

2026 農業部農業試驗所 溫室工程與植物賦能 系列課程

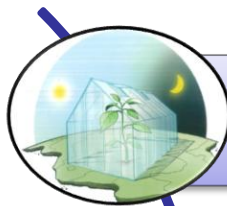
植物賦能之物理現象

Growing with Plant Empowerment (GPE)

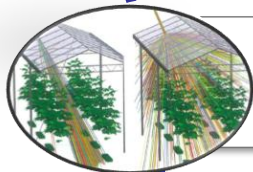
方煒 臺灣大學生物機電工程學系名譽教授

last updated 05/12

Physics 物理現象



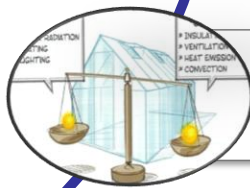
三層空間、六種平衡



層間能量傳遞



層間水分傳遞



植物周圍的物理現象

植物周圍的能量和質量傳遞 可以區分三層空間：

- 內層：作物本身與鄰近周遭，微氣候 (micro-atmosphere)，境界層 (boundary layer)
- 中層：作物鄰近之外的溫室內空間
- 外層：溫室內環境與外界空氣



六種平衡

觀察溫室內的所有物理過程，可區分為四種平衡：

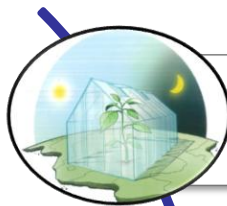
- ☐ 溫室內能量、水分平衡

- ☐ 作物區能量、水分平衡

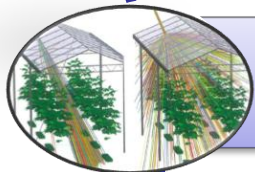
觀察植物生長，再添兩個平衡點：

- ☐ CO_2 與同化平衡

Physics 物理現象



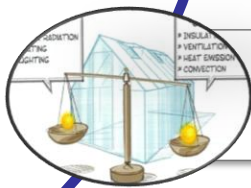
三層空間、六種平衡



層間能量傳遞



層間水分傳遞



植物周圍的物理現象

層間能量傳遞

- 短波輻射的能量傳遞
- 長波（熱體）輻射的能量傳遞
- 熱傳導和對流的能量傳遞

能量以輻射、對流、傳導三種方式傳遞

短波輻射的能量傳遞

- 300-4500 納米波長範圍內的輻射稱為短波輻射。這包括來自太陽、HPS 燈和 LED 的大部分輻射能量。
- 30%太陽光會被溫室批覆、表面塗漆、灰塵反射或折射，或是被雲層吸收、反射，最多可進入溫室內只有70%。
- 雲量對陽光的散射度以及 PAR 能量/總能量比具有重大影響。晴天只有 45% 的總太陽能量在 PAR 光譜內，而在多雲的情況下約為 60%。
- 因此，在生產相同數量的同化物下，多雲天氣更為有利，因為蒸散損失的水分更少。

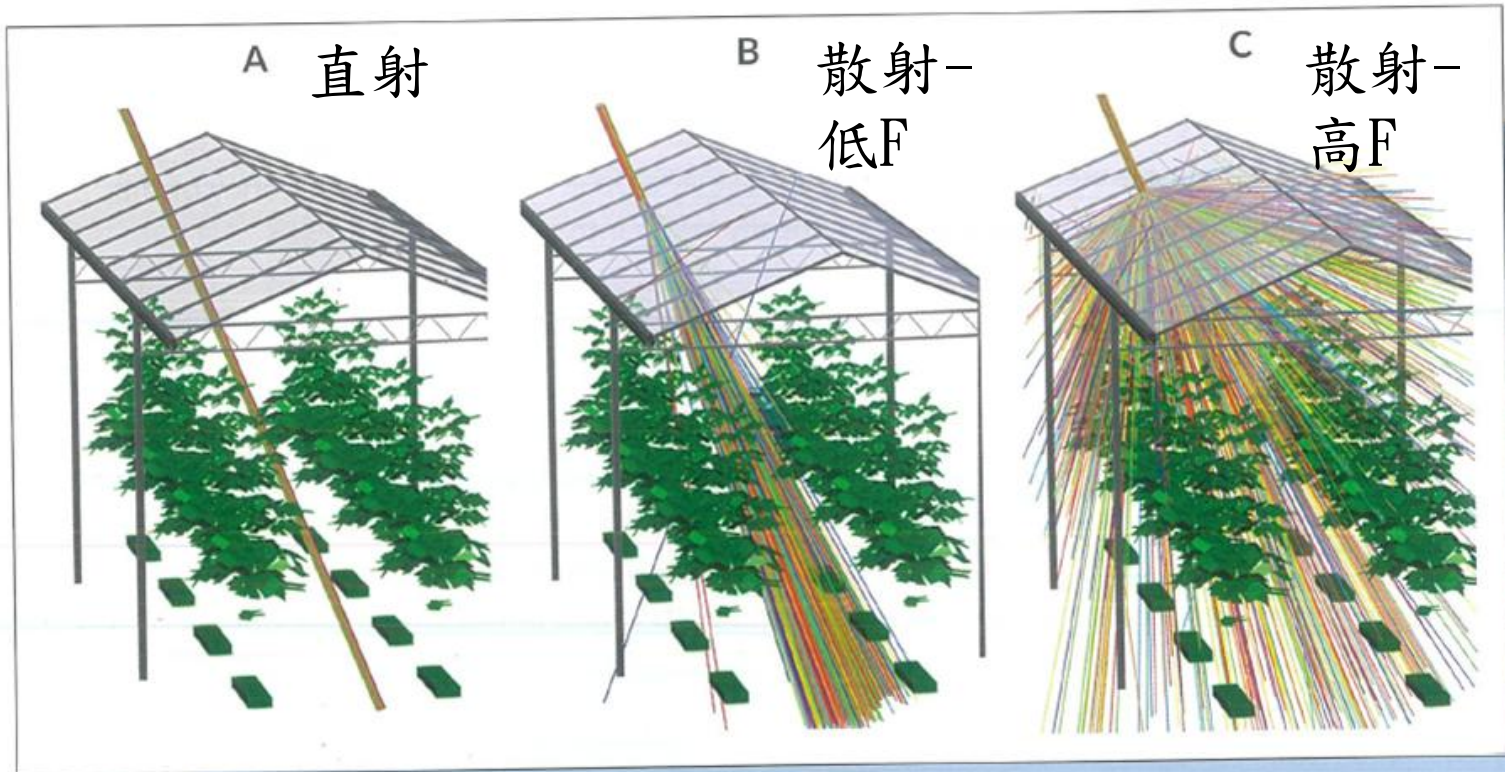
太陽輻射與人工光照

- 人工光有兩點與太陽輻射不同：光譜組成 & PAR/總能量的占比。
 - 1) 光譜組成會影響植物的型態發育。例如，較高的紅/遠紅比促進植物伸長，而較高的紫外線含量使植物更短。
 - 2) 光的總能量含量會影響蒸散速率及植物的垂直溫度分佈。
- 在高壓鈉燈（HPS）和/或發光二極體（LED）生長的植物可能會與預期完全不同。HPS 燈主要的光譜在紅光，因此還須有大量日光來幫助作物的生長。
- LED 燈光譜範圍窄，需混合不同顏色以獲得良好的效果。例如，95% 的紅光與 5% 的藍光相結合。與日光和 HPS 燈相比，LED 長波熱輻射會少很多。

直射光與散射光

- 霧度(Haze index): 表示光線折射角度 $>2.5^\circ$ 的百分比
- F-散射係數(F-scatter): 表示光在各個方向上均勻散射的程度 ==>更適合評估兩種玻璃材質，那種作為適合溫室批覆

Figure 4.3.1.1-1 Direct light (A), diffuse light low F scatter (B), and high F scatter (C) (Author Gert-Jan Swinkels, Wageningen University & Research, BU Greenhouse Horticulture)



長波輻射/熱體輻射的能量傳遞

- 所有物體都會發出長波輻射，與絕對溫度的四次方成正比。
- 植物與溫室環境之間的能量交換可粗估為 $5 \text{ W/m}^2\text{°C}$ 。
。如果作物平均溫度比溫室被覆溫度高 10°C ，則作物因熱體輻射而損失的熱能約 $10 \times 5 = 50 \text{ W/m}^2$ 。
这大致等于熱水管在 50°C 时提供的能量。這種熱體輻射是以犧牲蒸散作用為代價的，這可能導致植物頂部/生長尖端缺乏營養。如果植物葉片溫度低於露點，它甚至會導致作物結露。
- 熱輻射取決於溫差，也取決於不同材料的輻射率。
植物輻射率值接近1，因此只要溫室被覆溫度比植物低，植物就會輻射能量給溫室被覆。

熱傳導和對流的能量傳遞

- 熱傳導由 U 值來計算，有時也稱為 K 值。
- U 值: 單位: $\text{W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$ 。某玻璃窗 U 值為 $10 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$ 。如果玻璃窗兩側的表面溫度為 $25/10\text{ }^\circ\text{C}$ ，則通過該窗傳導的能量為 $(25-10) \times 10 = 150 \text{ W/m}^2$ 。
- 通常，在計算這類能量傳遞，不是用材料的表面溫度，而是用兩側空氣的溫度，所以包含對流熱傳遞。
- 實務上在溫室能量傳遞方式的計算中
熱傳導與對流總是一起發生。

對流/空氣流動的能量傳遞

- 對流熱傳遞取決於空氣與物體表面間的溫差以及空氣流動速度，
 - 如葉片式電暖器使用垂直葉片結合自然對流。
 - 空氣流動速度取決於葉片和空氣之間的溫差。
 - 葉片越熱，空氣沿它們垂直方向流動的速度就越快。
 - 這種電暖器的對流熱傳遞率約為 $10 \text{ W/m}^2\text{°C}$

對流/空氣流動的能量傳遞

- 溫室內外的許多不同地方都涉及對流熱傳遞：
 - 屋頂和溫室外空氣之間
 - 屋頂和溫室內空氣之間
 - 內網/幕布和兩側空氣之間
 - 加熱管和空氣之間
 - 燈具和空氣之間等。
- 植物周圍的空氣流動是在夜間刺激蒸散的有效工具，並支持植物在高輻射條件下保持其能量平衡和水分平衡。

有效U值

- 溫室能量傳遞方式，熱傳導與對流會一起出現。在正常狀況下用“有效U值”來計算傳遞的能量。
 - 1) 假設標準荷蘭溫室單層玻璃的U值約為 $7 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$
 - 2) 假設溫室內溫度比室外高 15 度，那麼溫室熱損失或保溫損失為 $15 \times 7 = 105 \text{ W/m}^2$ 。
 - 3) 如果溫室內部有“風扇”造成空氣流動增加或溫室外有強風，則此“有效U值”會大幅增加。
- 如果有強風，可以關閉幕布來減少能量損失。關閉幕布不僅引入了額外的保溫層，而且溫室屋頂下方的空氣流動也會減少。

計算多層的U值

- 當單個（有效）U 值已知時，以下式計算多層幕布的效果。

$$U_{result} = \frac{1}{\frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} + \frac{1}{U_3} + \dots}$$

- 假設溫室的 U 值為 $7 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ，特定節能網的 U 值為 $6 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ 。則：
 - 1) $U \text{ 值} = 1/(1/7+1/6) = 1/(13/42) = 3.2 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$
 - 2) 熱損失變成 $15 \times 3.2 = 48 \text{ W/m}^2$
 - 3) 節能布的節能率 = $(105 - 48) / 105 \times 100\% = 54 \%$
- 大多幕布都有特定百分比的節能率
- 如果使用2層以上時，在節能估算會變得複雜，因為不能直接百分比相加。

加熱管熱傳遞

加熱管熱傳遞含長波輻射及對流，加熱管表面溫度與空氣溫度差越大，對流和長波輻熱的傳遞效率就越高。如下式：

$$E_{\text{輻射}} = \sigma \times C_s \times [(273+T_p)^4 - C_c \times (273+T_c)^4] \quad \text{W/m}^2$$

$$E_{\text{對流}} = h \times (T_p - T_a) \quad \text{W/m}^2$$

其中，

σ ：斯蒂芬波茲曼常數 5.67×10^{-8}

C_s ：管壁輻射率，約 0.8

C_c ：作物表面輻射率，約 1.0

T_p ：管壁表面溫度， $^{\circ}\text{C}$ / T_c ：作物表面溫度， $^{\circ}\text{C}$ / T_a ：空氣溫度， $^{\circ}\text{C}$

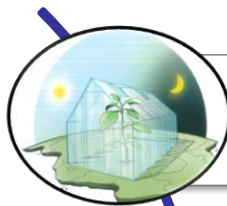
h ：對流熱傳係數，約 $10 \text{ W/m}^2\text{C}$

直徑為 51 mm 的加熱管的熱傳量

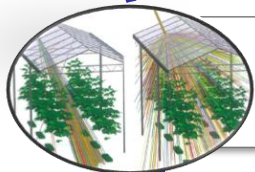
表面積為每米管長 0.15 m^2 氣溫和作物溫度都為 18°C

Pipe temperature $^\circ\text{C}$	Radiation W/m^2	Convection W/m^2	Total energy W/m pipe
20	9.0	20	4.7
25	32.5	70	16.4
30	57.0	120	28.3
35	82.9	170	40.5
40	110.0	220	52.8
45	138.6	270	65.4
50	168.5	320	78.2
55	199.7	370	91.2
60	232.5	420	104.4
65	266.8	470	117.9
70	302.6	520	131.6
75	340.0	570	145.6
80	379.0	620	159.9
85	419.8	670	174.4
90	462.3	720	189.2

