

# 環境因子影響揮發性有機物排放模式之研究

蔡添發\* 鄭福田\*\*

## 一、前言

塑膠加工業於製造過程中常因排放揮發性有機物(VOC)之臭味物質而遭人詬病,由於揮發性有機物的排放主要乃因使用有機溶劑或是塑膠加熱過程所產生,而排放量的多寡則受環境因子的影響。為能有效掌握塑膠加工業VOC排放機制,及其與環境因子之相關性,以作為設置空氣污染防治設備之基礎,本研究乃以完全混合型實驗室(well-mixing test chamber)進行各種有機溶劑污染源排放VOC之特性分析、污染物排放速率與環境條件(如溫度、濕度、空氣交換率)關係之建立、污染物從污染源釋出現象之探討,以期配合已發展之室內紊流空氣品質模式,研擬更有效室內空氣污染改善對策。

## 二、實驗設備與方法

根據表1所需之實驗藥品、器材與分析設備進行以下之實驗步驟:

1. 將有機溶劑以針筒注入試驗箱內之樣品杯中,注入時避免溶劑溢出杯口外。(杯口面積  $A = 1.96 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ )。
2. 利用零氣體產生器產生純淨空氣,並藉校正系統與浮子流量計控制純淨空氣進流量。
3. 利用水浴法加熱裝水之三口瓶,並依試驗條件需要通入適當純淨空氣流量以控制試驗箱濕度。
4. 試驗箱分隔成兩層,中間以導流板隔開,下層裝設分歧管;管上鑽孔,純空氣由各孔口進入箱內以促進箱內氣流混合均勻;並以磁石攪拌機控制箱底磁石轉動以期達到最佳混合效果。
5. 實驗過程中保持樣品之等液面及試驗設備完全無漏。
6. 藉水浴控制箱內溫度。
7. 由箱內上層排出之揮發性有機物質,再經過充填玻璃珠之混合區增進混合效果,最後送至氣體層析儀(GC)分析氣體組成,定量濃度;直至箱內VOC濃度達穩定為止。
8. 為求各環境條件影響有機溶劑蒸發逸散情形,再重覆步驟1.,並依表3的條件控制操作之。

---

\*中國技術服務社工業污染防治中心工程師

\*\*台灣大學環境工程學研究所教授

表 1 實驗藥品、器材與分析設備

項 目	名 稱
實驗藥品	1. 甲苯、環己酮、丁酮、鄰苯酐酸二辛酯(Dioctyl phthalate, DOP) (分析級), 其物理化學特性如表 2 2. PVC 發泡壁紙原料, 成份包含甲苯、環己酮、丁酮、DOP及PVC(polyvinyl chloride), 其重量百分比如表3(a)
實驗器材	溫度計、浮子流量計、無抽式抽氣馬達、採樣袋、針筒、血清瓶、分子篩、Thermo Environmental Model 111 Zero Air Supply、Thermo Environmental Model 146 Dynamic Gas Calibration system、TM model B403-D Temperature Control System、溫度、濕度偵測儀(Rotronic Model DL-20K及Rotronic Hygros Kop)
實驗設備	揮發性有機物排放試驗設備裝置 <sup>1</sup> 如圖 1
分析儀器*	1. HNU Model 311 Portable Gas Chromatograph GC, Column 為SPB-1, SPB-5, SP-1000, SP-1200 2. photovac Model 10S50 Gas Chromatograph GC, Column 為CSP-20m, 4'× (1/8)" 3. HP.5880A Series Gas Chromatograph GC, Column為SPB-5

\* : 各GC的操作條件如表 4

表 2 四種 VOC 物理化學特性

VOC 特性	甲 苯	丁 酮	環 己 酮	DOP
化 學 式	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>3</sub>	CH <sub>3</sub> COC <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O	C <sub>24</sub> H <sub>38</sub> O <sub>4</sub>
分 子 量	92.13	72.11	98.15	390.56
沸 點 (°C)	110.7	79.6	156.7	230
熔 點 (°C)	-92.13	-85.9	-32	-50
燃 點 (°C)	552	516	520	207
比 重	0.87	0.80	0.95	0.981
爆 炸 上 限 (vol.%)	7.0~1.27	11.5~1.8	8.1~1.1	-
勞工安全標準 (ppm)	100	200	50	10*
臭味關值 (ppm)	0.17	100	25	5*
水 溶 性	微 溶	可 溶	微 溶	不 溶

\* : 單位為 mg/m<sup>3</sup>

- : 資料不足

表 3 揮發性有機物排放試驗參數與條件

試驗參數	試驗條件
單質試驗之 物質種類**	丁酮 甲苯 環己酮
混合物質	丁酮+甲苯+環己酮 (27.47:19.78:52.75) 丁酮+甲苯+環己酮+DOP (26.94:19.40:51.72:1.94) 丁酮+甲苯+環己酮+DOP+PVC***
通氣量*(l/min)	0.5、1.0、1.5、2.0
溫度*(°C)	15、20、25、35
濕度*(%)	15、30、50、75

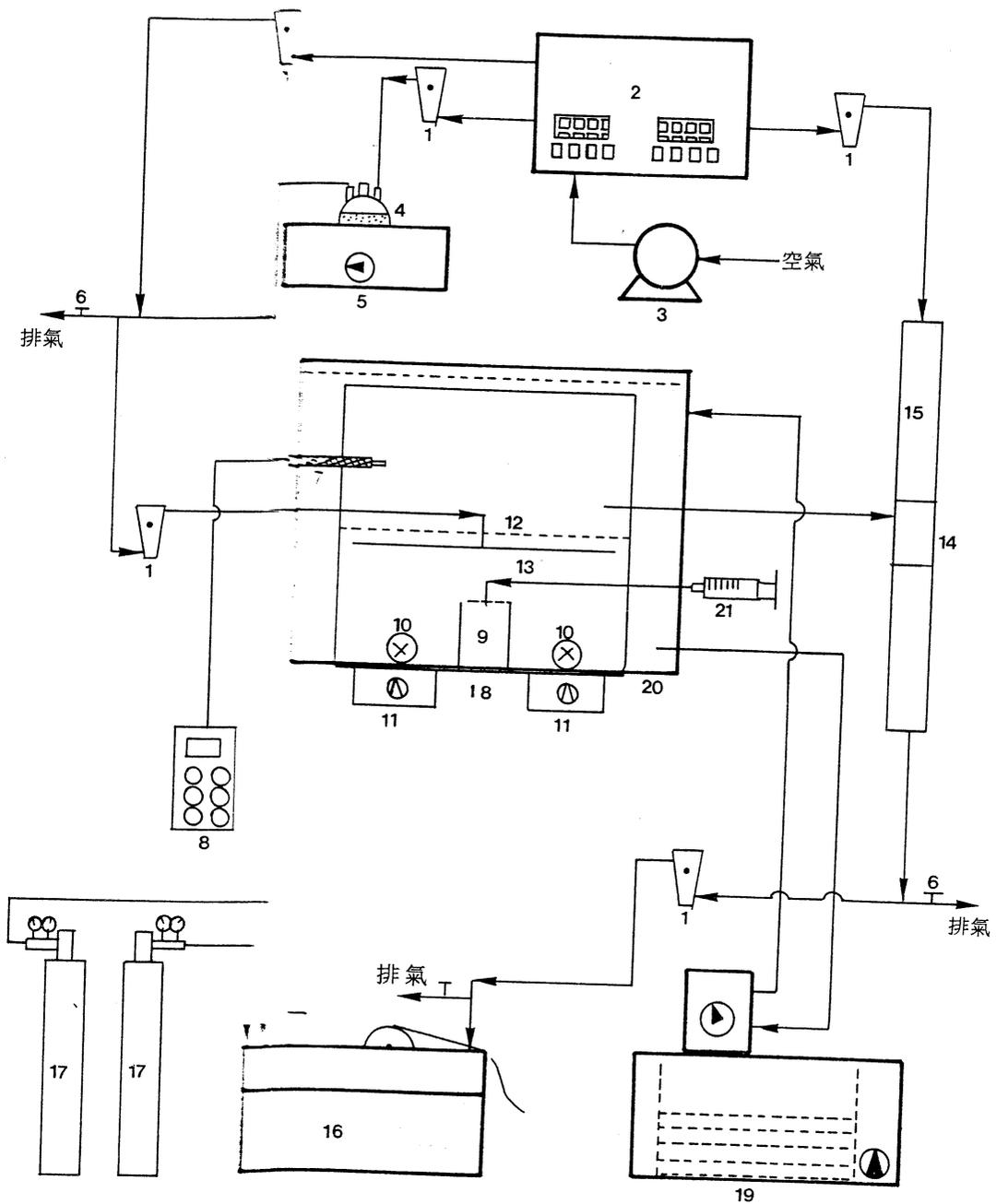
\*：實驗數值變化

\*\*：依塑膠加工業較常用，且用量頗大的有機溶劑

\*\*\*：PVC 發泡壁紙原料，各成份比例如表 3 (a)所示

表 3 (a)

物質種類	含量 (g)	比例 (%)
PVC	4	7.2
DOP	1	1.8
丁 酮	14	25
甲 苯	10	18
環 己 酮	27	48
總 計	56	100



- |                    |       |           |              |          |
|--------------------|-------|-----------|--------------|----------|
| 1: 浮子流量計           | 溫度控制器 | 10: 磁石轉子  | 15: 混合槽      | 20: 水槽   |
| 2: 零氣體產生器及<br>校正系統 | 溫度控制閥 | 11: 磁石攪拌機 | 16: GC       | 21: 注射針筒 |
| 3: 空氣壓縮機           | 溫度感測器 | 12: 導流板   | 17: 氮氣鋼筒     |          |
| 4: 三口瓶             | 溫度顯示器 | 13: 十字分歧管 | 18: 測試箱      |          |
|                    | 溫度計   | 14: 玻璃珠   | 19: 水槽加熱、冷卻器 |          |

圖 1 揮發性有機物排放試驗裝置

表 4 氣相層析儀(G.C.)操作條件

項 目	操 作 條 件		
	HNU Model 311 Portable GC	Photovac Model 10S50 GC	HP.5880A GC
注射口溫度	130	室 溫	250
加熱爐溫度	110	—	160
偵測器溫度	110	室 溫	310
偵測器種類	UV激光離子偵測器 (PID)	UV激光離子偵測器 (PID)	火焰離子化偵測器 (FID)
管 柱	SPB-1, SPB-5 SP-1000, SP-1200	CSP-20m, 4' × (1/8)"	SPB-5

註：1. 上述GC的攜帶氣體皆為20ml/min的氮氣

2. 各溫度單位為°C

### 三、實驗結果與討論

#### 3.1 VOC 排放實驗結果

揮發性有機物排放速率實驗乃依據如表 3 各項試驗參數對各種有機溶液進行氣液相平衡時液面上方空氣中蒸氣壓或濃度之量測。本研究之溶液組成份共分為二大類，即單一物質與混合物質。

