

大學校園戶外環境熱舒適性之實測調查研究

鄭明仁* 羅仁豪** 李建鋒***

關鍵字：戶外熱環境，全遮蔭，無遮蔭，輻射熱，中性溫度

摘要

針對大學校園進行戶外全遮蔭、無遮蔭的熱環境監測，並以主觀問卷資料和客觀實地量測同步進行戶外熱環境調查，於戶外環境使用者 888 份問卷中的直接感受，發現植栽對於戶外環境之重要性。藉由機率迴歸方式分析獲得，中性溫度全遮蔭 24.5°C (SET*)、無遮蔭 22.6°C (SET*)。從溫度的接受上界來審視，則可發現有、無樹蔭相差了 1.6°C，顯見民眾對於輻射熱有明顯負面的感受，也可以了解到有樹蔭的戶外空間將能提供更具寬廣的戶外氣候條件範圍，提升戶外環境使用上的熱舒適性。

A Field Study of Thermal Comfort for the Campus Outdoor Environment

Ming-Jen Cheng* Jen-Hao Lo** Jiann-Fong Li***

KEYWORDS: Outdoor Environment, Tree Shade, Non-Shady, Radiant Heat, Neutral Temperature

ABSTRACT

This study assessed outdoor thermal environments with and without leafy shade on university campuses of. Subjective opinions of interviewees were obtained via a questioner survey, while objective climatic factors were measured in field monitoring. A total of 888 valid questionnaires were collected. The importance of plants to outdoor thermal environment was highlighted by the reports of thermal sensations from users of outdoor facilities. The analysis results from probability regression indicated that neutral temperatures are 24.5°C (SET*) in sites with leafy shade and 22.6°C (SET*) in sites without plant shading. The upper limit of acceptable temperature in non-shady sites was 1.6°C lower than that of shaded sites. Radiant heat imposes negative sensations on subjects in the subtropical zone. Understandably, plant shade widens the thermal comfort zone of outdoor spaces, and thus enhances utilization by local residents.

* 逢甲大學建築學系教授（通訊作者 Email: mjcheng@fcu.edu.tw）

Professor, Department of Architecture, Feng Chia University, Taiwan

** 逢甲大學土木及水利工程研究所規劃組博士候選人

Ph. D. Candidate, Graduate Institute of Civil and Hydraulic Engineering, Feng Chia University, Taiwan

***逢甲大學建築學系碩士班研究生

Graduate Student of Master, Department of Architecture, Feng Chia University, Taiwan



一、前言

在人類的居住環境中，以往人們大多致力於室內環境之改善，較專注在創造一個適合人類居住之室內空間，但室內空間僅為整體大環境中的一小部份，隨著全球暖化問題一年比一年更加嚴重，戶外熱環境之品質控制更顯重要。

戶外熱環境之改善，如能採用誘導性之設計(passive design)，遵循自然法則，以不破壞地球環境資源為前提，減緩暖化之發生，便能造就更適於人類居住的環境。因此，了解戶外環境氣候變化以及人類對熱環境之感知，將可探尋出最適切的戶外熱環境。

世界各國現階段對於熱環境舒適度之探討，大多以室內環境為主要探討對象。而室內環境之評估多以 ET(effective temperature)、PET(physiologically equivalent temperature)、OT(operative temperature)、ET* (new effective temperature)等為標準評估方式。目前對於戶外熱環境之研究，並無統一國際通用的標準來評估，目前大多數的熱環境評估模式研究所運用的指標，包含Ta(ambient temperature)、GT(globe temperature)、MRT(mean radiant temperature)、WBGT(wet-bulb globe temperature)、SET*(standard new effective temperature)等。因此，如何選用適切的評估方式應用於亞熱帶地區之「台灣」，並及早與國際上各種類型氣候分區之「熱環境」等議題共同探討，使得目前台灣熱環境朝向與國際化接軌，實有其重要性與必需性。

二、理論與方法

2-1 物理環境相關理論基礎回顧

(1)人體熱平衡

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，且因人而異並有所不同。人體本身產熱的情形，經由身體表面所散發之熱量，使得人體可以維持一定體溫，而達到人體的熱平衡狀態(Fanger, 1970)。

$$\text{熱平衡方程式：} S = M \pm R \pm C - E$$

S：體內蓄熱 C：人體依對流所接受或散失之熱

M：人體生熱 E：人體由蒸發所散失之熱

R：人體由周圍輻射所接受或散失之熱

當 S 接近 0 值時，人體感覺舒適，

$$\text{此時熱平衡方程式為：} M \pm R \pm C - E = 0$$

當 S 為負值時，人體感覺寒冷，

$$\text{此時熱平衡方程式為：} M \pm R \pm C - E < 0$$

當 S 為正值時，人體感覺暖和，

$$\text{此時熱平衡方程式為：} M \pm R \pm C - E > 0$$



(2)人體的冷熱感覺

人體與周遭環境的冷熱感覺，建立在生理和心理的影響上，主要影響生理方面的有三大要素，一是外周環境影響要素，二是人體狀況要素(賴榮平等，1991)。

(A)外周環境影響要素

- (a)氣溫：空氣中所量測到的溫度。
- (b)濕度：空氣中所含水蒸氣量的大小。
- (c)周壁溫度：四周牆面的輻射溫度。
- (d)氣流：空氣流動的情形。

(B)人體狀況要素

- (a)工作強度：人體的代謝率。
- (b)著衣量：人體身上衣服穿著多寡的情形。

(3)穩態熱平衡模型

熱環境舒適性的探討，大多專注於室內熱環境的改善，於六十年代，美國冷凍空調協會(ASHRAE)在美國堪薩斯州立大學環境實驗室中，進行大量的實驗研究，得到了熱舒適性條件的數據，丹麥的 Fanger 教授在 1972 年，將這些數據資料，結合了人體產熱與散熱的物理因子(溫度、濕度、風速、輻射)以及人體的代謝量和衣著量，提出了綜合性舒適方程式，並發表了穩態熱平衡模型(圖 1)，將人體視為忽略許多熱負荷的平衡狀態，於穩態時，發熱速度等於散熱速度(ASHRAE, 2004)。

