

溫室環控工程決策支援軟體之建立 III. 數位化濕氣圖及應用

方 焯¹, 簡志樺²

國立台灣大學生物產業機電工程學系教授¹, 前研究生²

摘要

溫度與濕度控制是溫室環境控制重點，所有涉及空氣中任何熱力性質的計算譬如通風，降溫，加溫與加濕，除濕等，均需用到濕氣圖。濕空氣熱力特性之間的計算公式在美國農業工程師協會(ASAE)與美國加熱冷凍空調工程師協會(ASHRAE)所編撰的技術手冊中均有列出。過去學界依此些計算式建立的 DOS 版軟體較常被使用的包括美國康乃爾大學所建的 PLUS 與台灣大學所建的 PsyChart 軟體。隨著個人電腦作業系統的演進，此兩套軟體即將被淘汰，有必要重新建立適用於視窗版的軟體。本文旨在介紹使用 Visual C++所撰寫的新版數位化濕氣圖軟體，此軟體不僅適用於一般環境控制工程領域，由於新增更多與植物栽培及動物熱緊迫相關的表格與計算功能，所以更適用於環控農業領域之教學，研究與實務分析之用。

關鍵詞： 濕氣圖、熱力學性質、濕空氣、決策支援、環控農業

Development of decision support software for greenhouse environmental control. III. Digital psychrometric chart and its applications

Wei Fang and Chih Hwa Chien

Department of Bio-Industrial Mechatronics Engineering
National Taiwan University

Abstract

Temperature and humidity control play important roles in greenhouse environmental control. Engineering calculations of ventilation, cooling, heating, humidification and dehumidification processes can be best described by using psychrometric chart. Researchers developed software based on equations describing relationships among thermodynamics properties of moist air can be found published in fundamentals of ASAE and ASHRAE. The two most popular software was 'PLUS', developed by Prof. Albright of Cornell Univ., and 'Psychart' developed by Author at National Taiwan University. The advancement of the computer operating system has made DOS based software obsolete. The purpose of this paper is to describe the Windows based new 'Psychart' software developed using Visual C++. More features include fundamentals and applications in both greenhouse and animal housing engineering have been added to the software, thus making it a better tool to be used in the field of CEA (Controlled Environment Agriculture).

Keywords: Psychrometric Chart, Thermodynamic Properties, Moist Air, Decision Support, Controlled Environment Agriculture

一 前言

空氣與水氣組成的混合氣體簡稱「濕空氣」或「濕氣」。基於濕空氣具有的以下作用，濕空氣與許多種的處理過程均直接相關，譬如加熱、通風與空調(HVAC)，食品儲藏，堆肥(有氧發酵)，乾燥與脫水等。

1. 做為輸送水蒸氣、氧氣與二氧化碳的介質
2. 做為熱傳遞的介質
3. 做為水蒸氣的來源(source)或去處(sink)
4. 做為熱的來源或去處

濕空氣熱力學(Psychrometrics)專門探討由空氣與水氣組成的混合氣體，環境控制涉及空氣溫度、濕度與成分等的調節，濕空氣熱力學為必修的基礎。濕空氣可作為熱與水氣的來源(source)與去處(sink)，熱與水氣直接影響空氣的溫度與濕度。在熱力學性質(psychrometric properties)中，空氣的溫度包括乾球溫度(T_{db})、濕球溫度(T_{wb})與露點溫度(T_{dp})，濕度則包括絕對濕度(AH，或稱濕度比)與相對濕度(RH)。其他的性質包括密度(D)、比容(V)、飽和度(DOS)、飽和蒸氣壓(P_{ws})、蒸氣分壓(P_w)、熱焓(h)等。

以圖形方式表現濕空氣熱力性質彼此間關係者稱為濕空氣線圖，簡稱濕氣圖(Psychrometric chart)。濕氣圖以乾球溫度為 X 軸，以濕度比為 Y 軸，以飽和相對濕度線為上界。除了大氣壓力之外，已知兩獨立性質可求出其他所有性質。不同海拔有不同的大氣壓力值，傳統使用濕空氣線圖有低、中與高海拔三種圖之區別。低海拔者又依溫度範圍分成低溫、常溫與高溫三種範圍，中、高海拔者則僅有常溫範圍的濕氣圖。另外亦有英制與公制之別。查圖法在使用上有頗多的限制，譬如：每張濕氣圖僅適用一個大氣壓力狀況，易發生讀圖誤差；查圖速度慢，不方便使用，且無法納入電腦進行自動化查圖。

美國加熱冷凍空調工程師協會 (American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, ASHRAE, 1993) 與美國農業工程師協會 (American Society of Agricultural Engineers, ASAE, 1999) 將前人的研究成果彙整列出了計算濕空氣性質所需的所有計算式，美國康乃爾大學所建的 Psychrometric Look Up Subroutines (PLUS, Albright, 1990) 與台灣大學所建的 Psychart (馮與方, 1986) 電腦軟體即植基於此些計算式。這些先前所建立的軟體在 Windows 的作業系統中即將無法使用，所以有必要重新建立適用於新作業系統的軟體。Wang 等 (2003)使用 MATLAB 程式語言建立了適用於視窗作業系統的程序，使用者需有 MATLAB 軟體才能執行。本文所介紹為使用 Visual C++所撰寫的視窗版軟體，經編譯後可獨力執行，軟體功能超越 MATLAB 版本。

二 功能介紹

本軟體提供多種應用功能，包括：允許修改大氣壓力值；提供熱力特性相關的 11 個表格，允許由兩個獨立參數值計算其他的 11 個參數值；計算不同狀態點熱力性質的差；最後並針對兩個溫室環控常見應用提供更方便的使用者介面，包括應用水簾片的蒸發冷卻降溫系統與偵測灌溉時機必備的植物葉片與空氣之間的水蒸氣壓力差。

圖 1 所示為執行軟體後的第一個畫面，左邊深色區為濕氣圖位置，上方為選項區，主要包括：Set, Tables, About, Exit 四項。右側上方為應用區，包括 State, Process, Pad, VPD 四個標籤。右側中間 Message 區顯示游標在應用區內某一參數位置的訊息，右側下方左半邊的 Crosshair 區可使設定的空氣狀態點沿著某固定性質移動，下方右半邊的 Line&Curves 區允許在 PsyChart 上繪出選項中有被勾選的項目的直線或曲線。右側最下方左半邊為 Step 區允許 Psychart 圖形的放大或縮小 X 軸範圍，右側最下方右半邊為 Misc 區，提供兩項管理畫面的功能。