##### 3.1.1 單一物質

實驗結果如表 5，在控制各試驗參數條件下，得各物種的平衡濃度測值為丁酮介於  $0.69 \times 10^4 \sim 7.23 \times 10^4$  ppm；甲苯介於  $0.48 \times 10^4 \sim 3.78 \times 10^4$  ppm；環己酮介於  $0.19 \times 10^4 \sim 1.9 \times 10^4$  ppm。排放速率則可由濃度 × 排放量計算求得，樣品面積為  $0.00196 \text{ m}^2$ 。丁酮介於  $0.9 \times 10^6 \sim 4.33 \times 10^6 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{hr}$ ，甲苯介於  $1.1 \times 10^6 \sim 2.85 \times 10^6 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{hr}$ ；環己酮介於  $0.28 \times 10^6 \sim 2.45 \times 10^6 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{hr}$ 。

##### 3.1.2 混合物質

###### 1. 三種物質混合

即甲苯、環己酮及丁酮之混合溶液，結果如表 6。由表知丁酮平衡濃度測值介於  $0.28 \times 10^4 \sim 2.08 \times 10^4$  ppm，甲苯介於  $0.09 \times 10^4 \sim 1.05 \times 10^4$  ppm，環己酮則介於  $0.49 \times 10^3 \sim 6.62 \times 10^3$  ppm，排放速率丁酮介於  $0.27 \times 10^6 \sim 1.55 \times 10^6 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{hr}$ ，甲苯介於  $0.18 \times 10^6 \sim 1.21 \times 10^6 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{hr}$ ，環己酮介於  $0.91 \times 10^5 \sim 1.06 \times 10^6 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{hr}$ 。

表 5 環境因子作用下各純物質之排放速率實驗

實驗 序號	溫度 T (°C)	相對濕度 RH (%)	通風量 ACH (1/min)	丁 酮		甲 苯		環 己 酮	
				平衡濃度 (10 <sup>4</sup> ppm)	排放速率 (10 <sup>6</sup> mg/m <sup>2</sup> ·hr)	平衡濃度 (10 <sup>4</sup> ppm)	排放速率 (10 <sup>6</sup> mg/m <sup>2</sup> ·hr)	平衡濃度 (10 <sup>4</sup> ppm)	排放速率 (10 <sup>6</sup> mg/m <sup>2</sup> ·hr)
1	20	50	0.5	3.50	1.60	2.19	1.30	0.59	0.37
2	20	50	1.0	2.24	2.05	1.26	1.45	0.49	0.61
3	20	50	2.0	1.21	2.22	0.62	1.47	0.32	0.81
4	20	75	0.5	3.74	1.72	2.55	1.50	0.68	0.43
5	20	75	1.0	2.68	2.46	1.52	1.78	0.51	0.63
6	20	75	2.0	1.44	2.64	0.76	1.79	0.33	0.83
7	25	15	1.0	1.66	1.49	1.13	1.30	0.44	0.55
8	25	30	1.0	2.30	2.08	1.37	1.57	0.55	0.67
9	25	50	1.0	2.64	2.38	1.52	1.75	0.70	0.86
10	25	75	1.0	3.10	2.79	1.83	2.10	0.83	1.02
11	30	50	0.5	5.42	2.40	3.65	2.00	1.46	0.88
12	30	50	1.0	3.08	2.73	1.89	2.14	0.97	1.17
13	30	50	1.5	2.36	3.14	1.42	2.41	0.76	1.38
14	30	50	2.0	1.78	3.16	1.07	2.42	0.67	1.62
15	30	75	0.5	5.68	2.52	3.78	2.10	1.59	0.96
16	30	75	1.0	3.39	3.00	2.09	2.38	1.15	1.39
17	30	75	1.5	2.38	3.17	1.64	2.78	0.90	1.64
18	30	75	2.0	1.83	3.24	1.26	2.85	0.72	1.75
19	35	50	0.5	6.98	3.04	-	-	1.30	0.77
20	35	50	1.0	4.25	3.70	2.22	2.47	1.14	1.35
21	35	50	1.5	2.84	3.71	-	-	1.03	1.83
22	35	50	2.0	2.17	3.79	-	-	0.81	1.91

- : 未進行實驗

表 6 環境因子作用下混合物(丁酮+甲苯+環己酮)之排放速率實驗

實驗 序號	溫度 T (°C)	相對濕度 RH (%)	通風量 ACH (1/min)	丁		酮		甲		苯		環		己	酮
				平衡濃度 (10 <sup>4</sup> ppm)	排放速率 (10 <sup>5</sup> mg/m <sup>2</sup> ·hr)	平衡濃度 (10 <sup>5</sup> mg/m <sup>2</sup> ·hr)	排放速率 (10 <sup>6</sup> mg/m <sup>2</sup> ·hr)	平衡濃度 (10 <sup>4</sup> ppm)	排放速率 (10 <sup>6</sup> mg/m <sup>2</sup> ·hr)	平衡濃度 (10 <sup>3</sup> ppm)	排放速率 (10 <sup>5</sup> mg/m <sup>2</sup> ·hr)				
1	20	15	0.5	0.58	0.27	0.31	0.18	1.45	0.91	1.45	0.91	1.45	0.91	0.91	0.91
2	20	15	1.0	0.40	0.37	0.19	0.21	0.71	0.89	0.71	0.89	0.71	0.89	0.89	0.89
3	20	15	2.0	0.28	0.51	0.09	0.22	0.49	1.22	0.49	1.22	0.49	1.22	1.22	1.22
4	20	75	0.5	1.25	0.57	0.82	0.48	4.06	2.53	4.06	2.53	4.06	2.53	2.53	2.53
5	20	75	1.0	0.82	0.74	0.46	0.54	2.67	3.33	2.67	3.33	2.67	3.33	3.33	3.33
6	20	75	2.0	0.45	0.82	0.35	0.62	1.91	4.77	1.91	4.77	1.91	4.77	4.77	4.77
7	25	15	1.0	0.51	0.46	0.28	0.32	0.94	1.15	0.94	1.15	0.94	1.15	1.15	1.15
8	25	30	1.0	0.61	0.55	0.36	0.42	1.79	2.20	1.79	2.20	1.79	2.20	2.20	2.20
9	25	50	1.0	0.82	0.74	0.46	0.53	2.70	3.32	2.70	3.32	2.70	3.32	3.32	3.32
10	25	75	1.0	0.98	0.88	0.59	0.66	3.54	4.34	3.54	4.34	3.54	4.34	4.34	4.34
11	30	15	0.5	0.99	0.44	0.55	0.31	3.44	2.07	3.44	2.07	3.44	2.07	2.07	2.07
12	30	15	1.0	0.63	0.56	0.40	0.45	2.05	2.47	2.05	2.47	2.05	2.47	2.47	2.47
13	30	15	1.5	0.59	0.79	0.29	0.49	1.51	2.73	1.51	2.73	1.51	2.73	2.73	2.73
14	30	15	2.0	0.52	0.92	0.22	0.50	1.29	3.12	1.29	3.12	1.29	3.12	3.12	3.12
15	30	75	0.5	1.78	0.79	1.04	0.59	6.04	3.64	6.04	3.64	6.04	3.64	3.64	3.64
16	30	75	1.0	1.22	1.08	0.73	0.83	4.65	5.61	4.65	5.61	4.65	5.61	5.61	5.61
17	30	75	1.5	1.02	1.36	0.65	1.11	4.11	7.43	4.11	7.43	4.11	7.43	7.43	7.43
18	30	75	2.0	0.87	1.54	0.58	1.31	3.89	9.40	3.89	9.40	3.89	9.40	9.40	9.40
19	35	30	0.5	1.83	0.79	0.91	0.51	5.71	3.39	5.71	3.39	5.71	3.39	3.39	3.39
20	35	30	1.0	1.02	0.89	0.70	0.76	4.32	5.13	4.32	5.13	4.32	5.13	5.13	5.13
21	35	30	1.5	0.83	1.09	0.50	0.83	3.78	6.73	3.78	6.73	3.78	6.73	6.73	6.73
22	35	30	2.0	0.72	1.26	0.41	0.92	3.57	8.47	3.57	8.47	3.57	8.47	8.47	8.47
23	35	50	0.5	2.08	0.91	1.05	0.58	6.62	3.93	6.62	3.93	6.62	3.93	3.93	3.93
24	35	50	1.0	1.32	1.15	0.85	0.94	5.23	6.20	5.23	6.20	5.23	6.20	6.20	6.20
25	35	50	1.5	1.00	1.31	0.69	1.15	4.69	8.34	4.69	8.34	4.69	8.34	8.34	8.34
26	35	50	2.0	0.89	1.55	0.54	1.21	4.47	1.06	4.47	1.06	4.47	1.06	1.06	1.06

## 2. 四種物質混合

即甲苯、環己酮、丁酮及DOP之混合溶液，結果如表7所示。丁酮平衡濃度測值介於 $0.27 \times 10^4 \sim 1.33 \times 10^4$  ppm，甲苯介於 $0.09 \times 10^4 \sim 1.02 \times 10^4$  ppm，環己酮介於 $0.47 \times 10^3 \sim 6.58 \times 10^3$  ppm。排放速率丁酮在 $0.26 \times 10^6 \sim 1.28 \times 10^6$   $\text{mg/m}^2 \cdot \text{hr}$ ，甲苯介於 $0.17 \times 10^6 \sim 1.20 \times 10^6$   $\text{mg/m}^2 \cdot \text{hr}$ ；環己酮則介於 $0.86 \times 10^5 \sim 1.04 \times 10^6$   $\text{mg/m}^2 \cdot \text{hr}$ 。

## 3. 多種物質混合

即丁酮、甲苯、環己酮、DOP及PVC（此溶液為PVC壁紙原料）。結果如表8，由表知丁酮之平衡濃度測值介於 $0.66 \times 10^3 \sim 5.26 \times 10^3$  ppm，甲苯介於 $0.55 \times 10^3 \sim 3.86 \times 10^3$  ppm；環己酮介於 $0.36 \times 10^3 \sim 2.13 \times 10^3$  ppm。排放速率丁酮介於 $0.79 \times 10^5 \sim 6.20 \times 10^5$   $\text{mg/m}^2 \cdot \text{hr}$ ，甲苯介於 $0.78 \times 10^5 \sim 5.33 \times 10^5$   $\text{mg/m}^2 \cdot \text{hr}$ ；環己酮則為 $0.58 \times 10^5 \sim 3.01 \times 10^5$   $\text{mg/m}^2 \cdot \text{hr}$ 。

