

# 多層立體植栽室 生長條件均勻度之 理論分析

■ 黃建民 · 許守平 · 李金學

## 摘要

本研究以數值計算分析室內立體植栽環控室中生長條件的均勻度。流體介質包括乾空氣、水蒸氣及二氧化碳，統禦方程式包括動量方程式、能量方程式及質傳方程式，熱浮力效應包含在動量方程式中，紊流模式為k- $\epsilon$  High Reynolds number turbulent model。探討的變數包括光源發熱量、植物的光合作用強度、換氣量、出風口二氧化碳濃度及植栽層數，均勻度以各植栽層的平均濃度及標準差濃度來表示。結果顯示，熱浮力效應造成各層回風量有明顯差異，這也同時造成各層二氧化碳濃度及水蒸氣濃度有明顯差異。發熱量的增加基本上會造成均勻度降低；增加換氣量有助於提升均勻度；光合作用較弱的植物會有較均勻的生長條件；提高植栽室內的二氧化碳濃度會使均勻度降低；植栽層數越多，均勻度越差；三種生長條件中，溫度的均勻度最高，二氧化碳的均勻度最差。

關鍵字：多層立體植栽、生長條件、均勻度、CFD

## 前言

「室內植物栽培環控系統」是一個集合溫室、機電、生物與環境而成的最新系統。室內植栽系統工程由提高使用效率、增進農產品品質、無藥栽培、水霧栽培及調節季節性植物生長資源以增加經濟效益。這種植栽系統不受氣候影響、不受季節影響、無病蟲害及農藥，可以營造各種作物最佳生長條件，可以建立在都市中，減少運送成本，適合臺灣這種地小人稠且風災頻繁的地區使用。農業環控系統的設計需要工程人員徹底瞭解系統內生物與環境間之互動關係，從而創造合宜的環境以利作物之生長繁殖，溫室環控之重點在控制作物生長之微氣候，使作物能成功地生長與繁殖，環控技術之成熟，使得植物工廠的建立趨於可行。農業生產工業化與農業經營企業化不



再是口號，昔日不可能有農業生產的地方，如沙漠、極地、海底、太空等也都將能從事農業生產。

溫室環控之目標在於促進植物之生長，並能以市場所期望之品質供應市場所需求之成熟作物。溫室內微氣候的控制是所有室內環控中最困難的，一般溫室環控多只針對空氣之溫、濕度與空氣的品質，室內植栽環控需兼顧光量、光質、光照時間、二氧化碳濃度等。室內植栽環控的對象種類繁多，不同品種喜好的生長條件大多不同，就算同一品種，在不同成長階段之喜好也常有所更動。光、二氧化碳及水與光合作用息息相關，溫度、光質與光照皆會影響植物之生長與分化，水中之電導度與酸鹼度則影響植物體根系吸收養份之能力。就植物本身之生長過程而言，要加速植物之成長，必須加大光合作用、減少呼吸作用，且將蒸散作用、同化作用及二氧化碳之分佈等合理化。

室內植栽環控相關的研究包括連啓超<sup>[1]</sup>的研究嘗試將冷凍空調技術結合農業，建立室內栽培與複合養殖環境之試驗場。許守平等<sup>[2]</sup>認為室內植物栽培不再只是裝飾，而是具有稀釋室內之二氧化碳與陶冶身心的功能。郭博文<sup>[3]</sup>指出展場或研討會之會場通常因為人數眾多而充滿二氧化碳，除了藉由空調設備或空氣清淨機之外，也可由綠色植物加以調節。Liu et al<sup>[4]</sup>用一個二維E-ε模型模擬植物、大氣互相作用的關係，並分析森林邊緣的風向氣流的預測森林空地的氣候。Takahashi et al<sup>[5]</sup>分析熱流(包含潛熱)在建築區域與綠地區域之間之差異，並建立都市熱環境CFD數值模擬預測模型，對於氣溫、濕度、風速、熱等環境因子做探討。Robitu et al<sup>[6]</sup>探討植栽與水體對於都市熱環境的影響，以