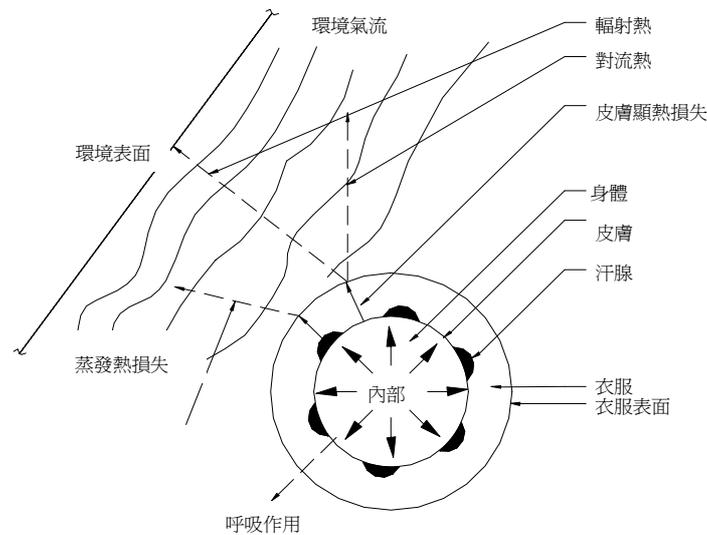


圖 1 人體與環境的熱交換平衡機制 資料來源：(ASHRAE, 2004)

(4)舒適性理論

美國冷凍空調學會 ASHRAE 和國際標準組織，訂有多種舒適性評估標準，如 ASHRAE Handbook of Fundamentals(ASHRAE, 1997)、ASHRAE Standard 55(ASHRAE, 2004)、ISO 7726(1998)、ISO 7730(1994)等，評估和規範舒適性之重要方法。

熱舒適性評估指標是熱舒適性研究的重要關鍵，結合了客觀的現場量測所得之實測值，與受測

者對當下所處熱環境舒適性的主觀感受；在美國冷凍空調協會對舒適 (comfort)的定義為“人體對週遭環境狀況感到滿足”；與國際標準組織的 ISO 7730 所定的熱舒適定義為人體當下所處的熱環境表示滿意時的狀況，需經由詢問當下熱環境使用者的舒適與否(ISO 7730, 1994)。

2-2 戶外環境熱舒適性相關文獻回顧

2007 年林子平於室內、半戶外及戶外空間進行環境舒適性的研究，研究結果發現戶外熱舒適性對於經濟價值上有其必要性，因越來越多遊憩活動發生於戶外及半戶外空間，且對於人類居住環境的省能、舒適、環保等課題皆有相關之影響。在半戶外空間中發現，因已有遮蔽物，導致對半戶外空間使用者的期待較戶外更高，容忍度更低；於半戶外環境中的溫度、濕度調節不容易，不像室內空間可以用空調設備來改善，因此，於設計時必需採取誘導式的方法(風速的控制、日照的遮蔽)，並依照不同的氣候環境進行調節，才能提供半戶外、戶外空間使用者舒適的熱環境(林子平, 2007)。

Spagnolo and de Dear 在戶外熱環境的研究中曾經提到，「在戶外或半戶外空間的舒適性到目前為止少有探討，乃是因為研究者或使用者過去普遍存在以下四點的想法(Spagnolo and de Dear, 2003)：

1. 已開發國家的人們花較長之時間對於室內空間進行研究。
2. 在工作環境裡，熱環境舒適性被認為直接地與生產力有關，所以室內熱環境舒適性被認為是經濟上之重要因素。
3. 戶外熱環境空間被認為比室內熱環境空間較不易被營造或控制。
4. 戶外環境的所有權，在許多的戶外空間中不容易像室內空間清楚定義。

唯戶外熱環境實屬未來重要的議題，舒適性上的研究更不能不及早面對，也因此，近年來針對戶外環境的相關研究則開始日益增多。但室內的評估模式，是否皆可應用於戶外的空間環境，則是必須小心謹慎的課題，於 2004 年研究中發現，PMV 與 PPD 並不適用於戶外及半戶外的使用，PMV、PPD 評估的方法僅限於室內空間為使用對象，故以往評定室內熱環境之評估標準，拿來用於戶外環境中是較有疑慮的(Chun, et al., 2004; Nakano and Tanabe, 2004)。

2-3 小結

根據物理相關熱環境舒適性理論基礎，釐清熱平衡與熱舒適等相關之概念，進而閱讀國內、外相關文獻與期刊等，總合觀察分析以上國內、外戶外相關之文獻後，對於戶外環境熱舒適性相關研究中，可發現其研究對象多以鋪面、都市水域空間、舒適性為主，探討之間的相互關係。而大多戶外熱環境的研究中，對其相關探討僅限於日照下之空間，較少墨於“植栽”對於戶外熱環境空間影響之議題。因此，本研究則針對植栽的遮蔽效果，進行有無遮蔭下之使用者，對於戶外熱舒適感知差異的調查與研究，期待未來能藉由更多元的戶外熱環境調查與不同指標上的評估，了解不同風土環境之民眾所能適應之最佳熱環境條件，以提供後續環境之檢討與改善之參考。



第三章 研究方法

3-1 研究對象

本研究選定大學校園戶外環境空間使用者為調查對象，因大學校園屬開放性的空間，故校園內之戶外環境空間使用者，遍及校園內的教職員生外，也涵蓋由一般民眾進入校園之校外人士，進入到校園中使用戶外環境空間，其涵蓋之年齡層為大學生以上之戶外環境使用者，故選定大學校園戶外空間使用者為調查對象，並於開放性的大學校園以隨機方式，進行戶外環境空間的實地量測與使用者的問卷調查。

3-2 調查方法

在大學校園戶外環境空間中，排除片斷不連續及小範圍的戶外空間，以大範圍空曠戶外環境為主，在選擇戶外地點時，考量避免建築物所造成熱環境的變動因子，故排除因建築物周圍所產生陰影的地點，並以當日日射狀況來選擇適當之調查地點，探討全遮蔭、無遮蔭二種明顯差異的戶外環境空間。

於受測者填寫問卷當下所處的戶外環境空間架設儀器，分別依照全遮蔭、無遮蔭之二種戶外熱環境空間分別施測，利用熱環境監測儀器量測，記錄當下所實測數據於問卷中，儀器架設高度設定高度為 110cm 高，並將儀器置放於受測者身旁，且受測者的男女比例相近，並請受測者依當下對熱環境感覺填寫問卷。

