

溫室溫控

方 煒
台大生機系教授



也是室內感測元件

風向計 風速計 光度計 溫、濕度計 雨感器 雨量計

室外氣象站七大感測元件

This block contains a photograph of seven outdoor weather station components arranged on a table. The components are labeled with yellow boxes: 風向計 (Wind direction sensor), 風速計 (Wind speed sensor), 光度計 (Light sensor), 溫、濕度計 (Temperature and humidity sensor), 雨感器 (Rain sensor), and 雨量計 (Rain gauge). A central white box is labeled '也是室內感測元件' (Also an indoor sensing component). The background is a patterned curtain.

溫室溫控的目的 在調節溫室內作物生長與分化

控制溫室的溫度涉及將熱量搬進與
搬出溫室

仔細想想，其實是涉及將熱量搬進
與搬出作物來調控其生長與分化

首先複習一下生長與分化的差異

生長指質量增加的不可逆過程，分化則是指生命發展經歷的階段



這兩株作物栽培了同樣長的時間，哪一株有最大的生長，哪一株有最大的分化？我們使用溫度來調控兩者造成差異。

熱量的搬移或輸送

- 傳導
- 對流
- 輻射
- 蒸發

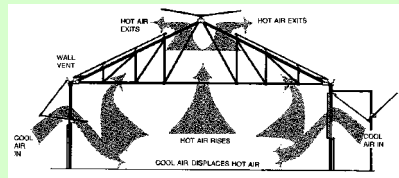


傳導

- 熱量的直接傳遞
- 由於分子碰撞造成動能傳遞
- 撞球
- 電爐上的熱水



對流



- 空氣或液體移動到新的位置來傳輸熱量
- 煙囪效應(自然通風)
 - 熱空氣上升，冷空氣下降
- 對流烤爐
- 熱風加熱與冷凍空調

輻射

- 熱能以電磁波方式輻射
- 任何物體溫度在絕對零度以上都會輻射電磁波
- Wein's law 煒恩定律
 - 溫度越高的物體輻射出來的波長越短
- 作物多以此種方式損失熱量
- 有些溫室內使用輻射加熱系統



蒸發



- 熱量傳遞與相變(液態變氣態)相關
- 蒸發潛熱
 - 水 = 540 cal/mL; 1,064 Btu/lb
 - 液體中是蠻大的
- 作物透過氣孔蒸發水分來散熱
- 某些溫室透過蒸發冷卻水牆來協助降溫

溫室內能源的收支 = 進入的 - 出去的

獲得的熱

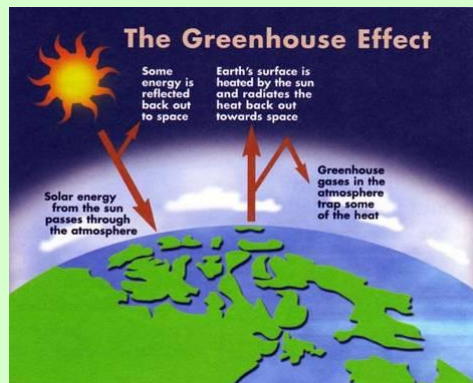
- 太陽輻射與出不去的熱
- 加熱系統
- 其他機械設備
 - 風扇馬達
 - 燈具/安定器

損失的熱

- 傳導
 - 熱量可透過被覆材料傳遞，雙層被覆材料之間的空氣層有助於減少熱傳導
- 通風/滲漏
 - 熱量與開口的損失
 - 可以是經過精密計算的(夏季通風降溫)或不要的賊風

