

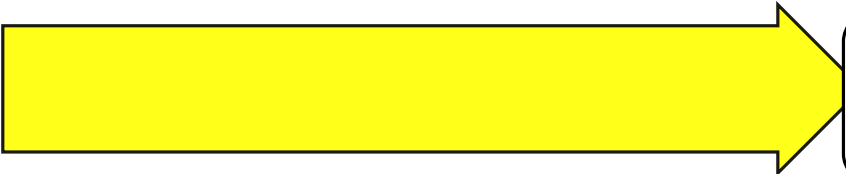
以植物賦能達到 均衡的成長

方煒 名譽教授
台灣大學生物機電工程學系

last updated 05/27

Balanced growing by
plant empowerment

目錄



引言

如何監測溫室及植物的均衡發展

如何在整合作物管理中應用GPE原則

細說 RTR

CO₂施肥

溫室與植株在各種狀況下所需維持的均衡發展

- | | | |
|---|------------------------------------|------|
| ✓ | Greenhouse energy balance | 能量 |
| ✓ | Greenhouse moisture balance | 水分 |
| ✓ | Greenhouse CO ₂ balance | 二氧化碳 |
| ✓ | Plant energy balance | 能量 |
| ✓ | Plant water balance | 水分 |
| ✓ | Plant assimilates balance | 同化 |

若後三項能達到正確的均衡發展
植株會健康、抗病且高產

維持溫室均衡發展的策略

- 確保溫室內環境的均勻度，不會有局部冷或濕的區域。這可透過通風、加溫或是關網策略來達成，但這一開始也跟溫室設計、溫室工程及設備有關。
- 確保溫室內AH及溫度總是高於戶外，因此可以透過通風系統排出熱量及濕氣。
- 通風策略除了以溫度設定之外，也要考慮濕度及二氧化碳的均衡

維持植物能量及水份均衡的策略

- 太陽輻射量(PAR) 比例 越高，植物攫取能量越多，蒸散速率越高。因此可利用的水分及水分供應必須與太陽輻射能量達到一致。
- 為了防止水分逆境及氣孔關閉，空氣的相對濕度必須與 太陽輻射能(PAR) 比例一致。通風策略可以做到這點，有時會同時使用噴霧。

維持植物同化物均衡的策略

1. 光合作用是植物生長的驅動力量，環境控制必須著重於**有效地利用PAR光線**，包括自然光及人工照明。為了充分發揮植物生長潛力，**二氧化碳**濃度、**RH**、**溫度**需要與目前**PAR**達到最佳的生長條件的組合，這主要是**透過減少通風量**來達成。
2. 有穩定的**日均溫與PAR光積值的比例**，是達到最佳生長及植物均衡的重要關鍵。

3. 植物負荷在整年各階段須與光積一致。
。可以透過環境控制部分達到此目標，其餘部分與植物管理有關。
4. 確保有好的垂直溫度分佈來支持植物均衡。
5. 依照植物種類及栽培階段有最大的PAR光強度，可以用遮陰及白漆來防止光線過強導致的傷害。

維持植物於最佳狀況的策略

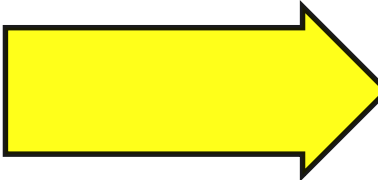
1. 目標是維持同化物的均衡。
穩定的日均溫/PAR光積值 (RTR) 是維持正確的植物均衡、穩定的植物負荷、確保健康及抗病的關鍵。
2. 使用VPD控制來防止水分逆境及植株失去活力。量測葉片溫度及計算VPD是很重要監控植物健康狀況的重要方法。
3. VPD值太大，表示水分逆境。VPD沒有太大變化表示環境穩定。

4. 維持植物最低限度的活力。植物附近必須要有**空氣流動**才能維持**最低限度的蒸散速率**，特別是在低光及夜間時段。空氣流動可以改善植物附近微氣候及溫室內溫度分佈的均勻。為促進空氣流動，可以使用垂直風扇而不是用熱水管加溫。
5. 保護植物避免**熱體輻射(失溫)**，防止植物頂端的蒸散速率減弱，造成營養吸收減弱、生長速率變慢。好的**節能布**可減少熱體輻射。
6. 注意植物葉面發生**凝結水及泌液**的風險。

目錄



引言



如何監測溫室及植物的均衡發展

如何在整合作物管理中應用GPE原則



細說 RTR



CO₂施肥



如何監測溫室及植物的均衡發展

已有很多溫室環境及植物的監測方法，可以探查溫室能量及水分均衡的狀況，瞭解植物是如何應付環境變化及維持其能量和水分均衡的狀態。

會說話的植物 (The speaking plant)

1. 有各種感測器可以量測葉溫、吸收的水分、植體內液體輸送，葉片、莖及果實的厚度。不幸的是沒有一個感測器被證明可解決我們的問題。原因是不夠讓我們理解植物說的話，我們需要瞭解他們的語言。
2. 瞭解植物總是會想要維持均衡，這會讓植物語言容易理解很多。我們只需要傾聽關鍵訊息：它們是否能靠自己達到均衡？或者需要我們的協助？

3. 必須測量溫室內的溫度及濕度，更需瞭解垂直溫度輪廓的意義，建議在不同高度量測，例如在靠近根域、成熟中果實附近、或是植株頂端。
4. 太陽輻射能是植株主要的能量來源，這也是環境控制最重要的項目，所以一個良好的溫室外光度計很重要。
5. 在人工照明下、或是在白漆或是遮陰網下生長的植物，植物附近的PAR感測器是一定要的。

6. 使用**二氧化碳感測器**量測二氧化碳可以瞭解通風的影響。如果有添加二氧化碳，二氧化碳感測器更是必需。
7. **淨輻射感測器**可量測進入及向外的短波和長波輻射量。感測器安裝在葉冠層上方，用來監控內網對植物的影響非常有用。
 - 這方法可以瞭解植物熱體輻射到溫室冷涼屋頂的負面影響。內網在早上可以延後打開，在傍晚時可以提前關閉，讓植株有更佳的活力。
8. 在特殊的植物感測器方面，最重要的是**紅外線溫度計**。監控**能量均衡**最終的方法是使用**熱像儀**量測植物溫度。

子目錄

如何監測溫室及植物的均衡發展

監測溫室的能量均衡

監測溫室的水分均衡

監測植物的能量均衡

監測平均葉溫、VPD、
淨輻射量

監測植物的水分均衡

監測水分供應、氣孔行為、
介質溫度

監測植物的同化物均衡

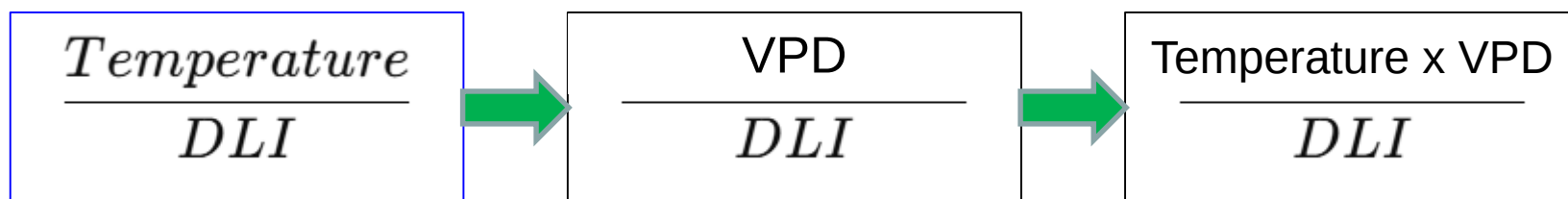
監測 RTR、植物負荷、垂
直溫度輪廓、CO₂與光強度

監測溫室的能量均衡

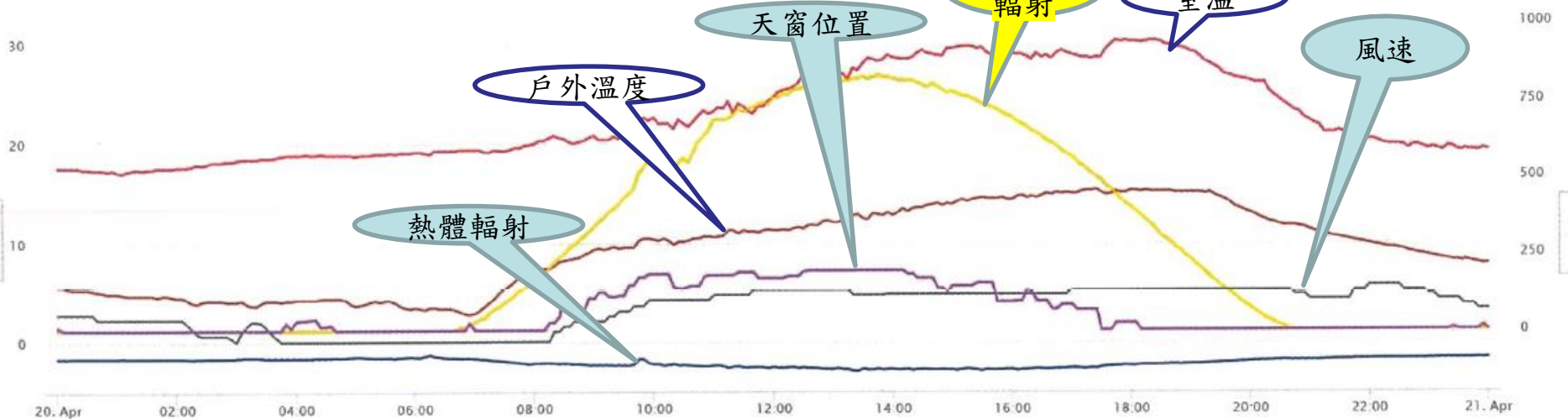
1. 進出的能量相同，溫室就會達到能量均衡，溫度維持穩定。
2. 很多生產者及顧問習慣使用溫度、濕度、天窗位置及熱水管溫度等圖形評估溫室氣候狀況，這可以得知目前已經發生的狀況，但這不是瞭解或分辨溫室氣候因果關係最好的方法，還需要包含室外狀況、如太陽輻射、溫度、濕度、風速等。
 - 要注意傳統溫室大約80%氣候是由天氣決定，只有20%是因為設備通風及加溫的結果。
 - 一般加溫設備設計的最大能力是 150 W/m^2 ，太陽輻射能則會有 $500\text{-}800 \text{ W/m}^2$ 。

3. 一般而言，通風效果被認為是由溫室內外溫差決定，實際上溫室內外的AH差異也是很重要的因素，因為溫、濕度構成空氣能量，但對植株生長來說，溫、濕度沒太多意義。
4. 結合溫、濕度條件與實際輻射量 (PAR強度)的比例才是最重要的。

● 似乎看到 RTR 概念的進化



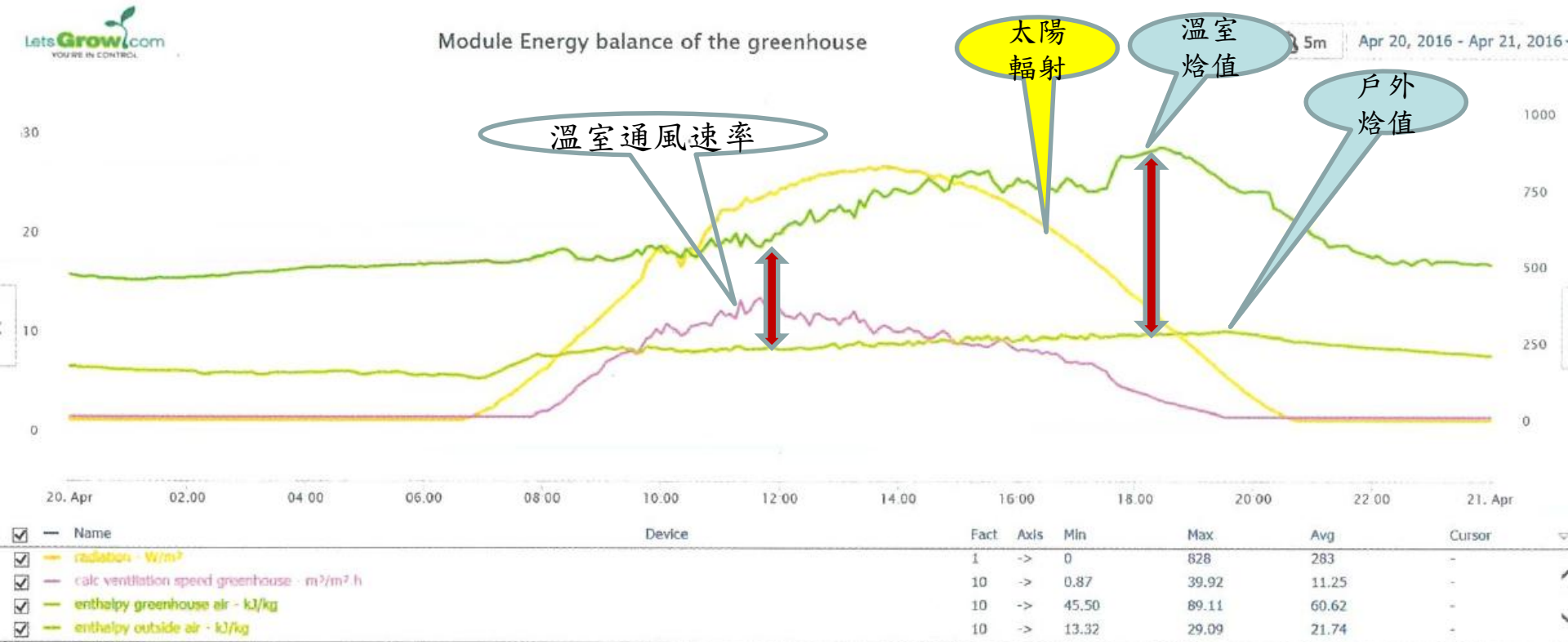
溫室內的能量均衡狀況可由圖上各參數來評估



☒	Name	Device	Fact	Axis	Min	Max	Avg	Cursor
☒	temp greenhouse - °C		1	<-	17.0	30.2	22.7	-
☒	outside temp - °C		1	<-	2.7	15.3	9.3	-
☒	radiation - W/m²		1	->	0	828	283	-
☒	vent wind - %		10	->	0	20	6	-
☒	emission: pyrgeometer - W/m²		1	->	-133	-80	-106	-
☒	wind speed - m/s		1	<-	0.0	5.7	3.3	-

The trend line of the greenhouse temperature (red) indicates the balance between energy input by the sun (yellow) and the energy loss as a result of a lower outdoor temperature (brown), wind speed and the vent position, and heat emission to the colder sky (dark blue).

溫室所需通風速率 = $f(\text{室內外烔差})$



室內、外烔差大，要移走進入溫室的太陽能，所需通風速率小；
反之，所需通風速率大

通風：溫度 vs. RH & CO₂ 濃度

1. 通風量通常是由溫室內溫度來設定，這表示通風的重點在維持能量均衡，但常會導致過度排濕及損失CO₂，進而影響光合作用。
2. 就濕度來說，通風總是導致濕度降低。因此，在較高的太陽輻射能量狀況下，限制通風會有利於較高濕度及更好的生長條件。
3. 就CO₂來說，必須分辨有、無添加CO₂兩種狀況。
 - ❏ 添加方式有工業用CO₂或鍋爐、發電機等排放的CO₂，可提高溫室內CO₂濃度到600~800 ppm。
 - ❏ 有較高的CO₂濃度可促進植物對CO₂吸收，可提高光線の利用效率。過高的通風速率代表CO₂損失，會降低生長速率。

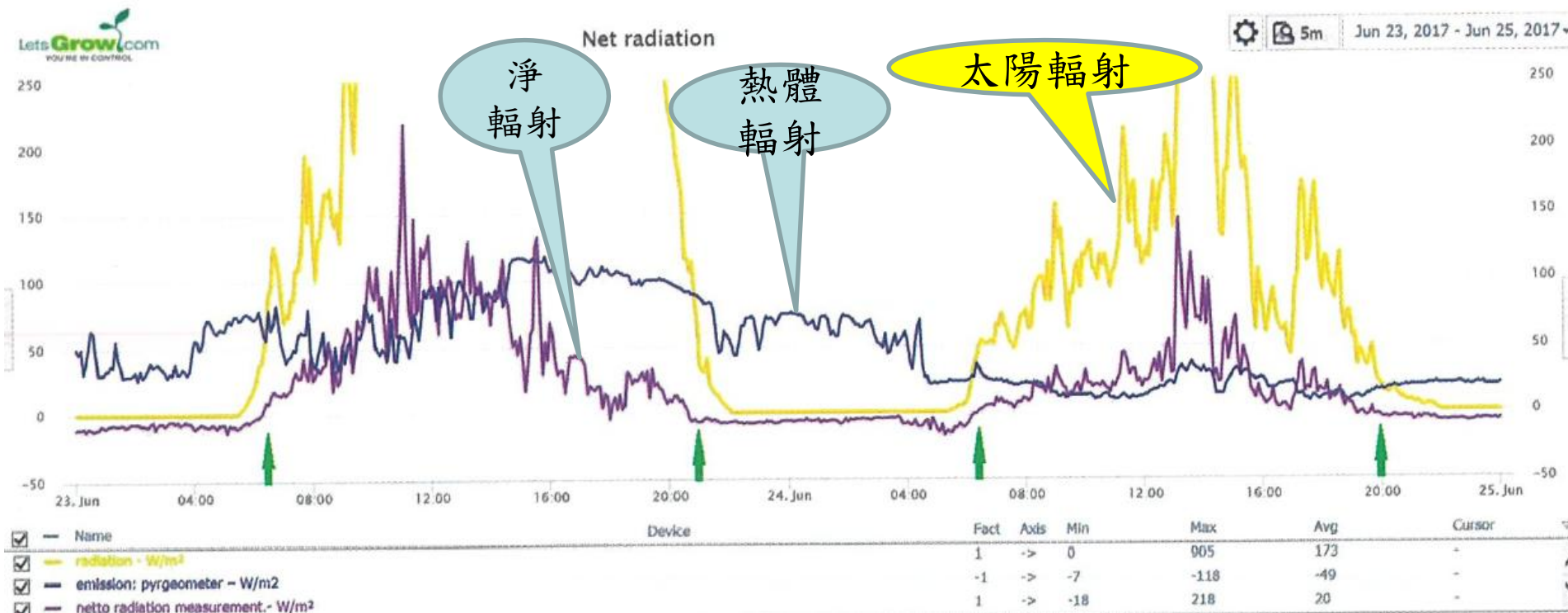
4. 在沒有添加CO₂狀況，植物對CO₂的吸收必須透過通風從戶外填補。
 4. 通風速率太少會導致溫室內CO₂的不足。
 5. 戶外CO₂濃度約400 ppm，溫室內很容易掉到200 ppm。
 6. 當CO₂濃度是限制因數時，提高光量、溫度及RH來加速光合作用也沒有效果了。
5. 監控溫室內CO₂濃度是重要的，可預防通風速率高時的CO₂損失或通風速率低時CO₂的不足。
6. 只有在光量、CO₂、RH、溫度都達到最佳組合時，才有最佳的光合作用速率。
7. 量測CO₂及考慮通風對CO₂、溫度及濕度的影響，才能達到最佳化的條件。

熱體輻射與能量均衡

- 溫室能量均衡受太陽輻射傳熱到溫室內及溫室本身熱體輻射向外輻射熱量的影響。全天空輻射計(Pyranometer)可以監測來自溫室屋頂的熱體輻射及太陽入射量。單位 W/m^2
- 淨輻射計可以監控溫室能量均衡狀況。

$$\text{淨輻射} = \text{太陽輻射能} + \text{熱體輻射}$$

當 **太陽輻射** < **熱體輻射**，淨輻射呈現**負值**（**綠箭頭標示區**）



Purple = net radiation inside. Yellow = irradiation outside, Blue = heat emission outside. Note that for easier comparison of the latter two lines, the heat emission is presented as a positive value here. When irradiation and heat emission cross, the energy balance turns positive or negative, marking the moments to open or close the screen(s). On 23 June, heat emission is higher than on 24 June, so the screen(s) should have been opened and closed at a higher irradiation level also, to prevent negative impact on the crop.

子目錄

如何監測溫室及植物的均衡發展

監測溫室的能量均衡

監測溫室的水分均衡

監測植物的能量均衡

監測平均葉溫、VPD、
淨輻射量

監測植物的水分均衡

監測水分供應、氣孔行為、
介質溫度

監測植物的同化物均衡

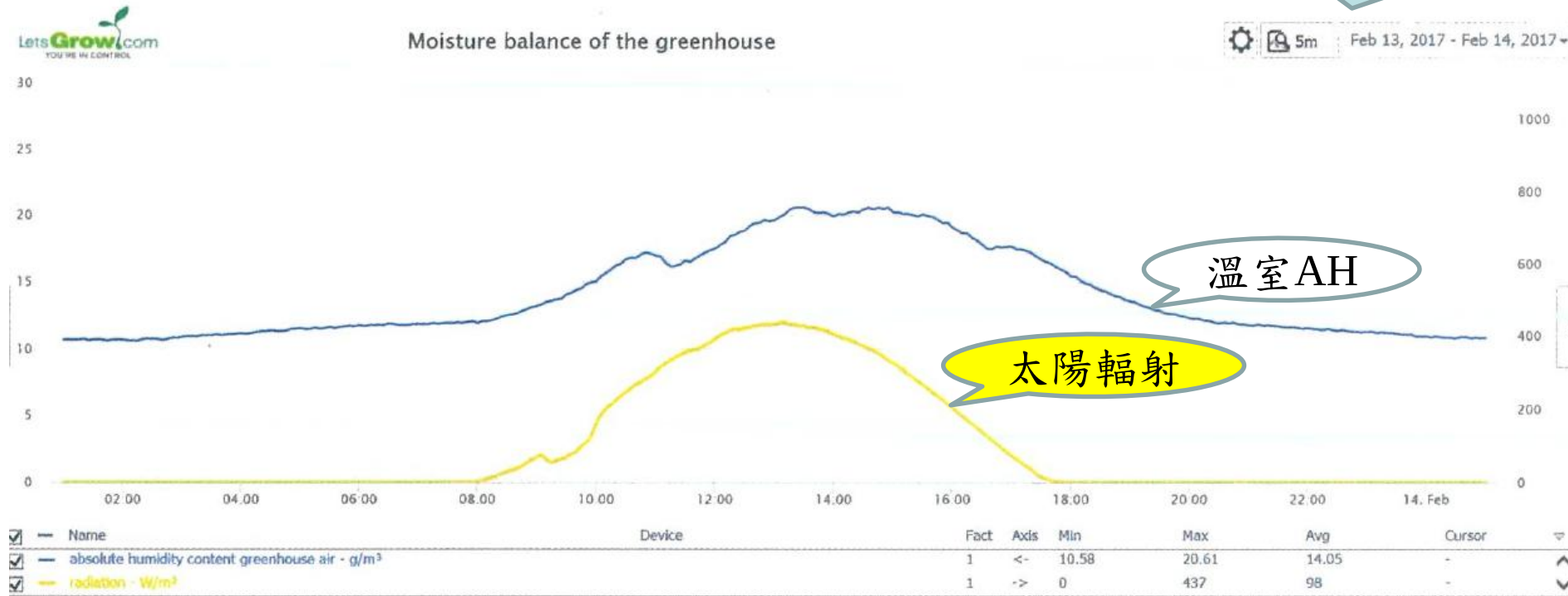
監測 RTR、植物負荷、垂
直溫度輪廓、CO₂與光強度

監測溫室的水分均衡

太陽的輻射能是溫室內溫度與絕對溼度(AH)變化的驅動力，
三者間有連帶關係，同時也受通風速率的影響

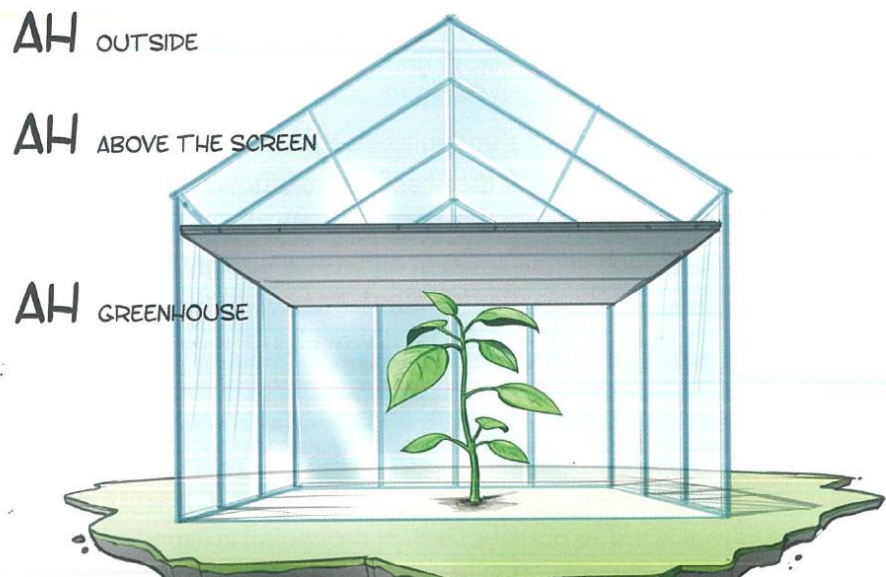
Figure 6.5.-OA Graph to assess the moisture balance of the greenhouse

2/13-2/14 2017



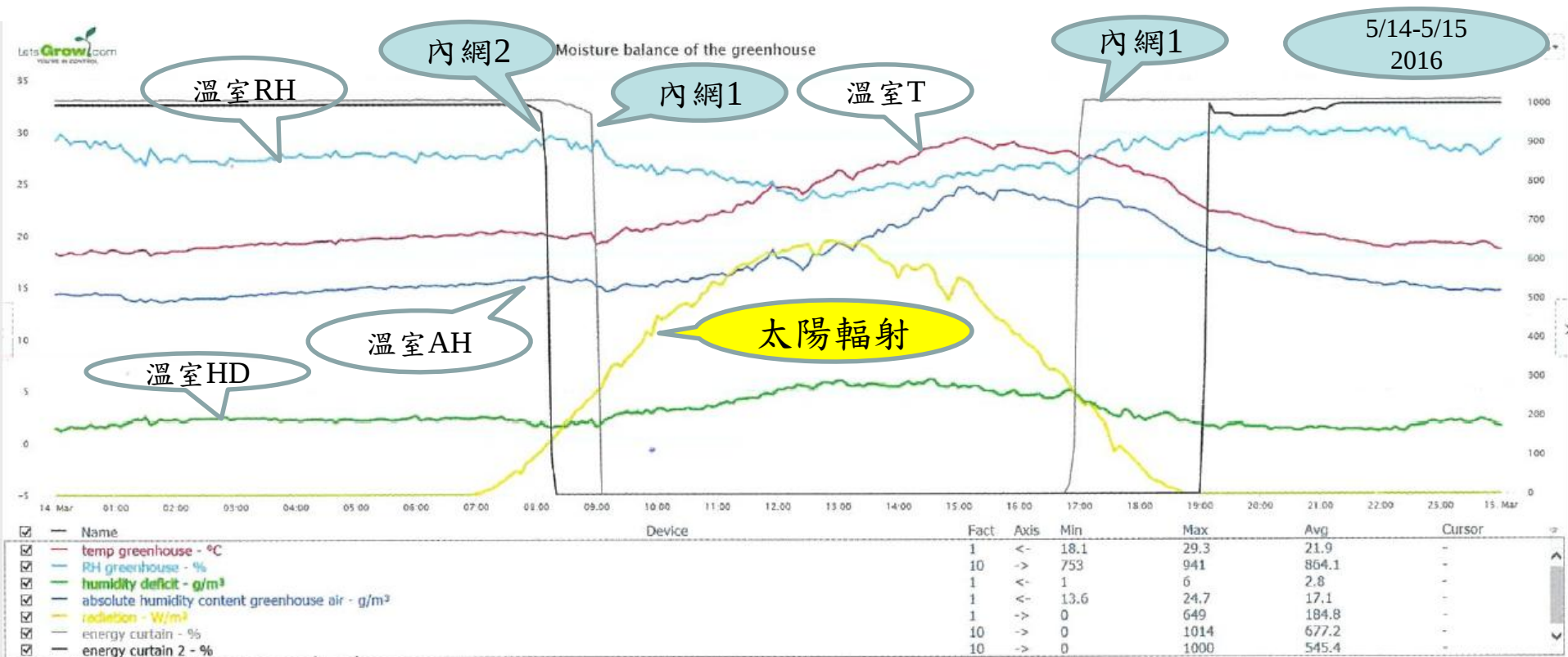
Blue = absolute humidity, Yellow = solar radiation. The trend of the AH indicates 3 possible situations regarding AH: input = output, input > output, and input < output.

Since solar radiation is the main driving force behind evaporation and greenhouse temperature, there is a strong relationship with AH also depending on the ventilation strategy.