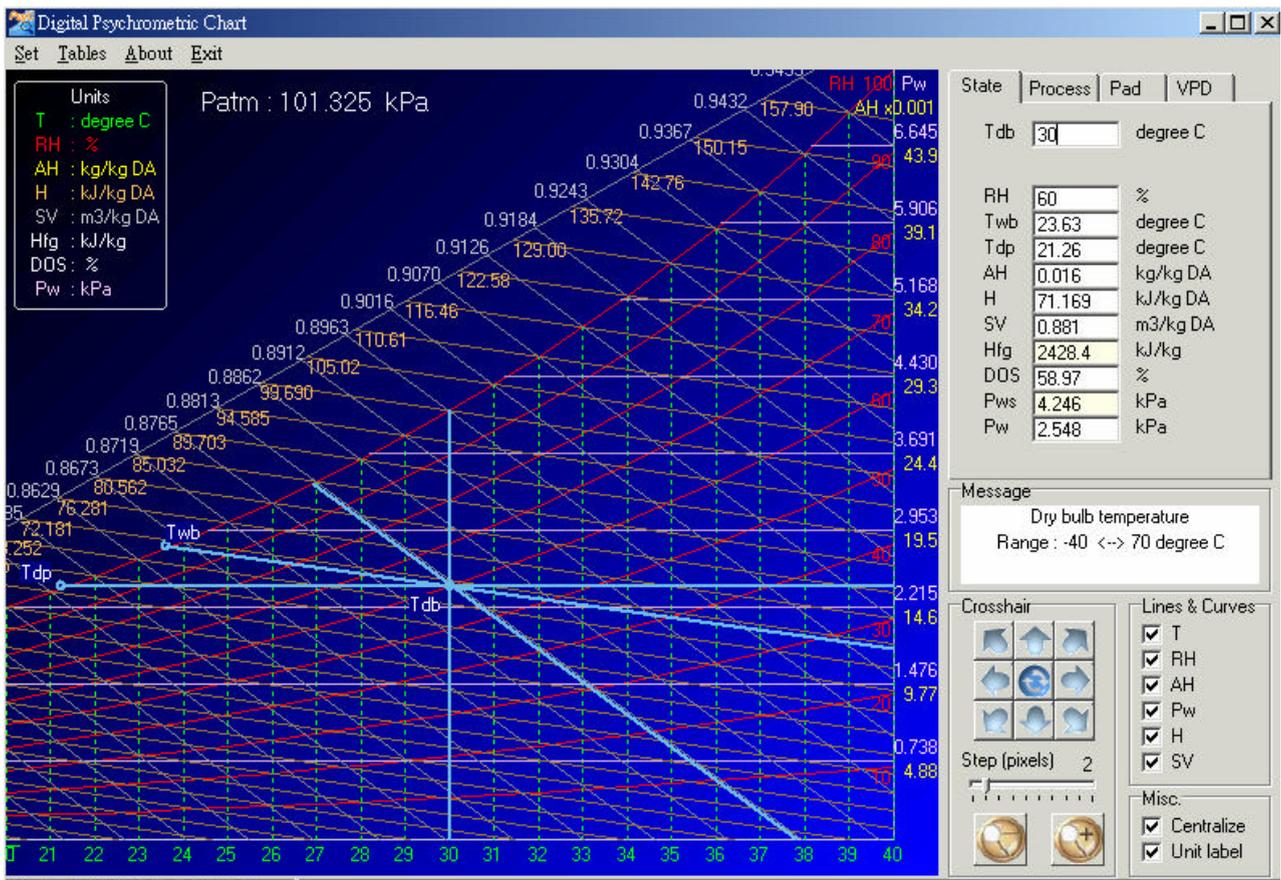


圖 1. 數位濕氣圖執行畫面

Figure 1. Main window of digital Psychart software

(一). 大氣壓力

如圖 2 所示為允許修改大氣壓力值的畫面，選擇圖中第二列的 Set，可得出右圖 Set Patm 視窗，此視窗中允許針對公制或英制輸入壓力值或海拔高度。

在確認壓力值後，在 Psychart 圖中首列會出現目前設定的大氣壓力值，如圖 1 所示的 Patm: 101.325 kPa。

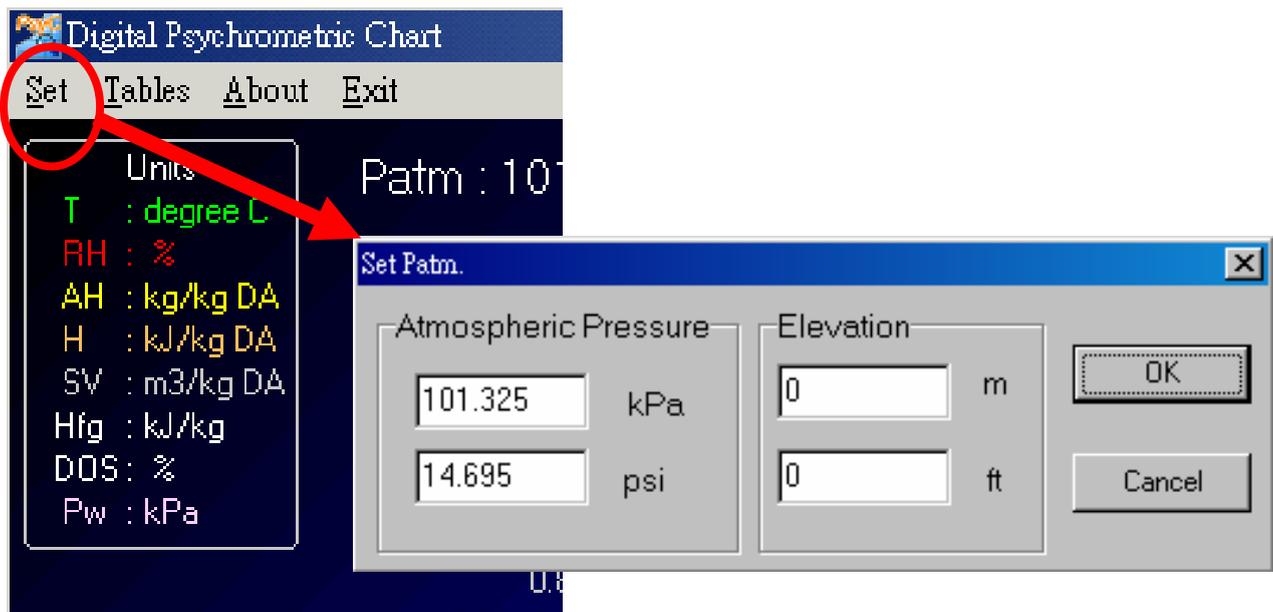


圖 2. 輸入大氣壓力值的畫面，選擇左圖中第二列的'Set'，可得出右圖畫面
Figure 2. Edit window to set the atmospheric pressure after pressing the 'Set' option

(二). PsyTables

圖 2 第 2 列的第二個選項 Tables 提供 11 個表格，如圖 3 所示，允許使用者設定兩項參數的範圍與間隔，並求出此兩參數所定義的狀態點的第三個狀態值。

第 1~3 選項與乾球溫度(T_{db})，濕球溫度(T_{wb})，乾濕球溫度差(WBD)與相對濕度(RH)有關。第 4, 5 選項與蒸氣壓差(VPD)相關，第 6, 7 選項與露點溫度(T_{dp})相關，第 8, 9 選項與溫濕度指標(THI)相關，第 10, 11 選項則與絕對濕度差(AHD)相關。所有數值採取類似 Excel 表格方式列出，圖 4 至圖 8 所示為前五個選項的輸出結果。圖 7 與圖 8 所示分別為 VPD 與 VPD' 選項的計算結果，前者計算式為 $P_{ws}@T_{db} - P_w@T_{db}\&RH$ ，列於圖 7 中首列，代表乾球溫度時之飽和蒸氣壓 - 乾球與相對濕度定義下的狀態點的蒸氣壓；後者之計算式為 $P_w@T_{wb} - P_w@T_{db}\&RH$ ，列於圖 8 中首列，代表濕球溫度時之蒸氣壓 - 乾球與相對濕度定義下的狀態點的蒸氣壓。圖 9 所示為 VPD/AHD, VPD'/AHD' 之計算示意圖，視濕氣圖的 Y 軸單位而定，

Y 軸單位可以是蒸氣壓力或者是絕對濕度。

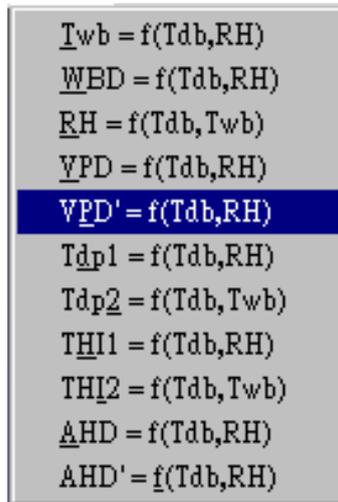


圖 3. Tables 功能選項提供的 11 個表格

Figure 3. In the tag title 'Tables', there are 11 PsyTables

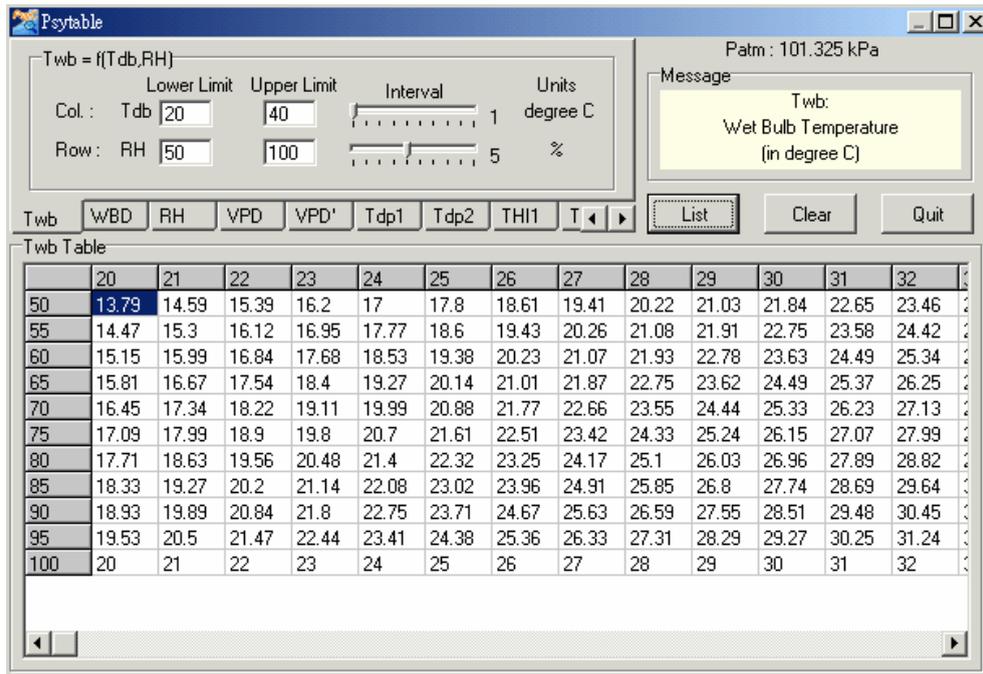


圖 4. PsyTables 視窗與計算結果列表：選項 1. $T_{wb} = f(T_{db}, RH)$

Figure 4. Window showing calculated result of option 1 of PsyTables

	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44
50	6.21	6.61	7	7.39	7.78	8.16	8.54	8.91	9.27	9.62	9.96	10.3	10.62
55	5.53	5.88	6.23	6.57	6.92	7.25	7.58	7.91	8.22	8.53	8.82	9.11	9.38
60	4.85	5.16	5.47	5.77	6.07	6.37	6.66	6.94	7.21	7.47	7.72	7.96	8.19
65	4.19	4.46	4.73	4.99	5.25	5.51	5.75	5.99	6.22	6.44	6.65	6.84	7.03
70	3.55	3.78	4.01	4.23	4.45	4.67	4.87	5.07	5.26	5.44	5.61	5.76	5.91
75	2.91	3.1	3.3	3.49	3.67	3.85	4.01	4.17	4.33	4.47	4.6	4.72	4.83
80	2.29	2.44	2.6	2.75	2.9	3.04	3.18	3.3	3.41	3.52	3.61	3.7	3.77
85	1.67	1.8	1.92	2.04	2.15	2.26	2.36	2.44	2.52	2.59	2.65	2.7	2.74
90	1.07	1.16	1.25	1.33	1.41	1.49	1.55	1.61	1.65	1.69	1.72	1.73	1.74
95	0.47	0.53	0.59	0.64	0.69	0.73	0.76	0.79	0.8	0.81	0.8	0.79	0.76
100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