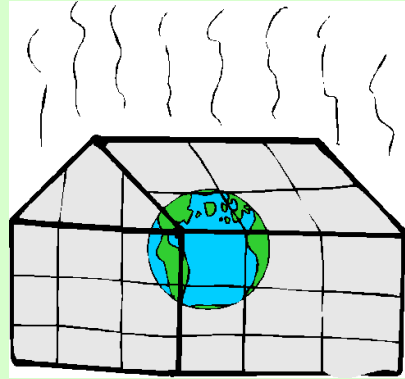
溫室效應

一間不通風的溫室會被太陽輻射加熱，因為進來的光線大多未被作物吸收用於光合作用或者被作物和其他物體反射



溫室效應

被吸收的光線可以再以熱輻射方式傳出.但是大多數溫室被覆資材對熱輻射而言,都是不透明的;換言之,熱量被限制在溫室內造成溫室可能升溫到危害作物的情況



溫室效應

這問題可能發生在任何季節,冬季發生在很冷卻晴朗的日子當通風口完全未打開

溫室效應



- 大氣層中二氧化碳與其他溫室氣體含量提高
- 溫室氣體吸收了太陽能並將能量侷限於大氣層中，就像玻璃溫室限制熱量出去
- 溫室被污名化

作物的能量收支

- | | |
|------------------|-----------|
| • 獲得 | • 損失 |
| - 太陽輻射 | - 輻射 |
| - 熱輻射 (由輻射加熱器獲得) | - *蒸散 |
| - 與暖空氣的對流 | - 與冷空氣的對流 |

* 蒸散是作物散熱的主要途徑，這是作物主要的降溫機制。也是為什麼在熱天讓植物有良好的灌溉是那麼重要。

溫室加熱需求的計算

- 計算溫室的熱損失

$$Q = [(A_1^* \times U_1) + (A_2^* \times U_2)] \times (T_{\text{inside}} - T_{\text{outside}}) \times W \times C$$

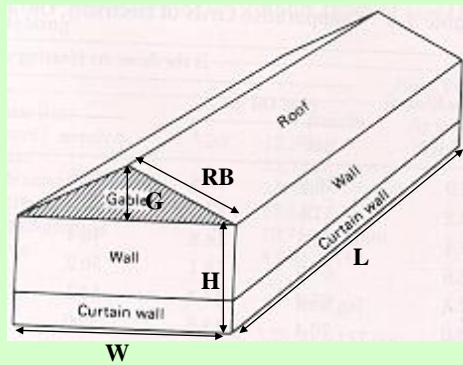
- A = 溫室各屋頂與牆面表面積-業者計算
- U = 傳導係數-廠商提供
- $T_i - T_o$ = 溫度差-由氣象資料瞭解
- W = 風速因子-由氣象資料計算
- C = 結構因子-廠商提供

- Q 是加熱系統所提供的加溫需求

* The subscript indicates different wall/glazing materials, e.g. wood, glass, concrete, plastics, etc.)

永遠需要考慮紀錄中存在的

- 最低溫度
- 最高溫度
- 最大降雪量
- 最大風速



溫室的表面積 = $2(L \times H) + 2(W \times H) + 2(L \times RB) + (G \times W)$

當我們在談溫室的加熱或降溫，為什麼溫室的表面積這麼重要？

加熱系統

- 局部加熱
 - 每區一套加熱器
 - 單元加熱機或強制送風的加熱機
 - 輻射加熱機
- 中央加熱
 - 中央地區製造熱，透過管線輸送到整棟溫室
 - 在周邊加熱
 - 地底加熱系統
 - 植床上加熱系統
- 太陽能加熱



單元加熱機

- 使用燃油來加熱空氣並透過風扇送風
- 小空間加熱有效率
 - (2000-6000 ft²)(200-600m²)
 - 塑膠布溫室
- 175,000 Btu/hr
- e.g. Reznor (as in Trent Reznor of Nine Inch Nails), Modine



空氣輸送



塑膠軟管連接強制送風加熱器



內循環風扇



室內均風風扇的典型安置方法

- 在屋簷高度、朝前、50呎距離
- 讓空氣在溫室內或該區域內造成環場的效果
- 空氣流速 0.25~0.5 m/s
 - 葉片輕微擺動
- 盡可能使用小風扇
 - 耗電小
 - 遮蔭小
- 各列的第一個風扇
 - 距離牆面10~15英尺 (3~4.5 m)
 - 可以是單元加熱器
- 基於多重原因很重要

內循環風扇安裝於花壇作物上方



輻射加熱

- 鐵管沿溫室走向安裝
 - 一端燃燒爐(天然氣或丙烷)
 - 遠端 - 室外排氣
- 鐵管被加熱就能輻射能量
 - $900^{\circ}\text{F} = 3800\text{ nm}$
- 任何含有水分的物體(譬如作物)都能吸收此輻射熱能
- 使用鋁製反射片來讓輻射管路對準作物

