

2026 農業部農業試驗所 溫室工程與植物賦能 系列課程

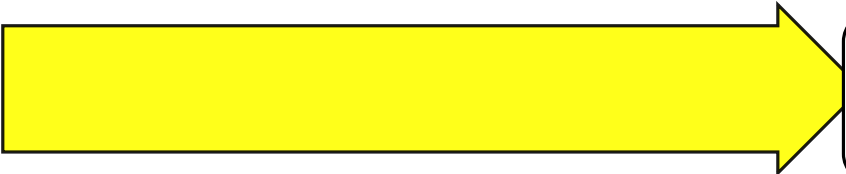
落實GPE因應 溫室外的挑戰

方煒 名譽教授
台灣大學生物機電工程學系

last updated 05/27

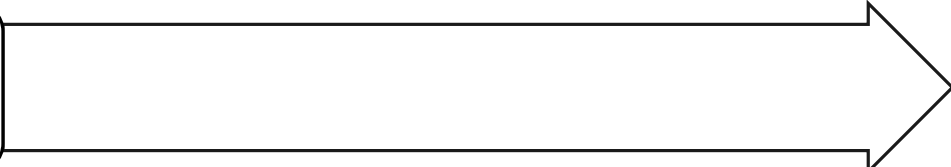
Challenge outdoor &
GPE implementation

目錄



引言

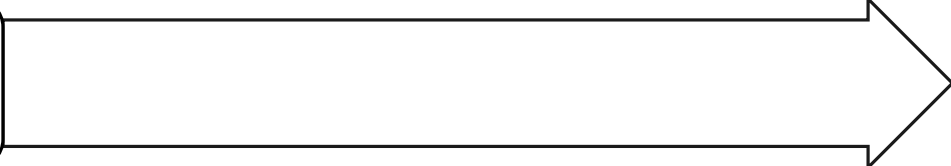
有挑戰的氣候條件與
因應



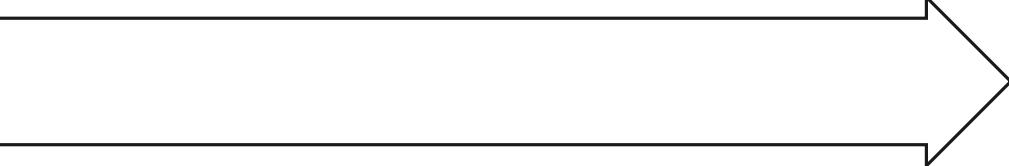
如何調整栽培策略來
適應具挑戰性的環境



GPE的實踐路線



RTR進階版



引言

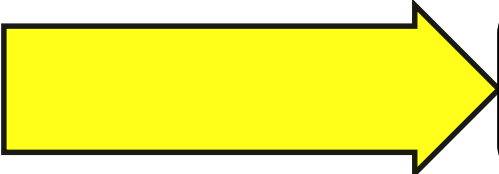
- 溫帶地區戶外很少有極端的天氣，所以較容易以簡單的溫室及技術來生產好品質的作物。
- 其它地區就有困難。因應方式：
 - 1) 接受現實，對生產不要求。
 - 2) 興建全密閉溫室、將氣候控制在適合植物生長範圍，不受戶外影響。採自然光照為主。
 - 3) 垂直農場、完全人工照明
- 短期或長期來看，那種是解決世界糧食的方法？牽涉到成本效益、技術可行性、資源使用的效益、永續等複雜考量。
- GPE: 利用植物本身的適應性，及使用相對簡單且可負擔的技術方法，來適應變化多端的戶外天氣。GPE的概念在較簡易或是先進的溫室都可以使用。

在有挑戰性氣候條件下，如何支持植物

- 在自然界，植物具有一些特性可以在極端惡劣條件下生長、繁衍。
- 溫室栽培的藝術: 結合植物的特性 及 適合的溫室環境 獲得良好的生產量及品質。
- 大多現有溫室技術是從溫帶地區發展出來，因此 GPE 需發展新的栽培策略及方法。

目錄

引言



有挑戰的氣候條件與因應

如何調整栽培策略來
適應具挑戰性的環境

GPE的實踐路線

RTR 進階版

極端戶外條件：強太陽輻射



使用**散射**的玻璃、塑膠布、塗料及遮陰網，
將直射光變成溫和散射光。

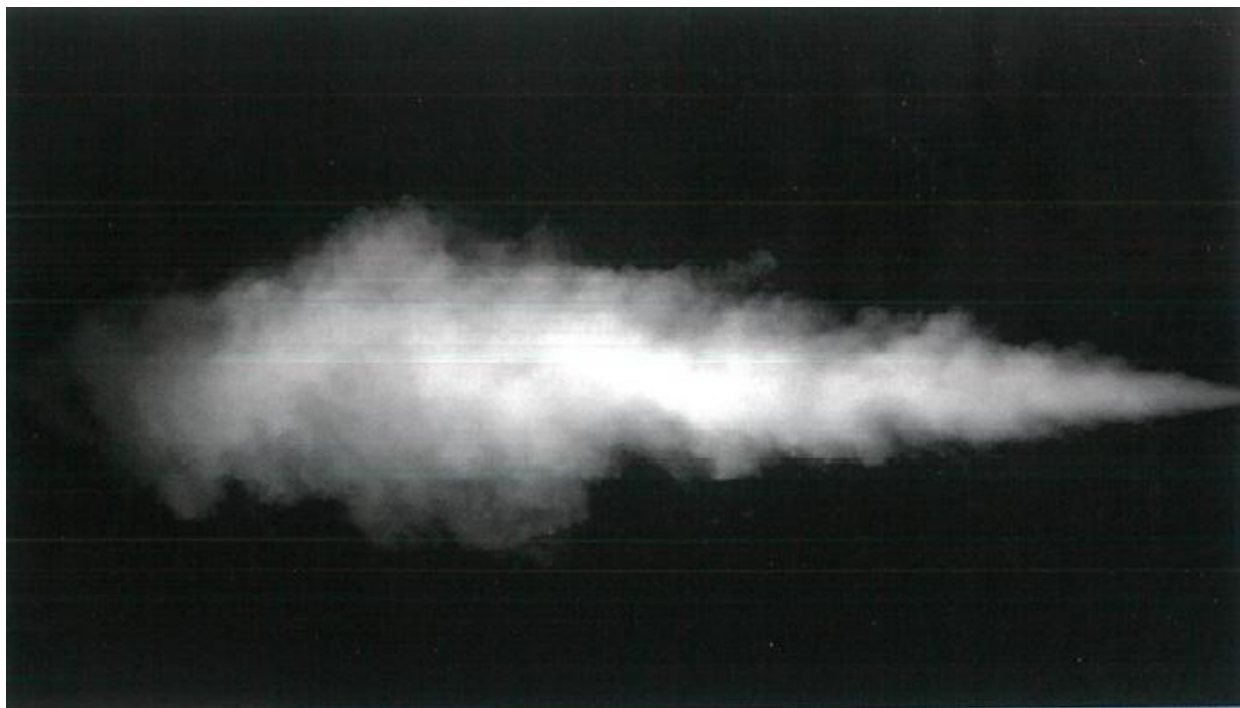
極端戶外條件：高溫、潮濕

- 不適合使用蒸發冷卻方法
- 使用空調設備效果不錯但成本高及耗能

GPE的方法：

- 將問題當作機會
- 高溫潮濕環境，搭配高光、高CO₂濃度，降低植物負荷、植株生長快速
- 濕度問題，以溫室水分平衡概念管理，溫室內AH必須高於戶外AH、使用垂直風扇確保足夠風的流動、天窗排濕、適合的品種

極端戶外條件：高溫、乾燥



- 使用噴霧降溫及加濕
- 較理想方法(GPE): 維持較高但植物可以忍受的溫度，減少通風換氣需求(自然通風)及減少 CO_2 的流失。

戶外溫室外部環境：高溫、乾燥、強風、風沙大



- 使用風扇水牆降溫效果不錯，但負壓會吸入風沙
- 正壓半密閉水牆或噴霧溫室比負壓溫室更適合

極端戶外條件：無風

Figure 7.4-1 Device to inject and distribute fresh air under a screen



- 自然通風效果差
- 溫室內安裝水平內循環扇與/或垂直風扇

極端戶外條件：溫度過低

- 戶外低溫時，使用**節能布保溫**，減少能源損失。
- 相反意見：夜間使用節能布會使植株濕度過高，例如RH 90%以上，所以節能布不能全關。
- GPE: 濕度高，是因為使用透氣性差的節能布。應使用**透氣性夠高的節能布**，並將**節能布關閉100%**，此時節能布上方溫度下降，使AH差異大，會有很好的排濕效果。
- 如果使用多孔的網，可能會因為過度排濕使得相對濕度太低及因為冷空氣沉降造成水平方向溫度的不均勻。

極端戶外條件：光線不足

- 使用LED或HPS，會影響溫度/光積值，特別是在遮黑布全關(避免對外造成光汙染)情況下，溫度可能會太高，所以需另外降溫，譬如使用空調與/或加強通風。
- GPE: 調整栽培策略來適應較高的溫度/光積值。
 - 例如: 優化葉片對光線的利用率(LAI、植株整體葉片結構)、優化光合作用(T, RH, CO₂)、優化植物負荷(單位面積內的果、莖、花苞、株數)等來減少對降溫的需求，包括降低冷卻負荷、換氣風量，或直接以蒸發冷卻來取代空調。

