

國立臺灣大學生物資源暨農學院園藝暨景觀學系

碩士論文

Department of Horticulture and Landscape Architecture

College of Bio-Resources and Agriculture

National Taiwan University

Master Thesis

街道綠化與透水鋪面對行人熱舒適度影響之研究

The effects of street greenery and permeable pavements

on pedestrian thermal comfort

蔡旻珈

Min-Chia Tsai

指導教授: 林寶秀 博士

Advisor: Bau-Show Lin, Ph.D.

中華民國111年8月

August, 2022





國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

街道綠化與透水鋪面對行人熱舒適度影響之研究
The effects of street greenery and permeable pavements
on pedestrian thermal comfort

本論文係蔡旻珈君 (R09628301) 在國立臺灣大學園藝暨景觀學
研究所完成之碩士學位論文，於民國 111 年 07 月 07 日承下列考試
委員審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：

林寶秀

(指導教授)

林晏州

張伯華

謝正義

張伯華



誌謝

首先感謝我的指導教授林寶秀老師，謝謝妳這兩年來的指導，每當我撞牆的時候，願意慢慢引導我、給我提點，不吝嗇分享過去研究上的經驗，陪伴著我從零到有完成這本論文。在此也特別感謝游老師、乾乾、欣欣，謝謝你們總是分享最新的笑話讓研究室的大家哈哈大笑，增添許多樂趣。

感謝林晏州老師、張俊彥老師、謝正義老師、張伯茹老師擔任口試委員，給予我不同方面的意見，使我的論文能更加完整。

感謝研究室夥伴們，涵君、亭玆、奕閻、湘文、丁容、雨樺、幼穎、聖方，謝謝你們在我需要幫忙時，總是義不容辭的協助我，讓我在研究的這條路上不感到孤單並培養出研究室的革命情感。

感謝朋友和家人的陪伴和鼓勵，讓我在課餘的生活保持充實且快樂。最後，感謝一路走來沒有放棄的我自己，我有做到了喔！

旻珈



摘要



近年來受到全球暖化、都市熱島效應影響，臺北市屢次打破歷史高溫，夏季正午烈日當頭，街道暑氣難以耗散，行人通行品質因此下降。為解決臺北市高溫，環境品質文教基金會於民國 109 年向臺北市政府提出「臺北樹都倡議」，臺北市工務局自民國 104 年起提出「鋪設透水性鋪面計畫」，預期透過植樹與鋪設透水性鋪面來改善街道高溫。但計畫實施後的街道是否真的能提供行人一個舒適的步行環境，則少有全盤性的研究討論，本研究目的為探討不同街道綠化與透水鋪面對行人之人體熱舒適的影響，量化不同行道樹組成、鋪面含水情形下的行人熱舒適度，以成為未來道路規劃設計之參考依據。

本研究調查了臺北市透水鋪面種類、參考內政部營建署市區道路透水性鋪面使用手冊，透過文獻回顧歸納出行道樹種類、植栽綠帶數量、車道鋪面種類、人行道鋪面種類、鋪面含水狀態等研究變項，並以臺北市透水鋪面實施路段為研究基地，使用 ENVI-met Version5 微氣候模擬軟體為研究工具，首先進行地點、鋪面含水狀態實測，驗證地表溫度、氣溫、平均輻射溫度、生理等效溫度等資料，經驗證確定為可信任模型後，以驗證地點的模型修正後做為基礎方案模型，並依據研究變項組成 21 種方案，計算不同方案之熱舒適度。

研究結果發現行道樹種類、植栽綠帶數量、車道鋪面種類、人行道鋪面種類、鋪面含水狀態皆會影響行人的熱舒適。根據逐步迴歸分析，在中午時段(中午 12 點至下午 2 點)，鋪面含水狀態對 PET 降溫效果影響最大，其他依序為植栽 LAI 值、植栽綠帶數量、車道鋪面種類、人行道鋪面種類，可以發現，在最熱的時段，鋪面含水量會對環境造成最大的影響，若透水鋪面為田間含水量，配合高 LAI 的植栽，在中午時段將有最佳的降溫效益；而在傍晚時段(下午 4 點至下午 6 點)，鋪面含水狀態對 PET 降溫效果影響最大，其他依序為車道鋪面種類、植栽 LAI 值、人行道鋪面種類、植栽綠帶數量，可以發現，即使熱度減少，鋪面含水狀態還是會對環境造成很大的影響，而透水車道佔據街道大部分面積，多孔隙瀝青混

凝土其物理特性升溫降溫快速，在傍晚時段會對街道環境帶來明顯的降溫效益。

【關鍵字】 ENVI-met、生理等效溫度、透水性、葉面積指數、植栽綠帶



Abstract

Street greenery and paving permeable pavements have been separately confirmed that it can cut down on street temperature effectively. However, there are a few studies assessing synergistic cooling effect from the street greenery and paving permeable pavement. Investigating the effect of street greenery and permeable pavements on pedestrian thermal comfort, this study considered number of planting strips, leaf area index (LAI) of trees, water permeability of traffic lane and sidewalk, and the moisture content of pavement when developing alternative road structures that aims to make pedestrians a more satisfying thermal comfort. The ENVI-met V5 model, was used to simulate the thermal environment of sidewalks within the 21 scenarios.

Results demonstrated that number of planting strips, LAI of trees, water permeability of traffic lane and sidewalk, and the moisture content of pavement all affect PET. According to the stepwise regression analysis, the variable affect PET at noon the most are, in descending order, moisture content of pavement, LAI of trees, number of planting strips, water permeability of traffic lane, water permeability of sidewalk . And the variable affect PET in the evening the most are, in descending order, moisture content of pavement, water permeability of traffic lane, leaf area index (LAI) of trees, water permeability of sidewalk, number of planting strips. We found that moisture content of pavement has the most effect on PET in one day. When moisture content of pavement is field capacity and the LAI is high, the result create a comfortable walking experience for pedestrians.

【Keywords】ENVI-met ; Physiological Equivalent Temperature ; water permeability ; Leaf Area Index ; planting strips

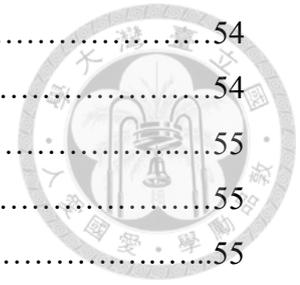


目 錄



第一章 緒論.....	1
第一節 研究動機.....	1
第二節 研究目的.....	3
第三節 研究步驟與流程.....	4
第二章 文獻回顧	7
第一節 街道綠化與微氣候	7
一、樹冠覆蓋	7
二、樹木種類	7
三、樹木種植間距	8
四、植栽綠帶數量	8
第二節 透水鋪面	9
一、透水鋪面定義	9
二、透水鋪面與都市環境.....	10
三、常見鋪面之縱斷面組成	11
第三節 人體熱舒適	13
一、環境與熱舒適	13
二、常見熱舒適評估方法	14
第四節 ENVI-met 相關軟體與應用	17
一、ENVI-met 軟體介紹.....	17
二、ENVI-met 軟體應用.....	19
第三章 研究方法.....	23
第一節 研究架構與內容	23
一、研究流程	23
二、研究假設	23
三、研究變項操作性定義	24
第二節 ENVI-met 模型設定與驗證.....	26
一、模型建立	26
二、模型驗證	29
第三節 街道綠化與透水鋪面模擬方案	40
一、方案發展過程與原則.....	40
二、方案說明	43
第四節 資料處理與分析	54

一、資料整理.....	54
二、研究假設檢定	54
第四章 研究結果.....	55
第一節 不同方案的模擬結果.....	55
一、各方案的 T_a 表現.....	55
二、各方案的 T_{mrt} 表現	62
三、各方案的 PET 表現	70
四、各方案在中午時段的 PET 剖面情況.....	80
五、各方案在傍晚時段的 PET 剖面情況.....	82
第二節 不同方案對行人熱舒適影響之分析.....	84
一、各方案在中午時段的平均 PET 降溫效果.....	84
二、各方案在傍晚時段的平均 PET 降溫效果.....	91
三、不同行道樹組成與鋪面含水情形對 PET 降溫影響之分析.....	98
行道樹組成與鋪面含水情形對 PET 降溫影響之分析.....	102
第三節 研究假設驗證.....	104
第五章 結論與建議.....	107
第一節 結論.....	107
一、不同行道樹組成與鋪面含水情形對行人熱舒適的影響程度.....	107
二、不同行道樹組成與鋪面含水情形對東西側行人熱舒適的影響...107	
三、天候狀態對行人熱舒適的影響.....	108
四、行道樹組成對行人熱舒適的影響.....	108
鋪面種類組合對行人熱舒適的影響.....	108
第二節 綜合討論.....	109
第三節 建議.....	111
一、都市道路規劃設計.....	111
二、後續研究建議.....	111
參考文獻	113



圖目錄

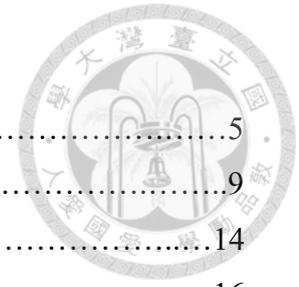


圖 1-1 研究流程圖.....	5
圖 2-1 透水鋪面形式之縱斷面示意圖	9
圖 2-2 PMV 與 PPD 關係圖	14
圖 2-3 臺灣地區 PET 對照圖	16
圖 3-1 鋪面含水狀態為永久凋萎點測點位置圖.....	29
圖 3-2 鋪面含水狀態為田間含水量測點位置圖	30
圖 3-3 鋪面含水狀態為永久凋萎點現地觀測儀器架設圖	31
圖 3-4 鋪面含水狀態為田間含水量現地觀測儀器架設圖.....	31
圖 3-5 鋪面含水狀態為田間含水量實際灑水情形.....	31
圖 3-6 含水狀態為永久凋萎點氣溫實測值與模擬值之逐時溫度圖.....	33
圖 3-7 含水狀態為永久凋萎點氣溫實測值與模擬值之驗證結果圖.....	33
圖 3-8 含水狀態為永久凋萎點平均輻射溫度實測值與模擬值之逐時溫度圖.....	34
圖 3-9 含水狀態為永久凋萎點平均輻射溫度實測值與模擬值之驗證結果圖.....	34
圖 3-10 含水狀態為永久凋萎點生理等效溫度實測值與模擬值之逐時溫度圖....	35
圖 3-11 含水狀態為永久凋萎點生理等效溫度實測值與模擬值之驗證結果圖....	35
圖 3-12 含水狀態為田間含水量氣溫實測值與模擬值之逐時溫度圖.....	36
圖 3-13 含水狀態為田間含水量氣溫實測值與模擬值之驗證結果圖.....	36
圖 3-14 含水狀態為田間含水量平均輻射溫度實測值與模擬值之逐時溫度圖....	37
圖 3-15 含水狀態為田間含水量平均輻射溫度實測值與模擬值之驗證結果圖....	37
圖 3-16 含水狀態為田間含水量生理等效溫度實測值與模擬值之逐時溫度圖....	38
圖 3-17 含水狀態為田間含水量生理等效溫度實測值與模擬值之驗證結果圖....	38
圖 3-18 方案發展流程.....	40
圖 4-1-1 同行道樹組成的平均 T_a 變化圖 (植栽綠帶為 0 之方案).....	57
圖 4-1-2 同行道樹組成的平均 T_a 變化圖 (植栽綠帶為 3 且為低 LAI 之方案)....	58
圖 4-1-3 同行道樹組成的平均 T_a 變化圖 (植栽綠帶為 3 且為高 LAI 之方案)....	58
圖 4-2-1 同鋪面種類組合的平均 T_a 變化圖(鋪面種類組合為車道不透水且人行道不透水之方案).....	60
圖 4-2-2 同鋪面種類組合的平均 T_a 變化圖(鋪面種類組合為車道不透水且人行道透水之方案).....	61
圖 4-2-3 同鋪面種類組合的平均 T_a 變化圖(鋪面種類組合為車道透水且人行道不透水之方案).....	61
圖 4-2-4 同鋪面種類組合的平均 T_a 變化圖(鋪面種類組合為車道透水且人行道透水之方案).....	62

圖 4-3-1 同行道樹組成的平均 T_{mrt} 變化圖 (植栽綠帶為 0 之方案).....	65
圖 4-3-2 同行道樹組成的平均 T_{mrt} 變化圖 (植栽綠帶為 3 且為低 LAI 之方案)...	65
圖 4-3-3 同行道樹組成的平均 T_{mrt} 變化圖 (植栽綠帶為 3 且為高 LAI 之方案)...	66
圖 4-4-1 同鋪面種類組合的平均 T_{mrt} 變化圖(鋪面種類組合為車道不透水且人行 道不透水之方案).....	68
圖 4-4-2 同鋪面種類組合的平均 T_{mrt} 變化圖 (鋪面種類組合為車道不透水且人行 道透水之方案).....	68
圖 4-4-3 同鋪面種類組合的平均 T_{mrt} 變化圖 (鋪面種類組合為車道透水且人行 道不透水之方案).....	69
圖 4-4-4 同鋪面種類組合的平均 T_{mrt} 變化圖 (鋪面種類組合為車道透水且人行 道透水之方案).....	69
圖 4-5-1 各方案不同時刻的平均 PET 變化圖 (植栽綠帶為 0 之方案).....	72
圖 4-5-2 各方案不同時刻的平均 PET 變化圖 (植栽綠帶為 3 且為低 LAI 之方案)	72
圖 4-5-3 各方案不同時刻的平均 PET 變化圖 (植栽綠帶為 3 且為高 LAI 之方案)	73
圖 4-6-1 同鋪面種類組合的平均 PET 變化圖(鋪面種類組合為車道不透水且人行 道不透水之方案).....	75
圖 4-6-2 同鋪面種類組合的平均 PET 變化圖 (鋪面種類組合為車道不透水且人行 道透水之方案).....	75
圖 4-6-3 同鋪面種類組合的平均 PET 變化圖 (鋪面種類組合為車道透水且人行 道不透水之方案).....	76
圖 4-6-4 同鋪面種類組合的平均 PET 變化圖 (鋪面種類組合為車道透水且人行 道透水之方案).....	76
圖 4-7-1 各方案之間的平均 PET 差值 (植栽綠帶數量與 LAI 高低所導致的平均 PET 差異).....	78
圖 4-7-2 各方案之間的平均 PET 差值 (鋪面含水狀態所導致的平均 PET 差 異).....	78
圖 4-7-3 各方案之間的平均 PET 差值 (鋪面種類組合所導致的平均 PET 差 異).....	79
圖 4-8-1 各方案中午時段(中午 12 點至下午 2 點)的平均 PET 剖面圖 (植栽綠帶 為 0 之方案).....	80
圖 4-8-2 各方案中午時段(中午 12 點至下午 2 點)的平均 PET 剖面圖 (植栽綠帶 為 3 且為低 LAI 之方案).....	81
圖 4-8-3 各方案中午時段(中午 12 點至下午 2 點)的平均 PET 剖面圖 (植栽綠帶 為 3 且為高 LAI 之方案).....	81
圖 4-9-1 各方案傍晚時段(下午 2 點至下午 6 點)的平均 PET 剖面圖 (植栽綠帶為 0 之方案).....	82
圖 4-9-2 各方案傍晚時段(下午 2 點至下午 6 點)的平均 PET 剖面圖 (植栽綠帶為 3 且為低 LAI 之方案).....	83

圖 4-9-3 各方案傍晚時段(下午 2 點至下午 6 點)的平均 PET 剖面圖 (植栽綠帶為 3 且為高 LAI 之方案).....	83
圖 4-10-1 同行道樹組成下的方案在中午時段(中午 12 點至下午 2 點)的平均 PET 降溫效果 (植栽綠帶為 0 之方案).....	86
圖 4-10-2 同行道樹組成下的方案在中午時段(中午 12 點至下午 2 點)的平均 PET 降溫效果 (植栽綠帶為 3 且為低 LAI 之方案).....	87
圖 4-10-3 同行道樹組成下的方案在中午時段(中午 12 點至下午 2 點)的平均 PET 降溫效果 (植栽綠帶為 3 且為高 LAI 之方案).....	87
圖 4-11-1 同鋪面種類組合下的方案在中午時段(中午 12 點至下午 2 點)的平均 PET 降溫效果 (鋪面種類組合為車道不透水且人行道不透水之方案).....	89
圖 4-11-2 同鋪面種類組合下的方案在中午時段(中午 12 點至下午 2 點)的平均 PET 降溫效果 (鋪面種類組合為車道不透水且人行道透水之方案).....	89
圖 4-11-3 同鋪面種類組合下的方案在中午時段(中午 12 點至下午 2 點)的平均 PET 降溫效果 (鋪面種類組合為車道透水且人行道不透水之方案).....	90
圖 4-11-4 同鋪面種類組合下的方案在中午時段(中午 12 點至下午 2 點)的平均 PET 降溫效果 (鋪面種類組合為車道透水且人行道透水之方案).....	90
圖 4-12-1 同行道樹組成下的方案在在傍晚時段(下午 4 點至下午 6 點)的平均 PET 降溫效果 (植栽綠帶為 0 之方案).....	93
圖 4-12-2 同行道樹組成下的方案在在傍晚時段(下午 4 點至下午 6 點)的平均 PET 降溫效果 (植栽綠帶為 3 且為低 LAI 之方案).....	93
圖 4-12-3 同行道樹組成下的方案在在傍晚時段(下午 4 點至下午 6 點)的平均 PET 降溫效果 (植栽綠帶為 3 且為高 LAI 之方案).....	94
圖 4-11-1 同鋪面種類組合下的方案在傍晚時段(下午 4 點至下午 6 點)的平均 PET 降溫效果 (鋪面種類組合為車道不透水且人行道不透水之方案).....	96
圖 4-11-2 同鋪面種類組合下的方案在傍晚時段(下午 4 點至下午 6 點)的平均 PET 降溫效果 (鋪面種類組合為車道不透水且人行道透水之方案).....	96
圖 4-11-3 同鋪面種類組合下的方案在傍晚時段(下午 4 點至下午 6 點)的平均 PET 降溫效果 (鋪面種類組合為車道透水且人行道不透水之方案).....	97
圖 4-11-4 同鋪面種類組合下的方案在傍晚時段(下午 4 點至下午 6 點)的平均 PET 降溫效果 (鋪面種類組合為車道透水且人行道透水之方案).....	97



表 目 錄



表 2-1 透水性鋪面之縱斷面組成建議類別	12
表 2-2 臺北市常見透水鋪面之縱斷面組成.....	12
表 2-3 ENVI-met 街道組成之人體熱舒適相關研究整理.....	21
表 3-1 模型各鋪面縱斷面組成.....	26
表 3-2 鋪面材料物理特性.....	27
表 3-3 ENVI-met 基本參數設定.....	28
表 3-4 初始氣溫集相對濕度逐時數值表.....	28
表 3-5 實測值與模擬值驗證結果表.....	33
表 3-6 方案基本參數設定.....	40
表 3-7 方案初始氣溫集相對濕度逐時數值表.....	41
表 3-8 方案內容表.....	42
表 4-1 各方案所有人行道範圍之 T_a 表.....	56
表 4-2 各方案所有人行道範圍之 T_{mrt} 表.....	63
表 4-3 各方案所有人行道範圍之 PET 表.....	70
表 4-4 各方案在中午時段(中午 12 點至下午 2 點)之 PET 降溫效果表.....	85
表 4-5 各方案在傍晚時段(下午 4 點至下午 6 點)之 PET 降溫效果表.....	90
表 4-6 中午時段植栽綠帶數量對 PET 降溫的 t 檢定分析結果表.....	98
表 4-7 傍晚時段植栽綠帶數量對 PET 降溫的 t 檢定分析結果表.....	98
表 4-8 中午時段植栽 LAI 值對 PET 降溫的 t 檢定分析結果表.....	99
表 4-9 傍晚時段植栽 LAI 值對 PET 降溫的 t 檢定分析結果表.....	99
表 4-10 中午時段車道鋪面種類對 PET 降溫的 t 檢定分析結果表.....	99
表 4-11 傍晚時段車道鋪面種類對 PET 降溫的 t 檢定分析結果表.....	100
表 4-12 中午時段人行道鋪面種類對 PET 降溫的 t 檢定分析結果表.....	100
表 4-13 傍晚時段人行道鋪面種類對 PET 降溫的 t 檢定分析結果表.....	100
表 4-14 中午時段鋪面含水狀態對 PET 降溫的 t 檢定分析結果表.....	101
表 4-15 傍晚時段鋪面含水狀態對 PET 降溫的 t 檢定分析結果表.....	101
表 4-16 中午時段行道樹組成與鋪面含水情形對 PET 降溫的迴歸分析結果表..	103
表 4-17 傍晚時段行道樹組成與鋪面含水情形對 PET 降溫的迴歸分析結果表...	103
表 4-18 研究假設驗證結果表.....	105



第一章 緒論



第一節 研究動機

根據調查，近年來全球暖化加劇，臺灣增溫趨勢為全球的兩倍，高溫日數逐年增加，低溫日數逐年減少，其中臺北測站的高溫日數增加尤其明顯。夏季中午烈日當頭，街道熱氣難以耗散，臺北盆地全區屬高溫炎熱之狀態，都市高溫不退，行人在都市街道行走感到不舒適，極端高溫可能造成熱衰竭、熱痙攣、熱昏厥和汗疹等病症，嚴重時更可能導致心血管、腦血管及呼吸性等病因所造成的猝死(O'Neill & Ebi, 2009)。為解決臺北市高溫，民間單位與政府機關提出了相應對策：

一、環境品質文教基金會於民國 109 年向臺北市政府提出「臺北樹都倡議」，根據美國威斯康辛大學麥迪遜分校研究顯示，60 至 90 公尺區間的城市街區需要有 40% 以上的樹冠覆蓋率，才能抵銷柏油路發散的高溫(Ziter, Pedersen, Kucharik, & Turner, 2019)，環品會藉此推動臺北市植樹計畫，期待透過增加樹木覆蓋率來緩解都市高溫現象。

二、臺北市工務局自民國 104 年起提出「鋪設透水性鋪面計畫」，鋪設透水鋪面能使雨水下滲至土壤，增加基地保水亦涵養地下水，儲留於土壤中的水分能透過透水鋪面的孔隙蒸發於大氣中，使鋪面表溫降低來調節都市環境微氣候，達到降低都市熱島效應之功能，以提供民眾一個舒適的都市步行環境。

依據政策與計畫改善過後的街道，行人熱舒適度是否獲得相對的改善是本研究探討的重點。過去針對街道綠化對都市道路微氣候的影響，多探討樹冠覆蓋率、樹木葉面積指數、樹木種植間距對於氣溫和行人熱舒適度的影響。在樹冠覆蓋率方面，60 至 90 公尺區間的城市街區需要有 40% 以上的樹冠覆蓋率，才能大幅減少日間高溫(Ziter et al, 2019)；在樹木葉面積指數方面，葉面積密度越高，行人熱舒適度越佳(Helletsgruber et al, 2020; Lin, Cho, & Hsieh, 2021)；而在樹木種植間距方面，樹木種植間距越小，街道氣溫、地表熱輻射降低幅度越大(Wang & Akbari.,

2016; Lee, Mayer, & Kuttler, 2020)。

而針對透水鋪面對都市道路微氣候的影響，學者曾說明鋪面熱輸出、透水性能影響街道微氣候。在鋪面透水性方面，透水鋪面確實能有效改善表面溫度(Cheng et al., 2019)，也能改善氣溫與行人熱舒適(Huang & Chen, 2020; Battisti, Laureti, Zinzi, & Volpicelli, 2018)，且多層的透水鋪面比起單層的透水鋪面更能儲留水分，其表面溫度較低(Ferrari, Kubilay, Derome, & Carmeliet, 2020)。

在過去研究中，可發現學者大部分僅探討透水鋪面的有無對氣溫及熱舒適的影響，尚未有學者針對鋪面含水情形進行行人熱舒適的量化並加以討論。而大部分研究僅各別探討街道綠化、透水鋪面與行人熱舒適的關係，較少評估街道綠化與透水鋪面兩者之間的協同關係，在實際的街道規劃上有較多的限制。因此本研究將以行道樹組成、鋪面含水情形視為影響道路微氣候的街道綠化、透水鋪面因素，探討其對行人熱舒適度的影響。

本研究以臺北市透水鋪面實施路段為研究對象，利用 ENVI-met Version5 微氣候模擬軟體計算不同街道綠化與透水鋪面之人體熱舒適度。藉由文獻回顧及現地調查了解街道綠化與透水鋪面對街道微氣候的影響，以及臺北市行道樹組成、透水鋪面種類差異。經由現地觀測資料、驗證輸出模型為可信賴模型後，進行不同街道綠化與透水鋪面模擬方案的人體熱舒適度計算，量化不同行道樹組成、鋪面含水情形下的行人熱舒適度，提供做為未來都市街道規劃設計之參考依據。

第二節 研究目的

本研究主要目的為探討不同街道綠化與透水鋪面對行人之人體熱舒適的影響，研究目標包含：

- 一、 探討不同行道樹組成對行人熱舒適之影響。
- 二、 探討不同鋪面含水情形對行人熱舒適之影響。
- 三、 探討不同行道樹組成與不同鋪面含水情形協同性對行人熱舒適之影響。



第三節 研究步驟與流程

本研究首先根據研究動機與目的進行相關文獻的收集與整理，確認變項定義、變項之間的關係與測量方式，再擬定研究架構、研究假設，並透過文獻與實際調查擬定街道綠化與透水鋪面模擬方案，最後進行電腦模擬與資料分析，並提出研究結果與建議。

本研究分為五個部分，研究流程如圖 1-1 所示。

一、 緒論

主要說明本研究之研究動機、研究目的、研究步驟與流程。

二、 文獻回顧

主要文獻包含街道綠化與微氣候、透水鋪面、人體熱舒適、ENVI-met 軟體相關研究與應用，作為研究架構、研究假設擬定之依據。

三、 研究方法

本部分依據研究動機、研究目的與文獻回顧之結果擬定研究方法，內容包含建立研究架構、設定與驗證 ENVI-met 模型、擬定街道綠化與透水鋪面模擬方案及處理與分析資料等。

四、 研究結果

主要說明街道綠化與透水鋪面模擬方案之分析結果，並說明研究假設驗證的結果。

五、 結論與建議

本部分包含研究結果重點摘要及主要結論，並依據研究結果提出都市街道規劃建議與後續研究方向。

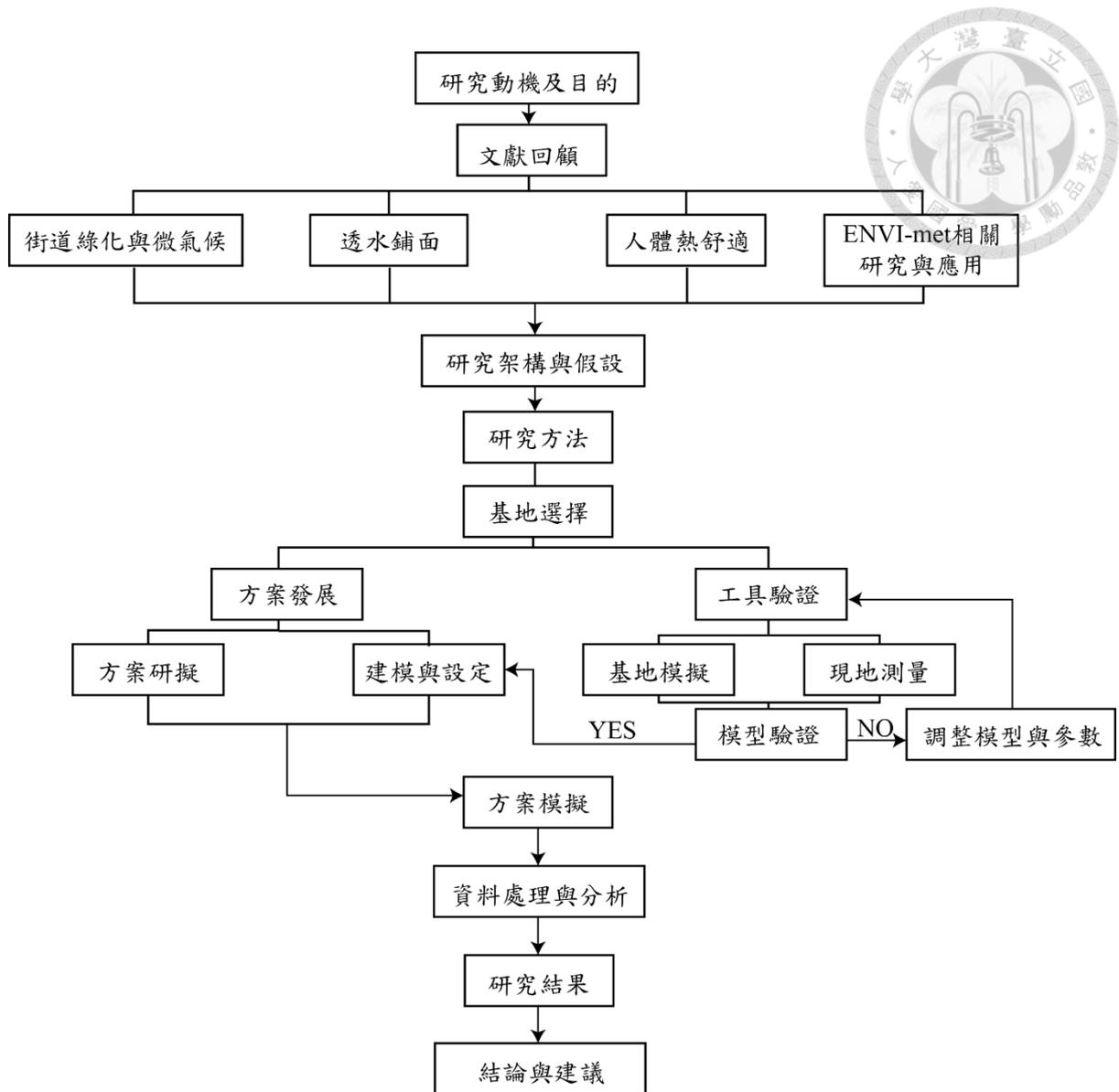


圖 1-1 研究流程圖



第二章 文獻回顧



第一節 街道綠化與微氣候

在過去研究中可發現街道綠化潛在地影響了街道微氣候。Chow 與 Brazel (2012) 認為行道樹所形成的樹蔭，能減緩都市熱島效應，改善街道高溫與行人熱舒適度。Lobaccaro 與 Acero (2015) 的研究發現，在街區裡不管是鋪植草地或是種植樹木皆能改善行人熱舒適度。而 Lee 等人 (2016) 認為在街區裡種植樹木比單純鋪植草地更能有效改善街道高溫與行人熱舒適度。Tsoka, Tsikaloudaki, 與 Theodosiou (2018) 則認為行道樹樹葉形成遮蔭、吸收太陽輻射，能減緩地表溫度與地表熱輻射，且樹木與草地種植介質為透水性，水分蒸發過程會帶走地表熱量，能減緩地表溫度與地表熱輻射。

整理過去研究可發現，種植樹木確實能有效減緩街道溫度，因此以下將針對行道樹組成之特性，進一步個別討論：

一、 樹冠覆蓋

樹冠覆蓋指的是樹冠垂直投影所佔地面之面積，樹冠覆蓋率則是指樹冠垂直投影所佔地面之比例。Katayama 等人 (1993) 在過去研究已指出樹冠覆蓋率越大，降溫效益越佳；而 Simpson (1998) 則估計樹冠覆蓋率每增加 1%，中午的最高氣溫就能降低 0.04–0.2°C。

