都市與計劃 (民國一百零六年) 第四十四卷 第四期 第 375~397 頁 Journal of City and Planning (2017) Vol.44, No.4, pp. 375~397

# 熱季街道環境與熱舒適性關係之研究1

孫振義2

論文投稿日期:105年07月14日第一次修正日期:106年01月25日第二次修正日期:106年03月30日論文接受日期:106年04月13日

### 摘要

人體熱舒適性會受到很多面向因素的影響,例如:人體生理機能、熱感受度、衣著量、溫度、濕度、風速…等。本研究爲釐清都市街道環境對於熱舒適性之影響,於街道五處不同環境條件之位置,連續三日測量各項熱舒適相關數據(上午11時到深夜22時),並且計算其「綜合溫度熱指數」(The Wet Bulb Globe Temperature, WBGT)及「平均輻射溫度」(Mean Radiant Temperature, MRT),藉此對未來街道環境與熱舒適性改善提出實質建議。

經本研究實測與分析後發現,都市街道中之熱環境與熱舒適度受到建築陰影、植栽陰影、建築與鋪面材料、通風條件、環境濕度、日照條件等因素所影響,進而反應在乾球溫度、濕球溫度、相對濕度、平均風速、黑球溫度等實測數據上。在五個實測點中,有兩個位於遮蔭條件較佳的實測點擁有較好的熱環境與熱舒適性。此外,有一處位於園道旁的實測點,固然擁有良好的通風環境與植栽蒸散冷卻優勢,但因沒有較好的遮蔭條件,故在乾球溫度、輻射(黑球)溫度、WBGT及MRT數值上顯得與街道中的量測點差異無幾。因此,相較於通風與植栽蒸散降溫作用,製造陰影對於改善熱環境與熱舒適性而言,誠是更重要的策略。

根據本研究實測結果與分析,建議未來應該增加都市街道之遮蔽條件,且由於植栽兼具遮蔭效果及蒸發散降溫之效益,對熱環境改善及熱舒適性的提升頗有顯著貢獻,故除了促使街邊建築物爲都市街道創造更多遮蔭範圍外,更推薦以園道、行道樹及街道綠化等手法強化街道遮蔭條件。總之,透過本研究建議之街道環境控制方法,不但可以改善街道熱舒適性,更可以有助於降低空調能源消耗與碳排放量,達到節能減碳的目標。

關鍵詞:熱島效應、熱舒適性指標、微氣候、遮陰冷卻效果

DOI: 10.6128/CP.44.4.375

中華民國都市計劃學會 民國一百零六年 ©2017 Taiwan Institute of Urban Planning

<sup>1.</sup> 由衷感謝科技部計畫(MOST 99-2221-E-004-006與101-2221-E-004 -016)經費支持,以及感謝都市與計劃期刊主審與審查者對於本文的建議與指導。

<sup>2.</sup> 國立政治大學地政學系副教授,通訊作者。Email:justin.sun.tw@gmail.com。

### Street Environment and Thermal Comfort in Hot Season

#### Chen-Yi Sun

Department of Land Economics, National Chengchi University Taipei, Taiwan 11605

#### **ABSTRACT**

Human thermal comfort is affected by factors such human physiology, thermal perception of clothing amount, temperature, humidity and wind speed. This study collected data from five measuring stations on the same street but in different environmental conditions from 11 am to 22 pm on September 3rd, 4th and 5th in 2011. The data were used to calculate WBGT (Wet Bulb Globe Temperature) and MRT (Mean Radiant Temperature) index, to clarify the thermal comfort affected by the urban street environment, and to provide recommendations to the street environment and thermal comfort improvement.

The measurement and analysis results showed that that the thermal comfort and thermal environment of city streets was affected by building shadow, planting shadows, architectural and pavement material, ventilation, humidity, sunlight conditions, meanwhile, reacted in dry bulb temperature(air temperature), wet bulb temperature, relative humidity, the average wind speed, globe temperature and other measured data.

Of these five measuring points, two had better thermal comfort and thermal environment due to their better shading environment. Moreover, one measuring point near the green corridor had a higher air temperature, globe temperature, WBGT and MRT as well as the measuring points on the street even though it has good ventilation and evapotranspiration cooling conditions, because it don't have nice shading. These data show that, for improving the thermal environment and thermal comfort, providing shade is a much better strategy than providing ventilation or cooling through evapotranspiration.

In contrast, radiation temperature is a key factor in WBGT. Analyses of data for these measurement points show that areas that are shaded (covered by the shadows of buildings or trees) have lower radiation temperature. Therefore, this study suggests that shaded areas in urban streets should be increased for mitigating urban warming and heat island effect. Therefore, applying the proposed methods of controlling the street environment can not only improve the thermal comfort of streets, but also reduce air conditioner energy consumption and carbon emissions to achieve targets of carbon reduction.

Keywords: Urban heat island, Thermal comfort index, Microclimate, Shading cooling effect



## 一、前言

台灣都市化程度日愈成長,根據市鎭鄉人口結構比數據,「市」人口比例從民國 60 年的 26.2%增至71年的49.8%(曾國雄、吳水源,1986),另外,若以萬人以上都市人口百分比視之,則臺灣都市化從1900年代之不足10%,至1990年時已幾乎達70%(黃樹仁,2002)。根據行政院主計總處資料顯示,2016年底我國總人口2,353萬人中約有1,733萬人(占74%)聚居在都會區(包括:新北市、臺北市、桃園市、臺中市、臺南市、高雄市、基隆市、新竹市與嘉義市),亦即迄今已有高達七成以上之人口居住在都會區中。然而,台灣都市熱環境卻日漸惡化,除了全球溫暖化的影響之外,加上近年微幅增加的都市熱島效應,根據一份1998年的量測文獻資料顯示,臺北夏季午夜都市熱島效應強度約爲4.5℃(林憲德等人,1999),但另一份於2012研究數據則得到臺北夏季午夜都市熱島效應強度介於5.11~5.77℃(孫振義、簡子翔,2016),顯示未來的都市規劃與設計若不及時做出因應措施,則都市高溫化勢必會對人們的生活產生重大影響。

以往對於熱島效應與熱環境之研究運用方法大同小異,例如以利用固定氣象站資料進行熱島效應研究(柯亙重、張書芸,2004);利用移動觀測法實踐對於都市熱島效應的實測(姜善鑫等人,1995;李魁鵬等人,1999;林憲德等人,2005;孫振義、林憲德,2006;孫振義等人,2010),及運用遙測技術做爲量測的主要工具(孫振義等人,2010)。然而,上述研究多著重於都市的溫度變化情形,而非以人的熱舒適感受做爲研究重點對象。然而,近期國內對於都市熱環境逐漸出現街道與社區尺度之研究成果,例如探討建築配置形式對戶外空間環境風場之影響(邱英浩,2011)、不同街道尺度對環境風場之影響(邱英浩、吳孟芳,2010)的研究、透水面積比例對環境微氣候之影響(邱英浩,2012)、抑或是封閉式中庭鋪面類型及尺度對微氣候之影響(邱英浩等人,2014)等研究。

