



香港天文台

HONG KONG OBSERVATORY

Reprint 576

香港的蒸發量分析及其長期趨勢

李新偉、陳啓榮

第十九屆粵港澳氣象科技研討會，
中國，廣東陽江，2005年3月1-3日

香港的蒸發量分析及其長期趨勢

李新偉 陳啟榮
香港天文台

摘要

香港天文台於 1957 年在京士柏氣象站裝設了兩套 A 型 (Class-A) 蒸發皿，翌年開始定期測量蒸發皿蒸發量。有關蒸發皿所得的數據，在 1976 年進行了 1958 至 1975 年間的數據分析。隨著數據的累積，我們對 1970 至 2003 年所得的數據進行了研究，結果顯示測量到的蒸發量在近數十年間有逐漸下降的趨勢。本文探討此趨勢，嘗試找出部份原因，並對所用的蒸發量公式作出討論。

Analysis of Evaporation and its Long Term Trend in Hong Kong

S.W. Li and J.K.W. Chan
Hong Kong Observatory

Abstract

The Hong Kong Observatory installed two Class-A evaporation pans at the King's Park Meteorological Station in 1957, and started regular measurements of pan evaporation the following year. An analysis of the pan evaporation data between 1958 and 1975 was made in 1976. With the acquisition of more data, we recently conducted a study on the data between 1970 and 2003. Results showed that the measured evaporation followed a decreasing trend over the past few decades. This paper discusses the observed trend and attempts to identify some of the contributing factors. The formulae used for deriving evaporation are also discussed in the paper.

1. 引言

香港的蒸發皿蒸發量（以後通稱「蒸發量」）測量工作有近五十年歷史。香港天文台在 1957 年於京士柏氣象站裝設了兩套 A 型（Class A）蒸發皿，並於 1958 年開始測量蒸發量。自此以後觀測工作從沒有間斷，至現時累積有四十六年的數據。

天文台的同事在 1976 年曾對 1958 年至 1975 年的蒸發量數據進行分析〔文獻 1〕。本文章在這基礎上分析了 1970 年至 2003 年的數據，評估蒸發量在這三十多年來的變化趨勢，並嘗試找出引致這變化的部份因素。文章中亦討論了蒸發量的計算公式，並提出修訂。

2. 香港的蒸發量

2.1 觀測蒸發量

京士柏氣象站位於北緯 22°19'，東經 114°10'，海平面以上 66 米。蒸發皿為不銹鋼製圓盆，直徑 1207 毫米，深 254 毫米，水平安裝在橫置於草坪上的木柱上。皿內注有清水，並設有一個固定高度點，在蒸發皿口緣以下 50.8 毫米，作為水位高度參考。工作人員每天早上 11 時進行蒸發量測量，按是否曾下雨及雨量的多寡，加添或抽取適量清水，使水位回復至固定高度點。蒸發量以下列公式計算：

$$E_o = W_a + RF \text{ 或 } E_o = RF - W_r$$

當中 E_o 為剛過去二十四小時的蒸發量（毫米）

W_a 為所加添的水量（毫米）

W_r 為所抽取的水量（毫米）

RF 為剛過去二十四小時的雨量（毫米），

由蒸發皿側的一個直徑 203 毫米普通雨量器測量

2.2 計算蒸發量

蒸發在氣象學上主要指液態水轉變成為水汽。當空氣的相對濕度低於百份之一百，就會出現蒸發過程。這個過程受氣象因素影響，所以可以利用其他氣象參數，計算蒸發量。文獻〔1〕按空氣動力原理和能量平衡原理，以 1958 年至 1975 年的數據為基礎，導出兩組蒸發量公式。

