

# 嘉南藥理大學 107 年度 研究計畫成果報告

計畫名稱：學校學習場域室內空氣品質調查與改善

子計畫 2-通風換氣對教育學習場所室內空氣品質改善  
之探討

■重點(整合型)研究計畫

□與業界廠商合作之研究計畫

執行期間：107年5月23日至107年12月31日

總計畫主持人：賴振立 教授

本(子)計畫主持人：黃小林 教授

中華民國 107 年 12 月 31 日

## 摘要

依「職業安全衛生設施規則」312 條規定作業場所必須提供足夠的換氣量，以調節新鮮空氣、溫度及降低有害物濃度。對於學習之教育場所而言，良好的通風換氣對於學生身體健康與學習具有正面助益，教室通風不良，二氧化碳濃度過高，易產生頭痛、嗜睡、反射減退、倦怠等症狀，使學習效率大打折扣，且教室內有污染物存在亦會累積影響師生健康。因此本研究之目的為探討教室不同的通風情形下之整體換氣性能，藉以評估其合理容許室內師生人數，並探討通風不佳之改善方法。本專題選擇職安大樓 O205 教室作為探討通風換氣之空間，利用二氧化碳分析儀及 CO<sub>2</sub> 鋼瓶氣體，採取濃度衰減法求得各通風條件下之空氣交換率-ACH 值。研究結果顯示五種通風條件下之 ACH 值為 1.045~5.324，通風最差的狀況為冷氣、風扇、門和窗全關；通風最佳的條件為冷氣、風扇、門和窗全開。教室內常見開冷氣或風扇，換氣量遠低於職業安全衛生設施規則之規範，但開門或窗後，換氣量則有顯著提升，但還是不足。若以職業安全衛生設施規則之通風換氣標準推算教室之各通風條件下的容許存在人數，通風最差及最佳狀況之容許人數分別 15 人和 47 人。顯示常見上課人數超過 50 人都已超過合理容許人數。建議限制上課人數低於 47 人或裝設抽風機，當上課人數多時可以開啟引入外氣，並配合天花板之風扇來加速室內外換氣，以確保學習場所教室內的空氣品質。

關鍵字：二氧化碳、濃度衰減法、空氣交換率。

## 一、前言

空氣品質與民眾生活密不可分，隨著生活品質的升高，群眾重視環境空氣品質(Indoor Environment Quality, IEQ)好壞的意識逐漸提高，例如細懸浮微粒(particulate matter, PM<sub>2.5</sub>)等相關報導、研究已成為民眾關注的趨勢；但隨著社會型態的改變，民眾大部分的時間幾乎待在室內，因此室內之空氣環境顯得更為重要。台灣經濟蓬勃發展，建築空間的需求也越來越大，過多的建築物也造成許多

建築間的距離過短，大樓繁多使建築不易採取自然通風換氣，因此大量仰賴空調，而若未妥善清潔保養空調系統，使 IAQ 不佳的情況下，將造成人體罹患「病態建築症候群」。

研究顯示發生「病態建築症候群」症狀係指人員待在「空調型環境」，產生有關非特異性症狀包括氣喘、過敏反應、咳嗽、打噴嚏、嗜睡等，若人員離開該空間一段時間後，其症狀會減輕。其造成原因廣泛，包含室內存在之污染源如揮發性有機化合物(Volatile Organic Compounds, VOCs)、二氧化碳、生物性污染物及溫度等。而目前引起病態建築症候群原因未明確定義，美國環保署(Environmental Protection Agency, EPA)大致將起因分為下列幾項(社團法人台灣病態建築診斷協會，2013)：(1)不充分的通風換氣、(2)來自室內污染源的化學物質、(3)來自室外污染源的化學物質、(4)生物性污染。

環保署近年研究顯示，造成 IAQ 不佳的因素主要有 3 項(丘建宏，2010)：(1)公共場所人員使用密度高、空調設備配置不當及通風量不足等，因此造成二氧化碳超標等危害。(2)過度裝修且裝修後未確實有充足的通風，造成有機溶劑等危害性化學物品濃度增高，對人體有害。(3)台灣為高溫高濕國家，有助於細菌、真菌類增長。國內、外雖已有相當多關於建築、室內空調系統之通風研究，但在實際配置室內空調時卻沒有對空間特性加以分析再做設計，因此造成許多場所室內環境不舒適性、污染物超標等危害，後續產生需考慮工程改善等問題。

為了確保空氣品質、人體舒適性或是特殊空間的通風排氣，近年來利用計算流體力學(CFD)來掌握許多影響因子進行模擬分析，探討流場的分布狀況已愈來愈廣泛。許多文獻也利用 CFD 模擬，針對影響通風因素的因子進行研究，如室內配置、進出口位置以及室內流場(溫度、壓力、風速)等(陳俊國，2001)，並有效提出改善方案。CFD 是一個現今廣泛用於預測流體、熱傳導、化學作用等的模擬程式，其遵守著三大定律：質量守恆、動量守恆、能量守恆，藉由數值解析將複雜物理現象以方程組模擬出實際變動的現象(陳孟甫，2009)，以解決實驗耗時耗經費的問題。



許多建築因為在空調設計規劃過程中沒有加以分析室內流場的狀況，或後續變更了建築物使用類型，造成門窗開口位置、幾何形狀不適合當下的使用類別，因此有室內通風不良及空氣品質不佳的問題。國內教育場所的教室或活動空間多使用無引入外氣換氣的窗型冷氣、分離式冷氣及箱型冷氣，在通風不良的情形下，室內污染物會不斷累積，對於室內抵抗力較弱的學生容易生病，且學習成效也會降低。因此若能在學校建築規劃的通風設計上，除了調查基地位置、常年風向外，也加入 CFD 模擬其各種門窗開口之自然通風或空調之機械通風等程序，就可減少未來可能面臨因通風不良而造成 IAQ 不佳等問題。

