

從健康需求討論氣候變遷對「室內環境」的衝擊

蘇慧貞

國立成功大學副校長·國立成功大學工業衛生學科暨環境醫學研究所特聘教授

許乃云

國立成功大學工業衛生學科暨環境醫學研究所 博士



不論是風災、雨災，亦或高溫熱浪、低溫寒潮的來襲，我們已日漸仰賴著各式建築物的庇護，並透過冷氣或暖氣等能源的消耗，來建構可接受且感到舒適的室內溫度與環境，以維持人體基本生理代謝運轉的理想效率。又隨著大多數族群居處於室內的時間比例增高，相對於室外大氣良窳，室內環境品質更直接地影響我們的身心健康；然而，過去在研究氣候變遷的健康衝擊時，往往忽略評估「室內」微環境的角色，僅少數針對減緩（mitigation）策略，如能源使用的有效性等作探討。美國國家學術出版社（National Academies Press，美國國家科學院附屬的學術出版機構）於2011年出版一超過250頁的專書——「氣候變遷、室內環境與健康（Climate Change, the Indoor Environment, and Health）」，係由相關領域學者所組成之「氣候變遷對室內空氣品質及公共衛生之影響委員會（Committee on the Effect of Climate Change on Indoor Air Quality and Public Health）」共同編寫。撰文的方向主要是提供給美國環保署、其他政府單位/組織，及對公共衛生、環境、建築設計、操作及氣候等相關領域有興趣的專家學者參考利用，當中引述大量文獻並提出科學假設，描述氣候變遷對室內環境可能的衝擊，以及後續的健康效應，另也針對政府現階段積極推動的減緩策略反而導致室內環境惡化的可能性提出論述 [1]。

室內環境品質對健康與舒適的影響毋庸置疑，凡建築本身結構、區位、各項開口及空調系統設計，各種建材、裝修材的選擇，人類維持生活必備的各種物品、商業行為的貨品、辦公家具等，乃至於人類本身的各項行為活動，均可直接或間接的引起音、光、熱、氣、水、微生物、電磁波等室內環境問題，其中影響最大且為民眾最直接感受的仍是與室內空氣品質不良有關的健康危害問題。美國的統計指出，不佳的室內環境估計可造成數十億美元以上的經濟損失，像是類似氣喘症狀、過敏症狀以及隨後消耗的生產力等。由於建築物所建構的室內環境本就和室外環境變化息息相關，針對衝擊層面，在「氣候變遷、室內環境與健康」一書中即規劃出以下幾大方向：

1. 空氣品質

近年來大氣污染物濃度受到氣候變遷的影響逐漸增加，包括溫暖潮濕的天氣促進微生物生長與存活，或是強日照之下造成光化學反應增強，利於光化學污染物如臭氧的生成。許多研究證實，建築物周遭的空氣品質會對室內環境有顯著性的影響。外源性的空氣污染物經由通風、空調系統進入室內環境外，一些內生性的室內污染物，包含建築材料的化學物質溢散、微生物的蓄積生長、燃燒/吸菸/烹煮等行為皆會導致特定的污染物在室內環境的累積增加。高溫有

利於揮發性有機物 (Volatile Organic Compounds, VOCs) 和半揮發性有機物 (Semi-Volatile Organic Compounds, SVOCs) 自材料中的釋出，室內甲醛濃度與室內溫度、相對溼度呈正相關；高溫易促使室外空氣經由門、窗進到室內，使得自然通風的建築內有較高的懸浮微粒濃度。

2. 潮濕、濕度與水患

當建築物受到水損時，高水量與濕度會促進家具或建材表面的微生物生長，因而增加室內空氣中的真菌、細菌及其副產物（如孢子、碎片、揮發性有機物）的濃度，增加非生物性的氣態化學物質（如甲醛）逸散至空氣中。暴露在受水損的建築中會使得咳嗽、氣喘等各種不良呼吸道健康危害的相對風險增加30-50%；在美國，約有460萬的氣喘案例是由於潮濕建築和黴菌的暴露所導致，此不良健康效應所造成的經濟損失約為每年35億美金。同時，淹水為世界上最常發生的天然災害，約占了天然災害的40%；本團隊在2009年莫拉克風災發生的前後，利用實境採樣證實，淹水過後的居家環境確實會有顯著較高之活性總真菌濃度室內外比值 [2]。近年颱風及極端雨量事件頻傳，更突顯了潮濕與水患對室內空氣品質影響的重要性，以及隨之而來的健康風險。