問卷分為三大部分，內容如下所示：

第一部分：為受訪者基本資料，包括性別、年齡、身高、體重、填寫問卷前的活動行為及當下的健康狀態和衣著量。

第二部分：則是針對受訪者對戶外熱環境的感覺，進行熱環境之感覺評估，包括：熱接受度、熱感知尺度、熱喜好度、空氣流動感知、濕度的感知。

第三部分：對於戶外熱環境空間，1.如果不舒適，會希望選擇的調適行為項目為何？以及 2.希望更加舒適時，希望能建議改善的項目為何？

3-3 調查時間與地點

(1)調查時間：實測時間於 2007 年 1 月底至 2008 年 1 月底間進行調查，測量進行時，考量雨天和陰天所造成戶外熱環境的變異與受測者於雨天戶外的活動行為受限，故排除雨天與陰天的天候，並以早上九點至下午六點為測量時段。

(2)調查地點：本研究主要想了解人類對於戶外環境熱舒適性的感受，故以逢甲大學及靜宜大學二所大學進行調查。

(A)逢甲大學：以逢甲大學的戶外環境使用者為研究對象，並以逢甲大學校區內之戶外空間為研



究範圍，礙於人力限制，排除片斷不連續及小範圍的戶外空間，以大範圍空曠戶外環境為主，故選擇：(1)榕榕大道至圖書館前戶外廣場；(2)人言大樓前廣場；(3)育樂館後面大草坪的範圍。

(B)靜宜大學：因靜宜大學校區內，於大門入口正中間擁有一大片的綠地空間，故戶外環境調查地點則選定在大門入口處的大片綠地之間，並排除建築物周邊緊臨地點造成的陰影影響，選定綠地中央與喬木種植之區域。

在調查進行前，皆將儀器架設於與受測者遮蔭環境相同的環境，並以不影響其活動為主。

3-4 儀器設備

依據人體與環境熱平衡的關係，主要影響人體舒適性的因素，共分為物理環境因子與個人因素二大類。其中物理環境參數包含：1.空氣溫度、2.平均輻射溫度、3.相對濕度、4.風速四大項目；個人因素則為包含：1.人體活動量、2.衣著量。

本研究戶外環境物理性的量測儀器，參照 ASHRAE Standard 55 與 ISO Standard 7726 規範，採用：1.CENTER314 溫濕度量測儀、2. ANEMOMETER HD2103.2 風速器，二種儀器均符合 ASHRAE Standard 55 與 ISO Standard 7726 對相關熱環境儀器的要求規定，主要是測量影響熱環境的四個物理參數：1.空氣溫度、2.平均輻射溫度、3.相對濕度、4.風速。

ISO Standard 7726 對於物理性環境因子儀器量測的規定，當中的平均輻射溫度是根據 ISO 7726 的平均輻射溫度測量方法，以直徑 150mm 的標準黑球，現場量測得到的戶外熱環境之黑球溫度，配合量測得到的空氣溫度與風速代入 ISO 7726 的公式算出平均輻射溫度。

儀器架設完成後，會先進行問卷的說明，以確實讓受測者了解問卷內容與答題方式，並讓儀器有時間與測量環境達到穩態平衡的狀況。

四、分析與討論

藉由主觀問卷調查所得資料，按照問卷內容進行歸納分析，配合客觀的現場量測數據，進行統計整合，並將主觀和客觀的資料進行交叉比對分析，進而討論其主觀和客觀數據彙整分析後的研究成果，期望能獲得準確性相對較高的研究貢獻。

經本研究調查數據的收集，共得 888 份有效問卷，於戶外環境當中，依照植栽遮蔭方式來區分，共計得到全遮蔭 542 份有效問卷，無遮蔭 346 份有效問卷，其所佔比例分別為 61.0%與 39.0%；以性別做為劃分，共計男性有效問卷數為 504 份，女性有效問卷數為 384 份，其分別所佔百分比，分別為男性 56.8%，女性 43.2%。

校園中的戶外環境使用者，因白天時屬於完全開放空間，其年齡層分佈範圍較廣，於填寫問卷之受測者中，平均年齡為 22.1 歲，其主要分佈在 18 歲到 21 歲之間，所佔百分比為 64.4%，這顯示校園中，雖主要的結構上仍以學生為多數，但仍有 35.6%的受測者，為來學校辦公、參觀校園及週遭社區居民的使用者。



4-1 熱調適行為之項目分析

校園戶外環境中的建議改善不舒適項目，分析全遮蔭和無遮蔭二種戶外環境空間的差異性，並將問卷資料做統計分析，而建議改善不舒適項目內容分別為 1.到樹蔭下；2.到有花架涼亭下；3.回到室內；4.快速通過；5.調整衣服；6.撐洋傘；7.戴帽子；8.喝飲料。

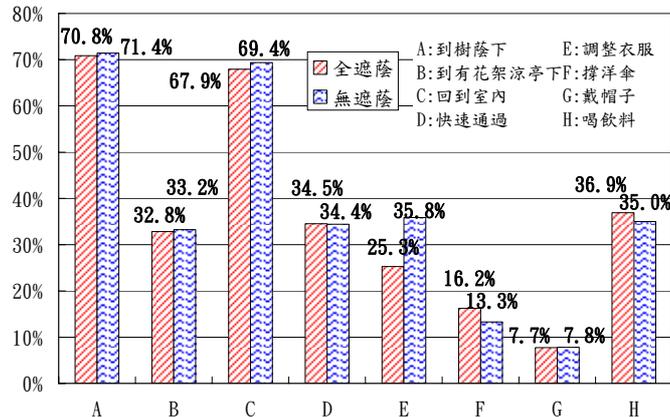


圖 2 全遮蔭、無遮蔭建議改善不舒適項目比例圖

在全遮蔭和無遮蔭環境下，到樹蔭下均佔最大百分比，全遮蔭和無遮蔭分別為 70.8%與 71.4%，顯見戶外熱環境不適時，民眾會先找尋有樹蔭的地點；而也有將近 70%的受測者會選擇回到室內，這也表示戶外熱環境不舒服時，將導致民眾戶外活動意願降低。在各個建議改善不舒適項目中，除了在調整衣服這個項目為差距最大的項目，無遮蔭 35.8%明顯大於全遮蔭 25.3%，差距 9.5%，顯示在無遮蔭環境中因受太陽輻射熱直接影響，調整衣物之意願較全遮蔭明顯提升；其他建議改善不舒適項目中，其差異性都沒有超過 5%，較無明顯差異(圖 2)。

