

第二十屆旺宏科學獎

成果報告書

參賽編號：SA20-638

作品名稱：去去「臭氧」走-BVOC 影響臭氧濃度效能之探討及應用

姓名：蔣宗翰

關鍵字：BVOC、臭氧、防蚊樹

摘要

過往許多研究都顯示揮發性有機物(volatile organic compounds, VOC)為臭氧之前驅物，會與氮氧化物(NO_x)經一連串光化反應而形成臭氧產生危害，但我們在觀察了 EKMA 模式的臭氧敏感性關係圖後，發現在某個條件下 BVOC 會抑制臭氧。本研究主要探討 BVOC 消除臭氧之效能，先透過改變防蚊樹的環境因子，包括日照、半日照、一般亮環境、暗室，利用留縫實驗箱觀察其 BVOC 濃度變化與氣溫、光照強度及 CO₂ 濃度之關係。結果符合文獻分析中異戊二烯及單萜類的釋出速率與溫度及 PAR 呈正相關，植物在全日照時及溫度增加幅度較大的情況下，BVOC 濃度變化較大。接著討論防蚊樹產生 BVOC 影響臭氧濃度之效能，利用抽風實驗箱，透過不同的環境條件與空箱時臭氧濃度之間的比較，驗證 BVOC 在有大量濃度的情況下確實具有消除臭氧之效能，並且會受光照的影響。最後探討其他景觀植物是否也具有消除臭氧之效能，選擇迷迭香、虎尾蘭來做探討，三種不同植物的比較以防蚊樹消臭氧的效能最佳，而虎尾蘭則不具消除臭氧之效能。如果未來能夠在都市各個角落設置如抽風實驗箱的裝置，利用植物天然的特性，以降低臭氧污染的危害，又具有綠化與美觀的效果。

壹、研究動機

某天太陽下山後夜幕低垂，但夜空怎麼不是黑的，在網路上找到這是因為空氣中包含許多微小懸浮顆粒反射光線，使夜空顏色詭譎，由於這些空氣污染物為煙霧態，稱之為「光化學霧(Photochemical smog)」。在探討其如何反應生成的過程中，我在網路上找到了 EKMA 模式，發現在某個特定條件下當 VOC 濃度遠大於氮氧化物濃度時，臭氧會無法累積。因此假設在此條件下臭氧濃度會下降，在恆溫箱裡先試試噴天然的精油，發現箱內臭氧濃度快速降為 0，這個實驗結果啟發了我的靈感，設想試著去利用天然植物所釋放的 BVOC 也許能消除空氣污染物之一的臭氧，故設計了一系列的實驗來驗證。

貳、研究目的

- 一、了解防蚊樹受光照影響 BVOC 濃度的變化。
- 二、探討不同條件下防蚊樹產生 BVOC 影響臭氧濃度的變化。
- 三、檢驗一般常見景觀植物影響臭氧濃度之效能。

參、研究設備與器材

一、研究器材

硬體

- (一) 電腦
- (二) 防蚊樹
- (三) 迷迭香
- (四) 虎尾蘭
- (五) 壓克力製留縫實驗箱
- (六) 壓克力製抽風實驗箱

- (七) Arduino UNO Rev 3 開發板
- (八) Base Shield V2 Grove Arduino 感測器擴充板
- (九) Data Logging shield 資料記錄器模組 (十) SD 卡
- (十一) Gravity : CCS811 空氣品質感測器
- (十二) Grove - SHT31 高精度溫濕度感測器
- (十三) Grove Sunlight Sensor 多通道數字型陽光感測器
- (十四) 2W 5.5V 單晶矽太陽能電池板
- (十五) 太陽能電源管理控制板 Solar Power Manager 5V
- (十六) 3.7V 2000mAh 聚合物鋰電池
- (十七) MQ-131 O₃ 臭氧氣體感測模組 (十八) 臭氧機
- (十九) 紫外線燈(波長 254nm)

* Data Logging shield：專門設計支援 Arduino 的數據記錄功能擴展板，將數據保存到任何 FAT16 或 FAT32 格式的 SD 卡上的文件，以供任何繪圖，電子表格或分析程序讀取。隨附的 RTC（實時時鐘）可以用來對當前時間的所有數據進行時間戳記。

* CCS811 空氣品質感測器：能測量 eCO₂ 和 TVOC 濃度，內部集成 ADC 和 MCU，可以對資料進行採集、計算，並且通過 IIC 返回資料。CCS811 支援多種模式：每 1 秒、10 秒、1 分鐘、250 毫秒測量一次以及休眠模式，這些模式在感測器測量期間進行了低功耗優化，因此 CCS811 適用於可攜式應用。

* SHT31 高精度溫濕度感測器：是一款高度準確，能夠快速響應和非常集成的溫濕度傳感器。該模塊的標準精度可以是±2%RH（相對濕度）和±0.3°C（對於溫度）。

* Grove Sunlight Sensor：是一種多通道數字光傳感器，具有檢測紫外線，可見光和紅外光的能力。

* MQ-131 臭氧感測器：其所使用的氣敏材料是在清潔空氣中電導率較低的三氧化鎢(WO₃)。當感測器所處環境中存在臭氧時，感測器的電導率隨空氣中臭氧氣體濃度的增加而減小。本模組使用簡單的電路將電導率的變化轉換為與該氣體濃度相對應的電壓信號進行輸出。

軟體

- (一) Arduino 1.6.7
- (二) Microsoft Excel

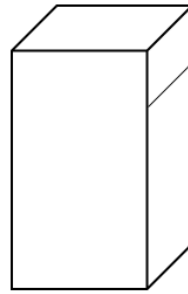
二、研究裝置

(一) 壓克力製留縫實驗箱

為了利用 CCS811 空氣品質感測器偵測防蚊樹的 BVOC 濃度，防蚊樹必須置於密閉的空間中，BVOC 才不會因空氣流動而流失。另一方面，為了測得 BVOC 濃度與真實環境溫度之關係，需使箱內溫室效應對植物及氣溫的影響降低，將密閉空間露出些微縫隙，製造細微的空氣對流，縫隙不能太大而影響到 BVOC 的收集。我設計了一個壓克力製實驗裝置箱(35cm*35cm*60cm)，其中一側留有縫隙(35cm*10cm)，與環境相通。如下圖一(a)(b)所示。



圖一(a) 實驗裝置箱



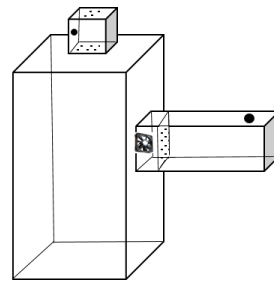
圖一(b) 內部透視示意圖

(二) 壓克力抽風實驗箱

為了實驗 BVOC 與臭氧之關係，我們設計一個壓克力製實驗裝置箱(30cm*30cm*50cm)，並安裝一個風扇在實驗箱側面，風速維持固定(約 0.75m/s)，將臭氧送進實驗箱裡，在輸入口及輸出口留小孔以便安裝 MQ-131 O₃ sensor 偵測臭氧濃度變化。如下圖二(a)(b)所示。



圖二(a) 實驗裝置箱



圖二(b) 內部透視示意圖

肆、研究方法與過程

一、文獻探討

(一) BVOCs 介紹

1、何謂 BVOCs?

VOCs (volatile organic compounds) 是各種人類活動和生物代謝釋放到大氣中的有機揮發化合物的總稱，而由生物代謝所釋放的 VOCs

稱為生物源揮發性有機化合物(Biological volatile organic compounds, BVOCs)，屬於植物生長過程中的二次代謝物 (Secondary metabolites)。經由植物體內精密複雜的生合成反應，產生多樣的 BVOCs，以吸引昆蟲、動物採食果實以幫助授粉、傳遞種子，並可作為植物天然的殺蟲劑及殺菌劑，幫助植物應付逆境、抵抗外來的侵襲及適應生長環境，BVOCs 更是大氣中活性碳氫化合物 (reactive hydrocarbons) 的主要來源。這些芳香氣息儲存於木材內部，因成分的高揮發性、低沸點而由材面自然釋出。

2、 主要成分

BVOCs 之成分包括甲烷、異戊二烯、單萜類、倍半萜類、醋酸鹽類、醛類、酮類、醚類、酯類、烯類、芳香族、鏈烷烴類、醇類等十二類，不同樹種所測得之 BVOCs 成分亦有所不同。

其中，揮發性萜類 (Terpenoids) 化合物的釋放量占了 BVOCs 的一半以上，萜類化合物是由異戊二烯 (Isoprene) 為構成單元而組成，根據異戊二烯個數的不同又可區分為單萜類 (Monoterpenes)、倍半萜類 (Sesquiterpenes)、二萜類 (Diterpenes) …等，異戊二烯、單萜類及倍半萜類具有高度揮發性，為林木之主要揮發性物質，亦是構成森林中芬多精 (Phytoncides) 的主要物質，在大氣中之活性極強，被視為重要的光化學煙霧前驅物。