目錄

引言

有挑戰的氣候條件與因應

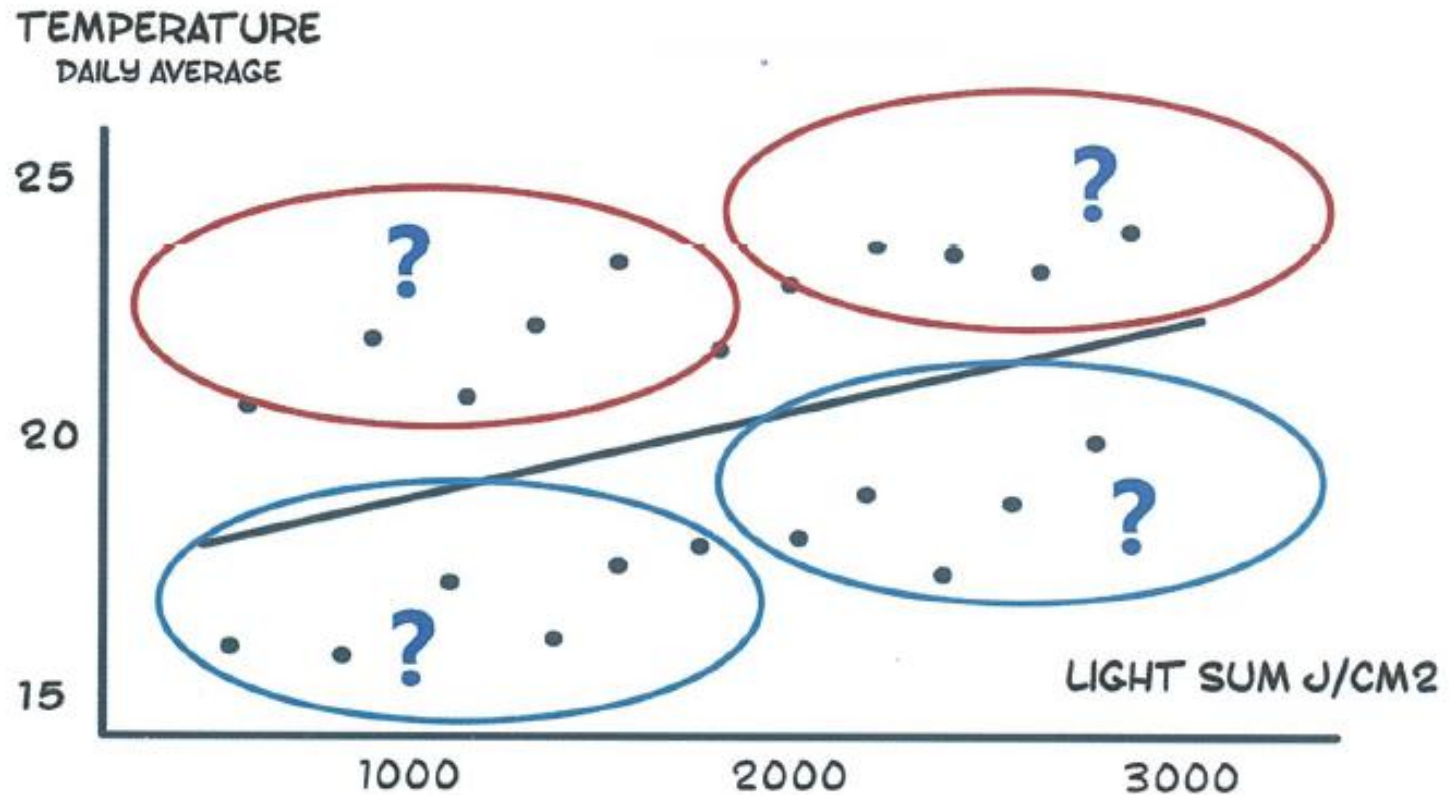


如何調整栽培策略來適應
具挑戰性的環境

GPE的實踐路線

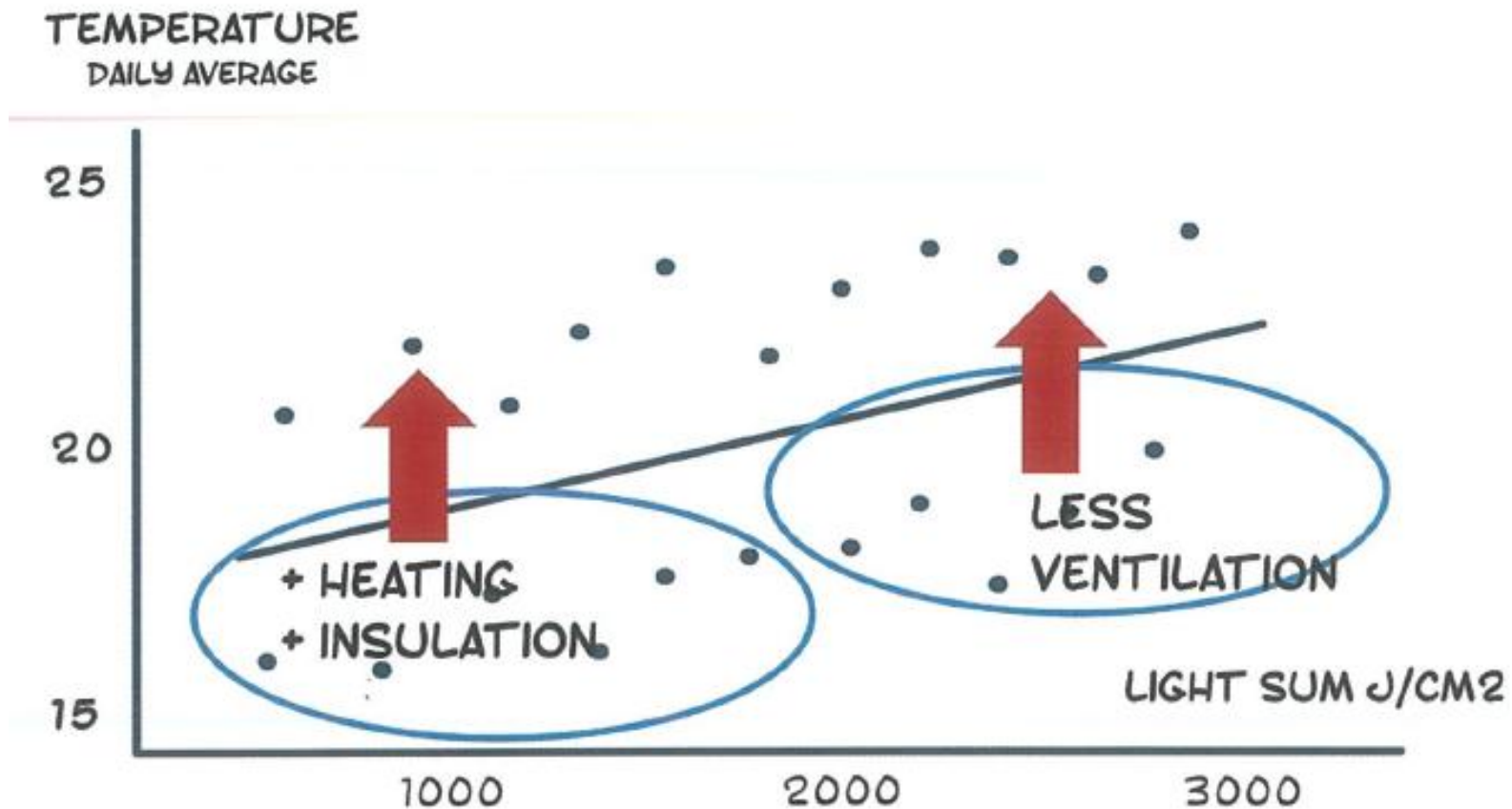
RTR 進階版

如何調整栽培策略來適應具挑戰性的環境



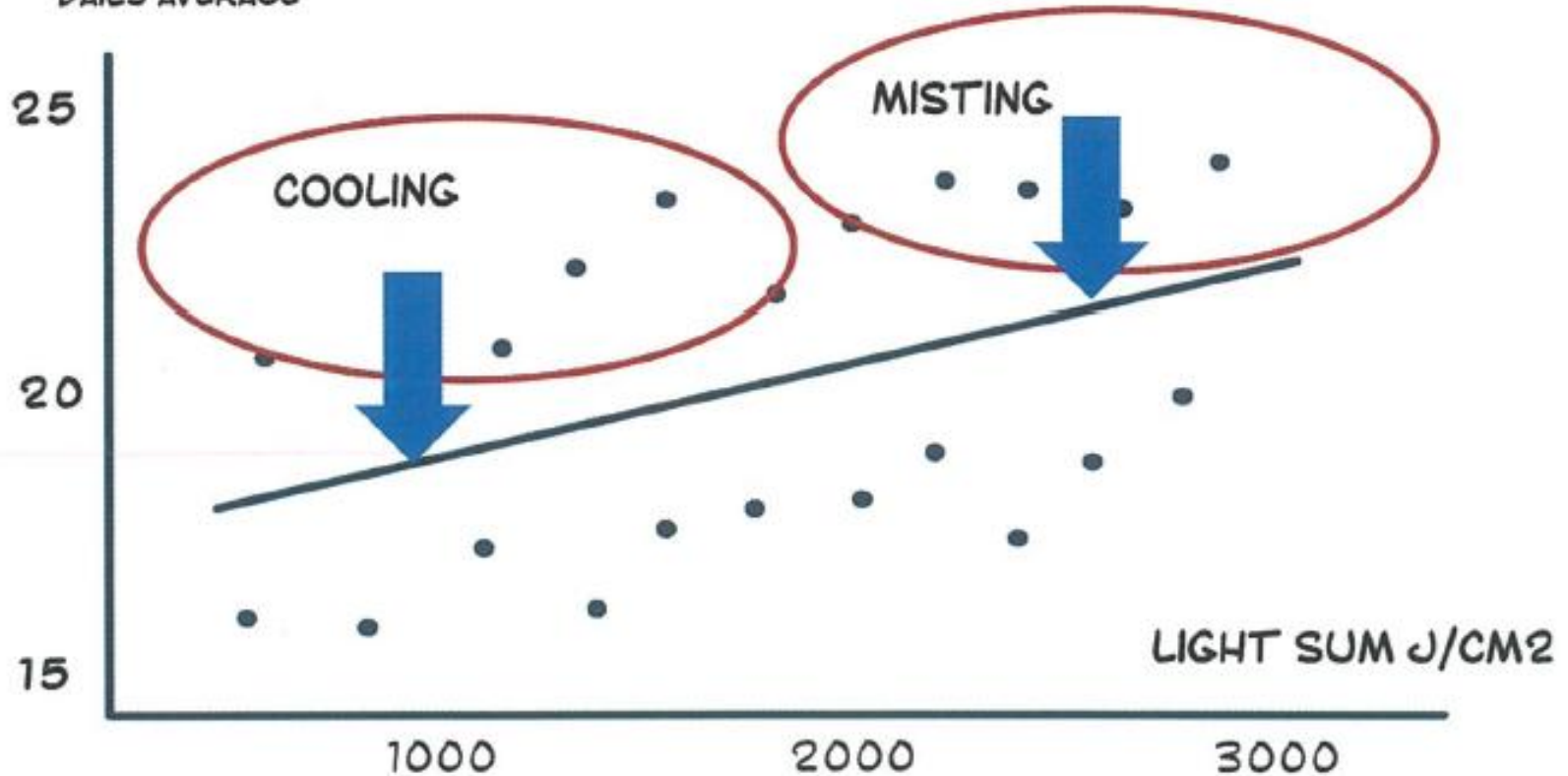
- GPE: 使用RTR的生產策略，同化物的合成及消耗達到平衡，植物會有最佳生長狀態，所有的落點會接近直線。挑戰性的環境會使各個點偏離直線，可將環境狀況分成四個象限：**低光積-高溫or低溫、高光積-高溫or低溫**