4-2 期望改善熱舒適之項目分析

詢問受訪者在改善戶外熱舒適性上，未來期望環境如何改善，仍以全遮蔭和無遮蔭二種戶外環境空間進行分析，而問卷中未來期望改善的項目，分別為 1.多種植樹木；2.多點花架涼亭；3.更改鋪面材質；4.增加遮陽擋風牆面。

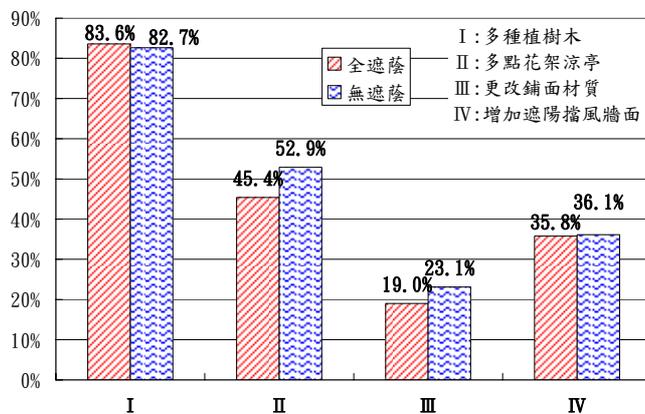


圖 3 全遮蔭、無遮蔭未來期望改善之項目比例圖

在全遮蔭和無遮蔭二種環境下，多種植樹木均佔最大百分比，分別為全遮蔭 83.6%和無遮蔭 82.7%，其次為多點花架涼亭，而人工化的更改鋪面材質、增加遮陽擋風牆面則少為民眾親睽。由此可見民眾們希望以最自然的方式來改善戶外熱環境。

4-3 熱感覺尺度與熱期望值項目分析

(1)全遮蔭熱感覺尺度與期望值項目分析

於全遮蔭 542 份有效問卷當中，將問卷中熱感覺尺度的項目與熱期望值經由統計結果如表 1 所示。

表 1 全遮蔭熱感覺尺度與期望值項目統計表

| | 冷 | 涼 | 微涼 | 剛好 | 微暖 | 暖 | 熱 | Total |
|-------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|----------------|
| 調涼 | 0 (0.0%) | 1 (2.1%) | 0 (0.0%) | 58 (45.3%) | 112 (76.7%) | 46 (97.9%) | 56 (96.6%) | 273 (50.4%) |
| 不變 | 1 (4.2%) | 25 (53.2%) | 62 (67.4%) | 68 (53.1%) | 34 (23.3%) | 1 (2.1%) | 2 (3.4%) | 193 (35.6%) |
| 調暖 | 23 (95.8%) | 21 (44.7%) | 30 (32.6%) | 2 (1.6%) | 0 (0.0%) | 0 (0.0%) | 0 (0.0%) | 76 (14.0%) |
| Total | 24 (100%) | 47 (100%) | 92 (100%) | 128 (100%) | 146 (100%) | 47 (100%) | 58 (100%) | 542 (100%) |

經由表 1 的統計交叉分析結果，於熱感覺尺度選擇剛好(0)的受測者中，同時也選擇不變的有 53.1%，選擇調涼的有 45.3%；於熱感覺尺度選擇微涼(-1)的受測者中，同時也選擇不變的有 67.4%；於熱感覺尺度選擇涼(-2)的受測者中，同時也選擇不變的有 53.2%；於熱感覺尺度選擇微暖(+1)的受測者中，同時也選擇不變的有 23.3%，選擇調涼的有 76.7%(圖 4)，並由圖 4 可看出人們喜好偏涼的環境，當民眾感到涼或微涼時仍有過半數的人認為可再調涼。

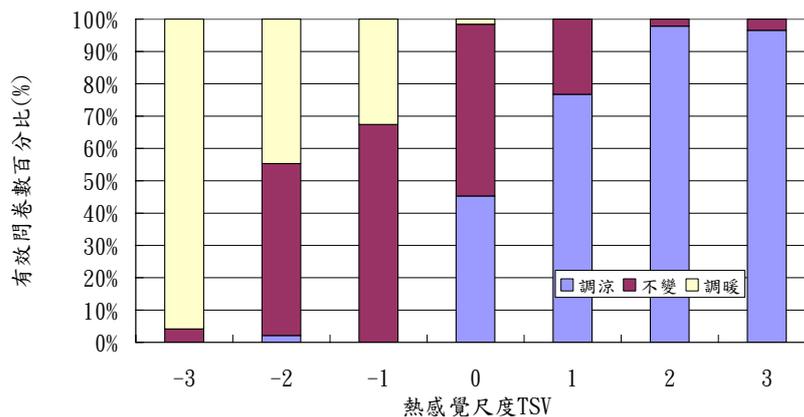


圖 4 全遮蔭熱感覺尺度與期望值項目圖

(2)無遮蔭熱感覺尺度與期望值項目分析

於無遮蔭 346 份有效問卷當中，將問卷中熱感覺尺度的項目與熱期望值經由統計結果如表 2 所示。



表 2 無遮蔭熱感覺尺度與期望值項目統計表

| | 冷 | 涼 | 微涼 | 剛好 | 微暖 | 暖 | 熱 | Total |
|-------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|
| 調涼 | 0 (0.0%) | 1 (20.0%) | 0 (0.0%) | 20 (45.5%) | 75 (74.3%) | 66 (93.0%) | 97 (98.0%) | 259 (74.9%) |
| 不變 | 0 (0.0%) | 3 (60.0%) | 14 (60.9%) | 21 (47.7%) | 26 (25.7%) | 5 (7.0%) | 2 (2.0%) | 71 (20.5%) |
| 調暖 | 3 (100.0%) | 1 (20.0%) | 9 (39.1%) | 3 (6.8%) | 0 (0.0%) | 0 (0.0%) | 0 (0.0%) | 16 (4.6%) |
| Total | 3 (100%) | 5 (100%) | 23 (100%) | 44 (100%) | 101 (100%) | 71 (100%) | 99 (100%) | 346 (100%) |

經由表 2 的統計交叉分析結果，於熱感覺尺度選擇剛好(0)的受測者中，同時也選擇不變的有 47.7%，選擇調涼的有 45.5%；於熱感覺尺度選擇微涼(-1)的受測者中，同時也選擇不變的有 60.9%；於熱感覺尺度選擇涼(-2)的受測者中，同時也選擇不變的有 60.0%；於熱感覺尺度選擇微暖(+1)的受測者中，同時也選擇不變的有 25.7%，選擇調涼的有 74.3%(圖 5)，並由圖 5 也可看出相似成果，即不論於有無遮蔭的狀況下，民眾皆偏好較涼的戶外熱環境。