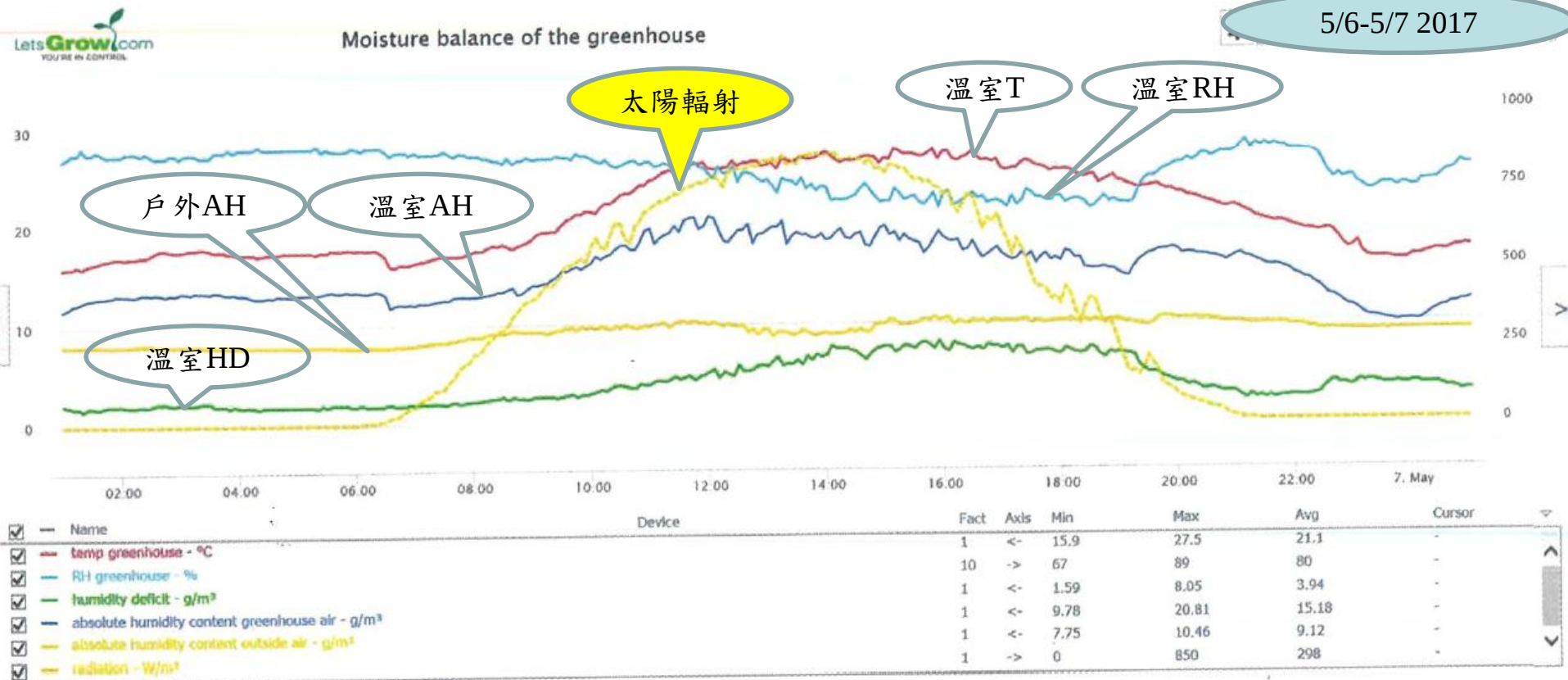


監測不同層的AH
，可評估關網、
留縫、屋頂換氣
的排濕效果。

- 不同層的水分(濕度)移轉是透過AH差異驅動。
- 不同層AH的差值表示透過內網或通風所能移轉濕度的能力。
- 差值大濕度移轉速率快，排濕所需通風量就可減少。

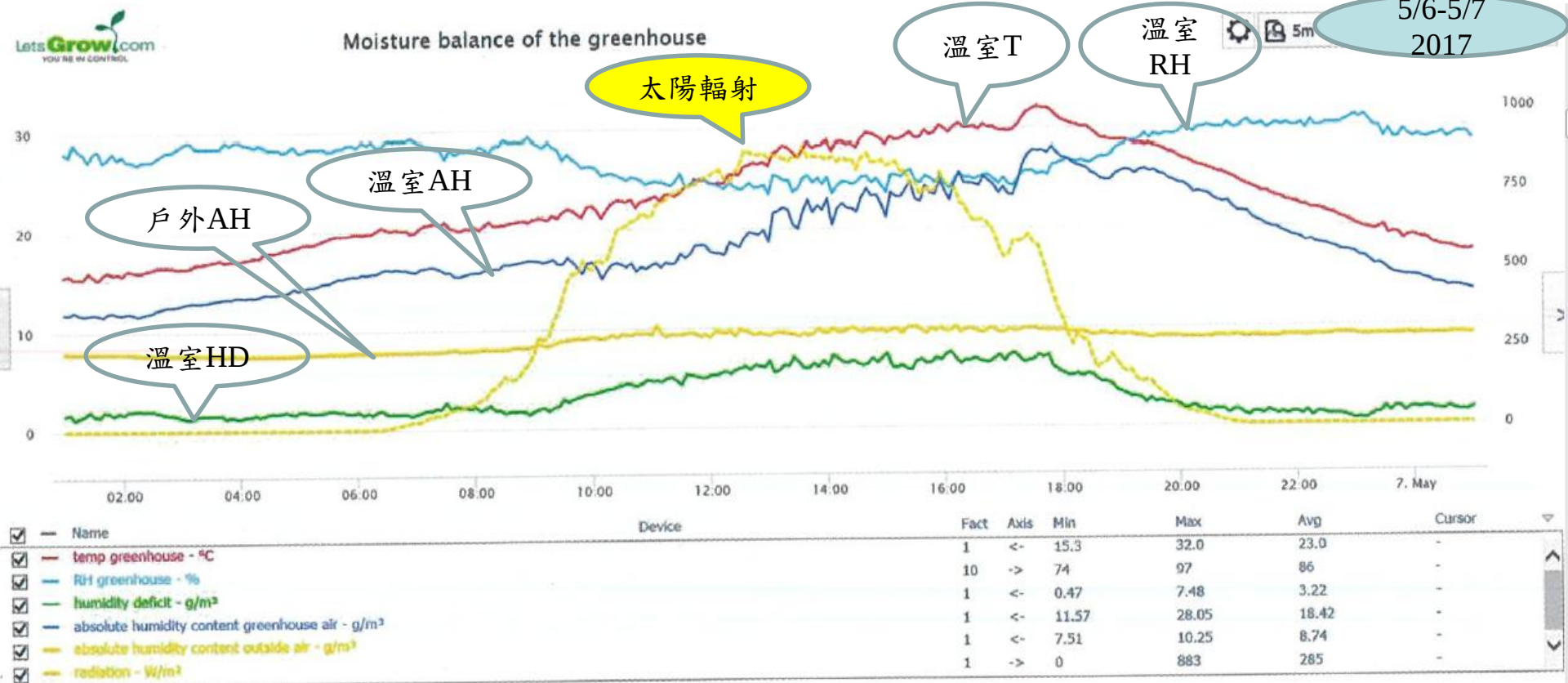


在上午，溫室內的AH不斷上升，代表作物蒸散所增加的水氣無法透過冷凝或通風來及時排濕。AH上升的同時，RH卻下降，這是陽光使得室內溫度上升所造成。午後AH下降可能是內網1關閉，蒸散減少，也可能是通風排濕所造成。內網2關閉之後，RH趨近固定，AH緩緩下降，代表排濕能力大於蒸散，T也緩緩降低，內網、通風運作適當。



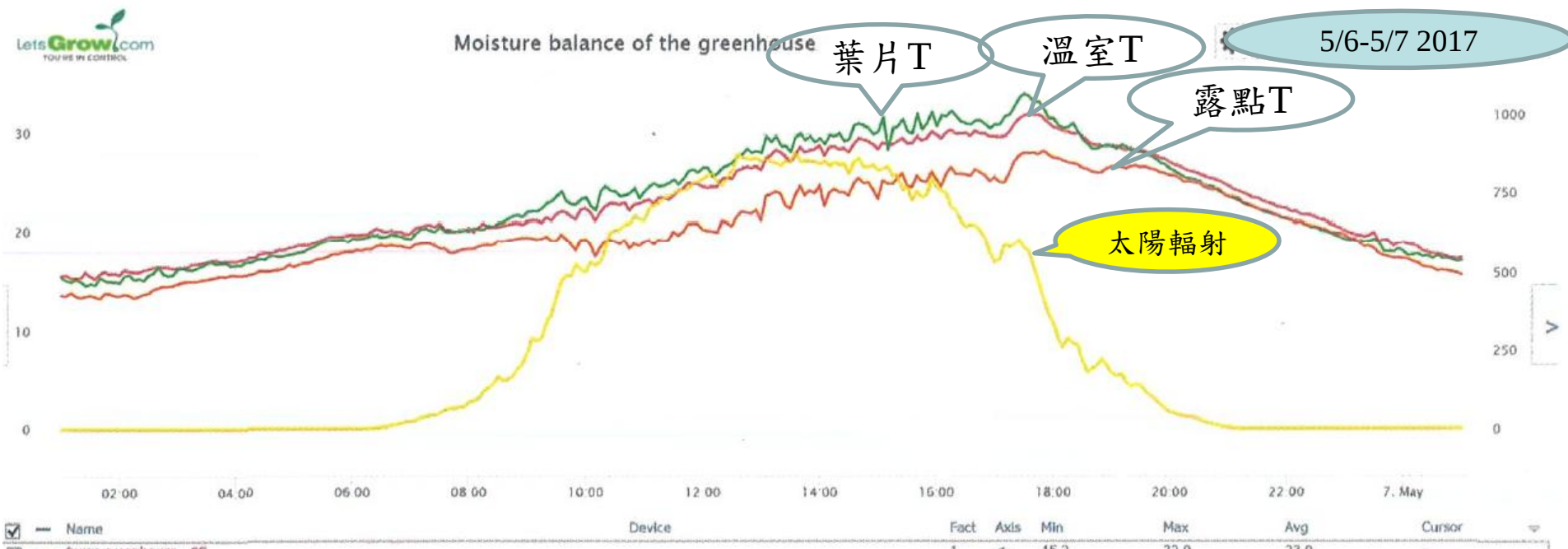
上午隨太陽輻射量增加，作物蒸散增加而 AH 上升，
 中午12:00 開始 AH 呈現微降趨勢，代表通風排濕效果良好，排濕能力大於蒸散加濕能力，同時 T 與 RH 都呈穩定微幅下降。

T: 15.9~27.5 °C, RH: 67~89%, Avg 80% 環控能力良好。



本圖顯示 AH 整天呈現增加趨勢，代表通風排濕不好，排濕能力小於蒸散或有其他加濕來源。
 整天的 RH 都在稍高的範圍 (74~97%，平均 86%)。

注意冷凝的風險



- 溫室內的露點T由室內T及RH計算而得。
- 夜間的葉片T、溫室T與露點T值均頗接近，看似前二者均高於露點T，但要注意的是溫室內水準及垂直方向可能存在1~1.5 °C的溫差，仍要留意局部位置發生冷凝的狀況。
- 日出時最易發生冷凝。上方空氣T上升較快，上方葉片蒸散較旺，下方果實及莖部溫度上升慢，當表面T低於空氣的露點T時，就會有冷凝發生在果實及莖部表面。
- 露點溫度與AH有關，提高室內T無法處理冷凝，需要排濕才能避免。

子目錄之子目錄

如何**監測**溫室及植物的均衡發展

監測**植物**的**能量**均衡

監測平均葉溫、VPD

監測淨輻射量

植物維持能量均衡的方式

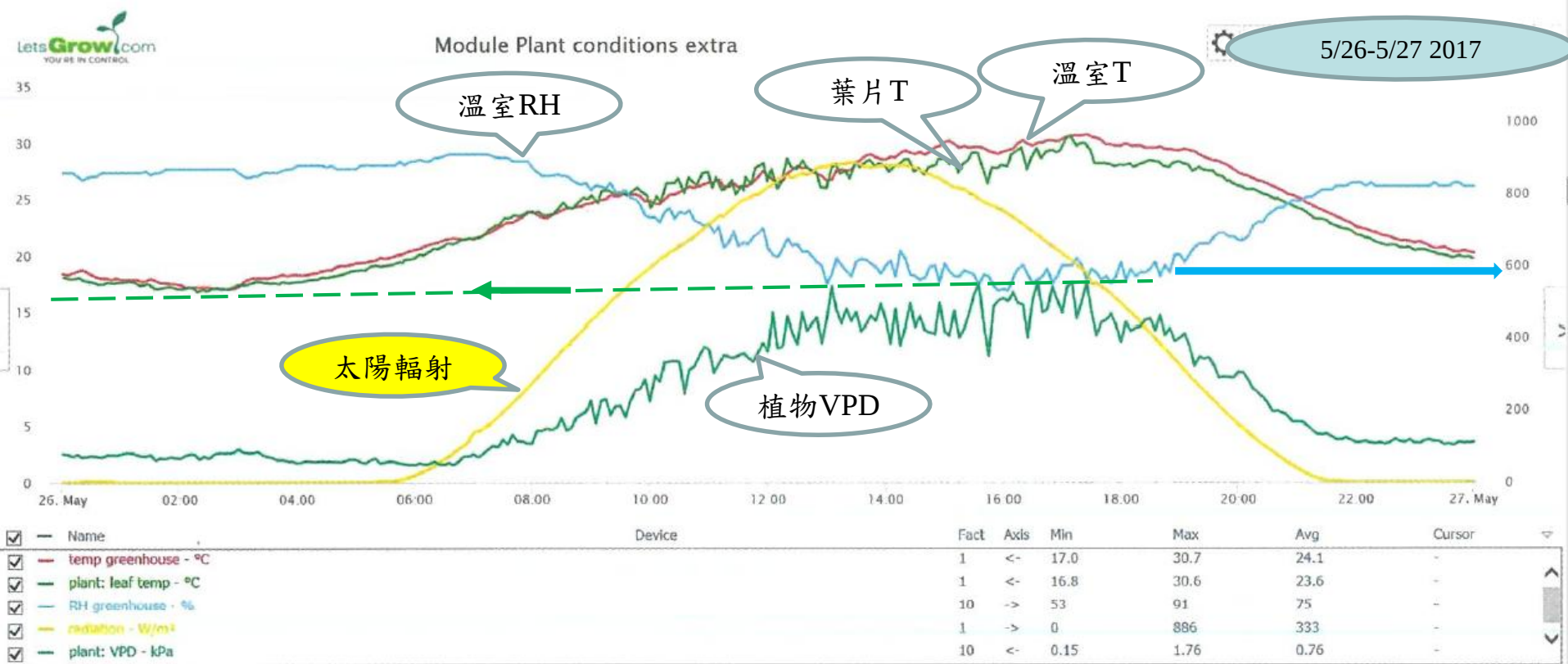
- 1) 透過輻射與對流進行**葉片與空氣**間的**熱量**移轉
- 2) 透過蒸散達成**葉片與空氣**間的**能量**均衡

能量 vs. 光合作用

- 每種作物都有其最大的光合能力及最大的 PAR 值
 - 在最大的 PAR 時，植物能否達到能量均衡？
- 每個作物都有其最大的蒸散作用能力
 - 蒸散作用過於旺盛，植物會發生水分逆境、葉溫增高、光線使用及光合作用也會受限。
- 只有在高濕度下才能在高光照下同時達到能量及水分均衡及最大的光合能力。

監測平均葉溫與VPD

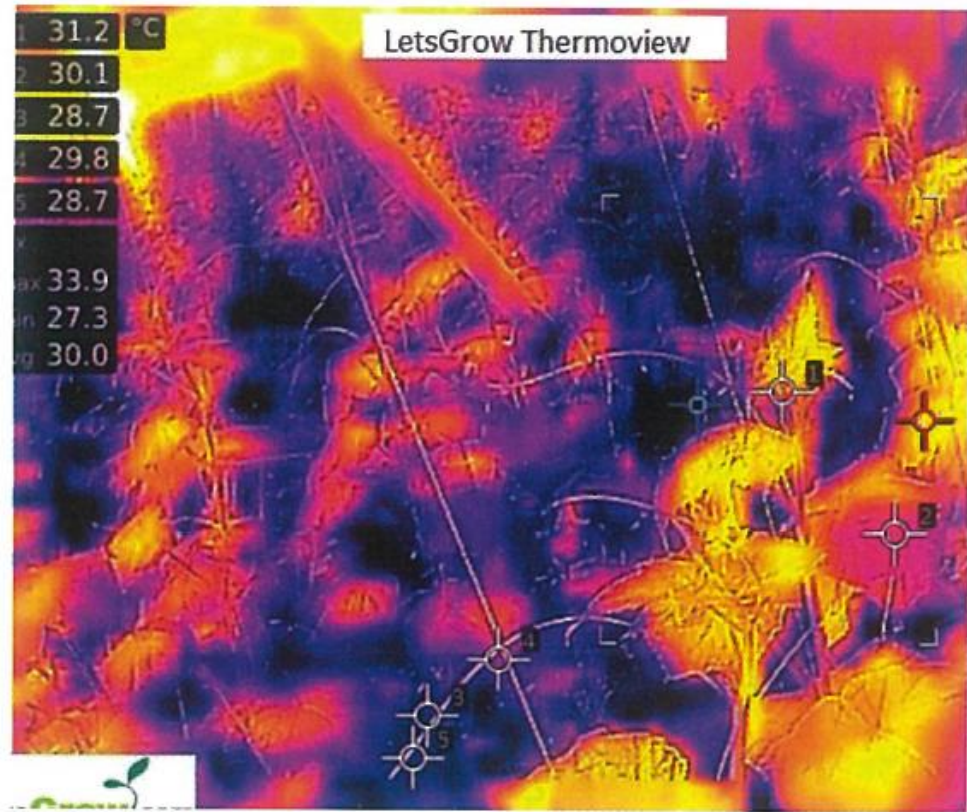
- 使用紅外線溫度計監測植物溫度時，隨量測距離遠近不同，通常是代表 3-10 m²範圍內的平均溫度。
- 量測葉片溫度可以評估溫室內溫、濕度、室內及室外光線、內網動作等改變所產生的影響。
- 葉片T與溫室T的差，代表植物是否達到能量均衡。當植物越能因應輻射量增加來調整蒸散作用時，葉片T與溫室T會接近。若葉片T明顯高於溫室T，代表植物能量不均衡及可能出現問題。
- 可以用VPD來觀察植物能量均衡狀況。
 - VPD < 1.0 kPa 不會有負面問題
 - VPD > 1.5 kPa 植物水份均衡**可能出問題**，氣孔局部關閉
 - VPD > 2.0 kPa，植物很可能**已出現**水分逆境



在夜間，葉溫低於氣溫，因為對流蒸散幫助散熱，在上午，葉溫高於氣溫，因為缺水蒸散量不足，到下午吸水量足了，蒸散恢復正常，也因太陽輻射降低，葉溫低於氣溫。

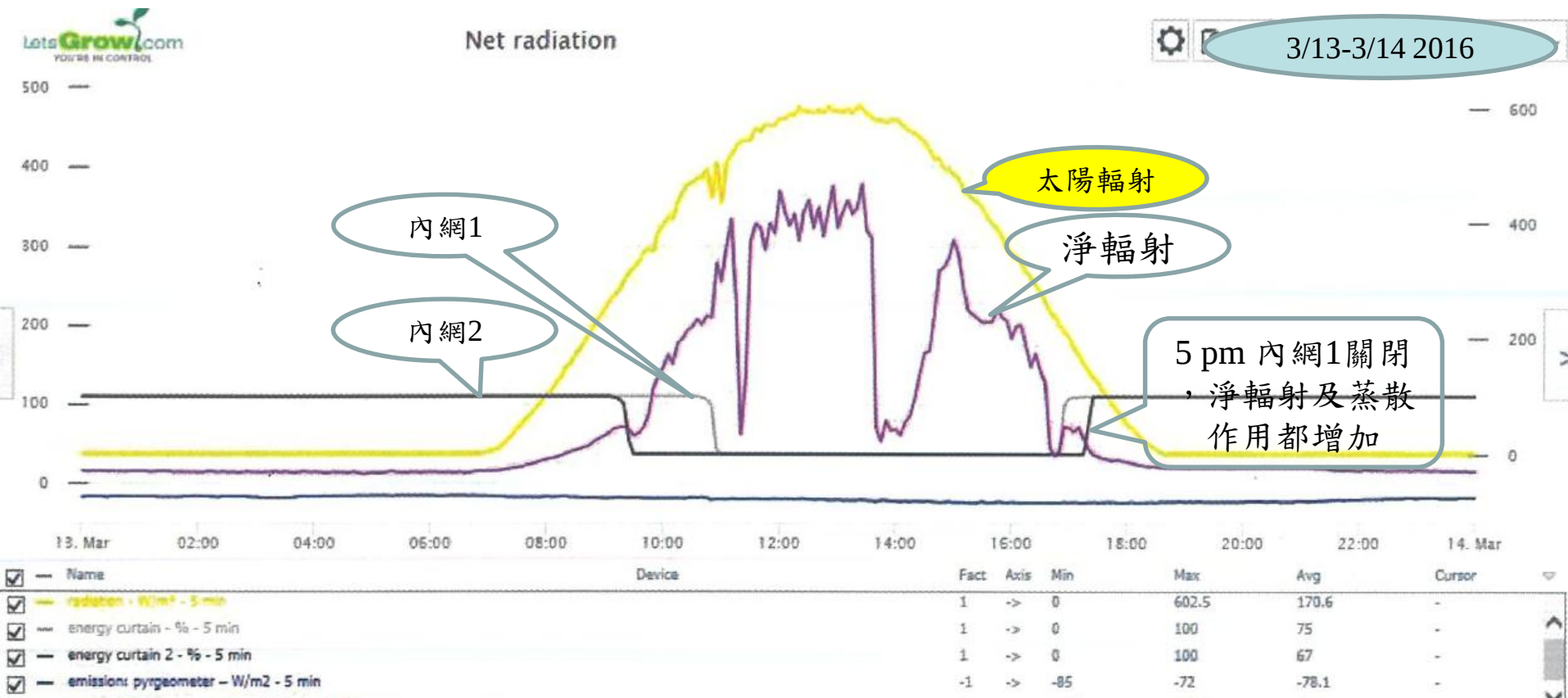
VPD 沒有超過 1.5 kPa 代表氣孔運作正常沒有缺水逆境發生，但是如果下午的 RH (55~60%) 能稍微提高，氣孔能運作得更順暢，二氧化碳的吸收也能更多。

使用熱像儀監測植物溫度



- 葉片溫度計量測局部的平均溫度，熱像儀量測作物全部溫度，可得知作物不同部位溫度差異、如莖、葉、花苞、果實，進而評估太陽輻射及熱體輻射對作物不同部位的影響。
- 也可得知生長點的溫度，避免強光對生長點影響。並能提醒提早關網避免日燒或提早關網減少熱體輻射。
- 可得知作物溫度的垂直分佈輪廓，可據以分析同化物分佈狀況。

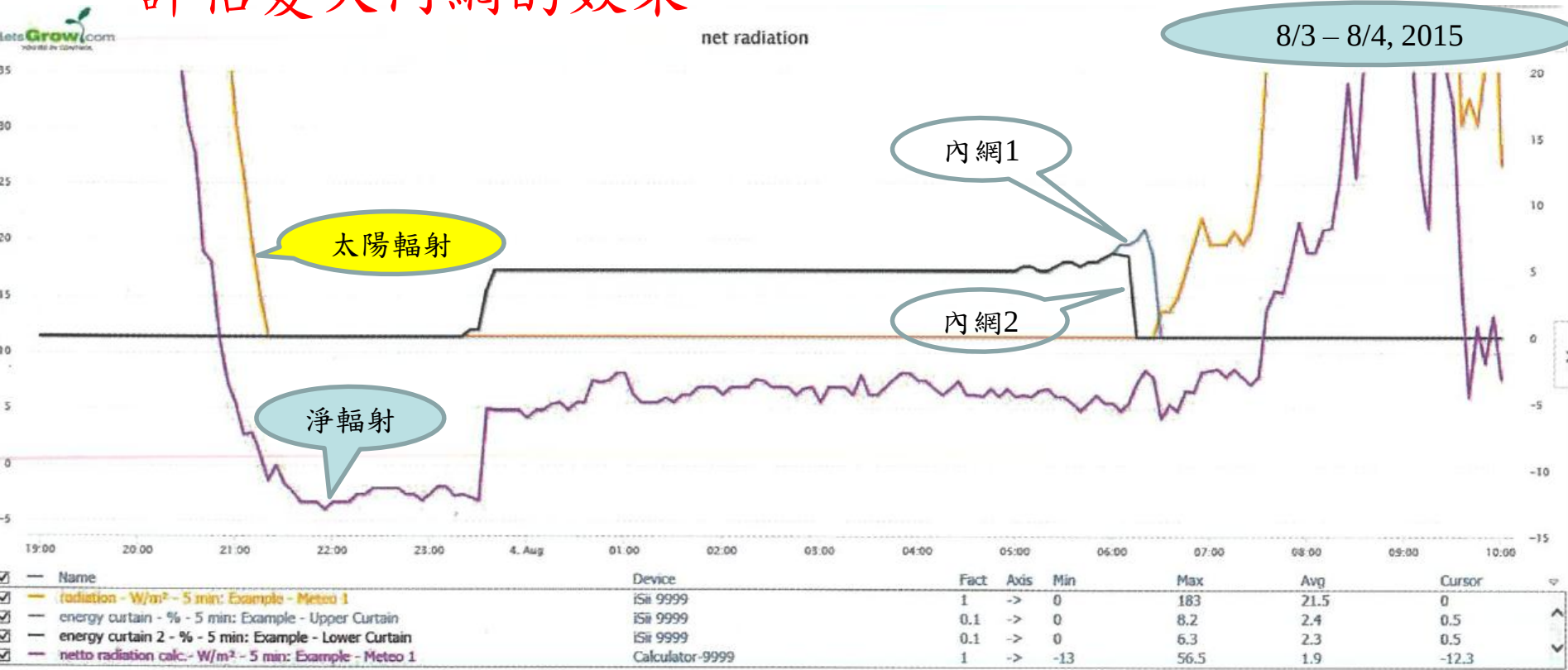
監測 (植株高度) 淨輻射量



用淨輻射來評估作物能量收支均衡狀況

- 早上戶外太陽輻射 150 W/m^2 時，溫室內淨輻射 $= 0 \text{ W/m}^2$
- 太陽輻射 300 W/m^2 ，內網2打開，溫室淨輻射因朝向屋頂的熱體輻射值下降，蒸散作用也隨之下降。
- 圖中白天時段淨輻射有驟降之處是因溫室結構的陰影。

評估夏天內網的效果

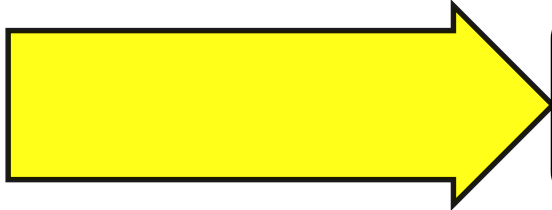


- 21:00 太陽輻射 100 W/m^2 接近日落時，淨輻射為負值 (-12.3 W/m^2)，蒸散速率明顯下降至 $25 \text{ g/m}^2\cdot\text{h}$ 。作物上方部位蒸散作用速率及營養吸收會太低。
- 晚上23:00兩層內網關閉，熱體輻射減少 -5 W/m^2 ，淨輻射上升。在晴天日落前關閉內網是有利的。

子目錄之子目錄



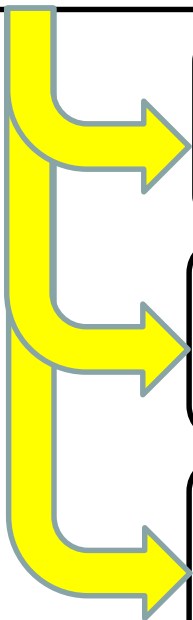
如何監測溫室及植物的均衡發展



監測植物的水分均衡

透過蒸散達成葉片與
空氣間的水分均衡

蒸散速率
= 根系吸水速率
= 灌溉供水速率



監測水分供應

監測氣孔行為

監測介質溫度

監測水分供應

兩種監測方法：

秤重 與/或 介質含水率感測器

● 只看介質含水率是不夠的 (供應面)

譬如：

📄 樹皮：15~18%含水率以下開始灌溉

📄 水草：13~15%含水率以下開始灌溉

● 基於 需求面

- 過去作法：特定天數特定頻率，定時定量
- CWSI (當下的VPD + 葉溫; WBD + 葉溫)
- 蒸散速率：ET models (當下的輻射+VPD)
- 蒸散能量(輻射)累積量
- 蒸散能量(輻射)累積量 + 特定天數

介質含水率VWC/T/EC 感測器



TEROS 10

The new, ultra-robust TEROS 10 soil moisture sensor delivers scientific accuracy and reliability at a price that makes large sensor networks economically practical.

