

台灣地區太陽輻射量之校驗與長期趨勢

林博雄¹ 劉紹臣² 馮欽賜³ 周宗玄³ 葉瑞元³

¹ 台灣大學大氣科學系

² 中央研究院環境變遷中心

³ 中央氣象局

摘要

本文首先說明中央氣象局全天空太陽輻射儀器之室內校驗和戶外比對過程，所得到的 1982~2002 年期間全天空太陽量之修正係數，並據以探討台灣東西岸城市 and 山區測站所呈現的太陽輻射量長期變化趨勢。結果發現，全天空太陽輻射儀器至少兩年內需要定期和參考品進行校驗，才能確保 5% 誤差以內的規範要求。在 1982~2002 年期間，氣象局太陽輻射日累積量有 15.2%~32.6% 低估的系統性誤差。經過儀器壓電係數修正後和台北和台南測站兩地的同步觀測比較，太陽輻射日累積量的 26.3% 和 12.5% 低估數值，可以修正縮小到 2.6% 和 2.4%，但是都市測站的儀器環境遮蔽現象尚待解決。修正後的台灣東西兩岸城市和恆春、阿里山郊區測站的年平均太陽輻射日累積量 20 年氣候趨勢上，都呈現一致性的遞減趨勢 (~ -0.22.MJ/ m² year)。

Abstract

This study showed the work of indoor calibration and outdoor validation on CWB pyranometers, and gave the bias coefficients of the global solar radiation during 1982 to 2002. Based on the corrected dataset, We discussed the long-term variation of solar radiation at cities and wild mountain sites. We found

the pyranometer should be calibrated every two years at least to keep 5% uncertainty maximum for use. The underestimated bias of daily accumulated global solar radiation at CWB weather stations had 15.2~32.6% range in the past 20 years. Using the new voltage-irradiance conversion coefficient and the on-site intercomparison, the low bias of global solar radiation at Taipei (Tainan) reduced from 26.3(12.5%) to 2.6%(2.4%). The heavy exposure of pyranometer at cities needs to be overcome in the future. In the 20-year trend analysis, we found the annual mean daily accumulated solar radiation at all weather sites have similar decreasing slope (~ -0.22.MJ/ m² year).

一、前言

地表輻射能量收支是探討氣候變遷的主要方向之一，而太陽輻射量更是地表輻射能量收支的主要分量。世界氣象組織(WMO)於瑞士設立世界輻射中心(World Radiation Center, WRC)，來提供全天空太陽輻射儀(Pyranometer)和其他輻射儀器的世界標準級標準元件，以及制定輻射觀測作業的準則依據。WMO/WRC 推動的

BSRN(Baseline of solar radiation Network; Ohmura et al.,1998) 目的是建立全球各地地面輻射觀測量的參考測站，在亞洲地區僅有日本 Tateno 測站於 1996 加入，中國大陸以及台灣測候站都尚未加入 BSRN 網絡。90 年代初期美國太空航空總署(NASA)嘗試利用衛星遙測反演地表輻射量，卻發現美國本土 30 處測站的地表太陽輻射觀測資料品質不足，不得不轉向使用歐洲國家的觀測站資料。有鑑於此，美國商務部海洋大氣總署(NOAA)從 1993 年開始推動 Surface Radiation Budget Network (SURFRAD) 計劃，針對不同緯度和不同地理特徵環境，重新建立 6 處地面輻射觀測站來達成校驗衛星遙測資料之需求(Augustine and Deluisi,2000)。此外，美國能源部也在美國中部科羅拉多州建立太陽輻射研究實驗室(Solar Radiation Research Laboratory, SRRL)，提供戶外校驗輻射儀器的標準場所，並持續在奧克拉荷馬州的 Southern Great Planes 推動大氣輻射觀測計劃 (Atmospheric Radiation Measurement Program, ARM; Storkes et al.,1994)。這些實驗室和計劃的共同目標，都是要提供精準而且長期穩定的太陽輻射量觀測資料。

