

第四章 設施內氣候物理特性與作物生育

4.1 設施之氣候物理特性

設施之氣候物理特性範圍廣泛，舉凡設施內與設施外，空氣中與土壤/介質中等環境因子均屬之。本節由設施環控觀點探討生命的三大要素：空氣、水與陽光及相關的工程基礎。

1) 濕空氣

探討由空氣與水氣組成的混合氣體(簡稱濕空氣或濕氣)的一門學問稱為濕空氣熱力學(Psychrometrics)。由於濕空氣可做為輸送水氣、氧氣、二氧化碳、其他氣體與熱量的介質，大氣亦可做為水蒸氣、熱量的來源(source)或水蒸氣、熱量與廢氣的去處(sink)，所以濕空氣與多種處理程序相關，譬如加熱、通風、空調、冷凍、儲藏、堆肥(有氧發酵)、乾燥、脫水與加濕等。

(1) 濕空氣熱力特性

環境控制涉及空氣溫度、溼度與成分等的調節，濕空氣為熱與水氣的來源(source)與去處(sink)，熱與水氣直接影響空氣的溫度與溼度。在熱力學性質(psychrometric properties)中，空氣的溫度包括乾球、濕球與露點溫度，溼度則包括絕對溼度(或稱溼度比)與相對溼度。其他的性質包括密度、比容、飽和度、飽和蒸氣壓、蒸氣分壓、熱焓等。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。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，異發生讀圖誤差，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)與台灣大學農機系/生機系所建的 Psychchart(馮與方, 1986) DOS 版與後續所建的 Windows 版電腦軟體即植基於此些計算式，分 MATLAB 版本(Wang 等, 2001)與 C++ 版本(方等, 2001; 方與簡, 2001)。後續介紹以 C++ 版本為主，此軟體取名 PsyC。如圖 4-1 所示，允許輸入不同大氣壓力或海拔高度進行計算。如圖 4-2 左側視窗內所示即為傳統的濕氣圖，使用者需要知道大氣壓力之外的兩項獨立參數的值才能在圖上得出空氣的狀態點(state)，一旦得出狀態點，其他性質可由圖中查出。

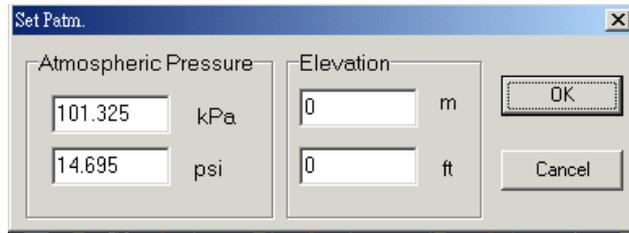


圖 4-1 設定大氣壓力值的視窗

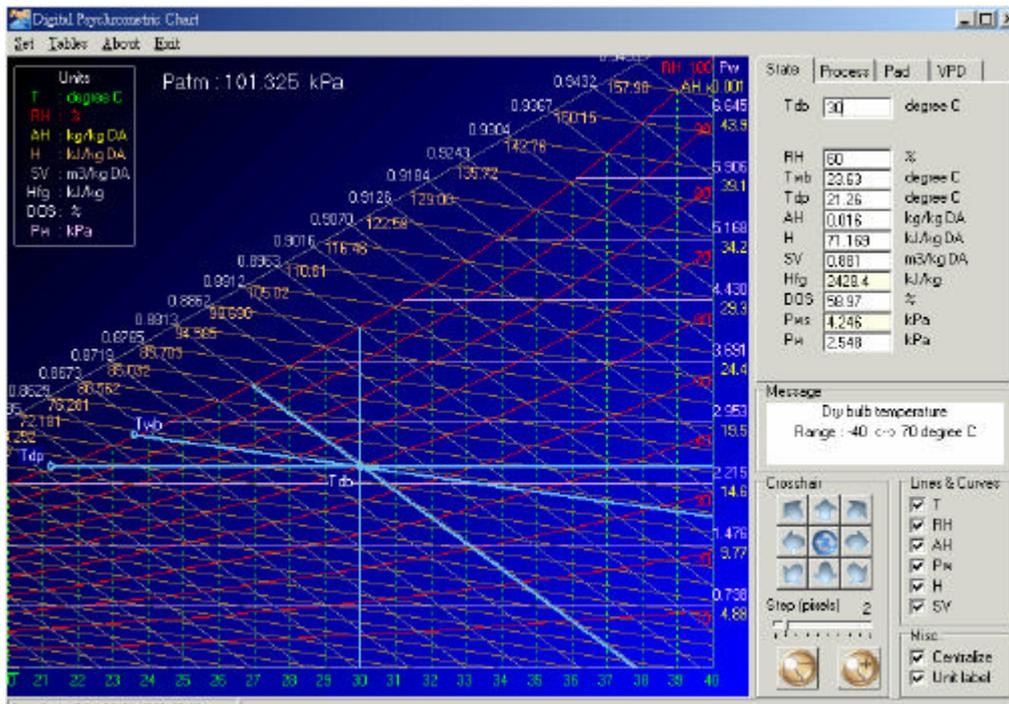


圖 4-2 數位濕氣圖電腦軟體之首頁

如圖 4-2 上方第二列所示有四個功能選項，第一個為 Set，允許使用者設定大氣壓力或海拔高度(圖 4-1)，第二個功能選項 Tables 提供多個表格方便對照。表 4-1 與表 4-2 所示分別為不同乾球溫度與相對溼度下的溼球溫度與不同乾球溫度與溼球溫度下的相對溼度。

水牆降溫系統、洒水降溫系統、噴霧降溫系統與冷卻水塔等基本上都是基於蒸發冷卻原理，其降溫極限為當時空氣狀態下的濕球降，濕球降(Wet Bulb Depression, WBD)為乾球溫度與濕球溫度的差。表 4-3 顯示不同乾球溫度(Tdb) 與相對溼度(RH)下的濕球降。

表 4-1 不同乾球溫度(20~44 °C) 與相對溼度(50~100%)下的濕球溫度(°C)

	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44
50	13.79	15.39	17	18.61	20.22	21.84	23.46	25.09	26.73	28.38	30.04	31.7	33.38
55	14.47	16.12	17.77	19.43	21.08	22.75	24.42	26.09	27.78	29.47	31.18	32.89	34.62
60	15.15	16.84	18.53	20.23	21.93	23.63	25.34	27.06	28.79	30.53	32.28	34.04	35.81
65	15.81	17.54	19.27	21.01	22.75	24.49	26.25	28.01	29.78	31.56	33.35	35.16	36.97
70	16.45	18.22	19.99	21.77	23.55	25.33	27.13	28.93	30.74	32.56	34.39	36.24	38.09
75	17.09	18.9	20.7	22.51	24.33	26.15	27.99	29.83	31.67	33.53	35.4	37.28	39.17
80	17.71	19.56	21.4	23.25	25.1	26.96	28.82	30.7	32.59	34.48	36.39	38.3	40.23
85	18.33	20.2	22.08	23.96	25.85	27.74	29.64	31.56	33.48	35.41	37.35	39.3	41.26
90	18.93	20.84	22.75	24.67	26.59	28.51	30.45	32.39	34.35	36.31	38.28	40.27	42.26
95	19.53	21.47	23.41	25.36	27.31	29.27	31.24	33.21	35.2	37.19	39.2	41.21	43.24
100	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44

表 4-2 不同乾濕球溫度(20~44 °C)下的相對溼度(%)

	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

表 4-3 不同乾球溫度(20~44 °C)與相對溼度(50~100%)下的濕球降(°C)

	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

水牆降溫系統的效率定義為(Tdb_outdoor – Tdb_after pad)除以 WBD。如圖 4-3 所示, 外溫 Tdb_outdoor 為 26 °C, 相對溼度 RH 為 45 %, 導出的施球溫度 Twb 為 17.77 °C, 所以 WBD 為 8.23 °C。一個所謂 80% 效率的水牆代表通過水牆的空氣溫度 Tdb_after pad 為 26 – 0.8 * WBD 等於 26 – 0.8 * 8.23 等於 19.41 °C。

圖 4-3 右下角有關 Lines & Curves 的部分只勾選了 Tdb 與 RH, 所以在圖上只出現

代表兩者的直線與曲線。圖 4-2 中 Lines & Curves 的 6 個選項全部被勾選，所以整張圖顯得非常複雜，允許顯示局部直線和曲線的功能，使得 PsyC 軟體應用在教學上頗為方便。

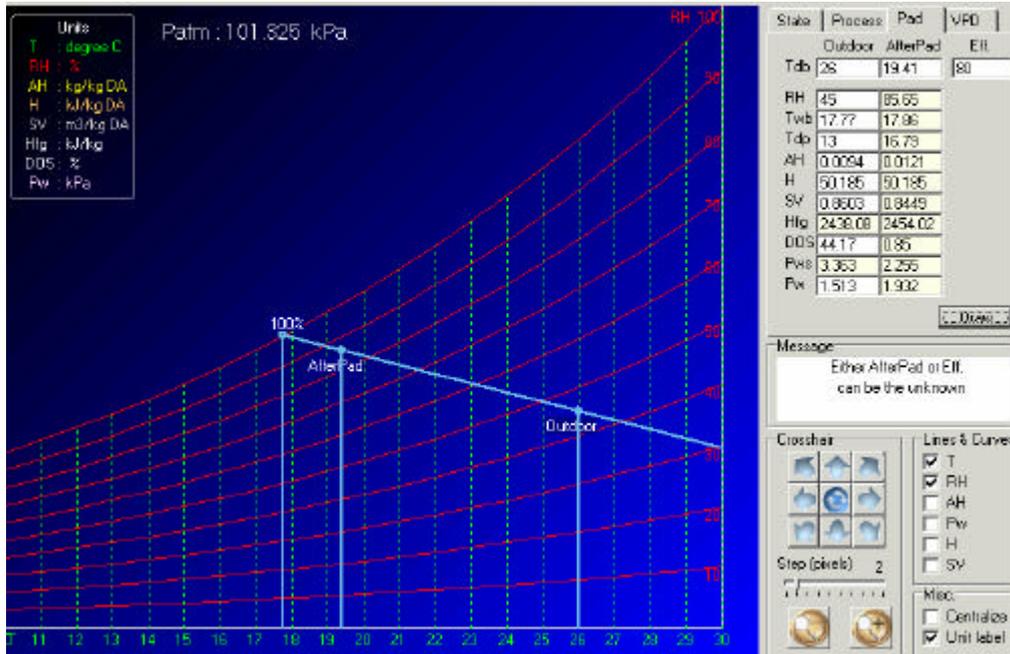


圖 4-3 Psychart 軟體中顯示水牆降溫系統的基本概念

(2)不同風速下之水牆效率

Trumbull, et al. (1986) 針對三種商品化的水牆材質進行探討，發現通過水牆的風速 (V) 增加，水牆效率 () 降低；研究同時發現量測的水牆效率比廠商公佈的技術資料比較明顯偏低。Mannix (1981) 探討水牆上水流速對水牆效率的影響，其結果顯示只要水牆上水份分佈平均，則水流速對水牆效率並無明顯影響。然而，Trumbull, et al. (1986) 發現不同水流速在不同風速下對水牆效率存在明顯影響。在低流速時 (0.57~1.53 L/s)，在實驗的風速範圍 (0.2~1 m/s) 內，水牆效率隨風速增加而降低，但在高流速時 (2.16~3.33 L/s)，在實驗的風速範圍 (0.2~1 m/s) 內，水牆效率呈現穩定狀態。

當風速高至某一特定值時，水牆上的水份會被帶入溫室內，不同廠牌的水牆材質有不同的最高風速，譬若 excelsior pad 為 1 m/s，Kool-Cel pad 為 1.6 m/s，而 CELdek pad 為 2 m/s (Trumbull, et al., 1986)。

(3)不同厚度下之水牆效率與系統壓降

凡是使用風扇的氣密溫室，其溫室內外就會有壓差 (亦稱壓降)，風扇以抽風方式使用會造成負壓 (外部壓力大於內部)，以吹入方式使用會造成正壓 (內部壓力大於外部)。開放型溫室沒甚麼壓差，開側窗的溫室稍有壓差，側窗總面積小則壓差大，加了水牆會提高壓差，水牆厚度愈大則壓差愈高，但效率可提高，成本也提高。不同風速下的水牆效率與壓降曲線稱為水牆特性曲線，此為採購該設備時必須了解的技術資

料。如圖 4-4 與圖 4-5 為美國 Munters Corp. 產品的水牆特性曲線，風速增加，效率降低，壓降增加。系統壓降直接影響風機的性能，如圖 4-6 所示為在台灣頗為盛行的義大利 Euromme 廠牌各個規格的風扇的風機性能曲線。當系統壓降增加，相同風扇所能提供的風量降低。

增加防蟲網也會提高壓差，防蟲網孔目愈小則壓差也愈高。溫室開口安裝防蟲網以不提高壓差為原則，最好的做法就是加大防蟲網使用面積，32-50 網目防蟲網，建議使用防蟲網面積為溫室開口面積的 1.4-1.7 倍。

業者所稱風扇所能提供的風量一般以無壓差下的風量為準，在型錄中也會提供在有壓差的情況下所能提供的風量(表 4-4 與表 4-5)，壓差愈大風量愈小。在設計環控系統時應確實瞭解溫室系統的壓降以正確選定風扇，不要以無壓差下的風量為計算基準。表 4-4 與表 4-5 的第三列為筆者增加的內容，當壓降達 50Pa 或 0.2 吋水柱時，相同風機只能提供原來 90% 的風量。溫室系統的壓降不應超過 0.2 inch 水柱(50 Pa)。表 4-6 所示為風壓與風量相關不同單位的轉換常數。

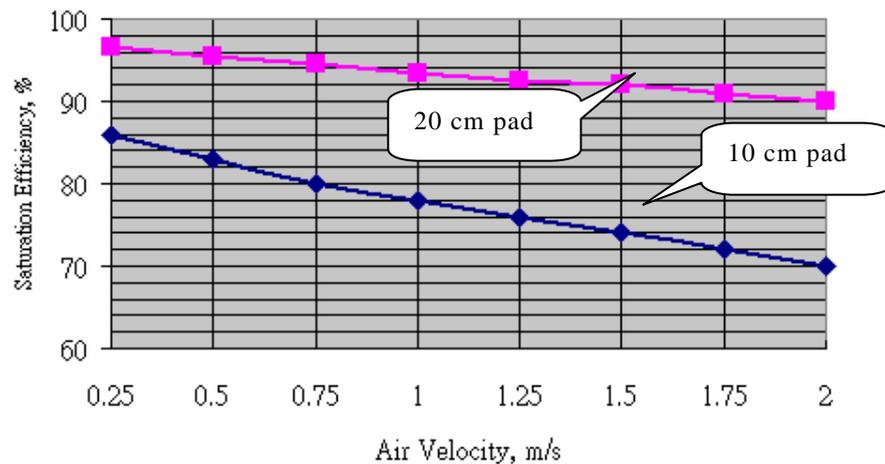


圖 4-4 不同風速與厚度下水牆之效率

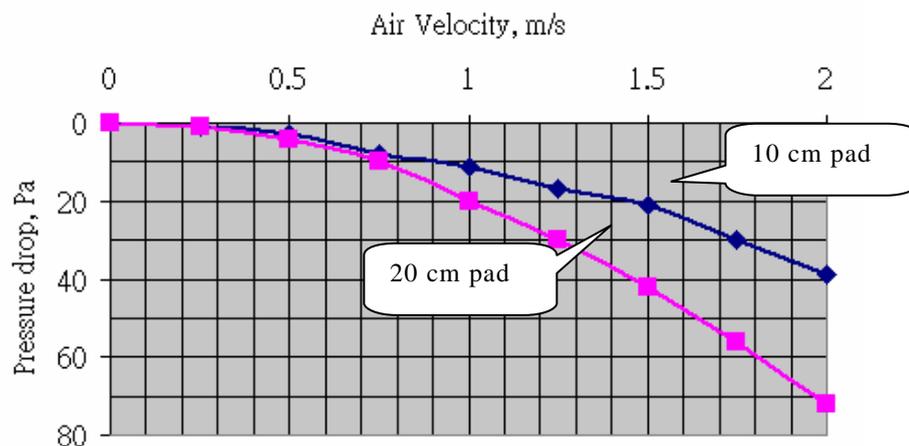


圖 4-5 不同風速與厚度下水牆之壓降

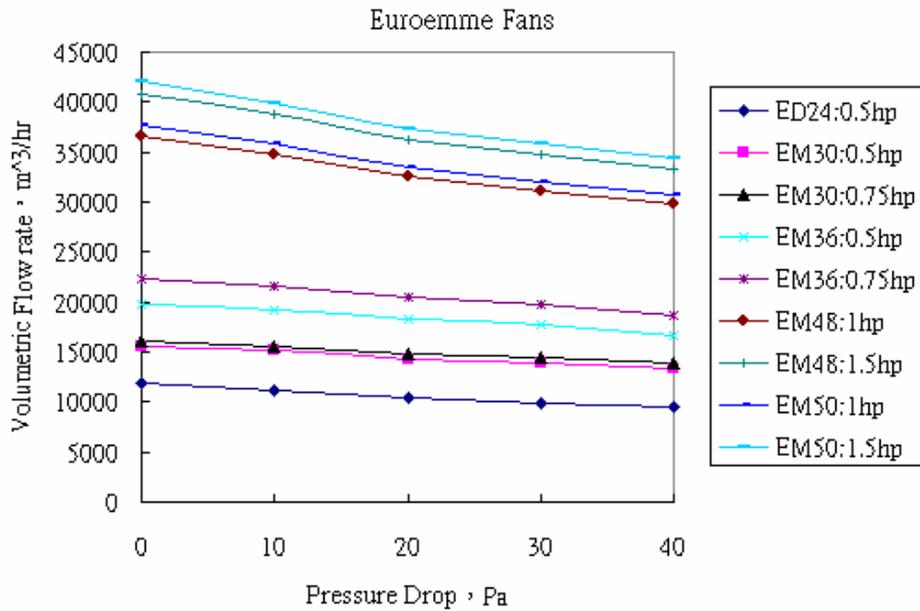


圖 4-6 義大利 Euroemme 廠牌 9 種規格風機之風機曲線

表 4-4 風機型錄範例(美國廠商，英制單位)

壓降, in.水柱	0	0.1	0.125	0.25	0.375	0.5	0.625	0.75
風量, cfm	13200	12770	12650	11870	10950	9780	8530	6950
比例, %	100	96.7	95.8	89.9	82.9	74.1	64.6	52.6

* 葉片直徑 30 吋，馬力 2hp，轉速 1150rpm

表 4-5 風機型錄範例(歐洲廠商，公制單位)

壓降, Pa	0	30	50	80	100	150	200
風量, m³/s	4200	3950	3820	3750	3500	3190	2860
比例, %	100	94	90.9	89.2	83.3	75.9	68.1

*葉片直徑 30cm，馬力 600W，耗電流 2.4A，噪音 67dB，轉速 2800rpm，單相電源 220V/50Hz

表 4-6 風壓與風量相關不同使用單位間的轉換常數

壓力	Pa (巴斯卡)	Psi (lb/in²)	cm 水柱高	ft.水柱高	大氣壓
1		14.50377E-5	0.0101974	3.3456E-4	9.86923E-6
6895		1	70.3089	2.3067	0.068
97.95		0.0142229	1 cm		9.67814E-4
24.88 約 25		0.361261	0.1 inch		

(接下頁)

(續表 4-6)

壓力	Pa (巴斯卡)	Psi (lb/in ²)	cm 水柱高	ft.水柱高	大氣壓
	2985.516	0.4335139	30.48 cm	1	
	1.01325E5	14.696	1033.26 cm	33.8995	1 atm
風量	cfm (ft ³ /min, 立方呎/分)		m ³ /s (立方公尺/秒)		
	10000 cfm =		4.719 m ³ /s		
	2118 cfm =		1 m ³ /s		

(4)噴霧系統之噴嘴效率

洒水與噴霧系統的降溫效率小於或等於噴嘴的效率，系統效率由噴嘴數，噴水速率與噴嘴效率決定(方，1995)。Bottcher et al. (1991)建立不同水壓(P, in kPa)之下的噴嘴效率()計算式如下：

$$= 0.124 + 1.35 * 10^{-4} * P$$

1個大氣壓力以0.1 MPa 估算，當提供 35 個大氣壓力時，噴嘴效率只有約 60%，當壓力達到 64.888 個大氣壓力(P=64.888 * 100 kPa) 時，噴嘴效率() 趨近 100%。考慮管路壓損，一般在高壓噴霧系統中，多建議使用 70 個大氣壓力的水壓 (Fang, 1994; 方，1995)。

(5)噴霧與水牆之比較

噴霧及水牆的差異在於水及空氣相互作用的方式不同，前者之目的在產生小水滴，使這些小水滴在設施內漂浮，並在蒸發時將熱量從空氣中去除。後者之作法則是以風扇抽風方式強迫空氣通過水牆，水分被蒸發並將空氣中之熱量去除。