Physics 物理現象



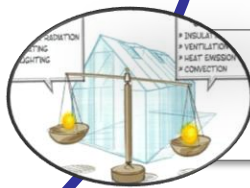
三層空間、六種平衡



層間能量傳遞



層間水分傳遞



植物周圍的物理現象

層間水分傳遞

- 透過擴散和空氣流動的水分移轉
- 冷凝方式排除水分
- 通風方式排除水分

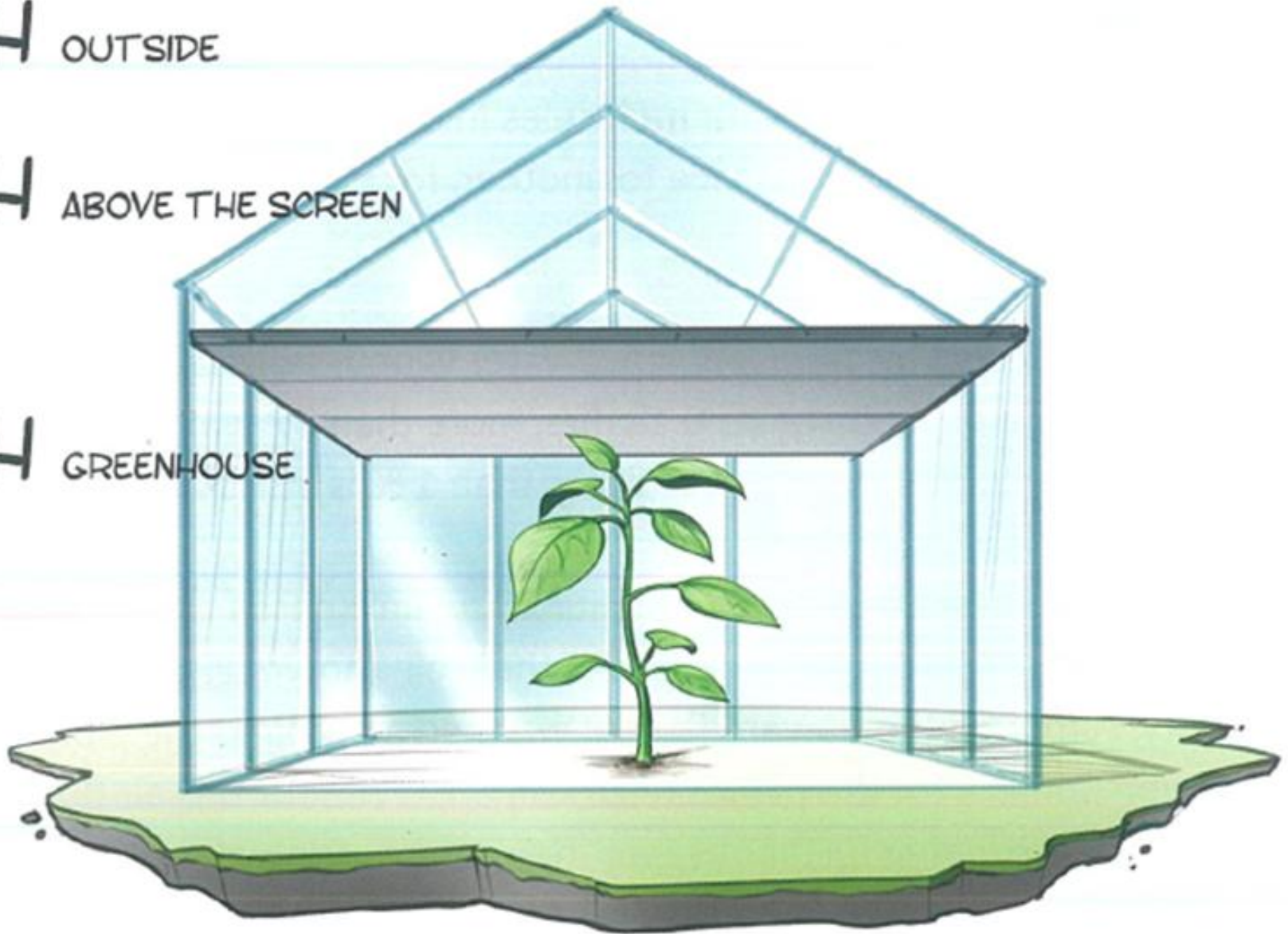
水分以擴散、空氣流動的方式做移轉 及 以冷凝及通風方式做排除（除濕）

水分轉移由AH差異驅動

AH OUTSIDE

AH ABOVE THE SCREEN

AH GREENHOUSE



通過擴散和空氣運動的水分轉移

- 水蒸氣(水分/濕度)：

 - 絕對濕度 (AH)，g/kg 或 g/m³

 - 水蒸氣壓 (VP)，kPa

- 水分移轉方式：

 - 99% 空氣流動 (風速 $\geq$ 0.1 cm/s)，1% 擴散

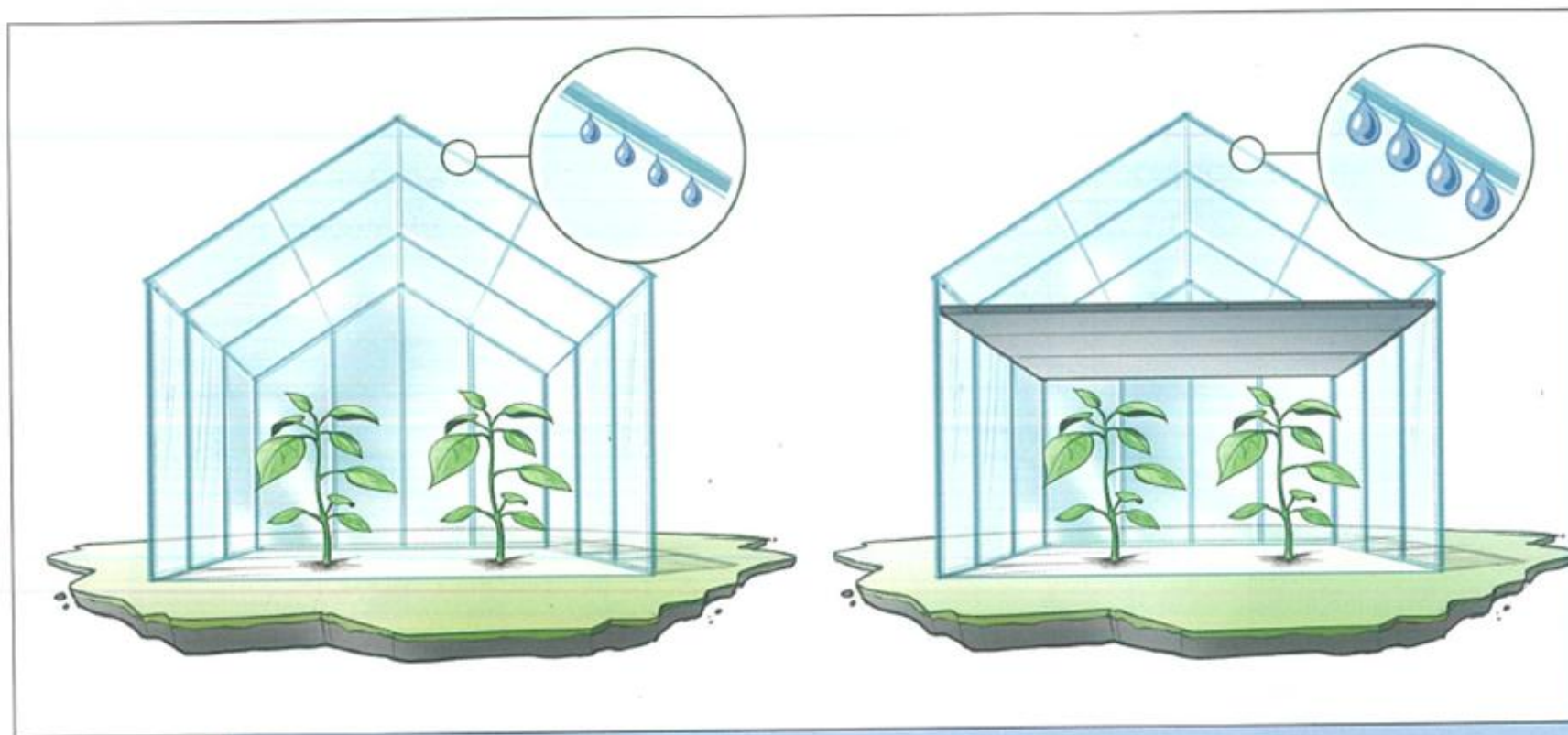
- 在封閉空間裏，少量空氣流動，可快速消除濕度差異。
。加溫管可以產生熱空氣流動，進而改善植物附近微氣候。如果沒有這種氣流，水氣會累積在葉片周圍，阻礙進一步的蒸散，並導致其他水分問題。

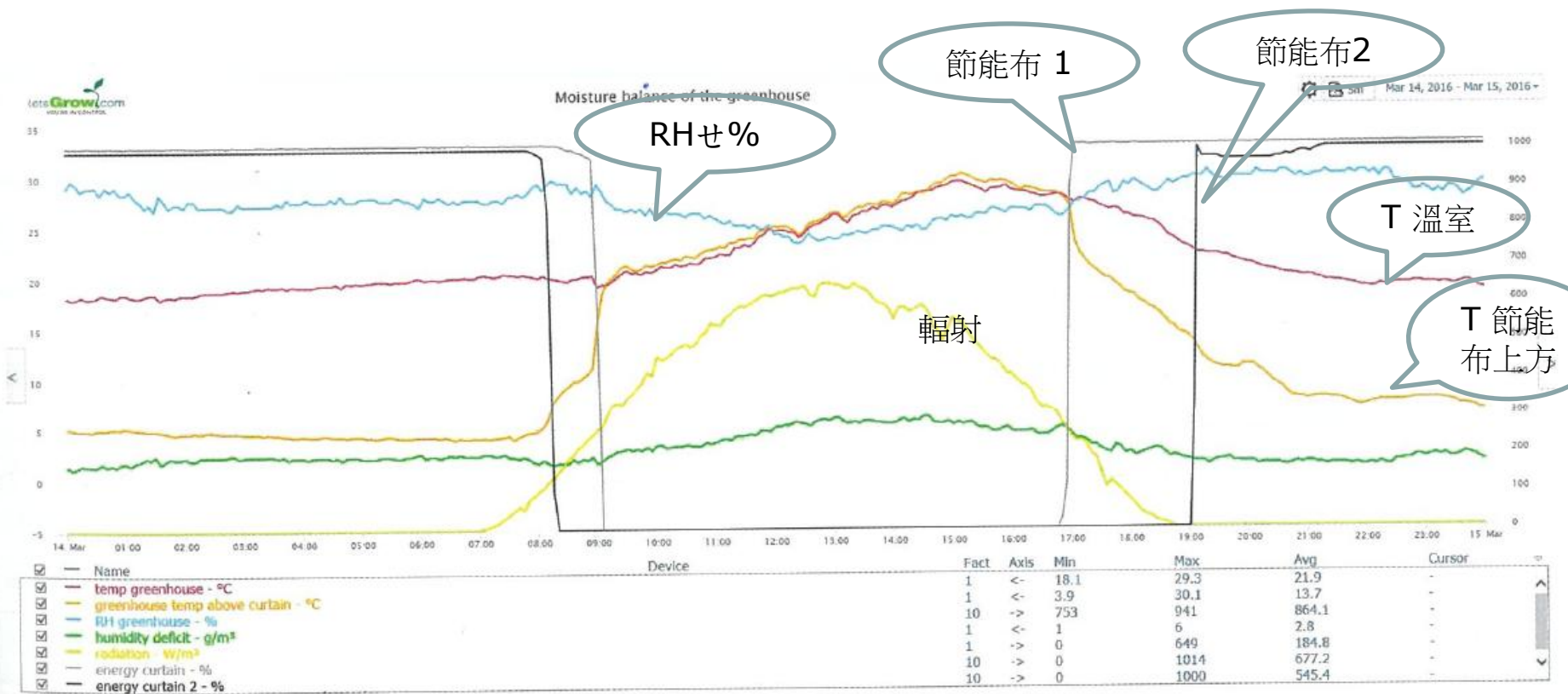
- 垂直風扇在產生空氣流動上比加溫管更有效

冷凝除濕

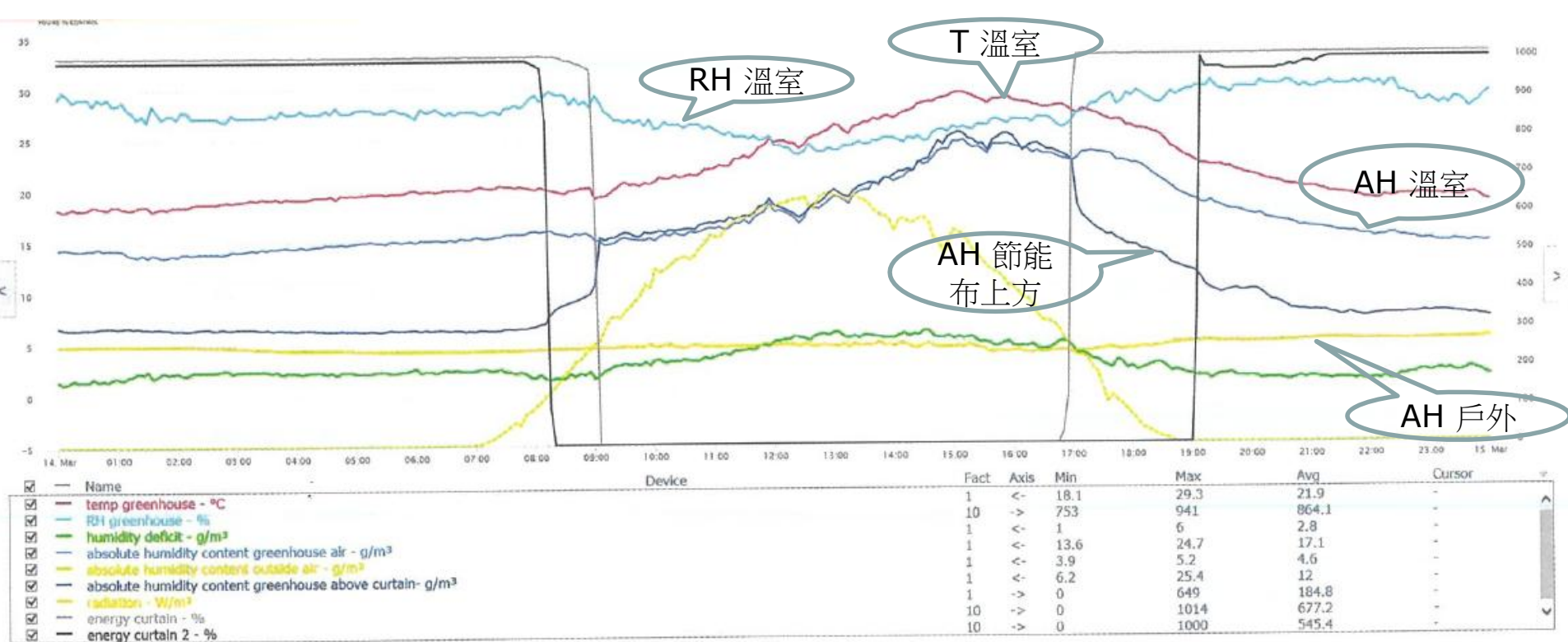
T_{outdoor} 低， $T_{\text{roof}} < T_{\text{dp}}$
冷凝發生

Figure 4.3.5-1 A and B Moisture reduction by condensation with open and closed screen





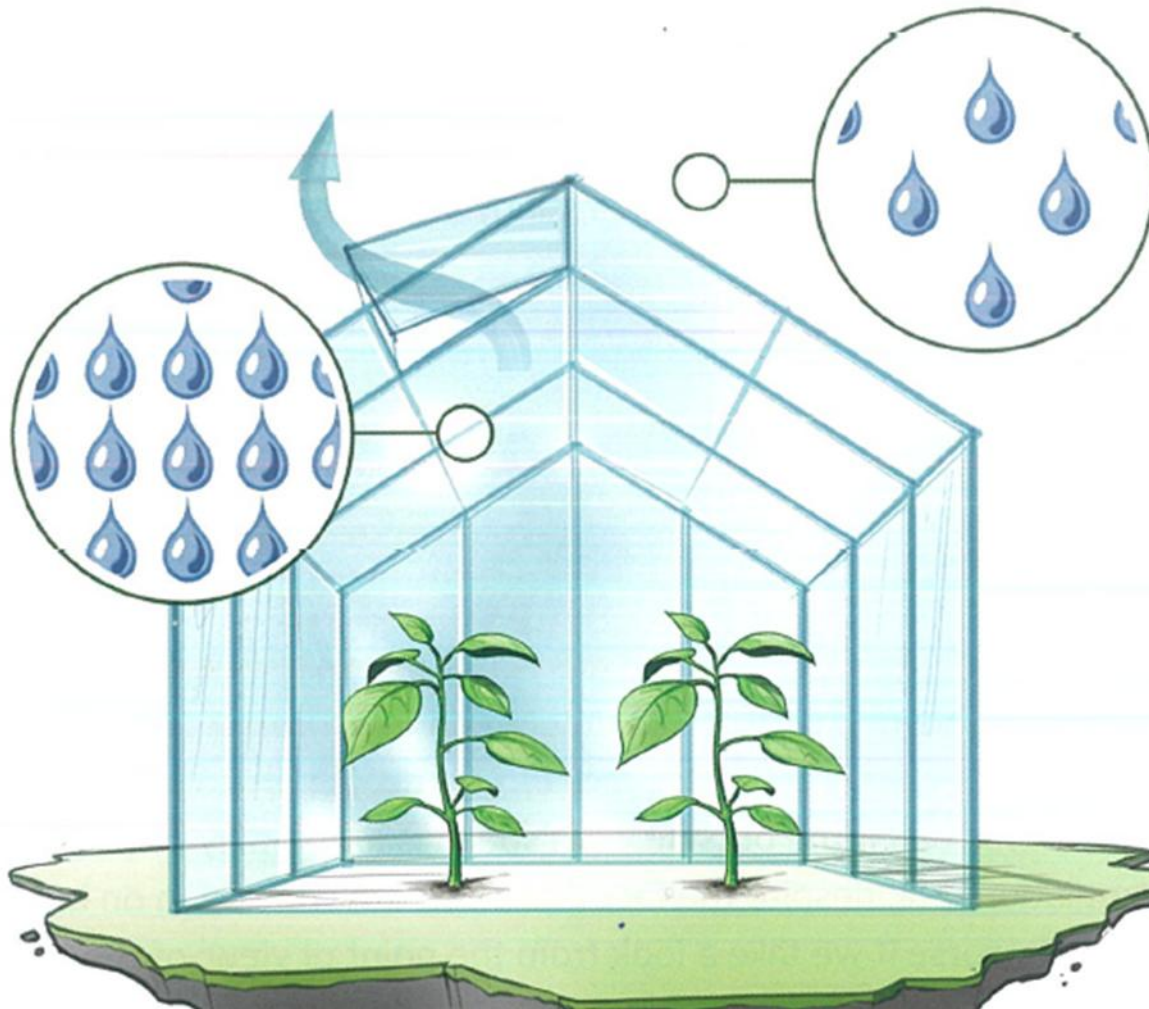
5 pm 關閉第一層節能布，節能布上方溫度下降，
 7 pm 關閉第二層節能布，溫室內溫度下降，節能
 布上方溫度持續下降拉大兩區溫差，這代表屋頂
 溫度也更低，也加大冷凝速率。



- 溫室內 AH (中藍色); 節能布上方 AH (深藍色); 室外 AH (深黃色)
- 17:00 第一層節能網關閉。屋頂冷凝，節能網上方 AH 低於溫室 AH，溫室中的 RH (淺藍色) 增加。
- 第二層節能布關閉後，節能網下方和上方的 AH 差異進一步增加。這改善了水分通過節能布。
- 結果：節能布上方的 AH 幾乎等於室外的 AH。這代表節能布上方的額外通風將非常有效地進一步促進水分排出。

通風除濕

Figure 4.3.6-1 Moisture transport by ventilation



Moisture exchange through the ventilation windows is proportional with the difference between AH inside and AH outside multiplied by the ventilation rate.

溫暖&濕空氣
密度比戶外低
驅動力：風&
煙囪效應

- 通風除濕 → 溫室空氣與室外空氣交換，取決於兩個主要因素：

- ✓ $\Delta AH = AH_{\text{內部}} - AH_{\text{外部}}$ 之差 (g/m^3)

- ✓ $V_r = \text{通風率}$ ($\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}$)

$$\text{Net moisture exhaust} = \Delta AH \times V_r [\text{g/m}^2.\text{h}]$$

- 為了有效降低空氣濕度， ΔAH 不能太小，如果小，通風率 (V_r) 就要高。
- 室內、外 AH 決定於溫度，溫室內溫度最好比室外溫度高幾度

通風除濕計算

- ✓ 作物蒸散量: $25 \text{ g/m}^2\text{h}$
- ✓ 溫室設定目標: 18°C , $\text{RH}=85\%$
- ✓ 戶外條件: 10°C , $\text{RH}=70\%$

通風速率 (V_r) 要多少才能排除多餘水蒸汽，維持水分平衡狀況？

計算步驟

- ✓ 查濕氣圖得 $\Delta AH = 5.6 \text{ g/kg} = 6.6 \text{ g/m}^3$
- ✓ 所需 $V_r = 25 / 6.6 = 3.8 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$

通風除濕計算

- ✓ 作物蒸散量: 25 g/m²h
- ✓ 溫室設定目標: 18°C, RH=85%
- ✓ 戶外條件: **17°C**, RH=70%

Temp		17	°C	1.00	Temp		18	°C
RH		70	%	15.00	RH		85	%
Absolute Humidity AH		8.47	g/kg	2.50	Absolute Humidity AH		10.97	g/kg
Absolute Humidity AH		10.23	g/m ³	2.95	Absolute Humidity AH		13.18	g/m ³
Humidity Deficit HD		3.63	g/kg	-1.69	Humidity Deficit HD		1.94	g/kg
Humidity Deficit HD		4.38	g/m ³	-2.06	Humidity Deficit HD		2.33	g/m ³
Enthalpy		38.21	kJ/kg	7.23	Enthalpy		45.44	kJ/kg
Enthalpy		46.13	kJ/m ³	8.46	Enthalpy		54.59	kJ/m ³
VPD		0.58	kPa	-0.27	VPD		0.31	kPa
VP		1.36	kPa	0.40	VP		1.75	kPa
VPsat		1.94	kPa	0.13	VPsat		2.06	kPa
Dewpoint		11.5	°C	4.0	Dewpoint		15.4	°C

通風速率要多少才能排除多餘水蒸汽，維持水分(濕度)平衡狀況？

計算步驟

- ✓ 查濕氣圖得 $\Delta AH = 2.95 \text{ g/m}^3$
- ✓ $V_r = 25 / 2.95 = 8.47 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$
- ✓ 室內外溫差變小、室內外 ΔAH 變小 $\rightarrow V_r$ 需要 2 倍以上，才能維持水分平衡

通風除濕計算

假設：

- ✓ 作物蒸散量： 500 g/m²h （維持很好的日照狀況下）
- ✓ 溫室設定目標： 25°C, RH=75%
- ✓ 戶外條件： 24°C, RH=60%