圖 5. PsyTables 視窗與計算結果列表：選項 2. $WBD = f(T_{db}, RH)$

Figure 5. Window showing calculated result of option 2 of PsyTables

	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44
20	100	82.63	69.02	57.61	48.01	39.89	33	27.14	22.14	17.89	14.26	11.17	8.55
22	N/A	100	83.49	70.48	59.48	50.13	42.16	35.35	29.52	24.52	20.24	16.57	13.42
24	N/A	N/A	100	84.34	71.84	61.18	52.06	44.23	37.49	31.69	26.69	22.38	18.67
26	N/A	N/A	N/A	100	85.17	73.11	62.75	53.83	46.12	39.45	33.68	28.67	24.34
28	N/A	N/A	N/A	N/A	100	85.98	74.3	64.21	55.45	47.85	41.24	35.49	30.48
30	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	100	86.78	75.43	65.56	56.95	49.44	42.88	37.13
32	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	100	87.56	76.49	66.81	58.33	50.89	44.36
34	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	100	88.32	77.49	67.96	59.58	52.19
36	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	100	89.03	78.39	68.99	60.68
38	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	100	89.67	79.18	69.87
40	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	100	90.19	79.82
42	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	100	90.57
44	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	100

圖 6. PsyTables 視窗與計算結果列表：選項 3. $RH = f(T_{db}, T_{wb})$

Figure 6. Window showing calculated result of option 3 of PsyTables

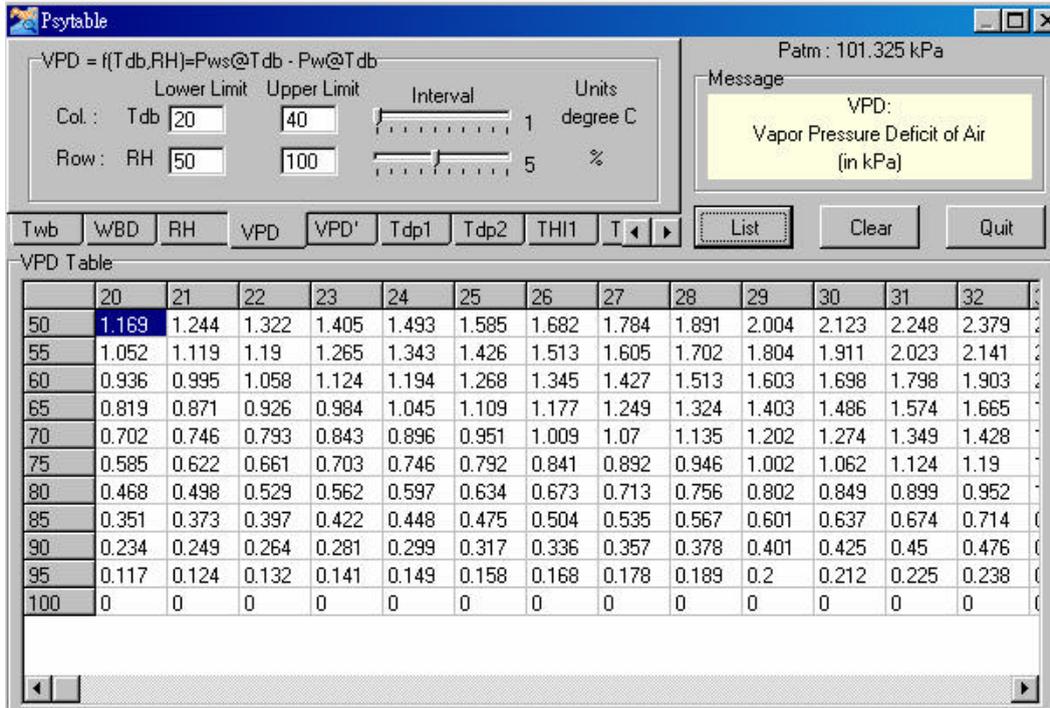


圖 7. PsyTables 視窗與計算結果列表：選項 4. $VPD = f(T_{db}, RH)$
 Figure 7. Window showing calculated result of option 4 of PsyTables

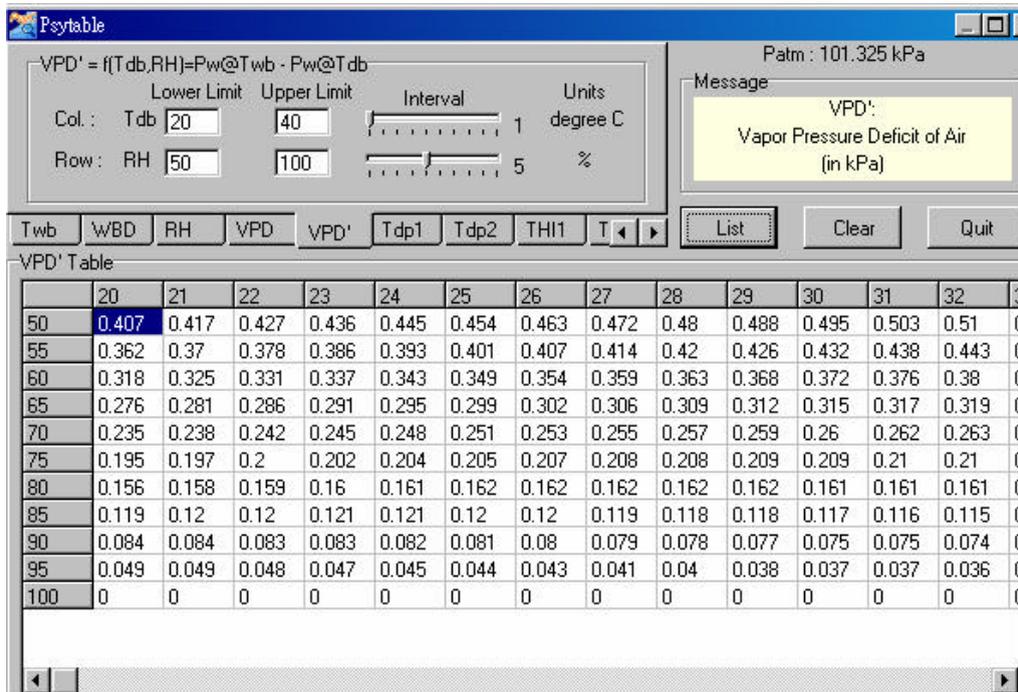


圖 8. PsyTables 視窗與計算結果列表：選項 5. $VPD' = f(T_{db}, RH)$
 Figure 8. Window showing calculated result of option 5 of PsyTables

