

紫外線輻射計校驗實驗與成果初析

柳中明、譚俊傑

台灣大學大氣科學系、台灣大學全球變遷研究中心

摘要

我國紫外線指數監測始自 1997 年，分由環保署與中央氣象局分別進行。一向依賴國外廠商提供標準儀器，然後依現場同步比對方式，確認現場監測設備之品質。雖然，二單位間的資料交換是合作無間的，但從未進行同步比對校驗；因此，當相鄰二點的監測數據出現差異時，就無法了解問題之所在。經多年作業後，一方面為降低長期作業成本，另一方面為提昇國內監測水準，乃於環保署資助下，於台灣大學設置「紫外線輻射儀器校驗實驗室」（以下簡稱本實驗室），建立我國獨一無二的輻射儀器校驗實驗室。

紫外射線儀器之校正標準及追溯體系，可區分為：「零級標準」、「一級標準」、「二級標準」與「三級標準」。「零級標準」為國際標準光源，「一級標準」乃指可追溯到美國國家標準局 (NIST; National Institute of Standards and Technology) 所認證之標準光源。「二級標準」乃取輻射光譜儀 (Oriel 74050 單柵光譜儀) 經標準燈校驗後，視之為參考標準；如此後續之紫外線指數測量儀器校驗，是將光譜儀與 UVI 測量儀器分別對準 150w 氙弧燈 (Xenon arc lamp) 測量，前者資料再經與紅斑權重函數相乘並積分後，即可與 UVI 測量儀器資料相比對，以建立該 UVI 測量儀器為「三級標準」，又稱「工作標準」。當「三級標準」建立後，就可移動到各監測現場，進行同步比對，以建立現場監測儀器的校正係數。

所以，本實驗室的任務分為：「二級標準」與「三級標準」的建立。基本上，二級標準建立過程中，需光譜儀的縱切函數 (slit function) 決定以及光譜儀的波譜校驗，若是可移動型戶外光譜儀，尚需進行光譜儀對於太陽天頂角改變反應 (又稱餘弦反應) 的檢驗。原則上，每 6 個月進行一次即可，以確保後續「三級標準」建立之品質。在「三級標準」的建立過程中，又區分為功能檢定與校正係數決定。功能檢定包括餘旋反應測量及光譜反應函數 (SRF, spectral responsivity function) 的檢測，當功能檢定未通過時，儀器就需送回原廠修復，此工作乃為過去我國在進行現場比對時，所無法進行的。

本文說明整體實驗設計，第一年的實驗成果與問題探討。本實驗室於 2004 年元月份，順利地同步調整行政院環保署所有觀測儀器之校正係數，期以同步強化監測品質。

關鍵詞：紫外線指數監測、實驗室、校驗。

一、實驗設計

柳等 (2001) 提出校驗實驗室的規劃，2002 年環保署提供相當經費購置相關設備，柳等 (2003) 則進一步操作實驗，而得以瞭解其確實的困難及準確度要求。以下先說明整體校驗系統設計 (為節省篇幅，相關圖檔多省略)：

幅，相關圖檔多省略)：

(一) 校驗標準及追溯體系

依王等 (1996) 的規劃，紫外射線儀器之校正標準及追溯體系擬定如圖 1 所示。「零級標準」為國際標準光源，「一級標準」乃指可追溯到美國國家標準局

(NIST; National Institute of Standards and Technology) 所認證之標準光源，如本實驗室所購買石英鹵素鎢絲燈 (quartz tungsten halogen lamp) 作為 280~320nm 及 320~400nm 紫外射線之校正標準光源。「二級標準」乃取輻射光譜儀經標準燈校驗後，視之為參考標準；如此後續之紫外線指數測量儀器校驗，是將光譜儀與 UVI 測量儀器分別對準 150w 氙弧燈 (Xenon arc lamp) 測量，前者資料再經與紅斑權重函數相乘並積分後，即可與 UVI 測量儀器資料相比對，以建立該 UVI 測量儀器為「三級標準」，又稱為「工作標準」。其建立過程尚可區分為功能檢定與校正係數決定，儀器未通過功能檢定者，需退回原廠修復。最後，工作標準將送到各測站進行輻射計之現場平行比對，以校驗測站之測量儀器，原則上，各測站每季均當進行現場校驗一次，以確保資料品質。而由於紫外線輻射的最大量出現在夏季，所以至少也應於夏季時進行現場比對一次。