通風速率要多少才能排除多餘水蒸汽，維持水分平衡？

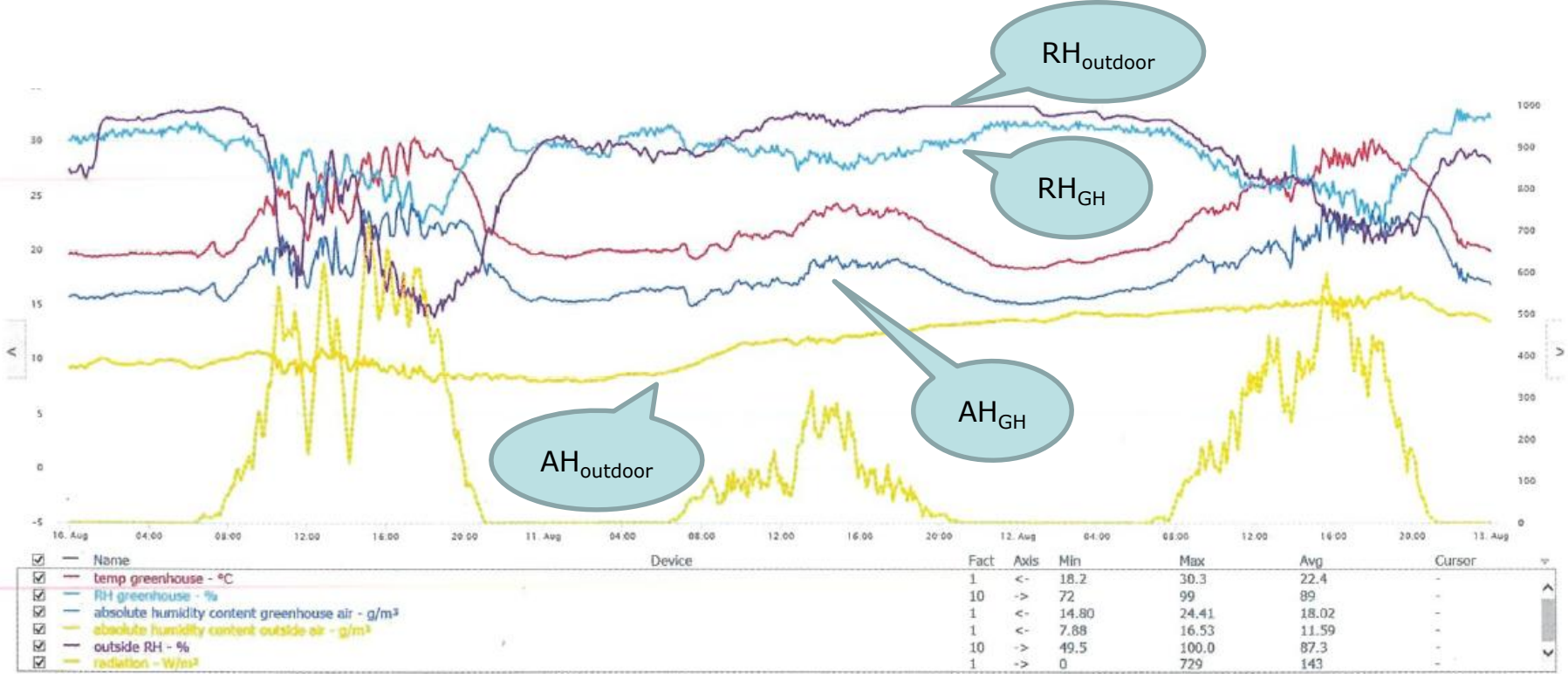
計算步驟

✓ $\Delta AH = 4.3 \text{ g/m}^3$

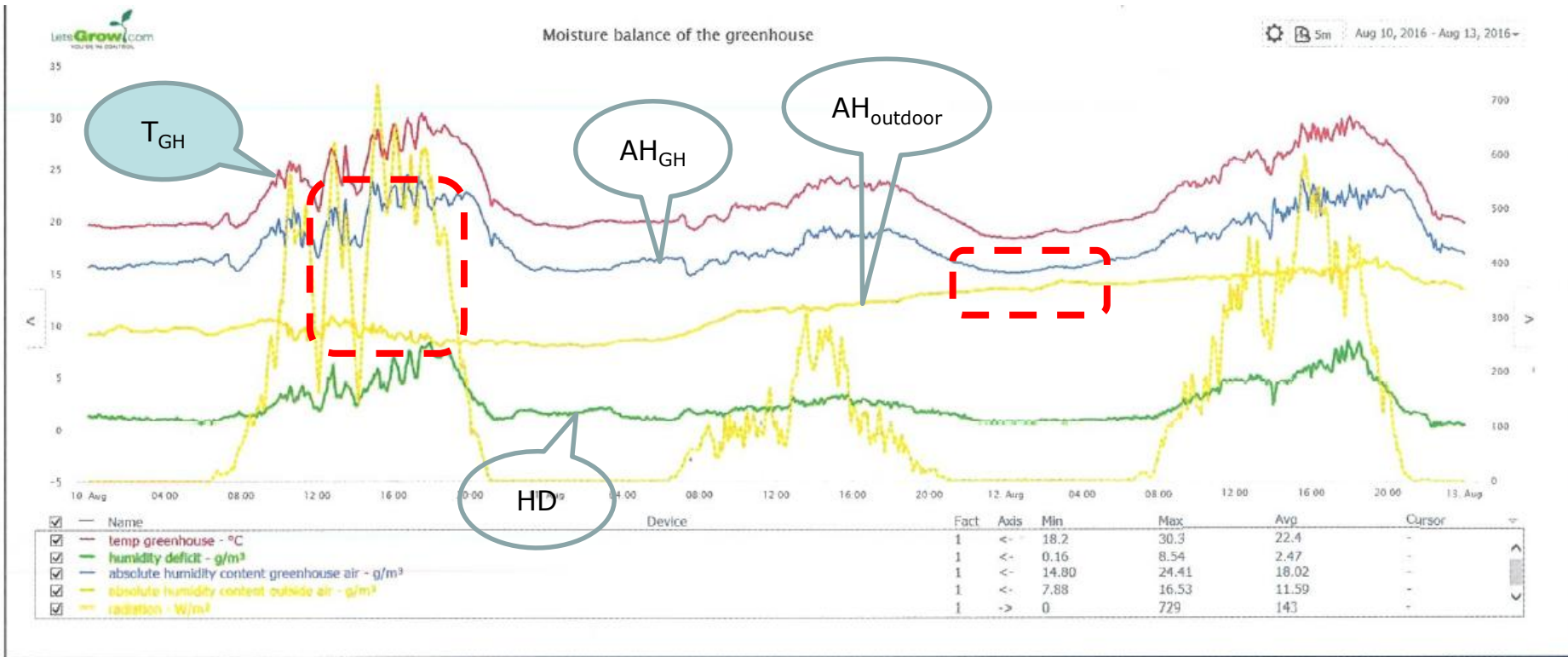
✓ $V_r = 500/4.3 = 116 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$

意義解釋：

- ✓ 假設溫室高度 6 m，溫室內換氣量每小時至少要20次。(=116/6)
- ✓ 添加的CO₂會大量損失，無法透過提高CO₂濃度來提高同化物生產
- ✓ 若戶外風速小，無論天窗開啟多大，也無法達到20次/小時換氣率
- ✓ 實際無法達到水分、CO₂以及能量平衡(換氣會流失能量)
- ✓ 唯一方法：增高溫室溫度=>提高溫室內AH→增加 ΔAH 這樣就可以減少換氣率又可以達到水分平衡

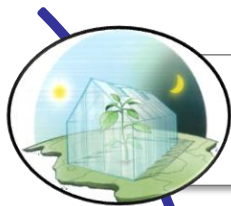


就算室外相對濕度 (RH) 高於室內，仍然可以透過通風排濕，只要室外的絕對濕度 (AH) 低於室內就可以

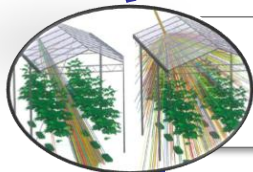


左側紅色虛線區 $\Delta AH > 5 \text{ g/m}^3$ ，換氣排濕非常容易。
 到夜間及隔日為陰天，室外AH持續上升， ΔAH 縮小，
 右側紅色虛線區 $\Delta AH = 1 \text{ g/m}^3$ ，換氣排濕相對困難，此
 時只能靠加溫提高室內 T ，讓室內 AH 增加來拉大 ΔAH

Physics 物理現象



三層空間、六種平衡



層間能量傳遞



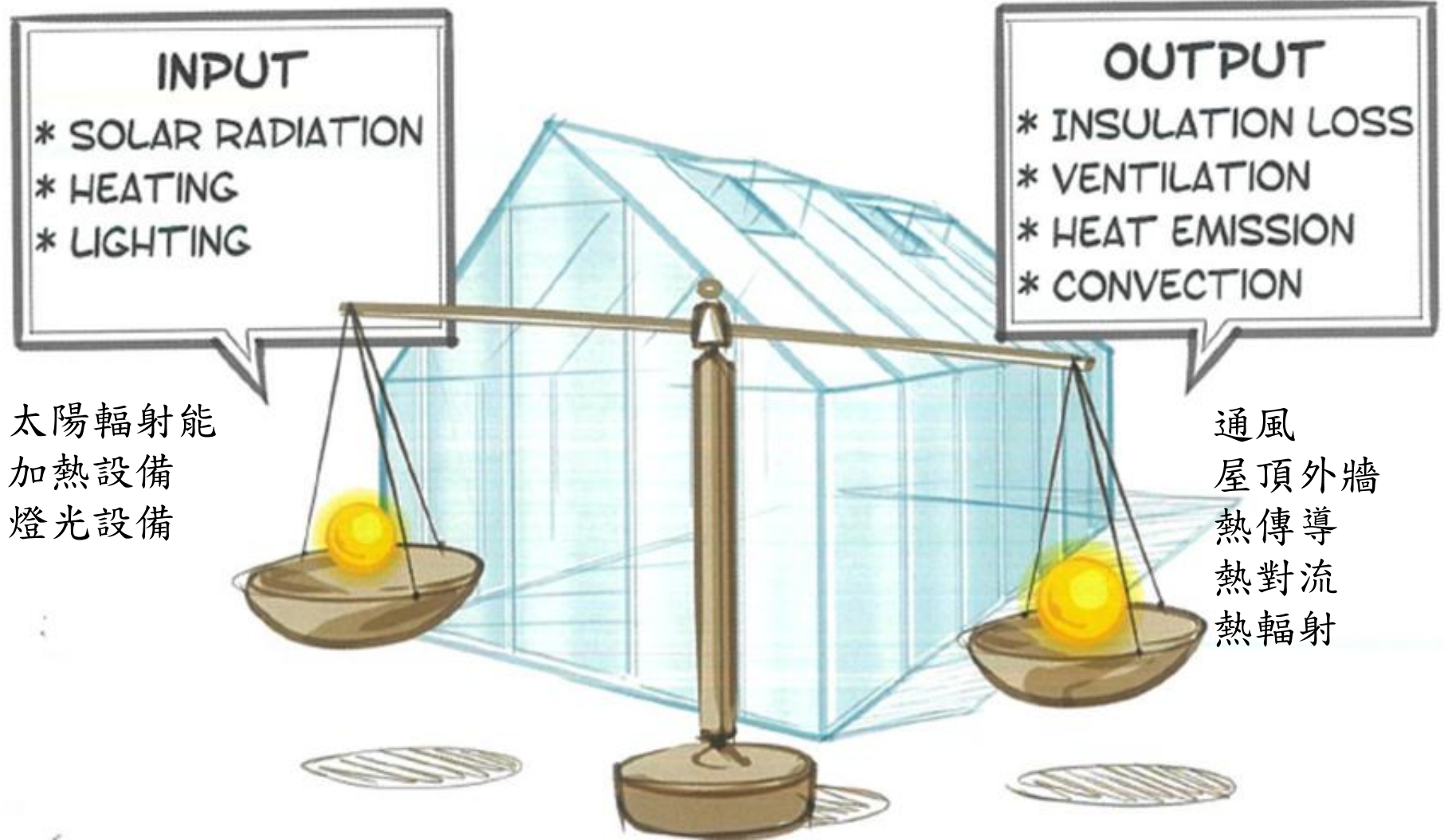
層間水分傳遞



植物周圍的物理現象

能量傳遞：溫室能量平衡

植物葉片、整株、溫室都遵守能量守恆定律



能量平衡可用下式表示：

$$S + H + L = I + V + Q + C$$

Where:

S = Net solar radiation measured inside [W/m^2]

H = Heating capacity [W/m^2]

L = Lighting (if switched on) total electric energy [W/m^2]

I = Insulation losses, depending on effective U-value of the greenhouse roof and gables, and temperature difference inside/outside [W/m^2]

V = Energy loss via ventilation (latent and sensible heat) [W/m^2]

Q = Heat emission [W/m^2]

C = Convection exchange between coverage and outdoor air due to wind speed [W/m^2]

- 單位全部是 W/m^2
- 不平衡，溫度會上升或下降。平衡時溫度會穩定
- 不含噴霧降溫&植物蒸散作用，因為只是顯熱與潛熱轉換，未移除或增加能量。

戶外環境的影響

- 溫室內氣候會受戶外環境影響，特別是天窗及節能布開啟時。
- 常用的數據：
 - 1) 加溫系統及人工補光: $50-150 \text{ W/m}^2$
 - 2) 太陽進入溫室輻射: $600-700 \text{ W/m}^2$
 - 3) 熱體輻射: $-100 - -150 \text{ W/m}^2$
- 在戶外環境變化大時，內網(遮陰&保溫)的功能很重要!! 內網是很好的控制溫室環境(能量平衡)的工具!!

估算達能量平衡所需的通風速率

- 氣體交換速率：溫室不同水平或是垂直位置都可能有很大差異。像番茄會長很高，上方及下方的換氣率可能就會差很多倍。
- 無法用氣象資料數據來估算通風速率，
- 但可用以下能量平衡方式估算

$$V_r = \text{Energy input} / \Delta \text{Enthalpy} \text{ [m}^3/\text{m}^2.\text{h}]$$

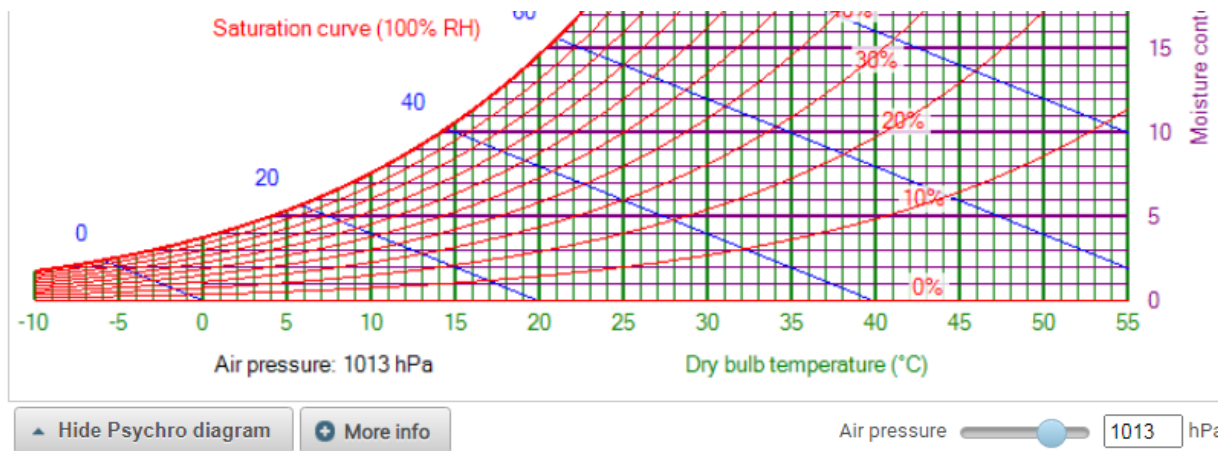
Where:

$\Delta \text{Enthalpy}$ = Enthalpy difference between inside and outside air [kJ/m^3]

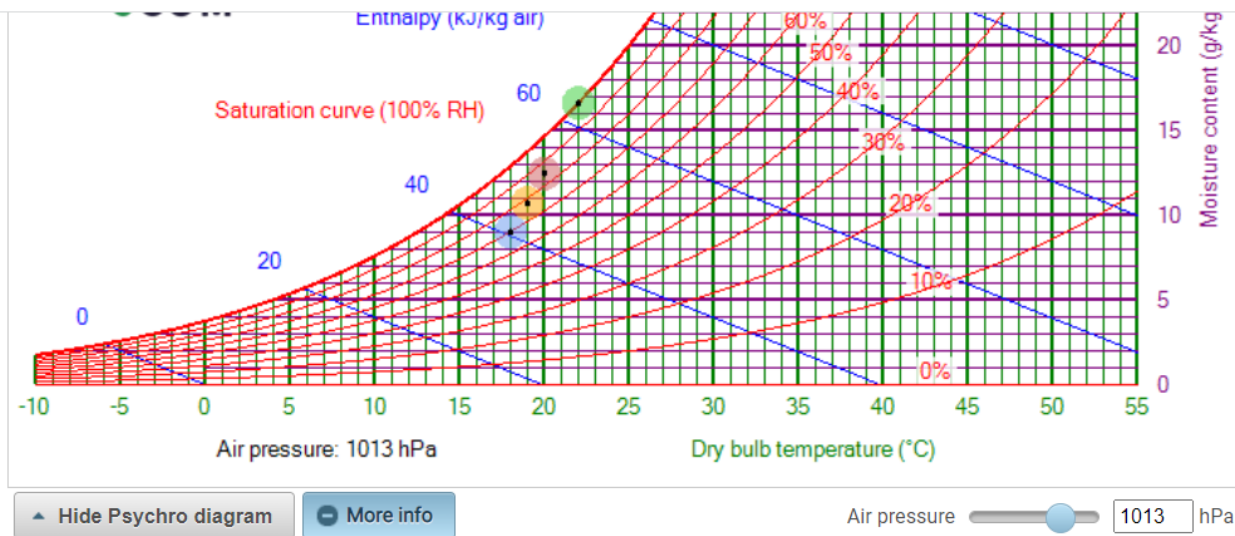
V_r = ventilation rate [$\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h}$]

Energy input = net energy input from the sun and other sources [$\text{kJ}/\text{m}^2.\text{h}$]

- 能量來源：太陽輻射或其他輸入

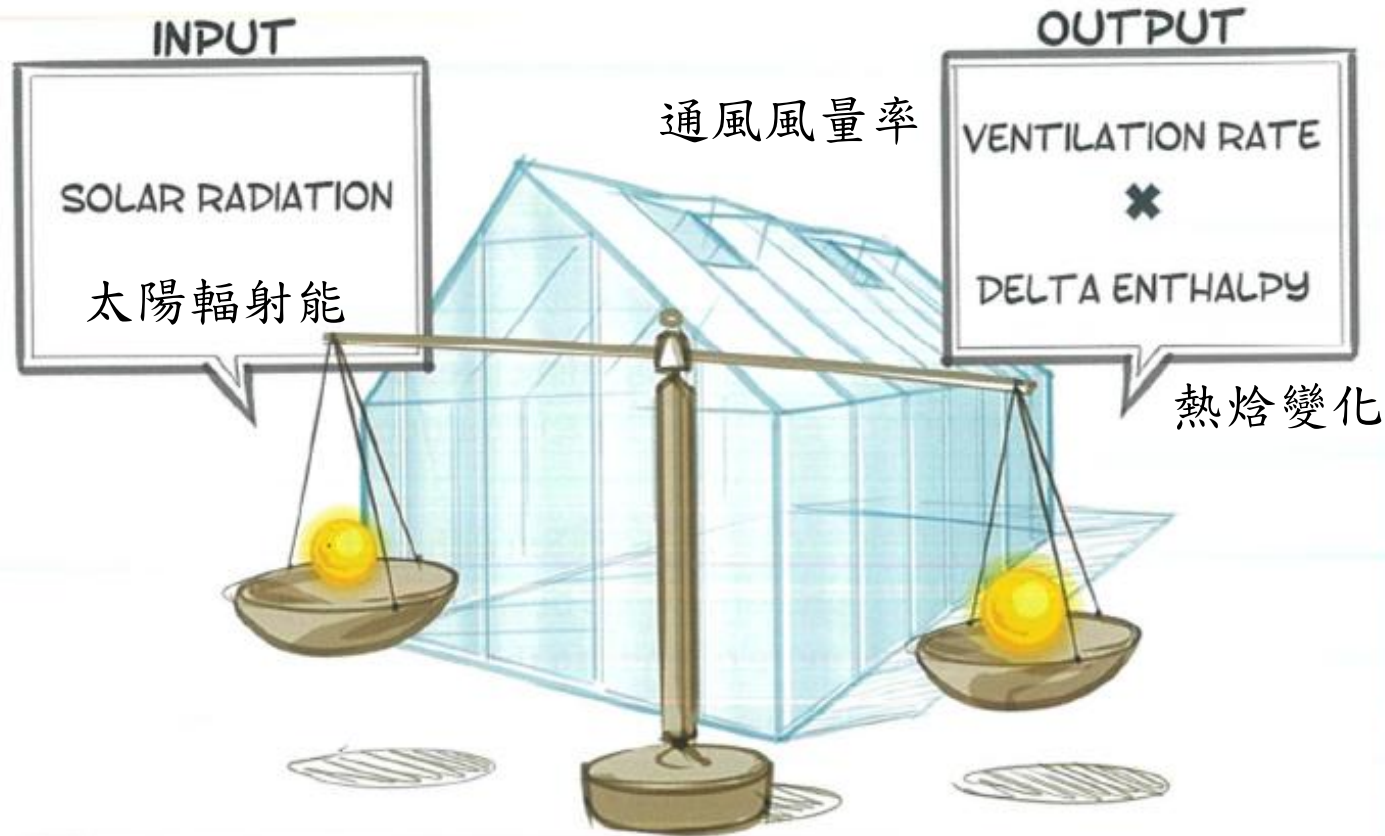


Outside			Difference			Above screen			Difference			Inside			Difference			Plant		
Temp	18	°C	1.00			Temp	19	°C	1.00			Temp	20	°C	2.00			Temp	22	°C
RH	70	%	8.00			RH	78	%	7.00			RH	85	%	15.00			RH	100	%
Absolute Humidity AH	9.04 g/kg		1.70			Absolute Humidity AH	10.73 g/kg		1.73			Absolute Humidity AH	12.47 g/kg		4.17			Absolute Humidity AH	16.64 g/kg	
Humidity Deficit HD	3.87 g/kg		-0.85			Humidity Deficit HD	3.03 g/kg		-0.83			Humidity Deficit HD	2.20 g/kg		-2.20			Humidity Deficit HD	0.00 g/kg	
Enthalpy	40.61 kJ/kg		5.23			Enthalpy	45.85 kJ/kg		5.31			Enthalpy	51.16 kJ/kg		12.38			Enthalpy	63.55 kJ/kg	
VPD	0.62 kPa		-0.14			VPD	0.48 kPa		-0.13			VPD	0.35 kPa		-0.35			VPD	0.00 kPa	
VP	1.44 kPa		0.27			VP	1.71 kPa		0.27			VP	1.99 kPa		0.66			VP	2.64 kPa	
VPsat	2.06 kPa		0.13			VPsat	2.20 kPa		0.14			VPsat	2.34 kPa		0.31			VPsat	2.64 kPa	
Dewpoint	12.4 °C		2.6			Dewpoint	15.1 °C		2.3			Dewpoint	17.4 °C		4.6			Dewpoint	22.0 °C	