使用噴霧系統時，其目的在使噴霧系統製造之霧顆粒未接觸到地面以前就能夠蒸發。因此，霧顆粒愈小愈好。而且霧顆粒愈小，就霧顆粒數量而言，霧顆粒之表面面積愈大，霧顆粒蒸發率愈高，所能達到之蒸發冷卻效果愈好。使用噴霧系統對密閉性的要求不高，所以可適用於開放式的農用設施。此系統的降溫極限為室內空氣的濕球溫度，高溫時以 28 為極限當屬合理的假設(方，1995)。

使用水牆時必需有風扇配合抽氣造成負壓，所以要特別注意密閉性，必需讓所有進來的空氣通過水牆，所以並不適用於開放式設施，除非改為正壓送風方式。使用水牆所無法避免的是一定存在溫度梯度；換言之，剛通過水牆的空氣溫度為最低，沿途吸熱造成風扇出口處的溫度為最高。此系統的降溫極限為室外空氣的濕球溫度，當氣溫在 30 以上時，使用水牆的密閉式空間的水牆出口處的氣溫以 25 為降溫極限，室內的平均溫度以 28 為極限當屬合理的假設(方，1994)。

(6)溫溼度指標

動物的熱緊迫情況與 THI 呈現高度相關性，有多位學者針對雞、豬與乳牛發展不同的溫溼度指標 (Temperature Humidity Index, THI)計算公式，彼此間稍有差異，但不外乎是結合溫度與溼度的綜合性指標 (THI = a * Twb + b * Tdb + c)。乳牛的肛溫與牛乳產量均與溫溼度指標(THI)呈現高度的相關性 (Igono et al., 1985; Knapp and Grummer, 1991)，當環境的 THI 值高於 70~72，乳牛即處於熱緊迫狀態 (Ingraham et al., 1974; Johnson, 1985; Stott, 1981)。當月平均 THI 值高於 62，乳牛的受孕成功率即會降低 (Du

Preez et al., 1991)。ASHRAE (1993)有關環境指標與產乳量的關係，使用下式：

$$MPD = 1.08 - 1.736 * NL + 0.02474 * NL * THI$$

其中，

MPD：每日每頭乳牛的產乳減少量，單位 kg

NL：沒有熱緊迫下的每頭乳牛每日泌乳量，單位 kg

THI：溫溼度指標

由上式可知，當 THI 固定時，MPD 值隨 NL 值增加而增加，這代表高產量乳牛受到環境緊迫程度的影響較明顯。相同 NL 者，MPD 值亦隨 THI 值增加而增加，如表 4-7 所示。

表 4-7 不同泌乳量的乳牛在不同熱緊迫狀態下的每日減產量比較

MPD, kg/頭/日	Tdb=36, RH=90 THI=89.5	Tdb=36, RH=50 THI=85.9	Tdb=30, RH=70 THI=79.9	Tdb=24, RH=90 THI=73.2
NL=20 kg/頭/日	MPD=10.6	8.8	5.9	2.6 kg/頭/日
NL=30 kg/頭/日	MPD=15.4	12.7	8.3	3.3 kg/頭/日

Linville and Pardue (1992) 使用更詳細的多日的連續 THI 資訊，可更精確的預測乳牛的產乳量，計算式如下：

$$MP = 21.48 - 0.051 * HD74 - 0.0099 * HA80S$$

其中，MP：每日每頭乳牛的泌乳量，單位 kg/day/cow

21.48：每日每頭牛的正常泌乳量，kg

HD74：過去四天中 THI > 74 的總小時數

HA80S：前一天 THI > 80 的總小時數的平方

如前述的 PsyC 軟體中的相關輸出如圖 4-7 與圖 4-8 所示，分別允許使用者查詢在不同 Tdb 與 RH 或不同 Tdb 與 Twb 下的 THI 值。

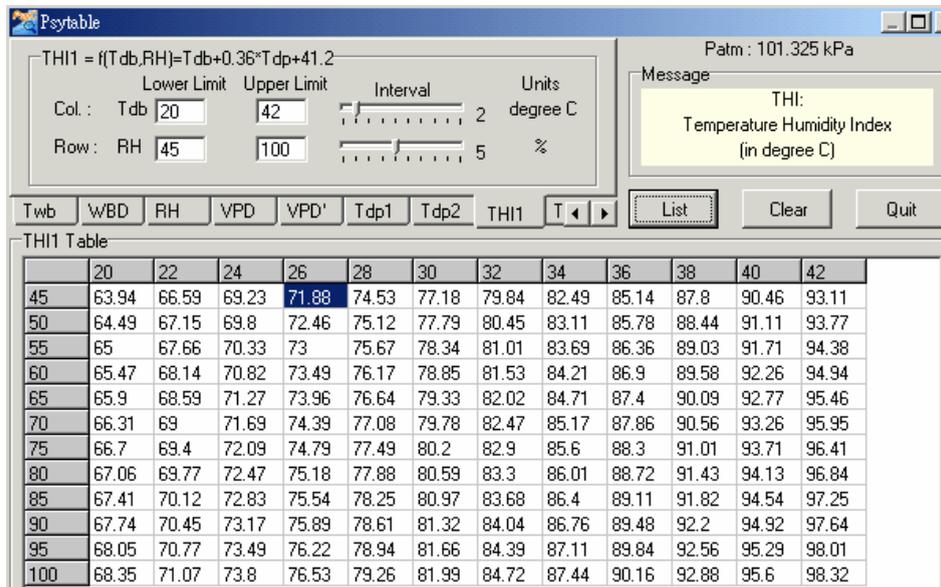


圖 4-7 不同 Tdb 與 RH 下的 THI

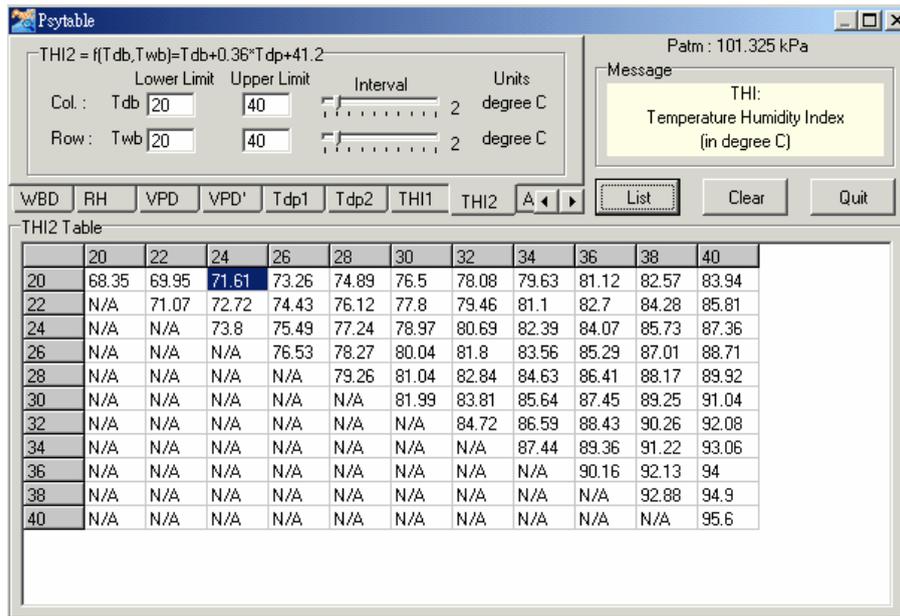


圖 4-8 不同 Tdb 與 Twb 下的 THI

(7)黑球溫度

THI 作為動物體感受到熱緊迫的指標已行之多年，然而其缺乏考慮風速的影響。黑球溫度 (Black globe temperature, BGT)為綜合乾球溫度、輻射與平均風速的一個新的指標，常被用來探討遮蔭的影響。當 BGT ≤ 25 °C 時，強制通風對降低乳牛體溫與肛溫沒有效果，當環境溫度高於 36 °C 時，強制通風可緩和肛溫隨 BGT 值增加而增加的速率達一半 (Berman, 1985)。黑球溫度的缺點則是並未考慮溼度的影響。

(8) 濕黑球溫度

濕黑球溫度(Wet bulb globe temperature, WBGT)綜合了乾球溫度、溼度、輻射與風速的影響，為 THI 與 BGT 之後的另一個新的指標。如圖 4-9 所示為商品化的熱緊迫量測儀器(heat stress monitor, hs-3600, Metrosonics, INC.)。WBGT 在是否遮蔭的情況下有不同的計算式，如下所示：

$$WBGT_{\text{indoor}} = 0.7 * Twb + 0.3 * BGT$$

$$WBGT_{\text{outdoor}} = 0.7 * Twb + 0.2 * BGT + 0.1 * Tdb$$

其中，WBGT, Twb, Tdb, BGT 單位均為 °C。

WBGT 的研究首見於美國海軍醫學研究所的熱緊迫部門(Heat Stress Division)，專門用來探討人體在各種熱緊迫的環境下所能停留的最大允許時間。



圖 4-9 熱緊迫量測儀 (hs-3600, Metrosonics, INC.)。

(9) 風冷溫度

通風時由於有利於體表水份的蒸散，所以動植物體所感受的溫度會低於鄰近的空氣溫度，此即所謂的風冷溫度(Wind chilled temperature)。禽畜舍內冬季的通風仍需掌握最小的換氣量以確保排除過多的粉塵、CO₂ 與 NH₃。然而，小雞與小豬在冬季若未能做適當的保溫常導致死亡。Timmons (1991)建議的適用於雞的風冷溫度計算公式如下所示：

$$T_{\text{wind chilled}} = 0.451 * T_{\text{air}} - 0.456 * \ln(V_{\text{air}}) * T_{\text{air}} + 6.832 * \ln(V_{\text{air}}) + 8.225$$

並如圖 4-10 所示。

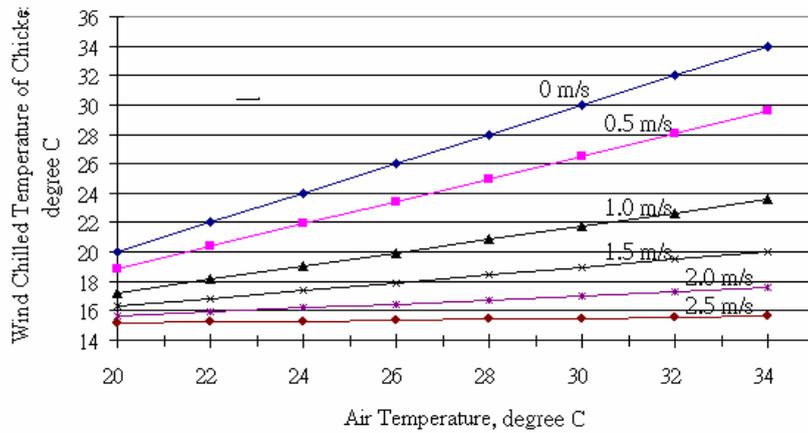


圖 4-10 雞隻適用的風冷溫度

(10)由兩個狀態點求過程

濕氣圖不僅可用來求出某空氣狀態點的性質，在實務上常用來求某兩個狀態點之間的差。從某個狀態點改變至另一個狀態點稱為過程(process)，空氣經過水牆加濕/降溫，進入溫室與室內空氣混合，再經過溫室內部由另側離開溫室的過程如圖 4-11 所示。常見的空气狀態變化過程包括：顯熱加熱(3→4)、顯熱冷卻(4→3)、蒸發冷卻/乾燥(1→2)、冷凝(5→4)、加濕(4→5)、空氣混合(1,2→3)等。

如圖 4-12 所示，PsyC 軟體提供使用者方便的工具自動計算兩個狀態點所有性質的差。圖 4-12 中 Crosshair 區中所示的箭頭亦允許使用者依某固定性質移動狀態點，譬如：左或右箭頭代表固定露點溫度(絕對溼度/蒸氣分壓)，但降低或增加乾球溫度；上或下箭頭代表固定乾球溫度，但降低或增加露點溫度(絕對溼度/蒸氣分壓)；左上或右下箭頭代表固定濕球溫度，但降低或增加乾球溫度；右上或左下箭頭代表固定相對濕度，但增加或降低乾球溫度。

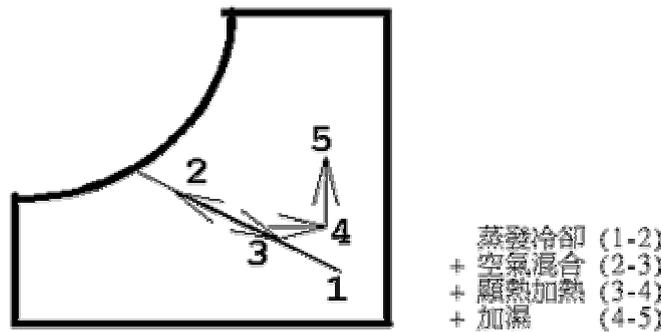


圖 4-11 濕空氣狀態點變化過程

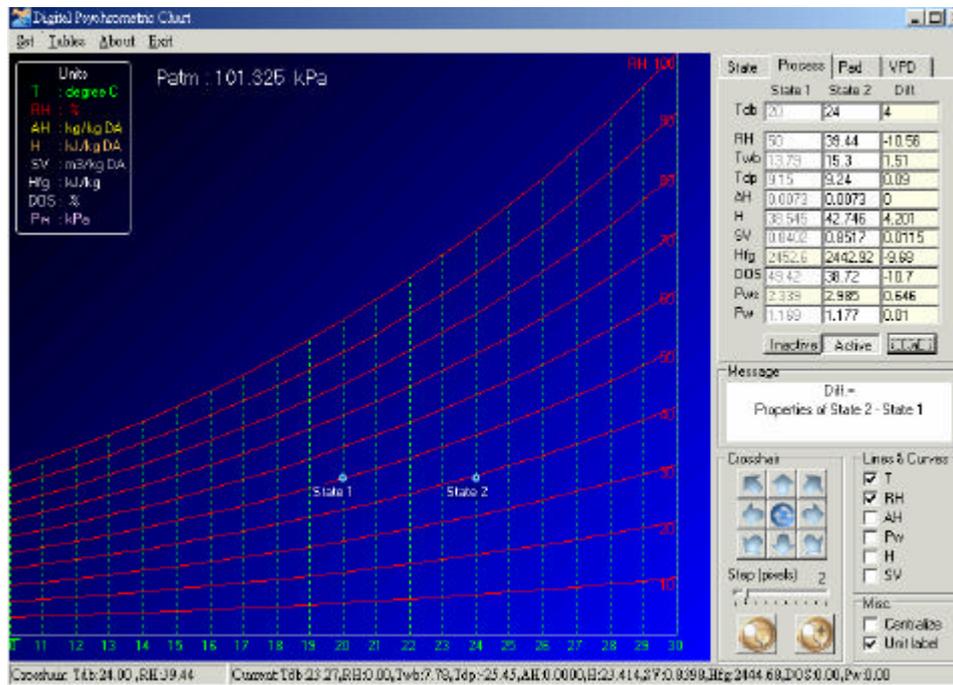


圖 4-12 PsyC 軟體中提供計算 process 的功能

(11)蒸氣壓差與灌溉

溫室內的水分蒸散(Evapotranspiration) 主要來自土壤或其他介質之蒸發(Evaporation)與作物之發散(Transpiration)，前人之研究證實水分蒸散量與葉片(leaf)氣孔內之飽和蒸氣壓($P_{ws}@T_{leaf}$)與空氣(air)中的蒸氣分壓($P_v@T_{db}$)的差(VPD_{l-a})有顯著的關係(表 4-8)。空氣狀態點為已知， $P_v@T_{db}$ 為可求；葉溫(T_{leaf})為已知，且假設氣孔內相對溼度為 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。

如圖 4-13 所示為 PsyC 軟體的 VPD 功能，此部份允許計算植物葉片與週遭空氣的蒸氣壓差 (VPD, Vapor Pressure Deficit)，此 VPD 結合葉溫與空氣溫度的差值可進一步求出 CWSI (Crop Water Stress Index)值，後者可作為植物體是否處於水逆境(water stress)的指標，亦可進一步作為是否需要灌溉的依據。

表 4-8 空氣與葉片之蒸氣壓差說明例

狀態點	T_{db}	T_{wb}	RH, %	P_v , kPa	蒸氣壓差 VPD_{l-a}
air	30	21.84	50	2.12	
Leaf 1	30	30	100	4.24	2.12 kPa
Leaf 2	25	25	100	3.17	1.05 kPa

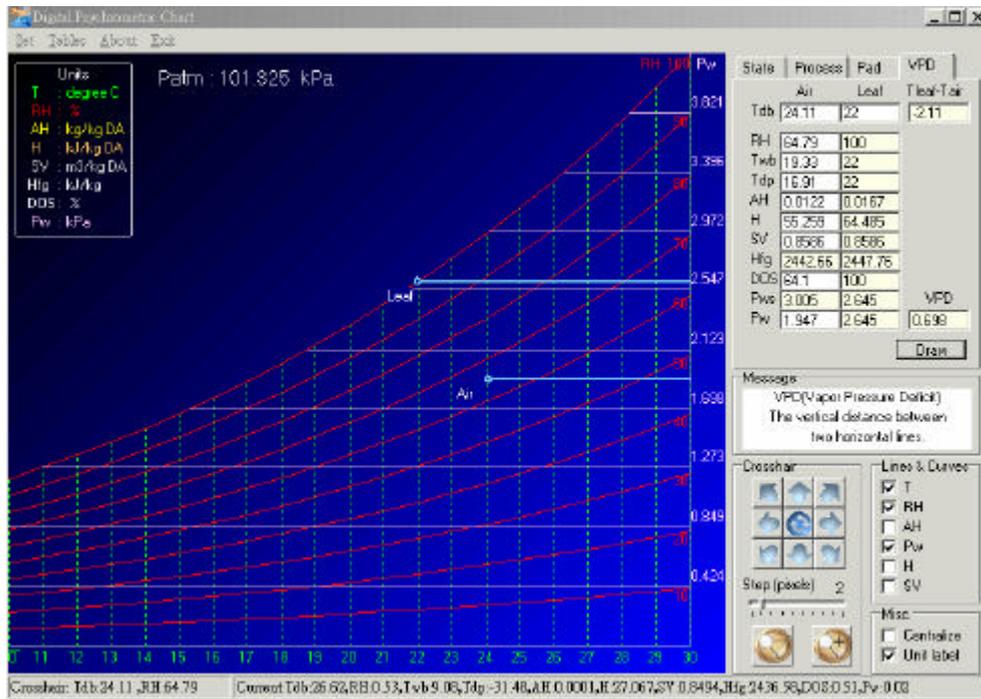


圖 4-13 PsyC 軟體中提供計算 VPD 的功能

(12)蒸氣壓差 VPD 與病蟲害防治

高濕的環境有利於病菌與其媒介昆蟲的繁殖，透過環境控制的方法可以使用結露偵測器偵測結露的發生或透過 VPD 的計算，在結露發生之前就及時啟動通風系統，避免葉面結露的發生，進而達到病蟲害防治之目的。黴菌(Fungal pathogens)喜歡 VPD 低於 0.43 kPa (0.062 Psi)的環境，當 VPD 低於 0.2 kPa (0.03 Psi)時，疫病容易蔓延。表 4-9 所示為 1 大氣壓下不同溫度範圍內，VPD 達上數兩項參考值的相對溼度。原則上，溼度控制的病蟲害防治方法必須使溫室內相對溼度低於表中所列的建議值。

表 4-9 大氣壓下不同乾球溫度時病蟲害防治的相對溼度上限

Tdb, °C	10	16	20	30	38
RH@VPD=0.2kPa	83 %	89 %	91.5 %	95.5 %	97 %
RH@VPD=0.43kPa	65 %	76 %	81.5 %	89.8 %	93.5 %

(方煒)

引用 參考文獻

1. 方煒。1994。水牆設計與使用。農業機械學刊 3(4)：57-70。
2. 方煒。1995。溫室蒸發冷卻系統降溫效果量化指標之建立。農業機械學刊 4(2)：15-25。
3. 方煒、簡志樺。2001。濕空氣線圖計算軟體。PsyC0226.exe 為最新版本。

下載網址：<http://ecaaser3.ecaa.ntu.edu.tw/weifang/psy/cea2-5.htm>

4. 方煒、馮丁樹、簡志樺、王岱淇。2001。生物環境控制工程電腦軟件之更新及其應用-I。濕空氣熱力性質。中國國際果蔬技術論壇論文集。廈門市。中國。
5. 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 1986 32(2)：49-64。
6. Albright, L.D. 1990. Environment control for animals and plants. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI. 410 pp.
7. ASAE D271.2. 1994. Psychrometric Data. Agricultural Engineering Yearbook ASAE, St. Joseph, MI. 49085.
8. ASHRAE. 1993. Handbook of Fundamentals. ASHRAE, Inc. New York.
9. Berman, A. 1995. How to improve production of dairy cattle under hot and humid climate. (in Chinese, translated by Dr. Lee, Shan-Nan). Taiwan Livestock Research Institute (TLRI), Taiwan, R.O.C.
10. Bottcher, R.W., G.R. Baughman, R.S. Gates, M.B. Timmons. 1991. Characterizing efficiency of misting systems for poultry. Transactions of the ASAE. 586-590.
11. Du Preez, J.H., S.J. Terblanche, W.H. Giesecke, C. Maree and M.C. Welding. 1991. Effect of heat stress on conception in a dairy herd model under south African conditions. Theriogenology 35:1039-1049.
12. Euroemme Corp., 1999. Catalogue of Fans. Italy.
13. Fang, W. 1994. Greenhouse Cooling in Subtropical Regions. Acta Horticulturae 399:37-48.
14. Ingraham, R.H., D.D. Gillette and W.D. Wagner. 1974. Relation of temperature and humidity to conception rate of Holstein cows in subtropical climate. J. Dairy Science 57:476-481.
15. Johnson, H.D. 1985. Physiological responses and productivity of cattle. p.3-23 in Stress physiology in livestock. Vol II. Yousef M.K. (ed.) CRC Press, USA.
16. Linvill, D.E. and F.E. Pardue, 1992. Heat stress and milk production in the south Carolina coastal plains. J. Dairy Science 75:2598-2604.
17. Mannix, J.G. 1981. Evaluation of convective heat transfer coefficient of an evaporative cooling pad. An unpublished thesis. Auburn University.
18. Metrosonics, INC. User manual of hs-3600, USA.
19. Munters Corp., USA. 1996 Catalogue of Pads.
20. Stott, G.H. 1981. What is animal stress and how is it measured. J. Animal Science 52:150-153.
21. Trumbull, R.D., J.L. Koon and C.A. Flood, Jr. 1986. Potential for use of evaporative cooling systems. ASAE paper 86-4048. St. Joseph, MI.
22. Wang, D.C., W. Fang and D.S. Fon. 2001. Development of a digital

psychrometric calculator using MATLAB. Acta Horticulturae. 578:339-344.