實測數據與數值模型相互驗證植栽與水體在輻射熱傳中之降溫效果。

二氧化碳濃度及水蒸氣濃度(濕度比)對植物的光合作用與蒸散作用有很大的影響，溫度也是眾所周知影響植物生長的重要參數。室內植栽為了增加產能、降低成本，多半會考慮採用類似多層架方式的立體植栽模式，然而如果不能使各層架植物表面有相近的生長條件(溫度、濕度及二氧化碳濃度)，各層植物生長的速度及品質會有所差異，同一批作物參差不齊會使室內植栽的競爭力大打折扣。

本研究的主要目的是以理論計算的方式分析室內植栽植物生長條件的均勻性，工作流體包括空氣、二氧化碳與水蒸氣，變數包括植栽層數、出風口導葉角度、出風量、出風口溫度、出風口二氧化碳濃度、出風口相對濕度及光源發熱量，探討以上變數對各植栽層之二氧化碳平均濃度、水蒸氣平均濃度及平均溫度的影響，除了層與層之間的比較外，同一層之濃度分佈也是本文要探討的。

## 物理模型

本研究的植栽空間，為一立體室內栽培室，植栽空間幾何如圖1所示，室內的長、寬及高皆為2m。其中位於左右兩側為立體式層架區，尺寸長1.5m、寬0.6m、高0.2m，0.2m的高度包括層板、土壤及植物本體。天花板上設定三個格柵型出風口，出風面積為0.45m×0.45m，回風口擺放植栽層架側邊，高度為0.125m，寬度則為0.3m，一層三個。光源是以LED燈平均分佈在1.8m×1.5m的機板上，外面有透光性高的玻璃罩，置於植栽室的中間，如此可均勻沒有死角的將光線傳到各層

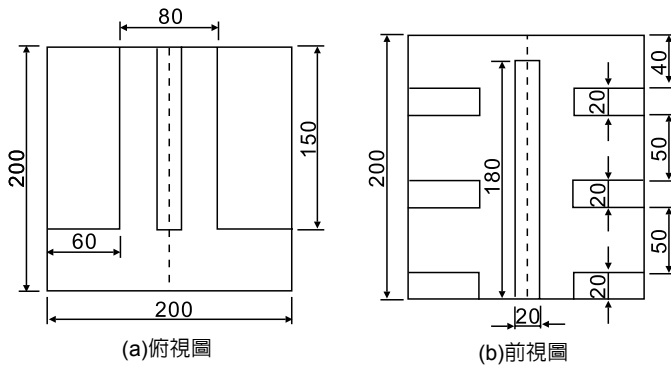


圖1 室內栽培室之幾何尺寸

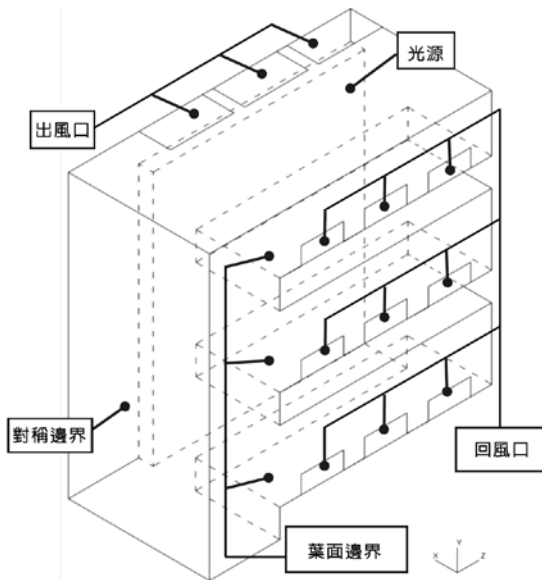


圖2 出風、回風口位置及邊界條件

植物的表面。若將光源設置在天花板，則層架會遮蔽下面植物所需的光線，若將光源置於每層層架的下方，雖然光照充足均勻，但光源系統置於澆灌系統之下容易損壞，且光源發出的熱量會使加熱澆灌系統的水或土壤，影響植物根部的生長。此系統幾何左右對稱，因此將系統用一半分析，如圖2所示。本研究的假設如下：

1. 流體為不可壓縮流、理想氣體，除密度外，物理性質不隨溫度而變。
2. 穩態流動。
3. 植物表面濕度比固定為 $16\text{g}/\text{kgda}$ (約為 $21^\circ\text{CDB}$ ，RH100%的狀態)。
4. 光源強度與植物表面二氧化碳濃度為獨立變數。