(二) 「二級標準 (參考標準)」之建立流程

所選擇建立為二級標準的單柵光譜儀為 Oriel 74050 MS260i 1/4m Imaging Spectrograph，其可選擇 10 μ m、25 μ m、50 μ m、100 μ m 與 200 μ m 等寬度之縱切口 (slit)，光譜解析均為 0.45~0.80nm。本研究選擇 50 μ m 寬度縱切口。

此項工作分為三項，分別是：輻射儀器的校驗、儀器對於太陽天頂角改變的反應 (angular response) (僅可移動型戶外光譜儀需要)、儀器的縱切函數 (slit function) 測量等。原則上，每 6 個月進行一次，以確保後續「工作標準」建立之品質。

(1) 輻射儀器的校驗

首先要進行「譜線校驗」，乃使用筆型汞氬光譜校正燈 (Hg(Ar) lamp, Oriel 6035) 提供固定波長之光源，以確認光譜儀之光譜精確度。過程是將汞氬光譜校正燈置於光譜儀 50cm 處，光譜儀的入光口使用 50 癢

之光柵，出光口使用矽光二極體陣列偵測器 (Oriel InstaSpec II PDA) 讀取測值，分別以 250nm、300nm、350nm 為中心點繪出其譜線，與汞氬燈的標準譜線比較。結果顯示在紫外線波段 253.65nm、312.67nm、313.15nm、365.2nm 等位置，光譜儀確實測得汞氬燈所設定的尖峰譜線。

其次，使用 200W 石英鹵素鎢絲燈 (tungsten halogen lamp, Oriel 63355)，作為標準光源，此光源已配備一個經認證過之隨距離改變之輻射通量密度表 (irradiance table)，而儀器所測之輻射量就是與此認證過之數據相比對。石英鹵素鎢絲燈的光譜輸出包括 UV 波段，可就 250~2500nm 區間選定 280nm~400nm 的紫外輻射波段，每 10nm 進行輻射強度測量比對。而在波段間隔間的強度，則是以曲線函數內差得之。不過，隨著燈泡使用時間的增加，其認證可信度亦逐漸降低。Gardiner and Kirsch (1995) 建議，檢查通過光源之電流、電壓是否見顯著改變，作為判定光源衰減的參考，以及確認實驗穩定進行之依據。此外，另一更可靠的方式是：購買第二支標準鹵素鎢絲燈，相互比對，其可靠性更高。

實驗設計 (附圖省略) 為：光源與光譜儀間距離 50 公分，中間隔一黑板，光線僅經由一個小孔穿過，並使用氦氖雷射光 (HeNe Laser) 定位三者在一條直線上。光譜儀後則裝設矽光二極體陣列偵測器 (Oriel 78221 InstaSpec II Silicon Photodiode Array Detection (PDA) system)，以有效偵測輻射能量。石英鹵素鎢絲燈需放置 20 分鐘以上，待光源穩定後開始校驗。經校驗後光譜儀測值即以 $\text{W}/\text{cm}^2/\text{nm}$ 為單位，與標準燈之輻射通量密度表相比較，而得光譜儀之波譜校正值。

在實驗過程中，當依照 Webb (1997) 的建議，注意實驗室內光學桌的穩定，電源供應的穩定，並覆蓋黑布於各儀器上以降低散射光線 (stray light) 等。而為避免光線散射，乃參考 Gardiner and Kirsch

(1995) 建議，使用電腦監控電流輸出，在近一個小時的實驗過程中，允許有 0.02% 異動，因為光源在 300nm 處的輸出會因電流的改變而受影響。同時應穩定使燈泡絲軸線垂直與標準光線水平。