2) 太陽能

有關太陽輻射能量、太陽的位置及其與地表上傾斜任意角度的斜面之間的相關角度等均屬太陽能工程(Solar Engineering)領域之範疇，其相關的計算公式請參考太陽能工程之教科書，本章不予以重覆。本章的重點在使用上述公式配合台灣地區氣象測站的資料，提供本地區的相關數據，並著重介紹到達地表面上的太陽輻射能量中與光合作用直接相關的光量，同時包括輻射單位與量子單位間之轉換與由來。

(1) 大氣層外圍

大氣層外圍的一個隨時正向太陽的平面上在一年中的第 n 天所受到的太陽能可用下式計算，其平均值以 G_{sc} 表示，稱為太陽常數 (Solar Constant)，1981 年，世界氣象組織改訂太陽常數之值為 $1367 \pm 7 \text{ W/m}^2$ 。對 n 作圖可得圖 4-14。

$$G'_{sc} = G_{sc} * [1 + 0.033 \cos\{(n/365)(360^\circ)\}]$$

其中， $G_{sc} = 1353 \text{ J s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ 或 $429 \text{ Btu hr}^{-1} \text{ ft}^{-2}$ 或 $1.940 \text{ langley min}^{-1}$

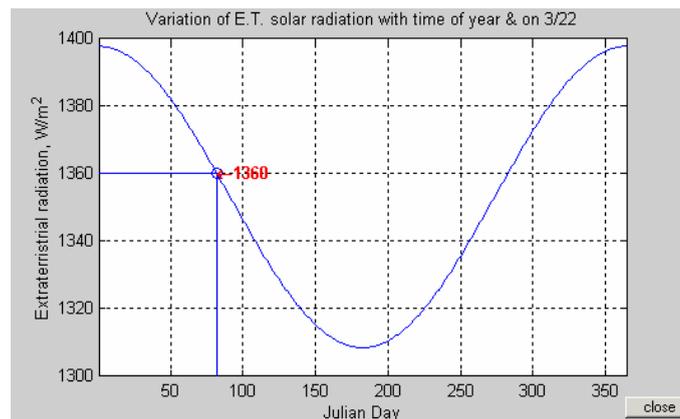


圖 4-14 大氣層外圍的一個正向太陽的平面上所受到的太陽能

如圖 4-15 所示為太陽光譜分布，最上層的虛線為大氣層外圍的太陽能，除了波峰處之外，大致上與絕對溫度為 5762 K 的完全黑體的輻射光譜相同。任何溫度超過絕對零度的物體都有輻射產生，太陽光產生的輻射線的波峰(500 nm)落於可見光範圍，一般以短波稱之；常溫的物體其絕對溫度約為 300 K，其輻射線的波峰(10 μm)落於遠紅外線範圍，一般分別以長波來稱之來與可見光(短波)作區隔。

圖 4-16 所示為絕對溫度為 4800 K 至 300 K 的完全黑體的輻射能。其光譜的分布可由普郎克定律(Planck's law) 來描述，波峰的位置(λ_{max})則透過韋恩定律 (Wien's law) $\lambda_{max} = 2897 / T$ 計算，其中 T 為絕對溫度， λ_{max} 為微米(μm)。圖 4-17 可更明顯看出波峰位置隨著絕對溫度減少而右移(波長增加)。

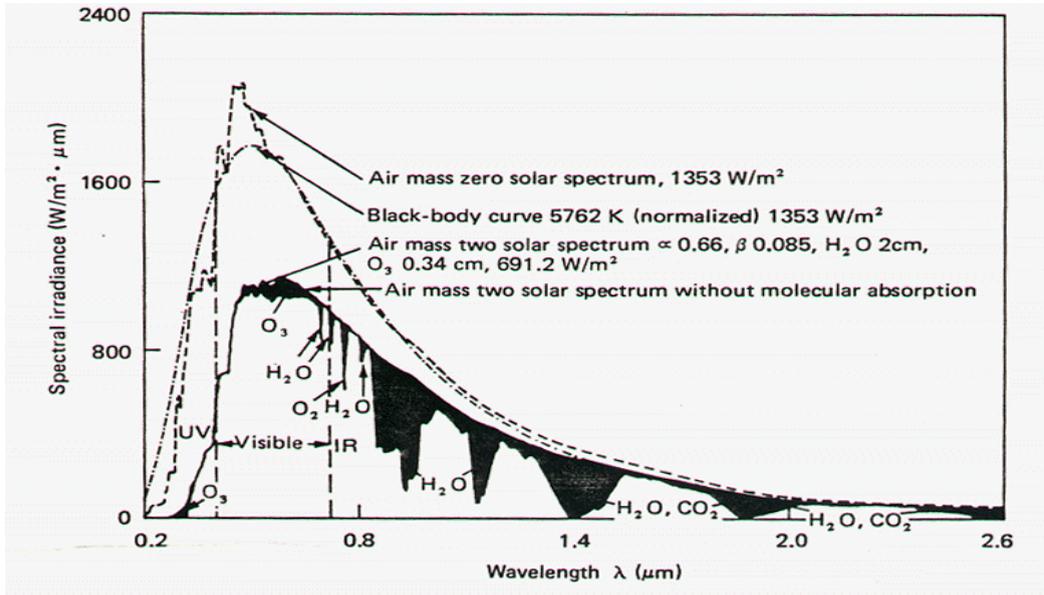


圖 4-15 太陽光譜 (Duffie and Beckman, 1980)

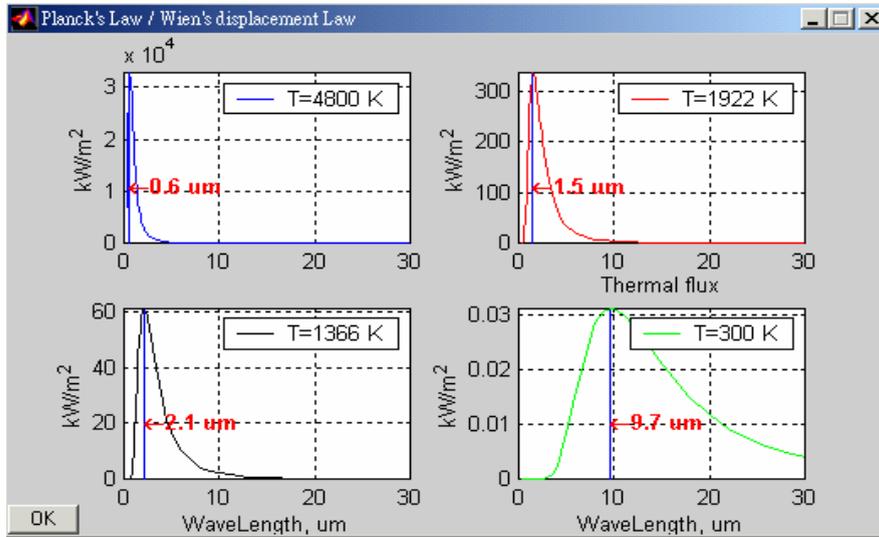


圖 4-16 四種溫度(300 – 4800K)的完全黑體的輻射光譜分布與波峰位置

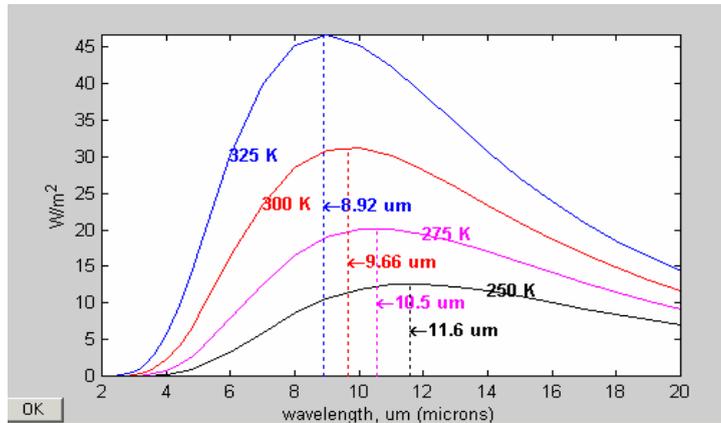


圖 4-17 四種溫度(250-325 K)的完全黑體的輻射光譜分布與波峰位置

玻璃為溫室常用的被覆資材，其短波穿透率高，長波穿透率低，所以光線容易進來，但熱量(紅外線)不易出去，此種現象稱為溫室效應。環保上提到的溫室效應為上述概念的引申。當溫室使用PE塑膠布時，溫室效應就不明顯了，因為PE這種材質有不低的長波穿透率。為了保溫之目的，有些農用PE塑膠膜有添加紅外線阻隔劑的產品提供選擇。

假設全光譜的總能量為1，各波長的累積機率值可用以下兩式計算(方，1994)。

240 500 nm 範圍 ($R^2 = 0.99974$)

$$Y = a + b * X^2 * \sqrt{X} + c / X * \sqrt{X} + d * \exp(-X)$$

其中，
 $a = -0.16661872$ $b = 6.38928E-08$
 $c = 415.778608$ $d = -1.3977E+101$

500 3800 nm 範圍 ($R^2 = 0.9999928353$)

$$Y = a + b * X + c * X^2 + d / X + e / X^2$$

其中，
 $a = 1.83579683$ $b = -0.00025789$
 $c = 2.84687E-08$ $d = -1081.00849$ $e = 168404.6274$

當需要了解某波段的光譜佔總能量的百分比時，只需將波段的上下限波長值(X)，依波長大小代入第一或第二式，兩計算結果(Y)的差值即為該波段範圍的太陽能佔總光譜能量之比例。表 4-10 為使用上列公式計算所得的不同波段所佔總太陽能之比例。

表 4-10 不同波段所佔總太陽能之比例

	波段範圍 (μm)	比例
太陽能輻射計量測範圍	0.28 - 2.80	0.9731-0.0056=0.9675
LI-1800 光譜分析儀量測範圍	0.30 - 1.1	0.72735
可見光	0.38 - 0.78	0.4729
光合作用有效光(PAR)	0.40 - 0.70	0.4688 - 0.0873= 0.3815
其他	0.40 - 1.1	0.7395-0.0873=0.6522

圖 4-18 為筆者使用 MATLAB 程式語言所撰寫的軟體，使用者輸入上下限波長，程式自動計算該波段範圍的太陽能佔全波段的比。圖 4-18 中較粗的線為使用上兩式產生的曲線，圖中顯示當波長大於 $2\ \mu\text{m}$ 部分的光譜能量只佔全光譜的 5.8%。

常見的太陽能輻射計(Pyranometer)的量測範圍為 $0.28 - 2.80\ \mu\text{m}$ ，一般皆以此為總光譜，由表 4-10 可知此波段佔了全光譜的 96.75%，雖非 100%，但也接近了。其他諸如 LI-1800 光譜分析儀的感測範圍($300-1100\ \text{nm}$)則佔 72.735%，可見光佔了 47.29%，光合作用有效光(Photosynthetically Active Radiation, PAR)則只佔 38.15%。

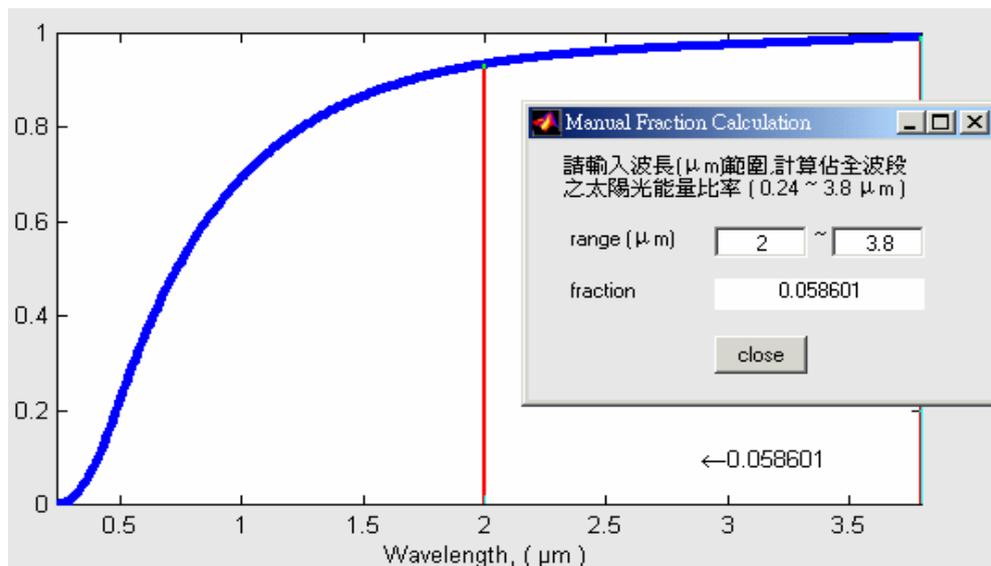


圖 4-18 各波段太陽能佔總光譜能量比例計算軟體的輸入與輸出畫面

(2)單位轉換

與太陽光量相關的有三種常用單位，包括代表輻射 (Radiometric)的 W/m^2 ，代表照度(Photometric)的 Lux 與代表量子(Quantum)的 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 等。輻射單位涉及能量的大小，照度單位與人眼錐狀體與柱狀體對不同波長之敏感程度(稱為比視感度)有關，量子單位則與光子的數量有關。

文獻中最多的是輻射能與照度方面的資料，前者與太陽能研究有關，後者與室內照明相關。與植物相關的研究早期多誤用照度單位，現已多修正為使用量子單位。

輻射與量子單位之間的轉換常數是經常需要用到的數字，此數字與光源種類與波段有關。一 μmole 個波長為 λ 之光子之能量(單位為 Joule)為 $(6.02252 \times 10^{23}) \cdot h \cdot C / \lambda$ ，將普朗克常數 (h) 與光速 ($C=2.997925 \times 10^{17}\ \text{nm}/\text{s}$) 之值代入，可得 $E = 119.6256 / \lambda$ 。換言之， $\text{J}/\mu\text{mole} = 119.6256 / \lambda$ 或 $\mu\text{mole}/\text{J} = 8.3594 \times 10^{-3} \cdot \lambda$ 。此處以奈米(nm)為單位，圖 4-19 所示為使用此計算式在 $400-700\ \text{nm}$ 範圍做計算後所繪之圖形，取其平均值得此波段之平均轉換因子為 $4.597677\ \mu\text{mol}/\text{J}$ 。

$Q_w = Q_q / 4.597677$ ，其中， Q_w 與 Q_q 分別以 W/m^2 和 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 為單位，兩者均為 $400-700\ \text{nm}$ 的波段。換言之， $1\ \text{W}/\text{m}^2 = 4.597677\ \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 約等於 $4.6\ \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 。

假設大氣層外的太陽輻射能為 $H_{ET-in-W/m^2}$ ，由表 4-10 可知 $PAR-in-W/m^2 = 0.3815 * H_{ET-in-W/m^2}$ ，又，知 $PAR-in-mol/m^2/s = 4.6 * PAR-in-W/m^2$ ，所以可求出 $PAR-in-mol/m^2/s = 4.6 * 0.3815 * H_{ET-in-W/m^2} = 1.7549 * H_{ET-in-W/m^2}$ 。

這些轉換因數依光源不同而異，以上各值僅適用於太陽光，其它人工光源如螢光燈管、高壓鈉燈、金屬燈等更詳細的資料與轉換常數推導方式之詳述可參考饒與方 (1997) 之論文，內容包括十八種市售螢光燈管的討論，高壓鈉燈與數種市售植物生長燈的討論可參考 Thimijan and Heins (1983) 之論文。

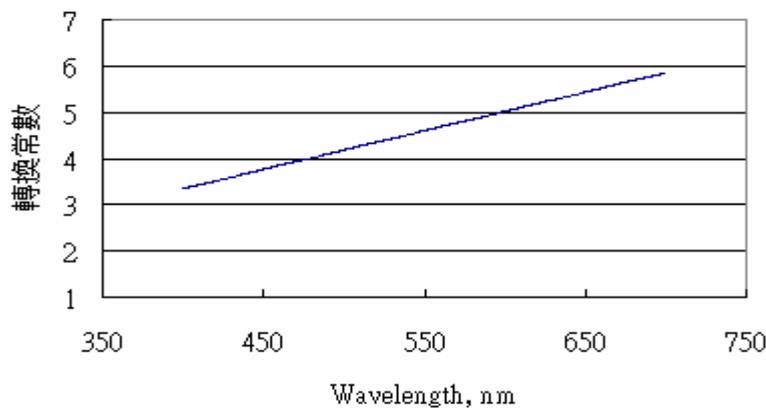


圖 4-19 光合作用有效光波段範圍內 $\mu mole/J$ 之轉換常數

(3) 太陽光線之入射角度

瞭解任意日期任意時刻太陽光線之入射角度，有助於規劃溫室內、外遮陰系統之安裝。表 4-11 所示為太陽入射光線與水平面之夾角，一般稱為高度角，取該角度正切值(Tangent)之倒數乘上溫室屋簷之高度所得之值即為光線由邊牆進到溫室所深入之距離。夏季時太陽較高，陰影較短，冬季時太陽較低，陰影較長。若欲阻隔光線進入溫室，則溫室邊牆外安裝之側遮蔭系統，其需要由屋頂延伸下來之距離亦與太陽光線之入射角度有密切之關係。表 4-11 之值雖然是以高雄地區之經緯度計算求得，其同樣可代表本島之其它地點，其誤差可忽略。表 4-11 第二列的 n 值為一年中的第幾天。

表 4-11 太陽入射光線與水平面之夾角(高度角)

日期	1/15	2/15	3/15	4/15	5/15	6/15	7/15	8/15	9/15	10/15	11/15	12/15
n	15	46	74	105	135	166	196	227	258	288	319	349
7:00	3.09	5.32	10.69	17.47	21.44	21.84	20.14	18.07	16.18	13.44	9.08	4.91
8:00	15.36	18.35	24.31	31.34	35.1	35.22	33.62	31.88	29.93	26.46	21.24	16.78
9:00	26.64	30.63	37.49	45.14	48.9	48.79	47.28	45.75	43.33	38.62	32.24	27.5
10:00	36.3	41.57	49.71	58.58	62.77	62.49	61.07	59.52	55.86	49.09	41.28	36.39
11:00	43.3	50.04	59.73	70.75	76.53	76.26	74.93	72.7	66.03	56.26	47.11	42.38

(接下頁)

(續表 4-11)

日期	1/15	2/15	3/15	4/15	5/15	6/15	7/15	8/15	9/15	10/15	11/15	12/15
n	15	46	74	105	135	166	196	227	258	288	319	349
12:00	46.34	54.21	64.75	77.07	86.3	89.02	88.6	81.41	69.82	57.83	48.34	44.31
13:00	44.62	52.62	61.92	70.57	74.51	76.04	77.2	74.07	64.22	53.07	44.6	41.7
14:00	38.62	45.89	53.01	58.37	60.7	62.27	63.33	61.05	53.31	43.9	36.93	35.19
15:00	29.6	35.9	41.26	44.91	46.84	48.57	49.53	47.31	40.52	32.4	26.75	25.97
16:00	18.7	24.14	28.3	31.11	33.05	35	35.84	33.44	27.02	19.73	15.08	15.03
17:00	6.67	11.4	14.77	17.24	19.42	21.63	22.32	19.62	13.23	6.42	2.53	3.03