本研究的邊界條件設定如下：

1. 出風口使用入口(inlet)邊界條件，在此邊界上需給定入口流速、二氧化碳濃度、水蒸氣濃度、紊流動能(k)及紊流消散率( $\epsilon$ )，這些參數在入口處皆為均勻分佈。
2. 回風口使用出口邊界條件，共有9個回風口，各風口的回風風量依照流場情況由軟體自行計算，回風口各氣體濃度也是依照流場情況由軟體自行計算。
3. 由於本研究選用 $k-\epsilon$  high Reynolds number turbulent model，壁面附近的速度以牆函數(wall function)處理。植栽室壁面假設為隔熱庫板，設為絕熱邊界條件。植物表面並非平整的平面，且可能隨風有輕微擺動，本研究皆簡化成一般絕熱壁面。然此平面上之二氧化碳濃度因行光合作用，低於環境中二氧化碳濃度；此平面上之水蒸氣濃度因蒸散作用，高於環境水蒸氣濃度。
4. 光源系統在玻璃罩中，玻璃表面的熱通量為LED燈的發熱量除以面積。發熱量由植物的光照需求決定，LED燈在提供此光照度的同時會產生的熱量即為發熱量。

沈俊宏<sup>[7]</sup>認為發光二極體(LED)具有低耗能、省電、壽命長、耐用等優點，因而被各方看好將取代傳統照明成為未來照明光源，



本研究分析模式中以LED為植栽光源，LED約有15%~30%可轉換成可見光<sup>[8]</sup>。若LED燈為90 lm/W、發光效率25%、發熱為75%，植物生長所需光度需在15000 lux以上<sup>[9]</sup>，配合植栽面積，可算出總發熱量為84.4W，除以光源面積得31.25W/m<sup>2</sup>。由於15000 lux是蘭花這種光度要求不高的植物，因此本研究選擇光源熱通量範圍從30W/m<sup>2</sup>到90W/m<sup>2</sup>。

本研究的標準狀況為光源熱通量60W/m<sup>2</sup>，出風口風速0.2m/s(風量約3.6m<sup>3</sup>/min或55ACH)，出風角度0度(垂直向下)，出風口空調氣溫度20℃、二氧化碳濃度500ppm、相對濕度60%，植栽層數為3，植物表面二氧化碳濃度100ppm、濕度比16g/kgda。本研究以此上述參數為參考，每次變化一種參數。

本研究探討植物生長條件的均勻度，包括層與層之間的濃度平均值比較及各層的濃度標準差，濃度平均值及標準差STD的定義如下：

$$\text{濃度平均值} = \Sigma(C_i \times \Delta V_i) / V, \quad i=1, n, \dots \dots \dots (1)$$

$$\text{STD} = ((\Sigma(C_i - C_{ave})^2 \times \Delta V_i) / V)^{0.5}, \quad i=1, n, \dots \dots \dots (2)$$

$\Delta V_i$ 為第*i*個網格的體積，這些網格都是位於植物表面上一層網格中，*V*為植物表面上一層網格的總體積，網格的厚度約2.5cm，亦即平均值及標準差是植物表面1.25cm處的數值。

## 數值方法

本研究使用STAR-CD進行流場、溫度場及濃度場的分析及計算，統禦方程式(governing equations)包括連續方程式、動量方程式、能量方程式及質傳方程式，統禦方程式中的對流項選用upwind method離散。由於本研究含熱浮力效應且有流動分離現象，

upwind雖然準確性較不足，但數值穩定性最佳，利用網格的加密補足準確度的問題。數值迭代方法使用PISO scheme，不使用常用的SIMPLE scheme，主要原因是因為自然對流增加壓力收斂的困難度，SIMPLE scheme無法將平衡殘餘值(residual)降到目標值，PISO scheme因有壓力的內部迭代，但可以達到收斂條件，收斂的條件是速度、壓力、溫度、紊流動能、各氣體濃度之平衡殘餘值(residual)皆小於10<sup>-4</sup>以下。