(2) 檢驗儀器對於太陽天頂角改變的反應 (angular response)

原則上，儀器在斜射時所測輻射強度與光源正對儀器時所測得的強度之比值，應與天頂角之餘弦值成正比，不過由於種種理由，實際的測量儀器並無法達到如此理想的狀況，而必定有誤差出現，此乃稱之為餘弦誤差 (cosine error)。在實驗室內，測量儀器被放置在一個旋轉台上，而每旋轉一個固定角度後所測輻射強度，對比於 0 度位置時所測，即提供了該儀器的餘弦誤差資訊。在實驗室內，氬氬雷射光可準確調整 0 度位置達 $\pm 0.2\%$ ，而在 70 度時誤差應小於 $\pm 1\%$ 。旋轉角度的誤差應降至最低，以減少可能誤差。原則上，誤差比例是在高天頂角時誤差最大。依 Seckmeyer et al. (1998)，天頂角在 40 度以內，誤差介於 $\pm 2\%$ ，70 度以上則可能達 -40%，此特性隨光譜儀而異，偵測後有助於其他相關測量之解析。實驗設計與下一節寬頻紫外線輻射計的餘弦效應實驗設計一致，由於二級標準光譜儀體積龐大，無法進行此實驗，所以僅輕便型的戶外光譜儀可進行此實驗。

(3) 儀器的縱切函數 (slit function) 決定

原則上，單柵輻射儀器的光源入口與出口應只允許固定波長 λ 之光子出入，但實際上會有略小於 λ 之光子進入，因此該單柵輻射儀器對某測量波段的穿透函數 (transmittance) 即稱之為縱切函數 (slit function)。此函數因每一套儀器的結構而異，因此也是該儀器之代表函數。該函數之波段寬度 (spectral width) 就代表該儀器之解析度，並以該函數在一半強度時的寬度 (FWHM: full width of the function at

half of its maximum) 訂定之。原則上，解析度低者會導致較高之輻射測量。一個經認證之氬鎘雷射光 (Plasma HeCd Single Line Laser system, HCCL-8UM (I))，波長為 325nm，功率為 15mW，可準確測定縱切函數達 5 個尺度 (five order of magnitude)。實作時，儀器對 321nm~329nm 間每 0.2nm 的波段間隔進行測量。測量結果以正常化後的訊號 (normalized signal) (即皆除以最高值) 在對數與線性座標下繪出，即可判定 FWHM 寬度。

(三) 「三級標準 (工作標準)」之建立

在建立「三級標準」的工作上，區分為功能檢定與校正係數決定。功能檢定的目的是在了解寬頻輻射計的餘弦效應、光譜反應函數等，是否顯著偏離原廠規範？若是，就需將儀器送返原廠修護；若否，就可進行校正係數的決定。而當校正係數確定後，就可送抵各測站現場，進行測站儀器校驗。本節各項實驗所使用之光源為 Oriel 6254 150W 氙燈 (Xenon lamp)，量測分析以相對值變化為探討重點，而非是絕對輻射量的變化，所以氙燈並不需附 NIST 檢測結果。

(1) 功能檢定

(A) 餘弦反應測量

實驗設計 (附圖省略) 為：以水平旋轉台與垂直旋轉台，組成全天空旋轉台。在穩定維持輻射計之受光面位於旋轉中心點的原則下，改變垂直天頂角，可探討儀器的餘弦效應。輻射輸出是以各不同角度下之測值，除以天頂角 90 度與方位角 0 度下之測值，即可得到相對量隨角度變化的情形。為檢測餘弦效應，每次調整轉盤 1° ，使輻射計偏離正射之光源，形成太陽斜射情況。原則上，餘弦修正函數僅適用於天頂角介於 $0\sim 60^\circ$ 間；在天頂角 $60\sim 70^\circ$ 間會出現測值偏高情形；而在 80° 則會出現明顯偏低測值 (Leszczynski et al., 1995)。此外，也可同時調整水平方位角，以檢測方位角效應。依 Leszczynski et al.