Outside			Difference			Above screen			Difference			Inside			Difference			Plant		
Temp	18	°C	1.00	Temp	19	°C	1.00	Temp	20	°C	2.00	Temp	22	°C				Temp	22	°C
RH	70	%	8.00	RH	78	%	7.00	RH	85	%	15.00	RH	100	%				RH	100	%
Absolute Humidity AH	9.04 g/kg		1.70	Absolute Humidity AH	10.73 g/kg		1.73	Absolute Humidity AH	12.47 g/kg		4.17	Absolute Humidity AH	16.64 g/kg					Absolute Humidity AH	16.64 g/kg	
Absolute Humidity AH	10.87 g/m³		1.99	Absolute Humidity AH	12.85 g/m³		2.01	Absolute Humidity AH	14.86 g/m³		4.79	Absolute Humidity AH	19.65 g/m³					Absolute Humidity AH	19.65 g/m³	
Humidity Deficit HD	3.87 g/kg		-0.85	Humidity Deficit HD	3.03 g/kg		-0.83	Humidity Deficit HD	2.20 g/kg		-2.20	Humidity Deficit HD	0.00 g/kg					Humidity Deficit HD	0.00 g/kg	
Humidity Deficit HD	4.66 g/m³		-1.03	Humidity Deficit HD	3.63 g/m³		-1.00	Humidity Deficit HD	2.62 g/m³		-2.62	Humidity Deficit HD	0.00 g/m³					Humidity Deficit HD	0.00 g/m³	
Enthalpy	40.61 kJ/kg		5.23	Enthalpy	45.85 kJ/kg		5.31	Enthalpy	51.16 kJ/kg		12.38	Enthalpy	63.55 kJ/kg					Enthalpy	63.55 kJ/kg	
Enthalpy	48.85 kJ/m³		6.05	Enthalpy	54.90 kJ/m³		6.09	Enthalpy	60.99 kJ/m³		14.06	Enthalpy	75.05 kJ/m³					Enthalpy	75.05 kJ/m³	
VPD	0.62 kPa		-0.14	VPD	0.48 kPa		-0.13	VPD	0.35 kPa		-0.35	VPD	0.00 kPa					VPD	0.00 kPa	
VP	1.44 kPa		0.27	VP	1.71 kPa		0.27	VP	1.99 kPa		0.66	VP	2.64 kPa					VP	2.64 kPa	
VPsat	2.06 kPa		0.13	VPsat	2.20 kPa		0.14	VPsat	2.34 kPa		0.31	VPsat	2.64 kPa					VPsat	2.64 kPa	
Dewpoint	12.4 °C		2.6	Dewpoint	15.1 °C		2.3	Dewpoint	17.4 °C		4.6	Dewpoint	22.0 °C					Dewpoint	22.0 °C	

Figure 4.4.2-1 Estimating the effective ventilation rate via the energy balance of the greenhouse



Under high radiation conditions the effective ventilation rate can be estimated by dividing the energy input by the Delta enthalpy (= difference between enthalpy inside and outside).

- 求出通風速率 V_r 後，可算水氣排放量

$$\text{Moisture exhaust} = V_r \times \Delta AH \quad [\text{g/m}^2.\text{h}]$$

Where:

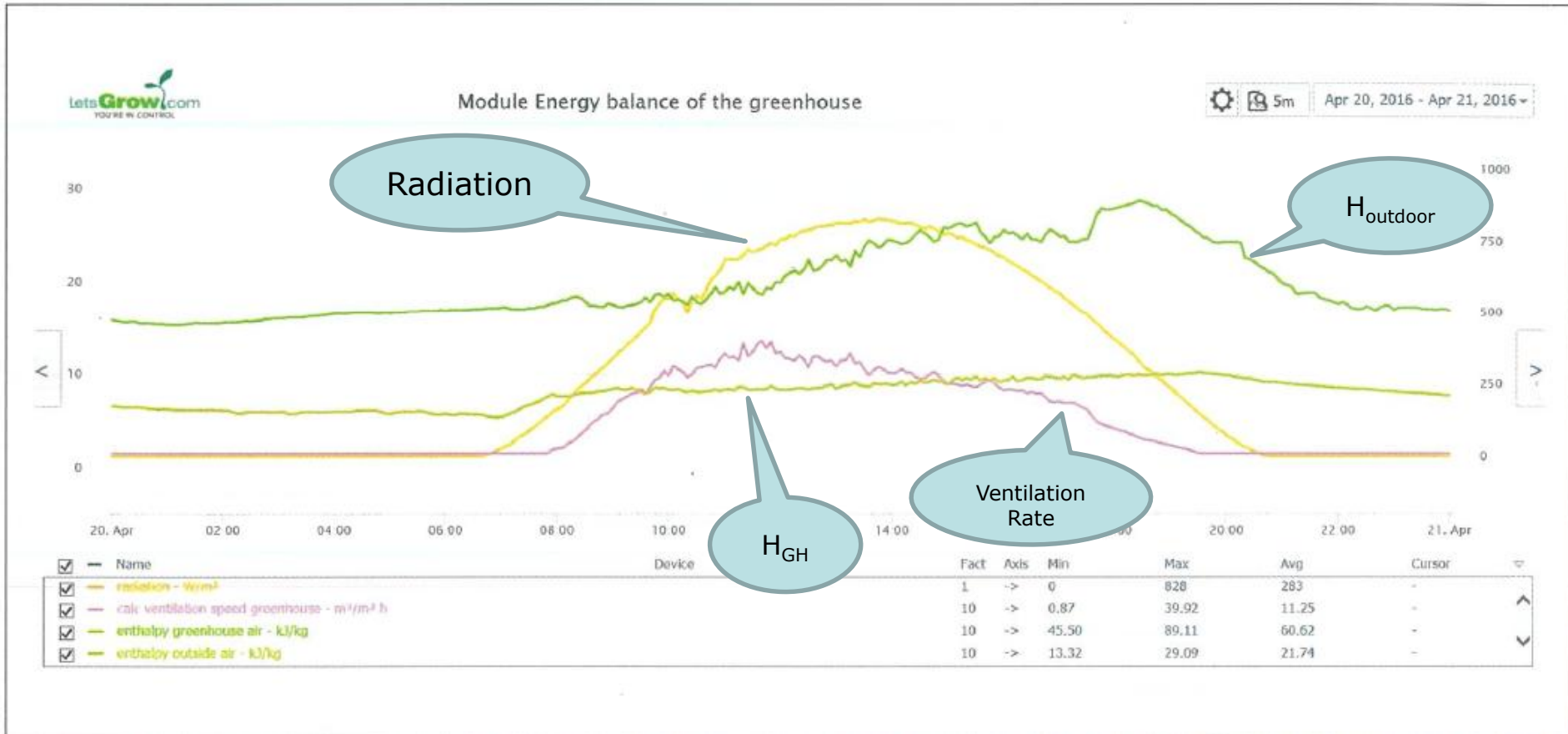
V_r = ventilation rate $[\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h}]$

ΔAH = difference between AH inside and outside $[\text{g/m}^3]$

- 依據能量及水分平衡的通風速率計算公式，通風速率與室內外溫度及濕度直接相關。
- 如果只用溫室內T來設定通風速率，那水分平衡會被忽略，溫室內AH可能會過低。因此溫室的環控設定，**必須同時用溫室的T與AH來設定 V_r** ，才能兼顧。

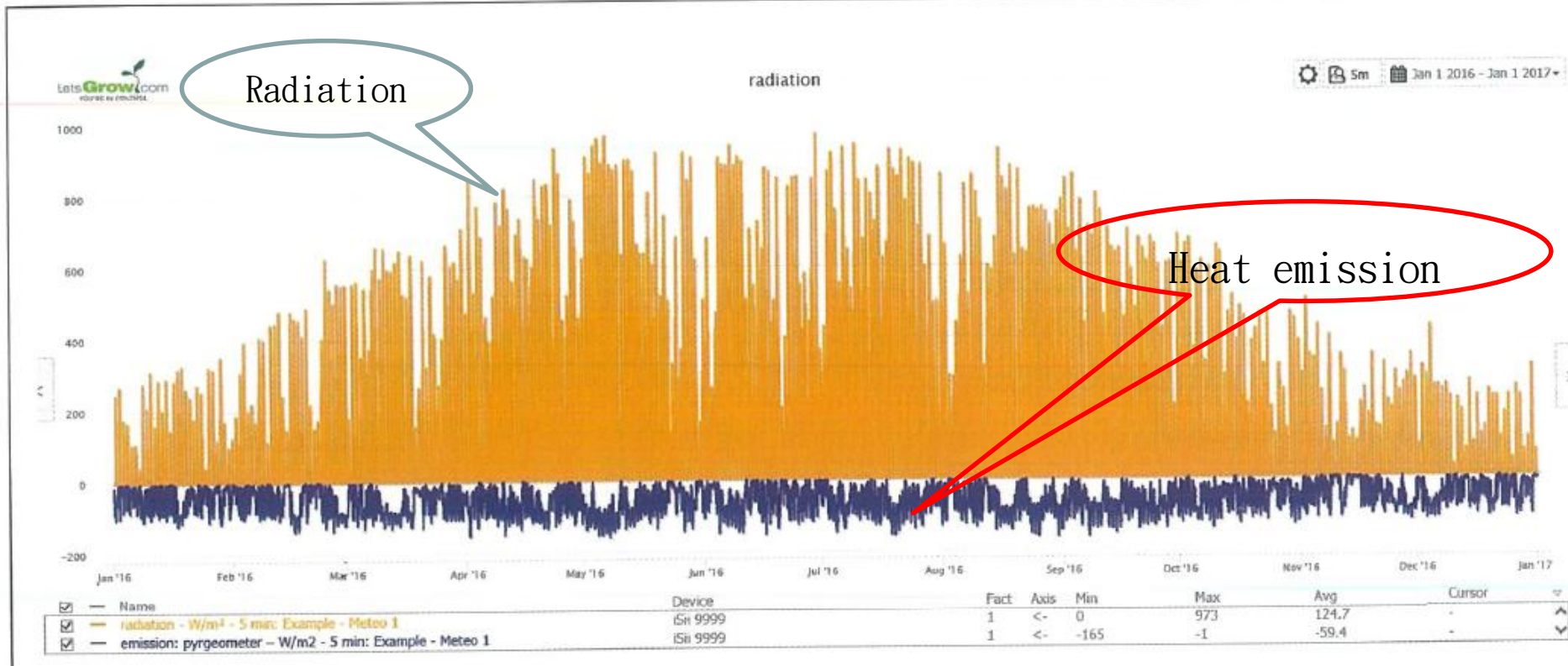
依照太陽輻射，溫室內、外焓值(h)設定通風速率

Figure 4.4.2.-2 Ventilation rate of the greenhouse.



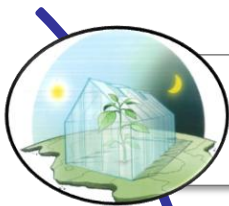
全年的熱體輻射 vs. 太陽輻射 (荷蘭)

Figure 4.4.3-1 Heat emission versus solar radiation through the year (The Netherlands)

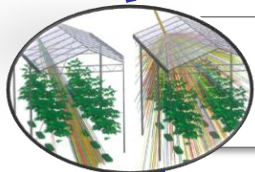


- 熱體輻射: $0 \sim -150 \text{ W/m}^2$ ，與雲量有關。
- 晴天時天空溫度可比氣溫低 $30\sim 40^\circ\text{C}$ ，1萬米高空約 $-50\sim -60^\circ\text{C}$ ，外太空為 -273°C 。
- 因此溫室屋頂會比氣溫低幾度，嚴重影響到溫室的能量平衡，增加加溫成本。