## 結果與討論

圖3為不同發熱量下，在z=1.25m截面的流場圖。圖3(a)在不考慮熱浮力效應時，空調出風口的空氣向下流動，從各回風口離開植栽室，從圖中可看出，三層回風口的回風量相差不多。圖3(b)為光源開啓後發出30W/m<sup>2</sup>熱量，光源附近的空氣因熱浮力向上流，這股向上的氣流改變了空調氣流的流向，由向下轉成向左，部份空調氣流在上層蔓延開，少部份空調氣流向下到中層。當熱量增加到60W/m<sup>2</sup>時，向下的空調氣流完全被上升氣流擋住，全數在上層蔓延開，一小部份與上升熱氣流混合後的空氣流到中層，大部份的空氣從層架與門之間寬0.5m的空間往下流動，分別進入中層與下層(如圖3(d)所示)，再從中、下層的回風口離開植栽室，由於轉彎的曲率半徑較小，向下流動的空氣較不易進入中層，使得中層的回風量最小，三層回風口的回風量有明顯的差異，與不考慮熱浮力時有很大的差別，如表1所示。表1為不同發熱量時各層的回風量，不考慮熱浮力時，三層的風量差異不大，中層風量較高些，發熱量為30 W/m<sup>2</sup>時，與不考慮熱浮力比較起來，上

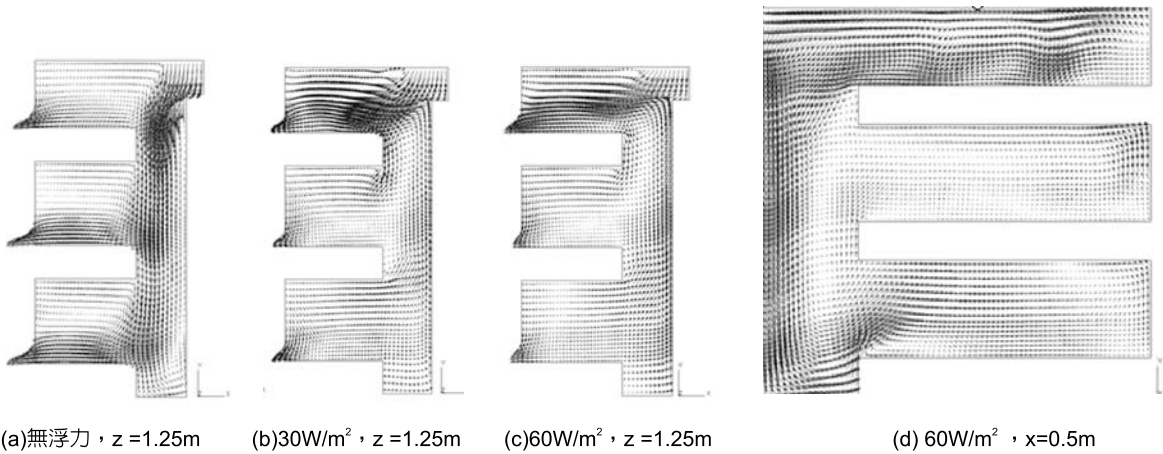


圖3 不同發熱量下的速度向量圖

表1 不同光源發熱量下各層的回風量(m<sup>3</sup>/s)

	無浮力	30 W/m <sup>2</sup>	60 W/m <sup>2</sup>	90 W/m <sup>2</sup>
上層	0.0157	0.0190	0.0209	0.0201
中層	0.0186	0.0142	0.0131	0.0142
下層	0.0177	0.0170	0.0171	0.0171

層的回風量增加，中層的回風量減小，下層的風量差別不大。發熱量增加到60 W/m<sup>2</sup>時，上層與中層的風量差距進一步擴大，下層風量的變化依然不大。發熱量增加到90 W/m<sup>2</sup>時，流場型式(flow pattern)與60 W/m<sup>2</sup>時相似，因此各層回風量均相近。

圖4為不同光源發熱量下，各層二氧化碳及水蒸氣的平均濃度與標準差濃度，長條線為平均值，折線為標準差，縱座標左邊為平均值，右邊為標準差。從圖4(a)可知不考慮熱浮力時，層與層之間的二氧化碳平均濃度相當接近，中層的平均濃度較高些，主要是上層的回風量較大，有較多的二氧化碳流經上層表面。當發熱量為30 W/m<sup>2</sup>時，熱浮力氣流改變空調氣流的流向，造成上層的回風量最大，中層的回風量最少，這也使得上層的