有鑑於教育場所空氣品質對於學生學習之重要性，因此本研究之目的為將進行學習場所的空氣污染物採樣，以及進行通風換氣效率之量測評估通風換氣效果。最後提出可行的通風換氣方式來維持良好學習場域之室內空氣品質。預期研究成果可以提供教育的學習場域作為室內環境通風換氣的設計與改善的參考，對於學生的學習效率提升與健康的防護有充分的保障，而對於教育單位對學習場域的 IAQ 維護管理上將有很大的助益。

## 二、文獻回顧與探討

### 2.1 室內空氣品質重要性

從 1850 年衛生革命開始超過百年期間，室內空氣一直被認定為主要的環境因素，直到 1960 年左右，室外環境問題嚴重，室外空氣成為主要人們關心議題 (Sundell, 2009)；而後主要的環境關心議題如室外空氣品質、能源利用及永續建築，卻非室內空氣品質；但卻有越來越多的證據顯示，暴露於不良室內空氣品質為民眾發病率和死亡率增加的原因 (Sundell, 2004)。此外，許多證據顯示室內空氣品質對許多疾病非常重要，包括過敏、其他過敏反應、呼吸道感染和肺癌等。無論是從公共衛生和國家經濟觀點來看，室內空氣品質與健康絕對是值得大家關注的議題 (Sundell, 2009)。

空氣品質取決於在空氣中的污染物負荷量 (Mopuang et al., 2006)，室內空氣



為一複雜的混合物，其包含有生物氣膠，例如真菌、細菌和過敏原以及非生物微粒，包括從各種燃燒過程的產物(Hargreaves et al., 2003)。人們約有 90% 的時間處於室內微環境，若在通風不良的情形下，易使室內活動人員暴露到化學及生物污染物及可能致癌的物質，可能會增加非特異性呼吸道和神經學症狀、過敏、哮喘和肺癌的風險(Dales et al., 2008)。室內環境中常見存在的空氣污染物包括：甲醛、燃燒氣體、二氧化碳、臭氧、微生物、氬氣、懸浮微粒、菸害、揮發性及半揮發性有機物質等(室內空氣品質資訊網，2018)。

近年來我國非常重視 IAQ，為保護國人健康確保室內空氣品質，行政院環保署已於 100 年 11 月 23 日立法通過「室內空氣品質管理法」，在 101 年 11 月 23 日訂定發布「室內空氣品質管理法施行細則」、「室內空氣品質標準」、「室內空氣品質維護管理專責人員設置管理辦法」、「室內空氣品質檢驗測定管理辦法」、「違反室內空氣品質管理法罰鍰額度裁罰準則」等 5 項法規命令配合室內空氣品質管理法的施行，並於 103 年 1 月及 106 年 1 月訂定公告「應符合室內空氣品質管理法之第一、二批公告場所」(室內空氣品質資訊網，2018)。我國政府透過室內空氣品質法令之訂定與執行，推動改善及維護室內空氣品質確保國人身體健康，展現國家對於 IAQ 議題的重視。

## 2.2 教育場所常見之空氣污染物

### 2.2.1 二氧化碳

二氧化碳是人類呼吸的代謝產物，所以室內二氧化碳的主要來源是人員呼吸所貢獻，當室內人員密度過高或是換氣效率不佳時，容易造成二氧化碳濃度累積，同時其他的污染物濃度也會相對地提高。因此，二氧化碳被視為室內空氣品質良窳的指標，當二氧化碳濃度過高時，會有頭痛、嗜睡、反射減退、倦怠等症狀，也會刺激呼吸中樞引起呼吸困難等感覺，因此若室內二氧化碳濃度過高，會使學生學習效率降低(室內空氣品質資訊網，2018)。

### 2.2.2 懸浮微粒



一般情況下，室內微粒排放包含新產生的微粒及之前已沈積而重新再揚起的微粒，其與振動、濕度、溫度、微粒積累、氣流速度等有關(Batterman, 2001)。室內細微粒主要來自燃燒、光化學反應、和氣體的轉換；而室內粗微粒主要是從機械的程序產生，包括研磨、破壞和材料的磨損及粉塵的再揚起(Hargreaves et al., 2003)。Kagi et al. (2007)指出辦公室或住宅使用的印表機是室內空氣污染的來源，其不僅會產生揮發性有機化合物和微粒，也會產生超細微粒和其它污染物。Blondeau et al. (2005)亦指出考量微粒粒徑 0.3-15  $\mu\text{m}$  之範圍，學校室內與室外微粒數的降低為粒徑的函數，在粒徑 0.3~0.4  $\mu\text{m}$  範圍的微粒數與粒徑 7.5-10  $\mu\text{m}$  範圍的微粒數相差 104 等級，而大於 10  $\mu\text{m}$  之微粒數則是每公升很少超過幾百顆，這顯示室內較小的微粒濃度隨著室外小微粒濃度而變化，然而大微粒之室內、室外相關性則不明顯。尤其當教室有人使用時，上下課過程中可觀察到尖峰微粒濃度，這可能是由室內人員本身產生、教學活動產生(例如黑板粉塵)或由於室內人員活動導致已沉積的微粒再揚起。