輻射加熱的優點

- 燃料成本降低
 - 較少熱量損失
 - 溫室內空氣溫度較低

輻射加熱的缺點

- 大多數溫度控制系統靠量測空氣溫度來做控制，使用輻射加熱需要能夠量測作物/葉片溫度

紅外線加熱器



中央加熱

- 中央鍋爐
 - 可以使用多種燃料
- 鍋爐把水加熱
 - 熱水(82 °C)
 - 蒸氣(101 °C)
- 將熱水或蒸汽在溫室內透過管路輸送來傳遞熱量

熱水 vs. 蒸汽

- 1 Btu/lb 當溫度 \downarrow 1° F
- 需要有幫浦
- 想獲得更多熱
 - 使用加壓系統
 - 管路堆疊
 - 使用有鰭片的散熱片
- 溫室加熱可做到很均勻
- 蒸汽 \rightarrow 水 970 Btu/lb 當溫度 \downarrow 1° F
- 自己移動
- 操作成本較高
- 較少管路，但接頭需耐壓
- 需遵守安全規範

中央加熱系統的熱輸送



- 植床下方的加熱管
- 頭頂上的加熱管
- 內循環風扇 協助氣流流動

地底加熱



- 特別適用於在地面栽培的系統
- 只使用熱水，通蒸汽會太熱了
- 水泥內使用塑膠管路
- 只在植物栽培區域內提供熱量
- 在澆水後，地表乾的比較快。

地底加熱



花壇作物溫室內的地底加熱系統



觀葉作物溫室內的地底加熱系統



植床上底部加熱

- 底部加熱
- 植床上使用塑膠管
- e.g. Biotherm™
- 單一熱水加熱器通常足夠
- 種苗繁殖



植床下加熱系統用於種苗繁殖植床



熱水系統的燃料比較

燃料	成本	效能 (Btu/\$)	供應
煤	\$41/ton	639,000	鏟
二號燃油	\$0.84/gal	126,000	埋桶
天然氣	\$4.69/ 1000ft ³	229,000	管線

燃燒相關

- 通風式加熱器的排氣口必須接到溫室外
 - 不完全燃燒會產生乙烯
 - 不完全燃燒會產生一氧化碳、硫化合物等
 - 要避免排氣又被通風系統吸入

太陽能加熱

- 由太陽獲得能源存於水中或石頭內用來加熱
- 當備胎用
- 成本高且迄今效率不足

加熱系統比較

加熱系統	安裝成本	燃料	熱傳方式
單元加熱機	\$0.50-1.00/ft ² 5~10 US\$/m ²	天然氣， 二號燃油	對流
輻射加熱機	\$1.50-2.25/ft ² 15~22.5 US\$/m ²	天然氣	輻射
中央加熱系統	\$2.50-3.25/ft ² 25~32.5 US\$/m ²	木頭、油、 煤、天然 氣	對流
太陽能加熱	\$8-10/ft ² 80~100 US\$/m ²	太陽	對流/輻射

