

通風程度與 SARS-CoV-2 傳播之關聯

王立安¹ 陳澄淳² 黃惠美² 施智源² 劉伯瑜¹

臺中榮民總醫院 ¹內科部感染科 ²感染管制中心

自 2019 年新型冠狀病毒 SARS-CoV-2 造成全球大流行以來，目前證據顯示其傳播途徑具有三種：接觸傳播、飛沫傳播、及氣膠粒 (aerosol) 傳播。藉由落實常規介入措施可以有效阻絕接觸傳播與飛沫傳播，然而氣膠粒傳播途徑可藉由通風管路汙染其他空間，必須透過有效率的通風方式才能減少其傳染機會。二氧化碳 (CO₂) 濃度可作為室內空氣通風效率的指標。本文藉由整理現有文獻對於二氧化碳濃度與氣膠粒傳染途徑的關聯性分析，進而討論改善室內二氧化碳濃度作為指標監測以減少 SARS-CoV-2 的氣膠粒傳染。希望藉由這些研究提供的資料可以降低感染 SARS-CoV-2 的風險。(**感控雜誌 2022;32:302-310**)

關鍵詞： SARS-CoV-2、通風程度、氣膠粒、二氧化碳濃度

前 言

新型冠狀病毒 SARS-CoV-2 造成全球疫情以來影響國際社會甚鉅，自 2019 年以來全球確診人數超過 5.3 億並且造成高達 631 萬人死亡[1]。目前證據顯示其傳染模式可分為下列幾種：吸入帶有病毒之細小飛沫 (droplets) 或氣膠粒 (Aerosols)、帶有病毒飛沫直接噴濺於眼口鼻等黏膜、

藉由手接觸到帶有病毒的飛沫或間接碰觸帶有病毒的物體表面，再碰觸眼口鼻等黏膜感染[2]。

根據世界衛生組織的報告，新型冠狀病毒發病潛伏期介於 1~12 天，且發病前即有傳染力。我國現行預防措施亦建議避免出入人潮擁擠、空氣不流通的公共場所，並維持社交距離 (室外 1 公尺，室內 1.5 公尺) 或佩戴口罩等[3]。然而，多數人經常長時

民國 111 年 6 月 1 日受理
民國 111 年 8 月 30 日接受刊載

通訊作者：劉伯瑜
通訊地址：台中市西屯區台灣大道四段1650號
連絡電話：04-2359-2525 #3329

DOI: 10.6526/ICJ.202210_32(5).0003

間待在室內空間如辦公室、教室、健身房、餐廳等，卻較少研究針對室內空氣通風程度與 SARS-CoV-2 傳播關聯之探討。故此篇綜論旨在進行相關文獻搜尋以及統整，列舉各國對於室內二氧化碳濃度標準差異，並整理改善室內通風程度與 SARS-CoV-2 傳播之關聯性。

SARS-CoV2 與室內通風程度

SARS-CoV2 於室內之傳染途徑主要分為三種：接觸傳染 (Contact route)、飛沫傳染 (Droplet route)、氣膠粒傳染 (Airborne route) [4]。一般呼吸道傳染病可因換氣行為如呼吸、咳嗽、說話、唱歌等行為，產生大小不一的攜帶病原體之飛沫顆粒，進而傳染給其他宿主。吐出的飛沫大小一般介於 0.01 到 1,000 μm [5]。若直徑小於 5 μm 則被稱為飛沫核 (droplet nuclei) 或氣膠粒，若直徑大於 5~10 μm 則被定義為飛沫。

飛沫與氣膠粒傳染的直徑大小差異影響傳染範圍，飛沫較常快速地沉降，其飛行距離約為 1 公尺。由感染者產生帶有病原體的飛沫接觸到健康個體的黏膜組織，或是若健康個體碰觸的物體上有病毒顆粒，再藉由手接觸到眼口鼻等黏膜組織，就會造成健康個體的感染[3]。戴口罩和保持適當社交距離可以有效減少飛沫傳染的風險。保持手部衛生及以酒精擦拭經常碰觸的物體表面 (特別是大眾經常