四個象限的因應方式

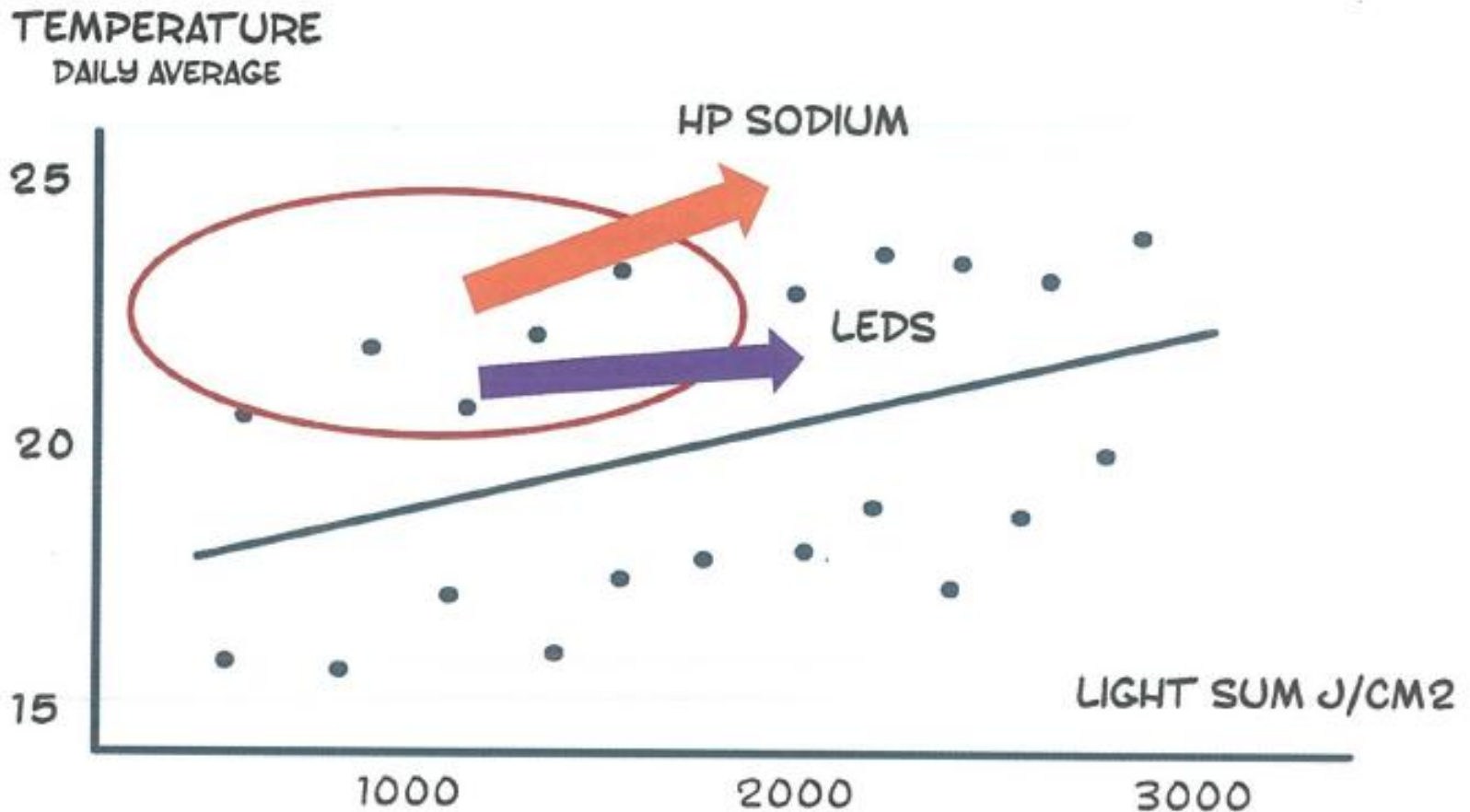


低光積，低溫：加強保溫&加溫，拉高平均溫
高光積，低溫：減少通風，拉高平均溫，可維持溫室濕度及CO₂濃度，因此提高光合作用效率。

TEMPERATURE
DAILY AVERAGE



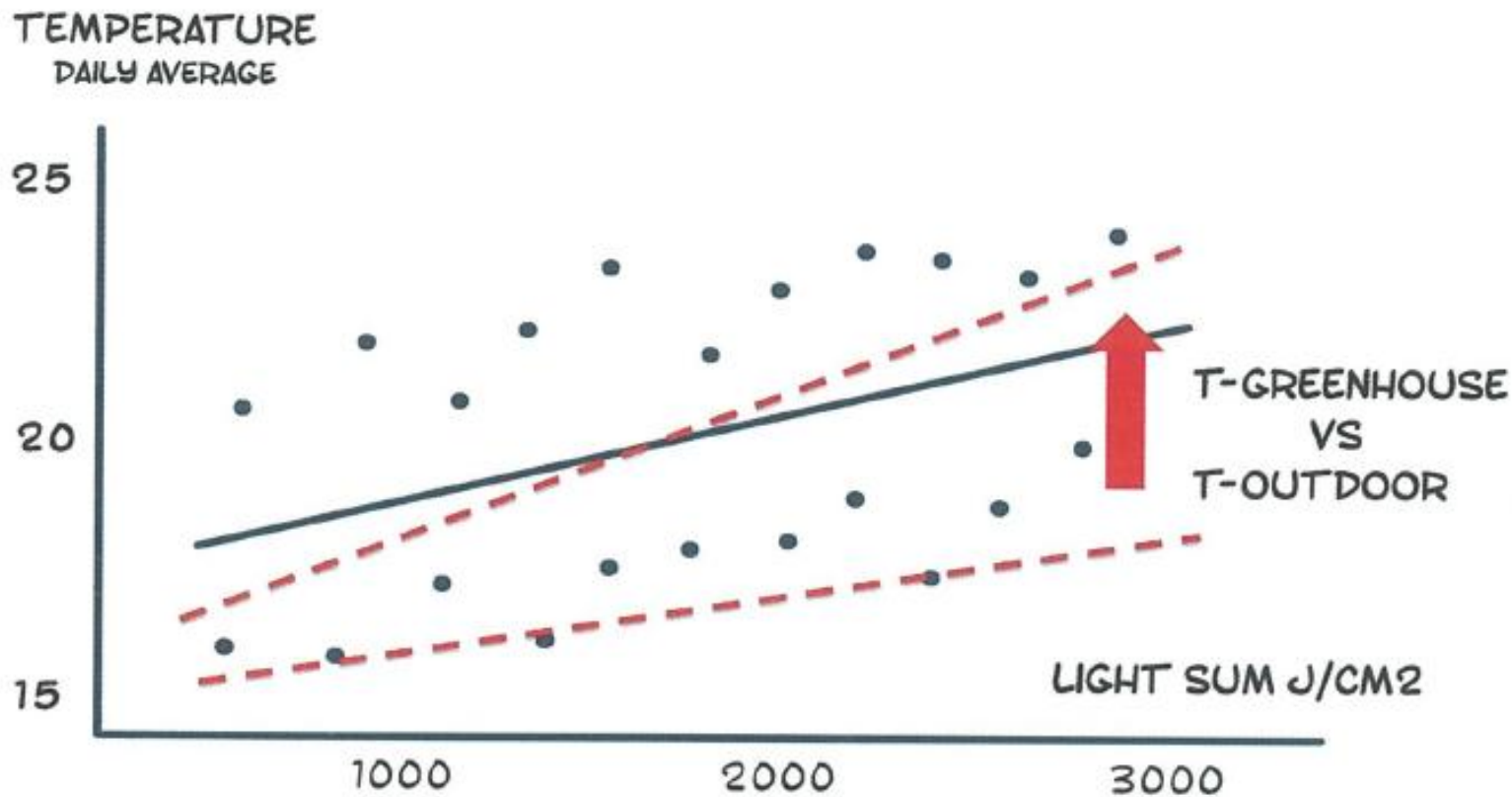
- **低光積，高溫**：採用空調或機械降溫，降低平均溫
- **高光積，高溫**：因空調或機械降溫成本高，使用噴霧或額外通風較符合成本及效益。噴霧會比額外通風好，因可保濕及減少CO₂流失。



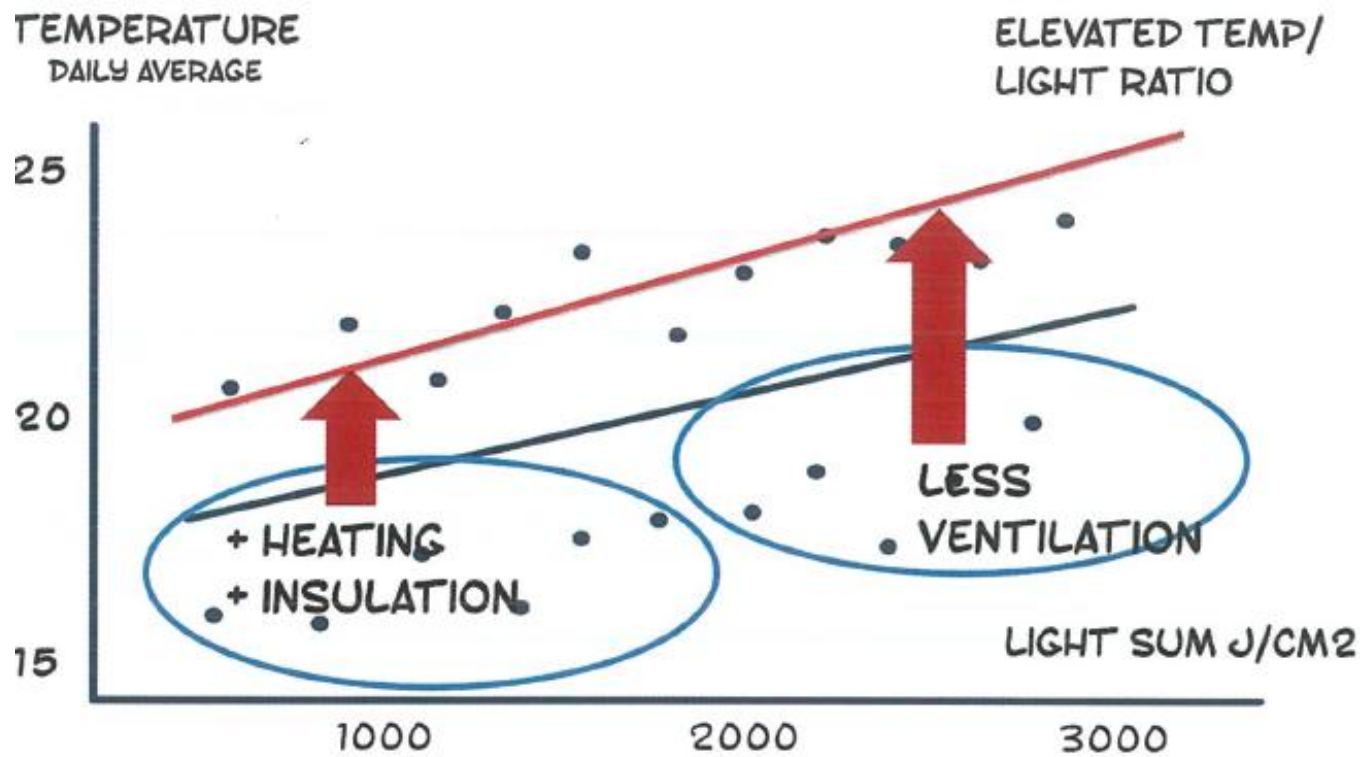
不同燈具會導致不同 RTR 值的偏離

LED補光: 不增加溫度，更接近 RTR 直線，較理想

HPS補光: 增加溫度，偏離 RTR 直線，較不理想。



- 紅線表示戶外光積與溫度的範圍。當戶外溫度及光積隨季節變化而增加時，會使得維持RTR策略變得困難，此時溫室內、外需存在溫差及AH差，才能以自然通風方式降溫及排濕。
- 實際上，在戶外高光積且高溫下，只有機械降溫（空調）才能維持在接近直線，但這樣又會提高成本。



- 利用植物本身對環境的適應性，拉高溫度，**提高RTR值的標準線**，前述大部分偏離直線的狀況，都可解決，這樣不用投資過多成本在降溫，水分及能量平衡更容易，也減少CO₂流失。
- 需植物配套條件: 優化植物的 **LAI** 及 **捕捉光線效率** (**source** 容量/m²)、調節 **植物負荷** (**sink** 容量/m²)、營養及水分調整、合適的品種。

GPE 在溫室結構與環控上的好處

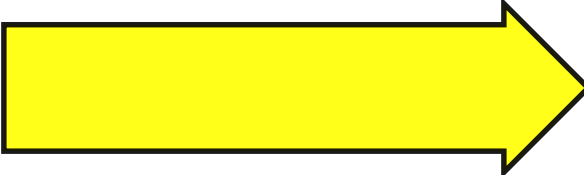
- 有更多的機會來使用節能布以降低熱能散失並提高節能效果
- 更好的利用太陽能，減少石化能源/電能的消耗
- 降低CO₂排放
- 透過自然通風與噴霧可簡單的做到溫度與濕度的控制
- 額外的設備譬如除濕與空調仍然需要，但只需小規模的使用
- 簡言之，維持在較高溫度範圍的 RTR 策略是較為永續且成本較為可負擔的的栽培系統，此系統仰賴植物本身的天賦能力，而不是依賴昂貴且耗能的硬體設備與技術。

目錄

引言

有挑戰的氣候條件
與因應

如何調整栽培策略
來適應…環境



GPE的實踐路線

RTR 進階版

子目錄

GPE的實踐路線架構

基本原理

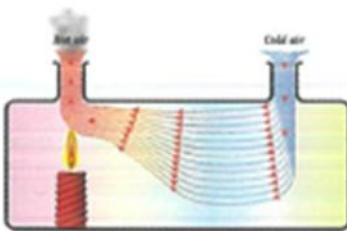
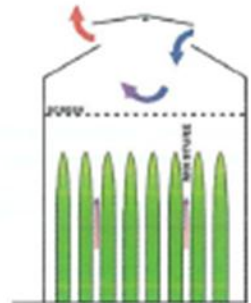
更好的量測方法

監控及解讀

具體實踐步驟

1. 改善氣候均勻度
2. 減少植物熱體輻射
3. 控制溫室水分平衡
4. 作物的同化物平衡及RTR
5. 作物的水分平衡
6. 同時使用兩側天窗
7. 整合調整栽培策略

1. 改善氣候均勻度 -- 基本原理

Principle 1 Repair unwanted openings	Principle 2 Screen strategy	Principle 3 Greenhouse design	Principle 4 Heating system design & control	Principle 5 Ventilation strategy
				
Figure 8.8.1-1	Figure 4.8.2-2	Figure 8.8.4-4	Figure 8-1	Figure 8.8.3-1
Seal all openings in facades and rooftop, fix broken panes and cracks in insulation, do not leave doors open, prevent leaks around screens at side walls, et cetera. Check also for local wet spots and water leakage.	Prevent cold air dropping through gaps in the screen. If gaps are inevitable, ensure that there is no significant temperature difference between below and above the screen.	Slopes in the greenhouse cover, plant gutters, and soil can cause horizontal airflows. Prevent these airflows by compartmentation by using vertical seals.	Ensure the heating system distributes energy homogeneously. Separately controllable side wall heating prevents unwanted hot or cold zones.	Ventilating on both the leeward and windward sides can give a more even distribution of temperature and humidity.

1. 改善氣候均勻度 -- 基本原理

● 更好的量測方法

1. 只在溫室中放一個sensor無法反應溫室溫差
2. 10個sensor/ha 使用data logger或無線sensor即時傳輸
3. 溫室內的RH差異比溫度差異更複雜: 因與溫度有關，並且通常植物內部的濕度會更高
4. 將上述資料合併環控電腦的戶外資料，一起解讀找溫差以及濕度差異原因。
5. 使用煙霧測試，偵測異常的氣流

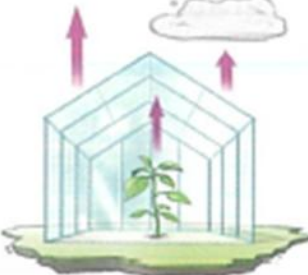
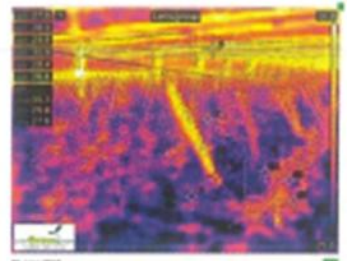
● 監控及解讀

- 溫差通常是多因子造成
- 足夠的監控過程及解讀資訊

● 具體實踐步驟

作物會對溫室均勻度有反應，可以觀察不同位置作物生產的狀況，並使用多個溫度紀錄器，比對經過一定時間後兩者之間的關連性，來找出原因

2. 減少植物熱體輻射 -- 基本原理

Principle 1 Process	Principle 2 Effects on the crop	Principle 3 Screening against heat emission	Principle 4 Monitoring heat emission	Principle 5 Monitoring energy balance of the plant
				
Figure 3.4.3-1 Heat emission from crop depends on roof temperature: ✓ Cloudiness ✓ Temperature outside ✓ Windspeed ✓ Precipitation	Figure 3.4.3.1-1 ✓ Evaporation ✓ Root pressure ✓ Calcium transport ✓ Assimilates transport ✓ Cell elongation ✓ Condensation ✓ Plant health	Figure 4.8.2.1-1 Effect of partial screening: no influence on temperature or humidity Note that partial screening is only advised when temperature difference between inside / outside is small.	Figure 3.4.3-1 Pyrgeometer = heat emission of the glasshouse roof Net radiation = irradiation + heat emission at crop level	Figure 11.8-1 Monitoring the effect of net radiation on the crop by a thermographic camera

● 更好的量測方法

- 作物上方放置淨輻射計
使用熱像儀 or 紅外線溫度計
內網上方放置吸入式溫濕度盒
- 環控電腦程式可以比對戶外天氣狀況及淨輻射計，決定最適合開網&關網時間、並評估內網關閉後對溫室水分平衡及天窗通風的影響。
- 如果沒有淨輻射計，熱體輻射簡單算法：
 $-5 \text{ W/m}^2\text{°C} \times (\text{作物與內網/屋頂的溫差})$