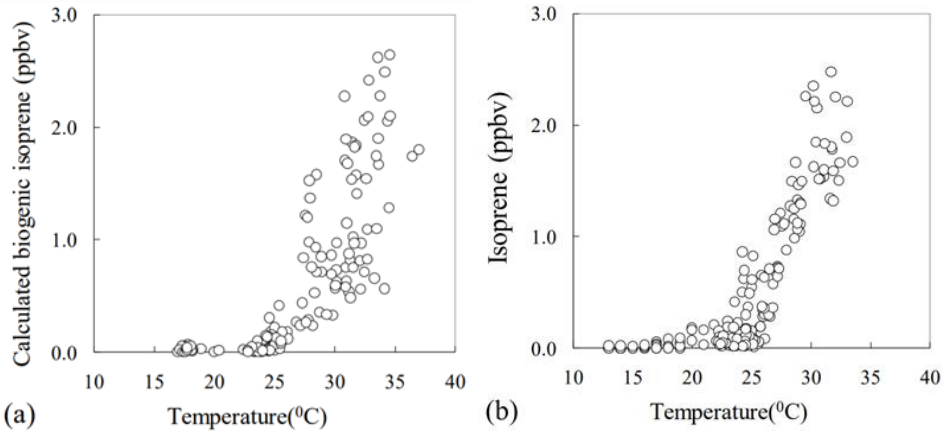
3、 環境因子

植物排放 BVOCs 之速率受到許多環境因子影響，如溫度、Photosynthetically active radiation (PAR)、大氣中 CO₂ 及 O₃ 濃度、相對濕度…等，其中，因受溫度及 PAR 的影響較為顯著，目前大部分研究多以溫度及 PAR 控制植物生長環境，且異戊二烯及單萜類的釋出速率與溫度及 PAR 呈正相關。植物所排放之 Isoprene 是在植物葉綠素中經由 methyl-erythritol 4-phosphate pathway (MEP pathway, 也可稱為 non-mevalonate pathway) 過程被製造，其生合成速率和光合作用有關，因此會影響光合作用速率的主要環境因素也會影響異戊二烯的釋放量，如溫度、光照強度及 CO₂ 濃度。

(1) 溫度

溫度為影響異戊二烯釋出的重要因素，異戊二烯的釋出對於溫度十分敏感，植物釋出異戊二烯，用來幫助植物抵抗高溫，使其在一定範圍內保護光合作用免於高溫的危害。許多植物圍封及頂篷通量實驗 (enclosure measurement, above-canopy flux measurement) 顯示當葉面溫度在 30°C 內時，植物 isoprene 逸散量會隨葉溫而指數性增加，葉

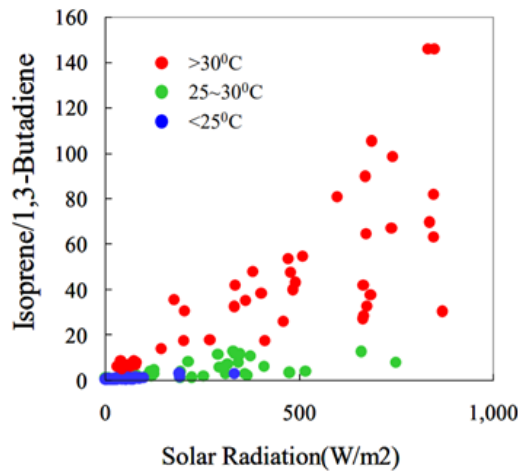
面溫度升高 10°C 後，短時間內異戊二烯的釋出量也會增加，增加量隨著樹種有所不同。光合作用速率對於溫度變化也有著靈敏的反應，當氣溫達 35°C 以上(最大排放約在 35~40°C)，植物會釋放出大量的異戊二烯和一種單一芬多精，同時促進臭氧的產生，當溫度上升達約 44°C 後，光合作用速率及 isoprene 排放率會急遽下降，甚至停止，此時葉片已遭受不可還原的破壞。



圖三 白天 isoprene 之植物排放與溫度之關聯性
(a)台北都會區(b)郊區生物源區(取自參考資料四)

(2) PAR (波段：400~700 nm)

植物所釋出的 isoprene 由光合作用而來，因此光對 isoprene 釋出量的影響很重要。當光照停止時，isoprene 排放也快速降至幾乎為零。當環境中輻射量越大，則越有利於植物行光合作用，isoprene 來自於植物的釋出量就會增高。一天當中，又以中午時段排放量較大。任何樹種排放之 isoprene 皆會受光影響而排放。從圖四中可得知當溫度小於 25°C 時，儘管太陽輻射量增加，而 isoprene 來自於植物排放的比例幾無增加。



圖四 台北都會區白天 isoprene/1,3-butadiene 比值與太陽輻射通量及溫度關聯圖(取自參考資料四)

(3) CO₂ 濃度

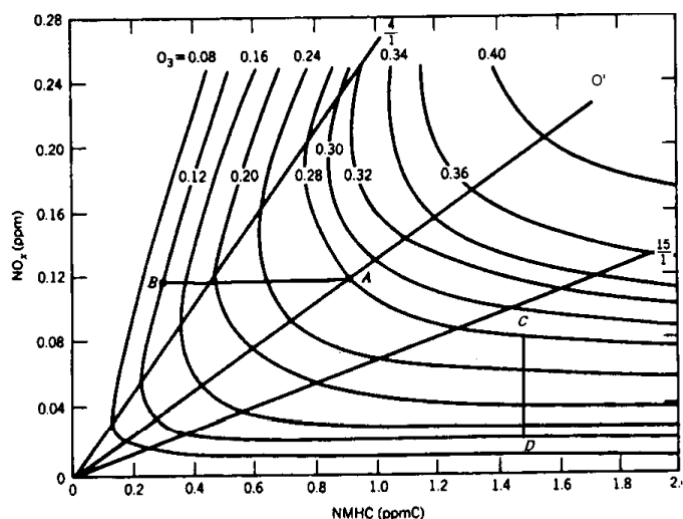
CO₂ 濃度過高或過低皆會影響異戊二烯的產生，異戊二烯之排放率只對低濃度(<100ppm)與高濃度(>600ppm)CO₂有較明顯的反應變化，此外亦與植物種類、生長環境等因素有關。

(二) 光化學煙霧 (Photochemical smog)

光化學煙霧是由氮氧化物與碳氫化合物，在強烈之太陽輻射下，產生一系列之光化學反應而形成的，屬於空氣污染裡的二次污染現象，此煙霧具有高度氧化力。主要的成分包括臭氧、醛類與過氧硝酸乙醯 (peroxyacetyl nitrate, PAN) 等，隨著污染源的不同，光化學煙霧的組成也會因地有所不同。其特點是經常發生在夏天，溫度相對高、大氣沒有強烈的對流、日光照射強、低濕度的情況下，集中在上午 10 點到下午 5 點期間，晚上就會消失。

(三) EKMA (Empirical Kinetic Modeling Approach)

EKMA 模式用來模擬都市附近地區 O₃ 形成的過程。針對各種不同的 VOCs/NO_x 濃度比值來模擬，如圖五所示。因此在早期 EKMA 模式所模擬繪製之最大 O₃ 等濃度線圖常用來發展 VOCs 和 NO_x 排放的管制策略，研擬都會地區達到國家空氣品質標準，所必須達成的 VOCs 和 NO_x 減量百分比。



圖五 臭氧敏感性示意圖(取自參考資料七)

圖中之 O₃ 等濃度線為在不同之 NO_x 與 VOC 的起始濃度時可生成之最大濃度。圖中右下方，亦即 VOC/NO_x 比值大於 15 時，因生成的 O₃ 易與烯烴類反應消耗、NO₂ 會與多餘的自由基反應、自由基間相互反應等因素，導致臭氧無法累積。

- 1、生成的 O_3 易與烯烴類反應消耗

$$O_3 + RH \rightarrow RCHO + RO \cdot + HCO \cdot$$
- 2、 NO_2 會與多餘的自由基反應

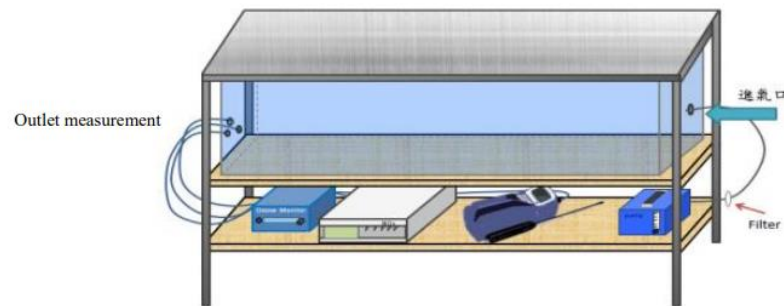
$$RO \cdot + O_2 \rightarrow HO_2 \cdot + RCHO$$

$$HO_2 \cdot + NO \rightarrow NO_2 + OH \cdot$$

$$OH \cdot + NO_2 \rightarrow HONO_2$$

(四) 實驗箱發想參考裝置

戶外可移動型光化學煙霧室(Outdoor Mobile Chamber)為研究大氣 VOCs 氧化作用形成新氣膠(New particle Formation, NPF)與氣態反應產物，於實際環境下應用戶外光化學煙霧探討臭氧與 SOA 之生成機制。如圖六所示。



圖六 戶外可移動型煙霧室(取自參考資料九)

二、實驗設計

實驗一、了解防蚊樹受光照影響 BVOC 濃度的變化

(一) 植物簡介：

防蚊樹(學名：*Pelargonium graveolens* L'Herit.)：屬於牻牛兒科(Geraniaceae)，有特殊且濃郁的香味，包含許多的植物化學成分物質，以香葉醇(geraniol)為主，尚含有肉桂(cinnamon)、香茅醇(citronellol)、沉香醇(linalool)及橙花醇(neral)等。

(二) 變因探討：

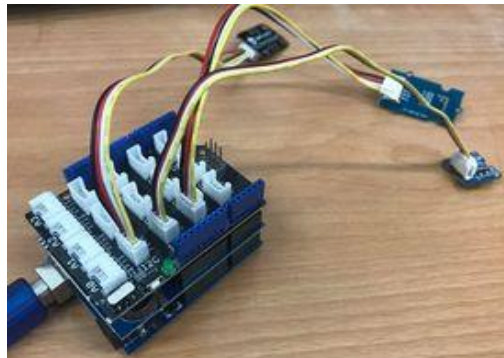
為了對 BVOC 濃度的日變化情形有更多的了解，並且從中知道其濃度上升及下降的變化，同時又受到甚麼因素影響而產生變化。在開始進行研究前，我們先藉由觀察一日裡防蚊樹 BVOC 濃度的升降變化情形，並且對於 BVOC 濃度的變化趨勢做分析，驗證其與文獻中變因的相關性，進而得出影響 BVOC 濃度升降的機制。