註：本表數據以中央氣象局高雄地區測站(北緯 22 度 34 分，東經 120 度 18 分)為準

(4)日出、日落與日長

「日長」定義為由日出到日落所經過的時間，「太陽正午」定義為一天之中間時刻，其英文名稱為 solar noon；以此時刻區分，一天中太陽相對於地球之移動軌跡為上下午對稱。全年中日長最短者為冬至，台灣地區冬至之日長時間為 10 小時 36 分，日長最長者為夏至，台灣地區夏至之日長時間為 13 小時 24 分，在冬至與夏至，太陽正午正好發生在 12 點整，在春分與秋分則日長正好為 12 小時。表 4-12 所示為台灣地區一年中各月份第 15 日的日出、日落時間與日長。

表 4-12 一年中台灣地區的日出、日落時間與日長

日期	1/15	2/15	3/15	4/15	5/15	6/15	7/15	8/15	9/15	10/15	11/15	12/15
日出時間	6:45	6:35	6:13	5:43	5:22	5:17	5:26	5:39	5:49	5:59	6:17	6:36
日落時間	17:30	17:50	18:03	18:14	18:27	18:40	18:42	18:26	17:56	17:27	17:10	17:53
太陽正午	12:08	12:13	12:08	11:59	11:55	11:59	12:04	12:02	11:53	11:43	11:44	11:54
日長 hr:mn	10:45	11:14	11:50	12:31	13:05	13:22	13:15	12:46	12:07	11:27	10:53	10:37

註：本表數據以中央氣象局高雄地區測站(北緯 22 度 34 分，東經 120 度 18 分)為準

(5)大氣層外圍太陽輻射能

許多太陽能工程或太陽能應用相關的教科書中皆可找到公式來計算大氣層外圍任意經緯度上、面對任意方向、傾斜任意角度的平面上之直射、散射與總輻射能。單位面積上所接受到的太陽能，不論是瞬時之能量(單位為 W/m^2)、逐時之能量(單位為 $MJ/m^2/hr$, Langley/hr, $Cal/cm^2/hr$ 或 $BTU/ft^2/hr$ 時)、日總能量或月總能量，只要是在大氣層外圍上的平面，皆可透過公式求得輻射能量值。

如圖 4-20 所示為赤道至北緯 70 度地區之日總太陽能，圖中同時可觀察到北緯 70 度地區(虛線)在冬季有日總太陽能等於零的永夜現象。太陽光經過大氣層必有一些衰減，其抵達地表之能量必定小於圖 4-20 所示的各值，此些值可視為地表面上可接受到的太陽能量的一個上限。

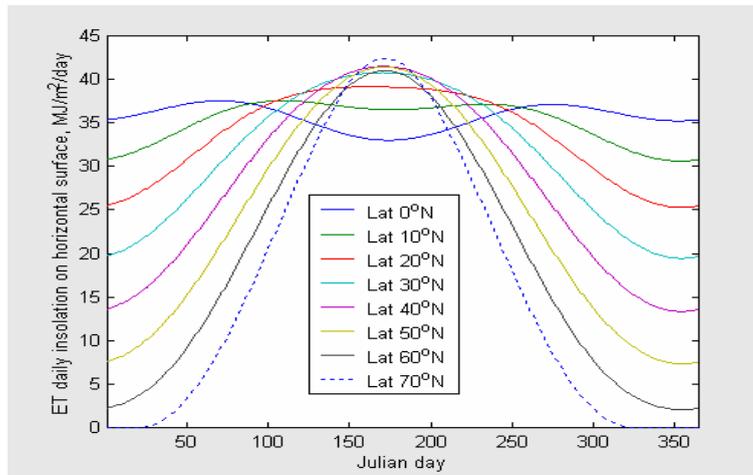


圖 4-20 北半球大氣層外圍水平面上之日總太陽能

表 4-13 所示為台灣大氣層外圍一年中之輻射能分佈情形。氣象局所使用的單位為 $\text{Cal}/\text{cm}^2/\text{日}$ (相當於 Langley/日), 其與一般學術界習用的公制單位 $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{日}$ 或英制單位 $\text{BTU}/\text{ft}^2/\text{日}$ 不同, 各單位間之換算因數如下:

$\text{Langley} * 1 = \text{Cal}/\text{cm}^2$	$\text{MJ}/\text{m}^2 * 1000/11.365 = \text{BTU}/\text{ft}^2$
$\text{Langley} * 3.688 = \text{BTU}/\text{ft}^2$	$\text{MJ}/\text{m}^2 / 0.04186 = \text{Langley}$

表 4-13 台灣大氣層外圍一年中之輻射能分佈情形

日期	1/15	2/15	3/15	4/15	5/15	6/15	7/15	8/15	9/15	10/15	11/15	12/15
逐時總輻射能(包含直射與散射), 單位: $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{小時}$												
6:30- 7:30	0.211	0.458	0.229	1.114	1.328	1.410	1.373	1.208	0.369	0.567	0.274	0.147
7:30- 8:30	1.239	1.555	1.346	2.254	2.427	2.478	2.450	2.322	1.477	1.674	1.317	1.151
8:30- 9:30	2.231	2.613	2.485	3.353	3.486	3.507	3.487	3.396	2.608	2.741	2.323	2.119
9:30-10:30	3.093	3.522	3.519	4.269	4.359	4.350	4.339	4.287	3.633	3.654	3.195	2.963
10:30-11:30	3.732	4.175	4.323	4.865	4.899	4.858	4.858	4.853	4.421	4.300	3.835	3.594
11:30-12:30	4.054	4.462	4.772	5.000	4.960	4.883	4.897	4.953	4.840	4.564	4.147	3.921
12:30-13:30	3.732	4.175	4.772	4.865	4.899	4.858	4.858	4.853	4.840	4.300	3.835	3.594
13:30-14:30	3.093	3.522	4.323	4.269	4.359	4.350	4.339	4.287	4.421	3.654	3.195	2.963
14:30-15:30	2.231	2.613	3.519	3.353	3.486	3.507	3.487	3.396	3.633	2.741	2.323	2.119
15:30-16:30	1.239	1.555	2.485	2.254	2.427	2.478	2.450	2.322	2.608	1.674	1.317	1.151
16:30-17:30	0.211	0.458	1.346	1.114	1.328	1.410	1.373	1.208	1.477	0.567	0.274	0.147

(接下頁)

(續表 4-13)

日總輻射能

MJ/m ² /日	25.06	29.11	33.35	36.85	38.63	39.00	38.72	37.47	34.70	30.44	26.03	23.87
BTU/ft ² /日	2208	2565	2938	3247	3403	3436	3411	3301	3057	2682	2294	2103
Langley/日	598.8	695.4	796.6	880.4	922.8	931.6	925	895.2	828.8	727.1	621.9	570.2

月總輻射能

MJ/m ² /月	784	814	1043	1120	1214	1189	1217	1172	1043	940	782	745
----------------------	-----	-----	------	------	------	------	------	------	------	-----	-----	-----

平均日總輻射能

MJ/m ² /日	25.29	29.06	33.64	37.33	39.15	39.62	39.25	37.82	34.77	30.31	26.07	24.04
----------------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

註：本表數據以中央氣象局高雄地區測站(北緯 22 度 34 分，東經 120 度 18 分)為準

(6)台灣各地區之平均大氣透過率

依據氣象局所收集之各地逐時總輻射能資料，取其日總輻射能，再計算月總輻射能，採用近十二年來之數據計算其平均值，數據取自七個氣象局測站與桃園農改場氣象站。各地各月之平均總輻射能，包括直射與散射，如表 4-14 的 A 區所示，其單位為 MJ/m²/月。月總輻射能除以當月之日數，可得當月之平均日總輻射能，其單位為 MJ/m²/日，如表 4-14 的 B 區所示。表 4-14 的 C 區所示為該地區該月份之平均大氣透過率(monthly average Clearness Index, CI)，亦稱大氣穿透率(Atmosphere Transmission Coefficient)，平均大氣透過率之定義為該月之地表面上的平均日總輻射能除以大氣層外圍水平面上該月之平均日總輻射能。

多年來的學術研究僅能提供吾人一數學式來計算大氣層外圍之輻射能，由大氣層外圍到地表，其間有許多因子錯綜複雜的交錯影響到達地表面的輻射能量，是以頗難預測。以台灣近幾年的地表輻射能量資料為基礎，發展經驗公式不失為一可行的辦法。

表 4-14 八個地區氣象局測站所量測之輻射能平均資料與計算之月平均大氣透過率

A. 平均月總輻射能，MJ/m²/月

月份	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
台北	206.7	189.2	257.6	311.8	374.4	406.2	503.3	498.4	395.3	338.1	249.9	217.5
花蓮	231.4	203.3	278.4	311.9	399.6	443.4	609.7	576.6	432.2	353.0	267.9	218.1
宜蘭	221.1	191.1	274.7	340.4	418.9	456.3	613.2	564.3	404.1	299.4	219.1	198.7
阿里山	297.5	330.6	329.2	340.6	400.7	357.2	420.4	311.5	328.2	393.0	364.1	341.2

(接下頁)

(續表 4-14)

台東	326.8	309.4	406.9	448.2	536.8	588.1	708.1	642.3	521.0	477.9	379.4	334.5
梧棲	291.6	253.1	317.8	374.8	443.2	475.5	533.1	500.8	449.4	416.9	320.7	297.3
桃園	200.5	223.6	244.2	259.5	406.2	452.7	582.4	549.9	439.5	387.3	298.4	248.0

B. 平均日總輻射能, MJ/m²/日

月份	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一	十二月
台北	6.67	6.76	8.31	10.39	12.08	13.54	16.23	16.08	13.18	10.91	8.33	7.01
花蓮	7.47	7.26	8.98	10.40	12.89	14.78	19.67	18.60	14.41	11.39	8.93	7.04
宜蘭	7.13	6.82	8.86	11.35	13.51	15.21	19.78	18.20	13.47	9.66	7.30	6.41
台南	10.75	12.58	13.28	14.63	16.68	16.77	18.03	15.79	14.55	13.28	11.36	10.14
阿里山	9.60	11.81	10.62	11.35	12.92	11.91	13.56	10.05	10.94	12.68	12.14	11.01
台東	10.54	11.05	13.12	14.94	17.32	19.60	22.84	20.72	17.37	15.42	12.65	10.79
梧棲	9.41	9.04	10.25	12.49	14.30	15.85	17.20	16.15	14.98	13.45	10.69	9.59
桃園	6.47	7.99	7.88	8.65	13.10	15.09	18.79	17.74	14.65	12.49	9.95	8.00

C. 月平均大氣透過率 CI

月份	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一	十二月
台北	0.266	0.232	0.249	0.282	0.313	0.347	0.419	0.429	0.380	0.358	0.320	0.294
花蓮	0.298	0.249	0.269	0.282	0.334	0.379	0.508	0.496	0.415	0.374	0.343	0.295
宜蘭	0.285	0.234	0.266	0.308	0.350	0.390	0.511	0.486	0.388	0.317	0.281	0.268
台南	0.429	0.432	0.398	0.397	0.432	0.430	0.466	0.421	0.419	0.436	0.436	0.425
阿里山	0.383	0.406	0.318	0.308	0.335	0.305	0.350	0.268	0.315	0.417	0.466	0.461
台東	0.421	0.380	0.394	0.405	0.448	0.503	0.590	0.553	0.501	0.507	0.486	0.452
梧棲	0.375	0.310	0.307	0.339	0.370	0.406	0.444	0.431	0.432	0.442	0.411	0.402
桃園	0.256	0.275	0.234	0.232	0.335	0.381	0.479	0.469	0.421	0.412	0.382	0.333

台灣各地區各月份平均大氣透過率的導出提供吾人一可行的簡易方法來估算台灣各地區在地表面上所接受到的太陽日總輻射能。由此日總輻射能數據，吾人可進一步由大氣層外圍逐時輻射能量與日總輻射能量之比值推算一日中地表面之逐時輻射能量。如表 4-14 中各地區各月份平均大氣透過率之數據可明顯看出除台南與阿里山地區之外，其它地區全年之 CI 值變化趨勢呈山型，亦即在夏季之透過率為較高，台南地區的 CI 值全年中均極穩定，趨近 0.43 呈直線走向，阿里山地區之 CI 值走向則呈 V 型，較為奇特，或許與高海拔有關。

(7) 氣象局日總輻射資料的應用

Bartok(1994)推算一棟 3000 平方英尺(278.7 m², 84 坪)的溫室，在晴朗的夏天中一日內會蓄積約 3.2 MBTU(3374 MJ)的熱量，此熱量相當於需燃燒 32 加侖的燃油。此

為美國東北地區、塑膠布溫室的資料。將上述之參考值以單位面積計算可得 12.1 MJ/m²/日。表 4-14 之 B 所示為台灣多處地區地表之平均日總輻射能資料，除山部地區之外，南台灣在三月至十月，北台灣則為五月至九月的日總輻射能均大於前述之參考值(12.1)。再者，表 4-14 的值為包括了晴、陰和雨天的月平均；而 Bartok 的參考值為晴天下的數據，是以在台灣晴朗的夏天，溫室內蓄積的熱量將大於表 4-14 所列之值，且遠大於 Bartok 的參考值。

氣象局日總輻射資料允許吾人瞭解台灣的輻射狀況，並建立溫室應用的本土化參考值。假設溫室面積為 100 坪(330 m²)，被覆資材之穿透率暫不考慮(或假設其值為 1)，台灣各地區溫室在 6 至 9 月平均每日蓄積之輻射能量值，如表 4-15 所示，全省之參考值為 5530 MJ/日(5.25 MBTU)，相當於每日燃燒 52.5 加侖的燃油所提供之熱量。將溫室面積之差異納入考慮，本值為 Bartok 所提參考值的 1.39 倍。當北美地區的溫室建議在夏季的通風量為每分鐘一個同溫室體積的空氣交換量時(1 AC/min)，我們應採用的數值是至少 1.4 AC/min。

表 4-15 台灣各地區六至九月七個地區 100 坪溫室內蓄積之輻射能量，MJ

	六月	七月	八月	九月	平均	總平均
台北	4468	5356	5306	4349	4870	
桃園	4979	6200	5854	4835	5467	
宜蘭	5019	6527	6006	4445	5500	
花蓮	4877	6491	6138	4755	5565	
台南	5534	5950	5210	4801	5374	
台東	6468	7537	6837	5732	6644	
梧棲	5230	5676	5330	4943	5295	5530

(8)地表之光合作用有效光

Ting, et al.(1987)利用已知之地表之日總輻射能(SOLAR, MJ/m²/日)數據透過迴歸之方式推導出地表之光合作用有效光(PAR, mol/m²/日)之值，簡介如下：

$$PAR = 2.0804 * SOLAR$$

$$CI_{par} = 1.1849 * CI_{sol}$$

$$RATIO = 0.7651 - 0.0153 * CI_{par} - 0.9113 * CI_{par}^2$$

其中

CI_{sol}：日總輻射能之大氣透過率

CI_{par}：日總光合作用有效光之大氣透過率

diffuse：地表之日總散射 PAR, diffuse = PAR * RATIO

RATIO：地表之日總光合作用有效光中之散射部份佔全部之比例

direct：地表之日總光合作用有效光中之直射部份, direct = PAR - diffuse

表 4-16 中第二與第三部份所列的分別為上式中的 SOLAR 與 CI_{sol} 值，以桃園及台東之日總輻射能(SOLAR)與大氣穿透率(CI_{sol})資料為例，使用上述公式，求得 PAR， CI_{par} ，RATIO，diffuse 與 direct，分別列於表 4-16a 與 4-16b。表 4-16a,b 中陰影部分為列於表 4-14 的已知數據，其他為使用以上三式所求出的數據。

表 4-16 中 PAR 一欄的數據為地表面的光合作用有效光，設施內的光合作用有效光以此值為上限，但其成分中有關散射所佔的比例與 RATIO 一欄的數據可能會不同，有些被覆資材可提供較多的散射光。對植物而言，散射光優於直射光。溫室內部塗上高反射率的白漆或地面鋪設白色塑膠布有助於提高散射光所佔的比例。

表 4-16a 桃園地區之日總「光合作用有效光」，含散射、直射與大氣透過率

		SOLAR	PAR	CI_{sol}	CI_{par}	RATIO	Diffuse	direct
單位		MJ/m ²	mol/m ²				mol/m ²	mol/m ²
桃 園	1 月	6.47	13.46	0.256	0.30	0.68	9.13	4.33
	2 月	7.99	16.62	0.275	0.33	0.66	10.98	5.64
	3 月	7.88	16.39	0.234	0.28	0.69	11.30	5.09
	4 月	8.65	18.00	0.232	0.27	0.69	12.50	5.50
	5 月	13.10	27.25	0.335	0.40	0.61	16.71	10.54
	6 月	15.09	31.39	0.381	0.45	0.57	18.01	13.38
	7 月	18.79	39.09	0.479	0.57	0.46	17.99	21.10
	8 月	17.74	36.91	0.469	0.56	0.47	17.38	19.53
	9 月	14.65	30.48	0.421	0.50	0.53	16.14	14.34
	10 月	12.49	25.98	0.412	0.49	0.54	14.00	11.98
	11 月	9.95	20.70	0.382	0.45	0.57	11.88	8.82
	12 月	8.00	16.64	0.333	0.40	0.61	10.20	6.44

表 4-16b 台東地區之日總「光合作用有效光」，含散射、直射與大氣透過率

		SOLAR	PAR	CI_{sol}	CI_{par}	RATIO	Diffuse	direct
單位		MJ/m ²	mol/m ²				mol/m ²	mol/m ²
台 東	1 月	10.54	21.93	0.421	0.50	0.53	11.61	10.32
	2 月	11.05	22.99	0.380	0.45	0.57	13.19	9.80
	3 月	13.12	27.29	0.394	0.47	0.56	15.19	12.10
	4 月	14.94	31.08	0.405	0.48	0.55	17.03	14.05

(接下頁)

(續表 4-16b)

		SOLAR	PAR	CI _{sol}	CI _{par}	RATIO	diffuse	direct	
單位		MJ/m ²	mol/m ²				mol/m ²	mol/m ²	
台	5月	17.32	36.03	0.448	0.53	0.50	18.05	17.98	
	6月	19.60	40.78	0.503	0.60	0.43	17.45	23.33	
	7月	22.84	47.52	0.590	0.70	0.31	14.63	32.89	
	8月	20.72	43.11	0.553	0.66	0.36	15.44	27.67	
	9月	17.37	36.13	0.501	0.59	0.44	15.86	20.27	
	東	10月	15.42	32.08	0.507	0.60	0.43	13.73	18.35
		11月	12.65	26.32	0.486	0.58	0.45	11.84	14.48
		12月	10.79	22.45	0.452	0.54	0.49	11.03	11.42

(9)產量預估

假設每日太陽輻射總量為 350 cal/cm²，其中光合作用有效光(400-700nm)佔 45%，可得 158 cal/cm²。扣除局部反射與無用的吸收各 10%，結餘 126 cal/cm²。已知每 cal 的能量相當於 8.64 μE 的光子，所以用於光合作用的光子數為 1089 μE/cm²。地表之光合作用有效光一旦可知，理論上，植物在一段時間之後的產能即可直接估算。Loomis and Williams (1963)預估番茄於 80 天生長期的潛在生產量，其計算步驟如下表所示：

1. 用於光合作用的光子數	1089 μE/cm ²
2. 產生碳水化合物數量 (還原 1mole CO ₂ 需 10 E 光子)	109 μmole/cm ²
3. 扣除 35%呼吸損失的結餘碳水化合物數量	71 μmole/cm ²
4. 每天淨碳水化合物 [CH ₂ O] 形成 (30 g/mole)	21 g/m ²
5. 80 天生長期淨碳水化合物形成量	1.68 kg/m ²
6. 果實之碳水化合物 (40%的收穫指數)	0.67 kg/m ²
7. 果實乾物產量 (轉換碳水化合物為乾物重之效率假設為 70%)	0.47 kg/m ²
8. 果實產量潛能 (92%含水量)	58.75 ton/ha

欲提高產量而提高光能利用率時，往往得與光質或光週期相配合，以便收穫器官得到最高光合產物。以上計算過程假設番茄的產能完全未受制於光質或光週期，雖不完全正確，但也頗具參考價值。Rutgers 大學所發展的單果串番茄生長模式可由累計光量推導出最終的產能與由始花至收穫所需的天數，後者亦允許對產程與工時進行的規劃 (Ting, et al., 1993)。(方煒)

引用 參考文獻

1. 方煒。1994。本省精密溫室環控極限與環控設備使用效率之探討。國科會專題研究成果報告。NSC-83-0409-B-002-094。
2. 方煒。1995。設施園藝工程與試驗。教育部顧問室農業自動化科技教育改進計劃。台灣大學。
3. 饒瑞估、方煒。1997。螢光燈管照明單位與光量子單位換算因數之探討。中國園藝 43(2) : 141-148。
4. Bartok, J. 1994. Greenhouse Engineering. NRAES-33, Cornell Univ., Ithaca, NY.
5. Duffie, J.A. and W. A. Beckman, 1980. Solar Engineering of thermal processes. 歐亞書局
6. Giacomelli, G.A., K.C. Ting and P. Panigrahi, 1987. Solar PAR versus Total Transmission in a Greenhouse, ASAE paper no. 87-4549.
7. Loomis, R.S. and W.A. Williams. 1963. Maximum crop productivity : an estimate. Crop Science 3:67-72.
8. Rui, R., A. M. Silva and A. Miguel, 1989. Solar Irradiation inside a single span greenhouse. Journal of Agr. Enging. Res. 43, 221-229.
9. Thimijan, R. W. and R.D. Heins, 1983. Photometric, Radiometric, and Quantum Light Units of Measure: A Review Procedures for Inter-conversion. HortScience, 18(6): 818-822.
10. Ting, K.C. and G.A. Giacomelli, 1987, Availability of Solar Photosynthetically Active Radiation. Transactions of the ASAE 30(5): 1453-1457.
11. Ting, K.C., G.A. Giacomelli and W. Fang. 1993. Decision Support Systems for Single Truss Tomato Production. Proceedings of XXV CIOSTA -CIGR V Congress. Wageningen, The Netherlands. 70-76.