近年來，Sun (2011) 的研究指出，在臺中，當道路的樹冠覆蓋率大於 35%時，可降溫約 0.55°C；Ng 等人 (2012) 的研究發現，在香港，30%的樹冠覆蓋率，能有效降低街區日間高溫；Ziter 等人 (2019) 的研究則發現，60 至 90 公尺區間的城市街區需要有 40%以上的樹冠覆蓋率，才能大幅減少日間高溫。

二、 樹木種類

樹木種類指的是樹木的分類，過去研究常依據樹木的茂密程度，以樹木之葉面積密度 (LAD) 或葉面積指數 (LAI) 將其進行分類。葉面積密度是一定體積內植物葉面積總和與該體積之比，而葉面積指數所指的是一定土地面積上植物葉面

積總和與該土地面積之比。

Shahidan 等人 (2010) 的研究結果指出，植栽數量較多、樹木冠層密度較密時葉面積指數愈高，可以有效改善環境微氣候。Wang 與 Akbari (2016) 的研究指出葉面積密度越高，街區內的氣溫、地表溫度與地表熱輻射能明顯降低；Helletsgruber 等人 (2020) 認為葉面積密度越高，行人熱舒適度越佳；Lin 等人 (2021) 則提出葉面積指數越高，植栽冠層枝葉密度越高，有效阻擋太陽輻射，行人熱舒適度越佳。

三、 樹木種植間距

樹木種植間距指的是樹幹中心與樹幹中心之間的直線距離。Huynh 與 Eckert (2012) 的研究發現樹木種植間距減小且具連續性，能有效改善街區內的氣溫和地表溫度。Wang 與 Akbari (2016) 則發現樹木種植間距越小，街道氣溫、地表熱輻射降低幅度越大；Lee 等人 (2020) 的研究也發現當樹木種植間距減少，街道氣溫、地表熱輻射降低幅度增大。

四、 植栽綠帶數量

植栽綠帶數量指的是道路中植栽設施帶的數量。Chang 與 Fang (2019) 的研究提出，和沒有植栽綠帶的道路相比，植栽綠帶數量越多，環境氣溫降低，環境相對溼度則提高；Lin 等人 (2021) 曾提出街道中，植栽綠帶數量越多，能提供更多遮蔭，環境氣溫越低。但研究也發現，若增設中央分隔島為植栽綠帶，因為其位於車道中間，而不是直接給予行人遮蔭，所以對於改善行人的熱舒適效果並不明顯。

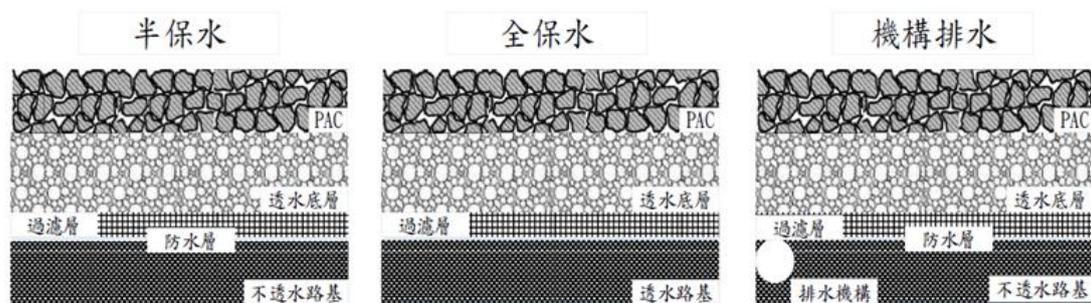


第二節 透水鋪面

一、 透水鋪面定義

依據行政院公共工程委員會施工綱要規範定義，透水鋪面為「使雨水通過人工鋪築之多孔性鋪面，直接滲入路基，而具有使水還原於地下之性能。」；而根據日本 2007 年提出的透水性鋪裝技術指南，透水鋪面為「能使雨水通過面層、底層甚至路基以下之鋪面結構。」

透水鋪面依照其水分滲透路徑，可分類為路基浸透型，即全保水鋪面，和暫時儲留型，又稱半保水鋪面。其中，路基浸透型能使雨水透過鋪面滲入路基達到抑制逕流及挹注地下水的效果，適用於未經穩定處理也具有一定支撐力，且浸水不會造成承载力驟降的地質環境。而暫時儲留型將雨水暫存在鋪面內部以抑制逕流產生，路基與底層間鋪設防水層以防止水分滲入路基，適用於路基需經穩定處理的地質環境，如配合滲透、儲存設施或排水設施來排除暫留於鋪面內部之水分，則稱為機構排水型（內政部營建署，2015）。



(內政部營建署，2015)

圖 2-1 透水鋪面形式之縱斷面示意圖

在過去研究中，可發現在鋪面透水性方面，透水鋪面確實能有效改善道路表面溫度、氣溫與行人熱舒適(Huang & Chen, 2020; Cheng et al., 2019; Battisti et al., 2018)，且多層的透水鋪面比起單層的透水鋪面更能儲留水分，其表面溫度較低(Ferrari, Kubilay, Derome, & Carmeliet, 2020)。從過去研究中發現學者著重探討透水鋪面的有無對氣溫及熱舒適的影響，尚未有學者針對街廓尺度之透水鋪面種類組合對行人熱舒適的影響進行討論。

二、 透水鋪面與都市環境

由 Pomerantz 等人 (2000) 提出的都市表面的輻射平衡方程式可以得知，地表升溫主要受到太陽輻射能影響，當系統所吸收的輻射能與其放射的輻射能相等時，此現象即稱為輻射平衡。若改變都市地表的反照率、發射率、蒸發散潛熱，將連帶影響環境可感熱，都市表面的輻射平衡方程式為：

$$(1 - a)I + Q_a = \varepsilon\sigma T_s^4 + h_c(T_s - T_a) + \lambda E + G$$

式 1

a ：表面反照率 (Surface Albedo)

I ：表面總入射輻射量 (Total Solar Radiation)

Q_a ：人造熱源 (Anthropogenic Heat Flux)

ε ：表面發射率 (Emissivity of the Surface)

σ ：Stefan-Boltzmann Constant ($5.67 \times 10^{-8} \text{w/m}^2\text{k}^4$)

T_s ：表面溫度 (Surface Temperature)

h_c ：熱對流係數 (Convection Coefficient)

T_a ：氣溫 (Air Temperature)

λE ：蒸發散潛熱 (Latent Heat Flux)

G ：地表熱通量 (Ground Heat Flux)

反照率指的是物體反射太陽輻射的量與投射到物體上面的總輻射量之比，其值介於 0-1 之間。反射率若為 0，代表物體表面完全吸收太陽輻射；反射率若為 1，則代表物體表面完全反射太陽輻射，都市表面使用高反射率材質可以降低對太陽輻射之吸收，使得都市表面溫度降低。發射率用於衡量物體表面輻射熱能的能力，其值介於 0-1 之間，都市熱島效應探討的範圍與物體表面發射率的波長介於 5-50 μm 的紅外線區間，高發射率的物體其輻射熱能的速率較快，有利降低夜間的都市熱島效應。不同的表面材質與植生狀況的蒸發散速率不同，蒸發散速率大利於潛熱吸能以降溫，故鋪設透水性的鋪面與種植良好的植被均有利於改善都市熱島效應。

Tsoka 等人 (2018) 在研究中曾提出透過改變鋪面之反照率、發射率、透水性，可以影響環境可感熱，藉以降低環境溫度。在過去研究中，已經證實提高街道鋪面面層之反射率能降低環境溫度、改善行人熱舒適 (Peron et al, 2015; Santamouris et al, 2012; Makropoulou 2017)，Santamouris 等人 (2012) 在研究中也提出環境溫度能隨著街道鋪面面層之發射率的提高而降低，而 Battisti 等人 (2018) 研究結果指出建設道路透水鋪面能有效改善氣溫與行人熱舒適度。

Stempihar 等人 (2012) 的研究結果更進一步指出，中午的時候，乾燥的多孔隙瀝青(透水)相較於密集配瀝青(不透水)反而會有增溫的現象，其來自於較低的反射率、粗糙的表面捕獲了更多的空氣和熱量以及較低的導熱率，這使得車道表面溫度持續提升；而 Cheng 等人 (2019) 在道路實測中，也發現持續乾旱的日子中，多孔隙瀝青(透水)表面在白天有升溫的現象。

三、 常見鋪面之縱斷面組成

透水鋪面之縱斷面組成當中，通常包含了面層、調整砂層、底層、過濾層、防水層、路基等層面。在設計透水鋪面時，除了考量其透水功能外，還需維持基本乘載力，工程上常用 AASHTO 設計法和透水功能性設計法計算承載力所需厚度。其中 AASHTO 設計法首先依據基地之基層土壤性質、周邊排水設施高層決定透水性鋪面類別，再由材料強度、路基水力傳導係數、孔隙率、連續孔隙率、交通量、計畫雨水處理量決定鋪面厚度。而透水功能性設計法則是利用計畫雨水處理量決定厚度，再利用各層材料間之孔隙率及雨水暫存量進行厚度計算。因此會以每個基地的路況差異調整成適宜的透水性鋪面之縱斷面組成 (內政部營建署，2015)。

為了訂定透水性鋪面之縱斷面組成的實務公定版本，內政部營建署在 2015 年的市區道路透水性鋪面使用手冊提出透水性鋪面之縱斷面組成建議類別，而林宗輝等人依據臺北市實務鋪設透水鋪面的工法於 2017 年提出了臺北市常見透水鋪面，整理如表 2-1、表 2-2。

表 2-1 透水性鋪面之縱斷面組成建議類別

透水性鋪面類別	車道		人行道
	全保水	半保水	半保水
面層材料	多孔隙瀝青混凝土	多孔隙瀝青混凝土	透水水泥混凝土地磚
面層材料厚度	15cm	15cm	8cm
調整砂層	-	-	透水砂漿
調整砂層厚度	-	-	3cm
底層材料	透水混凝土/ 低密度透水混凝土 /C-40 碎石級配	透水混凝土/ 低密度透水混凝土 /C-40 碎石級配	透水混凝土/低密度透 水混凝土/C-40、C- 30、C-20 碎石級配
底層材料厚度	45cm	45cm	10cm
過濾層材料	粒狀材料/不織布	粒狀材料/不織布	粒狀材料/不織布
過濾層材料厚度	5cm	5cm	5cm
防水層	-	防水布/ 密集配瀝青混凝土	防水布/ 密集配瀝青混凝土
防水層厚度	-	依狀況而定	依狀況而定
路基特性	透水	不透水	不透水

(內政部營建署，2015)

表 2-2 臺北市常見透水鋪面之縱斷面組成

透水性鋪面類別	車道	人行道
	半保水	全保水
面層材料	多孔隙瀝青混凝土	透水水泥混凝土地磚
面層材料厚度	5cm	6cm
調整砂層	-	透水砂漿
調整砂層厚度	-	2cm
底層材料	密集配瀝青混凝土	透水混凝土
底層材料厚度	15cm	15cm
防水層	C-40 碎石級配	-
防水層厚度	30cm	-
路基特性	不透水	透水

(林宗輝等人，2017)

第三節 人體熱舒適

一、 環境與人體熱舒適

美國冷凍空調協會 (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, ASHRAE) 和國際標準組織 (International Organization for Standardization, ISO) 分別提出對熱舒適的定義。其中，美國冷凍空調協會提出，熱舒適是指人們對於其所處的热環境感到滿意的心理狀態 (ASHRAE, 2004)；而國際標準組織則認為熱舒適為人們對其當下所處的热環境感到滿意時的狀況，並經由詢問以得知使用者對環境的舒適性評價 (ISO, 2004)。

熱舒適受氣候和人體兩大條件影響，氣候條件包含氣溫、風速、相對溼度、輻射溫度，人體條件則包含活動新陳代謝產熱量、衣著量 (ASHRAE, 2004)。當外部環境氣候變動，人與環境的热平衡關係將受到影響，進而影響了人體舒適度。無論何時，人體和環境一直在進行熱交換，也就是人體的新陳代謝產熱率和人對環境的散熱率之間的平衡關係，當此關係達平衡時，人的體溫則會呈現穩定 (Mayer & Höpfe, 1987)。

在一個穩定的環境下，人體與環境間的热平衡能以下列公式表示：

$$H + R + C + E_D + E_{Res} + E_{Rel} + E_{sw} + F = S$$

式 2

H: 新陳代謝產生的內部熱通量 (W/m^2)

R: 人體淨輻射量 (W/m^2)

C: 對流熱通量 (W/m^2)

E_D : 水蒸氣蒸發產生的潛熱通量 (W/m^2)

E_{Res} : 呼吸作用產生的潛熱通量 (W/m^2)

E_{Rel} : 呼吸作用產生的熱通量 (W/m^2)

E_{sw} : 人體出汗產生的潛熱通量 (W/m^2)

F: 從飲食獲取或流失的熱通量 (W/m^2)

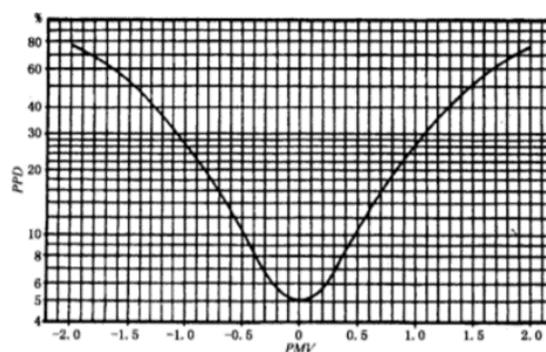
S: 人體內部的蓄熱量 (W/m^2)

當 $S=0$ 時，代表人體內部產生的熱通量和從環境中獲得的熱通量，與人體流失到環境中的熱通量相等，人的體溫呈現穩定。

二、 常見熱舒適評估方法

許多學者針對熱舒適提出評估指標，例如 Franger 分別於 1970、1982 年提出人體舒適指標(PMV)、人體舒適不滿意比例(PPD)，Gagge 則在 1986 年提出新標準有效溫度(SET*)，Höppe 在 1999 年提出生理等效溫度(PET)。PMV、PPD 主要表達人體對於熱環境的感受，而 SET*、PET 則呈現實際熱環境的氣候狀況。

PMV、PPD 指標為 Franger 在 1970 年根據人與室內環境的熱平衡關係所建構的理論模式，其適用於室內環境中，PMV 指標將人體對環境的主觀感受分為冷(-3)、涼(-2)、微涼(-1)、適中(0)、微暖(+1)、暖(+2)、熱(+3)七個等級，用來預測室內熱環境中人的心理反應。但是個人生理反應有時會與心理反應產生差距，即使在舒適的狀態下還是會感到不滿意，所以 PPD 指標用來評估人對於熱環境的不滿意程度，並以受測人數的百分比進行計算。PMV 與 PPD 關係圖如圖 2-2 所示，根據國際標準組織 ISO7730 的標準，當 PMV 值介於-0.5 至+0.5 之間時，PPD 會小於 10%，為人感到最舒適的情況(Fanger, 1982)。



(Fanger, 1982)

圖 2-2 PMV 與 PPD 關係圖

新標準有效溫度 SET* 指標則由 Gagge 於 1986 年提出，SET* 是根據人體與環境的熱傳導過程，以動態兩點模型來推算人體對環境反應的指標。其假設受試者位於一個相對溼度 50% 且平均輻射溫度=氣溫的等溫環境，並穿著 0.6clo 的標準化服裝，代謝量為 1.0met。此模型包含兩組熱平衡公式，其熱平衡方程式如下：

$$S_{cr} = M + W - (C_{res} + E_{res}) - (T_{cr} - T_{sk}) \times (5.28 + 1.163 \times skbf)$$

$$S_{sk} = (T_{cr} - T_{sk}) \times (5.28 + 1.163 \times skbf) - (C + R + E_{sk})$$



式 3

S_{cr} : 體核點的蓄熱速率 (W/m^2)

S_{sk} : 皮膚點的蓄熱速率 (W/m^2)

M : 基礎代謝率 (W/m^2)

W : 對外有效做功率 (W/m^2)

C_{res} : 呼吸作用中對流熱損失的速率 (W/m^2)

E_{res} : 呼吸作用中蒸發熱損失的速率 (W/m^2)

T_{cr} : 體核點溫度 ($^{\circ}C$)

T_{sk} : 皮膚點溫度 ($^{\circ}C$)

$skbf$: 皮膚表層血流量 (L/hm^2)

C : 皮膚對流熱損失 (W/m^2)

R : 皮膚輻射熱損失 (W/m^2)

E_{sk} : 皮膚總蒸發熱損失 (W/m^2)

$$S_{cr} = \frac{(1 - \alpha)mc_{p.b} \left(\frac{dt_{cr}}{d\theta} \right)}{A_D}$$

$$S_{sk} = \frac{\alpha mc_{p.b} \left(\frac{dt_{sk}}{d\theta} \right)}{A_D}$$

式 4

α : 皮膚佔體重之分數 (*fraction*)

m : 體重 (kg)

$c_{p.b}$: 人體特定的熱容量 (KJ/kg)

θ : 時間 (s)

A_D : 體表面積 (m^2)

生理等效溫度 PET 由 Höppe 在 1999 年提出，近年來常被用於戶外熱舒適度研究中，其理論基礎是根據 MEMI 能量平衡方程式建立，定義人在室外環境中當體核溫度、皮膚溫度與環境達成熱平衡時，該處溫度相當於典型室內環境中的氣溫，而其典型室內環境之設定為相對溼度 50% 且平均輻射溫度=氣溫、水蒸氣壓為 12.5hPa、風速為 0.1m/s，而受試者之衣著量為 0.9clo，代謝量為 1.4met。此模型包含三個熱平衡公式，其一為身體總能量公式(式 2)，另外兩個熱平衡方程式如下：

$$F_{cs} = v_b \times \rho_b \times C_b \times (T_{cr} - T_{sk})$$

$$F_{sc} = \left(\frac{1}{I_{cl}}\right) \times (T_{sk} - T_{cl})$$

式 5

F_{cs} : 從體核到體表的熱通量 (W/m^2)

F_{sc} : 從體表到衣服的熱通量 (W/m^2)

v_b : 從體核到體表的血流量 ($l s^{-1} m^{-2}$)

ρ_b : 血液密度 (kg/l)

C_b : 比熱 ($WsK^{-1}kg^{-1}$)

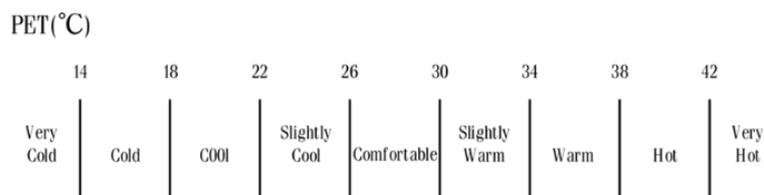
T_{cr} : 體核點溫度 ($^{\circ}C$)

T_{sk} : 皮膚點溫度 ($^{\circ}C$)

T_{cl} : 衣服點溫度 ($^{\circ}C$)

I_{cl} : 服裝耐熱性 (Km^2W^{-1})

而 Lin 與 Matzarakis (2008) 曾針對台灣地區的室外環境做熱舒適度調查，歸納整理出臺灣民眾在室外空間覺得舒適的範圍介於 PET 26-30 $^{\circ}C$ 之間。



(Lin & Matzarakis, 2008)

圖 2-3 臺灣地區 PET 對照圖



第四節 ENVI-met 相關研究與應用

一、 ENVI-met 軟體介紹

本研究使用微氣候模擬軟體 ENVI-met 模擬不同街道綠化與基地保水方案的氣溫和熱舒適度表現。ENVI-met 是由德國學者 Michael Bruse 於 1997 年開發的微氣候模擬軟體，以流體力學和熱力學作為基礎，用來模擬都市環境中建築表面、植被、土層、空氣之間的交互關係。ENVI-met GmbH 提出了 ENVI-met 微氣候模擬軟體主要的計算變量包含了風速、風向、空氣溫度、土壤溫度、空氣濕度、土壤濕度、輻射通量與顆粒汙染分布等。ENVI-met Version5 可模擬區域的網格數量 X 軸、Y 軸和 Z 軸皆無限制，水平解析度可設定 0.5 至 10 公尺之間，解析度代表模擬網格單元的寬度，解析度越小表示模擬的網格越精細，解析度越大則表示模擬得網格越粗糙。其應用領域涵蓋都市計劃、建築設計與材料分析等，能預測室內耗能、室外環境微氣候、人體熱舒適度以及空氣品質評估，目前已廣泛應用於都市道路、校園尺度等微氣候模擬 (ENVI-met GmbH, 2022)。

以下，根據 ENVI-met 操作流程，從建立模型、計算模型到模型呈現總共分為 7 個部分 (ENVI-met GmbH, 2022)：

(一) Headquarter

ENVI-met 微氣候模擬軟體的 Headquarter 負責管理數值設定、模型編輯、模型模擬、模型呈現、附加軟體等介面，在 Headquarter 的數值設定介面中，包含了管理 Project 和確立 Workplace、管理 Database、Albero、管理 Forcing 等功能選項，而在 Headquarter 的主功能介面中，則包含了編輯功能的 Monde、Spaces，模擬功能的 ENVI-guide、ENVI-core，模型呈現功能的 Leonardo，以及附加軟體 BIO-met。藉由 Headquarter 所提供的各功能選項，能完成一連串的工作流程。

(二) Creating Workspace

ENVI-met 微氣候模擬的首要工作流程即是管理 Project 和確立 Workplace。分類不同的 Project，可以藉此將不同的 Project 連接到相對應的 Database、Albero

和 Forcing，當後續調整數值設定時，各 Project 可以獨立作業且不會互相影響，而確立 Workplace 則是確認各元素、資料的儲存和輸出位置。



(三) Database Logic

探討 Database 的建立邏輯，可以發現 Database 分成系統選項、使用者選項以及 Project 選項，系統選項指的是系統本身創建好的參數預設值，如常見的壤土、砂土、瀝青、紅磚、玻璃等，而使用者選項則是使用者可以自己創造出特定的材質參數，且能廣用於各 Project 之中，而 Project 選項則是僅能用於特定的 Project 之中。

(四) Database Manager

設定 Database 時，需先選定指定的 Project 再開始進行調整。Database 可以分成土壤介質、土壤剖面、地被、牆壁及屋頂、牆壁及屋頂結構、牆壁及屋頂綠化、簡易裝置、污染源等類別。

在土壤介質中，可以調整土壤種類、飽和含水量、田間含水量、永久凋萎點、水勢、水力傳導係數、熱容、熱導率等參數；土壤剖面可以配置各深度的土壤介質，並且可以調整土壤表面的反射率、發射率、澆灌；地被可以調整葉片類型、葉面反射率、葉面透光率、植栽高度、植栽 LAD、根系深度；牆壁及屋頂可以調整材質表面吸收率、透射率、反射率、發射率、比熱、熱傳導係數、密度；牆壁及屋頂結構可以配置牆壁及屋頂的厚度以及材質組合，並且可以調整表面粗糙度；牆壁及屋頂綠化可以配置牆壁及屋頂的表面植栽；簡易裝置可以配置遮陽板或是磚牆；污染源則可以考慮交通工具產生的污染物。

(五) Design with Spaces

設定完 Database 的材質和元素後，下一階段即進入空間配置。首先創建一個新的模擬區域，可以設定模擬區域的經緯度、指北、海拔高度等資訊，並設定網格數量和網格大小。接下來即可依照在 Database 設定好的元素繪製空間模型，模型可以在 2.5D 和 3D 的維度中轉換。

(六) Simulation

在進行微氣候模擬前，需透過 ENVI-guide 建立一個模擬的檔案，其中需輸入模擬日期與模擬時間，並匯入欲模擬之空間模型。接下來可以進一步選擇模擬的天氣型態，Simple Forcing 模式中需輸入 24 小時的氣溫、相對溼度、初始風速、初始風向、地表粗糙度、初始雲量等資訊，並可額外加入土層、建物、輻射、植栽等初始狀態設定。在建立好模擬檔案之後，即可透過 ENVI-core 進行微氣候模擬，模型輸出時間長短依據模型大小、模擬時長以及 Database 設定複雜程度有所不同。

(七) Analyse with Leonardo

模型可以分別輸出 atmosphere、buildings、radiation、soil、surface 等不同微氣候面向的資料夾，也可以進一步以 atmosphere 資料夾的資料，透過附加軟體 BIO-met 計算出人體熱舒適。Leonardo 可以將微氣候結果圖像化，並透過 Excel 來顯示各時段的模擬數值。

二、 ENVI-met 軟體應用

都市化導致都市氣溫升高，連帶影響了室外熱舒適度。學界為了建立因應策略，開始利用數值模擬工具進行都市微氣候研究。Tsoka 等人 (2018) 針對 52 項 ENVI-met 微氣候模擬研究進行綜合回顧，從中可以發現過去學者們使用 ENVI-met 模擬都市樹木配置、綠地規劃、屋頂花園、鋪面熱輸出對街道微氣候的影響已相當成熟。

過去有許多學者使用 ENVI-met 來評估樹木配置與綠地規劃對微氣候的影響，Chow 與 Brazel (2012) 評估了區域尺度下，都市公園綠地、樹木覆蓋面積及分佈對熱舒適的影響，並以氣溫與 T_{mrt} 來呈現室外熱舒適度；Lee 等人 (2016) 評估了街區尺度下，樹木、綠地等不同覆蓋面積下對熱舒適的影響，且以生理等效溫度作為人體熱舒適度的依據；而 Lin 等人 (2021) 則是研究在街道尺度下，道路方位走向、植栽綠帶數量、植栽種類對行人熱舒適的影響，並以生理等效溫度作

為室外熱舒適度的參考。

最近幾年，也開始有學者使用 ENVI-met 來評估鋪面熱輸出對微氣候的影響，Peron 等人 (2015) 在區域尺度下，將都市不透水表面轉換為透水綠地、增設綠屋頂，並以空氣溫度來評估改善後的街區對行人熱舒適的影響；Battisti (2018) 在街區尺度下，以生理等效溫度做為室外熱舒適度參考的依據來評估透水鋪面、高反射性鋪面、樹木、綠地等不同覆蓋下對熱舒適的影響；而 Huang 與 Chen (2020) 則是分別以新標準有效溫度和生理等效溫度探討都市街區之透水鋪面、樹木、綠地等不同覆蓋面積、組合下對熱舒適的影響。

為了確認 ENVI-met 模擬的準確度，通常在進行方案模擬前會選擇一個地點進行實測驗證，以找出模型的最佳參數設定，使模型結果與實測結果相近。在過去街道熱舒適的相關研究中，驗證項目多為空氣溫度，並觀察其逐時折線圖是否和實測結果擁有相同趨勢， R^2 值皆達 0.73 以上，僅 Lee 等人 (2016) 的研究同時驗證了氣溫、平均輻射溫度、生理等效溫度等參數，而 Lin 等人 (2021) 則是驗證了氣溫和平均輻射溫度，並進一步驗證其準確度。

表 2-3 ENVI-met 街道組成之人體熱舒適相關研究整理

年份	作者	研究目的	研究地點	熱舒適指標	模擬面積/ 網格大小	驗證項目/ 驗證方法
2021	Lin et al	量化街道走向、綠帶 數量、植栽種類對行 人熱舒適的影響	臺灣 臺北	PET	100*100(m)/ 100*100*30	T _a 、T _{mrt} / 逐時折線圖 T _a :R ² =0.77、d=0.91 T _{mrt} : R ² =0.81、 d=0.94
2020	Huang & Chen	評估透水鋪面、樹 木、綠地等不同覆蓋 下對熱舒適的影響	臺灣 高雄	SET*/PET	550*650(m)/ 55*65*40	-
2018	Battisti et al	評估透水鋪面、反射 性鋪面、樹木、綠地 等不同覆蓋下對熱舒 適的影響	義大利 羅馬	PET	308*308(m)/ 154*154*30	-
2015	Peron et al	評估反射性鋪面、綠 地、屋頂綠化等不同 覆蓋下對熱舒適的影 響	義大利 威尼斯	Temperature (°C)	900*540(m)/ 180*105*25	T _a /逐時折線圖
2016	Lin & Lin	評估都市公園的佈置 對局部降溫的影響	臺灣 臺北	Temperature (°C)	1900*900(m)/ 190*90*25	T _a : d=0.69、0.82
2017	Makropoulou	評估反射性鋪面、樹 木、綠地等不同覆蓋 下對熱舒適的影響	希臘	PMV	(1) 240*280(m)/ 120*140*30 (2) 200*220(m)/ 100*110*30 (3) 428*588(m)/ 107*147*30	T _a /逐時折線圖 T _a :R ² =0.91、0.92、 0.91
2016	Lee et al	評估樹木、綠地等不 同覆蓋下對熱舒適的 影響	德國 佛萊堡	PET	150*150(m)/ 150*150	T _a 、T _{mrt} 、PET/ 逐時折線圖 T _a :R ² =0.85、 T _{mrt} : R ² =0.86、 PET: R ² =0.77
2012	Chow & Brazel	評估不同樹木覆蓋下 對熱舒適的影響	美國 鳳凰城	Temperature (°C)/MRT	640*390(m)/ 128*78*30	T _a /逐時折線圖 T _a :R ² =0.73、d=0.92



第三章 研究方法



第一節 研究架構與內容

本研究目的為探討不同街道綠化與透水鋪面對行人之人體熱舒適的影響，本節將詳述研究流程、架構中各變項之操作性定義和變項之間的關係，並提出研究假設。

一、 研究流程

本研究藉由相關文獻回顧，確認影響街道微氣候之街道綠化、透水鋪面因素有哪些，並整理出臺北市常見透水鋪面種類與臺北市透水鋪面實施路段。再來選定研究基地進行現地測量、蒐集臺北市地區基礎資料以驗證 ENVI-met 模擬軟體之可信度。確認為可信賴模型後，使用 ENVI-met 模擬計算出不同街道綠化、透水鋪面方案的熱舒適度 PET，以了解臺北市不同行道樹組成、鋪面含水情形之間的熱舒適度差異。

二、 研究假設

本研究指的街道綠化與透水鋪面是由植栽綠帶數量、行道樹種類、車道鋪面種類、人行道鋪面種類、鋪面之縱斷面含水狀態所構成，根據本研究架構，提出以下假設：

(一) 行道樹組成影響人體熱舒適

本研究之行道樹組成由植栽綠帶數量、行道樹種類所構成。過去文獻中顯示，植栽綠帶數量會影響道路的氣溫與熱舒適度，當植栽綠帶數量越多，氣溫越低，舒適度越佳 (Lin, Cho, & Hsieh, 2018)，植栽 LAI 值也會影響道路的氣溫與熱舒適度，當植栽 LAI 值越大，氣溫越低，舒適度越佳 (Shahidan, 2010；Lin, Cho, & Hsieh, 2018)，因此假設植栽綠帶、植栽 LAI 值對行人熱舒適度有顯著影響。