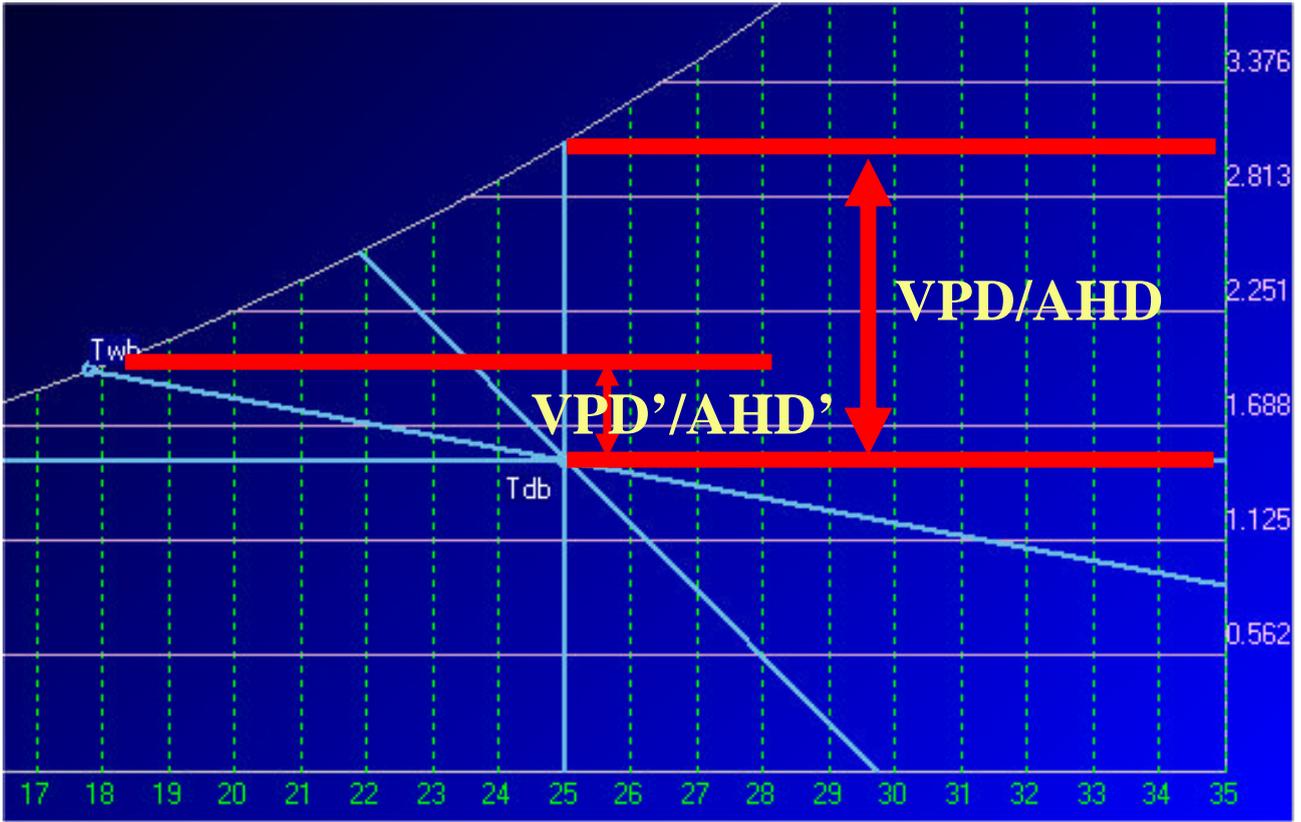


圖 9. PsyTables 選項 4(VPD)與 10(AHD)，選項 5(VPD')與 11(AHD')計算示意圖

Figure 9. Schematic diagram explaining options 4,5,10 and 11 of PsyTables

(三). 狀態點的決定

如圖 1 右上角所示有四個標籤，分別為 State, Process, Pad 與 VPD。第一項標籤允許輸入兩項參數值，軟體自動求出其他性質。此過程類似在濕氣圖上由獨立的兩項參數值決定出狀態點位置之後，再接著求出該狀態點的所有其他性質。

如前所述，除了大氣壓力之外，若已知任何兩個獨立的濕空氣性質，則該空氣性質的狀態點即可由濕氣圖中找到，其他性質即可依序求出。表 1 所示為所有常見濕空氣性質之成對列表，其中 I 代表獨立的組合，可由該組合求出其他性質，D 代表為相依的組合，無法由該組合求出其他性質。 $T_{db} - P_{ws}$ 與 $T_{db} - h_{fg}$ 均為相依的組合，由前述的計算式(1)可知， P_{ws} 為 T_{db} 的函數，所以 $T_{db} - P_{ws}$ 為相依的組合。由式(8)可知， h_{fg} 為 T_{db} 的函數，所以 $T_{db} - h_{fg}$ 為相依的組合。 T_{wb} 與 H 為近乎平行的兩線，所以也非獨立的參數， T_{dp} , AH 與 P_w 亦彼此相依，三者之任意組合均無法求出其他性質。

Table 1 Dependent and independent pairs of moist air properties

表 1. 相依(D)或獨立(I)的濕空氣熱力性質之成對組合

	T_{wb}	RH (DOS)	T_{dp}	AH	SV	H	P_{ws}	h_{fg}	P_w
T_{db}	I	I	I	I	I	I	D	D	I
T_{wb}		I	I	I	I	D	I	I	I
Rh			I	I	I	I	I	I	I
T_{dp}				D	I	I	I	I	D
AH					I	I	I	I	D
SV						I	I	I	I
H							I	I	I
P_{ws}								I	I
h_{fg}									I

本軟體提供六種組合的輸入選擇，包括 $T_{db} - rh$, $T_{db} - T_{wb}$, $T_{db} - T_{dp}$, $T_{db} - AH$, $T_{db} - DOS$ 與 $T_{db} - P_w$ 等組合。 T_{db} 為必須的輸入，另一個參數則可由下方選項中擇一，其中 H, SV, h_{fg} 與 P_{ws} 不允許輸入。前二者理論上允許輸入，只是此部份應用需求極少，所以程式中未包括此功能，後二者因為與 T_{db} 為相依，理論上不允許輸入。

(四). 兩狀態點的變化過程

濕氣圖的功用除了求出某狀態點所有性質的值之外，更重要的功能在找出兩狀態點之間的關係，譬如相差多少熱焓、多少溫度、多少水分含量等。此種狀態點的變化過程以濕空氣熱力過程(Psychrometric Processes)稱之，主要不外乎以下幾種狀況：

- 顯熱加熱與冷卻 (Sensible Heating and Sensible Cooling)
- 加濕與除濕 (Humidification, Dehumidification)
- 加熱與冷卻 (Heating, Cooling)
- 通風 / 空氣混合 (Ventilation, Air Mixing)
- 蒸發冷卻與乾燥 (Evaporative Cooling, Drying)
- 上述之綜合 (Combinations of the above)

圖 10 所示為溫室環控中典型的空氣狀態變化過程，簡單說明如下：

- 蒸發冷卻過程 (1-2)：點 1 為室外空氣的狀態，點 2 為室外空氣經過水簾片後的狀態。過程 1-2 依循絕熱狀態下的蒸發冷卻原則，所有增加的水蒸氣，其所需的蒸發

潛熱全部吸自空氣，造成空氣溫度的下降。

- B. 空氣混合過程 (2-3-1)：由於溫室的氣密性不佳，除了水簾片之外，還有其他的孔隙允許室外空氣的進入，所以真正進入溫室的空氣為兩股氣流的混合，其狀態分別為狀態點 2 與 1，混合後的空氣狀態點 3 落於 1-2 的連線上，其位置至兩端點的距離與兩者的空氣量成反比。狀態點 1, 2 與 3 的關係就像是保持平衡的蹺翹板，點 3 為支撐點，點 3 至點 1, 2 的距離由兩側的空氣量決定，空氣量多者距支撐點近。
- C. 顯熱加熱過程(3-4)與加濕過程 (4-5)：狀態點 3 的空氣進入溫室內，假設後者的溫度與濕度均較高，所以進入的空氣由入口至出口，沿途吸熱與吸濕，其累積的吸熱量與吸濕量可分別用 3-4 與 4-5 過程來表示。

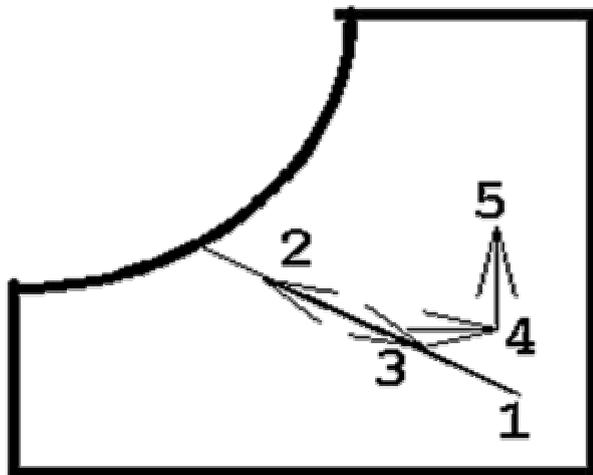


圖 10. 濕空氣狀態點變化過程，其中 1-2 為蒸發冷卻過程，2-3-1 為空氣混合過程，3-4 為顯熱加熱過程與 4-5 為加濕過程

Figure 10. Processes of moist air, 1-2 is evaporative cooling process, 2-3 is air mixing process, 3-4 is sensible heating process and 4-5 is humidification process

軟體中允許透過滑鼠點選兩個狀態點或各輸入兩個參數值，待完成兩個狀態點的設定，點選第三個 ICON: Cal.，可計算兩個狀態點所有性質的差值，顯示在 Diff. 之下。圖 11 所示為軟體畫面的輸出結果，在畫面右側中間的 Message 區顯示 Diff. 值的計算為狀態點 2 的值減去狀態點 1 的值。在濕氣圖上定義兩個狀態點時，若其中某一狀態點性質為相同時，請參見圖 14 之說明，軟體允許第二個狀態點沿著第一個狀態點的某特定性質移動。此特定性質在圖上可以是直線或曲線。