節能的方法



- 降低溫室總表面積對總體積的比例
 - 連棟
- 雙層被覆
- 節能保溫膜
 - 遮蔭或黑布
- 牆壁隔熱
- 溫室外設立風阻
- 選擇低溫作物

加溫設備 – 燃油加溫機&風管



加溫設備 – 鍋爐&熱水管



加溫、降溫、除濕設備 – 熱泵



加溫、降溫、除濕設備 – 熱泵



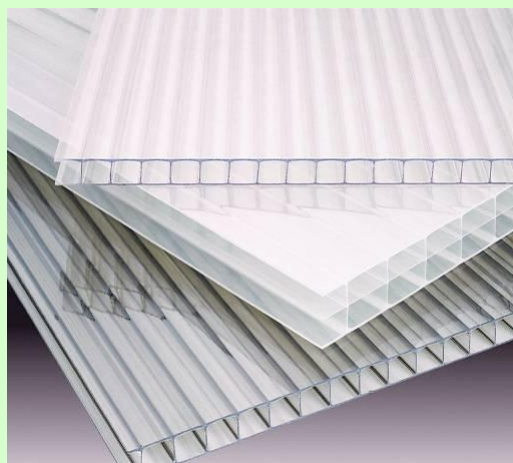
保溫設備 – 節能布



保溫設備 – 節能布



保溫設備 – PC中空板



PC中空板的節能實績



溫室	面積, m ²	平均每日 能源消耗
A (一般設計溫室)	9,600	351 L
B (節能溫室設計)	21,356	353 L

保溫設備 — 側節能布



均溫設備 - 循環風扇



除濕設備 - 熱水管&天窗



除濕設備 – 除濕機



加濕設備 – 噴霧系統



冷卻與通風

為什麼要通風

1. 降低空氣溫度
2. 補充CO₂
 室外 ~380 ppm, 室內
 可以低很多
3. 降低相對濕度
 減少葉片的水分凝結
 就能降低發生疾病機
 率



自然/被動通風

- 煙囪效應 – 對流
 - 浮力
 - 暖空氣較輕，上升
 - 冷空氣較重，下降

- 南北向可利用西向風



最有效的自然通風是側窗 與 上方開口都能打開

分階段的通風

- 溫升
 - 先開上方開口
 - 再開側窗
- 溫降
 - 先關側窗
 - 再關上方開口
- 手動或自動控制都需要依照正確順序

側邊通風口



先進的自然通風

屋頂大幅度打開



屋頂開口可能有昆蟲進入，可以使用防蟲網



天窗 + 防蟲網



除了**自然通風**的溫室之外，

許多溫室仰賴**強制通風**

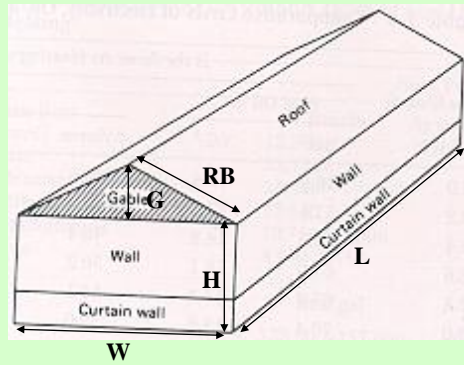
機械(強制)通風

- 風扇安裝於迎風面對側
 - 把風拉進溫室
- 維持每分鐘換氣一次
- 空氣進出口距離不超過45.7m.



降溫需求的決定

- 每分鐘一個溫室體積的空氣交換量
- 溫室體積=風扇必須搬運的空氣量
- 風扇能力=風扇可以搬運的空氣量
 - 以cfm為單位或m³/s或m³/min
- 兩個小風扇比一個大風扇好
 - 降溫更均勻
 - 相隔不超過7.6 m



$L \times W \times H + (L \times W \times G) / 2 = \text{溫室體積}$
 當要計算溫室降溫通風時，為什麼溫室體積的計算很重要

強制通風的控制分段



- 風扇啟動時天窗與側窗關閉
- 溫升
 1. 開天窗
 2. 開側窗
 3. 關天窗與側窗，開風扇
- ◆ 溫降
 1. 關風扇，開天窗
 2. 關側窗
 3. 關天窗

風機組成

◆ 百葉

- 風扇不用時關閉
- 與牆面對齊
- 擋風與擋雨

◆ 鐵網

- 安裝於風扇外
- 網目開口 $\leq 1 \text{ in}^2$
- 安全理由

蒸發冷卻水簾片

- ◆ Corrugated cellulose pad located on opposite wall from ventilator fans (windward side)
- Water flows over and through the cooling pad
- Fans pull warm outside air through cooling pad
- Water absorbs heat from the air as it evaporates which cools the air as it enters the greenhouse



540 cal/g of water!

That's a lot of cooling capability

水牆風扇蒸發冷卻降溫法

- 濕度越低，效能欲高
- 最佳水牆與風扇距離為30~45 m
- 1 ft² 水牆面積每分鐘允許 150 ft³ 空氣通過，相當於風速 2.5 ft/s = 0.76 m/s
- 需搭配海拔高度與溫室內光量做修正
- 一般10或20公分厚

降溫設備 - 水牆&風扇



更多有關水牆的討論

- 水流由水牆上方送入
 - 流量為 $\frac{1}{2}$ gal/分/英尺
 - 水體需循環
- 長藻的問題
 - 殺藻劑加入循環水中
- 小昆蟲(譬如薊馬)被吸入
 - 以殺蟲劑處理用水

單元式冷風機

- 小溫室使用蒸發冷卻的冷風機
 - 小溫室，趣味栽培溫室
 - 正壓式：風扇把風拉過水牆再送入溫室
- 冷空氣被吹入溫室

噴霧降溫系統

- 在溫室內造霧
 - 高壓(~1000 Psi = 68 大氣壓)噴霧產生小霧滴
- 霧滴蒸發時帶走空氣的熱量
- 不能使用硬水，會使噴嘴阻塞
- 濕度控制 80-90% RH以上不噴霧