- ✓ Long-life soil moisture sensor
- ✓ Robust epoxy body means it lasts for 10+ years in the field
- ✓ Easy integration with third-party systems

[EXPLORE TEROS 10 →](#)



兩支探頭的只能
量測雜質較少的
淡水

VWC only
2 pins



TEROS 12

The all-new TEROS 12 soil moisture sensor delivers an excellent price-to-performance ratio in a device that is easy to use and includes electrical conductivity.

- ✓ Long-life soil moisture, temperature, and EC sensor
- ✓ Increased volume of influence (1010 mL)
- ✓ Robust, epoxy body for tough field conditions

[EXPLORE TEROS 12 →](#)

VWC+T+EC
3 pins



TEROS 11

The TEROS 11 delivers a large volume of influence, reduced sensor-to-sensor variability, and a near-bulletproof form factor, which lasts up to 10 years in the field.

- ✓ Long-life soil moisture and temperature sensor
- ✓ Increased volume of influence (1010 mL)
- ✓ Robust, epoxy body for tough field conditions

[EXPLORE TEROS 11 →](#)

VWC+T
3 pins

稍有 EC 值
量測就不準

估算蒸散速率

- Penman–Monteith model 估算：假設葉溫等於氣溫，考慮太陽輻射量、空氣特性，使用多個參數。（但葉溫實際上常與氣溫不同）

註：P-M model 後續版有加入葉溫參數

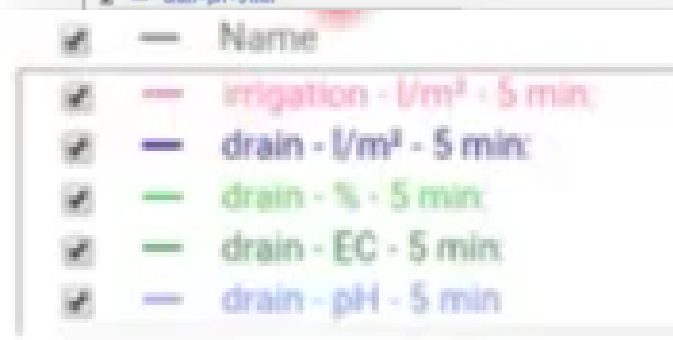
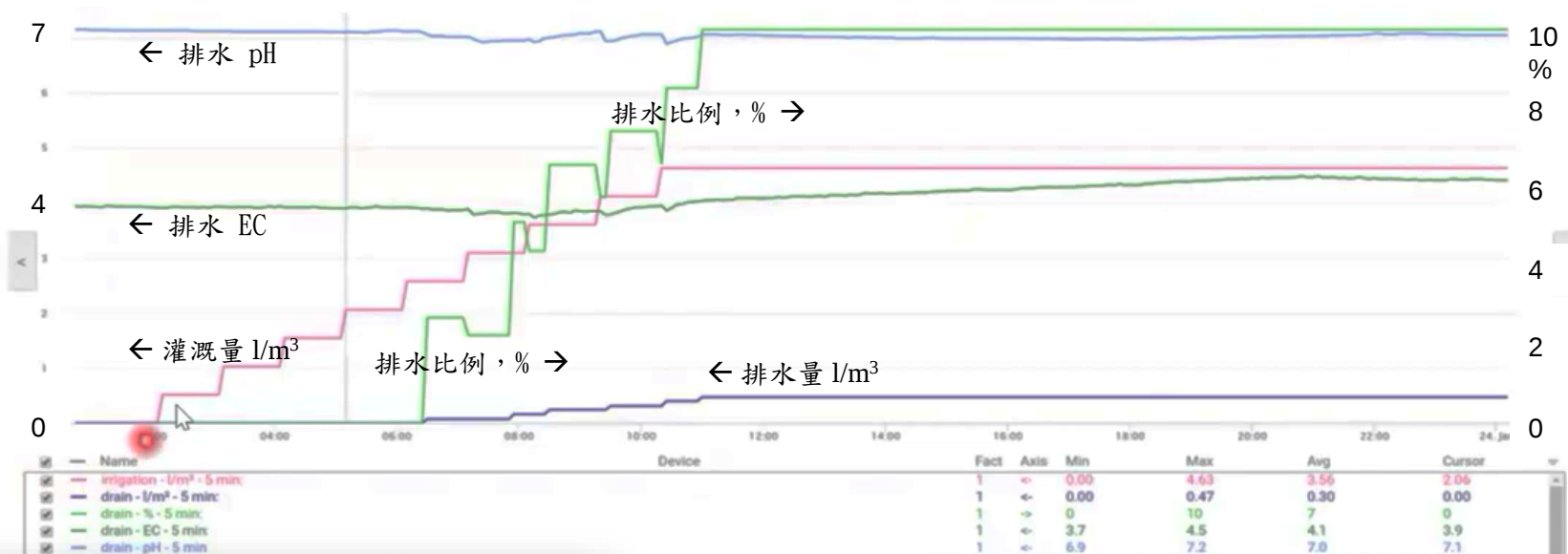
- 使用能量平衡估算：建立能量、葉溫與蒸散速率的關係模型。較簡單且直觀。

蒸散過於旺盛 或
莖部水分傳導阻力 或 氣孔阻力過大時
就算根系吸水與供水可達均衡
植物體仍可能發生水分逆境

蒸散速率 >>
根系吸水速率 = 灌溉供水速率

根系吸水速率跟不上蒸散速率時，
植物體內水分均衡的緩衝 (buffer):
葉片、莖部、果實

滴灌系統的水分控管



監測供水量

監測排出液的質、量與比例

質：監測 pH、EC

量 (L/m³)：占供給量的 10~15%

評估灌溉策略是否正確

- 觀察排水量占比（秤重）
- 觀察氣孔行為會更好

氣孔導度測定儀



SC-1 Leaf Porometer

Quick measurements. Easy-to-use engineering. Low cost in the short and the long run. The SC-1's breakthrough steady-state technology makes it the best for measuring stomatal conductance.

- ✓ Easy stomatal conductance measurements
- ✓ High speed results (readings in 30 seconds)
- ✓ Straightforward calibration and no moving parts

[EXPLORE SC-1 LEAF POROMETER →](#)

氣孔導度

LI-600

氣孔導度測定儀/螢光測定儀

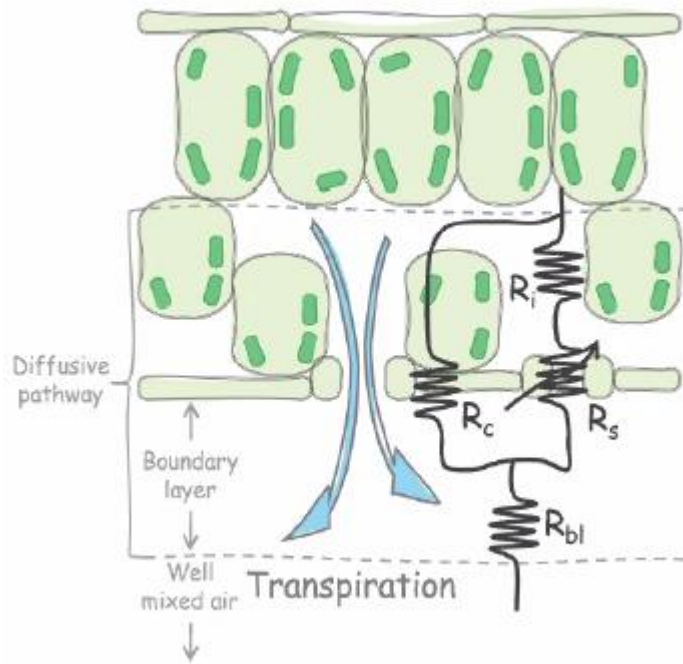
快速了解植物氣孔導度與葉綠素螢光。

LI-600 是一款精實的植物氣孔導度測定儀，可選裝設脈波振幅調變(PAM)螢光計，除了可測定同一葉片區域的氣孔導度外，還可測葉綠素螢光。LI-600 能在數秒內完成測量，提供研究人員可靠的數據精度與效率速度。



為何要測定氣孔導度與葉綠素 a 螢光？

氣孔開口會調節葉片與大氣的水氣和二氧化碳之交換。對水氣孔導率(gsw)反應了氣孔數量和氣孔開放程度之於光照、二氧化碳、溫度與濕度間的關係，這能夠提供植物對環境條件的生理反應與了解遺傳組成的指標。對葉綠素螢光進行測量可以得知有關葉片的量子效率、電子傳遞效率(ETR)與非光化學淬滅(NPQ)以及當葉片吸收過量光能的時共同保護葉片的各種反應訊息。



The diffusive pathway can be divided into segments, each making some contribution to the total conductance. Summing those contributions follows Ohm's Law:

$$g_{t_w} = \frac{1}{r_t} = \frac{1}{r_{bl} + \left(\frac{1}{r_s + r_i} + \frac{1}{r_c} \right)^{-1}}$$

To get the stomatal contribution, some simplifying assumptions are made:

- Intercellular resistance is small
- Cuticular resistance is large

$$g_{s_w} = \frac{1}{\frac{1}{g_{t_w}} - \frac{1}{g_{bl_w}}}$$

gtw: 對水蒸氣的總導度 (total conductance to water vapor)

gs_w: 對水蒸氣的氣孔導度 (the one-sided stomatal conductance to water vapor)

gb_w: 對水蒸氣的邊界層導度 (the one-sided boundary layer conductance)

$$g_{t_w} = \frac{1}{r_t}$$

$$r_t = r_s + r_{bl}$$

$$g_{s_w} = \frac{1}{r_s}$$

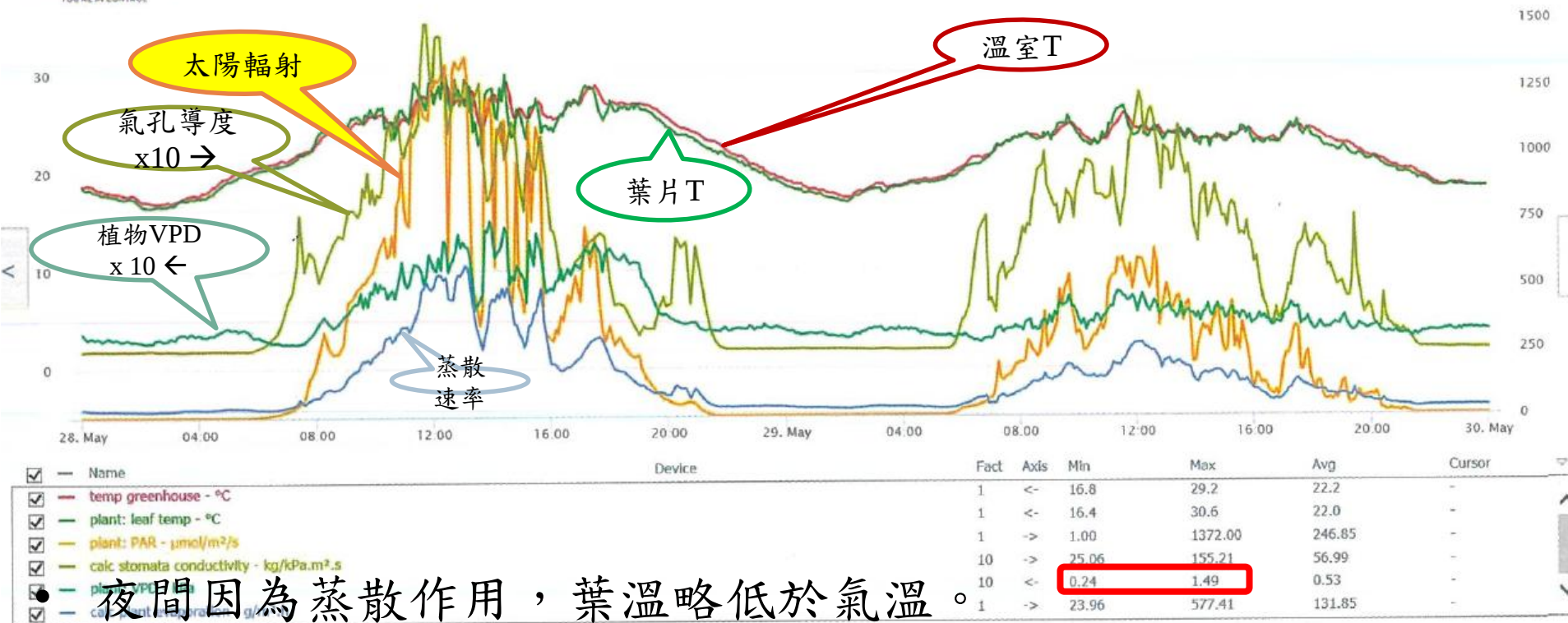
$$\frac{1}{g_{t_w}} = \frac{1}{g_{s_w}} + \frac{1}{g_{bl_w}}$$

$$g_{bl_w} = \frac{1}{r_{bl}}$$

監測氣孔行為

- 是觀察植物面對不同環境功能是否正常的最佳方法
- 氣孔導度量測限制：
 - 不能只測量局部小面積或單一個氣孔的導度
 - 需要用平均氣孔導度概念，
這可從葉溫、VP Difference、輻射量與其對應蒸散速率等參數量測來計算
- 葉溫與氣溫的差代表植物水分及能量均衡的狀態
- 荷蘭業者自創的氣孔導度計算式

$$\text{氣孔導度} = \text{蒸散速率} / 3.6 / \text{VPD}$$

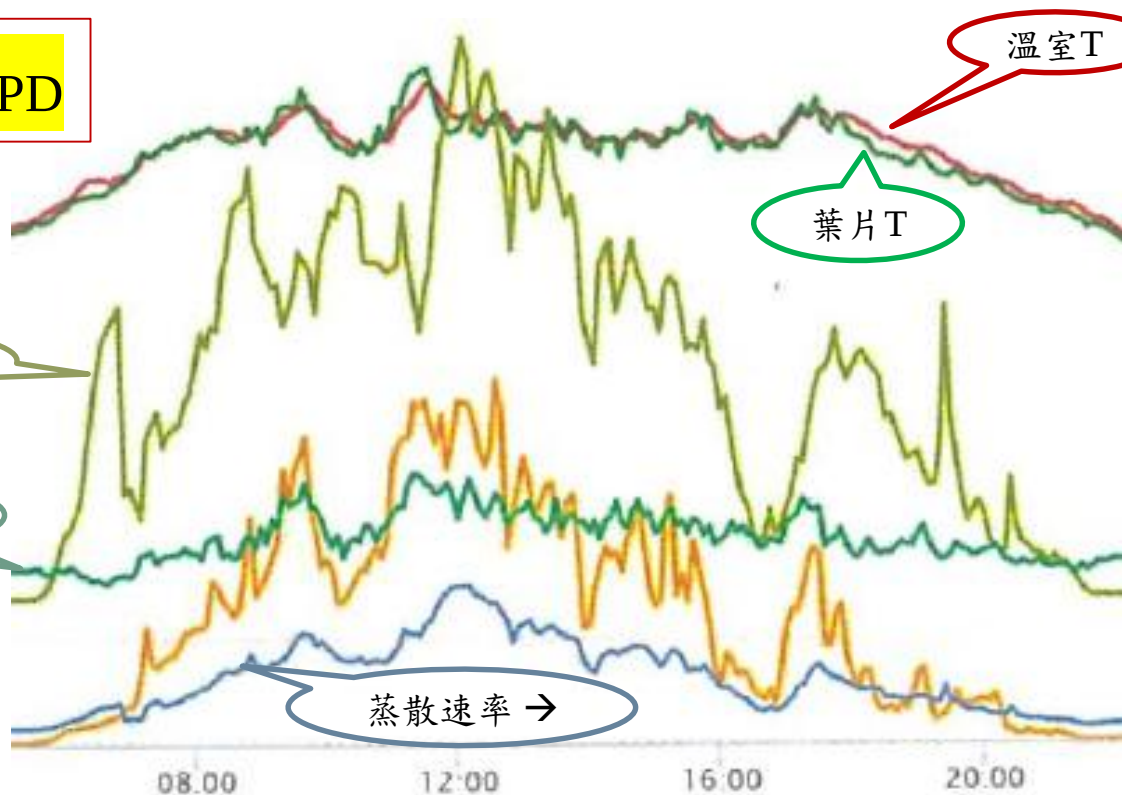


- 夜間因為蒸散作用，葉溫略低於氣溫。
- 日間PAR短時間快速增加，蒸散速率會跟不上，葉溫會高於氣溫。但若葉溫持續較氣溫高，可能表示出現水分逆境及氣孔已部分關閉。
- 蒸散速率可從能量均衡計算
- 植物VPD值越高，氣孔導度越低。但圖中顯示在適當範圍內植物VPD值越高，氣孔導度也越高。植物VPD > 1.5 kPa 表示氣孔開始關閉，存在水分逆境 (圖上 $VPD_{max} = 1.49$)。

$$\text{氣孔導度} = \text{蒸散速率} / 3.6 / \text{VPD}$$

氣孔導度 = 蒸散速率/3.6/VPD

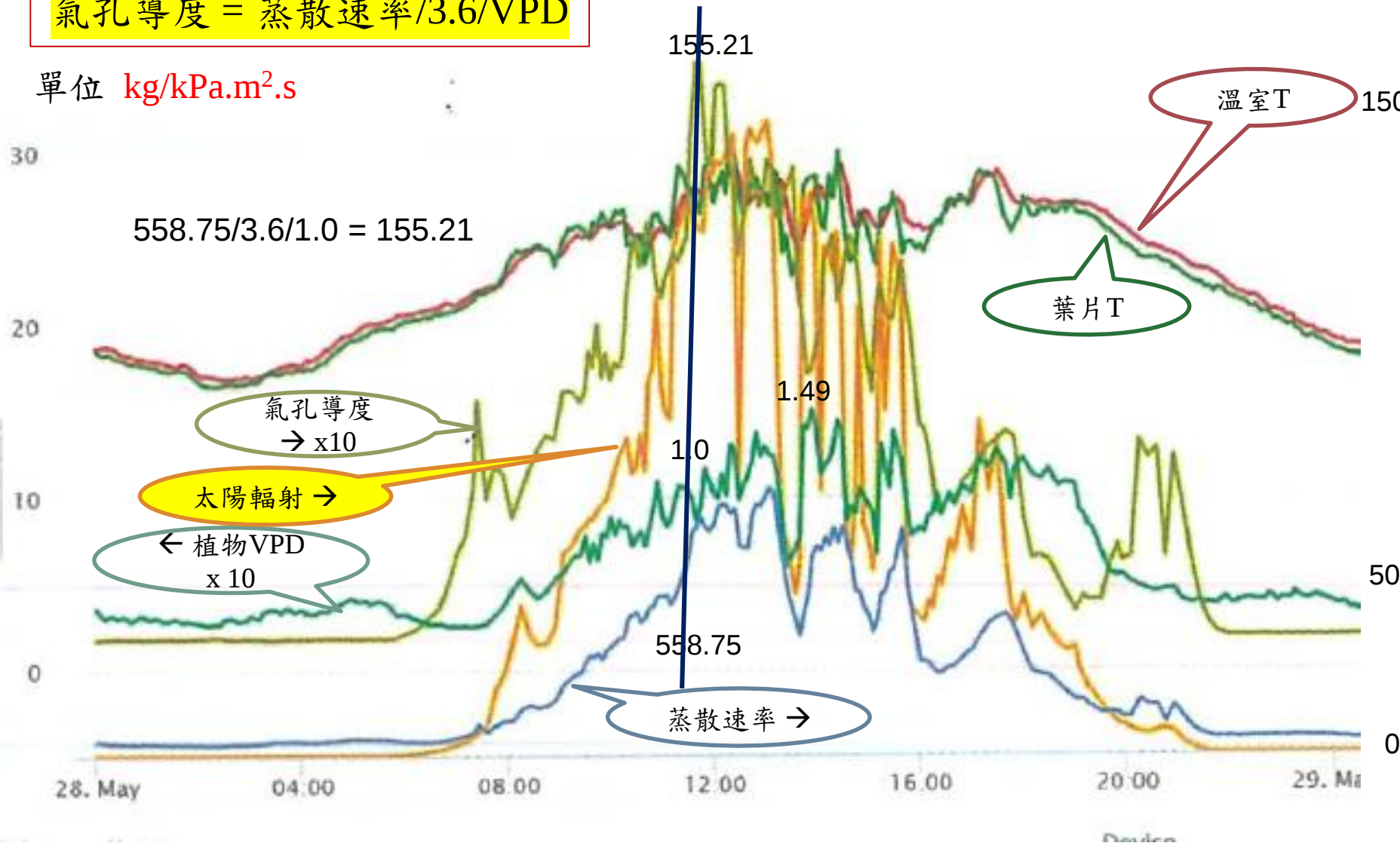
單位 $\text{kg/kPa.m}^2.\text{s}$



☒	—	Name	Fact	Axis	Min	Max	Avg
☒	—	temp greenhouse - °C	1	<-	16.8	29.2	22.2
☒	—	plant: leaf temp - °C	1	<-	16.4	30.6	22.0
☒	—	plant: PAR - $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$	1	->	1.00	1372.00	246.85
☒	—	calc stomata conductivity - $\text{kg/kPa.m}^2.\text{s}$	10	->	25.06	155.21	56.99
☒	—	plant: VPD - kPa	10	<-	0.24	1.49	0.53
☒	—	calc plant evaporation - $\text{g/m}^2.\text{h}$	1	->	23.96	577.41	131.85

$$\text{氣孔導度} = \text{蒸散速率} / 3.6 / \text{VPD}$$

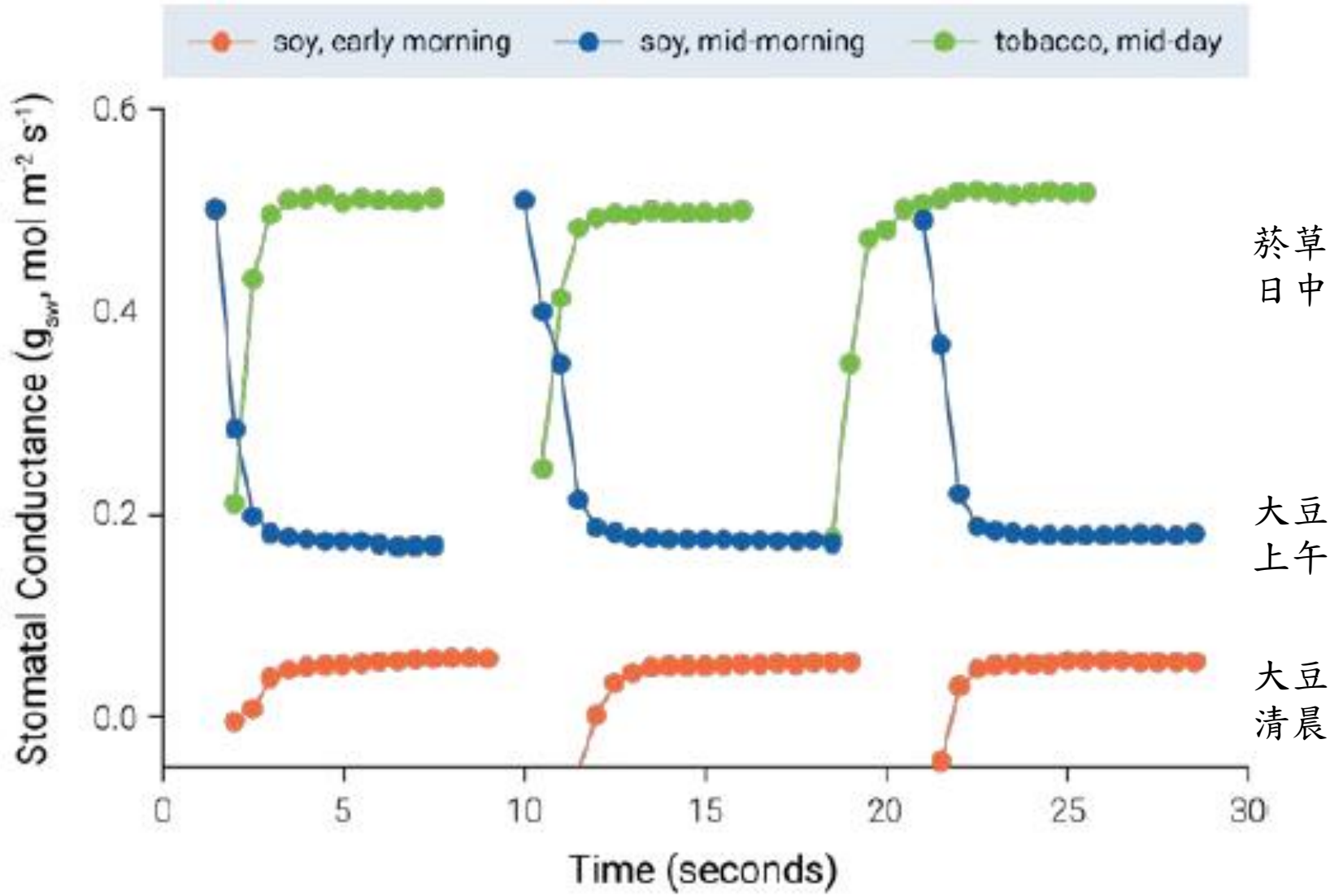
單位 $\text{kg/kPa.m}^2.\text{s}$



VPD < 0.2 kPa，表示濕度過高 ($\text{RH} > 95\%$)，蒸散速率低，會有鈣吸收問題 (圖上 $\text{VPD}_{\min} = 0.24$)。

Conductance vs. resistance (diffusion)

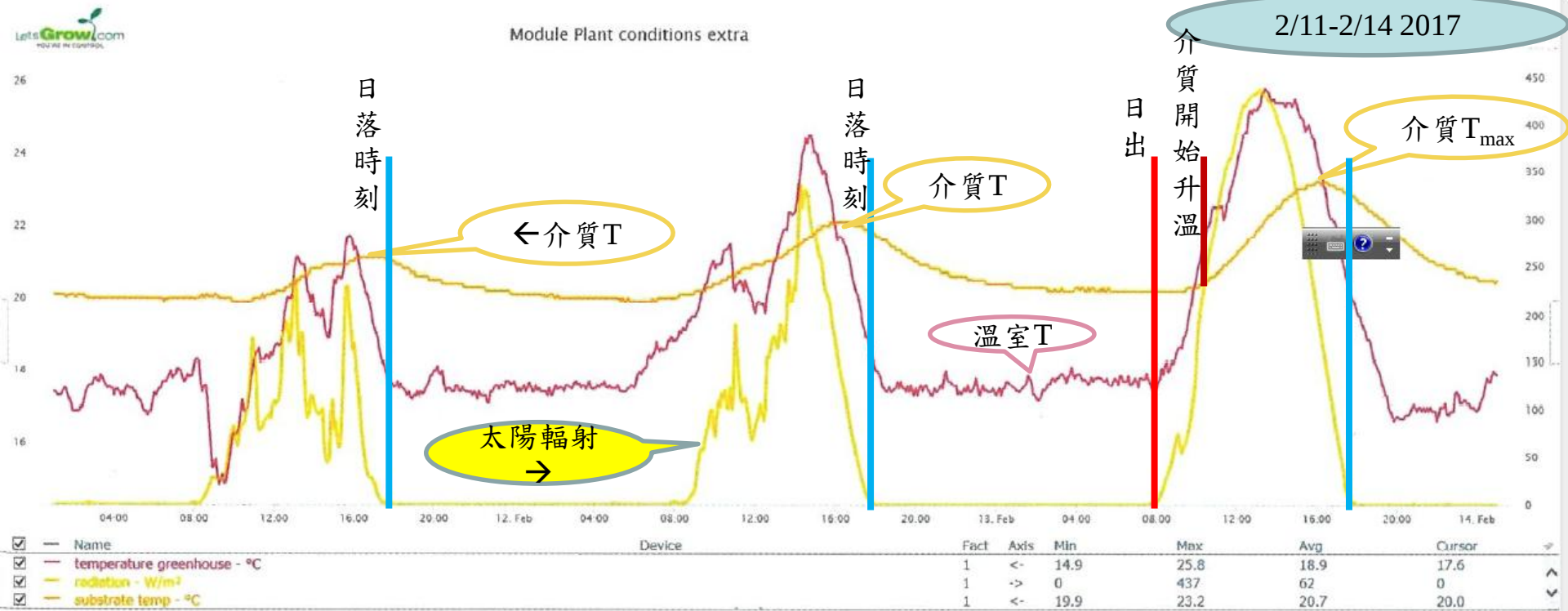
Unit used for Conductance	Unit used for Resistance
氣孔導度	氣孔阻力
$\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1} (= \text{m s}^{-1})$ [Mass of gas transferred per unit area per time]	s m^{-1} [Inverse of conductance]
$\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ [moles of gas transferred per unit area per time] Note: conversion factor from gas volume (m^3) to amount (mol) is temperature dependent.	$\text{m}^2 \text{s mol}^{-1}$ [Inverse of conductance corresponding unit]