碰觸的物體，如門把、扶手等) 則可以減少接觸感染風險。

相較於飛沫會在感染源附近快速落至物體表面，氣膠粒具有更遠的傳播距離，甚至可在室內的空調系統中移動。於西元 2007 年時一篇系統性文章回顧了四十篇原著論文，其中十篇提出建築物內通風程度與氣膠粒傳播感染相關，其中研究的病原體包含麻疹、結核菌、水痘、流行性感病毒及 SARS 等，因此可證明改善室內通氣 (ventilation) 可以減少氣膠粒傳染[6]。目前有越來越多研究證據顯示 SARS-CoV-2 具有氣膠粒傳染性質，根據一篇 2022 年發表的文獻指出，對於距離 COVID-19 患者所在處兩米以外，只通過排氣管道相連的房間，取其其中的空氣檢體做聚合酶連鎖反應 (PCR) 仍可偵測到 SARS-CoV-2 [7]，顯見氣膠粒傳染的可能性。

室內二氧化碳濃度常作為通氣效率的指標，根據一篇評估通氣效率及病毒感染機率的研究，其研究設計在一個 12 平方公尺的房間以二氧化碳濃度作為評估工具，分別於門窗緊閉、間歇性開窗、保持通風下觀察室內空氣品質、換氣效率及感染率，研究發現感染率與換氣效率之間成負相關，也就是緊閉門窗減少通氣量會增加感染風險[8]。綜上所述，改善室內空氣換氣率可減少氣膠粒聚積，有機會進而減少 SARS-CoV-2 感染的風險。

各國對於室內二氧化碳濃度的建議

文獻回顧可發現，目前各國家對於室內二氧化碳濃度的規範多數著重於節能與使用能源效率等探討，僅有少數文獻以監測室內二氧化碳濃度作為公共衛生的指標。以下整理自各國現有對於以室內二氧化碳濃度控制 SARS-CoV-2 傳播之建議[9] (表一)。

依據我國現行之室內空氣品質標準規定，八小時平均二氧化碳濃度建議為 1,000 ppm [19]，此規範為 2012 年公告實施，與美國 ASHRAE 組織訂定的標準相同。於現今新型冠狀病毒疫情之下，各國為因應現今疫情狀況，多建議應將室內二氧化碳濃度下降接近開放室外空氣 (450 ppm)。並且進一步指出若發現室內二氧化碳濃度持續上升，暗示室內換氣效率不足以對應室內人數或活動。此外，雖然室內二氧化碳濃度接近室外空氣是理想狀態，但考慮到溫度、濕度及舒適性，室內空氣二氧化碳濃度常不易與室外環境完全相同，因此，美國疾病管制署、英國緊急情況科學諮詢小組及歐洲暖氣通風空調組織將室內二氧化碳濃度訂定為 800 ppm，以滿足室內舒適度與疫情需求[15-17]。

各種實際場域中的二氧化碳濃度

室內二氧化碳濃度會因室內的人數與其活動量有所變化，根據 Laurent 等的研究指出，在醫院室內

的二氧化碳濃度高峰值常常超過規範上限值 (800 ppm)，特別是在晨間護理活動以及夫妻或情侶同時住院時，作者認為可能因為長時關閉門窗造成空氣交換不佳導致，另外也發現加強通風的最大阻礙是人們因室外溫度過冷或過熱造成不適感[20]。

根據 Chillon 等在 2021 年的研究顯示，在一個 91.8 平方公尺大的房間，有 15 位受試者待在房間內以模擬教室情形，發現若門窗緊閉不通風，二氧化碳濃度會直線上升，若有開窗通風，室內二氧化碳濃度可降至 570 ppm，此數值與同等大小空房間通風時相同[21]。但亦有其他研究顯示較寬鬆的二氧化碳容忍值也不一定造成感染率顯著上升，在一篇收集來自英國 11 個不同學校 45 個班級的二氧化碳濃度的研究，其遵循英國指引建議室內二氧化碳濃度須低於 1,500 ppm，且可接受短暫上升至 2,000 ppm，並不會明顯造成 COVID-19 感染機率上升，但仍鼓勵教室加強通風以減少氣膠粒途徑感染風險[22]。此研究可容忍地二氧化碳濃度較高，可能是因為當時流行的病毒株與現今不同，如今突變病毒株傳染力增強，加強通風進一步減少感染仍是重要議題。