H1: 植栽綠帶數量為 3 的方案，其行人的熱舒適度較植栽綠帶數量為 0 的方案佳。

H2: 植栽 LAI 值為 6 的方案，其行人的熱舒適度較植栽 LAI 值為 1.5 的方



案佳。

(二) 鋪面含水情形影響人體熱舒適

本研究之鋪面含水情形由車道鋪面種類、人行道鋪面種類、鋪面含水狀態所構成。過去文獻中顯示，鋪設透水鋪面能有效改善氣溫與行人熱舒適(Huang & Chen, 2020；Battisti et al., 2018)，且多層的透水鋪面比起單層的透水鋪面更能儲留水分，其表面溫度較低(Ferrari et al., 2020)。從鋪面含水狀態來看，鋪面含水量多的透水鋪面，其表面溫度比鋪面含水量低的透水鋪面來的更低(Cheng et al., 2019)。因此假設不同的鋪面含水情形對行人熱舒適度有顯著影響。

H3: 車道鋪面種類為透水的方案，其行人的熱舒適度較車道鋪面種類為不透水的方案佳。

H4: 人行道鋪面種類為透水的方案，其行人的熱舒適度較人行道鋪面種類為不透水的方案佳。

H5: 鋪面含水狀態為田間含水量的方案，其行人的熱舒適度較鋪面含水狀態為永久凋萎點的方案佳。

H6: 植栽綠帶數量、植栽 LAI 值、車道鋪面種類、人行道鋪面種類、鋪面含水狀態對行人熱舒適度有顯著影響。

三、 研究變項定義

(一) 行道樹組成

行道樹組成指的是道路植栽綠帶種植的行道樹組成類型，本研究以植栽綠帶數量、行道樹種類來定義。

1. 植栽綠帶數量

植栽綠帶數量是指道路中植栽設施帶的數量。本研究將植栽綠帶數量分為 0 條綠帶(無種植植栽)、3 條綠帶(公共設施帶及中央分隔帶種植植栽)等 2 種類別，植栽綠帶上種植著 12 m 高的行道樹和 0.25m 高的草。

2. 行道樹種類

行道樹種類為道路植栽綠帶種植的行道樹類別。本研究根據行道樹之茂密程

度，以 LAI 值作為區分行道樹類別的依據，Shahidan 等人於 2010 年提出 LAI 值為 6、1.5 可分別代表高 LAI 和低 LAI 植栽，故將行道樹種類分為 LAI 值為 6、LAI 值為 1.5 等 2 種類別。



(二) 鋪面含水情形

鋪面含水情形指的是同一路段中，不同性質之鋪面種類和不同含水程度的組合，本研究以車道鋪面種類、人行道鋪面種類、鋪面含水狀態來定義。

1. 車道鋪面種類

車道鋪面種類為同一路段中，車道鋪面之縱斷面組成類別。本研究根據林宗輝等人在 2017 年提出的臺北市常見透水性鋪面、行政院公共工程委員會於 2001 年提出的基層公共基本圖，將車道鋪面種類分為密集配瀝青混凝土鋪面、多孔隙瀝青混凝土鋪面 2 類。

2. 人行道鋪面種類

人行道鋪面種類為同一路段中，人行道鋪面之縱斷面組成類別。本研究根據林宗輝等人在 2017 年提出的臺北市常見透水性鋪面、2007 年的臺北市政府各機關辦理人行鋪面工程面層及底層設計原則，將人行道鋪面種類分為水泥混凝土地磚鋪面、透水水泥混凝土地磚鋪面 2 類。

3. 鋪面含水狀態

鋪面含水狀態為該鋪面的含水量。本研究以鋪面水分特性做為依據，將鋪面含水狀態分為永久凋萎點(指連續乾旱，鋪面水分少到某一限度，無法再提供植物汲取水分；本研究將其比擬為無雨晴天的鋪面含水狀態)、田間含水量(指經大雨或鋪面充分浸濕，鋪面中的過剩水充分由重力排除，鋪面含水量到達一個穩定狀態；本研究將其比擬為雨後放晴的鋪面含水狀態) 2 類。

(三) 人體熱舒適度

行人熱舒適度是指行走在人行道上的行人，其所感受的環境舒適程度。本研究使用平均氣溫(T_a)、平均輻射溫度(T_{mrt})、生理等效溫度 Physiologically Equivalent Temperature (PET)作為熱舒適度評估指標，並利用軟體 ENVI-met

Version5 的附屬軟體 Bio Met 2 來計算 PET 值。



第二節 ENVI-met 模型設定與驗證

本研究使用 ENVI-met Version5 微氣候模擬軟體作為研究工具，操作過程包含建立與驗證模型，因過去研究皆無詳細驗證 ENVI-met 之含水情形，本研究將分別實地驗證鋪面含水狀態為永久凋萎點和鋪面含水狀態為田間含水量，確定 2 種模型皆為可信賴模型、根據實地調查結果，研擬之方案、使用 ENVI-met 模型進行方案的模擬，計算行人熱舒適度。本節針對 ENVI-met 模型驗證的步驟與細節進行說明。

一、 模型建立

模型建立包含 Database 設定、建模設定與參數設定三個部分。

(一) Database 設定

本研究的透水鋪面縱斷面組成、含水量、水力傳導率以林宗輝等人在 2017 年提出的臺北市常見透水鋪面為依據，透水鋪面的體積熱容量則以 Stempihar 等人於 2012 年提出的鋪面研究數值做為參考；而不透水鋪面的縱斷面組成則以行政院公共工程委員會於 2001 年提出的基層公共基本圖和臺北市政府於 2007 年提出臺北市政府各機關辦理人行鋪面工程面層及底層設計原則為依據，而不透水鋪面的體積熱容量與熱導率則以 Stempihar 等人於 2012 年提出的鋪面研究數值做為參考，詳細 Database 設定見表 3-1、表 3-2。

表 3-1 模型各鋪面縱斷面組成

不透水車道			不透水人行道	
面層	密集配瀝青混凝土	6cm	水泥混凝土地磚	6cm
調整砂層	粗集配瀝青混凝土	14cm	水泥砂漿	2cm
底層	C-40 碎石級配	30cm	預拌混凝土	12cm
透水車道			透水人行道	
面層	多孔隙瀝青混凝土	6cm	透水水泥混凝土地磚	6cm
調整砂層	-	-	透水砂漿	2cm
底層	密集配瀝青混凝土	14cm	透水混凝土	12cm
防水層	C-40 碎石級配	30cm	-	-

表 3-2 鋪面材料物理特性

	多孔滲瀝青混凝土	透水水泥混凝土地磚	密集配瀝青混凝土	水泥混凝土地磚
飽和含水量(m^3/m^3)	0.25	0.20	-	-
田間含水量(m^3/m^3)	0.12	0.07	-	-
枯萎點含水量(m^3/m^3)	0.10	0.05	-	-
飽和水力傳導率 ($m/s * 10^{-6}$)	100.00	100.00	-	-
體積熱容量 ($J/(m^3K) * 10^6$)	1.94	1.99	4.31	1.99
熱導率 (W/mK)	-	-	1.80	1.10
反射率	0.13	0.35	0.20	0.35

(二) 建模設定

鋪面含水狀態為永久凋萎點的模型以街道組成的調查單元大小為模擬範圍，考量基地實際面積大小，將模型網格解析度設定為 $dx=dy=dz=1m$ ，網格數為 $X=50$ 格， $Y=50$ 格， $Z=50$ 格，超過 35m 時，高度伸縮係數為 10%。

鋪面含水狀態為田間含水量的模型因需配合實測驗證的定時灑水，故挑選校園人行道空間為模擬範圍，將模型網格解析度設定為 $dx=dy=dz=1m$ ，網格數為 $X=25$ 格， $Y=25$ 格， $Z=50$ 格，超過 30m 時，高度伸縮係數為 10%。

(三) 參數設定

在模擬前須在模型中建立好經緯度、初始大氣溫度、風速、風向、地表粗糙度、相對溼度、雲量等參數資料，另依據研究目的與研究地點的差異，可以再設定土壤參數。本研究初始氣候參數設定參照中央氣象局臺北氣象站提供的資料及實測結果，土壤參數資料則依據桃改臺北分場的測站資料，而在初始氣溫及相對溼度設定部分，上午 8 點至下午 6 點的資料以實測值輸入，其餘時間則依據臺北氣象站的數值進行模擬，詳細參數設定見表 3-3 及 3-4。

表 3-3 ENVI-met 基本參數設定

類別	參數項目	描述	鋪面含水狀態 為永久凋萎點 05/06	鋪面含水狀態 為田間含水量 05/05
氣象	Wind speed in 10m above ground	高於地表 10 米的風速	1.08 m/s	0.40 m/s
	Wind direction	風向 (0:N,90:E,180:S,270:W)	280 °	75 °
	Roughness legth Z0 at reference point	參考位置的表面粗糙度	0.10 m	0.10 m
	*Specific humidity in 2500m	*地面上 2500 米水氣比	7.00 g/kg	7.00 g/kg
土壤	Intial temperature, upper Layer(0-20m)	土壤上層初始溫度	23.40°C	22.50°C
	Intial temperature, middle Layer(20-50m)	土壤中間層初始溫度	22.80°C	22.25°C
	Intial temperature, deep Layer(below 50m)	土壤底層初始溫度	22.50°C	22.10°C
	*Intial humidity, upper Layer(0-20m)	*土壤上層初始溼度	50.00%	50.00%
	*Intial humidity, middle Layer(20-50m)	*土壤中間層初始溼度	60.00%	60.00%
	*Intial humidity, deep Layer(below 50m)	*土壤底層初始溼度	60.00%	60.00%

*表示為模型預設值

表 3-4 初始氣溫集相對濕度逐時數值表

日期	時間	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
05/06	氣溫(°C)	23.80	24.20	26.35	28.52	28.05	29.53	28.72	29.84	28.76	27.29	26.40
	濕度(%)	79.50	73.50	64.63	55.63	56.81	51.59	54.45	49.79	51.68	57.43	61.25
05/05	氣溫(°C)	25.03	25.39	25.43	25.22	25.55	25.58	24.33	25.20	25.42	25.01	24.42
	濕度(%)	77.08	71.54	69.34	69.76	68.70	68.53	75.93	69.84	66.38	68.60	70.96

二、 模型驗證

(一) 實測地點

鋪面含水狀態為永久凋萎點選擇臺北市工務局水綠地圖提供的透水性鋪面實施路段進行實測。為了防止周邊自然因子影響驗證結果，需排除靠近群山、河流等路段，並選擇四周建物圍繞的路段作為研究基地，實測地點架設儀器的地方四周需無建築遮蔭，且無冷氣室外機、工地、車輛進出等干擾。經過現地勘查後，選擇臺北市羅斯福路五段萬隆捷運站 3 號出口和 1 號出口之間的路段為實測地點，此路段道路為 30 米道路組成類型，走向為南北走向。測點位置如圖 3-1 所示。

配合模型模擬，鋪面含水狀態為田間含水量需在鋪面上方進行灑水澆灌，本研究選擇固定時間於透水鋪面上方灑水，在此限制下，實測地點須要能方便引用水源。經過現地勘查後，選擇臺灣大學禮賢樓外透水水泥混凝土磚為實測地點。測點位置如圖 3-2 所示。



圖 3-1 鋪面含水狀態為永久凋萎點測點位置圖

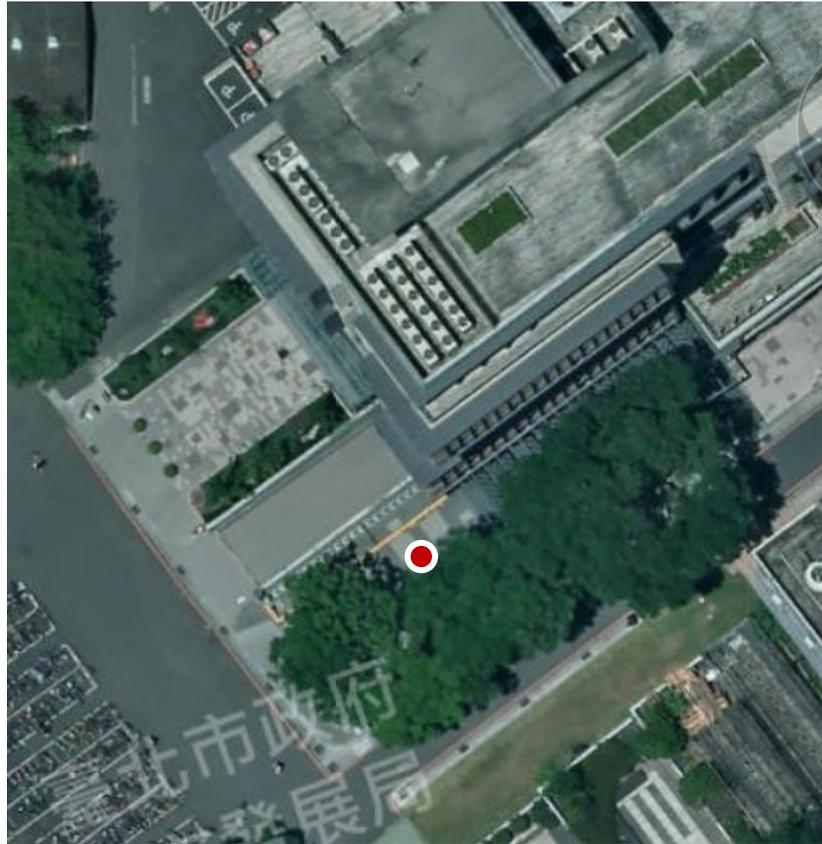


圖 3-2 鋪面含水狀態為田間含水量測點位置圖

(二) 測量項目及方式

為了驗證空氣溫度、平均輻射溫度、PET 等資料，本研究的測量項目包含氣溫、濕度、風速、黑球溫度等。鋪面含水狀態為永久凋萎點監測時段為 2022 年 5 月 6 日早上 8 點至下午 6 點，測量氣溫、濕度及風速儀器為 Watchdog Model 2550 Weather station (Spectrum Technologies Inc., Plainfield, IL)，測量黑球溫度儀器為 TR-31B 黑球溫度計 (Rixen Technology Co., Taiwan, ltd.)，將兩者架設於離地高 1.5 公尺處進行測量，每 1 分鐘記錄一筆資料，儀器架設如圖 3-3

鋪面含水狀態為田間含水量監測時段則為 2022 年 5 月 5 日早上 8 點至下午 6 點，每個整點定時於測量點之透水水泥混凝土磚(面積為 40 平方公尺)上方灑水(水量為 60 公升)使水分持續下滲，以比擬模型當中，持續於鋪面表面灑水並使鋪面含水量整日維持在田間含水量的狀態。測量儀器和鋪面含水狀態為永久凋萎點相同，儀器架設和實際灑水情形如圖 3-4、圖 3-5。



圖 3-3 鋪面含水狀態為永久凋萎點現地觀測儀器架設圖



圖 3-4 鋪面含水狀態為田間含水量現地觀測儀器架設圖



圖 3-5 鋪面含水狀態為田間含水量實際灑水情形

(三) 資料收集與計算

1. 氣溫、相對濕度、風速 (T_a 、 RH 、 v)

從監測的上午 8 點至下午 6 點中，取 Watchdog 所記錄的氣候資料，以每個整點前後 10 分鐘的實測值平均與模擬輸出值進行驗證。



2. 平均輻射溫度 (T_{mrt})

以 dataloggerCR800 收集黑球溫度計所測量的黑球溫度，將實測所收集到的氣溫、黑球溫度、風速等資料帶入的公式計算平均輻射溫度(ASHRAE, 2001; Kantor & Unger, 2011)，公式如下：

$$T_{mrt} = \sqrt[4]{(T_g + 273.15)^4 + \frac{hc_g}{\varepsilon \cdot d_g^{0.4}} \times (T_g - T_a) - 273.15}$$

式 6

$$hc_g = 1.1 \cdot 10^8 \cdot v^{0.6}$$

式 7

T_{mrt} : 平均輻射溫度 (°C)

T_g : 黑球溫度 (°C)

T_a : 空氣溫度 (°C)

v : 風速 (m/s)

ε : 球體發射率 (黑球發射率=0.95)

d_g : 球體直徑 (TR-31B 直徑=150mm)

3. 生理等效溫度 (PET)

本研究透過 RayMan Version1.2 計算 PET。人體參數設定為身高 175 公分，體重 75 公斤，年齡 35 歲的男性，新陳代謝率 164.7W，著衣量為 0.5 clo。

(四) 準確度計算

Willmott (1981) 針對數值模型性能評估提出了一致性指數 (Index of agreement, d 值) 以表示實測值與模擬值之間的關係。d 值為一個介於 0 到 1 之間的值，越接近 1 表示實測值與模擬值越匹配，可信度越高，越接近 0 則表示實測值與模擬值越不匹配，可信度越低，一般認為 d 值大於 0.6 時模型才有實際預測價值。d 值計算公式如下所示：

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2}, 0 \leq d \leq 1$$

式 8

P_i : 模擬值



O_i : 實測值

\bar{O} : 實測值的平均值

根據圖 3-6、圖 3-8、圖 3-10 可以發現鋪面含水狀態為永久凋萎點， T_a 實測值與模擬值相近， d 值為 0.98； T_{mrt} 的部分，因考量風速太低，熱量沒有有效地傳輸到環境，在此狀況下並不適合計算 T_{mrt} ，故移除風速為 0 m/s(上午 8 點至上午 10 點和中午 12 點)的 T_{mrt} 數值，而在模型設定時有考量當日雲量狀況，但在實測的下午 3 點至下午 4 點時，太陽出現， T_{mrt} 快速升高，故移除下午 3 點至下午 4 點的 T_{mrt} 數值，在排除風速和雲量等不可控因素後， T_{mrt} 的 d 值為 0.84；PET 的部分，其數值受 T_a 和 T_{mrt} 影響，故移除上午 8 點至上午 10 點、中午 12 點和下午 3 點至下午 4 點的 PET 數值，其 d 值為 0.76。

根據圖 3-12、圖 3-14、圖 3-16 可以發現鋪面含水狀態為田間含水量， T_a 在上午 8 點至上午 10 的實測值與模擬值在趨勢上有差異，經推測為實測倒水從上午 8 點開始，而模擬從上午 5 點開始，其趨勢出現差異，在移除上午 8 點至上午 10 點的 T_a 數值後， T_a 的 d 值為 0.68； T_{mrt} 的部分，移除上午 8 點至上午 10 點的 T_{mrt} 數值和風速為 0 m/s(下午 1 點至下午 2 點)的 T_{mrt} 數值後， T_{mrt} 的 d 值為 0.93；PET 的部分，其數值受 T_a 和 T_{mrt} 影響，故移除上午 8 點至上午 10 點和下午 1 點至下午 2 點的 PET 數值，其 d 值為 0.62。

不管是鋪面含水狀態為永久凋萎點或田間含水量皆可發現 T_a 是比較穩定的曲線， T_{mrt} 和 PET 則是波動較大的曲線，推測是與實測時微氣候的快速變化相關。

表 3-5 實測值與模擬值驗證結果表

		R^2	RMSE	MBE	d
05/06 鋪面含水狀態 為永久凋萎點	T_a	0.95	0.42	0.15	0.98
	T_{mrt}	0.70	4.38	1.74	0.84
	PET	0.82	3.21	-2.88	0.76
05/05 鋪面含水狀態 為田間含水量	T_a	0.70	0.69	0.69	0.67
	T_{mrt}	0.82	12.56	11.18	0.68
	PET	0.90	3.44	2.54	0.62