監測介質溫度

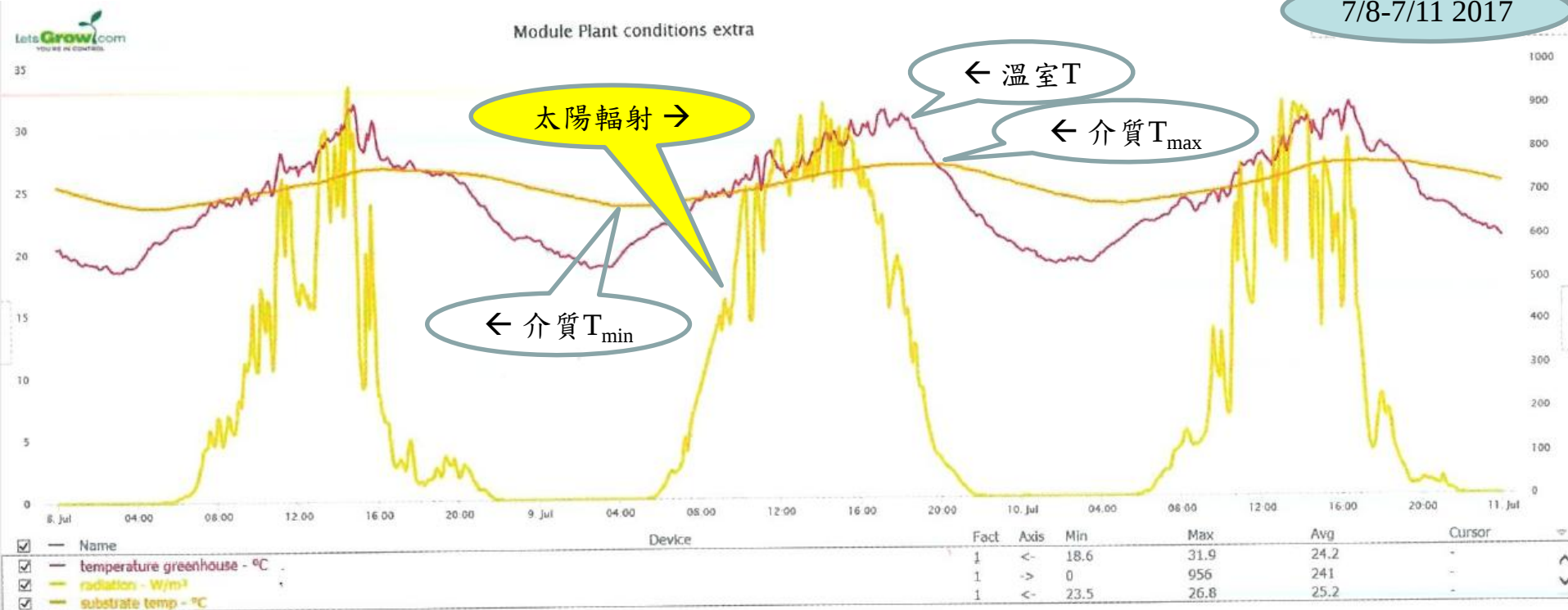
根溫的重要性

- 日出時，根系吸水速率要能跟上蒸散需求
- 若根溫低，吸水速率會無法跟上，會導致氣孔關閉、蒸散速率降低，光合作用減少
- 根溫低，無法產生足夠根壓促進細胞生長
- 根溫高，根壓大，可能會有泌溢發生
- 根溫低，獲得同化物分配量少，
影響新根發育，進而影響根部吸水能力



- 日出到介質升溫存在時間差，介質體積大，升溫慢，根溫偏低，根系吸水可能會跟不上蒸散。
- 傍晚時介質溫度最高，根溫最高，可能有泌溢狀況
- 二月份介質溫度 19.9~23.2 °C

7/8-7/11 2017



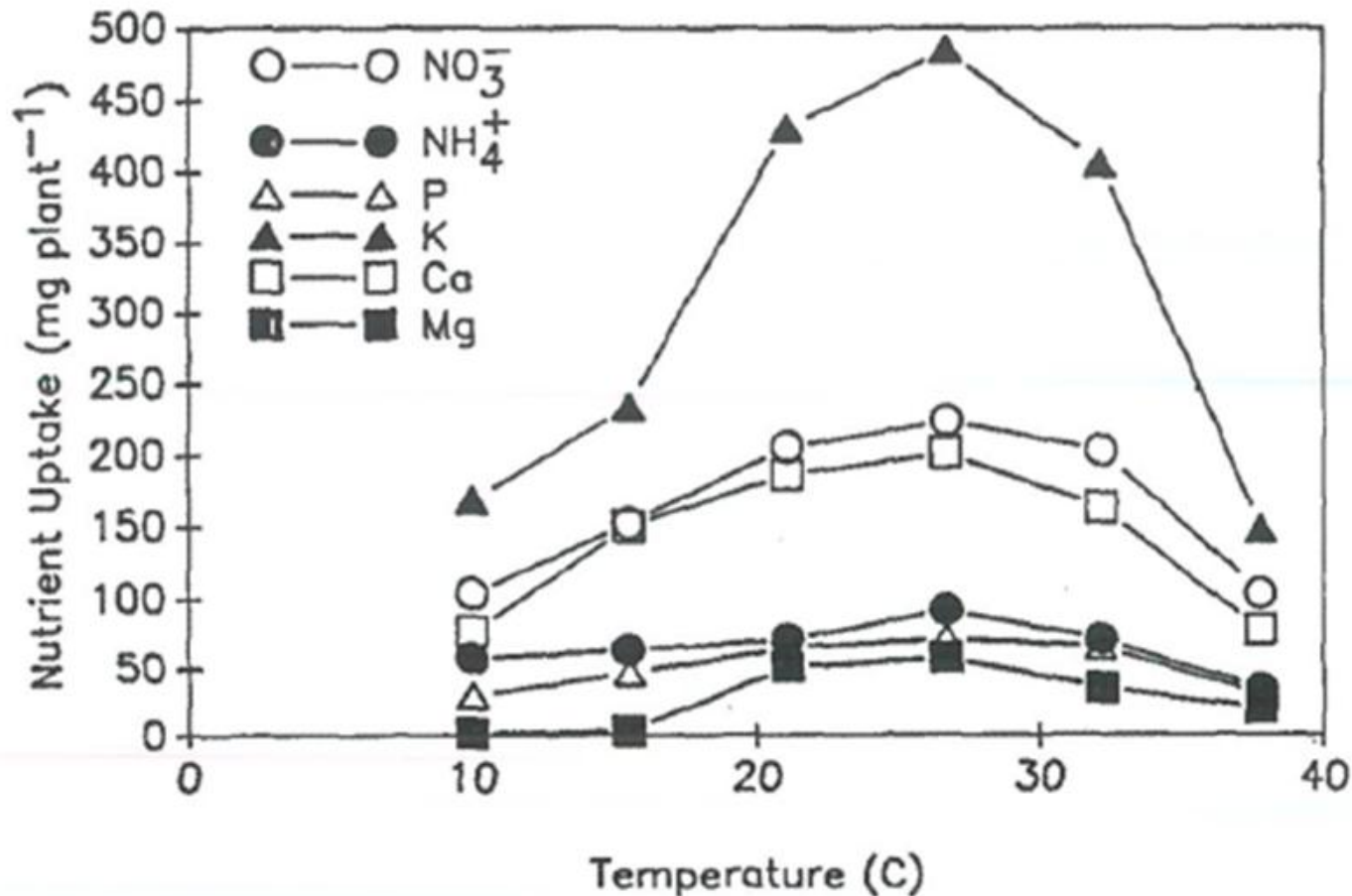
- 夏天介質溫度 23.5~26.8 °C 明顯高於二月時介質溫度 19.9~23.2 °C。
- 監測根溫可以最佳化根系狀況，也有助於監測瞭解水分均衡狀況。

根溫影響營養吸收

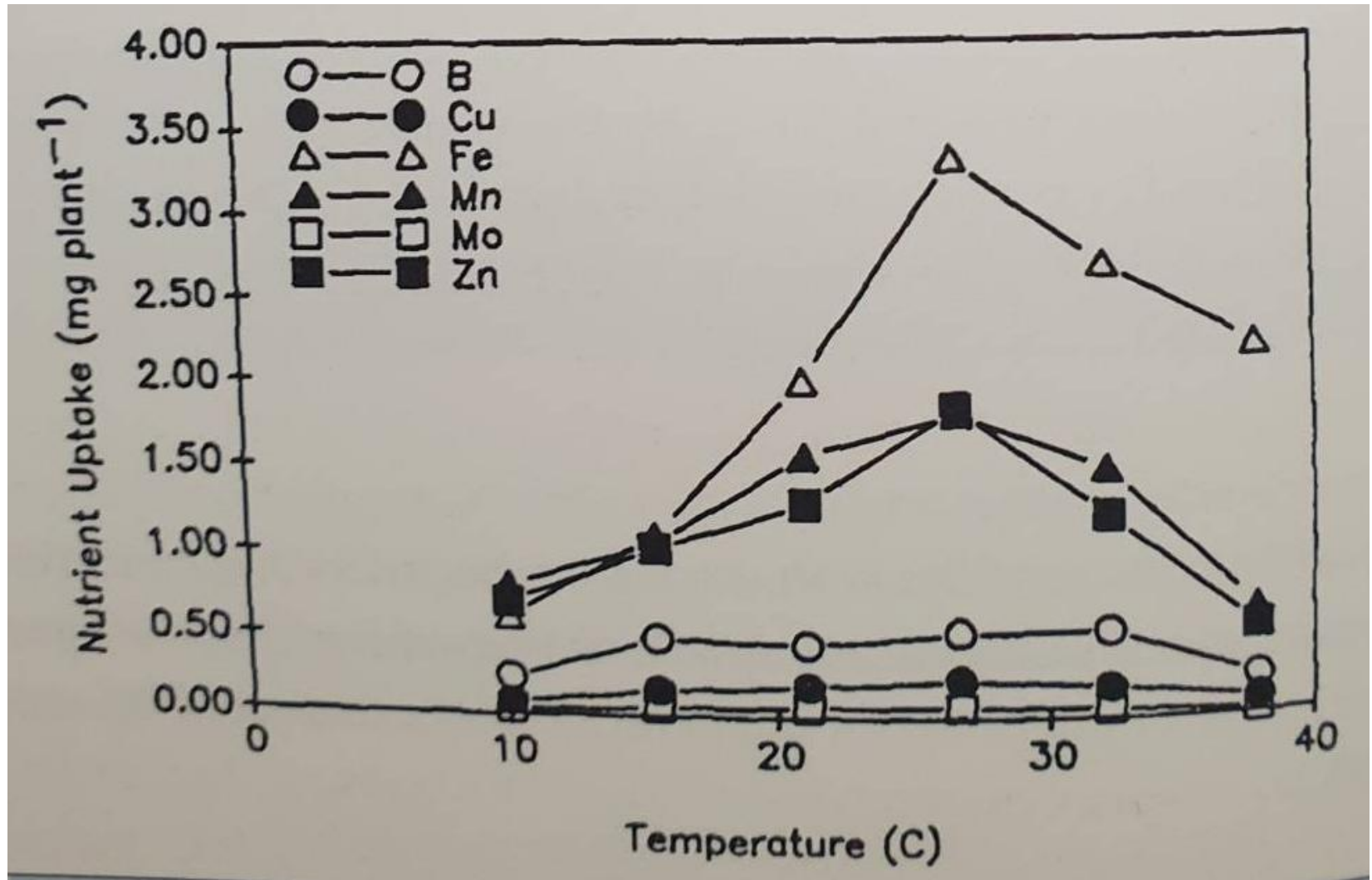
- 根溫會影響水分吸收。
- 根溫也會影響營養吸收
- 研究顯示根溫與產量及品質都有關
- 要監控根圈溫度，栽培時才能將各種均衡都考慮進來

根溫對番茄種苗吸收巨量元素的影響

Figure 6.9.2.2-1A + B The effect of root zone temperature on nutrient uptake of tomato seedlings. Tindall (1990)



根溫對番茄種苗吸收微量元素的影響



根系與營養管理

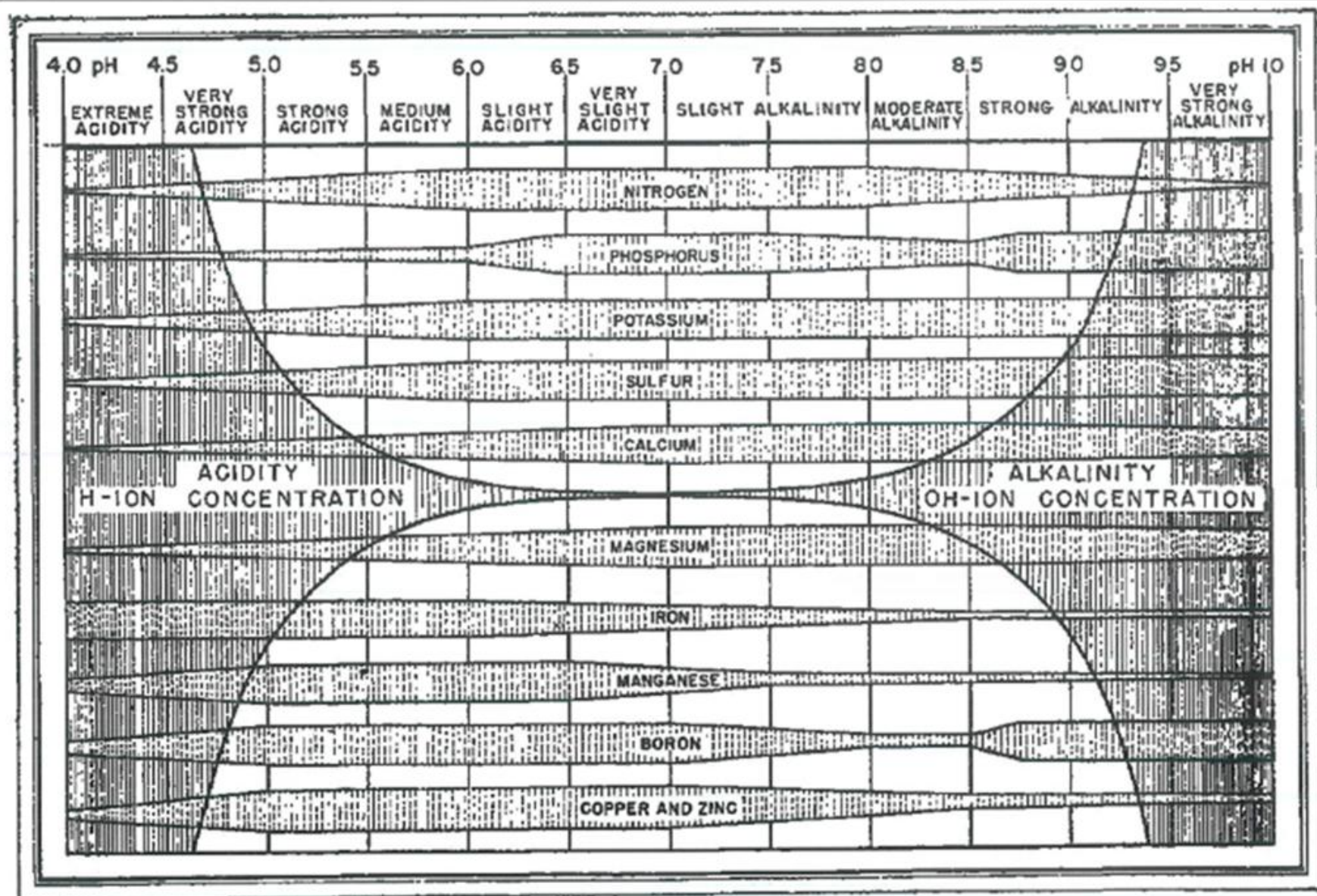
- 植物要快速生長需有發展良好的根系，根系則需同物化來維持及生長。
- 根系是植物積蓄最弱勢的部位。同化物不足時，最先受影響的是根系，根系可能會死亡或腐壞，產生水分逆境。當同化物有多餘時，最先反應的也是根系，可能使根系生長過旺，根壓過高。
- 對於健康及規律生長的根系，規律的同化物供應是關鍵。首先需有穩定的RTR，同化物的生長及消耗也需維持均衡。
- 植物負荷(果實、著果)會與根系競爭同化物，對根系生長影響很大，因此要控制植物負荷。
- 營養成分也會影響根系生長。

根圈 pH 影響營養吸收

- 生長快速的植物會吸收大量硝酸態氮 (NO_3^-)，根圈 pH 上升(釋放 OH^-)，造成營養沉澱成無機鹽類，而無法被根吸收。
- 蔬菜的果實及花卉的花苞都會吸收大量鉀 (K^+)，根圈 pH 下降(釋放 H^+)。下降至某個值，會造成根系受傷或死亡。
- 為避免根圈的 pH 有大的波動，需要植株有穩定的生長及能穩定的吸收各種養分。此時需要有穩定的 RTR 及植物負荷，達到規律的同化物均衡。
- 穩定的成長也有助於根圈的均衡，有穩定的 pH、EC 值，確保介質中各種養份都可被利用。

Figure 6.9.2-1 The uptake of different elements at different pH levels.

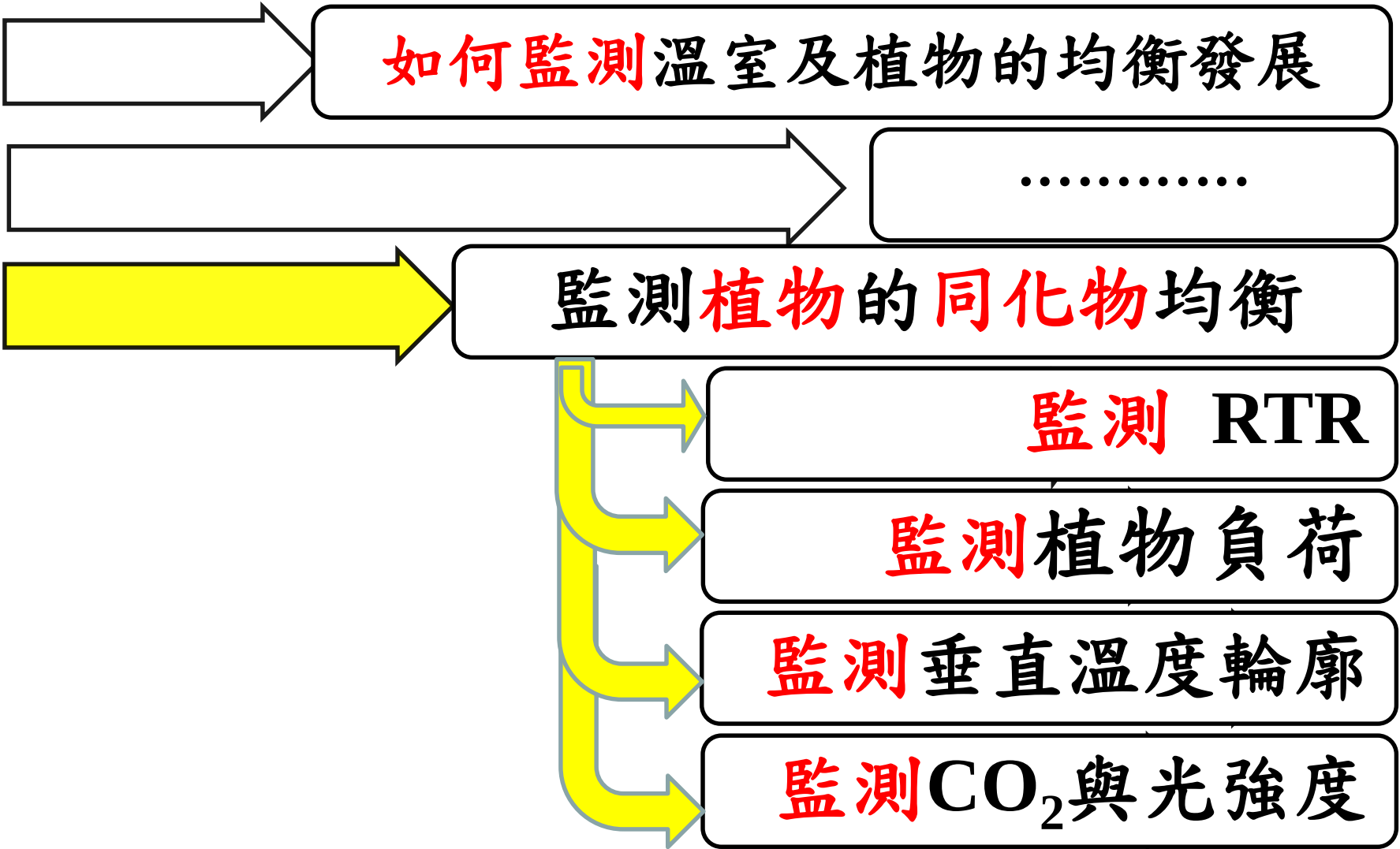
(Source: Truog, E. 1947. The Liming of Soils. In: USDA Yearbook of Agriculture 1943-1947. pp. 569-570.)



關注 泌溢 (guttation) 風險

- 植物體內**膨壓過大**時，就會產生泌溢，水分或是汁液會**從葉尖開孔滲漏**出來。虛弱的細胞或是花朵也會發生。發生時會造成組織傷害並孳生病害。
- **泌溢發生也表示蒸散速率與水分吸收不均衡**。
傍晚時，根溫仍高、濕度高及植物熱體輻射增加，使得蒸散速率下降，容易發生泌溢。
日出時，若根系加溫使得根溫上升，但此時蒸散速率低，也會發生泌溢。
- 防止泌溢最好的方式：
足夠的通風、避免 RH 過高、關內網，降低植物熱體輻射。這些方法同時也可防止冷凝發生。

子目錄之子目錄



如何監測溫室及植物的均衡發展

.....

監測植物的同化物均衡

監測 RTR

監測植物負荷

監測垂直溫度輪廓

監測CO₂與光強度

監測植物的同化物均衡

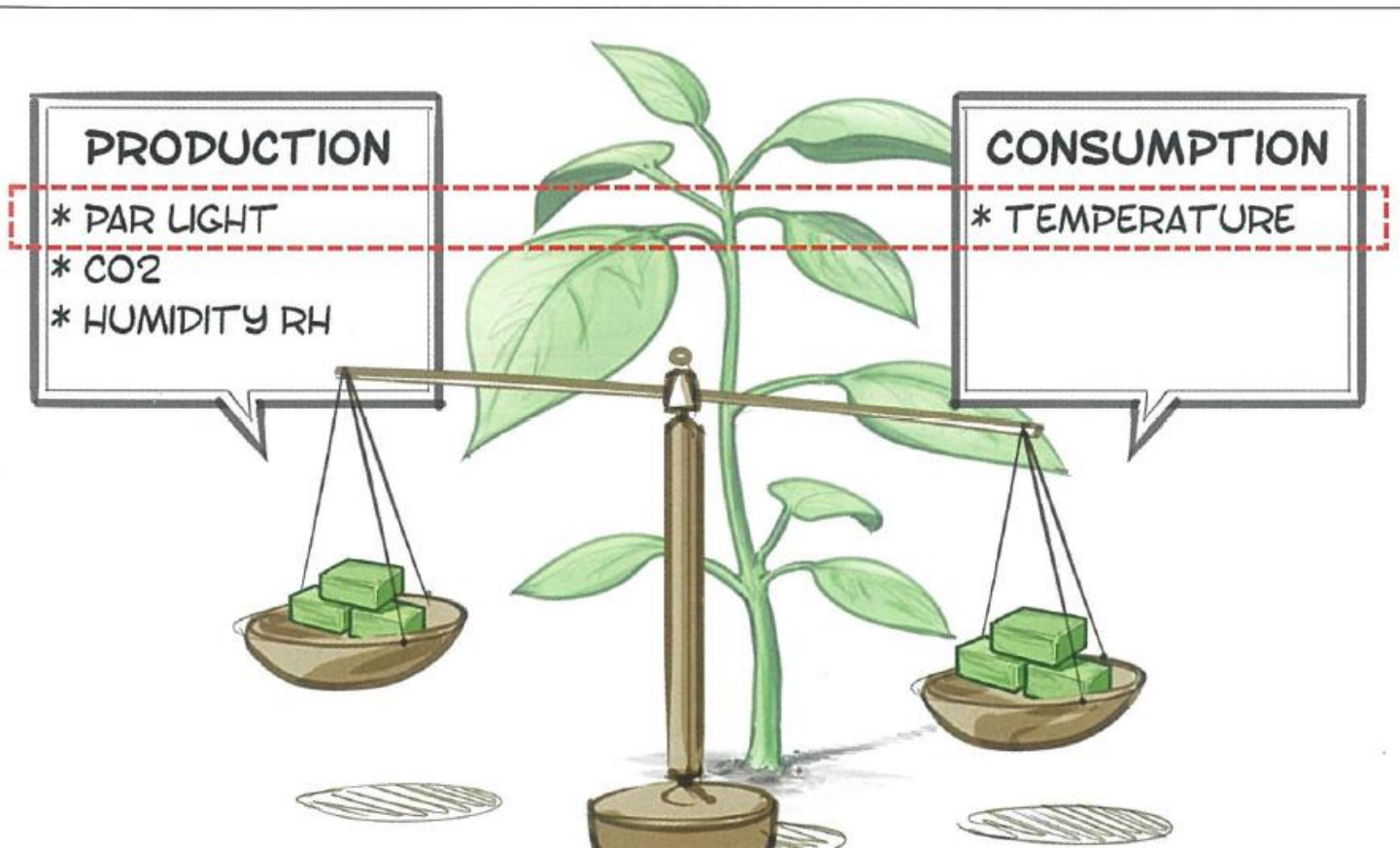
監測植物發育/狀態

傳統監測方法

- 1) 植物均衡：觀察植物**整體生長狀況**，若偏離期望狀況再作**調整**。調整分成營養生長及生殖生長兩種。
- 2) 同化物均衡：觀察植物**生長點的發育狀況**。例如，番茄頂部莖的厚度，太細時調降溫度減緩生長速度，反之，太厚增加溫度增加生長速度。因此，這也是基於過去已發生的現象作調整。
- 3) 傳統方式可讓植物維持在平均的均衡狀態，但這也表示植物一直處於不均衡狀況。

監測 溫度/光積 比值 RTR

- 當光合作用條件是適合時，同化物的生產量會與日光積值成正比。單位: J/cm^2 or $\text{PAR mol}/\text{m}^2$
- 植物發育速率及對同化物的需求主要與日均溫成正比

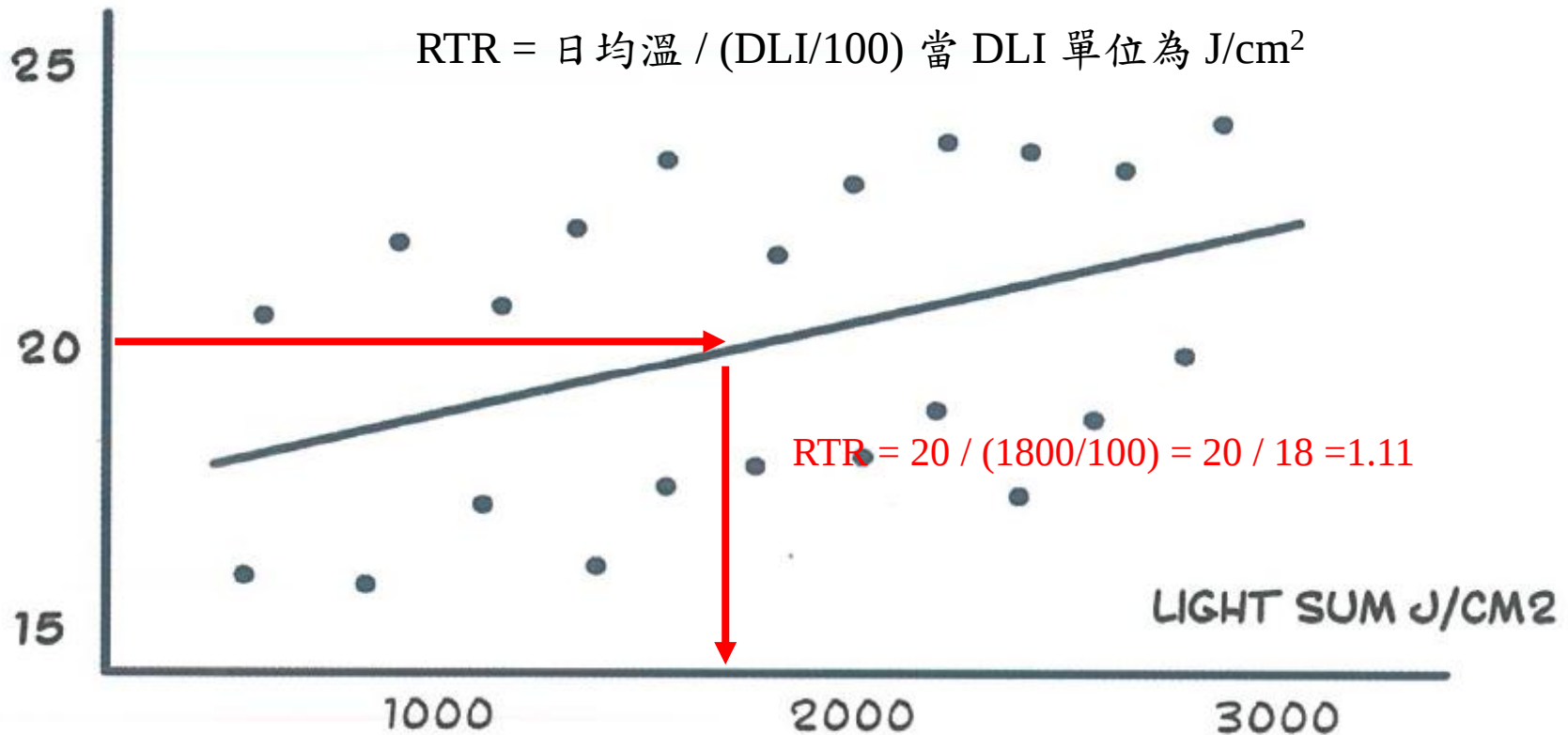


To keep the assimilates balance in equilibrium, average temperature must be aligned with the light sum on a day to day basis.