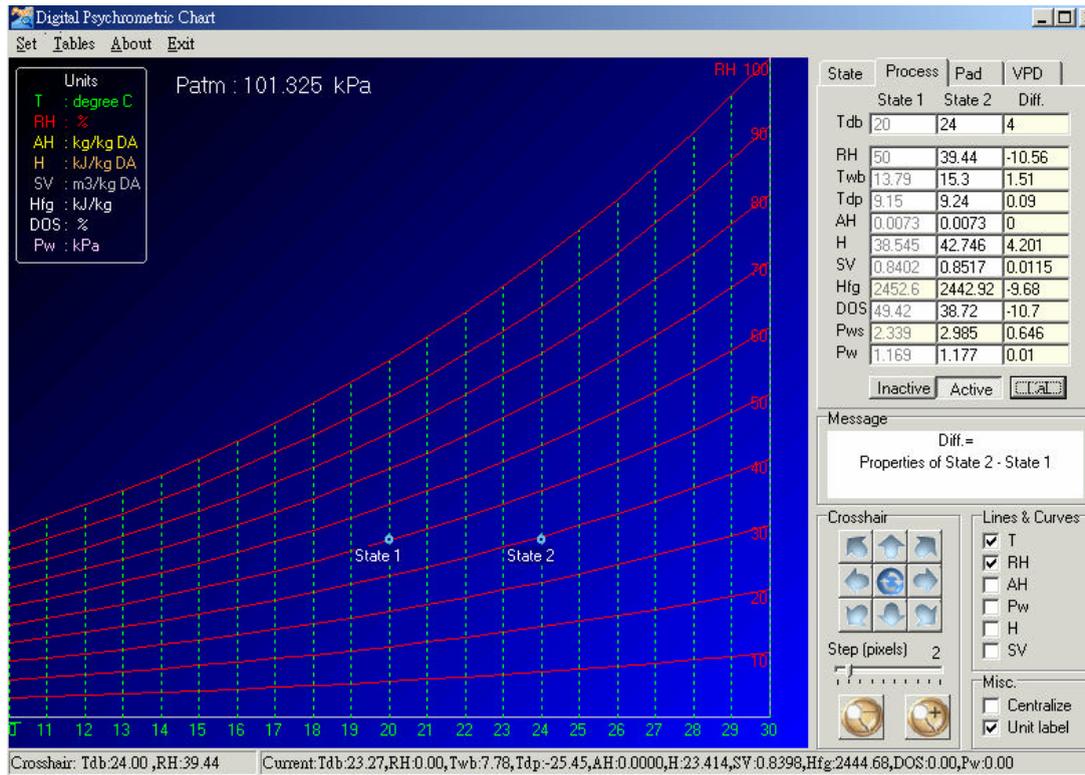


圖 11. 兩狀態點變化過程的計算視窗

Figure 11. Window showing properties and differences between 2 states

(五). 溫室降溫

遮蔭之外，自然通風與強制通風均為常見的溫室降溫方式，當兩者力有未逮時，蒸發冷卻方式為下一個選擇。風扇與水簾片分裝於溫室兩側或同側者分別為負壓式或正壓式蒸發冷卻降溫系統，前者適用於氣密性良好的溫室，後者亦可用於開放式溫室。安裝於溫室內的高壓噴霧系統其降溫原理亦為蒸發冷卻，但與水簾系統不同者在於前者之降溫極限為室內的濕球溫度，水簾系統之極限為室外的濕球溫度，其效率()可透過下式計算：

$$= (T_{db} - T_{pad}) / (T_{db} - T_{wb})$$

已知室外空氣的溫度(T_{db}) 與相對濕度 (rh)可求出濕球溫度(T_{wb})，量測通過水簾片後的空氣溫度(T_{pad})，代入上式可求出效率；若效率為已知，則在 Eff. 下方欄位輸入效率值，AfterPad 下各欄位數值為可求，包括上式中的 T_{pad} 。圖 12 左側視窗所示為點選 Message 區上方右側的 Draw ICON 後軟體畫面的輸出結果。

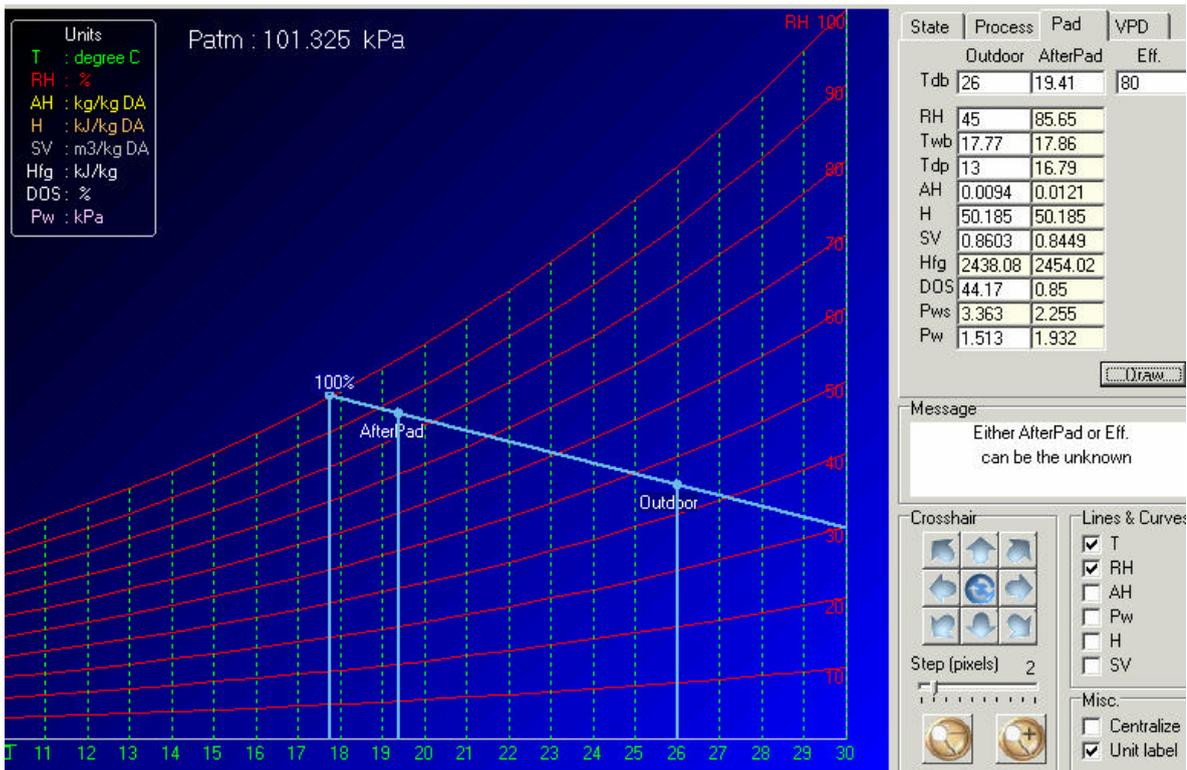


圖 12. 蒸發冷卻降溫系統降溫效率與通過水簾後狀態點的計算視窗

Figure 12. Window showing states of air before and after passing through an evaporative cooling pad and pad efficiency

(六). 空氣的吸濕能力

一般以空氣的相對濕度作為其吸濕能力的代表，假設有 A, B 與 C 三個狀態點的數據如表 2 所示，空氣狀態點 A 為 30 °C，50 % 相對濕度；狀態點 B 為與點 A 有相同乾球溫度時的飽和狀態點；狀態點 C 為與點 A 有相同濕球溫度時的飽和狀態點。在溫度不變的情況下，空氣的吸濕能力取決於 VPD_{A-B} 的大小；然而，在蒸發冷卻的過程中，空氣的吸濕能力取決於 VPD_{A-C} 的大小；後者(VPD_{A-C})比前者(VPD_{A-B})要小多了。

Table 2. Explanation on the vapor absorbing capability of air

表 2. 空氣吸濕能力說明例

狀態點 State	乾球溫度 Dry bulb temperature Tdb, °C	濕球溫度 Wet bulb temperature Twb, °C	相對濕度 Relative humidity rh, %	蒸氣壓 Vapor pressure Pv, kPa	蒸氣壓差 Vapor pressure deficit VPD, kPa
A	30	21.84	50	2.12	
B	30	30	100	4.24	$VPD_{A-B} = 2.12$
C	21.84	21.84	100	2.62	$VPD_{A-C} = 0.50$

(七). 灌溉之需求

溫室內的水分蒸發散(Evapotranspiration) 主要來自土壤或其他介質之蒸發(Evaporation) 與作物之蒸散(Transpiration), 已知水分蒸散量與葉片(*leaf*)氣孔內之飽和蒸氣壓($P_{ws}@T_{leaf}$)與空氣(*air*)中的蒸氣分壓($P_w@T_{db}$)的差(VPD_{l-a})有顯著的關係。空氣狀態點為已知, $P_w@T_{db}$ 為可求; 葉溫(T_{leaf})為已知, 且假設氣孔內相對濕度為 100%, 則 $P_{ws}@T_{leaf}$ 為可求, 兩者的差愈大代表水分蒸散愈多, 對灌溉的需求愈大。作物之水逆境指標(Crop Water Stress Index, CWSI)之發展即植基於 VPD_{l-a} 之應用。圖 13 所示的軟體操作畫面可用來建立如表 3 的表格, 在圖 13 中使用者只需輸入空氣的乾球溫度與相對濕度及葉溫, 圖中顯示的蒸汽壓差即為濕氣圖內兩條橫線的距離。表 3 顯示 *Leaf 1* 與空氣的蒸汽壓差大於 *Leaf 2* 與空氣的蒸汽壓差, 顯示前者對灌溉的潛在需求也較大。

Table 3. Explanation on leaf-air vapor pressure deficit

表 3. 空氣與葉片之蒸氣壓差說明例

狀態點 State	乾球溫度 Dry bulb temperature $T_{db}, ^\circ\text{C}$	濕球溫度 Wet bulb temperature $T_{wb}, ^\circ\text{C}$	相對濕度 Relative humidity rh, %	蒸氣壓 Vapor pressure P_w, kPa	蒸氣壓差 Vapor pressure deficit VPD_{l-a}, kPa
<i>air</i>	30	21.84	50	2.12	
<i>Leaf 1</i>	30	30	100	4.24	2.12
<i>Leaf 2</i>	25	25	100	3.17	1.05