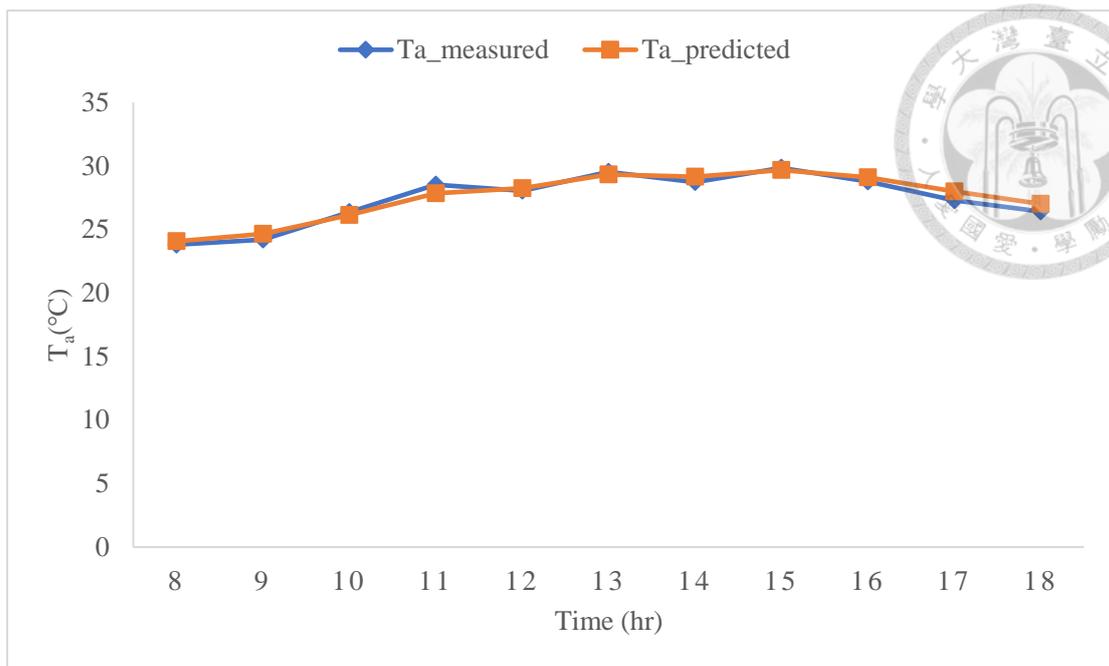


圖 3-6 含水狀態為永久凋萎點氣溫實測值與模擬值之逐時溫度圖

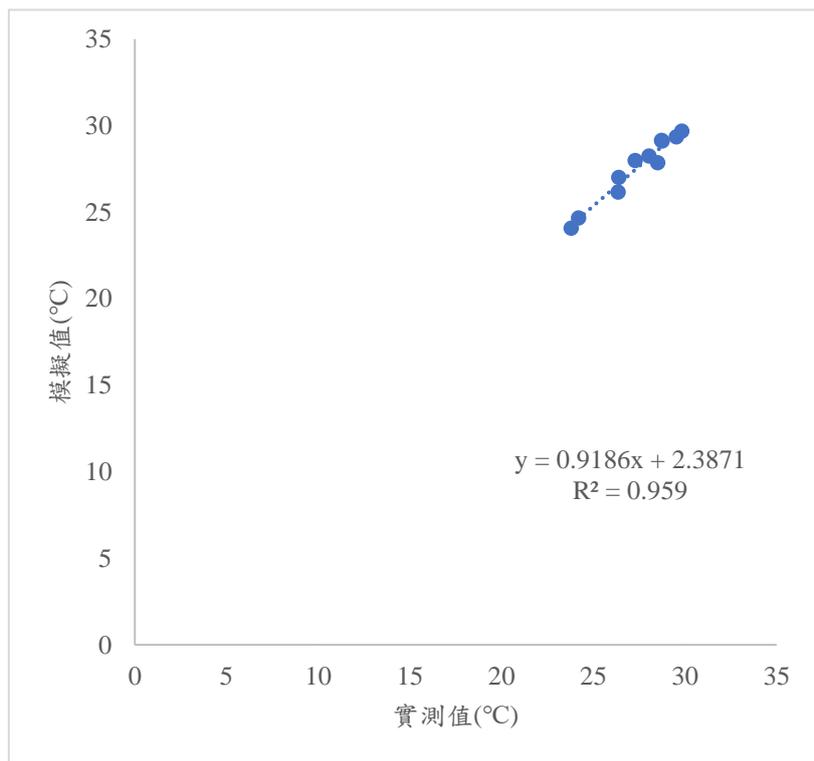


圖 3-7 含水狀態為永久凋萎點氣溫實測值與模擬值之驗證結果圖

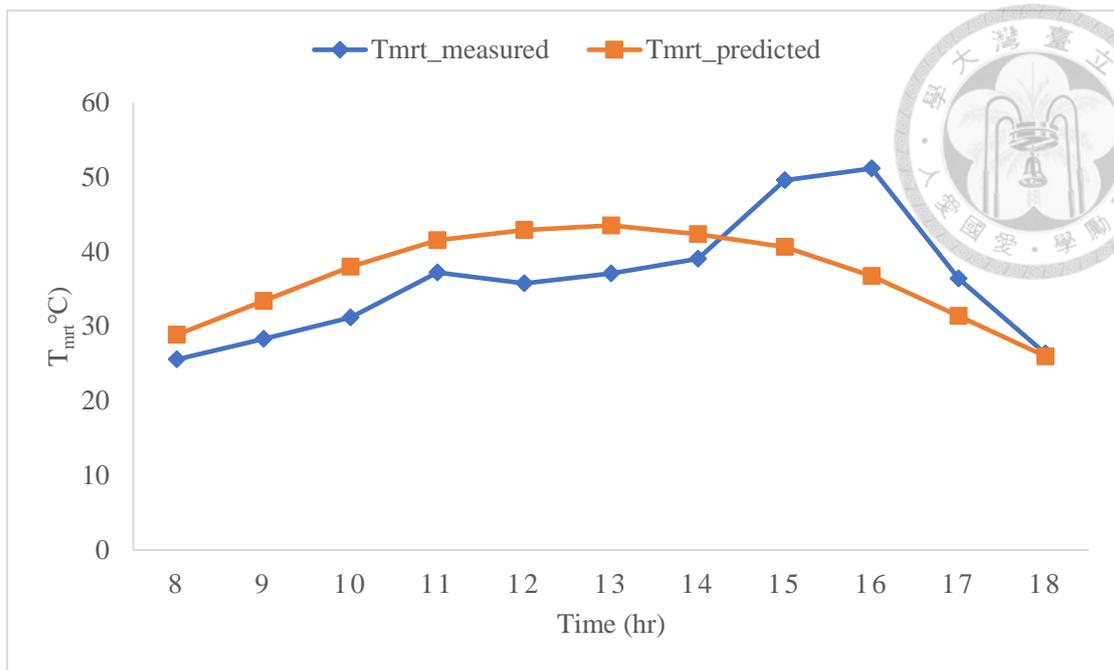


圖 3-8 含水狀態為永久凋萎點平均輻射溫度實測值與模擬值之逐時溫度圖

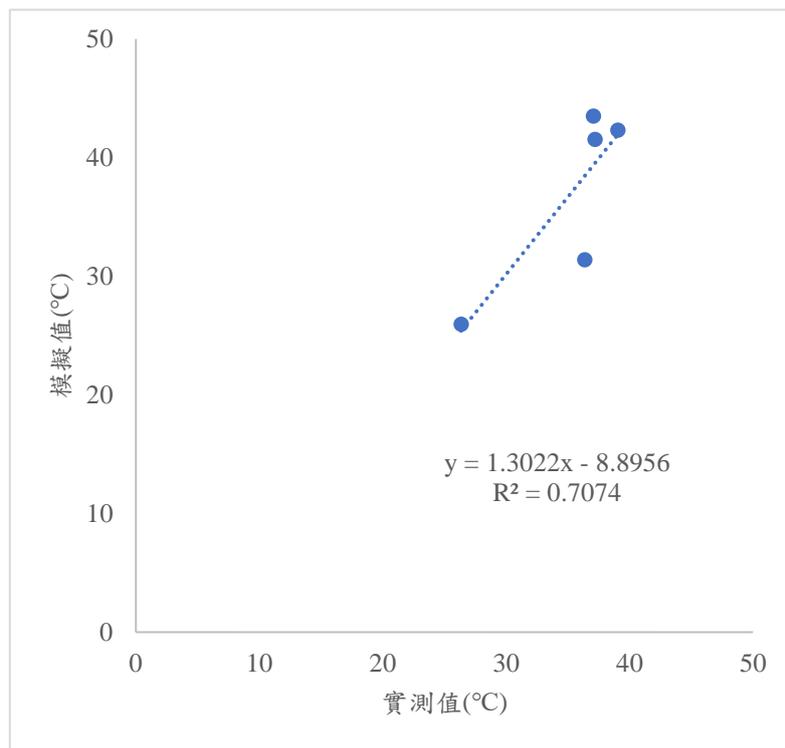


圖 3-9 含水狀態為永久凋萎點平均輻射溫度實測值與模擬值之驗證結果圖

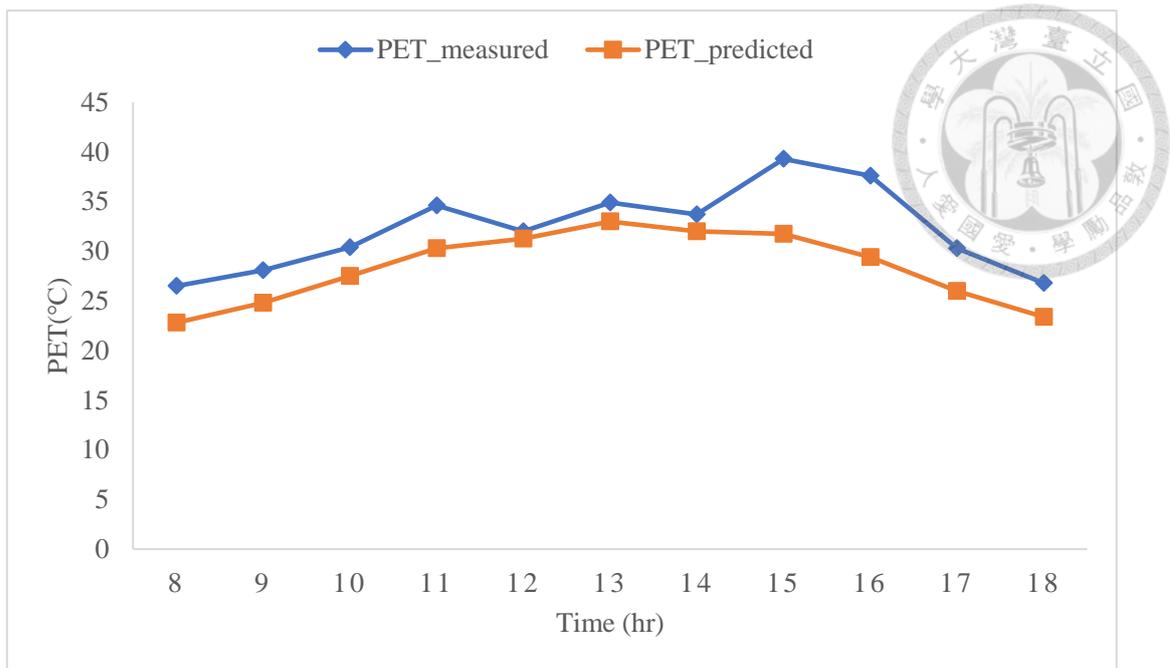


圖 3-10 含水狀態為永久凋萎點生理等效溫度實測值與模擬值之逐時溫度圖

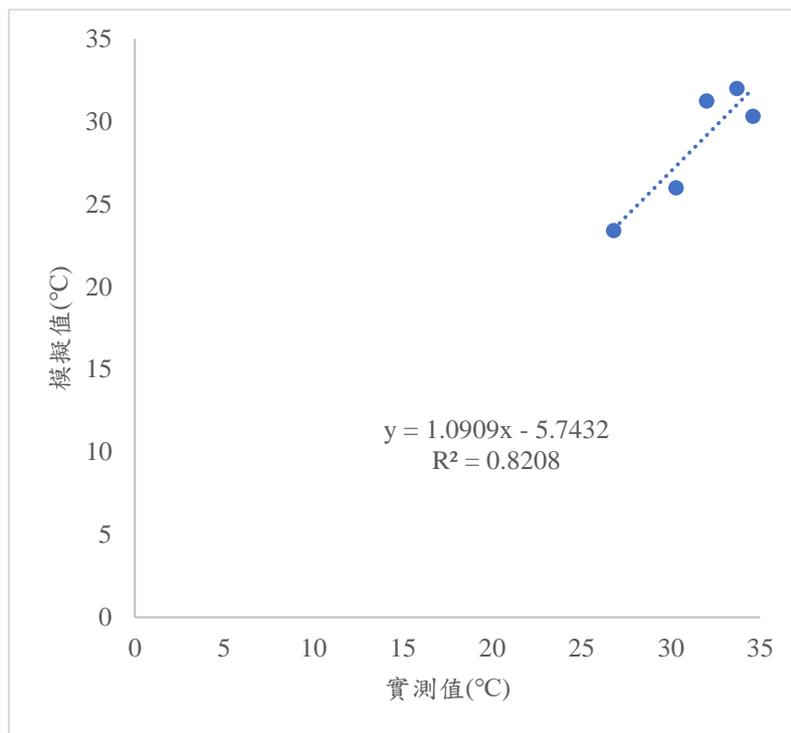


圖 3-11 含水狀態為永久凋萎點生理等效溫度實測值與模擬值之驗證結果圖

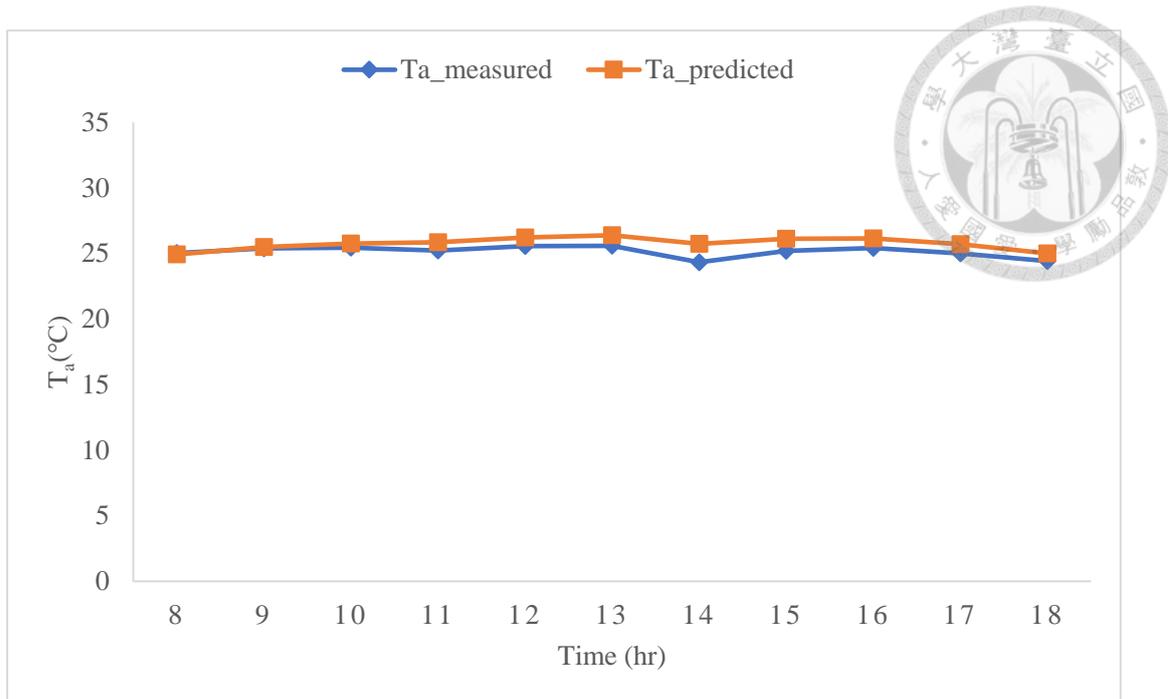


圖 3-12 含水狀態為田間含水量氣溫實測值與模擬值之逐時溫度圖

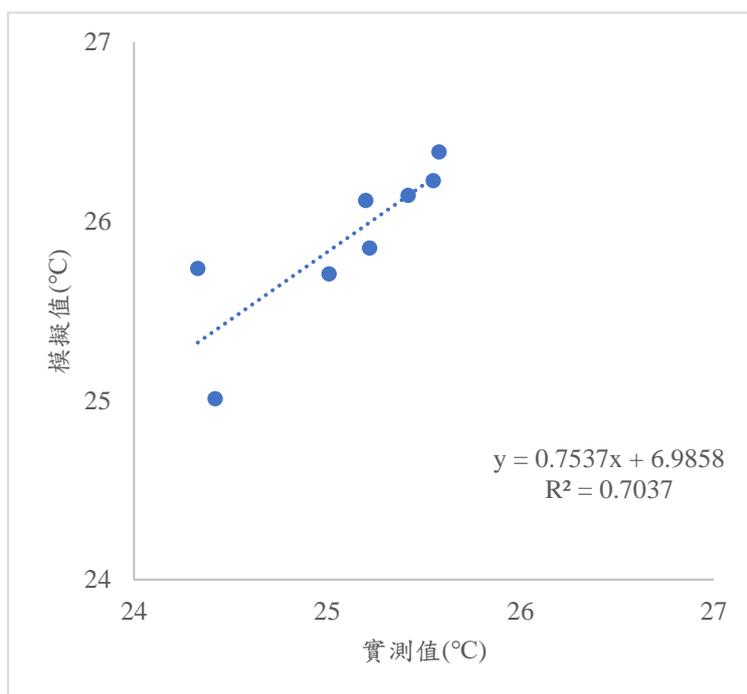


圖 3-13 含水狀態為田間含水量氣溫實測值與模擬值之驗證結果圖

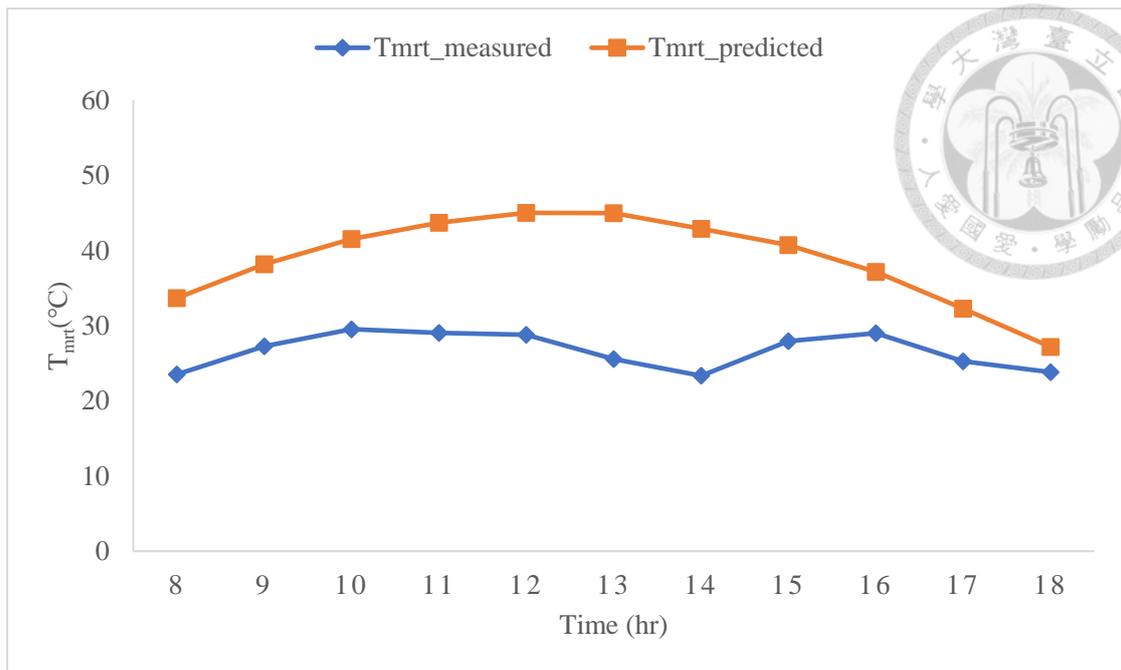


圖 3-14 含水狀態為田間含水量平均輻射溫度實測值與模擬值之逐時溫度圖

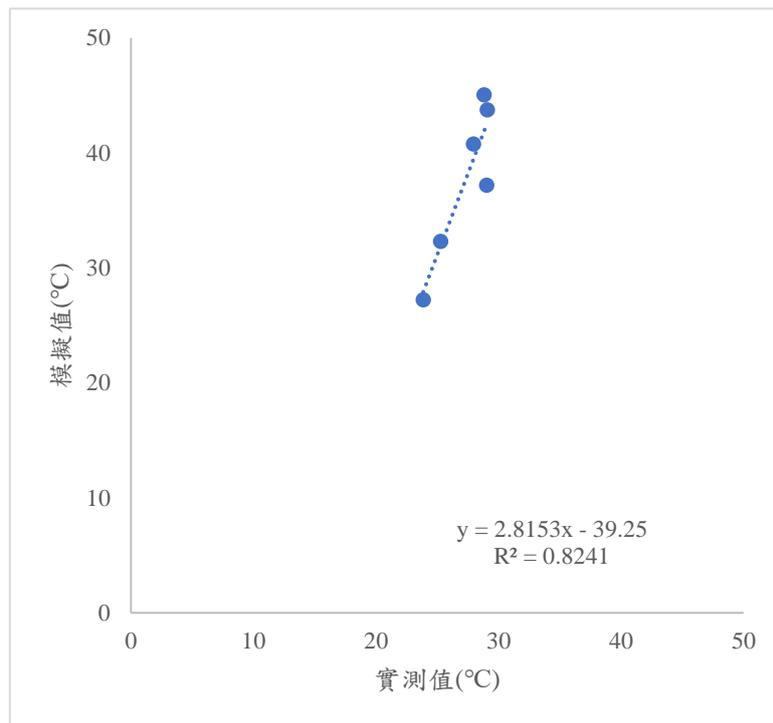


圖 3-15 含水狀態為田間含水量平均輻射溫度實測值與模擬值之驗證結果圖

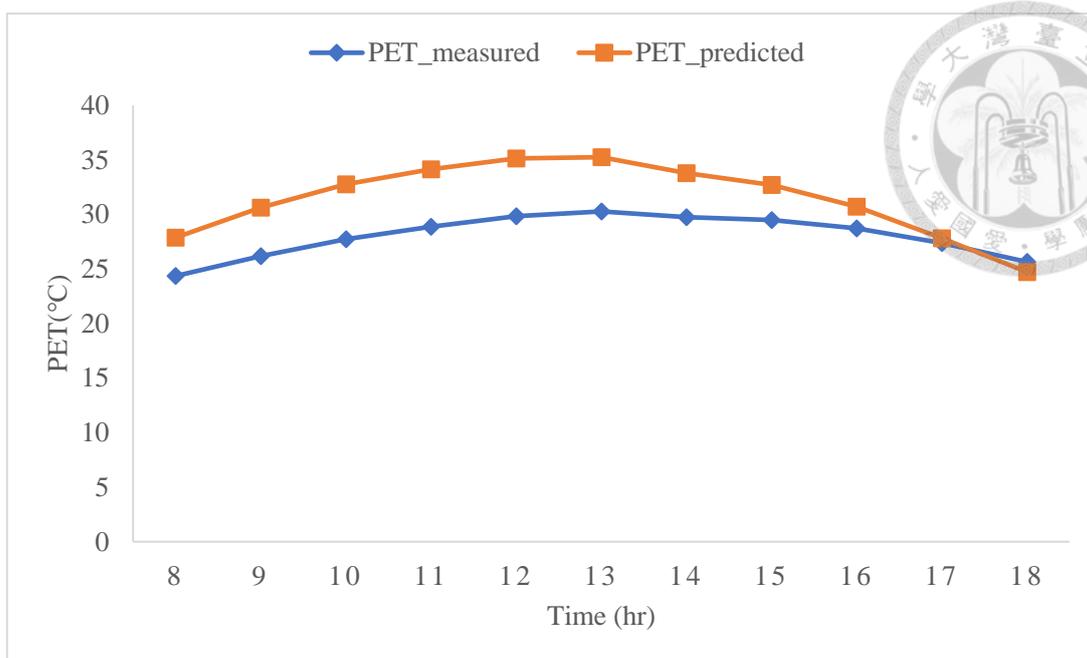


圖 3-16 含水狀態為田間含水量生理等效溫度實測值與模擬值之逐時溫度圖

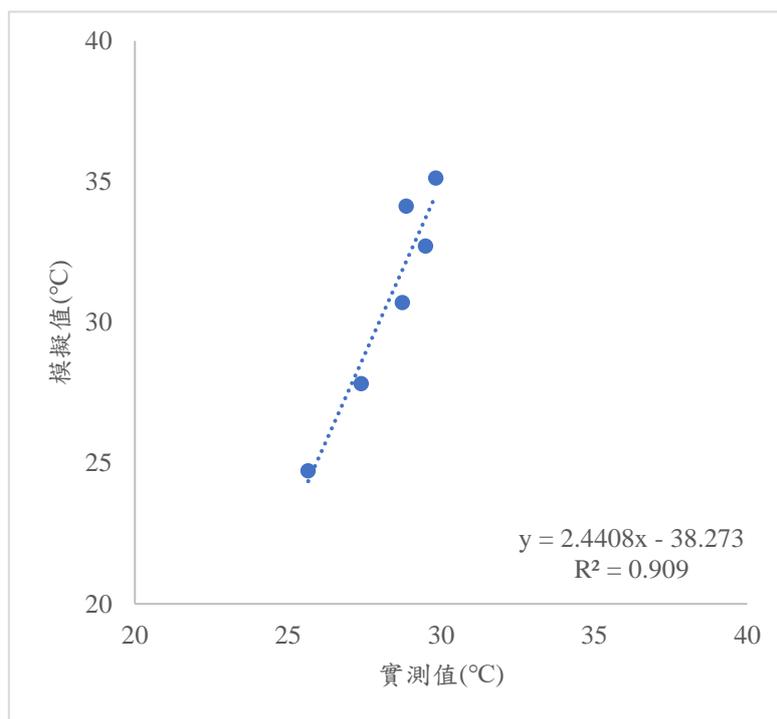


圖 3-17 含水狀態為田間含水量生理等效溫度實測值與模擬值之驗證結果圖

第三節 街道綠化與透水鋪面模擬方案

一、 方案發展過程與原則

方案模型以鋪面含水狀態為永久凋萎點的實測街道為原型，街道 30 米寬，南-北走向，其中包含東西各 9 米寬的車道、東西各 5 米寬的人行道和 2 米寬的中央分隔島，植栽綠帶位於人行道和中央分隔島上。因驗證基地之方位並非正南-北走向，且地面鋪設了各種透水和不透水鋪面，植栽的大小也不一致，為能準確的模擬各變項的影響，本研究將實地驗證基地之模型轉正，街寬比調整為 1:1、車道和人行道分別鋪設密集配瀝青混凝土和水泥混凝土磚並將植栽去除後，做為方案發想的基礎方案(D_II_0)，並做為後續比較之對照組。且考量 05/06 鋪面含水狀態為永久凋萎點實測日的天氣變化並非臺北典型夏日，故選擇 2020 年 7 月 24 日的天氣狀態做為模擬值，模擬臺北典型的夏日情況。

表 3-6 方案基本參數設定

類別	參數項目	描述	方案基本參數 2020/07/24
氣象	Wind speed in 10m above ground	高於地表 10 米的風速	1.62 m/s
	Wind direction	風向(0:N,90:E,180:S,270:W)	210。
	Roughness length Z0 at reference point	參考位置的表面粗糙度	0.10 m
	*Specific humidity in 2500m	*地面上 2500 米水氣比	7.00 g/kg
土壤	Intial temperature, upper Layer(0-20m)	土壤上層初始溫度	30.20°C
	Intial temperature, middle Layer(20-50m)	土壤中間層初始溫度	29.00°C
	Intial temperature, deep Layer(below 50m)	土壤底層初始溫度	29.00°C
	*Intial humidity, upper Layer(0-20m)	*土壤上層相對溼度	50.00%
	*Intial humidity, middle Layer(20-50m)	*土壤中間層相對溼度	60.00%
	*Intial humidity, deep Layer(below 50m)	*土壤底層相對溼度	60.00%

*表示為模型預設值

表 3-7 方案初始氣溫集相對濕度逐時數值表

日期	時間	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
07/24	氣溫(°C)	30.20	33.20	34.80	36.00	37.30	38.50	39.00	38.10	37.40	35.60	34.00
	濕度(%)	55.00	47.00	45.00	43.00	41.00	39.00	38.00	40.00	41.00	51.00	56.00

首先按照鋪面含水狀態發展 2 種不同的方案，再來調整方案模型的鋪面種類、植栽綠帶數量及植栽 LAI 值設定，總共發展成 21 個模擬方案。方案發展流程如圖 3-18 所示：

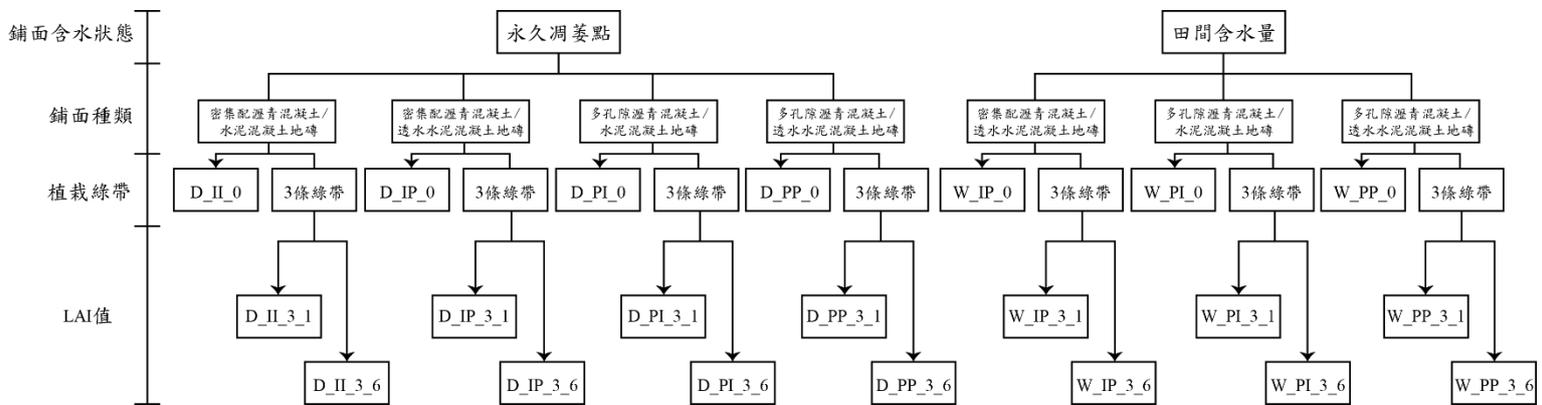


圖 3-18 方案發展流程

表 3-8 方案內容表

編號	方案名稱	鋪面含水情形			行道樹組成	
		鋪面含水 狀態 (D/W)	車道鋪面種類 (I/P)	人行道鋪面種類 (I/P)	植栽綠帶 數量 (0/3)	植栽 LAI 值 (1/6)
1	D_II_0*		密集配瀝青混凝土	水泥混凝土地磚	0	-
2	D_II_3_1		密集配瀝青混凝土	水泥混凝土地磚	3	1.5
3	D_II_3_6		密集配瀝青混凝土	水泥混凝土地磚	3	6.0
4	D_IP_0		密集配瀝青混凝土	透水水泥混凝土地磚	0	-
5	D_IP_3_1		密集配瀝青混凝土	透水水泥混凝土地磚	3	1.5
6	D_IP_3_6	永久凋萎 點**	密集配瀝青混凝土	透水水泥混凝土地磚	3	6.0
7	D_PI_0		多孔隙瀝青混凝土	水泥混凝土地磚	0	-
8	D_PI_3_1		多孔隙瀝青混凝土	水泥混凝土地磚	3	1.5
9	D_PI_3_6		多孔隙瀝青混凝土	水泥混凝土地磚	3	6.0
10	D_PP_0		多孔隙瀝青混凝土	透水水泥混凝土地磚	0	-
11	D_PP_3_1		多孔隙瀝青混凝土	透水水泥混凝土地磚	3	1.5
12	D_PP_3_6		多孔隙瀝青混凝土	透水水泥混凝土地磚	3	6.0
13	W_IP_0		密集配瀝青混凝土	透水水泥混凝土地磚	0	-
14	W_IP_3_1		密集配瀝青混凝土	透水水泥混凝土地磚	3	1.5
15	W_IP_3_6		密集配瀝青混凝土	透水水泥混凝土地磚	3	6.0
16	W_PI_0		多孔隙瀝青混凝土	水泥混凝土地磚	0	-
17	W_PI_3_1	田間含水 量***	多孔隙瀝青混凝土	水泥混凝土地磚	3	1.5
18	W_PI_3_6		多孔隙瀝青混凝土	水泥混凝土地磚	3	6.0
19	W_PP_0		多孔隙瀝青混凝土	透水水泥混凝土地磚	0	-
20	W_PP_3_1		多孔隙瀝青混凝土	透水水泥混凝土地磚	3	1.5
21	W_PP_3_6		多孔隙瀝青混凝土	透水水泥混凝土地磚	3	6.0

*基礎方案

**連續乾旱，鋪面水分少到某一限度，無法再提供植物汲取水分；本研究將其比擬為無雨晴天的鋪面含水狀態

***經大雨或鋪面被充分浸濕，鋪面中的過剩水充分由重力排除，鋪面含水量到達一個穩定狀態；本研究將其比擬為雨後放晴的鋪面含水狀態

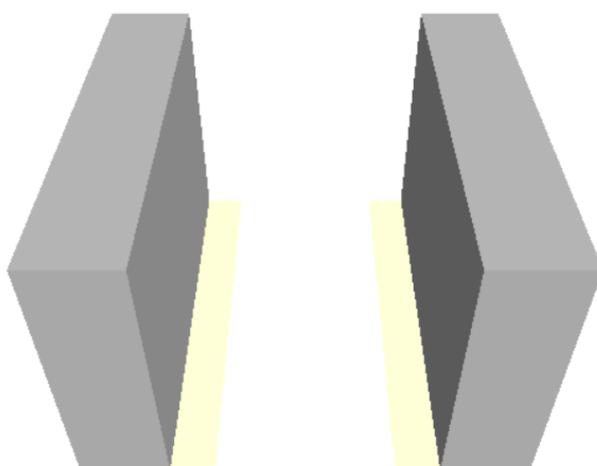
二、 方案說明

本研究以 2 種鋪面含水狀態、2 種車道鋪面種類、2 種人行道種類、2 種植栽綠帶數量、2 種植栽 LAI 值組合成 21 種街道綠化與透水鋪面方案，並以方案 D_II_0 作為後續比較之標準，詳細說明如下：



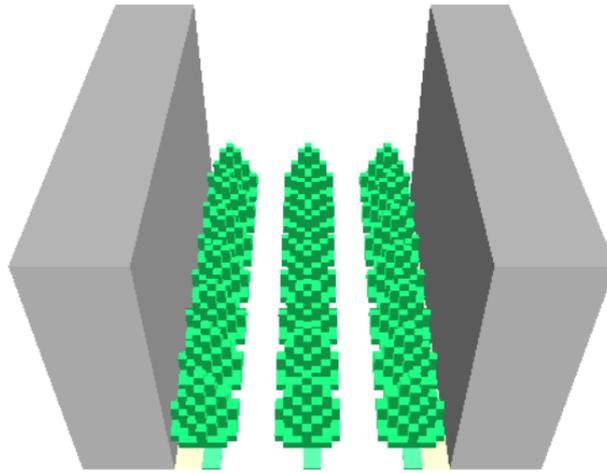
1. 方案 D_II_0 (基礎方案)

