

中國醫藥大學

碩士論文

編號：DOSH-0210

自然通風教室熱舒適要求調查

Field Survey on Thermal Reception and Comfort Perception in Naturally Ventilated Classrooms

所別：職業安全與衛生學系碩士班

指導教授：黃瑞隆

學生：郭乃榕 Kuo, Nai-Jung

學號：9472010

中華民國 96 年 6 月

誌謝

論文終於接近尾聲了，研究所生涯也將告一段落。首先當感謝指導老師 黃瑞隆教授的悉心指導，使我在專業領域得以全面性的拓展。同時也要感謝口試委員 鄭明仁、林子平以及陳振華老師們的細心審查。

感謝研究室學妹嫻真、茹涵、婉珩、家蓁、家仔、妤琿、佩紋、玉潔在研究上的支持與協助，亦感謝一同奮鬥的同學聖慈的互相扶持與鼓勵。

感謝辛勤養育與默默支持我的家人，在我感到挫折失意時給我溫暖、支持與鼓勵，迷惑時給我指引，讓我有繼續向前的動力及方向。謹以本論文獻給所有幫助過我的人，並致上最高的敬意與謝意。



摘要

在新版2004年的ASHRAE Standard 55中，參酌了熱適應模式的研究結果，首度對自然通風熱舒適標準有了新的建議。主要說明自然通風環境的居住者，其室內熱舒適溫度會隨著戶外溫度的增加而上升。為了解長期處於漫熱、潮濕氣候型態的台灣居民，在自然通風環境下的熱適應性。本研究主要以台中縣市內的14所學校共50間教室為調查對象。調查期間由2005年的八月份至次年的一月份。共有1,614位學生參與自然通風熱舒適實驗的進行，其中52%與48%的學生分別來自國中與國小學校。

研究方法以現場實測與問卷調查兩種方式同步進行，總共蒐集到3,754組有效數據。學生認為的中性操作溫度與喜好操作溫度分別為25.6°C與23.1°C。現場實測的中性溫度與ASHRAE Standard 55的最佳溫度相當。學生認為的80%與90%熱接受操作溫度範圍分別為17.8~30.5°C與20.3~28.0°C。研究結果顯示台灣自然通風環境的舒適範圍都較ASHRAE Standard 55的建議標準來的低，反應學生想要有更涼爽的教室環境。

將研究成果用於探討教室以自然通風方式確保熱舒適的可行性，分析結果顯示僅有低於25%的全年戶外溫度沒有落在80%舒適範圍內，顯示利用自然通風確保台灣教室熱舒適有很好的實用性。

關鍵字：自然通風環境；熱舒適；適應模式

ABSTRACT

According to adaptive model, which has been brought into the current edition of the ASHRAE Standard 55, people in naturally ventilated buildings can be comfortable at higher indoor temperatures as the outdoor air temperature increases. In order to investigate the thermal perception of people in Taiwan to a naturally ventilated indoor environment, a field survey was executed from August 2005 to January 2006. Environmental measurement and subjective questionnaires were performed simultaneously in the field survey. 1,614 volunteers in 14 public schools, located in central Taiwan, participated in this study. A total of 3,754 data sets were collected.

The thermal neutrality occurred at 25.6°C, which the same of the recommendation by ASHRAE Standard 55. The thermal preference occurred at 23.1°C. The comfortable zones for 80% acceptability and 90% acceptability were 17.8~30.5°C and 20.3~28.0°C, respectively, which both were lower than the criterion of ASHRAE Standard 55. The finding indicated that students want to have cooler indoor environments in Taiwan than that recommended by ASHRAE Standard 55.

A feasible assessment was applied to investigate the probability to achieve comfortable in the naturally ventilated classroom in Taiwan. It was found that only 25% school hours fall out the comfortable zones for 80% acceptability.

Keywords: Natural ventilated environment; Thermal comfort; Adaptive model

目錄

第一章 緒論-----	1
第一節 研究動機與目的-----	1
第二節 研究架構與流程-----	2
第二章 文獻探討-----	5
第一節 穩態能量平衡模式-----	5
第二節 熱適應模式-----	8
第三節 自然通風環境熱舒適研究相關文獻-----	12
第四節 自然通風環境熱舒適標準-----	16
第三章 研究方法-----	19
第一節 調查對象-----	19
第二節 儀器設備-----	20
第三節 衣著量與活動量計算-----	26
第四節 問卷設計-----	29
第五節 實驗步驟-----	34
第四章 研究結果-----	38
第一節 受訪者基本資料-----	38
第二節 對其他環境因子的評估-----	42
第三節 室內熱環境量測結果-----	49
第四節 衣著量統計-----	54
第五節 熱感覺的評估-----	56
第六節 熱喜好的評估-----	62
第七節 熱接受的評估-----	67
第八節 小節-----	72

第五章 討論-----	74
第一節 熱敏感度分析-----	74
第二節 中性溫度與喜好溫度-----	80
第三節 熱接受溫度範圍-----	91
第四節 與其他文獻比較-----	96
第五節 利用自然通風確保教室熱舒適之可行性分析-----	98
第六章 結論-----	104
參考文獻-----	106



表目錄

表 2-1 自然通風型辦公室的熱舒適調查結果彙整 -----	13
表 2-2 自然通風型住宅的熱舒適調查結果彙整 -----	14
表 2-3 自然通風型學校教室的熱舒適調查結果彙整 -----	16
表 2-4 PMV 公式的適用範圍 -----	17
表 3-1 儀器設備量測標準 -----	21
表 3-2 實驗儀器設備規格 -----	24
表 3-3 ASHRAE Standard 55 訂定的衣物熱絕緣值 -----	27
表 3-4 人體在不同活動狀態下的能量代謝率 -----	28
表 3-5 簡易的熱舒適調查問卷格式 -----	30
表 3-6 詳細的熱舒適調查問卷格式 -----	31
表 3-7 教室環境熱舒適性問卷設計 -----	33
表 3-8 國中實驗規劃行程表 -----	35
表 3-9 國小實驗規劃行程表 -----	35
表 4-1 濕度的七個感覺程度問卷投票數 -----	42
表 4-2 風速的七個感覺程度問卷投票數 -----	43
表 4-3 照度的七個感覺程度問卷投票數 -----	44
表 4-4 溼度感覺程度的性別比例分配列聯表 -----	47
表 4-5 物理性環境因子卡方齊一性檢定結果 -----	49
表 4-6 學生的七個熱感覺尺度投票數 -----	57
表 4-7 熱感覺卡方齊一性檢定結果 -----	61
表 4-8 學生的三個熱喜好尺度投票數 -----	63
表 4-9 熱喜好卡方齊一性檢定結果 -----	67
表 4-10 學生的兩個熱接受尺度投票數 -----	68

表 4-11 熱接受卡方齊一性檢定結果-----	72
表 4-12 舒適指標的感覺程度彙整-----	73
表 5-1 物測數據與問卷中熱感覺尺度的統計表-----	75
表 5-2 熱敏感度分析結果-----	79
表 5-3 物測數據與問卷中熱喜好尺度的統計表-----	86
表 5-4 中性溫度與喜好溫度彙整-----	90
表 5-5 物測數據與問卷中熱接受尺度的統計表-----	92
表 5-6 熱接受溫度範圍彙整-----	96
表 5-7 相關研究報告彙整-----	97
表 5-8 利用自然通風確保台北教室熱舒適之可行性分析結果-----	99
表 5-9 利用自然通風確保台中教室熱舒適之可行性分析結果-----	100
表 5-10 利用自然通風確保高雄教室熱舒適之可行性分析結果-----	101



圖目錄

圖 1-1 研究流程	3
圖 2-1 PMV 與 PPD 的關係圖	7
圖 2-2 空調環境熱舒適範圍	8
圖 2-3 人體適應性組成	9
圖 2-4 熱適應的產生機制	9
圖 2-5 世界各地執行熱舒適現場實測圖	10
圖 2-6 現場實測舒適溫度與戶外溫度關係圖	11
圖 2-7 自然通風環境熱舒適範圍	18
圖 3-1 國中、小學校位置圖	20
圖 3-2 其他研究使用之儀器設備	23
圖 3-3 本研究使用之儀器設備	25
圖 3-4 教室外的儀器設備架設情形	25
圖 3-5 冬、夏季制服衣著量的計算示意圖	26
圖 3-6 國中現場實測情形	36
圖 3-7 國小現場實測情形	37
圖 4-1 每個學校蒐集到的問卷數統計	38
圖 4-2 每個月份蒐集到的問卷數統計	39
圖 4-3 冬季與夏季問卷數統計	40
圖 4-4 上午與下午問卷數統計	41
圖 4-5 每個年級男生與女生蒐集到的問卷數統計	41
圖 4-6 濕度的七個感覺程度問卷投票數百分比	42
圖 4-7 風速的七個感覺程度問卷投票數百分比	43
圖 4-8 照度的七個感覺程度問卷投票數百分比	44

圖 4-9 男生與女生對其他環境因子的感覺百分比	45
圖 4-10 國中與國小對其他環境因子的感覺百分比	45
圖 4-11 城市與鄉村對其他環境因子的感覺百分比	46
圖 4-12 教室熱環境量測結果	50
圖 4-13 94/08 月份室內熱環境狀況	51
圖 4-14 94/09 月份室內熱環境狀況	51
圖 4-15 94/10 月份室內熱環境狀況	52
圖 4-16 94/11 月份室內熱環境狀況	52
圖 4-17 94/12 月份室內熱環境狀況	53
圖 4-18 95/01 月份室內熱環境狀況	53
圖 4-19 每個月學生穿衣情況	55
圖 4-20 每個室內操作溫度頻度下的衣著量分布情形	56
圖 4-21 學生的七個熱感覺尺度投票數百分比	57
圖 4-22 男生與女生熱感覺問卷投票數比例分布	58
圖 4-23 國中與國小熱感覺問卷投票數比例分布	59
圖 4-24 城市與鄉村熱感覺問卷投票數比例分布	60
圖 4-25 學生的三個熱喜好尺度投票數百分比	63
圖 4-26 男生與女生熱喜好問卷投票數比例分布	64
圖 4-27 國中與國小熱喜好問卷投票數比例分布	65
圖 4-28 城市與鄉村熱喜好問卷投票數比例分布	66
圖 4-29 學生的兩個熱接受尺度投票數百分比	68
圖 4-30 男生與女生熱接受問卷投票數比例分布	69
圖 4-31 國中與國小熱接受問卷投票數比例分布	70
圖 4-32 城市與鄉村熱接受問卷投票數比例分布	71
圖 5-1 全部學生的熱敏感度分析	76

圖 5-2 男生的熱敏感度分析	77
圖 5-3 女生的熱敏感度分析	77
圖 5-4 國中的熱敏感度分析	78
圖 5-5 國小的熱敏感度分析	78
圖 5-6 全部學生的中性溫度	81
圖 5-7 男生的中性溫度	82
圖 5-8 女生的中性溫度	82
圖 5-9 國中的中性溫度	83
圖 5-10 國小的中性溫度	83
圖 5-11 夏季的中性溫度	84
圖 5-12 冬季的中性溫度	84
圖 5-13 全部學生的喜好溫度	85
圖 5-14 男生的喜好溫度	87
圖 5-15 女生的喜好溫度	87
圖 5-16 國中的喜好溫度	88
圖 5-17 國小的喜好溫度	88
圖 5-18 夏季的喜好溫度	89
圖 5-19 冬季的喜好溫度	89
圖 5-20 全部學生的熱接受溫度範圍	93
圖 5-21 男生的熱接受溫度範圍	94
圖 5-22 女生的熱接受溫度範圍	94
圖 5-23 國中的熱接受溫度範圍	95
圖 5-24 國小的熱接受溫度範圍	95
圖 5-25 台北落在 80%舒適區外之上課時間比例	102
圖 5-26 台中落在 80%舒適區外之上課時間比例	103
圖 5-27 高雄落在 80%舒適區外之上課時間比例	103

第一章 緒論

第一節 研究動機與目的

美國冷凍空調工程學會（American Society Of Heating, Refrigerating, And Air-Conditioning Engineers，ASHRAE）在 ASHRAE Standard 55⁽¹⁾ 中對熱舒適的定義為：可以讓一個人感到滿意的熱環境狀況。為達到人們滿意的熱環境條件，維持室內熱環境之舒適性，一般建築物設計不是採用自然通風就是加裝空調系統控制等形式，來改變、調整居住者合適的室內熱舒適度。所謂自然通風環境是指使用開向戶外的窗戶或門，以及吊扇或風扇來改善室內熱環境情況的建築空間，使其達到熱舒適的狀態。

相關研究報告指出⁽²⁾，使用空調系統提供熱舒適環境的同時伴隨著自然資源的急劇消耗。隨著空調系統的普遍化，能源耗費呈現快速成長，建築物排放二氧化碳濃度的急速增加，導致全球暖化、氣溫攀升、兩極融縮以及海面升高等災難性後果。

並且有文獻顯示⁽³⁾，採用自然通風建築的辦公大樓相較於空調建築的辦公大樓，每年節省的用電能量為 14~41kWh/m²，節約的電費成本為 1.3~3.6 美元/m²。另外國際能源署（International Energy Agency，IAE）在 2000 年的總結算報告中說明⁽⁴⁾，歐洲國家的辦公室有效利用室外通風可以降低建築能耗達 50%以上。

空調環境的建築密閉性，當室內換氣量不足，污染物滋生時，也會造成室內空氣品質（Indoor Air Quality，IAQ）的嚴重惡化，長期暴露於室內污染物可能產生人體健康上的危害，如病態建築綜合症（Sick Building Syndrome，SBS）所產生的鼻塞、流眼淚等不舒服症狀。

由此可見，人們在享受空調的室內熱舒適環境的同時，不得不面對

其背後所衍生的各種問題。近年來許多學者提出⁽⁵⁾，採用自然通風全部或部分代替空調的方法，不僅可以減少資源耗費、緩和暖化效應以及改善室內空氣，也可以促進居住著的生活品質。

由於台灣的國中、國小學校教室，大部分都是藉助門、窗與吊扇或風扇設計來達到室內熱舒適的自然通風型態。故本研究選定國中、國小學校教室為現場實測的研究對象，嘗試建立台灣自然通風環境的熱舒適範圍，了解國中、國小學生的中性溫度、喜好溫度與熱可接受溫度，並且將研究結果應用於探討國中、國小學校教室以自然通風方式確保熱舒適之可行性分析。

本文主要研究目的項目如下：

1. 了解學生普遍接受熱舒適範圍的實際差異，反應學生對於教室內各種環境狀況下的熱舒適影響程度。
2. 確認學生對於教室內的熱中性溫度、熱喜好溫度和熱可接受溫度範圍，並且與其他文獻相互比較。
3. 透過客觀的現場實測調查學校教室內的熱環境狀況，並且與ASHRAE standard 55 的標準建議值相互比較。
4. 對於只能藉助門、窗戶與吊扇或風扇的設計手法來促進室內舒適性的自然通風環境而言，建立起可以確保自然通風熱舒適教室的溫度範圍。

第二節 研究架構與流程

本文依照研究目的所建立的研究架構與流程，如圖 1-1 所示。主要內容簡述如下：

第一章為緒論，首先以研究動機與目的說明自然通風與空調環境的差異性，並且由各種角度強調採用自然通風的重要性。再來是說明為何

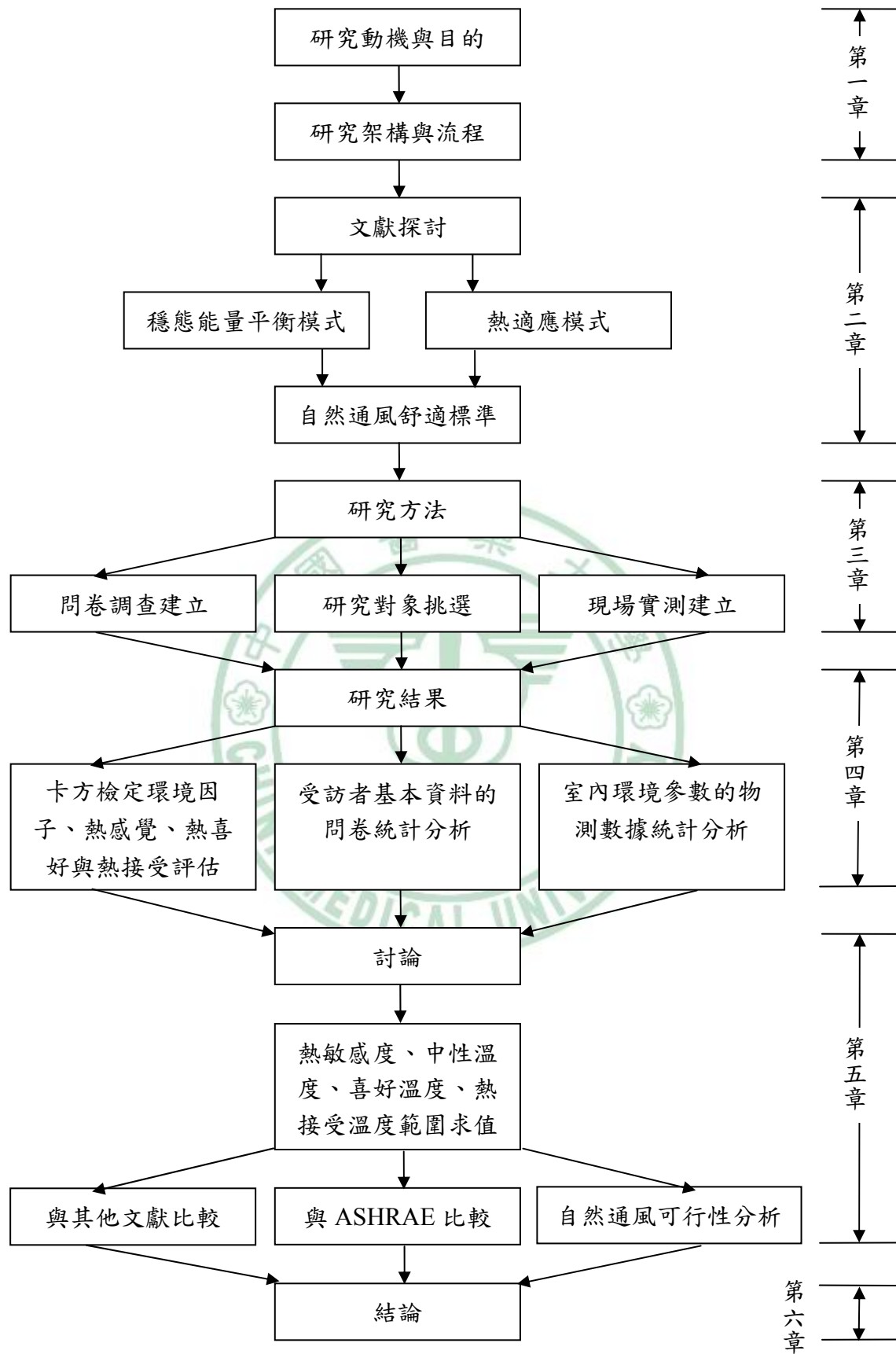


圖 1-1 研究流程

透過國中、小學校教室進行研究的主要因素，並且歸納出本文想要研究的幾個論點。

第二章為文獻探討，由原先奠基於穩態平衡模式的舊式熱舒適標準開始介紹，進而考慮了熱適應模式的新式熱舒適標準之發展過程。並且透過相關文獻的介紹，解釋發展成以熱適應模式為考量的熱舒適標準在實際應用上是真的合宜與合理。最後陳述受限於舊式熱舒適標準限制的原因與新成立的自然通風環境熱舒適標準。

第三章為研究方法，詳述了調查對象的挑選過程和地點分配、儀器設備的規格簡介和操作情形、受訪者的衣著量和活動量計算方法、問卷格式的內容參考和設計製作以及研究進行的規劃安排和實驗步驟。

第四章為研究結果，描述了受訪者的各種基本資料的問卷結果，室內環境參數的物測數據與受訪者衣著量的統計分析。利用卡方齊一性檢定來了解各種環境因子、熱感覺、熱喜好與熱接受之受訪者性別或國中、小學校之間的比例分配是否一致。

第五章為討論，討論了學生的熱敏感度、中性溫度、喜好溫度與熱接受溫度範圍，並且與 ASHRAE Standard 55 建議值或其他文獻比較。最後將本文現場實測的熱接受溫度範圍，套用在全年逐時之氣象資料上，進行自然通風確保教室熱舒適的可行性分析研究。

第六章為結論，綜合了本文的研究結果與討論所歸納出的幾個重要論點。

第二章 文獻探討

第一節 穩態能量平衡模式

早期的熱舒適研究相關理論都是根據穩態能量平衡模式。在穩態的熱環境中，人體與環境之間存在著熱交換平衡，以下列公式表示：

$$m - w - c - r - e = 0 \quad (2-1)$$

式中： m = 人體能量代謝產生熱 (W/m^2)；

w = 人體所做的機械功 (W/m^2)；

c = 人體外表面向周圍環境以對流形式散發的熱 (W/m^2)；

r = 人體外表面向周圍環境以輻射形式散發的熱 (W/m^2)；

e = 人體皮膚與呼吸蒸發所帶走的熱 (W/m^2)。

丹麥工業大學 Fanger⁽⁶⁾ 教授基於上述論點建立了著名的穩態傳熱模型，這個模型假設了人體是處於一個熱平衡狀態，其淨得熱量為零。原理是將人體的中心與人體的皮膚當作一個整體，不考慮人體顫抖、血管收縮與舒張等人體的自身調節機制。在穩定狀態下，人體得到的熱量會等於失去的熱量，能量平衡的關係模式如下：

$$M - W = Q_{sk} + Q_{res} = (C + R + Esk) + (Cres + Eres) \quad (2-2)$$

式中： M = 人體能量代謝產生熱 (W/m^2)；

W = 人體所做的機械功 (W/m^2)；

Q_{sk} = 人體皮膚總散熱量 (W/m^2)；

Q_{res} = 人體呼吸總散熱量 (W/m^2)；

$C + R$ = 人體皮膚失熱熱損失 (W/m^2)；

Esk = 人體皮膚蒸發散熱量 (W/m^2)；

$Eres$ = 人體呼吸蒸發散熱量 (W/m^2)；

C_{res} = 人體呼吸對流散熱量 (W/m^2)。

1960 年美國堪薩斯州立大學與丹麥工業大學的氣候控制艙內的 1,600 份實驗結果⁽⁷⁾ 為基礎發展而成的 PMV (Predicted Mean Vote, 預測平均投票數) 公式, 正是由人體與環境的穩態能量熱平衡理論為基礎發展而成。1970 年國際標準組織 (International Organization for Standardization, ISO) 在 ISO 7730⁽⁸⁾ 的熱舒適標準使用了 Fanger 教授提出的 PMV 指標。

PMV 公式考慮了四個環境參數 (乾球溫度、相對溼度、平均輻射溫度、空氣流動) 與兩個人體參數 (衣著量、活動量) 的影響, 來預測受訪者對熱環境的感覺程度。PMV 計算公式如下:

$$\begin{aligned} PMV = & (0.303e^{-0.036M} + 0.028) \times \{ (M - W) - 3.05 \times 10^{-3} \\ & \times [5733 - 6.99 \times (M - W) - P_a] - 0.42 [(M - W) - 58.15] \\ & + 1.7 \times 10^{-5} M (5867 - P_a) - 0.0014 M \times (34 - T_a) - 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} \\ & \times [(t_{cl} + 273)^4 - (T_{mrt} + 273)^4] + f_{cl} h_c (t_{cl} - T_a) \} \end{aligned} \quad (2-3)$$

$$\begin{aligned} \text{其中: } t_{cl} = & 35.7 - 0.028 \times (M - W) - I_{cl} \times \{ 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} \\ & \times [(t_{cl} + 273)^4 - (T_{mrt} + 273)^4] + f_{cl} h_c (t_{cl} - T_a) \} \end{aligned} \quad (2-4)$$

$$h_c = 2.38 \times (t_{cl} - T_a)^{0.25} \quad \text{or} \quad h_c = 12.1 V_a^{0.5} \quad (2-5)$$

$$\begin{aligned} f_{cl} = & 1.00 + 1.29 I_{cl} \quad \text{for} \quad I_{cl} < 0 \leq 0.78 m^2 kW^{-1} \quad \text{or} \\ f_{cl} = & 1.05 + 0.645 I_{cl} \quad \text{for} \quad I_{cl} > 0.78 m^2 kW^{-1} \end{aligned} \quad (2-6)$$

式中: T_a = 空氣溫度 ($^{\circ}C$);

T_{mrt} = 平均輻射溫度 ($^{\circ}C$);

V_a = 相對風速 (m/s);

P_a = 水蒸氣壓 (Pa);

I_{cl} = 衣服隔熱性能 (clo) ;

M = 新陳代謝率 (met) 。

除了 PMV 指標外，Fanger 教授還提出了預測不滿意度百分比 (Predicted Percentage of Dissatisfied, PPD)，PPD 定義如下：

$$PPD = 100 - 95 \exp[-(0.03353PMV^4 + 0.2179PMV^2)] \quad (2-7)$$

PMV 與 PPD 的變化曲線如圖 2-1 所示。在 $PMV=0$ 處， $PPD=5\%$ 。表示即使室內環境為最佳熱舒適狀態，由於人們的生理上差別，還有 5% 的人感到不滿意。ISO 7730 對熱舒適的定義，當 PMV 介於 -0.5 至 0.5 之間時，即 $PPD < 10\%$ 。

ASHRAE Standard 55 所推薦的讓 80% 的人可以接受的溫度範圍，其中 10% 不滿意度百分比是根據 PMV 介於 -0.5 至 0.5 之間時所對應的 PPD，而另外的 10% 則是由周圍環境不均勻空氣所引起的人體不舒適滿意度。ASHRAE Standard 55⁽⁹⁾ 在 2004 年最新訂定的空調環境熱舒適溫

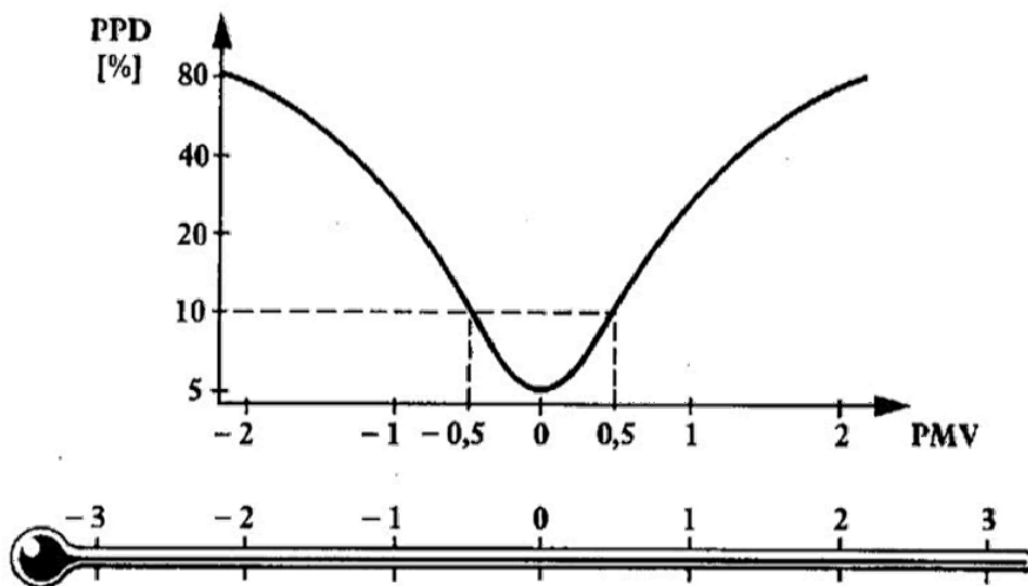


圖 2-1 PMV 與 PPD 的關係圖

度範圍如圖 2-2 所示。溼度上限是使用等溼度比線 (0.012kg/kg) 作為界線，並且取消溼度下限的規定。操作溫度上、下限 (Tmax、Tmin) 則需依照實際的衣著量 (Icl) 以下列公式計算：

$$T_{max} = [(Icl - 0.5clo)T_{max,1.0clo} + (1.0clo - Icl)T_{max,0.5clo}] / 0.5clo \quad (2-8)$$

$$T_{min} = [(Icl - 0.5clo)T_{min,1.0clo} + (1.0clo - Icl)T_{min,0.5clo}] / 0.5clo \quad (2-9)$$

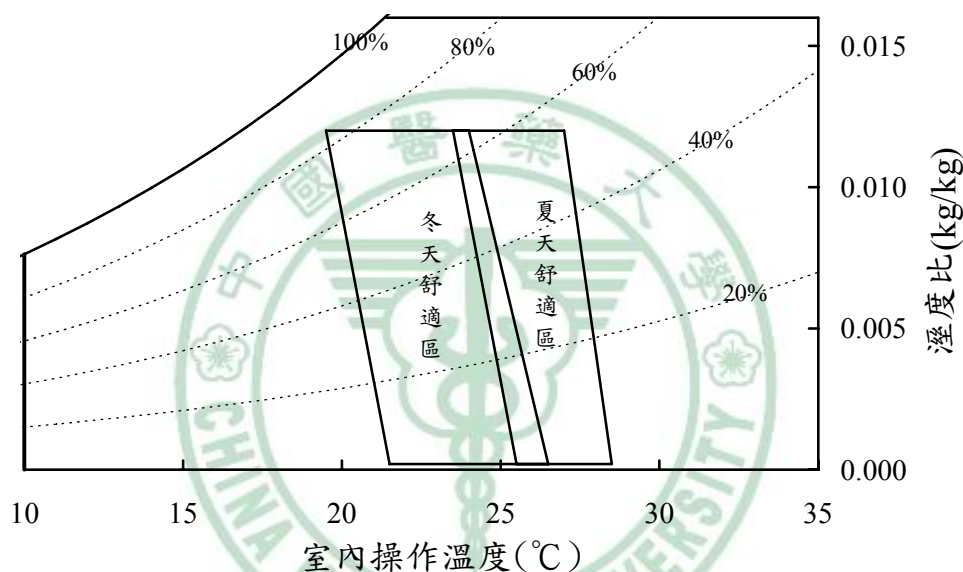


圖 2-2 空調環境熱舒適範圍

第二節 熱適應模式

人們有去適應他們所處環境狀況之變化的自然傾向，此現象稱之為熱適應性。人體的適應性組成如圖 2-3 所示，包括生理的、行為的與最重要的心理上的適應調節。生理調節主要是指人體長期暴露於該環境下，使得生理反應得以慢慢減少緊張，逐漸習慣變化而適應。生理調節可以劃分成先天的遺傳適應與後天的養成適應。行為調節主要包括人有意無意地採取改善自身的熱平衡狀態的行為，這種調節可以劃分成個人調節

(如添增或褪去衣物等)、技術調節(如打開或關上空調、風扇、窗戶等)以及文化習慣(如大熱天停止激烈活動以降低新陳代謝量等)。心理調節則是根據過去的經驗或期望而導致感觀反應的改變，如降低人們對環境的期望會使其產生心理上的適應。

生理的、行為的與心理上的三種調節並不是孤立存在、單獨作用的，人體對熱環境的主觀評估正是三者相互作用的結果⁽¹⁰⁾，如圖 2-4 所示。

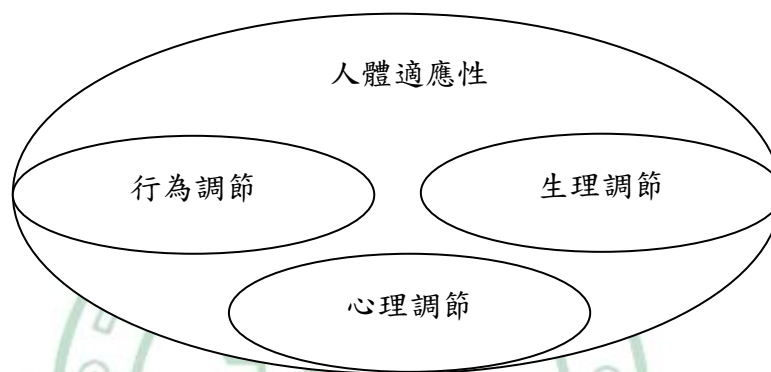


圖 2-3 人體適應性組成

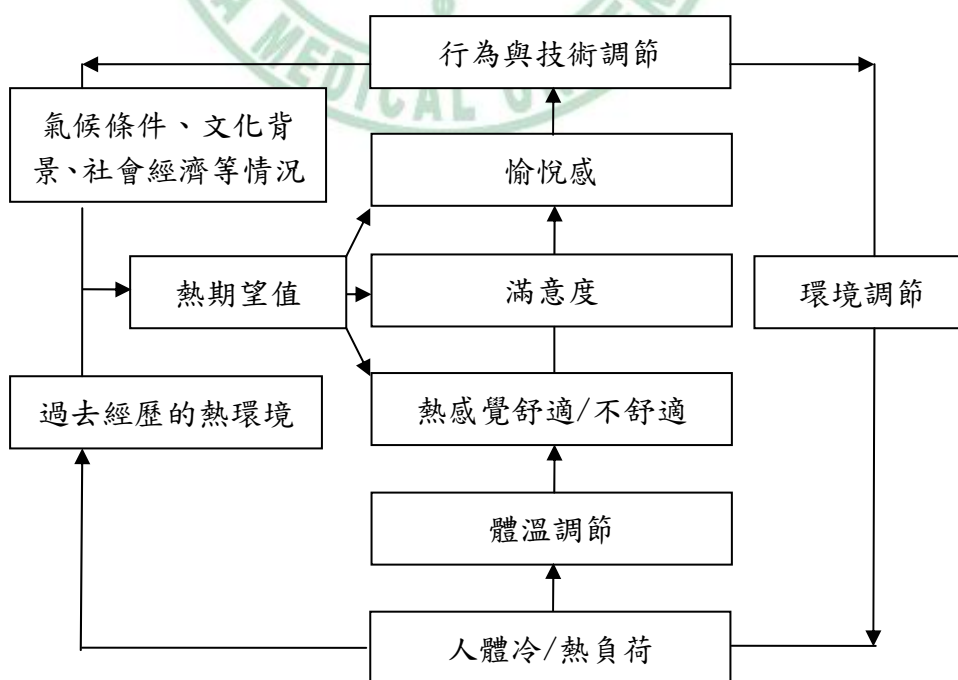


圖 2-4 熱適應的產生機制

首先，人體會對熱環境進行主觀評估，判斷的結果有舒適與不舒適兩種其中之一的情況。但是經由對環境的技術調節與對自身的個人調節會達到滿意的狀態。另一方面，過去經歷的氣候條件、社會背景等的期望值，會影響居住者對目前室內熱環境感到更加愉悅。

由以上所述，熱適應理論意指當人們有能力依照其意識對其所處熱環境進行調整時，他們會更容易對環境產生滿足，也可以容忍較熱舒適標準所建議的條件寬鬆許多的熱環境狀況。像是在濕熱地區的自然通風環境，夏季往往高溫高濕，人們就會使用風扇與窗戶加大室內的風速來達到滿意舒適度，居住者感覺熱舒適的溫度範圍也就相對的更寬鬆。

熱適應模式 (Adaptive Model) 是基於對熱舒適調查的大量現場實測結果，由 1998 年 de Dear⁽¹¹⁾ 等來自四大洲不同氣候區域 (圖 2-5)，包括有歐洲、北美與澳洲的大陸性氣候區、中東的乾燥氣候區、東南亞的熱帶雨林氣候區，共 21,000 份現場實測研究的實驗數據分析所提出。

