根部直接造成毒害，濃度低時則與其他二價離子爭相被根系吸收，而使植物生長之必要元素獲取量相對減少。據實驗所得，這種營養不良的症狀除了根部之外，以樹皮最為顯著，且已擴展至葉片之中。而這種情況之下，以鋁與鎂、鈣的比率來呈現其在土壤水中的化學勢能，較濃度更能表示出離子間的競爭作用。亦就是說，鋁的毒性大小可由土壤水中的 $Ca^{2+} + (Al^{3+} + 比與Mg^{2+} + (Al^{3+} + 比$ 值當作參考指標。以溶液培養之挪威雲杉和歐洲水青岡為例，其根系病症如表1。當然這些數值絕非固定的鋁毒害評估模式，其範圍亦應隨樹種變化而適度調整。

表 1. 鋁逆壓之閾值

(Threshold values for aluminium stress, derived from solution culture experiments, B.Ulrich, 1984)

培養液之 $Ca^{2+} + (Al^{3+} + (mol (mol)$		
挪威雲杉	歐洲水青岡	
> 1	> 1	鋁毒害逆壓可以忽略
1-0.3	1-0.3	輪根之生長降低、細根出現壞疽、間接的減少了養分之吸收
0.3-0.1	< 0.3	根尖的分生組織壞疽增加、根壞疽與黑斑的情形加劇、鈣吸收量劇減
< 0.2-0.1	?	細根系將無法維持存活或重建
培養液之 $Mg^{2+} + (Al^{3+} + (mol (mol)$		
< 0.3-0.2	?	Mg 之吸收銳減導致葉片缺綠，長期累積將使葉片黃化

然而，這套理論並沒有完全獲得另一方學者的認可。Zoetl 同意酸化的確與土壤中鈣鎂之貧瘠化有關，但不會造成鋁毒害的現象。他提出下列三個主要論點：首先，樹種間對鋁的需求量與承受量不同，這是植物對應所在環境之差異自動調適的結果。許多歐洲的樹種，很明顯的早已發展出可以在含高濃度鋁的土壤水中生存的能力。而藉此批評 Ulrich 等人雖則發現，土壤中鋁之活動性與死亡林木的根枝葉中含鋁量呈正相關，但卻無法依此確定兩者間的必然性，即鋁之活動性之大小與林木傷害等級之潛在關係。相反的，就他們在南黑森林高地之 Baerhalde 的銀冷杉林生態系的研究結果顯示，生長量最佳的林分 (75-85 年生) 中，其高濃度的針葉含鋁量，正映攝出該林分土壤中可置換鋁之最高含量。Rehfuess 則分別比較健康與呈病癥之冷杉林土壤水含鋁量，發現兩者並無差異。其次，Ulrich 等人所提出的 $Ca^{2+} + (Al^{3+}$ 比與 $Mg^{2+} + (Al^{3+}$ 比之毒害指標值，乃

是將苗木培育於不同濃度組合的水溶液下進行，苗木本來就比大樹敏感，且這樣的水耕試驗與林木根部伸展於土壤表面吸取土壤水的機制不盡相同，再者游離於土壤水中的鋁會與有機酸形成複合物而降低毒性。其三，在許多已死亡的林分中，其土壤仍含有極高之鹽基飽和度或石灰質量。因此，只有在生育地極度貧瘠與敏感的林分，才有可能因上述的污染機制導致林木缺鈣或缺鎂等營養失衡或鋁中毒，否則主要仍應歸因於乾旱與病蟲。

對上述的批判 Ulrich 的回答是 $Ca^{2+} + (Al^{3+}$ 比值並非用來當作污染等級評估的標準 (Be-wertungsschema)，而是可藉以了解土壤酸化所造成林木傷害的一個警戒點。且不單只是敏感的苗木對應其比值呈現根系病症，從低 $Ca^{2+} + (Al^{3+}$ 比的成熟林分中所挖掘出的根也有同樣的結果。但 Zoetl 等人以土壤中可置換性陽離子及鋁與生長量做為反駁，卻犯了一個非常嚴重的錯誤，那就是忽略了根部微區域 (microsite) 的離子濃度變化