鋪面含水狀態為永久凋萎點，車道鋪面種類為密集配瀝青混凝土(不透水)，人行道鋪面種類為水泥混凝土地磚(不透水)，植栽綠帶數量為 0。



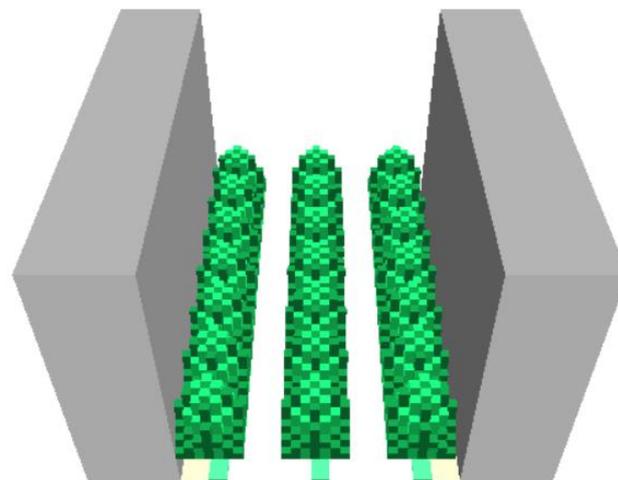
2. 方案 D_II_3_1

鋪面含水狀態為永久凋萎點，車道鋪面種類為密集配瀝青混凝土(不透水)，人行道鋪面種類為水泥混凝土磚(不透水)，植栽綠帶數量為3，植栽 LAI 值為 1.5。



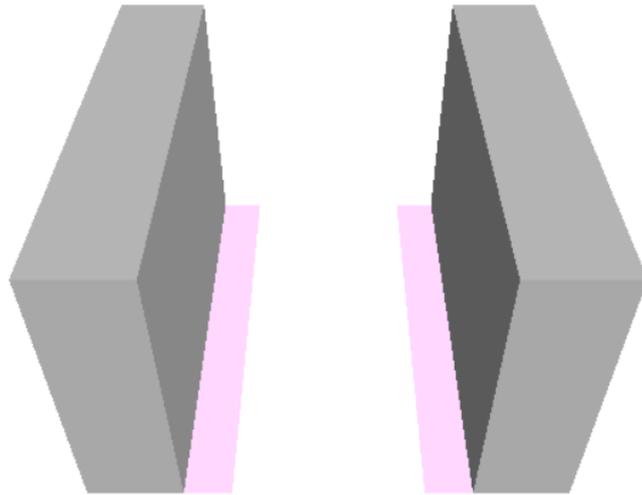
3. 方案 D_II_3_6

鋪面含水狀態為永久凋萎點，車道鋪面種類為密集配瀝青混凝土(不透水)，人行道鋪面種類為水泥混凝土磚(不透水)，植栽綠帶數量為3，植栽 LAI 值為 6。



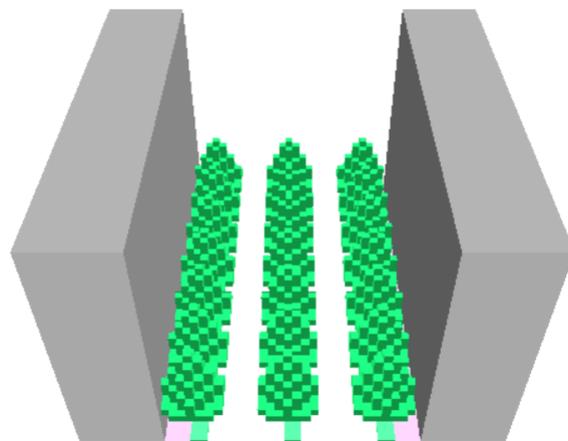
4. 方案 D_IP_0

鋪面含水狀態為永久凋萎點，車道鋪面種類為密集配瀝青混凝土(不透水)，人行道鋪面種類為透水水泥混凝土磚(透水)，植栽綠帶數量為 0。



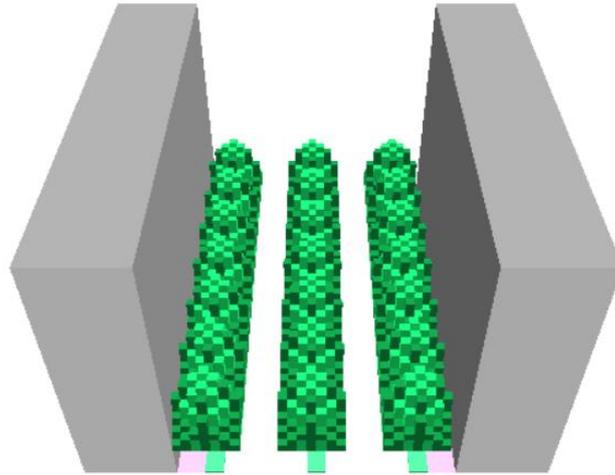
5. 方案 D_IP_3_1

鋪面含水狀態為永久凋萎點，車道鋪面種類為密集配瀝青混凝土(不透水)，人行道鋪面種類為透水水泥混凝土磚(透水)，植栽綠帶數量為 3，植栽 LAI 值為 1.5。



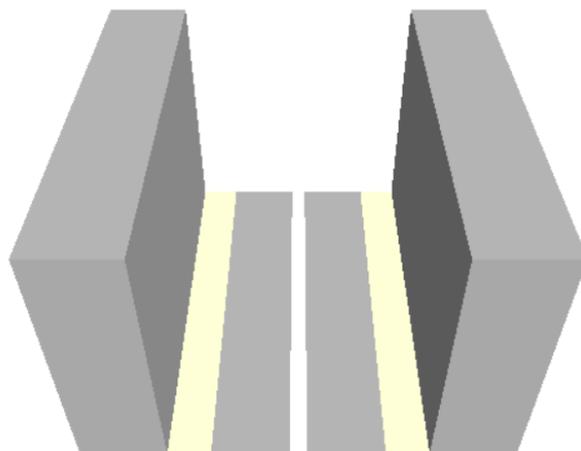
6. 方案 D_IP_3_6

鋪面含水狀態為永久凋萎點，車道鋪面種類為密集配瀝青混凝土(不透水)，人行道鋪面種類為透水水泥混凝土磚(透水)，植栽綠帶數量為3，植栽 LAI 值為 6。



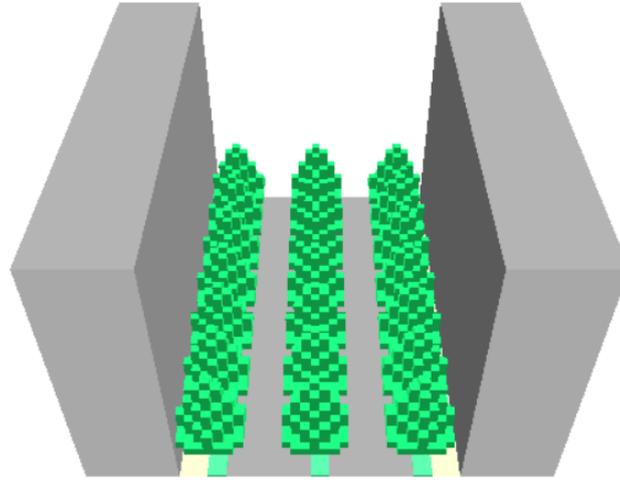
7. 方案 D_PI_0

鋪面含水狀態為永久凋萎點，車道鋪面種類為多孔滲瀝青混凝土(透水)，人行道鋪面種類為水泥混凝土磚(不透水)，植栽綠帶數量為 0。



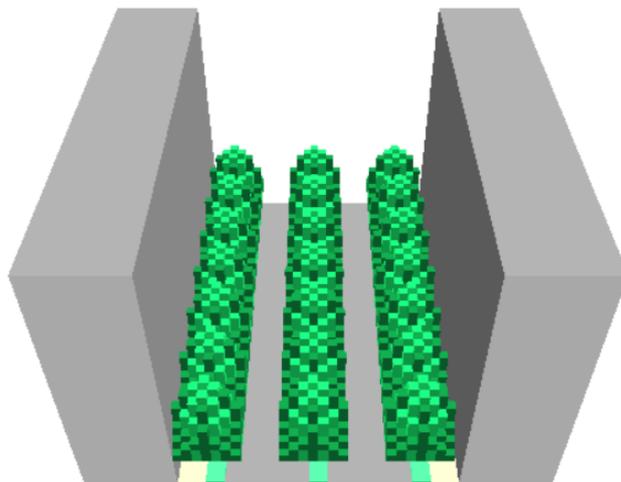
8. 方案 D_PI_3_1

鋪面含水狀態為永久凋萎點，車道鋪面種類為多孔滲瀝青混凝土(透水)，人行道鋪面種類為水泥混凝土磚(不透水)，植栽綠帶數量為3，植栽 LAI 值為 1.5。



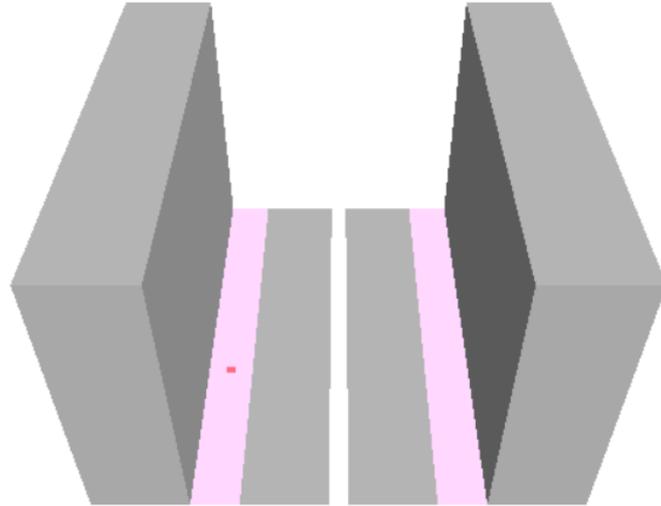
9. 方案 D_PI_3_6

鋪面含水狀態為永久凋萎點，車道鋪面種類為多孔滲瀝青混凝土(透水)，人行道鋪面種類為水泥混凝土磚(不透水)，植栽綠帶數量為3，植栽 LAI 值為 6。



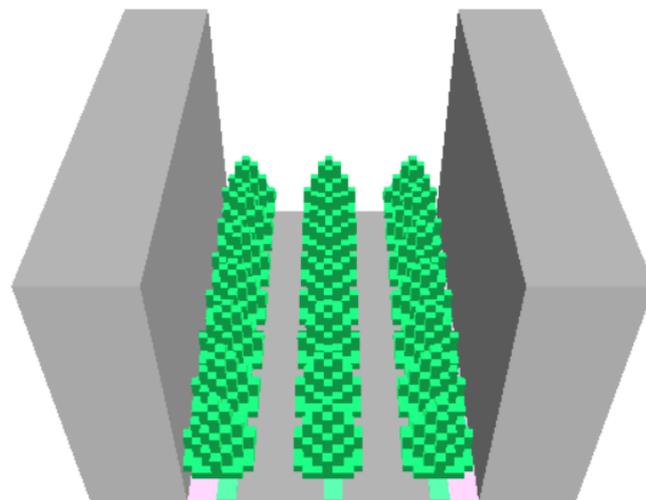
10. 方案 D_PP_0

鋪面含水狀態為永久凋萎點，道鋪面種類為多孔隙瀝青混凝土(透水)，人行
道鋪面種類為透水水泥混凝土磚(透水)，植栽綠帶數量為 0。



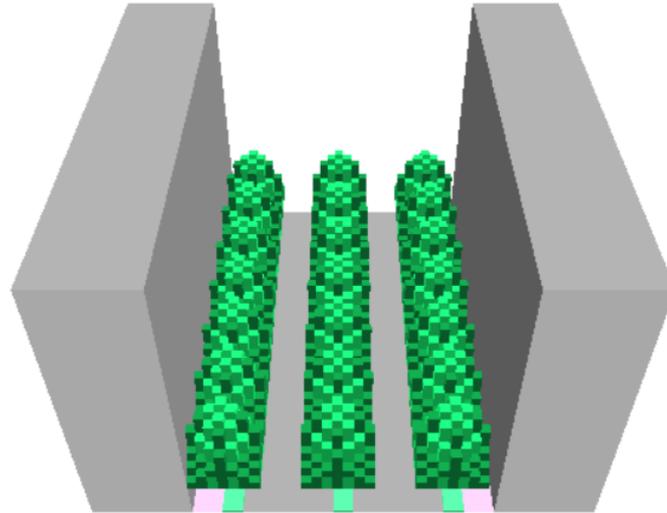
11. 方案 D_PP_3_1

鋪面含水狀態為永久凋萎點，道鋪面種類為多孔隙瀝青混凝土(透水)，人行
道鋪面種類為透水水泥混凝土磚(透水)，植栽綠帶數量為 3，植栽 LAI 值為 1.5。



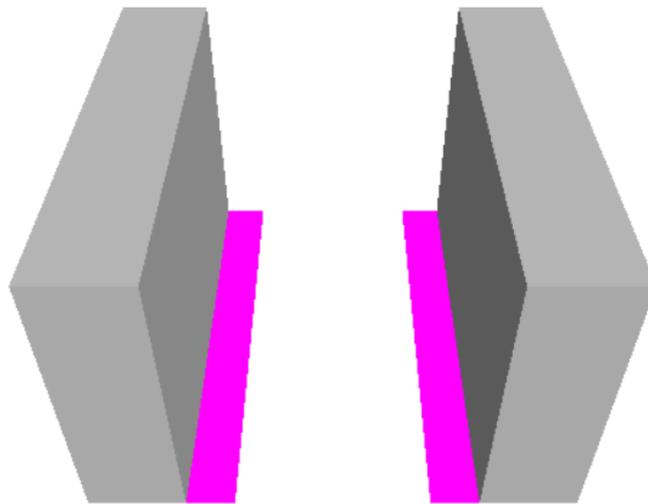
12. 方案 D_PP_3_6

鋪面含水狀態為永久凋萎點，道鋪面種類為多孔滲瀝青混凝土(透水)，人行道鋪面種類為透水水泥混凝土地磚(透水)，植栽綠帶數量為3，植栽 LAI 值為 6。



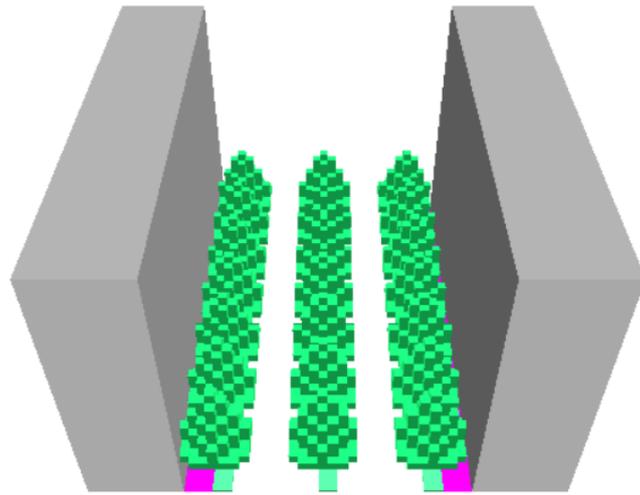
13. 方案 W_IP_0

鋪面含水狀態為永久凋萎點，車道鋪面種類為密集配瀝青混凝土(不透水)，人行道鋪面種類為透水水泥混凝土地磚(透水)，植栽綠帶數量為0。



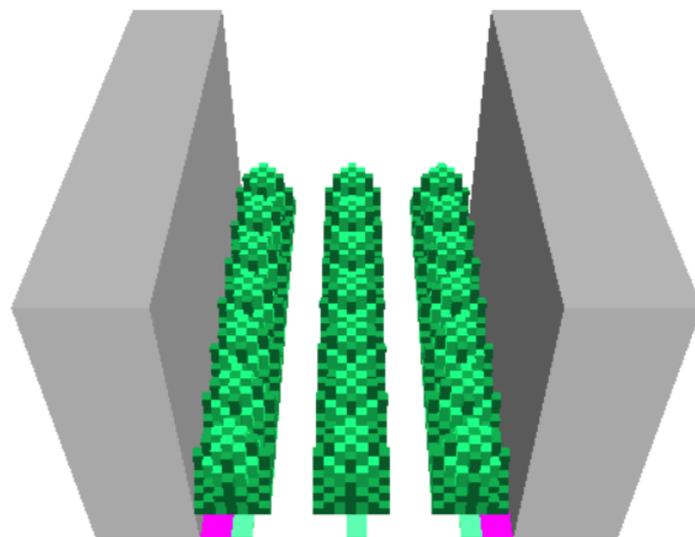
14. 方案 W_IP_3_1

鋪面含水狀態為田間含水量，車道鋪面種類為密集配瀝青混凝土(不透水)，人行道鋪面種類為透水水泥混凝土地磚(透水)，植栽綠帶數量為3，植栽 LAI 值為 1.5。



15. 方案 W_IP_3_6

鋪面含水狀態為田間含水量，車道鋪面種類為密集配瀝青混凝土(不透水)，人行道鋪面種類為透水水泥混凝土地磚(透水)，植栽綠帶數量為3，植栽 LAI 值為 6。



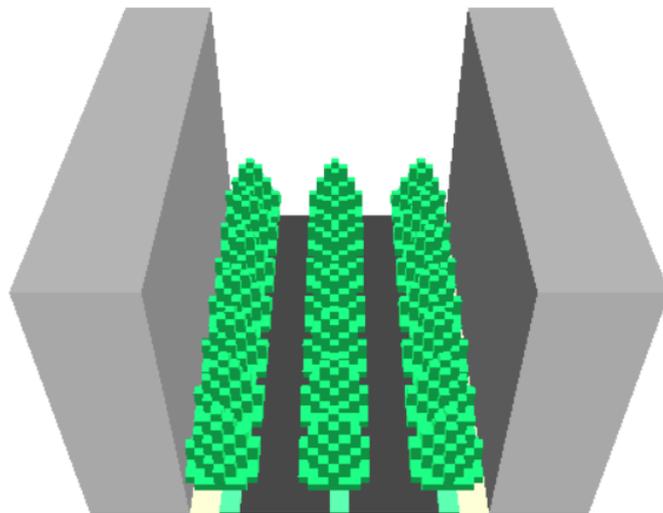
16. 方案 W_PI_0

鋪面含水狀態為田間含水量，車道鋪面種類為多孔滲瀝青混凝土(透水)，人行道鋪面種類為水泥混凝土磚(不透水)，植栽綠帶數量為0。



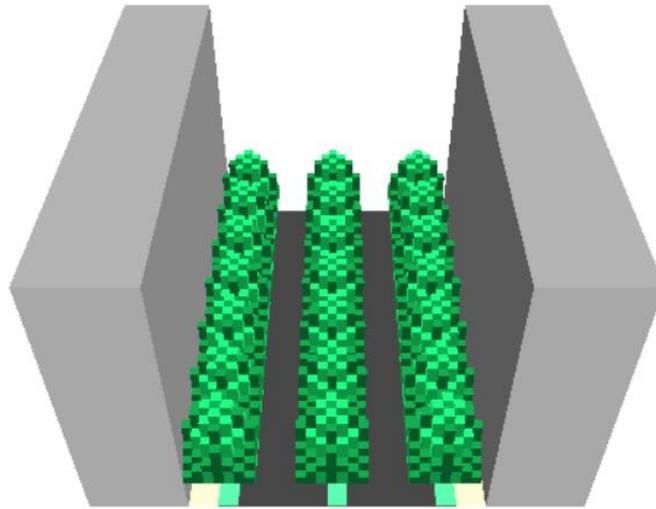
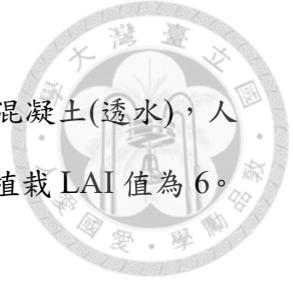
17. 方案 W_PI_3_1

鋪面含水狀態為田間含水量，車道鋪面種類為多孔滲瀝青混凝土(透水)，人行道鋪面種類為水泥混凝土磚(不透水)，植栽綠帶數量為3，植栽 LAI 值為 1.5。



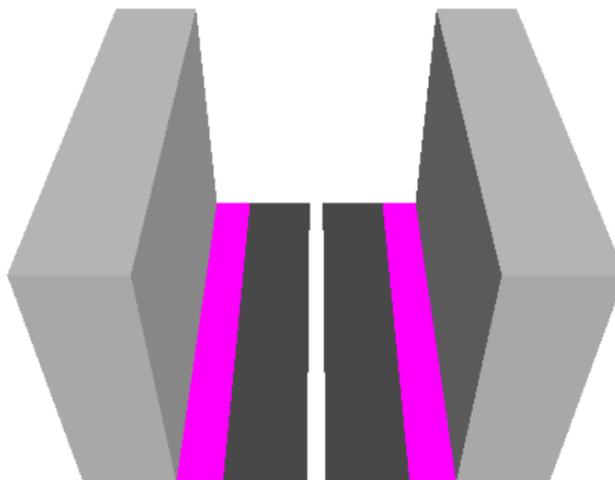
18. 方案 W_PI_3_6

鋪面含水狀態為田間含水量，車道鋪面種類為多孔滲瀝青混凝土(透水)，人行道鋪面種類為水泥混凝土磚(不透水)，植栽綠帶數量為3，植栽 LAI 值為 6。



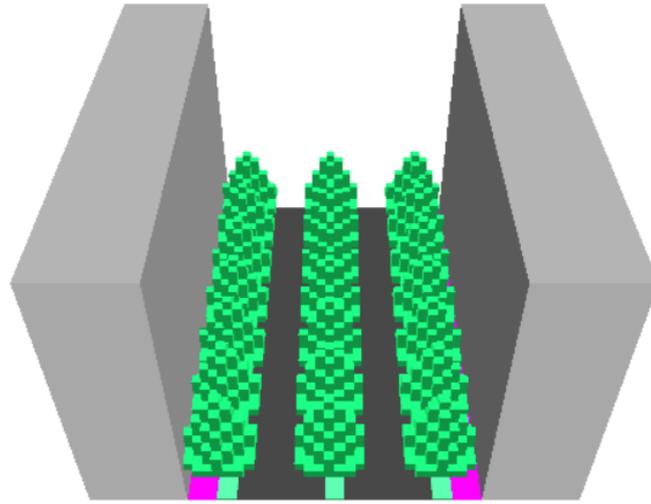
19. 方案 W_PP_0

鋪面含水狀態為田間含水量，車道鋪面種類為多孔滲瀝青混凝土(透水)，人行道鋪面種類為透水水泥混凝土磚(透水)，植栽綠帶數量為 0。



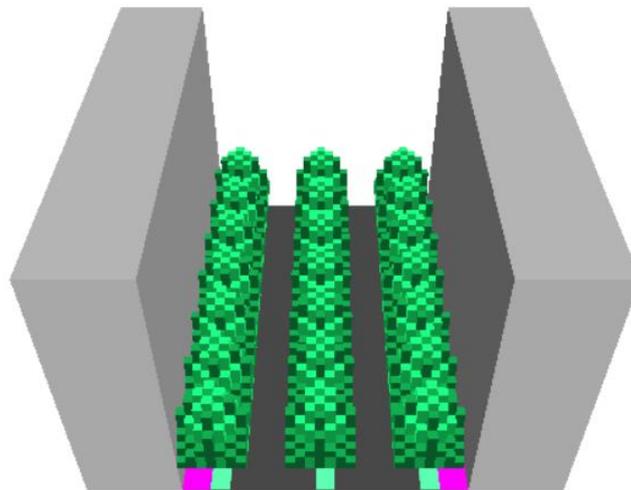
20. 方案 W_PP_3_1

鋪面含水狀態為田間含水量，車道鋪面種類為多孔滲瀝青混凝土(透水)，人行道鋪面種類為透水水泥混凝土磚(透水)，植栽綠帶數量為3，植栽 LAI 值為 1.5。



21. 方案 W_PP_3_6

鋪面含水狀態為田間含水量，車道鋪面種類為多孔滲瀝青混凝土(透水)，人行道鋪面種類為透水水泥混凝土磚(透水)，植栽綠帶數量為3，植栽 LAI 值為 6。



第四節 資料處理與分析

本研究使用 ENVI-met Version5 軟體進行模擬計算，將全部方案的模擬結果所輸出的資料全部收集後，利用 Excel 整理資料並進行建檔，再利用 SPSS 統計軟體進行描述性統計與檢定分析。



一、 資料整理

(一) 人體熱舒適資料

為比較不同方案之間的熱舒適度差異，將 ENVI-met 輸出氣溫、輻射溫度等氣候資料，並以 Bio Met 進行 PET 計算，分別輸出各方案中人行道範圍的方格在整點時刻(上午 8 點至下午 6 點，共計 11 個時刻)的資料，以各方案的 T_a 平均值、 T_{mrt} 平均值、PET 平均值進行比較並繪製圖表。

(二) 人體熱舒適降溫效果

本研究的人體熱舒適降溫效果定義為基礎方案 D_II_0 與其他各方案的 PET 溫差。

二、 研究假設檢定

為驗證本研究所提出的 6 個假設，將進行方案之間的比較。首先以植栽綠帶數量、植栽 LAI 值、車道鋪面種類、人行道鋪面種類和鋪面含水狀態，進行獨立樣本 t 檢定，觀察其 PET 降溫效果是否具有顯著差異。再以行道樹組成與鋪面含水情形視為解釋變項，以 PET 降溫為應變項進行逐步迴歸分析，驗證行道樹組成與鋪面含水情形對 PET 的影響。

第四章 研究結果



第一節 不同方案的模擬結果

本研究之目的為探討不同行道樹組成、鋪面含水情形下對行人熱舒適之影響，取早上 8 點至下午 6 點，總計 11 個時刻的 T_a 、 T_{mrt} 和 PET 進行分析，分析結果如下：

一、 各方案的 T_a 表現

依據早上 8 點至下午 6 點的平均 T_a ，方案 D_{II_0} 的平均 T_a 最高，為 35.96°C；最低則為方案 W_{PP_3_6}，為 33.87°C，兩者差值為 2.09°C。由高至低依序為方案 D_{II_0}(35.96°C)、方案 D_{IP_0}(35.82°C)、方案 D_{PI_0}(35.72°C)、方案 D_{II_3_1}(35.59°C)、方案 D_{PP_0}(35.57°C)、方案 D_{IP_3_1}(35.47°C)、方案 D_{PI_3_1}(35.35°C)、方案 D_{II_3_6}(35.29°C)、方案 W_{PI_0}(35.25°C)、方案 D_{PP_3_1}(35.18°C)、方案 D_{IP_3_6}(35.14°C)、方案 W_{IP_0}(35.11°C)、方案 D_{PI_3_6}(34.98°C)、方案 D_{PP_3_6}(34.84°C)、方案 W_{IP_3_1}(34.75°C)、方案 W_{PI_3_1}(34.60°C)、方案 W_{IP_3_6}(34.48°C)、方案 W_{PP_0}(34.47°C)、方案 W_{PI_3_6}(34.42°C)、方案 W_{PP_3_1}(34.12°C)、方案 W_{PP_3_6}(33.87°C) (表 4-1)。

依據早上 8 點至下午 6 點所出現的各方案 T_a 最高溫，方案 D_{II_0} 的 T_a 最高溫最高，為 39.51°C；最低則為方案 W_{PP_3_6}，為 38.69°C。依據早上 8 點至下午 6 點所出現的各方案 T_a 最低溫，方案 D_{II_0} 的 T_a 最低溫最高，為 30.22°C；最低則為方案 W_{PP_3_6}，為 28.58°C (表 4-1)。

表 4-1 各方案所有人行道範圍之 T_a 表

編號	方案名稱	平均 T_a (°C)	T_a 範圍(°C)		編號	方案名稱	平均 T_a (°C)	T_a 範圍(°C)	
			最低溫	最高溫				最低溫	最高溫
1	D_II_0*	35.96	30.22	39.51	13	W_IP_0	35.11	29.49	38.89
2	D_II_3_1	35.59	29.88	39.11	14	W_IP_3_1	34.75	29.26	38.82
3	D_II_3_6	35.29	29.84	38.85	15	W_IP_3_6	34.48	29.12	38.78
4	D_IP_0	35.82	29.62	39.53	16	W_PI_0	35.25	29.63	38.81
5	D_IP_3_1	35.47	29.40	39.08	17	W_PI_3_1	34.60	28.98	38.74
6	D_IP_3_6	35.14	29.27	38.84	18	W_PI_3_6	34.42	28.87	38.72
7	D_PI_0	35.72	29.66	39.48	19	W_PP_0	34.47	29.27	38.75
8	D_PI_3_1	35.35	29.04	38.94	20	W_PP_3_1	34.12	28.78	38.71
9	D_PI_3_6	34.98	28.94	38.82	21	W_PP_3_6	33.87	28.58	38.69
10	D_PP_0	35.57	29.33	39.50					
11	D_PP_3_1	35.18	28.87	38.89					
12	D_PP_3_6	34.84	28.71	38.81					

(一)、 不同鋪面種類組合下的方案平均 T_a 差異

圖 4-2 為同行道樹組成的平均 T_a 變化圖。由圖 4-1-1 可以發現，植栽綠帶數量為 0 且鋪面含水狀態為永久凋萎點的方案，鋪面種類組合的平均 T_a 由高至低依序為車道不透水且人行道不透水、車道不透水且人行道透水、車道透水且人行道不透水、車道透水且人行道透水，而鋪面種類組合的平均 T_a 差異在下午 2 點過後變得不明顯；植栽綠帶數量為 0 且鋪面含水狀態為田間含水量的方案，鋪面種類組合的平均 T_a 由高至低依序為車道透水且人行道不透水、車道不透水且人行道透水、車道透水且人行道透水，而車道透水且人行道透水的平均 T_a 明顯最低。整體來看，鋪面含水狀態為田間含水量的方案，其平均 T_a 在上午 11 過後明顯高於鋪面含水狀態為永久凋萎點的方案。

由圖 4-1-2 可以發現，植栽綠帶數量為 3 且低 LAI、鋪面含水狀態為永久凋萎點的方案，鋪面種類組合的平均 T_a 由高至低依序為車道不透水且人行道不透水、車道不透水且人行道透水、車道透水且人行道不透水、車道透水且人行道透水，而鋪面種類組合的平均 T_a 差異在下午 2 點過後變得不明顯；植栽綠帶數量

為 3 且低 LAI、鋪面含水狀態為田間含水量的方案，鋪面種類組合的平均 T_a 由高至低依序為車道不透水且人行道透水、車道透水且人行道不透水、車道透水且人行道透水，而車道透水且人行道透水的平均 T_a 明顯最低。整體來看，鋪面含水狀態為永久凋萎點的方案，其平均 T_a 在上午 11 過後明顯高於鋪面含水狀態為田間含水量的方案。

由圖 4-1-3 可以發現，植栽綠帶數量為 3 且高 LAI、鋪面含水狀態為永久凋萎點的方案，鋪面種類組合的平均 T_a 由高至低依序為車道不透水且人行道不透水、車道不透水且人行道透水、車道透水且人行道不透水、車道透水且人行道透水，而鋪面種類組合的平均 T_a 差異在下午 2 點過後變得不明顯；植栽綠帶數量為 3 且高 LAI、鋪面含水狀態為田間含水量的方案，鋪面種類組合的平均 T_a 由高至低依序為車道不透水且人行道透水、車道透水且人行道不透水、車道透水且人行道透水，而車道透水且人行道透水的平均 T_a 明顯最低。整體來看，鋪面含水狀態為永久凋萎點的方案，其平均 T_a 在中午 12 過後明顯高於鋪面含水狀態為田間含水量的方案。

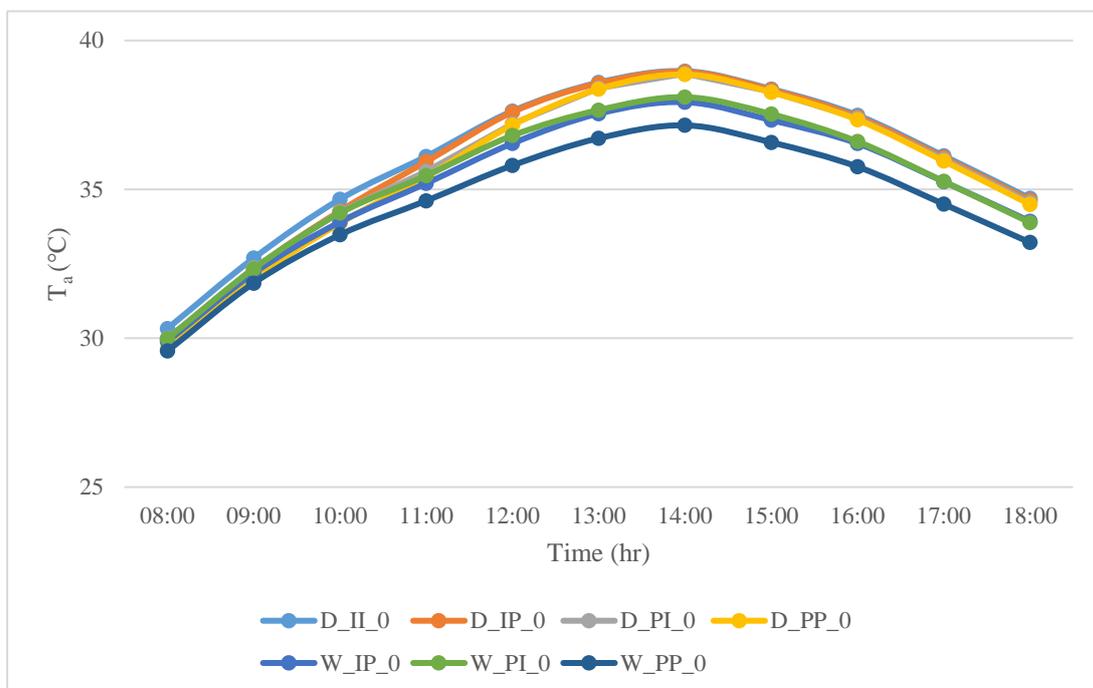


圖 4-1-1 同行道樹組成的平均 T_a 變化圖 (植栽綠帶為 0 之方案)

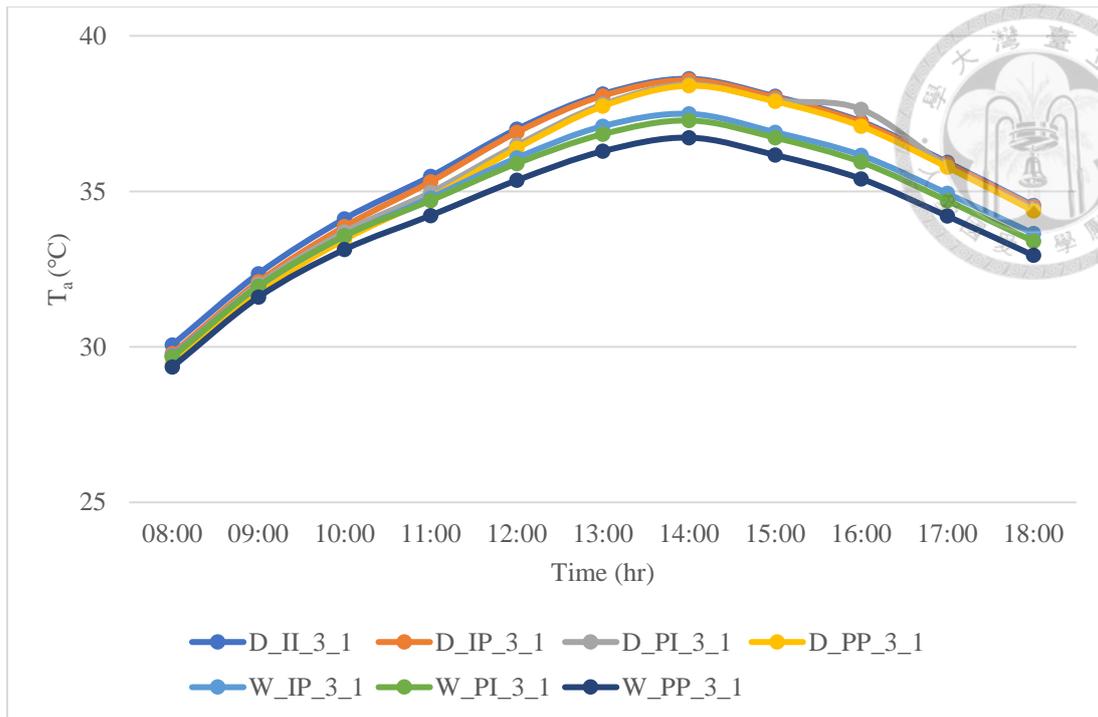


圖 4-1-2 同行道樹組成的平均 T_a 變化圖 (植栽綠帶為 3 且為低 LAI 之方案)

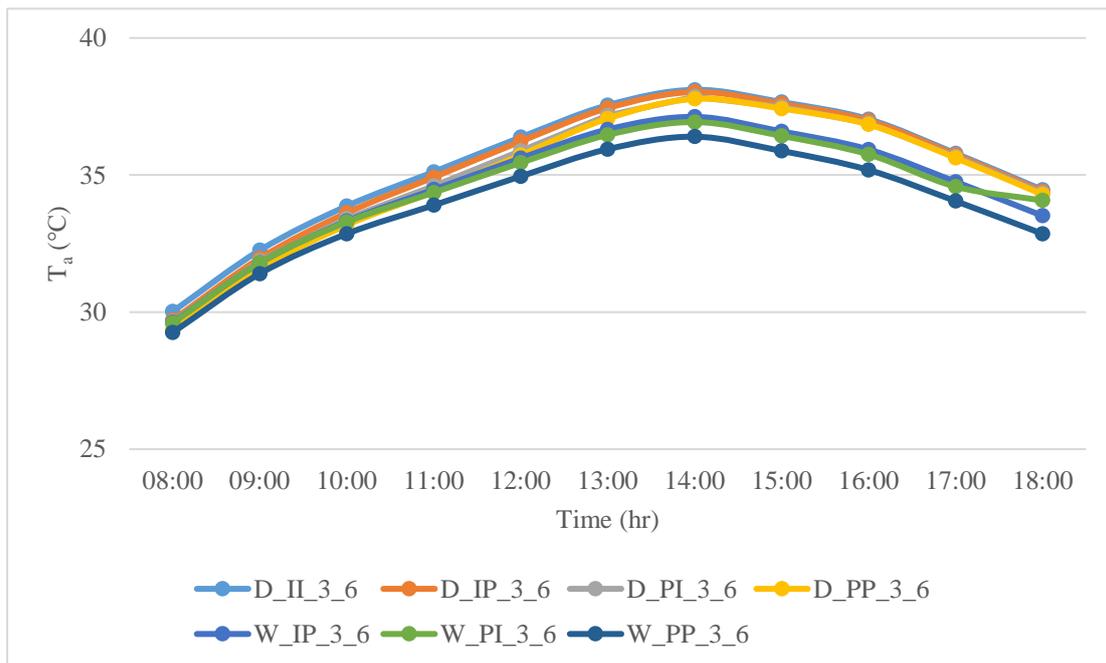


圖 4-1-3 同行道樹組成的平均 T_a 變化圖 (植栽綠帶為 3 且為高 LAI 之方案)