(1995)，在天頂角每 15° 調整時，可以同時量測每 45° 方位角改變下之輻射量。在天頂角小於 60° 下，方位角改變所造成的誤差約為 1~3%；天頂角為 75° 時，儀表上最後一個數字的變動就會造成約 2.5% 的改變。原則上，同一公司出產之輻射計，其餘弦效應與方位角效應特徵應相近。而由於方位角效應遠弱於餘弦效應，所以本研究暫不進行方位角效應測量。

(B) 光譜反應函數 (SRF, spectral responsivity function) 的檢測

將寬頻輻射計放置在單柵單色分光儀 (Oriol 74055 MS260i 1/4m Imaging Spectrograph) 的出光口外，距離 10 公分處，確定其感應部位均接受到紫外線輻射。並在 250~350nm 間，每 2nm 間隔量測一次。此外，亦使用已經國外標準實驗室校正過之矽光偵測器 (Oriol 71642 UV Enhanced Photodiode OPM Detector) 量測單色光，此二數值之比，即可得紫外線輻射計之光譜反應函數。實驗設計圖，在此先省略之。

所使用之 Oriol 矽光偵測器，必須先經國外實驗室認證。而在單色分光儀的入光口處需罩以 Oriol 59450 (Schott Model No. WG305) 濾光玻璃，以過濾掉小於 290nm 的光線。測量時，矽光偵測器被設定為對於 280~400nm 間每 1nm 間隔與 1nm 波段寬度之輻射量進行測量。如此，在每一個設定波段間，同時有矽光偵測器與寬頻輻射計的數據。將寬頻輻射計的數據除以矽光偵測器在某波段的數據，就得到該寬頻輻射計在此特定波段之 SRF。原則上，各儀器之 SRF 不應顯著偏離儀器公司所提供之數據。

(2) 校正係數決定

二級標準 Oriol 74050 單柵光譜儀，可與紫外線輻射計比對氬燈測量強度，以獲得輻射計之校正係數。實驗設計圖，在此先省略之。

原則上，光源前需罩以 Oriol 59450 (Schott Model No. WG305) 濾光玻璃以過濾掉小於 290nm 的光線。光源與測量儀器間之距離，大約 120cm。Oriol 74050 所得 290~400nm 間各波段之輻射通量密度乘以紅斑光譜權重函數後積分，其單位為經權重後之 $W m^{-2}$ ，視之為標準值，再轉換為 UVI 指數 ($= 25 mW m^{-2}$)。即可與被校驗之 Solar Model 501A UV-B 紫外線輻射計所測得之指數數值，相比較。也即將前項數值除以後項，就得到該被校驗儀器之校正係數。而經校驗後之儀器，就可視之為工作標準 (working standard)，送到各監測站與該站儀器相比對。

二、紫外線輻射計校驗結果分析

本研究在 92 年內按前節實驗程序，完成「參考標準」光譜儀的建立，以及 UVA 與 UVB 「工作標準」的建立，相關成果圖檔在此省略不述。此外，環保署將 20 台監測站及備用之輻射監測儀器分批送抵實驗室，以進行功能校驗與校正係數決定，其中二台無法通過功能檢驗而被送回原廠修理。圖 1 比較 18 台 UVB 輻射計之餘弦反應值相對於工作標準輻射計之餘弦反應值之差值比率，大致上，各台儀器之餘弦反應功能均能隨天頂角之變化而正常反應，約在天頂角大於 60° 後，差值比率才會大於 0.1。其中僅 UVB3876 在 50° 以上之誤差值略高於其他輻射計。圖 2 則比較 18 台 UVB 輻射計之光譜反應函數相對於工作標準輻射計之光譜反應函數之差值比率，由於該函數是呈現對數級變動，所以相對差值比率較大。在波長大於 320nm 以上，函數值幾近於 0，相對差值比率就呈現明顯上升。不過，就 290~320nm 區間內，差值比率大致可以接受。原則上，6 台輻射計 (UVB3888、UVB3884、UVB3877、UVB3876、UVB3850、UVB3555) 在 340nm 波段以上之光譜反應函數有略偏高的現象，有 1 台輻射計 (UVB3883) 於 340nm 波段以上之光譜反應函數較偏低。由於 340nm 以上波段之紅斑權值偏低，對於整