才是直接影響其養分吸收功能與生長的主因。由一般取土樣的方法所分析出來的可置換性陽離子值，乃屬於該地可供利用的養分總貯存量，不能混淆為其實際被植物使用的數量。再則，用以計算生長量的樹幹對鋁的反應不若冠層及根系敏感，即便根系已經受損、冠層出現病症，只要吸收的養分夠用且光合作用不斷進行，材積便可持續生長。而後，隨著分析方法的改良，與林地的野外調查結果出現，Ca²⁺ + (Al³⁺ + 比)的爭論也逐漸消聲匿跡。研究人員首先透過航照圖定出冠層呈現病癥之林分的位置，隨即於該處取樣進行分析。事實證明，從健康的林木到病株間，其立地土壤水之Ca²⁺ + (Al³⁺ + 比值)一路下降。空氣污染跨區性的殺傷力，確實危及著森林生態系的穩定性，困難的只是如何將其數量化或模式化。

自1984年以來至今，森林傷害調查乃是透過林木之冠層密度或枝葉量來界定其等級，在大面積的調查上則多以林冠之透光度估算之(如表2)。其中由2~4級屬於明顯傷害，若以此為調查依據，則至1996年底為止，綜合全德國各樹種總計仍有20.4%的林木列於此際；屬於輕度傷害的則為37%，只有不到一半的樹木是健康無虞的。但是這種計算方式，並無法表示出受傷林木與空氣污染危害之間的關係，也一直是反對者引為詬病的重點。因為沒有一種樹種有所謂的“標準冠層密度”。即便同一樹種在相似的氣候條件下，生於肥沃林地者通常冠層透光度也會較貧瘠處為高；或如在生長土壤養分含量相當的林木，位於高海拔者也會較溫暖的低

表2. 依針葉/葉片損失量所製定之林木傷害等級 (AFZ/DerWald, 1996)

林木傷害等級	針葉/葉片損失量
0.: 無傷害	0 ~ 10%
1.: 輕度傷害 (警告級)	11 ~ 25%
2.: 中度傷害	26 ~ 60%
3.: 嚴重傷害	60 ~ 99%
4.: 死亡	100%

地，有較為疏鬆的枝葉密度。

事實上，這個方法的確有待商榷，包括前 Solling 計畫(請參考臺灣林業第二十二卷第二期：人為控制條件下森林生態系的研究一文)主持人 H. Ellenberg 也因許多矛盾的調查數據而提出質疑。例如在其長期觀測的歐洲水青岡林分中，失葉量最大而被視為重傷的樹木，卻仍然表現出正常的生長量；而其中生長率居冠的樹木，也有15%的葉片折損率。在此我們必需特別注意的是，林木在短期內之高生長率並不能代表其健康與否；這兩者間的關係沒有百分之百的必然性。然而時至今日，林業研究人員也還沒有找出更方便有效的替代方式。

整合上述二派學者的主要論述簡而言之，Zoettl 等認為病蟲與乾旱是林木傷害的主因，若再加上土壤酸化使養分流失則將使病情加重，是為雪上加霜；Ulrich 等則相信土壤酸化對養分循環的干擾與鋁的釋放，造成淺根化(根系停止或無法向下伸展而聚集

於表土，此為熱帶林中常見的現象) 及根系傷害，而使林木敏感於乾旱逆壓，對病蟲危害的抵抗力減弱，可謂屋漏又逢連夜雨。雖然雙方各持實驗依據反復復互相爭辯了二十多年，森林傷亡的數值也起起落落令人心驚膽顫，所幸大面積的森林死亡終究沒有發生。這除了要慶幸近些年來溫和濕潤的氣候之外，還得歸功於當年污染防治法規的及時制定。儘管如此，長期空氣污染對森林生態系所累積的負作用，已是老少皆知的不爭事實了，無論在數量化及詮釋上孰是孰非，可以預見的是當天然的災變（乾旱、病蟲害）加上人為的迫害（硫化物、氮氧化物、重金屬、臭氧等），大面積的森林死亡不是不可能發生。