空氣動力原理

按照空氣動力原理，蒸發量直接受蒸發皿上的空氣及其移動情況影響，即與風速、水面的水汽量及空氣濕度有關。下列的公式，以飽和水汽壓和風移動量的平均值，計算月蒸發量。

$$E_{aero} = (10.97 + 0.043 U)(e_w - e_d) \quad (1)$$

當中 E_{aero} 為計算的月蒸發量（毫米每月）

U 為該月平均日風移動量（公里每日）

e_w 為對應於該月的平均蒸發皿水溫的飽和水汽壓（百帕）

e_d 為對應於該月的平均露點的飽和水汽壓（百帕）

能量平衡原理

彭曼（文獻〔2〕）考慮了能量平衡原理和利用經驗空氣動力方法，計算了一個自由水面的蒸發量如下：

$$E_p = \frac{AH + CE_a}{A + C} \quad (2)$$

當中 E_p 為自由水面蒸發量

A 為在日平均氣溫值的飽和水汽壓隨氣溫變化的曲線斜率

H 為水面的淨輻射

C 為單位轉換常數

E_a 為按空氣動力原理計算的蒸發量，跟公式 (1) 的 E_{aero} 相似，
用以下公式計算：

$$E_a = (10.97 + 0.043 U)(e_a - e_d) \quad (3)$$

當中 e_a 為對應於平均氣溫的飽和水汽壓

根據公式 (1)、(2) 和 (3)，利用京士柏氣象站的平均氣溫、平均露點、日照時間、太陽總輻射量和風移動量，便可以計算該站的蒸發量。

3. 數據來源、處理及分析

本文利用了1970 至2003 年京士柏氣象站所錄得的每日蒸發量計算每年的平均月蒸發量。如因天氣惡劣，不能進行觀測，或因雨勢太大而出現蒸發皿滿溢等情況，使當日的蒸發量出現缺失，我們便會按照之前的公式 (1)，利用有關的氣象參數估算當日的蒸發量。

按照公式 (1)、(2) 和 (3)，蒸發量受氣溫、露點、對應於蒸發皿水溫的飽和水汽壓、日照時間，太陽總輻射量和風移動量等影響（文獻 [1]）。為找出影響蒸發量的主要因素，本文亦計算了 1970 至 2003 年每年的日平均氣溫、日平均蒸發皿水溫和露點的飽和水汽壓差（以後通稱「飽和水汽壓差」，即 $(e_w - e_d)$ ）、平均日風移動量和平均日太陽總輻射量，並分析它們的趨勢。因為太陽總輻射量大致能反映日照時間的影響，為避免重覆，所以本文沒有為日照時間進行趨勢分析。

京士柏氣象站的日平均溫度是以當日的最高及最低氣溫的平均值計算，由蒸發皿附近的百葉箱內的白金絲電阻溫度計測量。百葉箱內的濕球白金絲電阻溫度計測量露點，每日的平均露點是以當日上午 8 時及下午 8 時的平均值計算。每日平均水溫為當日最高及最低蒸發皿水溫的平均值。蒸發皿內近水面處放有一個浮子，裝上一對最高及最低溫度表，量度皿水的最高及最低溫度。溫度表置浮子之下，避免受到陽光直接照射而影響數據。離蒸發皿口緣 152 毫米高的位置亦裝有一個計數風杯風速表，記錄每日的風移動量。在附近建築物天台裝有電熱總日射表，測量每日的太陽總輻射量。

計算及測試長期趨勢的統計方法有很多，包括參數化方法如線性迴歸和 t-測試，及非參數化方法如Mann-Kendall測試等。本文採用文獻〔3〕及〔4〕內所提及的線性迴歸方法，用最小二乘法求取迴歸線，以迴歸線的斜率作為趨勢的量值，並利用雙尾 t-測試，檢驗趨勢是否達5%顯著水平。測試所用的 t統計量為：

$$t = r \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}}$$

當中 r 為相關系數

n 為數據點的數目

4. 結果

京士柏氣象站的每年月平均蒸發量，日平均飽和水汽壓差、平均月太陽總輻射量、日平均氣溫和平均日風移動量在 1970 至 2003 年的趨勢變化總結於圖一至五和表一，並詳細討論如下。

京士柏氣象站的蒸發量在過去的三十四年（1970 至 2003 年）大致上呈現下降趨勢（圖一），與世界大部份地區的趨勢相符（文獻〔5〕及〔6〕）。月蒸發量以每年約 1.3 毫米的速率下降，t-測試達 5%顯著水平。按每十年的平均值計算（表一），1990 年代的月蒸發量比 1970 年代減少 27%（即 36 毫米）。蒸發量於 1999 至 2003 年稍為回升。由於回升現象剛剛出現，需要未來日子更多數據才可確定這個趨勢。