● 監控及解讀

- 將多種設備數據及氣象資料放在同張圖形比對

目標：防止夜間的热體輻射/減少清晨及傍晚的热體輻射

內網調控的不同思維

傳統思維	盡量增加內網打開時間(增加光照)，只有戶外低溫時再關網保溫
GPE	盡量關閉內網，使溫度和濕度穩定
傳統思維	作物需日夜溫差、夜間要早點降溫，所以傍晚時不用關網，除非戶外溫度太低時才需要關網
GPE	可以先關網80-90%，可減少熱體輻射，又不會讓溫室溫度下降速率變慢(by 天窗)
傳統思維	日出時盡可能增加清晨光線進來，所以日出時盡早開網。此外，溫度突然沉降有可以正面刺激植物。
GPE	認為寒冷天氣屋頂溫度太低，提早開網熱體輻射會太多

Cloudiness
Scattered

Pyrgometer -60 W/m²
Outside Radiation 0 W/m²

Outside Temperature 5 °C
Wind speed 4 m/s
Greenhouse air temperature 20 °C
Greenhouse air humidity 85 %

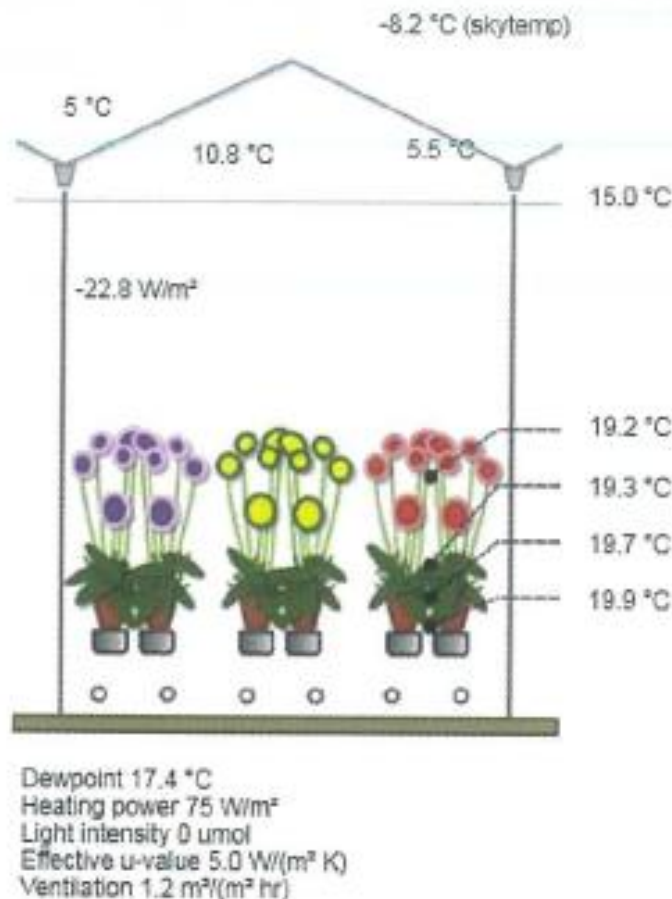
Greenhouse cover
Standard horticultural glass

Screen Window aperture 0 %
☒ Luxous 1347 FR
☐ Obscura 10070 WB+B
☐ Perf-Fclean (10x10)

Crop
Gerbera 非洲菊

0 % heating above crop
60 % heating between crop
40 % heating below crop

Lighting 0 μmol/m²s
☐ HPS Lighting (1.75 μmol/J)



Total transpiration: 18.5 g/(m²hr)

from layer 1 (0.10 m²): 0.3 g/(m² hr)

from layer 2 (0.80 m²): 5.8 g/(m² hr)

from layer 3 (0.80 m²): 6.3 g/(m² hr)

from layer 4 (0.80 m²): 6.1 g/(m² hr)

本模組可計算溫室內作物的熱體輻射量、蒸散量、加熱能耗、溫室內露點溫度、屋頂、內網上方與內網溫度及通風風量率等

作物上方的加熱
作物間的加熱
作物下方的加熱



Version:
November 2017

LetsGrow.com
GROWING DATA ONLINE

多重內網與節能布 允許針對室內外狀況做更彈性的調控



3. 控制溫室水分平衡 -- 基本原理

Principle 1 Avoid unnecessary input	Principle 2 Monitor the AH trend	Principle 3 Monitor the AH differences	Principle 4 Control through ventilation	Principle 5 Control via condensation
Figure 4.5.0-1	Figure 4.5.0-4	Figure 4.3.4-0	Figure 4.3.6-1	Figure 4.3.5-1B
Creating balance at night starts at the input side by avoiding unnecessary evaporation.	Monitor the moisture balance by the trend of the absolute humidity (AH) in the greenhouse.	Monitor AH at three points: below the screen, above the screen and outdoors to assess the opportunities for moisture transfer.	The outlet of moisture by ventilation depends on the difference between absolute humidity (ΔAH) inside and outside.	The outlet of moisture by condensation depends on the difference between dew point temperature of the air and the temperature of the greenhouse coverage.

要保持夜間的水分平衡，首先要避免不必要的蒸散

透過監測AH的變化來了解是否有維持水分的平衡

監測三個位置的AH來了解水分的轉移

透過換氣來排濕
需計算 ΔAH

透過冷凝來排濕
需計算室內露點溫度

● 監測及解讀

要更詳細了解水分平衡，以下參數最好都能量測並繪趨勢圖

- 溫室內 (內網下方)
空氣溫度、相對濕度、絕對濕度、露點溫度
葉片溫度與地面輻射能
- 溫室內 (內網上方)
空氣溫度、絕對濕度
- 溫室外
空氣溫度、絕對溼度、風速、太陽輻射能
地面輻射能
- 內網位置 (開啟比例、開閉時間點)
內網1、內網2、節能布
- 加熱管路溫度
- 天窗位置 (開啟比例)
迎風面、背風面

量測溫、濕度位置：植物區、內網上方、戶外

Introduction Moisture discharge Moisture transport Energy consumption Energy screens Ventilation rate

Moisture control by injection of outdoor air.

室外

Outside

Temp 18 °C

RH 70 %

Absolute Humidity AH 9.04 g/kg

室內

Inside

Temp 20 °C

RH 85 %

Absolute Humidity AH 12.47 g/kg

Injection fan

Flow 5 m³/m².hour

Moisture exhaust

Moisture exhaust 20.4 g/m².hour

導入的風量率

排濕速率計算

$$5 \times (12.47 - 9.04) \times 1.19 \text{ kg/m}^3 = 20.4$$

監測內網下方與內網上方的 溫度 T 與絕對濕度 AH
並探討

內網局部開啟對上述兩者的影響為何?

通風對內網上方的影響為何?

熱體輻射對上述兩者的影響為何?

內網的縫隙對上述兩者的影響

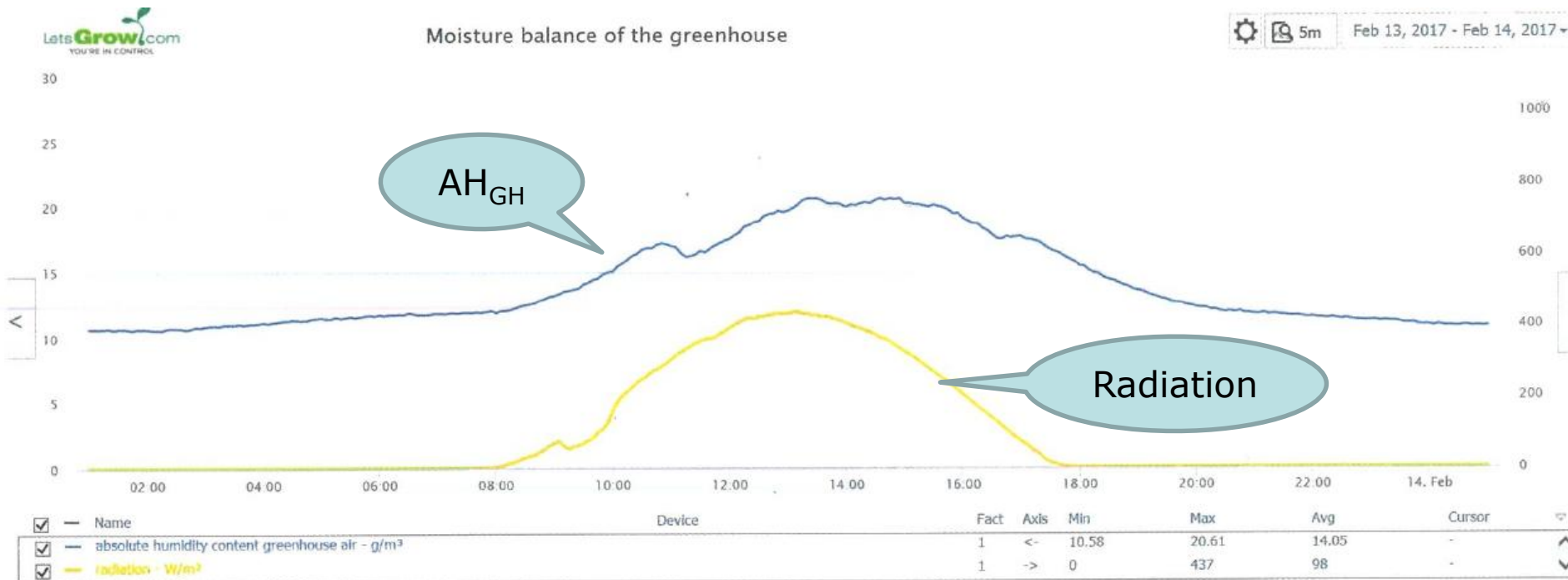
風速對上述兩者的影響為何?

內網打開或關閉的瞬間，對上述兩者的影響為何?

監測熱體輻射並了解對內網上、下與室外所有參數的影響

Figure 4.5-4 Absolute Humidity during the day

溫室水份平衡變化可透過 AH_{GH} 來監測

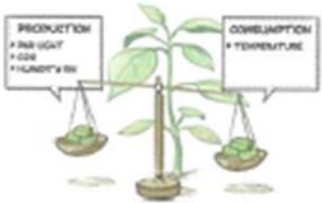
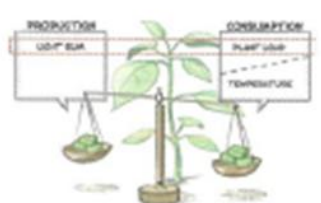
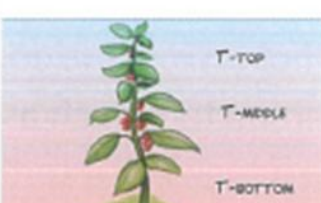


- 觀察AH的變化，無論RH或是HD值是高或低，用AH可以代表水份平衡的狀態。
 - ☐ 如果AH減少: $\text{output (排濕)} > \text{Input (水份蒸發)}$
 - ☐ 如果AH增加: $\text{Output} < \text{Input}$
 - ☐ 如果AH穩定代表達到水份平衡: $\text{Output} = \text{Input}$

熱水管溫度控管

傳統	會針對室內相對濕度值來設定最低熱水溫度來控制熱水管溫度，確保植株活力及避免空氣靜止不流動狀態。
GPE	認為傳統方式太耗能，佔 40% 加溫成本。改用固定的熱水管與空氣的溫差來設定，例如固定溫差10°C，可避免不必要的加溫及蒸散作用，達到活化植株及避免空氣靜止。

4. 作物的同化物平衡及RTR -- 基本原理

Principle 1 Maximizing assimilates production with PAR, CO ₂ and RH	Principle 2 Optimize LUE by low sink size	Principle 3 Monitoring RTR (Ratio of Temperature to Radiation) on a daily basis	Principle 4 Monitoring light sum and plant load year-round	Principle 5 Controlling plant load and distribution of assimilates by the vertical temperature profile
				
Figure 3.6.3-4 For maximum growth, focus on the production side. With increasing radiation, ventilation strategy is more based on humidity and CO₂ than on low temperature.	Figure 3.6.7-1 For maximum light use efficiency (LUE), consumption of assimilates maintain a low plant load (sink size), so balance is created by a low ventilation rate resulting in high CO₂, humidity and temperature	Figure 6.8.2-1 Balance can be achieved on a daily basis with a constant ratio between light and temperature. The result is a healthy and resilient crop.	Figure 6.8.3-1B Balance can be achieved by planning a "low" plant load year round based on the long-term light sum. The result is a better light efficiency (principles 1 and 2) in combination with a healthy and resilient crop.	Figure 3.6.8-1 A low plant load is the result of the temperature of the fruits or flower buds being high. It is influenced by the RTR and the vertical temperature profile of the crop. Regular crop management is also essential.