3. 傳染性病原體和害蟲

目前已知呼吸道病毒 (respiratory viruses)、格蘭氏陰性病原菌（如退伍軍人菌等）和塵蟎過敏原等生物性因子均會受到溫度和濕度等氣候因子的影響，普遍而言潮濕的環境有利於這些生物的生存，像是由退伍軍人菌 (*Legionella pneumophila*) 所導致的退伍軍人症 (legionellosis, 含退伍軍人病)，即為一典型與建築物有關之傳染性疾病。過去發現退伍軍人症的發生與高降雨量、濕度和氣溫有關，氣象因子

的改變恐會直接或間接地影響退伍軍人菌在滋生儲藏所 (reservoir) 內的存活與分布，且極端降雨造成自來水受汙染、建築物淹水，亦增加了人們在室內暴露病原體的機會。

4. 熱應力 (Thermal stress)

大多數研究指出未來氣象條件會增加熱的天數，尤其極端高溫的上限值恐將持續提高，反之冷的天數則趨於減少，但極端低溫的下限值並不一定會隨之減緩。無論是熱天還是冷冬，人體都需要經過調適才能因應。人體的正常體溫一般都維持在36-38°C間，當體溫高於40°C時，往往體內溫度調節系統會失去平衡，引發生理或心理上對周圍熱環境不適應的熱疾病，包括熱暈厥、熱痙攣、熱衰竭、中暑等。在美國1979至2003年間，一共超過8,000個死亡案例是由熱暴露所導致，該記錄高於所有因其他自然災害而死亡的總案例數 [3]。

當室外溫度增加或熱浪來襲時，建築物自然成了人們最佳的庇護所，然而在2003年歐洲熱浪造成近35,000人死亡的案例中，多數是在住宅空間中死亡，顯示即便是在室內，溫度的控制與適當的調適策略仍是必要的。影響室內溫度的因素眾多，首要則為室外大氣溫度的作用影響及太陽輻射量，再者就是建築物的儲熱能力（即構造材質的熱容量）、冷熱空調系統的使用，以及其他室內產熱源如人工照明（燈）、煮食設備、室內人員的代謝蒸發熱等。加拿大蒙特婁地區以室外大氣溫度、地表溫度及建築特性嘗試預測室內溫度，發現室外大氣溫度對室內溫度變異程度的模式解釋力 (R²) 僅22%，而一旦納入考量地表溫度、建築樓層以及提前24小時前的室外溫度，模式解釋力 (R²) 提升至54%，顯示建築物本身材料結構的蓄熱能力大大地影響了室內外溫度的相關性 [4]。另一在美國底特律進行的研究

[5]，指出大氣溫度對室內溫度變異性的解釋力僅38%；此外，當地平均而言，室內最高溫會高於室外最高溫 13.8°C 以上，且以乙烯鑲板（vinyl paneling）或木壁板（wood siding）為結構建材之建築相較於磚屋（brick）者較易受室外溫度的變化而影響，也就是「熱容量」的問題。臺灣的建築物高達99.76%使用混凝土為結構材料，雖然有極佳的熱容量，但其在夜間散熱的速度極緩，對於地處熱帶的我們，通常熱的天數比冷的還多，只是無端增加了夜晚使用空調的頻率及耗能問題；此亦部份解釋，為什麼臺灣在建築物的能源使用上有極大的比例消耗在冷氣空調系統。

5. 建築物的通風、耐候化（weatherization）及能源使用

我國在經濟部能源局統計全國各年度的電力消費中，除了能源部門自用外，尚分成工業、運輸、農業、服務業及住宅等五大項，其中住宅在這20年來占有所有電力消費中約18-20%，年成長率約5%（民國79-99年），若加上亦與建築耗能有關的服務業電力消費比例，則占約全部用電的38%，實為可觀 [6]。根據財團法人臺灣綠色產力基金會最新的「2010非生產性質行業能源查核年報」指出，除部分特殊建築物外，在所有的耗電用途中，幾乎以空調耗電為大宗（ $>40\%$ ） [7]。夏季（6-9月）的用電密度占全年約37-43% [8]，而影響臺灣地區辦公大樓用電密度的主要因素為空調形式，尤其使用獨立空調者，其用電密度在整年的分布特別受季節因素影響 [9]。以上資訊皆明確顯示臺灣民眾高度仰賴以消耗能源為主的溫度調節設備，以調節室內氣候至可接受的溫度範圍，因應氣候變遷之下日益攀升的環境溫度。然而，這樣的調適行為未來恐將面臨更多嚴峻的挑戰，包含高溫時期過多的能源負載、室內的密閉性及污染物的累積等。