## 3.2 環境狀況對VOC的排放特性影響

根據前述VOC排放實驗結果，進一步探討環境因子，如溫度、溼度及通風量對VOC排放特性之影響。

### 3.2.1 環境溫度對VOC排放特性之影響

由圖2及圖3知溫度與純物質之平衡濃度和排放速率成正相關性，此由於排放速率與氣液界面間濃度差成正比，而增溫會加強蒸發質量傳輸，致使兩界面間蒸氣壓差增大；相對地即排放速率增加。純物質環己酮的排放濃度隨溫度增加，指數函數遞增，而排放速率亦有相同現象，其排放速率在低溼度時，溫度由 $20^\circ\text{C}$ 昇至 $25^\circ\text{C}$ 約提高 $1.5 \times 10^5$   $\text{mg/m}^2 \cdot \text{hr}$ 。相同溫度變化下，甲苯約提高 $3 \times 10^5$   $\text{mg/m}^2 \cdot \text{hr}$ ，丁酮約提升 $5 \times 10^5$   $\text{mg/m}^2 \cdot \text{hr}$ ；高溼度時環己酮提高約 $4 \times 10^5$   $\text{mg/m}^2 \cdot \text{hr}$ ，甲苯約提高 $4.5 \times 10^5$   $\text{mg/m}^2 \cdot \text{hr}$ ，丁酮則提高約 $7.2 \times 10^5$   $\text{mg/m}^2 \cdot \text{hr}$ 。並由圖3知當溫度變化位於較高溫區時，各物種之平衡濃度與排放速率提高更多。由以上之數值比較可得一結果：物種濃度的排放多寡受溫度影響程度（即 $\Delta \text{Conc.} / \Delta T$ ）為丁酮>甲苯>環己酮，此因揮發機制直接與物種的沸點有關，丁酮沸點最低易揮發；反之環己酮沸點高不易揮發。

三種混合物質中各組成分（甲苯、丁酮及環己酮）之平衡濃度與排放速率受溫度影響的趨勢均與前述純物質情況一樣，隨溫度增加約呈指數函數遞增。各組成份間之排放濃度大小在同一溫度，固定通風量(11/min)及相對溼度(50%)下，丁酮>甲苯>環己酮，且該關係不隨溫度變化而改變。排放速率當溫度從 $25^\circ\text{C}$ 昇至 $30^\circ\text{C}$ 時，丁酮約提高 $2 \times 10^5$   $\text{mg/m}^2 \cdot \text{hr}$ ，甲苯提高 $1.3 \times 10^5$   $\text{mg/m}^2 \cdot \text{hr}$ ，而環己酮提高約 $7 \times 10^4$   $\text{mg/m}^2 \cdot \text{hr}$ ；即物種排放速率受溫度影響程度為丁酮>甲苯>環己酮，與純物質情況相同。故溫度對VOC之影響並不會因溶液混合情況改變而改變，差別在於混合物質中各物種揮發能力減小；因混合物中個別有機物之擴散係數也受該混合物組成份所影響<sup>2</sup>。

表 7 環境因子作用下混合物(丁酮+甲苯+環己酮+DOP)之排放速率實驗

實驗 序號	溫度 T (°C)	相對濕度		通風量 ACH (1/min)	丁 酮		甲 苯		環 己 酮	
		RH (%)			平衡濃度 (10 <sup>4</sup> ppm)	排放速率 (10 <sup>5</sup> mg/m <sup>2</sup> ·hr)	平衡濃度 (10 <sup>4</sup> ppm)	排放速率 (10 <sup>6</sup> mg/m <sup>2</sup> ·hr)	平衡濃度 (10 <sup>5</sup> ppm)	排放速率 (10 <sup>5</sup> mg/m <sup>2</sup> ·hr)
1	20	50		0.5	0.92	0.42	0.67	0.37	3.19	1.98
2	20	50		1.0	0.62	0.57	0.32	0.39	1.70	2.12
3	20	50		2.0	0.32	0.59	0.18	0.42	1.01	2.51
4	20	75		0.5	1.20	0.55	0.82	0.48	3.98	2.48
5	20	75		1.0	0.81	0.74	0.45	0.53	2.49	3.10
6	20	75		2.0	0.44	0.82	0.35	0.65	1.80	4.49
7	25	15		1.0	0.51	0.46	0.27	0.31	0.89	1.10
8	25	30		1.0	0.61	0.55	0.35	0.40	1.61	1.97
9	25	50		1.0	0.76	0.70	0.47	0.53	2.64	3.24
10	25	75		1.0	0.96	0.87	0.56	0.64	3.41	4.18
11	30	30		0.5	1.15	0.51	0.65	0.37	4.21	2.54
12	30	30		1.0	0.80	0.71	0.46	0.52	2.88	3.47
13	30	30		1.5	0.65	0.87	0.36	0.62	2.29	4.15
14	30	30		2.0	0.59	1.05	0.29	0.68	2.09	5.03
15	30	75		0.5	1.41	0.63	1.01	0.57	5.98	3.61
16	30	75		1.0	1.11	1.00	0.73	0.83	4.55	5.49
17	30	75		1.5	0.87	1.15	0.65	1.09	3.98	7.22
18	30	75		2.0	0.81	1.43	0.57	1.29	3.70	8.93
19	35	15		0.5	1.00	0.45	0.81	0.44	4.65	2.76
20	35	15		1.0	0.74	0.68	0.51	0.53	3.19	3.78
21	35	15		1.5	0.46	0.64	0.39	0.62	2.88	5.13
22	35	15		2.0	0.40	0.71	0.32	0.70	2.69	6.30
23	35	50		0.5	1.33	0.58	1.02	0.57	6.58	3.90
24	35	50		1.0	1.10	1.00	0.80	0.87	5.20	6.17
25	35	50		1.5	0.79	1.10	0.67	1.08	4.59	8.19
26	35	50		2.0	0.73	1.28	0.54	1.20	4.37	1.04

表 8 環境因子作用下混合物 (丁酮 + 甲苯 + 環己酮 + DOP + PVC) 之排放速率實驗

實驗 序號	溫度		相對濕度		通風量		丁		酮		甲		苯		己	
	T (°C)	RH (%)	A	CH	平 衡 濃 度 (10 <sup>3</sup> ppm)	排 放 速 率 (10 <sup>5</sup> mg/m <sup>2</sup> · hr)	平 衡 濃 度 (10 <sup>3</sup> ppm)	排 放 速 率 (10 <sup>5</sup> mg/m <sup>2</sup> · hr)	平 衡 濃 度 (10 <sup>3</sup> ppm)	排 放 速 率 (10 <sup>5</sup> mg/m <sup>2</sup> · hr)	平 衡 濃 度 (10 <sup>3</sup> ppm)	排 放 速 率 (10 <sup>5</sup> mg/m <sup>2</sup> · hr)	平 衡 濃 度 (10 <sup>3</sup> ppm)	排 放 速 率 (10 <sup>5</sup> mg/m <sup>2</sup> · hr)		
1	20	15		0.5	1.60	0.79	1.33	0.78	1.33	0.98	0.58					
2	20	15		1.0	1.20	1.14	0.92	1.13	0.92	0.66	0.77					
3	20	15		2.0	0.66	1.28	0.55	1.26	0.55	0.36	0.84					
4	20	30		0.5	2.53	1.17	1.92	1.16	1.92	1.35	0.79					
5	20	30		1.0	1.49	1.37	1.05	1.31	1.05	0.86	1.00					
6	20	30		2.0	0.90	1.65	0.61	1.52	0.61	0.57	1.33					
7	20	50		0.5	3.01	1.38	2.15	1.34	2.15	1.51	0.89					
8	20	50		1.0	2.11	1.94	1.19	1.48	1.19	1.07	1.26					
9	20	50		2.0	1.37	2.51	0.81	2.01	0.81	0.71	1.67					
10	20	75		0.5	3.20	1.47	2.31	1.44	2.31	1.65	0.97					
11	20	75		1.0	2.30	2.11	1.32	1.65	1.32	1.23	1.44					
12	20	75		2.0	1.42	2.60	0.90	2.25	0.90	0.76	1.78					
13	25	15		1.0	1.42	1.33	1.26	1.30	1.26	0.93	1.07					
14	25	30		1.0	2.38	2.15	1.64	2.01	1.64	1.23	1.42					
15	25	50		1.0	3.01	2.71	1.71	2.09	1.71	1.40	1.61					
16	25	75		1.0	3.20	2.88	1.84	2.25	1.84	1.43	1.64					
17	30	15		0.5	4.21	2.05	3.39	2.04	3.39	1.68	0.95					
18	30	15		1.0	2.97	3.25	2.69	3.24	2.69	1.28	1.45					
19	30	15		1.5	2.47	3.98	2.23	3.84	2.23	1.16	1.96					
20	30	15		2.0	2.19	4.54	1.94	4.49	1.94	0.88	1.99					
21	30	30		0.5	4.79	2.12	3.42	2.06	3.42	1.95	1.10					
22	30	30		1.0	4.05	3.59	2.89	3.49	2.89	1.62	1.84					
23	30	30		1.5	3.39	4.58	2.58	4.55	2.58	1.31	2.23					
24	30	30		2.0	3.24	5.75	2.04	4.93	2.04	1.22	2.75					
25	30	50		0.5	5.26	2.33	3.86	2.32	3.86	2.13	1.21					
26	30	50		1.0	4.85	4.29	2.93	3.53	2.93	1.76	1.99					
27	30	50		1.5	3.89	5.18	2.73	4.95	2.73	1.51	2.57					
28	30	50		2.0	3.50	6.20	2.21	5.33	2.21	1.33	3.01					