蒸發是水份子離開水體表面變成空氣中水汽的過程，很明顯與水面和空氣中的水汽量差異，即水面和空氣的飽和水汽壓差有關。飽和水汽壓差愈大，蒸發速度愈高，反之亦然。1970 至 2003 年的日平均飽和水汽壓差有上升趨勢，但 1990 年代及之前的趨勢並不顯著，t-測試未達 5%顯著水平。升幅主要只集中在 1999 年之後（圖二及表一），跟蒸發量同期的上升趨勢吻合，相信是近年蒸發量回升的因素之一。

蒸發需要熱能，即潛熱，而太陽是地球的主要熱能來源，所以蒸發速度亦受太陽輻射量影響。1970 至 2003 年的每年月平均太陽總輻射量有下降趨勢（圖三），速度為每年 2.12 百萬焦耳每平方米每月，總體趨勢亦達 5%顯著水平。按每十年的平均值計算，1990 年代的月平均太陽總輻射量比 1970 年代的少 14%，幅度符合文獻〔3〕的結果，主要原因相信是雲量增加，而後者亦與都市化現象中凝結核濃度增加有關。圖三可見下降在 1970 年代較為顯著，之後變化不大，在 2000 年以後則稍為回升。

京士柏氣象站的月平均氣溫在過去的三十多年逐漸上升（圖四），幅度是每年 0.029 度，趨勢亦達 5%顯著水平。1990 年代的平均氣溫比 1970 年代的高 1.7%（即 0.4°C）。氣溫上升會使空氣的飽和水汽壓上升，間接令飽和水汽壓差增大，加速蒸發過程（文獻〔1〕）。京士柏氣象站的平均氣溫上升，相應地應令該站的蒸發量增加，但這似乎跟蒸發皿所得數據的趨勢相反。文獻〔6〕指出蒸發皿測量的蒸發量是在有充足水份供應情況下的結果，這可能跟實際地面的蒸發量有所出入，尤其是在較乾燥

的地面，兩者的趨勢並不一定是相符，有時甚至是相反的。因為假定其他因素不變，氣溫上升會令地面蒸發量增加，引致空氣中的水汽增加，間接降低了蒸發皿蒸發量，所以京士柏氣象站氣溫上升亦可能是蒸發皿蒸發量遞減的其中一個因素。

蒸發速度亦與風速有關。風可以將水體表面的飽和空氣帶走，代之以較乾空氣，使飽和水汽壓差增大，加快蒸發過程（文獻〔1〕）。京士柏氣象站蒸發皿附近的風移動量在過去的三十多年間持續下降（圖五），趨勢是本文所分析的各個氣象參數中最顯著的一個。1970 年至今，平均日風移動量以每年 2.86 公里的速度下降，趨勢達 5%顯著水平。2000 至 2003 年的平均值比 1970 年代的十年平均下降達 66%，由 108 公里每日減至 37 公里每日。

飽和水汽壓差、太陽總輻射量、氣溫及風移動量在過去三十多年的趨勢大致都和蒸發量的變化吻合，但有些參數的貢獻較為顯著。本文嘗試利用公式（1）及（2）計算蒸發量，測試這些參數的變化是否可以解釋蒸發量的趨勢。

圖六是按空氣動力學原理和能量平衡原理，即分別為公式（1）及（2），推算的蒸發量，及觀測結果的比較。圖中可見由 1980 年代中開始，觀測值都普遍比空氣動力學原理和能量平衡原理的計算值為低。

以空氣動力原理為例子，公式（1）中蒸發量主要跟飽和水汽壓差和風移動量有關。從十年平均可見，1990 年代的蒸發量比 1970 年代下降了 27%，但同期飽和水汽壓差卻沒有顯著變動，可見風移動量可能是蒸發量下降的主要因素。另一方面，雖然風移動量下降了 57%，但公式（1）卻把 1990 年代的蒸發量高估了 11%（表一），所以該公式中蒸發量與風移動量的線性關係不一定能全完反映風移動量的貢獻。

文獻〔1〕曾提及當濕空氣移走的速度大於蒸發速度時，再增加風速亦不能增加蒸發。當風速較低時，風移動而促進蒸發的效率較高。但當風速升至某一程度，往後效率的上升速度會逐漸減慢。因此我們相信指數關係可能更能描述蒸發量及風移動量的關係。