整個系列的實驗，考慮的因素包括：

- 1、氣溫變化對 BVOC 濃度的影響。
- 2、光照強度變化對 BVOC 濃度的影響。
- 3、CO₂ 濃度變化對 BVOC 濃度的影響。

(三) 實驗方法：

- 1、將防蚊樹放置在實驗箱一裡，利用 CCS811 空氣品質感測器將一日的 BVOC 及 CO₂ 濃度變化紀錄下來。
- 2、在測量之前需先將 CCS811 空氣品質感測器放置在空氣新鮮的環境中（20 分鐘或更長時間），並在 Arduino 控制平台輸入程式碼以獲得 Baseline。之後使用時就能透過輸入 Baseline 來快速顯示傳感器預熱後的空氣質量。否則，在污染空氣中啟動時，需要很長時間才能正確讀取。
- 3、架設 SHT31 高精度溫濕度感測器及 Grove Sunlight Sensor 在實驗箱一測量氣溫、光照強度的變化。我透過 Base Shield V2 將感測器整合在一塊 Arduino UNO 板上，並加裝 Data Logging shield(如圖七(a))，利用太陽能板供電。如此就能在無網路的環境下將資料記錄，不同於之前使用的 Webduino 受限於網路狀態，而利用太陽能板供電則能避免以往行動電源整天測量下來過熱的情況。



圖七(a)

- 4、在 Arduino 控制平台輸入程式碼並設定 SD 卡儲存路徑及測量時間間隔（如下圖所示），自動記錄觀測資料。

```

61 // create a new file
62 char filename[] = "LOGGER00.CSV";
63 for (uint8_t i = 0; i < 100; i++) {
64     filename[6] = i/10 + '0';
65     filename[7] = i%10 + '0';
66     if (!SD.exists(filename)) {
67         // only open a new file if it doesn't exist
68         logfile = SD.open(filename, FILE_WRITE);
69         break; // leave the loop!
70     }

```

圖七(b)每次運作時在 SD 卡建立一個新的 CSV 檔

```

89 logfile.println("millis,datetime,TWOC,CO2,Vis,IR,UV,Temp,Hum");

```

圖七(c)在 CSV 檔裡最上列寫入項目名稱

```

152 logfile.print(", ");
153 logfile.print(CCS811.getTWOCPPB());
154 logfile.print(", ");
155 logfile.print(CCS811.getCO2PPM());
156 logfile.print(", ");
157 logfile.print(SI1145.ReadVisible());
158 logfile.print(", ");
159 logfile.print(SI1145.ReadIR());
160 logfile.print(", ");
161 logfile.print((float)SI1145.ReadUV()/100);
162 logfile.print(", ");
163 logfile.print(temp);
164 logfile.print(", ");
165 logfile.print(hum);

```

圖七(d)寫入測量資料

```

197 CCS811.writeBaseLine(0xAAAA);
198 //delay cannot be less than measurement cycle
199 delay(1000);

```

圖七(e)輸入 Baseline 於 AAAA 處，並設置時間間隔

為求測得詳細的觀測紀錄，我們設定測量時間間隔為 2 秒 1 筆。實驗一的觀測時間為上午 9 點到下午 3 點，則累積約 10800 筆資料紀錄，有效地表現出觀測時間內氣溫及光照強度變化的特性。

4、取四個不同地點的數據後(如表 1-0 所示)，將每 10 分鐘內數據取一個平均，畫出 BVOC 濃度、氣溫、光照強度和 CO₂ 濃度的日變化圖並觀察其圖形。

表 1-0 各種實驗地點

| 地點一 | 地點二 | 地點三 | 地點四 |
|---------|---------|------------|--------|
| 頂樓(全日照) | 走廊(半日照) | 房間(亮, 開冷氣) | 小房間(暗) |

5、計算出 BVOC 濃度與氣溫、光照強度和 CO₂ 濃度的相關係數，並將圖繪製出來。

實驗二、探討不同條件下防蚊樹產生 BVOC 影響臭氧濃度的變化

(一) 變因探討：

整個系列的實驗，考慮的因素包括：

- 1、防蚊樹對臭氧濃度的影響。
- 2、陽光照射對防蚊樹消除臭氧的影響。
- 3、紫外線對防蚊樹消除臭氧的影響。

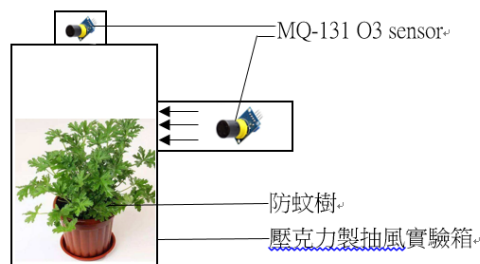
各種實驗組合如下表所示：

| 項目 | 對照組 | 實驗二-1 | 實驗二-2 | 實驗二-3 |
|-----|-----|-------|-------|-------|
| 臭氧機 | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 防蚊樹 | X | ○ | ○ | ○ |
| 半日照 | X | ○ | X | X |
| 暗室 | X | X | ○ | ○ |
| 紫外燈 | X | X | X | ○ |

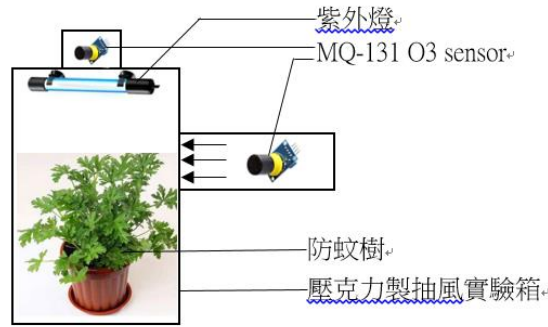
(二) O_3 可經光化反應而消失： $O_3 + h\nu (\lambda < 320 \text{ nm}) \longrightarrow O(1D) + O_2$ 。植物源排放的萜烯類(terpene)及異戊二烯(isoprene) 和人為源排放的芳香族(aromatic hydrocarbons)、含羰基(carbonyl)的醛、酮類以及少量烯、烷、炔類等。這些物種經光氧化等多次反應後形成較極性且低揮發的半揮發物質，這些成分會進行氣-固相分配(gas-particle partition)至大氣中既存的微粒上或融入微粒上所含的水中而產生所謂的二次有機氣膠(Secondary Organic Aerosols, SOA)，或經由凝結(condensation)及膠凝(coagulation)作用，使這些低飽和蒸汽壓的氣體凝結成細小有機微粒。本實驗二-3 即為了驗證防蚊樹照紫外光時是否可能加速臭氧的消耗或者生成 SOA 影響到 BVOC 消除臭氧的效能。

(三) 實驗方法：

- 1、在實驗箱二裡放置防蚊樹盆栽，啟動臭氧機，利用風扇將臭氧送進實驗箱裡，實驗箱的輸入口以及輸出口各安裝 MQ-131 O_3 sensor (如圖八(a)所示)。

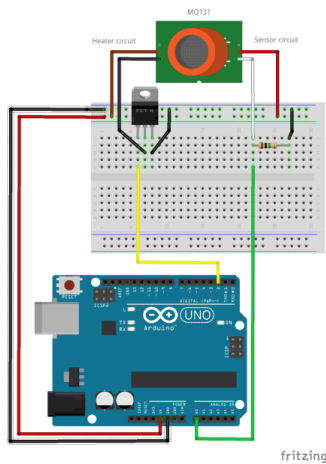


圖八(a) 實驗裝置示意圖



圖八(b) 模擬照紫外光時裝置示意圖

- 2、在 Arduino 控制平台設定好程式碼 (如圖八(c)(d)所示)，分別測出實驗箱輸入以及輸出的臭氧濃度，由 MQ-131 O3 sensor 在電腦上顯示的數值做判斷，取濃度較穩定時作為紀錄。



圖八(c)連接 MQ-131 與控制板

```

#include <MQ131.h>

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  // Init the sensor
  // - Heater control on pin 2
  // - Sensor reading read on pin A0
  // - Model LUP_CONCENTRATION
  // - Load resistance RL of 10kOhm (100000 Ohm)
  MQ131.begin(A0, LUP_CONCENTRATION, 100000);
  Serial.println("Calibration in progress...");
  MQ131.calibrate();
  Serial.println("Calibration done!");
  Serial.println("ID = ");
  Serial.println(MQ131.getID());
  Serial.println("O3 = ");
  Serial.println(MQ131.getO3());
  Serial.println("Time to heat = ");
  Serial.println(MQ131.getTimeToHeat());
  Serial.println(" ");
}

void loop() {
  Serial.println("Sampling...");
  MQ131.sample();
  Serial.println("Concentration O3 : ");
  Serial.println(MQ131.getO3(PPM));
  Serial.println(" ppm");
  Serial.println("Concentration O3 : ");
  Serial.println(MQ131.getO3(PPM));
  Serial.println(" ppm");
  Serial.println("Concentration O3 : ");
  Serial.println(MQ131.getO3(MG_M3));
  Serial.println(" mg/M3");
  Serial.println("Concentration O3 : ");
}

```

圖八(d)在 Arduino 控制平台打上程式碼

實驗三、檢驗一般常見景觀植物影響臭氧濃度之效能

檢測完防蚊樹影響臭氧濃度的效能後，我們接著去尋找是否有其他的景觀植物也具有消除臭氧的能力，本實驗採用迷迭香及虎尾蘭兩種植物。

(一) 植物簡介

1、迷迭香 (學名：*Rosmarinus officinalis*):

屬於唇形科(Lamiaceae)迷迭香屬(*Rosmarinus*)之多年生常綠小灌木植物，全株葉片分泌具粘性之精油，有特殊且濃郁的香味，包含許多的植物化學成分物質，包括迷迭香酸(Rosmarinic acid)、樟腦(Camphor)、咖啡酸(Caffeic acid)、熊果酸(Ursolic acid)、樺木酸(Betulinic acid)，和抗氧化劑鼠尾草酸(Carnosic acid)和鼠尾草酚(Carnosol)。