降溫設備 – 噴霧系統



降溫設備 - 冷氣



以遮蔭來降溫



- 透過降低入射光量來降溫
 - 遮蔭網
 - 塗料
- 調整光量種出高品質作物

光控 / 降溫設備 - 白漆



以遮蔭來降溫



- 遮蔭網
 - 收放自如
 - 機械化與電腦化控制
 - 安裝於室內則無法減少進入的能量

以遮蔭來降溫



- 遮蔭塗料
 - 無法收放自如
 - 在秋季必須人工清除
 - 有特殊配方
 - 可減少進入溫室的熱負荷



冬季降溫

- 被動通風
 - 開天窗
 - 確認不會被凍住
- 主動降溫
 - 通風管
 - 引入室外冷空氣會做內循環
 - 內循環風扇
 - 由屋脊拉下較冷空氣



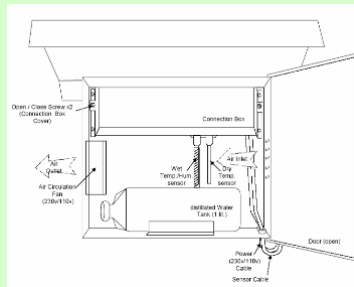
在晴朗的冬天，室外雖然可能低於零度，但完全不通風的溫室也會有溫度高於37°C，完全不適合作物生長。換言之，冬季的通風不能免。

溫度的量測

- 感測器需離作物愈近愈好，但不可被陽光直射
- 通風的溫度計
 - Fan blows air across thermometer
 - Prevents ‘dead air’ space from developing around the sensor
 - Gives more accurate reading of temperature
 - Within 2-3° of real temp rather than 4-5° with non-aspirated unit



室內溫、濕度感測器



The Ventilated cell is a closed shaded box equipped with an 80 x 80 mm fan. The fan provides a constant flow of air in the cell. This is the recommended way to monitor temperature in greenhouses and other sunlight effected places. The ventilated cell is also the ideal way to monitor Humidity in particular for controllers that can handle a dry-wet bulb calculation according to the psychrometric table.

使用溫度控制作物生長

溫室內的溫度

- 空氣溫度
 - 最容易量測
 - 夜間溫度比白天容易控制
- 葉片溫度
 - 不容易量測
 - 與空氣溫度多半不同
- 介質溫度
 - 根系
 - 種苗繁殖

溫度如何影響作物

- 誘導開花
 - e.g. Easter lily、Phalaenopsis 百合、蝴蝶蘭
- 與光週期合併來控制開花
 - Heat delay
- 花苞休眠或春化
 - e.g. hydrangea & azalea 繡球花與杜鵑
- 控制莖生長長度
 - *最重要

溫度的不利影響

- 低於 50°F/10°C 會發生寒害
 - African violets
 - Poinsettias 聖誕紅
 - Hibiscus 木槿
 - Gloxinia 大岩桐
 - Tomatoes 蕃茄
 - Foliage plants 觀葉植物
 - Phalaenopsis 蝴蝶蘭
- Chilling injury - 膜功能障礙
 - Lipids in tropical and subtropical plant membranes solidify



成長Growth vs.分化Development

- 成長
 - Increase in size (volume or weight) of plant or organ that is irreversible and permanent
- 分化
 - Aging process of the plant – phases that plant goes through as gets older
 - Germination
 - Vegetative growth
 - Flowering
 - Fruit set
 - Seed release

作物的生長速率

- 生長速率Growth rate =組織經歷某種發展階段的速率 The speed at which an organ goes through a certain developmental stage
 - Stem growth 莖的伸長
 - Flower production 花的生長
 - Leaf unfolding 葉片的展開
- 所有的生長過程都有不同的溫度反應曲線
 - 即使是相同品種
 - 依品系而定

最適溫度

- 各品種都有最適與可容忍的溫度範圍
- 最適範圍:可最快長成最高品質
 - 菊花: 16~17°C夜溫
- 可容忍範圍:仍可生長但是既慢且低品質
 - 菊花= 40-60°F & 65-80°F 夜溫