- 每個地方天氣型態不同，光積及溫度也不同。
。植物本身有適應存活的本能，能應付天候的變化。
- 但對生產者來說，栽培的要求不只是存活而已，而是生產量及品質都要能達最佳化的狀態。為達這目的，植物需要賦能（empowerment），即維持**穩定的每日光積/溫度 比例**。
- 經過賦能後的植物，生長勢更強健也更能因應天氣變化、對病蟲害抗性更好，植物根圈也能獲得改善。

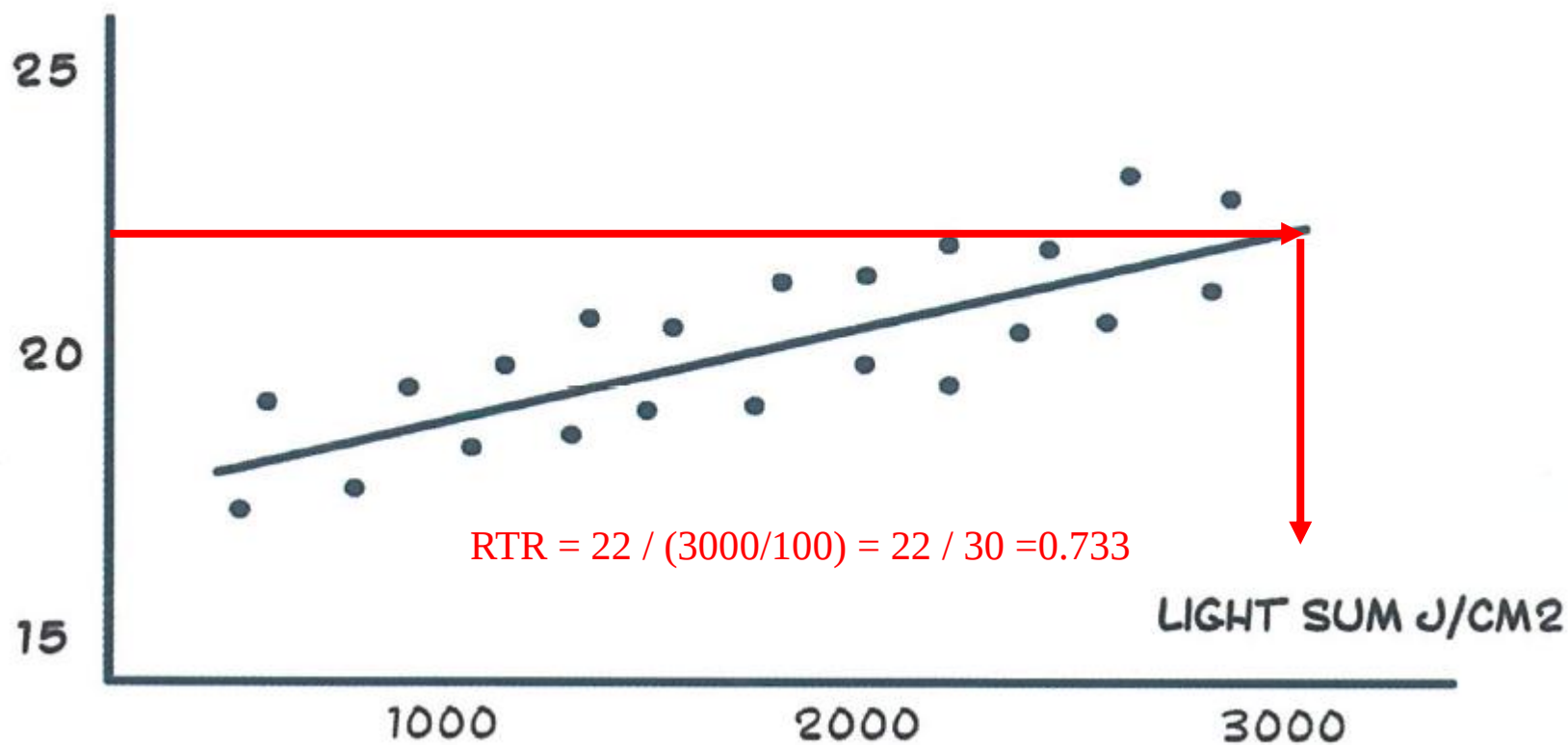
TEMPERATURE
DAILY AVERAGE

$$500 \text{ W/m}^2 \times 3600 \text{ sec/hr} \times 10 \text{ hr} / 10000 \\ = 1800 \text{ J/cm}^2$$



每個點代表一天的數據，所有點看似都不在直線上，只有平均值接近直線，這代表植物看起來可維持生長的均衡，但實際上一直都是在不穩定的狀態，總是在調整。

TEMPERATURE
DAILY AVERAGE



使用RTR策略產生的穩定狀況，每個點位置都接近直線上。同化物的合成與消耗是均衡狀態，植物可以同時營養生長與生殖生長，持續有新根生長、持續開花及產生果實，並且生長過程中不受干擾，植株會是最佳狀態。

From monitoring to steering



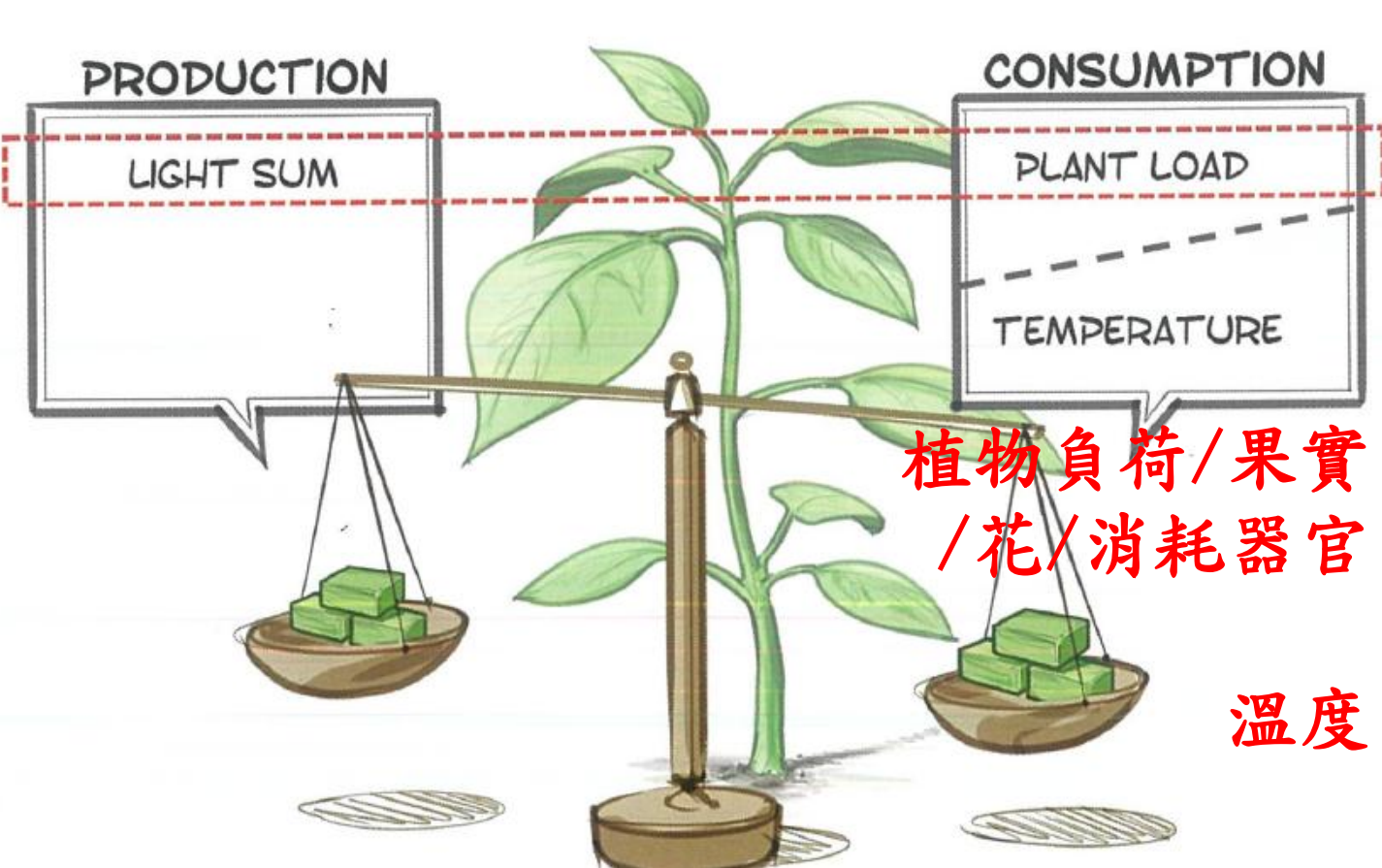
不穩定的 RTR 就像
沒目標地盲目往前



維持穩定的 RTR 就像
掌穩舵往目標直線前進

監測植物負荷

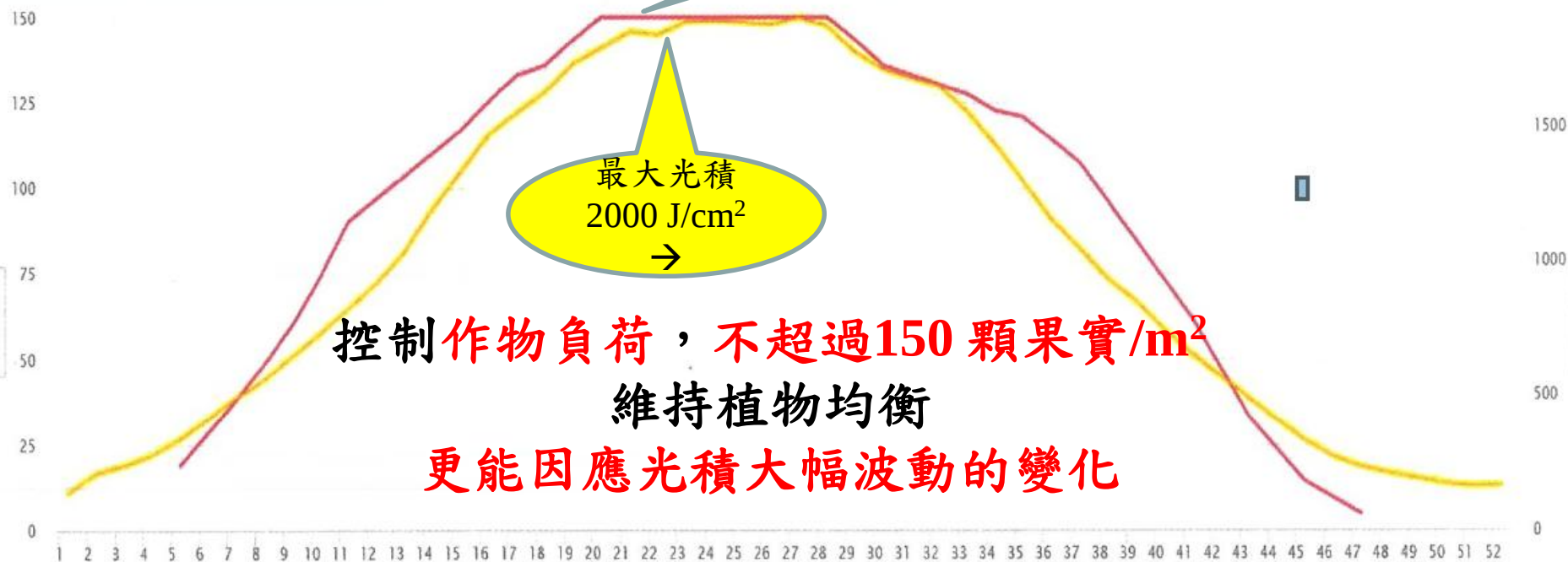
- 監控植物負荷是維持同化物均衡很重要的步驟
- 同化物的需求由植物負荷及溫度決定 = 積儲強度
- 穩定的RTR策略，可依照季節的光積變化，來控制植物負荷 (果實數/m² or 植株/m²)



To control the assimilates balance during the season the plant load should be related to the expected light sum (based on the average of the last 10 years)

Plant load target and Radiation

1d Jan 4, 2017 - Jan 2, 2018



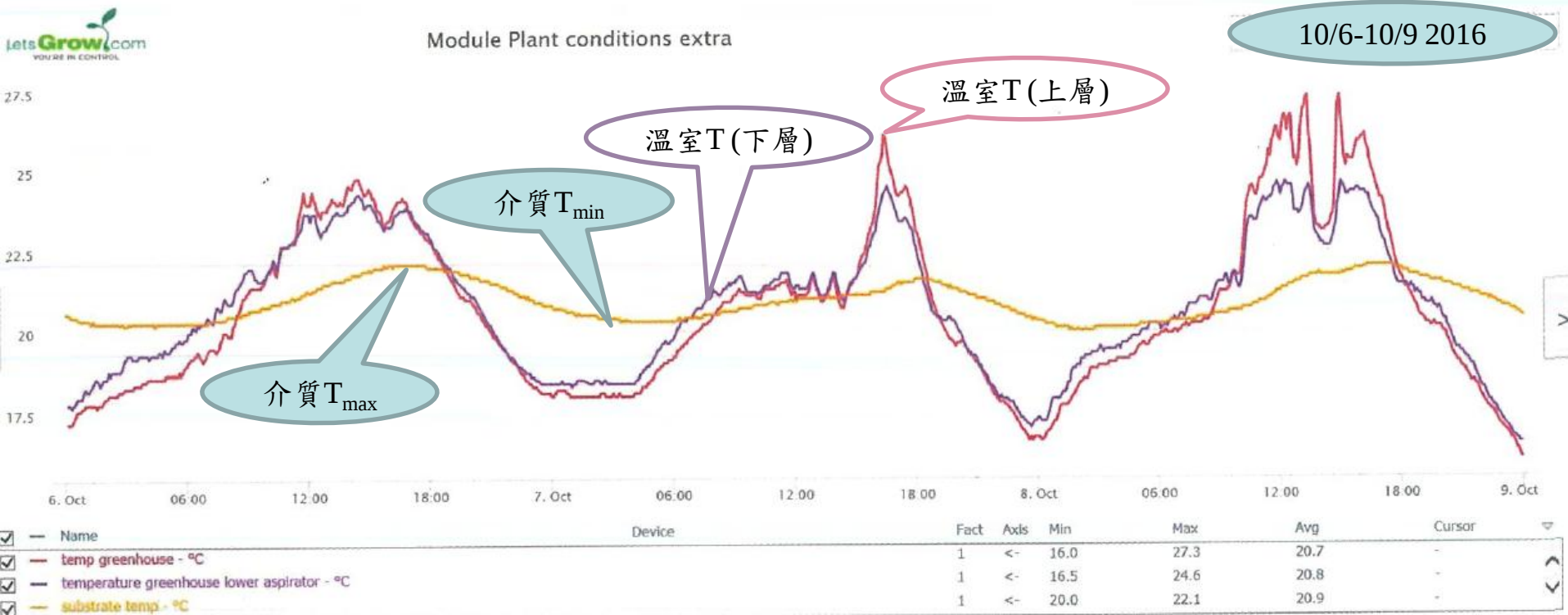
☒	Name	Device	Fact	Axis	Min	Max	Avg	Cursor
☒	plant load target - #/m ²		1	<-	4.8	150.0	99.0	-
☒	radiation sum longstanding - J/cm ²		0.14	->	174	13590	7033	-

黃線 = 每週累計的光線能量，單位：J/cm² (依據10年的平均值)
紅線 = 規劃的/預期的作物負荷，單位：果數/m²

監測垂直溫度輪廓

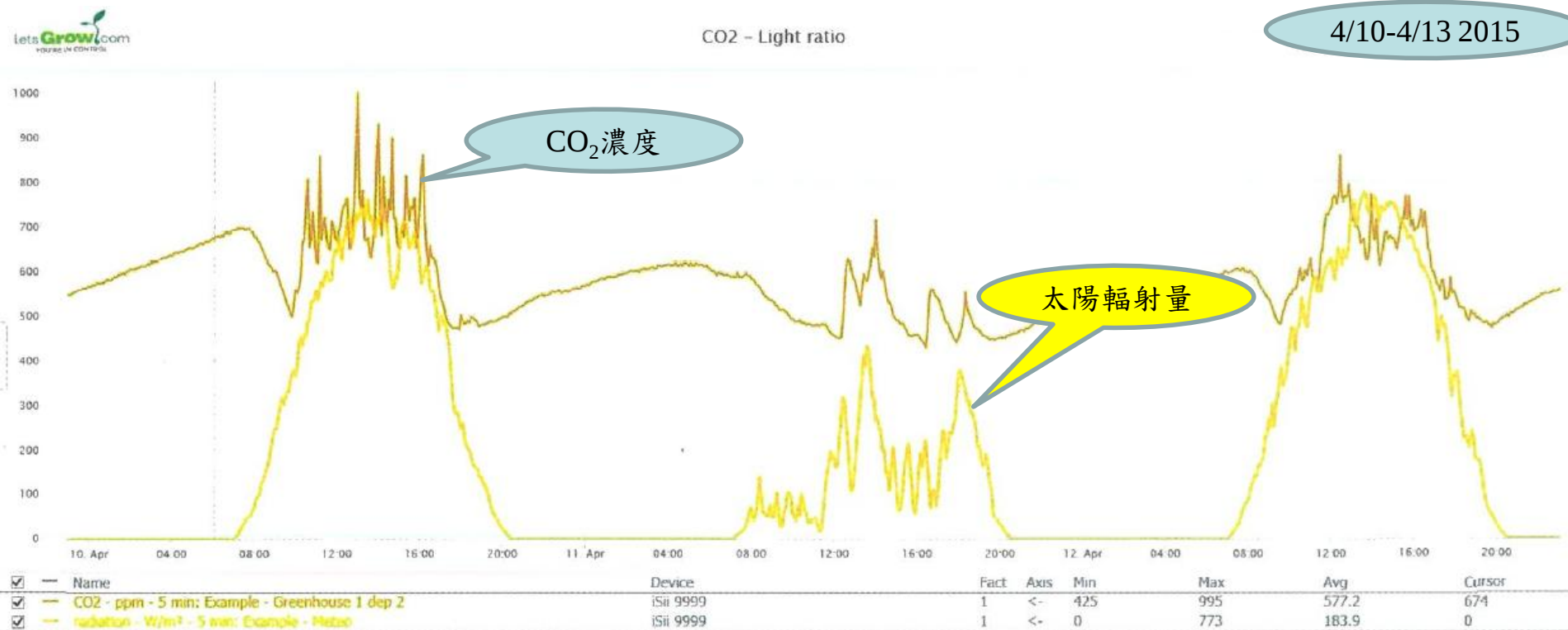
- 果實或是花芽的產生 與 果實或是花朵的採收，兩者之間的均衡也會與植物垂直溫度輪廓有關。溫度決定了果實及花朵的生長發育速度。
- 垂直溫度輪廓影響因素
 - 1) 太陽輻射、人工光照、熱體輻射
 - 2) 植物結構(葉片大小及分佈): 影響光線分佈及果實或花朵的溫度
 - 3) 加溫管的位置: 上、中、下層
 - 4) 補光燈種類: LED (較少熱量) or HPS (較多熱量)
 - 5) 直射光或散射光: 散射光可進入植物下層，進而提高下層溫度，因此可促進下層果實成熟
- 為維持植物均衡及控制植物負荷，監測垂直溫度輪廓是必須的，因此需要在上層及下層安裝溫度計。假若有不均衡狀況時，也可以調整上下層的加熱管來調整至適合的狀態。

彩色甜椒的垂直溫度分佈與介質溫度



監測 CO₂與光強度

- 為產生最大光合作用效率，CO₂濃度要與光強度做連動。
估算方式: CO₂ 的濃度 (ppm) 至少要維持與溫室外的太陽輻射量 (W/m²) 相同的值，如下圖的兩個晴天時的狀況，陰天時 CO₂ 濃度可調降
- 高濕可以避免水分逆境，並維持氣孔打開來吸收CO₂



植物的同化物均衡與作物處理

- 使用 RTR 策略及垂直溫度輪廓可以控制植物負荷，並影響到植物頂部發育及下方果實的成熟速率。
- 作物處理也扮演重要角色
 - 1) 採收頻率
 - 2) 是否需要保留額外的莖（番茄）
 - 3) 是否摘除側芽（番茄、茄子）
 - 4) 側芽的大小（甜椒）
 - 5) 疏果（甜椒、番茄、草莓、小黃瓜）
 - 6) 移除果串（truss）
 - 7) 摘除上方葉片
 - 8) 控制單位面積的株數及莖數
- 上述表示作物處理和採收的時機與頻率，對維持規律的著果、花芽形成、果實成熟是很重要的，亦即維持植物均衡。
- 投資少量的人工成本進行作物處理，即可改善均衡，有時會比節省人力更能獲利。

目錄

引言

如何監測溫室及植物的均衡發展

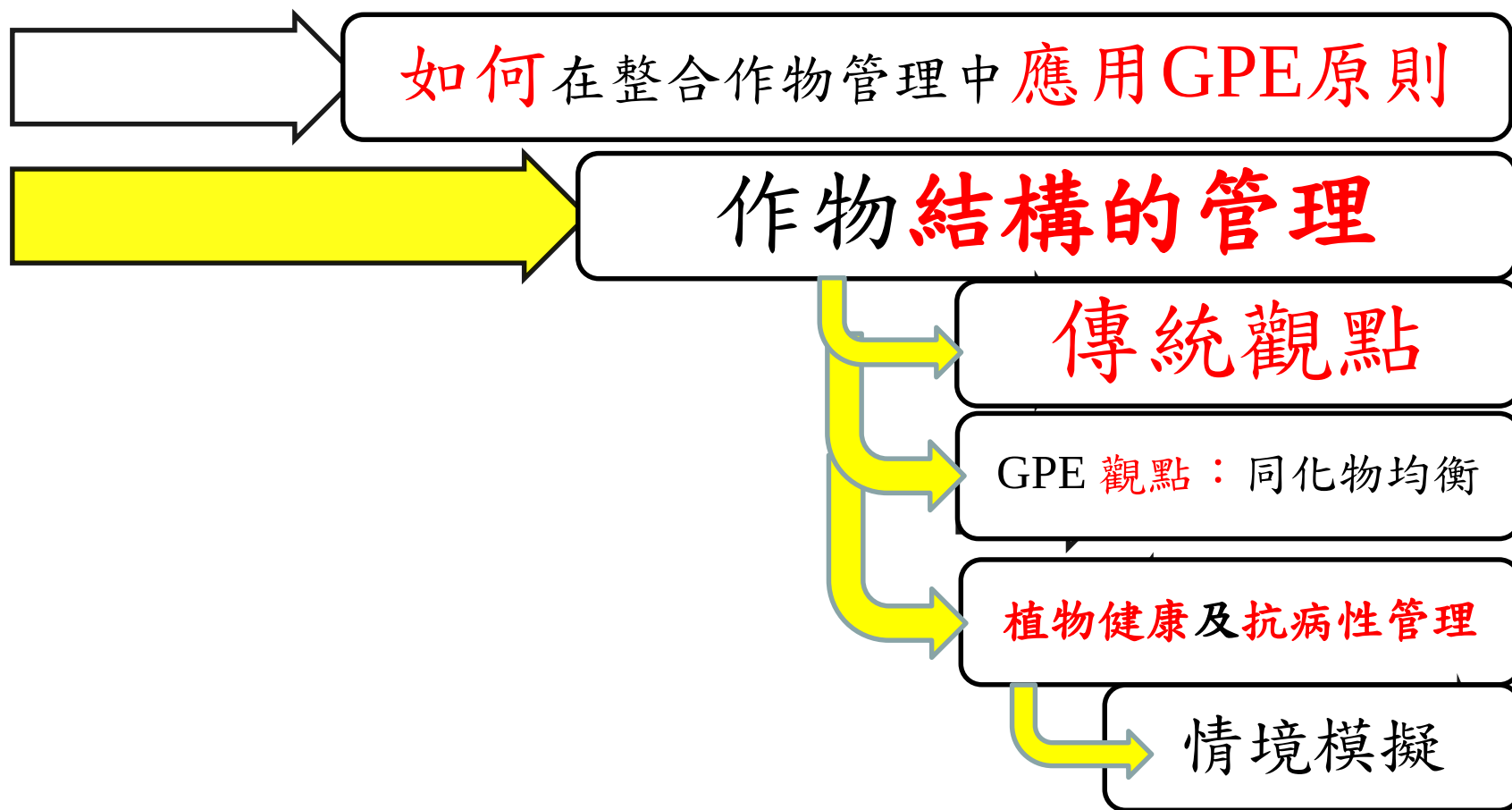
如何在整合作物管理中應用GPE原則

細說 RTR

如何在整合作物管理中應用GPE原則

- 已討論
植物的能量、水分、同化物三種均衡
- 本節探討
在同時考慮三種均衡的狀況下
如何分析、支持及**調控**植物的表現
及
以植物均衡為中心考量的優點

子目錄



作物結構的管理

- 作物結構是光線利用效率的重要因素
- 作物結構分成“生殖生長”及“營養生長”
- 果菜類: 番茄、小黃瓜、甜椒、茄子，
 - 期望的作物結構是高度生殖生長
 - 開放式&葉短讓光線穿透到下層，同時有足夠的LAI。
 - 下層果實可有足夠光線，果溫較高，較早成熟，較高產且植物負荷較低。
- 葉菜類與觀葉植物: 偏好營養生長或茂盛生長
- 如何控制作物的結構?