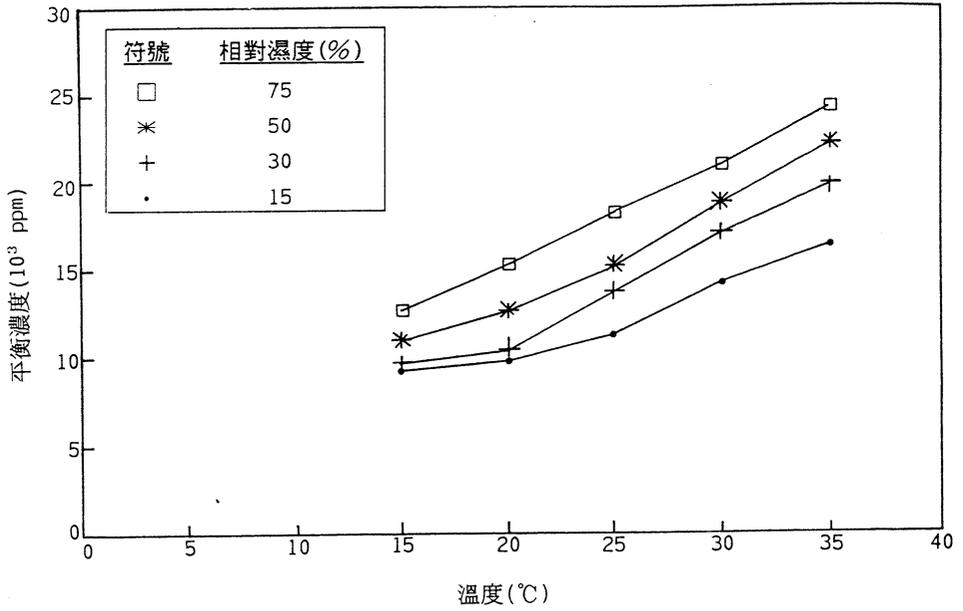


圖 2 固定通風量(11/min)不同相對濕度下純物質甲苯的平衡濃度與溫度關係

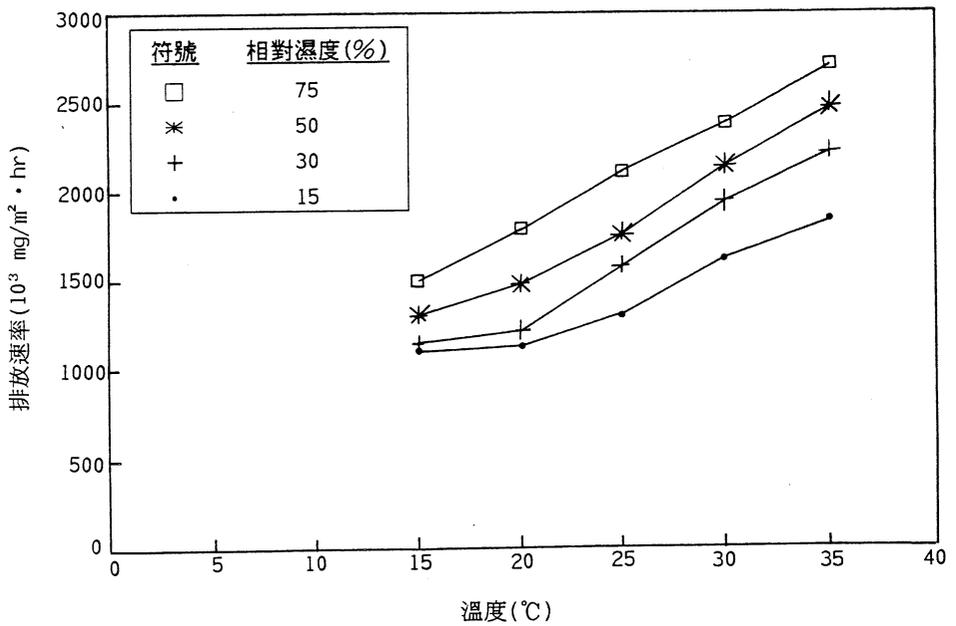


圖 3 固定通風量(11/min)不同相對濕度下純物質甲苯的排放速率與溫度關係

四種混合物質（添加DOP）中各組成分丁酮、甲苯、環己酮排放情形均與前述之三種混合物質情況雷同。三種排放濃度大小在固定通風量(1l/min)、相對濕度(50%)及同一溫度下，亦為丁酮>甲苯>環己酮。且濃度排放值與前述三種物質混合情況相近，故其排放速率亦約略相近。

最後測試之混合物質為PVC 壁紙原料。在相同試驗條件下可得與前述測試情況相似之實驗結果如圖 4 及圖 5。各物種排放速率如圖 5 所示，每上升5°C時丁酮約增加 $1.4 \times 10^5$  mg/m<sup>2</sup>·hr，甲苯增加 $1.1 \times 10^5$  mg/m<sup>2</sup>·hr，環己酮增加僅 $3 \times 10^4$  mg/m<sup>2</sup>·hr，原因為PVC 的加入而於表面產生界面阻力。

綜合以上結果知溫度影響蒸氣壓大小，而蒸氣壓又受混合物組成份影響；影響程度可由圖 6 及圖 7 得知，任何溫度下混合物種愈多，對同一揮發物種而言其蒸氣壓愈少，即排放速率愈低，例如圖 7 中，溫度20°C，通風量1l/min及相對濕度50%時，純物質丁酮排放速率為 $2.05 \times 10^6$  mg/m<sup>2</sup>·hr，但在第四種情況（即PVC壁紙原料）中丁酮之排放速率為 $1.94 \times 10^5$  mg/m<sup>2</sup>·hr，其間相差十倍多。

### 3.2.2 環境濕度對VOC 排放特性之影響

由圖 8 及圖 9 知相對濕度與純物質之平衡濃度及排放速率成正比關係，但呈現飽和函數，因水份會吸收有機物丁酮、甲苯及環己酮，氣體中濕氣愈重則吸收更多溶劑；故有機物質排放速率相對地隨之增加，但其吸收量有一定限度。甲苯排放濃度每提高20%相對濕度約平均增加 2,000ppm，環己酮約平均增加1,000ppm；丁酮則約平均增加5,000 ppm；甲苯排放速率每提高20%相對濕度約平均增加 $3 \times 10^5$  mg/m<sup>2</sup>·hr，環己酮約平均增加 $2 \times 10^5$  mg/m<sup>2</sup>·hr；丁酮則增加約 $6 \times 10^5$  mg/m<sup>2</sup>·hr。由以上數值比較知純物種濃度之排放多寡受相對濕度影響程度（即 $\Delta \text{Conc.} / \Delta \text{RH}$ ）為丁酮>甲苯>環己酮，此因丁酮的溶水性較其它兩者強。

三種混合物質中各組成分甲苯、丁酮及環己酮之平衡濃度與排放速率受相對濕度影響之趨勢均與前述純物質情況相似，隨相對濕度增加約呈飽和函數遞增。各組成份間的排放濃度大小為同一相對濕度下，固定通風量(1l/min)及溫度30°C時，丁酮>甲苯>環己酮，即溶水性強的物種自混合物質中揮發速率較微溶水性物種快，且各物種排放速率均明顯降低，每提高20%相對濕度甲苯約平均增加 $1.2 \times 10^5$  mg/m<sup>2</sup>·hr，環己酮平均增加 $6 \times 10^4$  mg/m<sup>2</sup>·hr；而丁酮則平均增加 $2 \times 10^5$  mg/m<sup>2</sup>·hr；四種混合物質中各組成分受相對濕度影響程度大抵均與三種混合物質情況相同。

PVC 壁紙原料在相同試驗條件下，可得與前述之混合情況相似之實驗結果如圖10及圖11。各物種排放速率由圖11知每提高20%相對濕度甲苯約平均增加 $3 \times 10^4$  mg/m<sup>2</sup>·hr，環己酮平均增加 $2 \times 10^4$  mg/m<sup>2</sup>·hr，丁酮則平均增加 $7 \times 10^4$  mg/m<sup>2</sup>·hr，各測值明顯降低乃因原料表面形成一界面阻力。