2、虎尾蘭(學名：*Sansevieria trifasciata*)：

屬天門冬目(Asparagales)天門冬科(Asparagaceae)的植物，被稱為天然的「空氣淨化器」，可淨化空氣中的有害氣體(如苯、甲醛、三氯乙烯、二甲苯和甲苯等)以及重金屬微粒，夜晚時吸受二氧化碳轉化為氧氣。

(二) 變因探討：

各種實驗組合如下表所示：

| 項目 | 實驗二-1 | 實驗三-1 | 實驗三-2 |
|-----|-------|-------|-------|
| 臭氧機 | ○ | ○ | ○ |
| 半日照 | ○ | ○ | ○ |
| 防蚊樹 | ○ | X | X |
| 迷迭香 | X | ○ | X |
| 虎尾蘭 | X | X | ○ |

伍、研究結果

實驗一、了解 BVOC 受光照影響的濃度變化關係

一、地點一(全日照，頂樓)

(一) 實驗數據分析

根據感測器測量之實驗數據結果，做出逐時變化圖(如下各圖所示)。

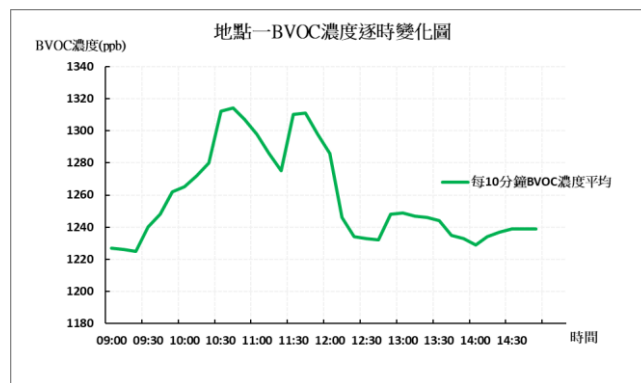


圖 1 地點一 BVOC 濃度逐時變化散佈圖

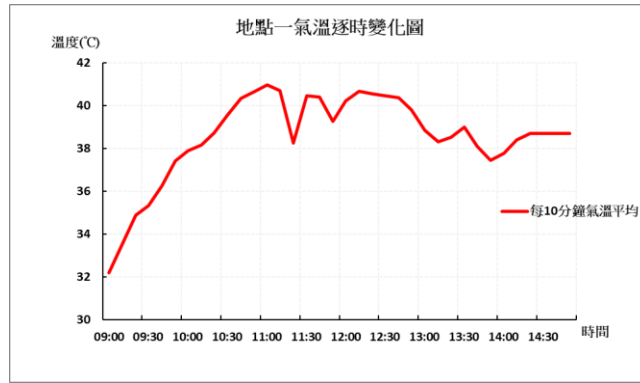


圖 2 地點一氣溫逐時變化圖

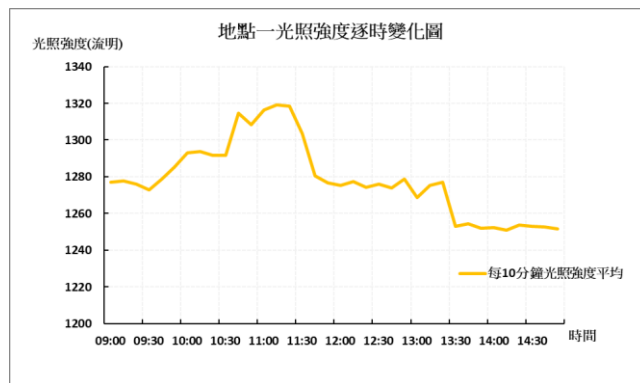


圖 3 地點一光照強度逐時變化圖

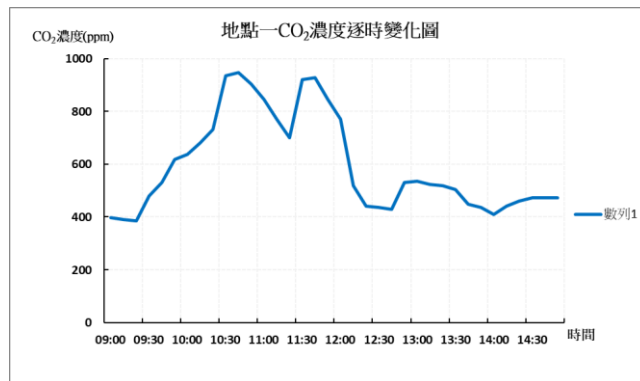


圖 4 地點一 CO₂ 濃度逐時變化圖

(二) 觀察與討論

- 1、可看出 BVOC 濃度並不是穩定的，在 10：30~11：00 及 11：30~12：00 之間各達到最大濃度。
- 2、氣溫大約在 11：00~12：30 達到最大值，中途有 2 段時間驟降，之後慢慢回穩，並且逐漸降溫，最後穩定在 38°C 左右。
- 3、光照強度大約在 11：00~11：30 達到最大值，之後逐漸下降。
- 4、CO₂ 濃度變化趨勢與 BVOC 濃度變化趨勢相似。

將 BVOC 濃度與另外三種數據加以分析，做出了散佈圖(如下各圖所示)。

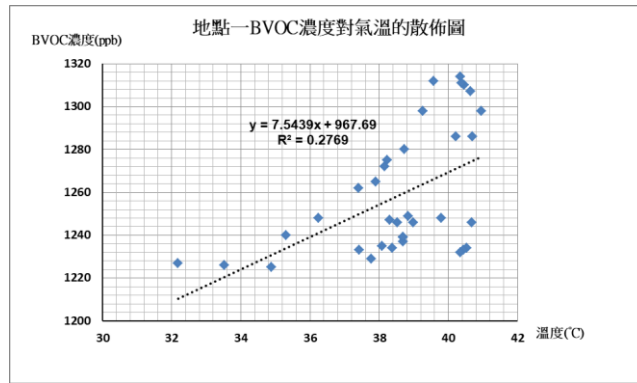


圖 5 地點一 BVOC 濃度對氣溫的散佈圖

線性趨勢線公式： $y = 7.5439x + 967.69$ ，相關係數：**0.526253**

由圖 5 可以看出 BVOC 濃度與氣溫呈中度正相關，代表氣溫越高，BVOC 濃度越高。

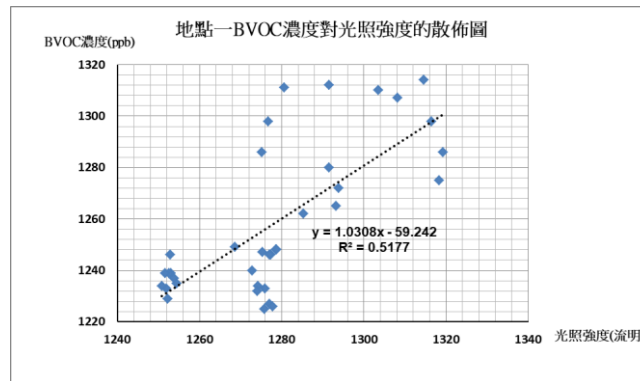


圖 6 地點一 BVOC 濃度對光照強度的散佈圖

線性趨勢線公式： $y = 1.0308x - 59.242$ ，相關係數：**0.719489**

由圖 6 可以看出 BVOC 濃度與光照強度呈高度正相關，代表光照強度越高，BVOC 濃度越高。

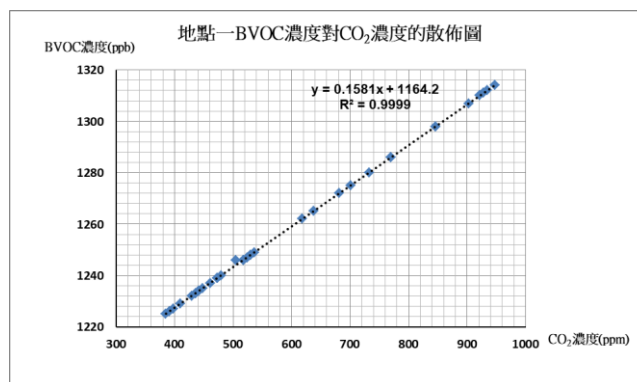


圖 7 地點一 BVOC 濃度對 CO₂ 濃度的散佈圖

線性趨勢線公式： $y = 0.1581x + 1164.2$ ，相關係數：**0.999936**

由圖 7 可以看出 BVOC 濃度與 CO₂ 濃度呈高度正相關，甚至其相關係數接近 1，代表 CO₂ 濃度越高，BVOC 濃度越高。

二、地點二(半日照, 走廊)