在世界各地執行的熱舒適現場實測結果顯示⁽¹²⁻¹⁵⁾，確認在不同地區的居住者，對於其熱舒適的偏愛程度，會深受當地長期氣候所影響。在

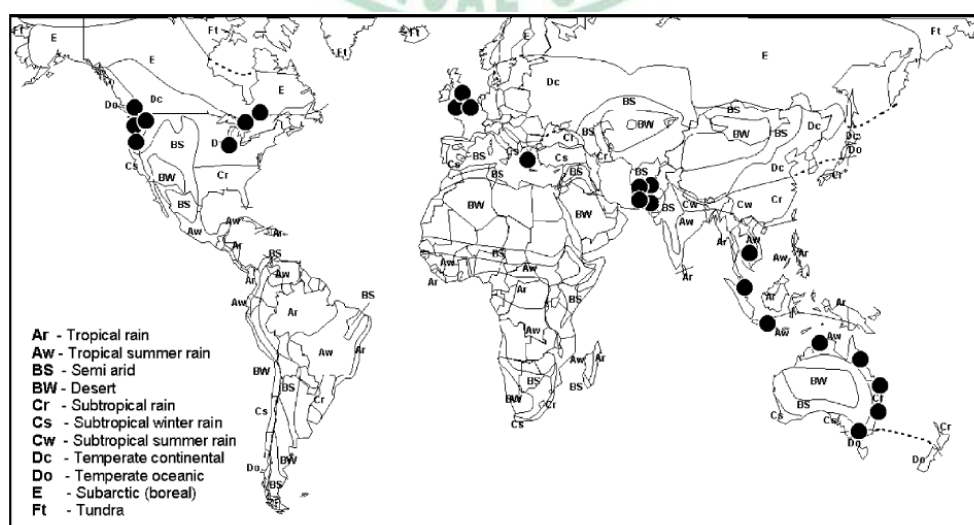


圖 2-5 世界各地執行熱舒適現場實測圖

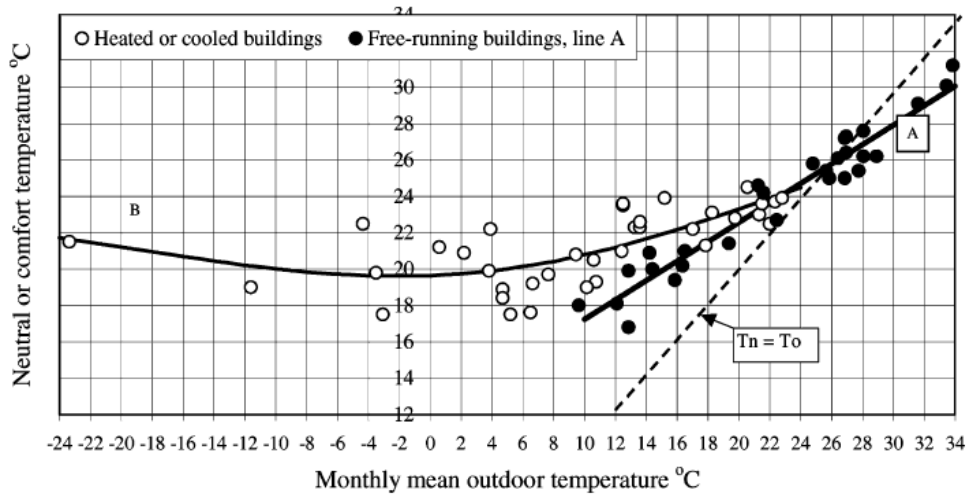


圖 2-6 現場實測舒適溫度與戶外溫度關係圖

真實狀況下符合最佳熱舒適的室內溫度是戶外溫度的函數，如圖 2-6 所示。而此結論剛好與 ASHRAE standard 55 的熱舒適標準所指出的結果不同。

de Dear 等⁽¹⁶⁾與 Humphreys⁽¹⁷⁾也有同樣的想法，並且以熱適應理論為基礎提出了熱適應模式。de Dear 等與 Humphreys 透過大量熱舒適調查的實驗數據分析，提出建築物的居住者認為的最佳室內溫度，或者是會有最多人認為舒適的溫度，是室外溫度的函數，de Dear 等與 Humphreys 得到的線性回歸公式分別如下：

$$\text{de Dear 等： } T_{\text{comf}} = 0.31 \times T_{a,\text{out}} + 17.8 \quad (2-10)$$

$$\text{Humphreys： } T_{\text{comf}} = 0.54 \times T_{a,\text{out}} + 13.5 \quad (2-11)$$

式中： T_{comf} = 室內最佳舒適溫度 (°C)；

$T_{a,\text{out}}$ = 室外空氣平均溫度 (°C)。

由此可知，每個地區的當地氣候條件、文化背景以及社會經濟等的差異影響，使得人們對於熱舒適環境的要求也會有所不同，這也是為什麼熱舒適調查的現場實測結果無法普遍化運用到其他地區的主要原因。

第三節 自然通風環境熱舒適研究相關文獻

世界各國學者在自然通風環境熱舒適調查方面做了許多研究工作，包括辦公室、住宅以及學校教室等建築空間。

A 自然通風型辦公室

1990 年 Busch⁽¹⁸⁾ 在泰國曼谷辦公大樓共 1,100 名辦公人員進行的熱舒適現場實測，研究結果顯示兩棟空調型與兩棟自然通風型的辦公大樓其調查出辦公人員的中性溫度分別為 24.5°CET* 與 28.5°CET*，並說明自然通風辦公室得到的中性溫度較空調辦公室來的高的原因是，長期處在溫度較高的自然通風環境，其辦公人員容忍的溫度也較高。

1991 年 de Dear 等⁽¹⁹⁾ 在新加坡的辦公室和高層住宅大樓內進行的現場實測與問卷調查，研究結果顯示空調環境與自然通風環境其調查出受訪者的中性溫度分別為 24.2°C To 與 28.5°C To，此結果與 Busch 認為的長期處在溫度較高的自然通風環境其居住者有較高的中性溫度的理論相符。1990 年 Busch 與 1991 年 de Dear 等分別在對泰國曼谷與新加坡進行實測調查的結果顯示溼熱氣候下的居住者，尤其是在自然通風的建築物中的居住者，可以接受較 ASHRAE standard 55 熱舒適標準範圍緩和的條件。

1998 年 Karyono⁽²⁰⁾ 在印尼雅加達的辦公大樓進行熱舒適與建築耗能的現場實測研究。研究對象的辦公大樓共有七棟，屬於自然通風建築的有一棟、混合型建築的有一棟以及空調型建築的有五棟，共有 596 名員工參與熱舒適調查。研究結果則指出空調型與自然通風型辦公大樓內員工認為的中性溫度並無顯著的不同，都是等於 26.7°C To。自然通風型辦公室相關研究報告彙整於表 2-1 中。

表2-1 自然通風型辦公室的熱舒適調查結果彙整

年份	研究者	地點	場所	類型	中性溫度 (°C _{To})
1990	J.F.Busch	泰國曼谷	辦公室	空調	24.5*
				通風	28.5*
1991	R.J.De Dear 等	新加坡	住宅、辦公室	空調	24.2
				通風	28.5
1998	T.H.Karyono	印尼雅加達	辦公室	空調/通風	26.7

表示使用的溫度是新有效溫度 (ET)，而不是操作溫度。

B 自然通風型住宅

1999年夏一哉等⁽²¹⁾在中國北京對88戶自然通風住宅的熱舒適現場實測與問卷調查，研究結果顯示居民認為的中性溫度為25.3°C_{To}。作者說明北京自然通風住宅的熱環境雖然落在ASHRAE standard 55的熱舒適區域外，但是仍有80%的居民可以接受熱環境對應的溫度上限為30°CET*。並且強調在預測人體熱感覺時，應該考慮建築環境、生活習慣、經濟條件和對環境的可調節等因素的影響，再次說明ASHRAE standard 55規定的熱舒適區域對夏季自然通風環境建築來說顯得有些狹窄了。

2002年Wong等⁽²²⁾在新加坡對公寓大樓的熱舒適現場實測與問卷調查，研究結果指出居住者的熱適應行為，包括有使用電扇、窗戶、窗簾、調整衣著量、沖澡、離開此地等方法，會有效改善其熱舒適的程度，可以容忍較ASHRAE standard 55建議標準寬鬆的接受溫度範圍。

2003年Feriadi等⁽²³⁾在新加坡對超過300戶自然通風住宅的熱適應行為與熱舒適調查，分別在濕季與乾季蒐集到255筆與283筆的實驗數據。透過線性迴歸分析自然通風住宅，無論是濕季或乾季的居民認為的中性溫度都是29.3°CET*，居民想要的喜好溫度(25.1°CET*)也都比中性溫度來的更涼爽。2002年Wong等與2003年Feriadi等在新加坡自然通風住宅的熱舒適研究有相同的結論，作者都認為居民普遍能有意識地

以多種適應性行為來改善自身的熱感覺，所以可以容忍較 ASHRAE standard 55 建議標準寬鬆的接受溫度範圍。

2004 年 Feriadi 與 Wong⁽²⁴⁾ 在印尼日惹對 274 戶自然通風住宅的熱舒適調查，分別在濕季與乾季蒐集到 262 筆與 263 筆的實驗數據。研究結果居住者的中性溫度與喜好溫度分別為 29.3°C To 與 26.0°C To，顯示居民想要有更涼爽的居家環境。並且表示透過對環境的自由控制會更容易達到居民的室內舒適滿意度。

2006 年 Han 等⁽²⁵⁾ 探討在中國溼熱地區的長沙、廣州與深圳三個城市共 26 戶自然通風住宅環境的熱舒適研究。研究結果顯示居住者的中性溫度與喜好溫度分別為 28.6°C To 與 22.8°C To。作者歸納出只有 48.2% 的環境落在 ASHRAE standard 55 的熱舒適區域內，卻有高達 87.3% 的居民還是認為可以接受，其主要原因是人們已經習慣了長期處於高溫高濕的氣候下。自然通風型住宅相關研究報告彙整於表 2-2 中。

表 2-2 自然通風型住宅的熱舒適調查結果彙整

年份	研究者	地點	場所	類型	中性溫度 (°C To)
1999	夏一哉等	中國北京	住宅	通風	25.3
2002	N.H.Wong 等	新加坡	住宅	通風	-
2003	H.Feriadi 等	新加坡	住宅	通風	29.3*
2004	H.Feriadi N.H.Wong	印尼日惹	住宅	通風	29.2
2006	J.Han 等	中國溼熱地區 (長沙、廣州、深圳)	住宅	通風	28.6

表示使用的溫度是新有效溫度 (ET)，而不是操作溫度。

C 自然通風型學校教室

1998 年 Kwok⁽²⁶⁾ 在夏威夷對空調型與自然通風型學校教室中 3,544 位學生進行的現場實測與問卷調查。空調型與自然通風型學校教室其調

查出學生的中性溫度分別為 26.5°C To 與 28.1°C To，喜好溫度分別為 23.0°C To 與 24.0°C To。研究結果顯示在自然通風形教室中，即使教室的室內環境有超過 75% 的時間不在 ASHRAE standard 55 的熱舒適標準範圍內，但是裡面的學生對教室內的熱環境仍然表示覺得舒適。

2003 年 Wong 與 Khoo⁽²⁷⁾ 在新加坡對高中自然通風型教室的熱舒適調查，學生認為的中性溫度為 28°C To。現場實測的教室環境都沒有落在 ASHRAE standard 55 的熱舒適溫度範圍內，但是學生可以容忍較其建議值寬鬆的接受溫度範圍。此結果與 1998 年 Kwok 在夏威夷對學校教室熱舒適調查的研究報告一樣，都暗示著沒有考慮人之適應性與心理預期的 ASHRAE standard 55 熱舒適建議標準，並不適用於無空調下的環境。

2003 年 Kwok 與 Chun⁽²⁸⁾ 在日本橫濱對空調型與自然通風型學校教室共 74 名小學生的現場實測與問卷調查。研究報告指出自然通風型教室和預期相同並沒有像空調型教室容易落在 ASHRAE standard 55 的熱舒適溫度範圍內，自然通風型教室內的學生想要的舒適度也明顯較空調型教室來的溫暖。

2004 年黃瑞隆等⁽²⁹⁾ 以台灣七所大學院校共 944 人學生為對象，以現場實測及問卷調查兩種方法進行國人熱舒適性的調查。統計分析得到的中性溫度在空調型教室為 25.6°C ET*，在自然通風教室為 26.1°C ET*。可以讓 80% 學生接受的溫度範圍為 19.4~28.8°C ET*，較 ASHRAE standard 55 的夏季舒適區範圍的 23.0~26.0°C ET* 明顯寬鬆許多。作者說明習慣高濕熱環境的居民有較寬鬆舒適度要求標準。

2005 年 Corgnati 等⁽³⁰⁾ 在義大利的高中與大學共 13 間學校教室的熱舒適研究。當學生的 ASHRAE Standard 55 七個熱感覺尺度選擇冷與涼 (-3、-2) 或熱與暖 (3、2) 時，其不接受滿意度的比例非常高。作者指出熱適應性的因素，導致在選擇感覺暖 (2) 的學生還有不錯的熱接受度，

學生喜歡較暖和的教室環境。

2005 年羅明智等⁽³¹⁾以中國重慶某大學學校教室為對象，進行現場實測與問卷調查的熱舒適實驗。研究結果顯示學生的中性溫度為 27.7°CET*，可以讓 80% 學生滿意的熱可接受溫度範圍為 25.5~29.8 ET*。作者表示學生長期處於高溫的教室環境，增加室內的風速可以有效改善學生對於教室環境的舒適滿意度。自然通風型學校教室相關研究報告彙整於表 2-3 中。

表 2-3 自然通風型學校教室的熱舒適調查結果彙整

年份	研究者	地點	場所	類型	中性溫度 (°CTo)
1998	A.G. Kwok	美國夏威夷	小學教室	空調	28.1
				通風	26.5
2003	N.H. Wong S.S. Khoo	新加坡	高中教室	通風	28.8
2003	A.G. Kwok C.Chun	日本橫濱	小學教室	通風	-
2004	黃瑞隆等	台灣	大學教室	空調	25.6*
				通風	26.1*
				全部	26.3*
2005	S.P.Corgnati 等	義大利	高中、大學教室	通風	-
2005	羅明智等	中國重慶	大學教室	通風	27.7*

表示使用的溫度是新有效溫度 (ET)，而不是操作溫度。

第四節 自然通風環境熱舒適標準

根據前面的文獻回顧，許多的研究報告顯示現場實測的環境溫度大部分的自然通風環境是超過 ASHRAE standard 55 建議的熱舒適溫度範圍。

對於使用空調系統的空間而言，空調系統的目的在於將空間的溫度維持在令居住者覺得舒適的溫度。而該溫度通常是參考 ASHRAE standard

55 或者 ISO 7730 有關室內熱舒適的標準。但是，對於使用自然通風的空間而言，PMV 公式的適用範圍（表 2-4）的限制使得其變得不適用。像是在濕熱地區的自然通風環境，由於夏季往往高濕高熱，空氣溫度很容易就高於 PMV 公式的適用上限（30°C）。然而自然通風建築通常利用風扇與窗戶，增加室內的風速來改善舒適度，風速也很容易就大於 PMV 公式的適用上限（1m/s）。

表 2-4 PMV 公式的適用範圍

變數	單位	適用下限	適用上限
空氣溫度	°C	10	30
平均輻射溫度	°C	10	40
相對風速	m/s	0	1
水蒸氣壓	Pa	0	2700
衣服隔熱性能	clo	0	2
新陳代謝率	met	0.8	4
PMV	-	-2	2

故在新版 2004 年⁽⁹⁾的 ASHRAE Standard 55 中，參酌了熱適應性的研究結果，首度對自然通風熱舒適標準有了新的建議。

ASHRAE Standard 55 建議之自然通風環境熱舒適範圍如圖 2-7 所示。圖中 90%熱可接受溫度的範圍是以最佳室內操作溫度（ T_c ）為中心 $\pm 2.5^\circ\text{C}$ 所圍成的區域；80%熱可接受溫度的範圍則是最佳室內操作溫度為中心 $\pm 3.5^\circ\text{C}$ 所圍成的區域。其中最佳室內操作溫度是外氣乾球溫度（ T_{out} ）的函數，公式如下：

$$T_c = 0.31 \times T_{out} + 17.8 \quad (2-12)$$

ASHRAE Standard 55 強調其所建議之熱舒適範圍僅是參考標準，而非強制性標準。它也同時強調適用於某地區最好的熱舒適標準是透過當地的現場實測來建立。

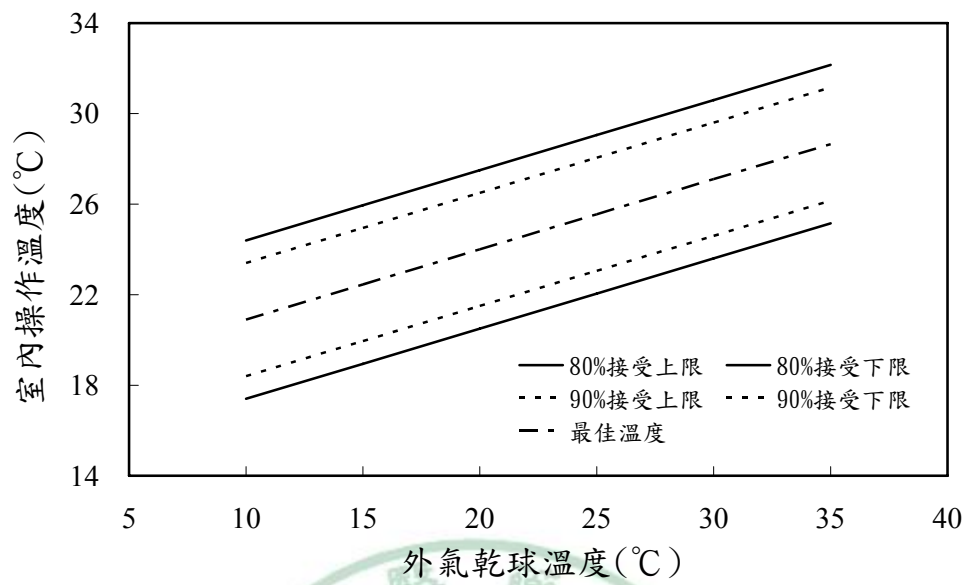


圖 2-7 自然通風環境熱舒適範圍



第三章 研究方法

第一節 調查對象

本研究目的是要調查學生對於自然通風教室內的熱環境要求。在選擇調查對象時，由於國內的大學教室大部分已經採用空調設備，而黃教誠⁽³²⁾的碩士論文中又已經探討過大學教室的熱舒適要求。因此本文的調查對象鎖定仍然普遍採用自然通風的國中與國小教室。

本文根據下列幾點原則來選取調查對象：

1. 經費的問題
2. 交通的便利
3. 學校與班級的配合度
4. 學校地點的均勻分布

基於上述幾點原因，所以所有被挑選的國中與國小學校都位在台中都會區。本文共邀請了十四所國中、小學校參與實驗，其地點分布如圖 3-1 所示。

學校地點的分布，考量了城鄉差異、交通流量、建築物多寡與人口密度會造成微氣候上的差異，其樣本的選擇儘量在鬧區、郊區與郊外三大區塊均勻分布。本文所採鬧區主要是台中市的舊市區，包括東區、西區、南區、北區以及中區。有三所國中與兩所國小位於鬧區，分別是東區的育英國中，實驗班次為 6 次；西區的大業國中與忠明國小，實驗班次分別為 10 次與 6 次；北區的五權國中與省三國小，實驗班次分別為 8 次與 4 次。在鬧區的實驗班次總共有 34 次。

郊區主要是台中市的西屯區、南屯區以及北屯區。有三所國中與兩所國小位於郊區，分別是西屯區的西屯國中與上安國小，實驗班次分別為 18 次與 18 次；南屯區的惠文國中、萬和國中與大新國小，此三所學

校的實驗班次共分別為 4 次、8 次以及 6 次。在郊區的實驗班次總共有 54 次。

郊外主要是台中市周圍的鄉市鎮。有兩所國中與兩所國小位於郊外。本文選取了位於太平市的太平國中、大里市的長億國中、龍井鄉的龍峰國小以及大肚鄉的瑞峰國小。這些學校地點的分布都位在山腳下或離都會區很偏遠的地方。太平國中、長億國中、龍峰國小以及瑞峰國小的實驗班次分別為 4 次、4 次、 10 次以及 7 次。在郊外的實驗班次總共有 25 次。

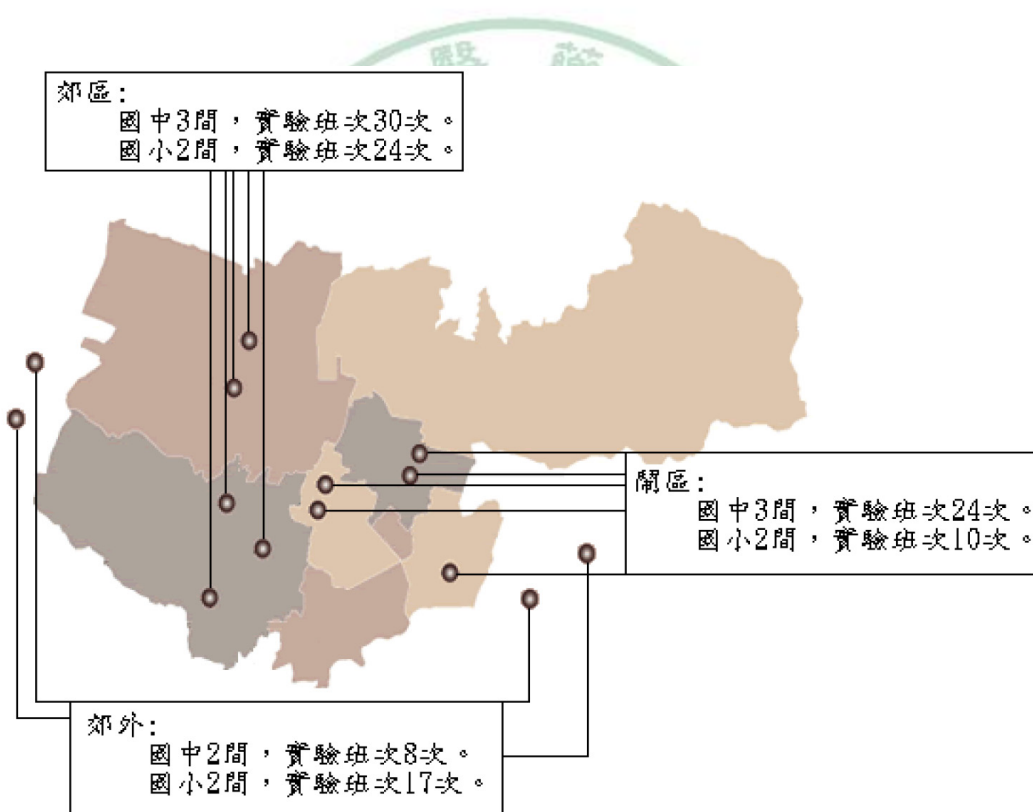


圖 3-1 國中、小學校位置圖

第二節 儀器設備

人體與環境的熱平衡主要是被六個物理因子所影響：乾球溫度、相對溼度、平均輻射溫度、空氣流動、衣著量以及活動量。除了衣著量與

活動量，其他四個參數必須仰賴物理性環境測定其實際範圍，以判定是否達到人體熱舒適的要求。在 ASHRAE Standard 55 與 ISO Standard 7726 都有對物理性環境測定的儀器設備作詳細的規定說明，本研究主要使用之儀器設備量測標準的參考資料，摘錄如表 3-1 所示。

表 3-1 儀器設備量測標準

物理性參數	符號	量測範圍	準確度	反應時間
空氣溫度	Ta	10~30°C	基本要求：±0.5°C 理想要求：±0.2°C 以上基準在 $ T_{mrt}-T_a =10$ °C 時，應確認符合要求。	依儀器的特性而定，原則上愈短愈好。
平均輻射溫度	Tmrt	10~40°C	基本要求：±2°C 理想要求：±0.2°C 當不能符合要求時，應列出實際測量之準確度。	依儀器的特性而定，原則上愈短愈好。
空氣流速	Va	0.05~1 m/s	基本基準： $\pm 0.05 + 0.05 V_a $ m/s 理想基準： $\pm 0.02 + 0.07 V_a $ m/s	基本基準：1 s 理想基準：0.5 s
絕對濕度 (以水蒸氣部分分壓示之)	Pa	0.5~25kPa	±0.15kPa 基準在 $ T_{mrt}-T_a \geq 10$ °C 時，應確認符合要求。	依儀器的特性而定，原則上愈短愈好。
自然濕球溫度	Tnwb	沒有明確定義標準		
黑球溫度	Tg	沒有明確定義標準		

在溫濕條件分布均勻的空間進行物理性環境測定時，其儀器設備架設高度應該與受測者腹部有相同高度，測定位置儘量不干擾受測者的活動範圍，並且有最具代表受測者之位置為原則。倘若當受測者周圍環境的溫濕條件分布不均勻時，決定物理性環境測定時則有以下兩種計算方式：

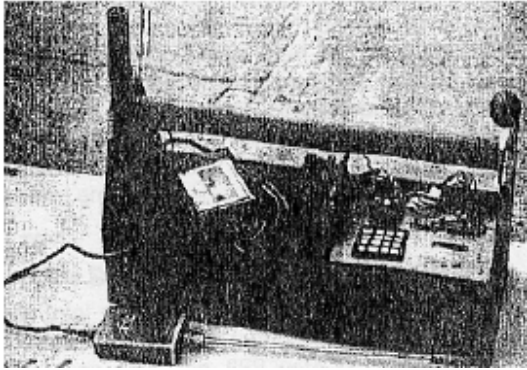
1. 若受測者為坐姿，建議測量高度為坐姿時受測者的腳踝、腹部與頭部，分別離地面 0.1 公尺、0.6 公尺以及 1.1 公尺處的物理性環境測定值加以平均；
2. 若受測者為站姿，則測量高度為站姿時受測者的腳踝、腹部與頭部，分別離地面 0.1 公尺、1.1 公尺以及 1.7 公尺處的物理性環境測定值，分別以腳踝、腹部與頭部的加權係數 1：2：1 作加權平均計算。

圖3-2是近年來熱舒適研究或文獻回顧中所提到的現場實測之相關使用儀器設備。這些儀器設備包括簡易式與整套式。本文現場實測使用的儀器設備比較接近Wong⁽²⁷⁾ (圖3-2 (c)) 與Stefano⁽³⁰⁾ (圖3-2 (d)) 的使用儀器。

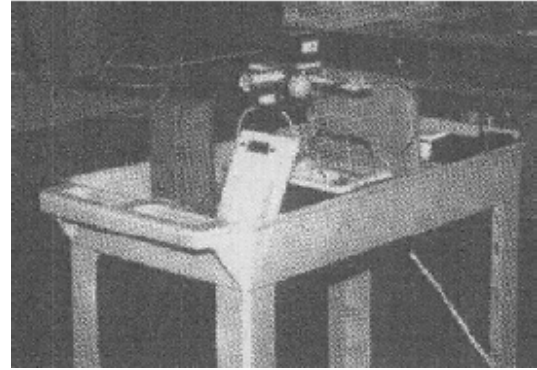
由過去熱舒適調查的相關研究報告可以發現，儘管每個研究者使用的儀器設備有所不同，但是影響人體熱舒適性的四個物理性因子：乾球溫度、相對溼度、平均輻射溫度與空氣流動，皆是其現場實測主要量測的環境參數。

本研究現場的物理性環境因子測量是使用組合式的室內氣候分析儀。室內氣候分析儀主要有量測乾球溫度、相對溼度、黑球溫度以及風速四種感測器。選用之感測器皆符合ASHRAE Standard 55對熱評估儀器設備之要求，實驗所有的儀器設備規格如表3-2所示。

乾球溫度是利用K型熱電偶溫度計直接量測空氣中的溫度。溼度是由TES-1360電子式溫溼度計直接量測空氣中的相對濕度。風速計為定風向微風速計，測量時則需朝氣流方向才能量測準確的風速。黑球溫度則是以K型熱電偶溫度計量測直徑15公分標準黑球的中心溫度，黑球是由外層均勻塗上黑漆的中空銅製球體所組成，測量時需待10至20分鐘後得以記



(a) Busch⁽¹⁸⁾ 使用之儀器



(b) Kwok⁽²⁶⁾ 使用之儀器



(c) Wong⁽²⁷⁾ 使用之儀器



(d) Stefano⁽³⁰⁾ 使用之儀器



(e) Henry⁽³³⁾ 使用之儀器



(f) Wang⁽³⁴⁾ 使用之儀器

圖 3-2 其他研究使用之儀器設備

錄穩定的黑球溫度。

求得平均輻射溫度的方法是根據ISO 7726⁽⁸⁾附錄的公式，以標準黑球測得黑球溫度，配合測得空氣溫度與風速代入公式，即可換算出平均輻射溫度。公式如下：

$$T_{mrt} = \left[(T_g + 273)^4 + 2.5 \times 10^8 \times V_a^{0.6} (T_g - T_a) \right]^{0.25} - 273 \quad (3-1)$$

式中： T_{mrt} =平均輻射溫度(°C)；

T_g =黑球溫度(°C)；

T_a =乾球溫度(°C)；

V_a =風速(m/s)。

將所有的感測器都安裝在腳架上，並透過K型熱電偶溫度計與腳架底部的數據記錄器組成一套室內氣候採擷系統，數據記錄器會每十分鐘登錄一筆所有環境參數，其參數為每十分鐘內每秒數據的平均值。本研究使用的儀器設備如圖3-3所示。

由於時間、地點與實驗儀器設備的限制，無法遵守ASHRAE Standard 55規定最佳於三種不同高度進行測量，測點的高度僅離地面約1.0公尺。教室外的儀器設備架設情形如圖3-4所示。

表 3-2 實驗儀器設備規格

項目	感測器	量測範圍(精密度)
乾球溫度	K型熱電偶溫度計	-250~1370°C(±0.5°C)
黑球溫度	K型熱電偶溫度計 15cm標準黑球	-250~1370°C(±0.5°C)
相對溼度	TES-1360電子式溫溼度計	10~95%(±3%)
風速	定風向微風速計	0~2.5m/s(±0.01m/s)
記錄器	MMS3000-T6V4	每秒記錄一次所有讀值



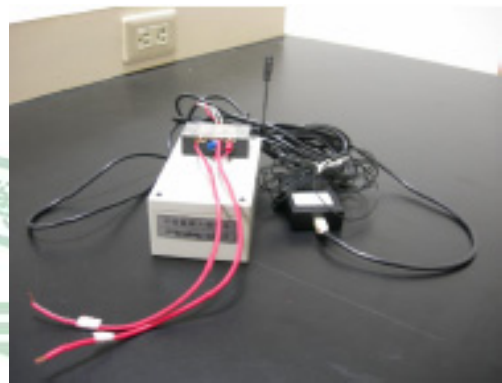
(a)數據計錄器



(b)溫溼度計



(c)黑球溫度



(d)風速計

圖 3-3 本研究使用之儀器設備



圖 3-4 教室外的儀器設備架設情形

第三節 衣著量與活動量計算

另外兩個物理因子：衣著量與活動量的測量。其中衣著量的測量是利用問卷調查受訪者的穿衣情況，對照於 ASHRAE Standard 55 訂定的各種衣物熱絕緣值 (Clothing Insulation Values, clo) 的加總，如表 3-3 所示。國中、小學生必須穿著學校規定的制服上課，制服依季節轉換有夏季與冬季制服兩種基本衣服配套，圖 3-5 為冬、夏季制服衣著量的計算示意圖。夏季制服是由短袖運動衣、短運動褲或短裙、鞋襪再加上內衣褲所組成。冬季制服則是由長袖運動衣、長袖外套、長運動褲、鞋襪以及內衣褲所組成。其夏季與冬季制服的基本衣著量總合分別為 $\text{clo}=0.32$ 與 $\text{clo}=0.96$ 。為了適應溫度的變化，學生們往往於制服的標準配套外，添加或褪去如背心、薄外套與厚外套的保暖衣物，來調整為滿意的教室內舒適環境。

人體活動量是透過觀察來求得。由於問卷調查時，學生都處於教室座位上課，參照表3-4中人體在不同活動狀態下的能量代謝率，此時學生活動情形皆符合坐著看書或寫字的人的能量代謝率即1met。

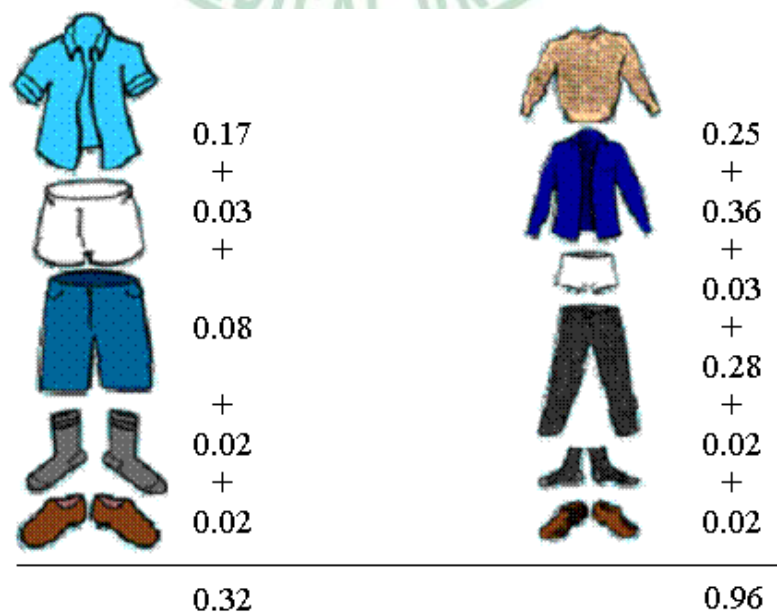


圖 3-5 冬、夏季制服衣著量的計算示意圖

表3-3 ASHRAE Standard 55訂定的衣物熱絕緣值

衣服種類	Iclu(clo)	衣服種類	Iclu(clo)
內衣		裙子	
胸罩	0.01	薄裙	0.14
短內褲	0.03	厚裙	0.23
男用內褲	0.04	薄無袖連身裙	0.23
T恤	0.08	厚無袖連身裙	0.27
短襯裙	0.14	薄短裙	0.29
長內褲	0.15	薄長裙	0.33
長襯裙	0.16	厚長裙	0.47
長內衣	0.20	毛線衣	
鞋類		薄無袖背心	0.13
運動短襪	0.02	厚無袖背心	0.22
連身褲襪	0.02	薄長袖	0.25
涼鞋	0.02	厚長袖	0.36
運動鞋	0.02	外套	
拖鞋	0.03	薄背心	0.10
皮鞋	0.03	厚背心	0.17
薄靴	0.06	單層薄夾克	0.36
厚靴	0.10	單層厚夾克	0.42
上衣		雙層薄夾克	0.44
無袖上衣	0.13	雙層厚夾克	0.48
短袖運動衫	0.17	睡衣	
短袖襯衫	0.19	薄無袖短睡衣	0.18
長袖襯衫	0.25	薄無袖長睡衣	0.20
長袖棉絨襯衫	0.34	短袖病衣	0.31
長袖運動衫	0.34	薄短袖睡衣	0.34
褲子		薄短睡褲	0.42
短褲	0.06	厚長袖睡衣	0.46
短運動褲	0.08	厚長袖短睡衣	0.48
薄西裝褲	0.15	厚長睡褲	0.57
厚西裝褲	0.24	厚長袖長睡衣	0.69
長運動褲	0.28		
馬褲	0.30		
吊帶褲	0.49		

表3-4 人體在不同活動狀態下的能量代謝率

活動狀態		新陳代謝率	
		W/m ²	met
休息狀態	睡眠	40	0.7
	躺	45	0.8
	靜坐	60	1.0
	放鬆地站立	70	1.2
行走	0.89m/s	115	2.0
	1.34m/s	150	2.6
	1.79m/s	220	3.8
辦公室內的活動	坐著看書	55	1.0
	寫字	60	1.0
	打字	65	1.1
	做著整理檔	70	1.2
	站著整理檔	80	1.4
	徘徊	100	1.7
	舉東西/打包	120	2.1
駕駛/飛行	轎車	60~115	1.0~2.0
	飛機(正常飛行)	70	1.2
	飛機(著陸)	105	1.8
	飛機(戰鬥)	140	2.4
	重型車輛	185	3.2
其他工作活動	烹調	95~115	1.6~2.0
	打掃房間	115~200	2.0~3.4
	劇烈地四肢運動(坐姿)	130	2.2
機械加工	鋸	105	1.8
	輕型(用電工業)	115~140	2.0~2.4
	重型	235	4.0
	手提 50kg 的物品	235	4.0
	挖掘和鏟	235~280	4.0~4.8
其他休閒活動	跳舞(社交時)	140~255	2.4~4.4
	美容體操/鍛煉	175~235	3.0~4.0
	打網球(單打)	210~270	3.6~4.0
	打籃球	290~440	5.0~7.6
	扳手腕(比賽)	410~505	7.0~8.7

第四節 問卷設計

熱舒適調查代表性的問卷包括 ASHRAE Standard 55 與其推動的編號 RP-462、702、821 以及 921 的問卷格式。ASHRAE Standard 55 與編號 RP-921 分別是簡易版與詳細版的代表，分別如表 3-5 與表 3-6 所示。其問卷內容主要包括個人基本資料的填寫、對目前環境熱舒適度的評估、對其他物理性因子的評估、對環境各種特性的滿意度調查、衣著量的調查與活動量的調查等。本研究的問卷設計（表 3-7）是根據學生在教室中的熱舒適狀態，參考了兩者的問卷內容修改而成三個主要提問部分。

第一部分為個人基本資料，包括受訪者填寫的日期、時間、學校、班級、性別與目前穿衣類型。由於學生必須穿著學校規定的制服上課，故問卷中只有額外調查其他的衣服類型，如內衣種類與外套種類的勾選選項。

第二部分是熱環境舒適度的評估，本研究採用了熱感覺、熱喜好與熱接受度三種常見的評估方式進行環境評估。其中熱感覺是採 ASHRAE Standard 55 傳統七個等級的熱感覺尺度 (Thermal Sensation Votes, TSV)，分別是冷 (-3)、涼 (-2)、微涼 (-1)、中性 (0)、微暖 (1)、暖 (2)、熱 (3)。熱喜好是問對現在的熱環境為希望調涼爽、不調或調暖和。而熱接受度則是問，是否能接受現在的溫度。

第三部份則是詢問學生對於其他物理性因子影響教室熱環境舒適度的感覺評估，包括濕度、風速與照度。溼度感覺是採七個等級的感覺尺度，分別是很濕、濕、微濕、剛好、微乾、乾以及很乾。風速感覺是採七個等級的感覺尺度，分別是很弱、弱、微弱、剛好、微強、強以及很強。照度感覺也是採七個等級的感覺尺度，分別是很暗、暗、微暗、剛好、微亮、亮以及很亮。

表 3-5 簡易的熱舒適調查問卷格式

**INFORMATIVE APPENDIX E—
THERMAL ENVIRONMENT SURVEY**

THERMAL ENVIRONMENT SURVEY		Survey Number:
WHITE SECTIONS TO BE FILLED IN BY OCCUPANT		Surveyor's Name:
1. Occupant's Name:		11. Occupant Location in Area (Place an "X" in the approximate place where you most often work.) 
2. Date:		
3. Time:		
4. Approx. Outside Air Temperature (°F or °C):		
5. Sky: <input type="checkbox"/> Clear <input type="checkbox"/> Mixed (Sun & Clouds) <input type="checkbox"/> Overcast		
6. Seasonal Conditions <input type="checkbox"/> Winter <input type="checkbox"/> Spring <input type="checkbox"/> Summer <input type="checkbox"/> Fall		SURVEYOR'S USE ONLY Clothing Insulation Summary: Total I_{cl} = _____ clo Metabolic Rates (met) 1. 0.8 met 2. 1.0 met 3. 1.2 met 4. 1.2 met 5. 1.6 met 6. 2.0 met 7. 3.0 met Total Heat Added/ Subtracted
7. Occupant's Clothing Please refer to the attached Table 1. Place a check mark next to the articles of clothing that you are currently wearing as you fill out this sheet. If you are wearing articles of clothing not listed in the table, please enter them into the space provided below. Article: Article:		
8. Occupant Activity Level (Check the one that is most appropriate) 1. <input type="checkbox"/> Reclining 2. <input type="checkbox"/> Seated Quite 3. <input type="checkbox"/> Office, school 4. <input type="checkbox"/> Standing Relaxed 5. <input type="checkbox"/> Light Activity Standing 6. <input type="checkbox"/> Medium Activity, Standing 7. <input type="checkbox"/> High Activity		
9. Equipment (Equipment adding or taking away from the heat load.)		
Item (computers, copiers, lighting, fans, etc.)	Quantity	
10. General Thermal Comfort (Check the one that is most appropriate) 1. <input type="checkbox"/> Hot 2. <input type="checkbox"/> Warm 3. <input type="checkbox"/> Slightly Warm 4. <input type="checkbox"/> Neutral 5. <input type="checkbox"/> Slightly Cool 6. <input type="checkbox"/> Cool 7. <input type="checkbox"/> Cold		Thermal Sensation Scale 1. +3 2. +2 3. +1 4. 0 5. -1 6. -2 7. -3
General Environment Comments:		Area Summary:
		Room/Building Type:
		Outside Relative Humidity: %
		Thermostat Setting: °F or °C
		Humidity setpoint: %
		Total Number of Occupants:

表 3-6 詳細的熱舒適調查問卷格式

Murdoch University

ASHRAE Project RP 921

W__ SUB_____ Building_____ Kalgoorlie, Western Australia

Comfort Study - Online Survey

Please note: All survey responses will remain confidential.
Participants will remain anonymous and will only be identified as an assigned ID code.