改善室內空氣換氣效率

因季節溫度不同，人們時常處於密閉室內空間，因此冬天的感染機

表一 各國官方與民間組織對於二氧化碳濃度之建議[8]

建議來源	操作建議與最適宜之二氧化碳濃度	二氧化碳最大容忍閾值
美國冷暖空調工程師學會 (ASHRAE) [10]	保持室內二氧化碳濃度在 500~700 ppm	1,000~1,200 ppm
德國聯邦環境局 German Umweltbundesamt [11]	建議在學校要有固定式或可攜式二氧化碳濃度監測儀 (紅綠燈*)，提醒教師及學生應開窗促進教室空氣流通 *文中紅黃綠燈號同交通標誌警示燈，綠燈為良好品質，黃燈為警告燈號代表品質不佳，紅燈為空氣品質惡劣代表	小於 1,000 ppm 會顯示綠燈 (空氣品質良好) 介於 1,000 ppm 至 2,000 ppm 顯示黃燈 大於 2,000 ppm 顯示紅燈 (空氣品質惡劣)
英國威爾斯政府 Welsh Government [12]	建議在多人教室中監測二氧化碳濃度，以評估空氣流通性	保持教室二氧化碳濃度小於 800 ppm
渥太華－卡爾頓地區教育局 Ottawa-Carleton District School Board [13]	自教室分析二氧化碳濃度，發現整日加強通風可以使二氧化碳濃度小於 800 ppm	其於 SARS-CoV-2 全球大流行之前室內二氧化碳濃度建議為 1,100 ppm
魁北克 Province of Quebec [14]	監測教室中二氧化碳濃度	最高可接受 < 1,500 ppm
歐洲暖氣通風空調組織 Federation of European Heating Ventilation and Air Conditioning Associations (REHVA) [15]	在學校使用二氧化碳濃度指示燈，如此教師與學生可以了解在不同活動中的空品變化，例如唱歌時發現濃度上升開窗改善通風。	現行標準應減少至 800 ppm
英國緊急情況科學諮詢小組 UK Scientific Advisory Group for Emergency (SAGE) [16]	運用二氧化碳監測儀偵測通風不足的場域並改善通風。 需注意有些場地的二氧化碳濃度低不代表有足夠的通風環境，而可能是人數不多或空間面積大。因此該機構認為二氧化碳濃度不能完全作為直接判定 COVID-19 傳染風險的依據。	二氧化碳濃度超過 1,500 ppm 應被當作首要改善之場所。 容易產生氣膠粒的活動場所，則需將二氧化碳濃度限制於 800 ppm。
美國疾管署 US Centers for Disease Control and Prevention [17]	建議使用可攜式二氧化碳監測儀偵測不同室內環境	在無法維持二氧化碳濃度於 800 ppm 以下的環境應考慮使用可攜式空氣清淨器
美國華盛頓州 Washington State [18]	於開放吃飯空間 (如露臺或有大面窗戶之餐廳) 監測二氧化碳濃度應與戶外空間相同。	若座位附近二氧化碳濃度大於 450 ppm 超過 15 分鐘，用餐客人應被更換位置到通風功能更佳的餐桌位置。

率常大於夏天[22]，特別是在共用寢室的情形下，一般會建議打開窗戶或天窗，增加空氣流通可以減少感染機率。

在一篇探討用餐密閉空間中，以二氧化碳作為追蹤指標，評估換氣效率與 COVID-19 感染風險的研究，在一個 12 立方公尺大的房間，分別以三種通風方式：門窗緊閉、門窗保持打開或每 15 分鐘開窗 1 分鐘進行分析，假定室內沒人戴口罩，結果發現通風率最好為門窗保持打開，次為每 15 分鐘開窗 1 分鐘，最差為緊閉門窗。感染風險恰為相反順序，風險依遞增順序為門窗保持打開時 (0.02~84%)，每 15 分鐘開窗 1 分鐘