三、森林死亡的政治涵意

在此我們必需澄清一點，雖然對於是有因空氣污染而導致新型的森林傷害 (neuartiger Waldschaden)，在實驗理論上學者各持所見，對調查數據的詮釋也眾說紛紜，但森林死亡一說並非學術上的主要爭議，而污染防治的呼籲卻是學界有志一同的。即然如此，為什麼森林死亡的警報不能解除呢？對此，我們必需再從另外兩個層面—群眾的環境意識與政治的環境法規—來看其涵意。

當 Spiecker 等人自去年九月起，以新的森林生長量配上舊有的天然災害論大舉進攻“Waldsterben”（森林死亡）這個字同時，空氣污染的重點也由硫化物進入氮化物。也就是說，污染指控的主要目標已經從資本家的工廠，變成平民百姓的日常生活所需—汽車、家庭燃料、及大規模的農牧業（便宜肉品與乳製品的來源）如表 3。

表 3. 十個歐洲國家氮硫污染之主要來源

來源	NH ₃ (%)	NO _x (%)	SO ₂ (%)
天然來源	1	0	0
農牧業	97	0	0
工業	1	17	31
發電廠	0	21	54
家庭用暖氣設備	0	4	9
交通運輸	0	56	6
垃圾貯存與處理	1	2	0
總計	100	100	100

資料來源：World in Transition: The Threat to Soils, 1995

因為硫化物的污染機制已經十分清楚，其釋放量從 1984 年起至今已降低了將近 75%。但相對的，空氣中的氮氧化物 (NO_x)

卻與日俱增，其回歸林地量從天然狀況的平均每年每公頃 1~3 公斤，激增到 15~40 公斤，一些特殊地方甚至高達 100 公斤以上。

氮也由原本的森林生長限制的首要因子（約每年每公頃 10 公斤的需求量），變成潔淨水源的頭號殺手。學者引以為憂的是，若媒體大肆解除森林死亡的警報，群眾又誤認“高生長量”等於“健康的森林”，而忽視氮氣化合物對環境的威脅，那麼未來要面臨的問題，就不僅是森林生態系的穩定性如何，而是整個生物圈存活的壓力。因為氮的污染型態包括 NH_3 、 N_2O 、 NO 、 NO_2 及 N_2O_5 ，其中 N_2O 為溫室效應氣體，且比 CO_2 之吸熱強度高出 180 倍；其餘的 NO_x 在氣中為臭氧層破洞的觸媒，水化後則隨降水回歸陸地，造成土壤與水體的加速酸化，使土壤中更多的金屬離子淋溶流出。除了我們的飲用水質受污染外，更對水生生物的存活構成嚴重威脅。而 NH_3 水化後雖可供植物立即使用形同肥料，但植物每吸收一個 NH_4^+ 便釋放一個 H^+ ，若由土壤微生物硝化成 NO_2^- 或 NO_3^- 則將釋出二個 H^+ ，其酸化能力可說是其他氮化合物的二倍。此外，由於氮污染的施肥效用樹木的生長加速，但幹材並未相對加粗（類似苗木之徒長情形），則容易導致風折或風倒，對病蟲害的抵抗力也會減弱。大量的氮輸入已改變了許多森林生態系的主要植物相，一些附生物因之而消失，而原本不適生的草本植物漸漸成為優勢，使林木天然更新受阻，土壤動物與微生物群相也跟著改變。