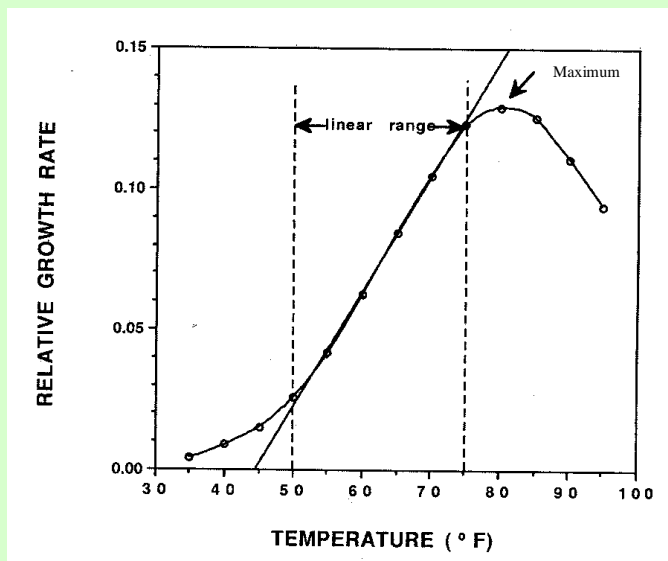
累積生長

- 各瞬時的作物溫度控制當時的作物生長
- 累積24小時的作物生長代表在該時段內作物的平均生長狀況
- 調控溫室內的日總平均溫度可以改變作物分化速率
 - 長得快不代表高品質

日總溫度平均值

- 依據設定的日溫與夜溫計算平均溫度值
- 加權平均
 - 日間16小時，平均溫度77°F
 - 夜間8小時，平均溫度68°F
 - 加權平均溫度
 - = $[(16 \times 77) + (8 \times 68)] / 24 = \underline{74^\circ \text{F}}$

生長曲線



最大通常不代表最佳

最佳溫度決定於你希望作物的生長速率是多少

生長曲線

- 線性範圍
- 基礎溫度：線性範圍之直線與X軸的交點
- 最大溫度

度日數的觀念

- 斜率: dy/dx 單位改變量 / 單位溫度改變
 - *e.g.* # leaves/day/ $^{\circ}$ F \rightarrow 葉片開展
 - *e.g.* inches/day/ $^{\circ}$ F \rightarrow 莖部伸長
- 平均溫度增加 1° F，葉片生長或莖長的每天增加量

度日數的觀念

- 在基礎溫度以上累積的熱量都用來提供作物生長發育所需
 - 平均溫度= 55°F
 - 基礎溫度= 50°F
 - 該日累計有 5 度日 degree-days

度日數的觀念

- 度日數與每個分化階段都相關
 - 譬如作物需達到 80 度日數才能達到某階段
- 以下的幾項都可得到累積的80度日數
 - 80 days @超過基礎溫度1°
 - 40 days @超過基礎溫度2°
 - 08 days @超過基礎溫度10°
- 允許作物栽培者可以用來針對作物的生長分化進行規劃與排程

度日數的應用 (使用假設的數字)

- Easter Lily production during leaf development
 - Slope = 0.02 leaves/degree-day
 - Degree-day constant = $1/0.02 \approx 50$
 - 50 degree-days/leaf
 - What temp to produce 3 leaves in 10 days?
 - Avg daily temp = $\frac{\text{total degree-days}}{\text{desired time}} + T_{\text{base}}$ *

* T_{base} = base temperature

範例(續)

- What avg. daily temp to produce 3 Easter lily leaves in 10 days?
 - Base temp = 55° F
- Avg temp = $\frac{3 \times 50}{10} + 55 \approx 70\text{F}$
- Maintain 70F avg. temp and you should have 3 new leaves in 10 days!

- Most E. Lily growers use a 'bud meter' once flower buds are visible. 百合業者使用花苞長度量尺

	1	2	3	4	5	6		Inches	Night Temperature Days to Flower									
20	22	20	17	18	16	13	11	0		0	7	8	5	4	3	2	1	16°C (60°F)
24	22	20	17	15	13	11	9	8		7	6	5	4	3	2	1	18°C (65°F)	
20	17	16	13	11	9	8	7	6		5	4	3	2	1			21°C (70°F)	
20	17	16	13	11	9	8	7	6		5	4	3	2	1			24°C (75°F)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			centimeters	

By measuring the length of the bud, the grower knows how warm to keep the greenhouse to get the bud to the selling stage by Easter. The bud meter is based on degree days.