參照公式（1），我們把 1970 至 1999 年的平均月蒸發量和平均飽和水汽壓差進行曲線擬合，得到下列指數關係：

$$\frac{E_{aero}}{e_s - e_d} = 3U^{0.3512} \quad (4)$$

為了驗證以上結果，我們利用公式（4）計算了 2000 至 2003 年的蒸發量。圖七比較了計算結果及同期的觀測結果，可見公式（4）的結果較為接近觀測值，亦符合其變化趨勢。表二總結了比較結果。

我們亦把公式（4）的指數關係用於能量平衡原理的公式（2）上。圖八比較了 2000 至 2003 年的計算結果及觀測值，情況跟空氣動力原理的相似，在大多數的情況下指數關係的計算結果較線性關係更接近觀測值，每年月平均的計算和觀測值的差異由最高的 10% 下降至 3% 或以下（表二）。

5. 討論

在過去的三十多年（1970 至 2003 年），京士柏氣象站的蒸發量呈大致下降的趨勢，與世界其他大部份地區的趨勢相符。影響蒸發量的幾個主要氣象參數中，風移動量可能有最大貢獻。

在不同風速時，空氣移動影響蒸發速度的效率不同，所以指數關係可能較線性關係更能描述蒸發量和風移動量的關係。我們利用 1970 至

1999 年的數據，得出了新的指數關係。而驗證結果顯示，按指數關係計算的蒸發量，跟觀測結果較為接近。

鳴謝

作者就李本滢博士、潘海濤先生及徐傑志先生所提供的寶貴意見，特此致謝。

參考文獻

- [1] Chen, T.Y., 1976, Evaporation and evapotranspiration in Hong Kong, Hong Kong Observatory, Technical Note No. 42.
- [2] Penman, H.L., 1950, “Evaporation over the British Isles”, *Quart. J. Roy Meteor. Soc.*, 76(330), 372-383.
- [3] Leung, Y.K., K.H. Yeung, E.W.L. Ginn, W.M. Leung, 2004, *Climate Change in Hong Kong*, Hong Kong Observatory, Technical Note No. 107.
- [4] Easterling, D.R. B. Horton, P.D. Jones, T.C. Peterson, T.R. Karl, D.E. Parker, M.J. Salinger, V. Razuvayev, N. Plummer, P. Jamason, C.K. Folland, 1997, “Maximum and Minimum Temperature Trends for the Globe”, *Science*, 277, 364-367.
- [5] IPCC, 2001, “Climate Change 2001: The Science of Climate Change”, Contribution of the Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881 pp.
- [6] Brutsaert, W., M.B. Parlange, 1998, “Hydrologic cycle explains the evaporation paradox”, *Nature*, 396, 30.