像這樣的問題不可謂不大，民眾也不是不能理解，技術上更不是不能克服，那麼為什麼無法解決呢？我們先再回頭看看硫化物排放限制的歷史。自從酸雨問題正式搬上台

面引發學理辯論，媒體起初未加注意到後來奔相走告大聲疾呼，限量管制的法案漫漫長長經過十多年卻始終無法在德國國會通過立法，因為這攸關著數十億馬克的去硫裝置是否要強制執行。如果森林死亡不是因為煙害及酸雨，這筆錢對發電廠與工廠而言無異於浪費。政客不願意得罪財團，於是駝鳥般的等待學者間的爭論有明確的結果。一直到民眾眼見周遭的森林黃了、禿了、甚至死了，也由報章雜誌瞭解到問題的根源與嚴重性，而激起強烈的環境意識對國會施加壓力（這可由德國綠黨於 1979 年成立，隨即在各州議會形成勢力，並且在 1983 年國會大選時勇奪 28 個席次可見一般），才使德國聯邦政府終於在 1984 年訂下廢氣排放標準及污染物減量的目標，並設立五個專責的生態研究中心，森林傷害的調查結果此後也要年年呈報國會。

森林死亡不僅只是諸多環境問題中的一環，而是整合了空氣、土壤、水各項因素之變化與互動後所呈現出來的現象。當群眾透過了解森林死亡的來龍去脈，進而明白到人為污染所可能引發的各式環境問題，並回頭追溯污染的來源，且企圖阻止或減少污染的持續進行，這樣的變革實非一蹴可及，但藉由民主程序將環境意識轉換成環保政策這確是最佳例証。然而如今，污染的矛頭卻指向了群眾，使得這個素來以環保之先進聞名於世的國家，在面對東西德統一之後的財政困難，也不得不開始掙扎於公共財之保護與私有財之擁有間的矛盾。據統計，從 1984 年到 1994 年間，光撒到森林裏用以中和酸土

的石灰，就花掉國庫近六億馬克的稅收（合臺幣約 108 億元）；而與森林相關的研究經費（其中尚不包括環境保護部、各州政府、歐體、及其他財團法人或民間組織所贊助者），則由聯邦政府教育及研究部（BMBF）審核支出總共超過十五億馬克以上。如果森林死亡只不過是危言聳聽，而更多氮氧化物的輸入能讓樹木長得更高更壯利多於弊，那麼這些爲了拯救森林所投資的錢不就可以拿來做其他對“人”更實際直接有效的措施？例如社會福利或用來創造更多就業機會。然而可悲的是污染不會因爲人們的漠視而消失，逃避無益問題的解決。

這個以自由市場機能爲導向的社會主義國家，能在戰後發展經濟進入富強之列的同時也發展出綠色政治來，並由開始的科技中心主義逐漸晉升爲道德中心主義（前者強調問題產生後之處理，如上述去硫設備的強制安裝；後者則要求對自然的尊重與預防勝於治療），與較不計環境代價的資本主義國家相比，是有其獨特的社會背景與開發模式的。然而，當現下那些與人們生活息息相關的農牧業與交通運輸，也必須爲了污染防治而解構時，問題便不似當年炮口一致朝向資本家那麼單純容易了。雖則私人用於預防污染的支出（包括稅收的運用）較之污染所付出的代價，實在微乎其微。但讓我們以極端的方式設想一下，倘若大規模的畜牧與密集生產的農業從此被迫打散，並限施不完全的速效無機肥，必須以有機的永續經營爲原則才得以生存；倘若往來頻繁負責傳送及交換各式產品的運輸業被限制或課以污染稅；又

倘若爲了能源的有效使用，家庭必須改變某些設施或提高使用費，有那項不是牽一髮而動全身的政策大變革，甚至是不便民不利己的開經濟倒車？再加以歐洲共同體複雜的經貿協定，這些法令要如何貫徹且不違反互惠的原則，甚至還得設法取得其他友邦的支持，都使問題難上加難。