TEMPERATURE
DAILY AVERAGE

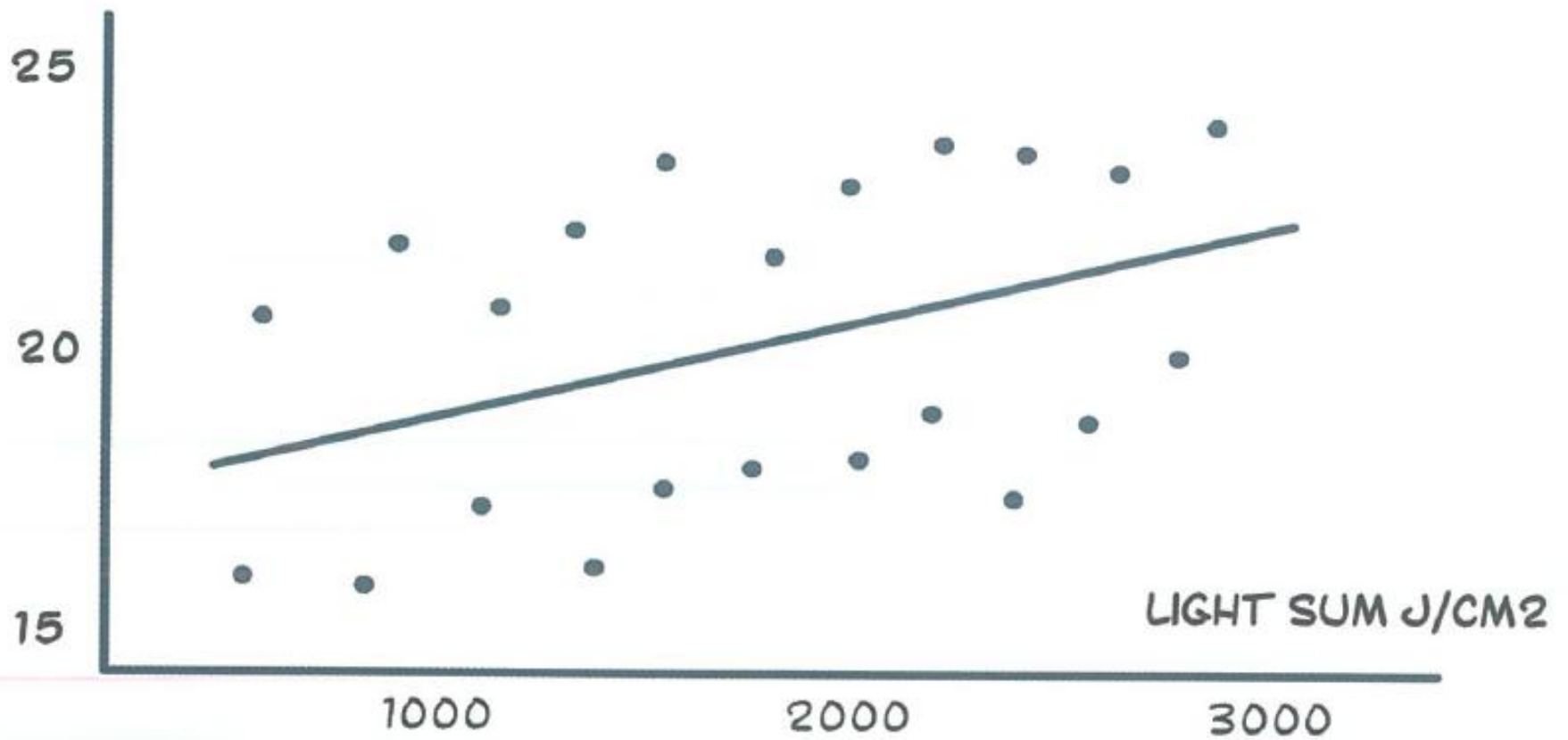
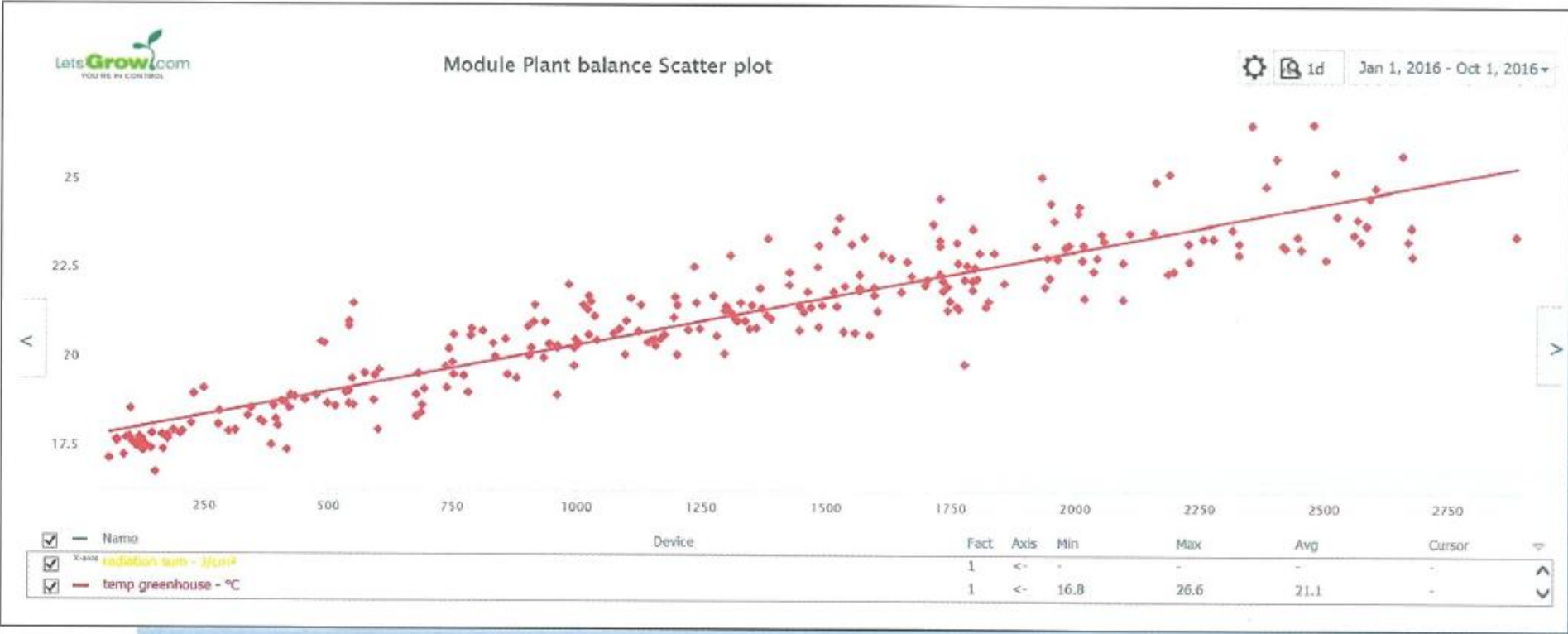


Figure 10.4.3-1 RTR scatter plot recorded by the LetsGrow Plant module



Fact	Axis	Min	Max	Avg
<C=	-	-	-	-
<-	16.8	26.6	21.1	°C

DLI = 240 2400 1250 J/cm2

RTR = 7.0 1.10 1.68

量測紀錄的項目

日總 DLI

目標的日均溫

實際的日均溫

● 具體調整步驟:

目標是要確保 RTR 值 接近 RTR 趨勢線

1. 依據光積值調整天窗設定值
2. 依據光積值調整日夜間轉換，例如晴天時，光積多，可以延長白天時數，使同化物全部運輸到果實或其他部位。
3. 依據光積值調整夜間有加溫及天窗設定。
 - 晴天時，可以增加夜間溫度，使有足夠時間讓醣類從葉片轉移到其他部位。
 - 陰天時，因葉片沒有蔗糖可以移轉，可以降低夜間溫度。
4. 增加夜間溫度不需提高加溫能力，只需提前關內網即可。

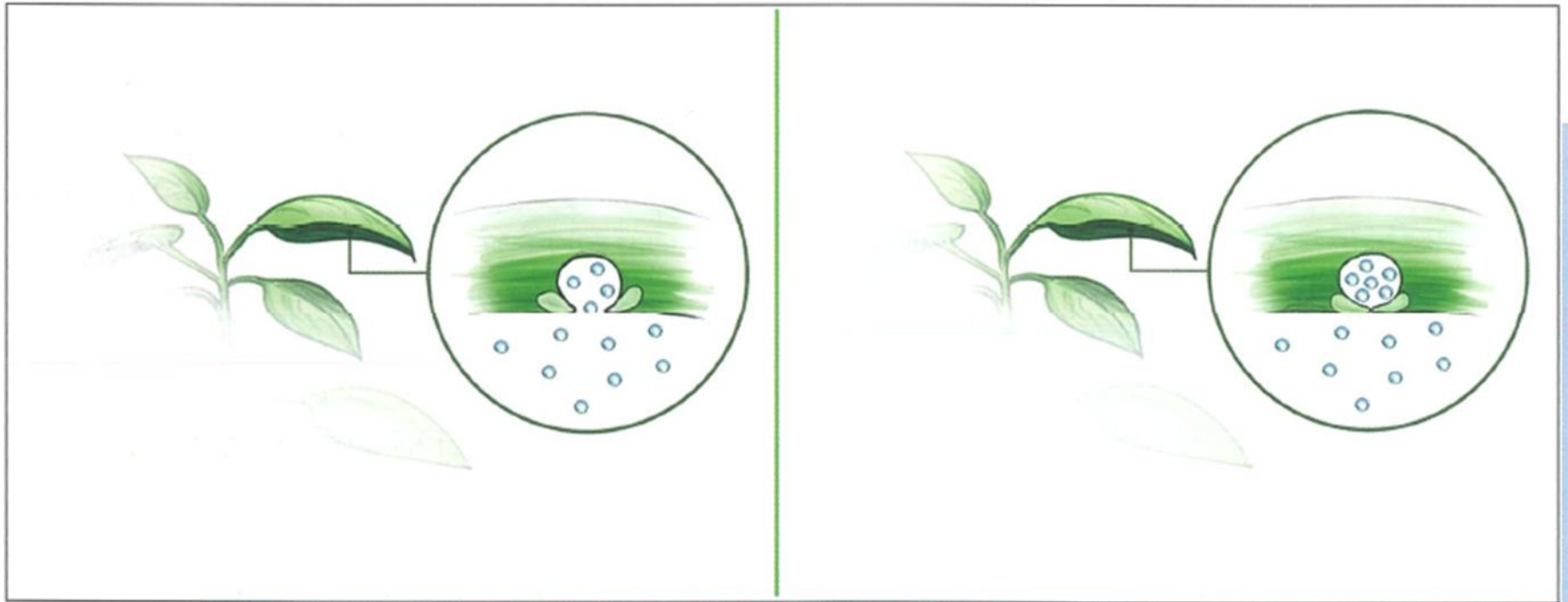
5. 作物的水分平衡 —— 基本原理

Principle 1 Energy input: The driving force behind evaporation	Principle 2 Radiation evaporation	Principle 3 Convection evaporation	Principle 4 Monitoring water balance by VPD	Principle 5 The role of stomata
				
Figure 3.5.1-1 There are two different ways of energy transport and evaporation: Radiation evaporation -energy transport without contact. Convection evaporation - Energy transport through air movement.	Figure 3.5.3-1 Evaporation rate depends only on radiation. RH influences stomata opening. With increasing radiation level, ventilation strategy is more based on humidity and CO₂ than on low temperature.	Figure 3.5.2-1 Evaporation rate is dependent on $T_{\text{leaf}} < T_{\text{air}}$ Air movement > 0 $RH < 100\%$	Figure 3.5.6-1 Low VPD ($< 1.2 - 1.5 \text{ kPa}$) is an indication for open stomata and no water stress.	Figure 3.5.5.1-1 

● 監控及判讀

1. 葉溫與氣溫的溫差 反應 作物的能量平衡及水份平衡狀態
2. 葉溫改變 反應 氣孔開關及VPD變化
3. VPD值與飽差及相對濕度關係

Figure 10.5.3-1 A / B Stomata and VPD



● 具體調整步驟：

通風設定改以濕度為主，取代以溫度為主設定

1. 傍晚減少天窗通風：輻射熱能小可避免高溫、可觀察濕度如何增加與氣孔維持開啟
2. 有經驗效果不錯後，逐漸抓到天窗關閉的時機
3. 日出時減少天窗通風：先嘗試將天窗開啟角度關小一點，可觀察太陽輻射逐漸增強，如何維持較低的VPD，讓蒸散速率不會太快導致根系吸水來不及狀態。
4. 逐漸用濕度取代溫度來控制通風設定，並量測葉溫確認水分平衡及能量平衡。

6. 同時使用兩側天窗 -- 基本原理

同時使用兩側天窗，會比傳統只使用背風面 lee side 天窗環境更均勻、微氣候更好控制，溫室可保留較多的CO₂。

● 具體調整步驟:

1. 逐漸提前 wind side 的開啟時機，盡量與 lee side 同時。可觀察到天窗總開口角度會變小，天窗內外的氣體交換也會減少
2. 嘗試 wind side 先開，然後接著開 lee side
3. 注意強風及降雨時恢復只用 lee side 模式

GPE 把天窗當成調節植物水分平衡、能量平衡、CO₂ 與濕度均勻性的工具。因此傾向使用 wind side 與 lee side 兩側天窗，且在某些濕度控制情境下會先用 wind side，再補 lee side。

自然通風的基本物理是：風打到迎風面會形成較高壓，背風面形成較低壓；空氣通常由迎風側開口進入，再從背風側開口排出。這也是為什麼天窗開哪一側，不只是「開口面積」問題，而是會改變整棟溫室裡的氣流路徑、濕度分布、CO₂ 分布與作物冠層微氣候。