1. Name_____ 2. Date:_____

3. Time:_____

In this part of the survey we would like to know how you feel RIGHT NOW, at this moment.

4a. (Thermal environment) Please tick the scale below at the place that best represents how you feel at this moment. You may tick in an appropriate place between two categories, if you wish.

4b. Is the thermal environment acceptable to you? 1 unacceptable 2 acceptable

4c. Please select the box below that best represents how you feel at this moment.

I would like to be:

3 warmer

2 no change

1 cooler

5. Please select the boxes that best represent how you feel at the moment about the AIR MOVEMENT in your office.

6 very acceptable

5 moderately acceptable

4 slightly acceptable

3 slightly unacceptable

2 moderately unacceptable

1 very unacceptable

I would like:

3 more air movement

2 no change

1 less air movement

表 3-6 詳細的熱舒適調查問卷格式 (續)

6. (General Comfort) How comfortable is your office right now?

6	<input type="checkbox"/>	very comfortable
5	<input type="checkbox"/>	moderately comfortable
4	<input type="checkbox"/>	slightly comfortable
3	<input type="checkbox"/>	slightly uncomfortable
2	<input type="checkbox"/>	moderately uncomfortable
1	<input type="checkbox"/>	very uncomfortable

7. (Temperature) What would you estimate the temperature to be RIGHT now? _____

8. (Activity) What activities have you been engaged in during the preceding hour?

	sitting quietly	sitting typing	standing still	on your feet working	driving a car	walking around
Last 10 minutes?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
The 10 minutes preceding?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
The 10 minutes before that?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
The half hour before that?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

9. (Clothing) Please indicate whether you are wearing any of the items listed below by circulating the appropriate number. 0 = not wearing item, 1 = light weight item, 2 - medium weight item, 3 = heavy weight item.

FEMALES:	MALES:
Underlayer:	Underlayer
0 1 2 3 top	0 1 2 3 top
0 1 2 3 bottom	0 1 2 3 bottom
0 1 2 3 slip	
Footwear:	
0 1 2 3 socks	0 1 2 3 socks
0 1 2 3 pantyhose	0 1 2 3 shoes
0 1 2 3 shoes	
Midlayer	Midlayer
0 1 2 3 short sleeved shirt	0 1 2 3 short sleeved shirt
0 1 2 3 long sleeved shirt	0 1 2 3 long sleeved shirt
0 1 2 3 dress	0 1 2 3 pants
0 1 2 3 skirt	0 1 2 3 shorts
0 1 2 3 pants or slacks	
0 1 2 3 shorts	
Outerlayers	Outerlayers
0 1 2 3 sweater	0 1 2 3 sweater
0 1 2 3 vest	0 1 2 3 vest
0 1 2 3 jacket	0 1 2 3 jacket

10. Please indicate whether you have consumed any of the following items within the last 15 minutes.

<input type="checkbox"/> Hot drink	<input type="checkbox"/> Caffeinated drink	<input type="checkbox"/> Snack or Meal
<input type="checkbox"/> Cold drink	<input type="checkbox"/> Cigarette	

11. Are you presently using air conditioning at home and/or or in your car?

	Compressor based air conditioning		Evaporative air conditioning		Not available
	Yes	No	Yes	No	
at home in my bedroom	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
at home in my living area	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
in may car	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>

表 3-7 教室環境熱舒適性問卷設計

教室環境熱舒適性問卷

前言：
您好，感謝您填寫本問卷。本問卷目的在了解室內溫熱環境對人體舒適性的影響，以改善環境品質。本問卷僅供學術研究探討，不另作他用，敬請惠予支持與協助。

第一部份：受訪者基本資料

1. 填寫日期：_____ 2. 填寫時間：_____

3. 學校：_____ 4. 班級：_____

5. 性別：男 女

6. 除了制服之外，你還多穿了哪一些衣服類型？
內衣類型：短袖汗衫(男)或襯衣(女) 長袖衛生衣 無
外套類型：背心 薄夾克外套 厚夾克外套 無

第二部份：熱環境舒適度的評估

7. 你覺得目前溫度如何？
冷 涼爽 微涼 剛好(舒適) 微暖 暖和 熱

8. 如果你能改變目前的溫度，你會如何調整？
想變暖 不想改變 想變涼

9. 你可以接受目前的溫度嗎？
接受 不接受

第三部份：其他物理性因子的評估

10. 你覺得目前濕度如何？
很濕 濕 微濕 剛好(舒適) 微乾 乾 很乾

11. 你覺得目前風速如何？
很弱 弱 微弱 剛好(舒適) 微強 強 很強

12. 你覺得目前照度如何？
很暗 暗 微暗 剛好(舒適) 微亮 亮 很亮

第五節 實驗步驟

為了解學生每個月份的熱舒適變化情形，規劃學校班級以每個月份進行一次熱舒適實驗為原則，最多不超過兩次。國中與國小實驗的詳細行程安排分別如表 3-8 與表 3-9 所示。

每次的實驗程序是經由各個國中與國小校方的同意後才正式開始。在進行教室環境的現場實測與問卷調查之前，必須先將影響人體熱舒適性的四個參數：溫度、溼度、平均輻射溫度以及風速的感測器與數據記錄器組成四套室內氣候分析儀。

在學生上課前十分鐘將準備好的四套室內氣候分析儀，其中三套平均放置教室內，另 1 套則置於教室外，測點的高度選擇離地面高度 1.0m。採樣時間由早上 8 點至下午 4 點作連續性的測量與記錄。數據記錄器會每十分鐘登錄一筆所有物理性環境參數，其參數值為每十分鐘內每秒數據的平均值。

為了解學生每天最高溫與最低溫的熱舒適變化，問卷的填寫時間約為室溫最低時的早上第一節以及最高時的下午第一節兩次時段為原則。問卷調查之前，會有工作人員簡單介紹其實驗目的，並且受訪者回答問卷時，有研究人員在旁解說或回答其提出的相關問題，但不會誘導受訪者。為避免前一節課的活動影響其主觀感覺的評估，學生是於下課前十分鐘開始填寫問卷。

進行熱舒適實驗的過程中，為了減少干擾學生作息時間與避免影響老師教學進度，除了現場實測的儀器設備採用自動控制外，問卷調查也儘量在十分鐘之內完成。國中與國小的現場實測情形如圖 3-6 與圖 3-7 所示。

表 3-8 國中實驗規劃行程表

研究對象	研究學校	實驗日期(班級*)
01	育英國中	94/11/29 (3A) , 95/01/04 (1A) , 95/01/05 (1A) 。
02	大業國中	94/11/10 (2A) , 94/12/16 (3A) , 95/01/03 (3A、3B) , 95/01/06 (3C) 。
03	五權國中	94/09/29 (2A) , 94/09/30 (1A) , 94/10/03 (1B) , 94/10/04 (1C) 。
04	西苑國中	94/08/03 (3A) , 94/08/08 (3A) , 94/08/24 (1A) , 94/10/12 (1B) , 94/10/13 (3A) , 94/10/14 (3B) , 94/11/25 (1C) , 94/12/09 (1B) , 95/01/02 (3B) 。
05	惠文國中	94/11/14 (3A) , 94/11/15 (2A) 。
06	萬和國中	94/08/18 (3A) , 94/09/05 (3B) , 94/09/06 (3C) , 94/10/24 (3D) , 94/10/25 (3C) 。
07	太平國中	94/11/03 (1A) , 94/11/07 (2A) 。
08	長億國中	95/10/19 (2A、3A、3B) 。

*括弧內數字只是流水號，用於區別不同班級，不代表其真實班級名稱。

表 3-9 國小實驗規劃行程表

研究對象	研究學校	實驗日期(班級*)
01	忠明國小	95/10/17 (5A) , 94/10/18 (5B) , 94/12/13 (5A) 。
02	省三國小	94/09/26 (6A) , 94/09/27 (5A) 。
03	上安國小	94/09/08 (5A) , 94/09/09 (6A) , 94/10/06 (5B) , 94/10/07 (6B) , 94/11/04 (5A) , 94/12/06 (6A) , 95/01/09 (5B) , 95/01/10 (5C) , 95/01/11 (5D) , 95/01/12 (5A) , 95/01/13 (5E) 。
04	大新國小	94/09/19 (6A) , 94/09/20 (6B) , 94/12/02 (6B) 。
05	龍峰國小	94/09/15 (5A) , 94/09/16 (5B) , 94/12/29 (6A、6B、6C、6D) , 94/12/30 (6E、6F) 。
06	瑞峰國小	94/09/12 (6A) , 94/09/13 (5A) , 94/12/22 (6B) , 94/12/23 (5A) 。

*括弧內數字只是流水號，用於區別不同班級，不代表其真實班級名稱。



圖 3-6 國中現場實測情形



圖 3-7 國小現場實測情形

第四章 研究結果

第一節 受訪者基本資料

參與問卷調查的學生分別來自十四所國中、小學校，其中國中與國小學校分別佔 8 所與 6 所，參與的班級共有 50 個班。參與問卷調查的學生共 1,614 人，總共蒐集到 3,754 份有效問卷。

國中與國小學校蒐集到的有效問卷分別是 2,239 份（60%）與 1,515 份（40%）。每個學校蒐集到的問卷數統計如圖 4-1 所示。由於學校班級的配合度較高，熱舒適實驗較容易安排進行，故在西苑國中的 784 份（21%）與上安國小的 488 份（13%）得以蒐集較多的學生問卷數。

由於學校每個班級的男學生與女學生招收人數相當，故每個學校的男、女學生分配比例相近。有效問卷男生與女生的問卷數統計分別為 1,838 份（49%）與 1,916 份（51%）。

研究調查期間從 2005 年的八月份至翌年的一月份。每個月份蒐集到

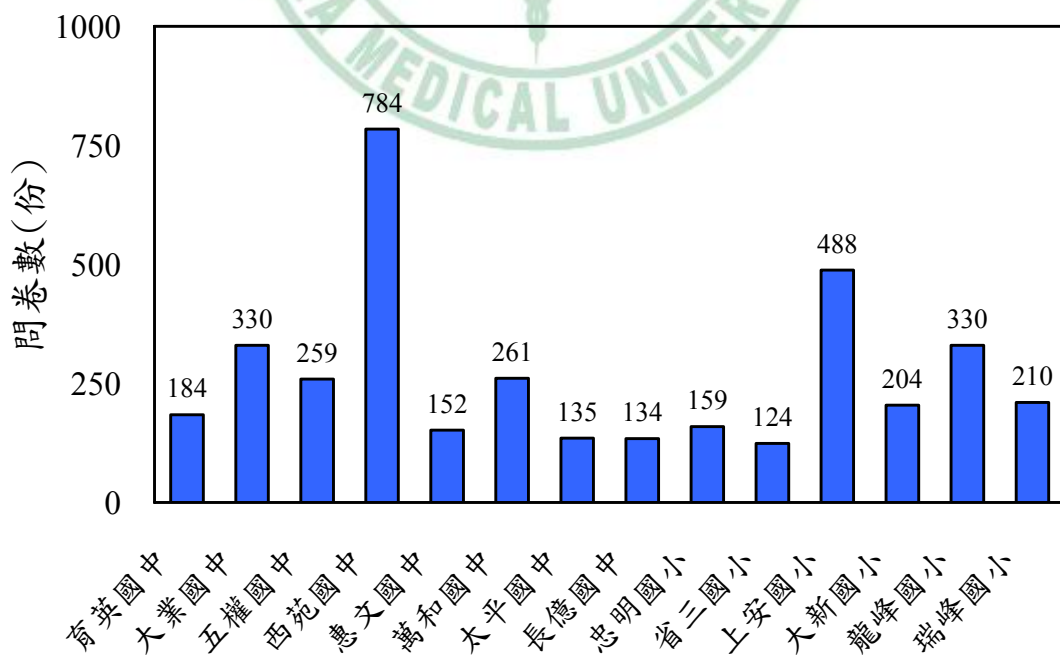


圖 4-1 每個學校蒐集到的問卷數統計

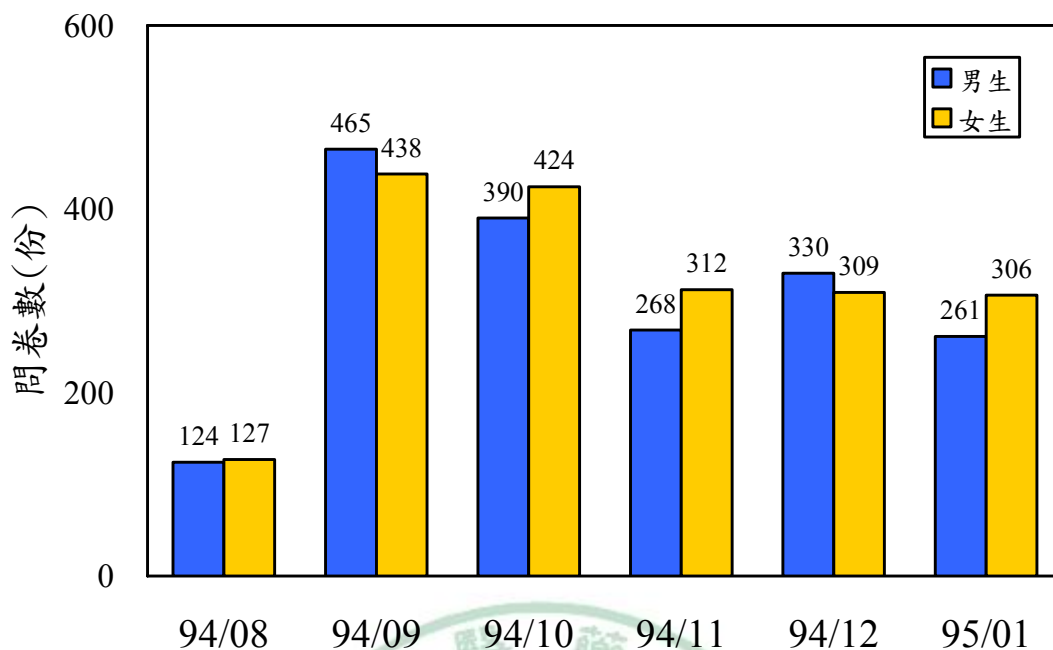


圖 4-2 每個月份蒐集到的問卷數統計

的男生與女生問卷數統計如圖 4-2 所示。八月份至翌年的一月份問卷數分別共有 251 份 (7%)、903 份 (22%)、814 份 (24%)、580 份 (15%)、639 份 (17%) 與 567 份 (15%)。八月份為學生暑假期間，熱舒適實驗安排進行的次數較少，九月份為補足炎熱狀態下的實驗數據，熱舒適實驗安排進行的次數較多，是八月份蒐集到的問卷數最少與九月份蒐集到的問卷數最多的主要因素。

基於國中、小學生必須穿著學校規定的制服上課，由於十一月底為冬季制服與夏季制服的換季界限，故將八月份至十一月份與十二月份至翌年的一月份分別歸類為夏季與冬季。冬季與夏季分別共蒐集到 1,206 份 (32%) 與 2,548 份 (68%) 的有效問卷。冬季蒐集到的問卷數較夏季蒐集到的問卷數來的少，是因為國中、小學生穿著冬季制服的時期較穿著夏季制服的時期來的短，所以熱舒適實驗安排進行的次數較少，得以蒐集到的問卷數也較少。

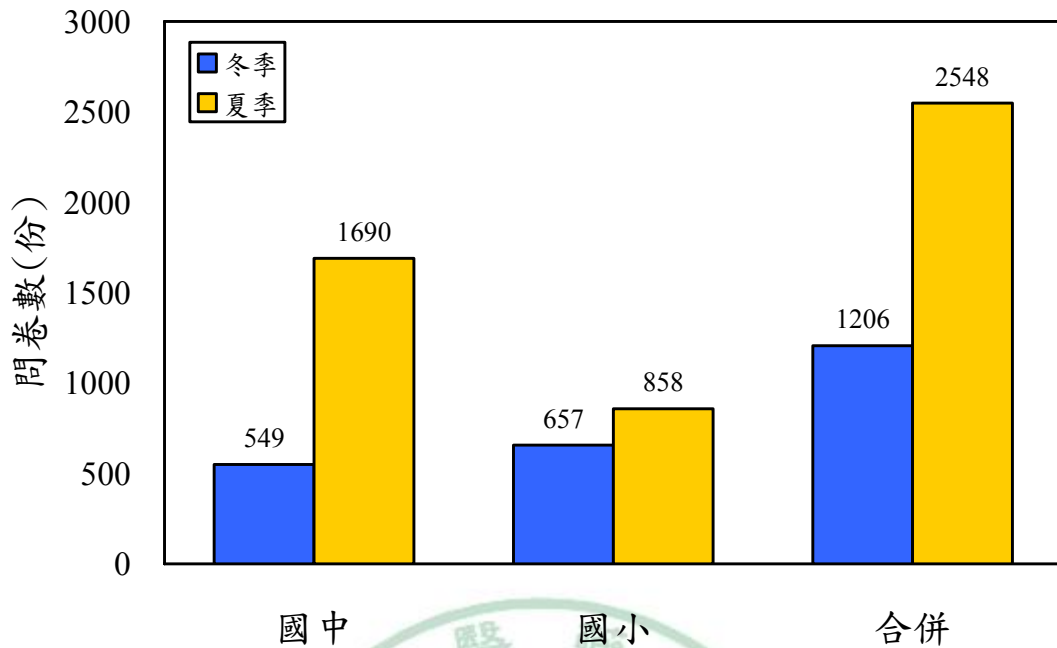


圖 4-3 冬季與夏季問卷數統計

國中、小的冬季與夏季問卷數統計分布如圖 4-3 所示。其中國中與國小在穿著冬季制服時期分別共蒐集到 549 份 (46%) 與 657 份 (54%) 的有效問卷；在穿著夏季制服時期分別共蒐集到 1,690 份 (66%) 與 858 份 (34%) 的有效問卷。

問卷的填寫時間約為室溫最低時的早上第一節以及最高時的下午第一節兩次時段為原則。依上午 (06:00~12:00 時) 與下午 (12:00~18:00 時) 來分類，國中、小的上午與下午問卷數統計分布如圖 4-4 所示。其中國中與國小在上午時段分別共蒐集到 1,267 份 (57%) 與 943 份 (43%) 的有效問卷；在下午時段分別共蒐集到 972 份 (63%) 與 572 份 (37%) 的有效問卷。

國中與國小學生的年齡層分布，可以透過學生被分配到的年級來判斷。年級的分布為國小五年級至國中三年級，故年齡層約為 11 歲至 15 歲。圖 4-5 為男生與女生在每個年級蒐集到的問卷數統計。其中正在念國

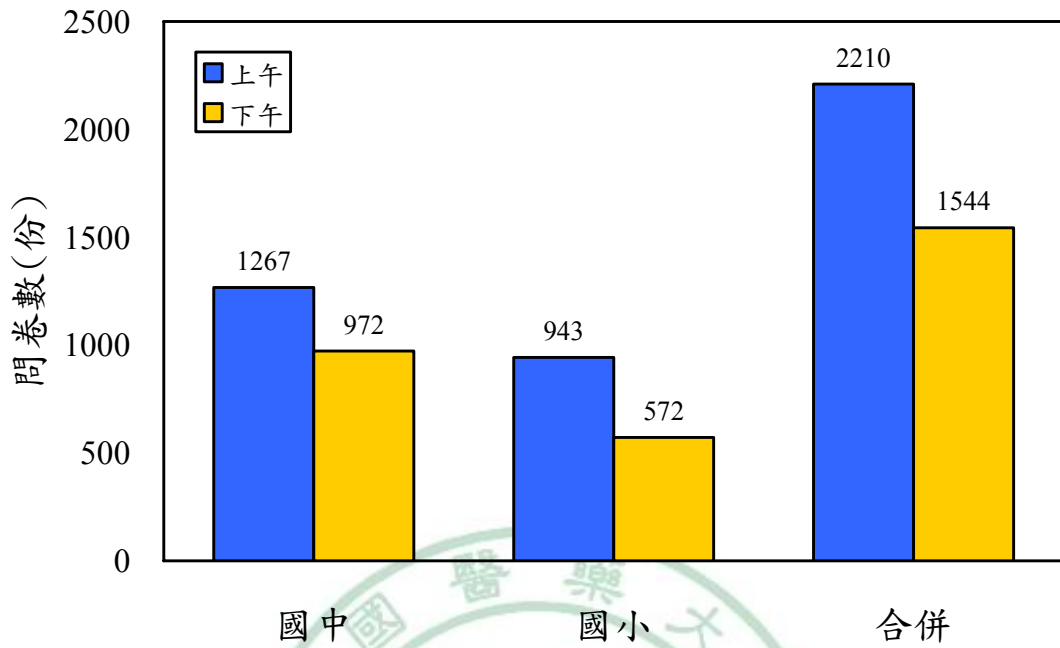


圖 4-4 上午與下午問卷數統計

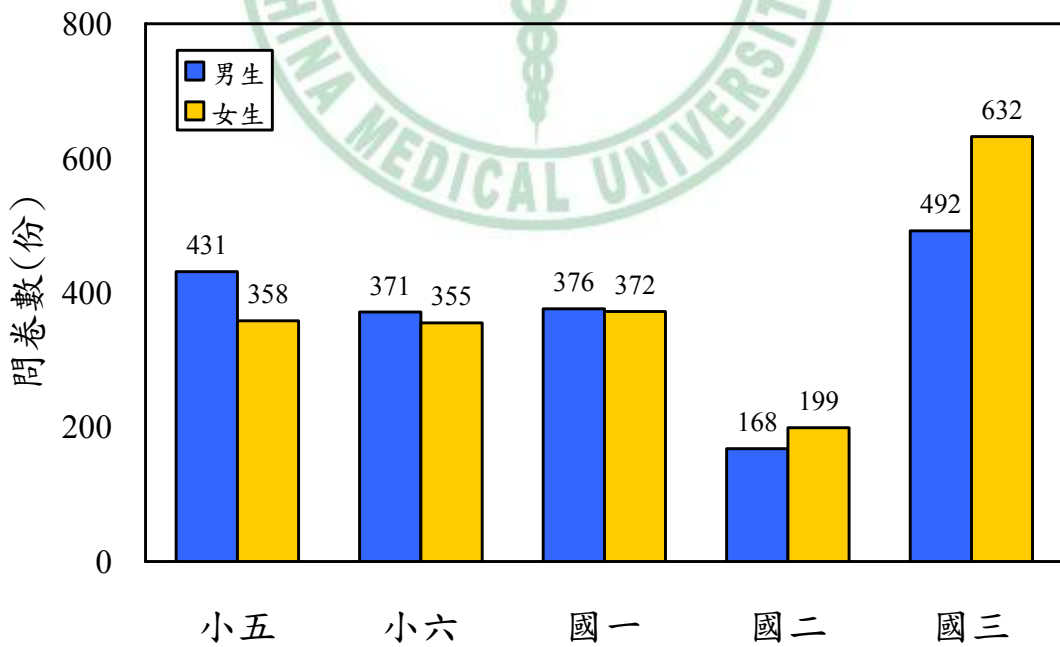


圖 4-5 每個年級男生與女生蒐集到的問卷數統計

小五年級的人共有 789 人 (21%)、國小六年級共有 726 人 (19%)、國中一年級共有 748 人 (20%)、國中二年級共有 367 人 (10%) 以及國中三年級共有 1,124 人 (30%)。其中國中二年級的學生參與問卷調查數為最少，國中三年級的學生為最多。由於班級的熱舒適實驗進行，是經由校方無刻意安排的任意挑選，故無法在每個年級實施相當次數的熱舒適實驗與蒐集到相當的問卷數。

第二節 對其他環境因子的評估

問卷中第三部份詢問了學生對教室內濕度、風速與照度的七個感覺程度的評估。濕度的七個感覺程度問卷投票數彙整如表 4-1。其問卷投票數比例分布情形如圖 4-6 所示。分別為目前覺得很濕的共有 39 票 (1%)、

表 4-1 濕度的七個感覺程度問卷投票數

環境因子	濕度							合計
	很濕	濕	微濕	剛好	微乾	乾	很乾	
問卷數 (份)	39	152	755	2002	628	148	30	3754

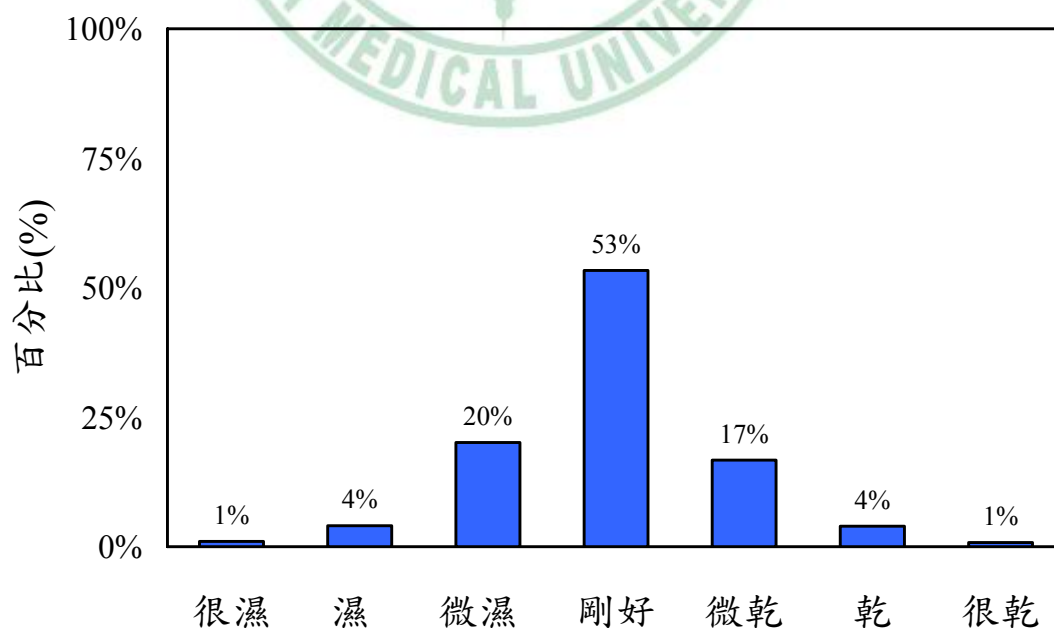


圖 4-6 濕度的七個感覺程度問卷投票數百分比

覺得濕的共有 152 票 (4%)、覺得微濕的共有 755 票 (20%)、覺得剛好的共有 2,002 票 (53%)、覺得微乾的共有 628 票 (17%)、覺得乾的共有 148 票 (4%) 以及覺得很乾的共有 30 票 (1%)。選擇目前覺得濕度剛好的學生最多，依覺得很濕與覺得很乾的方向遞減。

風速的七個感覺程度問卷投票數彙整如表 4-2。其問卷投票數比例分布情形如圖 4-7 所示。分別為目前覺得很弱的共有 219 票 (6%)、覺得弱的共有 398 票 (11%)、覺得微弱的共有 1,161 票 (31%)、覺得剛好的共有 1,316 票 (35%)、覺得微強的共有 560 票 (15%)、覺得強的共有 72 票 (2%) 以及覺得很強的共有 28 票 (1%)。選擇目前覺得風速剛好的學生最多，依覺得很弱與覺得很強的方向遞減。

表 4-2 風速的七個感覺程度問卷投票數

環境因子	風速							合計
	很弱	弱	微弱	剛好	微強	強	很強	
問卷數 (份)	219	398	1161	1316	560	72	28	3754

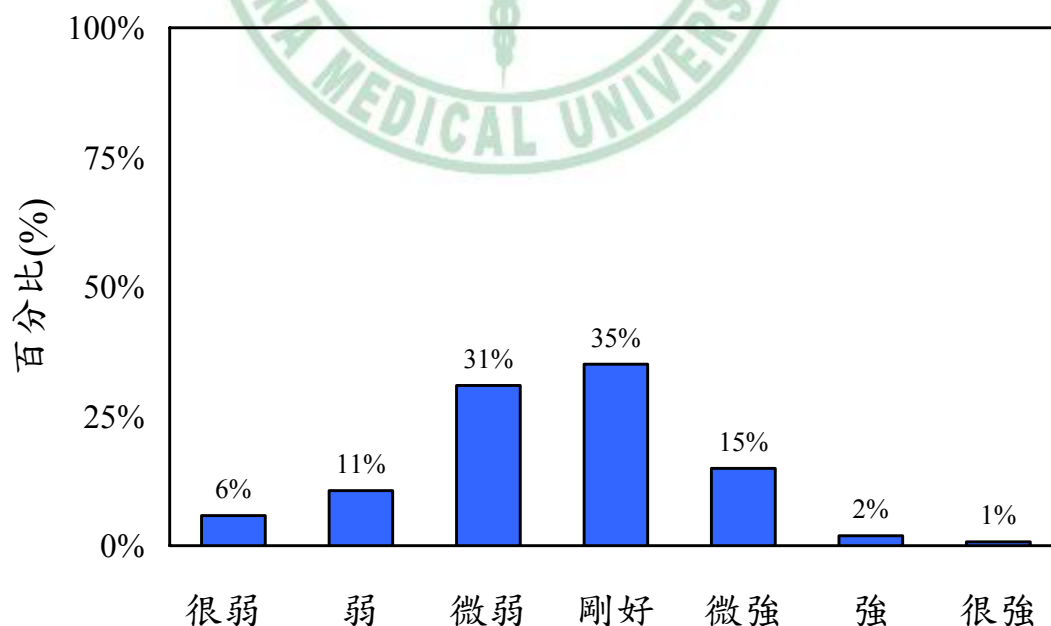


圖 4-7 風速的七個感覺程度問卷投票數百分比

照度的七個感覺程度問卷投票數彙整如表 4-3。其問卷投票數比例分布情形如圖 4-8 所示。分別為目前覺得很暗的共有 39 票（1%）、覺得暗的共有 209 票（6%）、覺得微暗的共有 721 票（19%）、覺得剛好的共有 1,538 票（41%）、覺得微亮的共有 657 票（18%）、覺得亮的共有 200 票（5%）以及覺得很亮的共有 63 票（2%）。選擇目前覺得照度剛好的學生最多，依覺得很暗與覺得很亮的方向遞減。

圖 4-9、圖 4-10 以及圖 4-11 分別是男、女生、國中、小以及城、鄉對教室內濕度、風速以及照度的七個感覺程度問卷投票數比例分布情形。城市與鄉村的問卷選取是根據十四所國中、小的學校位置，依照其周圍繁榮程度而劃分，為了探討交通流量、建築物多寡與人口密度會造