二氧化碳平均濃度最高，中層的平均濃度最低。當光源的發熱量達60 W/m<sup>2</sup>時，由於自然對流更強烈，對空調氣流的影響更大，使中層的二氧化碳平均濃度更小，將發熱量提高到90 W/m<sup>2</sup>並沒有對各層二氧化碳的平均濃度造成進一步的影響，原因是流動型式沒有改變。圖4(a)另顯示每一層的二氧化碳濃度分佈標準差，標準差越大表分佈越不均勻，上層的二氧化碳濃度標準差以30 W/m<sup>2</sup>最小，中層標準差最大的也是30 W/m<sup>2</sup>，每一層的二氧化碳濃度分佈與該層的速度分佈有關，發熱量30 W/m<sup>2</sup>的流場是從無浮力效應到浮力效應完全控制流場間的過度流場，在中層的流動較複雜，不均勻度也較高。發熱量60 W/m<sup>2</sup>與90 W/m<sup>2</sup>時，流場型態很類似，各層的二氧化碳濃度均勻度也相當，從圖3(c)及(d)可知空

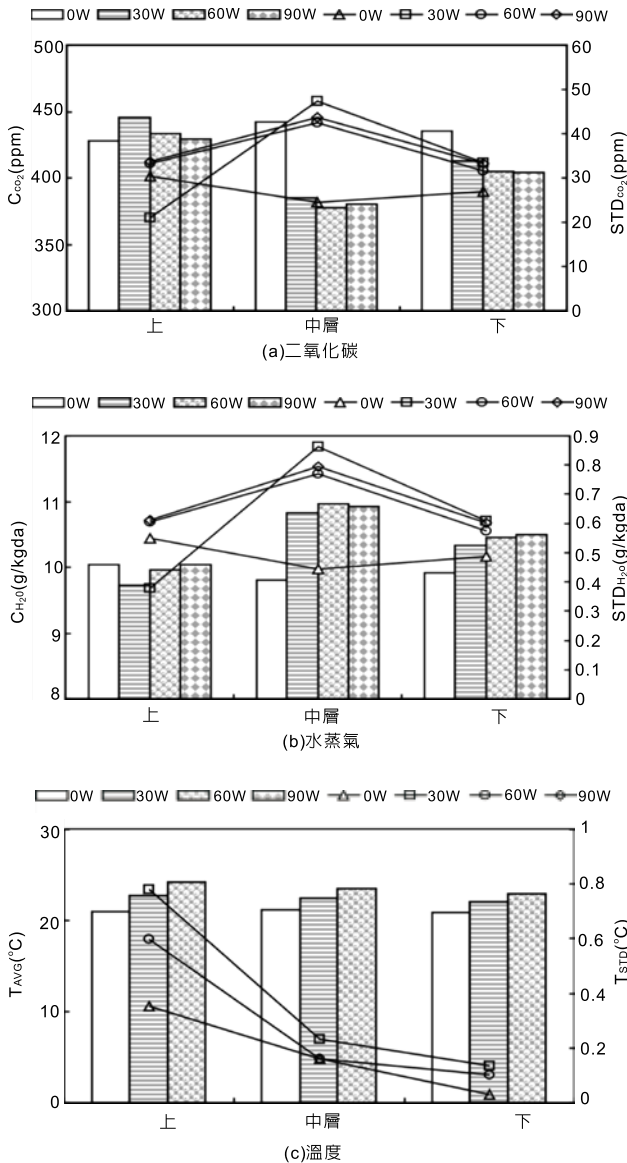


圖4 發熱量對各層二氧化碳及水蒸氣濃度的影響 (長條線為平均值, 折線為標準差)

氣進入中層最不順, 造成中層的二氧化碳濃度均勻度最差。考慮浮力效應後, 中層的二氧化碳平均濃度最低, 不均勻度又最高, 標準差約為平均值的11~12%, 不均勻的情況較嚴重。

圖4(b)中各層的水蒸氣平均濃度(濕度比)中, 以上層最低、中層最高, 與二氧化碳平均濃度的情況

相反。由於空調氣流是高二氧化碳濃度、低濕度比, 在上層有較大的空氣流量, 提供較多的二氧化碳及較大的除濕效果, 因此二氧化碳濃度最高、濕度比最低, 二者呈現相反趨勢, 中、下層情形類似。各層濕度比的標準差與流場有關, 因此各層標準差與二氧化碳相類似, 中層最高。然而, 中層的平均值及標準差都最高, 使得濕度比的不均勻程度沒有二氧化碳嚴重。圖4(c)顯示各層溫度的平均值及標準差, 上層的溫度最高, 因為從光源表面上升的熱空氣與空調氣流衝擊後流向上層表面, 因此上層溫度最高, 中層次之, 下層最低, 即使如此, 由於空調氣流量遠大於上升氣流量, 上、中、下層的平均溫度差異不到1°C。上層有上升熱氣流及空調氣流混雜其上, 因此溫度分佈最不均勻, 標準差最大, 混合以後才到中、下層, 因此中、下層的溫度標準差都很小。