### 2.2.3 生物氣膠

室內真菌的主要來源主要來自室外，室外真菌濃度通常高於室內(Tseng et al., 2011)。大多數室內空氣中真菌種群是來自室外，特別是來自周遭區域的植被會強烈影響附近空氣中真菌濃度(Hargreaves et al., 2003)。這些懸浮微生物可以通過開啟的大門和窗戶，或者入滲空調系統進入室內環境(Tseng et al., 2011)。累積的灰塵也是室內生物氣膠潛在的來源，微生物(例如真菌和細菌)可以在灰塵中的無生命物質中生長；如果水含量能支持微生物的生長，基質材料(例如壁紙、地毯、通風管的表面)也可以成為生物氣膠來源(Chao et al., 2002)。

細菌大量存在於空氣中，是有機氣膠的一部份，主要來源除了所知的土壤及植物表面外，動物排泄物也是可能的細菌來源(Bowers et al., 2011)。此外，從控制地板懸浮微粒實驗中發現，從人體直接脫落的微生物會影響室內空氣中細菌氣膠濃度，尤其是這些於室內空氣及地板中觀察到的高濃度細菌與從皮膚、鼻孔及頭髮中掉落有特定關係。直接從人體皮膚細胞脫落的微粒會懸浮於空氣及沈積

地板，之後生物氣膠再揚起會強烈影響空氣中的細菌相結構(Hospodsky et al., 2012)；此亦顯示人員為室內環境空氣中的細菌重要來源(Pastuszka et al., 2000)。

### 2.3 通風換氣之要求

國內作業場所通風標準訂有最少通風量要求，如職業安全衛生設施規則要求作業場所依場所之氣積與人員數目，規定每一勞工佔有之立方公尺體積時，每分鐘應提供每位勞工有多少量之新鮮空氣，以期使有害物濃度低於容許濃度標準。「職業安全衛生設施規則」第 312 條規定勞工工作場所所需換氣標準如表 1 所示(陳等，2016)。

表 1 勞工作業場所空氣充分流通所需之換氣標準

作業場所每一勞工所佔之體積 (m <sup>3</sup> /人)	每分鐘每一勞工所需之新鮮空氣量 (m <sup>3</sup> /min.人)
5.7 以下	0.6 以上
5.7~14.2	0.4 以上
14.2~28.3	0.3 以上
28.3 以上	0.14 以上

由於二氧化碳是一種無色無味的氣體，性質安定不易變化，為碳原子(C)進行氧化作用後的產物，綠色植物行光合作用的主要元素之一。因此 CO<sub>2</sub> 在室外並非空氣污染物，但在室內由於濃度過高會造成人體健康不適雖在一般狀況下，二氧化碳基本上不具毒性，但在門窗關閉、換氣不良的室內環境，室內人員多二氧化碳濃度升高，血液變酸而易疲倦，使工作及學生學習效率降低(陳和謝，2009)。室外二氧化碳濃度大約為 400 ppm，許多辦公室內的二氧化碳濃度則可超過 1000 ppm，學生人數多的教室內濃度甚至會高達 3000 ppm，此乃因很多人在封閉的空間內呼出二氧化碳，且通風換氣不佳所致。二氧化碳對人體反應如表



2 所示。

表 2 室內二氧化碳對人體生理反應

濃度(ppm)	生理反應
350~450	同一般室外環境
350~1000	空氣清新，呼吸順暢
1000~2000	感覺空氣渾濁，並開始覺得昏昏欲睡
2000~5000	感覺頭痛、嗜睡、呆滯、注意力無法集中、心跳加速、輕度噁心
>5000 ppm	可能導致嚴重缺氧，造成永久性腦損傷、昏迷

我國職安法令「勞工作業場所容許暴露標準」規定工作場所的二氧化碳容許暴露標準不可持續 8 小時超過 5000 ppm，環保法規「室內空氣品質標準」則規範 8 小時平均濃度不可超過 1000 ppm。長時間處於高二氧化碳濃度的環境中，不僅會影響一個人的精力，也會影響其作出正確決策和思考的能力。此外，室內環境空氣之良窳均以二氧化碳之含量為指標，其原因在於二氧化碳濃度大致與通風不良引起之溫度、濕度、氣流、惡臭等空氣之綜合條件有密切之關係；此外在作業環境測定判讀上較容易。室內空氣品質不佳可能會導致病態建築症候群(SBS)、建築相關疾病(BRI)及癌症等。教室是學生學習之重要場域，通風不良除導致學生的學習效率降低外，甚至引起一些不良的健康效應，尤其是在關閉門窗及開冷氣之室內外換氣不佳的情形下更易發生。

### 三、研究方法與步驟

本計畫之研究架構如圖 1 所示，確立研究主題後，瞭解主要教育學習場所之室內空氣問題後，再選擇大學教室來探討通風換氣，因大學生於教室上課人數不固定，一般教室的上課人數多則可能高達近 65 位，實有必要詳細瞭解教室通風換氣情形。因此本研究針對大學教室進行通風換氣效率之量測，以空氣交換率(Air Exchange Rate, ACH)為指標，經換算為通風量後再與職業安全衛生設施規則 312 條規範作比較，以評估不同通風條件下，教室之換氣量是否足夠。若不足夠，則將提出通風改善或管理建議，以期維持教室空氣品質，確保學生學習效率與健