表一 蒸發量及其他氣象參數的趨勢和計算結果

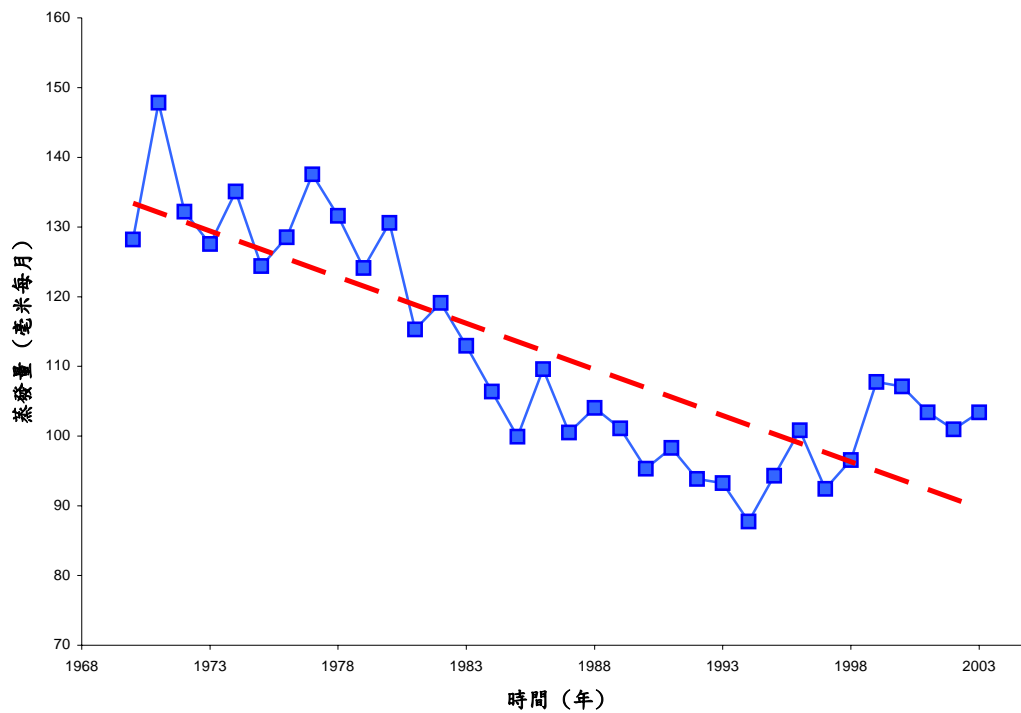
		1970- 1979	1980- 1989	1990- 1999	2000- 2003	趨勢 (每年)
平均月蒸發量	(毫米每月)	132	110	96	104	-1.32
日平均飽和水汽壓差	(百帕)	8.4	8.7	8.3	9.8	+0.026
平均月太陽總輻射量	(百萬焦耳 每平方米每月)	446	386	384	397	-2.12
日平均氣溫	°C	23.0	23.1	23.4	23.9	+0.029
平均日風移動量	(公里每日)	108	67	46	37	-2.86
蒸發量計算結果						
空氣動力原理	(毫米每月)	130	120	107	123	--
能量平衡原理	(毫米每月)	123	107	106	111	--

表二 蒸發量的觀測結果及計算結果比較 (2000 至 2003 年)

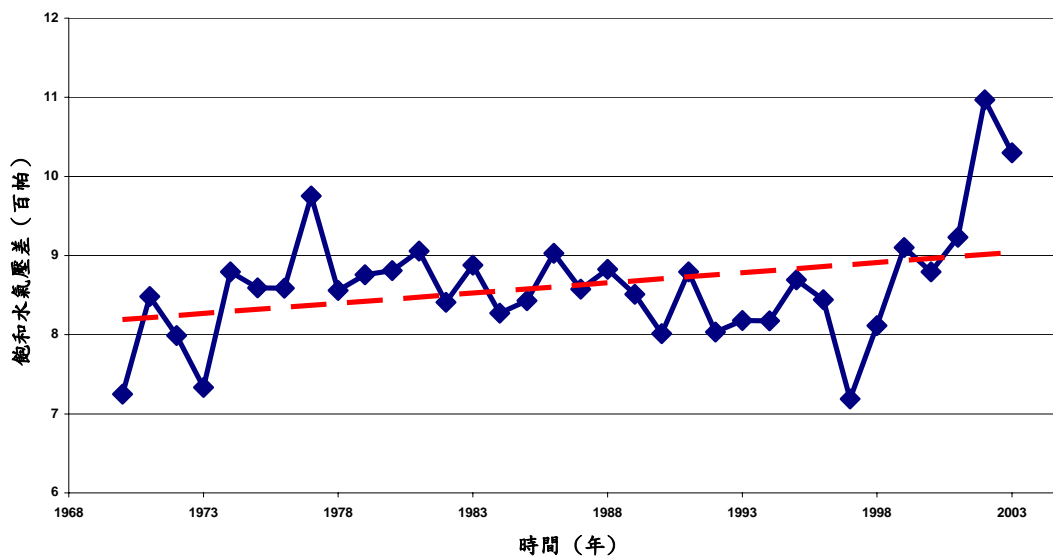
	月平均蒸發量 (毫米每月)				平均
	2000	2001	2002	2003	
觀測結果	107	103	101	103	104
空氣動力原理計算結果*					
線性關係	113 (+6%)	115 (+12%)	135 (+34%)	129 (+25%)	123 (+18%)
指數關係	98 (-8%)	97 (-6%)	109 (+8%)	110 (+7%)	104 (0%)
能量平衡原理計算結果*					
線性關係	111 (+4%)	110 (+7%)	111 (+10%)	113 (+10%)	111 (+7%)
指數關係	105 (-2%)	102 (-1%)	102 (+1%)	106 (+3%)	104 (0%)