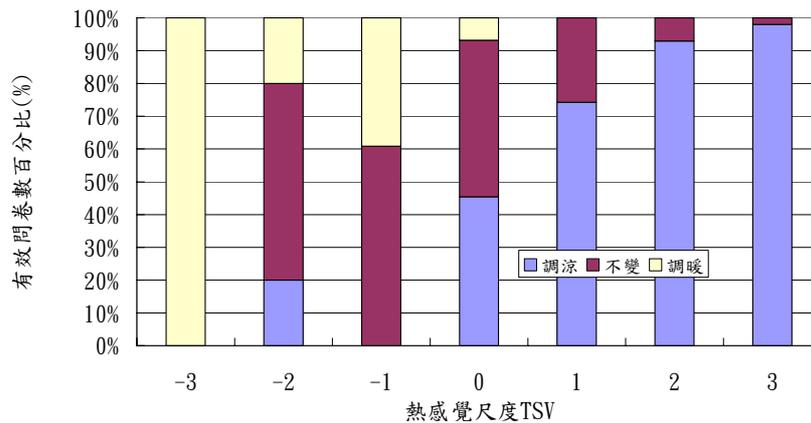


圖 5 無遮蔭熱感覺尺度與期望值項目圖

(3)小結

經由熱環境之問卷資料，依據熱感覺尺度和期望值的交叉分析統計結果，顯示校園全遮蔭和無遮蔭下的戶外環境使用者，期望比熱中性更加涼爽的戶外熱環境。

4-4 戶外熱環境評估指標探討

本研究量測數據，為了更貼近受測者填寫問卷時的感受，故於受測者填寫問卷時，同時以儀器記錄當下所量測之空氣溫度、黑球溫度、相對濕度及風速等四項物理環境因子。除了了解整體戶外熱環境的狀況，建立其資料庫外，並將問卷所反映出的民眾感知判斷與實測數據來相對應彼此之間的關聯性，以利於後續的分析研究。

根據校園戶外熱環境量測數據的統計所得，空氣溫度(乾球)最小值為 17.3℃，最大值為 35.0℃；黑球溫度最小值為 17.7℃，最大值為 42.5℃，以 1℃作為溫度的區間；相對濕度(RH)最小值為 37.9%，最大值為 84.4%；風速(V)最小值為 0.23m/s，最大值為 3.57m/s。

(2)外周環境和人體狀況因素

SET*熱環境評估指標，在外周環境因素當中，計算影響物理環境變動的四項重要因素，包含空氣溫度、濕度、周壁溫度、氣流等四種外周環境因素；並於人體狀況因素當中，將著衣量和活動量加入計算，使熱環境舒適度的計算更加的適切。

人體皮膚至衣服最外層之間的熱傳遞，包含介於之間空氣的熱對流、熱輻射，以及直接透過衣服的熱傳遞，因此衣物的熱阻值，是影響人體舒適性之重要的一個因素，Gagge 引用 Icl 的概念，來說明穿著衣服之人體，經由通過皮膚向衣物最外層散熱的總傳熱之熱阻。人體穿著衣物的總熱阻值，是經由各類衣服絕緣值的加總所獲得(ISO 9920, 1995)。

活動量理論，人體的新陳代謝率，由人體進行活動時於體內產生之熱量，而影響人體的新陳代謝率之因素，包性別、年齡、身高、體重、種族、脂肪比率、活動行為、進食的時間、周圍環境溫度等多項因素，一般測量人體新陳代謝所用的傳統單位為 Met(1 Met=58.15 W/m²)。一般成年人身體表面積為 1.7 m²，處於熱舒適的情況下，大約有 1 Met 的新陳代謝率，此時人體所釋散的熱量約為 100W(ASHRAE, 1997)。

4-5 熱敏感度分析

依據熱感覺尺度指標 TSV 的冷(-3)、涼(-2)、微涼(-1)、剛好(±0)、微暖(+1)、暖(+2)、熱(+3)七個等級的投票數，以每 1℃為一頻度，統計每 1℃頻度中的投票分佈狀況，再經由每 1℃頻度中的平均熱感覺尺度 MTSV 的計算，與相對應的新標準有效溫度 SET*，做線性迴歸方程式，即可將戶外環境使用者對戶外熱環境的熱敏感性呈現出來。將每 1℃頻度中做平均熱感覺尺度 MTSV，是為避免溫度過度集中於同一溫度的分佈狀況，故經由每 1℃頻度中的熱感覺尺度投票數統計結果，做平均熱感覺尺度 MTSV 的計算，進而與新標準有效溫度 SET*做迴歸分析。

(1)全遮蔭戶外熱環境熱敏感度分析

經全遮蔭戶外熱環境量測計算所得的新標準有效溫度 SET*，與平均熱感覺尺度 MTSV 的統計，在低溫中熱感覺尺度的投票值偏向冷、涼的選項投票值較多，並且熱感覺尺度的投票值偏向冷、涼的選項往高溫中逐漸降低；反之，偏向熱、暖的熱感覺尺度投票值，由低溫逐漸向高溫遞增。每 1℃頻度中間卷數分佈的分佈狀況，以中間溫度值為最多，逐漸往高溫和低溫降低減少，並且於平均熱感覺尺度 MTSV 中，在 25℃頻度中剛好為冷、熱感覺溫度分佈的分界點，MTSV 為 0 值。

經由新標準有效溫度 SET*的每 1℃為一頻度的溫度分佈，與平均熱感覺尺度 MTSV 做線性迴歸，得到線性迴歸方程式為 $MTSV = 0.2568 SET* - 6.3394$ ，判斷係數 $R^2 = 0.9593$ (圖 6)。