(一) 實驗數據分析

1、根據感測器測量之實驗數據結果，做出逐時變化圖(如下各圖所示)。

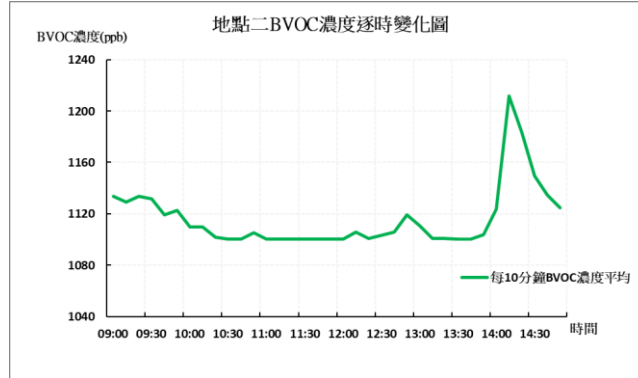


圖 8 地點二 BVOC 濃度逐時變化圖

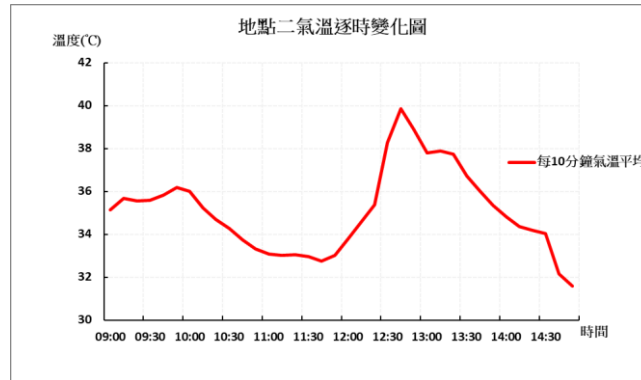


圖 9 地點二氣溫逐時變化圖

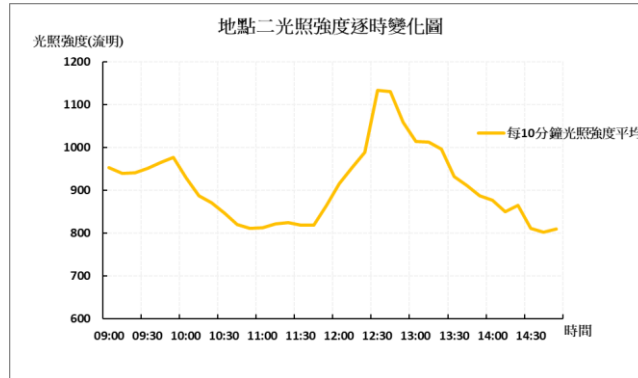


圖 10 地點二光照強度逐時變化圖

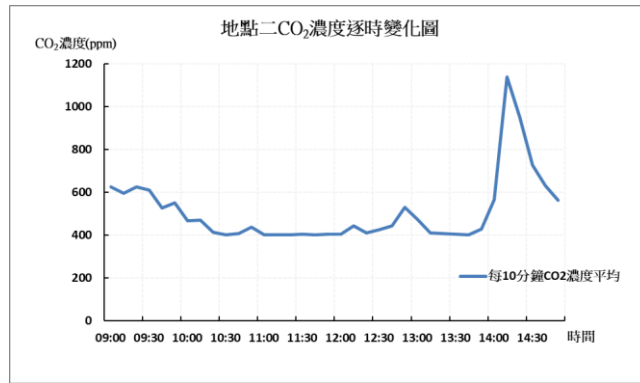


圖 11 地點二 CO₂ 濃度逐時變化圖

(二) 觀察與討論

- 1、可看出 BVOC 濃度幾乎呈穩定狀態，只在 14:00~14:30 之間急遽上升。
- 2、可以看出氣溫並不是穩定的，於 10:00 左右開始下降，降至約 33°C。11:45 左右開始劇烈上升，大約在 12:30~13:00 之間達到最大值，之後又逐漸下降。
- 3、光照強度變化趨勢與氣溫變化趨勢相似。
- 4、CO₂ 濃度變化趨勢與 BVOC 濃度變化趨勢相似。

將 BVOC 濃度及另外三種數據加以分析，做出了散佈圖(如下各圖所示)。

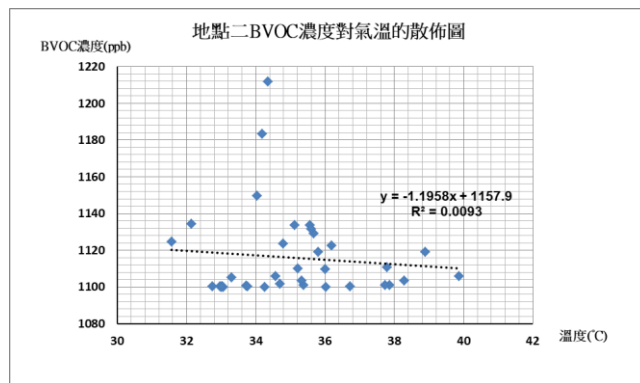


圖 12 地點二 BVOC 濃度對氣溫的散佈圖

線性趨勢線公式： $y = -1.1958x + 1157.9$ ，相關係數： -0.09623

由圖 12 可以看出 BVOC 濃度與氣溫呈低度負相關，雖無法判斷 BVOC 濃度是否隨氣溫上升，但可以發現數據點分布較多的區間為 34~36°C，並且最大排放約在 34~35°C 之間，符合文獻中提到最大排放約在 35~40°C。

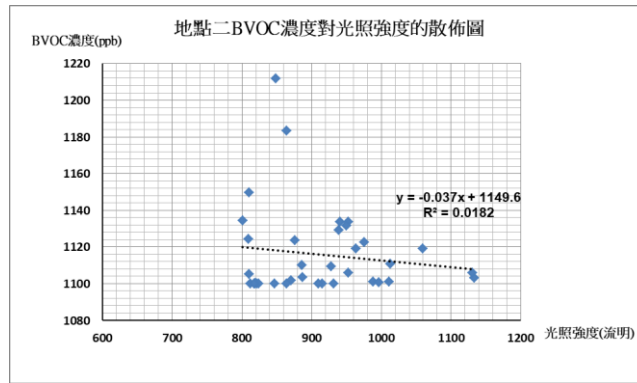


圖 13 地點二 BVOC 濃度對光照強度的散佈圖

線性趨勢線公式： $y = -0.037x + 1149.6$ ，相關係數： -0.135

由圖 13 可以看出 BVOC 濃度與光照強度呈低度負相關，雖無法判斷 BVOC 濃度是否隨光照強度上升，但可以發現數據點分布較多的區間為 800~1000 流明，最大排放則約在 850 流明時。

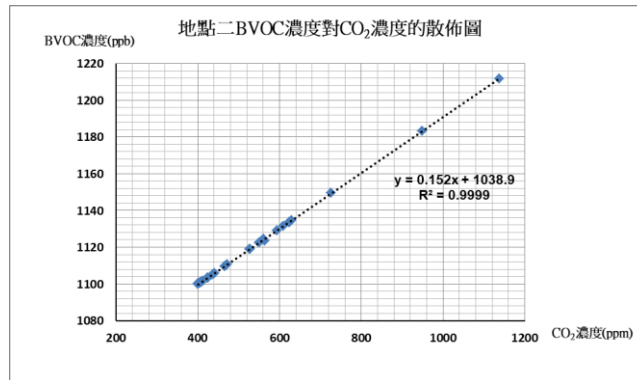


圖 14 地點二 BVOC 濃度對 CO₂ 濃度的散佈圖

線性趨勢線公式： $y = 0.152x + 1038.9$ ，相關係數： 0.999956

由圖 14 可以看出 BVOC 濃度與 CO₂ 濃度呈高度正相關，甚至其相關係數接近 1，代表 CO₂ 濃度越高，BVOC 濃度越高。

三、地點三(一般亮環境，房間)

(一) 實驗數據分析

1、根據感測器測量之實驗數據結果，做出逐時變化圖(如下各圖所示)。

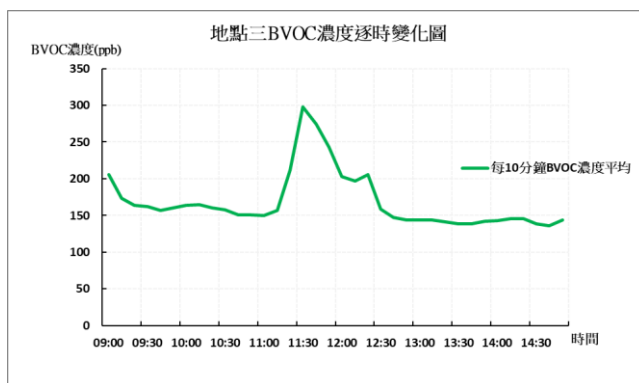


圖 15 地點三 BVOC 濃度逐時變化圖

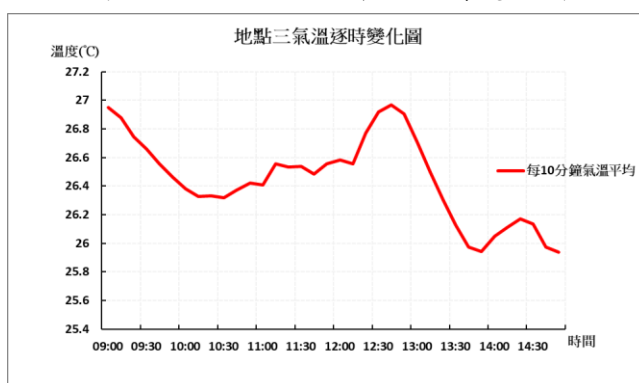


圖 16 地點三氣溫逐時變化圖

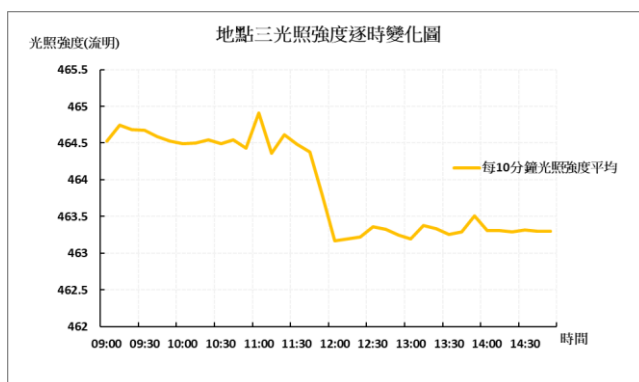


圖 17 地點三光照強度逐時變化圖

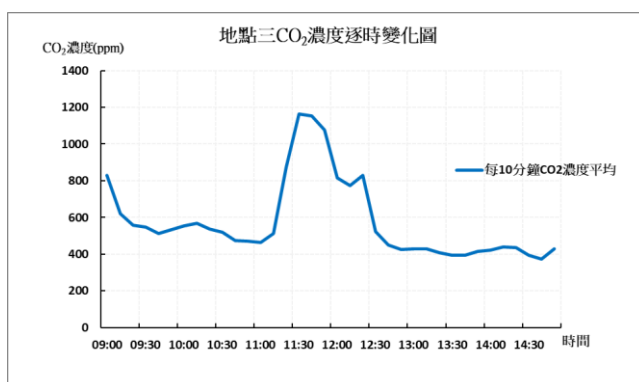


圖 18 地點三 CO₂ 濃度逐時變化圖

(二) 觀察與討論

- 1、可看出 BVOC 濃度並不是穩定的，於 11:15 左右開始劇烈上升，約在 11:30 達到最大值，之後逐漸下降，最後穩定於約 150ppb。
- 2、氣溫在 26~27°C 之間上下起伏，溫差不到 1°C，上升幅度極小，可見室內的氣溫變化不大。雖在 12:45 左右達到最大值，但根據實驗記錄，此時可能是因暫時將室內冷氣關掉，導致其溫度上升。
- 3、光照強度在 463~465 流明之間上下起伏，相差不到 2 流明，上升幅度極小，幾乎亮度相似，可見室內的光照強度變化不大。
- 4、CO₂ 濃度變化趨勢與 BVOC 濃度變化趨勢相似。