康。

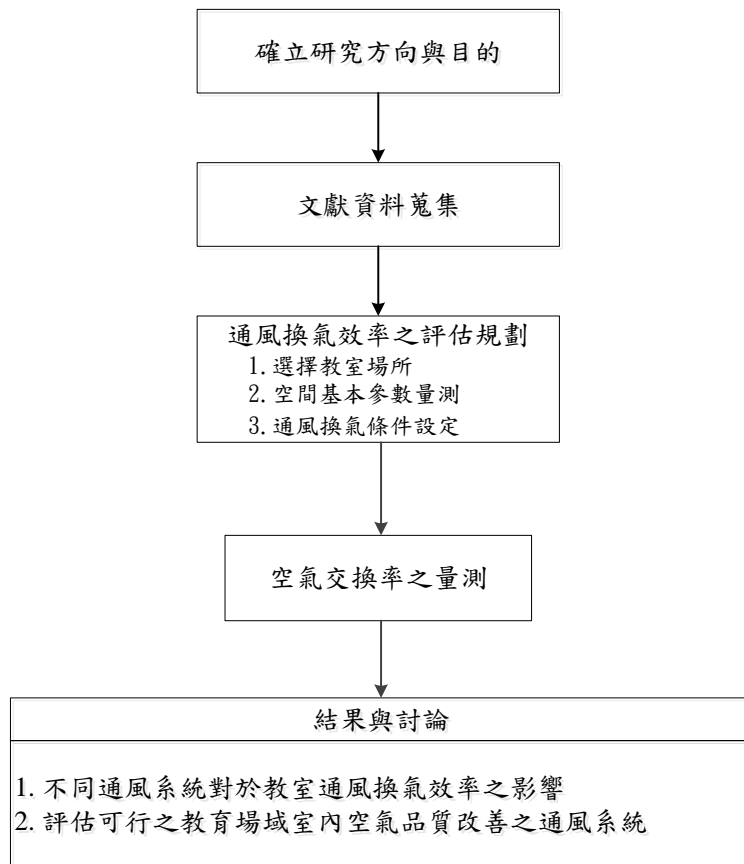


圖 1 研究架構

### 3.1 空氣交換率之量測

#### 3.1.1 研究設備

本研究使用兩台非色散式紅外線分析儀(型號：TES-1370)(如圖 2)來量測及記錄教室內及教室外之二氧化碳濃度變化，其可同時量測室溫、相對溼度及二氧化碳濃度之掌上型儀器。二氧化碳濃度的測量方法係利用位於儀器之頂端之非色散式紅外線感應器，經由位於儀器外殼頂端之感應孔洞，透過擴散效應來量測二氧化碳濃度。此儀器測量二氧化碳之原理係利用二氧化碳分子能吸收特定波長光波，此波長為紅外線範圍。高濃度二氧化碳分子較低濃度吸收較多之光波，技術



稱之為非色散式紅外線(NDIR)偵測法。此儀器使用便利，由於使用非色散式紅外線感應器，因此亦無消耗之化學品存在。



圖 2 非色散式紅外線分析儀(型號：TES-1370)

### 3.1.2 空氣交換率之量測方法

教室室內外之空氣交換率(ACH)之量測，係使用「濃度衰減法」來進行。濃度衰減法是利用示蹤氣體量測換氣率以及短時間內量測不同 ACH 值之最基本方式。此法乃將先釋放一定量之示蹤氣體(本研究選擇二氧化碳，如圖 3 所示)，並利用風扇促使室內濃度快速均勻混和，待靜置一段時間後開啟欲探討之通風的各種條件進行二氧化碳量測，由於室內氣體之流動與稀釋帶出，室內二氧化碳氣體之濃度會隨之而衰減，再經計算衰減率便可得出室內換氣 ACH 值。由於同一狀態下 ACH 值應相同，故於不同初始濃度狀態下進行之結果應相同(衰減率相同)。





圖 2 示蹤氣體-CO<sub>2</sub> 鋼瓶氣體

### 3.1.3 空氣交換率(ACH)之計算

空氣換氣(交換)率常用單位為 ACH 或 1/h, 即每小時換掉空間容積量的次數。本研究使用的示蹤氣體量測方法行來進行現場室內通風換氣效能測量或相關通風換氣性能分析已廣為被使用。工業通風之整體換氣公式如下(楊等, 2018):

$$C = C_i + \frac{G}{Q} + [C_0 - \left(C_i + \frac{G}{Q}\right)]e^{-\frac{Q}{V}\Delta t}$$

其中:

C: 室內二氧化碳濃度(ppm)

C<sub>i</sub>: 室外二氧化碳濃度(ppm)

C<sub>0</sub>: 室內初始二氧化碳濃度(ppm)

Q: 通風換氣量(m<sup>3</sup>/min)

G: 二氧化碳產生率(m<sup>3</sup>/min)

V: 教室空間大小(m<sup>3</sup>)

Δt: 通風換氣時間(min)



空氣交換率( $ACH=Q/V$ )之計算方式如下：

當示蹤氣體(二氧化碳)停止釋放後(二氧化碳產生率  $G=0$ )，因新鮮空氣持續引入而使室內二氧化碳濃度呈指數函數之衰減。整體換氣公式經化簡後得到(鐘，2003)：

$$C = C_i + (C_0 - C_i)e^{-\frac{Q}{V}\Delta t}$$

$$C = C_i + (C_0 - C_i)e^{-ACH\Delta t}$$

$$C = C_i + (C_0 - C_i)e^{-ACH\Delta t}$$

$$C - C_i = (C_0 - C_i)e^{-ACH\Delta t}$$

$$\frac{C - C_i}{C_0 - C_i} = e^{-ACH\Delta t}$$

$$\ln\frac{C-C_i}{C_0-C_i} = -ACH\Delta t$$

$$-\ln\frac{C-C_i}{C_0-C_i} = ACH\Delta t$$

以 $-\ln\frac{C-C_i}{C_0-C_i}$ 對通風時間(hour)  $\Delta t$ 做圖。進行迴歸分析，由迴歸係數(斜率)即可求得ACH(1/hr)。本研究使用 Excel、SigmaPlot 14.0 軟體進行數據整理、繪圖與統計迴歸分析。

