

有關太陽輻射能量、太陽的位置與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，本章多不予以重覆。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。

一、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式 1 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 $1367 \pm 7 \text{ W/m}^2$ 。式 1 對 n 作圖可得圖 1。

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

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

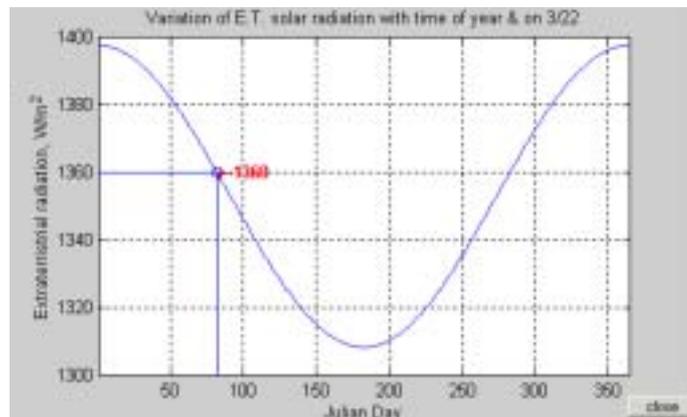


圖 1. 大氣層外圍的一個隨時正向太陽的平面上所受到的太陽能

如圖 2 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，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，一般分別以短波與長波來簡稱。圖 3 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 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)。

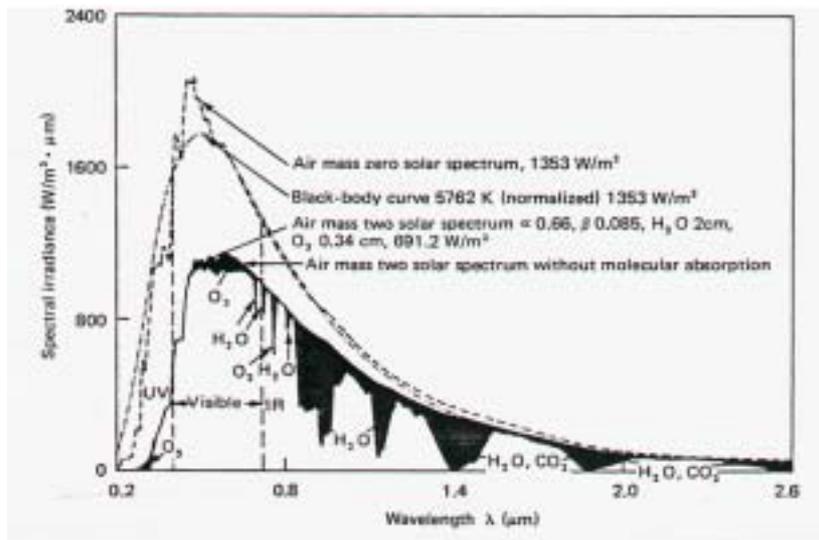


圖 2 太陽光譜 (摘自 Duffie and Beckman, 1980)