註：

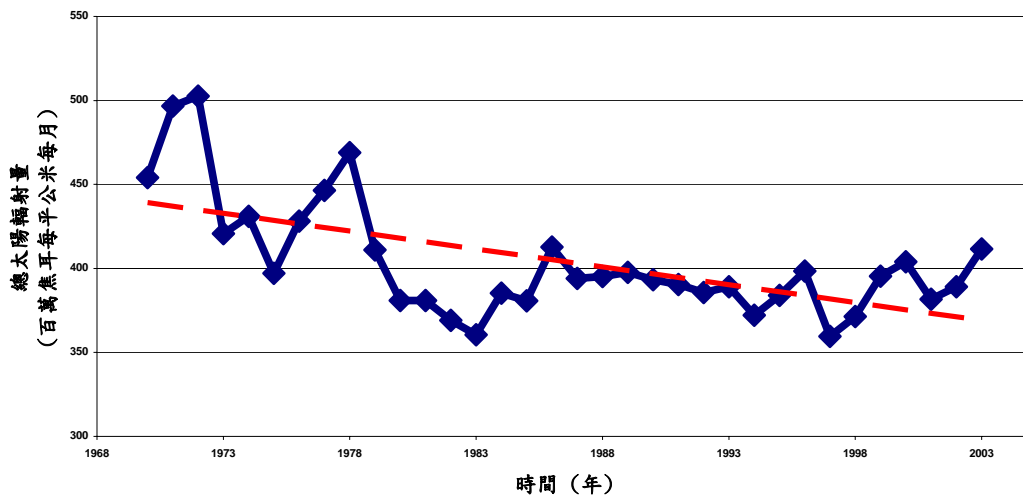
* -- 括號內的是與觀測結果的差異。



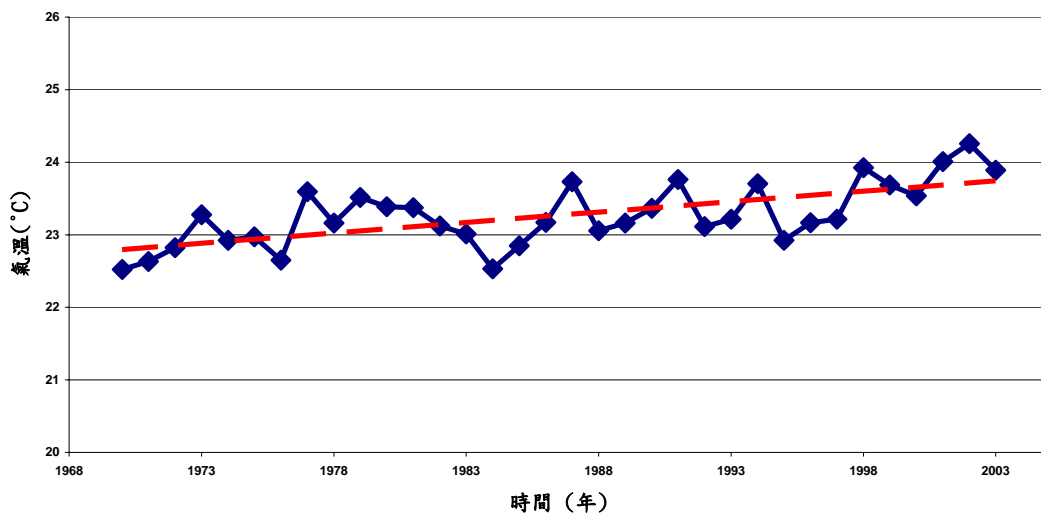
圖一 京士柏氣象站月平均蒸發皿蒸發量 (1970 至 2003 年)