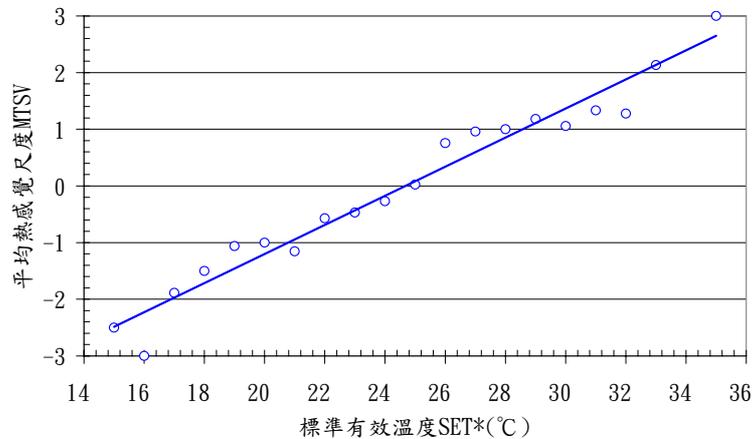


圖 6 全遮蔭熱敏感度圖

(2)無遮蔭戶外熱環境熱敏感度分析

經由無遮蔭戶外熱環境量測計算所得的新標準有效溫度 SET*，以每 1°C 為一頻度，統計每 1°C 頻度中的投票分佈狀況，再經由每 1°C 頻度中的平均熱感覺尺度 MTSV 的計算，在低溫中熱感覺尺度的投票值偏向冷、涼的選項投票值較多，並且熱感覺尺度的投票值偏向冷、涼的選項往高溫中逐漸降低；反之，偏向熱、暖的熱感覺尺度投票值，由低溫逐漸向高溫遞增。每 1°C 頻度中間卷數分佈的分佈狀況，以中間溫度值為最多，逐漸往高溫和低溫降低減少，並且於平均熱感覺尺度 MTSV 中，在 22 至 23°C 頻度中剛好為冷、熱感覺溫度分佈的分界點，MTSV 為-0.1 至 0.3 值。

經由新標準有效溫度 SET* 的每 1°C 為一頻度的溫度分佈，與平均熱感覺尺度 MTSV 做線性迴歸，得到線性迴歸方程式為 $MTSV = 0.2428 SET* - 5.6417$ ，判斷係數 $R^2 = 0.8886$ (圖 7)。

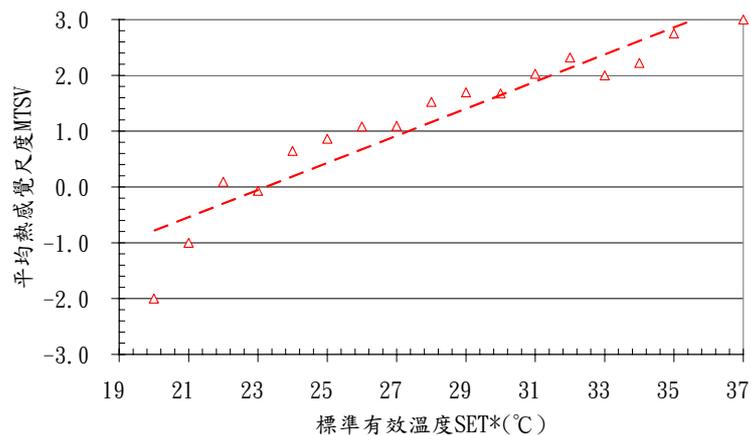


圖 7 校園無遮蔭熱敏感度圖

(3)小結

分析比較校園全遮蔭和無遮蔭情形戶外熱環境的線性迴歸，以了解其熱敏感度的差異為何，得

到全遮蔭與無遮蔭線性迴歸方程式如表 3 所示，由判斷係數來檢視，校園全遮蔭與無遮蔭的狀況下，兩者皆高於 0.89，顯示在無遮蔭與全遮蔭的空間下，整體的數據分布有極高的一致性。再由其斜率來看，全遮蔭與無遮蔭空間下分別為 0.26/°C 與 0.24/°C，並無明顯的差異變化。而熱感知與 SET* 之間的關係，也表示當全遮蔭的狀況下，熱感知每差距一個頻度，其溫度的變化為 3.9°C，而無遮蔭的狀況下，熱感知每差距一個頻度，其溫度的變化為 4.2°C，彼此之間的差距為 0.3°C，差異並不大。

表 3 全遮蔭、無遮蔭戶外熱環境線性迴歸分析表

| | 線性迴歸方程式 | 判斷係數 |
|-----|--------------------------------|----------------|
| 全遮蔭 | $MTSV = 0.2568 SET^* - 6.3394$ | $R^2 = 0.9593$ |
| 無遮蔭 | $MTSV = 0.2428 SET^* - 5.6417$ | $R^2 = 0.8886$ |

4-6 戶外熱環境中性溫度分析

中性溫度是依據熱感覺尺度指標 TSV 的冷(-3)、涼(-2)、微涼(-1)、剛好(±0)、微暖(+1)、暖(+2)、熱(+3)七個等級的投票數，經由全遮蔭戶外熱環境量測計算所得的新標準有效溫度 SET*，以每 1°C 為一頻度，統計每 1°C 頻度中的投票分佈狀況，再以剛好(±0)等級為中界點，劃分為中性偏熱群和中性偏冷群二大類別，中性偏熱群包含有選擇微暖(+1)、暖(+2)、熱(+3)以及選擇剛好(±0)群眾的一半所組成；中性偏冷群包含有選擇冷(-3)、涼(-2)、微涼(-1)以及選擇剛好(±0)群眾的一半所組成，進而分別計算所佔之百分比，並以在 50%所對應到的新標準有效溫度 SET*，即是全遮蔭與無遮蔭之戶外熱環境的中性溫度。