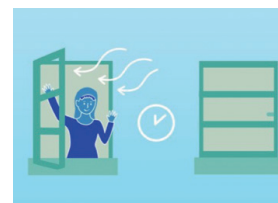
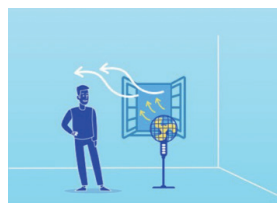
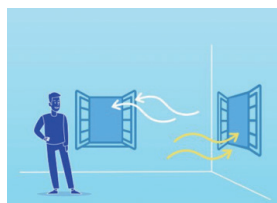
(0.34~94%)，門窗緊閉 (1.5~100%)，顯示感染趨勢與通風程度之關聯為負相關[8]。然多數醫院環境以開窗方式改善通風程度較不可行，中央空調設定有以下方法作為參考：美國冷暖空調工程師學會 (ASHARE) 亦有建議使用中央空調之建築物需增加引入戶外空氣，減少室內空氣再循環；捨棄「需求控制通風」(Demand-controlled ventilation, DCV) (此模式會由中央空調因應人數、室內污染物濃度等條件的變化自動調整空間的通風效率) [23]。

參考我國教育部對於室內使用冷氣或中央空調之通風原則，教室門可關閉，且應於教室對角處各開啟一扇

開窗讓室外空氣流入室內
打開兩扇對面窗戶，更可改善通風效率

用電扇面窗往窗戶外送風

當氣候太熱或太冷時，仍每小時開窗數分鐘，讓新鮮空氣流入室內

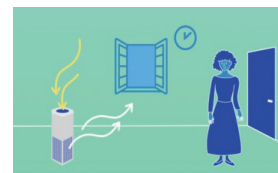
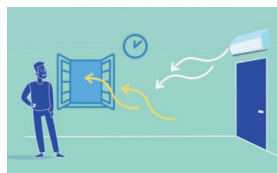
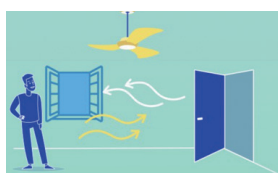


若室內有懸吊式風扇，必須保持打開門窗，因為在密閉空間使用風扇會增加病毒散播機會

使用室內空調時，每小時開窗數分鐘，因空調會反覆利用室內空氣，增加病毒散播

使用中央空調時，必須設定增加戶外空氣流入比率，並確保空調系統有定期維護清潔

使用空氣清淨機不能改善通風，因此仍須每小時開窗通風



圖一 世界衛生組織建議如何改善通風效率[26]

窗，每扇至少開啟 15 公分。中央空調出風量與迴風量的數量比例為 2 比 1，保持正壓狀態以利與外界（戶外）氣體交換。室內無空調之通風原則，教室可增設抽風扇（壁扇）與立扇，並適當擺放[24]。

另外有其他文章建議監測二氧化碳濃度判斷是否有充足的室外空氣流通，二氧化碳偵測儀應擺放於無物品阻擋氣流的位置，但不能直接放置於窗戶前、冷暖氣機等通風系統附近，擺放高度應在五十公分至兩公尺之間。由於氣膠粒途徑感染機率與即時過多的二氧化碳濃度及空間擁擠程度成正比，所以通常通氣良好的區域不會造成顯著氣膠粒途徑傳染[25]。因此應注意日常活動中室內空氣二氧化碳濃度是否超過建議或迅速上升，並且開窗或開啟通風系統降低環境二氧化碳濃度。

開窗讓室外空氣流入室內打開兩扇對面窗戶，更可改善通風效率，用電扇面窗往窗戶外送風，當太熱或太冷時，每小時開窗數分鐘，讓新鮮空氣流入室內。若室內有懸吊式風扇，必須保持打開門窗，因為在密閉空間使用風扇會增加病毒散播機會。使用室內空調時，每小時開窗數分鐘，因空調會反覆利用室內空氣，增加病毒散播。使用中央空調時，必須設定增加戶外空氣流入比率，並確保空調系統有定期維護清潔。使用空氣清淨機不能改善通風，因此仍須每小時開窗通風。