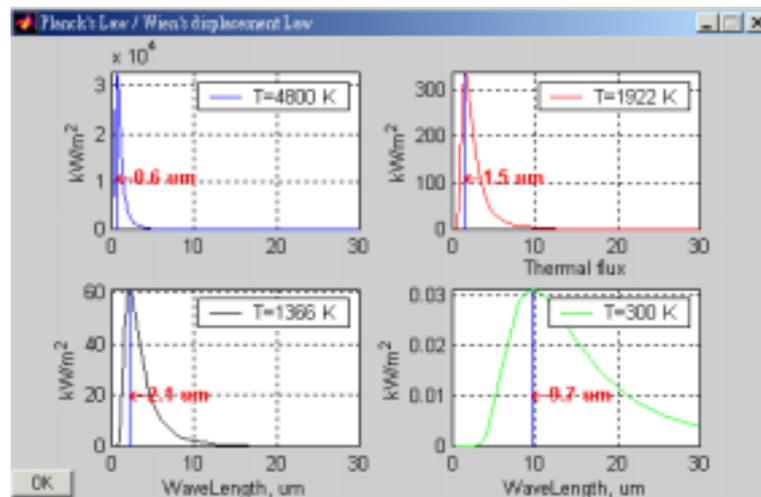


圖 3. 四種溫度(300 – 4800 K)的完全黑體的輻射光譜分布與波峰位置

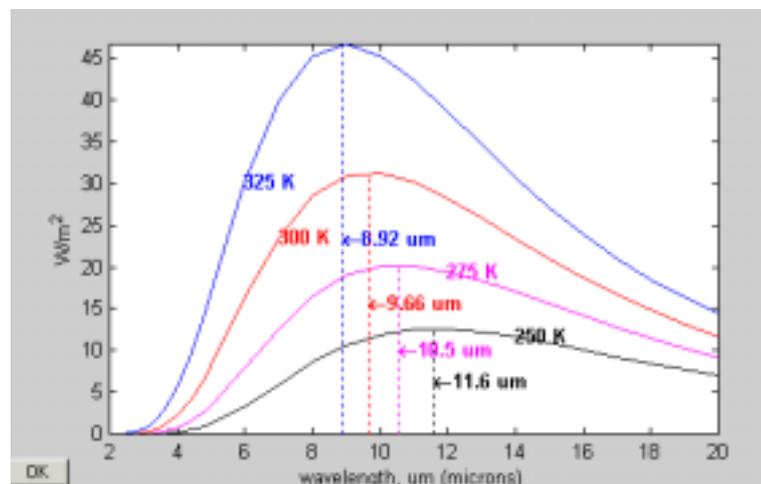


圖 4. 四種溫度(250-325 K)的完全黑體的輻射光譜分布與波峰位置

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，溫室效應就不存在了，因為 PE 這種材質有不低的長波穿透率。

假設全光譜的總能量為 1，各波長的累積機率值可用式 2 與式 3 計算(方, 1994)，兩公式對波長繪圖的結果如圖 5 所示。圖 5 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列。圖 5 中較粗的線為使用公式 2 與 3 產生的曲線。當波長大於 2 μm 部分的光譜能量只佔全光譜的 5.8%。

240 500 nm範圍 ($R^2 = 0.99974$)

$$Y = a + b * X^2 * X + c / X * X + d * \exp(-X) \dots\dots\dots[2]$$
 其中, $a = -0.16661872$ $b = 6.38928E-08$ $c = 415.778608$
 $d = -1.3977E+101$

500 3800 nm範圍 ($R^2 = 0.9999928353$)

$$Y = a + b * X + c * X^2 + d / X + e / X^2 \dots\dots\dots[3]$$
 其中, $a = 1.83579683$ $b = -0.00025789$ $c = 2.84687E-08$
 $d = -1081.00849$ $e = 168404.6274$

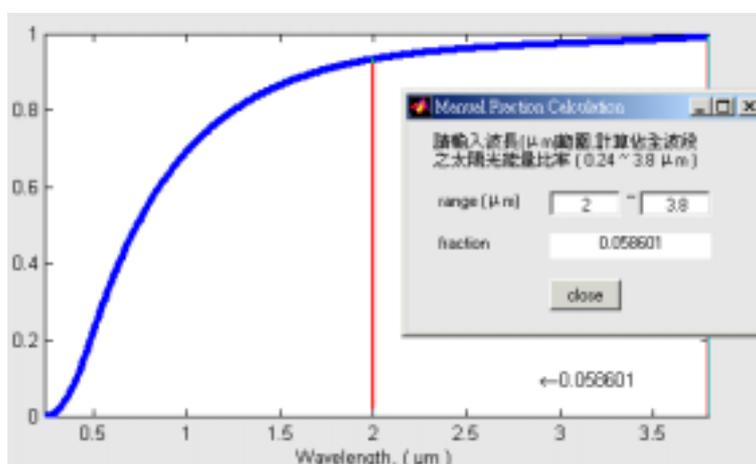


圖 5. 各波段太陽能佔總光譜能量比例計算軟體的輸入與輸出畫面

公式2與3所示為兩不同波長範圍的計算式，當波長小於等於500 nm 時使用公式2，反之，使用公式3。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代入公式2或3，兩計算結果的差值即為該波段範圍的太陽能佔總光譜能量之比例。簡介如下：

由式 2可求出 $Y(x=280\text{nm}) = 0.0056$, $Y(x=380\text{nm}) = 0.0700$, $Y(x=400\text{nm}) = 0.0873$,

由式 3可求出 $Y(x=700nm) = 0.4688$, $Y(x=850nm) = 0.593875$, $Y(x=1100nm) = 0.7395$, $Y(x=2800nm) = 0.9731$ 。結果彙整如下表：

表 1. 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

常見的太陽能輻射計(Pyranometer)的量測範圍為0.28 - 2.80 微米(μm)，一般皆以此為總光譜，由表1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 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%。