體指數之影響小於13.5%，因此當輻射計在低權值區段若有正常的光譜反應時，這些輻射計仍建議可於測站正常操作，但

未來3~6個月內將優先檢驗其變動情形。表一則比較這些儀器的校正係數，未來當定期追蹤，以了解其變動情形。

表1：各UVB輻射儀器之校正係數比較。

測站	UVB	追溯日期	校驗係數
新竹	3888	2004/1/4	0.8574
桃園	3876	2004/1/5	1.0419
陽明	3882	2004/1/9	1.2249
宜蘭	3886	2004/1/3	1.0697
仁愛	3530	2004/1/6	1.1518
板橋	3884	2004/1/6	0.9537
彰化	3878	2004/1/7	1.0674
阿里山	3880	2004/2/2	0.9717
斗六	3879	2004/1/9	1.1998
竹山	3850	2004/1/7	1.1432

測站	UVB	追溯日期	校驗係數
後甲	3529	2004/1/12	1.0270
屏東	3555	2004/1/7	1.1290
恆春	5785	2004/1/7	1.0215
小港	3883	2004/1/5	1.2136
品保室	3881		故障
	3887	2003/12/1	0.9249
	3877	2004/1/9	1.1243
	3554		故障
南區公司	3529	2004/1/7	1.0270
北區公司	5768	2004/1/7	1.2064