### 3.2 測定地點

為便利實驗，本研究選擇職安系的教室來探討，由於職安大樓二樓的五間教室規格都相同，因此本研究選擇 O205 教室作為探討通風換氣的對象，教室內部之冷氣、風扇、窗戶位置如圖 4、5 所示。





圖 4 職安大樓 O205 教室

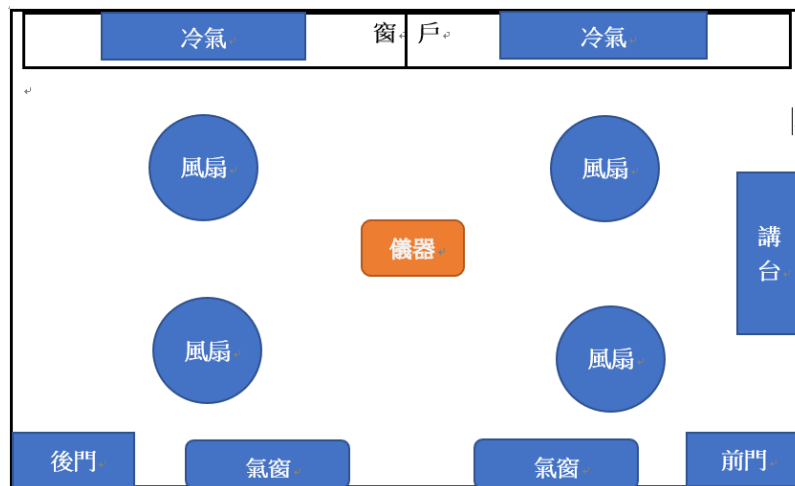


圖 5 職安大樓 O205 教室空間示意圖

### 3.3 五種通風換氣之條件

由於不開冷氣採自然通風時，教室較無通風換氣不佳之情形，因此本研究主要是探討開冷氣且經常關門窗的情形下，較易發生通風換氣不足導致室內空氣品質不佳的情形，因此本研究共計規劃教室五種可能的通風換氣情形，以評估其換氣效率，五種通風條件如表 3。



表 3 教室五種通風換氣條件

通風	冷氣	風扇	門	窗
條件一	X	X	X	X
條件二	○	X	X	X
條件三	○	○	X	X
條件四	○	○	○	X
條件五	○	○	○	○

附註：○為開，X為關

### 3.4 實驗步驟

- (1) CO<sub>2</sub>採樣分析儀器功能確認及校正。
- (2) 設定 CO<sub>2</sub>釋放點與教室中間兩個採樣點，並將儀器擺置至作業高度。
- (3) 量測室外空氣 CO<sub>2</sub>濃度，關閉室內門窗及相關通風系統。
- (4) 啟動測試儀器，先進行空間的 CO<sub>2</sub>背景濃度量測 10~20 分鐘，以確定背景濃度並不影響量測結果。
- (5) 背景濃度量測之後，使用鋼瓶 CO<sub>2</sub>大量施放 CO<sub>2</sub>至足夠高的濃度後關閉鋼瓶之閥門，並以風扇加速均勻混合。
- (6) 打開設定探討的通風系統，進行室內 CO<sub>2</sub>濃度量測，此時濃度逐漸減至正常狀態下，即可停止量測。
- (7) 下載各儀器之 CO<sub>2</sub>監測數據。
- (8) 選擇適當的迴歸分析模式進行迴歸分析。
- (9) 並以軟體進行分析及計算 ACH 值。

## 四、結果與討論

### 4.1 五種通風條件之 ACH

將五種通風條件下之實驗數據整理後，以  $-\ln \frac{C-C_i}{C_0-C_i}$  對通風時間(hr)做圖並進行迴歸分析，迴歸結果之圖形分別如圖 6~10 所示。