除了熱環境之外,與人體感受息息相關的熱舒適性研究也日愈受到重視,相關國內外研究不勝枚舉,例如:針對都市微氣候熱舒適性與空間使用人數狀態之研究 (Nikolopoulou et al., 2001)、以熱舒適性爲標的在澳洲雪梨的戶外和半戶外地點進行熱舒適性問捲和微氣象儀器調查 (Spagnolo and Dear, 2003)、以熱舒適和心理適應作爲城市空間設計的指南之研究 (Nikolopoulou and Steemers, 2003)、針對歐洲不同國家之室外城市空間熱舒適分析 (Nikolopoulou and Lykoudis, 2006)、著重於遮陽效果對長期戶外熱舒適之研究 (Lin et al., 2010)、探討城市街道遮陽對長期戶外熱舒適的季節性影響 (Hwang et al., 2011)、分析建築密度、綠覆率與街道高寬比等街道環境特性對於微氣候之影響 (Sun, 2011)、討論都市水域空間對熱環境舒適度影響調查 (邱英浩, 2009)、大學校園戶外環境熱舒適性之實測調查研究 (鄭明仁等人, 2009)、人行步道空間的陰影連續性設計與熱舒適評價 (謝俊民等人, 2012)、水域周邊熱舒適預測模型之研究 (邱英浩等人, 2013)、以及都市街廊特徵與人體熱舒適之關係研

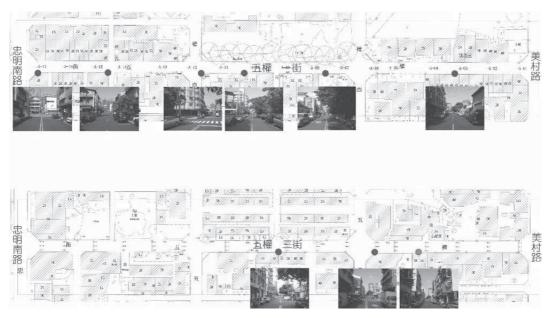
究(賴湘文等人,2016)。基於探討都市街道環境與熱舒適性間之關係,本研究係以「熱舒適」 爲研究標的,採用「固定氣象站觀測法」進行全日監測,並對取得之數據進行分析研究,最 終綜合實測結果提出熱舒適之具體改善建議,以作爲未來都市規劃、都市設計的參考依據。

# 二、街道環境調查與熱舒適性實測

本研究旨在探討都市街道環境與熱舒適性間之關係,故擇定臺中市一東西向街道進行實 測研究,具體之研究區域選定、實測方法與實測儀器說明如下:

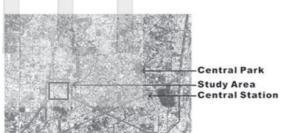
### (一)研究區域

本研究以臺中市五權一街爲研究對象,該路段同時兼有臺灣常見之二至五層樓透天連棟住宅建築,以及臺中市常見之綠園道。本研究經先期擇點評估研究(見圖一)後,根據所安裝之固定站溫濕度儀器數據證實,此研究路段區域除兼具典型道路環境條件外,加上交通流量穩定、道路朝向正東西方,可有效控制實驗受交通量波動或坐向方位所衍生之問題。而爲兼顧研究目的與實測可行性,本研究遂從原兩條街道容許設置儀器之九個測點中,擇定在該街區五個街道環境較具比較差異分析效果之地點(見圖二),作爲實測數據收集之測點。

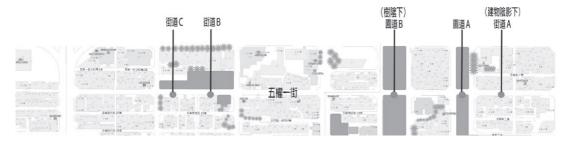


圖一 本研究初步擇點評估之測點位置圖





孫振義: 熱季街道環境與熱舒適性關係之研究



圖二 研究區域與測點位置圖

### (二)實測方法

根據各項研究文獻顯示,都市熱環境與熱舒適性取決於溫度、濕度、風速、輻射溫度、衣著量與人體活動 (ASHRAE, 2004; Fukushima et al., 2002),因此有大量文獻以上述參數爲基準進行都市熱舒適性研究。例如:以氣溫、相對濕度、平均風速、日射強度、著衣量爲基礎數據,探討水域空間對周圍熱環境舒適度影響之研究(邱英浩, 2009);以考慮溫度、相對濕度、平均輻射溫度、風速、人體活動及衣著等六個主要綜合人體對於溫熱環境反應之參數所得之人體熱舒適度指標「新標準有效溫度」(SET\*, Standard Effective Temperature) 爲主,據以評價人行步道空間的陰影連續性設計與熱舒適關係(謝俊民等人, 2012);亦有文獻以人體熱能溫度 (PET, Physiological Equivalent Temperature)、新標準有效溫度 (SET) 爲衡量指標,進行都市街廓特徵與人體熱舒適之關係研究(賴湘文等人, 2016)。

此外,既有文獻 (Honjo, 2009) 曾指出:相較於室內熱舒適度研究之完整,戶外環境方面舒適度的研究較為稀少,故瞭解城市戶外環境熱舒適氣候變化極具重要,該研究針對熱平衡原理對新標準有效溫度 (SET\*)、熱舒適性指標 PMV (Predicted Mean Vote) 和人體熱能溫度 (PET) 等指標進行探討,研究中察覺這些指標評估仍然存在問題,但也肯定上述三項指標適合應用於熱舒適研究。

綜合上述文獻,本研究爲進行街道環境與熱舒適性之比較研究,基於儀器、研究預算限制與可實踐性之考量,遂標定以量測溫度、相對濕度、風速、濕球溫度、黑球溫度等五項參數爲主(見圖三),據以計算分析街道各測點之氣溫、濕度、風速、平均輻射溫度(Mean Radiant Temperature, MRT)、綜合溫度熱指數 WBGT (The Wet Bulb Globe Temperature, WBGT)等熱舒適相關參數。本研究採用「固定氣象站觀測法」係將設有各式感測器之氣象站支架,

置放於固定測點以進行量測,此法具有量測時間同步性的優點,不需要進行時間同步化校正 與標準化,可以避免掉因時間差距帶來的誤差。此外,本研究之實驗儀器在量測前均經過系 統誤差校正,用以排除儀器誤差之影響。本研究使用之測量儀器詳細資料如表一。