表 4-3 照度的七個感覺程度問卷投票數

環境因子	照度							合計
	很暗	暗	微暗	剛好	微亮	亮	很亮	
問卷數(份)	209	366	721	1538	657	200	63	3754

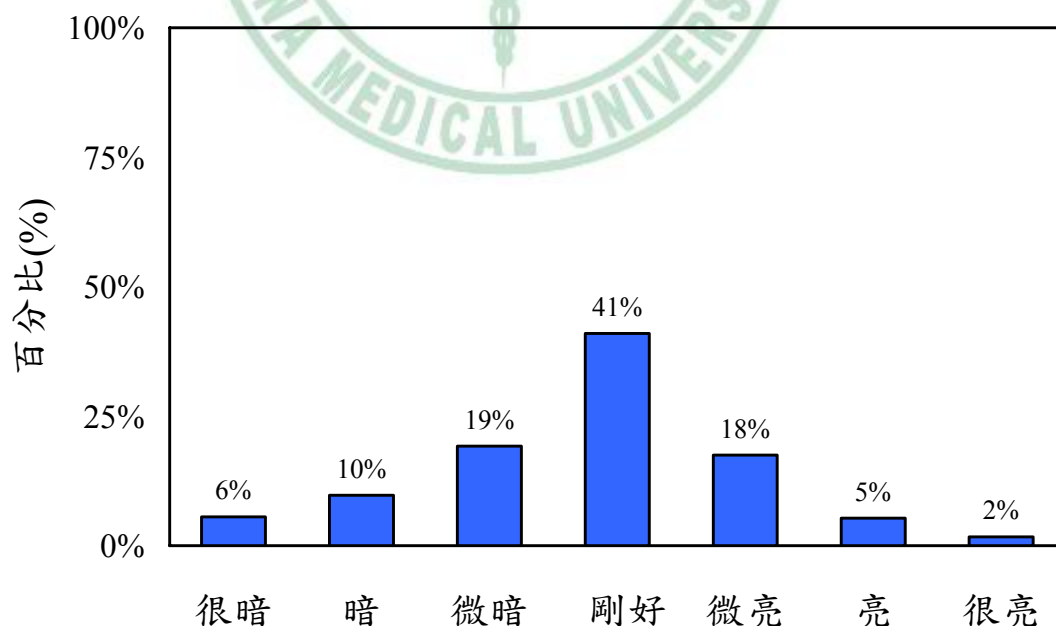


圖 4-8 照度的七個感覺程度問卷投票數百分比

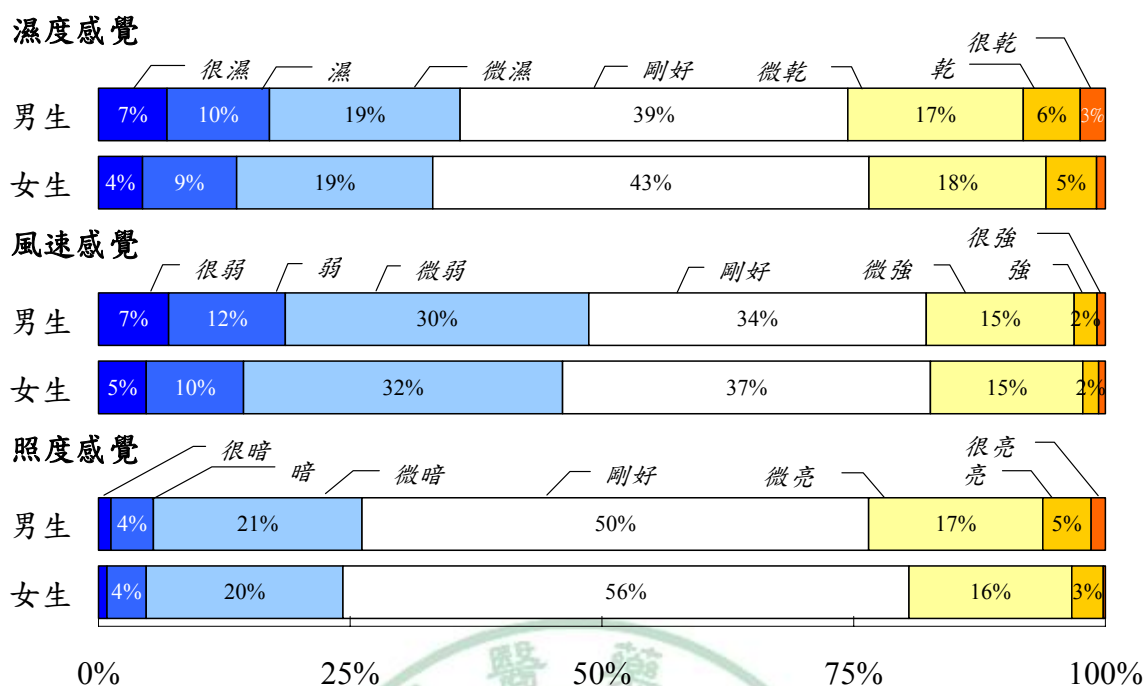


圖 4-9 男生與女生對其他環境因子的感覺百分比

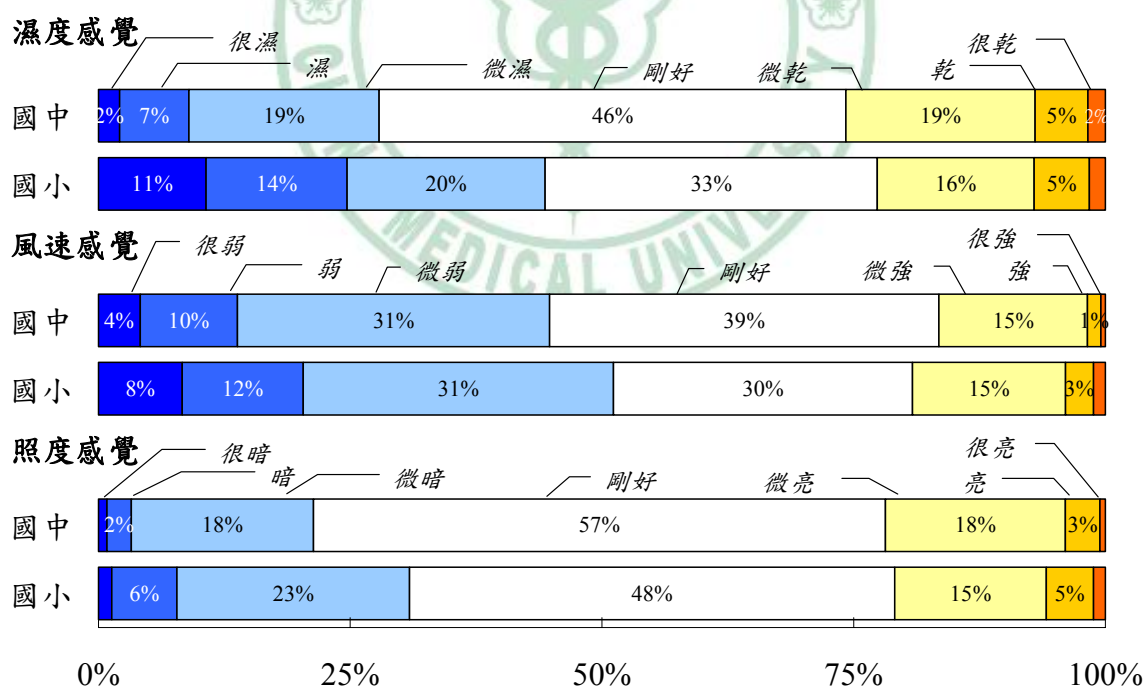


圖 4-10 國中與國小對其他環境因子的感覺百分比

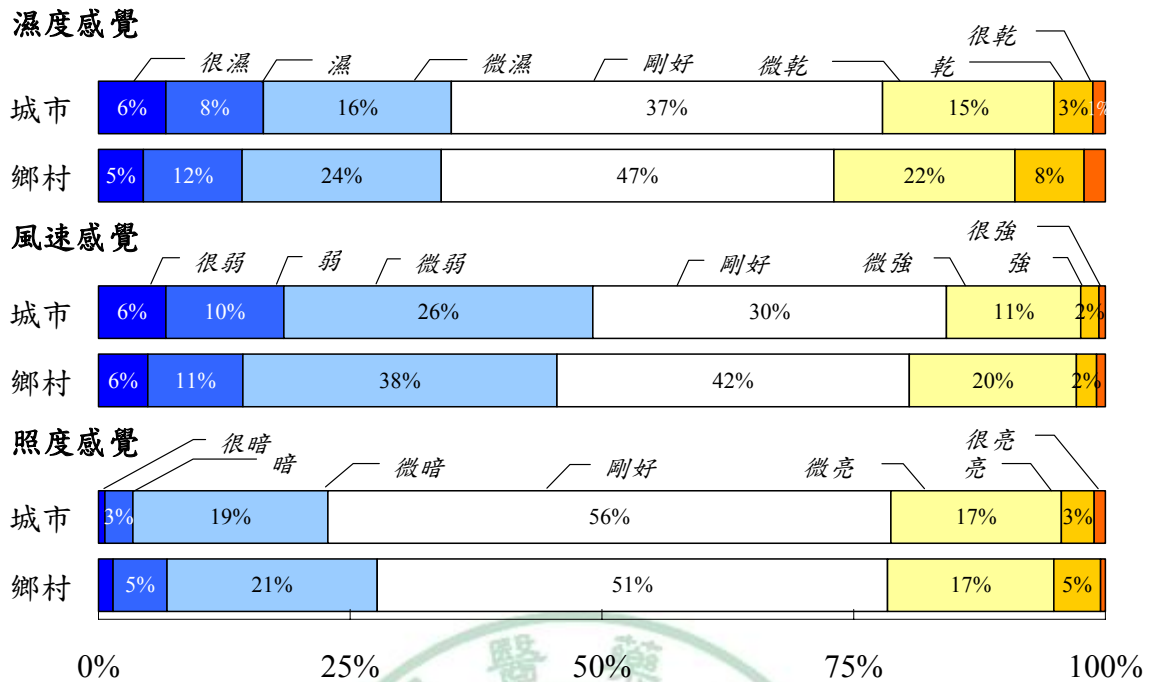


圖 4-11 城市與鄉村對其他環境因子的感覺百分比

成微氣候上的差異情形。

男、女生對教室內濕度的感覺前三者分別是覺得剛好的 39%與 43%、覺得微濕的 19%與 19%以及覺得微乾的 17%與 18%。男、女生對教室內風速的感覺前三者分別是覺得剛好的 34%與 37%、覺得微弱的 30%與 32%以及覺得微強的 15%與 15%。男、女生對教室內照度的感覺前三者分別是覺得剛好的 50%與 56%、覺得微暗的 21%與 20%以及覺得微亮的 17%與 16%。無論是男生或女生選擇目前覺得溼度、風速以及照度為剛好的學生最多。

國中、小對教室內濕度的感覺前三者分別是覺得剛好的 46%與 33%、覺得微濕的 19%與 20%以及覺得微乾的 19%與 16%。國中對教室內風速的感覺前三者分別是覺得剛好的 39%、覺得微弱的 31%以及覺得微強的 15%。國小對教室內風速的感覺前三者分別是覺得微弱的 31%、覺得剛好的 30%以及覺得微強的 15%。國中、小對教室內照度的感覺前

三者分別是覺得剛好的 57%與 48%、覺得微暗的 18%與 23%以及覺得微亮的 18%與 15%。無論是國中生或國小生選擇目前覺得溼度、風速以及照度為剛好的學生最多。

城、鄉對教室內濕度的感覺前三者分別是覺得剛好的 37%與 47%、覺得微濕的 16%與 24%以及覺得微乾的 15%與 22%。城、鄉對教室內風速的感覺前三者分別是覺得剛好的 30%與 42%、覺得微弱的 26%與 38%以及覺得微強的 11%與 20%。城、鄉對教室內照度的感覺前三者分別是覺得剛好的 56%與 51%、覺得微暗的 19%與 21%以及覺得微亮的 17%與 17%。無論是城市學生或鄉村學生選擇目前覺得溼度、風速以及照度為剛好的學生最多。

本節以卡方齊一性檢定 (Chi-Square Test of Homogeneity) 來了解其他環境因子的男生與女生、國中與國小或城市與鄉村之學生感覺是否相同。檢定的環境因子有濕度、風速與照度三種。卡方齊一性檢定是研究者想要檢定兩個或兩個以上之隨機樣本，是否自同一母體或同一統計的方法。由不同母體分別抽取樣本來分析其比例分配是否一致。通常是將資料呈現為列聯表的形式，因此也稱為列聯表檢定 (Contingency Table Test)。列聯表是將屬性分別排成橫列與縱行的表格，如表 4-4 所示。

表 4-4 溼度感覺程度的性別比例分配列聯表

受訪者特性	濕度							合計
	很濕	濕	微濕	剛好	微乾	乾	很乾	
男生(O)	0.013	0.042	0.207	0.503	0.173	0.048	0.014	1.000
女生(O)	0.008	0.039	0.195	0.562	0.162	0.031	0.002	1.000
合計	0.021	0.081	0.402	1.065	0.335	0.079	0.016	2.000
男生(E)	0.010	0.041	0.201	0.533	0.167	0.040	0.008	
女生(E)	0.010	0.041	0.201	0.533	0.167	0.040	0.008	
男生(X ²)	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.002	0.004	0.009
女生(X ²)	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.002	0.004	0.009

表 4-4 為溼度感覺程度與性別兩個屬性排成的列聯表形式，表中分別列出計算後的觀察次數、期望次數與檢定統計量的值。下面是以溼度感覺程度的性別比例分配是否一致為例所做的卡方齊一性檢定。

卡方齊一性的檢定有下列幾項步驟：

1. 列出虛無假設 (H_0) 與對立假設 (H_1)。

H_0 ：溼度感覺程度的性別比例分配一致。

H_1 ：溼度感覺程度的性別比例分配不完全一致。記錄列聯表中每一方格觀察次數 (O_{ij}) 與期望次數 (\hat{E}_{ij})。期望次數的計算公式如下。

$$\hat{E}_{ij} = \frac{(\text{第}i\text{列的總和}) \times (\text{第}j\text{行的總和})}{\text{樣本大小}} \quad (4-1)$$

2. 計算檢定統計量的值。檢定統計量等於觀察值減去期望值的程度，檢定統計量愈大代表偏離度愈大。專注於觀察值與期望值差別度大小，故必須去除正、負號而取平方。因此卡方值亦即將每一個觀察值減去期望值的平方後除以期望值，累加起來。其計算過程如下：

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c \frac{(O_{ij} - \hat{E}_{ij})^2}{\hat{E}_{ij}} = \frac{(0.013 - 0.01)^2}{0.01} + \dots + \frac{(0.002 - 0.008)^2}{0.008} = 0.02 \quad (4-2)$$

3. 若 $\chi^2 > \chi_{(r-1) \times (c-1), \alpha}^2$ 或 P 值 $< \alpha$ ，則拒絕 H_0 (α 為顯著水準，在 r 列、 c 行的情況下自由度為 $df = (r-1) \times (c-1)$)；反之則接受 H_0 。由於濕度感覺程度有 7 個類別與性別有 2 個類別，故其自由度為 $df = (7-1) \times (2-1) = 6$ 。由計算結果可知 $\chi^2 > \chi_{6,0.05}^2 = 12.59$ ，因此在顯著水準大於 0.05 的情況下，無法拒絕虛無假設的成立，表示性別

對溼度的感覺並無顯著差異。

表 4-5 為濕度、風速與照度三種環境因子的七種感覺程度下，檢定受訪者男生與女生、國中與國小或城市與鄉村的感覺是否相同的卡方齊一性檢定結果。檢定結果無論在溼度、風速與照度感覺程度下，其男生與女生、國中與國小或城市與鄉村的學生比例分配皆達顯著水準，即 $\chi^2 < \chi_{6,0.05}^2 = 12.59$ 或 P 值 $> \alpha = 0.05$ ，表示性別、學校或城鄉對於教室環境內的溼度、風速以及照度的感覺程度並無顯著差異。

表 4-5 物理性環境因子卡方齊一性檢定結果

卡方檢定	物理性環境因子		
	濕度	風速	照度
性別			
χ^2 @	0.02	0.01	0.02
P 值	1	1	1
學校			
χ^2 @	0.04	0.04	0.11
P 值	1	1	1
城鄉			
χ^2 @	0.02	0.01	0.01
P 值	1	1	1

@95%信賴水準的卡方值，在自由度等於 6 時，即 $\chi_{6,0.05}^2 = 12.59$ 。

*未達顯著水準，即 $\chi^2 > \chi_{6,0.05}^2 = 12.59$ 或 P 值 $< \alpha = 0.05$ ，表示該溫度頻度下的性別或學校比例分配並不一致。

第三節 室內熱環境量測結果

圖 4-12 係將所有測得的物理性環境測定數據顯示在 ASHRAE Standard 55 的舒適度濕空氣曲線圖上。其中圖 4-12 的橫座標是室內操作溫度 (Operating Temperature, To)，而非室內乾球溫度。所謂操作溫度乃

是乾球溫度與平均輻射溫度並乘上其以其對應的熱傳係數加權所得之指標。其公式如下：

$$T_o = \frac{h_c \times T_a + h_r \times T_{mrt}}{h_c + h_r} \quad (4-3)$$

式中： T_o = 操作溫度 (°C)；

T_a = 乾球溫度 (°C)；

T_{mrt} = 平均輻射溫度 (°C)；

h_c = 對流熱傳係數；

h_r = 輻射熱傳係數。

本文的室內操作溫度是直接使用室內乾球溫度與室內平均輻射溫度的平均值。物測數據在每個月份室內操作溫度範圍內的百分比與每個月份量測到的室內熱環境狀況，分別如圖 4-13 至圖 4-18 所示。

根據量測的結果顯示，研究調查期間的室內乾球溫度範圍約在 14.0~32.9°C，平均值為 26.1°C，標準差為 5.4；黑球溫度範圍約在 14.6~34.4°C，平均值為 26.6°C，標準差為 5.4；平均輻射溫度範圍約在 14.6~35.2

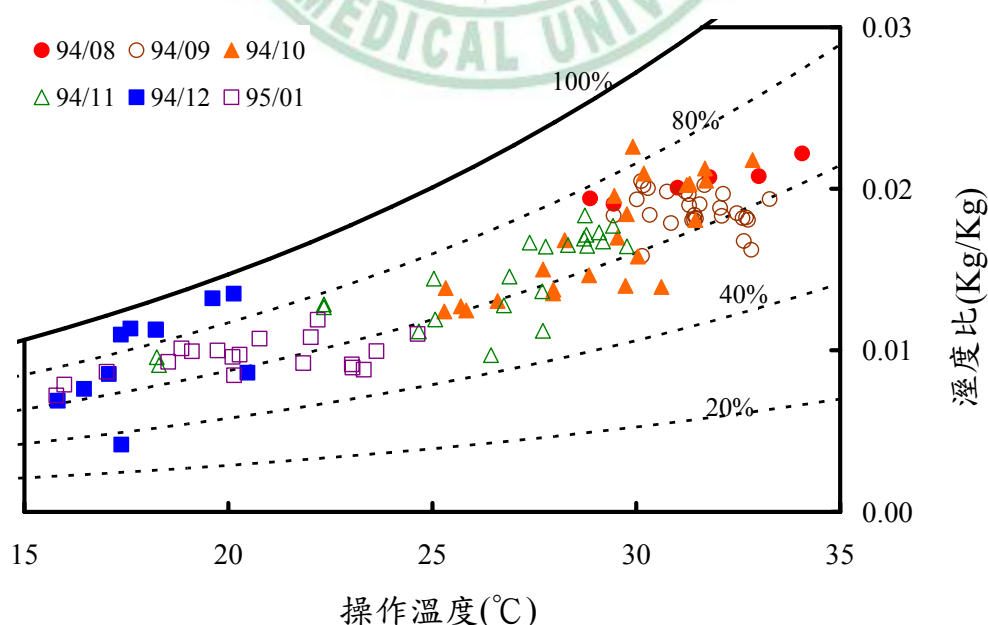
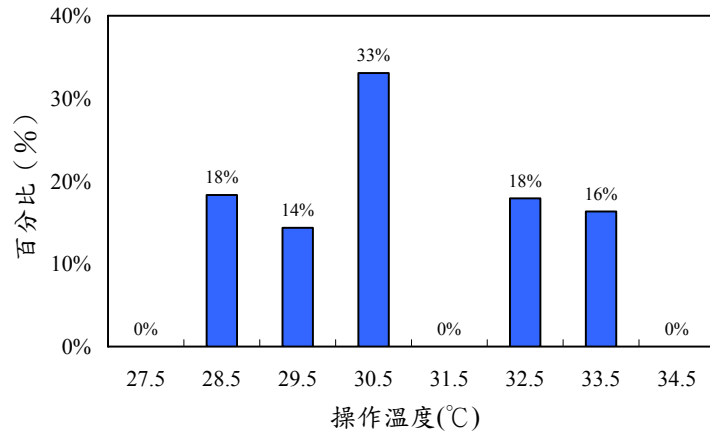
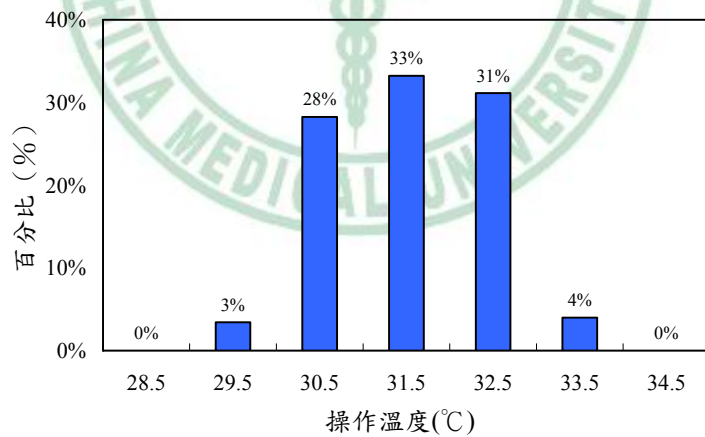


圖 4-12 教室熱環境量測結果



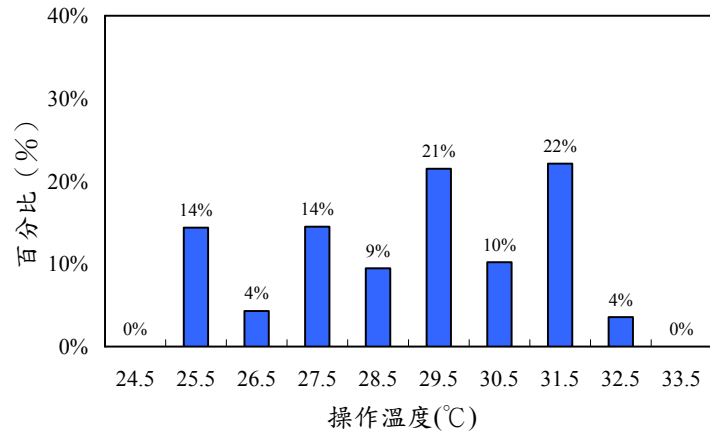
環境參數	平均值	標準差	最小值	最大值
乾球溫度(°C)	30.9	1.8	28.5	32.9
黑球溫度(°C)	31.5	2.1	29.0	34.4
平均輻射溫度(°C)	31.9	2.3	29.2	35.2
操作溫度(°C)	31.4	2.0	28.9	34.1
濕度比(Kg/Kg)	0.020	0.001	0.019	0.022
相對溼度(%)	71.2	4.3	65.7	78.1

圖 4-13 94/08 月份室內熱環境狀況



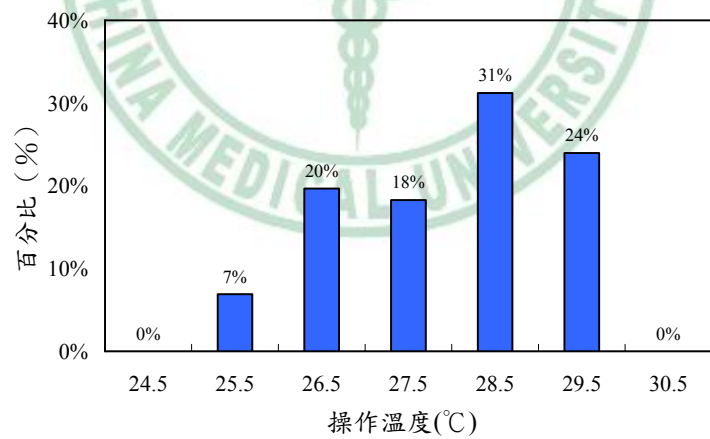
環境參數	平均值	標準差	最小值	最大值
乾球溫度(°C)	31.0	1.0	29.1	32.6
黑球溫度(°C)	31.6	1.0	29.6	33.5
平均輻射溫度(°C)	31.8	1.1	29.8	34.0
操作溫度(°C)	31.4	1.0	29.4	33.3
濕度比(Kg/Kg)	0.019	0.001	0.016	0.020
相對溼度(%)	64.7	6.3	51.1	74.8

圖 4-14 94/09 月份室內熱環境狀況



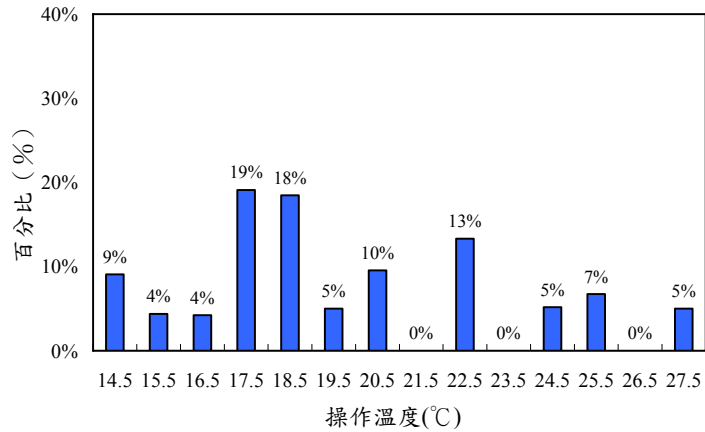
環境參數	平均值	標準差	最小值	最大值
乾球溫度(°C)	28.7	2.1	24.7	32.6
黑球溫度(°C)	29.3	2.2	25.3	33.0
平均輻射溫度(°C)	29.5	2.3	25.2	33.1
操作溫度(°C)	29.1	2.2	25.3	32.8
濕度比(Kg/Kg)	0.017	0.003	0.012	0.023
相對溼度(%)	65.9	8.4	51.3	86.8

圖 4-15 94/10 月份室內熱環境狀況



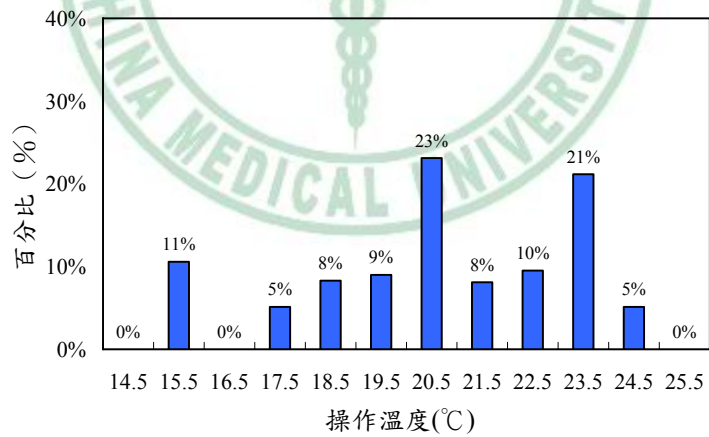
環境參數	平均值	標準差	最小值	最大值
乾球溫度(°C)	27.7	1.5	24.0	29.4
黑球溫度(°C)	28.2	1.2	25.3	30.0
平均輻射溫度(°C)	28.4	1.1	26.1	30.5
操作溫度(°C)	28.1	1.3	25.1	29.8
濕度比(Kg/Kg)	0.015	0.003	0.010	0.018
相對溼度(%)	63.8	7.5	45.4	72.6

圖 4-16 94/11 月份室內熱環境狀況



環境參數	平均值	標準差	最小值	最大值
乾球溫度(°C)	18.9	3.5	14.0	27.1
黑球溫度(°C)	19.4	3.5	14.6	27.5
平均輻射溫度(°C)	19.7	3.5	14.6	27.6
操作溫度(°C)	19.3	3.5	14.5	27.4
濕度比(Kg/Kg)	0.010	0.003	0.004	0.017
相對溼度(%)	72.2	16.4	36.8	92.2

圖 4-17 94/12 月份室內熱環境狀況



環境參數	平均值	標準差	最小值	最大值
乾球溫度(°C)	20.1	2.1	16.1	24.3
黑球溫度(°C)	20.6	2.7	15.7	24.8
平均輻射溫度(°C)	21.0	3.2	15.5	26.3
操作溫度(°C)	20.5	2.6	15.8	24.6
濕度比(Kg/Kg)	0.010	0.001	0.007	0.012
相對溼度(%)	64.5	6.4	51.4	74.1

圖 4-18 95/01 月份室內熱環境狀況

°C，平均值為 26.9°C，標準差為 5.5；操作溫度範圍約在 14.5~34.1°C，平均值為 26.5°C，標準差為 5.4；溼度比為 0.0041~0.0226Kg/Kg，平均值為 0.0148 Kg/Kg，標準差為 0.0045；相對溼度為 36.8~92.26%，平均值為 66.5%，標準差為 9.7。

由圖 4-13 中，八月份大部分的物測數據是落在 28.5~33.5°C To 的溫度範圍，其中 30.0~31.0°C To 的溫度範圍有最高的比例 (33%)。由圖 4-14 中，九月份大部分的物測數據是落在 29.5~33.5°C To 的溫度範圍，其中 31.0~32.0°C To 的溫度範圍有最高的比例 (33%)，九月份與八月份的物測數據分布相較，並無明顯的差別。由圖 4-15 中，十月份的物測數據是平均落在 25.5~32.5°C To 的溫度範圍，相較於八月份與九月份的物測數據分布，十月份量測得到的室內操作溫度涵蓋範圍較寬廣，溫度有逐漸下降的趨勢。由圖 4-16 中，十一月份大部分的物測數據是落在 25.5~29.5°C To 的溫度範圍，其中 28.0~29.0°C To 的溫度範圍有最高的比例 (31%)。由圖 4-17 中，十二月份的物測數據是平均落在 14.5~27.5°C To 的溫度範圍，相較於之前的月份，溫度範圍延伸至更低的溫度狀態。由圖 4-18 中，隔年一月份的物測數據已無超過 25°C To 以上，物測數據平均落在 15.5~24.5°C To 的溫度範圍。

第四節 衣著量統計

研究調查期間 2005 年的八月份至翌年的一月份，學生衣著量總和的範圍在 0.30~0.79clo 之間，平均值為 0.45clo，標準差為 0.18。其中八月份至十一月份學生穿著夏季制服期間，衣著量總和的範圍為 0.30~0.33clo，平均值為 0.31clo，標準差為 0.01。十二月份至翌年的一月份學生穿著冬季制服期間，衣著量總和的範圍為 0.55~0.79clo，平均值為 0.67clo，標準差為 0.06。

每個月學生穿衣情況如圖 4-19 的盒狀圖所示。圖中八月份、九月份與十月份學生穿著夏季制服期間，衣著量平均值分別為 0.32clo、0.31clo 與 0.32clo。八月份、九月份與十月份這三個月內學生衣著程度沒有明顯的變動。十一月份衣著量平均值為 0.38clo，衣著量最大值與最小值分別為 0.65clo 與 0.25clo。雖然十一月份學生仍穿著夏季制服，但是隨著氣候逐漸轉涼，學生添加了額外的保暖衣物。十二月份與隔年一月份衣著量平均值分別為 0.69clo 與 0.67clo，衣著量最大值分別為 0.79clo 與 0.77clo，衣著量最小值分別為 0.56clo 與 0.57clo。十二月份與隔年一月份學生穿著冬季制服期間，學生衣著程度隨著教室內溫度的上升或下降而減少或增加。

每個室內操作溫度頻度下的衣著量分布情形如圖 4-20 的盒狀圖所示。圖中顯示的數值為該溫度頻度下的衣著量平均值。圖中在 14.5~24.5°C To 的溫度範圍內，衣著量的平均值約在 0.59~0.77clo 的範圍

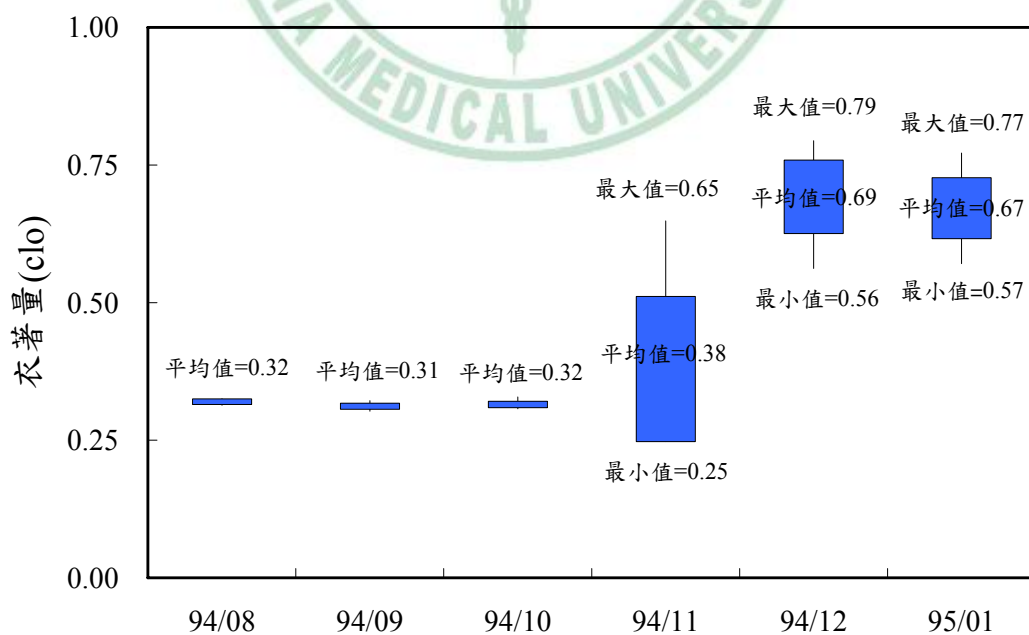


圖 4-19 每個月學生穿衣情況

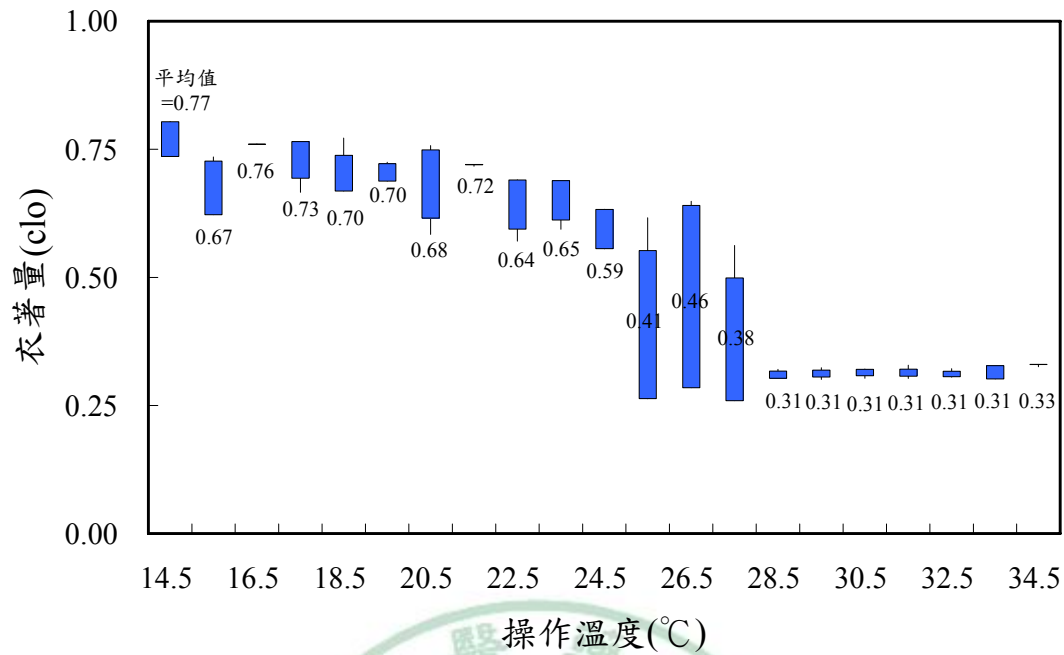


圖 4-20 每個室內操作溫度頻度下的衣著量分布情形

內變化。在 25.5~27.5°C 的溫度範圍內，衣著量的平均值約在 0.38~0.46clo。此操作溫度範圍內，衣著量的變動幅度最大，學生的穿著程度從最小值 0.30clo 到最大值 0.65clo 中分布。由 24.5°C 跨越至 25.5°C，隨著溫度的上升，衣著量有明顯下降的趨勢。在 28.5~34.5°C 的溫度範圍內，衣著量的平均值約在 0.33~0.31clo。此操作溫度範圍內，衣著量的變動幅度最小，幾乎沒有變化。由於學生的穿衣程度不能再減少，故維持最小的衣著量。

第五節 熱感覺的評估

問卷中第二部份詢問了學生對教室內熱舒適度的評估，熱舒適度包括熱感覺、熱喜好與熱接受度三種評估。學生的七個熱感覺尺度投票數彙整如表 4-6。其問卷投票數比例分布情形如圖 4-21 所示。分別為目前覺得冷的共有 72 票（2%）、覺得涼的共有 141 票（4%）、覺得微涼的共有 698 票（19%）、覺得剛好的共有 1,854 票（49%）、覺得微暖的共

表 4-6 學生的七個熱感覺尺度投票數

熱舒適度	熱感覺							合計
	冷	涼	微涼	剛好	微暖	暖	熱	
問卷數 (份)	72	141	698	1854	717	175	97	3754

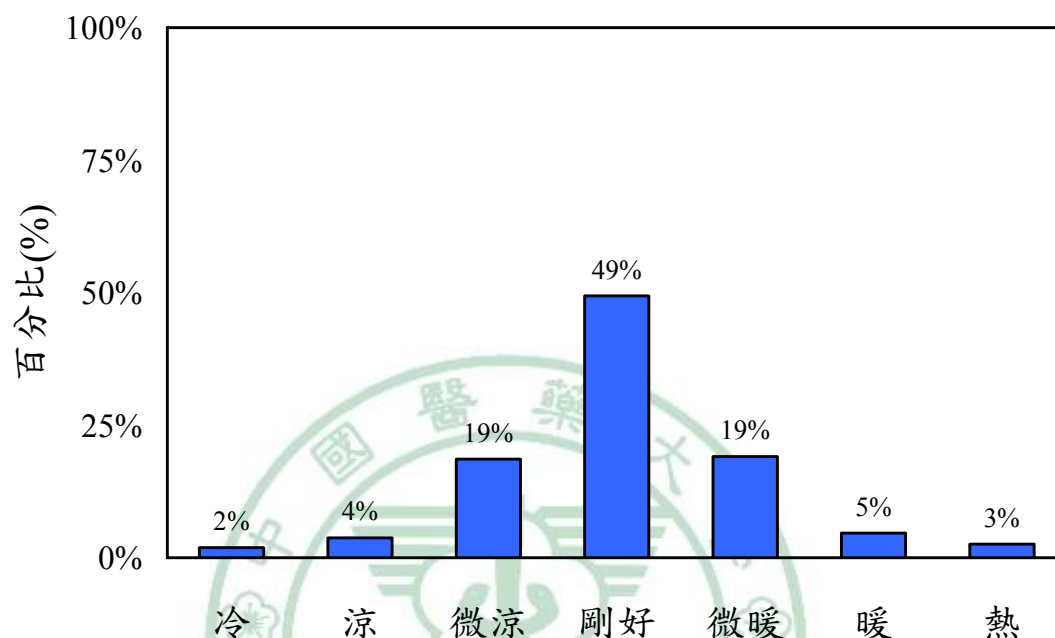


圖 4-21 學生的七個熱感覺尺度投票數百分比

有 717 票 (19%)、覺得暖 175 的共有票 (5%) 以及覺得熱 97 的共有票 (3%)。學生覺得目前教室熱環境剛好的比例最多，覺得冷與覺得熱的比例最少。

男生與女生在室內操作溫度下的分布情形如圖 4-22 所示。隨著溫度的上升，學生覺得熱的比例愈多；隨著溫度的下降，學生覺得冷的比例愈多。男生在 14~32°C To 時，覺得剛好的比例是最高；在 32~36°C To 時，覺得微暖的比例是最高。女生在 14~32°C To 時，覺得剛好的比例是最高；在 32~34°C To 時，覺得微暖的比例是最高；在 34~36°C To 時，覺得暖的比例是最高。