量測花苞的長度，業者可以瞭解溫室溫度需設定多少度才能趕上復活節銷售旺季。此花苞量尺的設計就是依據度日數。

度日數的早期應用

- 田間栽培作物
 - 由量測溫度來計算度日數
 - 預測收穫時間
 - 蘋果: 開花 → 收穫 = 2800 degree-days
 - 預測昆蟲孵化/蛻皮
- 度日數 = $(T_{\max} - T_{\min})/2 - T_{\text{base}}$
- 只能預測-因為田間溫度無法控制

溫度與株高調控

DIF的歷史

- Originally discovered in 1944
- “Rediscovered” and developed as a growth regulation technique 生長調節技術 in late 1980’s by Dr. Royal Heins at MSU 美國密西根州立大學
- The DIFference between day and night temperature in a greenhouse will affect internode elongation and consequently, stem length.

(溫室內日溫與夜溫的差會影響節間長度，影響莖高)

DIF 日夜溫差

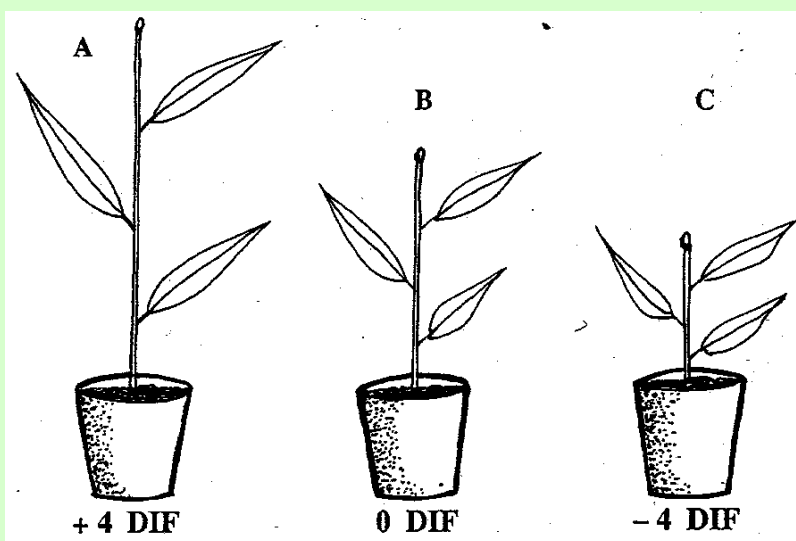
$$\text{DIF} = \text{日溫} - \text{夜溫}$$

- 當日溫大於夜溫，DIF為正值
- 當日溫等於夜溫，DIF為0
- 當日溫小於夜溫，DIF為負值

在正常生長狀況下，DIF值正的越多，節間長度越長

溫室	A	B	C
日溫	60°F	55°F	50°F
夜溫	50°F	55°F	60°F
日平均溫度	55°F	55°F	55°F
日夜溫差	+10	0	-10
植株高度	高	中等	矮

日夜溫差影響百合莖長



受DIF影響的品種

- Easter lilies 百合
 - Poinsettias 聖誕紅
 - Snapdragon 金魚藻
 - Rose 玫瑰
 - Petunia 牽牛花
 - Carnation 康乃馨
 - Impatiens 鳳仙花
 - Tomato 蕃茄
 - Pepper 小黃瓜
- 不受影響
- Hyacinth 風信子
 - Tulip 鬱金香
 - Narcissus 水仙
 - Squash 南瓜

度日數 vs. 日夜溫差

- 日總平均溫度或者總度日數控制作物的生長速率
- DIF 只用來調節作物的生長高度(節間長度)
 - DIF 正的多，植株長得高
 - DIF 負的多植株，長得矮

極端的-DIF的副作用

- Chlorosis缺綠病;變色病 (esp. DIF < -10F)
 - Bedding plants (e.g. salvia)
- Leaf orientation 葉片走向
 - Problem on Easter Lily