結語

新冠肺炎疫情蔓延至今已逾二年，空氣流通性與傳染風險相關的研究證明具正相關性。隨著病毒株的突變與傳染性增強（如 B.1.1.7、501Y.V2、B.1.1.529、BA.1、BA.1.1、BA.2、BA.3、BA.4 及 BA.5 等）[24]，要更謹慎清潔手部藉此減少接觸傳染，佩戴口罩及保持社交距離以降低飛沫傳染。至於減少氣膠粒途徑傳染的風險，首要改善室內通風條件，並且維持足夠的室外空氣流通，鼓勵設定二氧化碳監測儀及人數管控，有機會降低氣膠粒感染風險。

參考文獻

1. World Health Organization (2022, June 20). Global coronavirus (COVID-19) Dashboard. Available <https://covid19.who.int>
2. World Health Organization (2020, March 29). Modes of transmission of virus causing COVID-19: implications for IPC precaution recommendations: scientific brief. Available <https://www.who.int/news-room/commentaries/detail/modes-of-transmission-of-virus-causing-covid-19-implications-for-ipc-precaution-recommendations>
3. 衛生福利部疾病管制署 (2020, 4 月 27 日)。嚴重特殊傳染性肺炎：疾病介紹。摘自 <https://www.cdc.gov.tw/Category/Page/vleOMKqwuEbIMgqaTeXG8A#>。
4. Mittal R, Ni R, Seo JH: The flow physics of COVID-19. Journal of Fluid Mechanics 2020:894. Available file:///C:/Users/VGH00/Downloads/the-flow-physics-of-covid-19.pdf
5. Bake B, Larsson P, Ljungkvist G, et al: Exhaled particles and small airways. Respir Res 2019;20:8.
6. Li, Y., et al., Role of ventilation in airborne