中央氣象局測候站早於 1896 年~1901 在全台幾個都市開始用約旦(Jordan)日照計紀錄日照時數，1950 年代至 1970 年代採用魯卑支日射儀(Robitzsch Actinograph)觀測日射量，1970 年代到 1980 年代改用日本 EKO 廠牌的 Pyranometer，又因輸出電壓範圍和地面自動測報系統規格不符問題，1980 年代開始逐一汰換成美國 Eppley Lab.公司出品的 Pyranometer

(陳，1997)。顏(1974)首度使用魯卑支日射計資料和雲量與日照率進行線性迴歸分析，林與蘇(1986)也利用日照時數推算台灣各地月平均日射量。1981 年到 1985 年期間，經濟部能源委員會委託中央氣象局，於全台 8 處測站進行太陽能潛勢利用評估，柳與馮(1989)即應用這些 Eppley Precision Spectral Pyranometer(以下簡稱為 Eppley PSP)資料來探討晴空天氣狀況下，台北、恆春和宜蘭等地晴空天氣下的全天空太陽輻射量的衰減量。林等(2001)透過中央研究院環境變遷中心(Research Center for Environmental Changes, 以下簡稱 RCEC)的「Particulate Matter and its Environmental Impacts in Taiwan」主題計劃，開始建立 Eppley PSP 室內校驗實驗室(林與陳，2001)，並自 2001 年開始，每年春天分別於台北和台南兩地進行法國 Cimel 多頻道窄頻太陽直射儀以及 Eppley PSP 觀測。在處理都市(台北和台南)或鄉野(蘭嶼)PSP 資料時，都不約而同發現 RCEC 觀測值顯著高於中央氣象局同一地點觀測值 25~50%，並且晴天差異程度大於陰雨天氣狀態。

由於 WMO 氣象觀測規範(WMO, 1996)建議測站太陽輻射量的小時累積和日累積的 95%信賴度的不確定度分別是 3~8%和 2~5%，陳(2001)估計 PSP 儀器飄移誤差、環境氣溫引發誤差和太陽天頂角變化引發的 cosine response 誤差總和約 2.7%，因此要滿足 WMO 的太陽輻射量觀測資料品質高標準規範 3% 數值，需要盡力消除 Pyranometer 的系統誤差。本文第二節描述台灣大學和 RCEC 如何與中央氣象局合作，所進行 Eppley PSP 定量化校驗方法，第三節討論 Eppley PSP

室內校驗與戶外比對結果，以及 PSP 在各測站受到的環境遮蔽程度。第四節再從其他氣象因子的統計相關分析，來檢視 PSP 品質的年際變化和可能之運用。

二、研究方法

本文參考美國 NOAA SURFRAD 計劃的年度例行輻射儀器校驗流程，將 Eppley PSP 儀器校驗分為：(1)室內暗房下，標準光源對於參考品和待校品的校驗(2)戶外環境下待校品和參考品的實測比對，以及(3)台北、台南測站 2003 年 PSP 校驗前後的觀測比較。

室內校驗部分，位於 RCEC 的光學校驗室乃是參考美國國家大氣研究中心 Atmospheric Chemistry Division (NCAR/ACD) 的 Atmospheric Radiation Investigation & Measurement Laboratory，以及 Oriel 公司標準光源配置說明書，設置了一間面積約 2*6 平方公尺、全天性空氣調節的標準光源操作室。室內備有 80*150*70cm 校驗實驗桌，桌腳可伸縮調整達到桌面水平需求。桌上備有 100 公分長度的光學滑軌，滑軌一端是標準光燈源，另一端為 Eppley PSP 測試平台，兩者高度相同並需精確地相距 50 公分；兩者中間為一黑色絕熱板架，板架中心有一可調口徑的光圈圓洞，燈源前後方和兩側都是黑色不吸光牆壁或布幔。標準燈泡電源由 Oriel 原廠指定的穩壓電源供應器，來提供漸變式 8.2 安培、1000 W 的電流，以達到光譜分布和熱能強度的正確輻射。燈泡由可伸縮支架固定在一組 XY 軸的滑動盤上，滑動盤再置放在有刻度的滑軌之上。滑軌另一端的待測 Eppley PSP 所接收的電壓，以一秒鐘時間解析度輸出到美國 Campbell Scientific Corp. CR10 記錄器。待測平台下方安置了數位步進馬達，由個人電腦控制並以一度的解析度來旋轉 Eppley PSP，以進行 Eppley PSP 對於受光角度改變的