#### 表一 熱舒適儀器組資料

性能	風速計 (Anemometer7911)	溫濕度計 (TRH3203)	濕球溫度計 (TRH301)	黑球溫度計 (TRH301)
測量範圍	0 - 79 m/s	0 - 100RH 0 - 100°C	0 - 100RH 0 - 100°C	0 - 100°C
精確度	± 1.5 m/s 或 5%	± 2%RH ± 0.3°C	± 2%RH ± 0.3°C	± 0.2°C



圖三 實測儀器示意圖

## (三)實測地點

爲實踐街道環境與熱舒適性關係之研究,本研究於研究區域內架設固定實測站進行數據 收集。其量測點選定邏輯係考量街道兩旁建築型態、綠帶園道、植栽狀況、建築遮蔭、風廊 氣流、儀器設置可能性等條件,最終擇定三處位於街道內測點以及兩處位於綠園道之實測位 置,設置五個固定站進行連續量測。此外,所有量測儀器均設置於街道南側距離路緣一公尺 處,以避免造成條件差異。

本次實驗所選定了五個量測點(見圖四~圖六)(見表二)條件各異,故便於數據分析時之比較。「街道 A」測點位於街道中,兩側建築均介於二至五層樓高,爲典型台灣連棟透天建築物街區之街道條件,且因街道朝向爲東西向,故此測點白天幾乎多數時間處於南方建築陰影之下。「街道 B」雖設置於與「街道 A」測點類似條件之街道中,然而其北面對街爲一尚未開發之空地,且南面有則有一堵約一米半高之圍牆,圍牆邊有些許植栽及椰子樹,但圍牆與植栽陰影在絕大部分時間並不會遮蔽量測儀器。「街道 C」測點同樣位於街道中,其北

面對街亦是尚未開發之空地,但南面臨接建築前緣之一層樓車庫,該兩至三層建築距測點尚有數公尺遠,故此測點受建築陰影遮蔽的影響較小。「園道 A」測點周邊係爲具有行道樹緣化之園道,但儀器未位於樹蔭之下,以資做爲與園道陰影下測點之對照,然而,該測點西南方約70公尺處有一棟22層樓高建築,故此測點在部分午後時間受到該建築陰影影響甚鉅。「園道 B」測點位於周邊園道樹冠茂密、通風良好之處,儀器架設位置位於喬木陰影之下,大部分時間處於無直接陽光照射之條件。本研究各實測點條件狀況彙整於表二所示。

並且,爲了排除天候差異所造成之影響,本研究以慎選實驗日之方式,避免極端天候狀態所造成之誤差。而中央氣象局之數據亦僅供佐證實測日天候狀態之用,其量測之數據爲「氣象」尺度數據,與本研究以「微氣候」研究之主體在尺度上略有差異,故在本研究中未進行街道量測數據與氣象局資料之比對。



圖四 街道A測點(左圖)與街道B測點(右圖)實景圖



圖五 街道C測點實景









圖六 園道A測點(左圖)與園道B測點(右圖)實景圖

### 表二 熱舒適儀器組資料

382

測點名稱	街道環境條件(○:助於降溫、△:無關降溫、×:礙於降溫)				
側約右件	通風降溫     遮蔭降溫		綠化降溫	建築增溫	
街道 A (建築陰影)	街中 (×)	嚴重建築陰影(○)	微量 (×)	大量 (×)	
街道 B	街中、北方空地(△)	無(×)	少量(△)	無(○)	
街道 C	街中、北方空地(△)	少量建築陰影 (△)	無(×)	中量(△)	
園道 A	街角(○)	少量建築與樹陰影(△)	大量(○)	無(○)	
園道 B (園道陰影)	街角(○)	嚴重建築陰影與樹陰影(〇)	大量(○)	無(○)	

### (四)實測日期

本研究於研究區域內架設固定實測站進行街道環境與熱舒適性關係研究之數據收集,並且擇定在 2011 年九月連續三日量測。由於實測日雲量若過高,雲層將會大量阻擋都市建築物與地面對於太陽日射量之接收,提升街道環境熱舒適性;此外,實測日風速若過高,亦會讓街道因受通風降溫之效果進而提升其熱舒適性,故爲探討街道熱舒適性較差之狀態,本研究需儘量擇定低雲量、平均風速較低之實測日進行實驗。經比對該年度九月平均氣象資料(見表三)後顯示,本研究於 2011/9/3-9/5 等三日進行實測,尚能符合低雲量、平均風速適中之實測條件。根據中央氣象局自 1981 年至 2010 年統計資料顯示,台中六、七、八、九月平均氣溫分別爲 27.6°C、28.6°C、28.3°C以及 27.4°C,此四個月份平均溫度均高於年均溫 23.3°C許多,亦爲泛稱之「熱季」。本研究量測日雖未在統稱之夏季(六、七、八月)中,但選擇於九月初進行量測除了可避開颱風季節之不干擾因素,實測日均溫介於 28~29°C間(見表三),仍屬泛稱之「熱季」。

孫振義: 熱季街道環境與熱舒適性關係之研究

表二 台中九月半均氣候與貫測日氣候條何	表三	台中九月平均氣候與實測日氣候條件比較表
---------------------	----	---------------------

測點名稱		氣候	氣候條件		
	平均氣溫(°C)	風速(m/s)	雲量(10分量)	日射量(MJ/m²)	
2011 九月平均	28.1	1.07	5.07	16.33	
2011/09/03	28.5	0.86	3.20	22.06	
2011/09/04	29.2	1.04	1.80	21.69	
2011/09/05	29.1	1.20	1.50	20.40	

註:本資料來源爲中央氣象局台中氣象站(位於台中公園內)氣象資料(未出版)。

## 三、實測結果與分析

根據本研究設置之固定氣象站實測資料,可釐清在同一街區於夏季在有無建築陰影遮蔽、綠化陰影遮蔽、通風條件差異等各種不同的情形之下,由早上升溫後 11 時開始,最終量測至日落後逐漸降溫的連續變化情形,且以此實驗結果之分。並爲針對街道環境提出具體建議,裨益提升都市街道環境與熱舒適度,本實驗於 2011 年 9 月 3 日至 9 月 5 日共計進行連續三日之實測,各日之測量時間爲上午 11 時至下午 22 時止。根據中央氣象局數據顯示,本研究所挑選之三實驗日均符合台中夏季典型晴朗之天氣情況,能確保研究結果具參考價值。各項實測結果數據初步分析如下:

### (一)乾球溫度、相對濕度與平均風速

乾球溫度、相對濕度與平均風速此三項參數是對於街道熱環境最直接的外顯數據,街道 上之乾球溫度除了受到大環境的整體氣溫所影響,更會受到周圍地面、建築物、人工發散熱 及植栽所影響,相對濕度與平均風速則係攸關街道通風降溫及人體表面排汗之蒸散速度,此 二者對街道熱環境及人體熱舒適性的影響亦至爲重要。