DIF的其他效應

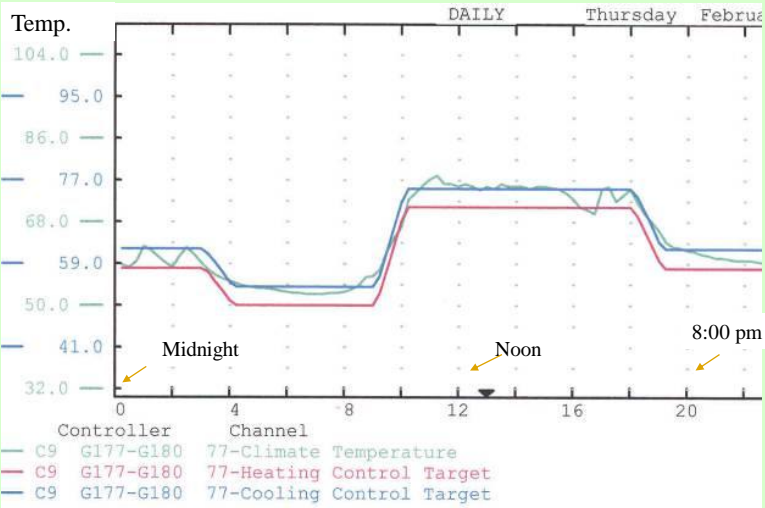
- 植物對DIF的反應極快且可以逆轉
 - 負的DIF的不良反應，可以透過幾天的0 或正的DIF值來修正
 - 反應快
- DIF與光週期
 - 日長縮短，對-DIF的反應更明顯

DIF的限制

- 誘導開花
 - 聖誕紅在夜溫高於22.2°C不開花
- 季節
 - 不見得達到理想的-DIF控制溫度(日溫低於夜溫)
 - 溫暖區域的夏天
 - 大晴天溫室被加熱，無法做到日溫低於夜溫

DROP/DIP

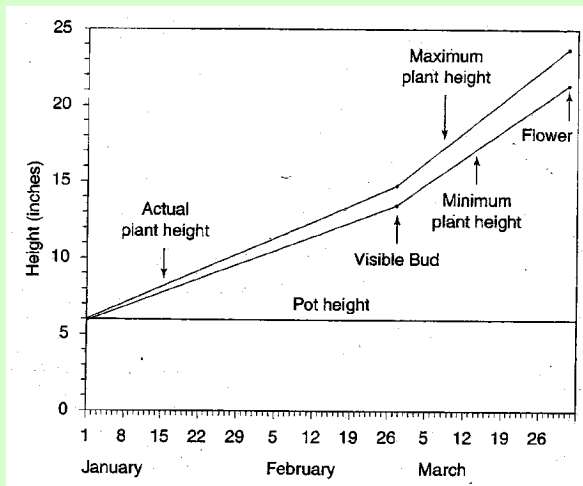
- 日出前幾小時降低溫度
 - 比日落後降溫有效
 - 莖部伸長多半發生在這幾小時
 - 結合早晨的降溫與較小的-DIF或0 DIF會比較多的-DIF有效)
 - 在日出前拉開保溫膜或進行通風是達到DROP的好方法



Min 52.3°F
 Max 78.1°F
 Ave 64.1°F

Typical DROP/DIP daily temperature pattern

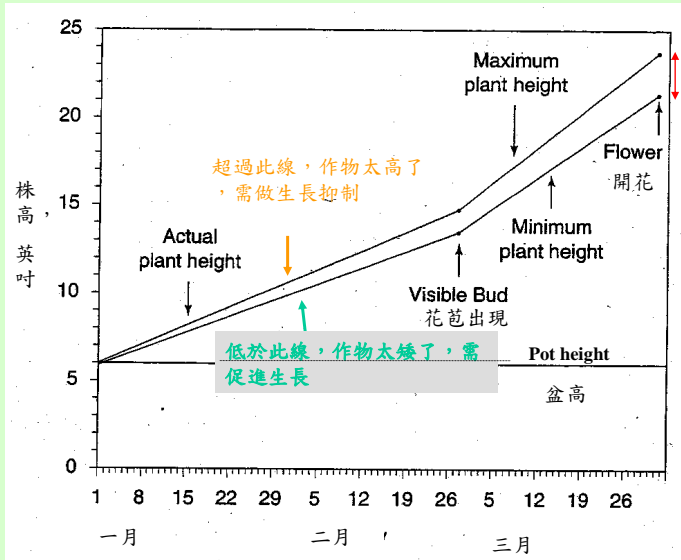
畫圖追蹤



讓你確實瞭解現接度植物應該要有的高度

這點非常重要，因為輸送容器有高度限制且莖的高度與產品美觀有極大相關

畫圖追蹤



可接受的適當高度

每週量測一到兩次，針對結果作因應

在花苞出現前至剛出現的這段期間，植物對生長調節的反應最靈敏

待續

植物光生理

溫室光控

溫室肥培管理

養液控制

紐西蘭溫室環控系統

荷蘭溫室環控系統

UECS