國中與國小在室內操作溫度下的分布情形如圖 4-23 所示。隨著溫度

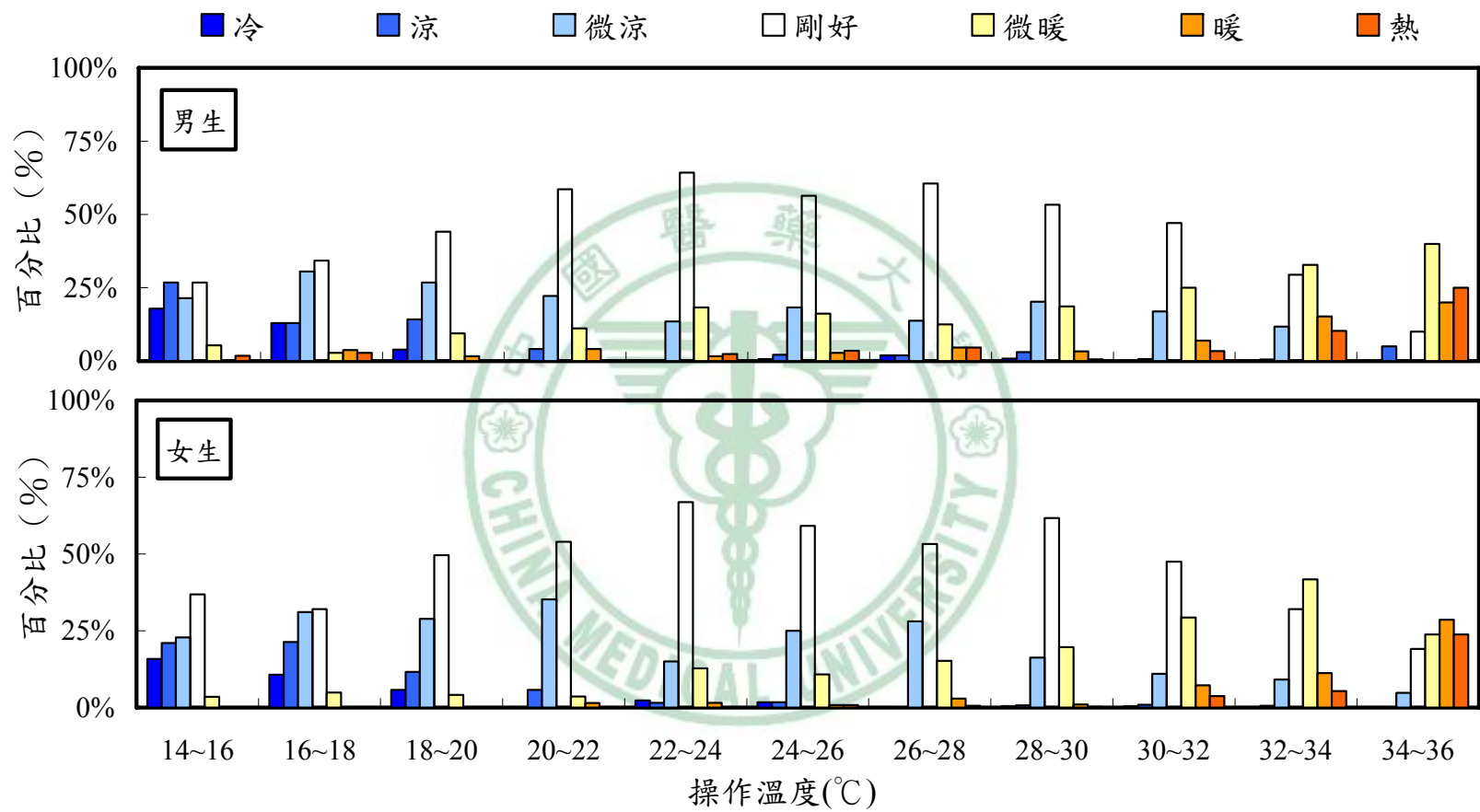


圖 4-22 男生與女生熱感覺問卷投票數比例分布

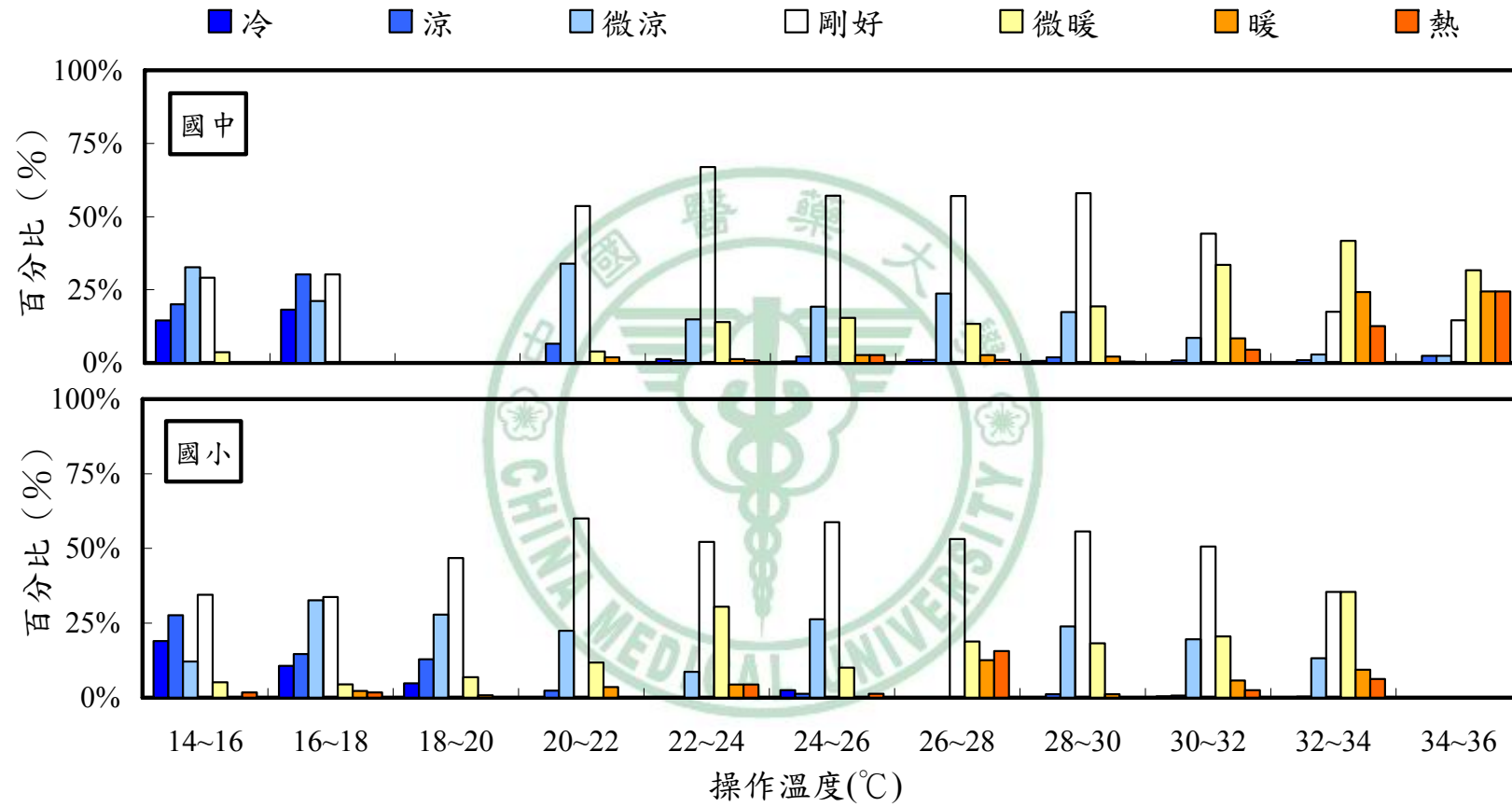


圖 4-23 國中與國小熱感覺問卷投票數比例分布

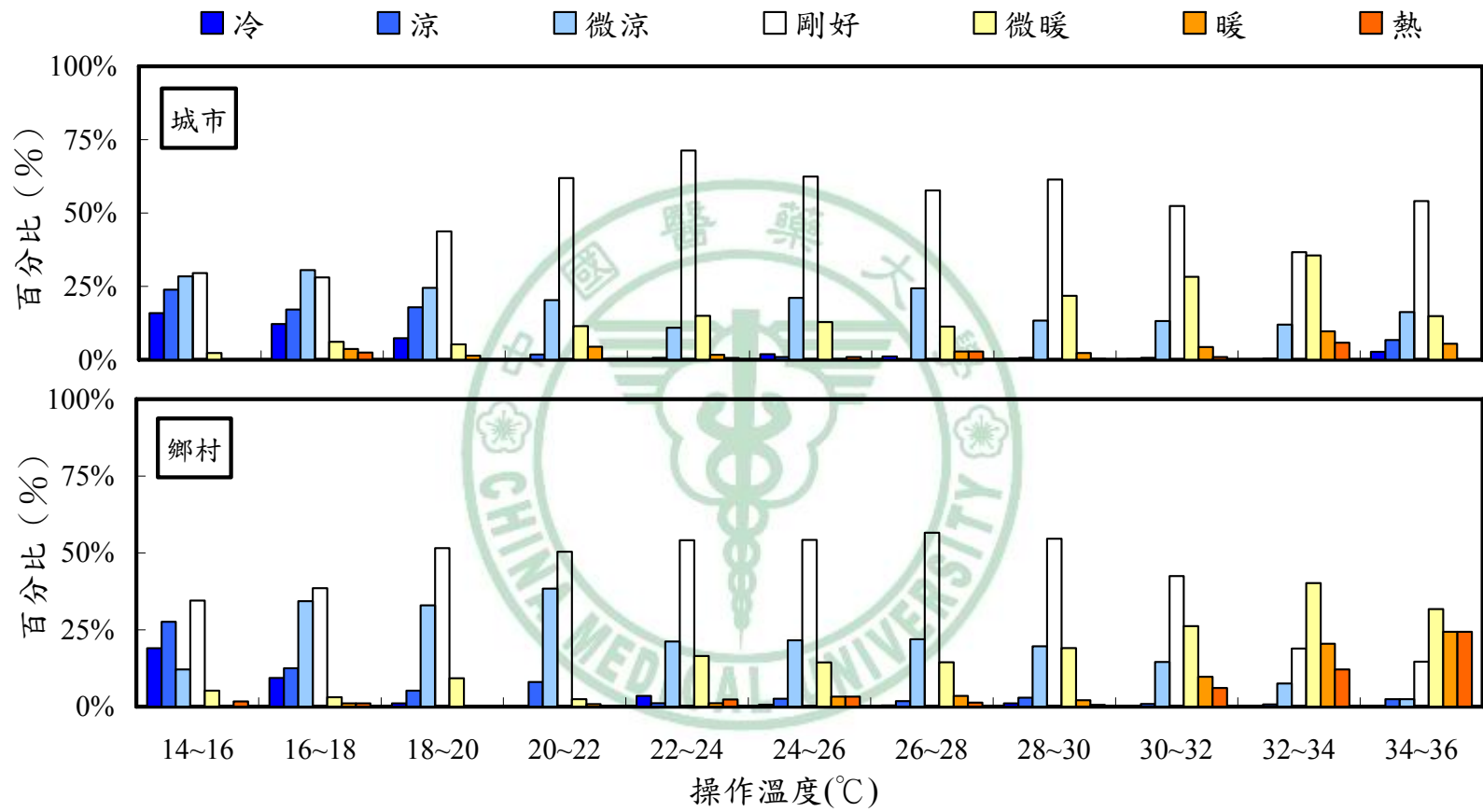


圖 4-24 城市與鄉村熱感覺問卷投票數比例分布

的上升，學生覺得熱的比例愈多；隨著溫度的下降，學生覺得冷的比例愈多。國中生在 14~16°C To 時，覺得微涼的比例是最高；在 16~32°C To 時，覺得剛好的比例是最高；在 32~36°C To 時，覺得微暖的比例是最高。國小生則是在每個操作溫度頻度內覺得剛好的比例都是最高的。

城市學生與鄉村學生在室內操作溫度下的分布情形如圖 4-24 所示。隨著溫度的上升，學生覺得熱的比例愈多；隨著溫度的下降，學生覺得冷的比例愈多。城市學生除了在 16~18°C To 時覺得微涼的比例是最高，其他操作溫度頻度內都是覺得剛好的比例是最高。鄉村學生除了在 32~36°C To 時覺得微暖的比例是最高，其他操作溫度頻度內都是覺得剛好的比例是最高。

進一步了解男生與女生、國中與國小或城市與鄉村之學生在室內操作溫度下的熱感覺分布情形，本文使用卡方齊一性檢定，來判斷每 2°C 頻

表 4-7 熱感覺卡方齊一性檢定結果

卡方 檢定	操作溫度 (°C)										
	14~16	16~18	18~20	20~22	22~24	24~26	26~28	28~30	30~32	32~34	34~36
性別											
χ^2 @	2.62	9.77	5.73	10.26	9.34	6.80	21.45	15.64	9.45	7.13	3.74
P 值	0.86	0.14	0.46	0.11	0.16	0.34	0.00*	0.02*	0.15	0.31	0.71
學校											
χ^2 @	7.81	9.39	0.00	10.31	8.91	7.33	41.09	3.66	42.30	33.55	0.00
P 值	0.25	0.15	1.00	0.11	0.18	0.29	0.00*	0.72	0.00*	0.00*	1.00
城鄉											
χ^2 @	7.29	5.34	17.4	22.87	14.93	7.68	6.07	11.98	31.54	23.41	46.18
P 值	0.30	0.50	0.01*	0.00*	0.02*	0.26	0.42	0.06	0.00*	0.00*	0.00*

@95%信賴水準的卡方值，在自由度等於 6 時，即 $\chi_{6,0.05}^2 = 12.59$ 。

*未達顯著水準，即 $\chi^2 > \chi_{6,0.05}^2 = 12.59$ 或 P 值 $< \alpha = 0.05$ ，表示該溫度頻度下的性別或學校比例分配並不一致。

度的室內操作溫度下男生與女生、國中與國小或城市與鄉村之學生的熱感覺分布是否相同。表 4-7 為卡方齊一性檢定的結果。除了在 26~28°C To 與 28~30°C To 男生與女生的感覺不同外，其餘的都表示相同。在 26~28°C To、30~32°C To 與 32~34°C To 的頻度下，國中與國小的感覺不同外，其餘的都表示相同。在 18~20°C To、20~22°C To、22~24°C To、30~32°C To、32~34°C To 以及 34~36°C To 的頻度下，城市與鄉村的感覺不同外，其餘的都表示相同。

第六節 熱喜好的評估

學生的三個熱喜好尺度投票數彙整如表 4-8。其問卷投票數比例分布情形如圖 4-25 所示。分別為希望調暖和的共有 747 票（20%）、不需要改變的共有 977 票（26%）與希望調涼爽的共有 2,030 票（54%）。學生覺得目前教室熱環境需要再涼爽一點的比例最多，需要再暖和一點的比例最少。

男生與女生在室內操作溫度下的分布情形如圖 4-26 所示。隨著溫度的上升，學生希望調涼爽的比例愈多；隨著溫度的下降，學生希望調暖和的比例愈多。男生在 14~20°C To 時，希望調暖和的比例是最高；在 20~36°C To 時，希望調涼爽的比例是最高。女生在 14~22°C To 時，希望調暖和的比例是最高；在 22~26°C To 時，不需要改變的比例是最高；在 26~36°C To 時，希望調涼爽的比例是最高。

國中與國小在室內操作溫度下的分布情形如圖 4-27 所示。隨著溫度的上升，學生希望調涼爽的比例愈多；隨著溫度的下降，學生希望調暖和的比例愈多。國中生在 14~22°C To 時，希望調暖和的比例是最高；在 22~26°C To 時，不需要改變的比例是最高；在 26~36°C To 時，希望調涼爽的比例是最高。國小生在 14~20°C To 時，希望調暖和的比例是最高；

表 4-8 學生的三個熱喜好尺度投票數

熱舒適度	熱喜好			合計
	希望調暖和	不調整	希望調涼爽	
問卷數 (份)	747	977	2030	3754

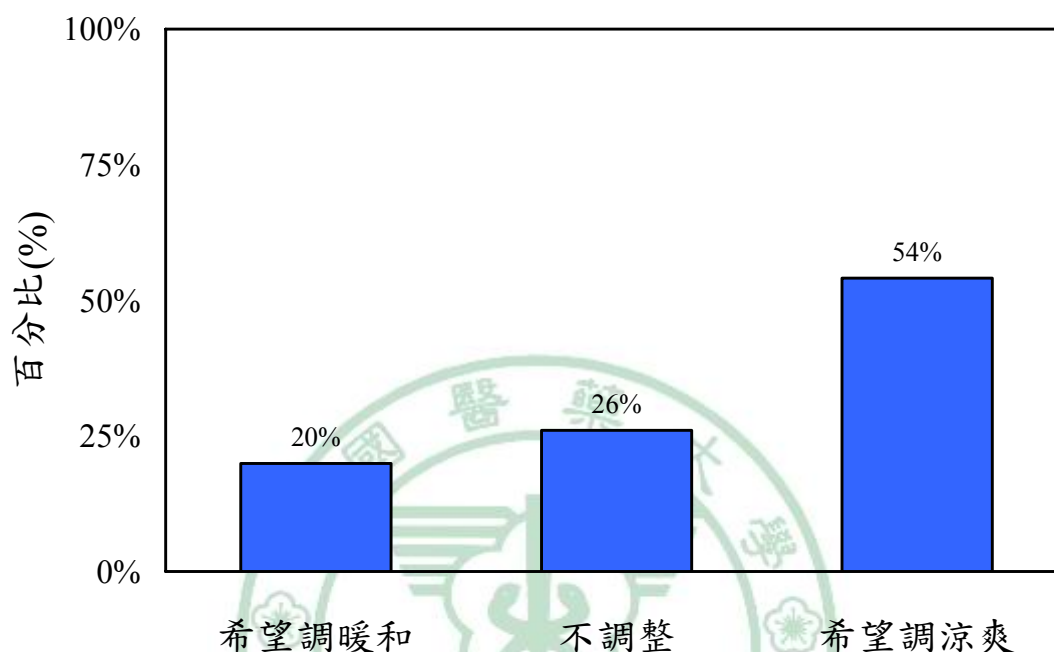


圖 4-25 學生的三個熱喜好尺度投票數百分比

在 20~34°C_{To} 時，希望調涼爽的比例是最高。

城市學生與鄉村學生在室內操作溫度下的分布情形如圖 4-28 所示。隨著溫度的上升，學生希望調涼爽的比例愈多；隨著溫度的下降，學生希望調暖和的比例愈多。城市學生在 14~20°C_{To} 時，希望調暖和的比例是最高；在 20~24°C_{To} 時，不需要改變的比例是最高；在 24~36°C_{To} 時，希望調涼爽的比例是最高。鄉村學生在 14~22°C_{To} 時，希望調暖和的比例是最高，以及除了在 24~26°C_{To} 時不需要改變的比例是最高外，其餘皆是希望調涼爽的比例是最高。

進一步了解男生與女生、國中與國小或城市與鄉村之學生在室內操作溫度下的熱喜好分布情形，本文使用卡方齊一性檢定，來判斷每 2°C 頻

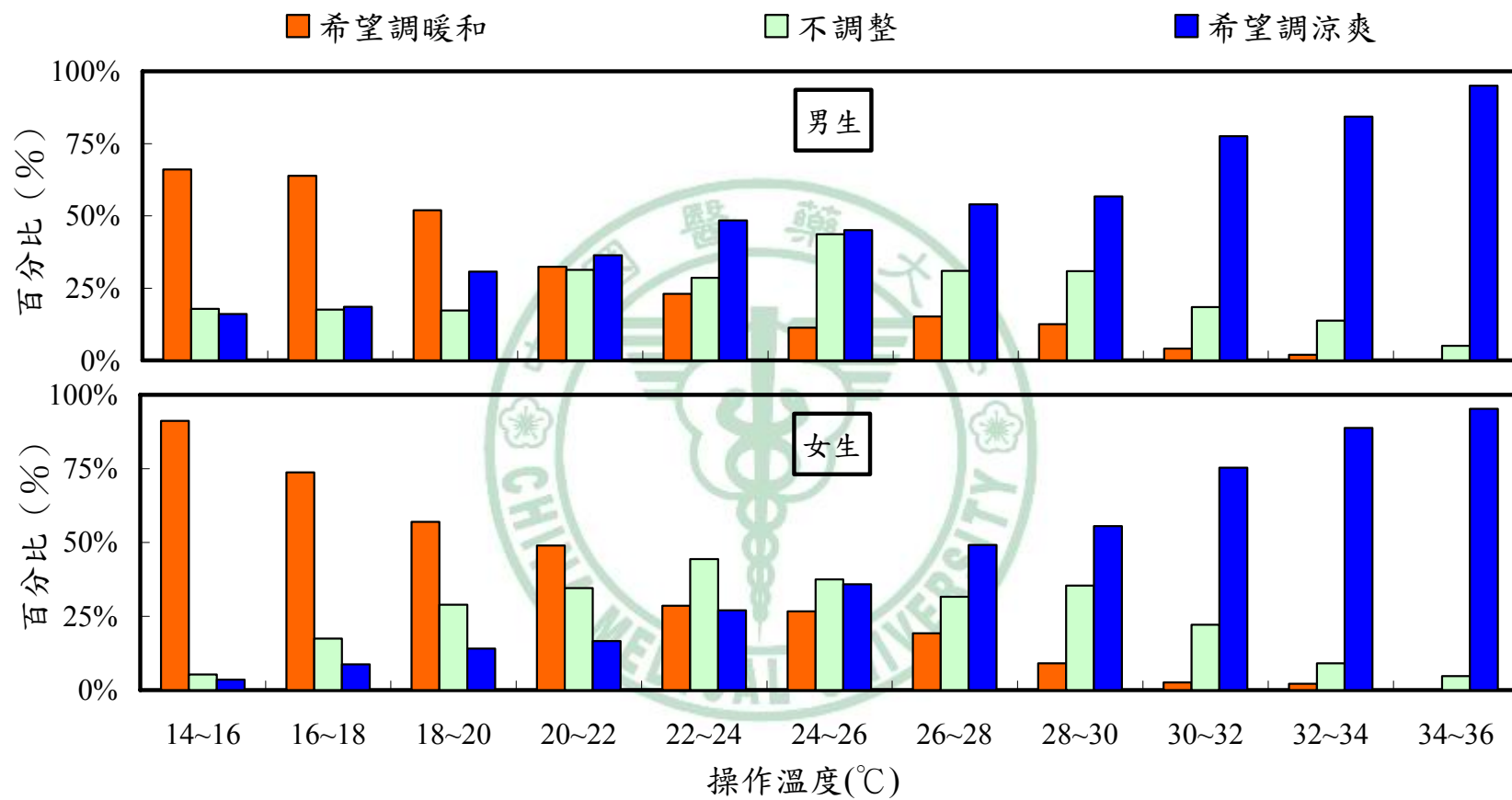


圖 4-26 男生與女生熱喜好問卷投票數比例分布

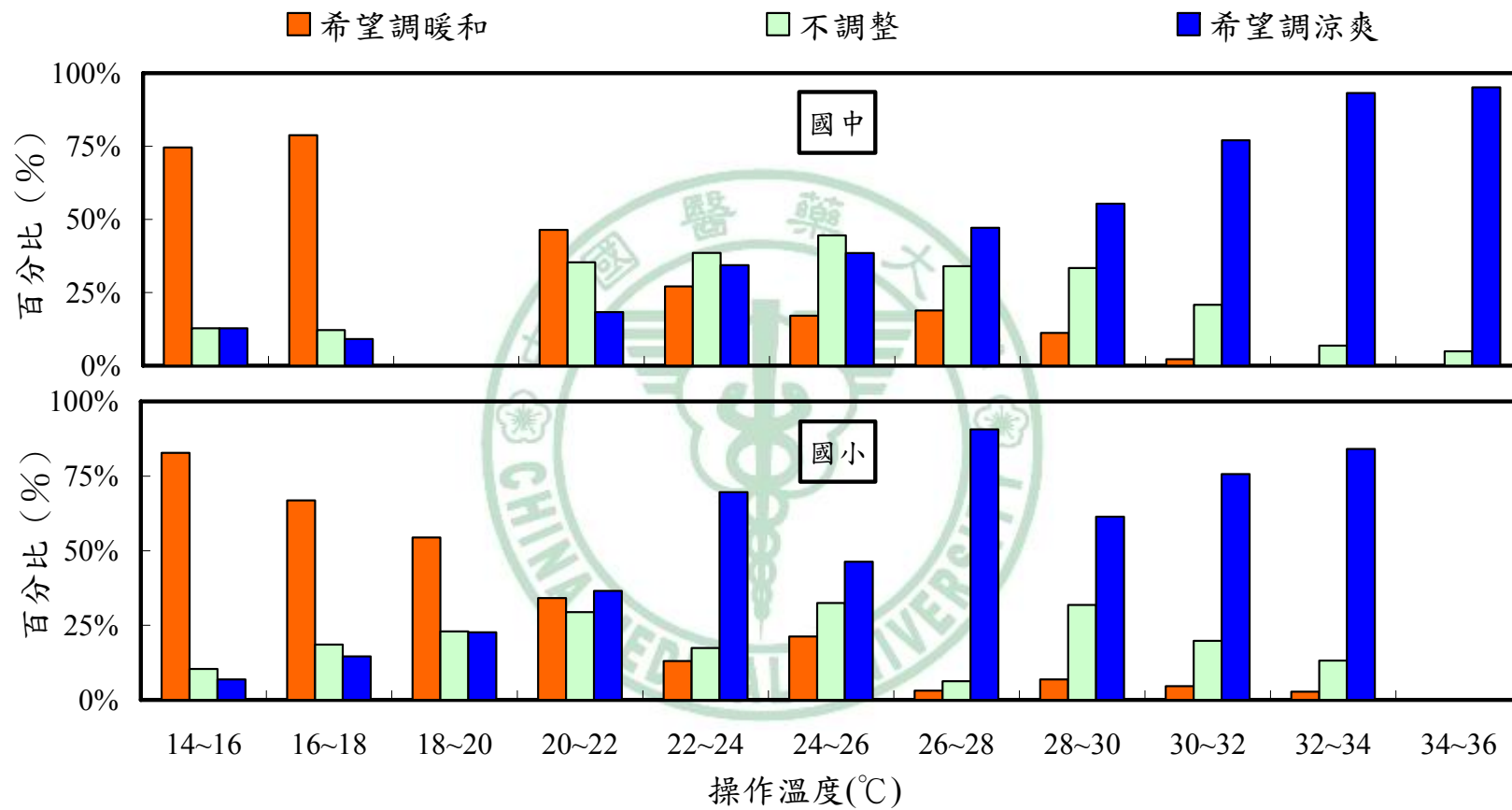


圖 4-27 國中與國小熱喜好問卷投票數比例分布

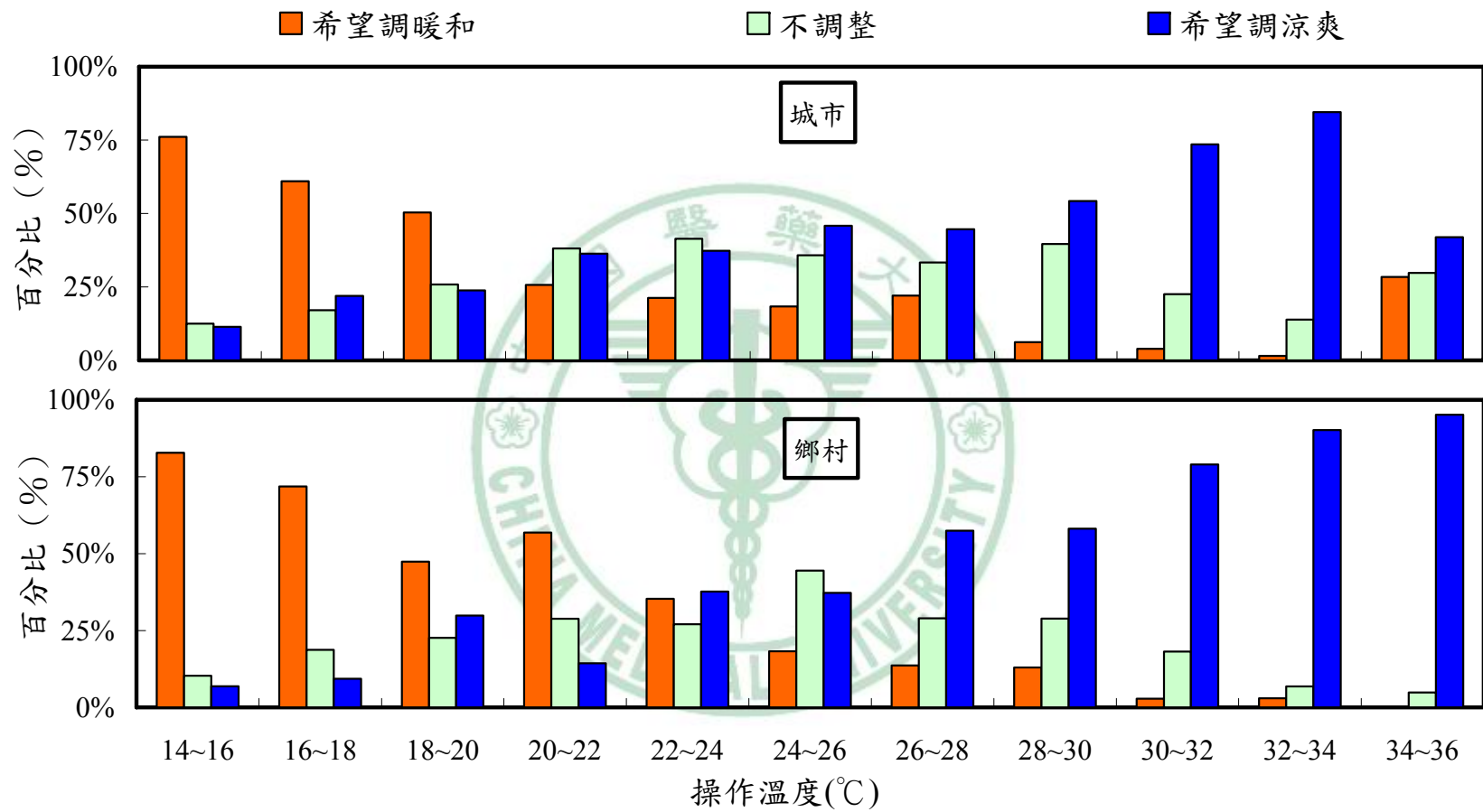


圖 4-28 城市與鄉村熱喜好問卷投票數比例分布

表 4-9 熱喜好卡方齊一性檢定結果

卡方檢定	操作溫度 (°C)										
	14~16	16~18	18~20	20~22	22~24	24~26	26~28	28~30	30~32	32~34	34~36
性別											
χ^2 @	10.74	4.42	11.54	13.13	13.04	10.38	1.18	3.31	2.99	2.06	0.00
P 值	0.01*	0.11	0.00*	0.00*	0.00*	0.01*	0.55	0.19	0.23	0.36	1.00
學校											
χ^2 @	1.37	1.85	0.00	9.81	11.12	3.33	21.89	1.95	4.24	6.30	0.00
P 值	0.51	0.40	1.00	0.01*	0.00*	0.19	0.00*	0.38	0.12	0.04*	1.00
城鄉											
χ^2 @	1.06	5.47	1.17	26.69	7.54	2.33	7.89	14.17	3.74	5.07	31.72
P 值	0.59	0.07	0.56	0.00*	0.02*	0.31	0.02*	0.00*	0.15	0.08	0.00*

@95%信賴水準的卡方值，在自由度等於2時，即 $\chi_{2,0.05}^2=5.99$ 。

*未達顯著水準，即 $\chi^2 > \chi_{2,0.05}^2=5.99$ 或 P 值 $< \alpha=0.05$ ，表示該溫度頻度下的性別或學校比例分配並不一致。

度的室內操作溫度下男生與女生、國中與國小或城市與鄉村之學生的熱喜好分布是否相同。表 4-9 為卡方齊一性檢定的結果。在 14~16°C To、18~20°C To、20~22°C To、22~24°C To 與 24~26°C To 的頻度下，男生與女生的感覺不同外，其餘的都表示相同。在 20~22°C To、22~24°C To、26~28°C To 與 32~34°C To 的頻度下，國中與國小的感覺不同外，其餘的都表示相同。在 20~22°C To、22~24°C To、26~28°C To、28~30°C To 以及 34~36°C To 的頻度下，城市與鄉村的感覺不同外，其餘的都表示相同。

第七節 熱接受的評估

學生的兩個熱接受尺度投票數彙整如表 4-10。其問卷投票數比例分布情形如圖 4-29 所示。分別為接受的共有 3,156 票 (84%) 與不接受的共有 598 票 (16%)。大部分的學生都認為目前教室熱環境是可以接受

表 4-10 學生的兩個熱接受尺度投票數

熱舒適度	熱接受		合計
	接受	不接受	
問卷數 (份)	3156	598	3754

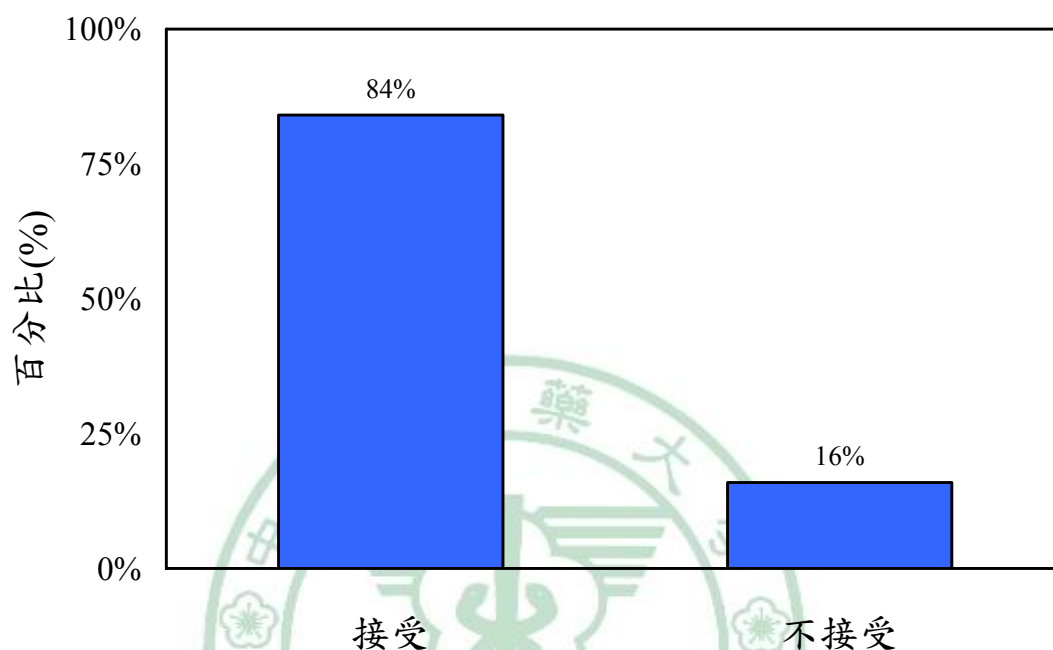


圖 4-29 學生的兩個熱接受尺度投票數百分比

的。性別、學校以及城鄉之學生在室內操作溫度下的分布情形分別如圖 4-30、圖 4-31 以及圖 4-32 所示。隨著溫度上升的愈高或溫度下降的愈低，學生認為目前教室熱環境是不接受的比例就愈多，但是不接受的比例都不會超過 50%。男生、女生、國中生以及鄉村學生的比例分配，在溫度愈高時的不接受度比例皆明顯高於在溫度愈低時的不接受度比例。

進一步了解男生與女生、國中與國小或城市與鄉村之學生在室內操作溫度下的熱接受分布情形，本文使用卡方齊一性檢定，來判斷每 2°C 頻度的室內操作溫度下男生與女生、國中與國小或城市與鄉村之學生的熱接受分布是否相同。