本研究三天的實驗數據 (見圖七~十五)中顯示,位於街道上之五個測點之乾球溫度與相對濕度數據雖然有相同波動趨勢,但明顯分成了「陰影下」與「非陰影下」兩大組別。相對高溫組包含「園道 A」、「街道 B」、「街道 C」等三實測點,而相對低溫組則是兩個位於陰影下之「街道 A (建築陰影)」與「園道 B (園道陰影)」兩實測點。從乾球溫度折線圖可知,從白天至日落前,位在低溫群的「街道 A (建築陰影)」與「園道 B (園道陰影)」兩實測點,較其他三實測點具有較明顯的低溫狀態,其最大溫差約有  $2.5\sim3.0^{\circ}$ C之譜。而此時相對濕度則呈現相反的狀態,「街道 A (建築陰影)」與「園道 B (園道陰影)」兩實測點的相對濕度明顯高於另三個實測點約 5%。

在日落後所有的實測點乾球溫度數據逐漸趨於一致,唯有「園道 B (園道陰影)」實測點之乾球溫度始終維持在相對較低溫狀態,然而日落後各實測點之乾球溫度迅速趨於收斂,乾

球溫度差別多僅在1°C以內,而相對濕度差異亦僅介於3~5%之間,顯示除了「園道B(園道陰影)」實測點因通風佳、植栽量多與周圍建築物稀少等街道環境因素而常處最低溫狀態外,其餘實測點並無非常顯著之差異。

綜觀,「街道A(建築陰影)」與「園道B(園道陰影)」兩實測點均受陰影影響,但主要差異是街道中建築物之陰影完整,能產生較穩定的遮蔭降溫效果,不似園道陰影受樹冠孔隙率之影響而偶能讓日照透射,導致陰影降溫效果略有折損。此結果亦呼應了相關文獻,例如與同樣發現在都市街廓尺度中遮蔭與大樓陰影對於人行空間氣溫的升高與降低有相當程度的影響之研究(邱煒翔,2012)結果一致,並且與另一份研究文獻(謝俊民等人,2012)之結論吻合,該研究分析中顯示於陰影環境下黑球溫度較低,且植栽陰影下的黑球溫度較建物陰影爲高,該研究推測其原因爲植栽葉間縫隙較大、光線穿越較多,故黑球溫度的降溫效果較差。

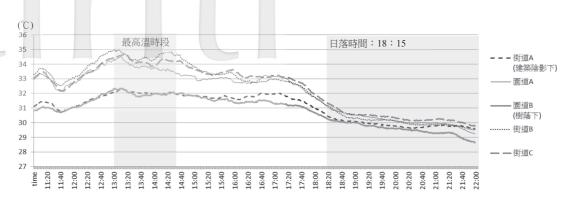
本研究比較三個位於都市街道中建築環境條件不同之實測點數據,試圖釐清街道建築物與乾球溫度之關係。分析結果發現:即便「街道A(建築陰影)」實測點之街道兩側建築密集,理當會接受到更多建築物人工發散熱之影響,甚至因爲周邊之密集建築而減低通風降溫效果,然而「街道A(建築陰影)」實測點之乾球溫度始終保持較低溫之優勢;反觀「街道B」與「街道C」兩實測點之數據,在白天與傍晚前,有較少建築物影響之「街道C」實測點所測得之乾球溫度始終微幅高於「街道B」,足見建築物所造成的人工發散熱及阻礙通風之影響雖然不容小覷,但在本研究所選之街道環境中卻略顯得微不足道。

另一影響都市街道熱舒適性之關鍵因子即是風,風是空氣流動產生的現象,一般以 m/sec 作爲平均風速的量測單位,在有風流動的情形下,人體會感覺較爲舒適,在熱舒適性指標「平均輻射溫度」(Mean Radiant Temperature, MRT)的計算式之中,即包含了平均風速。

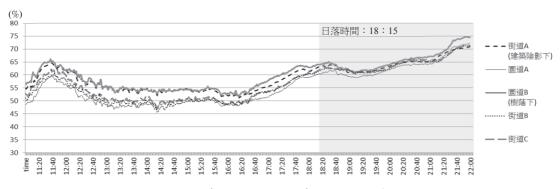
由平均風速數據(見圖九、圖十二、圖十五)顯示,位於園道的兩實測點因儀器周圍較爲空曠,空氣流動不受阻礙,明顯具有較高的風速。而在建築陰影下的測點因爲建物的遮蔽,根據實測結果數據顯示,該區域平均風速數値較小,進而也會影響熱舒適性。此外,就都市街道通風降溫而言,若單以兩個均位處於通風條件優異之「園道 A」與「園道 B(園道陰影)」的乾球溫度與平均風速實測點數據比較,即可發現兩者於白天同樣均擁有較高之平均風速,但仍存在極大的乾球溫度差異。此外,雖然「園道 A」量測點平均風速較「街道 A(建築陰影)」實測點高出許多,但顯現出的實測結果數據卻是通風降溫條件較優異的「園道 A」乾球溫度較高出許多。再者,三個位於街道內的實測點「街道 A(建築陰影)」、「街道 B」與「街道 C」有相類似的平均風速條件,在白天卻也擁有約2.5~3.0℃的乾球溫度差異。

而若以植栽綠化降溫論之,兩處位於園道之實測點亦在白天溫度差異,甚至「園道 A」 實測點之乾球溫度遠高於「街道 A」(建築陰影)所測得之值,足顯示對於東西走向之都市街 道而言,主宰熱環境的關鍵因子,當以陰影條件爲首,相對濕度與風速條件次之。至於納入 濕球溫度與輻射溫度之街道熱舒適性分析,在熱舒適性指標分析中另做探討說明。