cosine response。

戶外校驗部份，本文選擇在中央氣象局檢校中心 (Meteorological Instruments Center，以下簡稱 MIC) 檢校課辦公室屋頂 Pyranometer 量測比對平台進行。MIC 參考品是檢校課分別於 2002 年和 2003 年所購入的 Eppley PSP 新品，RCEC 參考品也在同一地點和 MIC 參考品進行比對。此外，MIC 維修課自 2002 年 7 月起輪流召回各測站 PSP，來和 MIC 參考品進行戶外比對。

各測站 PSP 儀器顯露度 (exposure) 調查方面，本文利用魚眼鏡頭搭配數位相機 (林等，2002) 現場調查西岸都會 (台北、台中、台南)、東岸都會 (花蓮、台東)、鄉村地區 (恆春) 以及山地 (阿里山、玉山) 測候站 PSP 安裝位置的環境遮蔽程度。

在其他氣象參數的獨立驗證方面，我們選擇日照時數和最高、最低溫度差距等兩項參數，來對太陽輻射量進行雙因子變異數分析和相關係數計算，並使用 t 檢定 95% 信賴度確認統計分析意義。

三、校驗比對結果分析

(1) PSP 室內校驗和戶外比對：

RCEC 光學校驗室經過數月時間的環境因子反覆測試，於 2003 年 6 月制定出「PSP 校驗標準作業程序 (SOP)」，經過這一 SOP 程序重複測試同一份 PSP 的差異僅有 0.27%，我們也證實 Eppley PSP 新品之間的差異僅有 2.3W/m^2 (0.85%)。MIC 的兩份 PSP 參考品經過 RCEC 室內校驗後都僅有 0.9W/m^2 (0.32%) 和 2.3W/m^2 (0.85%) 偏差。此外，RCEC 在台北和台南戶外各自運作 2 年和 1 年的 Eppley PSP，室內校驗後發現分別有 14.9W/m^2 (2.7%)

和 8.4 W/m^2 (1.6%) 的低估現象，這一數據顯示 PSP 至少兩年內需要定期和參考品進行校驗，才能確保 WMO 3% 誤差的規範要求。RCEC PSP 觀測都採用風扇底座，該底座風扇以 $30 \text{ feet}^3/\text{min}$ 轉速在 PSP 玻璃罩四周提供由下向上的氣流，來降低灰塵、細雨或露滴等對於 PSP 玻璃罩的黏附。我們發現這一附加設備可以在天頂角 60 度以上時增加 8.4 W/m^2 (1.4%)，日平均而言則約可增加 1.3 W/m^2 (0.7%)。我們預期這一風扇裝置在大都市或空氣污染嚴重地區能再顯著將低 Eppley PSP 系統性誤差。