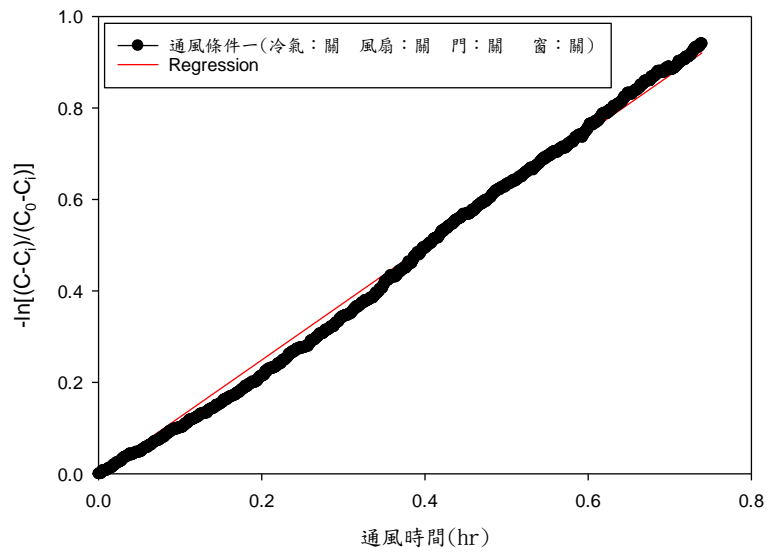


圖 6 通風條件一(冷氣:關、風扇:關、門:關、窗:關)之迴歸圖

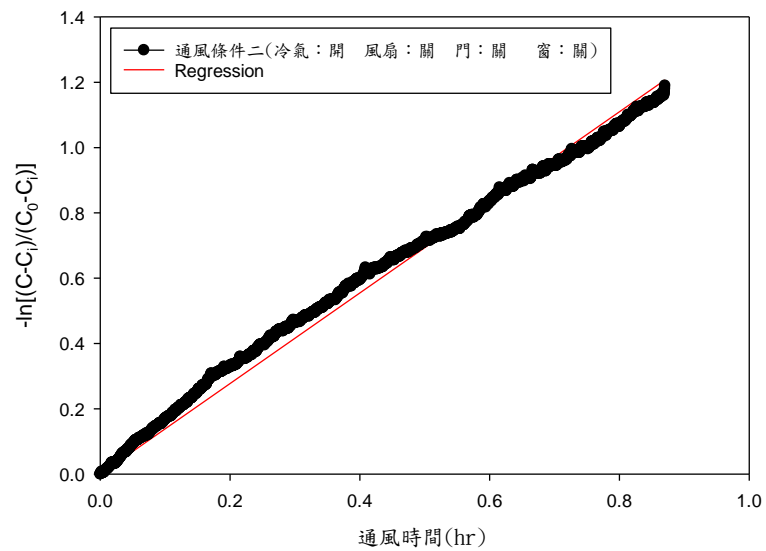


圖 7 通風條件二(冷氣:開、風扇:關、門:關、窗:關)之迴歸圖



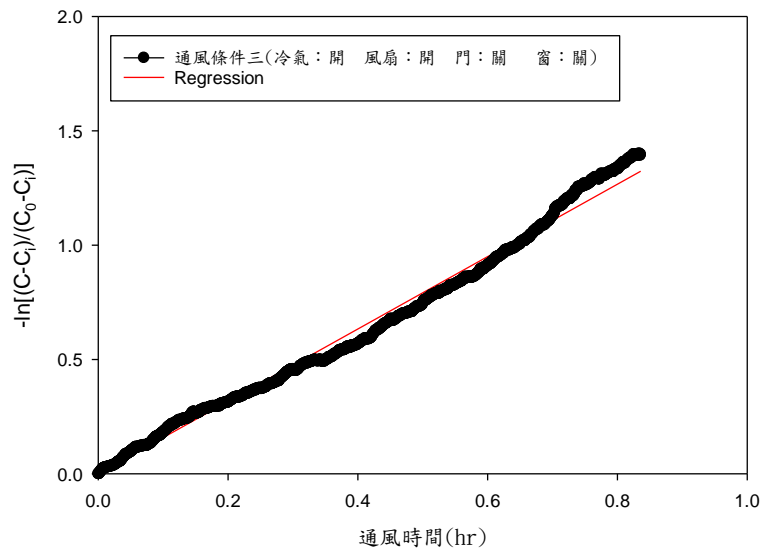


圖 8 通風條件三(冷氣:開、風扇:開、門:關、窗:關)之迴歸圖

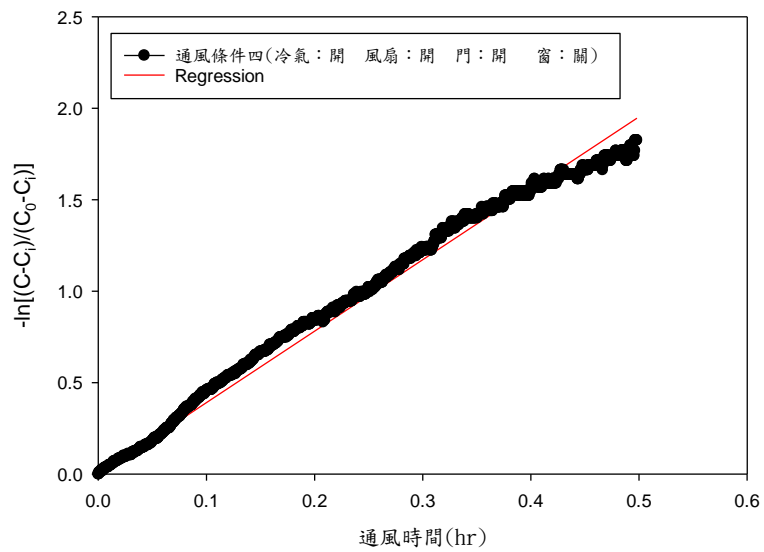


圖 9 通風條件四(冷氣:開、風扇:開、門:開、窗:關)之迴歸圖





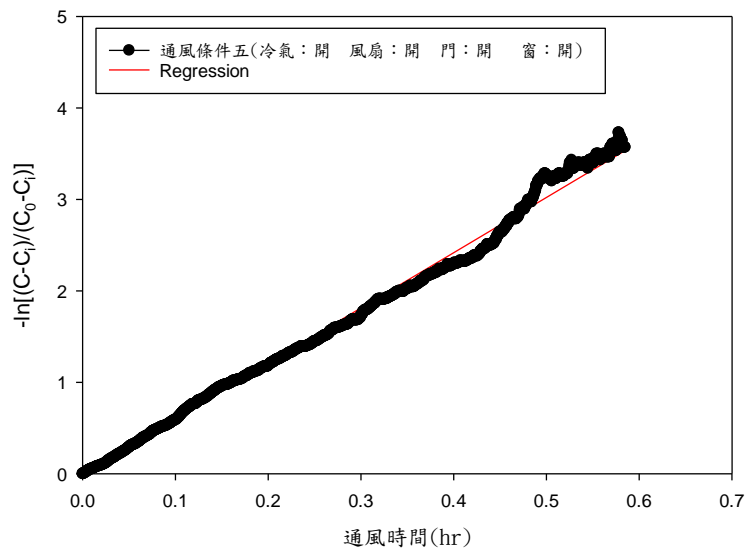


圖 10 通風條件五(冷氣:開、風扇:開、門:開、窗:開)之迴歸圖

由迴歸係數(斜率)即可求得各通風條件下之空氣交換率 ACH(1/hr)，結果如表 4 所示。

表 4 五種通風條件之空氣交換率

通風條件	冷氣	風扇	門	窗	ACH(1/hr)
一	X	X	X	X	1.045
二	○	X	X	X	1.386
三	○	○	X	X	1.583
四	○	○	○	X	4.593
五	○	○	○	○	5.324