表 4-11 為卡方齊一性檢定的結果。在 24~26°C_{To} 與 28~30°C_{To} 的頻

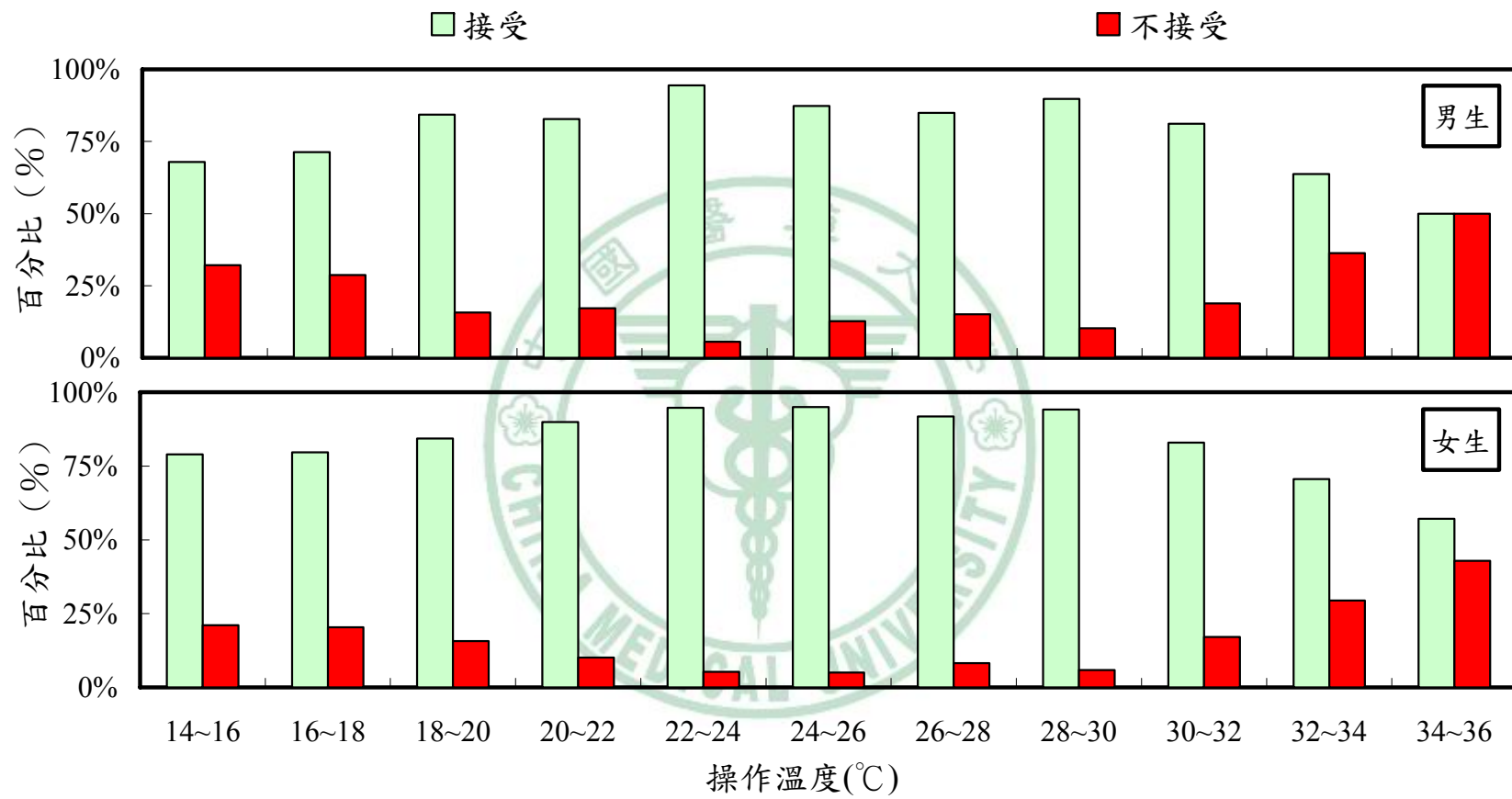


圖 4-30 男生與女生熱接受問卷投票數比例分布

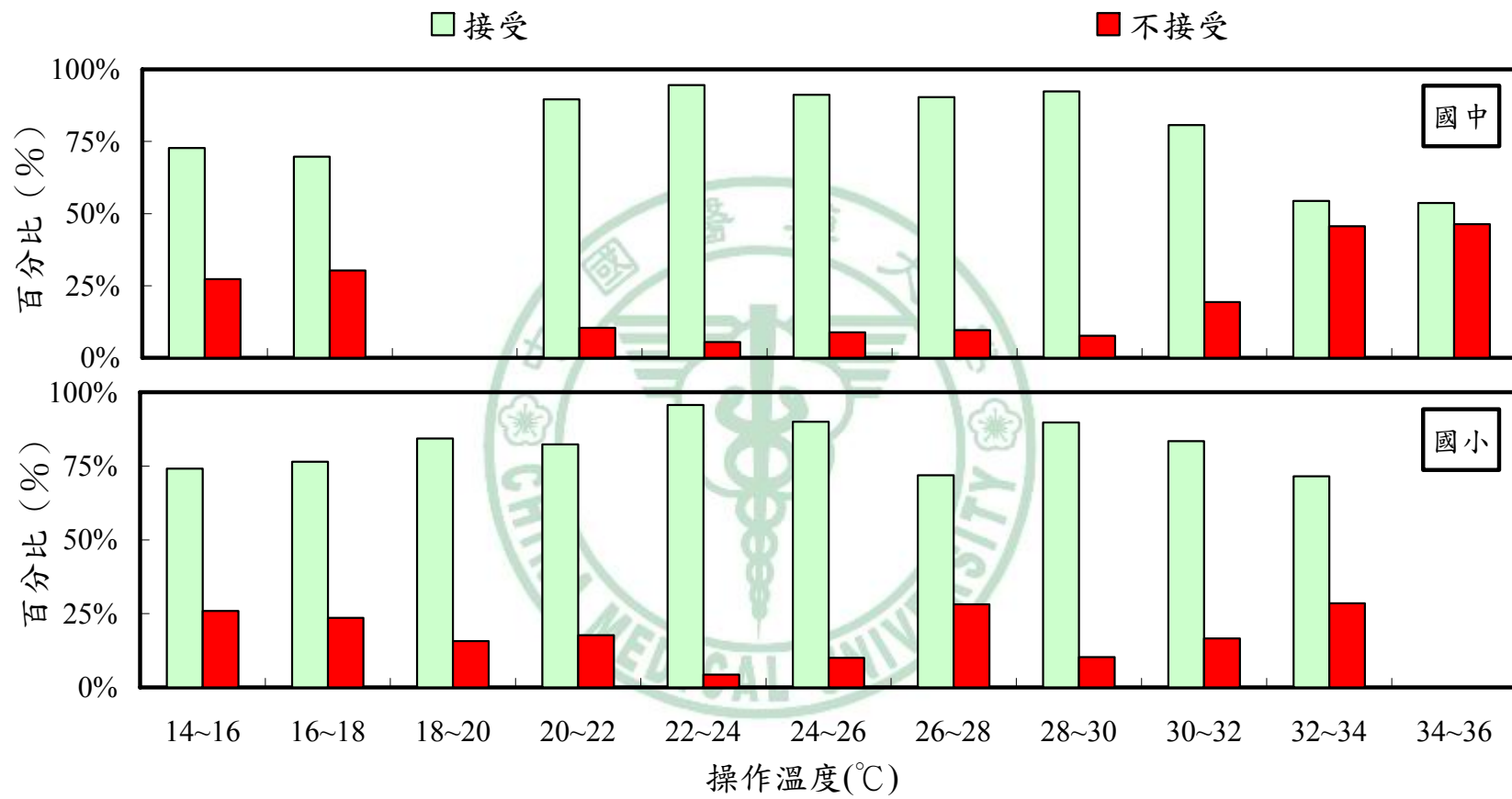


圖 4-31 國中與國小熱接受問卷投票數比例分布

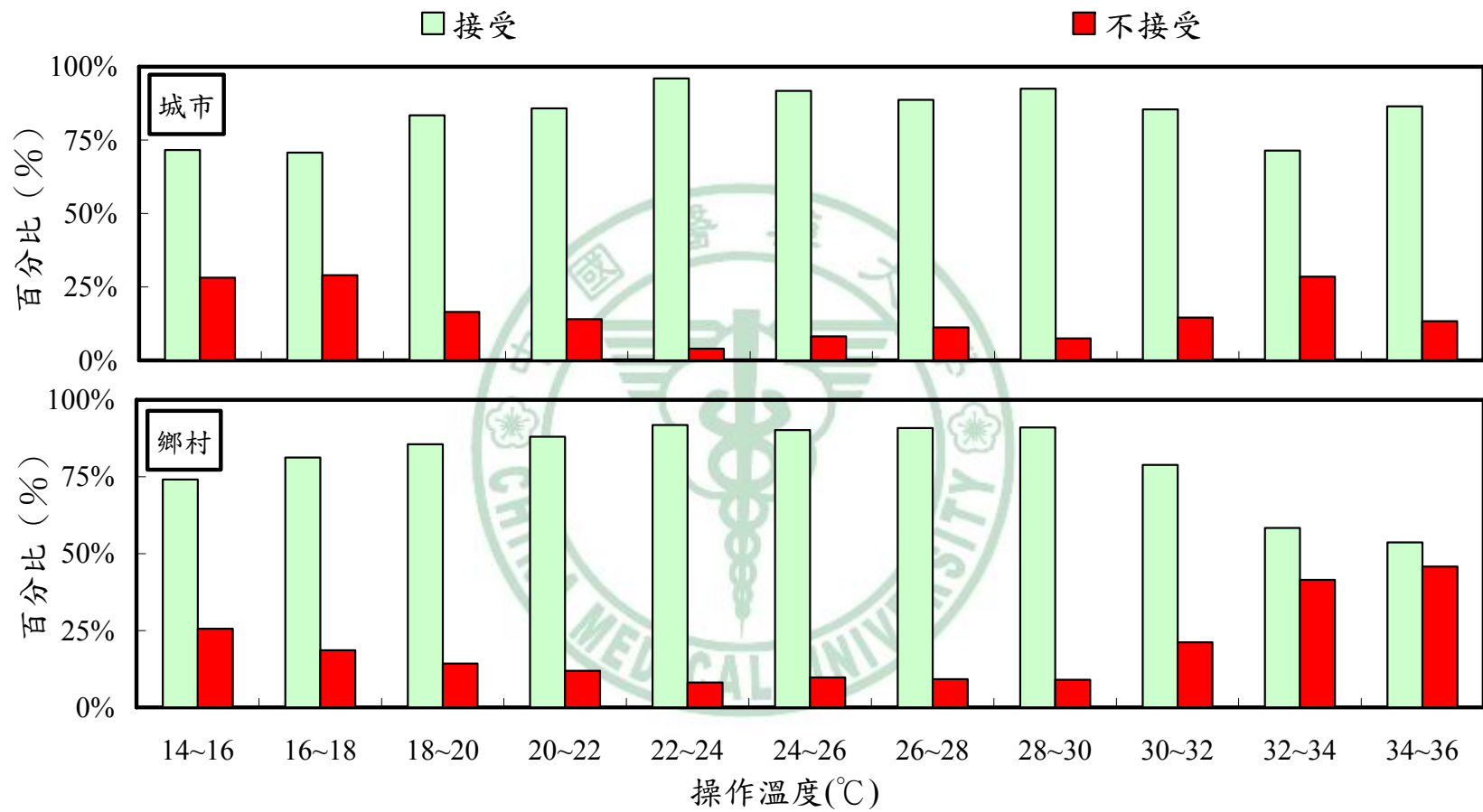


圖 4-32 城市與鄉村熱接受問卷投票數比例分布

表 4-11 熱接受卡方齊一性檢定結果

卡方 檢定	操作溫度 (°C)										
	14~16	16~18	18~20	20~22	22~24	24~26	26~28	28~30	30~32	32~34	34~36
性別											
$\chi^2 @$	1.78	1.96	0.00	2.57	0.01	4.61	3.83	5.01	0.52	2.08	0.21
P 值	0.18	0.16	0.99	0.11	0.92	0.03*	0.05	0.03*	0.47	0.15	0.65
學校											
$\chi^2 @$	0.03	0.67	0.00	2.49	0.06	0.10	9.73	0.70	1.16	10.10	0.00
P 值	0.87	0.41	1.00	0.11	0.81	0.76	0.00*	0.40	0.28	0.00*	1.00
城鄉											
$\chi^2 @$	0.11	2.71	0.20	0.24	1.98	0.18	0.48	0.53	6.72	6.78	15.08
P 值	0.74	0.10	0.65	0.62	0.16	0.67	0.49	0.46	0.01*	0.01*	0.00*

@95%信賴水準的卡方值，在自由度等於1時，即 $\chi_{1,0.05}^2 = 3.84$ 。

*未達顯著水準，即 $\chi^2 > \chi_{1,0.05}^2 = 3.84$ 或 P 值 $< \alpha = 0.05$ ，表示該溫度頻度下的性別或學校比例分配並不一致。

度下，男生與女生的感覺不同外，其餘的都表示相同。在 26~28°C To 與 32~34°C To 的感覺不同外，其餘的都表示相同。在 30~32°C To、32~34°C To 以及 34~36°C To 的頻度下，城市與鄉村的感覺不同外，其餘的都表示相同。

第八節 小節

將性別、學校以及城鄉的影響，對於教室環境內各種溫度下舒適指標的感覺程度相同與否彙整如表 4-12 所示。發現在舒適溫度區域的熱感覺指標感覺程度，除了城鄉差異所造成的感覺並無明顯不同外，在性別與學校間的感覺程度有所不同。在舒適溫度區域的熱喜好指標感覺程度，性別、學校以及城鄉間皆有不一樣的感覺程度。在舒適溫度區域的熱接受指標感覺程度，除了城鄉差異所造成的感覺並無明顯不同外，在

性別與學校間的感覺程度有所不同。

由於本研究要探討學生的最佳舒適溫度範圍，在適溫區的三種舒適指標感覺程度，其中除了熱感覺與熱接受指標的城鄉差異不會有所影響外，其餘的影響都會導致感覺不同，故進一步探討性別與學校間的差異情形。

表 4-12 舒適指標的感覺程度彙整

舒適指標	類別	感覺是否相同		
		低溫區	適溫區	高溫區
熱感覺	性別	同	不同	同
	學校	同	不同	不同
	城鄉	不同	同	不同
熱喜好	性別	不同	不同	同
	學校	同	不同	不同
	城鄉	不同	不同	不同
熱接受	性別	同	不同	同
	學校	同	不同	不同
	城鄉	同	同	不同

第五章 討論

第一節 熱敏感度分析

熱敏感度分析可以用來解釋室內居住者對其所處環境條件的熱敏感性。使用平均熱感尺度與室內操作溫度的線性迴歸線可以了解學生對教室內溫度的敏感度，其中為了避免極端投票值的個別影響差異，使用操作溫度的頻度是以每 0.5°C 為原則，將其溫度範圍內的所有熱感覺投票數作平均。表5-1是物測數據與問卷中熱感覺尺度的統計表，表中所示的操作溫度為該頻度內測得室內操作溫度之平均值，而各熱感覺投票數則是該頻度內的總數，其中平均熱感尺度是根據熱感覺七個等級尺度給予的總數，所計算出來的加權平均數。

探討學生的熱敏感度分析時，發現室內操作溫度在高溫區、低溫區以及介於兩者之間的中溫區各自和平均熱感尺度有明顯的線性關係。導致此結果的主要因素是學生依季節穿著學校規定制服所影響。當教室內溫度落在高溫區時，學生大部分穿著夏季制服；教室內溫度落在低溫區時，學生大部分穿著冬季制服；當教室內溫度落在介於兩者之間的中溫區時，學生無論穿著夏季制服或冬季制服，對教室內操作溫度的感受性都很平穩。本文特地將室內操作溫度畫分成高溫區、中溫區以及低溫區三大區塊，分別討論學生所處環境條件下的敏感性。

圖5-1顯示在不同室內操作溫度下，全部學生在高溫區、中溫區以及低溫區之平均熱感尺度的線性迴歸線，三個區域的線性迴歸方程式分別如下：

$$\text{高溫區: } \text{MTSV} = 0.26T_o - 7.60, R^2 = 0.91 \quad (5-1)$$

$$\text{中溫區: } \text{MTSV} = 0.31 - 0.01T_o, R^2 = 0.01 \quad (5-2)$$

$$\text{低溫區: } \text{MTSV} = 0.16T_o - 3.63, R^2 = 0.79 \quad (5-3)$$

表 5-1 物測數據與問卷中熱感覺尺度的統計表

To	MTSV	問卷數	熱感覺						
			冷	涼	微涼	剛好	微暖	暖	熱
14.7	-1.14	58	11	16	7	20	3	0	1
15.9	-1.22	88	14	21	25	26	2	0	0
16.5	-0.93	27	4	4	12	3	2	1	1
17.2	-0.64	120	9	17	34	49	6	3	2
17.6	-1.29	31	6	5	12	8	0	0	0
18.2	-0.90	118	10	23	36	43	6	0	0
18.7	-0.47	47	0	4	17	23	3	0	0
19.1	-0.62	26	2	4	6	11	2	1	0
19.7	-0.07	57	0	1	10	39	6	1	0
20.2	-0.28	163	0	8	52	85	14	4	0
20.8	-0.10	29	0	0	6	21	1	1	0
21.8	-0.39	46	0	4	13	27	1	1	0
22.2	-0.01	139	3	1	26	81	23	2	3
23.1	0.01	87	0	1	8	67	11	0	0
23.6	0.21	33	0	0	3	22	6	2	0
24.7	0.06	62	1	0	7	42	11	0	1
25.2	-0.02	142	1	5	38	65	23	5	5
25.8	-0.21	58	1	0	11	44	2	0	0
26.4	-0.09	32	0	0	7	21	4	0	0
26.7	0.09	117	1	0	27	62	17	7	3
27.4	0.91	32	0	0	0	17	6	4	5
27.8	-0.19	224	2	4	59	131	26	2	0
28.3	-0.40	78	3	7	16	44	8	0	0
28.8	-0.03	226	0	4	42	145	28	6	1
29.3	0.10	208	2	1	34	114	52	4	1
29.7	0.23	173	0	1	23	92	51	5	1
30.2	0.09	246	0	3	53	125	50	14	1
30.7	0.36	92	0	0	10	47	29	4	2
31.3	0.32	385	1	1	46	201	106	20	10
31.7	0.81	178	1	3	16	53	60	26	19
32.2	0.59	128	0	1	17	43	48	10	9
32.7	0.69	182	0	0	19	60	71	22	10
33.1	1.17	81	0	1	5	17	26	20	12
34.1	1.46	41	0	1	1	6	13	10	10

全部學生熱敏感度分析的線性迴歸方程式在高溫區、中溫區以及低溫區的斜率分別為0.26、-0.01與0.16。高溫區的斜率最大，表示在高溫區的範圍內學生的平均熱感尺度變化量最大、靈敏度最高，反之在中溫區的範圍內學生的平均熱感尺度變化量最小、反應最平穩。

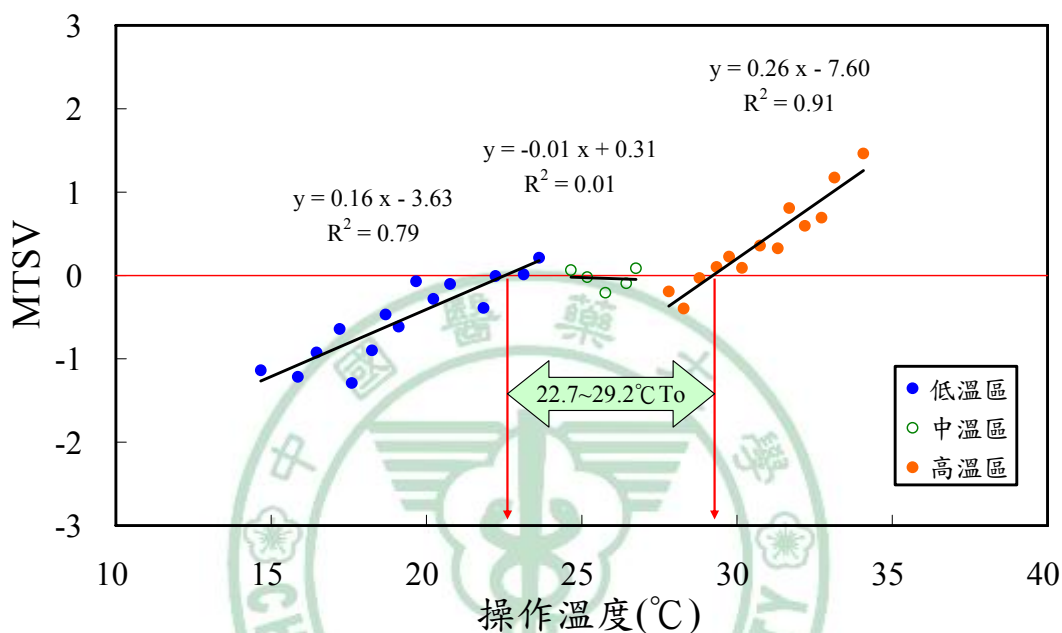


圖 5-1 全部學生的熱敏感度分析

圖5-2至圖5-5分別是男生、女生、國中生以及國小生的熱敏感度分析結果。其中除了國小生熱敏感度分析的線性迴歸方程式在低溫區時斜率（0.22）略大於在高溫區時斜率（0.20），表示國小生在低溫區範圍內的平均熱感尺度變化量與靈敏度略大於在高溫區範圍內，其餘的則是對於高溫區範圍內的平均熱感尺度有最大的變化量與最高的靈敏度。

大部分的學生在低溫區範圍內的平均熱感尺度變化量與靈敏度較在高溫區範圍內來得遲鈍的原因，主要是在低溫區時，學生大部分穿著冬季制服，即自由調整衣著量可以使室內操作溫度的變化量較學生大部分穿著夏季制服的高溫區時緩和。

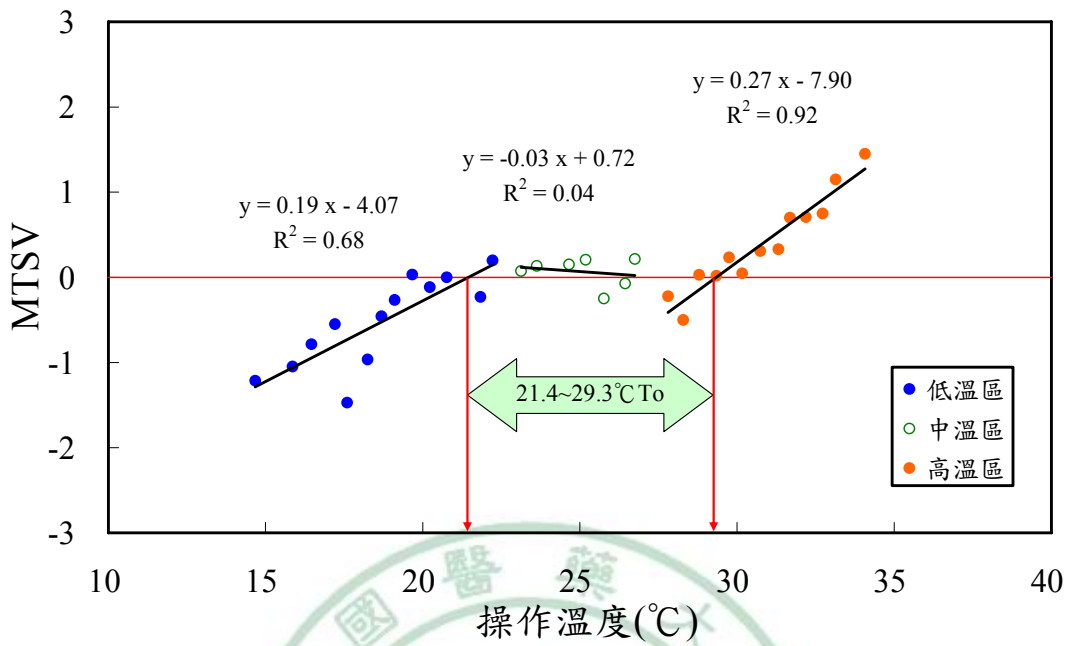


圖 5-2 男生的熱敏感度分析

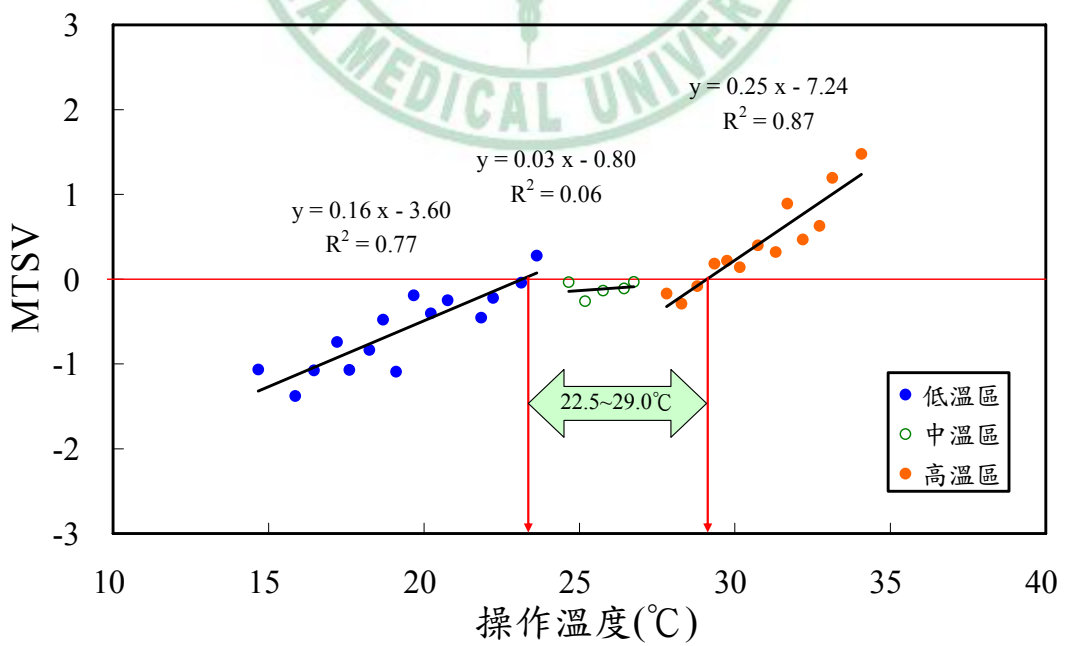


圖 5-3 女生的熱敏感度分析

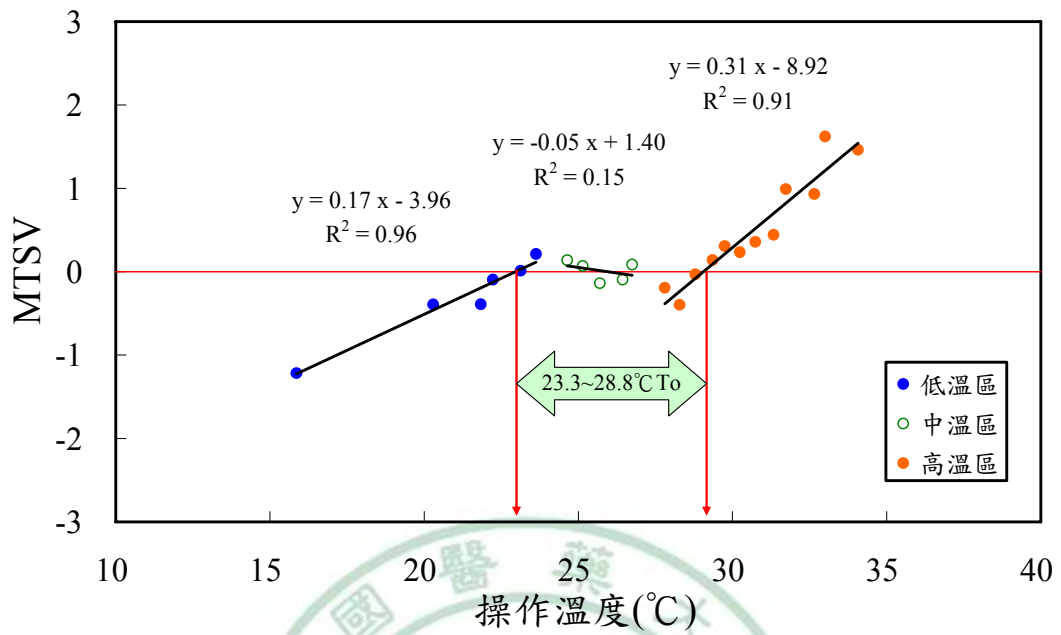


圖 5-4 國中的熱敏感度分析

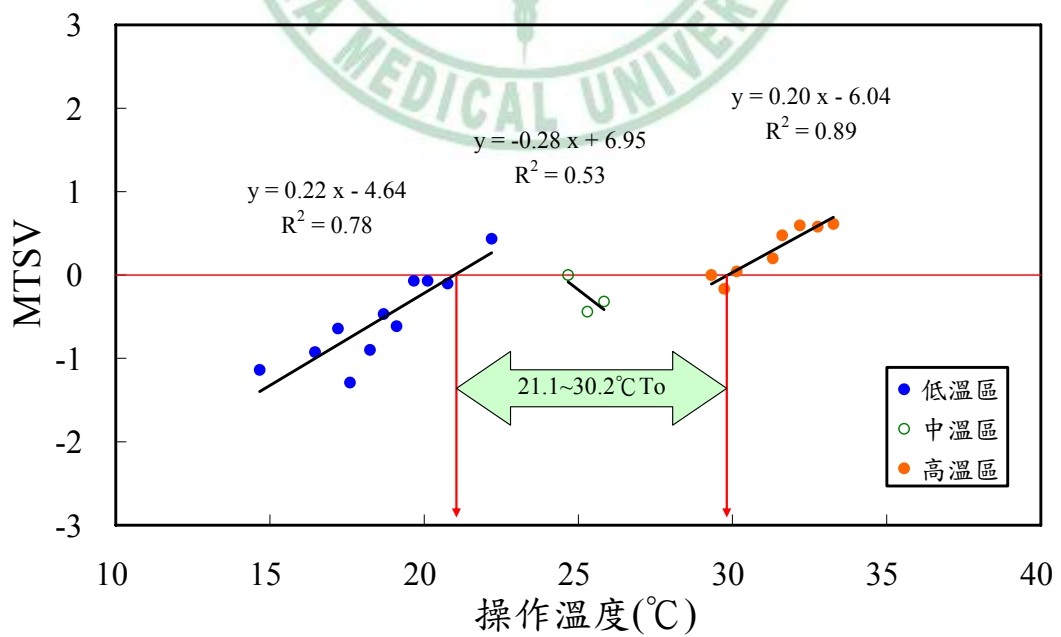


圖 5-5 國小的熱敏感度分析

透過當高溫區與低溫區的平均熱感尺度為零時，分別對應的室內操作溫度為溫度上限與下限，即是學生認為在教室內熱敏感度最平穩的溫度範圍。由圖5-1所示，全部學生熱敏感度最平穩的溫度範圍為22.7~29.2°C To。圖5-2至圖5-5分別標明了男生、女生、國中生以及國小生在教室內熱敏感度最平穩的溫度範圍，分別為21.4~29.3°C To、22.5~29.0°C To、23.3~28.8°C To以及21.1~30.2°C To。

男生、女生、國中生、國小生以及全部學生之熱敏感度分析的線性迴歸方程式與熱敏感度最平穩的溫度範圍彙整如表5-2所示。

表5-2 熱敏感度分析結果

類別	平穩區溫度範圍	線性迴歸方程式			
		區域	斜率	截距	判定係數 (R ²)
全部	22.7~29.2°C To	高溫區	0.26	-7.60	0.91
		中溫區	-0.01	0.31	0.01
		低溫區	0.16	-3.63	0.79
男生	21.4~29.3°C To	高溫區	0.27	-7.90	0.92
		中溫區	-0.03	0.72	0.04
		低溫區	0.19	-4.07	0.69
女生	22.5~29.0°C To	高溫區	0.25	-7.24	0.87
		中溫區	0.03	-0.80	0.06
		低溫區	0.16	-3.60	0.77
國中	23.3~28.8°C To	高溫區	0.31	-8.92	0.91
		中溫區	-0.05	1.40	0.15
		低溫區	0.17	-3.96	0.96
國小	21.1~30.2°C To	高溫區	0.20	-6.04	0.89
		中溫區	-0.28	6.95	0.53
		低溫區	0.22	-4.64	0.78

第二節 中性溫度與喜好溫度

中性溫度的解釋是有最多受訪者會投熱中性（熱感覺尺度的中間點）所對應的溫度。本文使用了機率回歸分析的統計方法來求得中性溫度。受訪者會投熱中性所對應的溫度為連續的隨機變數，表示大多的溫度會集中於平均數的兩邊，其次數分配曲線呈鐘形狀，並且其數值絕大部分聚集在離平均數三個標準差內（ $P(\mu-3\sigma) < x < P(\mu+3\sigma)$ ， x =變數； P =機率； μ =平均值； σ =標準差。），故此溫度為常態隨機變數，其分配為常態分配（The Normal Distribution）。

將表5-1中間卷受訪者的熱感覺尺度分成回答熱（3）、暖（2）、微暖（1）的所有投票數以及中性（0）的一半投票數視為“覺得暖和群”，而剩下的投票數則視為“覺得涼爽群”，藉由常態分配的累加機率函數公式（如公式5-4），可以找出適合室內操作溫度的累積機率分布曲線。

$$F(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f(x)dx \quad (5-4)$$

累積機率分布曲線50%所對應的室內操作溫度，即是常態分配曲線中間點或最高點所對應的室內操作溫度，亦即有最多受訪者會投熱中性所對應的溫度，意指中性溫度。

如圖5-6所示，全部學生所認為的中性溫度為圖中對應於累積機率50%的25.6°C To。以此類推，男生、女生、國中生、國小生、夏季以及冬季機率回歸分析求得的中性溫度如圖5-7至圖5-12所示，分別為25.3°C To、25.9°C To、26.0°C To、26.1°C To、29.4°C To以及21.5°C To。其中除了在夏季與冬季找出的中性溫度較其他溫度來的偏高與偏低外，其餘求得的中性溫度都相當接近。

夏季與冬季的中性溫度有明顯的差異，肇因於學生衣著量的不同。

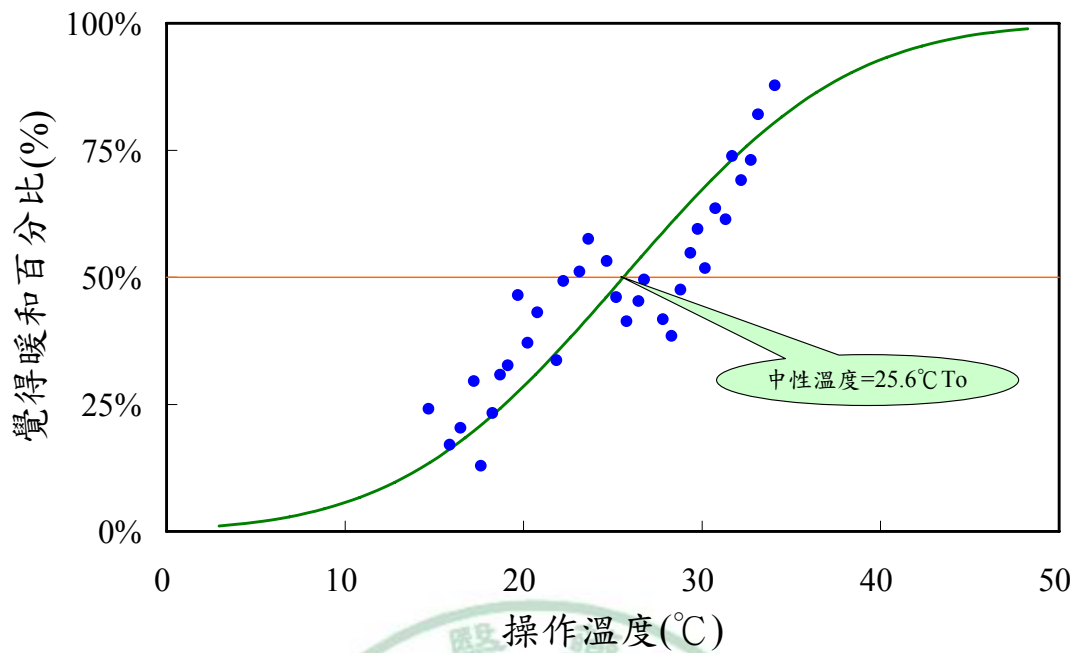


圖 5-6 全部學生的中性溫度

當學生穿著夏季制服時，因為衣著量較少所以可以容忍較高的溫度，學生會投熱中性所對應的溫度也自然較高，反之當學生穿著冬季制服時，求得的中性溫度較低。

ASHRAE Standard 55所建議的中性溫度，可以利用外氣乾球溫度代入其自然通風環境熱舒適範圍公式所得到的最佳室內操作溫度。本文以學生穿著夏季制服期間(五月份至十一月份)、學生穿著冬季制服期間(十二月份至次年四月份)以及全年的外氣乾球溫度平均值分別代入自然通風環境熱舒適範圍公式，求得ASHRAE Standard 55所建議的夏季、冬季以及全年中性溫度分別為 27.6°C To 、 22.5°C To 以及 25.2°C To 。

ASHRAE Standard 55所建議的全年中性溫度與現場實測全部學生的中性溫度相當。但是其所建議的夏季中性溫度較現場實測來的低，是由於學生在穿著夏季制服時，隨著溫度的上升，衣著量減少至最低狀態，可以容忍較高的溫度。冬季中性溫度較現場實測來的高，是由於學生在