究竟道德能否戰勝慾望，而改變大夥長期以來剝削自然透支能源的生活方式，使德國能保有或贏得較健全的生態系統，並逐步達成永續性的環境經營；而政客又敢否拿自己的選票面對問題，提出並執行新的環境政策，都是生態學者努力的目標。在此我們必須再次強調這絕非對文明的敵意，也絕非企圖當阻礙人類追求舒適生活的絆腳石，只是個中的得失權衡需要更多人一起深思，共同找尋平衡的定位點。至於德國如何度過這個經濟難關又不犧牲環境品質，讓我們拭目以待。

四、參考文獻

1. Bredemeier, M., K. Blanck, N. Lamersdorf and G.A. Wiedey, 1995, Response of soil water chemistry to experimental "clean rain" in the NITREX roof experiment at Solling, Germany, *Forest Ecology and Management* 71 : 31-44.
2. Brumme, R., 1995, Mechanisms of carbon and nutrient release and retention in beech forest gaps, III. Environmental regulation of soil respiration and nitrous oxide emissions along

台灣

- a microclimatic gradient. *Plant and Soil*, 168-169 : 593-600.
3. Ellenberg, H., 1995, Allgemeines Waldsterben - ein Konstrukt? *Naturw. Rdsch.* 48 (3) : 93-96.
4. German Advisory Council on Global Change, 1995, *World in Transition : The Threat to Soils. 1994 Annual Report.* Eco-nomica Verlag, Bonn, Germany. pp.250.
5. Kues, J., E. Matyner, D. Murach, and K. Blanck, 1991, Saurer Regen und Waldsterben. AOL-Verlag, Goettingen, pp.132.
6. Likens, G.E., C.T. Driscoll, and D.C. Buso, 1996, Long-term effects of acid rain : Response and recovery of a forest ecosystem. *Science*, 272 : 244-246.
7. Prenzel, J., and H. Schulte-Bisping, 1995, Some chemical parameter relations in a population of German forest soils. *Geoderma*, 64 : 309-326.
8. Skeffington, R.A., 1990, Accelerated nitrogen inputs : A new problem or a new perspective? *Plant and Soil*, 128 : 1-11.
9. Tamm, C.O., 1991, *Nitrogen in Terrestrial Ecosystems : Questions of Productivity, Vegetational Changes, and Ecosystem Stability.* Springer Verlag, Berlin, pp.115.
10. Ulrich, B., K.J. Meiwes, N. Koenig, and Khanna, P.K., 1984, Untersuchungsverfahren und Kriterien zur Bewertung der Versauerung und ihrer Folgen in Waldboeden. *Der Forest- und Holzwirt.*, 11 (10) : 278-286.
11. Ulrich, B. 1989, Effects of Acid Deposition on Forest Ecosystems in Europe. In : Adriano, D.C. and A.H. Johnson (eds.) *Acidic Precipitation, Vol. 2, Biological and Ecological Effects,* Springer Verlag, 189-272.
12. Waldschadenserhebung, 1996, Schadensrueckgang im Osten bestimmt den bundesweiten Trend. *AFZ\DerWald*, 25 : 1396-1412.
13. Zoettl, H.W., 1983, Zur Frage der toxische Wirkung von Aluminium auf Pflanzen. *AFZ*, 38 : 206-208.
13. Zoettl, H.W., 1990, Remarks on the effects of nitrogen deposition to forest ecosystems. *Plant and Soil*, 128 : 83-89.

謝誌

本文之完成，感謝哥廷根大學森林生態研究中心 (Forschungszentrum Waldoekosysteme der Universitaet Goettingen) 之資料提供，及中興大學森林系許博行教授與哥廷根大學森林土壤所齊毅軍博士之指正。

本文作者：

王巧萍現為德國哥廷根大學土壤與森林營養研究所博士生 (Institute for Soil Science and Forest Nutrition, Universitz of Goettingen, Buesgenweg 2, D-37077 Goettingen, Germany)

Joerg Priess現為哥廷根大學土壤與森林營養研究所科學研究員 (聯絡地址同上)

林業