表 1 是 MIC 召回全台灣測候站 Eppley PSP 進行校驗壓電係數調整結果，由於各測站 Eppley PSP 的原廠壓電係數文件並未保存完整，MIC 先前假定太陽輻射每一分鐘的積算量極大值是 0.08 MJ/m^2 (太陽常數 $1367 \text{ W/m}^2 * 60 \text{ seconds} = 0.0828 \text{ MJ/m}^2$)。經過這次召回校驗修正後，MIC 將每一測站的分鐘積算量極大值由原本 0.08 MJ/m^2 的常數修正為 0.091 MJ/m^2 (東吉島) 到 0.117 MJ/m^2 (台東) 不等。我們根據表 1 壓電係數和新 Full-scale 設定值的線性函數關係，反推過去 MIC 所設定的 0.08 Full-scale 設定值所對應的 Eppley PSP 壓電係數應為 $10.51 \mu\text{V} / \text{Wm}^2$ 。單從這一數據而不考慮其他隨機誤差因素，我們估算氣象局各測站 PSP 在 1982~2002 年期間，太陽輻射日累積量有低估 15.2%~32.6% 的系統性誤差。

(2) 測站 PSP 校驗前後的差異：

經過表 1 的壓電係數校驗修正，我們比較 2002 年和 2003 年的 4 月份 RCEC 和氣象局在台北、台南測站同地觀測的差異變化(圖 1)，發現 2002 年

(PSP 校驗前)氣象局在台北和台南分別低估了 26.3% 和 12.5%，到了 2003 年(PSP 校驗後)低估的差距縮小到 2.6% 和 2.4%。由於氣象局資料蒐集系統將分鐘觀測值立即由 W/m^2 轉換成 MJ/m^2 ，並且進行小數點下二位進位後再進行累加。RCEC 則是直接將每秒鐘原始資料儲存，最後才進行日累積量計算，因此氣象局數據略低於 RCEC 是可預期的。

(3) PSP 儀器顯露度調查：

根據 WMO 對於觀測坪儀器顯露度建議，12 度是勉為接受的環境遮蔽上限，表 2 是 9 處被訪測站的觀測坪和 Eppley PSP 儀器顯露度一覽，可以花蓮、恆春、阿里山和玉山的環境遮蔽較不嚴重，但是都市測站的 Eppley PSP 都被測站週遭建物環境或風力塔遮蔽嚴重，台北和台東測站顯露度偏高，都是緊鄰 PSP 北方的風力塔所造成；雖然塔架對於 PSP 沒有直接遮蔽之虞，但是塔架的陽光反射間接影響不容忽視。

四、太陽日累積量長期變化趨勢討論

由於太陽輻射量和日照時數有高度線性相關(林與蘇,1986)，2002 年中農業試驗所委託美國密西根州立大學 Dr. Joe Ritchie 進行太陽輻射日累積量分析，則採用日夜溫差來當作分析參數。因此本節也從測站的日照時數(簡稱 SH)以及最高、最低溫度溫差(簡稱 DT)來檢視太陽輻射日積量(簡稱 SW)的年際變化趨勢。經由雙因子變異數分析和 95% 信賴度區間檢定相關係數，我們發現無論哪一受訪測站或樣本時間長短，全部一致顯示 SW vs. (SH,DT) 的相關係數高於 (SW vs. SH) 和 (SW vs. DT) 的相關係數。表 3 詳列

九處測站自 1982 年到 2000 年期間 SW 和 SH 與 DT 複變數迴歸分析的相關係數，這些係數都大於 0.80 以及通過 95% 信賴度的 t 檢定。台東測站的 SW vs. (SH,DT) 相關係數變化在所有受訪測站之中最為穩定，除了 1990 年和 1993 年，逐年相關係數都保持在 0.9~0.95 之間。台北測站和花蓮測站次之，花蓮測站在 1997 年 PSP 數據品質有問題發生。其餘各測站的相關係數逐年變化大都維持在 0.85~0.9 之間。值得注意的是，嘉義測站在 1984 年 PSP 數據品質有問題發生；恆春測站在 1992、1993、1995 和 2000 年等四年 PSP 數據品質都有問題發生；阿里山測站在 1991、1992 連續兩年 PSP 數據品質有問題發生，1984、1985 和 1989 年數據品質也有疑問；玉山測站則在 1988 年和 2000 年 PSP 數據品質有問題發生。