在 GPE 的作法中，濕度控制不是傳統的「加熱＋開窗」為主，而是盡量讓內網維持作用，讓水氣穿過內網到上方空間，再透過上方通風帶走或讓其在冷玻璃處凝結。GPE 會使用 **wind side**，然後再使用 **leeside**，這與傳統思維不同。

傳統上很多溫室偏好先開 **lee side**，理由是比較安全：較少冷風直灌、雨水風險較低，也比較不會造成作物劇烈擺動。尤其在強風地區，迎風側通風雖然換氣率較高，但也可能增加作物與迎風側天窗的受損風險，因此一些地區會偏好 leeward ventilation。

GPE 挑戰「只用 lee side」的習慣，原因在於：只靠背風側抽吸，氣流不一定會均勻穿過每個跨距與作物區，可能造成某些區域較濕、某些區域較乾，或 CO₂ 與溫度分布不均。相對地，若 wind side 與 lee side 共同開啟，空氣移動、水氣交換與環境 CO₂ 分布會更均勻。

操作步驟

第一步：先判斷目標，不是直接開窗

先看作物區與內網上方的溫度、RH/AH、VPD、植物溫度、風速、風向與是否下雨。GPE 的精神是以植物的水分、能量與同化物平衡為核心，而不是只用室溫或濕度單點數值做反應式控制。這是以植物自然活力、植物生理與物理原理為基礎的整合式栽培方法。

第二步：在內網關閉或半封閉、需排濕時，先小幅開 wind side

目的不是把冷風直接打到作物，而是讓迎風側把外氣「推入」內網上方或溫室上部空間，促進水氣由作物區經內網向上移動，再由上部空間排出。這比單靠背風側抽吸更主動，也較能避免只在局部形成濕氣滯留。

第三步：若排濕或降溫能力仍不足，再逐步加入 lee side

這時 lee side 不是替代 wind side，而是成為補充排氣與平衡氣流的出口。兩側一起使用時，單側天窗不必開得很大，整體通風會比較均勻、可控。wind side 與 lee side 同時用於通風時，天窗不需開得那麼大，通風更均等、可控；而且把外氣吹入溫室，比單純把溫室空氣吸出去更有效，因此兩側通風可形成較均質的氣候。

第四步：需求降低時，通常反向收回

也就是先降低作為補充容量的 lee side，再降低 wind side；但遇到強風、陣風、雨水、低外溫或作物已出現冷風壓力時，wind side 必須優先受限制，甚至改以 lee side 為主。這裡沒有一個放諸四海皆準的「wind side 幾%、lee side 幾%」公式，因為溫室高度、屋脊方向、天窗形式、作物高度、內網透濕性、風速與地形都會改變最佳比例。

為何要「wind side 先、lee side 後」？

這個設計的關鍵在於：先建立主動、可控的進氣，再用背風側補足排氣與均勻性。

只開 lee side 時，系統像是在「抽」溫室裡的空氣；空氣從哪裡補進來，常常受漏風、天窗形狀、風向與壓差影響，路徑不一定理想。先小幅開 wind side，則等於利用迎風側正壓，把外氣導入上方空間，讓水氣、熱量與 CO₂ 交換路徑更明確。當需要更大通風量時，再打開 lee side，使氣流有出口，形成比較完整的進出氣迴路。

這也解釋了為什麼 GPE 強調「兩側天窗」而不是「單側大開」。兩側小開通常比單側大開更容易做到：氣候均勻、作物頭部不過冷、濕度不滯留、VPD 不劇烈跳動、CO₂ 分布較平衡，並且降低單側強氣流造成的局部壓力。

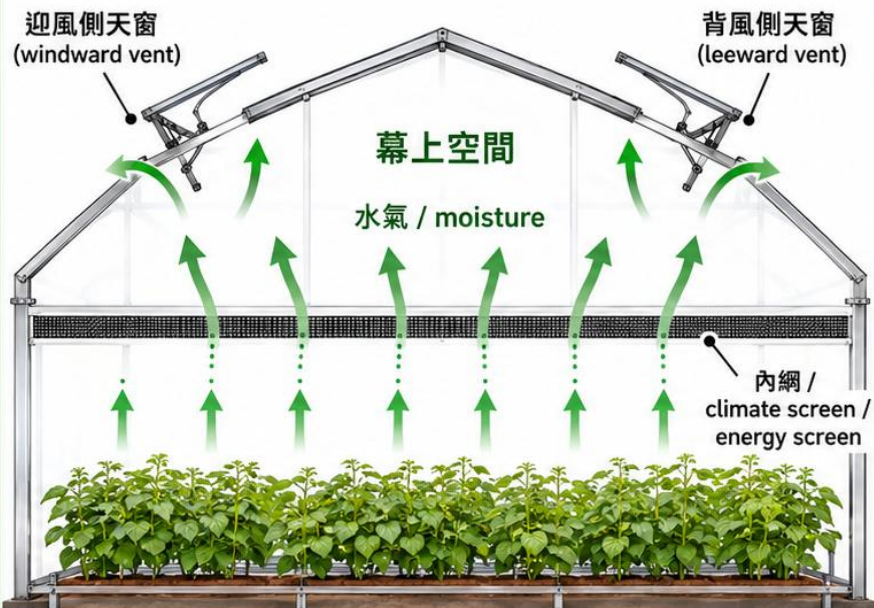
它真正的邏輯是：用 wind side 建立主動進氣，用 lee side 完成排氣與均勻化；用較小開度達到較穩定的氣候，而不是用單側大開造成局部氣流、濕度與溫度差異。

所以實務上應該把 wind side/lee side 設定成一組「受風速、風向、雨水、內網狀態、植物溫度與濕度目標共同限制」的控制策略，而不是固定公式。這正符合 GPE 的精神：先保護植物的能量與水分平衡，再用設備去支持植物，而不是讓設備單純追逐空氣溫度或相對濕度。

情境	建議天窗順序	主要目的
夜間或清晨，內網關閉 濕度偏高	先小開 wind side，再 視需要補 lee side	讓水氣往內網上方移動 並排出，避免直接開 內網，冷空氣沉降造成 冷點
白天輻射升高，需要排 熱但仍想維持均勻	wind side 與 lee side 逐 步一起使用	增加通風但避免單側大 開造成局部乾冷或濕度 梯度
外面風速高、外溫低、 下雨或陣風明顯	限制 wind side，必要 時以 lee side 為主	保護作物、天窗結構， 避免冷風與雨水直灌
作物區濕度不均、CO ₂ 分布不均	避免長時間只用單側天 窗	改善跨距間氣流、水氣 與 CO ₂ 均勻性
排濕需求降低	先收 lee side，再收 wind side；遇強風則先 收 wind side	保持基本氣流，同時避 免過度通風

✓ 建議作法

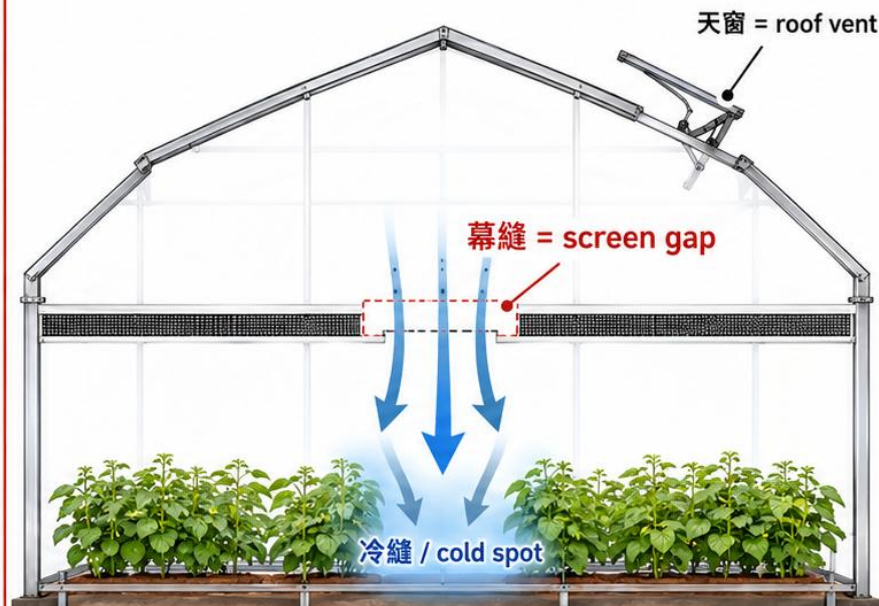
讓水氣穿過 screen 進入幕上空間，再由天窗排出



排濕較均勻，不易形成冷點

❗ 不建議作法

直接開 screen 縫排濕，易造成冷點



局部冷空氣下沉，作物區易出現冷點

7. 整合調整栽培策略

依據 GPE 理念進行的栽培策略可達到以下目的：

1. 維持在較低的植物負荷下生長
2. 在較高的溫度/光積比（RTR）下生長可改善植物的同化物平衡、水分平衡和能量平衡
3. 有限的通風將水分和二氧化碳保持在室內，並提供更好的光利用效率（更高的二氧化碳濃度與開放的氣孔）。因此，也可以在夜間保持較高的與溫度相關的日累積光量。以維持在較高的 RTR 比例下生長意味著對外部溫度和濕度的依賴更少，從而實現更好的氣候控制和更好的整體植物平衡

4. 以較高的 RTR 生長可改善溫室在高輻射下的能量平衡和水分平衡。有限的通風保持內部水分。這導致溫室空氣的焓值更高。由於溫室和室外空氣之間的焓差更顯著，通過自然通風可以更容易地控制溫度
5. 維持高 RTR 比例的生長可改善溫室內的 CO_2 平衡
6. 有限的通風將二氧化碳保持在室內，這改善了植物的同化物平衡

室內維持較高的溫度允許更積極的使用內網，
這從以下許多角度來看都是有益的：

1. 更容易控制溫室的水分平衡
2. 更少的加熱意味著更少的過度蒸發和更少的通風需求
3. 關閉內網，下方的 RH較高也會減少作物的蒸散
4. 溫室內、外 AH 差值較大，透過通風排出的水分會更多
5. 由於屋頂溫度和溫室空氣的露點溫度之間的差異較大，通過冷凝排出的水分也較多
6. 較大的室內、外溫差提高了自然通風和強制通風系統的效率

7. 沒有間隙的封閉式遮陽網確保整個溫室的水平溫差更小
8. 更均勻的氣候導致更少的真菌，如灰黴病
9. 維持較高的夜間溫度使果實或花蕾保持溫暖，這意味著果實或花蕾上發生冷凝的風險較低，尤其是在清晨
10. 強壯且維持更好平衡的植物會更健康，對病蟲害的抵抗力更強，因此需要更少的害蟲防治措施
11. 減少加溫所需的能耗