- 細胞伸長是植物結構主要關鍵，有兩種機制：
 - **滲透壓**：細胞內的高濃度可溶性醣、鉀離子引起的吸水、及細胞膨大。細胞的吸水狀況又與蒸散作用及根系吸收水分的狀況有關。
 - **根壓**：有活力的根系可以加壓整個植株，使膨壓增大促進年輕細胞延長。此種細胞伸長只發生在蒸散作用低時，
- 細胞伸長是多種過程的結果：
 - 同化物生產與分配、蒸散作用、根壓及水通道蛋白（細胞膜控制水進出的蛋白）。
- 可以有很多種方法來調控植物結構，看是要偏向生殖生長還是營養生長。

傳統觀點：以植物三種均衡來看傳統的方法

• 促進生殖生長方式：

1. 高光及最大通風、低濕可以促進的生殖生長，因缺水細胞伸長減少，葉片短。但氣孔關閉、光合作用效率低、生長慢。
2. 傍晚降溫：同化物自葉片流向花朵、果實會受溫度影響，因此有一個方法是傍晚時讓溫室快速降溫，因果實質量大，果溫下降速度會較其它器官慢，因此果實會獲得較多的同化物。但降溫也會減少葉片的同化物輸送，目前研究也還沒證明這種方法是有效的。不過，因為溫度較低，水通道蛋白活力低，細胞伸長減少及生長慢。
3. 減少水分供應，抑制營養生長。壞處：水分逆境

• 促進營養生長方式：

- 低光、高濕、規律給水

上述生殖生長會涉及水分均衡與溫度，
實際操作較難預測效果

例如傍晚降溫，影響的不只溫度，
包含通風系統及節能布使用，
都會影響到加溫系統、植物的熱體輻射、
蒸散、根壓、同化物的輸送。

因此過去用溫度策略調整作物結構，
很多狀況都不甚理想。

GPE觀點

- 植物結構主要受同化物的分配及滲透壓造成細胞伸長的影響。
- 生長條件到位時(光線、濕度、 CO_2)可得到最大量的同化物生產。當光線強並結合白天及葉間的高溫，葉片同物化會流向果實或花朵。因此葉片蔗糖濃度低，減少了葉片細胞伸長。果實或花朵的蔗糖濃度高，會有更大的果實及花朵，及風味更佳。
- **GPE的做法：**利用垂直溫度輪廓達到同化物均衡來促進生殖生長，目標是讓果實的溫度比其它生長點高，因此能獲得較多的同化物。

同化物均衡調控植物結構 範例：

- 1) 甜椒及草莓：植物負荷在短時間增加時，幼葉會很少或停止生長。
- 2) 番茄：摘移一串番茄花果，葉片會明顯伸長。

因此透過同化物分配來調控生殖生長及營養生長的均衡，是植物自我獎勵的效果。如果植物負荷、平均溫度都能配合季節性日照變化，就會有非常穩定的均衡。

植物健康及抗病性管理

- **傳統方法**是治療的觀點，著重病株的治療方法，較少有要維持植物健康的預防性觀點。傳統觀點常是單因數方式思考例如：
 - 1) 病害與高濕RH有關，例如灰黴病
 - 2) 植物抗病性差與植物缺乏活力有關
 - 3) 大部分病害可以用特定的化學藥物處理
- **傳統方法**的特徵是盡可能維持好的氣候環境，打開天窗通風、夜間開啟節能布及加溫。這樣做會有效果，但這不是正確解決問題的方法，因為會浪費大量的能量及藥劑成本。原因是這些病害很少只是環境氣候不好的問題，通常這些植物也有植物均衡受到干擾及狀況不佳的問題。
- 綜合防治可更有效率的達到植物健康及植物抗病性。作法：
 - 良好的植物均衡；使用天敵做生物防治
 - 在根圈添加有益微生物等。

- 細胞內具有高比例的植物纖維素是植物抗病性的基礎
 - 纖維素成分是多醣類分子，因此同化必須足夠
 - 同化物可用來生產水楊酸及茉莉酸等與植物抗病性有關的物質
 - 根圈的微生物也需要植物的同化物
 - 鈣也是構成纖維素重要的成分，鈣也有助於夠成堅固的細胞膜
- 植物均衡可以確保同化物是足夠的，讓植物對病蟲害具有抵抗力。
- 當有需要時，受傷的組織也因為有足夠的原料，可以很快的被修復。

很多栽培問題的根本原因是植物的**均衡**
受到干擾，而氣候狀況例如**濕度高**只是
次要原因。以下用小黃瓜來舉例證明：

情境 I：

小黃瓜在光線不足下，栽培一段時間後
連續幾天的好天氣，開始大量採收

- 光線不足會使同化物缺乏，影響根系發育，根系對水分吸收能力不足。
- 接下來好天氣時，在強日照時，植物蒸散作用與水分吸收無法均衡，又因短時間大量採收小黃瓜，因此對水分調整緩衝空間下降，水分逆境因此形成。
- 另一方面，大量採收小黃瓜，減少了植物負荷，因此同化物均衡很快地恢復，
- 接著足夠的同化物會促進根系生長，因日照強根溫高，結果造成根壓增高。因為缺乏果實做水份的緩衝，結果造成泌溢及葉片邊緣的細胞受傷。潮濕的花朵及受傷的細胞，更容易感染到灰黴病及其它真菌病害。
- 如何預防？

- 光線不足時：

- 1) 要降低植物負荷，維持較低的溫度，讓根系有較佳的狀態會應付未來水份需求的增加。
- 2) 注意植物 RTR 的穩定度，平均溫度增高時也要有光積值成比例的增加。

這樣就可以避免根系過於旺盛及根壓過高。

其它避免根壓過高及泌溢的方法：

關網減少熱體輻射、促進植物上方的蒸散作用。
這與傳統夜間要開網的作法是相反的。

情境 II: 非洲菊花朵灰黴病的發生 過去多認為高RH是灰黴病主因

- 最近研究發現，非洲菊有熱體輻射及在遮黑布關閉下缺乏空氣流動才導致灰黴病發生的主因。
- 產生現象:
 - 1) 花朵溫度偏低，蒸散作用小，鈣吸收不足
 - 2) 根壓造成花朵的泌溢及冷凝結
- 增加通風及加溫來降低RH可能是正確的方向，但有時還是無法解決這問題。
- 關閉兩層內網(減少熱體輻射)、使用垂直風扇促進空氣的流動，已證明會更有效，並且能夠節省能源成本。

情境 III:

在冬季長期使用人工光照的玫瑰，在切花採收後，花朵及葉片快速脫水，瓶插壽命大幅縮短。傳統認為氣孔失去關閉能力原因：

- 1) 溫室長時間維持高濕度
- 2) 人工補光時間太長，使得黑暗時間過短

GPE 認為這兩種看法都不是很正確

- GPE 認為 **採後的品質管理不能只在採後處理**，要讓植物生長快速的同時，還要避免植物變成懶散，必須兼顧，因此需要在這兩者之間取得平衡。前述情境的玫瑰是一個缺乏自然干擾，植株變懶散的狀況。
- 人工照明就算提高到 $200-300 \mu\text{mol}/\text{m}^2.\text{s}$ ，仍遠小於自然光照，並且人工照明非常穩定，開燈也分2-3個階段逐漸開啟，不像自然光會短時間大幅增加。因此，也不會有蒸散速率短時間大幅增加的狀況。
- 因此冬季人工照明下栽培的玫瑰，從來沒遇過水分逆境或水分不足的狀況。氣孔的功能是要保護植物避免脫水，但現在不會用到這種功能，所以冬季時氣孔的調整能力會較其它季節差。
- 在荷蘭居家客廳中乾燥天候 VPD 為 2 kPa 環境下，玫瑰切花的氣孔無法應付，乾得快，這是同樣道理。

- 其它季節的陽光會在很短的幾分鐘內增加或減少幾百 W/m^2 ，這會促進氣孔要快速反應。所以其他季節栽培的比較不會有懶散的問題。
- 監控VPD可以用來監控水分均衡及氣孔行為。正常狀況下，VPD應該要在0.5-1.5 kPa，但在人工照明下，VPD是非常穩定及只有0.1-0.5 kPa。因此很明顯地，缺乏水分均衡的變化，才是導致氣孔功能異常的原因。
- 植物只投資在最有用及必須的部位，人工光照明下平均溫度對光積值的比例（RTR）會比自然光下高很多，這表示植物要節省使用同化物。
- GPE 對策：
 - 合理選擇 RTR 及對應的植物負荷
 - 水份平衡的調控要設計成有波動，使氣孔可以對應的開啟或關閉。研究發現只要一天一次的頻率，就可以讓氣孔功能明顯改善。

目錄

引言

如何監測溫室及植物的均衡發展

如何在整合作物管理中應用GPE原則

細說 RTR

CO₂施肥

- **RTR** = 平均溫度 / 光積值 (Light Integral)
- **光積值**：一段時間內（通常是一天）植物接收到的總光量，可以理解為植物的「能源收入」。
- **平均溫度**：影響植物代謝速率，可以理解為植物的「代謝開銷」。

為什麼人工光下的 RTR 會比自然光高很多？

- **自然光**：光積值非常高（陽光強、時間長），溫度雖然也可能高，但 **分子(溫度)上升的速率跟不上分母(光積值)**，所以 RTR 低。植物能量充足，可以「大手大腳」地生長。
- **人工光**：光積值通常只有自然光的 10-30% (尤其室內種植)，但為了讓植物生長，溫度往往需要維持在適宜範圍（例如 20-25°C）。這導致 **分母小、分子相對大**，所以 RTR 高。換句話說，植物是在「能源收入很少」的情況下，卻要面對「不低的代謝開銷」。

高 RTR 迫使植物「節省使用同化物」？

- **同化物**：就是光合作用產生的碳水化合物（如葡萄糖、蔗糖）是植物建造身體和維持運作的「資金」。
- 在高 RTR 條件下，植物面臨一個困境：
 - **收入少**：光積值低 → 光合作用總產量低。
 - **支出高**：溫度高 → 呼吸作用消耗快（夜間消耗尤其明顯）。
- 結果就是**入不敷出**。如果植物還像在自然光下一樣「浪費」同化物（例如快速長枝葉、合成次級代謝產物），很快就會耗盡庫存，導致生長停滯甚至衰弱。

「節省」具體表現在哪些行為上？

植物會**啟動一系列的節能策略**，例如：

- **降低呼吸速率**：下調不必要的呼吸代謝，減少能量浪費。
- **減少非必需結構**：不長太高的莖、不長太薄的葉片（避免水分和碳消耗）。
- **延遲開花或生殖生長**：把優先權留給根莖葉這些基本生存結構。
- **提高光能利用效率**：增加葉綠素含量，把每一點光都榨乾。
- **儲存優先**：把珍稀的同化物先轉為澱粉儲存起來，而不是立刻用於生長。

一個生活化的比喻

想像你是一個上班族：

- **自然光下（低 RTR）**：月薪 10 萬元（光積值高），但每月基本開銷只要 3 萬元(溫度適中)。可每天吃大餐、買新衣、出國旅行(奢侈生長)。
- **人工光下（高 RTR）**：月薪只剩 1 萬元（光積值低），但房租、交通、吃飯加起來還是要 8 千元（溫度不低）。你就必須省吃儉用、取消娛樂、甚至去撿菜市場的剩菜（節省同化物）。

人工光照明下**平均溫度對光積值的比例（RTR）**會比自然光下高很多，這表示植物要節省使用同化物。

這句話的意思是：當溫度相對較高、光線又不足時（高 RTR），植物的光合產物非常珍貴，不足以支援奢侈的生長模式。它會強制自己降低代謝需求、減少浪費、把資源用在最必要的生存功能上。這是一種植物在逆境下的生存智慧，而非生理缺陷。

如果你是在進行植物工廠或室內種植，觀察到高 RTR 下的節省現象，就提示你需要**增加光照強度或適當降溫**，才能讓植物恢復到正常生長的碳平衡狀態。

控制RTR策略是避免植株體內同化產物生產與消耗錯配的第一步，有助於實現更平穩、連續的生產曲線

萵苣栽培的RTR設定值相對較低，以抑制生殖生長。確切的數值需要根據特定品種和光積值進行微調。

- **RTR參考策略**：採用偏向營養生長的策略，**RTR值**相對較低，例如**RTR等於1左右**（意即每獲得**1000 J/cm²的輻射**，溫度增加**1°C**）。
- **核心參數參考**：在高光積值（ $>11.5 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ）下，結球萵苣在21-26°C的氣溫範圍內生長良好。一項研究中，光積值達**11.6 mol·m⁻²·d⁻¹**，結合日夜氣溫約**22.7/20.8 °C**的條件，取得了良好的產量和品質

草莓是連續開花結果的作物，必須在營養生長與生殖生長（開花結果）之間取得平衡。RTR的設定就顯得更為關鍵。

- **RTR管理**：需要精準調控RTR值，避免因溫度過高、光線不足（即**RTR值過高**），導致同化物消耗過快，進而影響果實品質和產量。
- **核心溫度參數**：草莓生長的適宜溫度範圍為15-25°C。
- **RTR動態調整**：栽培者應觀察作物生長情況來調整RTR。例如，當發現**果實成熟過快，意味著同化物消耗過多**，此時應**降低RTR值（調低溫度）**；若作物生長強健但果實成熟過慢，則可增加RTR值（提高溫度）

與草莓類似，**番茄**也是目標為收穫果實的作物。並且它的產量通常與植物負荷（Plant Load）的管理緊密相關。

- **RTR管理**：在結果期，RTR的管理目標是將植物導向生殖生長，因此**RTR值相對較高**。
- **核心溫度參數**：結果期的適宜溫度為白天**24-26°C**，夜間**12-17°C**。
- **植物負荷平衡**：需**平衡植物負荷**（如果實數量）與**溫度**。**高負荷**（果實多）時需搭配較**低溫度**，**低負荷**時則可搭配較**高溫度**，以**維持光合產物的供需平衡**。

RTR管理、核心溫度參數、植物負荷，這三者之間是相互影響的動態關係，調整RTR或植物負荷，目的是為了維持植物體內「同化產物」的供需平衡。

- **植物負荷 (Plant Load)**：指植物的「庫」(Sink) 大小，對於番茄、草莓等果菜類，通常指單位面積內的果實數量。它與**溫度**共同決定同化產物的消耗速率。
- **同化產物平衡**：高負荷意味著需要消耗更多能量。當光線不足或溫度過高（即**RTR值過高**）時，光合產物不足以供應所有果實，就會導致果實小、品質差。因此，**當植物負荷較高時，通常需要配合較低的溫度（即調整RTR）**，反之亦然

$$RTR = 24\text{小時均溫} \div DLI$$

作物	栽培目標	RTR範圍	核心調控邏輯與策略考量
萵苣	最大化營養器官（葉片的生物量	較低RTR 1.0 - 1.5°C / (mol·m ⁻² ·d ⁻¹)	核心邏輯：目標是營養生長，採用較低的RTR值以確保植株能高效利用光能合成幹物質，產出鮮嫩葉片。 策略考量：較低的RTR也意味著在人工光下更節能。但需警惕，RTR過低可能導致生長緩慢；過高又可能造成葉片徒長、品質下降。品種間差異也很大，現代品種（如 Crispy Lettuce）能耐受更高的RTR而不發生生理性病害。
草莓	連續、高產地收穫果實	平衡型RTR 0.8 - 1.2°C / (mol·m ⁻² ·d ⁻¹)	核心邏輯：目標是營養與生殖的平衡。這是為了平滑產量，避免“產果波峰浪穀”的現象，從而實現穩定的計畫和供應。 策略考量：若果實成熟過快、植株勢弱，表示RTR過高（光產生的能量供不應求），需降低；反之，若植株生長旺盛但果實成熟過慢，則可提高RTR。
番茄	連續、高品質地收穫果實	較高RTR 1.2 - 1.8°C / (mol·m ⁻² ·d ⁻¹)	核心邏輯：目標是生殖生長，採用較高的RTR值來引導植物將更多能量投向果實發育。 策略考量：番茄是高光需求作物，高RTR也意味著在光照充足時，溫度可以相對更高，以提高光合作用效率。但RTR過高可能導致植株早衰、果實品質下降。

RTR (Radiation-Temperature Ratio) 定義為：

每日24小時平均溫度與當日總光積值 (PAR) 的比值。

它的核心作用是 **監控植物體內的“同化物平衡”(Assimilate Balance)**。通過監控這個比值，您可以判斷植物的能量收支是否平衡，進而調整溫室環控策略，引導植物的生長方向

三種作物“均衡生長”的 RTR 值參考

在《Plant Empowerment》體系中，若使用 J/cm^2 作為光積值單位，那麼RTR的單位就是 $^{\circ}\text{C} / (\text{J}/\text{cm}^2)$ 。例如， $\text{RTR}=1$ 代表每 $1000 \text{ J}/\text{cm}^2$ 的日輻射量，對應24小時平均溫度為 1°C 。

• 番茄 (Tomato)

- **指導策略**：通常採用較高的 RTR 策略以引導植株向 **生殖生長 (Generative)** 方向發展，促進開花結果。
- **RTR 案例參考**：有番茄種植者在實踐《Plant Empowerment》理念後，實現了顯著的增產。在荷蘭的番茄種植中，RTR 策略是種植者優化產量和品質的關鍵工具之一。
- **目標設定與調整**：從**1.0（營養）**到**1.8（生殖）**。若植株莖葉生長過旺，說明 RTR 偏低，可以**提高** RTR 目標值。若果實發育緩慢，植株出現早衰跡象，則說明 RTR 偏高，應**降低** RTR 目標值。

• 草莓 (Strawberry)

- **指導策略**：目標是平衡營養與生殖生長，以實現持續、穩定的產量。
- **RTR 案例參考**：草莓種植者通過實施 RTR 策略，來避免同化物供需失衡，以實現更平穩的產量曲線。
- **目標設定與調整**：可從**中值 1.2**開始嘗試。若果實成熟期過早，植株勢弱，說明 RTR 偏高，需**降低** RTR 目標值；若果實遲遲不轉色，則說明 RTR 偏低，可**提高**目標值。

• 萵苣 (Lettuce)

- **指導策略**：通常採用較低的 RTR 策略以引導植株向 **營養生長 (Vegetative)** 方向發展，促進葉片生長。
- **RTR 案例參考**：RTR 策略同樣能幫助平衡作物的同化物平衡。
- **目標設定與調整**：可從**中值 1.0**開始嘗試。若植株出現徒長、葉片薄而脆，說明 RTR 偏高，需**降低**目標值。若植株生長緩慢，可能由 RTR 偏低導致，可嘗試**提高**目標值。

如何在實際生產中應用 RTR 策略？

掌握RTR策略，關鍵在於理解並執行一個迴圈：設定 → 監控 → 評估 → 調整。

第一步：設定 (Set)

結合您溫室的歷史資料和經驗，為三個關鍵時段設定一個初始的 **RTR Slope**（溫度增量係數）：

- **白天 (Day)：1.0**。可以看作業物能量管理的“常規模式”。
- **傍晚 (Evening)：> 1.0**（如1.2）。這是引導作物進入生殖生長的關鍵視窗。
- **夜間 (Night)：< 1.0**（如0.8）。旨在通過降低夜晚溫度，減少不必要的呼吸消耗，幫助植株“休息”。

第二步：監控與評估 (Monitor & Evaluate)

- **監控平衡**：在溫室管理軟體中設定好RTR後，持續監控**實際的RTR Ratio**是否平穩地圍繞目標值波動。
- **觀察植株**：每週至少一次，在早晨植株水分充足時，觀察新葉、莖節長度等細節，判斷植株的生長狀態。

第三步：調整 (Steer)

根據觀察結果對RTR進行微調，每次調整幅度宜在**0.1 - 0.2**之間

觀察到的現象	解讀 (Balance)	調整方向 (Steering)
新葉小而薄，節間長（徒長）	營養生長過旺 (Vegetative)	增加 (More Generative)
植株生長緩慢，節間短	生殖生長過旺 (Generative)	減少 (More Vegetative)
早晨新葉邊緣有吐水現象	植株活性高，狀態健康	維持 (Keep Steady)
晚上頂端優勢消失	植株活力不足	減少 (Lower RTR Slope)

Plant Empowerment 的核心邏輯其實是：

- 光（source）提供碳同化能力
- 溫度（sink activation）決定代謝與生長速度
- RTR 則是描述 source 與 sink 是否平衡的重要比例

RTR 太高代表：

- 溫度偏高但光不足
- 呼吸／伸長過強
- $\text{source} < \text{sink}$
- 易徒長、軟弱、糖度下降

RTR 太低則代表：

- 光很多但溫度太低
- sink 活性不足
- $\text{source} > \text{sink}$
- 易累積糖分但生長停滯、葉厚化

三種作物的典型 RTR 範圍

以下是根據：

- Plant Empowerment 概念
- 荷蘭高科技溫室經驗
- PFAL/人工光研究
- source-sink balance
- 糖分與產量平衡

1. 萵苣 (Lettuce)

- source limitation 較低
- sink 強度較弱
- 低溫耐受佳
- 過高 RTR 易徒長與 tip burn

生產目標	RTR
緊實、高品質	0.7–0.9
高速生長	0.9–1.1
易徒長區	>1.2

DLI	日均溫	RTR
12 mol	10°C	0.83
15 mol	15°C	1.0
17 mol	20°C	1.18

在 PFAL 中多數成功商業值：RTR $\approx$ 0.8 – 1.0

尤其奶油萵苣常更低：0.75 – 0.9

因為：

- 葉片過快伸長容易鬆散
- Ca transport 失衡易葉燒

2. 草莓 (Strawberry)

草莓比萵苣：

- sink 更強
- 果實需較高代謝
- source-sink balance 更敏感

但如果 RTR 太高：

- 糖度下降
- 軟果
- 酸度下降
- 空心果增加

適當 RTR：

生產目標	RTR
高糖度、高品質	0.7–0.9
高產量平衡	0.9–1.1
易軟果區	>1.15

高糖度策略：

「高光 + 偏低夜溫」
→ RTR 下降
→ source surplus
→ 糖分累積

Oishii 類高端草莓常會：

- 高 DLI
- 低夜溫
- 使 RTR 壓低至 0.75–0.9

DLI	日均溫	RTR
20 mol	16 °C	0.8
25 mol	22 °C	0.88
18 mol	20 °C	1.11

3. 番茄 (Tomato)

番茄屬於：

- 強 sink 作物
- 高負載果實
- 可承受較高 RTR

但如果：

- RTR 過低
 - source 過剩
 - 葉厚化、裂果、果實轉色慢

荷蘭高線番茄常見：

- 冬季 RTR ≈ 1.0
- 夏季 RTR ≈ 1.2

因為：

- 高輻射下 sink 能力很強
- 可維持高果實負載

適合 RTR：

生產目標	RTR
高品質果實	0.9–1.1
高產高速生長	1.1–1.3
過度營養生長區	<0.85
易糖度下降區	>1.4

DLI	日均溫	RTR
25 mol	22°C	0.88
30 mol	28°C	0.93
18 mol	24°C	1.33

作物	適合 RTR	特性
萵苣	0.7–1.0	偏低 RTR 較佳
草莓	0.75–1.05	糖度對 RTR 極敏感
番茄	0.9–1.3	可耐較高 RTR

$$RTR_{lettuce} < RTR_{strawberry} < RTR_{tomato}$$

sink strength 逐漸增加。

RTR 本質上是 source-sink balance 的斜率

$$RTR \propto \frac{\text{Metabolic Demand}}{\text{Photosynthetic Supply}}$$

分子：溫度 → sink demand
分母：DLI → source supply

RTR 可視為：
「單位光能所需支撐的代謝速度」

這也是為何：

- 高 RTR → 易徒長
- 低 RTR → 易糖分累積

目錄

引言

如何監測溫室及植物的均衡發展

如何在整合作物管理中應用GPE原則

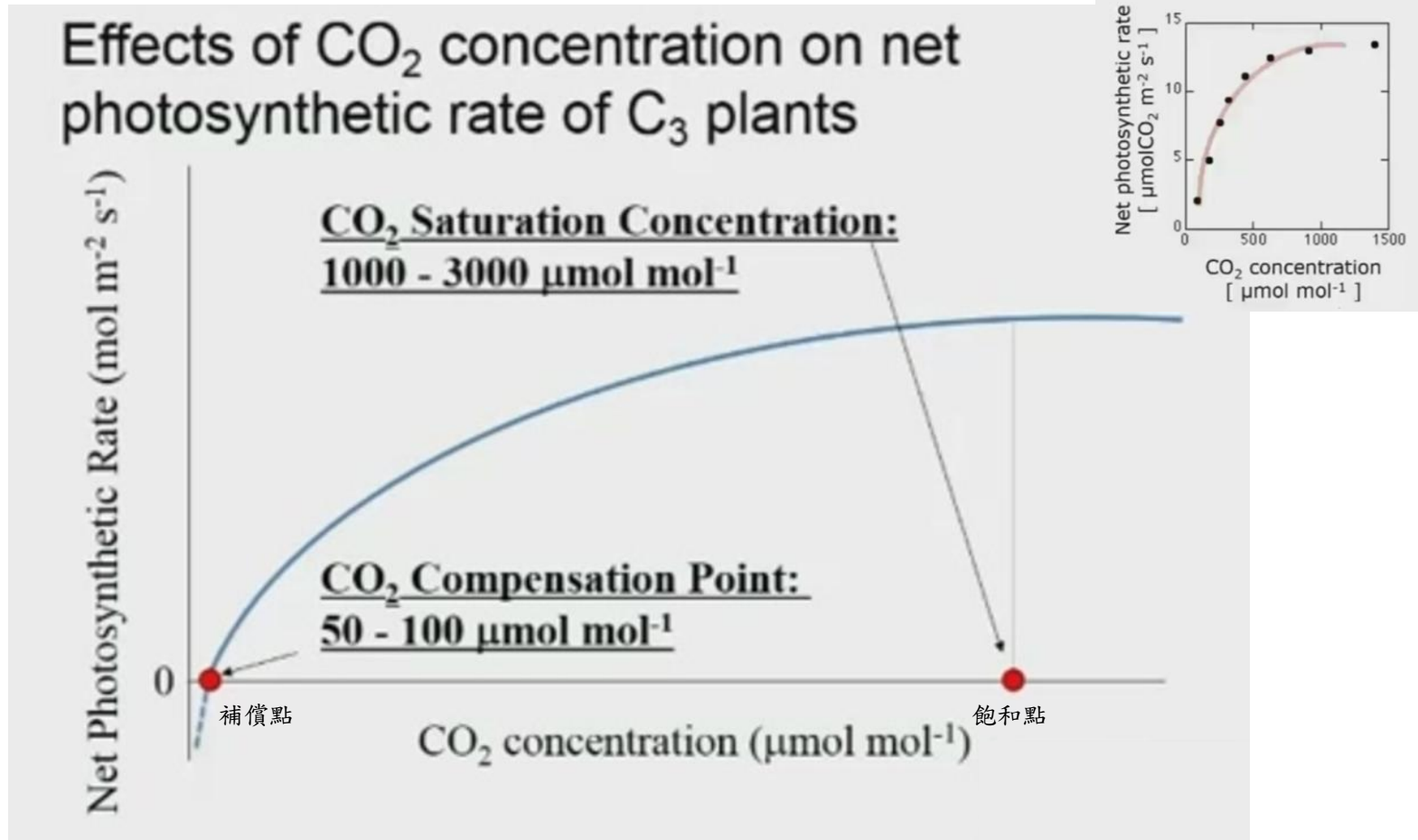
細說 RTR

補充教材

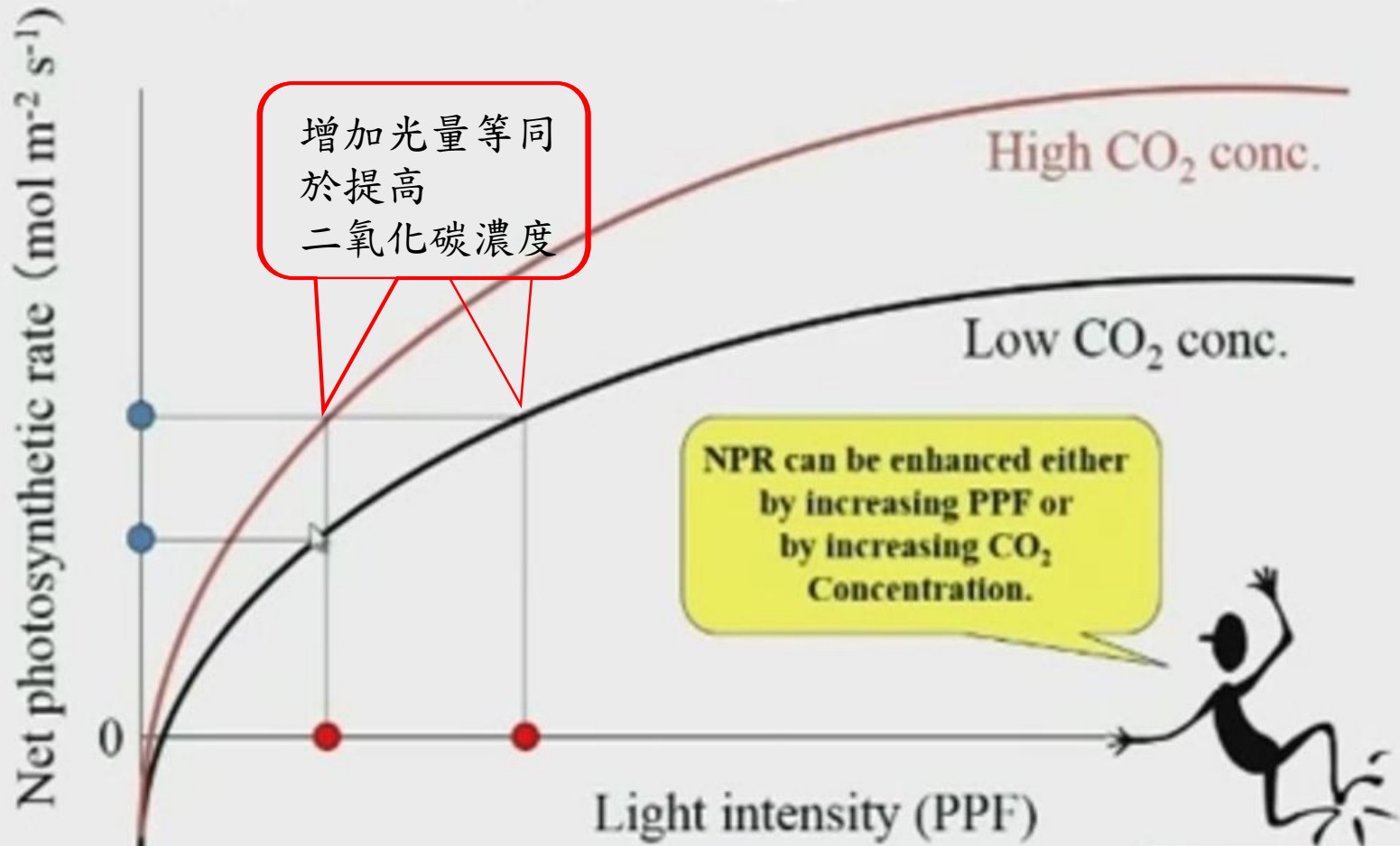
CO₂施肥

溫室二氧化碳調控

Typical CO₂ response of C₃ photosynthesis



Effects of light intensity and CO₂ concentration on NPR



溫室通風的功用

- 換氣：加溫或降溫，補充 CO_2
- 調濕：提高或降低濕度
- 濕度影響蒸散/養分吸收 → 影響生長速率
- CO_2 濃度影響光合作用/同化速率 → 影響生長速率

二氧化碳施肥方法

Table 1

Application examples of different CO₂ enrichment technologies reported in scientific articles.