4.2 氣候物理特性與作物生育

設施栽培原是溫帶地區為因應生長環境中低溫的逆境，所開發出之可防寒、加溫的生產技術，近年來更配合環境自動控制技術的發展，可以提高並控制所栽植作物的品質，因此成為溫帶地區一種重要的園藝作物生產技術。台灣地區處於亞熱帶地區，雖然低溫並非最重要的生產限制因子，但是因台灣地處大陸和海洋的交界處且地形複雜，春季的梅雨、夏季的颱風和熱雷雨、冬季的寒流、高濕和日夜溫差小的海洋性氣候、以及普遍存在的酸雨和空污、等不良微氣象環境的影響，造成作物生長不良和品質劣化，因此仍希望利用設施栽培以達穩定生產及提高品質的目的。唯由於夏季日射強烈時，設施內作物會遭受非常嚴重的熱逆境，因此設施栽培在台灣地區尚未被普遍採用。

目前台灣地區設施栽培所使用的結構物可分為以保溫或防雨為目的的簡易塑膠棚和紗網棚，和較精密的溫室兩大類。第一類型設施的結構強度並不足以承受強風的破壞，且沒有調降設施內氣溫的能力。第二類型的設施通常配有通風窗和遮陰網，有些設施甚至配有抽風扇、水牆、噴霧等降溫設備，因此具有調降設施內氣溫的能力，此類設施的結構強度可承受較強的風壓力，但因所需硬體設備的投資大，且所用之降溫措施多以降低氣溫為目標，常常犧牲對日射、溼度、等其它重要環境因子的利用與控制，因而僅適用於少數幾種高經濟價值的作物，例如好陰喜濕的蘭花。

由於有一層設施覆蓋物的存在，因此設施與露地栽培之作物微氣象環境有很明顯的差異（表 4-17）。本章首先將分別由輻射、溫度、溼度、空氣流動、CO₂濃度等方面，說明這些構成設施內的微氣象環境因子的物理特性，以及其對作物生長的影響，最後並將綜合分析幾種紓解設施內作物熱逆境方法的優缺點，以供作為未來開發和引進設施降溫措施時的參考。

表 4-17 設施與露地之微氣象環境比較分析

輻射	入射光量減少且分佈不均，光質與自然日光不同。長波輻射不易釋出。
溫度	最高和最低氣溫、日夜溫差和土溫都高於露地，且溫度分佈不均；在小設施內夜間溫度有可能略低於露地。
溼度	設施內日間過乾，夜間過濕。
風速	顯著較露地微弱，感熱和潛熱之移運受到阻礙。
CO ₂	設施內日間顯著減少，夜間明顯升高。

1) 輻射

(1) 輻射基礎

電磁波則是一種以輻射方式傳遞之能量，通常可依據電磁波的波長範圍，將電磁波分類，其中與作物生長和設施環控密切相關的電磁波可概分為日射和熱輻射兩部份。日射（太陽輻射）的波長範圍由 300nm 至 3000nm，其中波長在 400 - 700nm 之光線是人類眼睛所能看見的範圍稱為可見光（visible, VIS），通過三稜鏡可分解為紅、橙、黃、綠、藍、靛、紫等色光。波長比可見光短的光線稱為紫外光（ultraviolet, UV），波長比可見光長的光線稱為近紅外光（near-infrared, NIR）。雖然植物能感應的波長範圍在 380-780nm 間，但因進行光合作用之葉綠素主要吸收藍光和紅光，因此一般仍以 400-700nm 作為光合作用有效輻射（photosynthetic active radiation, PAR）的界限。波長範圍介於 3 μ m 至 100 μ m 的輻射稱為熱紅外線（thermal infrared, TIR）。日射由於波長較短，故又稱短波輻射（shortwave radiation）；熱紅外線的波長較長，故又稱長波輻射（longwave radiation），也稱為遠紅外線（far-infrared）。日射中作物光合作用可利用的可見光的能量不及全部日射能量的一半（圖 4-21），而佔日射總能量 50% 以上的近紅外光並不能被作物的光合作用所利用，但卻會轉成熱能使設施內的溫度升高。

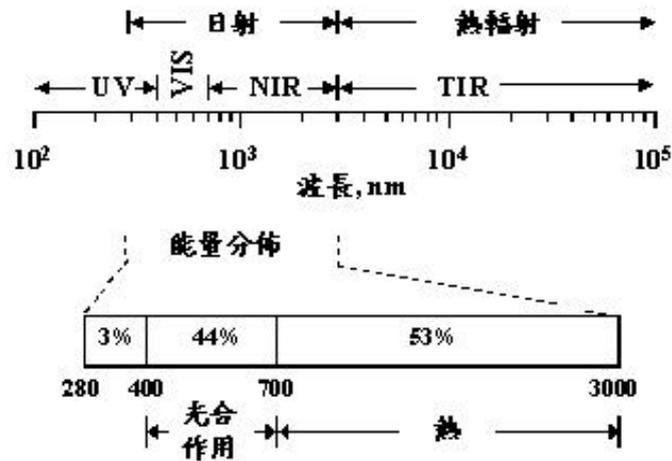


圖 4-21 日射和熱輻射的波長範圍。日射中主要波段的能量分佈易受大氣吸收與散射的效應而產生變動。

量測單位時間內照射在單位面積上、或由單位面積輻射出的輻射能量通量密度 (radiant energy flux density)，國際上使用 $W m^{-2}$ 或 $J m^{-2} s^{-1}$ 為單位，但農業工程界常使用 $Kcal m^{-2} hr^{-1}$ 為單位，兩者之關係為 $1 W m^{-2} = 0.2389 Kcal m^{-2} hr^{-1}$ 。與作物光合作用有關之光合作用光子通量密度 (photosynthetic photon flux density, PPFD) 則用 $\mu Em^{-2} s^{-1}$ 或 $\mu mol m^{-2} s^{-1}$ 為單位，但以往園藝界常用照度表示光的強度，單位常用 lux 或呎燭光 (footcandle，簡稱 fc。1 fc=10.8 lux)，由於照度係指人眼所感受的明亮度，因此用照度表示輻射能量或可供光合作用的能量強弱是不合適的。不過若知道光源的光譜分佈，則可進行換算，表 4-18 列有常見光源間之換算係數。

表 4-18 各種光源之輻射能量間的轉換係數 (McCree, 1981)

	日光	鹵素燈	鈉燈	水銀燈	日光燈	鎢絲燈
$W m^{-2}$ (PAR) $\rightarrow \mu Em^{-2} s^{-1}$ (PAR)	4.6	4.6	5.0	4.7	4.6	5.0
klux $\rightarrow \mu Em^{-2} s^{-1}$ (PAR)	18	14	14	14	12	20
klux $\rightarrow W m^{-2}$ (PAR)	4.0	3.1	2.8	3.0	2.7	4.0

日射又分為直接由太陽來的直達日射，和當日射穿過大氣層時，被空氣中氣體分子和懸浮微粒散射之散漫日射兩類，兩者之和稱為全日射或水平全日射量。直達日射強時，設施內會明顯呈現光量分佈不均的情形。瞬時之水平日射量，以及日射量中直達日射與散漫日射之比例主要受太陽高度角與大氣透明度之影響。晴天正午時，直達日射量可佔全日射量之 85%；清晨和傍晚，以及陰天時，則以散漫日射為主。大氣對太陽輻射的散射和吸收效應也會改變日射之光譜分佈。受雷利散射 (Rayleigh Scattering) 效應的影響，太陽輻射行經大氣層的路徑越長，其中較短波長對較長波長的比值會下降，因此在清晨和黃昏時段，藍光對紅光，以及紅光對遠紅光的比值明顯

下降；但在地勢高處，日射中紫外線和藍光所佔的比例則較多。受近紅外光易被空氣中水氣吸收的影響，在清晨和黃昏時段、以及在高濕或陰天環境下，日射中可見光對近紅外光的比值也會明顯下降。

台灣地區水平全日射量，在夏季晴天正午最高可達 800 W m^{-2} ，冬季晴天正午最高約 600 W m^{-2} 。平均而言，夏季全天水平日射量約 $20 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ；冬季全天水平日射量約 $15 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 。一年中，台灣地區太陽高度角與方位角之變動情形則示於圖 4-22，各地區水平日射量之統計列於表 4-19。

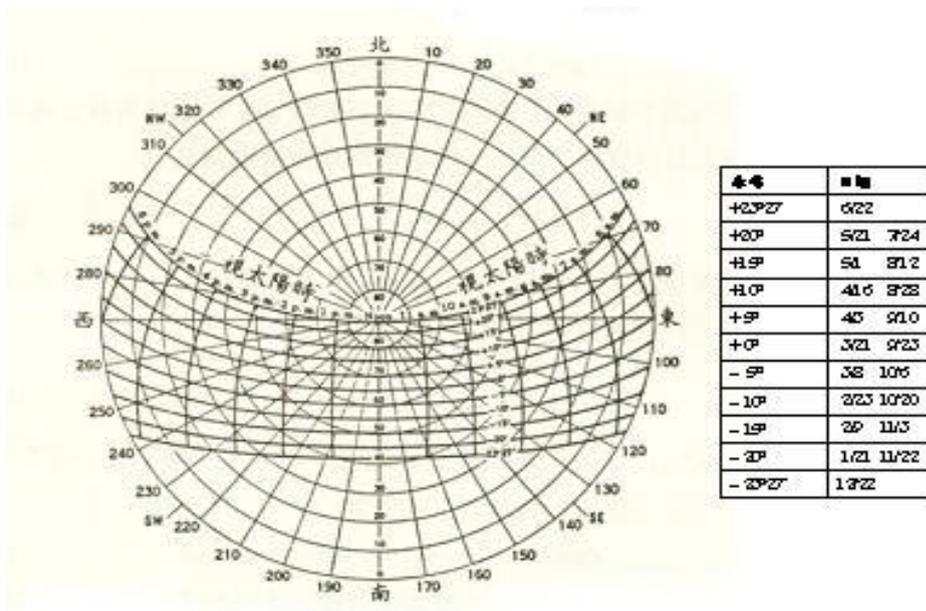


圖 4-22 台灣地區 (25°N) 太陽方位角與高度角平日之變化

表 4-19 台灣地區日射量統計資料 (中央氣象局, 2002)

	台北	新竹	台中	嘉義	台南	高雄	恆春	宜蘭	花蓮	台東
一月	156.5	151.2	238.8	272.2	348.7	271.2	192.6	173.6	139.3	287.7
二月	183.6	197.2	271.2	297.2	387.3	303.6	183.1	142.5	135.1	267.0

(接下頁)

(續表 4-19)

	台北	新竹	台中	嘉義	台南	高雄	恆春	宜蘭	花蓮	台東
三月	227.2	226.8	282.9	314.1	388.9	350.7	224.8	246.8	205.8	384.3
四月	281.6	269.5	344.6	380.1	433.3	412.8	282.4	296.4	278.5	482.1
五月	330.6	328.4	359.2	380.4	432.5	384.9	265.8	343.8	289.3	499.4
六月	338.1	361.1	351.1	402.9	447.5	447.9	275.8	342.3	330.7	562.4

七月	365.6	375.3	357.7	383.2	415.0	402.7	275.0	440.6	411.7	604.1
八月	398.9	367.4	327.5	385.6	406.7	389.6	264.8	434.9	345.1	570.4
九月	326.8	299.9	314.1	372.0	376.1	280.5	215.7	283.5	223.6	431.2
十月	346.0	249.9	294.9	336.9	465.0	339.0	234.2	209.2	221.5	397.3
十一月	236.3	188.9	248.4	278.0	402.4	358.4	181.2	184.4	204.3	265.7
十二月	216.7	153.0	32.0	358.1	329.8	294.1	149.7	198.6	232.4	255.5
全年	3407.6	3168.5	3422.0	4160.7	4833.2	4238.4	2745.0	3293.5	3107.1	5007.1

單位:每平方公尺百萬焦耳(MJ/m²)

(2)設施內的輻射環境

到達地表的日射在進入設施時，會依設施的構型與被覆資材產生不同比例之反射、吸收、與穿透，因而改變設施內的日射環境，可分別由光強度、光分佈、以及光品質三部份進行探討。此外，設施內的熱輻射環境也會依所用被覆資材之特性而改變。

1 光強度

設施的結構材料會阻擋日射的穿透，因此設施所用結構材料越多，設施的平均日射穿透率越低。設施所用被覆資材的日射穿透率則依資材的種類與厚度而定，常用設施被覆資材的日射穿透性質示於表 4-20。一般而言，設施內床面平均日射量最高約僅及露地的 85%，若被覆物上的灰塵多、或被覆材料已老化，設施內床面平均日射量通常僅及露地的 50%或更低。設施被覆材料上若有凝結的水滴，約有 10-20%的日射會被反射出設施外，減少可穿透的日射能量，因此如果選用無滴被覆材料，透光率會提高。台灣常用的被覆材料以 PVC 和 PE 為多，PVC 較 PE 材質有較長的使用年限，但 PVC 較 PE 材質易累積灰塵與藻垢。

表 4-20 常用被覆資材日射穿透率之經年變化。

材質	厚度 (mm)	日射穿透率 (%)			
		新品	一年後	二年後	二年後洗淨
玻璃	4	80	78	77	80
PVC	0.1	92	76-80	74-77	86-91
PE	0.1	92	85-87	78-86	86-91

2 光分佈

由於受設施中結構體的遮光作用，和被覆資材穿透率隨入射角度改變之影響（圖 4-23），設施內床面日射量呈現分佈不均的現象（圖 4-24）。由於太陽的方位角和高度角隨時間、季節、和緯度而異，因而設施內日射量的分佈將依設施的構型（方位、屋頂傾斜度、連棟方式、）和太陽位置產生動態之變化。一般而言，台灣地區因緯度低，因此棟方位和屋頂角度對於床面平均日射量的影響較小。但因設施中東西向主樑所產生的陰影，只會隨季節才有較大的位移；且東西向的設施通常南側的日射強度

高於北側，而南北向設施東西兩側卻因太陽方位移動而有較均勻的光照，因此設施的棟方位以南北向為佳，可減少因日射分佈不均一所引起之生育與生長上的差異。簡易塑膠棚溫室雖然沒有粗的主樑，但若以連棟方式結合，棟與棟間也會產生強烈的陰影帶，因此最好也是以南北為棟方位呈東西向結合的方式為佳，以減少栽培床面光量分佈的不均一。使用具散射性質的被覆材料也會減少栽培床面光量分佈不均的情形，但通常會伴隨透光量的降低。

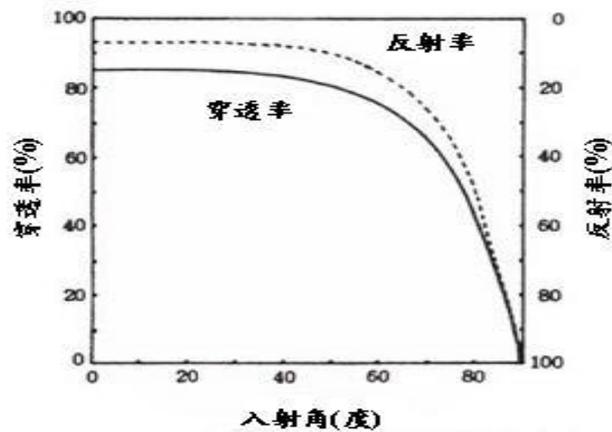


圖 4-23 被覆資材（玻璃 0.3mm）穿透率和反射率與入射角之關係

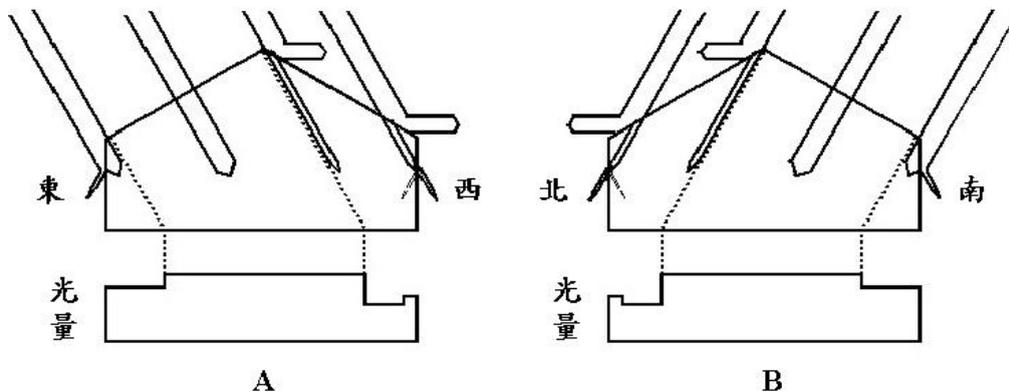


圖 4-24 棟方位即被覆資材受光角度造成設施內日射分佈不均的情形 (A) 東西棟上午 10 時 (B) 南北棟

3 光品質

常用設施被覆資材的日射透光譜示於圖 4-25。對紫外光而言，不同材質之被覆材料的透過率不同，其中以 PE 的透過率最高，PVC 和玻璃其次，PC 板則幾乎不能通過，添加紫外光吸收劑的 PE 和 PVC 材質的被覆材料則可隔絕紫外線的穿透。對可見光而言，透明的被覆材料不會影響穿透之光品質，但不同顏色的被覆資材會改變穿透日射中可見光的光譜分佈，因而可以利用不同顏色的被覆資材調整作物的光型態表現。對近紅外光而言，目前設施常用之被覆資材阻擋可見光穿透的能力多於阻擋近

紅外線的能力，導致設施內可見光與近紅外光比例下降，反而惡化熱帶和亞熱帶地區設施栽培的熱逆境。

被覆材料日射穿透品質指數 (Q) 可定義如下 (Shen et al., 1992) ,

$$Q = \frac{(VIS/NIR)_t}{(VIS/NIR)_i} \quad (4-1)$$

其中 (VIS/NIR) _t 和 (VIS/NIR) _i 分別代表入射和穿透日射中可見光與近紅外光之比例。當 Q=1 表示被覆材料並未改變入射與穿透日射中可見光與近紅外光的比例，當 Q<1 表示被覆材料使得穿透日射中可見光與近紅外光的比例小於入射日射之比例，當 Q>1 表示被覆材料使得穿透日射中可見光與近紅外光的比例大於入射日射之比例。日射中的近紅外光僅會使設施溫度提高，對低溫之高緯度地區的設施而言，為節省加熱所需的能源，所用被覆材料之近紅外光穿透率越高越好；但設施內的高溫逆境卻是熱帶和亞熱帶地區進行設施栽培的主要生長限制因子，因此被覆材料的日射穿透品質指數應成為篩選適合此地區設施之被覆材料的重要依據。台灣地區典型設施內的日射品質和床面透光率示於圖 4-26。

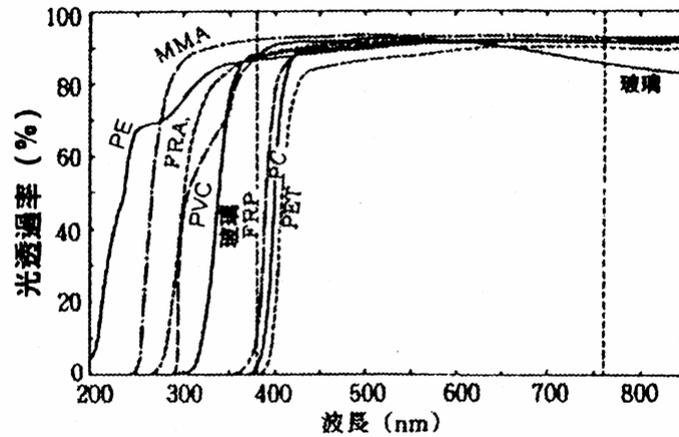


圖 4-25 常用被覆資材的日射穿透光譜

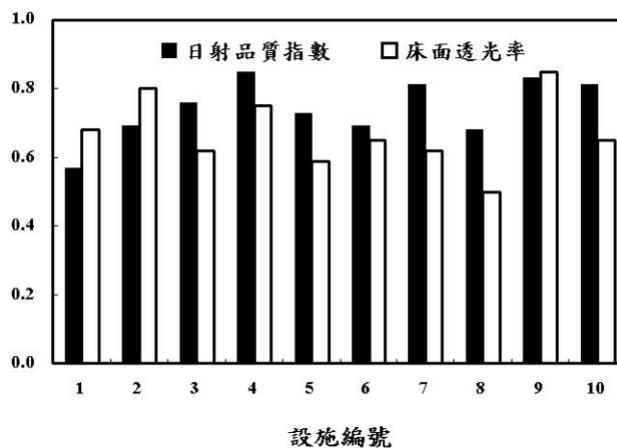


圖 4-26 台灣地區典型設施內的日射品質和床面透光率 (Shen et al., 1992)