圖5為換氣量對各層二氧化碳及水蒸氣濃度的影響, 長條線為平均值, 折線為標準差。換氣量大代表出風速度高, 從圖5(a)可看出當換氣量加大後, 各層之間的二氧化碳平均濃度差異明顯減小, 每一層的二氧化碳濃度標準差也隨換氣量的增加而減小, 換言之, 整個植栽室內的二氧化碳濃度隨換氣量的增加而趨向均勻。當換氣量增加, 出風口風速也隨之增加, 空調氣流有足夠的動量可以抑制熱浮力對流場的影響, 使流場不會如圖3(c)及(d)那麼混亂, 空調氣流較容易進入中層, 使中間層的二氧化碳平均濃度上

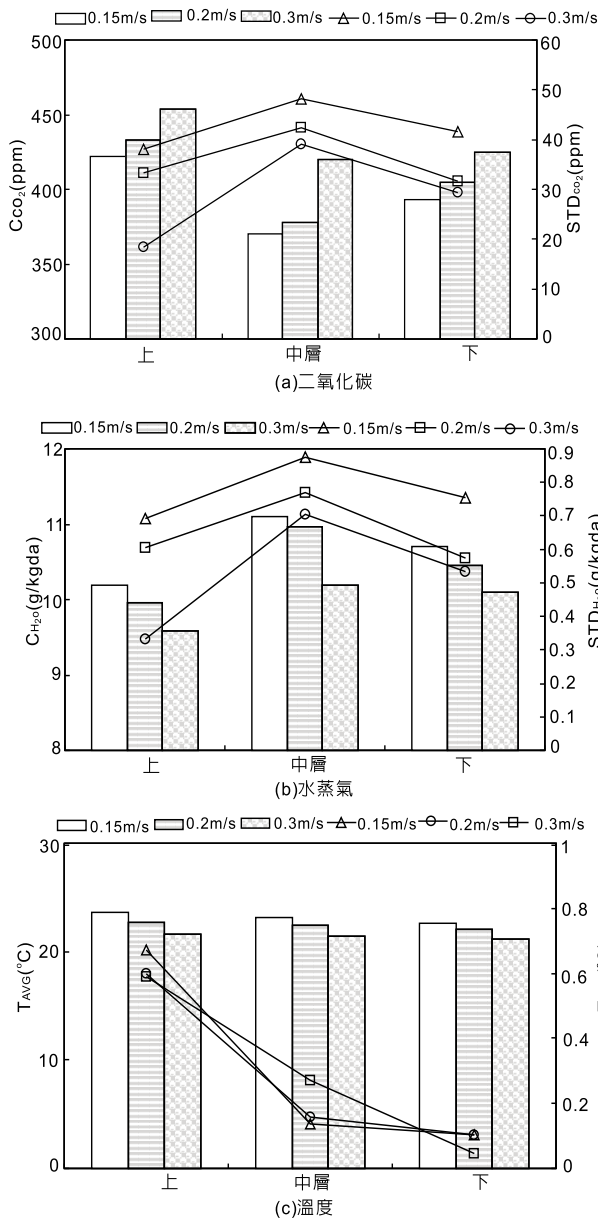


圖5 換氣量對各層二氧化碳及水蒸氣濃度的影響

升，也使中層的二氧化碳濃度分佈較均勻，然中層相對上、下二層，依然是平均值最小及標準差最大的一層。減少換氣量即減小出風速度，對熱浮力的抑制力更弱，濃度場的不均勻情況更嚴重。換氣量

增加同樣的也使濕度比的分佈更均勻，無論是平均濃度或濃度標準差都相同。值得注意的是，由於換氣量增加，除濕效果提升，使各層植物表面的濕度比明顯降低，換算成相對濕度已經不到65%。圖5(c)顯示空調換氣量越大溫度越低，這是可以預期的結果，溫度標準差仍是上層最大。影響溫度最大的參數是前述的光源發熱量及空調換氣量，其餘參數的影響都很小。溫度的均勻度明顯高於二氧化碳及水蒸氣。