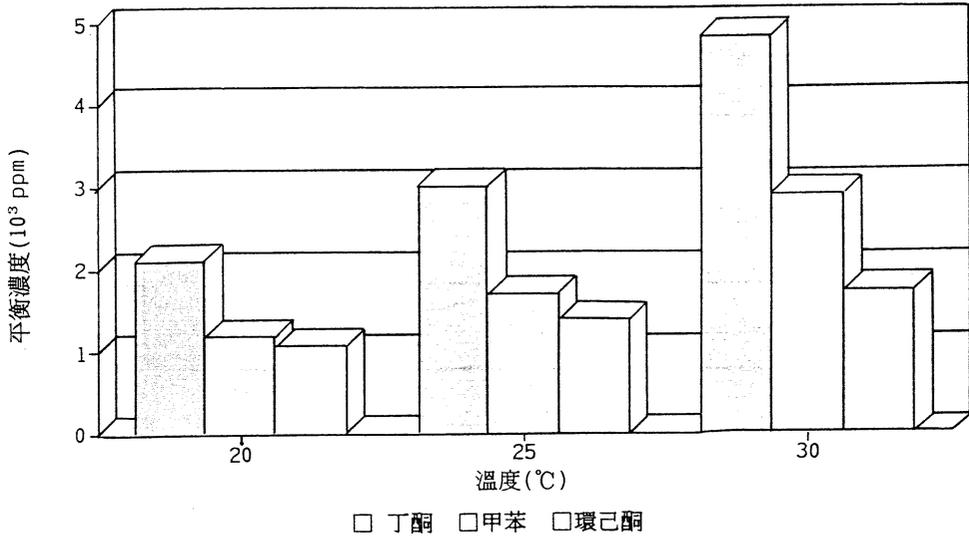


圖 4 固定通風量(11/min)，相對濕度(50%)下混合物質(丁酮+甲苯+環己酮+DOP+PVC)中個別物種的平衡濃度與溫度關係

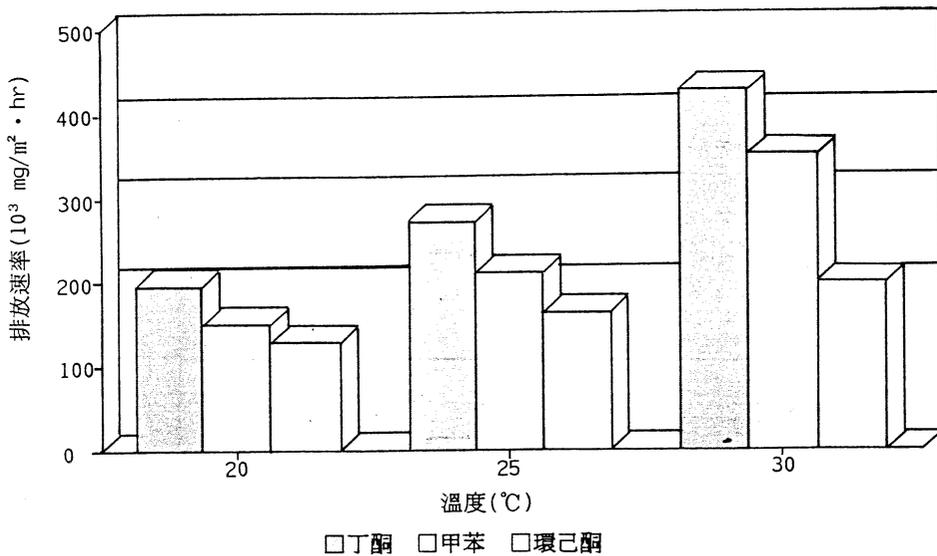


圖 5 固定通風量(11/min)，相對濕度(50%)下混合物質(丁酮+甲苯+環己酮+DOP+PVC)中個別物種的排放速率與溫度之關係

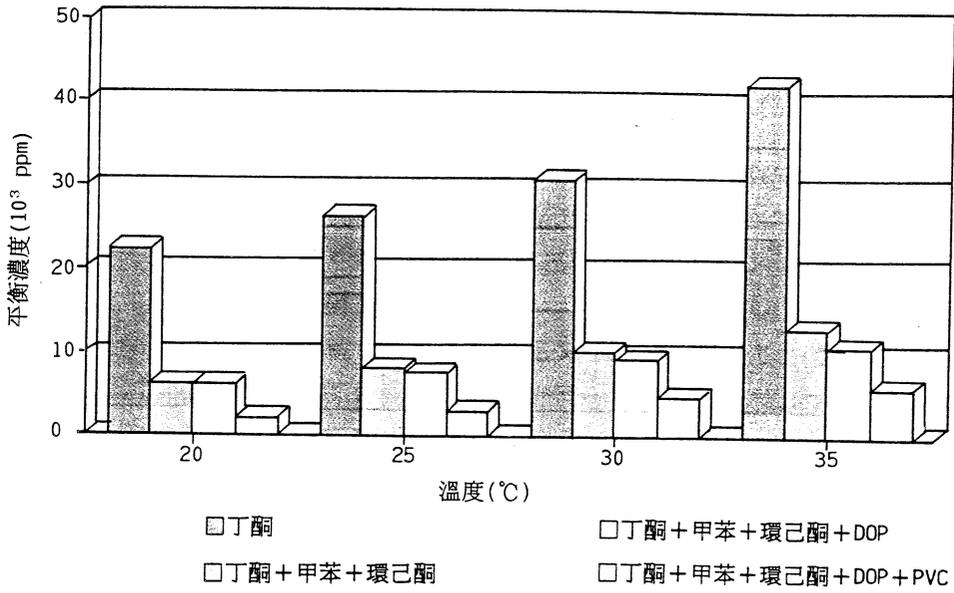


圖 6 固定通風量(11/min)，相對濕度(50%)下各種混合情況中丁酮的平衡濃度與溫度之關係

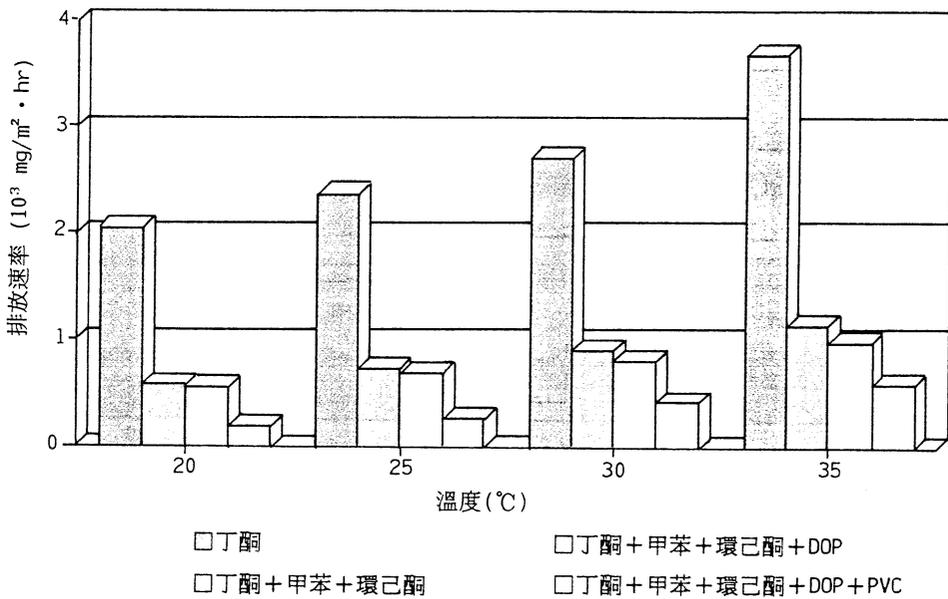


圖 7 固定通風量(11/min)，相對濕度(50%)下各種混合情況中丁酮的排放速率與溫度之關係

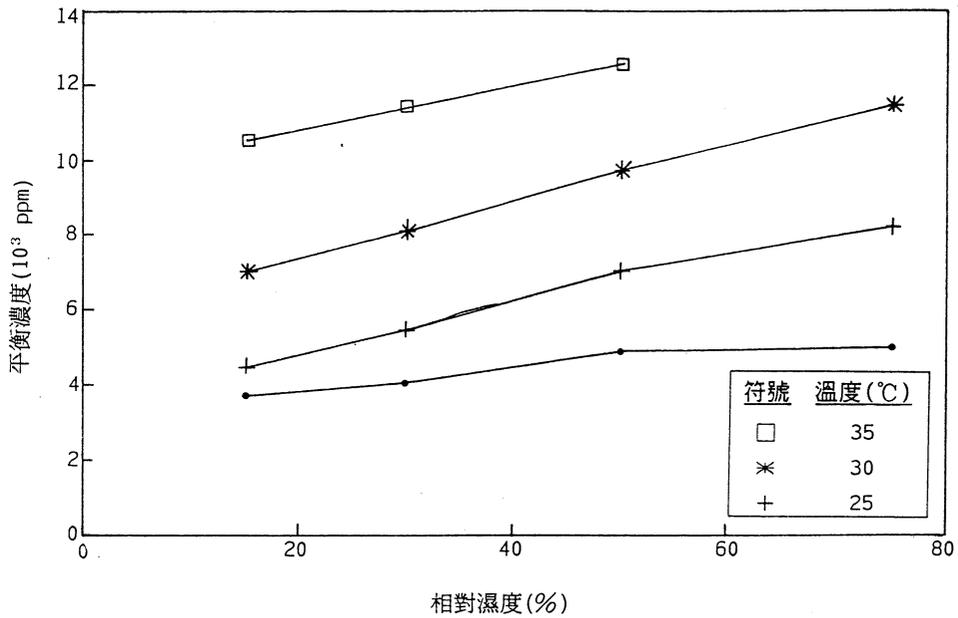


圖 8 固定通風量(11/min)不同溫度下純物質環己酮的平衡濃度與相對濕度之關係

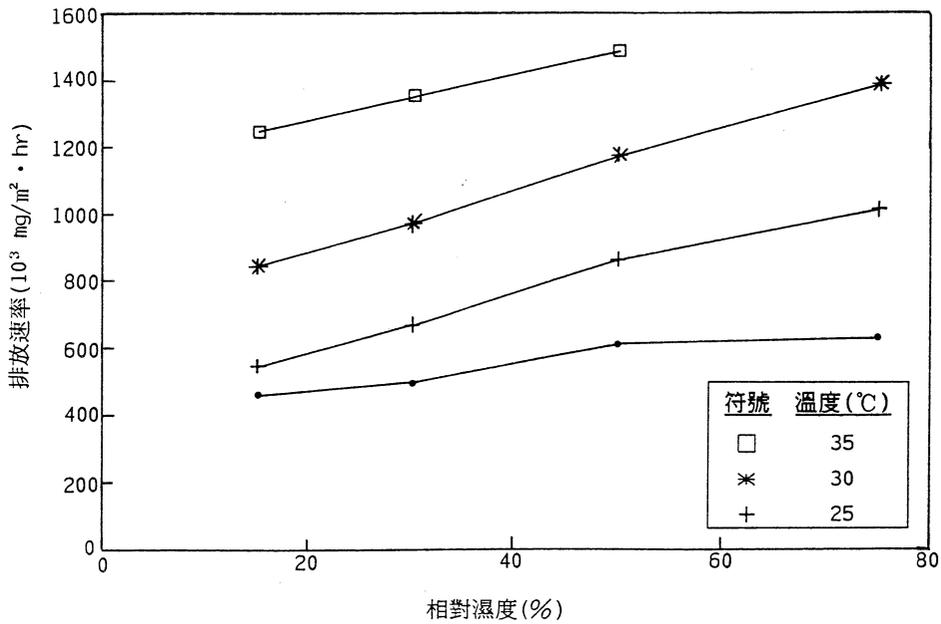


圖 9 固定通風量(11/min)不同溫度下純物質環己酮的排放速率與相對濕度之關係

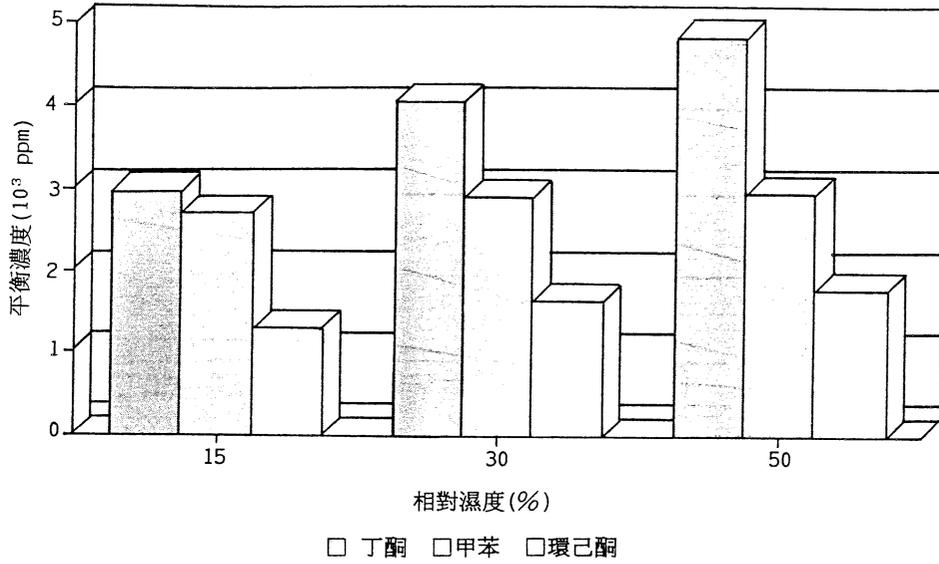


圖 10 固定通風量(11/min)，溫度(30°C)下混合物質(丁酮+甲苯+環己酮+DOP+PVC)中個別物種的平衡濃度與相對濕度之關係

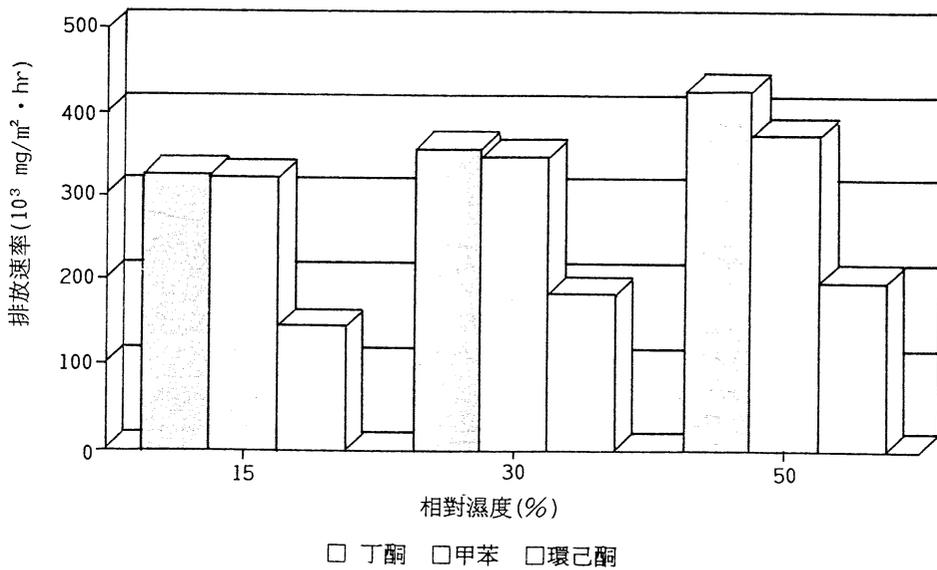


圖 11 固定通風量(11/min)，溫度(30°C)下混合物質(丁酮+甲苯+環己酮+DOP+PVC)中個別物種的排放速率與相對濕度之關係

綜合以上結果知相對濕度影響物種之排放濃度，且易溶水性的物種相對之排放速率愈高。混合物質中各物種之平衡濃度受該混合液組成份左右；影響程度可由圖12及圖13得知，任何相對濕度下混合物質愈多，對同一揮發性物種而言其排放速率愈低，例如圖13中，溫度30°C、通風量1l/min及相對濕度75%時，純物質環己酮排放速率 $1.39 \times 10^6$  mg/m<sup>2</sup>·hr，而第四種情況（PVC壁紙原料）中環己酮之排放速率為 $2.2 \times 10^5$  mg/m<sup>2</sup>·hr，兩者相差6.4倍。