Physics 物理現象



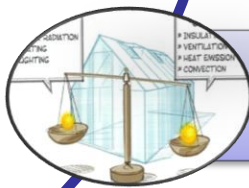
三層空間、六種平衡



層間能量傳遞

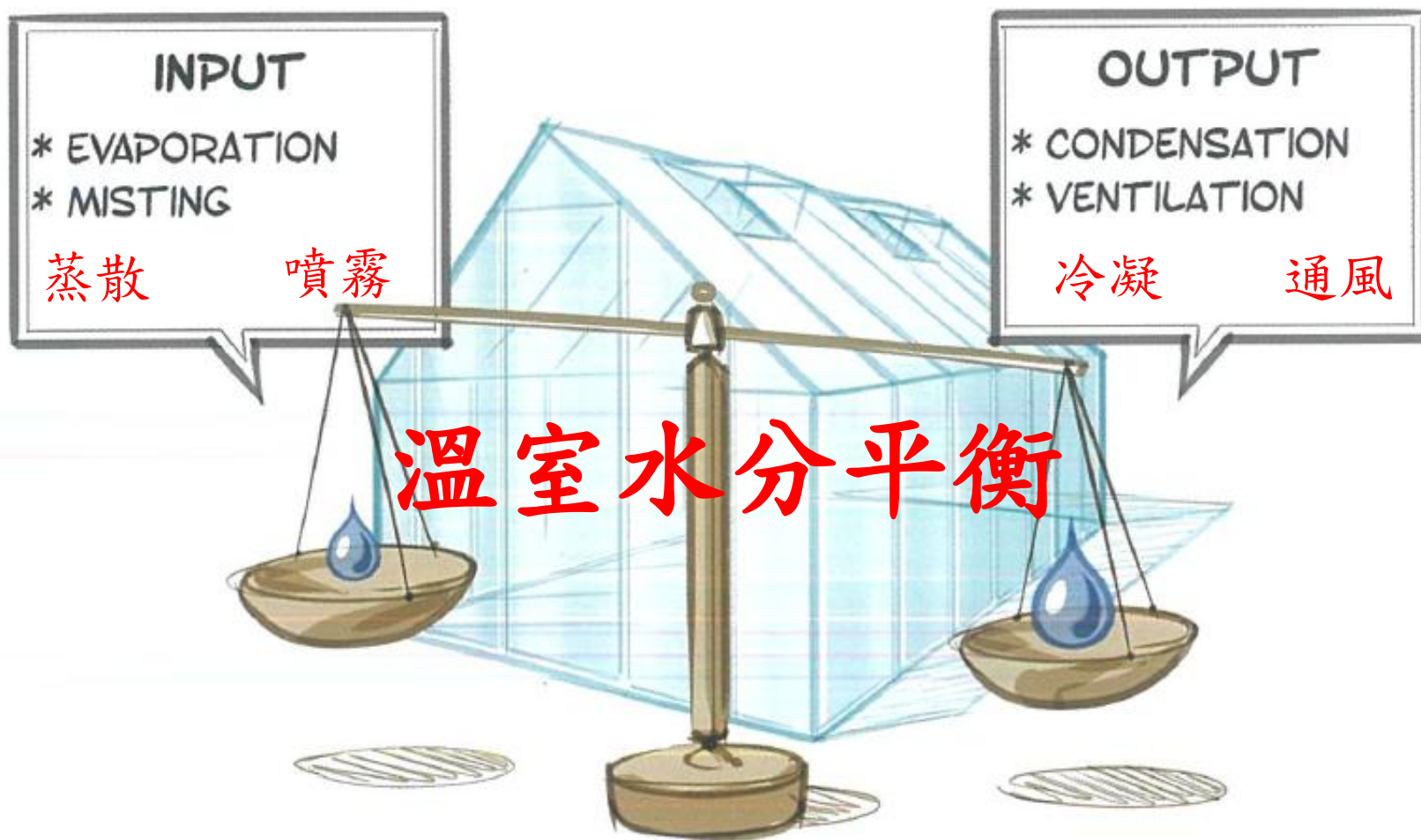


層間水分傳遞



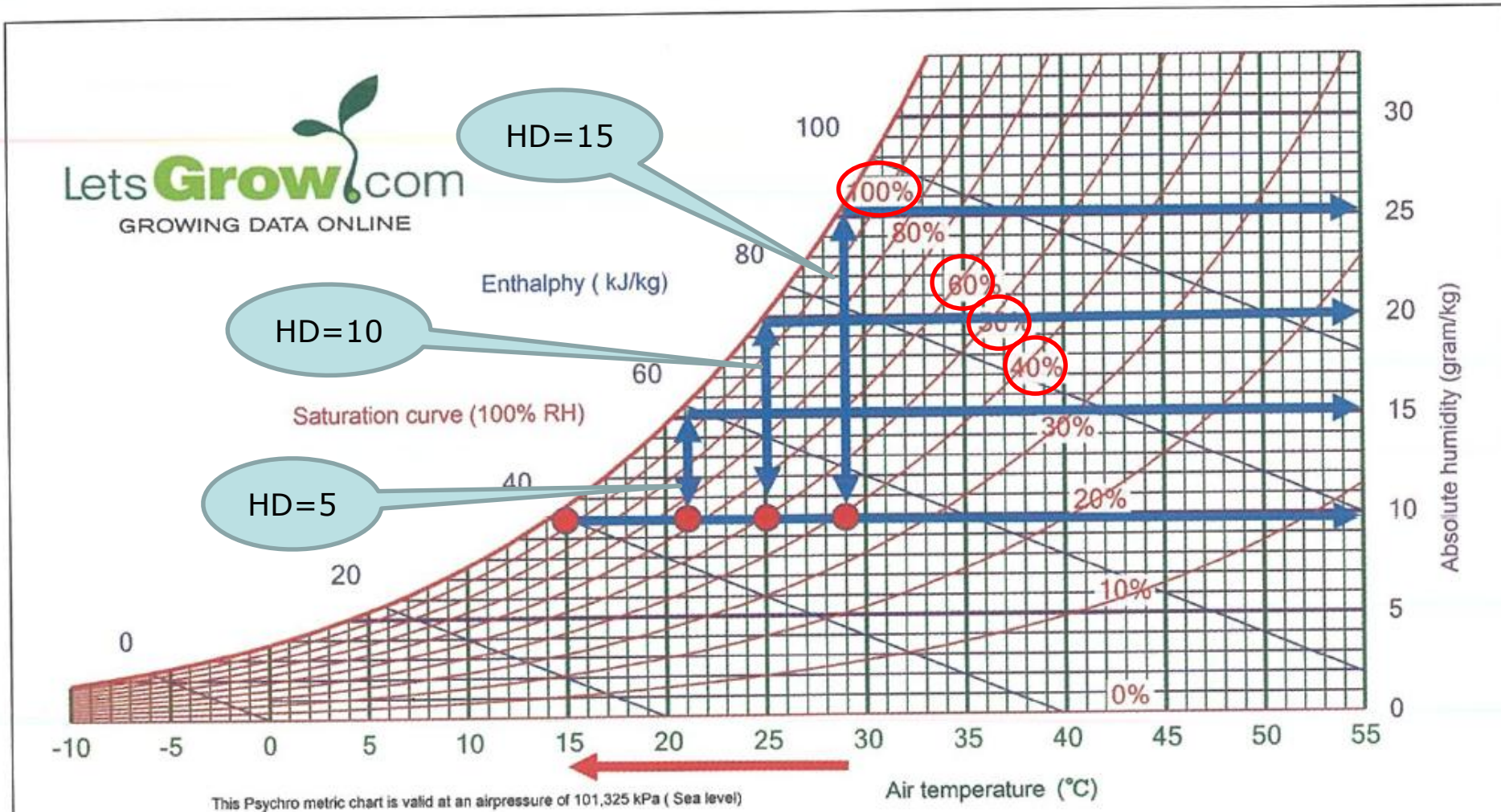
植物周圍的物理現象

質量傳遞：溫室水分平衡



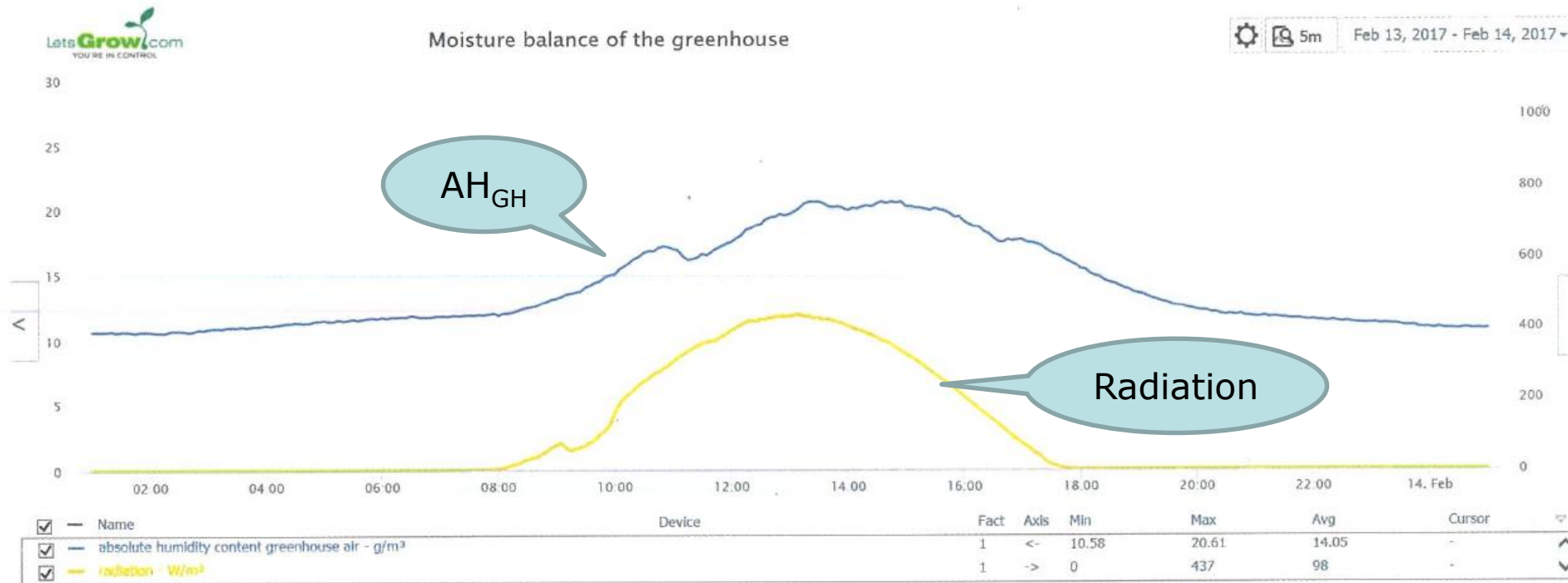
- 冷凝排濕量取決於屋頂表面溫度與空氣露點溫度的差
- 通風排濕量取決於溫室內外絕對濕度AH的差

Figure 4.5-2 Relationship between HD, Temperature and AH



- AH值固定，但HD值(飽差值)會隨降溫而減少。
- 使用RH 或 HD來做溫室水分管理，不是正確的方法，
溫室水分平衡必需使用AH (g/kg) 來調控。

Figure 4.5-4 Absolute Humidity during the day 溫室水分平衡變化可透過 AH_{GH} 來監測

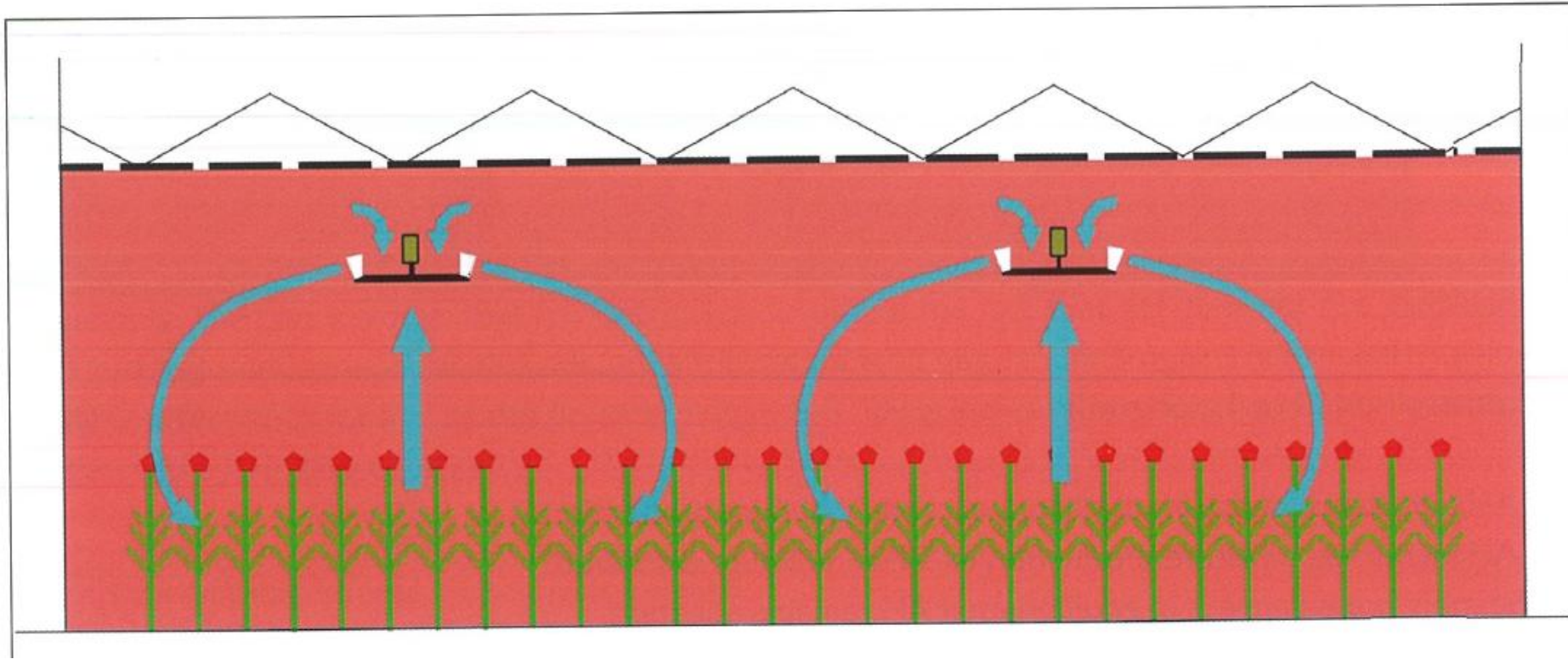


- 如果 AH 減少：output（排濕） > Input（水分蒸發）
- 如果 AH 增加：Output < Input
- 如果 AH 穩定代表達到水分平衡：Output = Input
- 無論 RH 或是 HD 值 是 高或低，都可以達到水分平衡。
用 AH 可以代表水分平衡的狀態。

溫室水分平衡的控制

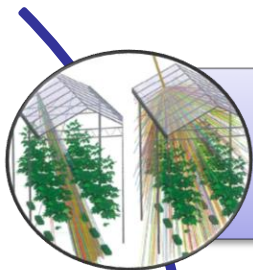
- 植物的蒸散與土壤或噴霧的蒸發都是水分平衡中的輸入項。為達水分平衡，需通風以排濕，這是輸出項。
 - 生長旺盛的番茄在無人工照明下，夜間蒸散量為 $25 \text{ g/m}^2\text{h}$ ，日照充足的白天蒸散量達 $500 - 700 \text{ g/m}^2\text{h}$ 。
- 當濕度高時提高通風速率來排濕，但若可減少蒸散，會更容易做到水分平衡。
 - 減少輸入項的其他作法：避免傍晚或夜間澆水，地表鋪上塑膠布或可阻土壤水分蒸發的材料，當 $\text{LAI} > 3$ 時摘除過多的葉片。
- 夜間內網關閉時，使用內循環風扇來促進植物附近的空氣流動，垂直風扇效果會更好。
 - 風扇用來產生空氣流動的效果會比使用加溫方式要好。

Figure 4.5.1-1 Vertical air circulation by means of fans



要避免不必要的蒸發，使用垂直風扇帶動氣流，會比透國的額外加熱方式要好

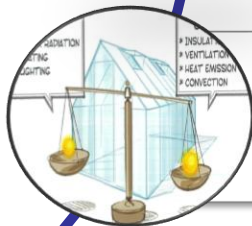
植物周圍的物理現象



能量平衡與水分平衡交互作用



溫室CO₂平衡



植物及溫室的能量與水分平衡

能量平衡與水分平衡交互作用

影響因素

1. 水分蒸發：能量增加，蒸發速率增加
2. 通風
3. 幕布（內網）

通風的影響

- 通風策略通常是以溫度做設定，而不是濕度。
- 因此是以能量平衡為優先考量，可先計算能量的收支。但同時通風也會影響到水分平衡。
- 以下說明通風影響能量平衡及水分平衡：

假設：

溫室內設定溫、濕度為 25 °C，75%

室外溫、濕度為 24 °C，60%

室外太陽輻射能 = 700，溫室內約 500 W/m²

多少通風量才能達到設定目標？

達到能量平衡所需的通風速率

$$V_r = \text{Energy input} / \Delta \text{Enthalpy} \text{ [m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h]}$$

其中

$\Delta \text{Enthalpy}$ = 室內、外的焓差 kJ/m^3

V_r : 通風風量率, $\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}$

Energy Input: 淨輸入能量, $\text{kJ/m}^2\text{h}$

排濕量與通風速率

$$\text{Moisture exhaust} = V_r \times \Delta \text{AH} \text{ [g/m}^2\cdot\text{h]}$$

其中

V_r : 通風風量率, $\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}$

ΔAH : 室內、外AH的差 g/m^3

$$500 \text{ W/m}^2 = 500 \times 60 \times 60 = 1800000 \text{ J/m}^2\text{h} = 1800 \text{ kJ/m}^2\text{h}$$

Inside: (Temp = 25 °C , RH = 75 %) -> AH = 17.6 gr/m³ , enthalpy = 73.2 kJ/m³
Outdoor (Temp = 24 °C, RH = 60 %) -> AH = 13.3 gr/m³ , enthalpy = 61.5 kJ/m³

$$\text{Ventilation rate} = 1800 / (73.2 - 61.5) = 153.8 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$$

(達到能量平衡所需的通風速率)

如果通風速率維持在153.8 m³/m²h，溫室的排濕能力可以維持在661g/m²h，就可同時維持能量與水分平衡。

And what does that mean for the exhaust rate of water vapour?

$$\text{Water exhaust} = 153.8 \times \Delta\text{AH} = 153.8 \times 4.3 = 661 \text{ g/m}^2\cdot\text{h}.$$

若溫室高 6 m，153.8 m³/m²h 等同一小時換氣 25.6次 → 每分鐘換氣 0.4 次，ACM = 0.4

- 假若上面狀況都發生，通風速率高，添加CO₂就沒有用處。
- 在上面案例的設定條件下，很容易出現水分逆境，並產生以下影響：

- 1) 氣孔部份關閉減少水分蒸散及防止脫水
- 2) 因此會減少CO₂吸收及降低光合作用效率
- 3) 溫室 RH 會逐漸減少，導致空氣的焓值(熱能)減少
- 4) 結果越來越需要更高的通風速率來維持能量平衡

$$V_r = \text{Energy input} / \Delta \text{Enthalpy} [\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h}]$$

$$\Delta \text{Enthalpy} = H_{\text{inside}} - H_{\text{outdoor}}$$

- 因此若只依照溫度來做設定，很容易出現上述惡性循環，不利生長及光合作用之進行。
- 是否有其它方式同時兼顧到能量及水分平衡，並且是利於光合作用的環境條件？

室內 (25 °C、RH 75%)，改成(28 °C、RH 75%)，如下：

Inside: (28 °C , RH = 75 %) AH = 20.9 gr/m³, enthalpy = 84.5 kJ/m³
Outside (24 °C, RH = 60 %) -> AH = 13.3 gr/m³, enthalpy = 61.5 kJ/m³

Ventilation rate = 1800 / (84.5 - 61.5) = 78.3 m³/m².h

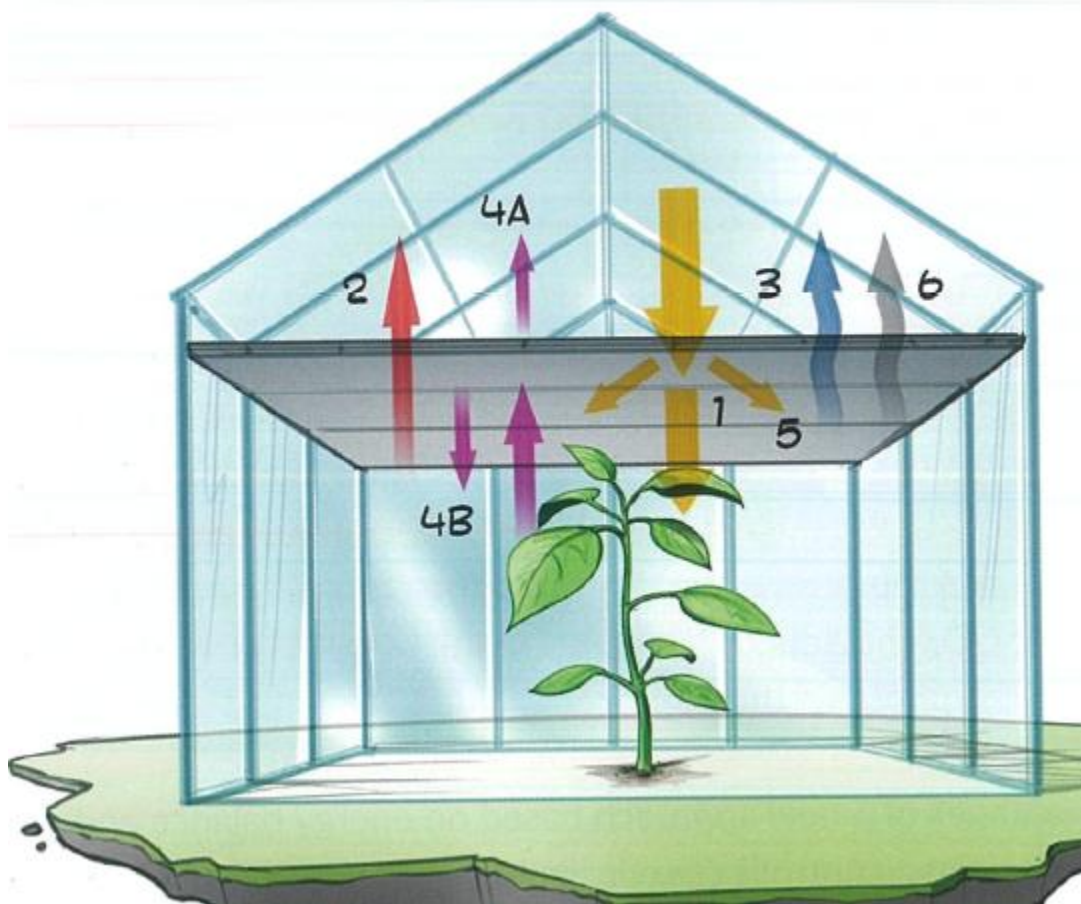
What does that mean for the exhaust rate of water vapour?
Water exhaust = 78.3 x ΔAH = 78.3 x (20.9 - 13.3) = 595 g/m².h.