植物光合作用越強，其葉面上之二氧化碳濃度越低，本文作者曾經以二氧化碳濃度偵測儀量測夏天中午草坪上之二氧化碳濃度，其數值約在100ppm附近，因此以100ppm為參考值，0ppm表示比草的光合作用更強烈許多倍的植物，相對的，200ppm表示光合作用較草為弱的植物。圖6為植物光合作用強度對各層二氧化碳濃度的影響，圖中顯示栽種光合作用越強的植物，層與層之間的二氧化碳平均濃度差異越大，各層的二氧化碳濃度標準差也上升。植物表面的二氧化碳濃度愈低，吸收二氧化碳的能力愈強，各層的二氧化碳平均濃度也愈低，也因為吸收二氧化碳的能力強，二氧化碳補充較不足的地方(如中層)的濃度會更低，造成層與層間二氧化碳平均濃度的差異增大。光合作用強的植物會使「空氣齡」較大的區域二氧化碳濃度特別低，造成濃度標準差的增大。低平均濃度加上高標準差，光合作用強的植物會強化二氧化碳濃度的不均勻程度。

圖7為植栽層數對二氧化碳及濕

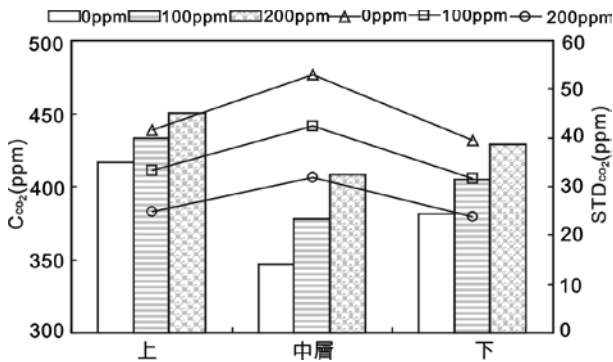
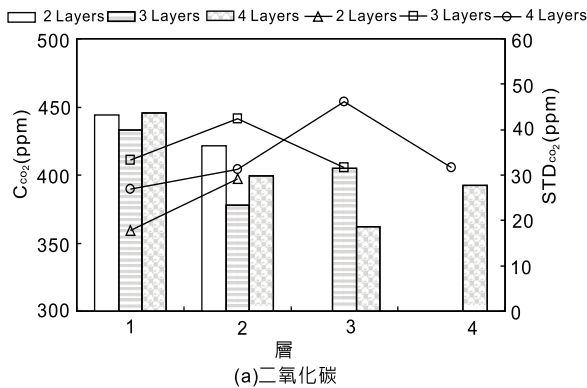
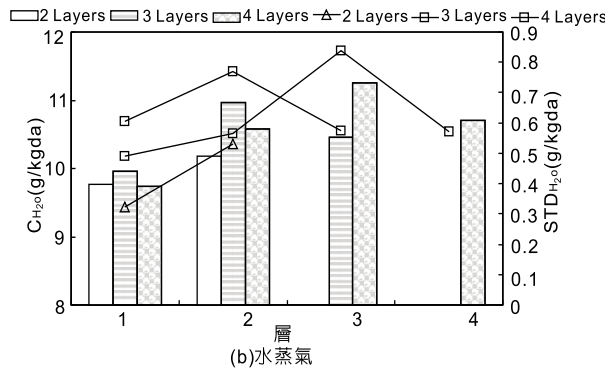


圖6 植物光合作用強度對各層二氧化碳濃度的影響



(a)二氧化碳



(b)水蒸氣

圖7 植栽層數對各層二氧化碳及水蒸氣濃度的影響

度比的影響，圖中橫座標的第1層，代表最上層，數字越大表示越下面的層。植栽層數越多表示植栽室的農穫越多，二氧化碳的消耗量也越大，因此圖7(a)顯示四層植栽的二氧化碳平均濃度整體而言