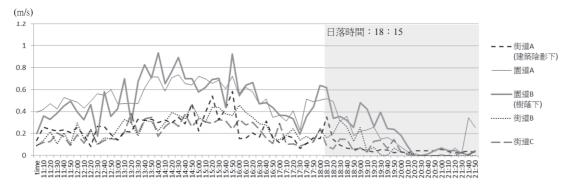




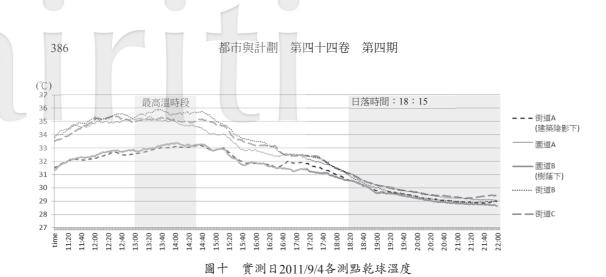
圖七 實測日2011/9/3各實測點乾球溫度



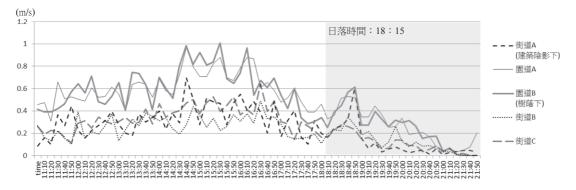
圖八 實測日2011/9/3各實測點相對濕度



圖九 實測日2011/9/3各實測點十分鐘平均風速

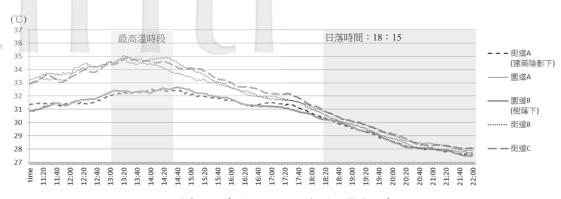






圖十二 實測日2011/9/4各測點十分鐘平均風速





圖十三 實測日2011/9/5各測點乾球溫度



(m/s) 1.2 日落時間:18:15 - - 街道A (建築陰影下) 0.8 関道Α 0.6 関道Β (樹蔭下) 0.4 .. 街道B 0.2 — 街道C 0 

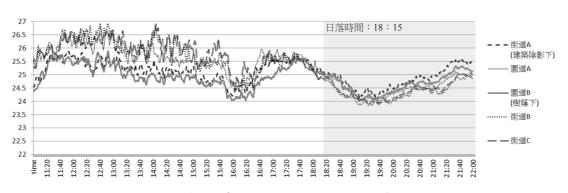
圖十五 實測日2011/9/5各測點十分鐘平均風速

## (二)濕球溫度與黑球溫度

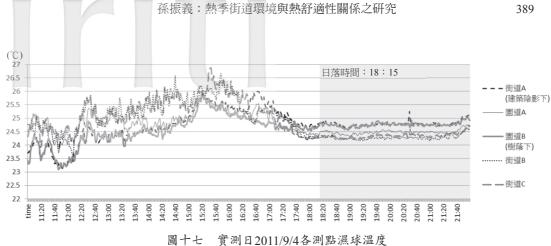
本研究爲探討街道環境與熱舒適性之關係,在五實測點量測乾球溫度、相對濕度、平均 風速外,同時亦量測濕球溫度與黑球溫度值,以資作爲計算熱舒適相關指標之依據。 濕球溫度是指對一塊空氣進行加濕,當其相對濕度爲 100% 之飽和狀態時所達到的溫度。 濕球溫度由實際乾球溫度和濕度決定,由於汽化潛熱由空氣塊提供,故此溫度將會低於乾球 溫度。換言之,本研究量測所得之濕球溫度可視爲當時各實測點環境僅通過水蒸發所能達 到的最低溫度。實測結果顯示:所得之各實測點乾濕球折線圖有類似的走向(見圖十六~圖 十八),同時仍是以「街道 A (建築陰影)」及「園道 B (園道陰影)」兩實測點之濕球溫度較低, 但「園道 A」實測點之濕球溫度時而與低溫群一致、時而向高溫群靠攏,顯示此實測點屬性 介於兩者之間,也亦即「園道 A」之熱舒適性分析將較爲複雜。最末值得一提的是,本研究 發現,各量測點之濕球溫度差值在傍晚日落前開始趨向一致,不似白天有較大的差異,亦即 各測點的濕度條件較趨於類似。

黑球溫度是評估輻射、空氣溫度和空氣流速對人類舒適綜合效應的一種方式,相較於乾球溫度與相對濕度,黑球溫度納入了周圍輻射熱與平均風速的影響,常被當作評估熱舒適度的重要參數之一。本研究以黑球溫度數據進行分析,結果顯示各測點之間所得黑球溫度數據差異遠大於乾球溫度(見圖十九~二十一),高溫群(「街道 B」與「街道 C」)和低溫群(「街道 A(建築陰影)」及「園道 B(園道陰影)」)的黑球溫度差距在白天甚爲偏高。意即當人經過或活動於高溫群各測點時,除了空氣溫度外,亦將可能會接收到較多的輻射熱,嚴重影響人體之熱舒適性。

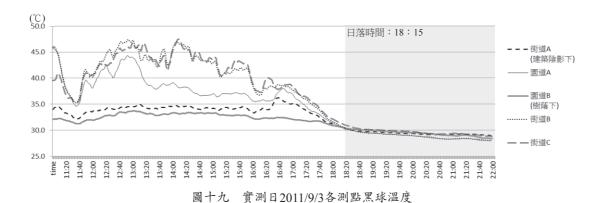
本研究之高溫群測點「園道 A」之黑球溫度數據約在 13:00 過後明顯出現降低的現象,乃是肇因於該測點周邊建築因太陽照射角度的改變而對量測點造成陰影,當陰影遮蔽了測量儀器時,促使該區域接收到的輻射溫度大幅降低,隨時序推移後,「園道 A」測點黑球溫度變動曲線與數值,便迅速地與同爲陰影下之「街道 A (建築陰影)」及「園道 B (園道陰影)測點所得數據趨近。此外,所有實測點之黑球溫度在 16:30~17:30 間會出現一短暫升溫情況,此仍係因太陽照射角度的關係,以至於各實測點在此時均受到短暫太陽直射。類似狀態在乾球溫度量測數據中亦有出現,僅是增溫現象比較微幅,係因爲輻射熱對於黑球溫度之影響較劇烈、直接,而太陽輻射熱加溫實測點周圍環境雖亦會促使氣溫上升,但需要更長的時間才能具體反應在乾球溫度數據上。

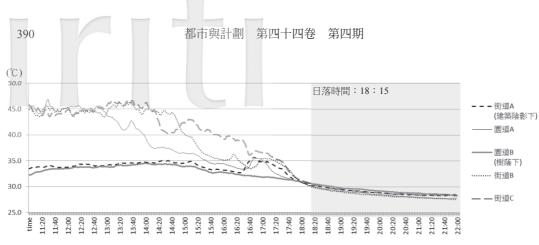


圖十六 實測日2011/9/3各測點濕球溫度

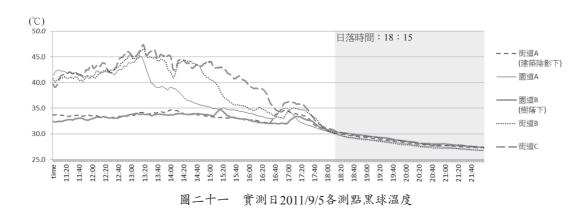








圖二十 實測日2011/9/4各測點黑球溫度



## (三)熱舒適性指標 WBGT

由於熱舒適性係受周圍環境影響之綜合結果,環境影響因子間可能的交互作用及相互關聯,既有之熱舒適指標係以各環境因子之貢獻度爲基礎,作爲計算公式之係數依據。關於熱舒適性之評估,在國際上常見的指標有「濕黑球溫度」(The Wet Bulb Globe Temperature, WBGT)及「平均輻射溫度」(Mean Radiant Temperature, MRT)兩項。WBGT 指標約在 1950 年代晚期被提出,於 1989 被建議爲國際通用指標,在台灣亦以此指標做爲評估熱舒適的標準之一。此指標係是在陽光直射環境下,考慮了熱舒適性之溫度、濕度、風速、太陽輻射等因素,因此有許多國家均以WBGT作爲戶外作業及軍事機構,在陽光直射環境下的工作量管理依據。其計算方法如下:

戶內或戶外無日曬時: WBGT =  $0.7 \times Tw + 0.3 \times Tg$ 

戶外有日曬時: WBGT =  $0.7 \times Tw + 0.2 \times Tg + 0.1 \times Ta$ 

其中,Tw:濕球溫度 ( $^{\mathbb{C}}$  )、Tg:黑球溫度 ( $^{\mathbb{C}}$  )、Ta:乾球溫度 ( $^{\mathbb{C}}$  )。

根據上列計算公式,本研究計算出所有實測點之 WBGT 數據,並且將之繪成折線圖分析

其變化趨勢(見圖二十二~圖二十四)。研究結果發現,在實測期間內各測點濕球溫度波動大約僅介於 1~2°C,但黑球溫度的波動卻高達 10~15°C。因此,整體而言,WBGT 計算值和黑球溫度有一定程度的相似趨勢,但數值比黑球溫度低許多。本研究實測結果顯示,長期處於有陰影遮蔽環境之「街道 A(建築陰影)」及「園道 B(園道陰影)」兩實測點,其原濕球溫度與黑球溫度數據資料均爲較低,故計算所得之 WBGT 數值亦相對偏低,屬於熱舒適性較佳之環境。然而,雖人工發散熱確實亦會起到加溫空氣溫度之作用,但在戶外環境具備微量風速之狀態下,除非長時間有源自於交通或建築物(例如:烹煮或空調)的人工發散熱,否則其對於熱舒適性之影響相對輕微,亦即,若能控制都市環境在具備陰影或周圍輻射溫度條件較佳的狀態下,便較能夠確保該地區擁有較佳的熱舒適性。

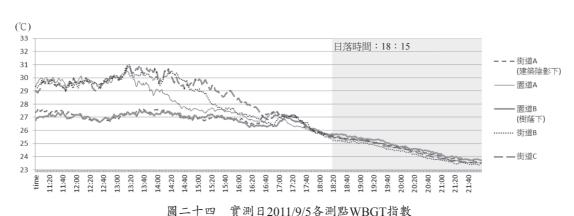
依據 ISO 7243 標準與相關研究 (Parsons, 2006) 顯示,休息中或輕量工作狀態的人可以忍受的 WBGT 値爲  $32~33^{\circ}$ C,因此根據本研究五實測站所得 WBGT 數據顯示均未超過  $32^{\circ}$ C 而言,代表各實測站之街道環境均在熱舒適可忍受範圍內。而本研究範圍中兩處長期處於有陰影遮蔽環境之「街道 A (建築陰影)」及「園道 B (園道陰影)」實測點,其全日 WBGT 大致未超過  $28^{\circ}$ C,係約爲間歇處理一般重物或爲步行者(每小時 3.5-5.5 公里)新陳代謝率能忍受之熱舒適性範圍,換言之,爲較佳之街道熱舒適性環境。

基本上,人們對於周遭熱環境感覺到舒適的程度是由人體的生理機能來決定,並且會因人而略有差異。在WBGT的計算式中,考量到人體排汗蒸發降溫機能,故以濕球溫度爲最主要的變數,但經實測得知由於各量測點間實際的濕球溫度差異値小,因此造成計算出來的WBGT結果並未強烈受到濕球溫度太大的影響。反觀,雖根據WBGT指標計算式可知黑球溫度權重並不算高,但因爲各量測點間的黑球溫度差異最高可達10°C以上,促使黑球溫度成爲影響WBGT的關鍵數值,甚至其他因素都難以對WBGT數值構成之決定性影響。故而若是能有效控制都市街道環境之輻射溫度的上升,就可以有效地創造較佳的熱舒適環境。



圖二十二 實測日2011/9/3各測點WBGT指數





### (四)熱舒適性指標 MRT

「平均輻射溫度」(Mean Radiant Temperature, MRT) 是除了 WBGT 以外較常見之熱舒適性指標之一。基本上,爲進行的熱環境的詳細評估,空氣溫度、輻射溫度、濕度和空氣流速此四個基本環境參數是必要的,在 MRT 的計算公式中除了考量到輻射溫度之外,還將空氣對流的程度(平均風速)直接納入基算。MRT 其計算式分爲是否有強制通風兩種 (Parsons, 2006),此外,亦有許多研究文獻採用簡要 MRT 計算公式 (謝俊明等人,2012)。根據 ISO 7726 標準使用最頻繁是有強制通風方程式,並且基於本研究場域爲戶外街道熱環境,故本研究遂選用有強制通風之公式計算。

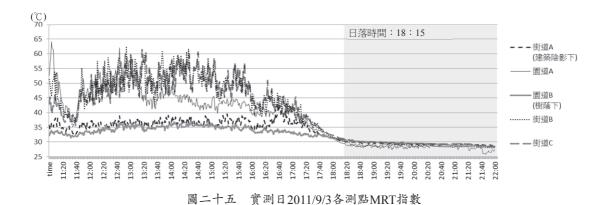
無強制通風: MRT =  $[(Tg+273)^4 + (0.25 \times 10^8)/\varepsilon \times ((Tg-Ta)/d)^{1/4} \times (Tg-Ta)]^{0.25} - 273$  有 強 制 通 風 ( 風 速 大 於 0.15m/s): MRT =  $[(Tg+273)^4 + (1.1 \times 10^8 \times v^{0.6})/\varepsilon d^{0.4} \times (Tg-Ta)]^{0.25} - 273$ 

簡略公式: MRT =  $Tg + 0.273 \times v^{1/2} \times (Tg - Ta)$ 

其中,Tg:黑球溫度 (°C )、Ta:乾球溫度 (°C )、 $\varepsilon$ :標準黑球發射率 ( 取  $\varepsilon$  = 0.95)、d:標準黑球直徑 ( 取 d = 0.15m)、v:風速 (m/s)。