經由美國地區的經驗，針對建築物的能源使用，目前提出了Weatherization（耐候化）的概念；weatherization專指為了增加建築物內能源的使用效率，特別是冷熱空調的使用，將透過住宅設計或翻新，減少不必要的空氣洩漏，使建築物更加緊密（tighten），減少過多的能源耗損，近年為因應氣候變遷等問題，weatherization為美國政府主要減緩（mitigation）地球暖化的主要政策之一 [1]。其最主要的目的即減少房屋結構上任何可能會洩漏氣體的孔隙以達減低建築物的能源需求，然而過度的「密封（seal）」建築物，往往降低了室內外的通風效率以及污染物移除、稀釋的能力。文獻指出，改變室內氣流流動型態或是降低通風率皆會增加建築物內的濕度和空氣污染物，如增加濕度會導致黴菌在建材上的孳生，或者加劇建材本身有害化學物質的逸散，且通風效率不良易導致該污染物的累積，引發嚴重的室內環境品質問題，進而影響到室內人員的健康，這些恐都是weatherization的概念之下衍伸的重要問題。

在臺灣，雖然沒有明文鼓勵推行weatherization等措施，但為因應相關的問題，仍是有類似的政策；近年來推動「國家適當減緩行動（National Appropriate Mitigation Actions, NAMAs）」，並於2010年「臺灣啟動溫室氣體適當減緩行動」的報告中，針對“住商部門”特定服務業之建築予以“冷氣不外洩”之節能規範，實為weatherization概念上的重點工作之一 [10]；一般家庭在使用空調系統時，往往也以節省能源為前提，完全的緊閉住宅而忽略了其他可能的健康危害。這些懸宕在節能減碳與健康風險之間、難以取捨的選項，尚需有完整的現況評估與成本效益考量，以利未來的政策規劃。

在氣候變遷的衝擊下，就現階段而言真正需要擔憂的實為易感族群，包含6歲以下的嬰幼

兒、65歲以上的老年人、免疫不全或慢性疾病患者以及社經地位較低者。臺灣面臨人口老年化的情形比全球其他國家更嚴重，預計到了2050年，台灣老年人口將高達30%。內政部營建署最新統計資料顯示（100年第三季），全臺灣有近1/4的住宅內住有一位以上65歲以上老年人口（24.64%），5.43%的住宅僅老年人口居住，且該比例於近30年內將有升無減。對易感族群像是老年人而言，在健康條件與行動的限制下，一天往往超過90%的時間處於室內環境，也因此在此規劃氣候變遷對於易感族群的衝擊與應有的調適

時，建築特性與室內環境的各項因素勢必加以考量。針對密西根州底特律市65歲老年人探討其「熱調適」的研究發現，住宅型式的不同，各種調適行為所佔的時間百分比亦有所差；在地表不滲透性高的地區（即地表溫度較高區域），居民採用各種調適行為的頻率較高，強調出都市熱島效應、建築與室內特性所造成的影響 [11]。

我國行政院經濟建設委員會委託中華民國都市計劃學會所擬定的氣候變遷調適政策綱領（草案），在臺灣地區「氣候變遷的衝擊與挑戰中」，針對建築物或室內環境的影響在“維生基

臺灣建築學會
ARCHITECTURAL INSTITUTE OF TAIWAN

臺灣建築學會第二十四屆建築研究成果發表會

大會

主辦單位：臺灣建築學會
 執行單位：朝陽科技大學建築系
 發表日期：2012年9月22日(六)
 發表會地點：朝陽科技大學
 優良建築案例參訪導覽-
 921地震博物館、日月潭向山遊客服務中心、桃米社區紙教堂、國立台中數位圖書館等(自費；暫定2012.09.23
 · 需事先報名· 滿額始成行)

建築教育論壇

主演講-
 建築教育改革與認證
 分科教師交流:

1. 建築設計與計畫
2. 敷地計畫與都市設計
3. 營建法規與實務
4. 建築結構
5. 建築構造與施工
6. 建築環境控制

敬邀國內各大學院校建築、空間、室內、都市、景觀等科系所教師共同參與討論各科目之教學大綱、內涵與教學等事宜。

礎設施”(3.2.3小節)內稍有提及，強調於建築房屋結構部分，像是“長期性”的危害如地層下陷/水患/山坡滑動等問題使建築結構受損，或因海平面上升的威脅而必須遷移；“短期性”危害如室內氣溫的改變(寒潮或熱浪來襲)而造成結構物建材的損壞，另一方面也必須配合更多的暖氣與冷氣的配置；然而在「調適策略」的描述中，針對建築物所遇到的“長期”衝擊強調在生態保育及水利工程的大規模調適，卻未對建築物所遇到的“短期”衝擊提出直接的因應措施及可能的規劃 [12]。此外，行政院國家永續發展委員