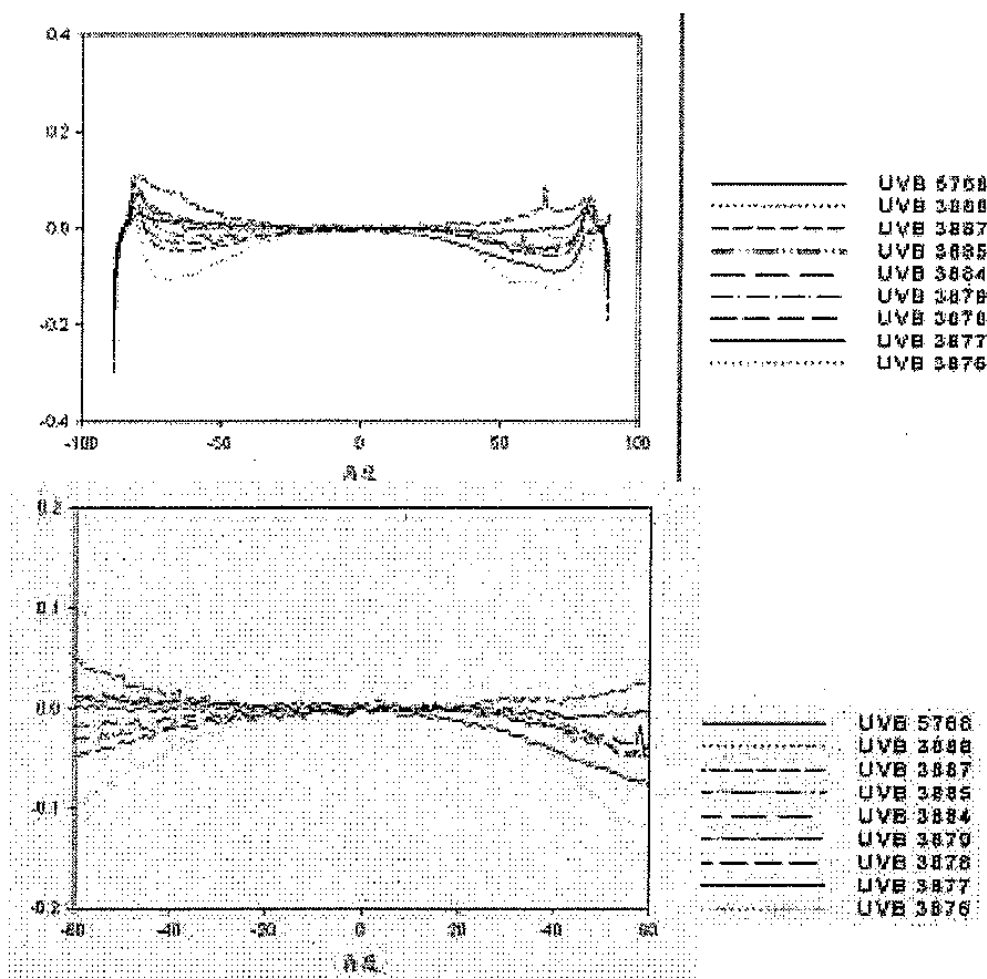


圖1：比較18台UVB輻射計之餘弦反應值相對於工作標準輻射計之餘弦反應值之差值比率。

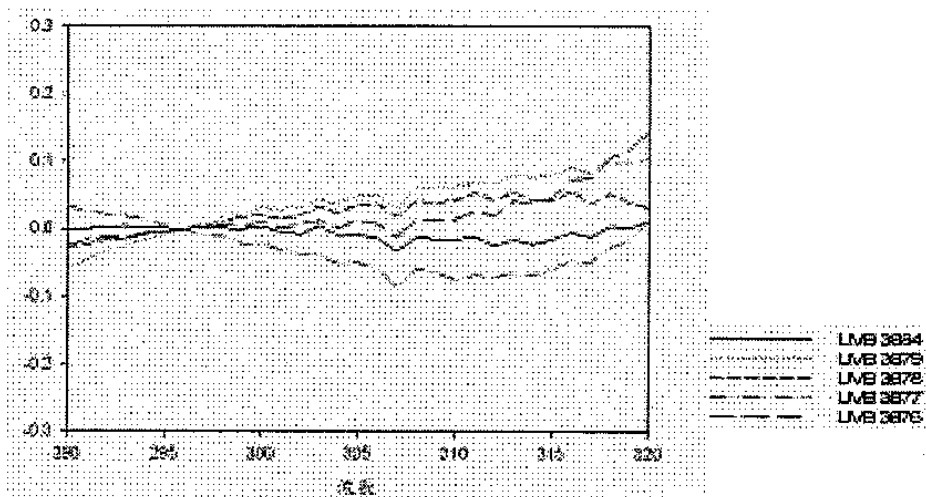
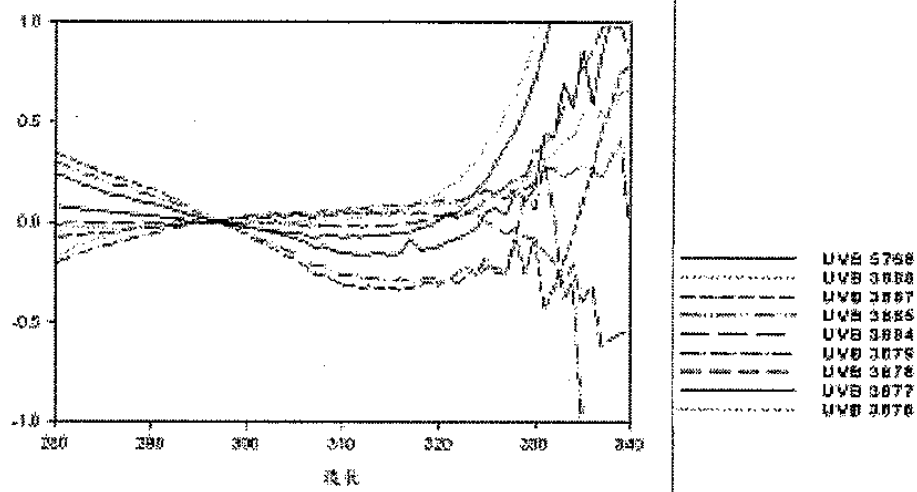


圖2：比較18台UVB輻射計之光譜反應函數相對於工作標準輻射計之光譜反應函數之差值比率。