### 3.2.3 通風量對VOC 排放特性之影響

由實驗結果知甲苯濃度每增加0.5l/min通風量平均約降低 13,000ppm，環己酮平均降低3,000ppm；丁酮平均降低 18,500ppm。而甲苯排放速率每增加0.5l/min通風量平均約增加 $4 \times 10^5$  mg/m<sup>2</sup>·hr，環己酮平均增加 $2 \times 10^5$  mg/m<sup>2</sup>·hr；丁酮則平均增加 $6.5 \times 10^5$  mg/m<sup>2</sup>·hr，如圖14及圖15所示。

三種混合物質中各組成份在不同溫度、相對濕度下平衡濃度及排放速率與通風量之關係，實驗所得趨勢亦與前述之情況相似。由實驗知甲苯排放濃度每增加0.5l/min通風量平均約降低2,000ppm，環己酮平均降低700ppm；丁酮約降低2,500ppm，而甲苯排放速率每增加0.5l/min通風量平均增加 $2 \times 10^5$  mg/m<sup>2</sup>·hr，環己酮平均增加 $6 \times 10^4$  mg/m<sup>2</sup>·hr；丁酮則平均增加 $3 \times 10^5$  mg/m<sup>2</sup>·hr。

至於四種物質混合及PVC 壁紙原料等兩種情況之實驗結果也均與上述情況相似，PVC壁紙原料中各物種在不同溫度、相對濕度下平衡濃度及排放速率與通風量關係表示如圖16及圖17所示。

綜合以上結果知同一物種在各種不同混合情況中其平衡濃度、排放速率與通風量關係均有一致之趨勢；即通風量增大，排放速率亦增強，此由於通風會稀釋原來之VOC濃度，致使其排放濃度降低，但導致氣液界面間之濃度差增大；為達平衡機制，物質排放速率自然增大。甲苯排放情形如圖18及圖19所示。

## 3.3 環境因子影響VOC 排放模式之建立

為合併探討溫度、濕度及通風量對污染物排放之影響，Matthews等於<sup>3,4</sup>曾對一無人居住之實驗房間（含臥室、起居室、盥洗室、廚房），探討各種環境因子對甲醛濃度分佈之影響，並由理論推導出如表9中之排放濃度模式。

由3.1節所得之實驗數據以 SAS<sup>6</sup> 程式系統對該模式作非線性統計迴歸分析(NLIN)，以期獲得最佳預測相關係數。

表9為環境因子影響VOC濃度排放之半經驗式預測結果，迴歸係數分別為Cstd、T<sub>1</sub>、R<sub>1</sub>、K<sub>B</sub>及ACH<sub>0</sub>。由表9可知各物種迴歸後的相關係數均大於0.95。其中係數Cstd乃表示各物種在標準狀態下（273°，50%相對濕度）之濃度值，迴歸結果得Cstd值隨物種混合情況而異，且丁酮>甲苯>環己酮；隨著物質混合種類增多而遞減，此與前述之VOC 排放特性一樣。Cstd值亦落在實驗測值範圍內。