- 1)減少10% 的溫室排濕量，因此減少植物水分逆境
 - 2)氣孔維持更大的開口及更容易吸收CO₂
 - 3)葉溫較高，增加了光合作用效率
- 考量溫室及植物的能量平衡及水分平衡來做設定，會有上述的好處，而不是僅以溫室溫度來設定考量。
 - 另外，晴天時，選擇通風量減少的策略，對光合作用效率會更有利。

幕布(內網)的影響

內網種類及用途：

1. 遮陰網：避免光線過強
2. 節能網/布：減少加溫成本
3. 遮黑網：暗處理(短日)或減少光線外洩
4. 透明塑膠布：PE膜、保溼防止幼苗脫水



專業的內網廠商會建立產品各項參數的標準量測方法，以利客戶挑選各種內網。

內網特性表達的方式：

- 1) 透光率/遮陰率(%)
- 2) 保溫特性/節能率(%)
- 3) 特定條件下的溼氣穿透率 ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)
- 4) 長波輻射穿透率/長波輻射反射率/熱體輻射阻隔能力(%)
- 5) 太陽光的散射度/散射因子(%)
- 6) 特定條件下的氣體穿透率($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)

透光率/遮陰率

1. 在特定角度的光源下進行測量。因角度決定了光線在材料的反射程度及光線穿過材料的路徑長度，測量值會與角度有關。**內網安裝的角度與屋頂角度相同，會比水平安裝的內網有較高的透光率。**
2. 在實驗室條件下量測新、乾淨的內網透光率，並不代表內網使用有效期間的平均透光率
3. 內網上的水滴會嚴重減少光線透光率。這種狀況的改善方式：內網安裝角度與屋頂相同、添加可溼劑、改變表面結構。
4. 若遮陰網沒有全關、部分植物會直接日曬。

保溫

1. 以 U 值 $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ 表達會比節能率好。U 值與溫室內外的溫度差有關。但要注意不是固定值，因溫室屋頂及通風系統也會影響到 U 值。輻射熱能損失及風都會影響到內網溫度及上方的空氣，並且空氣也會穿透內網。
2. 更重要的，內網留縫會大幅增加 U 值。

溼氣穿透率

1. 溼氣穿透率決定於內網的抗性參數，非固定值，與內網的溼潤程度及使用年數有關。
2. 穿透內網的溼氣量，與抗性參數和內網兩邊之間的絕對濕度(AH)差值的乘積有關。風會通過內網或是內網空隙也會增加溼氣交換。

長波輻射(熱體輻射)穿透率/輻射率

1. 內網或是屋頂上的水會改變長波輻射的穿透率。就塑膠布內網來說，水滴會增加長波輻射穿透率，但平均分布在薄膜上的水分則會減少穿透率。屋頂或是PE內網上有一層水膜，長波輻射穿透率會相當於單層玻璃。如果沒有使用溼潤劑，或是當塑膠內網是水平安裝時，會建議使用鋁料內網來防止植物因熱體輻射的傷害。
2. 鋁條帶的內網會反射大量來自植物的長波輻射。

散射

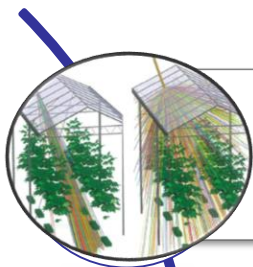
1. 依照作物種類，使用高散射係數的內網對植物生長有利。另外一方面，這種內網負面的影響是會減少PAR光線。在低光狀況下，透光率更高的內網會比較受歡迎。在比較冷的區域，用兩個不同的散射係數內網是需要的。

空氣穿透率

1. 空氣穿透率會隨內網磨損而改變。針織網的穿透率會比編織網更快改變。塑膠布的部分，可以選穿孔型的來獲得特定的穿透率。
2. 實際氣體交換的狀況，與風、內網上下的溫差有強烈關係。在溫室內有溫差及壓力差做為驅動力，會產生氣流，過內網開孔進行大量的氣體交換，可以達 $20-40 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ ，相當於每小時 5-10 次的溫室體積。為防止開孔太多內網的不好影響，可以再增加一層塑膠布內網。
3. 通常，較高的空氣穿透率也表示較高的濕度穿透率及較低的節能率。

結論：要整合這些透光率、節能、排濕等特性，在不同環境狀況下，如何設定內網位置來獲得最適合的溫室氣候是相當有挑戰性的任務。興建溫室時，如何挑選適合的內網也是要考量的。

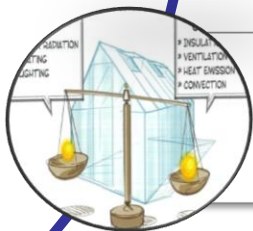
植物周圍的物理現象



能量平衡與水分交互平衡作用

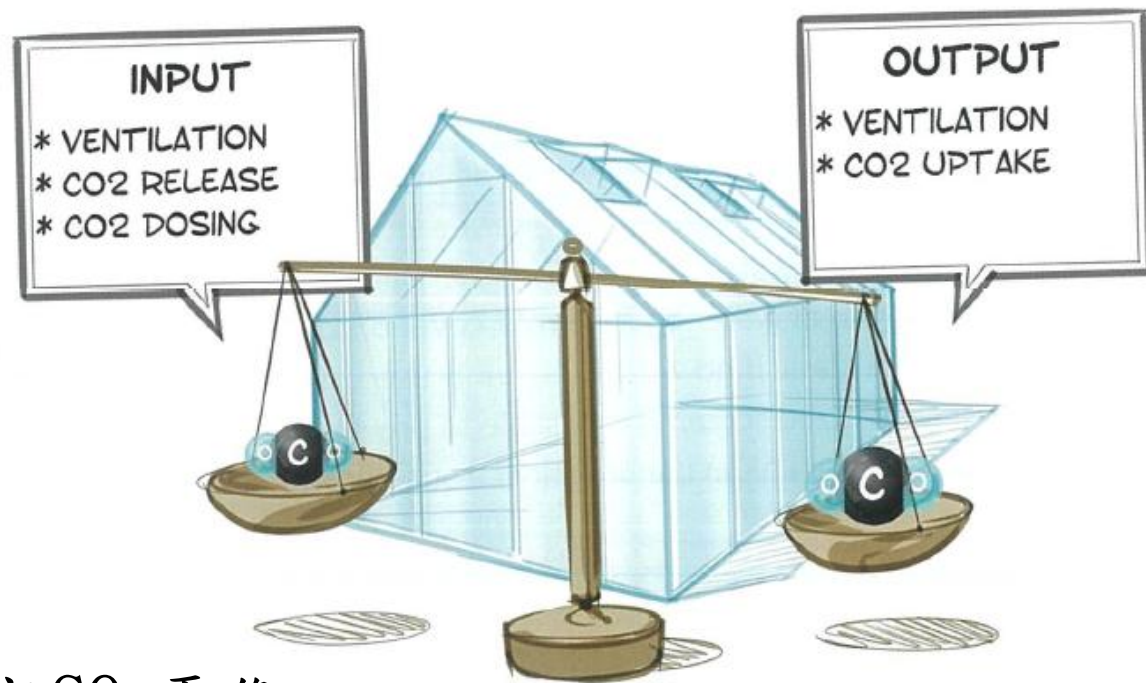


溫室CO₂平衡



植物及溫室的能量與水分平衡

溫室CO₂平衡



CO₂流動決定了溫室CO₂平衡

1. 作物異化作用產生的CO₂
2. 作物白天光合作用吸收的CO₂
3. 添加的CO₂
4. 通風時溫室內外環境的CO₂交換

最後CO₂是流入還是流出，由溫室內外的CO₂差決定

通風對CO₂濃度的影響

1. 添加CO₂

在同樣的CO₂補充量下，低通風速率，CO₂濃度較高，因此生長會比較好。通風量少，溫度、RH、CO₂對光合作用都會有正面的助益。

2. 無添加CO₂

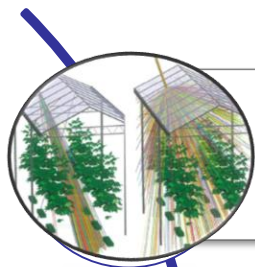
低通風速率會使溫室內的CO₂濃度不足，會變成光合作用的限制因子。因此，需要在三種因子上做妥協來達到最適結果。

無論有無添加CO₂，在溫室安裝CO₂ sensor會是設定通風速率的很好指標。

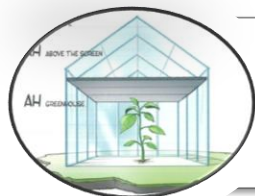
CO₂水平及垂直分佈

- 因CO₂是生長關鍵因子，除了必須維持高濃度CO₂供應之外，也需要讓CO₂水平及垂直分佈均勻。
- 局部吸收CO₂與局部光強度成正比，補充的位置應該選擇在作物的上方。
- 需要足夠的空氣流動來防止局部CO₂的缺乏。

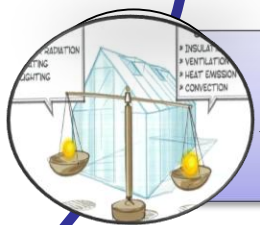
植物周圍的物理現象



能量平衡與水分交互平衡作用



溫室CO₂平衡



植物及溫室的能量與水分平衡

植物與溫室的能量與水分平衡

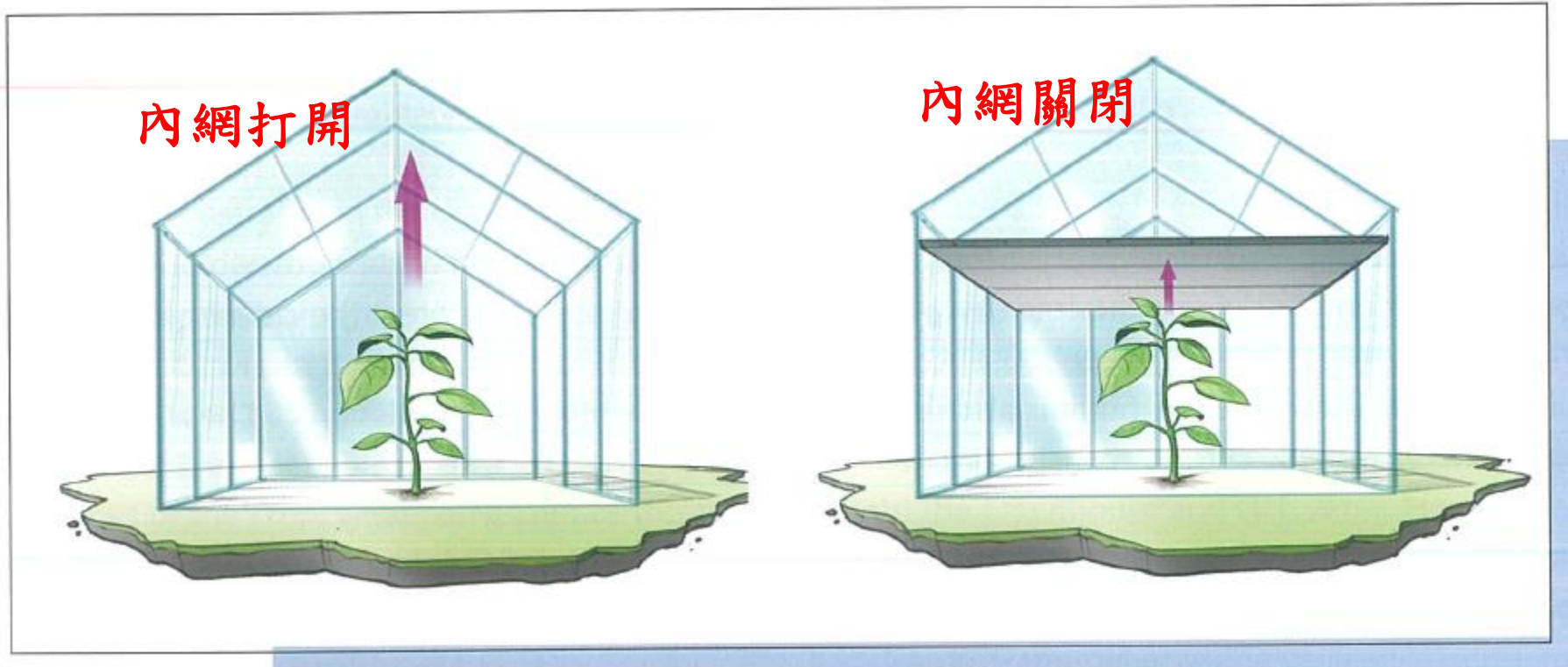
- 植物的能量與水分平衡與溫室的能量與水分平衡有密切關係。
- 來自植物的能量及水分都會通往微氣候區之外的第二層。
- 溫室溫度及濕度也會大幅影響植物葉片溫度及濕度，亦即植物附近的微氣候。

植物與溫室的能量與水分平衡

- 所有來自作物的都會進入溫室，反之亦然。然而有一些例外：
 - 首先是作物的蒸散作用。蒸散是植物的能量與水分的輸出，植物的蒸散並不會影響到溫室的能量平衡，因為只是顯熱與潛熱的轉換。溫室內的噴霧也是一樣。蒸散作用與機械通風降溫狀況不同，通風降溫會移走溫室的能量與水分。
 - 其次是植物與環境透過短波及長波輻射進行的熱交換。長波輻射與節能網/布的使用有密切關係。

內網開閉對植物體熱體輻射的影響

Figure 4.8.2-1A and 1B Heat emission of the crop with open and closed screen



- 植物的熱體輻射計算與溫室相同，由作物與屋頂溫度差及物體長波輻射率決定。**簡單公式:植物熱體輻射 = $-5 \text{ W/m}^2\text{°C}$** ，植物溫度 18°C 、屋頂表面溫度 10°C ，植物熱體輻射速率 = $(18-10) \times -5 = -40 \text{ W/m}^2$
- 若夜間沒有能量進來，植物體只能靠對流取得能量，植物熱體輻射會明顯影響植物能量平衡。

- 玻璃溫室的表面溫度簡單的計算公式：

$$T_{\text{coverage}} = ((2 \times T_{\text{greenhouse}}) + T_{\text{outdoor}}) / 3^{\circ}\text{C}.$$

- 溫室溫度 20°C 、戶外溫度 11°C
屋頂表面溫度 = $(2 \times 20 + 11) / 3 = 17^{\circ}\text{C}$
植物熱體輻射速率(內網打開)
= $-5 \times (20 - 17) = -15 \text{ W/m}^2$
- 溫室表面溫度也會受到風速及天空的熱體輻射影響，後者可以用Pyrgometer (地面輻射強度計)量測，晴天時 -120 W/m^2 ，會使表面溫度較陰天時低幾度。

估算內網關閉後的熱體輻射狀況，必須先估算內網溫度，為達到這個目的可在內網上方安裝氣象盒。簡單公式：

$$T_{\text{screen}} = (T_{\text{greenhouse}} + T_{\text{abovescreeen}}) / 2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

植物溫度 20°C 、內網上方氣象盒溫度 16°C

$$\text{內網溫度} = (20 + 16) / 2 = 18 \text{ } ^\circ\text{C}$$

內網關閉後的熱體輻射速率

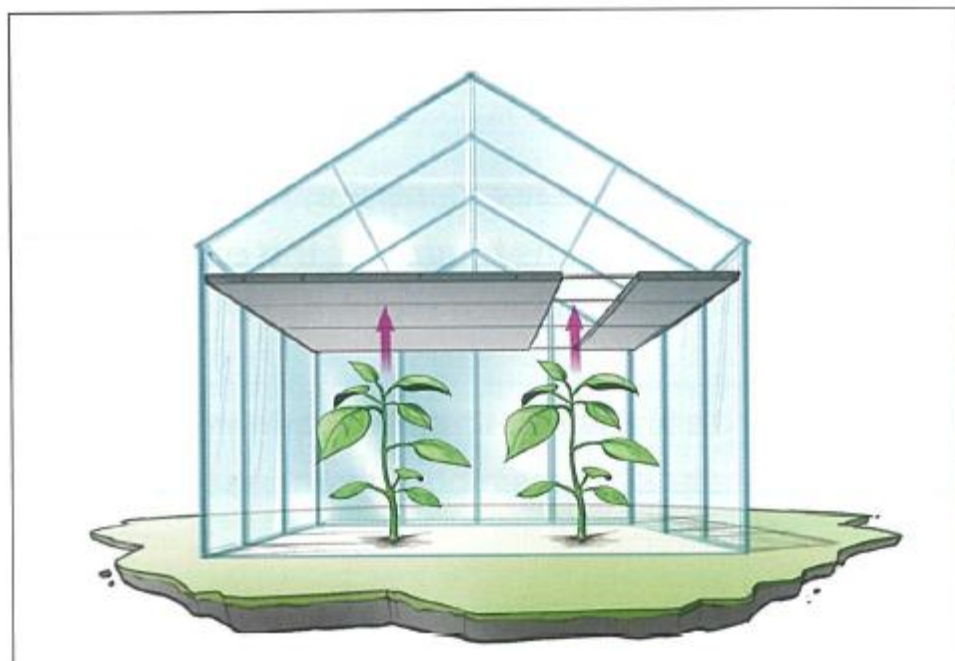
$$= -5 \times (20 - 18) = -10 \text{ W/m}^2$$

(內網打開： -15 W/m^2)

減少熱體輻射的關網方式

- 很多生產者想要減少植物熱體輻射，但同時又不想要關網造成溫度及濕度不好影響，特別是傍晚時候關網會減少熱能及濕度排放，溫度及濕度會偏高。
- 要強調的是熱體輻射速率是取決於植物與上方的覆蓋物(屋頂或內網)溫度差異及覆蓋物覆蓋的程度。

Figure 4.8.2.1-1 Heat emission of the crop to a partially closed screen



如左圖 內網關閉85%
縫隙的位置對於植物
體熱體輻射總量沒有
影響

內網關閉85%的熱體輻射計算方式：

$$\text{Heat emission} = -5 \times \left[(85 \% \times (T_{\text{crop}} - T_{\text{screen}})) + (15 \% \times (T_{\text{crop}} - T_{\text{glass}})) \right] \text{W/m}^2$$

Where:

T_{crop} = Crop temperature,

T_{screen} = Screen temperature

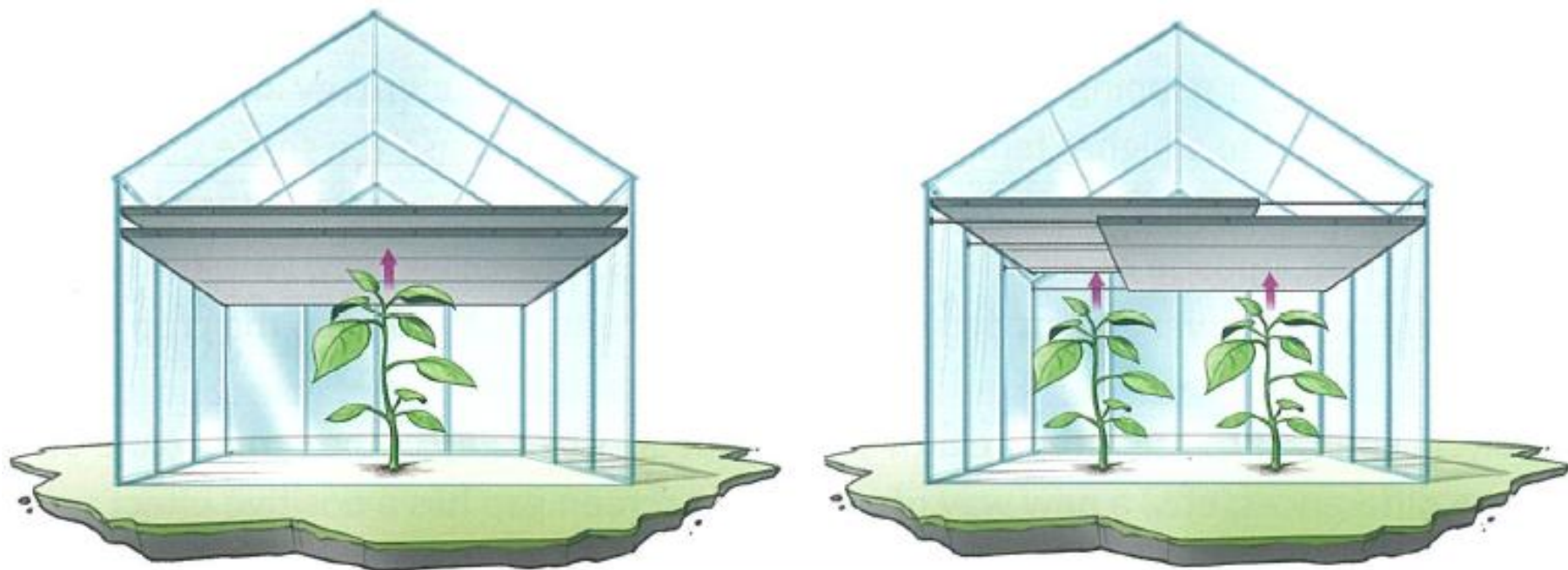
T_{glass} = Roof temperature

85 % = Percentage of screen coverage, 15 % = percentage of the screen gap.