(二)、 不同行道樹組成下的方案平均 T_a 差異

圖 4-2 為同鋪面種類組合的平均 T_a 變化圖。由圖 4-2-1 可以發現，鋪面種類組合為車道不透水且人行道不透水、鋪面含水狀態為永久凋萎點的方案，行道樹組成平均 T_a 由高至低依序為植栽綠帶數量為 0、植栽綠帶數量為 3 且低 LAI、植栽綠帶數量為 3 且高 LAI，而行道樹組成的平均 T_a 差異在中午 12 點最為明顯，下午 4 點過後差異變小。

由圖 4-2-2 可以發現，鋪面種類組合為車道不透水且人行道透水、鋪面含水狀態為永久凋萎點的方案，行道樹組成平均 T_a 由高至低依序為植栽綠帶數量為 0、植栽綠帶數量為 3 且低 LAI、植栽綠帶數量為 3 且高 LAI，而行道樹組成的平均 T_a 差異在中午 12 點最為明顯，下午 4 點過後差異變小；鋪面種類組合為車道不透水且人行道透水、鋪面含水狀態為田間含水量的方案，行道樹組成平均 T_a 由高至低依序為植栽綠帶數量為 0、植栽綠帶數量為 3 且低 LAI、植栽綠帶數量為 3 且高 LAI，而行道樹組成的平均 T_a 差異在中午 12 點至下午 2 點最為明顯。整體來看，鋪面含水狀態為永久凋萎點、植栽綠帶數量為 3 的方案，其平均 T_a 低於鋪面含水狀態為田間含水量、植栽綠帶數量為 0 的方案。

由圖 4-2-3 可以發現，鋪面種類組合為車道透水且人行道不透水、鋪面含水狀態為永久凋萎點的方案，行道樹組成平均 T_a 由高至低依序為植栽綠帶數量為 0、植栽綠帶數量為 3 且低 LAI、植栽綠帶數量為 3 且高 LAI，而行道樹組成的平均 T_a 差異在中午 12 點最為明顯，下午 5 點過後差異變小；鋪面種類組合為車道透水且人行道不透水、鋪面含水狀態為田間含水量的方案，行道樹組成平均 T_a 由高至低依序為植栽綠帶數量為 0、植栽綠帶數量為 3 且低 LAI、植栽綠帶數量為 3 且高 LAI，而行道樹組成的平均 T_a 差異在中午 12 點至下午 2 點最為明顯。整體來看，鋪面含水狀態為永久凋萎點、植栽綠帶數量為 3 的方案，其平均 T_a 低於鋪面含水狀態為田間含水量、植栽綠帶數量為 0 的方案。

由圖 4-2-4 可以發現，鋪面種類組合為車道透水且人行道透水、鋪面含水狀態為永久凋萎點的方案，行道樹組成平均 T_a 由高至低依序為植栽綠帶數量為 0、植栽綠帶數量為 3 且低 LAI、植栽綠帶數量為 3 且高 LAI，而行道樹組成的平均 T_a 差異在中午 12 點最為明顯，下午 5 點過後差異變小；鋪面種類組合為車道透水且人行道透水、鋪面含水狀態為田間含水量的方案，行道樹組成平均 T_a 由高至低依序為植栽綠帶數量為 0、植栽綠帶數量為 3 且低 LAI、植栽綠帶數量為 3 且高 LAI，而行道樹組成的平均 T_a 差異在中午 12 點至下午 2 點最為明顯。整體來看，在中午 12 點過後鋪面含水狀態為永久凋萎點的方案，其平均 T_a 高於鋪面含水狀態為田間含水量的方案。

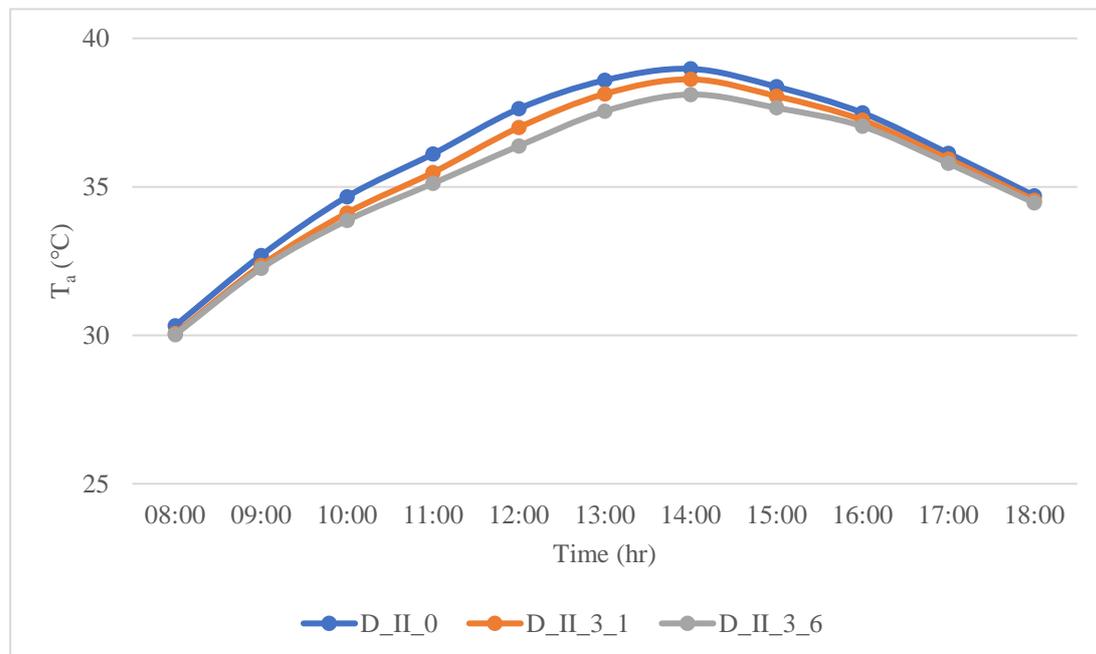


圖 4-2-1 同鋪面種類組合的平均 T_a 變化圖

(鋪面種類組合為車道不透水且人行道不透水之方案)

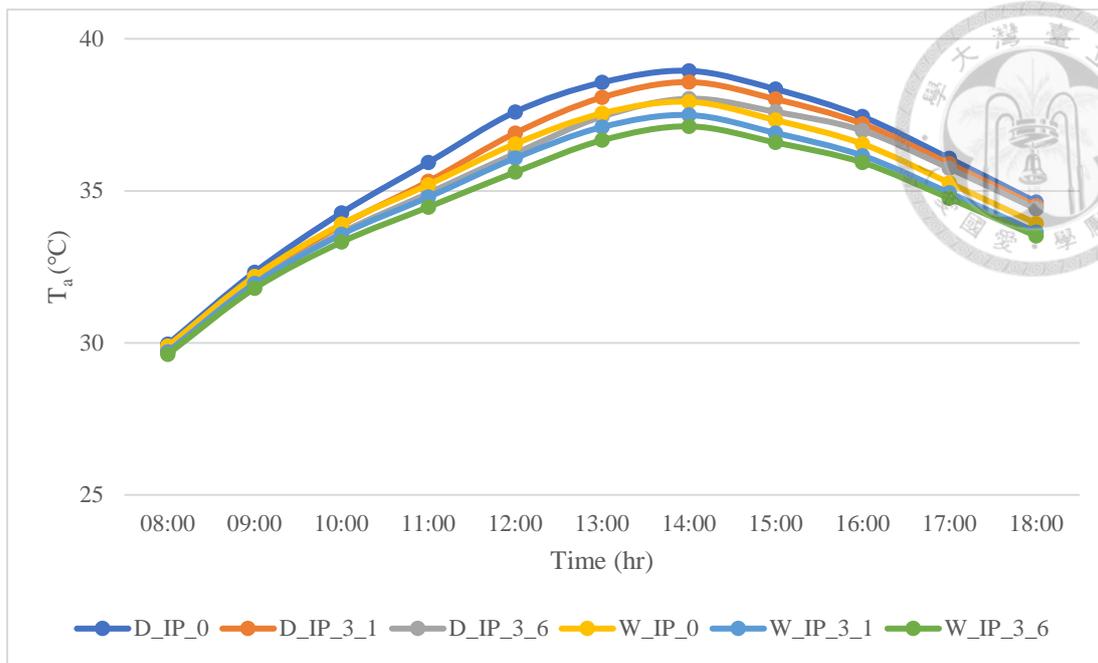


圖 4-2-2 同鋪面種類組合的平均 T_a 變化圖

(鋪面種類組合為車道不透水且人行道透水之方案)

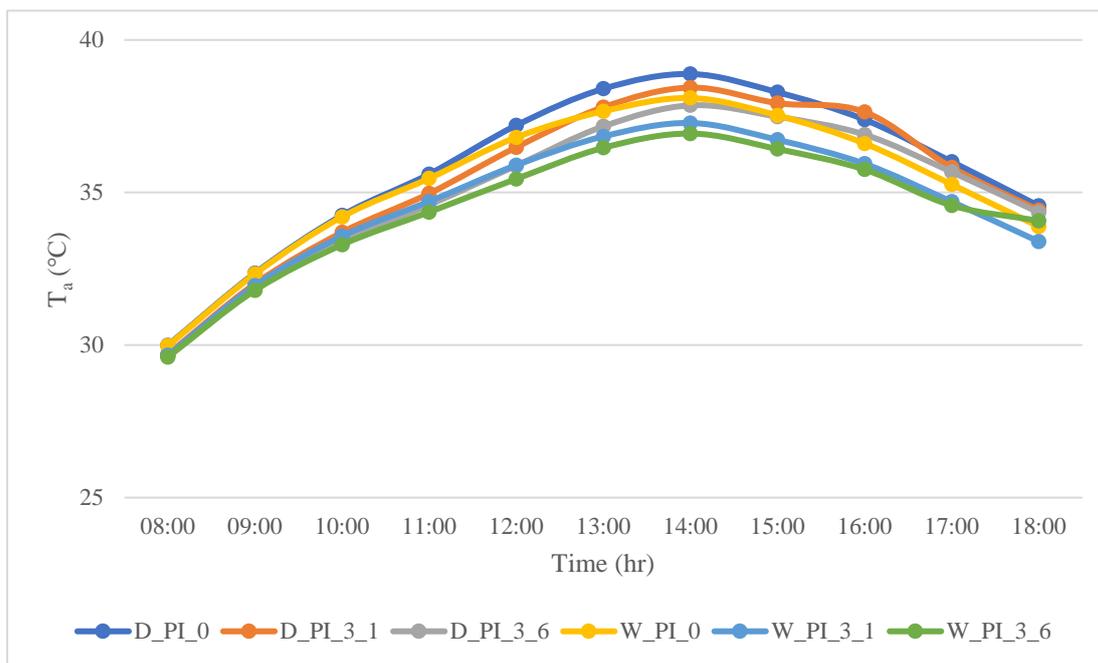


圖 4-2-3 同鋪面種類組合的平均 T_a 變化圖

(鋪面種類組合為車道透水且人行道不透水之方案)

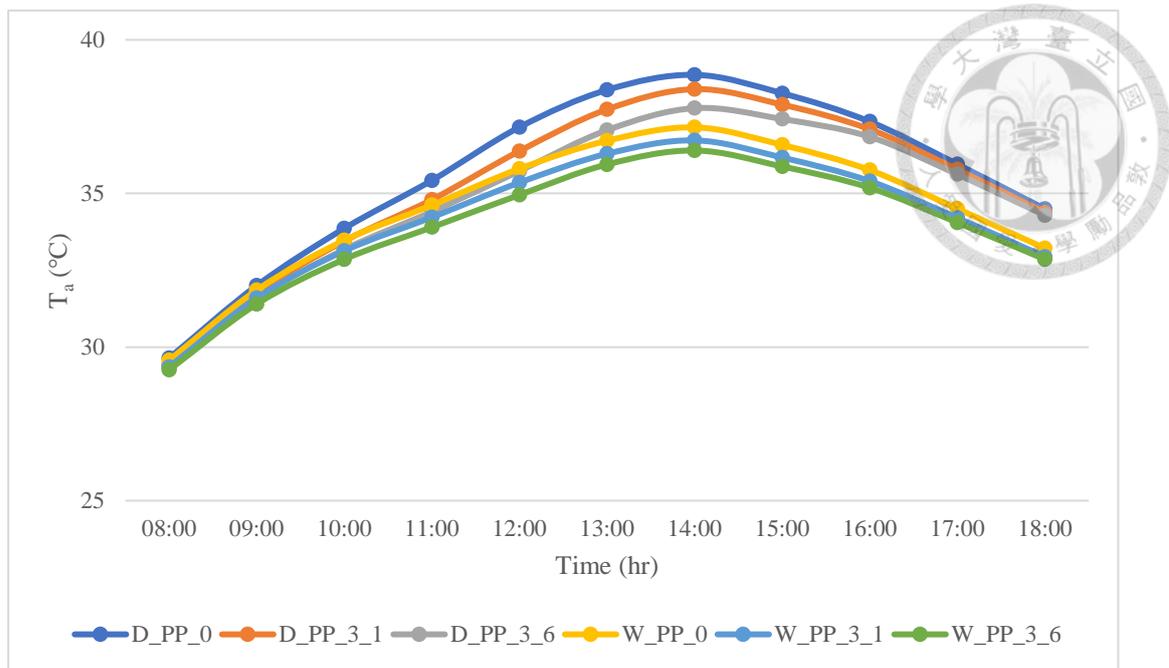


圖 4-2-4 同鋪面種類組合的平均 T_a 變化圖

(鋪面種類組合為車道透水且人行道透水之方案)

二、 各方案的 T_{mrt} 表現

依據早上 8 點至下午 6 點的平均 T_{mrt} ，方案 D_II_0 的平均 T_{mrt} 最高，為 48.84°C ；最低則為方案 W_PP_3_6，為 32.47°C ，兩者差值為 16.37°C 。由高至低依序為方案 D_II_0(48.84°C)、方案 D_PI_0(48.63°C)、方案 D_IP_0(48.20°C)、方案 D_PP_0(48.00°C)、方案 W_IP_0(44.73°C)、方案 D_II_3_1(43.29°C)、方案 W_PI_0(43.13°C)、方案 D_PI_3_1(42.99°C)、方案 D_IP_3_1(42.95°C)、方案 D_PP_3_1(42.26°C)、方案 W_IP_3_1(40.12°C)、方案 W_PP_0(39.18°C)、方案 D_II_3_6(38.29°C)、方案 D_IP_3_6(37.98°C)、方案 D_PI_3_6(37.39°C)、方案 W_PI_3_1(37.26°C)、方案 D_PP_3_6(37.10°C)、方案 W_IP_3_6(36.11°C)、方案 W_PP_3_1(35.67°C)、方案 W_PI_3_6(33.79°C)、方案 W_PP_3_6(32.47°C) (表 4-2)。

依據早上 8 點至下午 6 點所出現的各方案 T_{mrt} 最高溫，方案 D_PI_0 的 T_{mrt} 最高溫最高，為 65.89°C ；最低則為方案 W_PP_3_6，為 50.43°C 。依據早上 8 點

至下午 6 點所出現的各方案 T_{mrt} 最低溫，方案 D_II_0 的 T_{mrt} 最低溫最高，為 30.87°C；最低則為方案 W_PP_3_6，為 28.85°C (表 4-2)。

表 4-2 各方案所有人行道範圍之 T_{mrt} 表

編號	方案名稱	平均 T_{mrt} (°C)	T_{mrt} 範圍(°C)		編號	方案名稱	平均 T_{mrt} (°C)	T_{mrt} 範圍(°C)	
			最低溫	最高溫				最低溫	最高溫
1	D_II_0*	48.84	30.87	64.46	13	W_IP_0	44.73	29.08	59.74
2	D_II_3_1	43.29	29.59	58.38	14	W_IP_3_1	40.12	28.46	55.10
3	D_II_3_6	38.29	28.74	55.55	15	W_IP_3_6	36.11	27.73	53.22
4	D_IP_0	48.20	30.26	64.05	16	W_PI_0	43.13	27.55	59.44
5	D_IP_3_1	42.95	28.97	58.24	17	W_PI_3_1	37.26	27.12	53.21
6	D_IP_3_6	37.98	28.15	55.43	18	W_PI_3_6	33.79	26.65	51.46
7	D_PI_0	48.63	29.71	65.89	19	W_PP_0	39.18	25.94	55.51
8	D_PI_3_1	42.99	28.00	58.62	20	W_PP_3_1	35.67	26.29	51.71
9	D_PI_3_6	37.39	27.15	55.32	21	W_PP_3_6	32.47	25.85	50.43
10	D_PP_0	48.00	28.62	65.47					
11	D_PP_3_1	42.26	27.42	58.44					
12	D_PP_3_6	37.10	26.60	55.19					

(一)、 不同鋪面種類組合下的方案平均 T_{mrt} 差異

圖 4-3 為同行道樹組成的平均 T_{mrt} 變化圖。由圖 4-3-1 可以發現，植栽綠帶數量為 0 且鋪面含水狀態為永久凋萎點的方案，鋪面種類組合的平均 T_{mrt} 在中午 12 點前由高至低依序為車道不透水且人行道不透水、車道不透水且人行道透水、車道透水且人行道不透水、車道透水且人行道透水，在中午 12 點至下午 3 點間由高至低依序變為車道透水且人行道不透水、車道透水且人行道透水、車道不透水且人行道不透水、車道不透水且人行道透水，在下午 3 點過後鋪面種類組合的平均 T_{mrt} 差異變得不明顯；植栽綠帶數量為 0 且鋪面含水狀態為田間含水量的方案，鋪面種類組合的平均 T_a 由高至低依序為車道透水且人行道不透水、車道不透水且人行道透水、車道透水且人行道透水，在中午 12 點鋪面種類組合的平均 T_{mrt} 差異最為明顯。整體來看，鋪面含水狀態為永久凋萎點的方案，其平均 T_{mrt} 在上午 9 點過後明顯高於鋪面含水狀態為田間含水量的方案。

由圖 4-3-2 可以發現，植栽綠帶數量為 3、低 LAI 且鋪面含水狀態為永久凋

萎點的方案，鋪面種類組合的平均 T_{mrt} 在中午 12 點前由高至低依序為車道不透水且人行道不透水、車道不透水且人行道透水、車道透水且人行道不透水、車道透水且人行道透水，在中午 12 點過後鋪面種類組合的平均 T_{mrt} 差異變得不明顯；植栽綠帶數量為 3、低 LAI 且鋪面含水狀態為田間含水量的方案，鋪面種類組合的平均 T_{mrt} 由高至低依序為車道透水且人行道不透水、車道不透水且人行道透水、車道透水且人行道透水，在中午 12 點鋪面種類組合的平均 T_{mrt} 差異最為明顯。整體來看，鋪面含水狀態為永久凋萎點的方案，其平均 T_{mrt} 在上午 10 點過後明顯高於鋪面含水狀態為田間含水量的方案。

由圖 4-3-3 可以發現，植栽綠帶數量為 3、高 LAI 且含水狀態為永久凋萎點的方案，鋪面種類組合的平均 T_{mrt} 在下午 1 點前由高至低依序為車道不透水且人行道不透水、車道不透水且人行道透水、車道透水且人行道不透水、車道透水且人行道透水，在下午 1 點過後鋪面種類組合的平均 T_{mrt} 差異變得不明顯；植栽綠帶數量為 3、高 LAI 且含水狀態為田間含水量的方案，鋪面種類組合的平均 T_{mrt} 由高至低依序為車道透水且人行道不透水、車道不透水且人行道透水、車道透水且人行道透水，在中午 12 點鋪面種類組合的平均 T_{mrt} 差異最為明顯。整體來看，含水狀態為永久凋萎點的方案，其平均 T_{mrt} 在上午 11 點過後明顯高於含水狀態為田間含水量的方案。

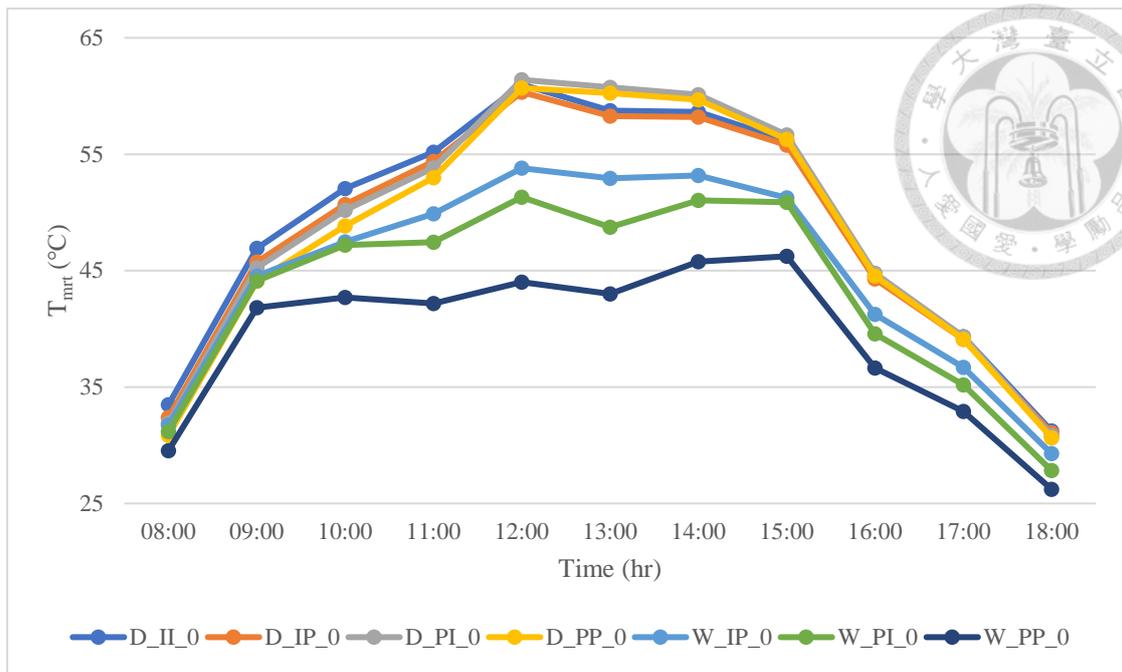


圖 4-3-1 同行道樹組成的平均 T_{mrt} 變化圖 (植栽綠帶為 0 之方案)

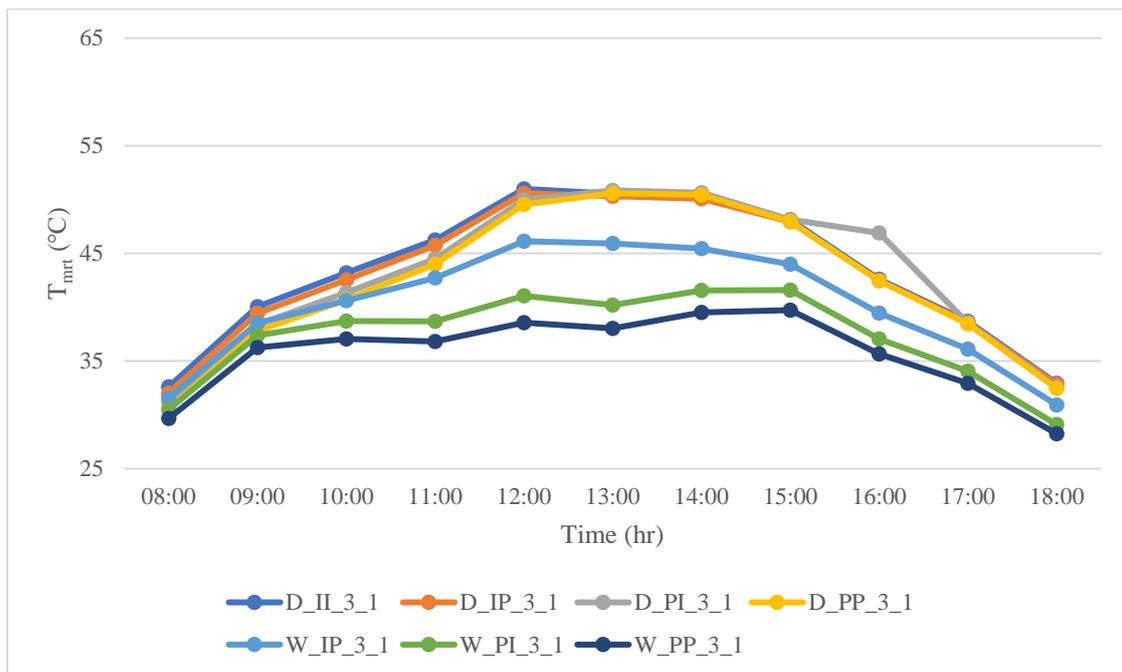


圖 4-3-2 同行道樹組成的平均 T_{mrt} 變化圖 (植栽綠帶為 3 且為低 LAI 之方案)

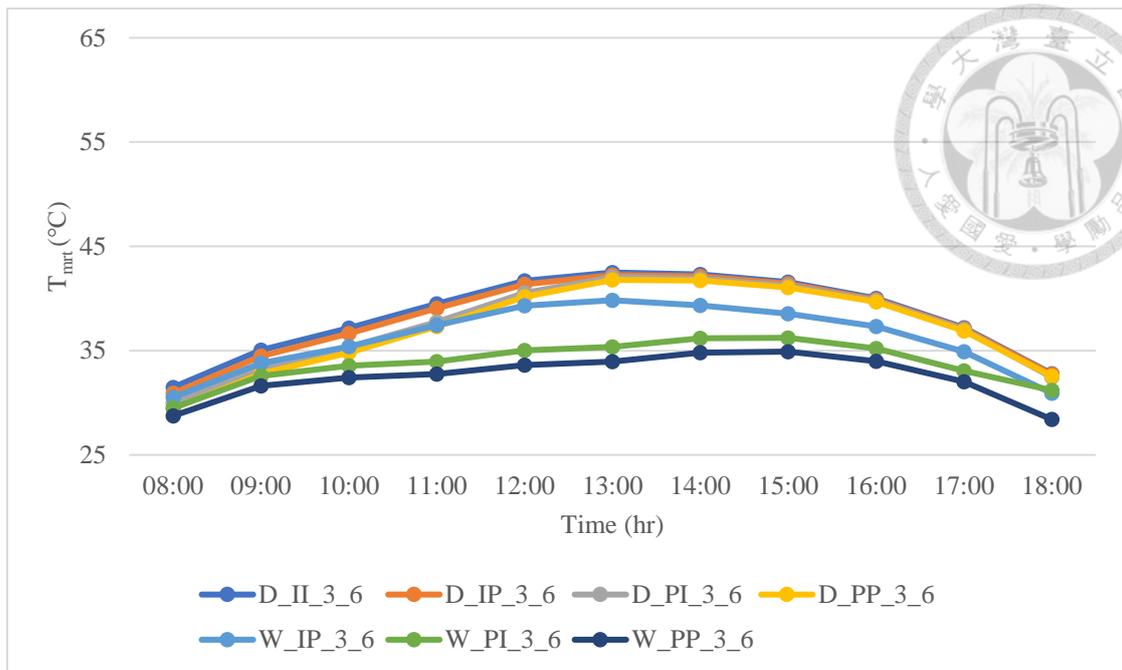


圖 4-3-3 同行道樹組成的平均 T_{mrt} 變化圖 (植栽綠帶為 3 且為高 LAI 之方案)

(二)、 不同行道樹組成下的方案平均 T_{mrt} 差異

圖 4-4 為同鋪面種類組合的平均 T_{mrt} 變化圖。由圖 4-4-1 可以發現，鋪面種類組合為車道不透水且人行道不透水、鋪面含水狀態為永久凋萎點的方案，行道樹組成平均 T_{mrt} 由高至低依序為植栽綠帶數量為 0、植栽綠帶數量為 3 且低 LAI、植栽綠帶數量為 3 且高 LAI，而行道樹組成的平均 T_{mrt} 差異在中午 12 點最為明顯，下午 4 點過後差異變小。

由圖 4-4-2 可以發現，鋪面種類組合為車道不透水且人行道透水、鋪面含水狀態為永久凋萎點的方案，行道樹組成平均 T_{mrt} 由高至低依序為植栽綠帶數量為 0、植栽綠帶數量為 3 且低 LAI、植栽綠帶數量為 3 且高 LAI，而行道樹組成的平均 T_{mrt} 差異在中午 12 點最為明顯，下午 4 點過後差異變小；鋪面種類組合為車道不透水且人行道透水、鋪面含水狀態為田間含水量的方案，行道樹組成平均 T_{mrt} 由高至低依序為植栽綠帶數量為 0、植栽綠帶數量為 3 且低 LAI、植栽綠帶數量為 3 且高 LAI，而行道樹組成的平均 T_{mrt} 差異在中午 12 點至下午 2 點最為明顯，下午 4 點過後差異變小。整體來看，鋪面含水狀態為永久凋萎點、植栽綠

帶數量為 3 的方案，其平均 T_{mrt} 低於鋪面含水狀態為田間含水量、植栽綠帶數量為 0 的方案。

由圖 4-4-3 可以發現，鋪面種類組合為車道透水且人行道不透水、鋪面含水狀態為永久凋萎點的方案，行道樹組成平均 T_{mrt} 由高至低依序為植栽綠帶數量為 0、植栽綠帶數量為 3 且低 LAI、植栽綠帶數量為 3 且高 LAI，而行道樹組成的平均 T_{mrt} 差異在中午 12 點最為明顯，下午 5 點過後差異變小；鋪面種類組合為車道透水且人行道不透水、鋪面含水狀態為田間含水量的方案，行道樹組成平均 T_{mrt} 由高至低依序為植栽綠帶數量為 0、植栽綠帶數量為 3 且低 LAI、植栽綠帶數量為 3 且高 LAI，而行道樹組成的平均 T_a 差異在中午 12 點最為明顯，下午 4 點過後差異變小。整體來看，鋪面含水狀態為永久凋萎點、植栽綠帶數量為 3 的方案，其平均 T_{mrt} 低於鋪面含水狀態為田間含水量、植栽綠帶數量為 0 的方案。

由圖 4-4-4 可以發現，鋪面種類組合為車道透水且人行道透水、鋪面含水狀態為永久凋萎點的方案，行道樹組成平均 T_{mrt} 由高至低依序為植栽綠帶數量為 0、植栽綠帶數量為 3 且低 LAI、植栽綠帶數量為 3 且高 LAI，而行道樹組成的平均 T_{mrt} 差異在中午 12 點最為明顯，下午 4 點過後差異變小；鋪面種類組合為車道透水且人行道透水、鋪面含水狀態為田間含水量的方案，行道樹組成平均 T_{mrt} 由高至低依序為植栽綠帶數量為 0、植栽綠帶數量為 3 且低 LAI、植栽綠帶數量為 3 且高 LAI，而行道樹組成的平均 T_{mrt} 差異在中午 12 點至下午 2 點最為明顯下午 5 點過後差異變小。整體來看，鋪面含水狀態為永久凋萎點、植栽綠帶數量為 3 且高 LAI 的方案，其平均 T_{mrt} 低於鋪面含水狀態為田間含水量、植栽綠帶數量為 0 的方案。