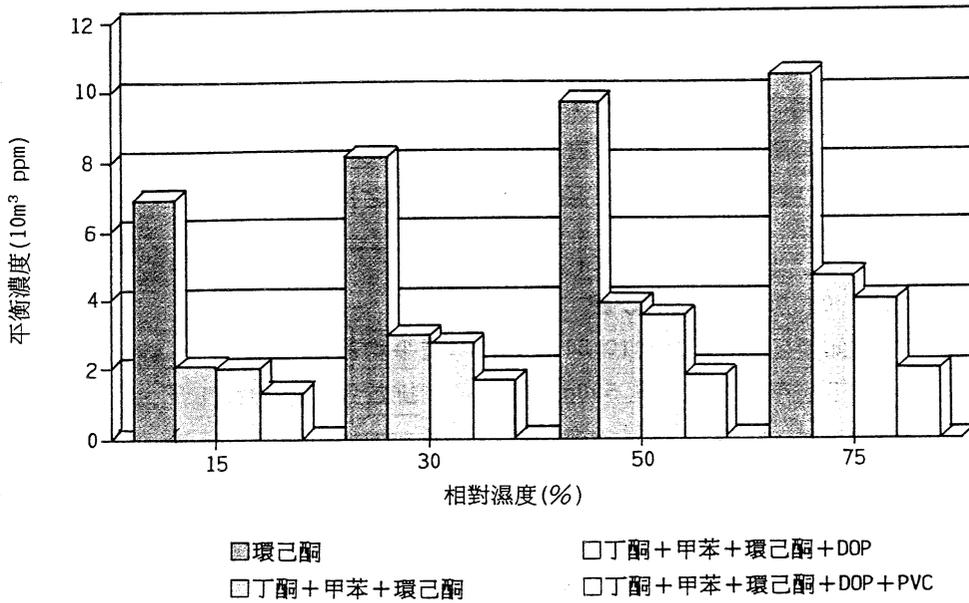


圖 12 固定通風量(11/min)，溫度(30°C)下各種混合情況中環己酮的平衡濃度與相對濕度之關係

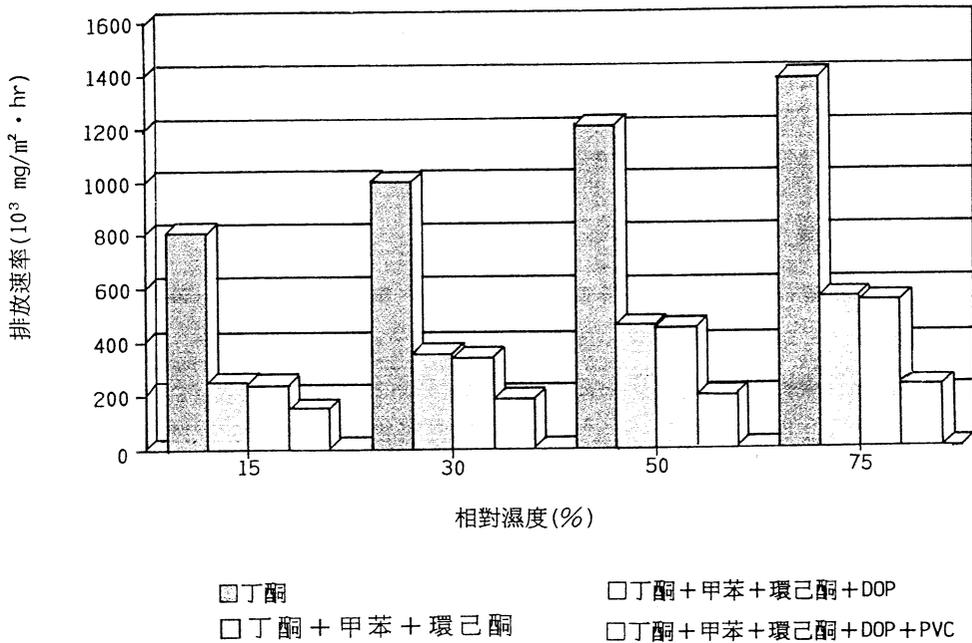


圖 13 固定通風量(11/min)，溫度(30°C)下各種混合情況中環己酮的排放速率與相對濕度之關係

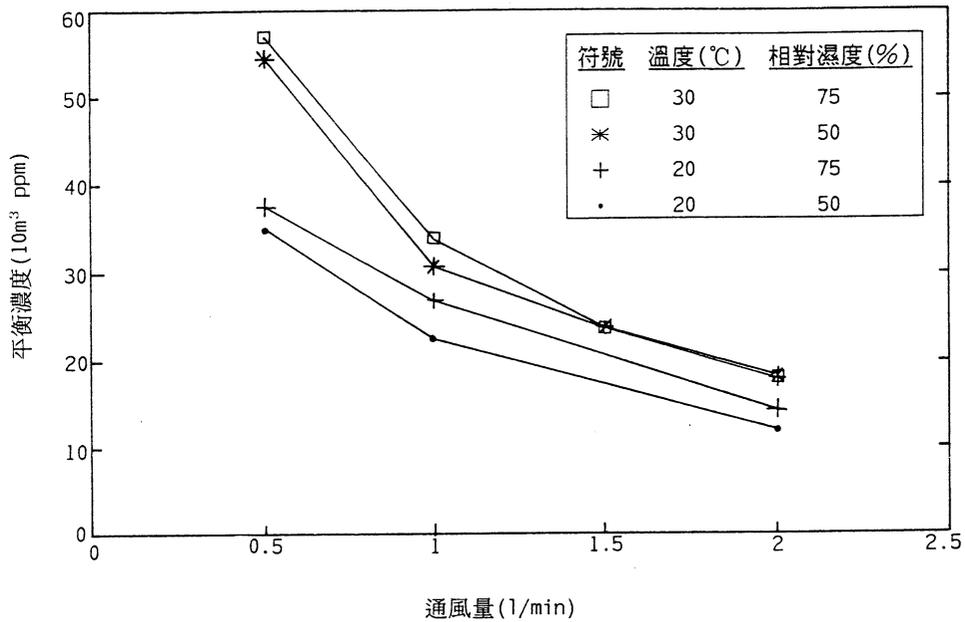


圖 14 不同溫度，相對濕度下純物質丁酮的平衡濃度與通風量之關係

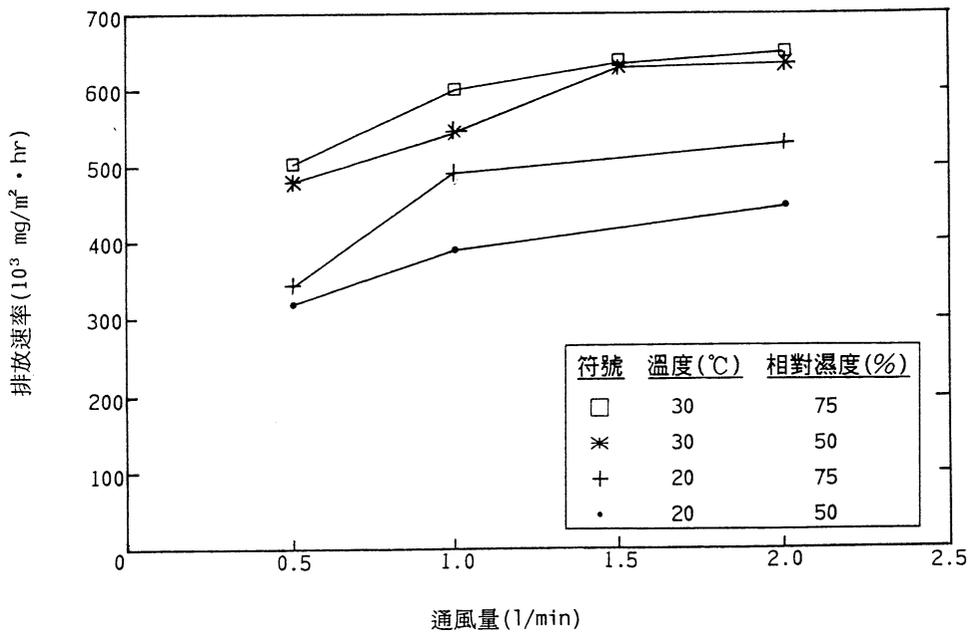


圖 15 不同溫度，相對濕度下純物質丁酮的排放速率與通風量之關係

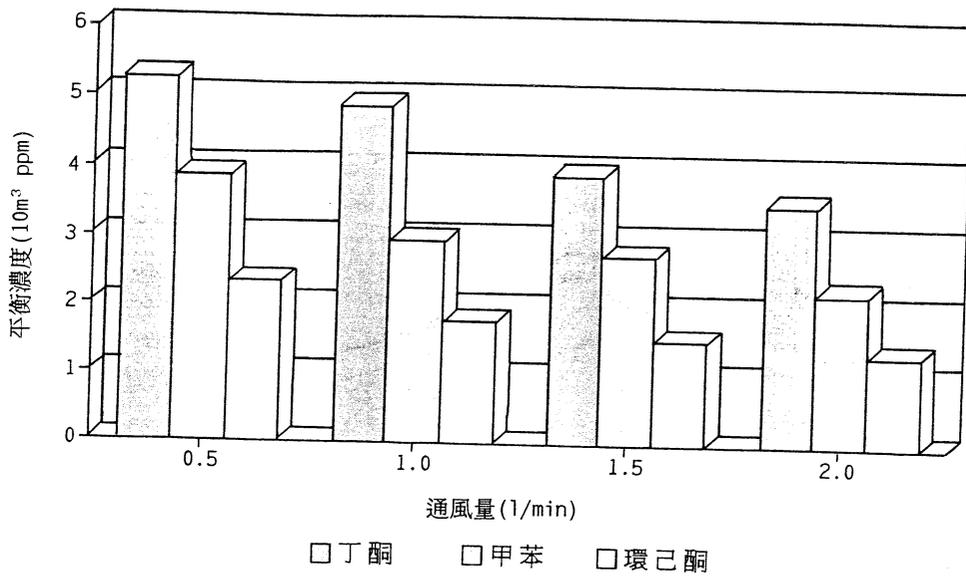


圖 16 固定溫度(30°C)，相對濕度(50%)下混合物質(丁酮+甲苯+環己酮+DOP+PVC)中個別物種的平衡濃度與通風量之關係

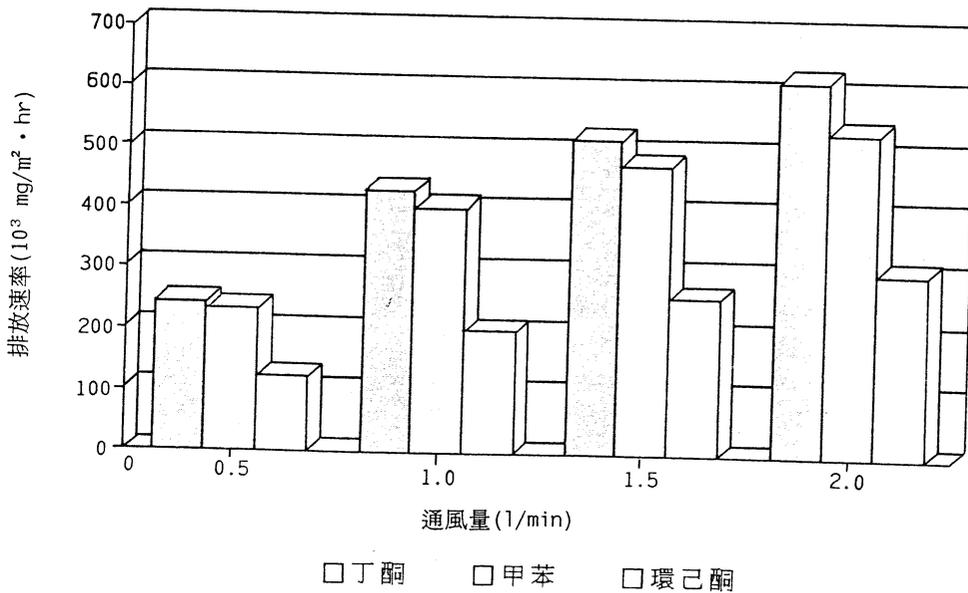


圖 17 固定溫度(30°C)，相對濕度(50%)下混合物質(丁酮+甲苯+環己酮+DOP+PVC)中個別物種的排放速率與通風量之關係

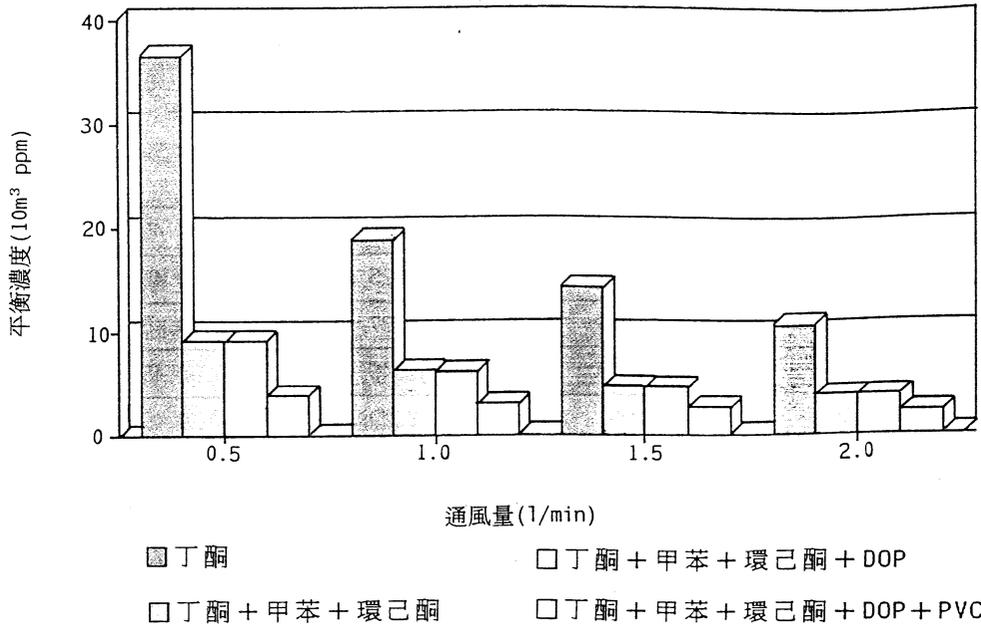


圖 18 固定溫度 (30°C), 相對濕度 (50%) 下各種混合情況中甲苯之平衡濃度與通風量關係

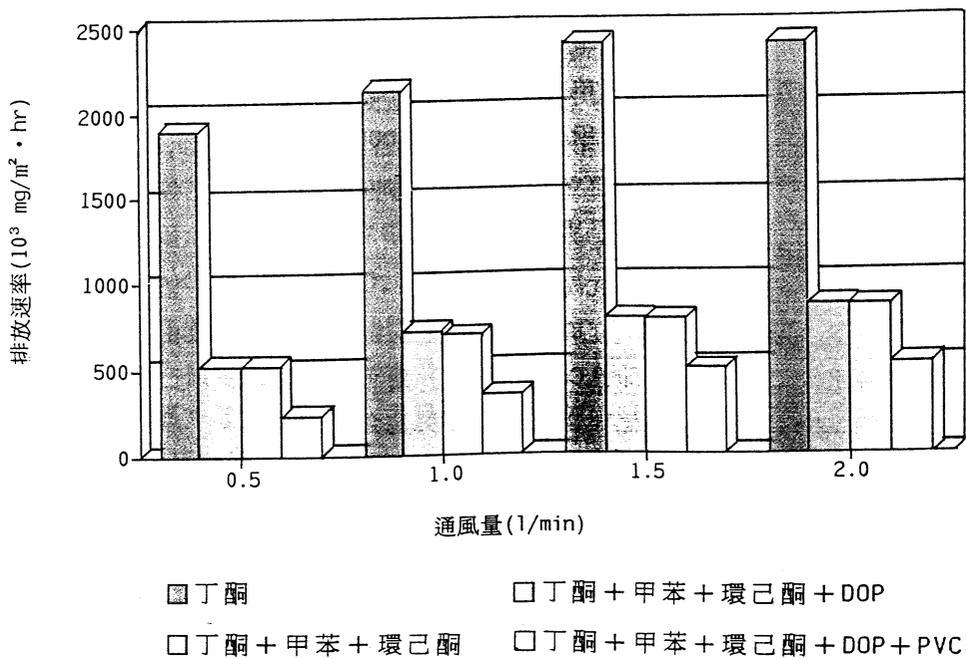


圖 19 固定溫度 (30°C), 相對濕度 (50%) 下各種混合情況中甲苯之排放速率與通風量關係

表 9 環境因子影響VOC濃度排放之模式預測

物種		濃度 單位	係數	Cstd	T <sub>1</sub>	R <sub>1</sub>	K <sub>B</sub>	ACH <sub>0</sub>	γ <sup>2</sup>
				(ppm)	(K)		(m/sce)	(l/min)	
純 物 質	丁 酮	10 <sup>4</sup> ppm		15000	6052	0.1881	0.00248	0.45	0.986
	甲 苯			9000	7114	0.2925	0.00232	0.45	0.956
	環己酮			2000	7534	0.3737	0.00221	0.45	0.972
混 合 物 質 一	丁 酮	10 <sup>4</sup> ppm		4000	6052	0.4346	0.00245	0.45	0.984
	甲 苯			2000	7114	0.5129	0.00230	0.45	0.958
	環己酮	10 <sup>3</sup> ppm		1000	7534	0.4913	0.00213	0.45	0.952
混 合 物 質 二	丁 酮	10 <sup>4</sup> ppm		4000	6052	0.4526	0.00246	0.45	0.945
	甲 苯			2000	7114	0.5141	0.00229	0.45	0.957
	環己酮	10 <sup>3</sup> ppm		1000	7534	0.4821	0.00218	0.45	0.954
混 合 物 質 三	丁 酮	10 <sup>3</sup> ppm		1000	6052	0.3278	0.00164	0.45	0.984
	甲 苯			750	7114	0.1818	0.00154	0.45	0.971
	環己酮			500	7534	0.3719	0.00147	0.45	0.949
$\text{conc.} = \text{Cstd} \times (\exp(-T_1 \times (1/(T+273) - 1/273))) \times (\text{RH}/50)^{R_1} \times (0.0196 \times K_B + 0.0000167 \times \text{ACH}_0) / (0.0196 \times K_B + 0.0000167 \times \text{ACH})$									

註：混合物質一：(丁酮+甲苯+環己酮)

混合物質二：(丁酮+甲苯+環己酮+DOP)

混合物質三：(丁酮+甲苯+環己酮+DOP+PVC)

$\gamma^2$  (uncorr) = (uncorrectd sum of squares for regression) / (total uncorrectd sum of squares)

T<sub>1</sub> 值表示溫度因子對各種VOC 濃度影響程度，迴歸結果得T<sub>1</sub> 值大小分別為為丁酮 < 甲苯 < 環己酮，由該模式知濃度與溫度成指數函數遞增關係，故由 T<sub>1</sub> 值可反應出溫度對各物種濃度之影響程度（即ΔConc./ΔT）為丁酮>甲苯>環己酮，此關係與前述之VOC 排放特性一致；且 T<sub>1</sub> 值與物質有關而與混合情況無關。

由表中可看出R<sub>1</sub> 值並無一致性；隨物質種類及混合情況不同而異，故濃度值與R<sub>1</sub> 無關，R<sub>1</sub> 值只視為相對濕度項之無因次迴歸係數。

ACH<sub>0</sub>值即在標準狀態下之通風量，迴歸結果約等於 0.45l/min。本研究之通風量範圍為0.5~2l/min之間。

由上述知半經驗模式可同時迴歸出經驗式所有之係數，且其最大優點乃模式中增加質傳係數 $K_B$ 項（指氣液間之質傳），對於本研究可一併探討在多種物質混合情況下各物種之質傳特性。

由表知 $K_B$ 值迴歸結果為：質傳係數與物質種類有關：且丁酮之 $K_B$ 值 $>$ 甲苯 $>$ 環己酮，例如：純物質實驗中， $K_B$ （丁酮） $= 0.00248\text{m/sec}$ ， $K_B$ （甲苯） $= 0.00232\text{m/sec}$ ， $K_B$ （環己酮） $= 0.00221\text{m/sec}$ 。但 $K_B$ 值變化與物種之混合情況無明顯關係，例如：三種混合物質中， $K_B$ （丁酮） $= 0.00245\text{m/sec}$ ， $K_B$ （甲苯） $= 0.00230\text{m/sec}$ ， $K_B$ （環己酮） $= 0.00213\text{m/sec}$ ；四種混合物質（添加DOP）中， $K_B$ （丁酮） $= 0.00246\text{m/sec}$ ， $K_B$ （甲苯） $= 0.00229\text{m/sec}$ ， $K_B$ （環己酮） $= 0.00218\text{m/sec}$ ，即各物種之 $K_B$ 值並不會因多添加其他物種而明顯改變，就不同混合情形對同一物種而言，其質傳係數幾乎相近。至於為何混合情況中對同一物種而言，其排放速率會低於該單一物種情況，原因可能排放速率受氣液間之蒸氣壓差影響較大，而 $K_B$ 則影響較小。

由表9可發現：含PVC的多種混合物質中各物種之 $K_B$ 值遠小於純物質情況，約為0.66倍。根據James H. Smith et al<sup>5</sup>. (1980)研究界面阻力對高揮發性有機物之影響知苯在界面阻力（0.003% Triton X-100）作用下，其自水中蒸發之質傳係數約降為0.55~0.67倍。故本研究中考慮界面阻力影響時，質傳係數需獨立討論。