在 MRT 的計算公式中,主宰熱舒適度的參數即爲黑球溫度,其次除了平均風速外,並且受到乾球溫度與黑球溫度差之影響,亦即當黑球溫度大於乾球溫度時,風速愈大則 MRT 數值越高。換言之,當實測點位置之輻射熱較多時所量測到的黑球溫度相對會偏高,此時黑球溫度與乾球溫度差異值也會相對較大,若同時有比較大的平均風速,則 MRT 計算值便會上升。此與台灣現實經驗在夏季較熱環境中,往往希望能有涼風輕拂的直觀想法不盡相符,此思維落差乃係因爲人體會以排汗機制調節體溫,而人們也有期待風可加速汗水蒸發、帶走熱量的經驗有關。

由於本研究期間各測點的風速絕大部分多低於 1.0 (m/sec),導致 MRT 指數的計算結果和 黑球溫度數據有極高的相似性,甚至在無風的狀態時,MRT 指數值就等於黑球溫度。針對實 測數據分析,MRT 指數較低者爲有陰影遮蔽環境之「街道 A (建築陰影)」及「園道 B (園道 陰影)」,此兩實測點雖然亦有相對較高的平均風速,但因其平均風速多低於 1 (m/sec),故其影響 MRT 值微乎其微 (見圖二十五~圖二十七)。此外,「園道 A」實測點的 MRT 計算值變動趨勢與其黑球溫度相仿,在午前身處高溫群,但午後因黑球溫度下降而趨近低溫群。相對地,另外兩個位於街道中無顯著遮蔭的「街道 B」及「街道 C」則因爲偏高的黑球溫度而持續處於 MRT 值較高之狀態,直到傍晚日射強度降低後 MRT 計算值才逐漸下降,最終在日落前幾乎與其他實測點數據趨於一致。



(°C) 日落時間:18:15 65 街道A 60 (建築陰影下) 55 関道A **周**道B 45 (樹蔭下) 40 .. 街道B 35 30 - — 街道C 25 12:20 12:40 20:20 20:40 13:00 13:20 15:00 15:40 16:00 16:20 16:40 17:00 17:20 17:40 18:00 18:20 18:40 19:00 19:40 20:00 12:00 13:40 14:00 14:20 14:40 15:20

圖二十六 實測日2011/9/4各測點MRT指數



- 街道A

関道Α

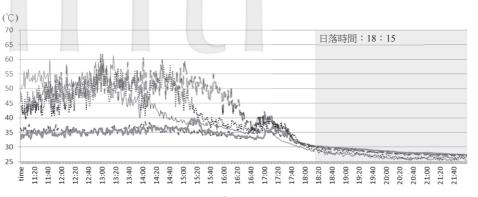
周 省 R

街道B

—街道C

(樹蔭下)

(建築陰影下)



圖二十七 實測日2011/9/5各測點MRT指數

## 四、結論與建議

在台灣有多數人居住於都市,都市中街道熱環境與熱舒適性係爲影響居住品質、空調耗能及戶外活動意願之重要依據。人體熱舒適性會受到很多面向因素的影響,如人體的生理機能因人而異,對熱的感受程度不同,或者穿著衣服不同影響熱對流等。爲探討夏季都市街道環境與熱舒適性之關係,本研究依據還經差異設立了五個實測點,連續三日由 11:00 至 22:00 測量相關微氣候數據之變動情形,並且據以計算各量測點之 WBGT、MRT 指數,希望藉此分析對未來都市街道環境及人們活動場域做出提升熱舒適性之實質改善建議。本研究具體結論與建議敘述如下:

- (一)經本研究實測與分析後發現,都市街道中之熱環境與熱舒適度受到建築陰影、植栽陰影、建築樣式、通風條件、環境濕度、日照條件等因素所影響,進而反應在乾球溫度、濕球溫度、相對濕度、平均風速、黑球溫度等實測數據上。
- (二)在「街道A(建築陰影)」、「園道A」、「園道B(園道陰影)」、「街道B」、「街道C」 此五個實測點中,熱環境與熱舒適性較佳的測點爲長期處於陰影下之「街道A(建築陰 影)」及「園道B(園道陰影)」,其反映出創造良好的陰影環境將有效確保街道熱環境 與熱舒適性。
- (三)「園道 A」與「園道 B(園道陰影)」雖同樣擁有較佳的通風環境及綠化降溫條件,但因為「園道 A」測點無較佳之陰影遮蔽環境,故其無論在乾球溫度、黑球溫度、WBGT或 MRT 之實測與計算數據上,均高於「街道 A(建築陰影)」及「園道 B(園道陰影)」,並且與位於街道內之測點「街道 B」及「街道 C」較為相似。顯示出通風條件與綠化降溫等因素對於街道熱環境與熱舒適性而言頗具影響力,但重要性卻不及遮陰對於熱環境之改善與熱舒適性之提昇來的直接有效。
- (四)本研究亦採用了廣泛運用於眾多熱舒適性評估與研究中之 WBGT 及 MRT 兩項指標,其



中最直接影響 WBGT 與 MRT 指數的因子即爲輻射溫度(黑球溫度)的高低變化,並以 濕球溫度與乾球溫度爲輔。雖然在 MRT 計算公式中納入了平均風速之考量,但此舉亦 會出現夏季炎熱時平均風速越高則 MRT 指數越高之狀態。爲簡化都市街道熱環境狀況 之呈現,建議將來台灣夏季街道環境熱舒適性之研究可以 WBGT 指數爲主。

- (五)根據本研究實測結果與分析,在陰影下的實測點「街道 A(建築陰影)」及「園道 B(園道陰影)」擁有較佳之降低幅射溫度(黑球溫度)之效,故建議未來應該增加都市街道之遮蔽條件。此外,「園道 B(園道陰影)」雖與「街道 A(建築陰影)」同般具備陰影條件,但根據濕度數據顯示「園道 B(園道陰影)」另擁有植栽蒸發散降溫之效益,對熱環境改善及熱舒適性的提升頗有顯著貢獻,故除了促使街邊建築物爲都市街道創造更多遮蔭範圍外,更推薦以園道、行道樹及街道綠化等手法強化街道遮蔭條件。
- (六)建築物所產生之遮蔭降溫效果遠大於原所預期的人工發散熱增溫影響,且即便是緊鄰著 綠園道的測點,若是沒有良好的遮蔭條件,在周圍具是會反輻射熱量的道路、鋪面狀態 下,該測點之熱舒適性並不會因爲鄰近綠園道而提升;而在熱舒適性公式計算邏輯上, 雖然隨著風速的增加會促使熱舒適性變佳,然而若風係由大面積鋪面或道路方向吹來, 其引來的高溫微風並不會讓實際的街道熱舒適提升。