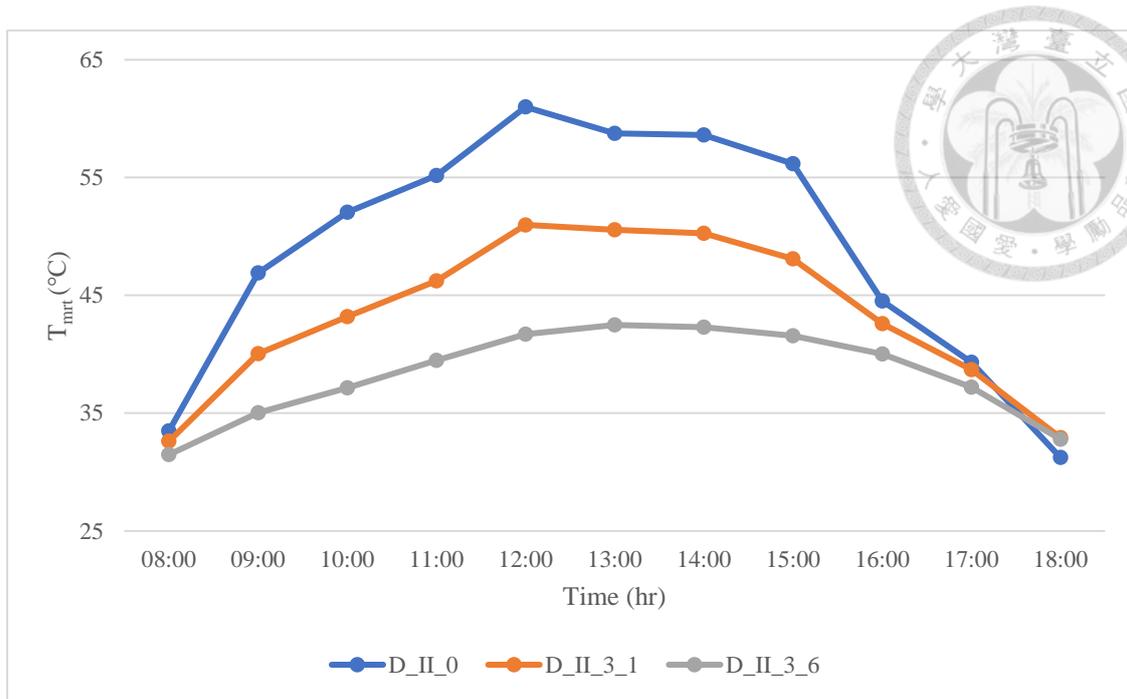


圖 4-4-1 同鋪面種類組合的平均 T_{mrt} 變化圖
(鋪面種類組合為車道不透水且人行道不透水之方案)

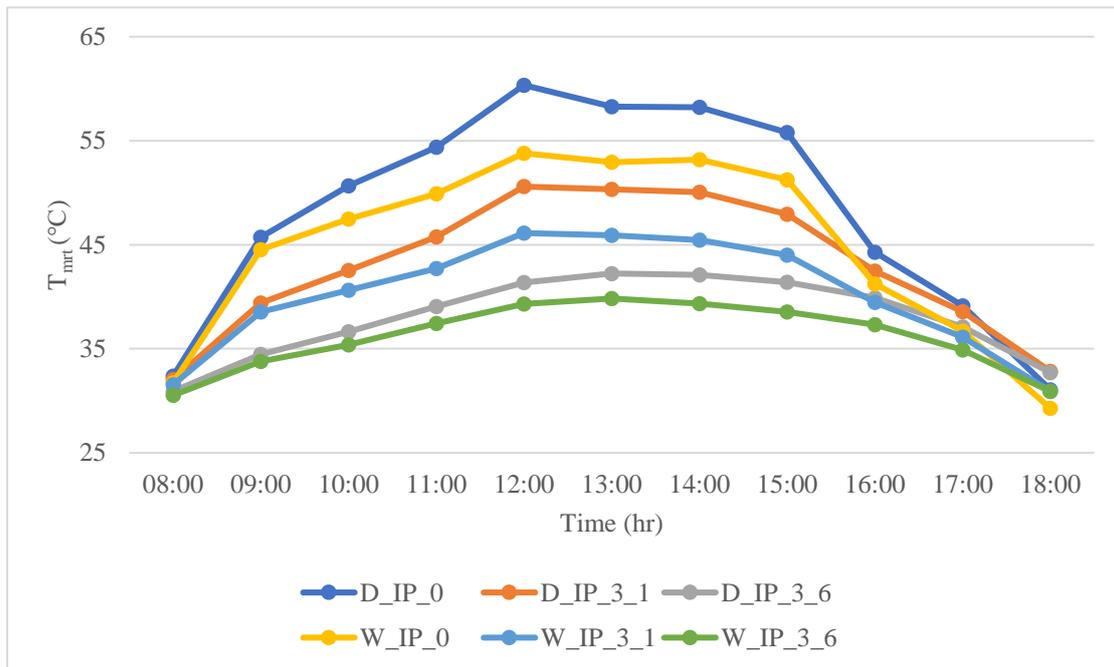


圖 4-4-2 同鋪面種類組合的平均 T_{mrt} 變化圖
(鋪面種類組合為車道不透水且人行道透水之方案)

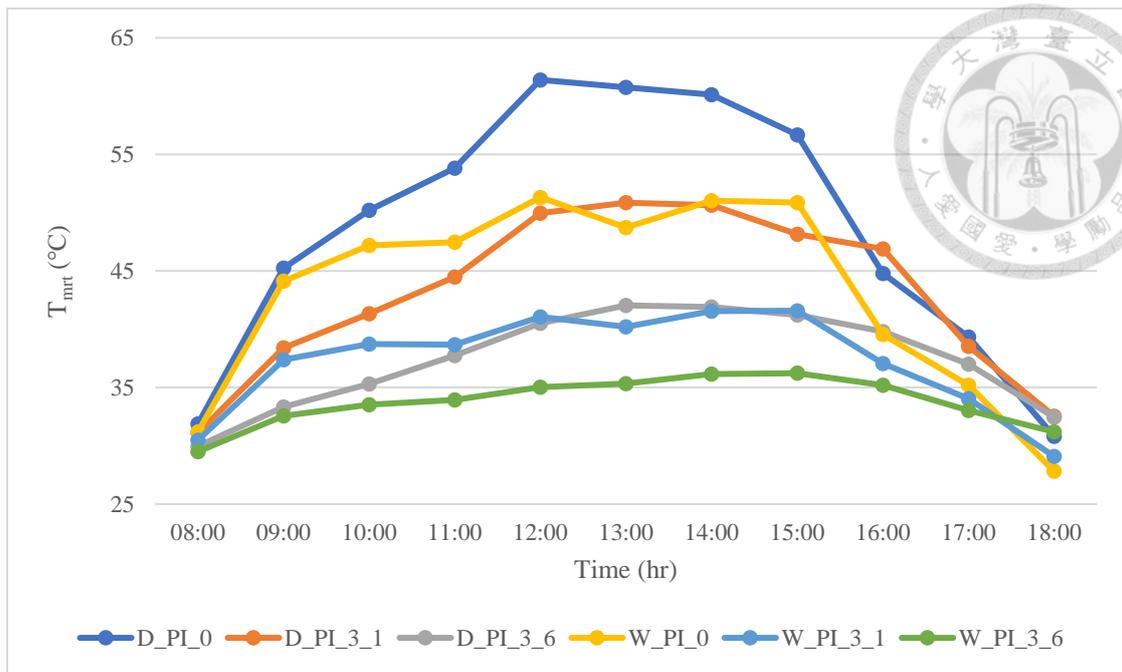


圖 4-4-3 同鋪面種類組合的平均 T_{mrt} 變化圖

(鋪面種類組合為車道透水且人行道不透水之方案)

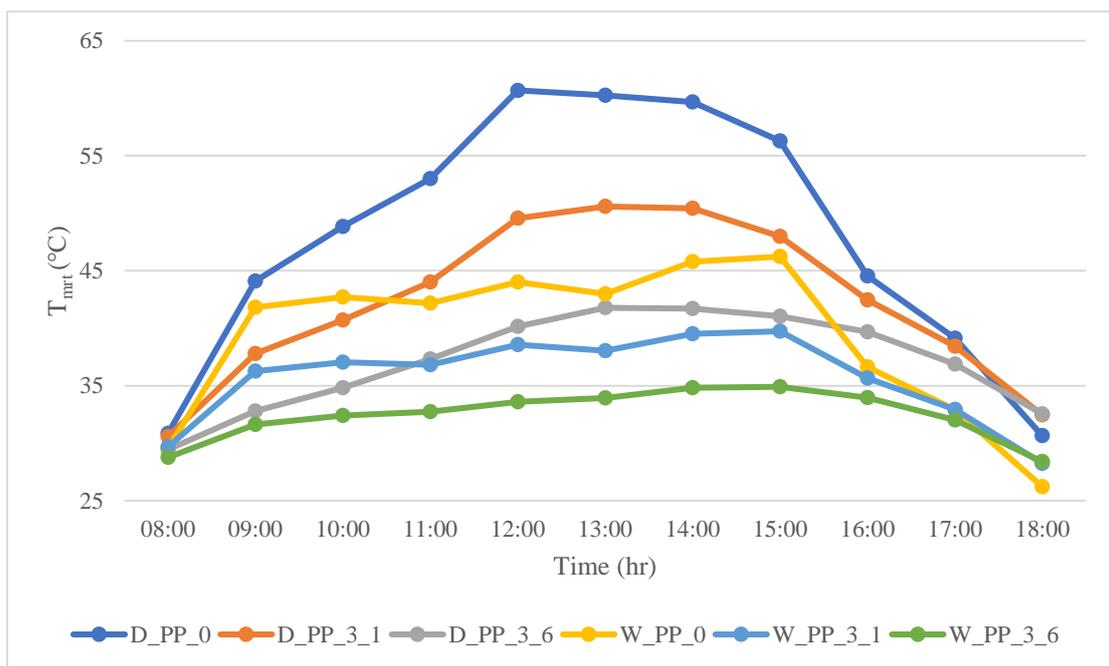


圖 4-4-4 同鋪面種類組合的平均 T_{mrt} 變化圖

(鋪面種類組合為車道透水且人行道透水之方案)



三、 各方案的 PET 表現

依據早上 8 點至下午 6 點的平均 PET，方案 D_II_0 的平均 PET 最高，為 42.12°C；最低則為方案 W_PP_3_6，為 32.82°C，兩者差值為 9.3°C。由高至低依序為方案 D_II_0(42.12°C)、方案 D_PI_0(41.78°C)、方案 D_IP_0(41.72°C)、方案 D_PP_0(41.39°C)、方案 W_IP_0(39.72°C)、方案 D_II_3_1(39.38°C)、方案 D_IP_3_1(39.11°C)、方案 W_PI_0(39.10°C)、方案 D_PI_3_1(39.04°C)、方案 D_PP_3_1(38.54°C)、方案 W_IP_3_1(37.12°C)、方案 D_II_3_6(36.71°C)、方案 W_PP_0(36.51°C)、方案 D_IP_3_6(36.44°C)、方案 D_PI_3_6(36.03°C)、方案 D_PP_3_6(35.78°C)、方案 W_PI_3_1(35.67°C)、方案 W_IP_3_6(34.99°C)、方案 W_PP_3_1(34.51°C)、方案 W_PI_3_6(33.90°C)、方案 W_PP_3_6(32.82°C) (表 4-3)。

依據早上 8 點至下午 6 點所出現的各方案 PET 最高溫，方案 D_PI_0 的 PET 最高溫最高，為 51.10°C；最低則為方案 W_PP_3_6，為 42.57°C。依據早上 8 點至下午 6 點所出現的各方案 PET 最低溫，方案 D_II_0 的 PET 最低溫最高，為 28.64°C；最低則為方案 W_PP_3_6，為 25.47°C (表 4-3)。

表 4-3 各方案所有人行道範圍之 PET 表

編號	方案名稱	平均 PET(°C)	PET 範圍(°C)		編號	方案名稱	平均 PET(°C)	PET 範圍(°C)	
			最低溫	最高溫				最低溫	最高溫
1	D_II_0*	42.12	28.64	51.02	13	W_IP_0	39.72	27.40	49.08
2	D_II_3_1	39.38	27.95	49.08	14	W_IP_3_1	37.12	27.00	46.16
3	D_II_3_6	36.71	27.40	47.46	15	W_IP_3_6	34.99	26.63	44.69
4	D_IP_0	41.72	27.80	50.75	16	W_PI_0	39.10	27.41	49.02
5	D_IP_3_1	39.11	27.31	49.06	17	W_PI_3_1	35.67	26.62	45.51
6	D_IP_3_6	36.44	27.00	47.32	18	W_PI_3_6	33.90	26.20	44.00
7	D_PI_0	41.78	27.80	51.10	19	W_PP_0	36.51	26.25	46.93
8	D_PI_3_1	39.04	27.00	49.08	20	W_PP_3_1	34.51	25.81	43.72
9	D_PI_3_6	36.03	26.40	47.20	21	W_PP_3_6	32.82	25.47	42.57
10	D_PP_0	41.39	27.00	50.81					
11	D_PP_3_1	38.54	26.33	49.06					
12	D_PP_3_6	35.78	25.93	47.07					

(一)、 不同鋪面種類組合下的方案平均 PET 差異

圖 4-5 為同行道樹組成的平均 PET 變化圖。由圖 4-5-1 可以發現，植栽綠帶數量為 0 且鋪面含水狀態為永久凋萎點的方案，鋪面種類組合的平均 PET 在中午 12 點前由高至低依序為車道不透水且人行道不透水、車道不透水且人行道透水、車道透水且人行道不透水、車道透水且人行道透水，在中午 12 點至下午 2 點間由高至低依序變為車道透水且人行道不透水、車道透水且人行道透水、車道不透水且人行道不透水、車道不透水且人行道透水，在下午 2 點過後鋪面種類組合的平均 PET 差異變得不明顯；植栽綠帶數量為 0 且鋪面含水狀態為永久凋萎點的方案，鋪面種類組合的平均 T_a 由高至低依序為車道透水且人行道不透水、車道不透水且人行道透水、車道透水且人行道透水，在中午 12 點鋪面種類組合的平均 PET 差異最為明顯。整體來看，鋪面含水狀態為永久凋萎點的方案，其平均 PET 在上午 9 點過後明顯高於鋪面含水狀態為田間含水量的方案。

由圖 4-5-2 可以發現，植栽綠帶數量為 3、低 LAI 且鋪面含水狀態為永久凋萎點的方案，鋪面種類組合的平均 PET 在下午 1 點前由高至低依序為車道不透水且人行道不透水、車道不透水且人行道透水、車道透水且人行道不透水、車道透水且人行道透水，在下午 1 點過後鋪面種類組合的平均 PET 差異變得不明顯；植栽綠帶數量為 3、低 LAI 且鋪面含水狀態為田間含水量的方案，鋪面種類組合的平均 PET 由高至低依序為車道透水且人行道不透水、車道不透水且人行道透水、車道透水且人行道透水，在中午 12 點至下午 1 點鋪面種類組合的平均 PET 差異最為明顯。整體來看，鋪面含水狀態為永久凋萎點的方案，其平均 PET 在上午 10 點過後明顯高於鋪面含水狀態為田間含水量的方案。

由圖 4-5-3 可以發現，植栽綠帶數量為 3、高 LAI 且鋪面含水狀態為永久凋萎點的方案，鋪面種類組合的平均 PET 在下午 2 點前由高至低依序為車道不透水且人行道不透水、車道不透水且人行道透水、車道透水且人行道不透水、車道透水且人行道透水，在下午 2 點過後鋪面種類組合的平均 PET 差異變得不明顯；

植栽綠帶數量為 3、高 LAI 且鋪面含水狀態為田間含水量的方案，鋪面種類組合的平均 PET 由高至低依序為車道透水且人行道不透水、車道不透水且人行道透水、車道透水且人行道透水，在中午 12 點至下午 1 點間鋪面種類組合的平均 PET 差異最為明顯。整體來看，含水狀態為永久凋萎點的方案，其平均 PET 在上午 11 點過後明顯高於含水狀態為田間含水量的方案。

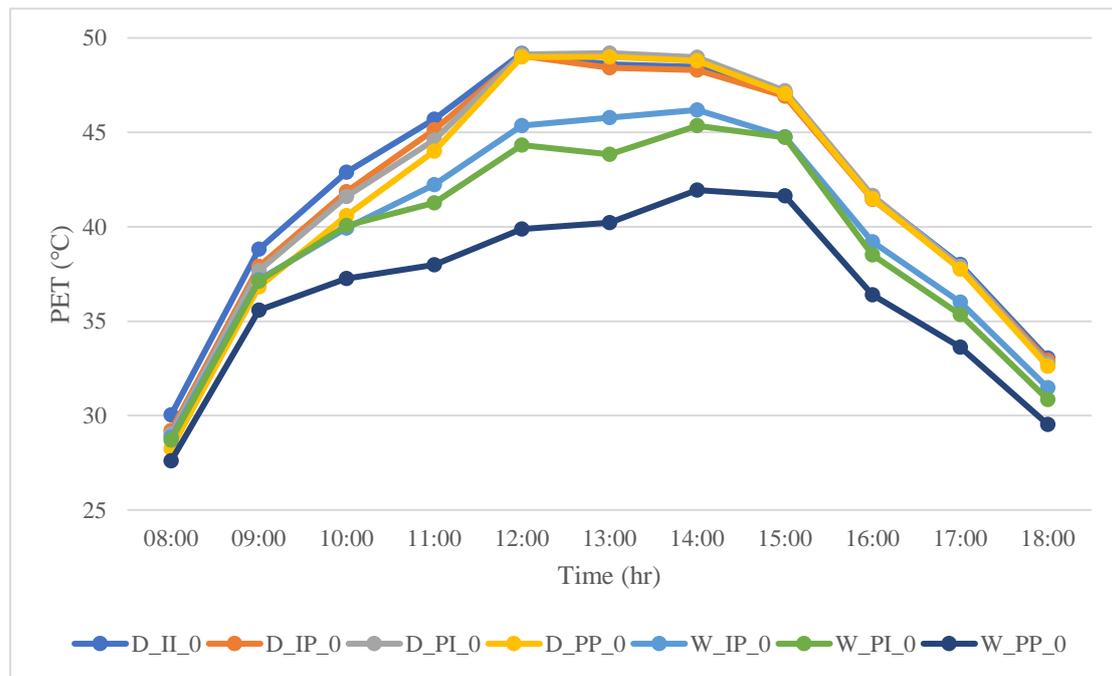


圖 4-5-1 各方案不同時刻的平均 PET 變化圖 (植栽綠帶為 0 之方案)

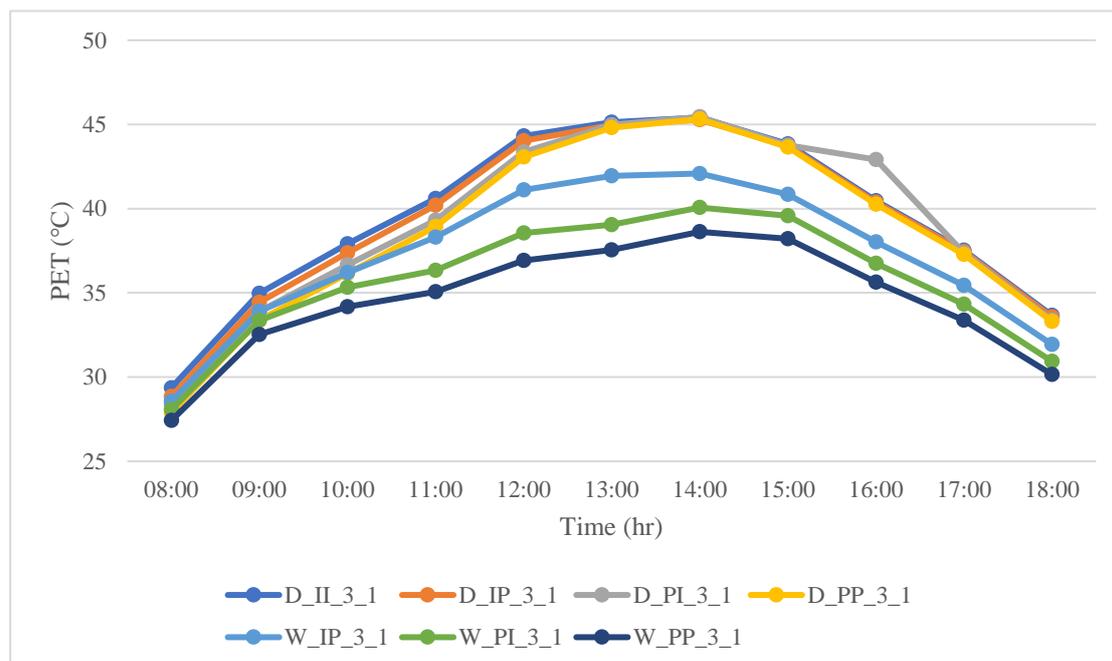


圖 4-5-2 各方案不同時刻的平均 PET 變化圖 (植栽綠帶為 3 且為低 LAI 之方案)

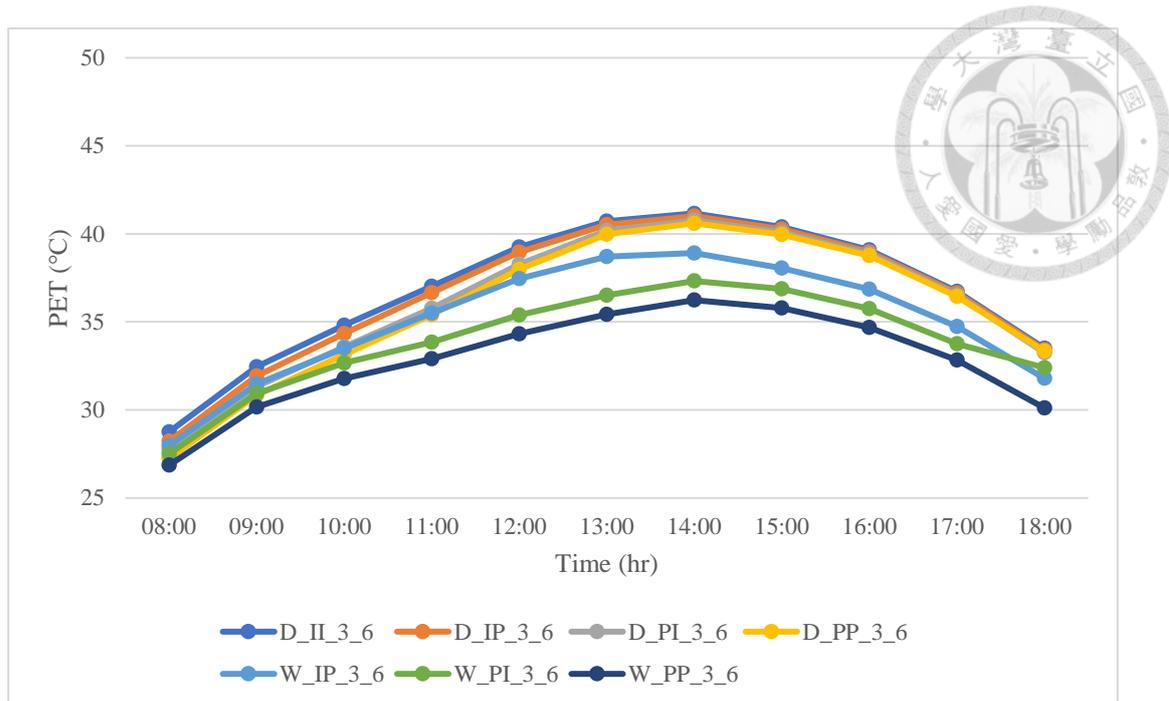


圖 4-5-3 各方案不同時刻的平均 PET 變化圖 (植栽綠帶為 3 且為高 LAI 之方案)

(二)、 不同行道樹組成下的方案平均 PET 差異

圖 4-6 為同鋪面種類組合的平均 PET 變化圖。由圖 4-6-1 可以發現，鋪面種類組合為車道不透水且人行道不透水、含水狀態為永久凋萎點的方案，行道樹組成平均 PET 由高至低依序為植栽綠帶數量為 0、植栽綠帶數量為 3 且低 LAI、植栽綠帶數量為 3 且高 LAI，而行道樹組成的平均 PET 差異在中午 12 點最為明顯，下午 4 點過後差異變小。

由圖 4-6-2 可以發現，鋪面種類組合為車道不透水且人行道透水、含水狀態為永久凋萎點的方案，行道樹組成平均 PET 由高至低依序為植栽綠帶數量為 0、植栽綠帶數量為 3 且低 LAI、植栽綠帶數量為 3 且高 LAI，而行道樹組成的平均 PET 差異在中午 12 點最為明顯，下午 4 點過後差異變小；鋪面種類組合為車道不透水且人行道透水、含水狀態為田間含水量的方案，行道樹組成平均 Ta 由高至低依序為植栽綠帶數量為 0、植栽綠帶數量為 3 且低 LAI、植栽綠帶數量為 3 且高 LAI，而行道樹組成的平均 PET 差異在中午 12 點至下午 2 點最為明顯，下午 4 點過後差異變小。整體來看，鋪面含水狀態為永久凋萎點、植栽綠帶數量為

3 的方案，其平均 PET 低於鋪面含水狀態為田間含水量、植栽綠帶數量為 0 的方案。

由圖 4-6-3 可以發現，鋪面種類組合為車道透水且人行道不透水、含水狀態為永久凋萎點的方案，行道樹組成平均 PET 由高至低依序為植栽綠帶數量為 0、植栽綠帶數量為 3 且低 LAI、植栽綠帶數量為 3 且高 LAI，而行道樹組成的平均 PET 差異在中午 12 點最為明顯，下午 5 點過後差異變小；鋪面種類組合為車道透水且人行道不透水、含水狀態為田間含水量的方案，行道樹組成平均 PET 由高至低依序為植栽綠帶數量為 0、植栽綠帶數量為 3 且低 LAI、植栽綠帶數量為 3 且高 LAI，而行道樹組成的平均 T_a 差異在中午 12 點最為明顯，下午 4 點過後差異變小。整體來看，含水狀態為永久凋萎點、植栽綠帶數量為 3 且高 LAI 的方案，其平均 PET 低於含水狀態為田間含水量、植栽綠帶數量為 0 的方案。

由圖 4-6-4 可以發現，鋪面種類組合為車道透水且人行道透水、含水狀態為永久凋萎點的方案，行道樹組成平均 PET 由高至低依序為植栽綠帶數量為 0、植栽綠帶數量為 3 且低 LAI、植栽綠帶數量為 3 且高 LAI，而行道樹組成的平均 PET 差異在中午 12 點最為明顯，下午 4 點過後差異變小；鋪面種類組合為車道透水且人行道透水、含水狀態為田間含水量的方案，行道樹組成平均 PET 由高至低依序為植栽綠帶數量為 0、植栽綠帶數量為 3 且低 LAI、植栽綠帶數量為 3 且高 LAI，而行道樹組成的平均 PET 差異在上午 9 點至下午 3 點最為明顯下午 4 點過後差異變小。整體來看，含水狀態為永久凋萎點、植栽綠帶數量為 3 且高 LAI 的方案，其平均 PET 明顯低於含水狀態為田間含水量、植栽綠帶數量為 0 的方案。

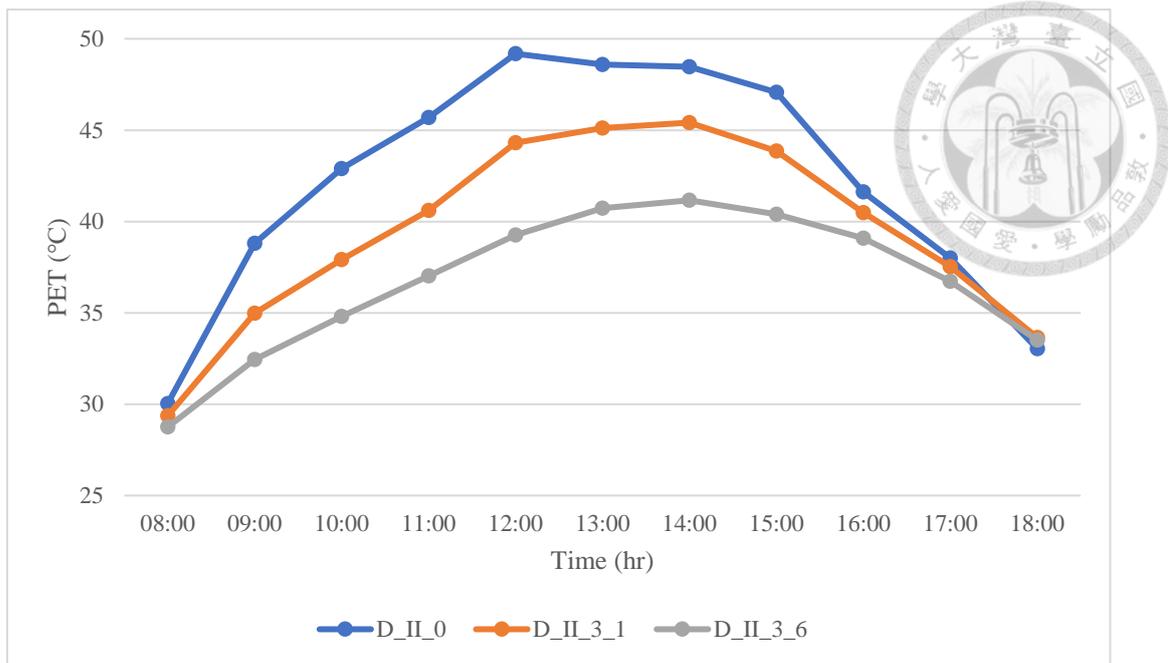


圖 4-6-1 同鋪面種類組合的平均 PET 變化圖

(鋪面種類組合為車道不透水且人行道不透水之方案)

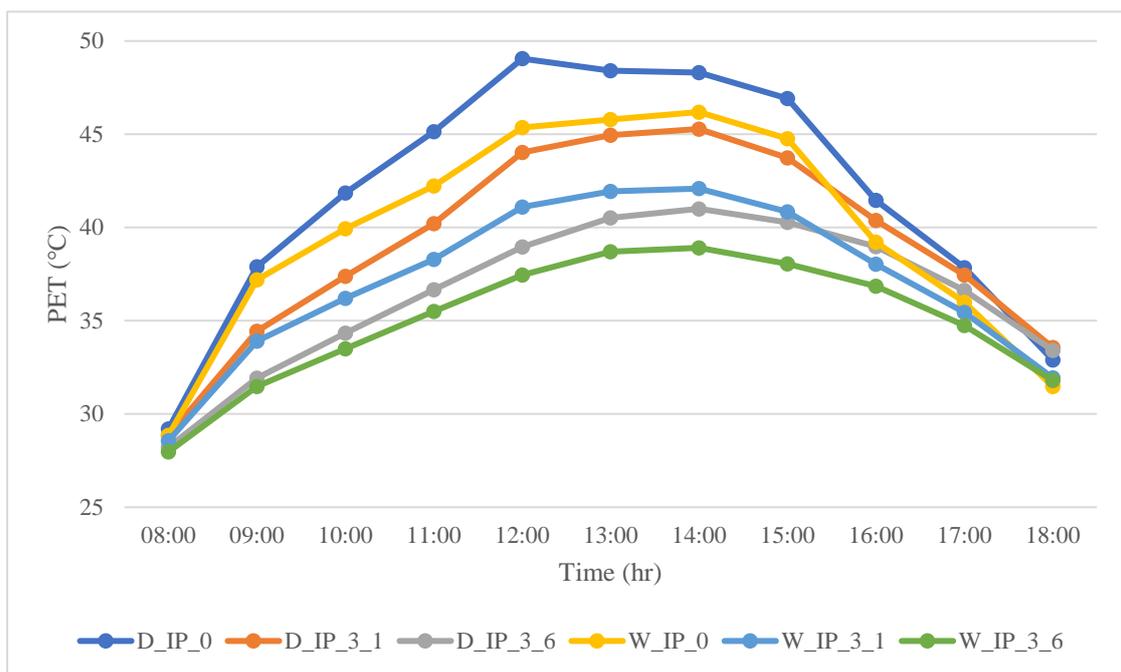


圖 4-6-2 同鋪面種類組合的平均 PET 變化圖

(鋪面種類組合為車道不透水且人行道透水之方案)