二、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 $\mu mol/m^2/s$ 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。— $\mu mole$ 個波長為 λ 之光子之能量(單位為 Joule)為

$$(6.02252 \cdot 10^{23}) \cdot h \cdot C / \lambda$$

將普郎克常數 (h) 與光速 (C=2.997925 * 10¹⁷ nm/s) 之值代入上式，可得

$$E = 119.6256 / \lambda \quad \dots\dots\dots[4]$$

換言之， $J/\mu mole = 119.6256 / \lambda$
 $\mu mole/J = 8.3594 \cdot 10^{-3} \cdot \lambda \quad \dots\dots\dots[5]$

式 5 的 以奈米(nm)為單位，圖 6所示為使用式 5在 400-700 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 $\mu\text{mol}/\text{J}$ ，如式 6所示：

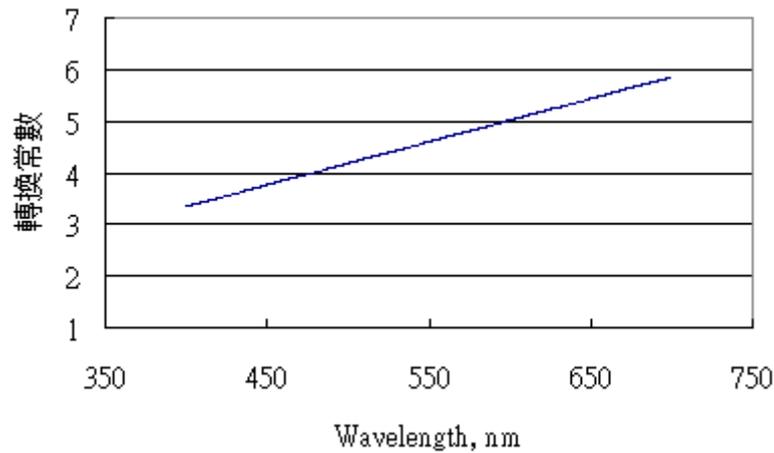


圖 6. 光合作用有效光波段範圍內 $\mu\text{mol}/\text{J}$ 之轉換常數

$$Q_w = Q_q / 4.597677 \dots \dots \dots [6]$$

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 nm 的波段。式6中等號右側的使用單位為 $(\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}) / (\mu\text{mol}/\text{J})$ 等於 $\text{J}/\text{m}^2/\text{s}$ 等於 W/m^2 ，此為等號左側的 Q_w 的單位。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 $H_{\text{ET-in-W}}/\text{m}^2$ ，由表1可知 $\text{PAR-in-W}/\text{m}^2 = 0.3815 * H_{\text{ET-in-W}}/\text{m}^2$ ，又，由式6知 $\text{PAR-in-mol}/\text{m}^2/\text{s} = 4.6 * \text{PAR-in-W}/\text{m}^2$ ，所以可求出 $\text{PAR-in-mol}/\text{m}^2/\text{s} = 4.6 * 0.3815 * H_{\text{ET-in-W}}/\text{m}^2 = 1.7549 * H_{\text{ET-in-W}}/\text{m}^2$ 。

這些轉換因數依光源不同而異，以上各值僅適用於太陽光，其它人工光源如各種螢光燈管 高壓鈉燈 金屬燈等，請參考饒與方(1997)及 Thimijan and Heins (1983)發表之論文。

三、 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 2 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 2 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 2 第二列的 n 值為一年中的第幾天。

表 2、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 時間	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
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

四、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 3 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 3、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

五、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 所示為赤道至北緯 70 度地區之日總太陽能，圖 4 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 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。

表 4 所示為本省大氣層外圍一年中之輻射能分佈情形。由於氣象局所使用的單位為 $Cal/cm^2/日$ ，相當於 Langley/日 與一般學術界習用的公制單位 $MJ/m^2/日$ 或英制單位 $BTU/ft^2/日$ 不同，各單位間之換算因數如下：