目錄

引言

有挑戰的氣候條件與因應

如何調整栽培策略來適應……
環境

GPE的實踐路線

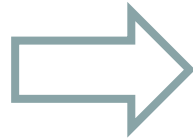
補充教材

RTR 進階版

進階版本

RTR

$$\frac{\text{Temperature}}{DLI}$$



RTR*

$$\frac{\text{Temperature} \times VPD}{PAR \times CO_2}$$

因為

- VPD 影響 stomatal conductance
- CO₂ 影響 source strength

$$RTR^* \propto \frac{\text{Sink Activation}}{\text{Carbon Assimilation}}$$

GPE 強調：

- balance
- steering
- source-sink dynamics

$$RTR^* \approx \frac{\text{Growth Demand}}{\text{Carbon Supply}}$$

而不只是單純 climate setpoint

「植物的生長需求速度」除以「植物真正可得到的碳供應能力」

一、案例 1：草莓高糖度策略

PFAL 草莓常見：

條件	設定
PPFD	250–350
CO ₂	1000–1200 ppm
日溫	22–24°C
夜溫	10–14°C
VPD	偏低到中等

表面上：

- 溫度不高
- 生長速度不算最快

但糖度很高。為何？

因為：**RTR***↓

原因：

- 高 PAR
- 高 CO₂
- source 很強
- 但：
- 夜溫低
- sink activation 降低

因此：Carbon supply > Growth demand

結果：

- 糖累積 / 果實硬度增加 / 酸甜平衡改善

$$\frac{\text{Temperature} \times \text{VPD}}{\text{PAR} \times \text{CO}_2}$$

$$RTR^* \approx \frac{\text{Growth Demand}}{\text{Carbon Supply}}$$

種出高端草莓的策略：

- 不追求最快長大
- 而是追求 source surplus

二、案例 2：萵苣 tip burn

很多 PFAL 發現：

- 高光
- 高 CO_2
- 生長超快

結果：

- tip burn 爆發

傳統會以為：「Ca 不足」

但從 RTR^* 角度看：

其實是 **RTR^* 太低**

$$\frac{Temperature \times VPD}{PAR \times CO_2}$$

因為：

- PAR 很高
- CO_2 很高

但：

- 溫度不夠高
- VPD 太低

導致：

- 碳同化非常快
- 葉膨壓增加
- 組織擴張速度過快

但：

- Ca transport 跟不上
因此 tip burn。

這也是為何：

提高一點 VPD 反而能改善 tip burn。

因為： $VPD \uparrow \Rightarrow RTR^* \uparrow$

蒸散增加：

- Ca transport 增加
- 組織平衡改善

三、案例 3：番茄冬季「看起來有光但不長」

荷蘭冬季很典型：

- 溫室內補光
- DLI 看似足夠

但：

- 生長仍偏慢

原因常是：

RTR*太低

$$\frac{\text{Temperature} \times \text{VPD}}{\text{PAR} \times \text{CO}_2}$$

因子	狀況
PAR	高
CO ₂	高
Temperature	偏低
VPD	偏低

結果：

- source 很強
- **sink 不夠活化**

植物呈現：

- 葉厚
- 深綠
- 生長慢
- 果轉色慢

荷蘭業者因應對策：

- 提高夜溫
- 提高 pipe temperature
- 提高 VPD

目的其實是：

Sink activation ↑

讓 source-sink 再平衡

四、案例 4：高 VPD 為何有時反而增糖？

很多人以為：高 VPD 一定降低品質。其實不一定。

例如草莓：

適度提高 VPD：

- 0.6 → 1.0 kPa

有時會：

- 糖度上升
- 果實變硬

原因：

適度 VPD：

- 增加蒸散
- 增加鈣離子輸送
- 增加韌皮部卸載

而且：

適度 stomatal limitation

會讓：

- 生長速度下降
- 但糖累積增加

$$\frac{\text{Temperature} \times \text{VPD}}{\text{PAR} \times \text{CO}_2}$$

$$RTR^* \propto \frac{\text{Sink Activation}}{\text{Carbon Assimilation}}$$

$$RTR^* \approx \frac{\text{Growth Demand}}{\text{Carbon Supply}}$$

因此：

Growth ↓ but Sugar accumulation ↑

這就是：

Source 源與 sink 庫的「再分配」。

五、案例 5：同樣 DLI，冬天比夏天甜

這是非常經典現象

即使：

- DLI 類似
- 冬季番茄或草莓仍較甜

原因其實是：夜溫

冬季：

因子	夏季	冬季
DLI	相近	相近
夜溫	高	低
呼吸	高	低

因此：

$$RTR_{winter}^* < RTR_{summer}^*$$

$$\frac{Temperature \times VPD}{PAR \times CO_2}$$

結果：

- 夜間碳消耗較少
- 糖保存較多

所以：

冬季更甜

這也是：

日夜 DIF

與糖度高度相關的原因

六、案例 6：為何高 CO₂ 有時反而容易徒長？

很多 PFAL：

提高 CO₂ 後：

- 葉變大
- 節間變長
- 組織變軟

原因：

RTR*↓

因為 CO₂ 在分母

當 CO₂↑ 等於 source capability 大增

若：

- 溫度
- VPD
- sink capacity

沒有同步提高，

則：

Source >> Sink

$$\frac{\text{Temperature} \times \text{VPD}}{\text{PAR} \times \text{CO}_2}$$

植物會：

- 細胞膨大
- 葉片變薄
- 組織柔軟

這和單純「高 CO₂ 促進光合」不同

真正問題是：

sink capacity 跟不上

Plant Empowerment 後期真正強調的其實不是：

- 單純 climate control

而是：

- 「平衡 **steering**」掌舵

Source side	Sink side
PAR	Temperature
CO ₂	VPD
葉面積	果實負載
光週期	DIF
光譜	蒸散

也就是說

不是最大化某一項，而是 $\text{Source} \approx \text{Sink}$

當：

source 稍微大於 sink

→ 高糖度、高品質

當：

sink 稍微大於 source

→ 高速度、高產量

而：

差距太大

→ 生理障礙

RTR* 可以視為一種「作物 steering index」

RTR* 未來式？

$$RTR^* = \frac{T \times VPD \times Sink\ Load}{PAR \times CO_2 \times LAI}$$

- Sink Load: 果實 / 根部 / 花朵 load
- Temperature: 地上部 / 地下部 / 介質 / 養液溫度

還可加入：

- EC
- Airflow 等

變成：

真正的 AI steering parameter

其實荷蘭很多 AI climate control 本質上已經在做這件事，只是沒有直接稱之為 RTR*

Plant Empowerment 的在地化

從控制溫室，到支持植物平衡

方煒 名譽教授
台灣大學生物機電工程學系

關鍵主張：作物不是被「控制」的對象，而是需要被支持的生理系統。

本書要解決什麼問題？

傳統「設定點控制」往往只處理空氣溫濕度，卻沒有直接回答：植物是否真的平衡？

傳統栽培常見限制

- 以溫度、濕度單點值做反應式調控
- 能量、濕度、CO₂ 與水分策略彼此分離
- 依賴經驗與直覺，難以複製與教學
- 為了排濕或降溫，常犧牲 CO₂ 與能源效率

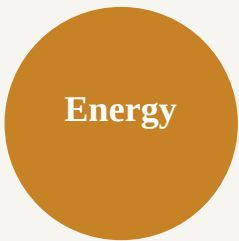
本書的回應：

用「物理 + 植物生理 + 資料」建立可解釋、可量化、可複製的栽培方法。



核心觀點：讓植物維持三個基本平衡

Plant Empowerment 先問植物是否有壓力，再決定設備如何介入。



Energy

能量平衡

葉片接收與散失能量
決定葉溫與蒸散能力



Water

水分平衡

根部吸水與葉片蒸散
必須匹配



Assimilates

同化物平衡

光合產糖與生長消耗
需日夜協調

閱讀重點：

植物的氣孔把三個平衡連在一起。

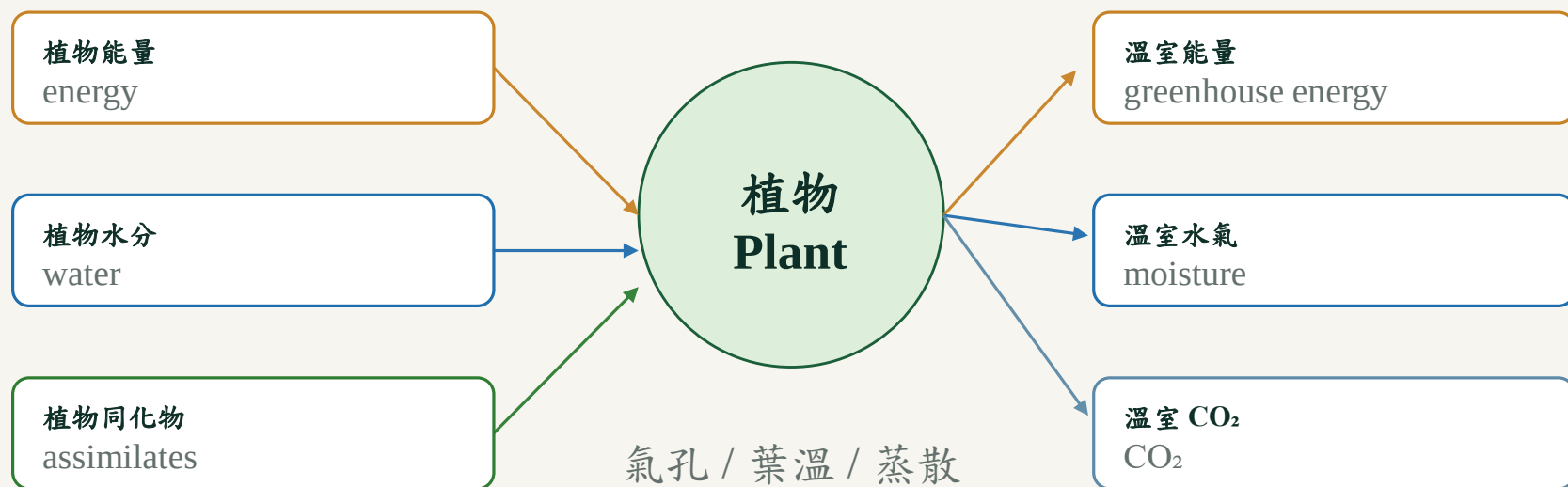
氣孔關閉時，水分保住了，但 CO_2 進不來、光合受限，葉溫也可能升高。



由「看環境」轉為「看植物反應」

核心架構：六個平衡

三個植物平衡 + 三個溫室平衡，形成一個耦合系統。



設備不是單一目標的開關；
每一次通風、遮蔭、灌溉、加溫與 CO₂ 施放，
都會同時改變多個平衡。

能量平衡：葉溫由能量收支決定

葉片不會自己產熱；葉溫來自輻射、對流與蒸散之間的平衡。



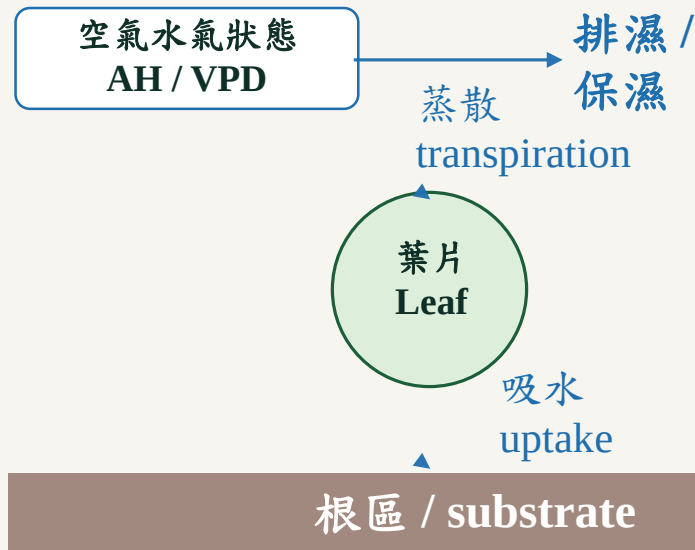
閱讀重點

- 光增加：同時增加光合潛力與熱負荷
- 葉片若缺水，氣孔關閉，葉溫會上升
- 夜間長波輻射會讓葉片低於空氣溫度
- 內網、加溫管、通風與空氣流動需一起判斷

管理目標不是「越冷越好」或「越熱越好」，而是讓葉溫與蒸散維持在植物可承受範圍。

水分平衡：灌溉不是給水，而是匹配蒸散

水分管理必須同時看根區供水能力、葉片蒸散需求與空氣水氣狀態。



本書給灌溉管理的啟發

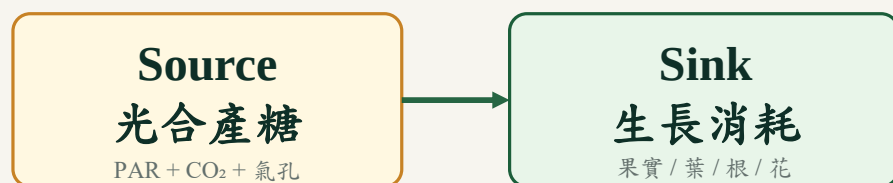
- 灌溉時機要回應光合與蒸散，而非只看時鐘
- 水分過少：氣孔關閉、葉溫上升、光合受限
- 水分過多：根區缺氧、EC 失控、作物變弱
- 排濕要避免局部冷點與作物冠層濕滯留

對內網的理解：

不是「開縫排濕」越多越好；而是讓水氣有路徑離開，同時保護作物區氣候均勻。

同化物平衡：Source × Sink 的日夜分配

光合產糖是「來源」，生長點、果實與根是「消耗端」；兩者失衡會降低產量與品質。



RTR 的概念

Radiation-Temperature Ratio：用光量與溫度策略協調同化物產生與消耗，避免只促進一端。



從設備控制到作物策略

內網、天窗、加溫管、CO₂ 與補光不是獨立按鈕，而是共同調整六個平衡。



設備角色的重新定位

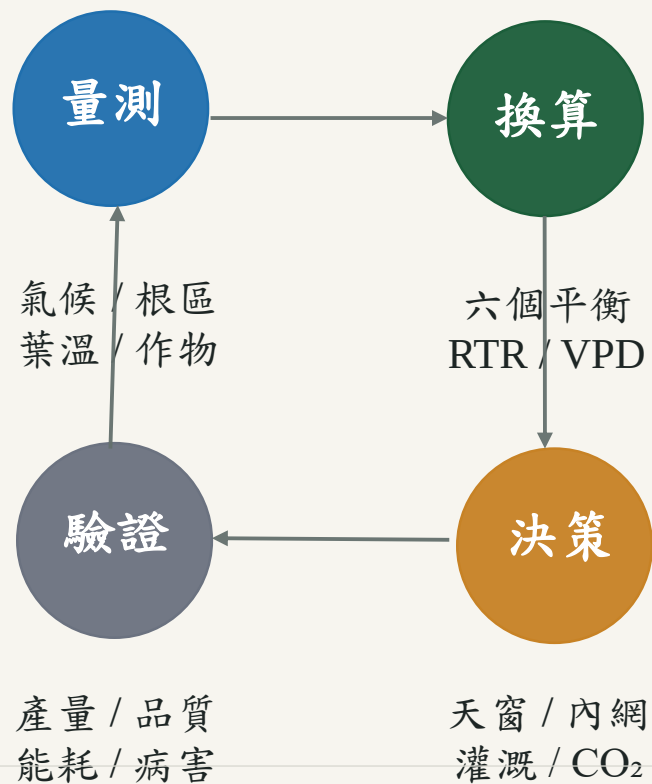
- 內網** 保溫、減少長波輻射損失、穩定冠層微氣候
- vent** 排熱、排濕，但也會損失 CO₂ 與改變蒸散
- pipe** 補能量、避免冷凝、配合排濕與夜間作物活性
- CO₂** 提高光合 source，但要避免因通風大量流失