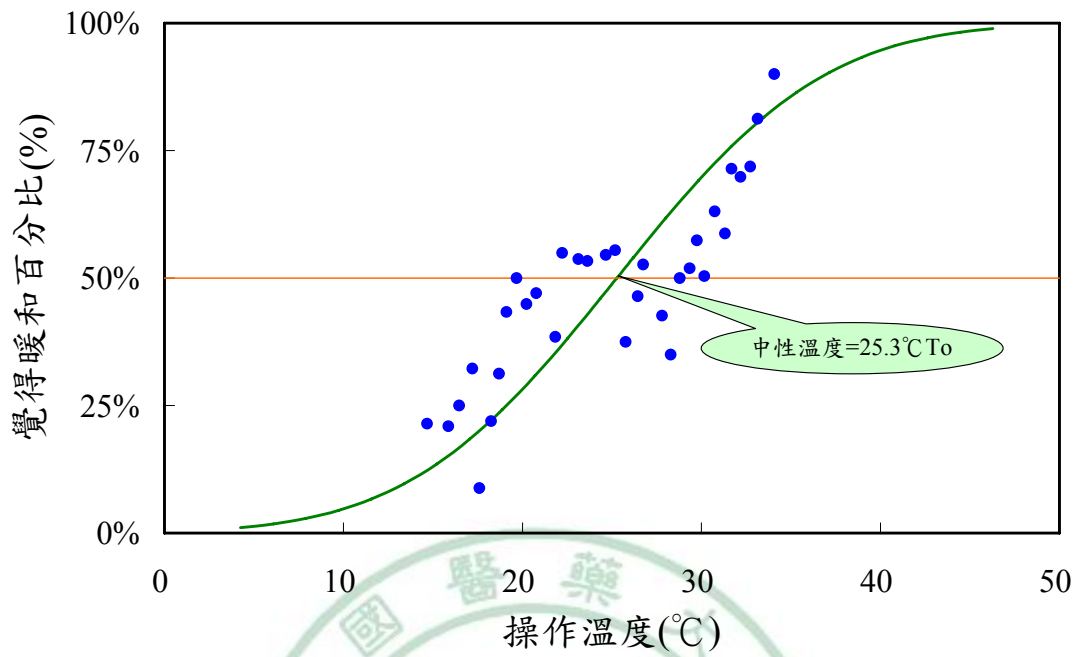


圖 5-7 男生的中性溫度

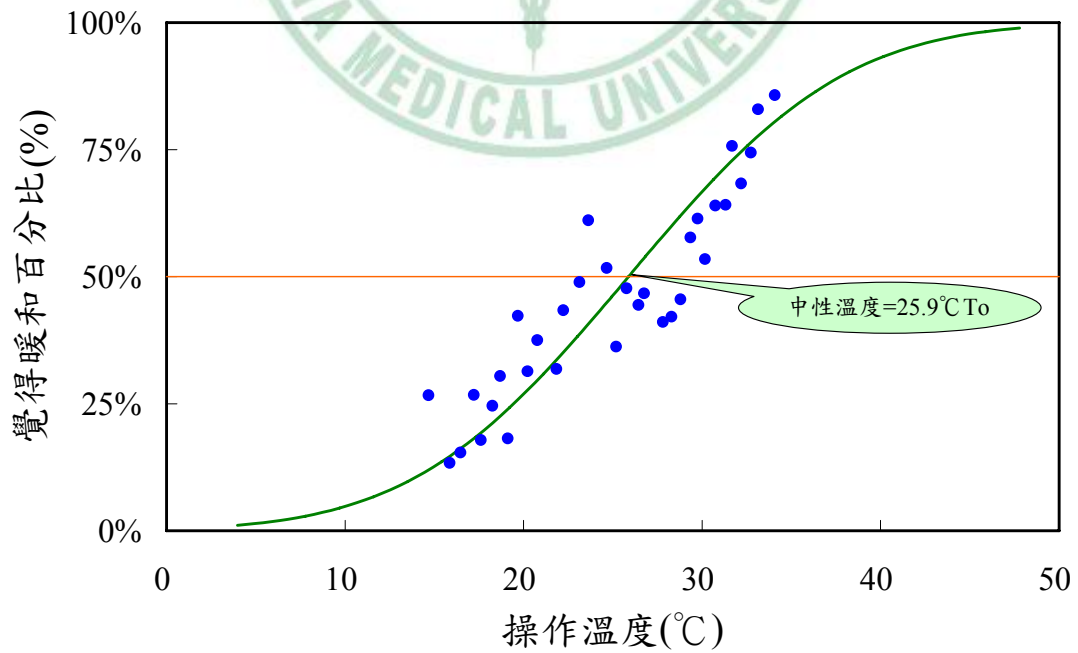


圖 5-8 女生的中性溫度

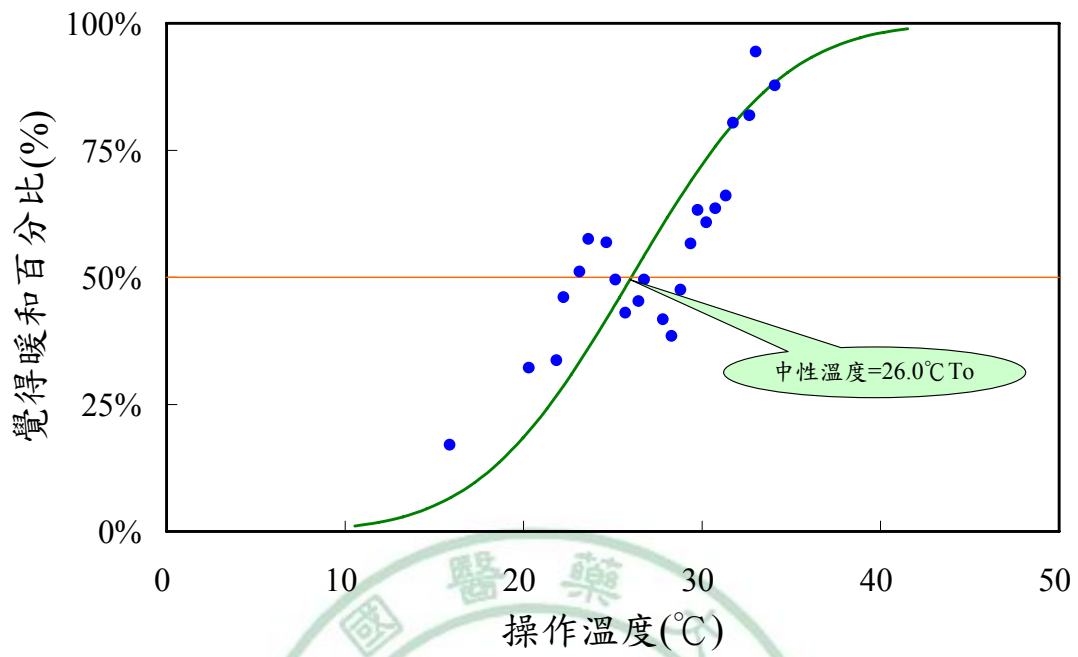


圖 5-9 國中的中性溫度

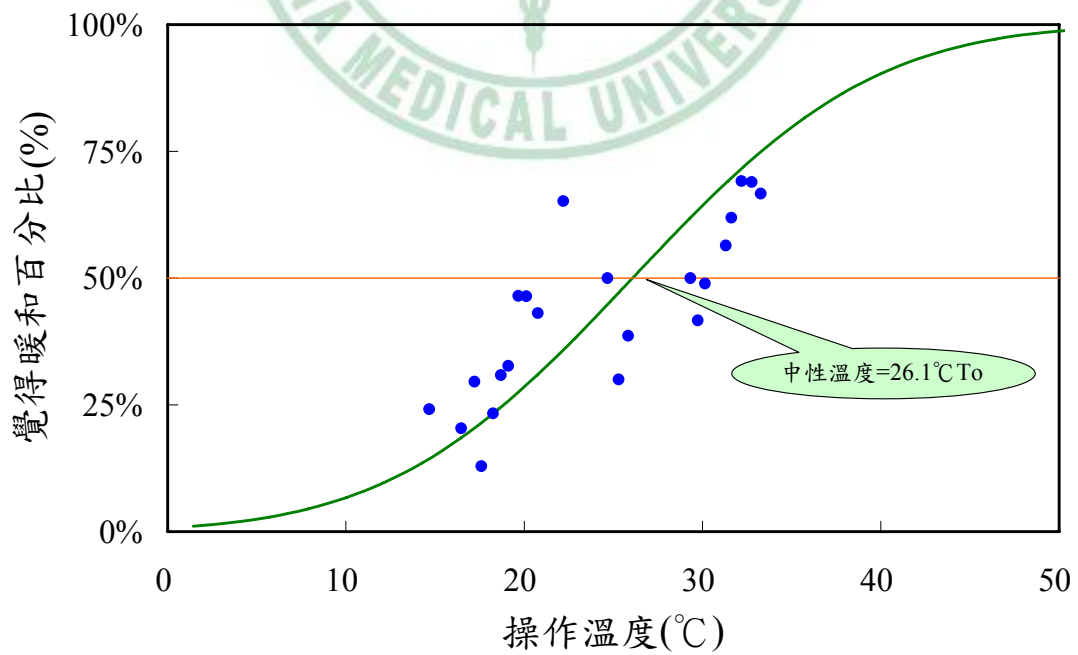


圖 5-10 國小的中性溫度

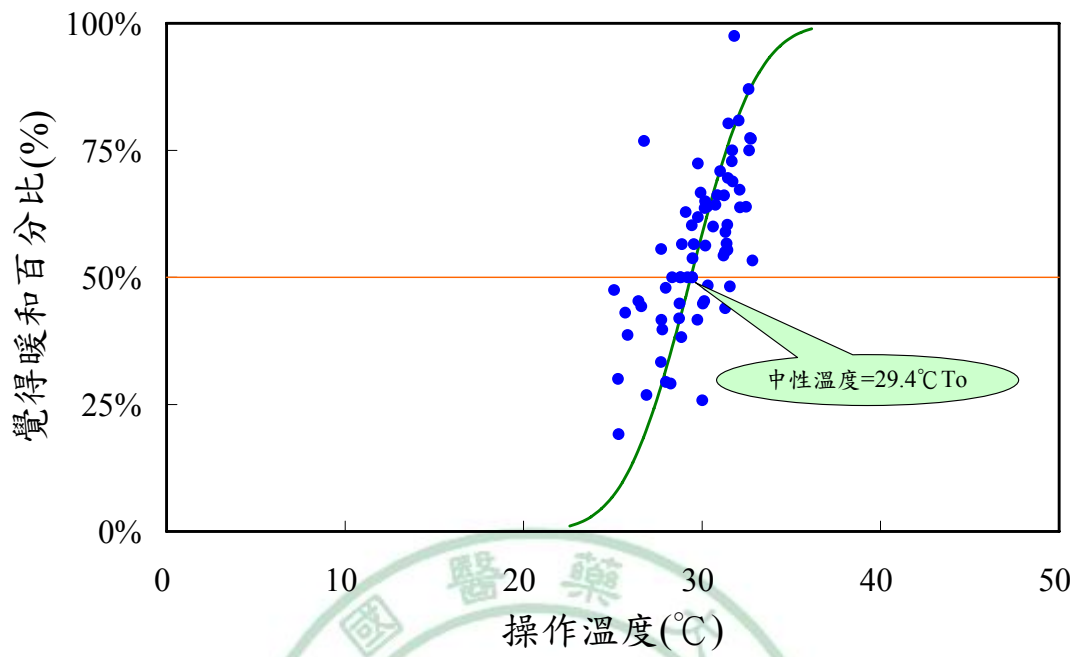


圖 5-11 夏季的中性溫度

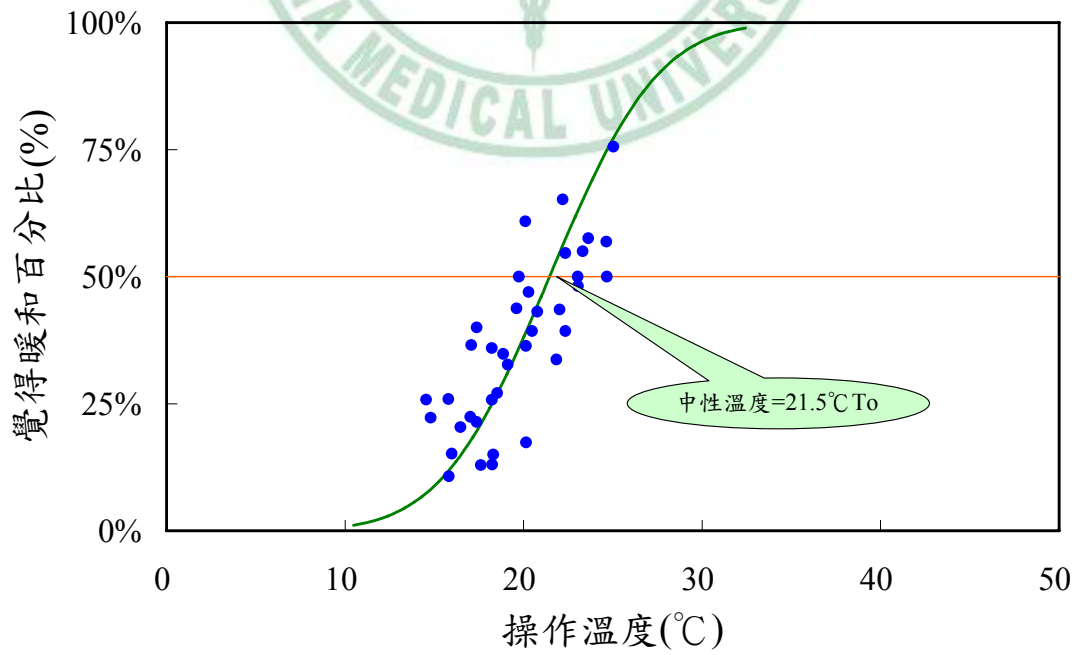


圖 5-12 冬季的中性溫度

穿著冬季制服時，隨著溫度的下降，自由增添衣著程度，可以容忍較低的溫度。

喜好溫度意指人們想要將其熱環境調整得更暖和或者更涼爽的狀態。表5-3是類似於表5-1的物測數據與問卷中熱喜好尺度的統計表。表中所示的操作溫度亦為該頻度內測得室內操作溫度之平均值，而各熱喜好投票數則是該頻度內的總數。

透過表5-3中對三種調整方式的熱喜好尺度進一步機率迴歸分析，可以找出學生想要的喜好溫度。分別對“想調暖群”與“想調涼群”進行機率迴歸分析，其中想要調暖和或想要調涼爽的累積機率分布曲線，表示每一溫度頻度中投票想要調暖和或涼爽的問卷數百分比。兩條累積機率分布曲線的交點對應的溫度即是學生想要的喜好溫度。如圖5-13所示，圖5-13為全部學生的機率迴歸分析結果。圖中右邊的S型曲線表示想要涼爽一點的族群，而左邊的曲線代表想要溫暖者，兩條曲線交點對應的溫度（23.1°C To）就是學生的喜好溫度。

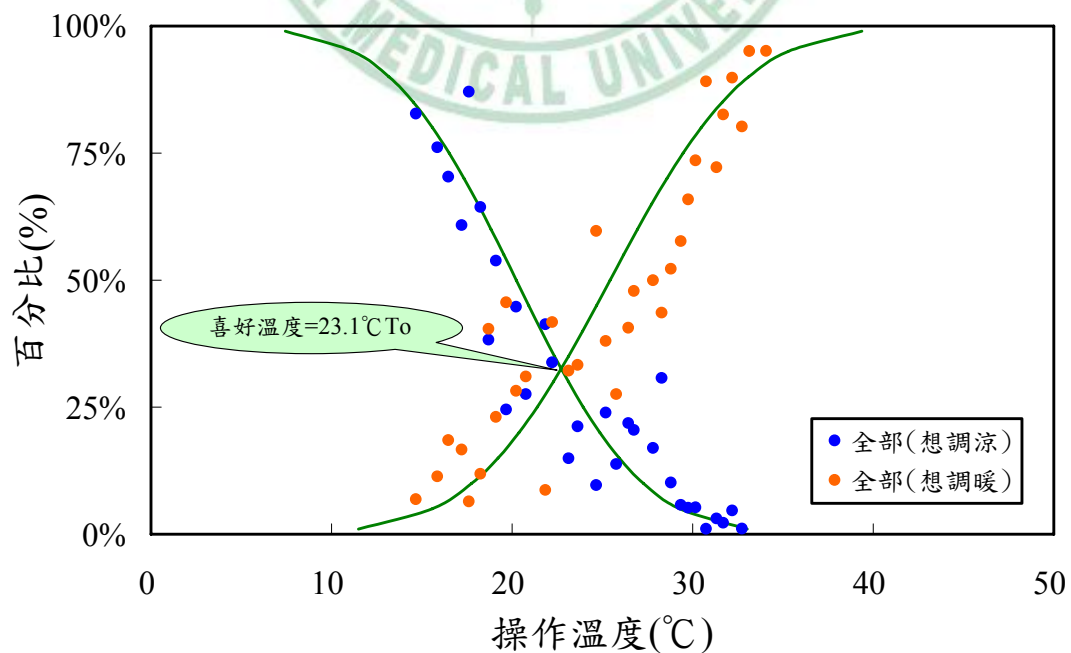


圖 5-13 全部學生的喜好溫度

表 5-3 物測數據與問卷中熱喜好尺度的統計表

To	問卷數	熱喜好		
		想調暖	不改變	想調涼
14.7	58	48	6	4
15.9	88	67	11	10
16.5	27	19	3	5
17.2	120	73	27	20
17.6	31	27	2	2
18.2	118	76	28	14
18.7	47	18	10	19
19.1	26	14	6	6
19.7	57	14	17	26
20.2	163	73	44	46
20.8	29	8	12	9
21.8	46	19	23	4
22.2	139	47	34	58
23.1	87	13	46	28
23.6	33	7	15	11
24.7	62	6	19	37
25.2	142	34	54	54
25.8	58	8	34	16
26.4	32	7	12	13
26.7	117	24	37	56
27.4	32	1	2	29
27.8	224	38	74	112
28.3	78	24	20	34
28.8	226	23	85	118
29.3	208	12	76	120
29.7	173	9	50	114
30.2	246	13	52	181
30.7	92	1	9	82
31.3	385	12	95	278
31.7	178	4	27	147
32.2	128	6	7	115
32.7	182	2	34	146
33.1	81	0	4	77
34.1	41	0	2	39

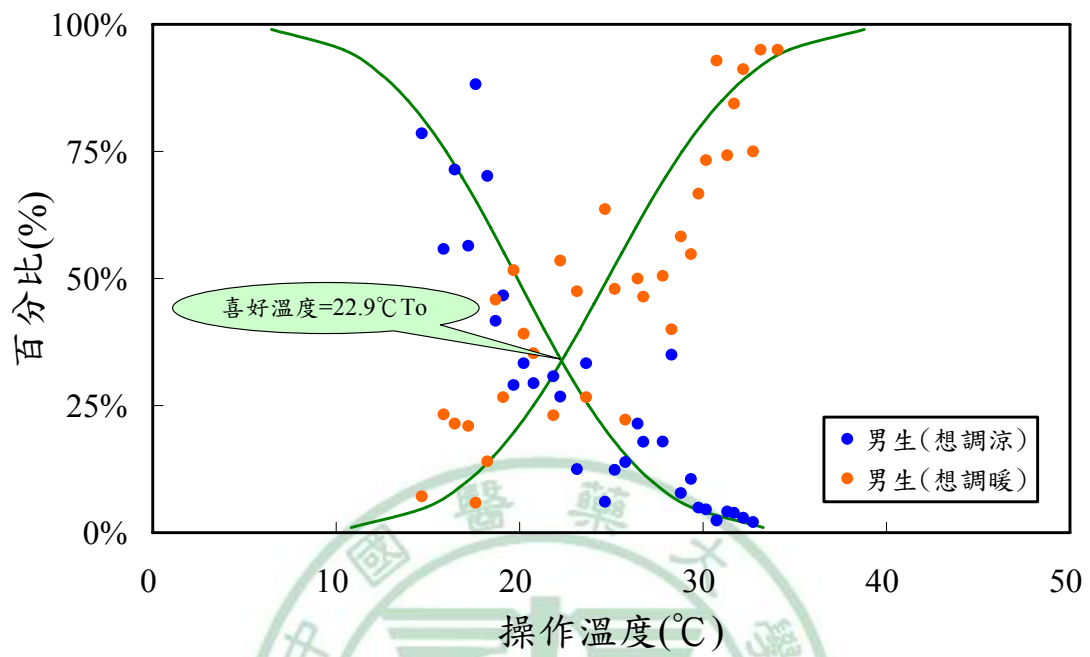


圖 5-14 男生的喜好溫度

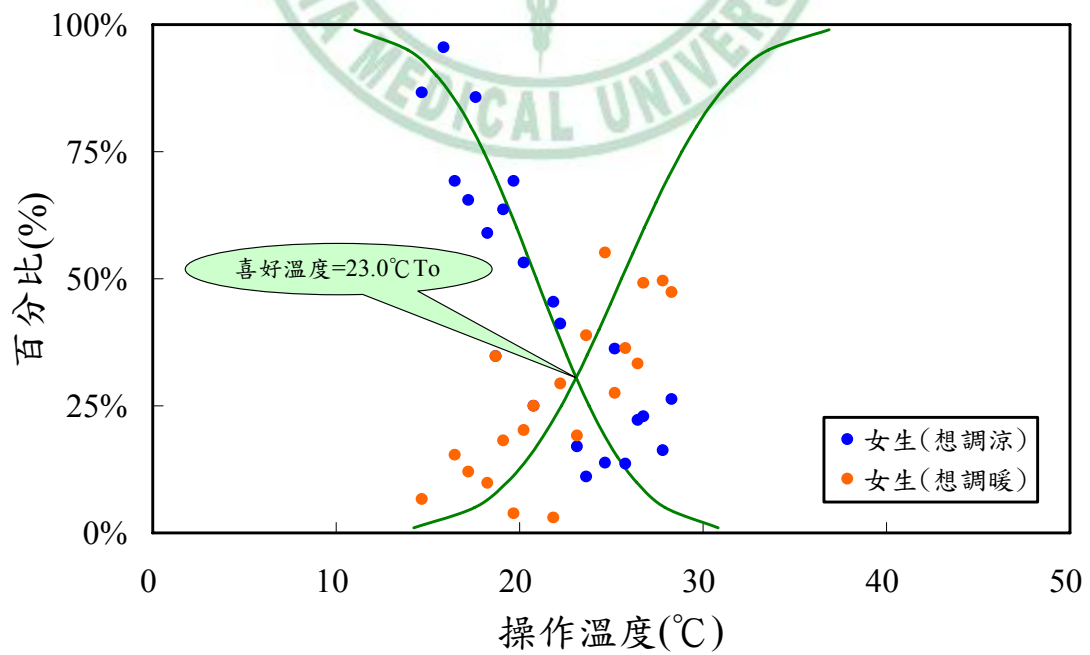


圖 5-15 女生的喜好溫度

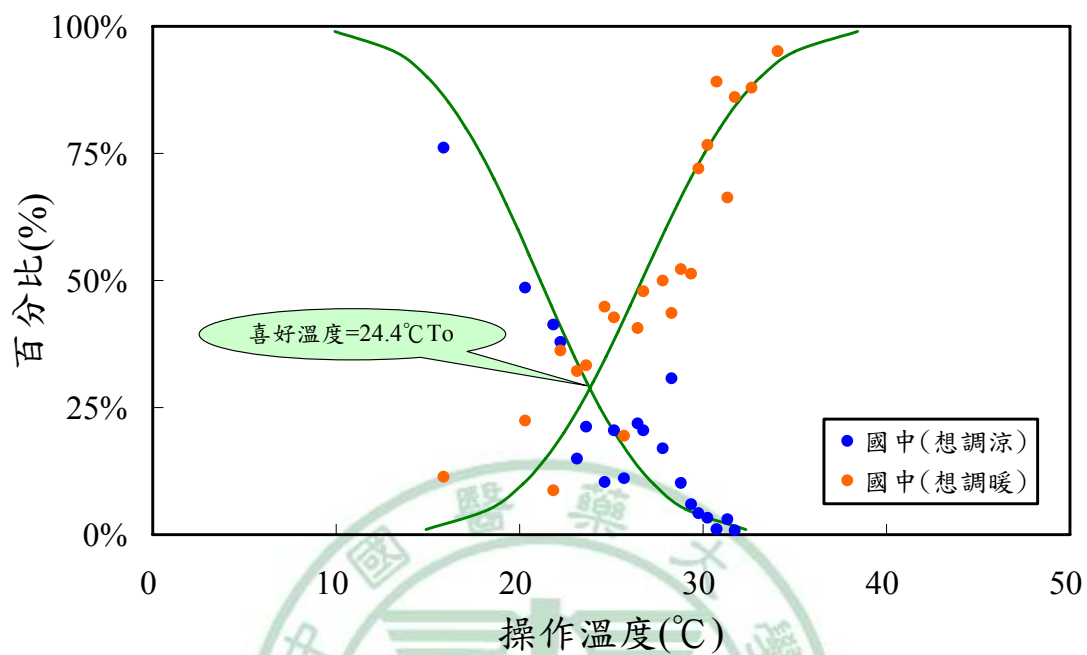


圖 5-16 國中的喜好溫度

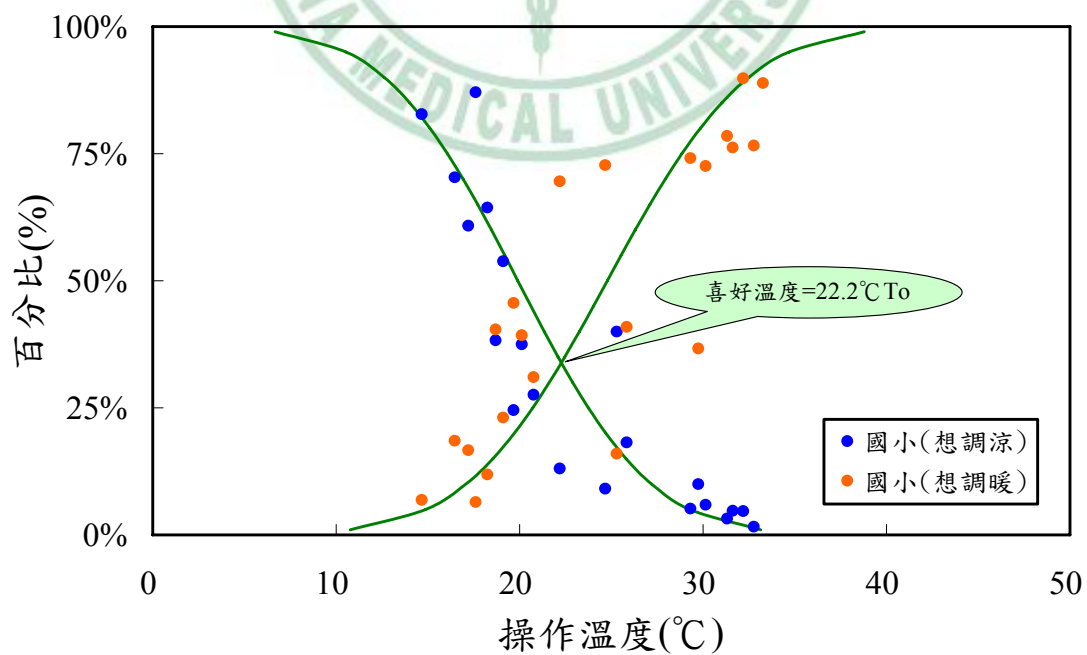


圖 5-17 國小的喜好溫度

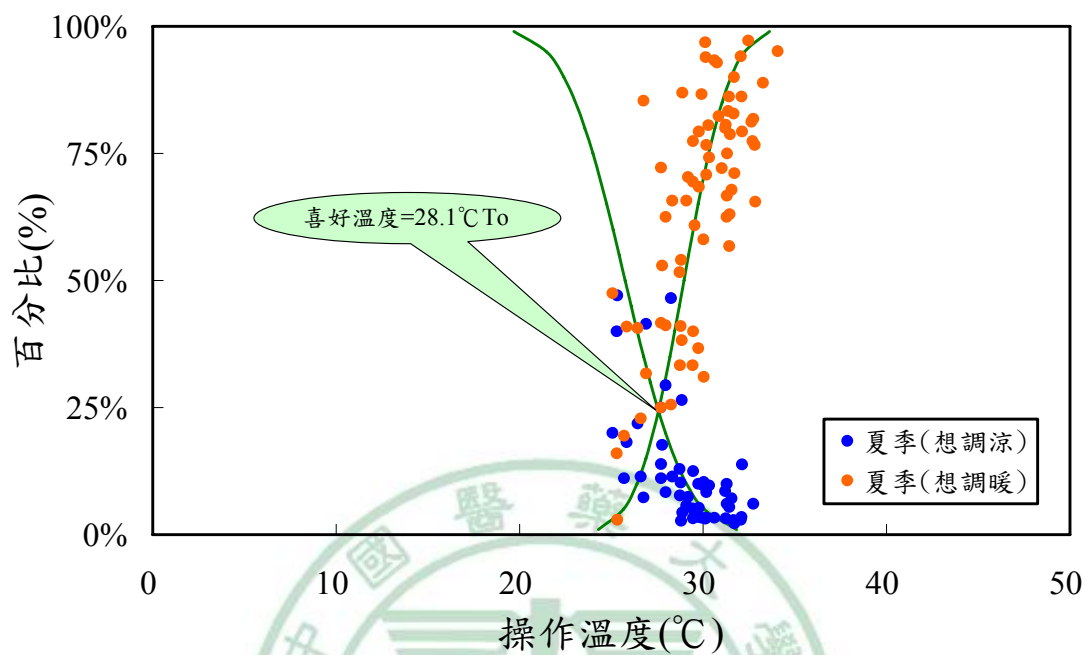


圖 5-18 夏季的喜好溫度

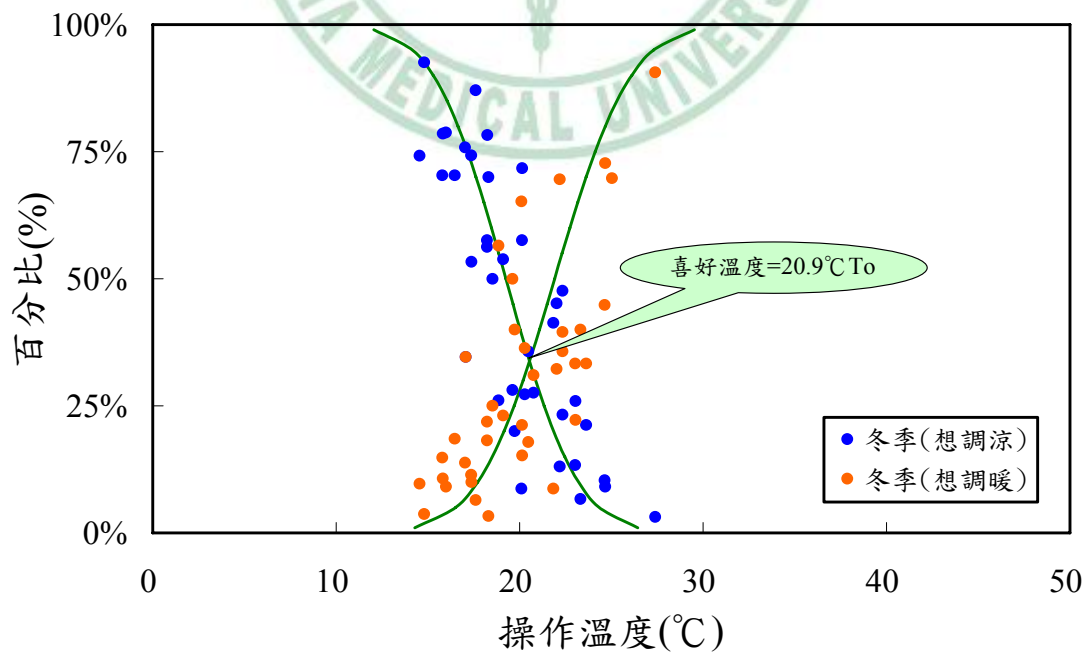


圖 5-19 冬季的喜好溫度

男生、女生、國中生、國小生、夏季以及冬季的機率迴歸分析結果分別如圖5-14至圖5-19所示，求得的喜好溫度分別為22.9°C To、23.0°C To、24.4°C To、22.2°C To、28.1°C To以及20.9°C To。其中除了在夏季與冬季找出的喜好溫度較其他溫度來的偏高與偏低外，其餘求得的喜好溫度都相當接近。

夏季與冬季的喜好溫度有明顯的差異，也是肇因於學生衣著量的不同。當學生穿著夏季制服時，因為衣著量較少所以可以容忍較高的溫度，學生會想要的喜好溫度也自然較高，反之當學生穿著冬季制服時，求得的喜好溫度較低。求得的喜好溫度皆較中性溫度來的低，此結果顯示學生希望有較涼爽的教室環境。本文將所有的的中性溫度與喜好溫度彙整於表5-4中。

表5-4 中性溫度與喜好溫度彙整

類別		中性溫度 (°C To)	喜好溫度 (°C To)
ASHRAE Standard 55 建議標準	全部	25.2	-
	夏季	27.6	-
	冬季	22.5	-
現場實測結果	全部	25.6	23.1
	男生	25.3	22.9
	女生	25.9	23.0
	國中	26.0	24.4
	國小	26.1	22.2
	夏季	29.4	28.1
	冬季	21.5	20.9

第三節 熱接受溫度範圍

依據ASHRAE Standard 55規定，熱接受溫度範圍為80%以上的受測者表示可以接受的熱環境條件。熱接受度分析的方法是使用表5-5中，以 0.5°C 頻度室內操作溫度相對於接受尺度統計表回答的“不接受”比例。圖5-20至圖5-24分別顯示全部學生、男生、女生、國中生以及國小生之不接受度和室內操作溫度的關係，由圖中的多項式預測曲線不接受度百分比20%與10%對應的室內操作溫度，即是分別可以讓80%與90%的人滿意的溫度範圍，

圖5-20至圖5-24找出的全部學生、男生、女生、國中生以及國小生的80%熱接受溫度範圍，分別是 $17.8\sim 30.5^{\circ}\text{C To}$ 、 $18.4\sim 30.1^{\circ}\text{C To}$ 、 $17.0\sim 31.0^{\circ}\text{C To}$ 、 $18.1\sim 30.3^{\circ}\text{C To}$ 以及 $17.8\sim 31.0^{\circ}\text{C To}$ ；90%熱接受溫度範圍，分別是 $20.3\sim 28.0^{\circ}\text{C To}$ 、 $21.2\sim 27.5^{\circ}\text{C To}$ 、 $19.4\sim 28.4^{\circ}\text{C To}$ 、 $20.3\sim 28.2^{\circ}\text{C To}$ 以及 $21.1\sim 27.6^{\circ}\text{C To}$ 。

其中無論在80%與90%熱接受溫度範圍，男生與女生分別有最寬（ 14.0 與 9.0°C To ）與最窄（ 11.7 與 6.3°C To ）的溫度範圍，其餘國中生（ 12.2 與 7.9°C To ）、國小生（ 13.2 與 6.5°C To ）以及全部學生（ 12.7 與 7.7°C To ）無明顯的差別，可能原因是女生容忍能力較男生好，所以可以接受的溫度範圍也較寬。

ASHRAE Standard 55所建議的80%與90%熱接受溫度範圍，可以利用外氣乾球溫度代入其自然通風環境熱舒適範圍公式所得到的80%與90%熱接受溫度上限與下限求得。本文以學生穿著冬季制服期間的最低溫度與學生穿著夏季制服期間的最高溫度，分別代入ASHRAE Standard 55的自然通風環境熱舒適範圍公式，分別得到冬季的80%與90%熱接受溫度下限與夏季的80%與90%熱接受溫度上限，作為ASHRAE Standard 55所建議

表 5-5 物測數據與問卷中熱接受尺度的統計表

To	問卷數	熱接受	
		接受	不接受
14.7	58	43	15
15.9	88	63	25
16.5	27	17	10
17.2	120	97	23
17.6	31	22	9
18.2	118	93	25
18.7	47	40	7
19.1	26	24	2
19.7	57	52	5
20.2	163	139	24
20.8	29	26	3
21.8	46	42	4
22.2	139	130	9
23.1	87	86	1
23.6	33	29	4
24.7	62	57	5
25.2	142	129	13
25.8	58	52	6
26.4	32	31	1
26.7	117	102	15
27.4	32	23	9
27.8	224	208	16
28.3	78	70	8
28.8	226	206	20
29.3	208	191	17
29.7	173	161	12
30.2	246	208	38
30.7	92	78	14
31.3	385	335	50
31.7	178	118	60
32.2	128	93	35
32.7	182	133	49
33.1	81	36	45
34.1	41	22	19

的全年80%與90%熱接受溫度範圍，分別是19.0~31.1°C To 與20.0~30.1°C To。

ASHRAE Standard 55所建議的全年80%熱接受溫度範圍（12.1°C To）與現場實測全部學生80%熱接受溫度範圍（12.7°C To）有相當的寬度，但是其所建議的全年80%熱接受溫度範圍（19.0~31.1°C To）卻比現場實測全部學生80%熱接受溫度範圍（17.8~30.5°C To）溫度來的高，顯示大部分學生可以接受的溫度範圍較建議值涼爽。

ASHRAE Standard 55所建議的全年90%熱接受溫度範圍（10.1°C To）比現場實測全部學生90%熱接受溫度範圍（7.7°C To）有較寬鬆的溫度，其所建議的全年90%熱接受溫度範圍（20.0~30.1°C To）的溫度上限也比現場實測全部學生90%熱接受溫度範圍（20.3~28.0°C To）的溫度上限來的高，再次說明讓90%的學生滿意的教室環境熱接受溫度上限較建議值涼爽。本文將所有的80%與90%熱接受溫度範圍彙整於表5-6中。