將 BVOC 濃度與另外三種數據加以分析，做出了散佈圖(如下各圖所示)。

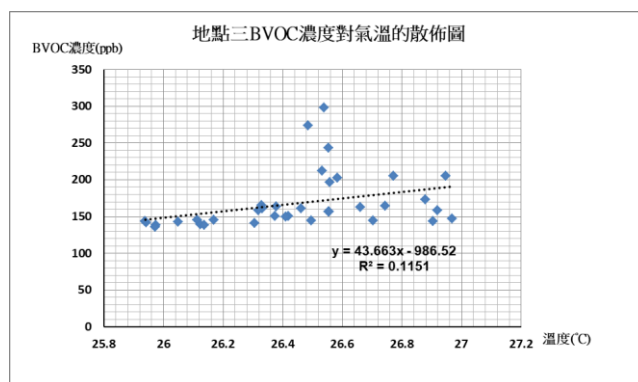


圖 19 地點三 BVOC 濃度對氣溫的散佈圖

線性趨勢線公式： $y = 43.663x - 986.52$ ，相關係數： 0.339212

由圖 19 可以看出地點三的 BVOC 與氣溫的正向關係沒有地點一 BVOC 濃度與氣溫關係來的明顯，但根據圖表仍可以判斷 BVOC 的濃度和光照強度是中度正相關。

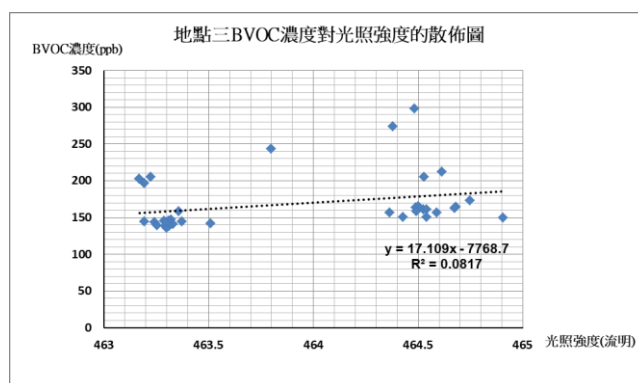


圖 20 地點三 BVOC 濃度對光照強度的散佈圖

線性趨勢線公式： $y = 17.109x - 7768.7$ ，相關係數： 0.28575

由圖 20 可以看出地點三的 BVOC 與光照強度的正向關係沒有地點一 BVOC 濃度與光照強度關係來的明顯，但根據圖表仍可以判斷 BVOC 的濃度和光照強度是低度正相關。

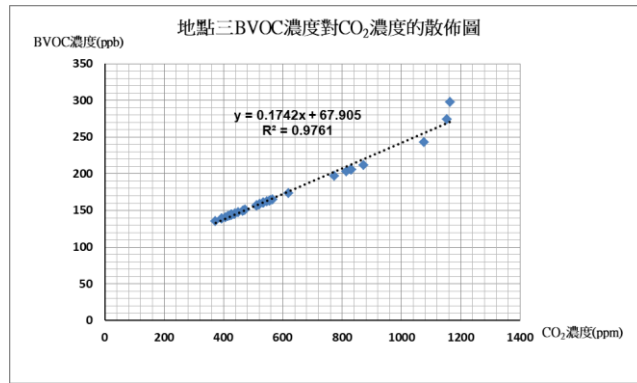


圖 21 地點三 BVOC 濃度對 CO₂ 濃度的散佈圖
線性趨勢線公式： $y = 0.1742x + 67.905$ ，相關係數：0.98797

由圖 21 可以看出 BVOC 濃度與 CO₂ 濃度呈高度正相關。經過多個項目的分析後，BVOC 濃度對 CO₂ 濃度的相關係數始終接近於 1，我開始推測是否是因 TVOC 及 CO₂ 濃度同由 CCS811 空氣品質感測器測量出來，儀器函數庫所用數據計算公式為相同，導致其相關係數接近於 1。

四、地點四(暗，小房間)

(一) 實驗數據分析

1、根據感測器測量之實驗數據結果，做出逐時變化圖(如下圖所示)。

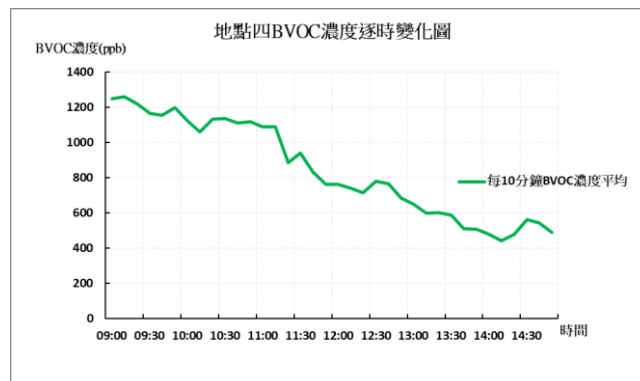


圖 22 地點四 BVOC 濃度逐時變化圖

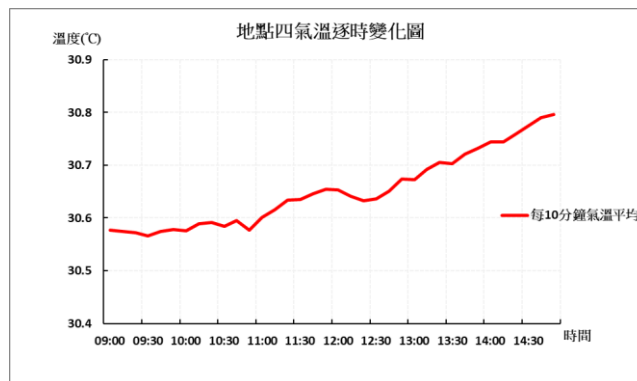


圖 23 地點四氣溫逐時變化圖

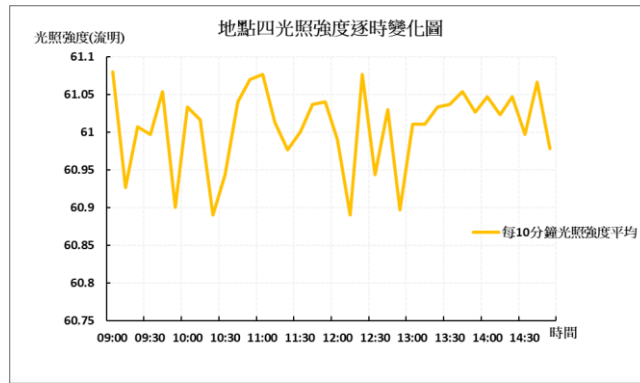


圖 24 地點四光照強度逐時變化圖

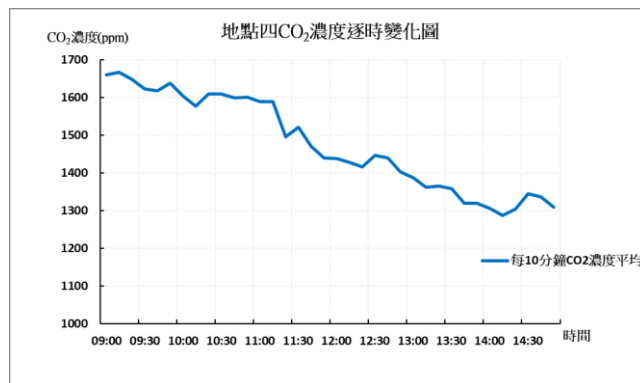


圖 25 地點四 CO₂ 濃度逐時變化圖

(二) 觀察與討論

- 1、BVOC 濃度持續下降，從 1650ppb 左右下降至約 1300ppb，下降幅度明顯。
- 2、氣溫持續上升，從 30.6°C 左右上升至約 30.8°C，溫差不到 1°C，上升幅度極小，可見暗室內的氣溫變化不大。
- 3、光照強度在 60.9~61.1 流明之間上下起伏，相差不到 1 流明，上升幅度極小，幾乎亮度相似，可見室內的光照強度變化不大。
- 4、CO₂ 濃度變化趨勢與 BVOC 濃度變化趨勢相似。