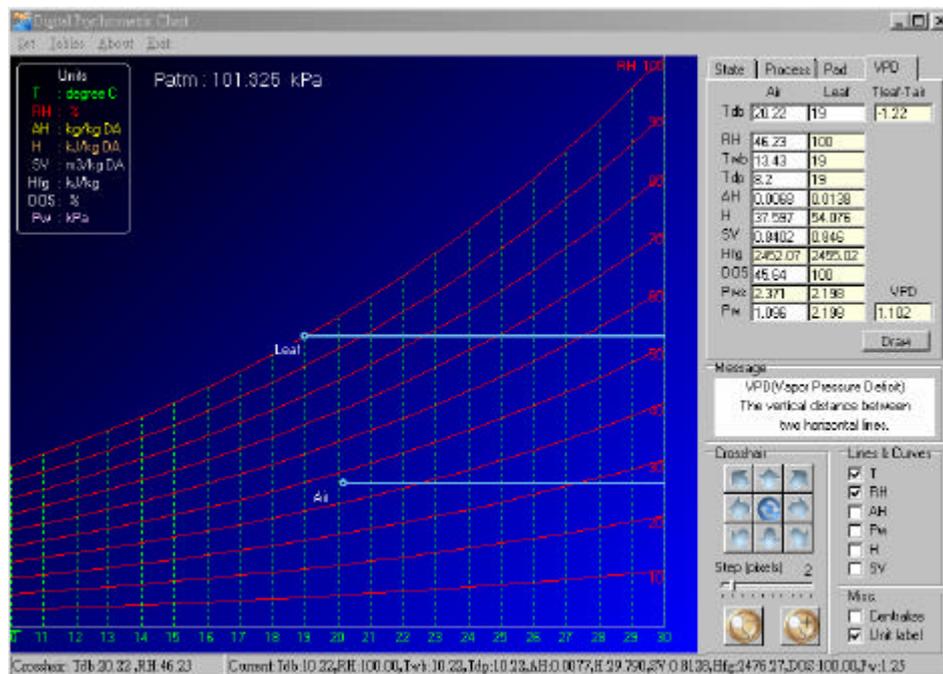


圖 13. 葉片與空氣蒸氣壓差之計算視窗

Figure 13. Window showing calculated results of leaf-air vapor pressure deficit

(八). 濕氣圖中直線與曲線

如圖 1 所示的濕氣圖中由於繪出了所有的直線與曲線，整個圖形顯得非常複雜。軟體右下角之 Lines & Curves 區允許針對濕氣圖上的直線或曲線作選擇性的繪出，如圖 14 所示為四組只繪出兩個參數的相關直線與曲線的濕氣圖。

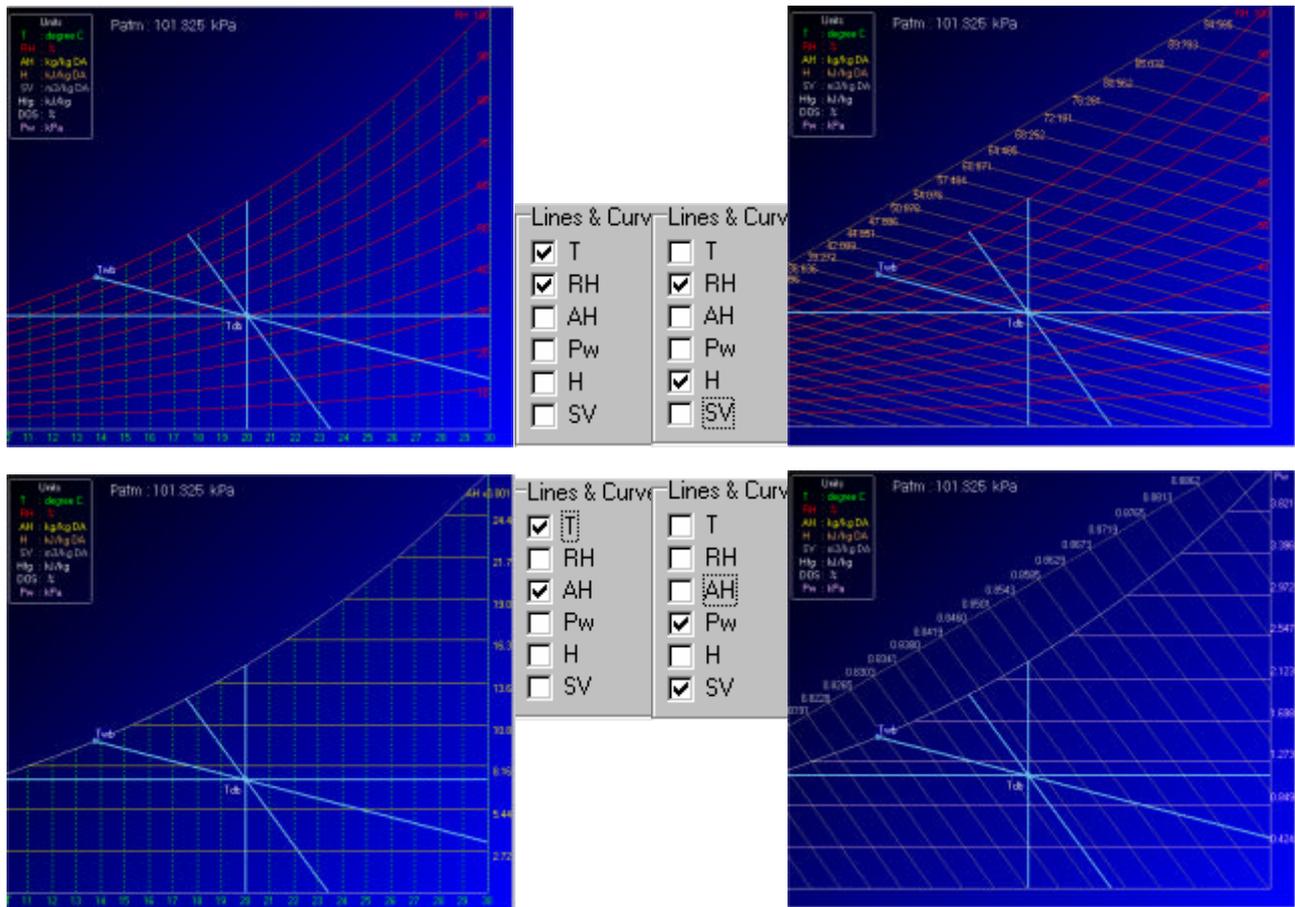


圖 14. 在 Lines & Curves 中勾選兩個狀態的四組視窗畫面

Figure 14. Snapshots of Psychchart portion of the software showing user selected 2 Lines & Curves

(九). 濕氣圖上狀態點的移動

使用者在決定狀態點時除了可直接輸入兩個狀態值之外，也可用滑鼠左鍵直接在濕氣圖上點選。在決定第二個狀態點時，可沿著某固定性質的方向鍵移動。圖 1 的濕氣圖內除了乾球溫度與相對濕度線之外，尚有四條直線，以交叉髮線 (crosshair)稱之，由左至右分別為 Edit 區所設定的狀態點的絕對濕度線(露點溫度線)、濕球溫度線、比容線與乾球溫度線。交叉髮線的交點即為狀態點，在 Crosshair 區選按方向鍵可移動狀態點，髮線隨狀態點移動。如圖 15 所示為各方向鍵代表的性質。上、下、左、右移動髮線的功能，分別代表加濕、除濕、顯熱加熱與顯熱冷卻等過程；沿左上與右下移動代表蒸發冷卻與乾燥過程；沿右上與左下移動則代表維持固定的相對濕度，但乾球溫度增加或減少。Step 區允許調整每次移動的圖點(pixel)