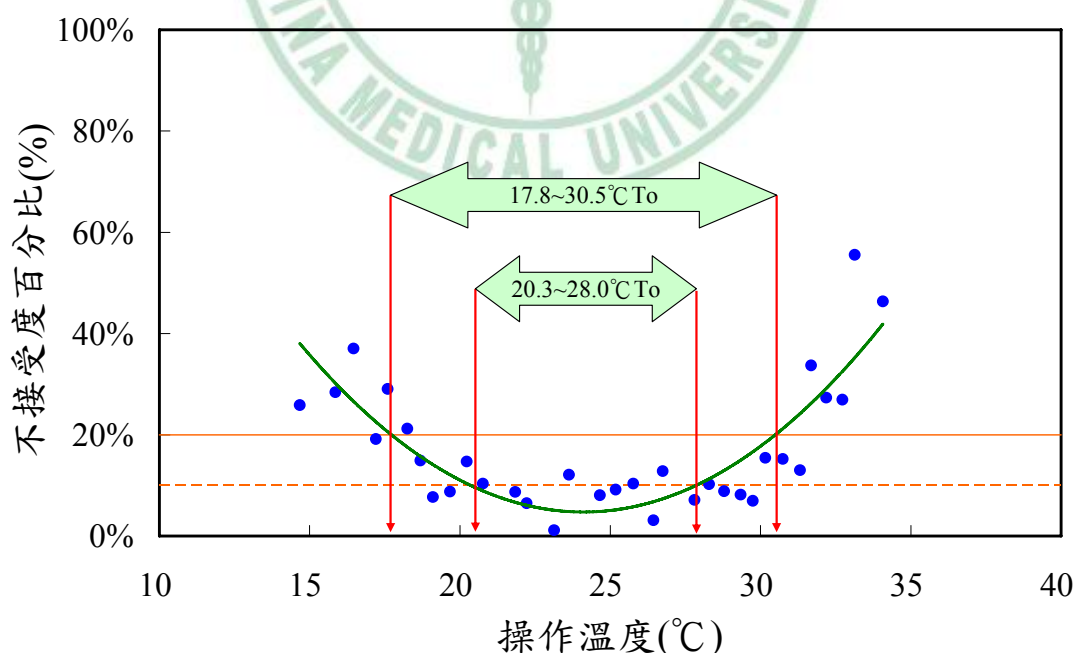


圖 5-20 全部學生的熱接受溫度範圍

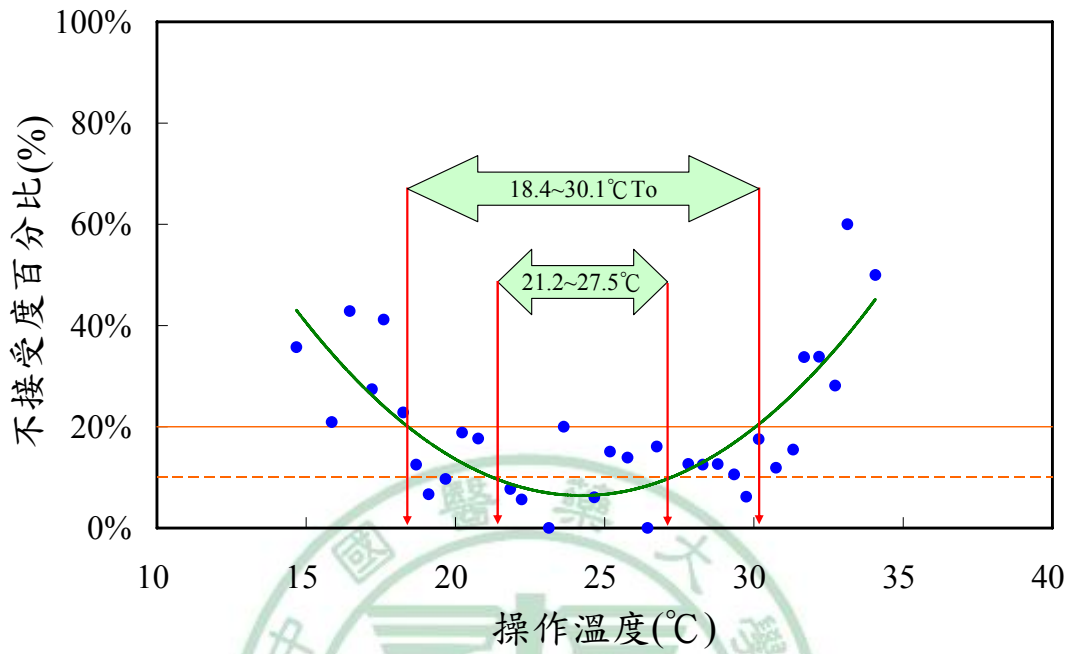


圖 5-21 男生的熱接受溫度範圍

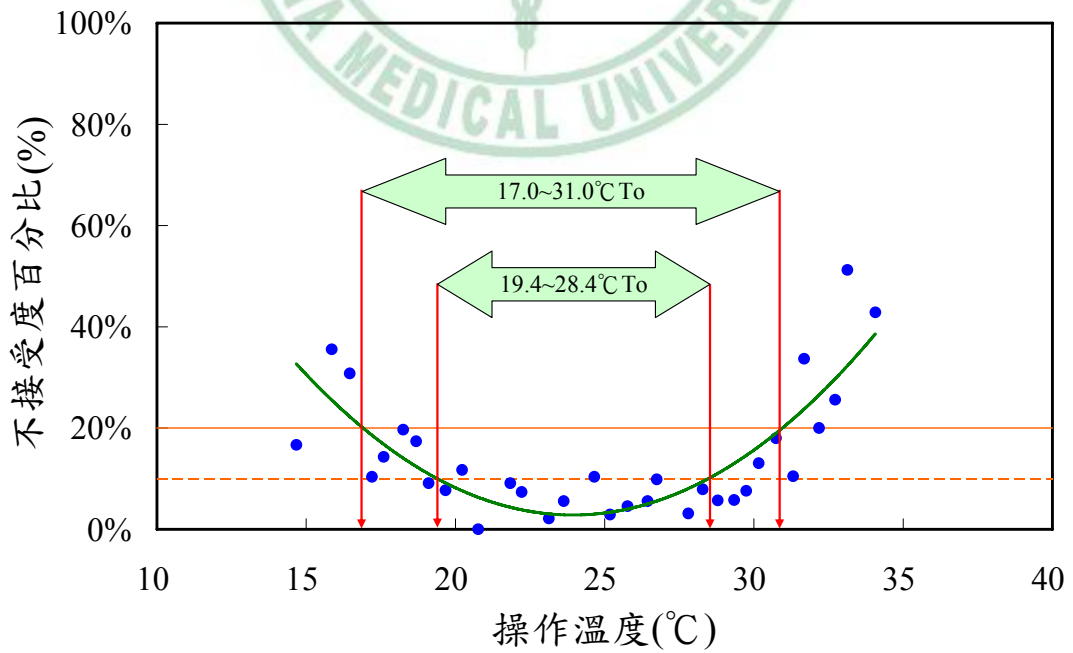


圖 5-22 女生的熱接受溫度範圍

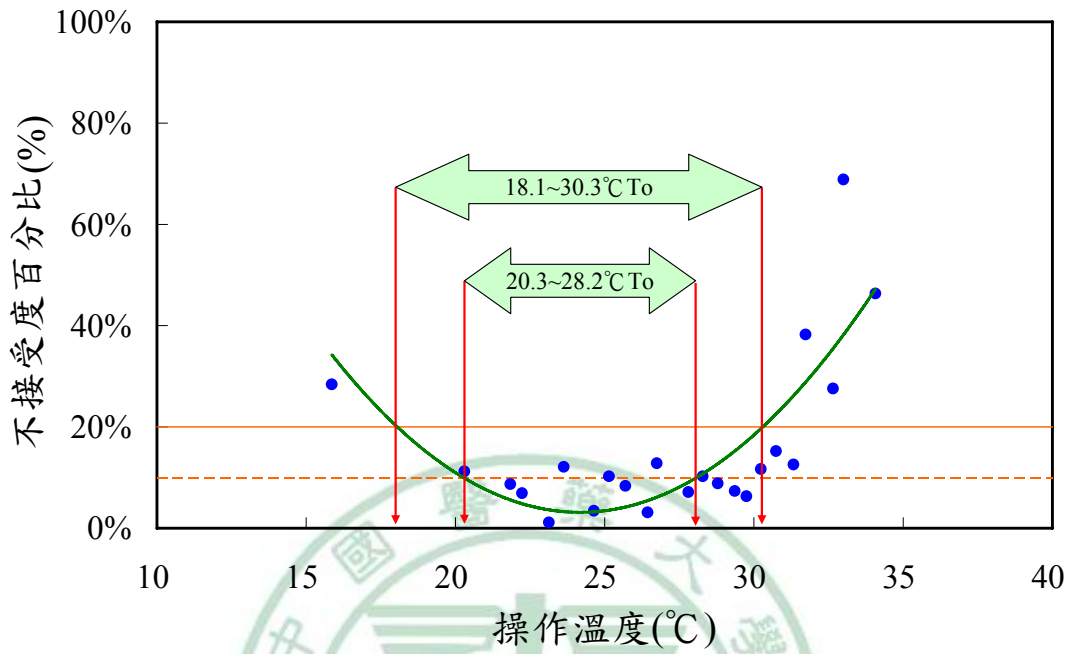


圖 5-23 國中的熱接受溫度範圍

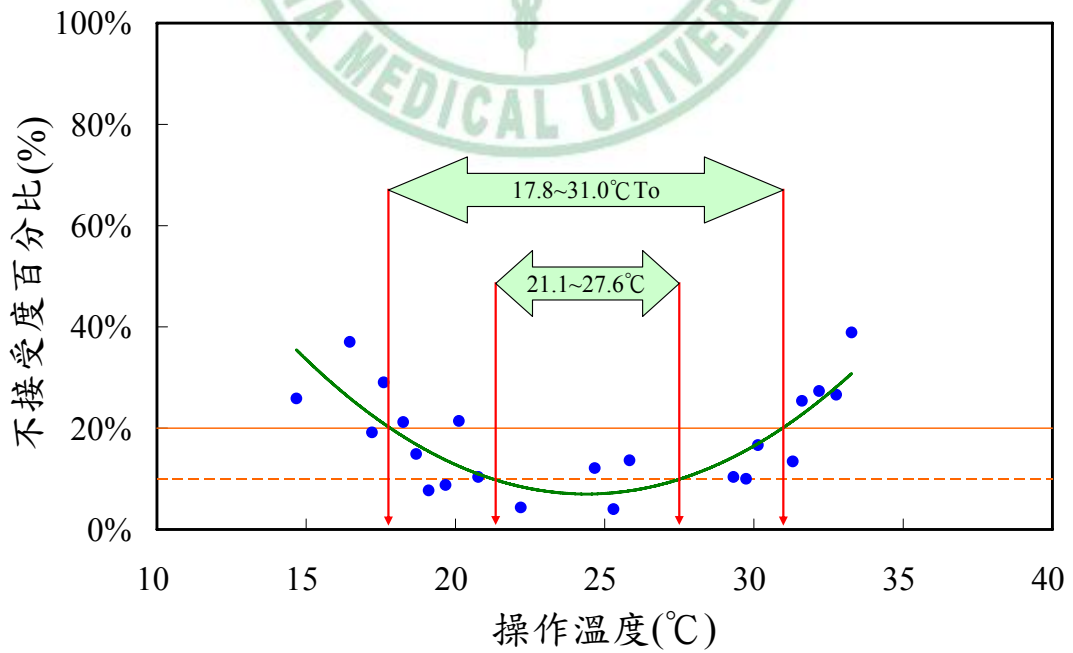


圖 5-24 國小的熱接受溫度範圍

表5-6 熱接受溫度範圍彙整

類別		熱接受溫度範圍 (°C _{To})			
		80%下限	80%上限	90%下限	90%上限
ASHRAE Standard 55 建議標準	全年	19.0	31.1	20.0	30.1
現場實測結果	全部	17.8	30.5	20.3	28.0
	男生	18.4	30.1	21.2	27.5
	女生	17.0	31.0	19.4	28.4
	國中	18.1	30.3	20.3	28.2
	國小	17.8	31.0	21.1	27.6

第四節 與其他文獻比較

本文是第一個在台灣進行中、小學自然通風教室熱舒適性的研究，本節將進一步與其他地區的自然通風教室熱舒適性結果比較，相關研究報告彙整於表5-7。

黃瑞隆等⁽²⁹⁾在台灣自然通風型教室，熱舒適研究結果學生的中性溫度與喜好溫度分別是26.1°C與25.3°C，本研究的則分別是25.6°C與23.1°C。本研究中、小學學生的中性溫度與喜好溫度都比大學生的中性溫度與喜好溫度來的低，是由於中、小學學生必須依照規定穿著學校制服，而大學生則可以自由選擇衣著程度，故中、小學學生礙於基本的衣著量希望有較涼爽的中性溫度與喜好溫度。

Kwok⁽²⁶⁾針對與台灣同屬海島型氣候之夏威夷群島的研究報告，顯示自然通風型教室中學生的中性溫度（26.5°C）與喜好溫度（24.0°C），分別都比本研究的中性溫度（25.6°C）與喜好溫度（23.1°C）來的高約1°C，是由於夏威夷位於北迴歸線以南，屬熱帶氣候區；本研究台灣台中則是位於北迴歸線以北，屬溫帶氣候區。夏威夷的夏季平均溫度（28.0~32.0

°C) 高於本研究夏季平均溫度 (27.0~28.0°C)，故長期習慣炎熱氣候的夏威夷學生，對教室內的熱環境容忍能力較高，中性溫度與喜好溫度也較高。

表5-7 相關研究報告彙整

年份	研究者	地點	場所	類型	中性溫度 (°C _{To})	喜好溫度 (°C _{To})	80%接受溫度 範圍 (°C _{To})	夏季平 均溫度 (°C)
1998	A.G. Kwok ⁽²⁶⁾	美國 夏威夷	小學 教室	空調	28.1	23.0	22.0~29.5	28.0~32.0
				通風	26.5	24.0	23.0~28.5	
2003	N.H. Wong S.S. Khoo ⁽²⁷⁾	新加坡	高中 教室	通風	28.8	25.3	27.1~29.3	27.0~31.0
2003	A.G. Kwok C.Chun ⁽²⁸⁾	日本 橫濱	小學 教室	通風	-	-	-	21.2~26.4
2004	黃瑞隆等 ⁽²⁹⁾	台灣	大學 教室	空調	25.6*	24.1*	-	27.0~28.0
				通風	26.1*	25.3*	-	
				全部	26.3*	24.7*	21.1~29.8*	
2005	S.P.Corgnati 等 ⁽³⁰⁾	義大利	高中 大學 教室	通風	-	-	-	23.0~26.0
2005	羅明智等 ⁽³¹⁾	中國 重慶	大學 教室	通風	27.7*	-	25.5~29.8*	27.0~29.0
2007	本研究	台灣	中學 小學 教室	通風	25.6	23.1	17.8~30.5	27.0~28.0

表示使用的溫度是新有效溫度 (ET)，而不是操作溫度。

Wong等⁽²⁷⁾針對地處熱帶，常年氣溫變化不大的新加坡自然通風型教室進行熱舒適研究，結果顯示因為當地學生長期處於高溫，對溫度的容忍性較大，所以學生有較高的中性溫度（28.8°C）與喜好溫度（25.3°C）。

重慶⁽³¹⁾位於中國青藏高原與長江中下游平原之間過渡地帶的四川盆地的西南部，氣候與台灣同樣是四季分明。每年的8月至10月的夏季平均氣溫（27.0~29.0°C）則較台灣夏季平均氣溫（27.0~28.0°C）來的炎熱酷暑。長期習慣溫度較高的重慶學生，其中性溫度（27.7°C）也較本研究學生的中性溫度（25.6°C）來的高。

第五節 利用自然通風確保教室熱舒適之可行性分析

將現場實測的熱接受溫度範圍研究結果，全年的80%與90%接受溫度範圍分別為17.8~30.5°C To與20.3~28.0°C To，應用在台北、台中與高雄的全年逐時之氣象資料，氣象資料的溫度是使用室外的乾球溫度，分析的時間為學生上課時間約每日上午八點至下午四點。

表5-8顯示了利用自然通風確保台北教室熱舒適之可行性分析結果。將80%以上的受測者表示可以接受的溫度範圍，應用於台北一整年的氣象資料中，一月份至十二月份分別有52%、43%、65%、91%、90%、77%、60%、65%、92%、99%、100%以及64%符合舒適標準。

其中十二月份至次年五月份有低於80%接受溫度範圍下限的比例，分別是36%、48%、57%、35%、4%以及1%；四月份至十月份有高於80%接受溫度範圍上限的比例，分別是5%、9%、23%、40%、35%、8%以及1%。顯示學生依學校規定穿著冬季制服在十二月份至次年三月份會有過冷的現象，學生依學校規定穿著夏季制服在六月份至十月份則會有過熱的現象。

將90%以上的受測者表示可以接受的溫度範圍，應用於台北一整年的

表5-8 利用自然通風確保台北教室熱舒適之可行性分析結果

月份	台北室外溫度分布情形					
	<80%下限 (17.8°C To)	>80%上限 (30.5°C To)	80%舒適區	<90%下限 (20.3°C To)	>90%上限 (28.0°C To)	90%舒適區
1	48%	0%	52%	73%	0%	27%
2	57%	0%	43%	82%	0%	18%
3	35%	0%	65%	69%	1%	30%
4	4%	5%	91%	22%	12%	66%
5	1%	9%	90%	2%	23%	75%
6	0%	23%	77%	1%	48%	52%
7	0%	40%	60%	0%	78%	22%
8	0%	35%	65%	0%	73%	27%
9	0%	8%	92%	0%	27%	73%
10	0%	1%	99%	0%	14%	86%
11	0%	0%	100%	6%	4%	90%
12	36%	0%	64%	69%	0%	31%
全年	15%	10%	75%	27%	23%	50%

氣象資料中，一月份至十二月份分別有27%、18%、30%、66%、75%、52%、52%、27%、73%、86%、90%以及31%符合舒適標準。其中十一月份至次年六月份有低於90%接受溫度範圍下限的比例，分別是6%、69%、73%、82%、69%、22%、2%以及1%；三月份至十一月份有高於90%接受溫度範圍上限的比例，分別是1%、12%、23%、48%、78%、73%、27%、14%以及4%。顯示90%接受溫度範圍讓台北室外溫度符合中、小學學生表示可以接受的熱環境條件的比例更少了。

表5-9顯示了利用自然通風確保台中教室熱舒適之可行性分析結果。將80%以上的受測者表示可以接受的溫度範圍應用於台中一整年的氣象資料中，一月份至十二月份分別有48%、49%、70%、94%、94%、83%、73%、74%、86%、96%、100%以及62%符合舒適標準。

其中十二月份至次年四月份有低於80%接受溫度範圍下限的比例，分

表5-9 利用自然通風確保台中教室熱舒適之可行性分析結果

月份	台中室外溫度分布情形					
	<80%下限 (17.8°C To)	>80%上限 (30.5°C To)	80%舒適區	<90%下限 (20.3°C To)	>90%上限 (28.0°C To)	90%舒適區
1	52%	0%	48%	76%	0%	23%
2	51%	0%	49%	72%	0%	27%
3	29%	1%	70%	56%	2%	43%
4	4%	2%	94%	12%	13%	75%
5	0%	6%	94%	1%	24%	75%
6	0%	17%	83%	0%	35%	65%
7	0%	27%	73%	0%	59%	41%
8	0%	26%	74%	0%	59%	41%
9	0%	14%	86%	0%	32%	68%
10	0%	4%	96%	0%	27%	73%
11	0%	0%	100%	10%	6%	84%
12	38%	0%	62%	63%	0%	36%
全年	14%	8%	78%	24%	22%	54%

別是38%、52%、51%、29%以及4%；三月份至十月份有高於80%接受溫度範圍上限的比例，分別是1%、2%、6%、17%、27%、26%、14%以及4%。顯示學生依學校規定穿著冬季制服在十二月份至次年二月份會有過冷的現象，學生依學校規定穿著夏季制服在五月份至十月份則會有過熱的現象。

將90%以上的受測者表示可以接受的溫度範圍，應用於台中一整年的氣象資料中，一月份至十二月份分別有23%、27%、43%、75%、75%、65%、41%、41%、68%、73%、84%以及36%符合舒適標準。其中十一月份至次年五月份有低於90%接受溫度範圍下限的比例，分別是10%、63%、76%、72%、56%、12%以及1%；三月份至十月份有高於90%接受溫度範圍上限的比例，分別是2%、13%、24%、35%、59%、59%、32%以及27%。顯示90%接受溫度範圍讓台中室外溫度符合中、小學學生

表5-10 利用自然通風確保高雄教室熱舒適之可行性分析結果

月份	高雄室外溫度分布情形					
	<80%下限 (17.8°C To)	>80%上限 (30.5°C To)	80%舒適區	<90%下限 (20.3°C To)	>90%上限 (28.0°C To)	90%舒適區
1	23%	0%	77%	46%	0%	54%
2	12%	0%	88%	38%	3%	58%
3	12%	0%	88%	19%	5%	76%
4	0%	8%	93%	3%	26%	71%
5	0%	19%	81%	0%	46%	54%
6	0%	24%	76%	0%	56%	44%
7	0%	25%	75%	0%	63%	37%
8	0%	28%	72%	0%	68%	32%
9	0%	15%	85%	0%	40%	60%
10	0%	5%	95%	0%	35%	65%
11	0%	2%	98%	0%	17%	83%
12	15%	0%	85%	34%	2%	64%
全年	5%	10%	84%	12%	30%	58%

表示可以接受的熱環境條件的比例更少了。

表5-10顯示了利用自然通風確保高雄教室熱舒適之可行性分析結果。將80%以上的受測者表示可以接受的溫度範圍，應用於高雄一整年的氣象資料中，一月份至十二月份分別有77%、88%、88%、93%、81%、76%、75%、72%、85%、95%、98%以及85%符合舒適標準。

其中十二月份至次年三月份有低於80%接受溫度範圍下限的比例，分別是15%、23%、12%以及12%；四月份至十一月份有高於80%接受溫度範圍上限的比例，分別是8%、19%、24%、25%、28%、15%、5%以及2%。顯示學生依學校規定穿著冬季制服在十二月份至次年三月份會有過冷的現象，學生依學校規定穿著夏季制服在四月份至十一月份則會有過熱的現象。

將90%以上的受測者表示可以接受的溫度範圍，應用於高雄一整年的

氣象資料中，一月份至十二月份分別有54%、58%、76%、71%、54%、44%、37%、32%、60%、65%、83%以及64%符合舒適標準。其中十二月份至次年四月份有低於90%接受溫度範圍下限的比例，分別是34%、46%、38%、19%以及3%；二月份至十二月份有高於90%接受溫度範圍上限的比例，分別是3%、5%、26%、46%、56%、63%、68%、40%、35%、17%以及2%。顯示90%接受溫度範圍讓高雄室外溫度符合中、小學學生表示可以接受的熱環境條件的比例更少了。

將現場實測全年的80%接受溫度範圍研究結果，應用在台北、台中與高雄的全年逐時之氣象資料，進行自然通風確保教室熱舒適之可行性分析，其中台北、台中與高雄落在80%舒適區外之上課時間比例分布情形分別如圖5-25至圖5-27所示。三者在全年的戶外溫度皆有超過75%的比例落在80%的舒適範圍內。只有25%的上課時間教室內熱環境落在80%的舒適範圍外，顯示以自然通風的方式確保教室熱舒適是可行的方案。

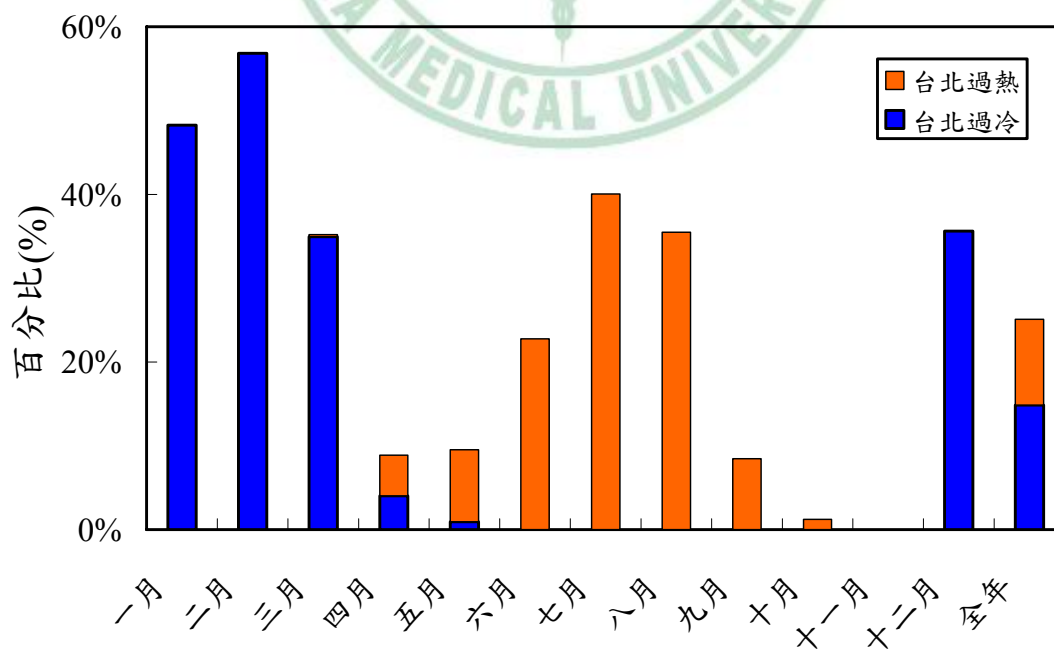


圖5-25 台北落在80%舒適區外之上課時間比例

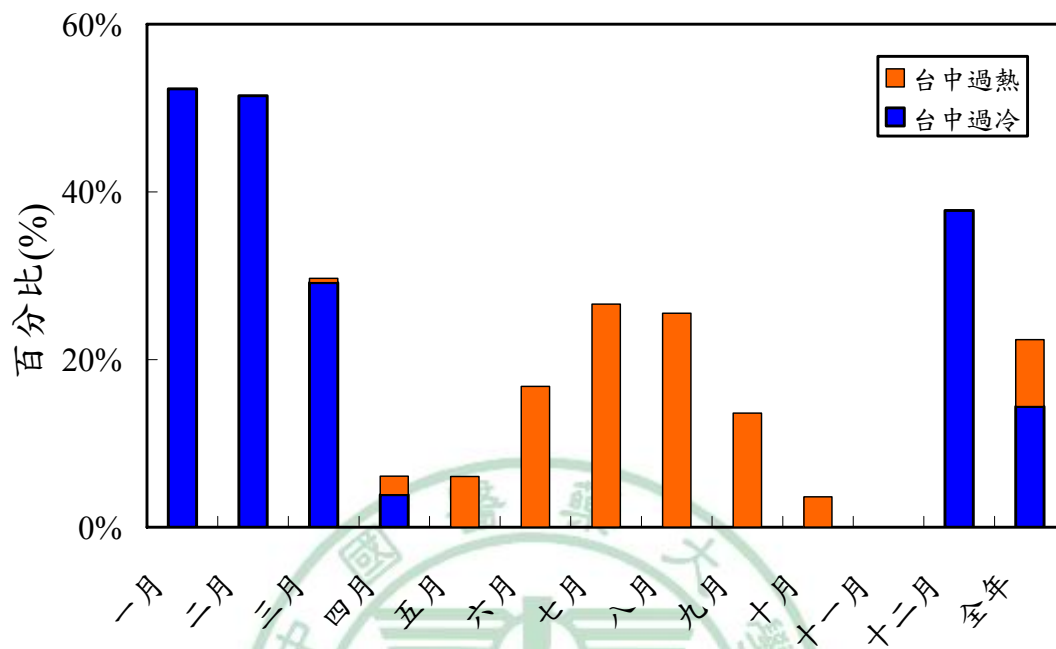


圖5-26 台中落在80%舒適區外之上課時間比例

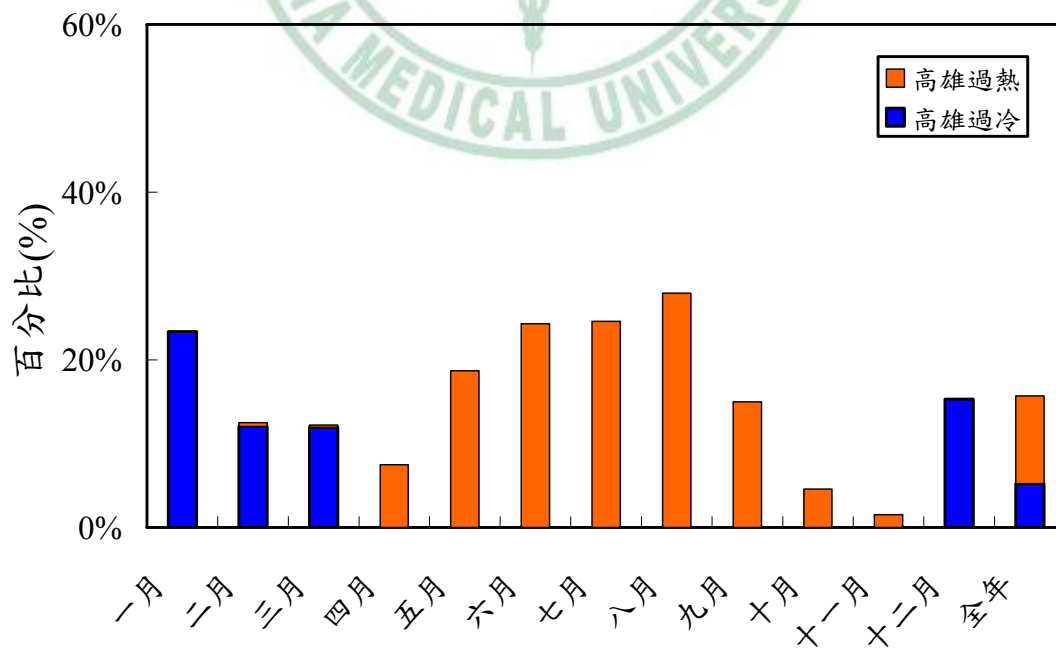


圖5-27 高雄落在80%舒適區外之上課時間比例

第六章 結論

本研究現場實測是針對自然通風型的 14 所國中、國小學校的 48 間教室學生，共完成了 3,754 份有效問卷與物測數據。研究的重要結論如下：

1. 透過熱敏感度分析，男生、女生、國中生、國小生以及全部學生在教室內熱敏感度最平穩的操作溫度範圍分別為：21.4~29.3°C、22.5~29.0°C、23.3~28.8°C、21.1~30.2°C 以及 22.7~29.2°C。
2. 學生在低溫區範圍內的平均熱感尺度變化量較在高溫區來得遲鈍的主要因素是衣著量的不同。在低溫區時，學生大多穿著冬季制服，即自由調整衣著量使得室內操作溫度的變化量較學生大多穿著夏季制服的高溫區時緩和。
3. 利用機率回歸分析，男生、女生、國中生、國小生、夏季、冬季以及全部學生在教室內求得的中性操作溫度，分別為 25.3°C、25.9°C、26.0°C、26.1°C、29.4°C、21.5°C 以及 25.6°C；求得的良好操作溫度，分別為 22.9°C、23.0°C、24.4°C、22.2°C、28.1°C、20.9°C 以及 23.1°C。求得的良好溫度皆較中性溫度來的低，顯示學生希望有較涼爽的教室環境。
4. 夏季與冬季的中性溫度有明顯的差異，肇因於學生衣著量的不同。當學生穿著夏季制服，即衣著量較少可以容忍較高的溫度，學生會投熱中性所對應的溫度自然也較高，反之則較低。
5. 利用自然通風環境熱舒適標準所得到的 ASHRAE Standard 55 所建議的夏季、冬季以及全年中性操作溫度分別為 27.6°C、22.5°C 以及 25.2°C。
6. 由於學生穿著夏季制服，隨著溫度的上升，衣著量減少至最低狀態，可以容忍較高的溫度；而學生穿著冬季制服，隨著溫度的下

降，自由增添衣著程度，可以容忍較低的溫度，導致本研究現場實測的夏季與冬季中性溫度分別較 ASHRAE Standard 55 的建議值高與低。

7. 本研究現場實測 (17.8~30.5°C) 與 ASHRAE Standard 55 建議值 (19.0~31.1°C) 的全年 80% 熱接受操作溫度範圍雖然有相當的寬度，但是現場實測的溫度上、下限較低，表示學生可以接受的溫度範圍較建議值涼爽。
8. 本研究現場實測 (20.3~28.0°C) 與 ASHRAE Standard 55 建議值 (20.0~30.1°C) 的全年 90% 熱接受溫度範圍。現場實測有較窄的溫度寬度，有較低的溫度上限，再次說明涼爽的教室環境讓 90% 學生較滿意。
9. 與其他文獻比較說明了長期處於緯度較低或高溼高熱地區的居住者，由於對氣候已有熱適應性，故其可以容忍的溫度也較高。
10. 將現場實測的熱接受溫度範圍，用於探討教室以自然通風方式確保熱舒適的可行性。只有 25% 的上課時間教室內熱環境落在 80% 的舒適範圍外，顯示以自然通風的方式確保教室熱舒適是可行的方案。

參考文獻

- (1) ASHRAE, ASHRAE Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, America Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, (1992).
- (2) 李先庭, 楊建榮, 王欣, 室內空氣品質研究現狀與發展, 暖通空調, 30(3), (2000)。
- (3) British Research Establishment Conservation Support Unit(BRECSU). Energy Consumption Guide 19: Energy Use in Offices. Garston, Watford, UK, (2000).
- (4) International Energy Agency(IAE)Annual Reports: Hybrid Ventilation Annex 35, Sydney, (2000).
- (5) 張金萍, 李安桂, 自然通風的研究應用現狀與問題探討, 暖通空調, 35(8) 32–38, (2005)。
- (6) P. O. Fanger, Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering. Mc Graw-Hill Inc, New York, (1970).
- (7) P. O. Fanger, Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering. Copenhagen: Danish Technical Press, (1970).
- (8) ISO 7730, Moderate Thermal Environments: Determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort. International Organization for Standardization, Geneva, (1994).
- (9) ASHRAE, ASHRAE Standard 55-2004: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, America Society of Heating,

Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Atlanta, Georgia, USA, (2004).

- (10) 羅明智，李百戰，鄭潔，人體熱適應性與熱舒適，制冷與空調，1 75-78(2005)。
- (11) R. J. De Dear, G. S. Brager, Developing an adaptive model of thermal comfort and preference, ASHRAE Transactions, 104(1) 145-167(1988).
- (12) K. J. Mc Cartney, J. F. Nicol, Developing an adaptive control algorithm for Europe, Energy and Buildings, 34 623–635 (2002).
- (13) J. F. Nicol, M. A. Humphreys, Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings, 34 563-572 (2002).
- (14) S. Heidari, S. Sharples, A comparative analysis of short-term and long-term thermal comfort surveys in Iran, 34(6) 607-614 (2002).
- (15) J. F. Nicol, Adaptive thermal comfort standards in the hot-humid tropics, Energy and Buildings, 36 628-637 (2004).
- (16) R. J. De Dear, J. Richard, G. S. Brager, Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55, Energy and Buildings, 34(6) 549-561 (2002).
- (17) M. A. Humphreys, J. F. Nicol, Outdoor temperature and indoor thermal comfort: raising the precision of the relationship for the 1998 ASHRAE database of field studies, ASHRAE Transactions, 106(2) 485-492 (2000).
- (18) J.F. Busch, Thermal responses to the Thai office environment, ASHRAE Transactions, 96(1) 859-872 (1990).
- (19) R. J. De Dear, K.G. Leow, S. C. Foo, Thermal comfort in the humid

- tropics: Field experiments in air-conditioned and naturally ventilated buildings in Singapore, *International Journal of Biometeorology*, 34 259-265 (1991).
- (20) T. H. Karyono, Report on thermal comfort and building energy studies in Jakarta-Indonesia, *Building and Environment* 35 77-90 (1998).
- (21) 夏一哉, 趙榮義, 江億, 北京市住宅環境熱舒適研究, 暖通空調, 29(2) 1-5 (1999)。
- (22) N. H. Wong, H. Feriadi, P. Y. Lim, K.W. Tham, C. Sekhar, K.W. Cheong, Thermal comfort evaluation of naturally ventilated public housing in Singapore, *Building and Environment*, 37 1267-1277 (2002).
- (23) H. Feriadi, N. H. Wong, S. Chandra, K. W. Cheong, Adaptive behaviour and thermal comfort in Singapore's naturally ventilated housing, *Building Research & Information* 31(1) 13-23 (2003).
- (24) H. Feriadi, N. H. Wong, Thermal comfort for naturally ventilated houses in Indonesia, *Energy and Buildings*, 36 614-626 (2004).
- (25) J. Han, G. Zhang, Q. Zhang, J. Zhang, J. Liu, L. Tian, C. Zheng, J. Hao, J. Lin, Y. Liu, D. J. Moschandreas, Field study on occupants' thermal comfort and residential thermal environment in a hot-humid climate of China, *Building and Environment*, (2006).
- (26) A.G. Kwok, Thermal comfort in tropical classrooms, *ASHRAE Transactions*, 104(1) 1031-1047 (1998).
- (27) N. H. Wong, S. S. Khoo, Thermal comfort in classrooms in tropical, *Energy and Buildings*, 35 337-351 (2003).

- (28) A. G. Kwok, C. Chun, Thermal comfort in Japanese schools, *Solar Energy* 74 245-252 (2003).
- (29) R. L. Hwang, T. P. Lin, N. J. Kuo, Field experiments on thermal comfort in campus classrooms in Taiwan, *Energy and Buildings*, 38 53-62 (2006).
- (30) S. P. Corgnati, M. Filippi, S. Viazzo, Perception of the thermal environment in high school and university classrooms: Subjective preferences and thermal comfort, *Building and Environment*, 42 951-959 (2007).
- (31) 羅明智，李百戰，徐小林，重慶夏季教室熱環境研究，重慶建築大學學報，27(1) (2005)。
- (32) 黃教誠，大學教室熱舒適範圍之實測調查研究，逢甲大學建築學系碩士班碩士論文，(2005)。
- (33) H. Feriadi, N. H. Wong, Thermal comfort for naturally ventilated houses in Indonesia, *Building and Environment*, 36 614-626 (2004).
- (34) Z. J. Wang, A field study of the thermal comfort in residential buildings in Harbin, *Building and Environment*, 41 1034-1039 (2006).