內網部分關閉，可以避免植物太多的熱體輻射，留縫隙也可以避免累積太多熱量及濕度，也不會影響到溫室溫度及濕度，因此整年可以使用這種方法的。當夜間溫室溫度低於設定目標時，再將內網關閉至100%。

評估兩層或三層內網效果

- 如果有兩層內網，下層內網會比較接近溫室溫度，因此減少植物熱體輻射。**植物熱體輻射量主要由最下層的內網決定**，所以使用兩層甚至三層內網是有利的。
- 2層內網的搭配，可以部分關網方式，達到完全覆蓋植物減少熱體輻射，傍晚時又不會累積太多熱量及濕度。（兩層內網要能交錯）（留縫會增加加溫能源流失）



內網特性(長波輻射率)的影響

- 內網長波輻射率：輻射率越低，熱體輻射量越低。具有鋁條帶或鋁料的內網輻射率低，夜晚可減少熱體輻射。
- 若使用單層、沒有做表面添加處理的塑膠布當內網，內網(長波輻射率高)關閉時，因作物會“看”得到溫室屋頂，因此會有更高的熱體輻射能量。
- 塑膠布內網與節能內網的搭配：塑膠布內網在下、節能網在上面，因上層內網溫度較低，所以會減少塑膠布負面影響。
- 當塑膠布內網上有冷凝結水，輻射率會減少，因此熱體輻射量也會減少。

兩層內網其中一層留縫隙

- 假設兩層網是全關，溫室溫度及濕度會太高，因此其中一層內網留縫隙來減少能量及濕度。要選那層網留縫？
- **下層內網留縫**：因兩層內網之間空間會充滿溫室溫暖空氣，下層內網表面溫度會較高，可減少植物熱體輻射。
- **上層內網留縫**：會有相反的影響，因兩層內網之間空間會充滿內網上方冷空氣，下層內網溫度降低，因此增加植物熱體輻射。

兩層內網其中一層留縫隙

- 備註：內網留縫會有負面結果像冷空氣沉降、溫度差異…。但也有好處，只要留縫時內網表面溫度高於全關下的內網表面溫度，就可以減少熱體輻射。
- 當內網上下的溫度相同時，也不會有冷空氣沉降及溫差過大問題。多層網會比單層網有更多的調整空間，更容易做到我們期望的結果。
- 當戶外溫度只比室內溫度稍低，不會差異很大時，內網留縫不太會對植株有不良影響，並且一定是比內網打開好。要注意的是 留縫會有較多的能源損失。

摘要 防止植物熱體輻射的方法

Principle 1 Process



作物對上方輻射散熱的多寡
取決於屋頂溫度，

屋頂溫度受以下因素影響：

雲層狀況、室外溫度、
風速、下雨狀況

摘要 防止植物熱體輻射的方法

Principle 2

Effects on the crop



對作物的影響：

蒸發散

根壓

鈣離子輸送

同化產物的輸送

細胞延展

冷凝

作物健康

摘要 防止植物熱體輻射的方法

Principle 3

Screening against heat emission



內網阻止作物層面的
熱體輻射

摘要 防止植物熱體輻射的方法

Principle 4 Monitoring heat emission



Pyrgeometer = heat
emission of the
glasshouse roof
Net radiation =
irradiation + heat
emission at crop
level

地面輻射計（pyrgeometer）是一種用來測量大氣中長波紅外線輻射（熱輻射）的儀器，通常量測波長範圍在 4 至 100 微米之間。它屬於一種輻射計，透過測量感測器與周圍大氣之間的淨能量交換，來幫助計算出近地大氣的溫度。

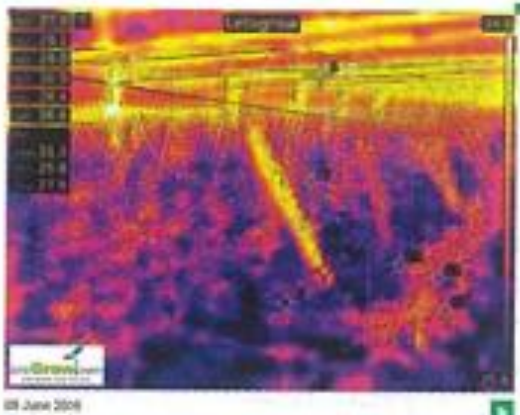
淨輻射

= 太陽輻射 + 熱體輻射

摘要 防止植物熱體輻射的方法

Principle 5

Monitoring energy balance of the plant



Monitoring the effect of net radiation on the crop by a thermographic camera

監測淨輻射對作物的影響 使用
熱像儀 (thermographic camera)

作物水逆境指標 CWSI

補充內容

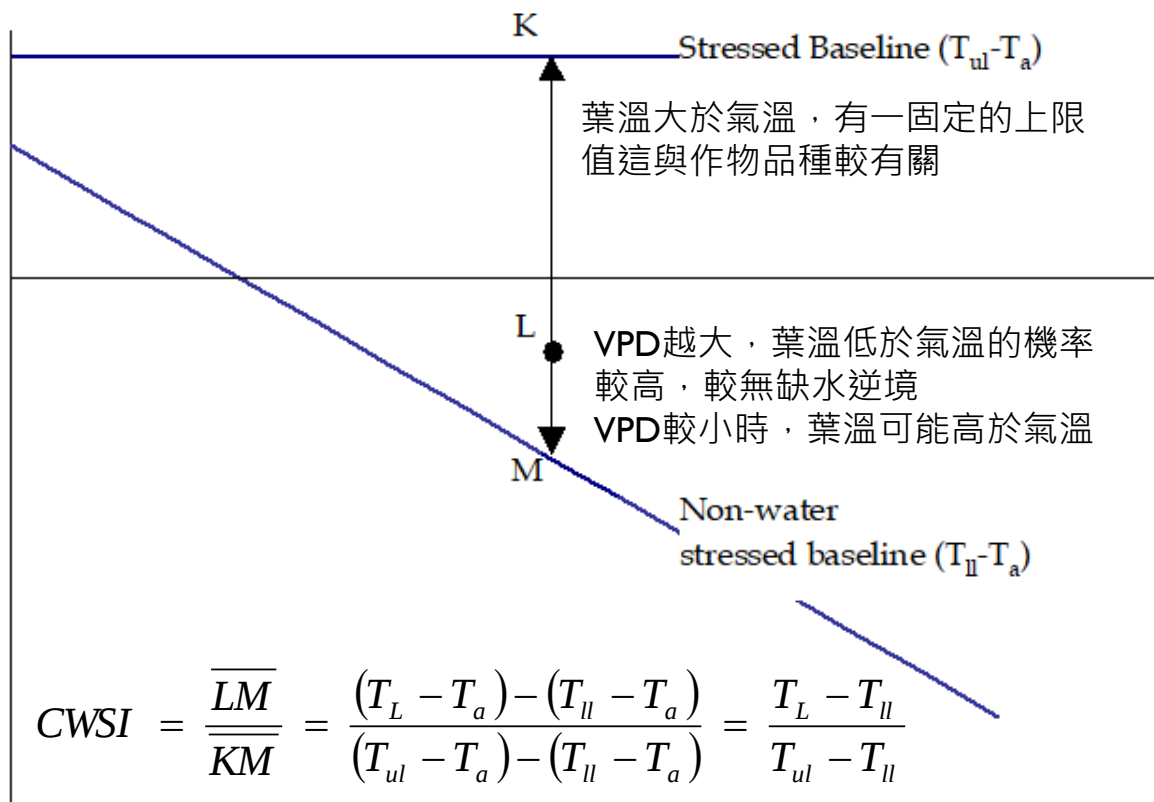
灌溉控制：何時給水、給多少量？

- 太陽輻射(因)造成介質水分蒸發/植物蒸散(果)根系吸水造成介質內水分含量逐漸降低(果)，空氣中絕對濕度增加，造成 VPD 的變化(果)
- 量測 VPD、量測輻射量、計算蒸散量的累積程度可用來決定灌溉時機(WHEN)
- 評估介質的含水量變化也可以決定灌溉時機(WHEN)

作物水逆境指標 CWSI

Crop
Water
Stress
Index

$T_c - T_a$ (C)



Vapor Pressure Deficit_{air} (kPa)

Gardner et al., 1992

作物水逆境指標

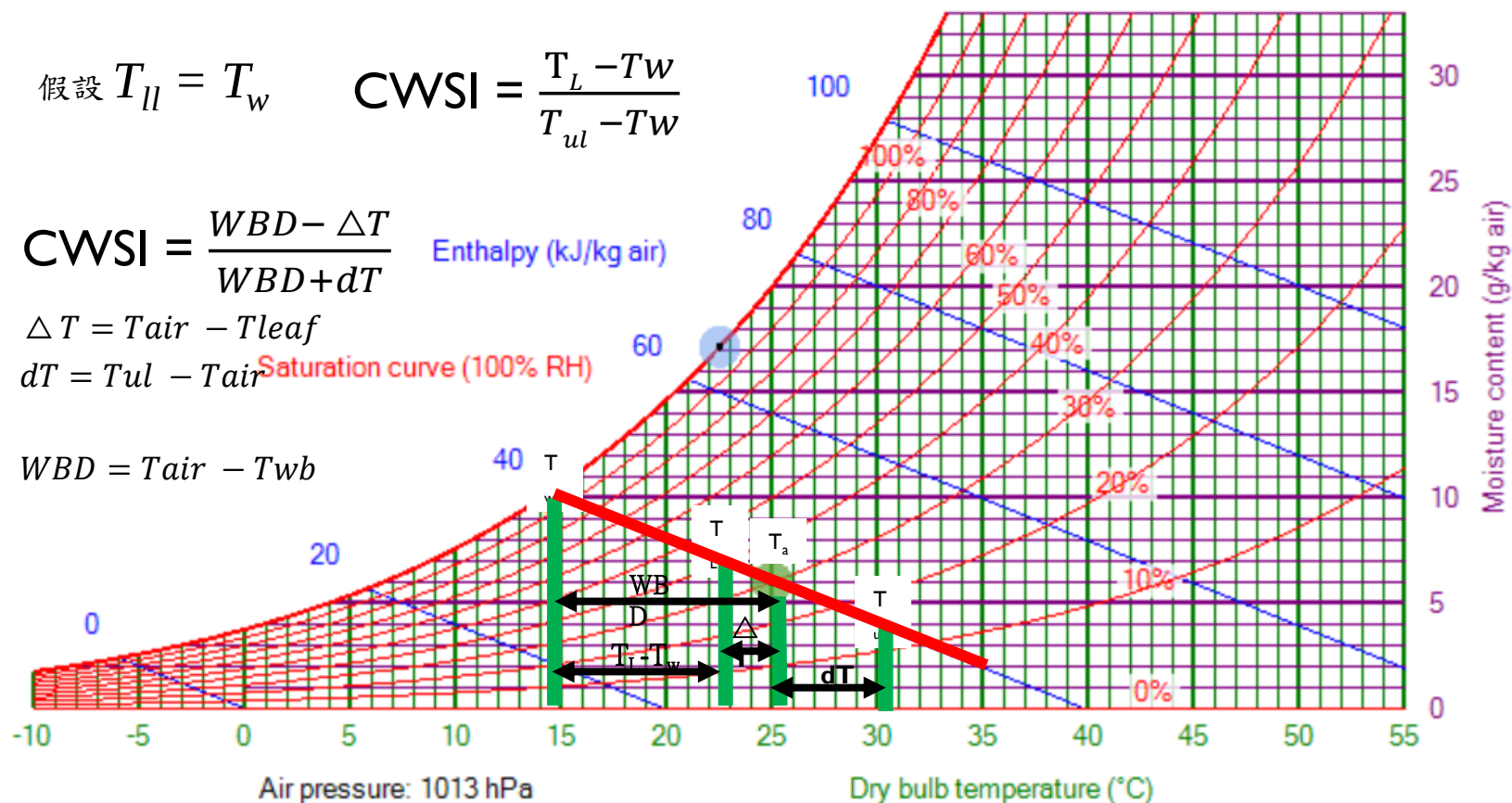
假設 $T_{ll} = T_w$ $CWSI = \frac{T_L - T_w}{T_{ul} - T_w}$