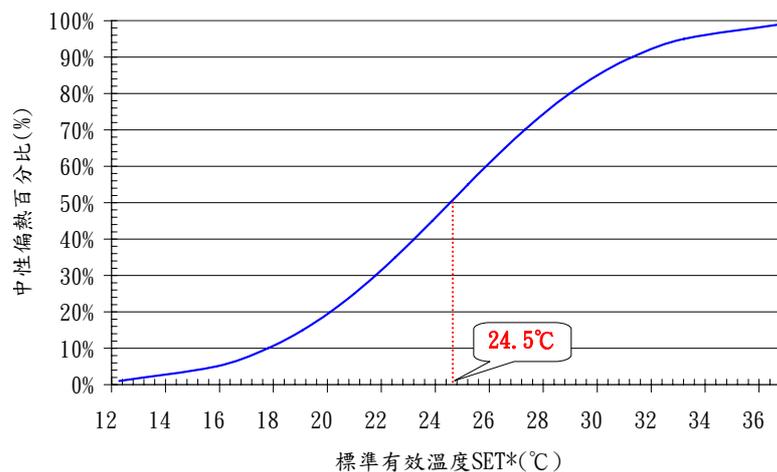


圖 8 全遮蔭戶外熱環境中性溫度圖



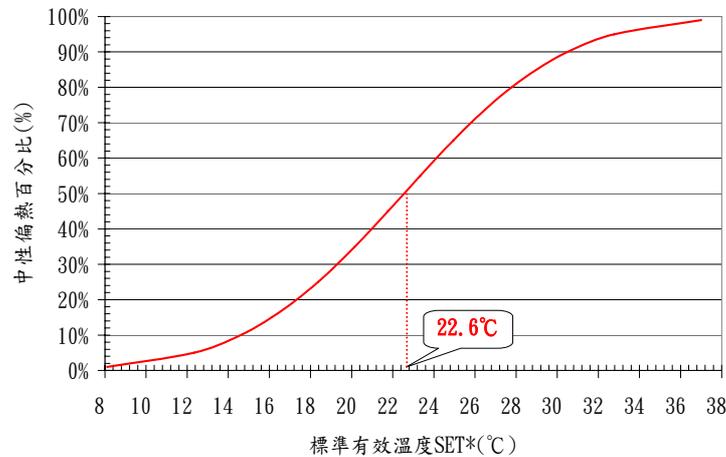


圖 9 無遮蔭戶外熱環境中性溫度圖

將中性偏熱群和中性偏冷群做統計分析，在中性偏熱群中，會隨著新標準有效溫度上升而增加百分比；在中性偏冷群中，會隨著新標準有效溫度上升而減少百分比；利用迴歸方程式 $Y_i = \alpha + \beta X_i$ 中 X_i 隨機變數，將 X_i 隨機變數標準化為 Z 值，使之成為標準常態分配，形成機率迴歸方程式 $Z = \alpha + \beta SET^*$ ，得以求出機率迴歸方程式的截距 α 和斜率 β ，再經由截距和斜率即可繪出累積機率分配百分比圖，最後由中性偏熱群的累積機率分配百分比圖中，在 50% 所對應到的新標準有效溫度 SET^* ，即可得到全遮蔭戶外環境使用者的中性溫度為 24.5°C，無遮蔭戶外環境使用者的中性溫度為 22.6°C(圖 8、9)。

4-7 戶外熱環境舒適範圍分析

將熱感覺尺度指標 TSV 與熱接受度的統計分析結果，依據 ASHRAE Standard 55 定義的舒適範圍，是指 80% 的受測者都感覺滿意的熱環境範圍。也因此，在圖面以 20% 不接受為界線，來劃分受測者的熱接受區間，其所對應到之數值，即是 TSV 的接受範圍。再依照 SET^* 與 TSV 的線性迴歸，將 TSV 的接受範圍對應至 SET^* ，即可得到熱舒適範圍的上、下界溫度(SET^*)。

(1) 全遮蔭戶外熱環境舒適範圍分析

依照 TSV 與接受度的交叉分析結果，得到二次迴歸曲線，再將 20% 的不接受範圍所對應到之 TSV 分別得到上限 1.14，下限 -1.43，再將之代入 SET^* 與 TSV 的線性迴歸線圖，依照迴歸線所對應到之上限溫度為 29.1°C (SET^*)，下限溫度為 19.1°C (SET^*)(圖 10、11)，由此得知在全遮蔭的狀況下，熱舒適的範圍有 10.0°C 的區間。

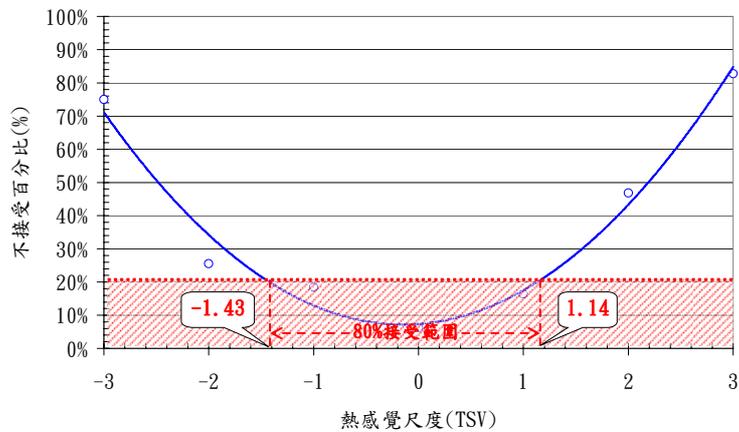


圖 10 全遮蔭接受範圍分析圖

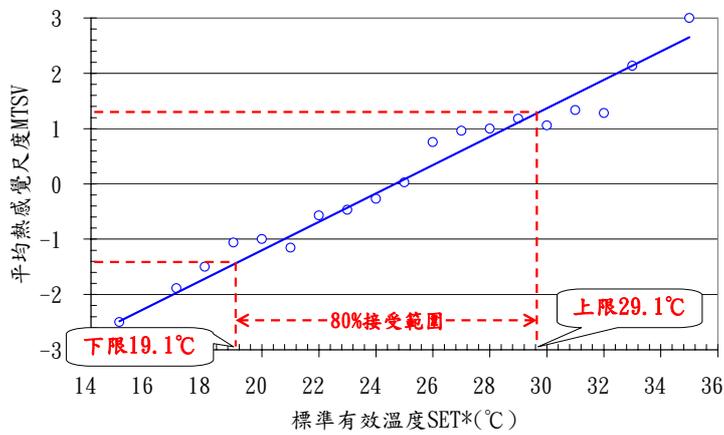


圖 11 全遮蔭舒適範圍分析圖

(2)無遮蔭戶外熱環境舒適範圍分析

依照 TSV 與接受度的交叉分析結果，得到二次迴歸曲線，再將 20%的不接受範圍所對應到之 TSV 分別得到上限 1.03，下限-1.26，再將之代入 SET*與 TSV 的線性迴歸線圖，依照迴歸線所對應到之上限溫度為 27.5°C (SET*) (圖 12、13)。