數，由 1 至 10。

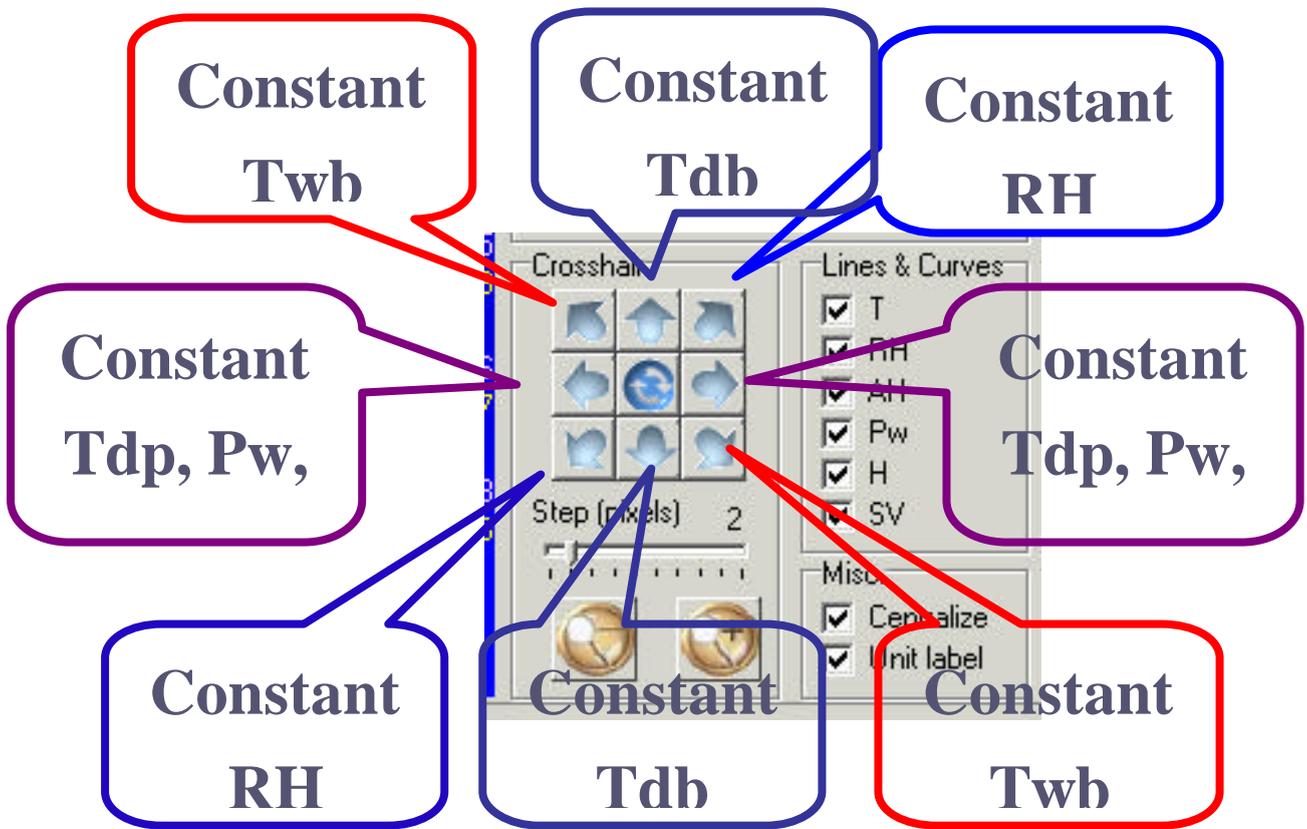


圖 15. 濕氣圖上狀態點沿著某固定性質移動的八個方向鍵

Figure 15. Eight directions to move crosshair on digital psychchart software

(十). 濕氣圖放大與縮小

Step 區下方的兩個圖示允許對濕氣圖做放大(Zoom in 近觀)或縮小(Zoom out 遠觀)，每選按一次，X 軸範圍加減 10 °C。不斷的 Zoom out，圖形會縮小，當縮小至極限時，左側的圖示會消失，如圖 16 所示；不斷的 Zoom in，圖形會放大，當放大到極限時，右側的放大圖示會消失，如圖 17 所示。按一下 Crosshair 區上下左右箭頭中央的圖示可將濕氣圖還原成如圖 1 所示的適當大小 (X 軸範圍為 20 °C)。

(十一). 其他功能

當在 Lines & Curves 區下方的 Misc 區中的中央化(Centralize)功能未選取時，狀態點會落在使用者點選的位置上；當選取中央化功能時，使用者點選的狀態點 Y 軸位置不動，但 X 軸位置會被自動移至圖形的中央。亦可使用 Crosshair 區上下左右鍵來移動狀態點的位置，當左右移動範圍超過 1 °C 時，程式會自動將新的狀態點移回圖形的正中央，此時 X 軸的溫度值會有所更新。此部份功能與操作者一般習慣較不相同，若無法適應，再點選一次可取消中央化功能。

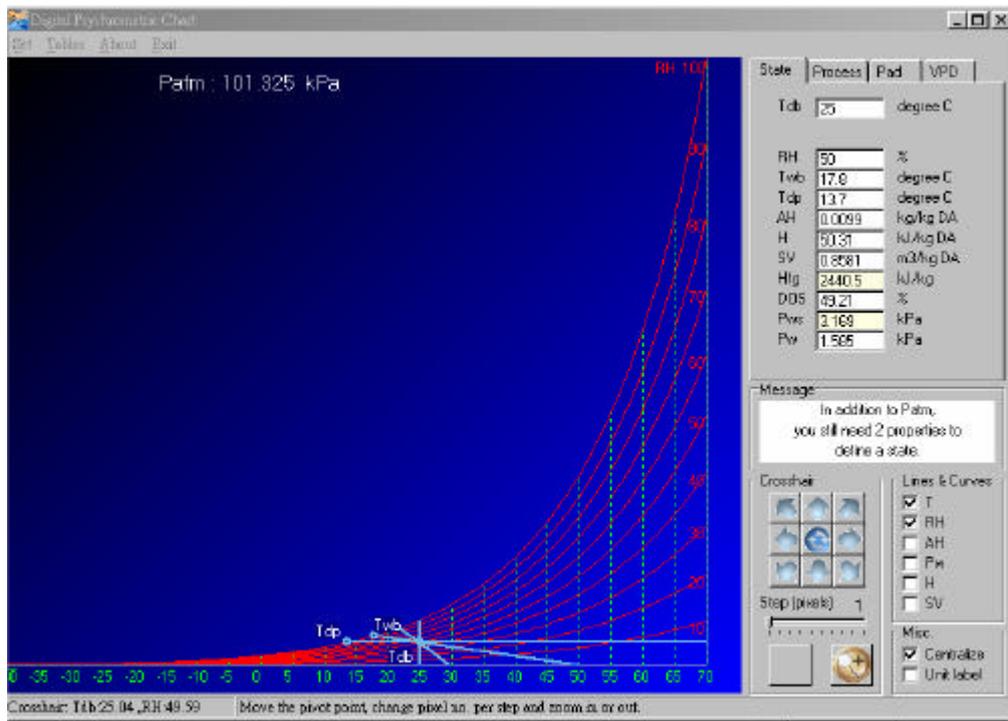


圖 16. 最大化的 'Zoom Out' 功能顯示視窗

Figure 16. Window shows the extreme of 'Zoom Out'

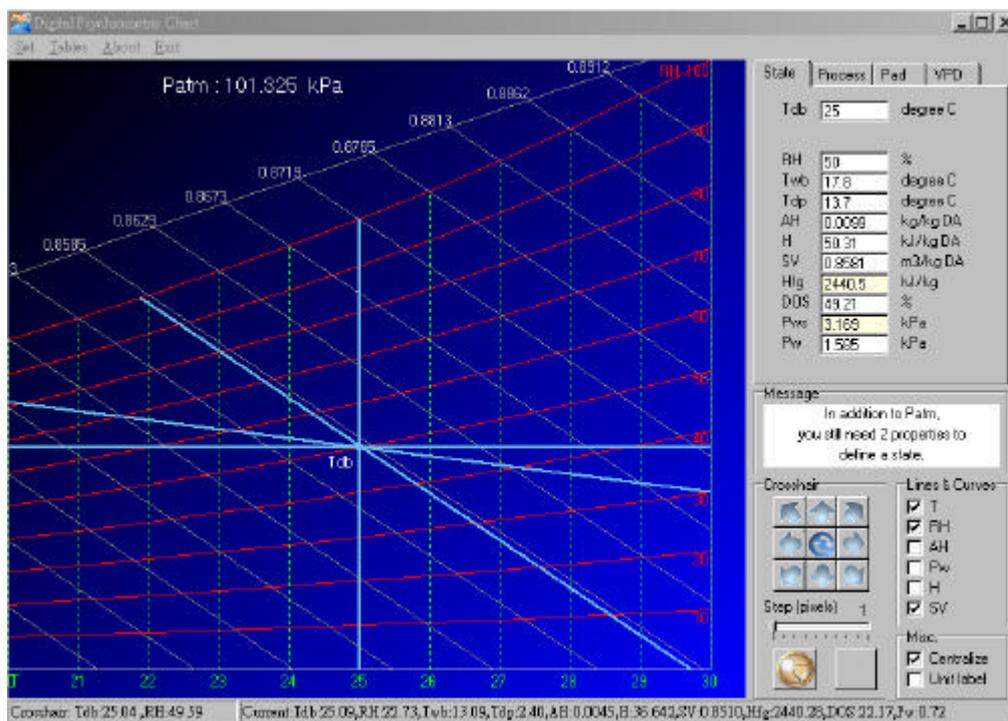


圖 17. 最小化的 'Zoom In' 功能顯示視窗

Figure 17. Window shows the extreme of 'Zoom In'

(十二). 其他應用之一：霧滴蒸發所需時間

Amsden (1962)建立的公式可用來評估噴藥時霧滴附著於葉片上至完全蒸發所需的時間，如下所示：

$$t = d^2 / (80 * WBD)$$

其中，t: 霧滴蒸發所需的時間 (s)，d: 霧滴的直徑(μm)，WBD: 濕球降(°C)。由於噴藥霧滴中含藥比例很低，上式也可用來評估噴霧降溫時霧滴蒸發所需的時間。如圖 18 所示為假設溫度與濕度已知下，不同大小的霧滴所需的蒸發時間。圖中各曲線由上而下之 WBD 值由小至大代表 WBD 值愈大蒸發所需時間愈短。