附註：○為開，X為關

結果顯示教室在不開冷氣、風扇及門窗的密閉情況下(第一種通風條件)，空氣交換率最低，僅 1.045；開啟冷氣但風扇、門窗關閉下，亦即為一般開冷氣關閉門窗的狀況(第二種通風條件)，空氣交換率僅較第一種通風條件全部不開的狀況下微升，室內外空氣交換相當有限；若再加開風扇(第三種通風條件)，在關閉

門窗的情形下，天花板的風扇雖能促進室內空氣循環，但對於促進室內外空氣交換的能力仍相當有限，ACH 僅略微提升 0.2 左右，對於通風換氣能力的幫助仍不足。但在開啟冷氣及風扇的狀態下，又微打開前後門(第四種通風條件)，此時 ACH 顯著提升至 4.593，顯示開門後教室內外空氣有直接相通的面積，通風換氣效率大大地提升；若進一步地也打開雙邊幾扇窗戶(第五種通風條件)，ACH 又提升至 5.324，通風效果更好，顯示門窗打開能有效補充室外新鮮空氣進來，促進通風換氣。

#### 4.2 各種通風條件之合理室內人數

本研究依照職業安全衛生設施規則 312 條之規定，計算在 O205 教室空間大小  $V=273.27\text{m}^3$  下，不同室內師生人數下之合理的空氣交換率 ACH 如圖 11 所示。

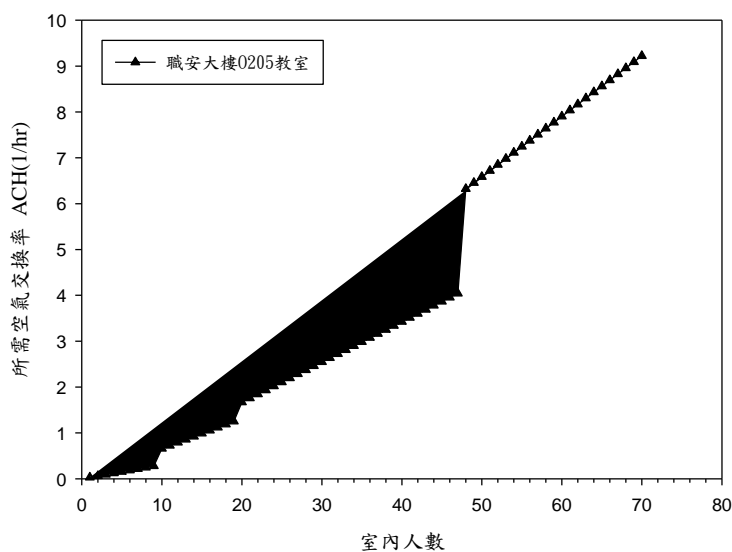


圖 11 符合職安設施規則之不同室內人數下合理的空氣交換率

因此針對本研究五種通風條件下量測得到之空氣交換率，推估合理教室內上課師生人數分別如表 5 所示。

表 45 不同通風條件之合理教室人數



通風條件	冷氣	風扇	門	窗	ACH(1/hr)	合理室內人數
一	X	X	X	X	1.045	≤15
二	○	X	X	X	1.386	≤19
三	○	○	X	X	1.583	≤19
四	○	○	○	X	4.593	≤47
五	○	○	○	○	5.324	≤47

由此可知，若要符合職業安全衛生設施規則通風換氣之規定，在不開冷氣、風扇及門窗時(通風條件一)，室內人數不宜超過 15 人；但對於常見關閉門窗且僅開冷氣的情形下(通風條件二)，由於密閉使得換氣不佳，因此教室內人數不宜超過 19 人，即使增加開啟風扇增加對流(通風條件三)，換氣效果仍有限，教室內人數仍不宜超過 19 人。但對於開門(通風條件四)或同時開啟門窗(通風條件五)的情形下，因為具有與外氣換氣的面積增加，在空氣交換率明顯上升的情形下，室內合理人數則可達 47 人。

綜合以上討論得知，對於 O205 教室在開冷氣或開冷氣+風扇的狀態下，藉由開啟門或窗換氣(通風條件四、五)，因具較足夠的換氣能力，因此建議上課人數維持在 20~47 人；在不開啟門、窗的狀態下，開冷氣或開冷氣+風扇時(通風條件二、三)之室內人數則建議維持在 19 人以下，以確保室內空氣品質。以目前的狀況來說，對於班級本身人數多，或者因選修或隨班附讀的人數多而超過 47 人時，此時教室開啟門窗後換氣率或換氣量仍不足以維持室內空品質，通風量不足對於教室人數多時的學生學習效率可能會有影響，值得特別注意。