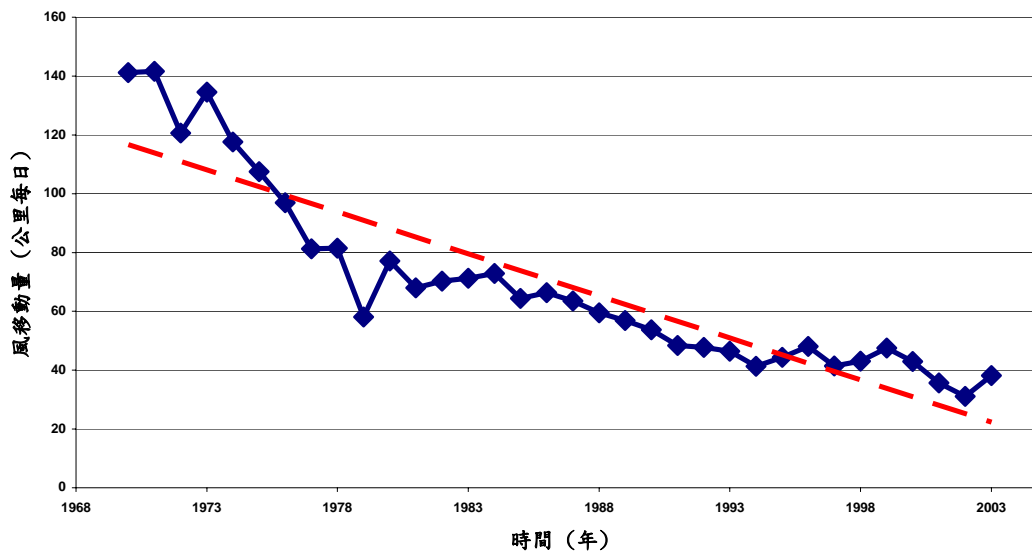
圖二 京士柏氣象站日平均飽和水汽壓差 (1970 至 2003 年)



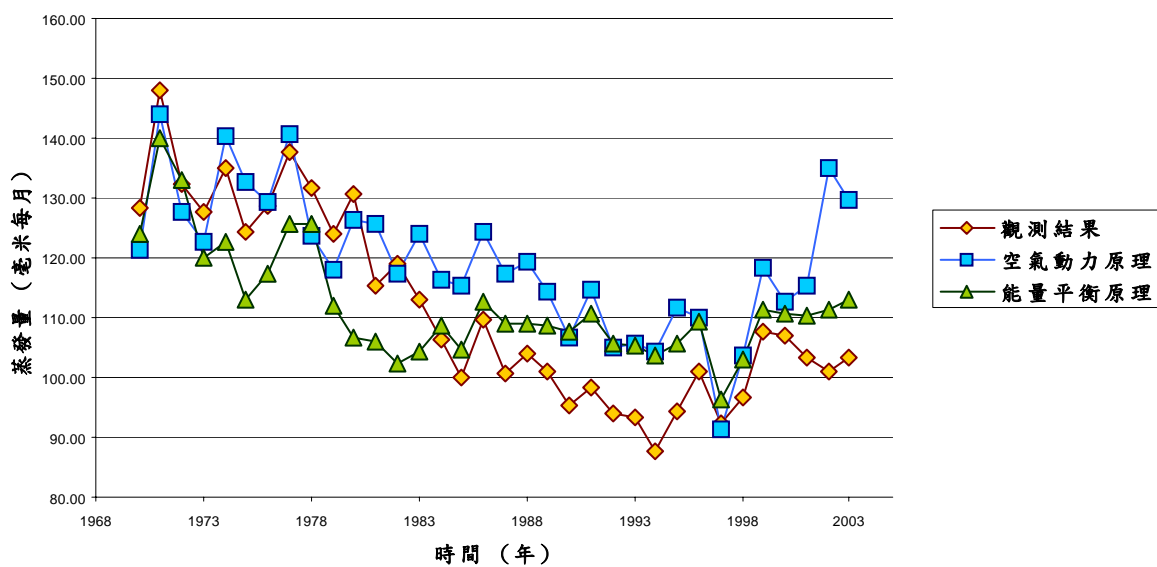
圖三 京士柏氣象站月平均太陽總輻射量 (1970 至 2003 年)