## 五、結 語

1. 建立實驗室環境因子（溫度、相對濕度及通風量）對物種丁酮、甲苯、環己酮的濃度（或蒸氣壓）與排放速率測值，可補足一般熱力學中只考慮溫度對物種濃度變化之飽和蒸氣壓表；可進一步了解濕度及通風量對物種蒸氣壓的影響。
2. 環境溫度對VOC濃度及排放速率呈指數函數遞增關係。濃度對溫度變化率 $\Delta \text{Conc.}/\Delta T$ 為丁酮 $>$ 甲苯 $>$ 環己酮，即低沸點者較易揮發。上述趨勢與物種混合情況無關。實驗結果知，通風量固定下，純物種丁酮每升高 $5^\circ\text{C}$ 排放速率平均增加 $6 \times 10^5 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{hr}$ ，甲苯平均增加 $4 \times 10^5 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{hr}$ ；環己酮則平均增加 $3 \times 10^5 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{hr}$ 。
3. 環境濕度對VOC濃度及排放速率呈飽和函數遞增關係。濃度對濕度變化率 $\Delta \text{Conc.}/\Delta \text{RH}$ 為丁酮 $>$ 甲苯 $>$ 環己酮，即水性强者較易揮發出與空氣中水氣結合。上述趨勢與物種混合情況無關。實驗結果知，通風量固定下，純物種丁酮每升高20%相對濕度排放速率約平均增加 $6 \times 10^5 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{hr}$ ，甲苯平均增加 $3 \times 10^5 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{hr}$ ；環己酮則平均增加 $2 \times 10^5 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{hr}$ 。
4. 通風量增大稀釋原來VOC蒸發濃度，導致氣液界面間濃度差增大，促使排放速率增強。由實驗結果知，純物種甲苯在同一溫度、相對濕度下排放速率每增加0.51/min風增加 $6.5 \times 10^5 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{hr}$ 。

5. 環境因子影響VOC 濃度排放的模式建立如下

半經驗式：

$$\text{Conc.} = \text{Cstd} \times \frac{e^{-T_1[(1/T+273)-1/273]} \cdot \left(\frac{\text{RH}}{50}\right)^{R_1} \cdot (1.963 \times 10^{-3} \times K_B + 1.667 \times 10^{-5} \times \text{ACHo})}{1.963 \times 10^{-3} \times K_B + 1.667 \times 10^{-5} \times \text{ACH}}$$

( $r^2 \geq 0.950$ )

係數為  $T_1(^{\circ}\text{K})$ 、 $R_1$ 、 $\text{ACHo}(\text{l}/\text{min})$ 、 $K_B(\text{m}/\text{sec})$ 、 $\text{Cstd}(\text{ppm})$

$\text{conc}(\text{ppm})$ 、 $T(^{\circ}\text{C})$ 、 $\text{RH}(\%)$ 、 $\text{ACH}(\text{l}/\text{min})$

該模式具有理論說服力，且能充分解釋各迴歸係數特性，並能探討質傳係數問題，故應用程度較廣。該式僅適用於本研究探討之物質種類如丁酮、甲苯及環己酮，原因為模式中之大部份係數值均因物質種類及物種混合情況不同而改變。

6. 質傳係數 $K_B$  (氣液間之質傳) 與物質種類有關。迴歸結果知：丁酮之 $K_B$ 值 > 甲苯 > 環己酮，純物質丁酮之 $K_B = 0.00248\text{m}/\text{sec}$ ，甲苯之 $K_B = 0.00232\text{m}/\text{sec}$ ，而環己酮之 $K_B = 0.00221\text{m}/\text{sec}$ 。但單一物種之 $K_B$ 值與混合情況中該同一物種之 $K_B$ 值並無明顯變化，幾乎相近。混合情況中對同一物種而言其排放速率會低於單一物種情況，原因為排放速率受氣液間之蒸氣壓差影響較大，而 $K_B$ 影響較小。

7. 對於添加PVC 聚合物而形成溶液之界面阻力作用，由模式迴歸得該溶液中各物種之 $K_B$ 值均遠小於同一物種之單一物質情況，約為0.66倍。故界面阻力影響物種氣液間的質傳係數甚鉅。

## 六、參考文獻

1. Bruce A. Tichenor. Indoor Air Sources: Using Small Environmental Test Chambers To Characterize Organic Emissions From Indoor Materials and Products. EPA-600/8-89/074 (NTIS NO. PB90-110131), U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, Aug, 1989.
2. 王茂齡，輸送現象，高立圖書出版，民國76年7月。
3. Matthew, T.G.; Thompson, C.V., Wilson, D.L.; Hawthorne, A.R., Air Velocity inside Domestic Environments: An Important Parameter in the Study of Indoor Air Quality and Climate, DE88-004331, 1988.
4. Matthews, T.G., Fung, K.W.; Tromberg, B.J. and Hawthorne, A.R., Impact of Indoor Environmental Parameters on Formaldehyde Concentrations in Unoccupied Research Houses, JAPCA, Vol.36, No.11, pp.1244~1249, 1986.
5. James H. Smith, David C. Bomberger, Jr., and Daniel L. Haynes, Prediction

of the Volatilization Rates of High-Volatility Chemicals from Natural Water Bodies Environmental Science & Technology, Volume 14, Number 11, pp. 1332~1337, NOV.1980.

6. 彭昭英，SAS 與統計分析，儒林圖書出版，民國80年1月。