4 熱輻射

設施被覆材料也多具有阻擋長波輻射穿透的特性（表 4-21），設施內因而產生溫室效應使溫度提高。不同被覆資材阻擋長波輻射穿透的能力不同，以台灣常用之 PE 和 PVC 兩種材料而言，PE 質材的長波穿透率較 PVC 為高，因此若需減輕設施內的熱逆境，則以採用 PE 材質為佳；若以冬季保溫為需求重點，則以 PVC 為佳。長波輻射的低透過率主因吸收率高，被吸收的熱量仍可藉由傳導方式傳至外表面後以對流和輻射的方式逸失，因此可使用雙層式的被覆方式，使內夾 1 – 2 cm 的空氣層，增加感熱和輻射熱的傳遞阻力，將可獲得極佳的保溫功效。使用較厚的被覆資材也會增加吸收率並增加感熱的傳遞阻力，但保溫的效果將遜於雙層的方式。

表 4-21 設施被覆材料的熱輻射特性

資材種類	厚度 (mm)	吸收率 (%)	透過率 (%)	反射率 (%)
玻璃	0.1	95	0	5
PE	0.1	15	75	10
	0.05	5	85	10
PVC	0.1	65	25	10
	0.05	45	45	10
Ployester	0.1	80	10	10
	0.05	60	30	10
EVA	0.1	35	55	10
	0.05	15	75	10

(3) 光量與作物生育

日射提供作物進行光合作用時所需的能量。黑暗時光合作用無法進行，但呼吸作用仍持續進行，故淨光合成速率為負值；隨光強度逐漸增高，光合成量隨之增加，但至某一程度後則漸趨平緩。當淨光合速率等於零時，即光合速率與呼吸速率相等時之光強度，稱為光補償點；當光合速率趨於平緩時之光強度，稱為光飽和點。一般而言，C3 型植物的二氧化碳補償點約為 50-150ppm，光飽和點約 $1000 \mu \text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$ ；C4 型植物的二氧化碳補償點約 5-10ppm，光飽和點約在 $2000 \mu \text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$ 以上（柯，2002）。由於光合作用是綠色植物合成碳水化合物化合物的基本反應，而碳水化合物則是構成植體根、莖、葉、花、果實等器官的必須物質，因此當光量不足時，不僅產量下降，莖、葉易發生徒長現象，花、果發育遲緩且著色不良，嚴重時作物將因無法維持基本之代謝需求而死亡。C4 型植物目前約有 1000 種，多原生於熱帶地區，其中包含玉米、甘蔗、高粱、茼蒿、白莧菜、小白菜、空心菜、國蘭等，許多牧草、草坪草、和雜草亦為 C4 型草類。

由於設施的結構體和被覆資材對穿透日射減弱的影響，一般設施內光量只有露地之 80 % 以下，因此在晚秋到初春期間，光量常成為設施內作物生長的重要限制因子，所以設施內作物之行株距離大於露地栽培者，否則會影響到對光的利用效率。

(4) 光質與作物生育

光質可以改變作物的生育和生長型態。花芽的形成與開花，以及幼苗節間伸長與

莖的高度都與紅光和遠紅光的比值相關。Morgan and Smith (1976, 1979) 指出莖的伸長效應與 R:FR 比值呈直線相關, R:FR 比值越小, 莖的伸長速率越大, 因此在紅光較多的環境下, 促進莖的伸長; 反之則使植株變矮。Rajapakse and Kelly (1992, 1994, 1995) 指出, 利用低濃度硫酸銅溶液提高 R:FR ratio, 可以縮短節間長度以降低株高; 減少葉面積, 但因葉綠素濃度提高, 葉片顏色較深; 降低可溶性醣類和澱粉含量, 花徑及花朵鮮重和乾重均下降, 且縮短盆花儲存壽命。由於光敏素的兩種型態 Pr 和 Pfr 的吸收峰分別處於紅光和遠紅光區, 因此推論可能因光敏素色素系統組成改變而調節了作物的生長型態 (Rajapakse et al. 1992)。

依據上述之研究結果, 日本三井化學株式會社 (Mitsui Chemicals, Inc.) 已發展出兩種類型的光選擇性 PE 塑膠布 (淺綠色), 一種可吸收紅光能促進莖的伸長, 一種可吸收遠紅光能矮化植株。這兩種形式的光選擇塑膠布能控制多種園藝作物的株高, 但控制效果則因作物種類而有差異。光選擇性塑膠布添加染料濃度越高, 雖然控制的效果越明顯, 但植株乾物重也會因透光度降低而顯著降低, 因此應用光選擇塑膠布時, 仍必須注意其透光度。該產品目前正在進行作物品種效果與耐候性測試中, 還未正式生產上市 (Kimpel, 2001)。

設施內當作物因光度不足而必須以人工補光時, 所用燈源的光譜分佈就必須留意。鎢絲燈光譜偏紅及遠紅光, 而日光燈譜則藍光較多 (圖 4-27)。採鎢絲燈, 熱又費電, 且植物易徒長, 而採日光燈省電, 植物也不易徒長。紫外線具有抑制伸長的效果, 能防止蕃茄、胡瓜苗的徒長及過度繁茂, 使果實品質較為優良。除去紫外線可抑制菌核病、灰黴病孢子形成, 可抑制上述病害之發生。

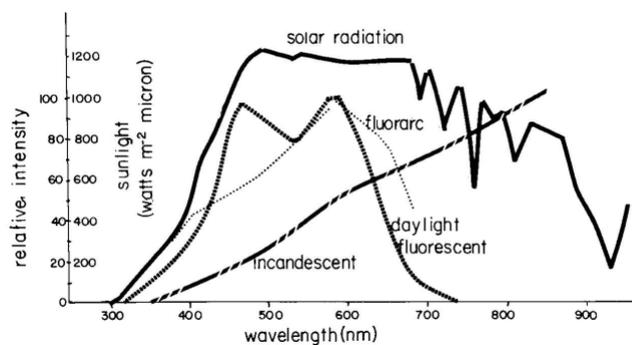


圖 4-27 常見光源的光譜分佈

(5)光週期與作物生育

每天的日夜長短隨季節和緯度不同而有差異, 夏至日長最長, 冬至日長最短。緯度愈高的地區, 日夜長短的變化更為明顯。每天日長和夜長對植物生長、休眠、開花或結球等生育現象的影響稱為光週期效應 (photoperiodism), 其中以光週期對開花的作用最為人所熟知。短日照植物在超過臨界之暗期長度後開花, 若在半夜時以電燈照明, 即可打斷長夜效果, 例如冬季期間, 菊花常利用半夜電照抑制開花, 而達產期調節的目的。夏季期間, 短日植物也可利用黑暗處理, 縮短光照時間, 而使其提前開花。

長日照植物則在暗期少於臨界時數後開花，因此冬季期間在晚上點燈照明可加速其開花。進行日長控制時，暗期可見光強度的臨界值最好在 8Wm^{-2} (11lux , 1fc) 以下，明期可見光強度的臨界值最好在 16Wm^{-2} (22lux , 2fc) 以上。為節省光照之電費，可以間歇照光的方式進行，惟間歇的間隔越久，可見光的臨界強度需配合增加。此外，由於光敏素吸收的波長屬於紅光 (660nm) 和遠紅光 (730)，因此使用鎢絲燈將會有較好的效果。日長對開花影響不明顯的植物則稱為日中性植物，如許多觀葉植物因為原產於熱帶和亞熱帶，這些地區的日長變化不如溫帶地區明顯，因此對光週反應也就不敏感。常見作物的光週期特性列於表 4-22。

表 4-22 常見植物的光週期特性 (柯, 2002)

長日照植物	短日照植物	日中性植物
吊鐘花	菊花	玫瑰
觀賞鳳梨	聖誕紅	向日葵
菠菜	長壽花	非洲堇
蘿蔔	牽牛花	紫茉莉
甘藍	百日草	三色堇
大白菜	草莓	黃瓜
多花黑麥草	菸草	蕃茄
大麥	大豆	茄子
小麥	水稻	四季豆

2) 溫度

(1) 設施內的溫度環境

白天進入設施的日射能量，除部份之可見光可被作物葉片色素吸收進行光合作用外，其餘大多轉成熱能分佈於設施中。由於被覆材料對長波輻射的透過率低，因此設施內的熱量無法順利直接以輻射的方式離開 (圖 4-28)。加以設施被覆材料的阻擋，導致設施內的熱量也不易藉由內外空氣交換的方式釋出。因而白天設施內的氣溫通常較露地為高，尤其夏季日射強烈時，設施內的氣溫常會達到危害作物的程度 (圖 4-29)。

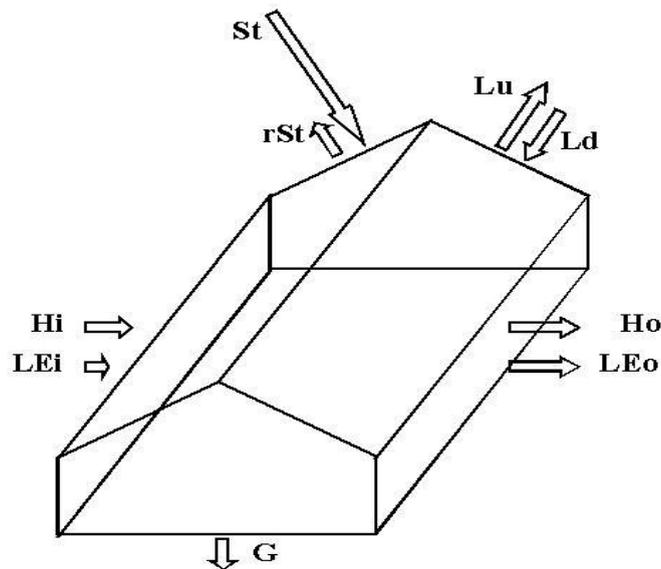
夜間因沒有日射能量之加入，經由設施外表面與大氣間的輻射和對流交換作用，溫室內的氣溫會因熱量逐漸損失而下降。由於被覆材料的阻隔作用，設施內熱量之釋出遠較露地為慢，因而夜間設施內的溫度仍會高於露地。但若所用被覆材料的長波輻射穿透率高，則反而可能因感熱向下輸送受到阻擋，導致單棟之小設施內的氣溫略低於露地。

設施中溫度之空間分佈，設施內南側因接受日射量多，溫度可較北側高；若屬四周開放的設施，不僅週邊的溫度較中間高，處於下風處的氣溫也較上風處為高；連棟設施內的氣溫高於單棟設施；接近水牆或與抽風扇進氣窗處的氣溫則低於遠離處；室內氣溫在垂直方向的略呈現上高下低的分佈，但溫差並不大；栽培床下的氣溫則明顯低於栽培床架上方的溫度。

以上對設施內氣溫變化的描述可歸納成兩大特徵，1. 晝夜溫度變化激烈，日出後室溫急速上升，日落後室溫急速下降。2. 因設施內受光不均一，此外因熱力作用引起

的自然對流和因風力作用引起之強制對流，常造成設施內氣溫分佈不均一。在台灣地區，沒有降溫措施的簡易隧道式設施中，與露地的溫差在中午過後通常可達 15 以上；即使在高架網室內，四週尼龍網的阻風效應仍將導致設施內通風不良，晴天時設施內氣溫仍可較露地高出 5 以上。夜間因覆蓋資材對長波輻射的阻擋效應，連棟設施之中間部位通常可提高 1-2 ，單棟且四周開放之設施內的氣溫則僅會略高於露地；若夜間有微風增加空氣感熱向下之傳輸，設施內的溫度反而可能略低於露地之氣溫。各地區水平日射量之統計列於表 4-23。

除氣溫外，設施內蒸發潛熱和感熱的離去受覆蓋物之阻擋而減少，導致可進入土壤的熱流量增多，因此設施內之土壤溫度也會高於露地（圖 4-30），但設施內土溫的日振幅，卻會因栽培床面之遮陰，以及被覆材料對長波輻射逸失的阻擋等作用而小於露地。水耕設施栽培床內養液的水溫亦會隨設施內氣溫變動，但由於水的比熱大，且養液儲槽多處於遮陰環境下，因此水溫的日振幅常較土溫更小。



$$pc\partial T/\partial t = (St - rSt) + (Ld - Lu) + (Ho - Hi) + (LEo - LEi) - G$$

圖 4-28 設施能量交換示意圖

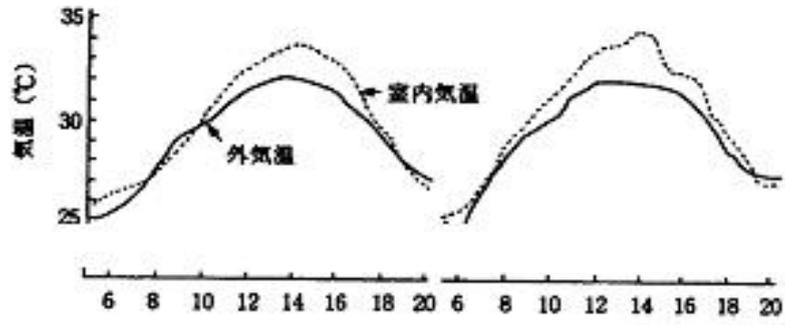


圖 4-29 設施內外氣溫日夜變化

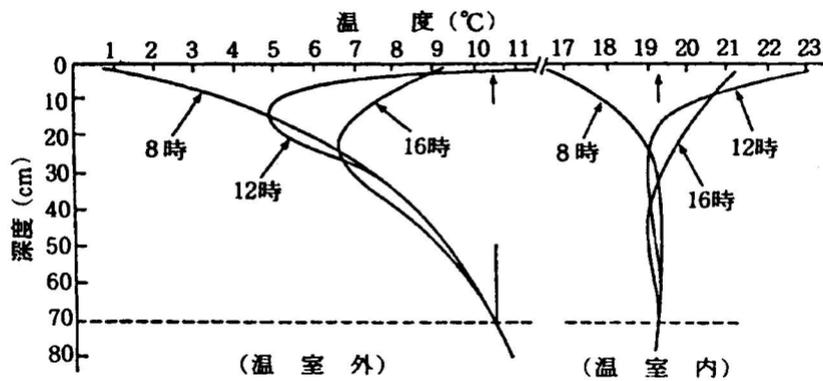


圖 4-30 設施內外土溫日夜變化 (沈等, 1999)

表 4-23 台灣地區平均氣溫統計資料 (中央氣象局, 2002)

	台北	新竹	台中	嘉義	台南	高雄	恆春	宜蘭	花蓮	台東
一月	16.1	15.6	17.1	16.9	18.1	19.9	20.6	16.6	17.9	19.6
二月	17.8	16.8	18.7	18.5	19.2	20.8	20.7	17.6	18.5	19.9
三月	21.1	20.4	22.0	21.7	23.0	24.0	23.7	21.0	21.6	23.0
四月	23.8	23.7	25.1	24.5	25.7	26.8	26.4	23.6	24.5	25.6
五月	26.6	26.0	26.9	26.2	27.0	27.6	27.4	25.6	26.2	26.9
六月	28.6	28.1	28.5	28.7	28.9	29.1	28.5	27.3	27.8	28.6
七月	29.6	29.1	28.5	28.4	29.1	29.3	28.7	28.6	28.6	29.0
八月	30.1	29.0	28.6	28.6	29.0	29.0	28.4	28.3	28.2	28.5

九月	27.1	27.0	27.3	27.0	28.2	28.1	27.1	26.2	26.2	27.2
十月	25.1	24.7	25.6	25.1	26.8	27.2	26.9	24.0	24.7	26.1
十一月	20.8	20.5	21.8	21.1	23.0	24.2	24.2	20.1	21.8	22.9
十二月	18.9	18.3	19.3	19.1	20.3	21.6	22.5	18.5	20.1	21.4
全年	23.8	23.2	24.1	23.8	24.9	25.6	25.4	23.1	23.9	24.9

單位:攝氏度()

(2)溫度與作物生育

作物生命週期中各種生理、生化的反應速率，如光合作用、呼吸作用、蒸散作用、，以及作物整體的生長、化育進度都與溫度密切相關。通常以最適溫度、最低溫度、和最高溫度等基點溫度表之。在最適溫度下，反應速率最快；達到最低或最高溫度時，反應速率就停止，但仍維持生命；若溫度繼續降低或升高，作物將受害甚至死亡。

作物光合作用和呼吸作用的基點溫度不盡相同，一般而言，光合作用的最適溫度約為 25-30，呼吸作用的最適溫度約為 35-40。當溫度超過 40，植物體內酵素就開始受到破壞而影響其生理與生化作用。溫度過高，呼吸速率大於光合作用速率，導致養分消耗快速，蛋白質、游離胺基酸、NO₃ 含量下降，同時荷爾蒙含量也會發生變化。高溫引發作物發育不良、生育衰弱或停滯或徒長、花器分化或發育不良（開花、授粉、受精、著果不良），以致產量下降、品質不良。

空氣溫度會影響光合作用、呼吸作用與新陳代謝之速率，也會影響葉溫，亦會影響水份之蒸散速率。太高的溫度會使蒸散作用太盛，失水過度而造成葉片焦枯或黃化，產生日燒現象，尤其白天光強，溫室內空氣不流動時更甚。相同氣溫環境下，葉溫仍會受其他環境因素之影響，如康乃馨的花朵在氣溫 16 -17 時，白色花朵在近中午時，溫度可達 28，而紅花者可達 37（圖 4-31）。土溫或根溫過高，易使根系木質化，減少吸收面積，降低對水分和養分的吸收能力。土表溫度日夜溫度變化過大，易降低種子萌芽的整齊性。此外，土壤溫度升高，也將使得土壤有機質分解加快，土壤理化性質劣變程度也隨之加強。

園藝作物之最適溫（optimum temperature）變異很大。最適溫度常依株齡、生長階段、和栽培目的而異。例如，番茄剛發芽小苗以日/夜溫 25 最好，結果時之夜溫以 17，日溫在 20-25 為適。黃瓜發芽適溫在 28-32，幼苗適溫降到 18-28 間，到抽薹開花結球期其日夜適溫降到 25/13-15。聖誕紅培養母株取穗及插穗發根以 30 為宜，花芽引發及苞片轉紅在短日下以夜溫 18-21 為適，夜溫超出 23 抑制花芽發育。而盛開後，置夜溫 15 左右苞片呈色最佳，結球萵苣在結球時以 17 日溫/13 夜溫為宜。種苗生產常需較高溫度，以利發根及初期的營養生長。待出售之成品，常須保存於較低溫度環境下，以維持其品質。表 4-24 為常見作物的基點溫度。

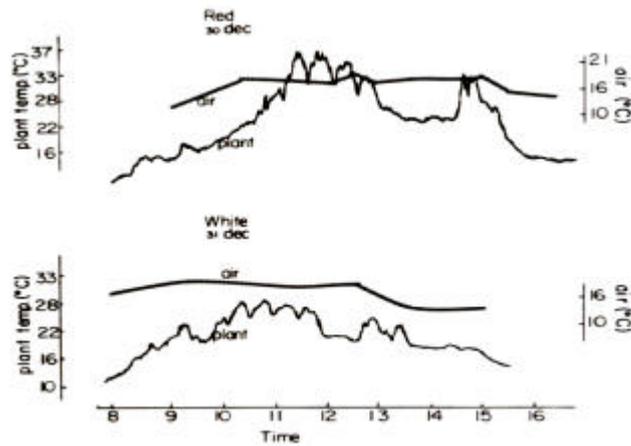


圖 4-31 花色對花朵溫度()之影響 (Hanan, 1965)

表 4-24 常見作物的適溫()範圍 (王, 1988)

作物名稱	日溫	夜溫	說明
蕃茄	20-25	10-18	苗期
茄子	25-30	15-20	苗期
甜椒	25-30	15-20	苗期
胡瓜	22-25	12-17	苗期
西瓜	25-30	18-20	苗期
香瓜	25-30	17-22	苗期
蕙蘭	18-26	20-25	生育期
蕙蘭		15-18	花成期
仙客來	20-25	10-15	生育期
仙客來		16-17	花成期
菊花	18-21	16-20	生育及花成期
康乃馨	18-25	9-14	生育及花成期
玫瑰	20-25	18-20	生育及花成期
鐵砲百合	18-24	13-18	生育及花成期

日夜溫差 (DIF=日均溫-夜均溫) 可影響作物的型態, Went (1944) 即提出熱周性理論 (thermoperiodicity), 並指出當蕃茄處於日溫高於夜溫的環境下, 莖的伸長大於處於在恆溫或日溫低於夜溫之環境者。近年有關日夜溫差對作物高度的研究則指出, 1. 日夜溫差的效應遠大於日均溫, 2. 日夜溫差正值越大, 越能促進莖之伸長, 3. 相同的日夜溫差增幅, 由 0 增至正值, 比由負值增至 0, 更能促進節間之伸長, 4. 在作物