Enrichment technology	Principle	Crops	Treatment/control	Production effects of CO ₂ enrichment	References
Compressed CO ₂ injection	Physical diffusion	Lettuce	700/400 ± 20 mol mol ⁻¹	Higher growth rates; Enhanced antioxidant capacity	Pérez-López et al., 2015
Injection & Ventilation	Physical diffusion	Cucumber	400-500/285-300 mol mol ⁻¹ average throughout the day	Increased fruit biomass; slightly effect on leaf area index	Sánchez-Guerrero et al., 2005
Biogas burning	Chemical reaction	Rose	800~2500 mol mol ⁻¹ / normal atmosphere	Enhanced fresh mass of cut flowers	Jaffrin et al., 2003
Mixing baking soda with acid	Chemical reaction		Mostly mentioned in reviews		Syed and Hachem, 2019
Composting	Biological activity	Tomato	800~900 mol mol ⁻¹ / not mentioned	Increased nutritional and sensory quality of fruits	Zhang et al., 2014

小蘇打（Sodium bicarbonate）是一種化學化合物，化學式為NaHCO₃，也稱為重碳酸鈉或泡打粉。它通常用作烘焙中的膨鬆劑，因為在加熱或與酸性物質反應時可以釋放二氧化碳氣體，從而使食物膨鬆。小蘇打主要含有鹼性，而泡打粉則包含酸和鹼，因此可以單獨產生氣體。使用時需根據食譜選擇合適的膨鬆劑。

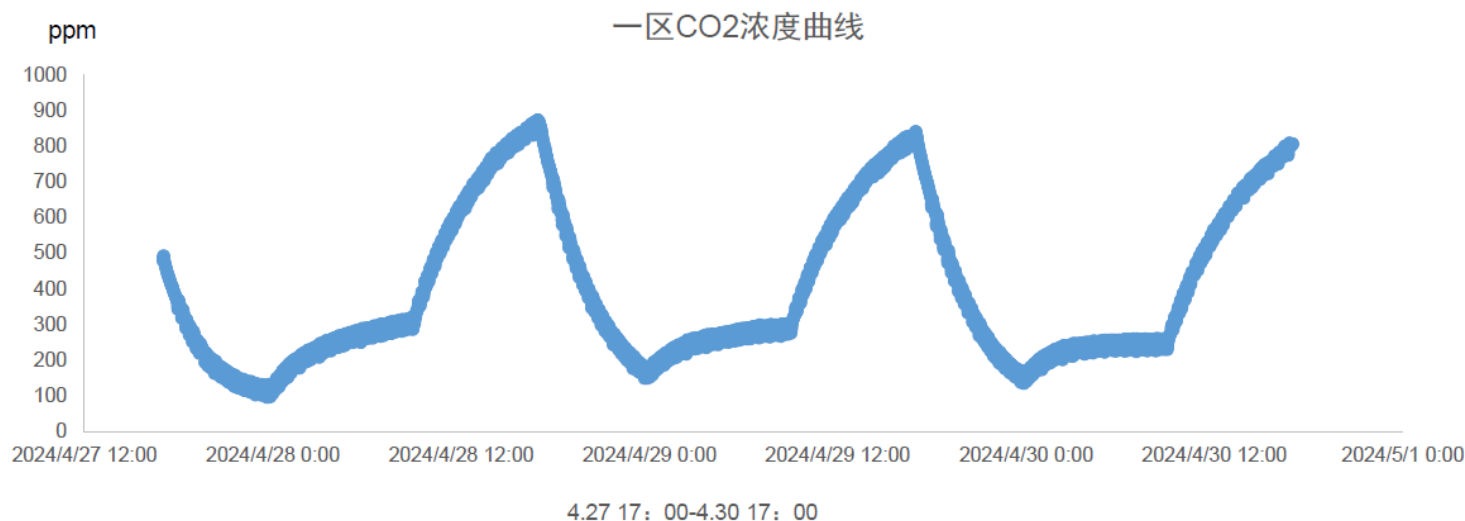
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9634482/>

先決條件

先做好氣密

例

某貨櫃式植物工廠的二氧化碳濃度量測數據，因為氣密性差加上植物光合作用的吸收，室內二氧化碳濃度很快就降到比室外(400 ppm)還低。雖然在夜間有因為呼吸作用而稍有回升，但仍低於室外值，補充到設定值(800 ppm)即停止，但很快就又掉回到200 ppm 以下。



CO₂施肥濃度

西紅柿	600-1000ppm	黃瓜	800-1000ppm
茄子、青椒	800-1000ppm	西葫蘆	700-1000ppm
油菜	600-1000ppm	韭菜	700-1000ppm
櫻桃	700-1000ppm	油桃	950ppm
葡萄	980-1150ppm	甜瓜	700-1000ppm

沒那麼複雜 800~1000 ppm 夠了

二氧化碳/氣肥施用方法_溫室用

1. 燃燒法：主要是燃燒汽油、柴油、液化氣、沼氣等液體或氣體燃料產生二氧化碳。
2. 硫酸-碳酸氫銨反應法：在設施內每40~50 m²掛一個塑料桶，懸掛高度，與作物的生長點相平，先在桶內裝入3~3.5 kg清水，再徐徐加入1.5~2 kg濃硫酸，配成30 %左右的稀硫酸，以後每天早晨，揭保溫被後0.5 h左右，在每個裝有稀硫酸的桶內，輕輕放入200~400 g碳酸氫銨，晴天與盛果期多加，多雲天與其它生長階段可少加，陰天不加。
3. 使用二氧化碳氣肥：每畝棚內均勻吊掛15~20套二氧化碳氣肥，在白
天陽光照射下可自動產生二氧化碳氣體，晚間無太陽光則很少產生或不產生二氧化碳氣體，非常適合農作物的自然生長條件，綠色環保無污染，增產效果顯著。
4. 增施有機肥：在生產中比較常見的二氧化碳施肥就是在土壤中增施有機肥和在地面上覆蓋稻草、麥糠等，通過微生物降解作用，緩慢釋放出二氧化碳持續不斷的補充大棚內，供給植物生長發育的需要。

原文網址：<https://kknews.cc/agriculture/zgnb6ap.html>

燃燒法

- 1 kg **甲醇**通過潔淨燃燒可產生1.375 kg 二氧化碳。以大棚占地一畝為基數，棚高平均約4~5米計算，補足1000 ppm 二氧化碳只需燃燒1.5 kg 甲醇。
- 如果採用煤、焦炭、石蠟、天然氣等燃燒，也可產生二氧化碳。但在燃燒的同時也會產生嚴重危害植物和人體的一氧化碳和氮氧化合物、硫化物、**乙烯**等物質，不宜直接棚室內施放。同時，也因環保問題受到國家禁止。因此，在考慮到經濟性、安全性、環保性、先進性、勞動力釋放等綜合因素，**採用甲醇燃燒技術補充二氧化碳氣肥是最佳選擇**。



QF-CR-1-1 型

适用于1亩大棚，每小时可产生二氧化碳1kg，每天工作2小时可满足其需求。



QF-CR-1-2 型

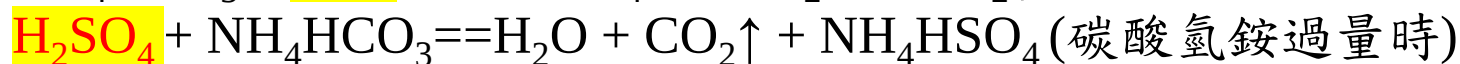
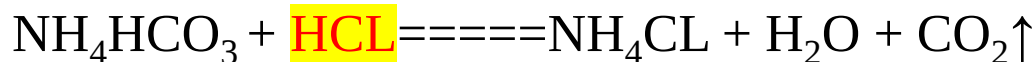
用于2.5亩大棚，每小时可产生二氧化碳2.5kg，每天工作2小时可满足其需求。



碳酸氫銨（碳銨） 酸解法

利用 **硫酸/鹽酸** 加碳酸氫銨，產生化學反應生成 **硫酸銨/氯化銨** 和水，並釋放出二氧化碳

原文網址：<https://kknews.cc/agriculture/5o5re2l.html>



碳酸氫銨（碳銨）

碳酸氫銨，分子式為 NH_4HCO_3 ，白色斜方晶系或單斜晶繫結晶體。無毒。有氨臭。能溶於水，水溶液呈鹼性，不溶於乙醇。

性質不穩定， 36°C 以上分解為二氧化碳、**氨**和水， 60°C 可以分解完。有吸濕性，潮解後分解加快。

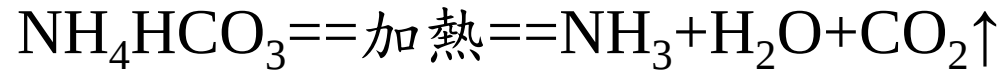


吊袋式 CO_2 氣肥。**吊袋式 CO_2 氣肥**產品形態為粉末狀固體，由 **CO_2 發生劑和 CO_2 促進劑**組成。使用時將二者攪拌均勻後，吊袋內產生的 CO_2 便在孔中釋放出來，供植物吸收進行光合作用。一袋 CO_2 氣肥使用面積33平方米，每畝需均勻吊袋20袋左右。每畝成本120元，30天後進行更換。

原文網址：<https://kknews.cc/agriculture/yon8pqb.html>

使用碳酸氫銨優於使用碳酸氫鈉（小蘇打），因為銨也是肥料的一種。但因為有氨臭味，小面積時轉為使用後者。

碳酸氫銨（碳銨）熱解法



碳酸氫銨施肥機

碳酸氫銨施肥機的特點為原料方便購買，使用成本低，碳酸氫銨**受熱分解**，原料產氣量為**1:0.55**，轉換效率高，產氣速率**1.1千克/時**。主要控制方式為通過CO₂傳感器監測溫室內CO₂濃度，通過平台判斷是否打開或關閉，並向控制器發送信號進行控制。

原文網址：<https://kknews.cc/agriculture/yon8pqb.html>



二氧化碳/氣肥施用方法_植物工廠用



高壓鋼瓶的顏色碼



氣體名稱	塗色	MUNSELL值	氣體名稱	塗色	MUNSELL值
氧氣或空氣	黑 (Black)	N-1.0	二氧化碳	翠綠 (Jade Green)	10 G 5/10 (#1-65)
氧氣等可燃性氣體	硃紅 (Vermilion Red)	7.5 R 9/20 (#1-25)	笑氣	孔雀藍 (Peacock Blue)	5 PB 3/10 (#1-47)
氬、氬、氬及惰性氣體	銀灰 (Silver Gray)	5 PB 6/1 (#1-36)	氯氣	檸檬黃 (Lemon Yellow)	7.5 Y 8/12 (#1-16)
乙炔	褐色 ()	5 R 4/4 ()	備註： 1. 氣體名稱塗白色 2. MUNSELL值係指瓶內為台灣協會所公認編號 3. 鋼瓶顏色因電鍍製成有顏色差異，請以 MUNSELL 值為依據		

依據：CNS.12242/C.N.52724

容器著色面積請參考容器檢查基準 4.1.1

中華民國工業氣體協會印製

中華民國 89 年 4 月修訂

鋼瓶製造及認證的相關法規目前有

國家標準CNS-12242無縫鋼製高壓氣體容器、

CNS-10848高壓鋼瓶閥

與CNS-10849高壓鋼瓶閥螺紋的製造標準，

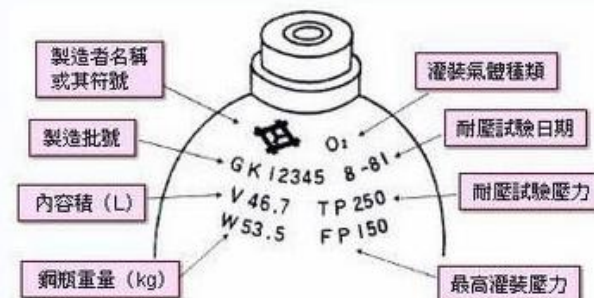
並有CNS-1261的高壓氧氣鋼瓶安全規章及高壓氣體勞工安全規章等，

每支鋼瓶必須每三年自行檢查一次，

檢查不通過者或沒檢查者不得灌裝氣體。

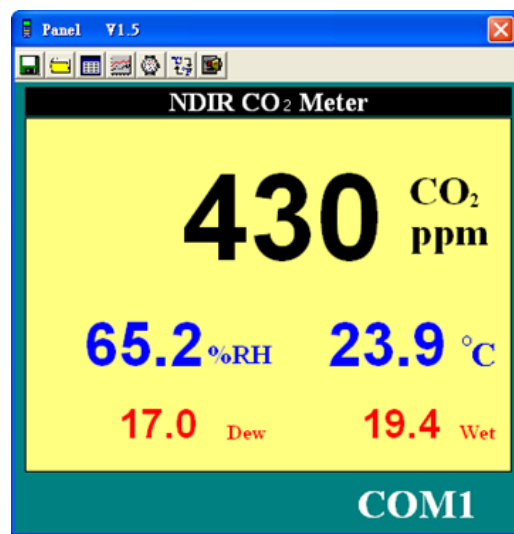
在氣體鋼瓶接受過安全檢驗後，

在其瓶頂端有以鋼印刻上檢查日期記號，



CO₂ sensors (with T/RH)





CO₂ 的供應要與燈光同步 (C3、C4 作物)

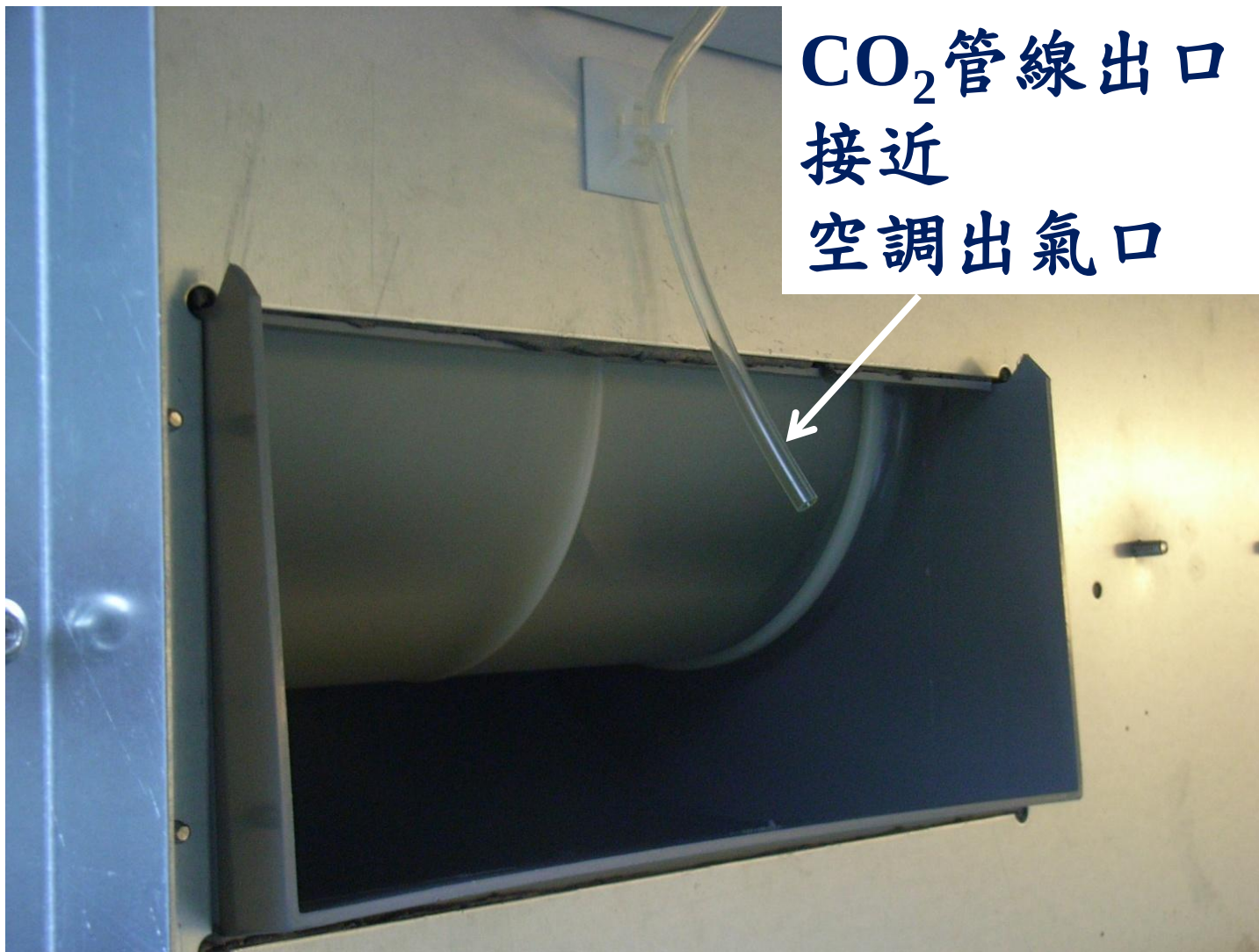


CAM 作物 CO₂ 要在
暗期供應



CO₂ 壓力計與閥





CO₂管線出口
接近
空調出氣口

檢測 CO₂ 供應的簡單作法



溫室二氧化碳施肥的功用

常用於冬天的
高氣密性溫室

- A practice widely used in greenhouse in winter to enhance plant growth in relatively closed greenhouse
- Sources include combustion of natural gas and liquid CO₂

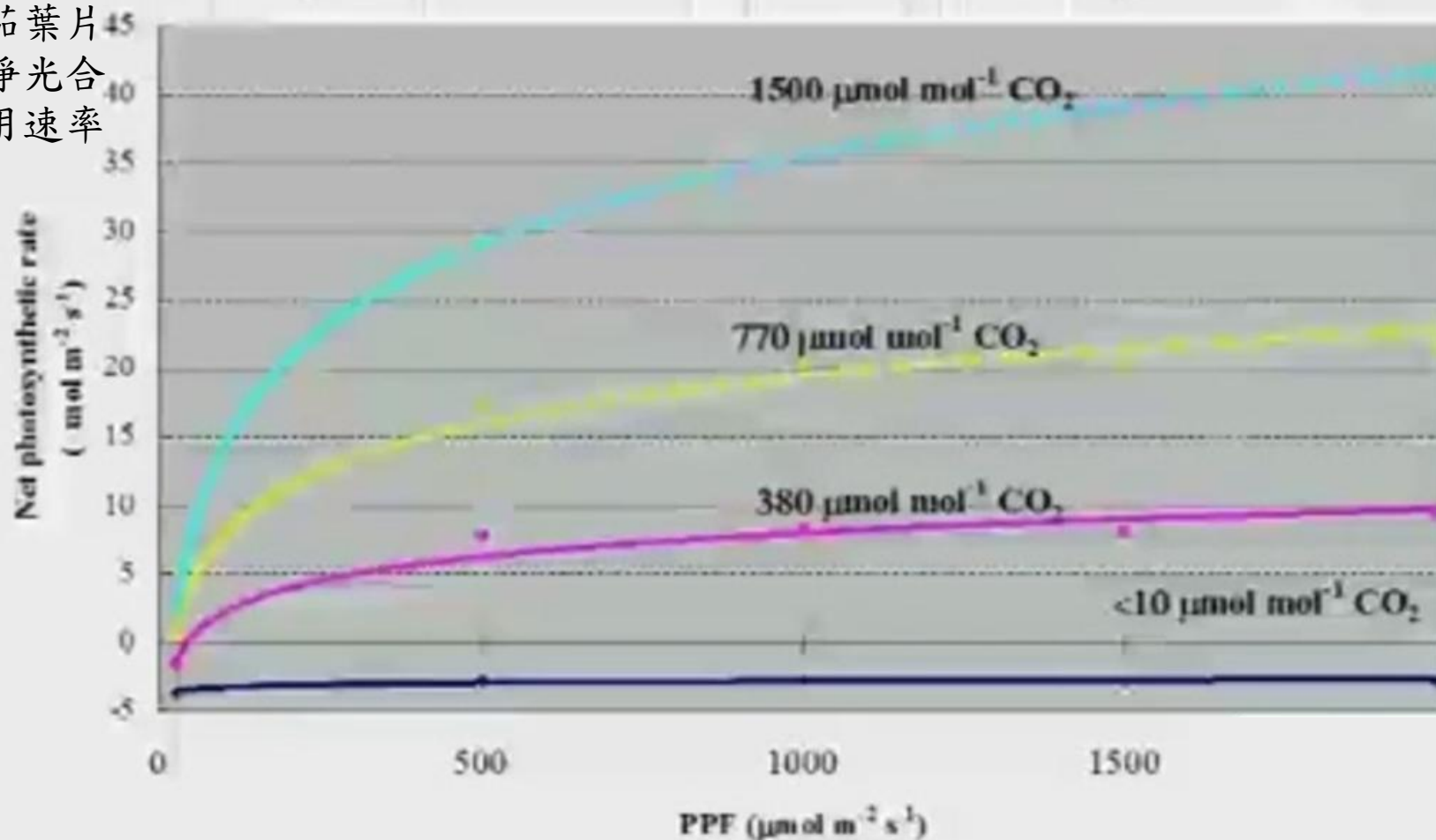


燃燒
天然氣 或
使用液態
CO₂

Instantaneous response of leaf photosynthesis to high CO₂

Photosynthesis of tomato leaves as affected by PPF and CO₂ concentration

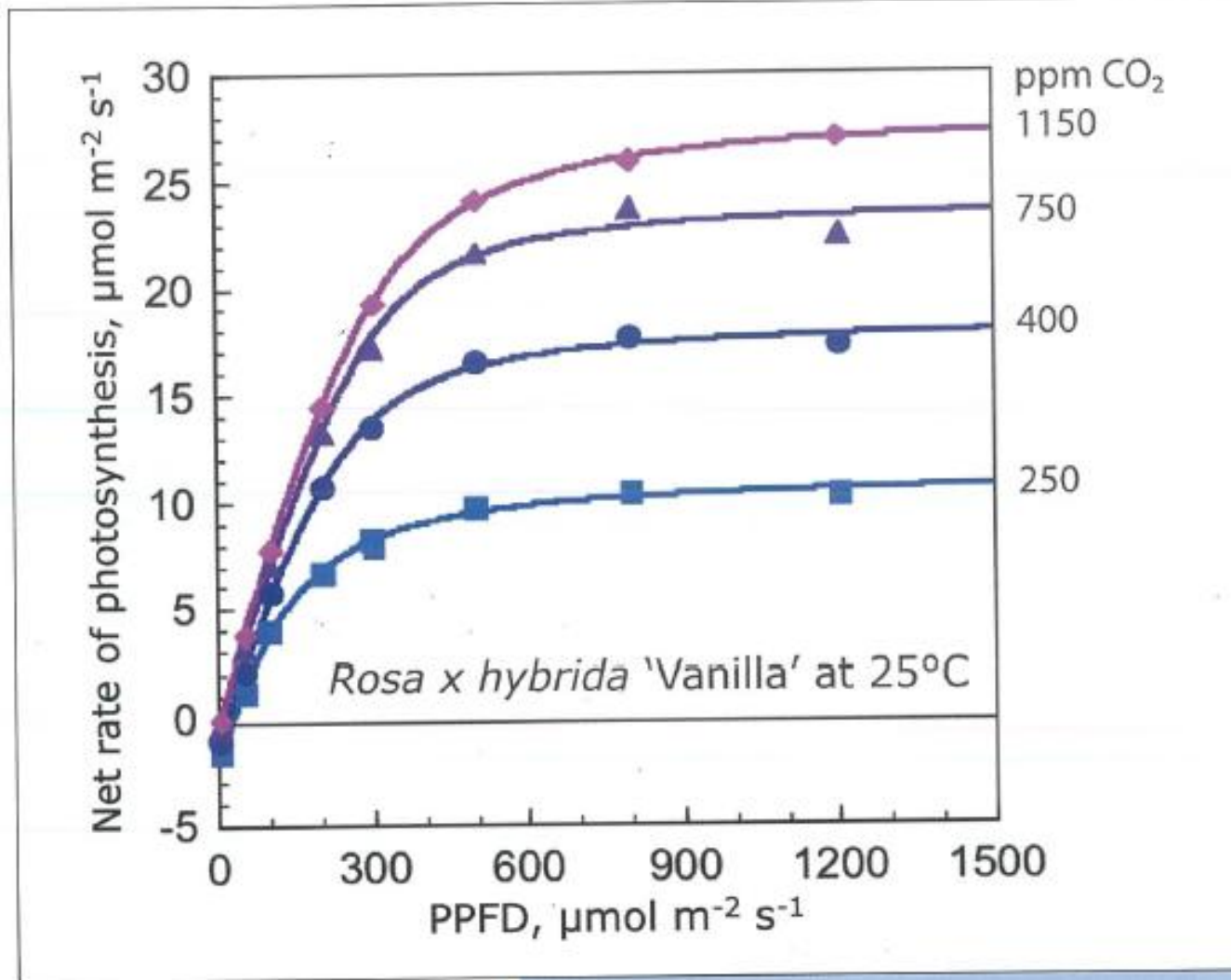
番茄葉片
的淨光合
作用速率



PPFD 與
CO₂ 濃度

影響

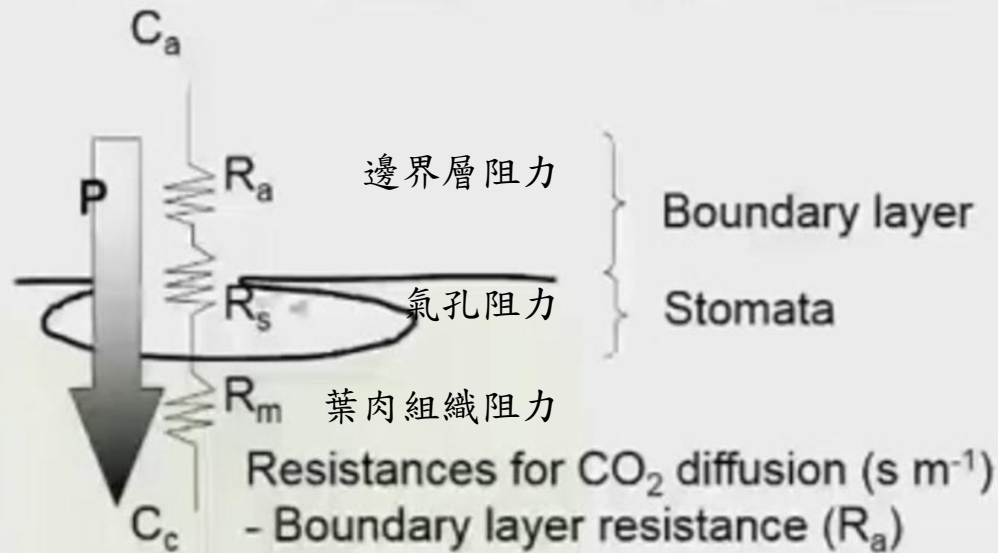
淨光合作用
速率



高濃度二氧化碳

- 高濃度二氧化碳會降低氣孔導度(增加阻力)，這可提高水分利用效率
- 植物需要較長時間才能適應
- 長時間暴露於高CO₂濃度下，增加的效益要下修，這應與光合酵素(Rubisco)活力的降低有關

Photosynthesis is a diffusion of CO₂ gas from the air to chloroplast.

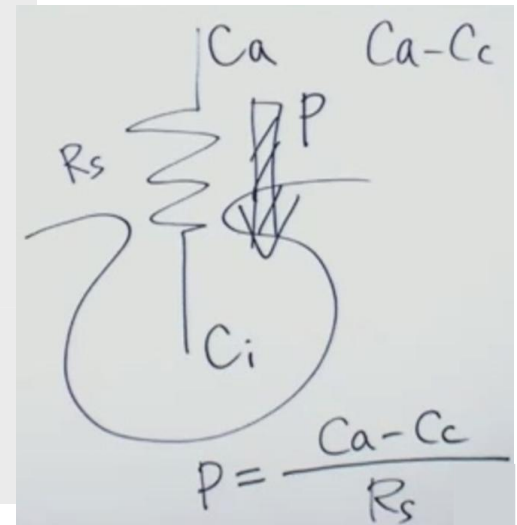
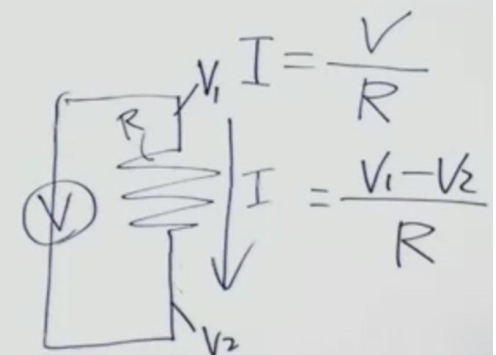


Resistances for CO₂ diffusion ($s\ m^{-1}$)

- Boundary layer resistance (R_a)
- Stomatal resistance (R_s)
- Mesophyll resistance (R_m)

Driving force of CO₂ diffusion

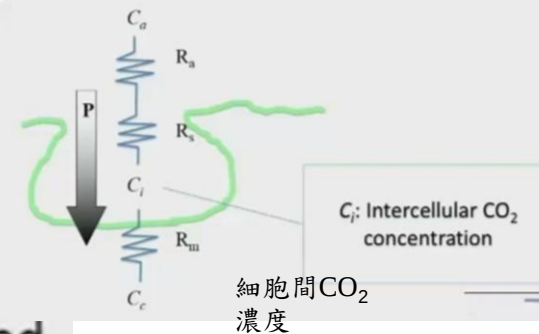
Difference between C_a and C_c



Ci-Photosynthetic response curve

- Instead of using CO_2 conc. in the air, CO_2 response curve (of photosynthesis) often employs CO_2 in the intercellular space (C_i).
- C_i can be estimated by measuring R_a and R_s based on leaf transpiration rate (mass balance) and leaf temperature.
- This approach is preferred in understanding physiology and photosynthetic limitation.
- However use of CO_2 in the air as variable is preferred in environmental control because C_i is not directly measurable.