## 五、結論與建議

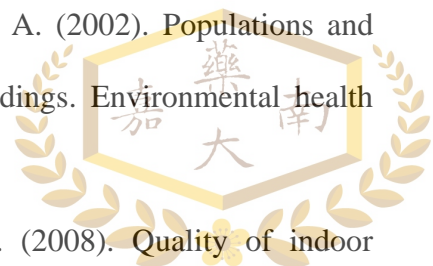
本研究結果顯示密閉的教室空間即使開了冷氣或冷氣+風扇，換氣量依舊遠低於職業安全衛生設施規則之合理的通風標準；但是開了門或窗後(通風條件四和五)，空氣交換率或換氣量則有顯著的提升，但當教室人數多時，開冷氣及開門窗時，空氣交換率或換氣量亦還沒有到達合理標準。由於教室是在開冷氣的狀態，因此考量節能，因此本研究探討的門窗之通風控制措施係採門半開、窗戶則

是開百葉窗以及微開，倘若門窗全開狀態，通風換氣效果應該會更顯著，但相對的也會更耗能。

依照職業安全設施規則之通風換氣規範，O205 教室在不開冷氣、風扇及門窗之情形下，建議教室內人數不超過 15 人；若有開冷氣或冷氣+風扇，但不開門窗，教室內人數不超過 19 人；開冷氣或冷氣+風扇，並配合開門窗，建議室內人數不超過 47 人。因此以通風條件五之最好的通風換氣率來說，超過 47 人上課的教室通風換氣都已明顯不足，更何況是其他沒有開門窗的控制措施。建議在本研究探討的幾種通風條件但換氣仍不足的情形下，除了限制教室使用人數外，倘若考量夏天門窗全開會導致冷氣效率不佳及耗能，又或者冬天不開冷氣但開門窗導致冷風讓人覺得凍到無法專心上課，考量節能及外氣無風速狀態，建議可裝設抽風機並定時或適時開啟引入外氣來幫助換氣，以確保教室空氣品質，維持學生良好學習效率。

## 六、參考文獻

- Batterman, S. A. (2001). Characterization of particulate emissions from occupant activities in offices. *Indoor Air*, 11(1), 35-48.
- Blondeau, P., Iordache, V., Poupard, O., Genin, D., & Allard, F. (2005). Relationship between outdoor and indoor air quality in eight French schools. *Indoor Air*, 15(1), 2-12.
- Bowers, R. M., Sullivan, A. P., Costello, E. K., Collett, J. L., Knight, R., & Fierer, N. (2011). Sources of bacteria in outdoor air across cities in the midwestern United States. *Applied and environmental microbiology*, 77(18), 6350-6356.
- Chao, H. J., Schwartz, J., Milton, D. K., & Burge, H. A. (2002). Populations and determinants of airborne fungi in large office buildings. *Environmental health perspectives*, 110(8), 777.
- Dales, R., Liu, L., Wheeler, A. J., & Gilbert, N. L. (2008). Quality of indoor



residential air and health. *Canadian Medical Association Journal*, 179(2), 147-152.

Hargreaves, M., Parappukkaran, S., Morawska, L., Hitchins, J., He, C., & Gilbert, D. (2003). A pilot investigation into associations between indoor airborne fungal and non-biological particle concentrations in residential houses in Brisbane, Australia. *Science of the Total Environment*, 312(1), 89-101.

Hospodsky, D., Qian, J., Nazaroff, W. W., Yamamoto, N., Bibby, K., Rismani-Yazdi, H., & Peccia, J. (2012). Human occupancy as a source of indoor airborne bacteria. *PLoS One*, 7(4), -34867.

Kagi, N., Fujii, S., Horiba, Y., Namiki, N., Ohtani, Y., Emi, H., ... & Kim, Y. S. (2007). Indoor air quality for chemical and ultrafine particle contaminants from printers. *Building and Environment*, 42(5), 1949-1954.

Mopuang, M., Kongtip, M., Sujirarat, D., & Luksamijarulkul, P. (2006). Microbial Count and Particulate Matter Level in Roadside Air of Bangkok Fashion City. *Thai Environmental Engineering Journal*, 20(2).31-45.

Pastuszka, J. S., Paw, U. K. T., Lis, D. O., Wlazło, A., & Ulfig, K. (2000). Bacterial and fungal aerosol in indoor environment in Upper Silesia, Poland. *Atmospheric Environment*, 34(22), 3833-3842.

Sundell, J. (2004). On the history of indoor air quality and health. *Indoor air*, 14(s7), 51-58.

Sundell, J. (2009, February). *Indoor Environments and Health*. In SHB2009-1st International Conference.

Tseng, C. H., Wang, H. C., Xiao, N. Y., & Chang, Y. M. (2011). Examining the feasibility of prediction models by monitoring data and management data for bioaerosols inside office buildings. *Building and Environment*, 46(12), 2578-2589.



丘建宏，「不同空調通風條件對於室內空間流場之 CFD 模擬」，中央大學，2010。

社團法人台灣病態建築診斷協會-認識病態建築，2018 年 2 月 19 日，取自：

<http://www.twasbc.org/detail.php?docId=271>。

室內空氣品質資訊網，2018 年 2 月 19 日，取自

<http://iaq.epa.gov.tw/indoorair/index.aspx>。

陳孟甫，「移動辦公室之區域性空調系統之熱流場模擬分析」，臺北科技大學，

2009。

陳春萬、吳至涵、杜宗明 & 陳俊瑋 (2016)，法規換氣率要求下二氧化碳累積情形探討，勞動及職業安全衛生研究季刊，24(2)，191-200。

陳春萬、謝書榮 (2009)，職場整體換氣性能規範之探討，行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所。

陳浚國，「室內空間氣懸浮微粒沉積效應之研究」，中原大學，2001。

楊振峰、林信一、陳友剛，工業通風，高立圖書出版社，2018。

鍾基強，工業通風設計概要，台北市：全華科技圖書股份有限公司，2003。