- transmission of infectious agents in the built environment - a multidisciplinary systematic review. *Indoor air*, 2007. 17(1): p. 2-18.
7. Sousa NR, Steponaviciute L, Margerie L, et al: Detection and isolation of airborne SARS-CoV-2 in a hospital setting. *Indoor Air* 2022;32:e13023.
 8. Persing AJ, Roberts B, Lotter JT, et al: Evaluation of ventilation, indoor air quality, and probability of viral infection in an outdoor dining enclosure. *J Occup Environ Hyg* 2022;19:302-9.
 9. Eykelbosh A (2021, May 18). Indoor CO2 sensors for COVID-19 risk mitigation. Current guideline and limitations. Available <https://ncceh.ca/documents/field-inquiry/indoor-co2-sensors-covid-19-risk-mitigation-current-guidance-and>
 10. Persily A, Bahnfleth WP, Mandin C, et al (2022, February 2): ASHRAE position document on indoor Carbon Dioxide. Available https://www.ashrae.org/file%20library/about/position%20documents/pd_indoorcarbondioxide_2022.pdf
 11. Umweltbundesamt (2021, May 7). Richtig Lüften in Schulen. Available <https://www.umweltbundesamt.de/richtig-lueften-in-schulen#konnen-mobile-luftreiniger-in-klasse-raumen-helfen>
 12. Welsh Government (2021, October). Covid infection risk control and improving ventilation Carbon dioxide monitors in education settings. Available <file:///C:/Users/VGH00/Desktop/%E8%88%8A%E6%A1%8C%E9%9D%A2%E8%B3%87%E6%96%99%E6%84%9F%E6%8E%A7%E9%9B%9C%E8%AA%8C%E7%B7%A8%E8%BC%AF/111/carbon-dioxide-monitors-education-settings.pdf>
 13. Ottawa-Carleton District School Board (2021, May 9). Carbon dioxide monitoring in schools. Available https://ocdsb.ca/news/carbon_dioxide_monitoring_in_schools.
 14. Gouvernement du Quebec (2021). Ventilation et transmission de la COVID-19 en milieu scolaire et en milieu de soins. Available <https://publications.msss.gouv.qc.ca/msss/fichiers/2020/20-210-375W.pdf>
 15. Federation of European Heating Ventilation and Air Conditioning Associations (2020, November 25). COVID-19 ventilation and building services guidance for school personnel. Available https://www.rehva.eu/fileadmin/user_upload/REHVA_COVID-19_guidance_document_School_guidance_25112020.pdf
 16. UK Scientific Advisory Group for Emergencies Environmental Modelling Group (2020). Role of ventilation in controlling SARS-CoV-2 transmission. Available https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/928720/S0789_EMG_Role_of_Ventilation_in_Controlling_SARS-CoV-2_Transmission.pdf
 17. Centers for Disease Control and Prevention (2021, March 23). Ventilation in buildings. Available <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/community/ventilation.html>
 18. Washington State Department of Health (2021, April 12). Open air and outdoor seating requirements. Available <https://www.governor.wa.gov/sites/default/files/COVID19%20Outdoor%20Open%20Air%20Seating%20Guidance.pdf>
 19. 行政院環境保護署 (2012, 11 月)。室內空氣品質標準。摘自 <https://portal2.ntua.edu.tw/~d09/download/%E8%87%BA%E8%97%9D%E5%A4%A7%E6%B3%95%E8%A6%8F-1011128/%E5%AE%A4%E5%85%A7%E7%A9%BA%E6%B0%A3%E5%93%81%E8%B3%AA%E7%AE%A1%E7%90%86%E6%B3%95/%E5%AE%A4%E5%85%A7%E7%A9%BA%E6%B0%A3%E5%93%81%E8%B3%AA%E6%A8%99%E6%BA%96-%E8%A1%A8%E6%A0%BC-101.11.pdf>。
 20. Laurent MR, Frans J: Monitors to improve indoor air carbon dioxide concentrations in the hospital: A randomized crossover trial. *Sci Total Environ* 2022;806:151349.
 21. Chillan SA, Millan M, Aramendia I, et al: Natural ventilation characterization in a classroom under different scenarios. *Int J Environ Res Public Health* 2021;18:5425.
 22. Vouriot CVM, Burrridge HC, Noakes CJ, et al: Seasonal variation in airborne infection risk in schools due to changes in ventilation inferred from monitored carbon dioxide. *Indoor Air* 2021;31:1154-63.
 23. Lawrence J, Schoen PE: Guidance for Building Operations During the COVID-19 Pandemic, *ASHRAE Journal*, May 2020. Available https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/ashrae%20journal/2020journaldocuments/72-74_ieq_schoen.pdf

24. 教育部學校衛生資訊網：「嚴重特殊傳染性肺炎教育專區」大專校院因應嚴重特殊傳染性肺炎防疫管理指引 (111 年 9 月 6 日修正)。
25. Burridge HC, Fan SJ, Roderic L, et al: Predictive and retrospective modelling of airborne infection risk using monitored carbon dioxide. *Indoor and Built Environment* 2021;31:1363-80.
26. World Health Organization (2021, December 23). Coronavirus disease (COVID-19). Ventilation and air conditioning. Available https://www.who.int/images/default-source/health-topics/coronavirus/ventilation_infographic_03_12.jpg?sfvrsn=78a27e26_5
27. Centers for Disease Control and Prevention (2022, April 26). What You Need to Know About Variants. Available <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/variants/about-variants.html>

Association Between SARS-CoV-2 Transmission and Indoor Air Ventilation

Li-An Wang¹, Ying-Chun Chen², Hui-Mei Huang², Zhi-Yuan Shi², Po-Yu Liu¹

¹Division of infectious disease, ²Infection Control Center,
Taichung Veterans General Hospital, Taichung, Taiwan

The coronavirus disease 2019 (COVID-19) pandemic continues today. [A9] COVID-19 has three routes of transmission: contact, droplets, and aerosol. Current transmission prevention measures can effectively prevent transmission by the contact and droplet routes. However, aerosol generation causes the virus to travel in confined spaces and enhances transmission. CO₂ concentration is an indicator of ventilation efficiency. This article describes the association between sudden acute respiratory syndrome coronavirus 2 transmission and indoor CO₂ concentrations to provide direction for disease prevention and slow the pandemic.

Key words: SARS-CoV-2, ventilation, aerosol, concentration of carbon dioxide