光合作用主要涉及細胞間 CO_2 濃度，但因為此數值不好直接量測，所以在環控上通常使用空氣中的 CO_2 濃度



影響二氧化碳擴散進入葉片的阻力

- Boundary layer resistance (value range: 10-100 s m⁻¹*)
 - Wind velocity
 - Surface viscosity
- Stomatal resistance (77-250 s m⁻¹ when open; 5000 s m⁻¹ or greater when closed*)
 - Plant water status
 - Light quality (blue light)
 - CO₂ concentration
- Methophyll resistance (100 – 1000 s m⁻¹**)

邊界層阻力

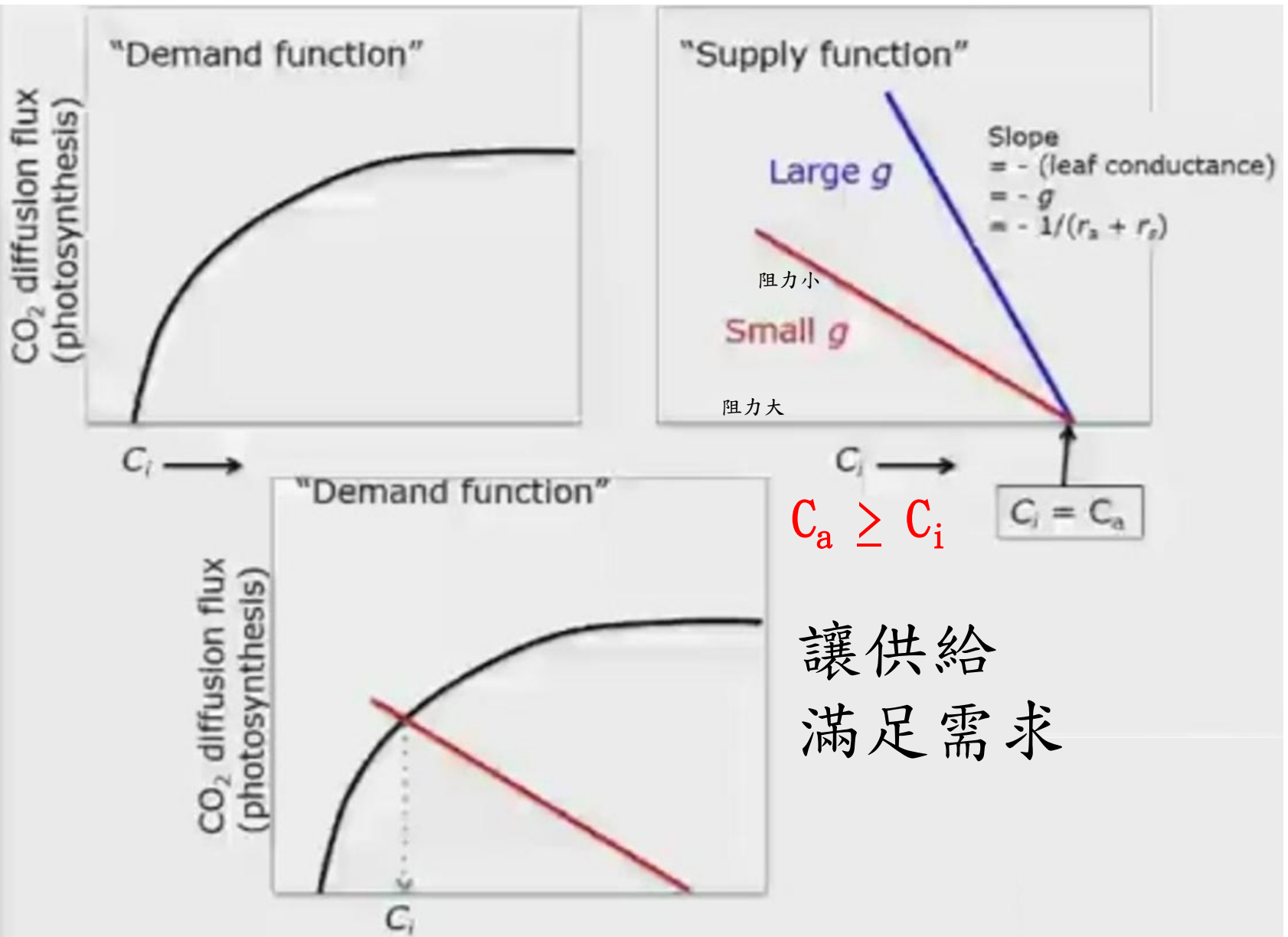
氣孔開

氣孔關

氣孔阻力

葉肉組織阻力

*Jones (1992); **Bierhuizen (1973), Hanan (1998)



二氧化碳控制：讓供給滿足需求

- 溫室氣密性夠高時 (ACH 低)
 - 可使用二氧化碳施肥，濃度 800~1200 ppm
- 植物工廠氣密性必須高 (ACM 低)
 - 應使用二氧化碳施肥，濃度 800~1200 ppm
- 如果氣密性不夠高
 - 一般不考慮使用二氧化碳施肥
 - 如果一定要用，室內的二氧化碳濃度設定值建議與室外二氧化碳濃度值 (380 ppm) 相同即可；也可與陽光的輻射量 (W/m^2) 連動，兩者維持相同的數值。

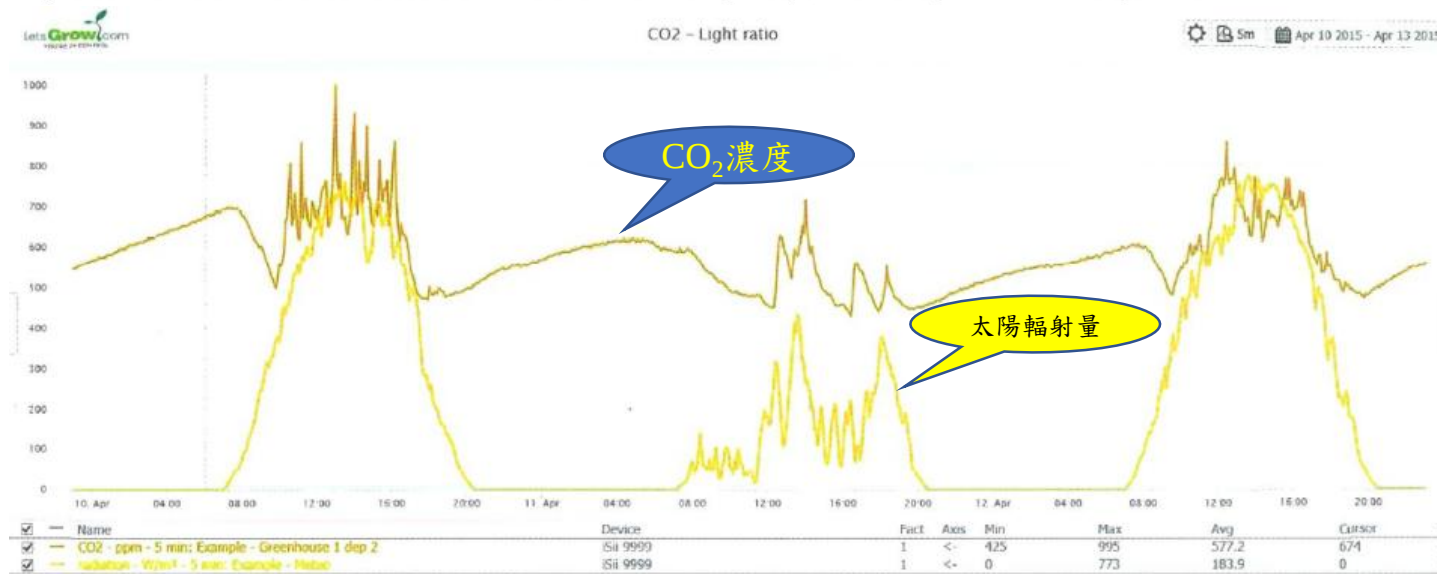
* ACH: Air Change per hour

* ACM: Air Change per minute

控制溫室內 CO₂濃度 (ppm) 與輻射量 (W/m²)維持相同數值

為產生最大光合作用效率，CO₂濃度要與光強度做連動。
維持CO₂ ppm 濃度與溫室內的太陽輻射量 W/m² 相同的數值，
如下圖兩個晴天時的狀況，陰天時CO₂ 濃度可調降

Figure 6.8.5-1 Assimilates balance: maximum use of light by controlling the CO₂ - Light ratio



Unit conversion

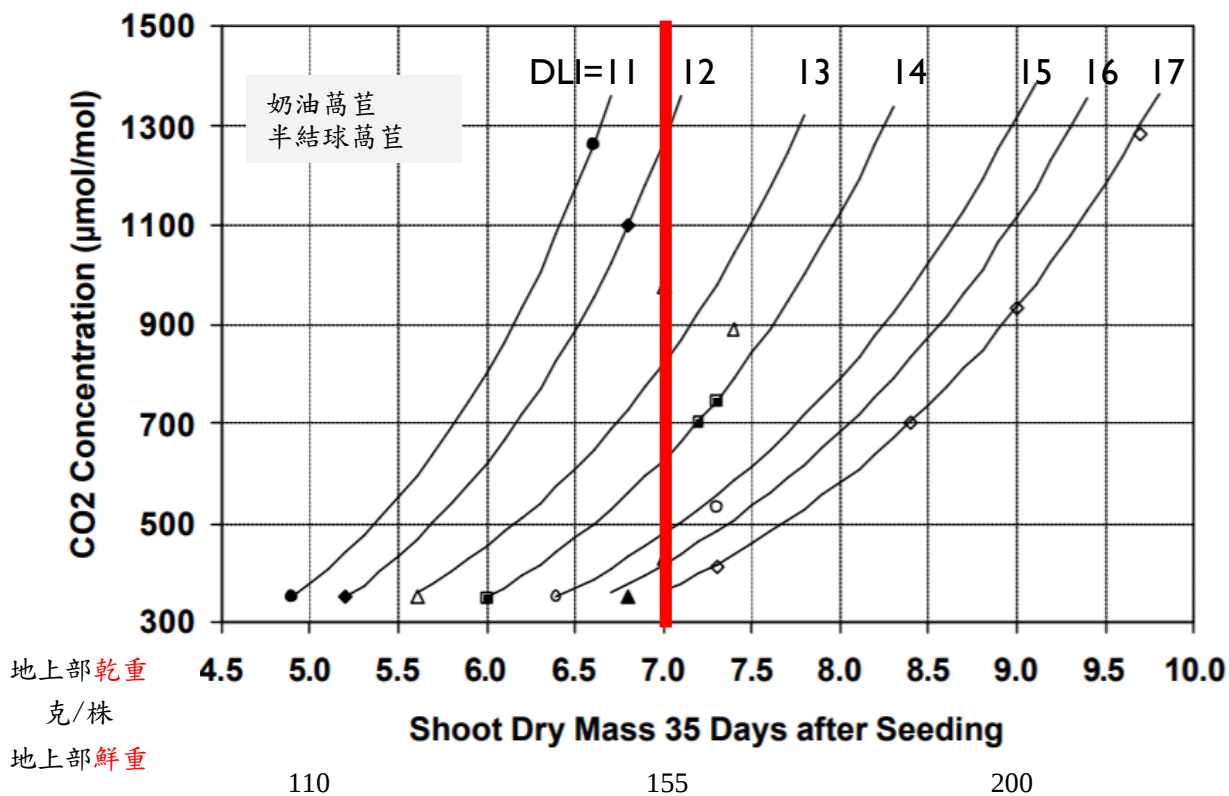
$$72 \text{ kg ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$$

$$= 72 \times 10^6 \text{ mg} / (10^4 \text{ m} \times 36 \times 10^2 \text{ s}) = 2 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

$$= 72 \times 10^6 \text{ mg} / (10^4 \times 100 \text{ dm}^2 \times \text{h}) = 72 \text{ mg dm}^{-2} \text{ h}^{-1}$$

光量與二氧化碳耦合控制

$$DM = f(DLI, CO_2)$$



CO₂ 與 光量耦合控制策略

量產7克乾重的萵苣所需的等效環控條件

Lettuce (cultivar Vivaldi) 35 天收穫 155 g/株

DLI	Δ DLI	CO ₂	Δ CO ₂
17	6	350	0
16	5	420	70
15	4	480	130
14	3	630	280
13	2	820	470
12	1	1270	920
11	0	1600	1250

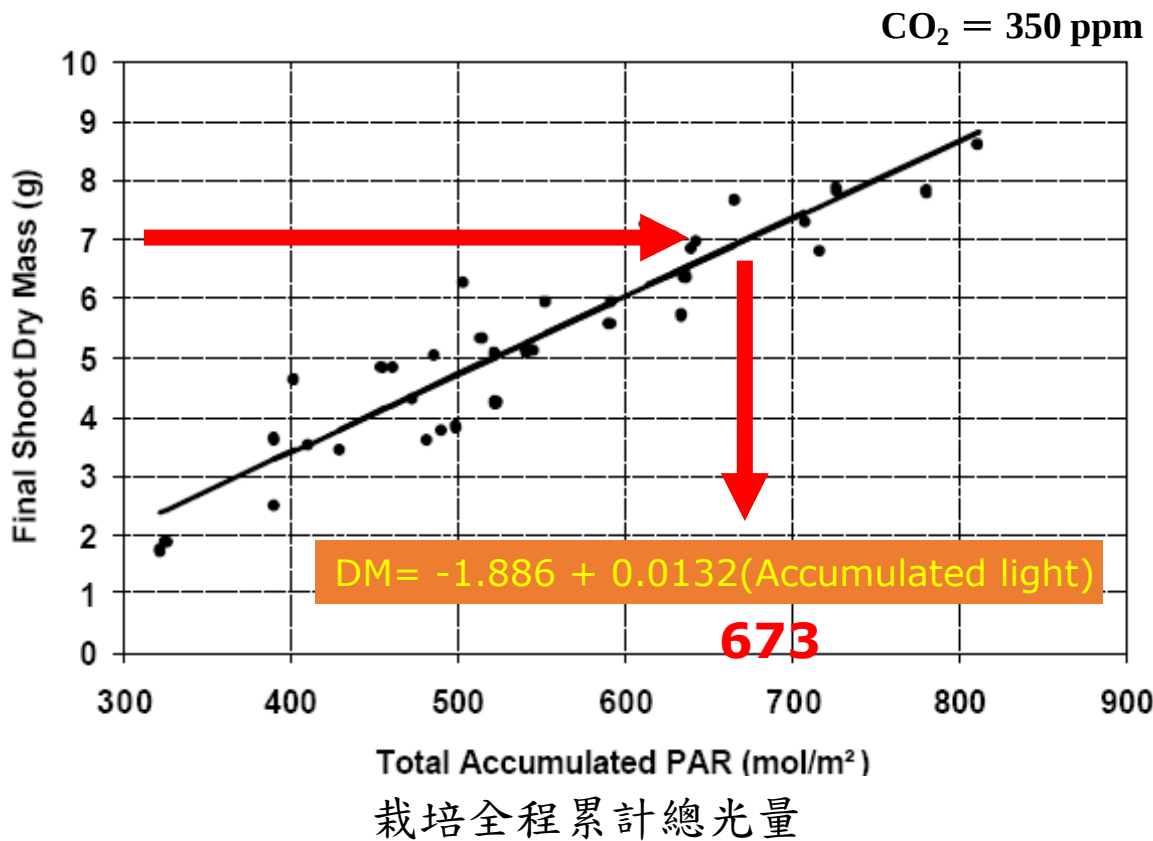
量產7克乾重的萵苣所需的等效環控條件

光量	每日給光時間	每日累計 光量 DLI	CO ₂ 濃度
μmol/m ² /s	hr:mn	mol/m ²	ppm
200	16:40	12	1270
300	15:45	17	350

$$200 \times 16.67 \times 3.6 / 1000 = 12.00$$

$$300 \times 15.75 \times 3.6 / 1000 = 17.01$$

地上部乾物重 vs. 總累積光強



量產7克乾重的萬苳所需的
等效光照條件

栽培全 程累計 總光量	每日累計 光量 DLI	所需栽 培天數
mol/m ²	mol/m ²	days
673	17	39.6
	12	56

產能可預測

$\text{CO}_2 = 350 \text{ ppm}$

$\text{DLI} = 17 \text{ mol/m}^2/\text{day}$, 播種後 35 天

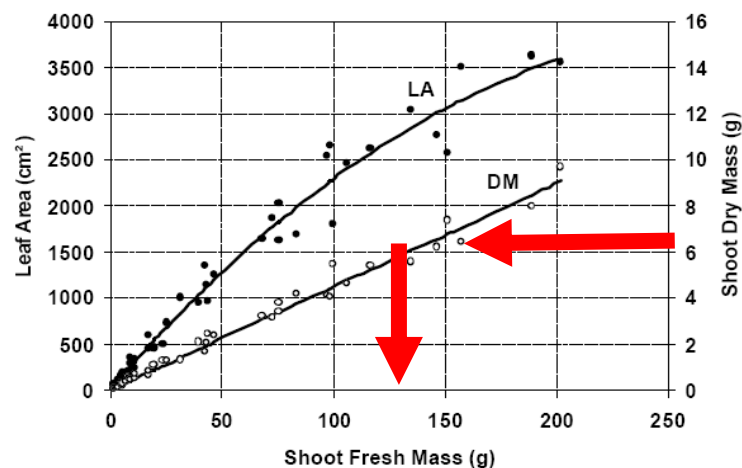
累計總光量 $17 \times 35 \text{ 天} = 595 \text{ mol/m}^2$.

$$\text{DM} = -1.886 + 0.0132(\text{Accumulated light})$$

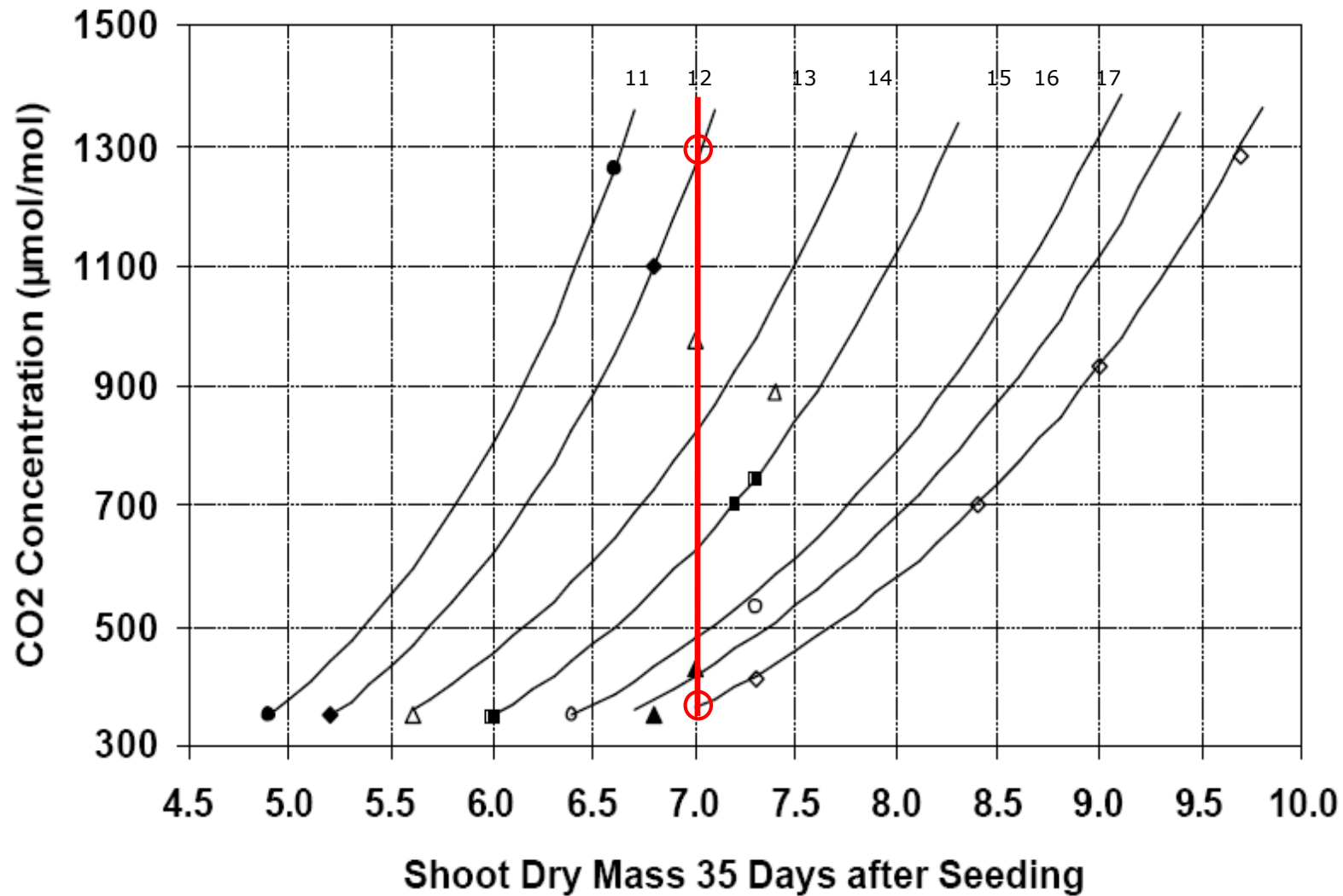
地上部乾重 5.968 g

鮮重為每株 $5.968 / 0.045 = 132 \text{ g}$

$$\text{DM} = 0.045(\text{FM})$$



不同 DLI 與 CO₂ 濃度下的單株乾重



CO₂ 施肥的效益

氣孔阻力增加 → 水資源利用效率提高

光呼吸速率受到抑制 → 淨光合速率提高

光合速率提高 → 淨光合速率提高 → 產量
提高、產期縮短

生產 7 g 乾重的萵苣
所需的 等效 DLI 與 CO₂濃度

PPFD	DL	DLI	CO ₂
μmol/m ² /s	hr:mn	mol/m ²	ppm
200	16:40	12	1300
300	15:45	17	345
300	11:07	12	1300

CO₂ 施肥的優點1

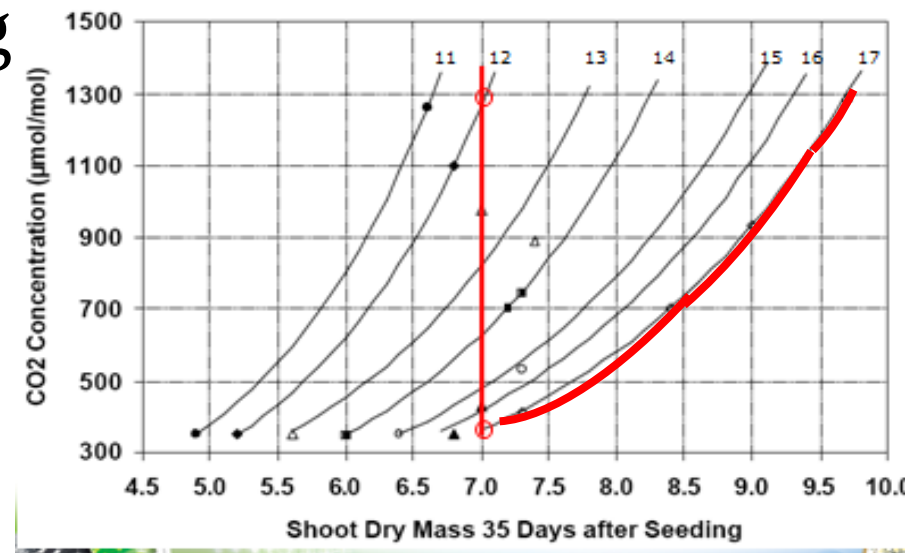
減少 DLI 需求

- 乾重不變，仍為 7 g
- CO₂ 由 345 提高至 1300 ppm 等於 DLI 由 17 降至 12 mol/m²
- DLI 減少
 - 可以是減少 明期小時數或是減少光照強度
 - 前者降低操作成本，後者降低固定成本

CO₂ 施肥的優點2

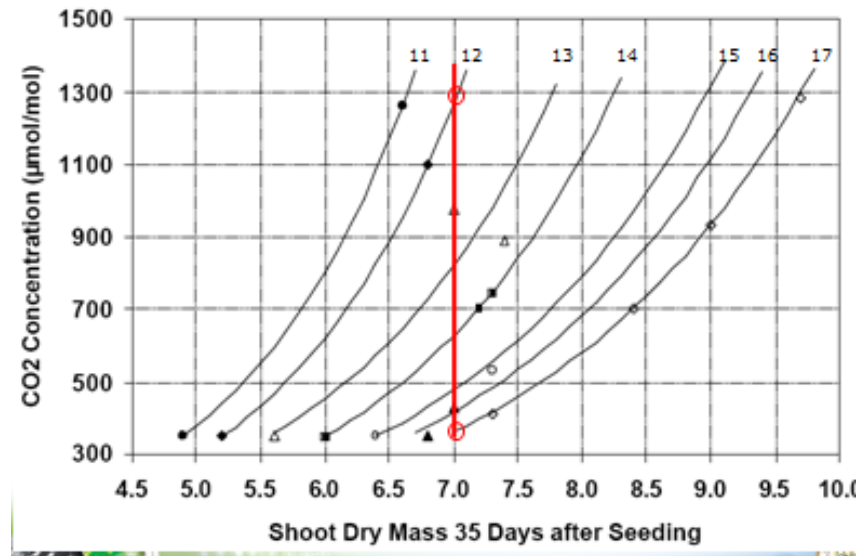
DLI 維持 17 mol/m^2 , CO_2 由 345 提高至 1300 ppm

- 同樣在播種後第35天採收
- 乾重增加 7 g to 9.6 g
- 鮮重增加 155 g to 213 g
- 收入增加



CO₂ 施肥的優點3

- 目標 乾重 7 g，DLI 維持 17 mol/m²
- CO₂ 提高至 1300 ppm, DLI 可以降至 12 mol/m²
- $TLI = DLI \times DAS = 12 \times 35 = 420 \text{ mol/m}^2 = 17 \times 24.7$
- 採收日期 可以縮短 $35 - 24.7 = 8.3 \text{ days}$
- 這代表至少可提前一週採收 (35 天 縮短成 28 天)
 - 育苗14天在育苗室
 - 量產室21天縮短成14天
 - 一年17批次變成26批次
- **縮短產期** 代表
年栽培批次增加
年產能增加



二氧化碳施肥對作物的影響

Process	Effects on Plants
Leaf Photosynthetic rates 葉片光合速率	Increase in all plants on first exposure. Little Response above 1000 ppm. 增加，超過1000 ppm 效益小很多
Leaf transpiration rate	Decrease in all plants 蒸散速率降低
Leaf anatomical adaptation 葉片外觀	Leaf area, weight per unit area, thickness increase in many species. 葉面積、單位面積重量、厚度增加
Canopy leaf area	Usually increases 冠部葉面積增加
Canopy water-use efficiency	Increases 冠部水利用效率增加
Carbon partitioning among organs 光合產物分配	Proportion of C going to roots and stems is increased in many species. 許多品種分配到根與莖的比例增加
Branching, flowering and fruiting 分支、花與果	Initiation and/or retention of these organs is increased in many species 很多品種開始與/或維持在此些器官內的占比增加
Yield 產能	Increases 32% on average between 300 and 660 ppm (Acock and Allen, 1985) 濃度由300增至660 ppm，產能增加32%

文獻中提到的 提高 CO₂ 濃度下 作物產能的提高比例

Mean percentage yield increase of CO₂-enriched to control crops reported in literatures (after Kimball, 1986)

Crop	Mature crops (marketable yield) 可售產量	Immature crops (biomass) 生物量
Rose	17-37% (n=24)	N/A
Tomato	14-20% (n=131)	35-70% (n=24)
Lettuce	26-45% (n=54)	24-129% (n=7)

n: number of reports

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)