## 五、參考文獻

- 1. 李魁鵬、林憲德、林立人、郭曉青、陳子謙 (1999),台灣四大都會區都市熱島效應實測解析(二),「建築學報」,第31期,第75-90頁。
- 2. 林憲德、李魁鵬、陳冠廷、林立人、郭曉青、陳子謙 (1999),台灣四大都會區都市熱島 效應實測解析(一),「建築學報」,第 31 期,第 51-73 頁。
- 3. 林憲德、孫振義、李魁鵬、郭曉青 (2005), 台南地區都市規模與都市熱島研究,「都市 與計劃」,第32卷,第1期,第83-97頁。DOI: 10.6128/CP.32.1.83。
- 4. 邱英浩 (2009),都市水域環境對周圍熱環境舒適度影響之研究,「都市與計劃」,第36卷, 第2期,第173-199頁。DOI: 10.6128/CP.36.2.173。
- 5. 邱英浩 (2011),建築配置形式對戶外空間環境風場之影響,「都市與計劃」,第 38 卷,第 3 期,第 303-325 頁。DOI: 10.6128/CP.38.3.303。
- 6. 邱英浩 (2012), 透水面積比例對環境微氣候之影響:以中興新村南核心區爲例,「都市與計劃」,第39卷,第3期,第297-326頁。DOI: 10.6128/CP.39.3.297。
- 7. 邱英浩、吳孟芳 (2010),不同街道尺度對環境風場之影響,「都市與計劃」,第 37 卷, 第 4 期,第 501-528 頁。DOI: 10.6128/CP.37.4.501。
- 8. 邱英浩、陳慶融、陳佳聰 (2014),封閉式中庭鋪面類型及尺度對微氣候之影響,「都市 與計劃」,第41卷,第4期,第395-427頁。DOI: 10.6128/CP41.4.395。

#### 都市與計劃 第四十四卷 第四期

- 9. 邱英浩、潘勇成、譚政泓 (2013),水域周邊熱舒適預測模型之研究,「都市與計劃」, 第 40 卷,第 3 期,第 243-266 頁。DOI: 10.6128/CP.40.3.243。
  - 10. 邱煒翔 (2012),「都市街道環境氣溫影響因素之研究」,臺北:中國文化大學碩士論文。
- 11. 姜善鑫、盧光輝、武克茂 (1995),台灣西部地區都市熱島效應之研究,「地理學報」, 第 18 期,第 23-34 頁。
- 12. 柯亙重、張書芸 (2004),高雄地區夏季地表氣溫分布之觀測解析,「環境與世界」,第 9期,第83-106頁。DOI: 10.6304/EAW.2004.9.4。
- 13. 孫振義、林憲德 (2006), 台南地區都市熱島強度全年變動之研究,「都市與計劃」,第 33 卷,第1期,第 51-68 頁。DOI: 10.6128/CP.33.1.51。
- 14. 孫振義、林憲德、呂罡銘、劉正千、陳瑞鈴 (2010), 台南市地表溫度與地表覆蓋關係之研究,「都市與計劃」,第 37 卷,第 3 期,第 369-391 頁。DOI: 10.6128/CP.37.3.369。
- 15. 孫振義、簡子翔 (2016),夏季臺北都會區熱島效應之研究,「都市與計劃」,第 43 卷,第 4 期,第 437-462 頁。DOI: 10.6128/CP.43.4.437。
- 16. 曾國雄、吳水源 (1986),台灣地區市鎭鄉都市化程度特性之研究,「師大地理研究報告」, 第 12 期,第 287-323 頁。
- 17. 黃樹仁 (2002),臺灣都市化程度析疑,「臺灣社會學刊」,第 27 期,第 163-205 頁。
- 18. 鄭明仁、羅仁豪、李建鋒 (2009),大學校園戶外環境熱舒適性之實測調查研究,「建築學報」,第 69 期,第 1-16 頁。
- 19. 賴湘文、邱英浩、高立新、王价巨 (2016),都市街廓特徵與人體熱舒適之關係研究,「都市與計劃」,第 43 卷,第 1 期,第 89-114 頁。DOI: 10.6128/CP.43.1.89。
- 20. 謝俊民、劉怡欣、戴婷婷 (2012), 人行步道空間的陰影連續性設計與熱舒適評價,「都市與計劃」,第39卷,第4期,第407-429頁。DOI: 10.6128/CP.39.4.407。
- 21. ASHRAE (2004). ASHRAE Standard 55-2004 Thermal Environment Conditions for Human Occupancy, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Inc.
- 22. Fukushima, T., Kureha, M., Ozaki, N., Fujimori, Y., and Harasawa, H. (2002). Influences of air temperature change on leisure, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 7(2): 173-189. DOI: 10.1023/A:1022803405470.
- 23. Honjo, T. (2009). Thermal comfort in outdoor environment, *Global Environmental Research*, 13: 43-47.
- 24. Hwang, R. L., Lin, T. P., and Matzarakis, A. (2011). Seasonal effects of urban street shading on long-term outdoor thermal comfort, *Building and Environment*, 46(4): 863-870. DOI: 10.1016/j.buildenv.2010.10.017.
- 25. Lin, T. P., Matzarakis, A., and Hwang, R. L. (2010). Shading effect on long-term outdoor thermal comfort, *Building and Environment*, 45(1): 213-221. DOI: 10.1016/j.buildenv.2009.06.002.

- 26. Nikolopoulou, M., Baker, N., and Steemers, K. (2001). Thermal comfort in outdoor urban spaces: Understanding the human parameter, *Solar Energy*, 70(3): 227-235. DOI: 10.1016/S0038-092X(00)00093-1.
- 27. Nikolopoulou, M. and Lykoudis, S. (2006). Thermal comfort in outdoor urban spaces: Analysis across different European countries, *Building and Environment*, 41(11): 1455-1470. DOI: 10.1016/j.buildenv.2005.05.031.
- 28. Nikolopoulou, M. and Steemers, K. (2003). Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces, *Energy and Buildings*, 35(1): 95-101. DOI: 10.1016/S0378-7788(02)00084-1.
- 29. Parson, K. (2006). Heat stress standard ISO 7243 and its gobal application, *Industrial Health*, 44(3): 368-379. DOI: 10.2486/indhealth.44.368.
- 30. Spagnolo, J. and de Dear, R. (2003). A field study of thermal comfort in outdoor and semi-outdoor environments in subtropical Sydney Australia, *Building and Environment*, 38(5): 721-738. DOI: 10.1016/S0360-1323(02)00209-3.
- 31. Sun, C. Y. (2011). A street thermal environment study in summer by the mobile transect technique, *Theoretical and Applied Climatology*, 106(3-4): 433-442. DOI: 10.1007/s00704-011-0444-6.