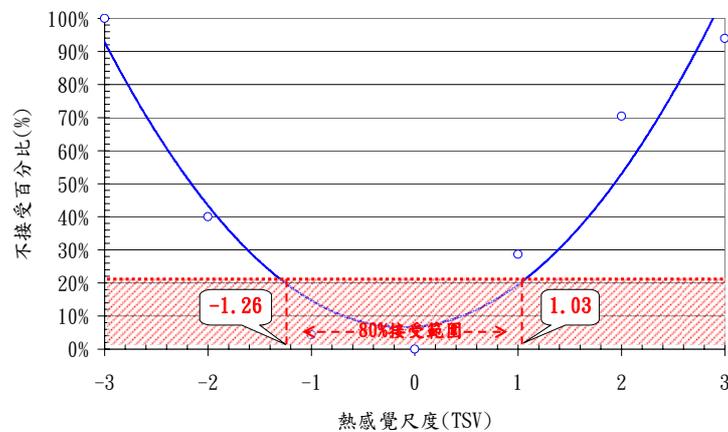


圖 12 無遮蔭接受範圍分析圖



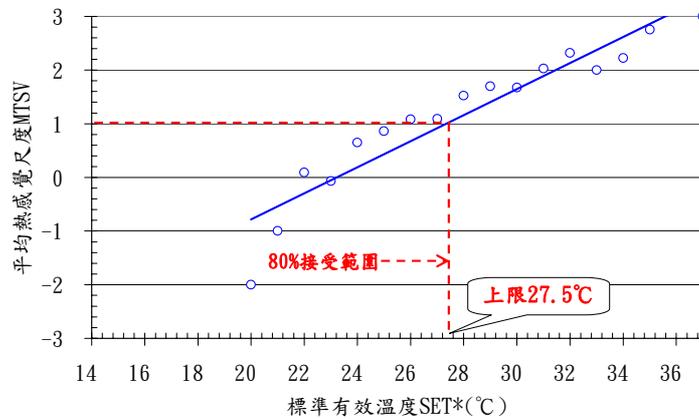


圖 13 無遮蔭舒適範圍分析圖

4-8 小結

根據全遮蔭和無遮蔭戶外熱環境中性溫度的累積機率分配百分比圖所得到的結果，全遮蔭戶外環境使用者的中性溫度為 24.5°C (SET*)，無遮蔭戶外環境使用者的中性溫度為 22.6°C (SET*)，全遮蔭戶外熱環境的中性溫度高於無遮蔭戶外熱環境的中性溫度 1.9°C，顯示無遮蔭戶外環境使用者因受輻射熱的直接影響，生理上必需以降溫來換取熱舒適性。

全遮蔭上界溫度為 29.1°C (SET*)，無遮蔭上限溫度為 27.5°C (SET*)，全遮蔭上界範圍高於無遮蔭 1.6°C，顯示於樹蔭底下，植栽直接的阻擋輻射熱照射於人體上，故在熱舒適的上界溫度上能有 1.6°C 的延展，這樣的狀況顯示，在有樹蔭遮蔽的環境下，民眾感到熱舒適的時間將能增加，同時也相對的提升民眾戶外空間使用上的意願與可能性。

五、結論

本研究針對大學校園戶外環境空間進行熱環境之探討，將校園內戶外環境空間，經由客觀量測數據與主觀問卷資料，分別針對全遮蔭和無遮蔭二種熱環境空間進行調查，調查時間為 2007 年 1 月至 2008 年 1 月，共計調查 888 份有效問卷。本研究之重要結論如下：

- (1) 大學校園戶外環境使用者，對於在戶外環境感覺到不舒適的情況下，熱調適行為上以到樹蔭下與回到室內皆有約 70% 的得票數，顯示校園戶外環境使用者，認為植栽對戶外熱環境之重要性是肯定的，也點出了戶外熱環境營造優劣將直接影響戶外活動意願；再者，校園戶外環境使用者在未來改善的期望上以「自然」的設計手法，如多種樹、花架來改善熱環境為主要意願。
- (2) 由問卷投票的熱感覺尺度和熱期望值之交叉分析結果，顯示大學校園戶外環境使用者皆期望擁有一個中性偏涼的戶外熱環境。
- (3) 大學校園戶外熱環境中性溫度，全遮蔭 24.5°C (SET*)、無遮蔭 22.6°C (SET*)，這表示熱環境會



影響生理的容受力與心理的感知。當民眾在無遮蔭狀況下，輻射熱直接的照射使得生理上熱負荷增加，可由中性溫度較全遮蔭低 1.9°C 看出民眾以降低溫度換取舒適度。

- (4) 大學校園戶外熱環境之舒適範圍的上限溫度，全遮蔭 29.1°C (SET*)、無遮蔭 27.5°C (SET*)，全遮蔭高於無遮蔭 1.6°C；在有樹蔭遮蔽的環境下，民眾感到熱舒適的時間將能增加，同時也說明了植栽對於熱環境與感知上之舒緩以及提升民眾戶外空間使用上的時間與意願。

誌謝

感謝行政院國家科學發展委員會 (NSC 96-2221-E-035-101) 對本計畫案之補助，使本研究得以順利完成。

參考文獻

- 林子平(2007)〈熱濕氣候區戶外熱舒適接受範圍與環境設計對策〉《兩岸三地都市微氣候評估研討會》：77-82。
- 賴榮平，林憲德，周家鵬(1991)《建築物理環境》：1-12，六合出版社，台北。
- ASHRAE(2004)ASHRAE Standard 55:Thermal environmental conditions for human occupancy, American Society of Heating, Refrigeration and Air-conditioning Engineers, Atlanta.
- ASHRAE(1997)Thermal Comfort, *ASHRAE Handbook of Fundamental*, USA.
- Chun, C., Kwok, A., and Tamura, A. (2004) Thermal Comfort in Transitional Spaces –basic concepts: literature review and trial measurement. *Building and Environment*, Vol.39:1187-1192.
- Fanger, P.O.(1970) *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*, McGraw-Hill Inc, New York.
- ISO 7726(1998)Thermal environment-instruments and method for measuring physical quantities, International Standard Organization, Geneva.
- ISO 7730(1994)Moderate thermal environments-determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort, International Standard Organization, Geneva.
- ISO 9920(1995)Ergonomics of the Thermal Environment-Estimation of the thermal insulation and evaporative resistance of a clothing ensemble, International Standards Organization, Geneva.
- Nakano, J., Tanabe, S.(2004)Thermal comfort and adaptation in semi-outdoor environments, *ASHRAE Transactions*, Vol.110, No. 2: 543-553.
- Spagnolo, J., de Dear, R. J.(2003) A field study of thermal comfort in outdoor and semi-outdoor environments in subtropical Sydney Australia, *Building and Environment*, Vol.38, No. 5: 721-738.