快速生長期，日夜溫差的效應最為顯著，5. 作物對日夜溫差反應的強弱，在種類或品種間存有差異。日夜溫差除了可影響莖的伸長外，日夜溫差增大，葉面積會增加、葉片上揚角度增加、側生分枝數則會減少、乾重和可溶性碳水化合物含量增加。日夜溫差可能藉由影響生物活性 GA 的合成量或改變組織對 GA 的敏感性，而影響植物的型態。

就對作物的型態特徵而言，紅光或高 R/FR 比值的效應與負的日夜溫差類似，可使得植株節間縮短，降低植株高度。遠紅光或低 R/FR 比值的效應與正的日夜溫差類似，可使得植株節間伸長，增加植株高度。因此光質與日夜溫差對莖之伸長有交互影響，在晚上連續以遠紅光照射，可消除-DIF 對莖伸長的抑制效果；但若以紅光照射，反而會增強-DIF 對莖伸長的抑制效果。光量增加會促進+DIF 對株高增加的效果，但光週期長度增長，則降低作物對 DIF 的反應，當光週期增長到 16 小時，許多種類的盆栽和苗床植物將對 DIF 變化鈍感，亦即植株需在短日環境下才對 DIF 變化敏感。由於莖的伸長速率在一天中並非固定不變，從光週期開始到結束，莖伸長速率逐漸減少；葉週期開始到結束，莖伸長速率逐漸增加。因此於日夜交替時段進行溫度驟變處理，其效果最為顯著，於光週期最初 2 小時，將溫度降至夜溫以下，與整日利用-DIF 抑制莖的伸長有相似之效果；增加日出後 2 小時的溫度，和整日利用+DIF 促進莖的伸長有相似之效果。

由於化學藥劑調整植株型態，不僅可能對作物其他部分的發展不利（例如利用矮化劑控制植株高度，同時也影響根系發展），也會污染環境並危害人體健康，因此將會逐漸被禁用。利用碰觸或震動方式，雖然也可減少節間之伸長，但因需要動力，且有植株易受機械傷害和產生乙烯等缺點，因此以溫度或光質控制植株的高度，將是未來的趨勢。調整光質雖也可控制株高，但因光量降低，常會有開花延遲、花朵變小、植體碳水化合物減少、採收後儲運品質下降等缺點，因而限制其在花卉生產上之利用。

溫度不只影響綠色植物的生長，也影響開花。植物的花芽分化通常有其特定的溫度範圍，有些植物必須經過一段低溫時期，才能誘導開花，此稱為春化作用，例如百合、星辰花、夏菊、紫羅蘭、月見草、芹菜、甘藍、甜菜等屬於這類反應的植物。春化作用的有效溫度約在 1-7 間，溫度越低效果越強。過程中如遇高溫，春化作用就會停止，但回到低溫環境後，被中斷的春化作用又可持續進行，因此春化作用進行時間越長其效應就越不易被消除。有些植物花芽形成後進入休眠狀態，需經低溫處理才能打破休眠，促進花芽發育和開花，此稱之為低溫需求型，如杜鵑、鬱金香、水仙、風信子、台灣一葉蘭等屬之。這些需春化或低溫需求者，即可利用溫度控制錯開花期，以達產期調節之目的。

3) 溼度

(1) 設施內的溼度環境

白天設施內的水氣含量可因作物蒸散、土壤和栽培床面的蒸發、以及灌溉作業而增加，且常因設施內外通風不良無法順利排除。但由於白天設施內氣溫升高，因此不僅設施內增加的水氣含量不易察覺，設施內的相對溼度反而顯著下降，尤其在午後設施內相對溼度常降至 60% 以下（圖 4-32）。夜間溫度下降後，白天中所累積的水氣將使得設施內的相對溼度急速上升，甚至經常可達結露的程度。

空氣溼度有多種表示法(表 4-25)。設施內的溼度常以相對溼度表示。相對溼度指空氣中實際的水氣壓與同溫度下之飽和水氣壓的百分比，因此相對溼度值僅表示當時空氣溫度下，空氣中的水氣含量距離飽和的程度。當相對溼度達 100%時，表示已達當時空氣中可容許的最大水氣含量，但並不代表由葉片或土面的蒸發散作用必須停止，只是若再有水氣加入空氣中，將會有水滴凝結出來。空氣中的飽和水蒸氣壓則是溫度的函數，隨溫度升高迅速增大，因此飽和水蒸氣壓隨溫度的改變量，在高溫時比在低溫時為大。含有水氣的濕空氣，隨溫度逐漸降低，相對溼度將逐漸升高，當空氣達到水氣飽和時的溫度又稱為露點溫度。露點溫度越接近氣溫，代表空氣中的相對溼度值越大。

使用噴霧或水牆等措施，係將空氣中感熱轉化為潛熱，使水分蒸發而達降低氣溫之目的，但同時也使得空氣中的水氣含量增加。在設施內直接以噴霧方式降溫，由於內外空氣不流通，因此不僅設施內的相對溼度逼近 100%，降溫的效果也不佳，會處於悶熱、潮濕的環境。若採用水牆方式降溫，由於所吸入之外界空氣的相對溼度較低，因此有較好的降溫效果。台灣地區四周環海，空氣中的相對溼度高(表 4-26)，因此加濕冷卻的降溫效果有限，以氣溫 30、相對溼度 80%的環境條件為例，水牆的降溫效果最多僅可將氣溫降至 27。一般而言，設施內接近水牆處的氣溫最低、溼度最高，並依距離水牆之遠近呈現明顯之溫度與溼度梯度。不論使用噴霧或水牆降溫，為避免夜間產生過濕的現象，可在傍晚前啟動排風扇，排出設施中的濕空氣。

表 4-25 空氣溼度表示法

用語	定義	單位
絕對溼度	單位體積濕空氣中水蒸氣的質量	kgm ⁻³
相對溼度	濕空氣中水蒸氣分壓與同溫飽和水蒸氣壓之比值	%
飽和差	濕空氣中水蒸氣分壓與同溫飽和水蒸氣壓之差值	hPa, mb
露點溫度	濕空氣中水蒸氣開始凝結的溫度	
濕球溫度	濕表面因蒸發冷卻可達的最低溫度	

表 4-26 台灣地區溼度統計資料(中央氣象局,2002)

	台北	新竹	台中	嘉義	台南	高雄	恆春	宜蘭	花蓮	台東
一月	77	75	70	74	77	69	71	77	75	70
二月	77	79	70	76	72	71	73	78	77	73
三月	76	77	71	79	73	73	73	76	76	73
四月	80	82	74	81	75	74	71	78	80	76
五月	75	77	71	80	73	78	72	78	76	75
六月	79	79	75	76	72	80	77	83	81	74
七月	75	77	77	79	73	80	76	80	78	74

八月	71	78	76	78	77	80	77	81	79	77
九月	75	75	73	78	76	79	75	79	78	75
十月	74	76	73	78	76	75	68	83	78	72
十一月	72	72	67	72	71	67	65	79	70	67
十二月	79	78	73	76	78	74	70	82	74	70
全年	76	77	73	77	74	75	72	80	77	73

單位:百分比(%)

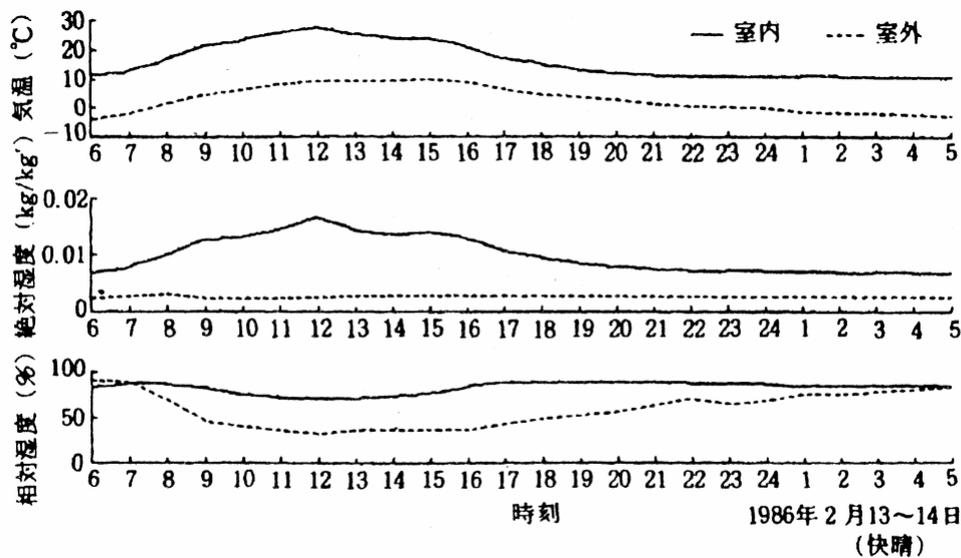


圖 4-32 設施內溼度日夜變化

(2) 溼度與作物生育

水分約佔作物植體鮮重 80~95%。水不只是光合作用的原料，植物體內各種代謝作用多在水溶液中進行。水分同時也是養分吸收和運輸的媒介，植物並可藉蒸散作用調節植物體之溫度以及影響水分和養分的吸收及移運。

空氣相對濕度降低，可促進葉片之蒸散作用，於是植物體需水量與需水頻率均增加，若土壤水份補充不及將直接影響植物生理，並縮小葉片氣孔開度導致光合成量降低。空氣相對溼度過高，會抑制葉片的蒸散作用，於是葉溫將升高，且影響水分和養分的吸收及移運。適合作物生長的溼度環境約在相對溼度 75~85%之間，過乾和過濕的環境不僅對作物的生長不利，也易於引起病蟲害的發生。作物在相對溼度 90%以上之環境下 4-5 小時，多會發生灰黴病、菌核病、斑點細菌病、及露菌病等病害。應盡量將白天因蒸發散所累積在設施內的水氣排除，夜間使用抽風扇強制空氣流動，加速葉尖泌露和葉表露水之蒸發，或以加熱降低相對溼度、利用吸濕材料除去多餘的水分、或使用可流滴被覆資材避免凝結之露水滴下，以減少晚間設施內發生高濕度和結露的時間。

設施內白天高溫低濕的環境，不僅使得由葉片蒸散和土壤蒸發所釋出的水氣量大增，土壤深處的水分和鹽分也經由毛細作用向上移動在土表富集，且因缺乏雨水淋洗，使土壤更易鹽化，不僅使土壤之物理性劣化且土壤微生物相破壞，以致造成根部受損、地上部葉片萎凋、生長緩慢、作物發生毒害等症狀，而形成鹽害或連作傷害。以水耕方式栽培者，若使用之養液配方、濃度與管理方式得當，養液之 EC 和 pH 並不會發生快速波動的變化。

4) 空氣流動

(1) 設施內的空氣流動情形

由於被覆資材的阻擋作用，設施外的風通常不易直接吹入，因此設施內外空氣的交換性很差。一般而言，密閉設施內空氣流動以自然對流為主，設施中間的空氣上升，再沿側壁下降形成環流。棟高較高的設施，自然對流能形成的環流較大，空氣的流速也較高。若設施有裂隙，設施內也會因風壓不同形成環流，在設施頂風處有正風壓、前上方有負風壓、和下風處又有正壓的情形下，形成由上風處經屋頂至下風再經過地面的環流，由於地面溫度高、濕度大，因此造成設施上風處較下風處的溫度高、濕度大 (Businger, 1966)。一般而言，設施內空氣流速多在 0.5ms^{-1} 以下，以普通風速計並無法測出。

利用換氣措施，可以提高設施內之空氣流動速率。換氣措施可概分為自然換氣與強制換氣兩種方式，自然換氣係以天窗或側窗進行換氣，其原動力分別為設施內外的溫差或外界之風壓。強制換氣則是利用風扇強制性排出設施內的空氣，同時引入外界的空氣。不論採用自然換氣或強制換氣，都需注意進氣與排氣窗口的相對位置和面積，以及設施本體的氣密性，務必使空氣的流動路徑能涵蓋作物生長的區域並流經葉叢之間，才能有效發揮空氣流動之功效。

風速達 1ms^{-1} 以上，才有足夠之風壓可進行換氣，但通常風速需達 2ms^{-1} 以上換氣效果才明顯。利用風壓換氣，換氣窗應分別設置於上風和下風處；若空氣由側窗進入天窗流出，則設施內下風處的溫度會較高。連棟之溫室，由側窗進入的空氣不易抵達設施中央，此時天窗必須兼具排氣與進氣之功能，因此不僅天窗面積務必較大，且背風與面風之天窗數目和相對位置都需有適當之安排，才能達較好之換氣效果。台灣地區夏季盛行西南風，冬季盛行東北風，但各地之確實風向仍會依當地之地型而異，相關的風力統計列於表 4-27。

無風或風力微弱之狀況下，自然對流必須利用設施內外空氣溫差所引起的壓力差為驅動力，因此在夏季高溫的氣候環境下，利用自然對流散熱的太子樓式設施並無法有效減輕設施內的熱逆境。但若將遮光網懸掛於設施內離屋頂有一段距離的地方，並將側壁由下向上捲至作物高度，當遮光網上方累積的熱空氣由天窗釋出時，將由側壁之開口吸入外界的冷空氣，若能適當安排側壁捲升的高度及栽培床位，使冷空氣能盡量流經植叢，則不僅有助於減輕作物的熱逆境，且可避免遮光網因風吹雨打而縮短使用期限。

利用抽風扇強制抽風可以滿足換氣的需求，使設施內的氣溫不致於過度升高，而抽風扇所產生的強制對流也能使葉片周圍的空氣流動，可以降低葉片邊界層的熱傳阻力，增加葉片被空氣帶走的感熱量，是緩解作物熱逆境的另一方法，但需注意到換氣

扇與吸氣口的相對位置和設施本體的氣密性，以確保空氣可以流經葉叢之間。利用抽風扇換氣，同時也可將設施內的水氣排出避免夜間發生過濕的狀況，並且避免設施內產生 CO₂ 不足的問題，但是設施內的氣溫最低僅能降至和外界氣溫一樣。

表 4-27 台灣地區風速統計資料(中央氣象局,2002)

	台北	新竹	台中	嘉義	台南	高雄	恆春	宜蘭	花蓮	台東
一月	2.5	3.5	1.5	1.8	3.4	2.2	3.7	1.8	3.1	1.7
二月	2.7	3.4	1.6	1.8	3.4	2.2	3.3	1.6	3.0	1.5
三月	2.5	2.7	1.5	1.8	2.9	2.2	3.2	1.6	3.0	1.6
四月	2.6	2.6	1.6	2.0	3.2	2.3	2.9	2.0	3.2	1.7
五月	2.5	2.1	1.5	1.9	2.8	2.0	2.7	1.9	2.6	1.5
六月	2.4	2.3	1.6	2.2	2.6	1.9	2.0	1.8	2.7	1.5
七月	2.4	2.4	1.7	2.3	3.4	2.7	2.8	2.4	2.5	1.7
八月	2.7	1.8	1.4	2.1	2.9	2.3	2.7	2.1	2.5	1.5
九月	2.7	2.7	1.5	1.9	3.1	2.3	2.8	2.5	2.8	1.6
十月	2.9	2.9	1.6	1.6	2.8	2.0	3.6	1.9	3.1	1.8
十一月	2.7	3.5	1.8	1.8	3.6	2.1	5.1	1.8	3.4	1.8
十二月	2.6	3.4	1.7	1.9	3.5	2.1	4.4	2.0	3.4	1.7
全年	2.6	2.8	1.6	1.9	3.1	2.2	3.1	2.0	2.9	1.6

單位:每秒公尺(m/sec)

(2)空氣流動與作物生育

緊鄰作物體表存在一靜止空氣邊界層，舉凡作物與其週遭空氣所進行之熱、水氣、CO₂ ...等之交換，都必須以擴散方式通過此一邊界層，因此該邊界層的傳遞阻力可直接影響熱、水氣、CO₂ ...等通量之交換速率。此邊界層的傳遞阻力主要受空氣流速之影響，流速大時，邊界層變薄，傳遞阻力下降；流速小時，邊界層變厚，傳遞阻力增大（圖 4-33）。當風速相等時，葉片越大其邊界層的阻力就越大。葉表空氣邊界層的傳遞阻力不易測定，通常可由葉片的形狀和特徵長度，以及空氣之對流方式和流速或溫差，利用適當公式予以估算。一般而言，植叢間空氣流速應維持在 0.5 ms⁻¹-1 ms⁻¹ 間，風速太低對降低葉片邊界層傳遞阻力的效果不大，風速太高則可能會對作物造成傷害。

維持適當的通風與換氣，可以降低設施內的氣溫和植叢內的溼度，減少葉溫與氣溫的差距，提高作物的蒸發散量和產量。空氣流動也會加速設施內熱量（溫度）、水氣、和 CO₂ 等環境因子之混勻，以及漂浮於空氣中之病菌和植體所排放之乙烯的散佈。進行通風與換氣，也可能引入外界的空氣污染物，對作物產生不良的影響。

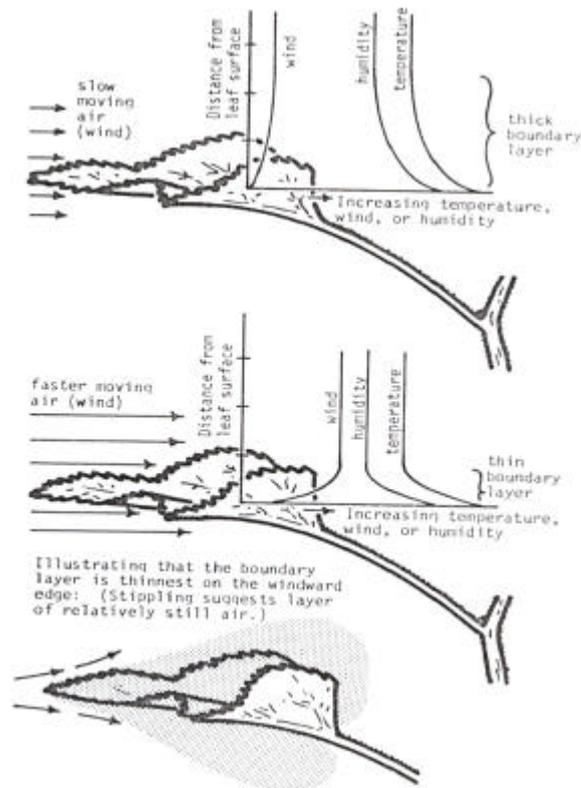


圖 4-33 葉片邊界層

5) 二氧化碳

(1) 設施內的二氧化碳環境

作物之光合作用將二氧化碳與水結合形成碳水化合物，呼吸作用則將碳水化合物分解成二氧化碳和水。在露地環境中，作物的光合作用在日出後開始進行，空氣中的二氧化碳濃度因而逐漸降低，通常在中午時二氧化碳濃度達到一日中的最低值；午後光合作用因日射量逐漸降低而減弱，呼吸作用卻因溫度升高而增強，因而空氣中之二氧化碳濃度逐漸上升；日落後，光合作用停止，呼吸作用仍持續進行，因而二氧化碳濃度快速提高，次日日出前，二氧化碳濃度將達到一日中的最高值。目前露地空氣中的 CO_2 濃度平均約達 350ppm，但由於空氣中存在的對流和渦流交換作用，每日振幅約僅有 10ppm。

設施內外由於空氣交換受限，上述露地環境中二氧化碳的變動更為明顯。通常在日出後，設施內的二氧化碳濃度即因作物光合作用消耗而急速下降，顯著低於室外大氣中的濃度，若將門窗緊閉，約在上午 8、9 點時就可降至約 100ppm，並維持此低二氧化碳濃度直至午後；日落後，二氧化碳濃度將因作物和土壤中微生物的呼吸作用而快速累積，濃度可達露地環境之 2-3 倍（圖 4-34）。由於白天作物光合作用的效率會

因設施內 CO₂ 濃度低而降低，因此進行設施栽培管理時必須注意有適量的通風，以維持設施內 CO₂ 濃度不致下降太多。CO₂ 濃度不足的現象以設施容積越小、密閉性越高、作物光合成器官面積越大時越顯著。影響設施內 CO₂ 濃度之因子有作物的繁茂度、作物種類及光合特性、土壤性質、換氣率、日射量、設施構型等。

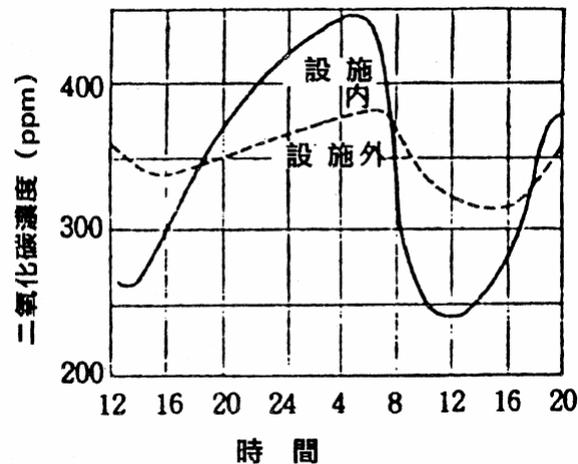


圖 4-34 設施內外二氧化碳之變化

(2) 影響作物二氧化碳固定量之因素

大多數作物屬於僅能以 Calvin 循環固定二氧化碳之 C₃ 型植物，受光呼吸作用之影響，C₃ 植物的二氧化碳補償點約為 50-150ppm。C₄ 植物因具有富集二氧化碳的能力，二氧化碳補償點僅約 5-10ppm，所以當二氧化碳濃度超過 10ppm，即可有淨光合產物的累積。一般 C₃ 型植物的光合速率約 15-35mg (CO₂) cm⁻²hr⁻¹，而 C₄ 型植物的光合速率則可達 40-80mg (CO₂) cm⁻²hr⁻¹ (柯，2002)。