我們選擇西部城市測站(台北、台中、台南)、東部城市測站(花蓮、台東)和郊區測站(恆春、阿里山)等七處的年平均太陽輻射日累積量，來討論 1982~2002 年不同都市化程度是否會在太陽輻射日累積量變化趨勢上顯露出來。圖 2 顯示這七處測站都呈現一致性的遞減趨勢($\sim -0.22 \text{ MJ/m}^2 \text{ year}$)。Liu et al. (2002) 分析台灣百年來日照時數趨勢變化，認為 1970 年之後台灣全面性發生日照時數遞減現象，可能是人為懸浮微粒造成區域性雲量增多所引起，本研究除了確認該一趨勢之外，也進一步提供太陽輻射日累積量的定量遞減率。

參考文獻

林憲德，蘇瑞泉，1986: 台灣地區月平均日射量分布之研究。《氣象學報》，

32, 99-104.

林博雄，林和駿，陳奕良，劉紹臣，2001: ACE-Asia 實驗期間蘭嶼懸浮微粒光學特性觀測之初步結果。第七屆全國大氣科學研討會，台北。

林博雄，陳奕良，2001: 地面短波輻射之精確量測及其應用。第七屆全國大氣科學研討會，台北。

柳中明，馮欽賜，1989: 近地面直達太陽服射通量受大氣懸浮微粒衰減分析。《大氣科學》，17, 169-186.

陳福來，1997: 窺豹台灣百年地面與高空氣象觀測及儀器沿革。《中華民國氣象學會年刊》，38, 5-25。

陳奕良，2001: 地面短波輻射之精確量測及其應用。台灣大學大氣科學研究所碩士論文，pp96。

顏俊士，1974: 台灣各地日射量估計。《大氣科學》，1, 72-80.

Augustine, J. A. and J. J. DeLuisi, 2000: SURFRAD-A national surface radiation budget network for atmospheric research. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **81**, 2341-2358.

Liu, S. C., C. H. Wang, C. J. Shiu, H. W. Chang, C. K. Hsiao and S. H. Liaw, 2002: Reduction in sunshine duration over Taiwan: causes and implications. *J. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Science*, **13**, 523-545.

Ohmura, A. H. Gilgen, H. Hegner, G. M. ler, M. Wild, E. G. Dutton, B. Forgan, C. Fr_鐵lich, R. Philipona, A. Heimo, G. K_霰ig-Langlo, B. McArthur, R. Pinker, C. H. Whitlock, and

Klaus Dehne, 1998: Baseline Surface Radiation Network (BSRN/WRMC), a new precision radiometry for climate research. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **79**, 2115 - 2136.

Stokes, Gerald M., Stephen E. Schwartz, 1994: The Atmospheric Radiation Measurement (ARM) Program:

Programmatic Background and Design of the Cloud and Radiation Test Bed. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **75**, 1201 - 222.

World Meteorological Organization, 1996: Guide to meteorological instruments and methods of observation. Sixth edition, WMO-No.8, Geneva.