將 BVOC 濃度及另外三種數據加以分析，做出了散佈圖(如下各圖所示)。

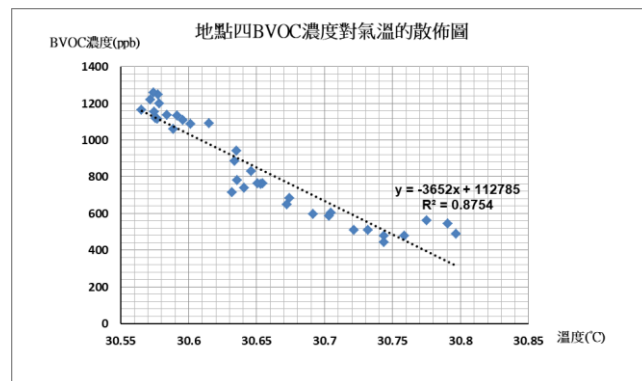


圖 26 地點四 BVOC 濃度對氣溫的散佈圖

線性趨勢線公式： $y = -3652x + 112785$ ，相關係數： -0.93565

由圖 26 可以看出 BVOC 濃度與氣溫呈高度負相關，與地點一、三 BVOC 濃度與氣溫之關係截然不同。

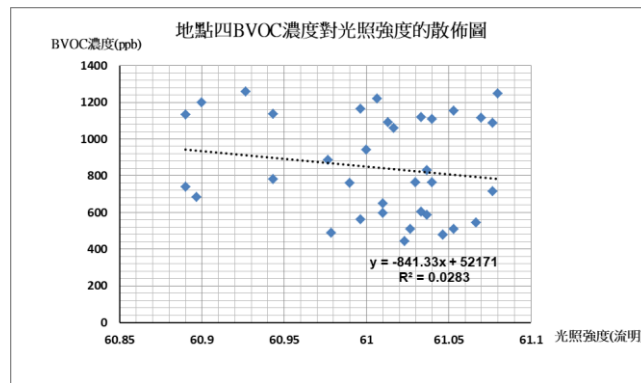


圖 27 地點四 BVOC 濃度對光照強度的散佈圖
線性趨勢線公式： $y = -3652x + 112785$ ，相關係數： -0.16808

由圖 27 可以看出 BVOC 濃度與光照強度呈低度負相關，兩者幾乎無關係，但因測量環境為暗室，可以視為合理。

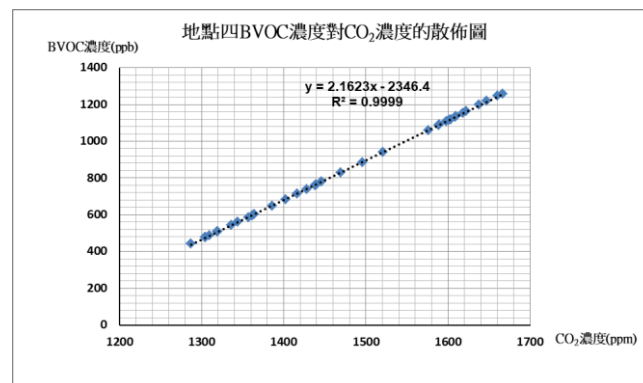


圖 28 地點四 BVOC 濃度對 CO₂ 濃度的散佈圖
線性趨勢線公式： $y = 2.1623x - 2346.4$ ，相關係數： 0.999961

由圖 28 可以看出 BVOC 濃度與 CO₂ 濃度呈高度正相關。這驗證了先前的推測，BVOC 濃度與 CO₂ 濃度因為同儀器測出，數據上會有某種關聯。

實驗二、防蚊樹產生 BVOC 消除臭氧的變化

探討 2-1 分析一般環境下實驗箱中有無 BVOC 對臭氧濃度的變化情形

一、對照組

(一) 實驗數據分析

- 1、根據 MQ-131 O₃ sensor 測量之實驗數據結果，做出輸出及輸入臭氧濃度變化圖(如圖 29、圖 30 所示)。

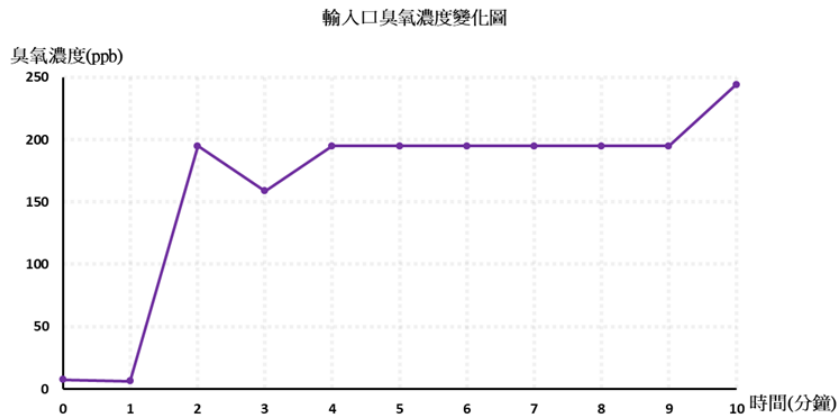


圖 29 輸入口臭氧濃度變化折線圖

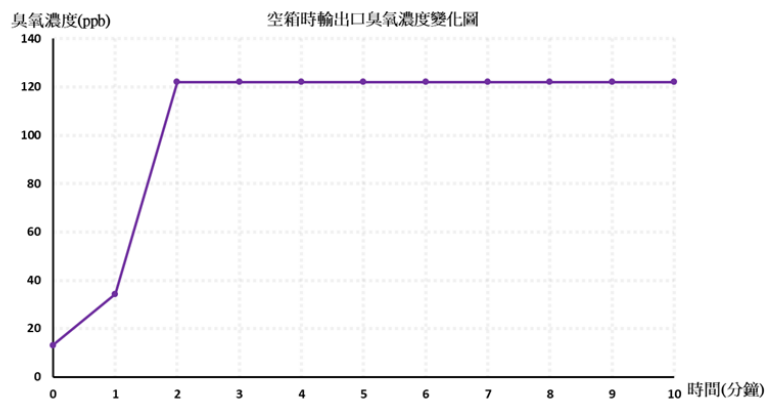


圖 30 空箱時輸出口臭氧濃度變化折線圖

(二) 觀察與討論

- 1、從圖 29 中可以看出輸入口的臭氧濃度變化，在啟動臭氧機 1~2 分鐘後急遽上升，3 分鐘時，臭氧濃度突然下降可視為實驗誤差，4~9 分鐘時變化逐漸平緩，最後在 10 分鐘時到達最高點。
- 2、從圖 30 中可以看出空箱時輸出口的濃度變化，整體的濃度上升趨勢與輸入口臭氧濃度變化相似。最高濃度較小可推測為輸入口的單位體積較小，故濃度較高，而輸出口濃度要考慮包含整個箱內體積及輸出口體積，因此測得濃度較小可視為合理。

二、實驗二-1

(一) 實驗數據分析

- 1、根據 MQ-131 O3 sensor 測量之實驗數據結果，做出輸出的臭氧濃度變化圖(如圖 31 所示)。

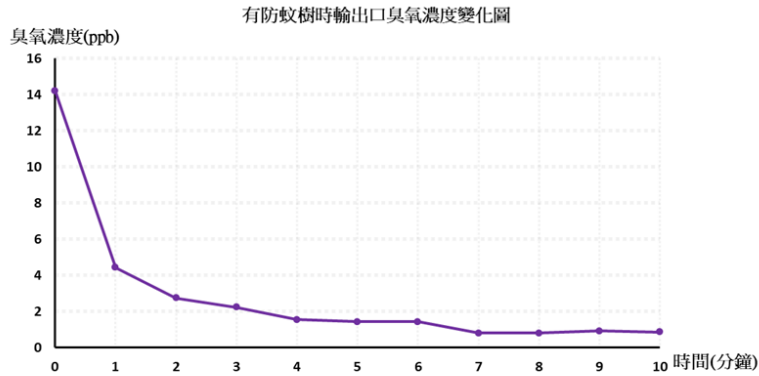


圖 31 有防蚊樹時輸出口臭氧濃度變化折線圖

(二) 觀察與討論

- 1、從圖 31 中可以看出有防蚊樹時輸出口的臭氧濃度變化，啟動 1 分鐘後急遽下降，下降趨勢大約從 4 分鐘後開始平緩。
- 2、與對照組的輸出口濃度變化趨勢截然不同。

探討 2-2 分析暗室裡 BVOC 對臭氧濃度的變化情形

一、實驗二-2

(一) 實驗數據分析

- 1、根據 MQ-131 O3 sensor 測量之實驗數據結果，做出暗室裡輸出的臭氧濃度變化圖(如圖 32 所示)。

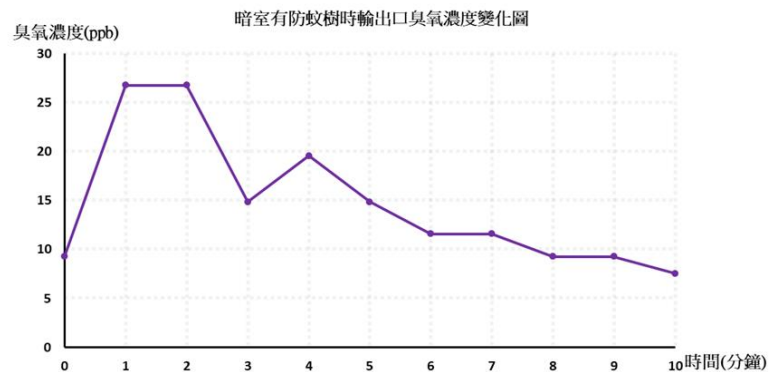


圖 32 防蚊樹在暗室時輸出口臭氧濃度變化折線圖

(二) 觀察與討論

- 1、從圖 32 中可以看出防蚊樹在暗室時輸出口的臭氧濃度變化，啟動 1 分鐘後急遽上升，我們推測可能是因 BVOC 與臭氧反應的速率趕不上臭氧製造的速率的關係。大約 2 分鐘後開始下降，4 分鐘時微幅上升，可視為實驗誤差，下降趨勢大約從 6 分鐘後開始平緩。
- 2、暗室裡臭氧濃度的下降趨勢沒有實驗二-1 來的明顯。