會所擬定之「永續發展政策綱領」，政府在氣候變遷因應、國家永續發展的規劃上，對於建築物方面之議題，主要強調於減緩相關策略，尤其生態城市與綠建築的推動，強調能源的再生利用以提升節能效益 [13]，但對於舊有之建築物(我國住宅平均屋齡26.8年)將如何因應氣候變遷的衝擊卻無任何配套措施，顯見有關單位對於此部分的認知與準備有待加強。

站在公共衛生的角度，如何透過事前的預防和即時有效的處置來避免熱危害，是保障民眾健康不可或缺的重要規劃。如利用早期預警系

臺灣建築學會
ARCHITECTURAL INSTITUTE OF TAIWAN

臺灣建築學會第二十四屆建築研究成果發表會

國科會宣導

國科會進行有關區域研究及地理學門的業務說明及意見交流

新材料新工法展示

1. 輕鋼構
2. BIM資訊系統
3. 綠建材
4. 防火建材
5. 隔音、隔熱新建材
6. 室內裝修材料

歡迎廠商引介各式新穎研發成果。

設計作品展

1. 建築師公會作品展
(歡迎台灣中部苗栗、台中、彰化、南投等縣市建築師公會參加)
2. 建築師作品邀請展覽
(姜樂靜、戴育澤、廖偉立、謝文泰等陸續徵求中)
3. 室內設計師作品邀請展覽
4. 都市設計作品邀請展覽
(台南市火車站、水湳經貿園區等台中市政重大建設展.....陸續邀約中)

統 (Early Warning Systems, EWS) 可減緩極端溫度事件所造成的健康衝擊，以增加面對未來可能發生更強烈、更頻繁之氣候問題時妥善因應的能力。在此之前，有關於氣候變遷對之室內環境衝擊影響層面則需有全面性的了解，知道所謂的風險容忍度或是閾值上限，後續將啟動預警機制、加強監測工作，一旦氣候衝擊超過容忍程度，預警系統將可幫助延長防災、應變措施的實施時間，減少災害損失 [14]。無論全球的暖化的程度是否能控制於 2°C 以內，其帶來的衝擊影響並無法立即停止，因此，透過「減緩」策略來削減造成氣候變遷的原因，並同步進行「調適」以妥善因應氣候變遷所造成的衝擊，實為當前之首要工作。

參考文獻

1. IOM (Institute of Medicine), Climate Change, the Indoor Environment, and Health, Committee on the Effect of Climate Change on Indoor Air Quality and Public Health, Editor 2011, The National Academies Press: Washington, DC.
2. Hsu, N.Y., et al., Changes in profiles of airborne fungi in flooded homes in southern Taiwan after Typhoon Morakot. *Sci Total Environ*, 2011. 409(9): p. 1677-82.
3. Extreme Heat. 2006 Jul. 31, 2009 Dec. 17, 2011]; Available from: http://www.bt.cdc.gov/disasters/extremeheat/heat_guide.asp.
4. Smargiassi, A., et al., Prediction of the indoor temperatures of an urban area with an in-time regression mapping approach. *J Expos Sci Environ Epidemiol*, 2008. 18(3): p. 282-288.
5. White-Newsome, J.L., et al., Climate change and health: Indoor heat exposure in vulnerable populations. *Environ Res*, 2012. 112: p. 20-27.
6. 經濟部能源局. 電力消費結構. 2011 December 23, 2011 December 24, 2011]; Available from: <http://www.moeaboe.gov.tw/opengovinfo/Plan/all/WorkStatisticsAll.aspx>.
7. 財團法人臺灣綠色產力基金會, 非生產性質行業能源查核年報, 2010, 經濟部能源局: 臺灣.
8. 陳介慧, 建築用電密度標準之研究, in 建築研究所2009, 成功大學: 臺南.
9. 楊開翔, 高耗能辦公大樓耗能因子解析之研究, in 建築研究所2009, 成功大學: 臺南.
10. 環境保護署, 臺灣啟動溫室氣體適當減緩行動, 環境保護署, Editor 2010, 行政院: 臺灣.
11. White-Newsome, J.L., et al., Assessing heat-adaptive behaviors among older, urban-dwelling adults. *Maturitas*, 2011. 70(1): p. 85-91.
12. 中華民國都市計劃學會, 氣候變遷調適政策綱領 (草案), 2010, 行政院經濟建設委員會: 臺灣.
13. 行政院國家永續發展委員會, 永續發展政策綱領, 2009: 臺灣.
14. 柳中明、華昌宜、游保杉, 我國「全球氣候變遷長期評估與衝擊調適策略之整體綱要計畫」草案建議, 國土規劃及不動產資訊中心, 2009, 國土規劃及不動產資訊中心: 臺灣.