表 1:氣象局檢校中心 Eppley PSP 校驗紀錄一覽

序號	校驗日期	壓電係數	拆回地點	拆回日期	安裝日期	安裝地點	新Full-scale*	原Full-scale
PSP001	91.7.25	9.58	基隆	92.8.26				
PSP002	91.7.31	8.45			91.9.2	彭佳嶼	0.107	0.08
PSP003	91.8.1	9.02			91.9.11	大屯山	0.1	0.08
PSP004	91.8.14	7.73			91.9.11	竹子湖	0.116	0.08
PSP005	91.8.16	9.63	檢校中心	91.9.23	91.9.24	東吉島	0.091	0.08
PSP006	91.8.28	7.54	基隆	91.8.27	91.9.12	局本部6F	0.119	0.08
PSP007	91.9.2	8.79	彭佳嶼	91.9.2	91.10.7	花蓮	0.102	0.08
PSP008	91.8.14	8.35	檢校中心	91.9.10	91.10.8	淡水	0.108	0.08
PSP009	91.8.15	8.79	局本部6F	91.9.12	91.10.8	永康	0.102	0.08
PSP010	91.8.16	9.26	大屯山	91.9.11	91.10.8	七股	0.097	0.08
PSP011	91.8.17	8.5	竹子湖	91.9.11	91.10.8	南區中心	0.106	0.08
PSP012	91.9.27	8.58	東吉島	91.9.27	91.10.17	高雄	0.105	0.08
PSP013	91.10.4	7.91	花蓮	91.10.8	91.10.31	鞍部	0.114	0.08
PSP014	91.10.4	7.95	淡水	91.10.8	91.11.5	蘇澳	0.113	0.08
PSP015	91.10.4	9.07	七股	91.10.9	91.11.6	宜蘭	0.099	0.08
PSP016	91.10.4	7.75	永康	91.10.9	91.11.7	馬祖	0.116	0.08
PSP017	91.11.7	8.26	高雄	91.10.18	91.12.4	台中	0.109	0.08
PSP018	91.11.8	8.53	鞍部	91.10.31	91.12.4	日月潭	0.106	0.08
PSP019	91.11.8	7.98	蘇澳	91.11.5	91.11.27	嘉義	0.113	0.08
PSP020	91.11.9	9.13	宜蘭	91.11.6	91.11.28	阿里山	0.099	0.08
PSP021	91.11.13	8.62	馬祖	91.11.7	91.12.16	蘭嶼	0.104	0.08
PSP022	91.12.6	8.03	阿里山	91.11.29	92.1.21	梧棲	0.112	0.08
PSP023	91.12.6	8.64	嘉義	91.11.27	92.1.21	新竹	0.104	0.08
PSP024	91.12.6	8.38	台中	91.12.5	92.2.13	台東	0.107	0.08
PSP025	91.12.6	7.97	日月潭	91.12.4	92.3.12	板橋	0.113	0.08
PSP026	91.12.23	8.63	蘭嶼	91.12.17	92.2.13	大武	0.104	0.08
PSP027	92.7.11	8.97	玉山	92.1.21	92.3.10	中心庫房		0.08
PSP028	92.1.21	7.77	中心庫房	92.1.21	92.3.17	成功	0.116	0.08
PSP029	92.1.21	8.52	中心庫房	92.1.22	92.3.25	恆春	0.106	0.08
PSP030	92.3.5	8.61	中心庫房	92.1.22	92.4.4		0.105	0.08
PSP031	92.3.5	9.01	新竹	92.1.21	92.3.31	檢校中心	0.1	0.08
PSP032	92.4.24	8.24	梧棲	92.1.22	92.8.26	基隆	0.109	0.093
PSP033	92.4.24	8.3	大武	92.2.13				
PSP034	92.4.24	7.68	台東	92.2.13			0.117	0.08
PSP035	92.4.24	8.05	恆春	92.3.25	92.6.16	玉山	0.112	0.107

表 2：中央氣象局測站觀測坪和輻射儀器顯露度一覽 (單位：度)

測站	觀測坪	輻射儀器
台北	21.7	29.3
台中	19.7	14
嘉義	5.2	12.9
台南	16.5	none
恆春	9.8	5.8
花蓮	13.9	6.3
台東	14.8	26.6
阿里山	17.4	5.3
玉山	6.7	6.7

表 3：氣象局測候站太陽輻射日累積量(SW)和日照時數(SH)以及日最高溫最低溫溫度差距(DT)的複迴歸相關係數(R)一覽。

測站	R (SW vs.(SH,DT))	年代	備註
台北	0.91	1982-2000	
台中	0.86	1982-2000	
嘉義	0.86	1982-2000	
台南	0.87	1982-2000	
花蓮	0.91	1984-2000	
台東	0.93	1981-2000	
恆春	0.86	1987-2000	
阿里山	0.87	1982-2000	缺 1991
玉山	0.88	1993-2000	