天窗策略閱讀提醒：

Plant Empowerment 不主張固定公式，而是看排濕、排熱、CO₂、作物水分平衡與氣候均勻性。

資料驅動栽培：把經驗轉成決策迴路

GPE 不是要取代栽培者，而是讓栽培判斷變得可觀測、可討論、可驗證。



判讀原則：

資料不是越多越好；關鍵是把資料轉成「植物是否平衡」的指標。

GPE 是原則，不是配方

1. 先理解植物，再設定環境

把設備操作連回能量、水分與同化物平衡。

2. 不追求單一最佳值

同一溫度或濕度，在不同光、CO₂ 與根區條件下意義不

3. 內網 與天窗是氣候工具

重點是均勻性、排濕路徑、CO₂ 保留與葉溫保護。

4. 資料要轉成判斷

儀表板不是答案；平衡指標與作物觀察才是決策基礎。

5. 在地化比照抄更重要

高溫、乾燥、強風且風沙大時，不宜照搬自然通風邏輯。

建議應用路徑

- ① 建立感測與資料可信度
- ② 用六個平衡重整控制策略
- ③ 小範圍試驗，逐步調整 setpoints
- ④ 以產量、品質、能耗、病害與作物均勻度驗證

高溫、乾燥、強風、風沙大

仍可用 GPE 原則，但自然通風可能不適合；應轉向過濾進氣、機械換氣、蒸發冷卻、遮蔭與內循環排濕等在地化方案。

GPE 以荷蘭溫室的環控為主導
多仰賴自然通風與多層內網與節能布的調控

如果考量台灣的高溫、多濕的天候環境
改為使用正壓式水簾溫室

GPE的核心精神仍有可借鏡之處

以下談 如何在地化

GPE／Plant Empowerment 不應被理解為「荷蘭式天窗、內網、節能幕的固定操作法」，而應被理解為一套以植物生理與物理平衡為核心的環控思維。

所以當場域從荷蘭型自然通風溫室，轉到台灣高溫、多濕、颱風、豪雨、病害壓力較高的環境時，設備策略可以大幅改變，但 GPE 的核心精神仍然非常值得借鏡。

Plant Empowerment 官方把它定義為一種 **data-driven growing philosophy**，目標是讓植物的 **energy balance**、**water balance**、**assimilate balance** 維持平衡；Plant Empowerment Academy 也明確說這套方法建立在植物生理與物理原理上，並宣稱可應用於不同作物、氣候區與溫室型式。這一點正是它對台灣有價值的地方：**可借鏡的是「平衡邏輯」，不是「荷蘭設備配置」。**

一、荷蘭 GPE 與台灣情境的根本差異

荷蘭溫室的典型挑戰常是：外界低溫、需要保溫、需要在不浪費能源的前提下排濕，所以自然通風、天窗、energy 內網、climate 內網、管溫與除濕策略很重要。

台灣溫室的典型挑戰則不同。台灣夏季常面對高溫、高濕、降雨、病害與颱風等壓力；農業部農試所也提到，本地溫室在炎熱多雨夏季需要降溫、通風、遮陰或噴霧等處理。另有荷蘭農業網絡對台灣溫室的觀察指出，台灣屬亞熱帶與熱帶氣候，夏季高溫高濕容易引發病害，傳統塑膠溫室在高溫季節內部溫度可能超過 40°C。

因此，在台灣若外氣本身又熱又濕，甚至伴隨風沙、病蟲、豪雨或強風，單靠自然通風並不一定是好的策略。自然通風會把外界熱量、水氣、病蟲、粉塵與不穩定風壓一起帶進溫室。這時改用正壓式水簾溫室，本質上是把環控邏輯從「靠天窗與風壓換氣」轉為「主動處理進氣、控制氣流路徑、維持內部正壓與空氣品質」。

二、設備策略要改，但 GPE 的核心仍可保留

把「GPE 用於正壓式水簾溫室」理解成以下轉譯：

GPE 原本重點	荷蘭常見實作	台灣正壓式水簾溫室的轉譯
能量平衡	天窗、篩幕、管溫、保溫	遮陰、水簾降溫、風量、正壓進氣、輻射負荷管理
水分平衡	排濕、避免冷點、控制 VPD	避免過濕、控制 VPD、葉面不結露、減少病害
同化物平衡	光、CO ₂ 、溫度協調	在高換氣下維持光合效率，避免只降溫卻犧牲 CO ₂ 與光
氣候均勻性	兩側天窗、內循環、幕上空間	水簾端到排氣端的溫濕梯度控制、循環風扇、分區感測
數據化決策	植物與環境感測	葉溫、VPD、絕對濕度、濕球溫度、風量、壓差、水簾效率

也就是說，**GPE 到台灣後，不是問「天窗該怎麼開」，而是問：**
植物現有的能量、水分、光合與蒸散是否平衡？正壓水簾系統
是否真的支持這個平衡？

三、正壓式水簾溫室的優點

在不適合自然通風的地區，正壓式水簾有幾個明顯優點。

第一，進氣來源可控。

自然通風是風從哪裡來、空氣就從哪裡進來；正壓系統則可以要求空氣先通過水簾、濾網、防蟲網或預處理區，再進入作物區。這對風沙、病蟲、外部污染與強風環境很重要。

第二，氣流方向可設計。

正壓式系統可以把空氣由水簾端推入，再經由排氣口、洩壓窗或排風路徑排出。這比單純靠風向與天窗壓差更容易管理。

第三，可降低自然通風的不穩定性。

台灣常見午後雷陣雨、颱風外圍環流、海風、焚風或強陣風，自然通風的換氣量容易突然變大或變小。正壓式機械通風至少可以把風量、進氣位置與壓力差納入控制。

第四，可與防蟲、防塵、病害管理整合。

若設計得好，正壓會讓空氣由內往外洩，而不是讓未過濾空氣從縫隙倒灌。這對高價值作物、育苗、種苗、葉菜、番茄、甜椒、草莓等都可能有助。

四、但水簾不是萬靈丹，尤其在高濕環境

這是台灣應特別小心的地方。

水簾降溫依靠的是**蒸發冷卻**。蒸發冷卻效果取決於乾球與濕球溫度的差，也就是 wet-bulb depression；相對濕度越低，蒸發冷卻越有效。蒸發冷卻在相對濕度較低時效率較高，高濕地區的冷卻能力會受限。

所以，台灣如果是**高溫但外氣相對乾燥**，水簾很好用；但如果是**高溫又高濕**，水簾會遇到瓶頸：它可以降低乾球溫度，但同時會增加空氣濕度、降低 VPD。這代表：**水簾解決的是熱壓力，但可能放大濕度壓力。**

如果控制不好，作物會出現蒸散不足、鈣運輸不良、葉面潮濕、灰黴病、細菌性病害、根壓過高、徒長或果實品質下降等問題。

因此，台灣正壓式水簾溫室要吸收 GPE 精神，**關鍵不是「把溫度降到最低」，而是把葉溫、VPD、光照、CO₂、蒸散與病害風險一起平衡。**

五、GPE 對正壓水簾溫室最有價值的提醒

1. 不要只看 air temperature，要看 plant temperature

台灣溫室管理很容易陷入「室溫太高，所以開水簾、開風機」的邏輯。但 GPE 會提醒我們：真正要看的不是空氣溫度本身，而是植物是否能維持適當的能量散逸與蒸散。

有時候空氣溫度雖然偏高，但若有足夠氣流、適當 VPD、根系供水正常，植物仍可透過蒸散降溫。反過來，空氣溫度降下來了，但 RH 過高、VPD 太低，植物蒸散停滯，葉片反而可能處於不健康狀態。所以正壓式水簾溫室應該加強監測：

葉溫、冠層溫度、VPD、絕對濕度、露點、

介質含水率、根域 EC、

進出口溫濕差、水簾前後溫濕差、溫室壓差

這比只看「室溫幾度」更符合 GPE。

2. 不要只追求降溫，要先降低輻射負荷

台灣夏季的問題常常不是只有空氣熱，而是太陽輻射太強。如果溫室先吸收大量太陽輻射，再用水簾硬降溫，會消耗大量水與電，也容易使 RH 過高。因此，GPE 的能量平衡概念可以轉成台灣策略：

先用外遮陰、內遮陰、散射光膜、屋頂塗佈、
反射材料或可調式遮陽降低輻射負荷，
再用水簾與風量處理剩餘熱量。

這樣比「高輻射下全靠水簾風機」更穩定，也更節能。

3. 水分平衡比溫度控制更難

正壓水簾會把空氣推進來，這些空氣通常溫度下降但濕度上升。若外氣已高濕，溫室內很容易出現 VPD 過低。此時作物看似沒有缺水，但其實可能因蒸散不足而影響養分運輸，尤其是鈣、硼等依賴蒸散流的元素。

所以台灣版 GPE 應把控制目標從：降低溫度
提升為：維持適當 VPD 與蒸散，同時避免葉面結露
與病害

這是非常重要的思維轉換。

4. 高換氣會犧牲 CO₂，要納入同化物平衡

水簾風機系統通常需要較高換氣量。高換氣雖然有助降溫，但會把 CO₂ 帶走。對番茄、甜椒、小黃瓜、草莓、葉菜等作物來說，如果光照很強但 CO₂ 被快速稀釋，光合作用可能受限。

這就是 GPE 的 assimilate balance 可以借鏡的地方：

不是光越強越好，也不是風越大越好，而是光、CO₂、溫度、葉溫與水分供應要互相配合。

因此在正壓式水簾溫室中，CO₂ 管理可能要採取更精準的策略，例如清晨低換氣時段補充、局部施放、依光照與通風率調整，而不是全天候粗放式補 CO₂。

5. 氣候均勻性是成敗關鍵

正壓式水簾＋多孔風管系統的重點，不是讓空氣從水簾端水平掃到另一端，而是把經水簾冷卻增濕後的空氣，經由作物下方風管均勻送入冠層，再由下往上通過作物並經天窗排出。其主要風險為「**風管出風均勻性、冠層垂直梯度與排氣穩定性**」，而不是傳統負壓水簾的「水簾端冷、風扇端熱」問題。

在台灣若採正壓式水簾＋多孔風管溫室，GPE 的重點不應放在傳統自然通風或單純水簾端差異，而應放在**植物冠層實際感受到的能量平衡與水分平衡**。控制上應監測作物下方送風溫濕度、冠層中層與上層溫濕度、葉溫、VPD、風管末端與前端風量差、溫室內外壓差，以及天窗排氣是否造成穩定的由下往上氣流。

這種正壓式水簾溫室的天窗不是傳統自然通風中的主要進氣口，而是排氣／洩壓口；主要進氣與氣流路徑是由水簾、風機與下方多孔風管主動建立的。

六、建議的「台灣版 GPE 正壓水簾控制邏輯」

可以概括如下：

以遮陰減少能量輸入，以正壓過濾控制進氣，
以水簾處理顯熱，以風量維持蒸散，
以除濕或排濕控制病害，以數據判斷植物是否平衡。

實務上可分成幾種情境：

外部情境	操作重點	GPE 對應精神
高溫、相對較乾	水簾有效，可提高風量與蒸發冷卻	支持水分平衡與葉溫控制
高溫、高濕	水簾效果有限，應先遮陰、加強排濕或除濕	不只降溫，要看 VPD 與病害風險
高溫、強光	先降低輻射負荷，再啟動水簾	管理 energy balance
強風、風沙大	關閉自然通風，使用過濾正壓進氣	控制進氣品質與氣流路徑
夜間高濕	避免過度密閉，需循環、排濕或除濕	避免冷凝與水分失衡
高換氣白天	注意 CO ₂ 被稀釋	管理 assimilate balance
水簾端與排氣端差異大	加密感測與循環風扇	維持氣候均勻性

七、需要修正的觀念：水簾溫室不是「低成本荷蘭溫室替代品」

特別提醒：正壓式水簾溫室不是把荷蘭溫室的天窗拿掉、換成水簾風機而已。

它是一套完全不同的氣候機器。

荷蘭溫室常處理的是：保溫、排濕、節能、自然通風。

台灣正壓水簾溫室常處理的是：降溫、除濕、防塵、防蟲、防颱、病害控制與高換氣下的 CO₂ 損失。

所以若要導入 GPE，應該做的是：

從「荷蘭設備操作參數」抽離，回到「植物平衡」本身。

這樣 GPE 才會真正落地，而不是變成不適合台灣氣候的外來處方。

八、結論

「台灣正壓式水簾溫室可以借鏡 GPE」這個方向，但要強調：

GPE 可借鏡的是原理，不是形式。

在荷蘭，它可能表現為天窗、energy 內網、管溫、幕上空間與自然通風策略。

在台灣，它應該表現為遮陰、水簾、正壓、過濾、循環風、VPD 管理、除濕、病害預防與多點感測。

真正的台灣版 GPE，不是問：荷蘭怎麼開天窗？

而是問：在台灣這種高溫、多濕、強降雨與病害壓力下，如何讓植物的能量、水分與同化物保持平衡？

若以這個角度來看，正壓式水簾溫室不是背離 GPE，而是把 **GPE** 從荷蘭自然通風框架，轉譯成適合台灣氣候的主動式環控框架。

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

weifang@ntu.edu.tw

五 五 五

Line and WeChat ID:
weifang0257

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