探討 2-3 分析照紫外光時 BVOC 對臭氧濃度的變化情形

一、實驗二-3

(一)實驗數據分析

- 1、根據 MQ-131 O3 sensor 測量之實驗數據結果，做出照紫外光時輸出的臭氧濃度變化圖(如圖 33 所示)。

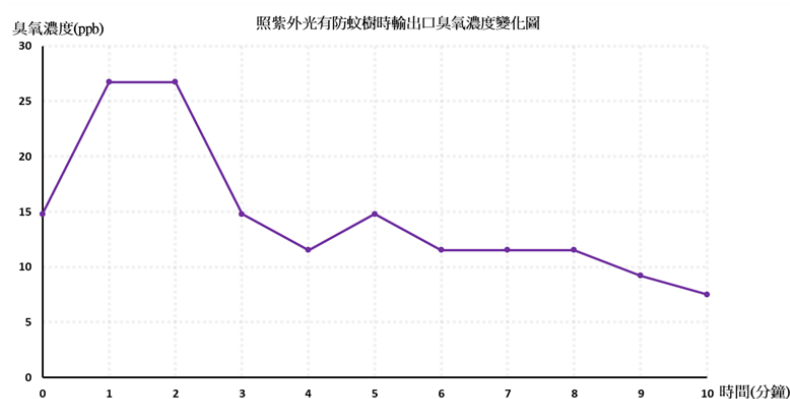


圖 19 防蚊樹照紫外光時輸出口臭氧濃度變化折線圖

(二)觀察與討論

- 1、從圖 33 中可以看出防蚊樹在暗室時輸出口的臭氧濃度變化，啟動 1 分鐘後急遽上升，大約 2 分鐘後開始下降，5 分鐘時微幅上升，可視為實驗誤差，下降趨勢大約從 6 分鐘後開始平緩。
- 2、照紫外光時的臭氧濃度的下降趨勢沒有實驗二-1 來的明顯。
- 3、下降趨勢與實驗二-2 相似。

實驗三、檢驗一般常見景觀植物影響臭氧濃度之效能

探討 3-1 檢驗有明顯香氣之植物對臭氧濃度的變化情形

一、實驗三-1

(一)實驗數據分析

- 1、根據 MQ-131 O3 sensor 測量之實驗數據結果，做出植物為迷迭香輸出的臭氧濃度變化圖(如圖 34 所示)。

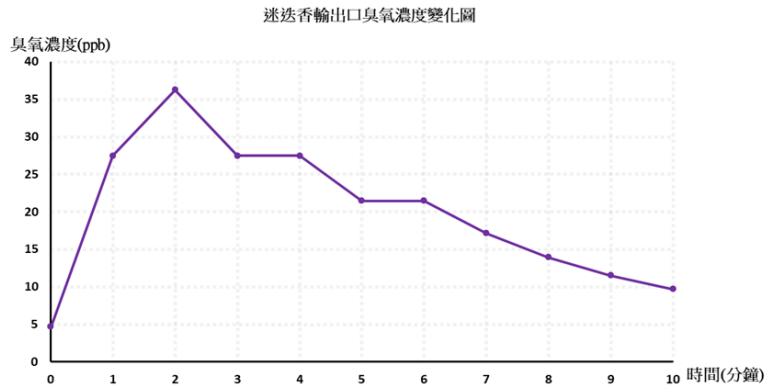


圖 34 迷迭香輸出口臭氧濃度變化折線圖

(二)觀察與討論

- 1、從圖 34 中可以看出迷迭香輸出口的臭氧濃度變化，1~2 分鐘之間急遽上升，大約 2 分鐘後開始持續下降。
- 2、植物為迷迭香時臭氧濃度的下降趨勢沒有實驗二-1 來的明顯。

由此可知，迷迭香具消除臭氧之效能。

探討 3-2 檢驗明顯無香氣之植物對臭氧濃度的變化情形

一、實驗三-2

(一)實驗數據分析

- 1、根據 MQ-131 O3 sensor 測量之實驗數據結果，做出植物為虎尾蘭輸出的臭氧濃度變化圖(如圖 35 所示)。

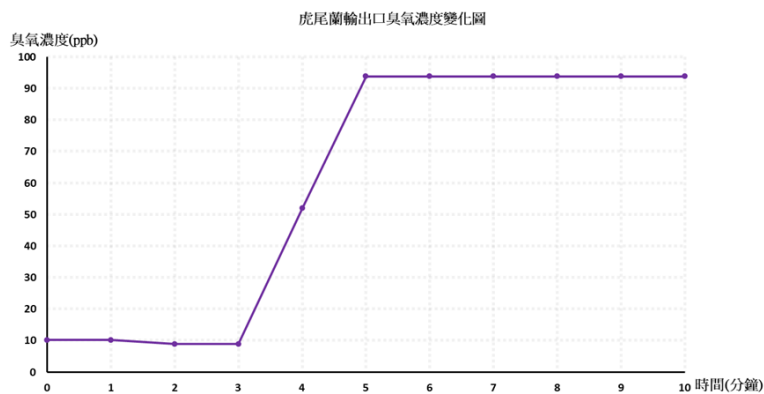


圖 35 虎尾蘭輸出口臭氧濃度變化折線圖

(二)觀察與討論

- 1、從圖 35 中可以看出植物為虎尾蘭時輸出口的臭氧濃度變化，在啟動臭氧機 3~5 分鐘時急遽上升，上降趨勢大約在 5 分鐘到達最大值後平緩。
- 2、與對照組的輸入及輸出口濃度變化趨勢相似。
- 3、與實驗二-1 及實驗三-1 的輸出口濃度變化趨勢截然不同。

由此可知，虎尾蘭不具消臭氧之效能。

陸、結論

一、歸納實驗一的地點一、四，比較日照有無影響防蚊樹 BVOC 的產量，可以發現地點一濃度最大值比地點四來的大，且地點一 BVOC 與氣溫及光照強度呈明顯的正向關係。地點四則呈負相關，顯示在暗室內 BVOC 不受氣溫及光照強度的影響

二、歸納實驗一的地點一、三，氣溫及光照強度變化會影響防蚊樹 BVOC 的產量。可以發現地點一、三氣溫、光照強度越高，BVOC 濃度越高。氣溫、光照強度變化值：地點一 > 地點三，BVOC 濃度變化值：地點一 > 地點三，由於地點三氣溫及光照強度變化幅度極小，故其 BVOC 濃度變化幅度小，正相關程度也較小。

三、根據實驗一的地點二，雖然 BVOC 濃度與氣溫呈低度負相關。但可以發現數據點分布較多的區間為 34~36°C，並且最大排放約在 34~35°C 之間，符合文獻中提到最大排放約在 35~40°C。

四、根據實驗一的地點四，可以發現 BVOC 濃度與氣溫呈現高度負相關，由此可知在暗室裡氣溫不是影響 BVOC 濃度的主要因素。依照植物在無光的環境下不行光合作用，但會持續行呼吸作用並製造出 CO₂，故推測 CO₂ 為影響 BVOC 濃度的主要因素，但受限於儀器，目前只能先留下假說，未來再作證實。

五、歸納實驗一，因儀器問題，CO₂ 與 BVOC 濃度之關係尚無法得出。

六、歸納探討二-1，比較防蚊樹有無影響臭氧濃度的變化，可以發現放置防蚊樹後，臭氧濃度明顯下降。

七、歸納實驗二-1、二-2，比較日照有無影響 BVOC 消除臭氧之效能，可以發現實驗二-2 暗室裡臭氧濃度在較長的時間中呈現下降的趨勢，實驗二-1 有光照的條件下則是在短時間內劇烈下降。

八、歸納實驗二-2、二-3，比較紫外光有無影響 BVOC 消除臭氧之效能，在本實驗中看不出其有太大的影響性。

九、根據實驗三，我們發現消除臭氧最佳的植物為防蚊樹，迷迭香也具消除臭氧的效能，不過較防蚊樹差，我們推測是因為其產生的 BVOC 濃度較少。而虎尾蘭明顯無消除臭氧的效能。

柒、討論及應用

一、我們會持續尋找其他能偵測 CO₂ 的精準感測器，與 CCS811 空氣品質感測器測得的 BVOC 濃度分開，如此一來便能獲得更完整的 CO₂ 對 BVOC 濃度變化的關係。並進一步去驗證暗室裡影響 BVOC 濃度變化的主要因素為 CO₂ 的假說。

二、未來若能建立起更精密的 BVOC 濃度對臭氧濃度變化值之間的關聯，包括將 NO_x 濃度也列為考慮因素，找出 BVOC 抑制臭氧的最佳化情況，並試驗出合適的植物而不僅限實驗中所使用之植物，我們將可利用這套系統應用在各種臭氧污染的防治，從一般家庭、學校到都市各個角落，只要是適合植物生長並保持通風的環境，便可利用類似抽風實驗箱的裝置降低臭氧污染的危害。

捌、參考資料

- 一、吳金村。2004/12。〈森林釋出異戊二烯對大氣品質之影響〉。林業研究專訊·第十一卷第六期。
- 二、張上鎮、葉汀峰。〈臺灣扁柏屬植物生物性有機揮發化合物與環境因子相互關係之探討〉。
- 三、張上鎮。〈臺灣針葉樹林生物性有機揮發化合物之分析〉。
- 四、張志忠。〈台灣巨型城市長期研究(I)-二次有機氣膠之環境衝擊-環境中二次有機氣膠前驅物分析及二次氣膠與光化學反應程度之關聯性研究〉
- 五、謝祝欽。〈自然源 VOCS 排放特性研究〉。
- 六、林忠霆。〈南部某工業區大氣中揮發性有機物時空特徵調查〉。
- 七、張良輝、陳建鴻。〈台灣地區臭氧污染控制物種之分析〉。
- 八、李家偉、許德仁。〈台灣巨型城市環境研究(III)-都市空氣污染與低雲及霧霾之物理化學交互作用-都市近郊 BVOCs 於人為污染下之氧化作用不同海拔高度反應產物之生成以及其對雲霧水性質之影響〉。
- 九、光化學煙霧，維基百科。
- 十、黃冠林、江仲民、鄭玉英、莊雅慈。〈黑妞狂癢曲-防蚊植物果真防蚊？〉。中華民國第四十八屆中小學科學展覽會作品說明書。
- 十一、香葉天竺葵，華人百科。
- 十二、香葉天竺葵，維基百科。
- 十三、蔡月夏。〈迷迭香栽培與利用〉。花蓮區農業專訊。
- 十四、迷迭香，維基百科。
- 十五、迷迭香 *Midiexiang* 藥用植物圖像資料庫（香港浸會大學中醫藥學院）
- 十六、虎尾蘭，維基百科。
- 十七、王映傑、黃譯賢、陳逸暘與陳孟賢(110 年 05 月)。〈虎尾蘭之綠化空汙〉。