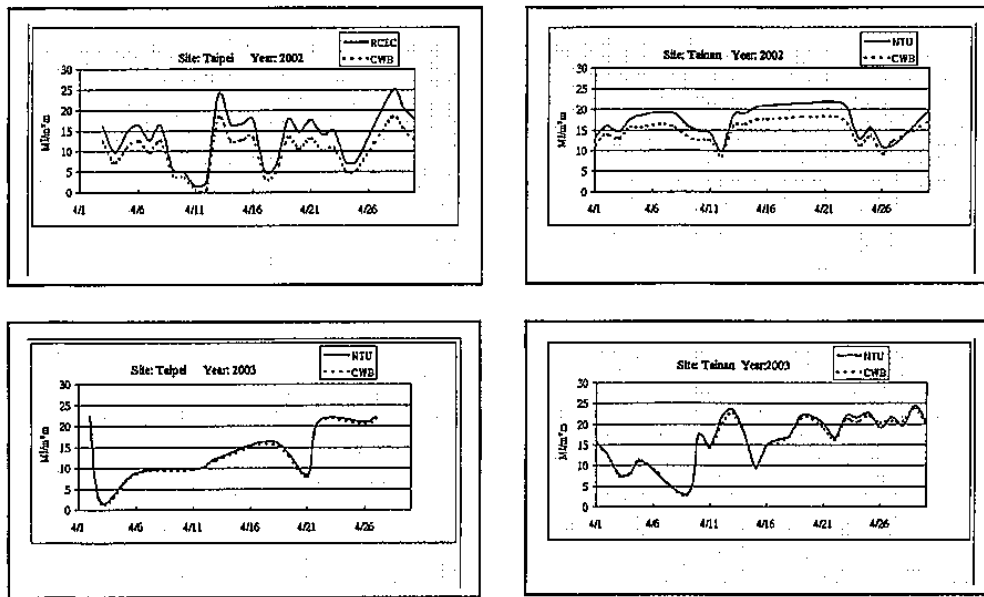


圖 1：2002 年和 2003 年 4 月台北(左)和台南(右)RCEC 和氣象局太陽輻射日累積量比較圖。

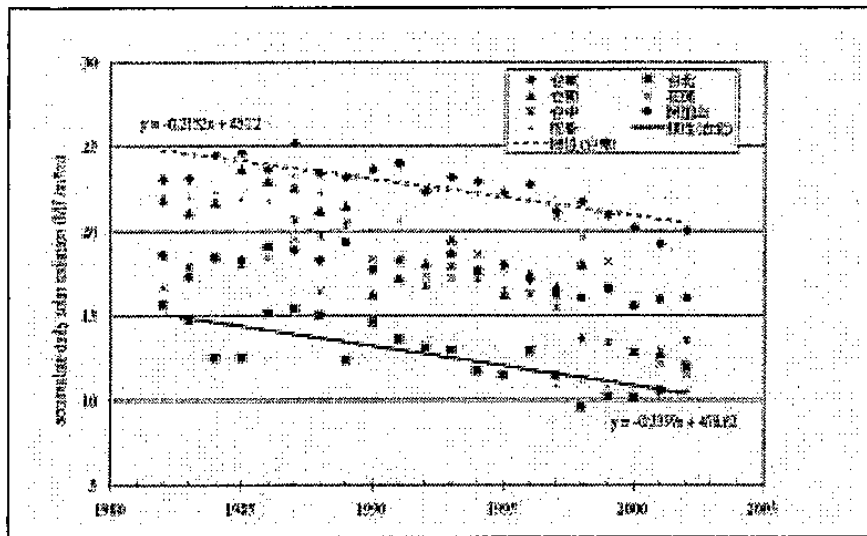


圖 2：1982 年到 2002 年中央氣象局測站(台北、台中、台南、花蓮、台東、恆春和阿里山)年平均太陽輻射日累積量變化趨勢。