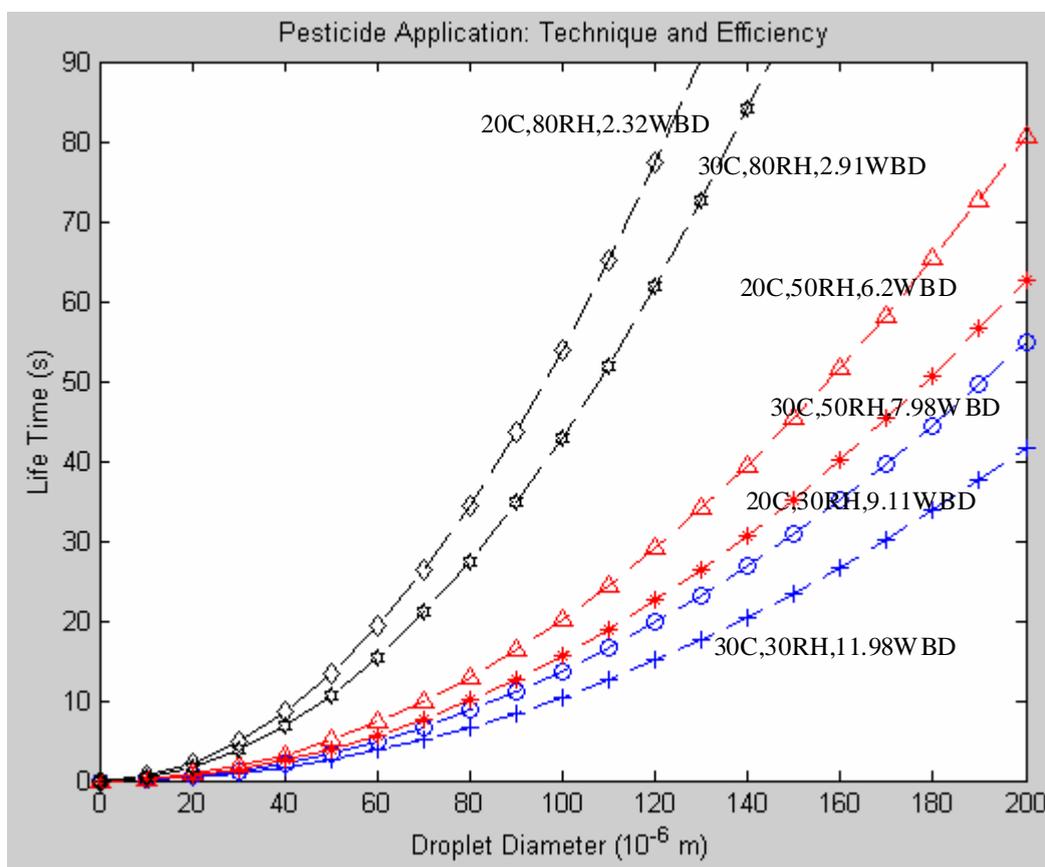


圖 18. 不同溫度與濕度範圍，不同大小的霧滴所需的蒸發時間

Figure 18. Evaporative time required for various sizes of droplet at various temperature and humidity

(十三). 其他應用之二：溫濕度指標

溫濕度指標(THI)是另一個應用在環控領域的指標，一般用來評估畜舍內動物所受到的熱緊迫。不同動物有不同的計算公式與係數。針對豬隻飼養環境的熱緊迫評估，1965~1982 期間，不同學者基本上均使用類似結合乾球(Tdb)與濕球溫度(Twb)之計算式，只有係數組不相同，基本上與品種改良及使用設備的精確度改進等都有關係。

$$THI = a * Twb + b * Tdb + c$$

Armstrong (1994)提出的公式結合乾球溫度(Tdb)與露點溫度(Tdp)，適用於乳牛。該式與氣象領域中針對人體的不舒適指標(DI, Discomfort Index)非常近似。

$$THI = Tdb + 0.36 * Tdp + 41.2$$

$$DI = 0.99 * Tdb + 0.36 * Tdp + 41$$

其中，Tdb 與 Tdp 的單位都是 °C。圖 3 所示的 PsyTables 中提供兩種求 THI 表格的方式，THI1 為已知乾球溫度與相對濕度求 THI，THI2 為已知乾球溫度與濕球溫度求 THI。圖 19 所示為濕氣圖上不同 THI 值之曲線群。圖 18 與 19 是使用 MATLAB 程式語言另外撰寫的程式索賄出的圖形，並不包括於本文介紹的軟體內。

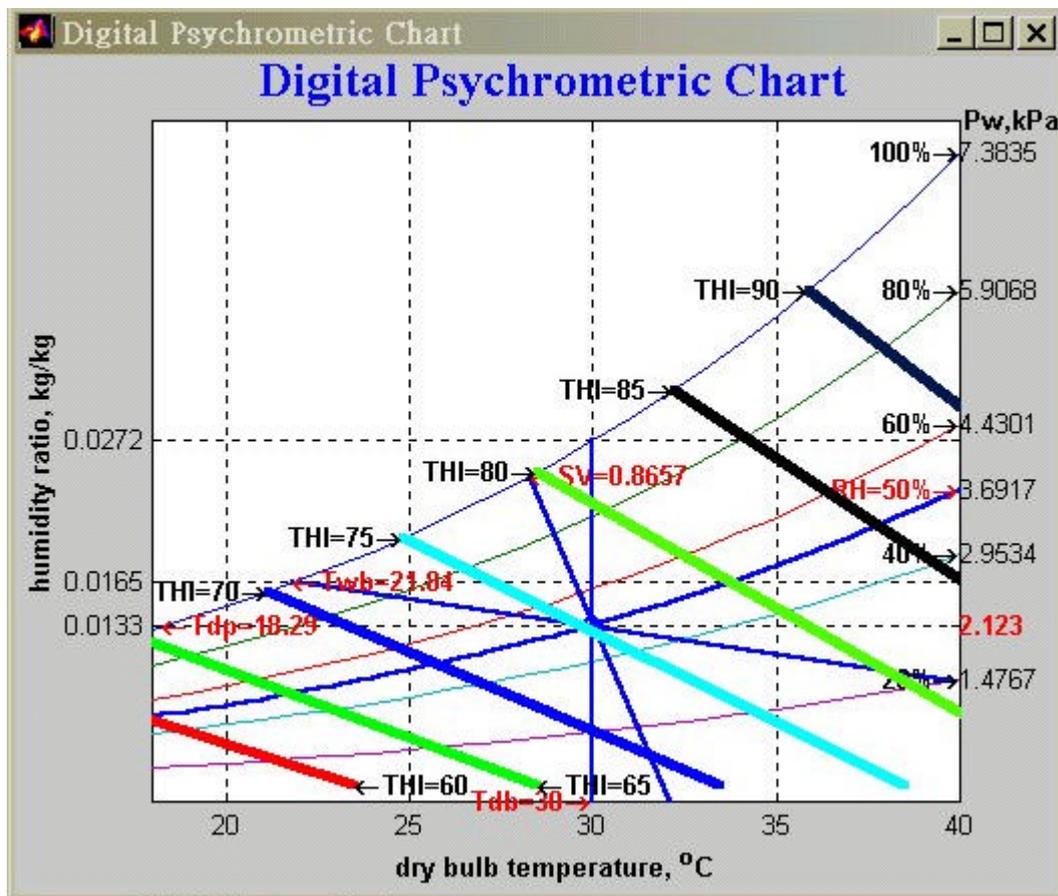


圖 19 濕氣圖上不同 THI 值之曲線群

Figure 19. Family curves of constant THI lines on psychrometric chart

(十四). 其他應用之三：病蟲害防治

葉片結露偵測器可用於病蟲害防治之自動控制，有水分於人工葉片上形成時會發生電阻的變化，控制方式係透過感測器偵測到人工葉片電阻的變化達設定值，啟動風扇，引入室外空氣使露水迅速蒸發，避免病蟲害滋生。此種控制方式必須等到葉片上開始形成水珠才動作，透過 VPD 的偵測可提早防患於未然。

在 VPD 低於 0.43 kPa 的範圍最適合黴菌的繁殖，在 VPD 低於 0.2 kPa 的範圍內病蟲害感染危害最大 (Prenger and Ling, 2002)。溫室內環境應維持在 VPD 大於 0.2 kPa。表 4 所示為不同溫度範圍下 VPD 下限(0.2 kPa)的相對濕度值；溫度愈高，允許的相對濕度值也愈高。VPD 示意圖請參考圖 9，計算公式列於圖 7 的第一列。

Table 4. Relative humidity values at various dry bulb temperature at VPD equals 0.2 kPa

表 4. 與同溫度下的飽和狀態點的蒸汽壓差值 (VPD) 為 0.2 kPa 時的相對濕度值

乾球溫度 dry bulb temperature, °C	相對濕度 relative humidity, %
10	83.0
20	91.5
30	95.5

三 結論

過去建立的濕空氣熱力性質計算軟體在隨著電腦作業系統的演進過程中，已面臨淘汰的命運。本研究所建立的軟體使用 MS Visual C++ 語言撰寫與編譯，提供方便且多元的操作介面，運算速度快，但受限於必須是 Windows 作業系統的電腦才能使用。此軟體目前可於網路上下載，網址列於參考文獻中。此軟體不僅適用於一般環境控制工程領域，由於新增更多與植物栽培及動物熱緊迫相關的表格與功能，所以更適用於溫室與禽畜舍環境控制工程領域之教學，研究與實務分析之用。

參考文獻

1. 馮丁樹，方煒。1986。個人電腦應用之三：空氣線圖之電腦模擬。中國農業工程學報 32(2)：49-64。
2. 濕空氣線圖計算軟體下載網址：<http://ecaaser3.ecaa.ntu.edu.tw/weifang/psy/cea2-5.htm>

3. Albright, L.D. 1990. Environment Control for Animals and Plants. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI. 410 pp.
4. Amsden, R.C. 1962. Reducing the evaporation of sprays. *Agric Aviat.* 4:88-93.
5. Armstrong, D.V. 1994. Heat stress interaction with shade and cooling. *Jour. Dairy Science* 77:2044-2050.
6. ASAE. 1999. Psychrometric Data. Agricultural Engineering Yearbook D271.2. ASAE, St. Joseph, MI. 49085.
7. ASHRAE. 1993. Handbook of Fundamentals. ASHRAE, Inc. New York.
8. Prenger, J. J. and P. P. Ling. 2002. Greenhouse Condensation Control: Understanding and Using Vapor Pressure Deficit (VPD). Ohio State University Extension Fact Sheet AEX 804-01.
9. Wang, D.C., W. Fang and D.S. Fon. 2001. Development of a digital psychrometric calculator using MATLAB. *Acta Horticulturae.* 578:339-344.