較低，層與層之間的二氧化碳平均濃度差異也較大。主要是層數越多流場越複雜，各層回風量的差異也越大。在四層植栽中，第3層的二氧化碳平均濃度最低，因為空調氣流最不容易進入第3層，第3層的標準差也最高，低平均數加上高標準差，第3層的不均勻程度最高。濕度比標準差的變化情形與二氧化碳相同，但平均值的情形則與二氧化碳相反，四層植栽中，第3層的濕度比標準差與濕度比的平均值都最高，因此不均勻程度不如二氧化碳嚴重。

圖8為出風口二氧化碳濃度對各層二氧化碳濃度的影響，植物在生長期的某些時候需要高濃度的二氧化碳以利生長。圖8顯示出風口高二氧化碳濃度對二氧化碳濃度的均勻性是負面效應，不但層與層之間二氧化碳平均濃度的差異增大，標準差與平均值的比值也增大。由於濃度差越大，植物對二氧化碳的吸收率越大，空氣齡較大的區域，二氧化碳補充的較慢，使二氧化碳濃度有較大的降幅，不均勻的情況惡化。

## 結語

本研究以CFD計算立體植栽室內各生長條件的數值，探討這些生長條件在各層的平均值及標準差，計算的結果經分析與探討後，得到以下結論：

1. 空調氣流受熱浮力效應影響而轉向，造成各層回風量有明顯差異。
2. 光源發熱量在 $60W/m^2$ 以下，二氧化碳及濕度比的均勻度隨發熱量的增



加而減小， $60\text{W}/\text{m}^2$ 以上時，均勻度不隨發熱量的增加有明顯的改變。

3. 換氣量越大，二氧化碳及濕度比的均勻度越高。
4. 植栽層數越多，二氧化碳及濕度比的均勻度越低。
5. 光合作用較強的植物及較高的二氧化碳出風濃度，均使二氧化碳濃度的均勻度降低。
6. 室內植栽的生長條件中，二氧化碳濃度的不均勻度最高，濕度比次之，溫度最均勻。❶

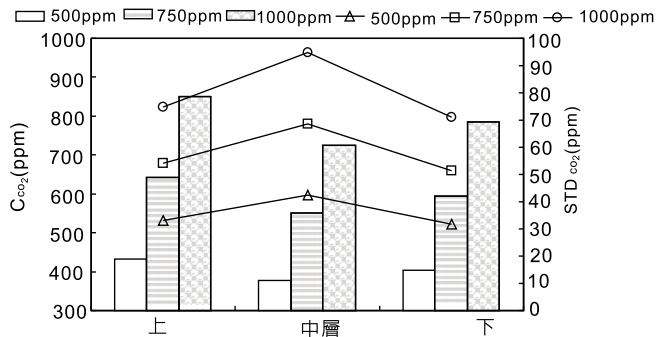


圖8 出風口二氧化碳濃度對各層二氧化碳濃度的影響

## 參考資料

- [1] 連啓超，「建構試驗性室內植栽及複合養殖之環境模擬與測試」，國立勤益科技大學，2008。
- [2] 許守平、駱文傑、黃建民、吳友烈、余嘉閔、張弘昇，「以植栽方式淨化室內空氣品質之模擬分析」，中華民國冷凍空調技師公會全國聯合會期刊，30-37，2009。
- [3] 郭博文，「植栽改善空氣中二氧化碳濃度之研究」，環境與生態學報，53-64，2009。
- [4] J. Liu, J. M. Chen, T. A. Black and M. D. Novak, "E-ε Modeling of turbulent air flow downwind of a model forest edge", Boundary-Layer Meteorology, 77, 21-44, 1996.
- [5] K. Takahashi, H. Yoshida, Y. Tanaka, N. Aotake, and F. Wang, "Measurement of thermal environment in Kyoto city and its prediction by CFD simulation", Energy and Buildings, 36, 771-779, 2004.
- [6] M. Robitu, M. Musy, C. Inard, and D. Groleau, "Modeling the influence of vegetation and water pond on urban microclimate", Solar Energy, 80, 435-447, 2006.
- [7] 沈俊宏，「高功率LED散熱模組之專利分析與熱傳導模擬」，和春技術學院，2008。
- [8] 呂宗蔚，「高亮度LED散熱系統之熱傳及效益研究」，國立成功大學，2007。
- [9] 蔡淳瑩，「國蘭栽培介質及肥培管理技術」，29:2-4，1999。

作者

黃建民、許守平、李金學/國立勤益科技大學 冷凍空調與能源系