當空氣中二氧化碳濃度降至 300ppm 以下，C₃ 植物通常就會感到二氧化碳匱乏，由於 C₄ 植物在較低的二氧化碳濃度下，仍能累積光合產物，因此 C₃ 植物較 C₄ 植物對空氣中二氧化碳之變動敏感。一般而言，目前大氣中二氧化碳濃度對滿足作物光合作用之需要是不足的，增加二氧化碳濃度可以提高光飽和點，從而提高光合成率。在設施中增施二氧化碳，局部提高作物生長環境中的二氧化碳濃度至 1000-2000ppm，可以獲得明顯增產效果，但仍必須有適合的光量、溫度、溼度、水分供應、風速、...等環境因素環境配合。

植物之淨光合率與葉溫的變化呈現鐘型曲線的關係。於低溫時光合成率隨溫度上升的比率較呼吸作用大，故淨光合率隨溫度增加而增大；當溫度高於 25-30 後，光合成率小於呼吸消耗速率，故淨光合率隨溫度增加而減少。在高 CO₂ 濃度環境下，與 Calvin 循環競爭核酮糖二磷酸的光呼吸作用被抑制，因此在相同之溫度與光照條件下，處於高 CO₂ 濃度環境中植物的淨光合成率高於處於低 CO₂ 濃度環境者。C₃ 型作物的光呼吸作用隨溫度升高而增強，所以其光量子產額隨溫度升高而降低；C₄ 型作物的光呼吸作用不明顯，所以其光量子產額較不因溫度變動而發生改變。由於 C₄ 型作物在進行 Calvin 循環固定 CO₂ 前，必須多耗費能量進行 CO₂ 的富集反應，因此在低溫時，

其光量子產額反而低於 C3 型作物 (柯, 2002)。

空氣中的二氧化碳必須通過葉片表面的邊界層, 經由氣孔進入葉片內, 再以擴散方式進入葉肉細胞內的葉綠體中, 才能被光合作用固定成為碳水化合物。此途徑中的每一過程都有阻力, 其中以邊界層阻力和氣孔阻力最為顯著。增加空氣流動可以減小二氧化碳通過葉片邊界層的阻力, 保持充足水分供應可以確保氣孔的開度, 因此兩者也都是提高作物二氧化碳利用的重要因素。

6) 設施微氣象環境對作物影響之綜合評估

前述各項微氣象環境因子在設施內都處於動態平衡中, 例如當入射的日射量增加, 將導致設施內的氣溫急速升高, 同時造成相對溼度急速下降, 空氣流動則因自然對流增強而增加, CO_2 濃度卻因光合作用增強而下降 (圖 4-35)。此外, 由於設施環境的緩衝能力小, 因此除空氣流速外, 氣溫、相對溼度、和 CO_2 濃度的變化幅度常遠大於露地。因此需進行綜合評估, 才易正確瞭解各種環境改善措施對作物的影響。

目前評估溫室內各種降溫措施降溫的效果多以氣溫為指標, 然而葉溫才是反應作物生理狀況最直接的指標 (Levitt, 1980; Fitter et al., 1987); 且葉溫為溫室內日射、氣溫、濕度、風速等環境因子對作物之綜合反應的結果 (Rosenberg et al., 1983; Campbell, 1977)。作物葉溫可用極細熱電偶插入葉脈中或貼於葉片上直接測得, 也可利用熱紅外線溫度計間接測得。但是, 測定葉溫僅能瞭解作物遭受溫度逆境的程度, 若需評估各種環境改善措施對葉溫的綜合影響, 最好以能含括多種環境因素之葉溫估算模式, 計算葉片表面輻射、感熱、和潛熱三種不同型式能量通量收支平衡後的綜合結果 (申與林, 1993)。

葉片表面的能量收支可表示如下,

$$R_n - H - LE = 0 \quad (4-2)$$

其中 R_n 、 H 、和 LE 分別代表淨輻射、感熱、和蒸發潛熱通量。而感熱和蒸發潛熱通量與葉片邊界層的溫度差和水蒸氣壓差有下列之關係

$$H = \rho c_p (T_i - T_a) / r_h \quad (4-3)$$

$$LE = \gamma (e_i - e_a) / (r_v + r_s) \quad (4-4)$$

其中 T_i 、 T_a 、 e_i 和 e_a 分別代表葉溫、氣溫、以及葉片氣孔內和空氣中的水蒸氣壓, γ 和 ρc_p 分別代表濕度計常數和空氣熱含量, r_h 、 r_v 和 r_s 分別代表感熱和蒸發潛熱通過邊界層的傳遞阻力, 以及氣孔阻力。當溫度相差不大時, 飽和蒸氣壓與對應之溫度間有如下之關係

$$\delta = (e_i - e_a) / (T_i - T_a) \quad (4-5)$$

將 (4-5) 代入 (4-4), 可得下式

$$LE = \gamma [\delta (T_i - T_a) + (e_a - e_i)] / (r_v + r_s) \quad (4-6)$$

將 (4-3) 和 (4-6) 代入 (4-2), 並經重新整理, 可得

$$T_i = T_a + R_n / h - \gamma (e_a - e_i) / [h(r_v + r_s)] \quad (4-7)$$

$$h = (\rho c_p / r_h) + [\gamma \delta / (r_v + r_s)] \quad (4-8)$$

由 (4-7) 可知, 目前熱帶和亞熱帶地區, 為減輕設施內熱逆境所採行之遮蔭法, 係藉由減少進入設施內的日射能量, 以達到減輕溫室內熱負荷的目的。以遮蔭方式降溫, 雖然設施內氣溫的下降程度不如水牆多, 但是可以減少葉片上接受的日射能量,

同時也維持設施內低濕度的環境，葉片蒸散冷卻的作用仍可維持，因此葉溫下降的程度將比氣溫的降幅大。一般而言，遮陰 50%的效果相當於使用噴霧冷卻的效果，使用 60%的遮陰網，可使葉溫降至與水牆、抽風扇等降溫措施相當的程度。然而遮陰網同時也減少了可供光合作用的可見光量，多數作物的光合成量也隨之降低，不僅影響了作物的產量，也常產生徒長、柔弱、消蕊等現象。因此遮光網之使用僅適合弱光性至中光性的作物，對強光性的作物而言並不十分理想。

加濕冷卻法係以水牆或噴霧的方式，從空氣中獲取蒸發液態水所需之熱能，以達到降低設施內氣溫的目的。加濕冷卻法可以使設施內的氣溫降的比外界氣溫低，但與空氣中的相對濕度有關，最低只可降達空氣的濕球溫度，因此空氣中的相對濕度越高，加濕冷卻的降溫效果越差。台灣地區四周環海，空氣中的相對濕度高，因此加濕冷卻的降溫效果有限，以氣溫 30、相對濕度 80%的環境條件為例，水牆的降溫效果最多僅可將氣溫降至 27。使用加濕冷卻法，容易造成設施內濕度上升，不僅有利於病蟲害的繁殖，也不利於作物利用本身的蒸散作用來降低葉溫，因此對於舒緩設施內作物熱逆境的效果小於所降低氣溫的幅度。欲使水牆的降溫效果發揮，設施的氣密性必須要高，但也相對增加設施的建造成本，因此僅適合具高經濟價值的作物使用。設施內以噴霧方式加入的水氣若留在設施內，會提高設施內的水氣含量，導致降溫的效果遠低於水牆的降溫效果，因此使用噴霧降溫措施時最好能搭配抽風扇一齊使用。

由於熱逆境發生時設施內通常為高溫低濕的狀態，因此若要有有效舒緩設施內作物遭受的熱逆境，需朝向降低設施內氣溫，減少投射至葉片的日射能量，但仍維持設施內低濕的方向著手（申和余，1997；Shen and Yu，2002）。利用設施內氣候估算模式和作物葉溫估算模式，可以模擬不同降溫措施對降低夏季設施內作物葉溫的效應（表 4-28），結果指出常用的降溫措施如抽風扇、水牆和遮陰網都可以降低作物的葉溫，其中以水牆的降溫效果最好，但是由於設施內相對溼度易因水牆之使用而提高，並不利於葉片蒸散作用之降溫，因此葉溫在 30 以上的機率在各地區仍有 15%以上。使用抽風扇設施內葉溫介於 30~35 之間的機率仍比水牆多 10%。使用 30%的遮陰網僅可有限的降低葉溫，需使用 60%的遮陰網才能使葉溫降至與水牆和抽風扇相當的程度。使用屋頂洒水技術並不會降低設施內的葉溫，反而會惡化作物的熱逆境，此與薄水膜會改變被覆資材的光學性質有關。單獨利用可阻擋近紅外光的被覆材料，由於設施內外空氣交換不良，設施內的氣溫仍高，對降低葉溫的效果僅約與單獨使用抽風扇或 60%遮陰的效果相當。若將可阻擋近紅外光的被覆材料配合抽風扇一起使用，由於可減少日射中近紅外光部分的入射，以避免設施內之氣溫和作物葉溫過度上升，但卻不會減損光合作用有效輻射（可見光）的進入，且設施內也不致於產生過濕的環境，降低作物葉片的蒸散冷卻效果，因此對葉溫降溫的效果比水牆還好。

目前可反射近紅外光的玻璃，已廣泛用於採用玻璃帷幕的辦公與商業大樓中（圖 4-36），以節省昂貴的空調冷卻費用。國內在塑膠布上以真空鍍膜法鍍上可反射近紅外光之金屬膜的技術已初步發展成功，國外也有相關研究正進行中（Hoffmann and Waaijenberg，2002）。日後若能應用於目前常見的簡易塑膠布溫室，並配合抽風措施，不僅可有效舒緩設施內的熱逆境，且不會產生 CO₂ 不足的情形，是適合熱帶和亞熱帶地區夏季高溫高濕氣候環境的有效降溫措施。

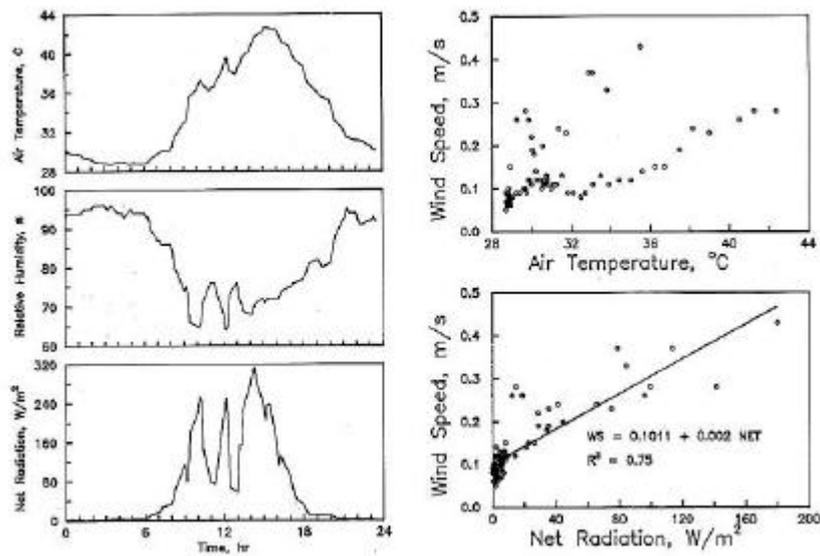


圖 4-35 設施內的微氣象環境因子的動態平衡關係

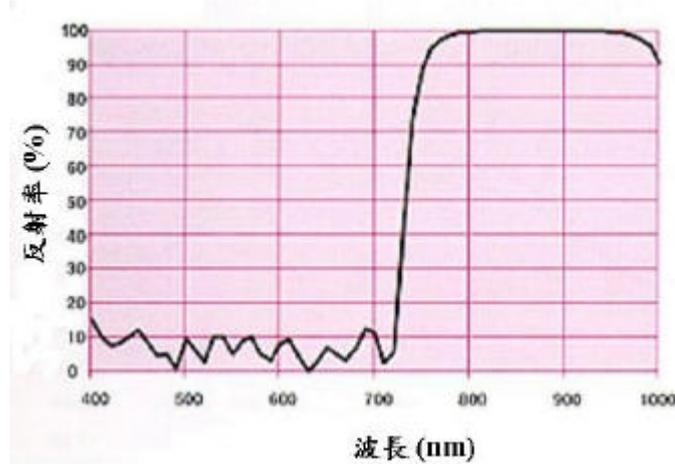


圖 4-36 熱反射玻璃的反射光譜

表 4-28 不同降溫措施對夏季設施內葉溫分佈頻率的影響 (申和余, 1997)

地 區	降溫措施	葉溫 ()				
		<20	20-25	25-30	30-35	>35
桃 園	GN	1.0	8.9	15.3	17.2	57.6
	GF	2.0	17.2	43.1	35.9	1.8
	G P+F	4.7	19.0	48.3	27.9	0.1
	PE N	4.5	13.6	20.8	26.3	34.7
	PE F	2.7	18.4	43.8	34.8	0.3
	PE P+F	5.4	20.5	49.1	24.8	0.1
	S30	4.6	15.7	25.9	33.1	20.7

(接下頁)

(續表 4-28)

地 區	降溫措施	葉溫 ()				
		<20	20-25	25-30	30-35	>35
	S60	4.6	19.4	38.2	36.8	0.9
	RS	1.2	9.4	17.2	19.2	53.0
	FR	2.5	15.8	33.4	43.8	4.6
	FR+F	2.7	20.8	55.5	21.0	0.0
台 中	G N	0.8	7.7	15.8	19.2	56.5
	G F	1.4	16.7	49.7	31.5	0.7
	G P+F	3.7	19.3	56.4	20.1	0.5
	PE N	3.1	13.5	22.6	31.7	29.2
	PE F	1.8	17.5	50.8	29.0	0.9
	PE P+F	4.3	21.1	57.8	16.3	0.5
	S30	3.0	15.7	29.2	39.3	12.7
	S60	3.1	19.6	43.7	32.4	1.2
	RS	1.0	8.1	17.7	22.4	50.8
	FR	1.7	15.1	36.9	45.4	0.9
	FR+F	1.8	20.1	65.8	11.7	0.6
	高 雄	G N	0.5	6.2	17.2	20.7
G F		0.8	13.6	54.0	31.2	0.4
G P+F		2.7	19.0	60.9	17.0	0.4
PE N		2.2	12.7	24.7	34.9	25.5
PE F		1.0	15.3	55.7	27.3	0.8
PE P+F		3.2	20.9	61.3	14.4	0.4
S30		1.8	14.6	32.7	39.6	11.2
S60		1.5	18.2	46.7	31.3	2.2
RS		0.6	6.6	18.8	24.6	49.3
FR		0.9	12.2	40.6	44.3	1.9
FR+F	0.9	17.5	68.6	12.4	0.5	
花 蓮	G N	0.9	10.3	16.7	17.7	54.3
	G F	1.6	19.2	47.8	30.9	0.6
	G P+F	4.2	20.7	54.0	20.9	0.2
	PE N	4.2	15.6	22.1	26.5	31.5
	PE F	2.1	19.7	48.2	29.1	0.9
	PE P+F	5.0	22.5	54.6	17.7	0.2
	S30	4.2	17.7	27.7	32.4	17.9
	S60	4.1	21.5	41.3	32.4	0.8
	RS	1.1	11.2	18.3	19.8	49.5
	FR	2.0	17.9	35.2	42.8	2.1
FR+F	2.1	21.8	62.3	13.4	0.4	

降溫措施代碼：G (玻璃溫室)，PE (PE 布設施)，N (不做降溫措施)，F (使用抽風扇)，P+F (使用水牆)，S30、S60 (遮陰 30%或 60%)，RS (屋頂洒水)，FR (使用近紅外光阻絕被覆材料)，FR+F (同時使用近紅外光阻絕被覆材料和抽風扇)。(申雍)

引用 參考文獻

1. 王鼎盛。1988。設施園藝設計手冊。台灣大學農業工程系。
2. 申雍、余淑玲。1997。台灣地區溫室降溫方式的評估。中華農業氣象 4 : 11-17。
3. 申雍、林婉貞。1993。設施內作物葉溫之估算模式及其應用。中華農學會報 新 163 : 8-17。
4. 沈再發。1980。台灣農家要覽豐年社發行。pp931-939pp。
5. 沈再發、蔡金川、黃禮棟 (譯)。1999。園藝設施學入門。七星農田水利研究發展基金會。
6. 吳敏濟、陳世銘。1993。自動育苗套籃系統之研究。出自“八十二年農業機械論文發表會論文摘要集”，13-15。台北：中華農業機械學會。
7. 柯勇。2002。植物生理學。藝軒圖書出版社。
8. Accati, E. 1978. Ideal climate, no labour costs, make Kenyan flowers bloom. The Grower. 89(14), Apr. 13, 1978.
9. Businger, J. A. 1966. The glasshouse (greenhouse) climate. In Physics of Plant Environment, ed. W. R. van Wijk. North-Holland Publ. Co., Amsterdam. 382 pp.
10. Campbell, G. S. 1977. An Introduction to Environmental Biophysics. pp. 159. Springer-Verlag, New York.
11. Castilla, N. et al. 1989. Alternative greenhouses for mild winter climate areas of Spain. Preliminary report. Acta Hort. 245:63-73.
12. Enoch, H. Z. 1978a. A theory for optimization of primary production in protected cultivation. I. Influence of aerial environment upon primary plant production. Acta. Hort. 76:31-43.
13. Fitter, A. B., A. Bauer and Blank. A. L. 1987. Effect of air temperature and apex development in spring wheat. Crop Sci. 27:113-116.
14. Hanan, J.J. 1965. Preliminary measurements of flower temperature. Colo. Flower Growers' Assoc. Bull. 188:1-4.
15. Hanan, J.J., W.D. Holley and K.L. Goldsbery. 1978. Greenhouse Management. Springer-Verlag. Pp. 530.
16. Hoffmann, S. and D. Waaijenberg. 2002. Tropical and subtropical greenhouses – A challenge for new plastic films. Acta Hort. 578:163-169.
17. Kimpel, K. 2001. Plastics may replace chemicals as plant growth regulators. <http://www.napa.ufl.edu/2001news/plastics.htm>
18. Levitt, J. 1980. Responses of Plants to Environmental Stresses. Vol. I. Chilling, Freezing and High Temperature Stress. pp.497. Academic Press, New York.
19. Lukaszewska, A. J. and L. Jablonska. 1991. Ornamental plant production in Poland. Chron. Hort. 31:35-37.
20. McCree, K.J. 1981. Photosynthetically active radiation. In: Physiological plant ecology. Lange, O.L., O. Nobel, B. Osmond and H. Ziegler (eds.). Vol. 12A, Encyclopedia of plant physiology (new series). Spring-Verlag.
21. Morgan, D.C. and H. Smith. 1976. Linear relationship between phytochrome

- photoequilibrium and growth in plants under simulated natural radiations. *Nature* 262: 210-212.
22. Morgan, D.C. and Smith. 1979. A systematic relationship between phytochrome-controlled development and species habitat, for plants grown in simulated natural radiation. *Planta* 145:253-258.
23. Palmer, C. 1987. It ' s not all going Spain ' s way. *The Grower*. 107(23). June 4,1987.
24. Papachristodoulou, S., C. Papayiannis and G. S. Panayiotou. 1987. Norm input-output data for the main crop and livestock enterprises of Cyprus. *Agric. Econ. Rpt.* 16. Cyprus Agric. Res. Inst. Nicosia.
25. Rajapakse, N.C. and J. W. Kelly. 1992. Regulation of chrysanthemum growth by spectral filter. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 117: 481-485.
26. Rajapakse, N.C. and J. W. Kelly. 1994. Influence of spectral filters on growth and postharvest quality of potted miniature roses. *Scientia Horticulturae* 56:245-255.
27. Rajapakse, N.C. and J. W. Kelly. 1995. Spectral filter and growing season influence growth and carbohydrate status of chrysanthemum. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 120: 78-83.
28. Rajapakse, N.C., R.K. Pollock, M.J. McMahon, J.W. Kelly and R.E. Young. 1992. Interpretation of light quality measurements and plant response in spectral filter research. *HortScience* 27: 1208-1211.
29. Rosenberg, N. J., B. L. Blad. and S. B. Verma. 1983. *Microclimate: The Biological Environment*. 2nd ed. pp.495. John Wiley & Sons, New York.
30. Shen, Y., J.T. Wu and I.P. Wang. 1992. Solar radiation quality inside greenhouses and an improvement technique. *J. Chinese Agric. Chem. Soc.* 30:321-327.
31. Shen, Y. and S.L. Yu. 2002. Cooling methods for greenhouses in tropical region. *Acta Hort.* 578:323-327.