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

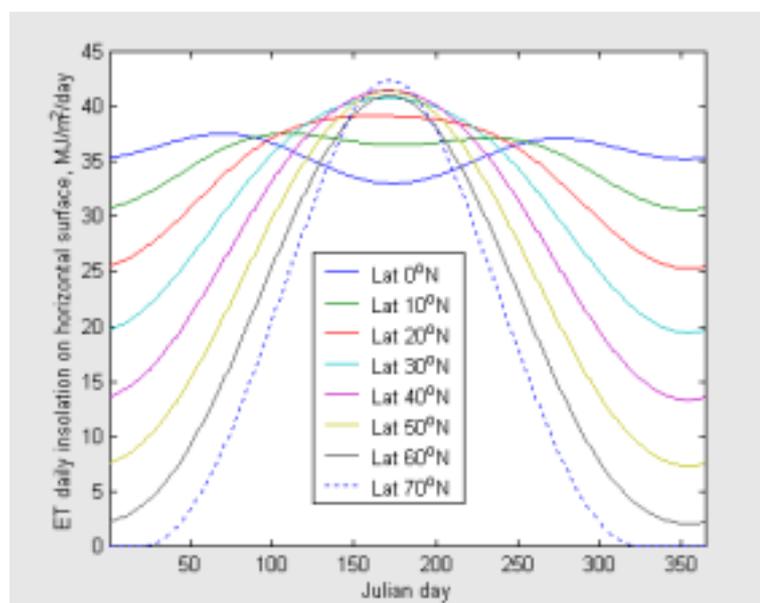


圖 4. 北半球大氣層外圍水平面上之日總太陽能

表 4、本省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: MJ/m ² 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
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

六、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 5 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 5 的 B 區所示。表 5 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。以本省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。

本省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本省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 5 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。

七、氣象局日總輻射資料的應用

據 Bartok (1994) 的推算，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大約 3.2 MBTU (3374 MJ) 的熱量，此熱量相當於需燃燒 32 加侖的燃油。雖然在 Bartok 的文章中未提及甚麼地區的溫室與該溫室使用甚麼被覆資材，吾人相信此值為美國東北地區、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。表 6 所示為本省多處地區地表之平均日總輻射能資料，比較本省氣象資料可知，除山部地區之外，南台灣在三月至十月的日總輻射能均大於前述之參考值 (12.1)，北台灣則為五月至九月。需注意表 6 的值為月平均，換言之，包括了晴天、陰天和雨天；而 Bartok 的參考值為晴天下的數據，是以在本省晴朗的夏天，溫室內蓄積的熱量將大於表 5 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本省的輻射狀況，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 6 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 5. 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/m ² /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	十二
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
台南	333.2	352.4	411.6	438.9	517.0	503.1	558.8	489.6	436.4	411.7	340.7	314.3
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
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/m ² /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
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
C. 平均日總輻射能之大氣透過率 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
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

註：桃園測站使用 1988 至 1993 桃園區農業改良場資料

表 6、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

八、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」數據透過迴歸之方式推導出地表之「光合作用有效光」之值，簡單說明如下：

$$\text{PAR} = 2.0804 * \text{SOLAR} \dots\dots\dots [7]$$

$$\text{CI}_{\text{par}} = 1.1849 * \text{CI}_{\text{sol}} \dots\dots\dots [8]$$

$$\text{RATIO} = 0.7651 - 0.0153 * \text{CI}_{\text{par}} - 0.9113 * \text{CI}_{\text{par}}^2 \dots\dots [9]$$

其中，SOLAR：地表之日總輻射能， MJ/m²/日

PAR : 地表之日總光合作用有效光, mol/m²/日

Cl_{sol} : 日總輻射能之大氣透過率

Cl_{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 5 中第二與第三部份所列的分別為上式中的 SOLAR 與 Cl_{sol} 值,以桃園及台東之日總輻射能(SOLAR)與大氣穿透率(Cl_{sol})資料為例,使用上述公式,求得 PAR, Cl_{par}, RATIO, diffuse 與 direct, 分別列於表 7a 與 7b。表 7 中陰影部分為列於表 5 的已知數據,其他使用公式 7,8,9 所求出的數據。

表 5 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表 5 中 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有助於提高散射光所佔的比例。

表 7a、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	Cl _{sol}	Cl _{par}	RATIO	diffuse	direct	
單位	MJ/m ²	mol/m ²	N/A	N/A	N/A	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

註：N/A 代表無單位

表 7b、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	Cl _{sol}	Cl _{par}	RATIO	diffuse	direct
單位		MJ/m ²	mol/m ²	N/A	N/A	N/A	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
	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
	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

註：N/A 代表無單位

九、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. 饒瑞佶，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. Rui Rosa, Ana Maria Silva and Antonio Miguel 1989. Solar Irradiation inside a single span greenhouse. Journal of Agr. Enging. Res. 43, 221-229.
8. 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.
9. Ting, K.C. and G.A. Giacomelli 1987, Availability of Solar Photosynthetically Active Radiation. Transactions of the ASAE 30(5): 1453-1457.