$$CWSI = \frac{WBD - \Delta T}{WBD + dT}$$

$$\Delta T = T_{air} - T_{leaf}$$

$$dT = T_{ul} - T_{air}$$

$$WBD = T_{air} - T_{wb}$$



由光積值決定灌溉時機

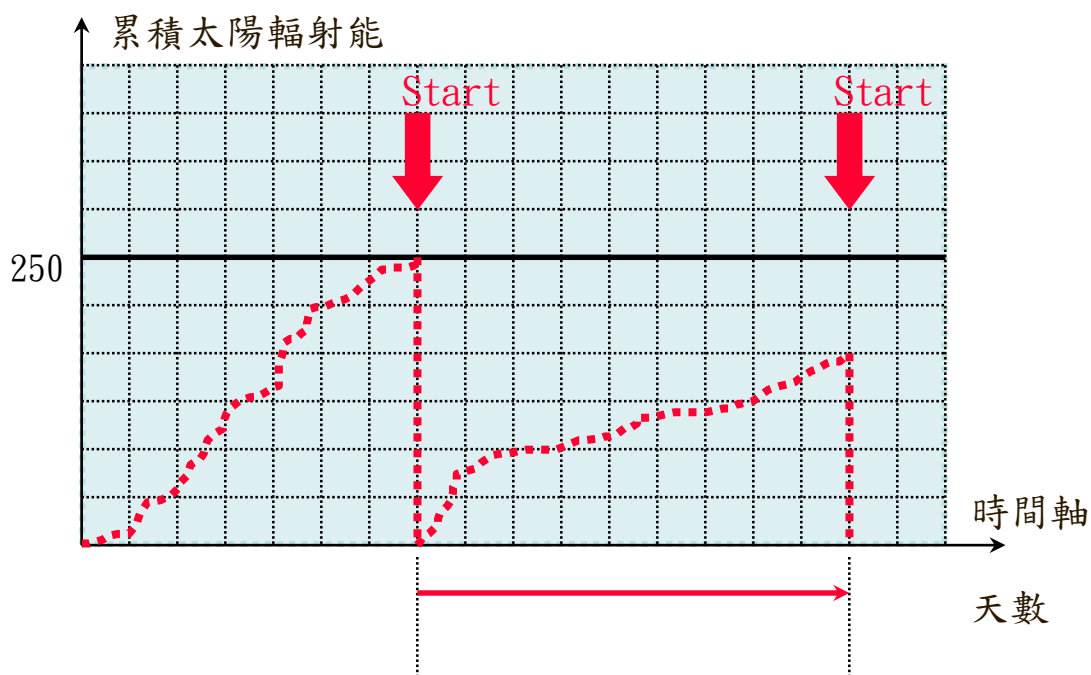
when

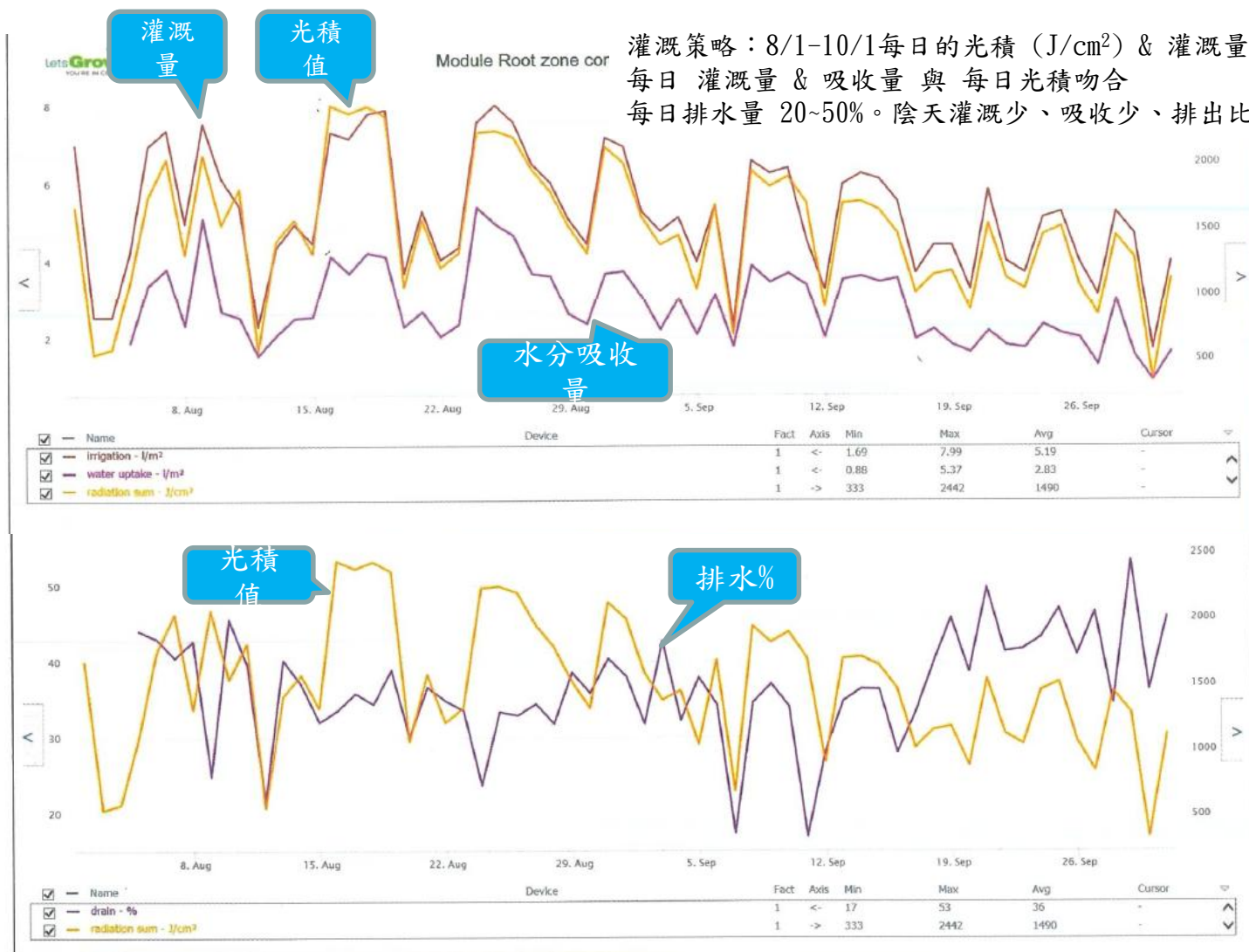
由重量決定灌溉量

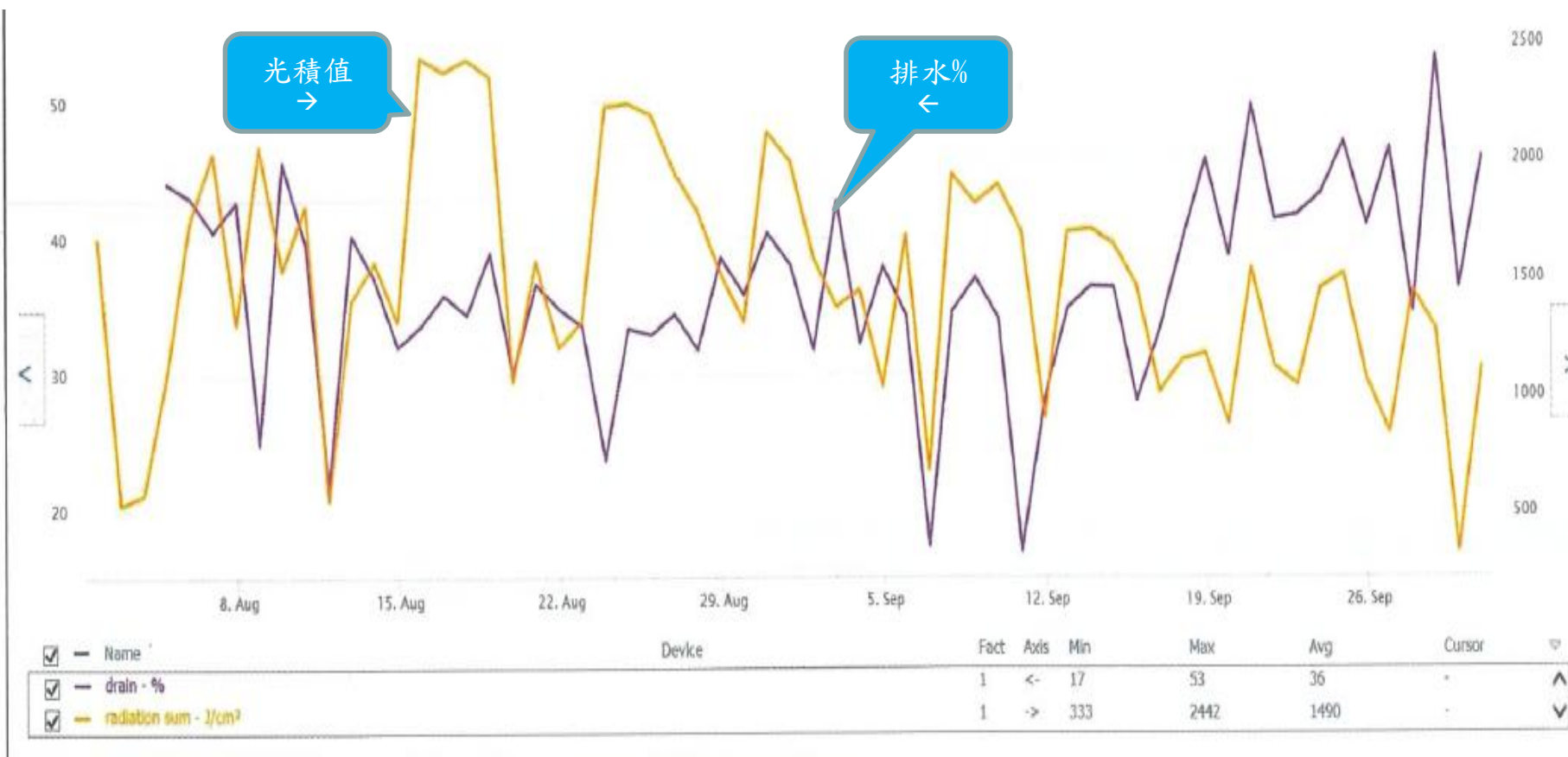
how much

智慧環控 —— 灌溉、肥灌控制

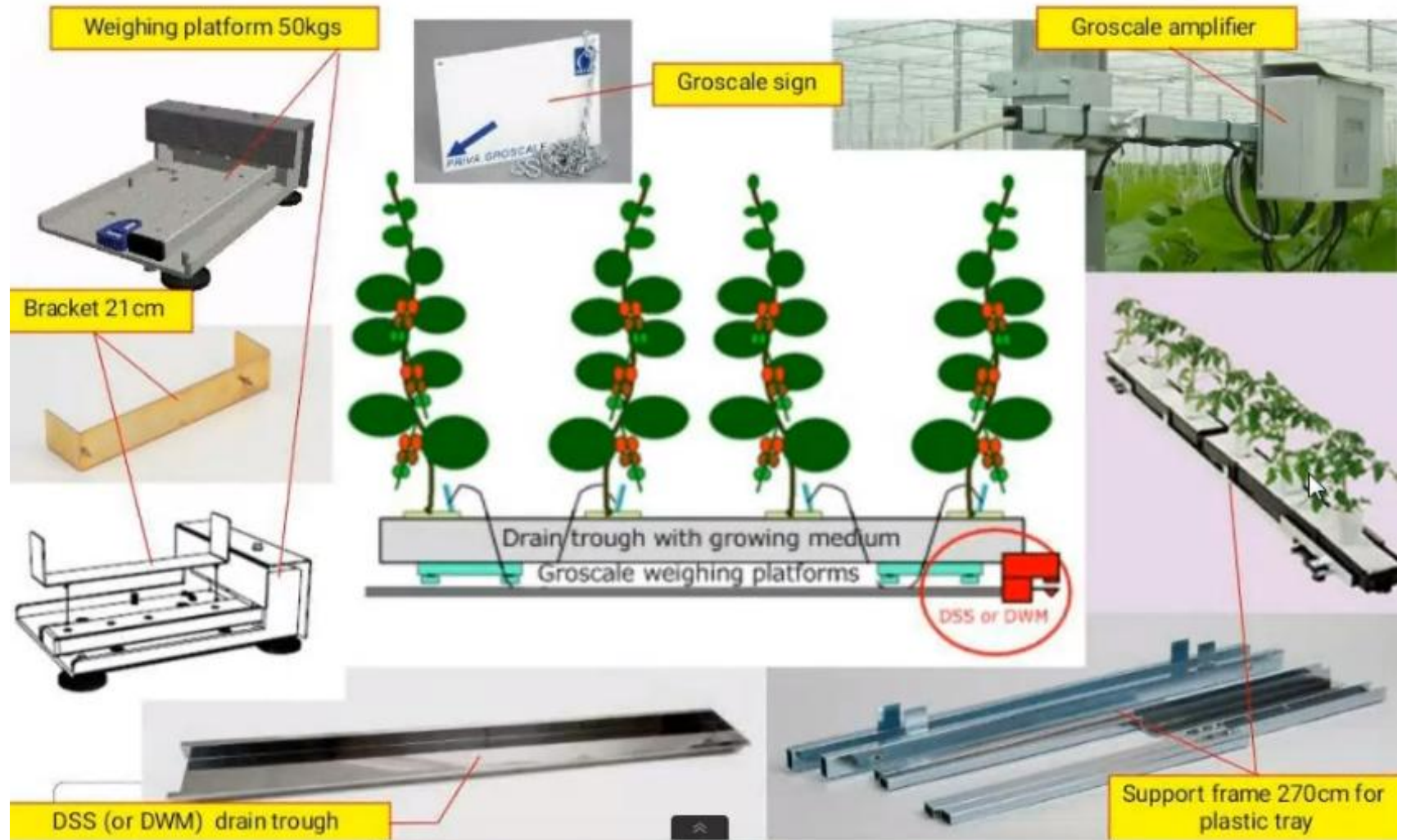
總輻射能量測
天數計算
控制策略整合
以上兩者



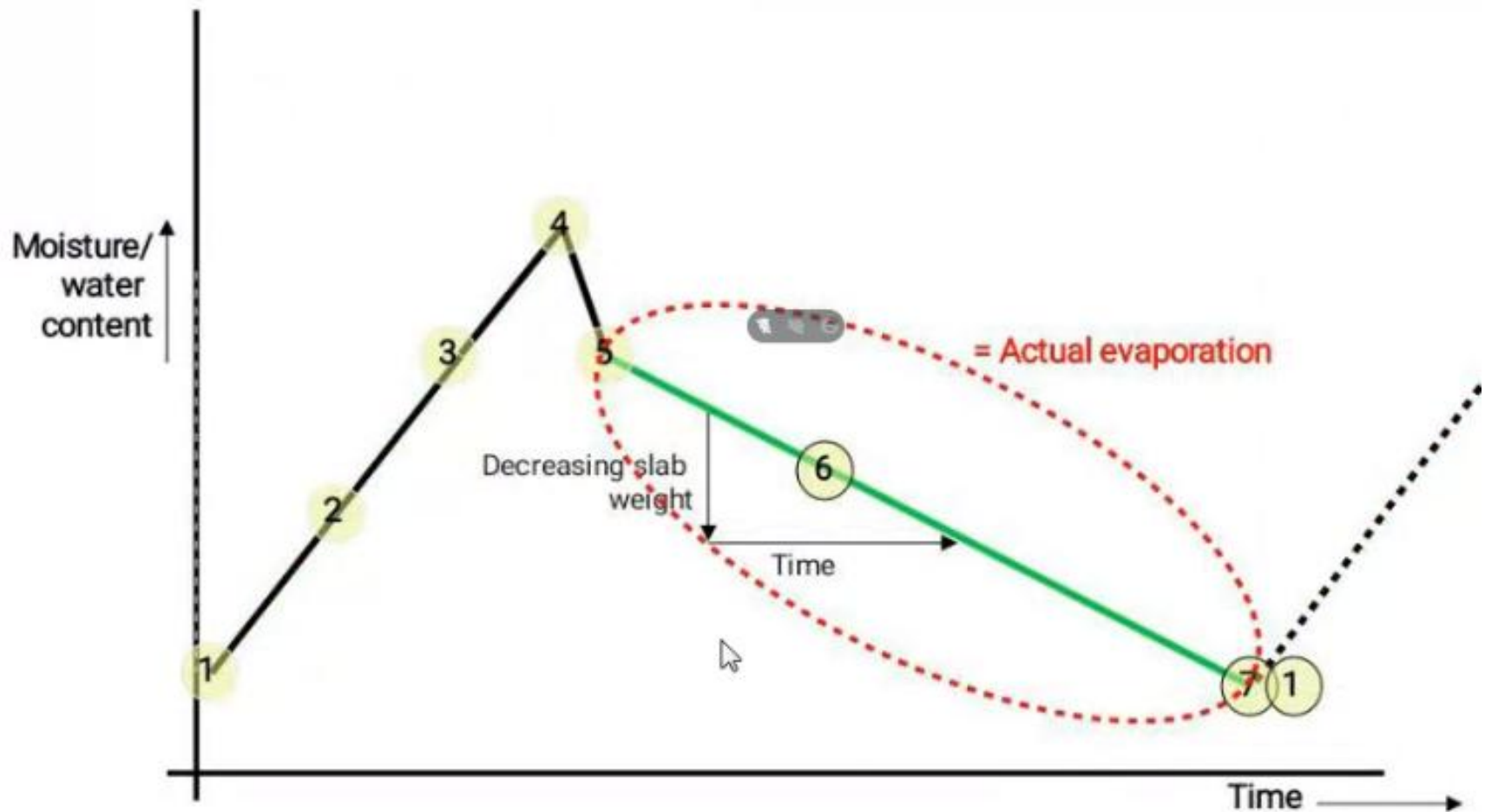




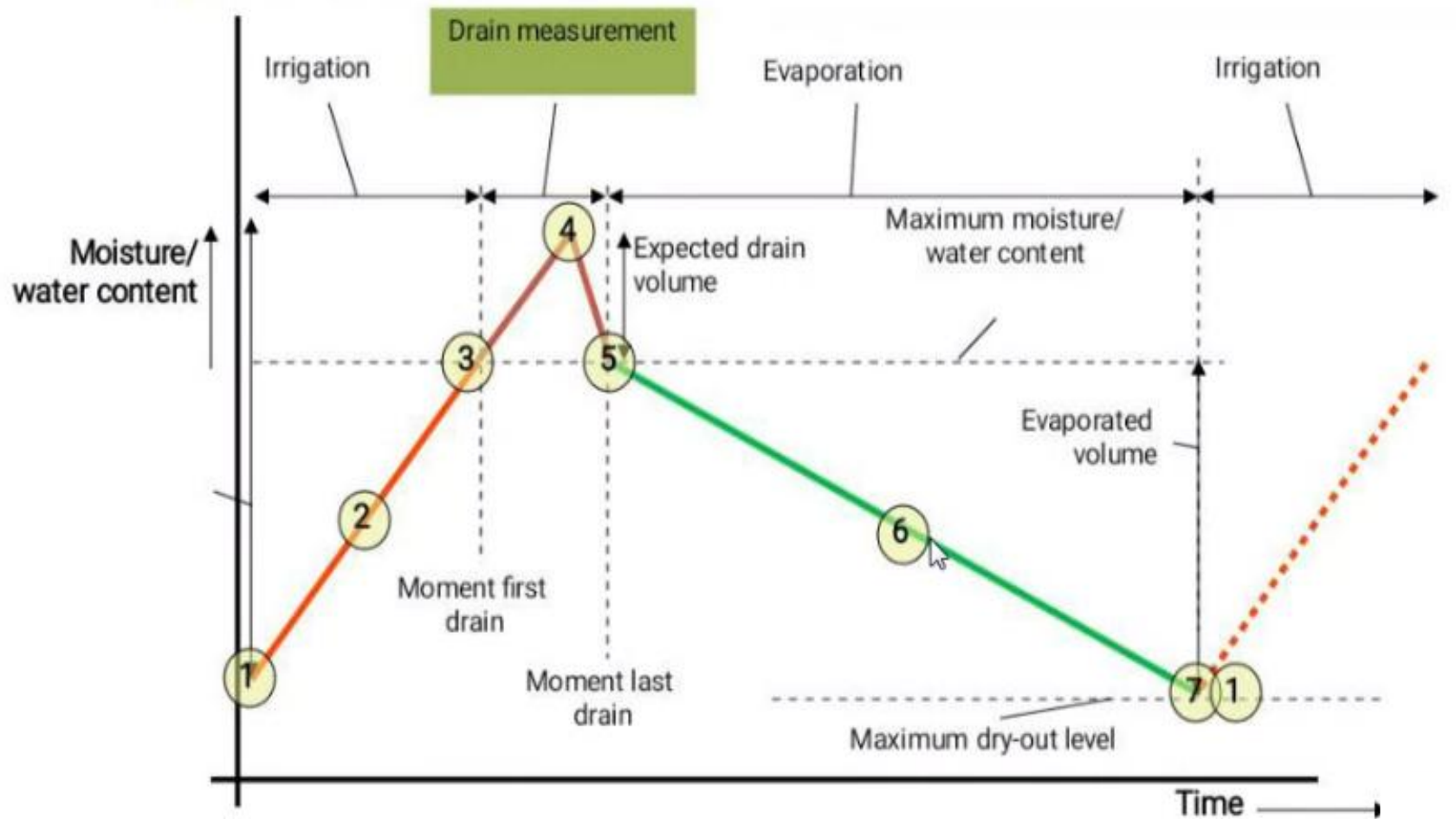
Groscale slab weighing



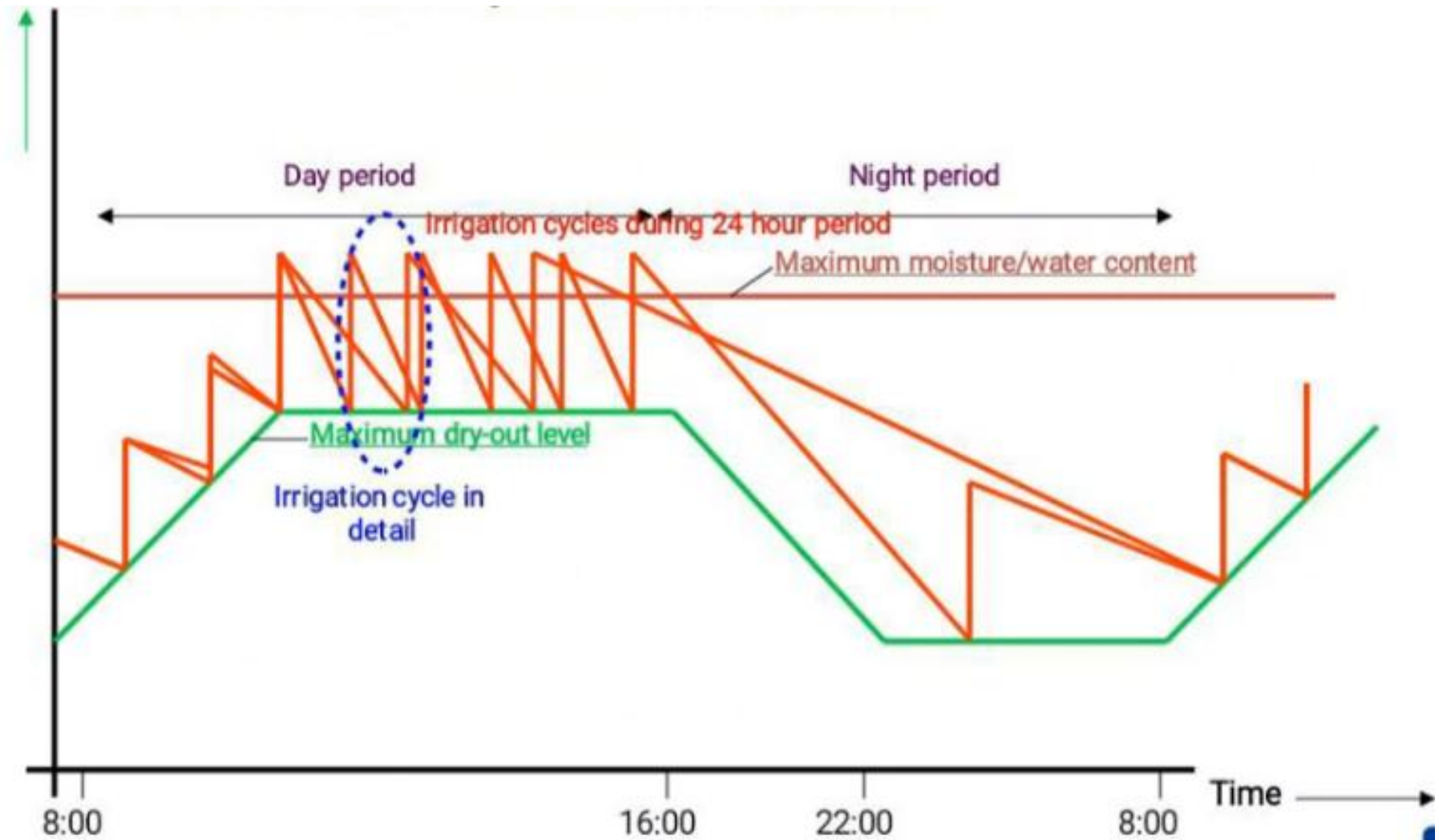
Actual evaporation



Irrigation cycle in detail



Water content and dry-out level in substrate



歡迎 (Maligayang pagdating) 歡迎 (Selamat Datang) 歡迎 (مرحبا)
 歡迎 (Chào mừng) 歡迎 (Welcome)

weifang@ntu.edu.tw



Line and WeChat ID:
weifang0257

歡迎 (Chào mừng) 歡迎 (Welcome) 歡迎 (مرحبا)
 歡迎 (Selamat Datang)