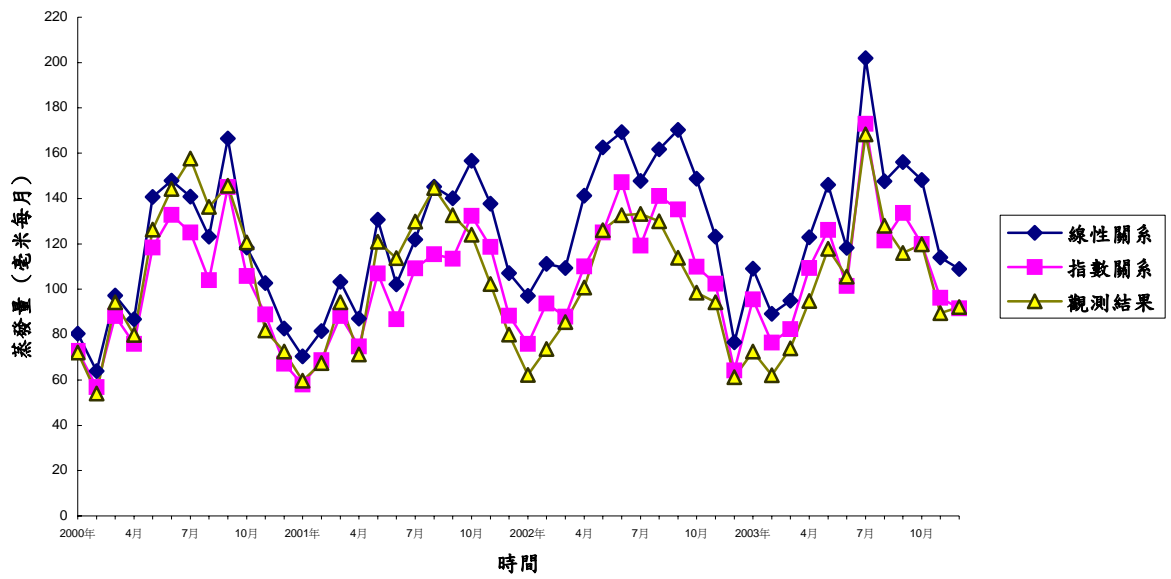
圖四 京士柏氣象站日平均氣溫 (1970 至 2003 年)



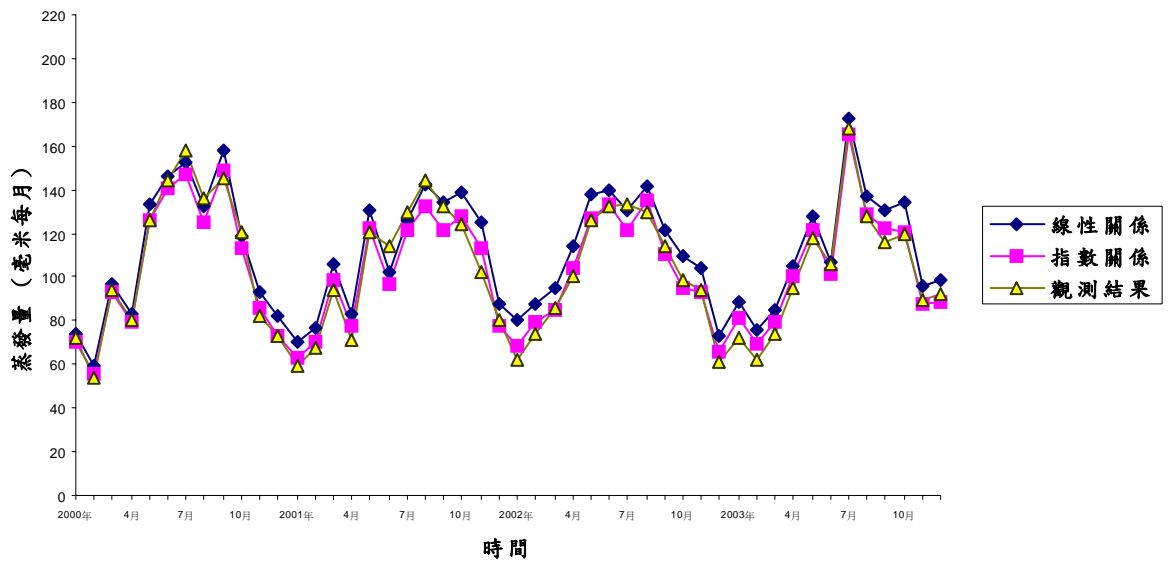
圖五 京士柏氣象站平均日風移動量 (1970 至 2003 年)



圖六 蒸發量的觀測結果和計算結果比較 (1970 至 2003 年)



圖七 以空氣動力原理計算的蒸發量 (2000 至 2003 年)



圖八 以能量平衡原理計算的蒸發量 (2000 至 2003 年)