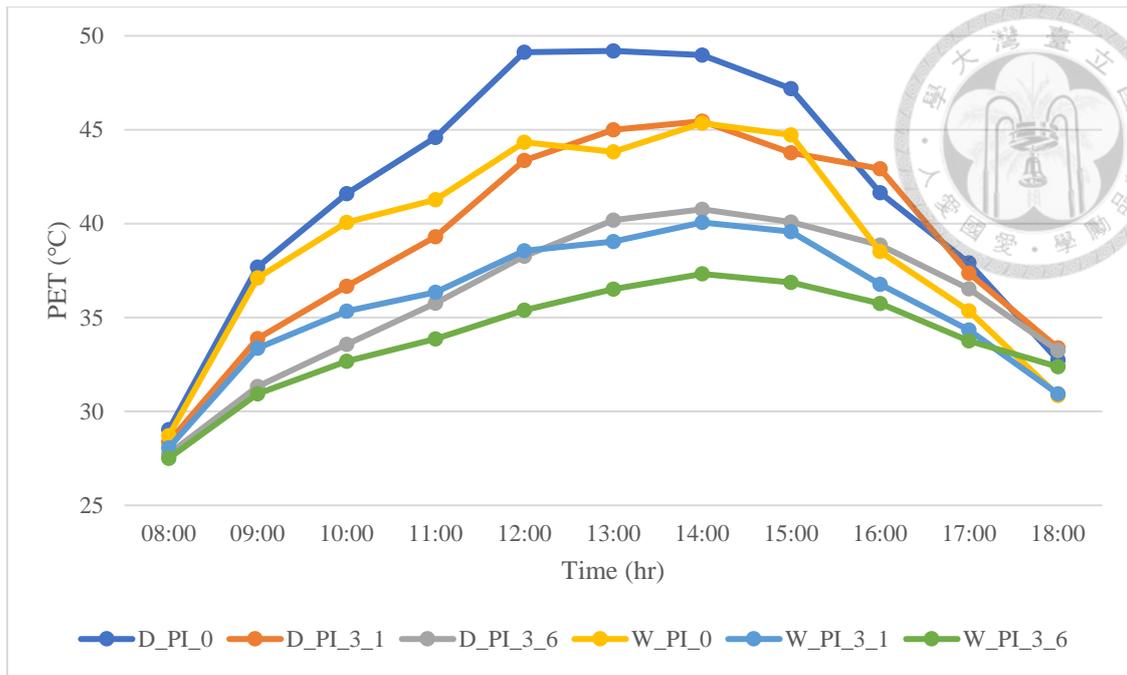


圖 4-6-3 同鋪面種類組合的平均 PET 變化圖

(鋪面種類組合為車道透水且人行道不透水之方案)

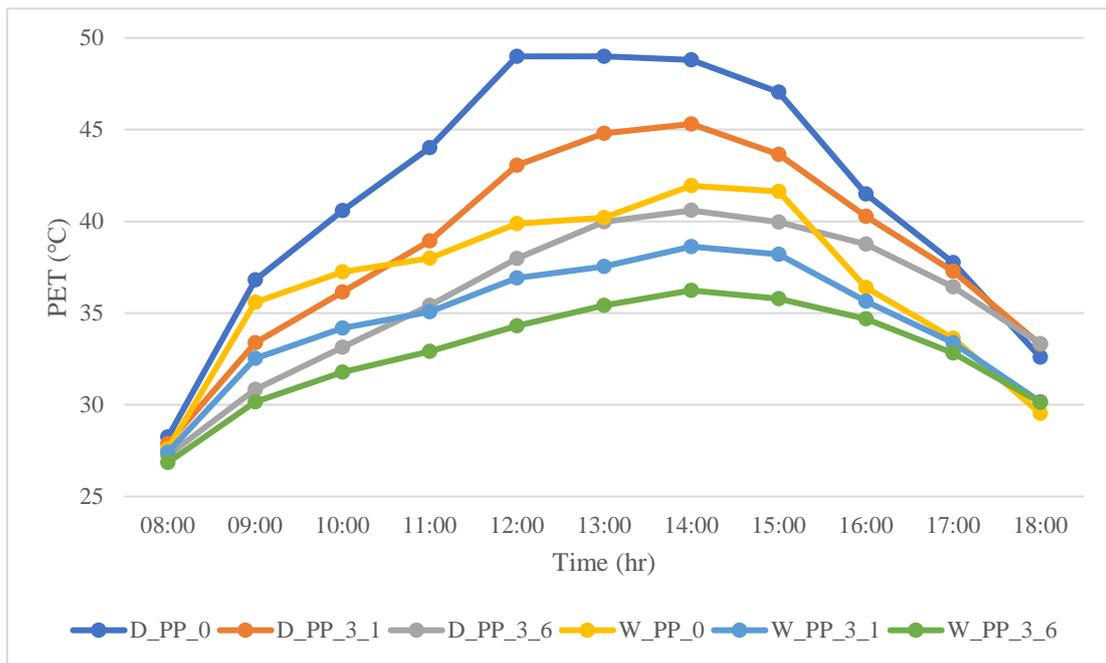


圖 4-6-4 同鋪面種類組合的平均 PET 變化圖

(鋪面種類組合為車道透水且人行道透水之方案)

(三)、 各方案之間的平均 PET 差值

圖 4-7 為各方案之間的平均 PET 差值。圖 4-7-1 顯示了植栽綠帶數量與 LAI 高低所導致的平均 PET 差異，從中可以發現，在含水狀態為永久凋萎點時，植栽綠帶為 0 的方案，其平均 PET 高於植栽綠帶為 3 的方案約 2.75 (2.61-3.00 之間) °C，而植栽為低 LAI 的方案，其平均 PET 高於植栽綠帶為高 LAI 的方案約 2.77 (2.66-3.00 之間) °C；在含水狀態為田間含水量時，植栽綠帶為 0 的方案，其平均 PET 高於植栽綠帶為 3 的方案約 2.26 (1.68-3.42 之間) °C，而植栽為低 LAI 的方案，其平均 PET 高於植栽綠帶為高 LAI 的方案約 1.85 (1.68-2.12 之間) °C。

圖 4-7-2 顯示了含水狀態所導致的平均 PET 差異，從中可以發現，含水狀態為永久凋萎點的方案，其平均 PET 高於含水狀態為田間含水量的方案約 2.52 (1.45-4.03 之間) °C。

圖 4-7-3 顯示了鋪面種類組合所導致的平均 PET 差異，從中可以發現，在含水狀態為永久凋萎點時，鋪面種類組合為車道不透水且人行道不透水的方案，其平均 PET 高於鋪面種類組合為車道不透水且人行道透水的方案約 0.30 (0.26-0.40 之間) °C，鋪面種類組合為車道不透水且人行道透水的方案，其平均 PET 高於鋪面種類組合為車道透水且人行道不透水的方案約 0.14 (-0.06-0.41 之間) °C，鋪面種類組合為車道透水且人行道不透水的方案，其平均 PET 高於鋪面種類組合為車道透水且人行道透水的方案約 0.37 (0.24-0.49 之間) °C；而在含水狀態為田間含水量時，鋪面種類組合為車道不透水且人行道透水的方案，其平均 PET 高於鋪面種類組合為車道透水且人行道不透水的方案約 1.05 (0.62-1.45 之間) °C，鋪面種類組合為車道透水且人行道不透水的方案，其平均 PET 高於鋪面種類組合為車道透水且人行道透水的方案約 2.19 (1.15-2.84 之間) °C。

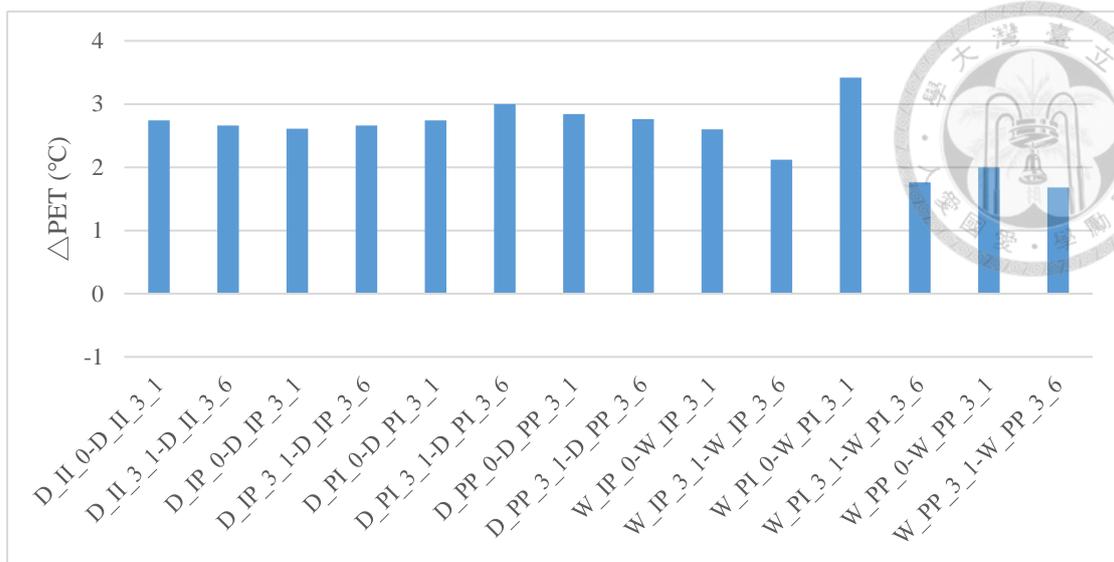


圖 4-7-1 各方案之間的平均 PET 差值
(植栽綠帶數量與 LAI 高低所導致的平均 PET 差異)

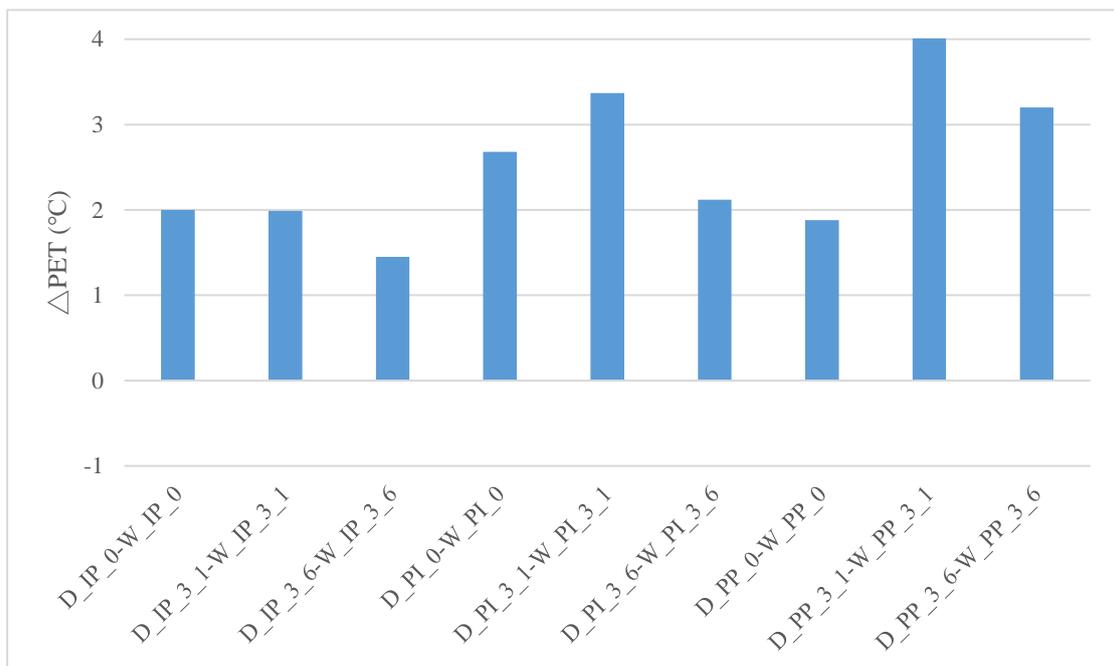


圖 4-7-2 各方案之間的平均 PET 差值
(鋪面含水狀態所導致的平均 PET 差異)

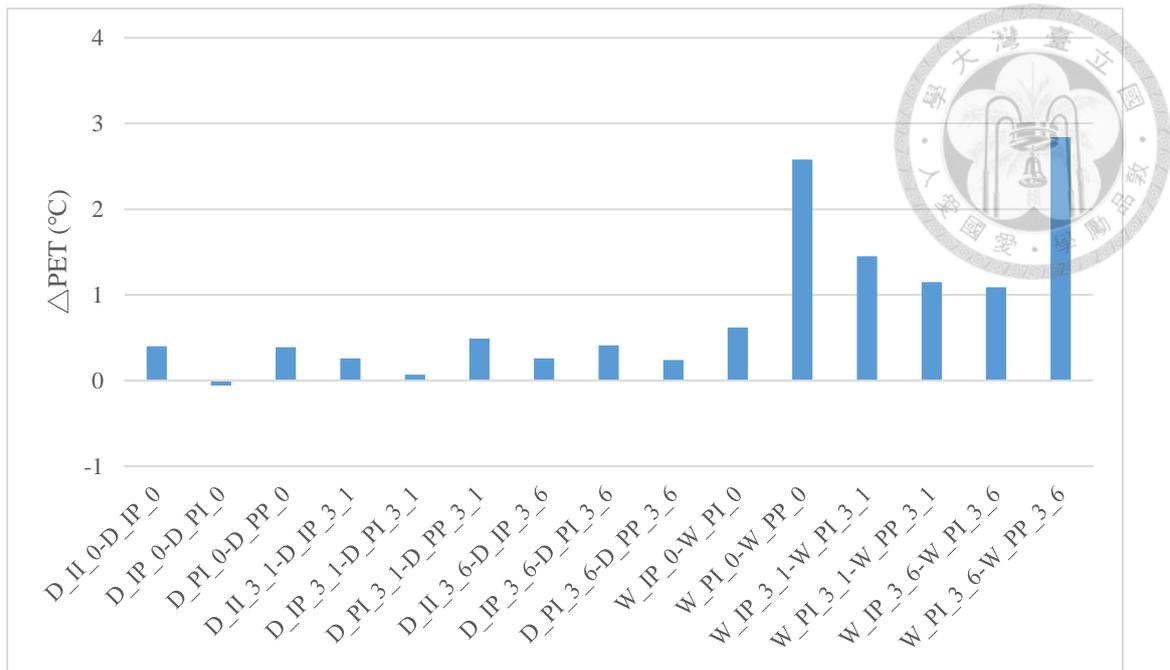


圖 4-7-3 各方案之間的平均 PET 差值
(鋪面種類組合所導致的平均 PET 差異)

四、 各方案在中午時段的 PET 剖面情況

從各方案的平均 T_a 、平均 T_{mrt} 和平均 PET 結果中發現，中午時段(中午 12 點至下午 2 點)為全日最熱的時段，各方案不管在平均 T_a 、平均 T_{mrt} 和平均 PET 皆出現全日最高溫。

圖 4-8 為各方案中午時段(中午 12 點至下午 2 點)的平均 PET 剖面圖。由圖 4-8-1 可以發現，在植栽綠帶為 0 時，東側人行道平均 PET 明顯高於西側人行道。由圖 4-8-2 可以發現，在植栽綠帶數量為 3 且低 LAI 時，東側人行道平均 PET 高於西側人行道，且越接近植栽綠帶，平均 PET 越低，越接近車道，平均 PET 越高。由圖 4-7-3 可以發現，在植栽綠帶數量為 3 且高 LAI 時，東側人行道平均 PET 略高於西側人行道，且越接近植栽綠帶，平均 PET 越低，越接近車道，平均 PET 越高。由圖 4-8-1、圖 4-8-2 和圖 4-8-3 中可以發現，含水狀態為永久凋萎點之方案的平均 PET 皆高於含水狀態為田間含水量之方案；在含水狀態為永久凋萎點時，鋪面種類組合的平均 PET 差值小；在含水狀態為田間含水量時，鋪面種類組合的平均 PET 差值大。

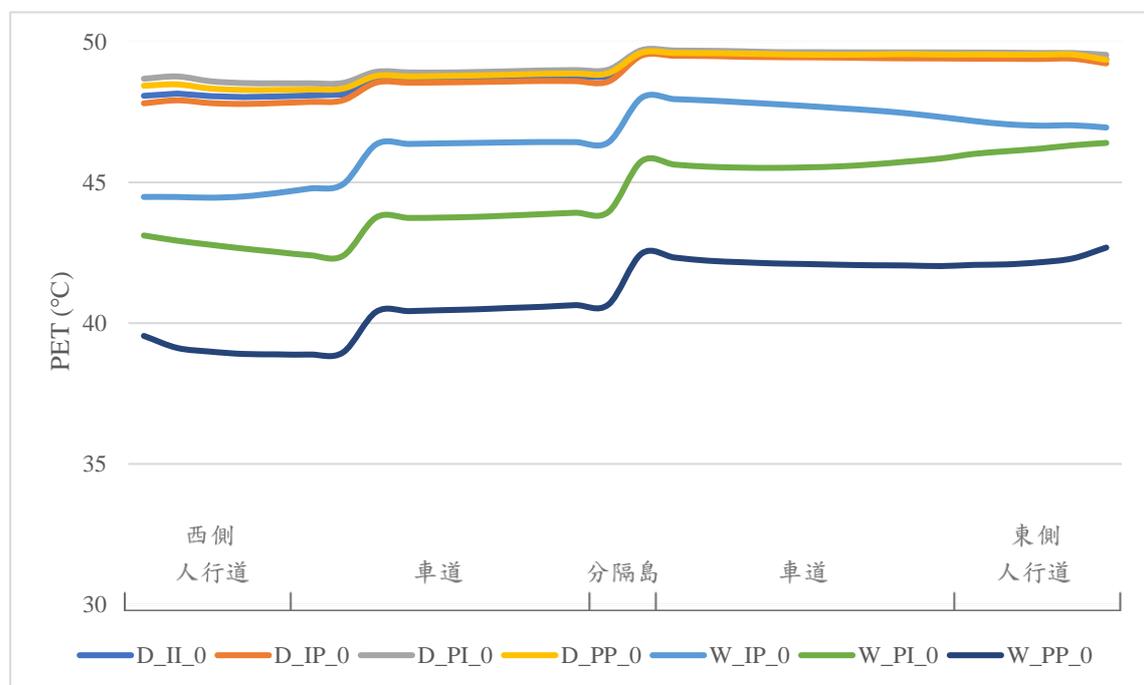


圖 4-8-1 各方案中午時段(中午 12 點至下午 2 點)的平均 PET 剖面圖
(植栽綠帶為 0 之方案)

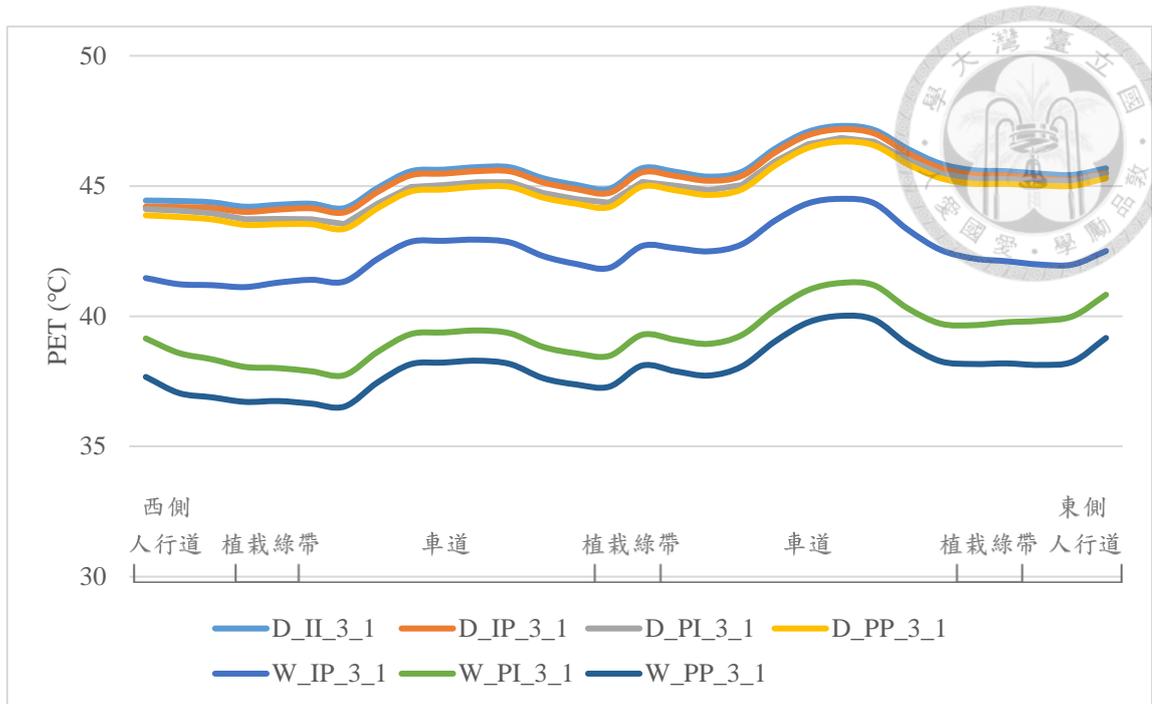


圖 4-8-2 各方案中午時段(中午 12 點至下午 2 點)的平均 PET 剖面圖
(植栽綠帶為 3 且為低 LAI 之方案)

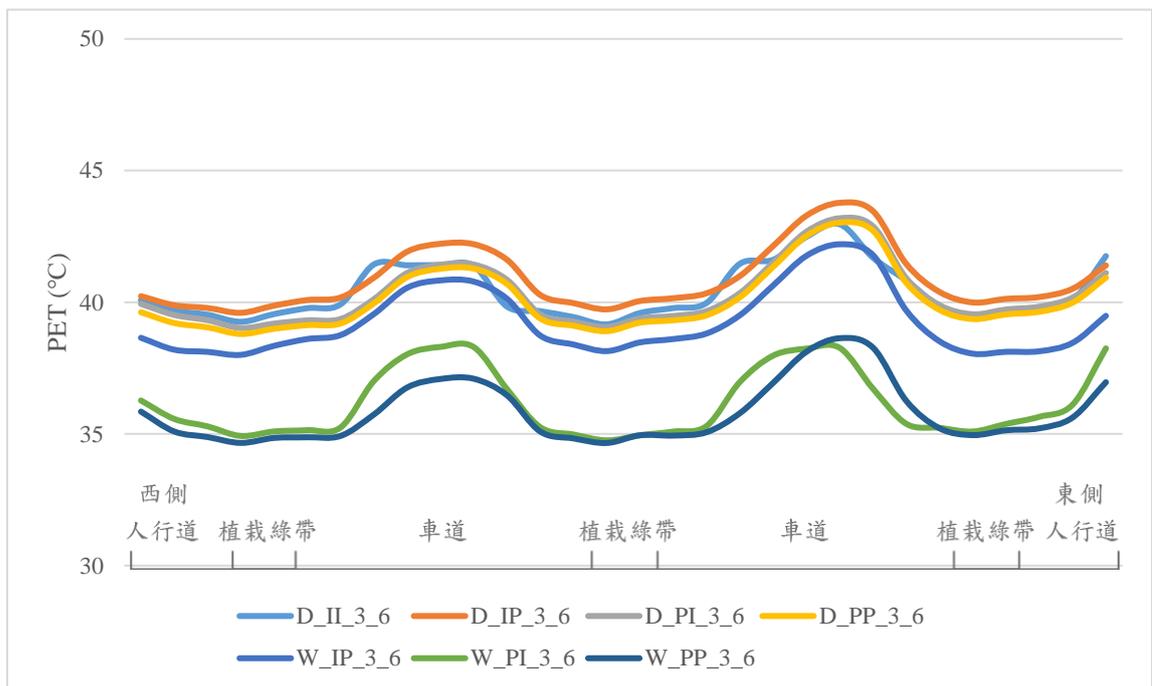


圖 4-8-3 各方案中午時段(中午 12 點至下午 2 點)的平均 PET 剖面圖
(植栽綠帶為 3 且為高 LAI 之方案)

五、 各方案在傍晚時段的 PET 剖面情況

圖 4-9 為各方案傍晚時段(下午 2 點至下午 6 點)的平均 PET 剖面圖。由圖 4-9-1 可以發現，在植栽綠帶為 0 時，東側人行道平均 PET 相近於西側人行道，且越接近街道兩側，平均 PET 越高。由圖 4-9-2 可以發現，在植栽綠帶數量為 3 且低 LAI 時，東側人行道平均 PET 相近於西側人行道，且越接近街道兩側，平均 PET 越高，越接近車道，平均 PET 越低。由圖 4-9-3 可以發現，在植栽綠帶數量為 3 且高 LAI 時，東側人行道平均 PET 相近於西側人行道，且越接近街道兩側，平均 PET 越高，越接近車道，平均 PET 越低。由圖 4-9-1、圖 4-9-2 和圖 4-9-3 中可以發現，含水狀態為永久凋萎點之方案的平均 PET 皆高於含水狀態為田間含水量之方案；在含水狀態為永久凋萎點時，鋪面種類組合的平均 PET 差值小；在含水狀態為田間含水量時，鋪面種類組合的平均 PET 差值大。

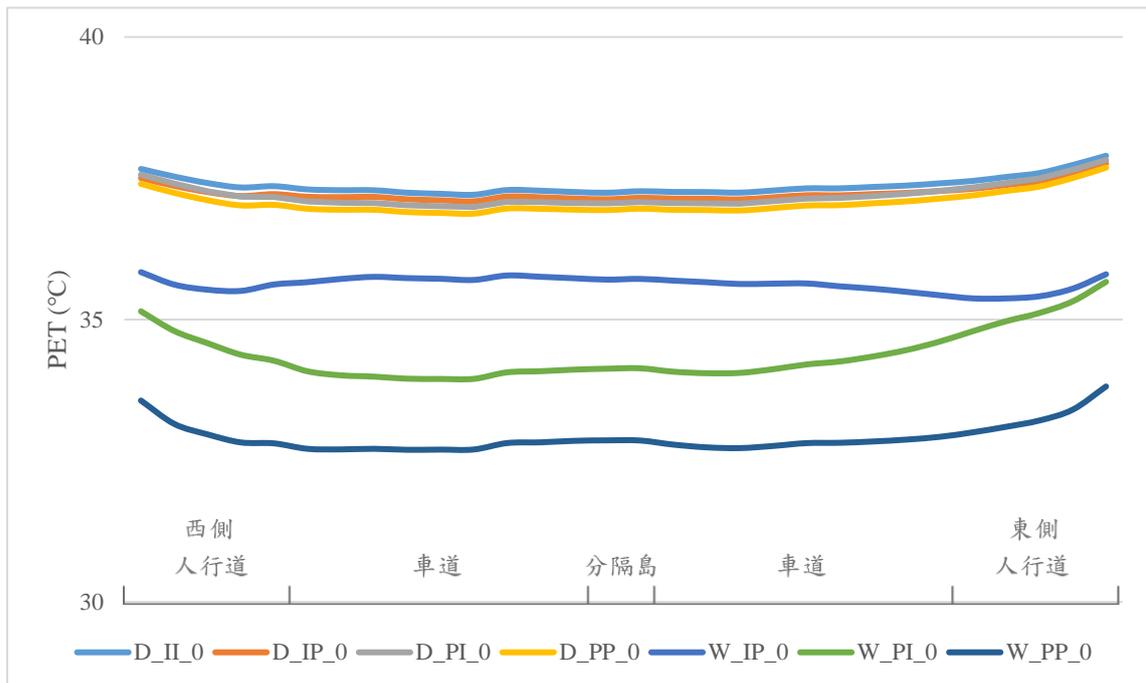


圖 4-9-1 各方案傍晚時段(下午 2 點至下午 6 點)的平均 PET 剖面圖

(植栽綠帶為 0 之方案)

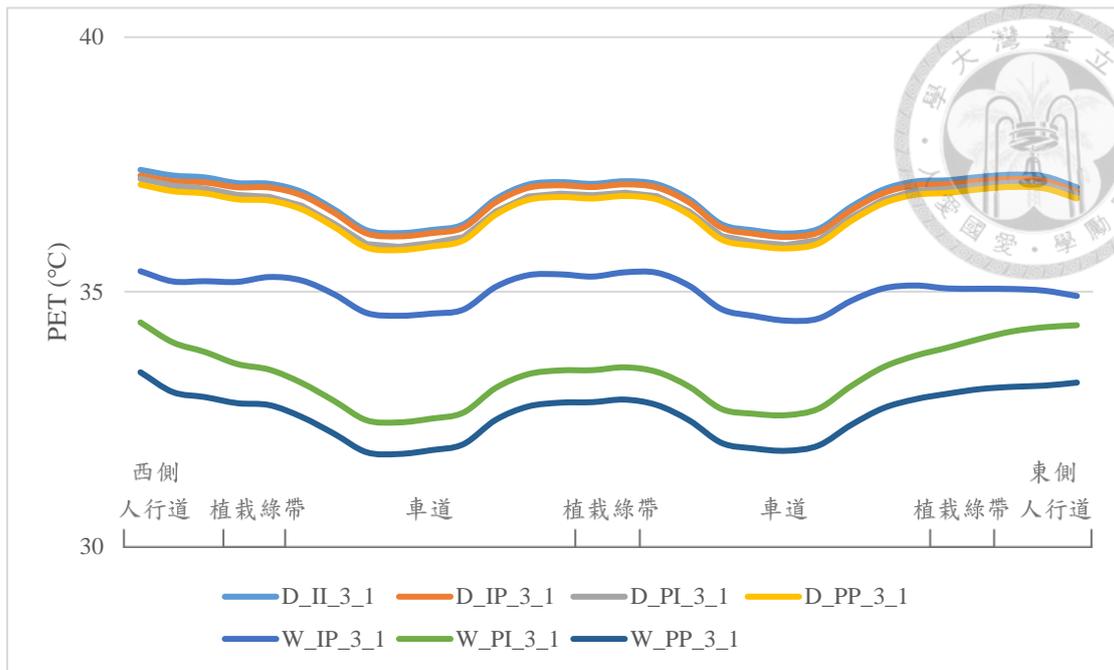


圖 4-9-2 各方案傍晚時段(下午 2 點至下午 6 點)的平均 PET 剖面圖
(植栽綠帶為 3 且為低 LAI 之方案)

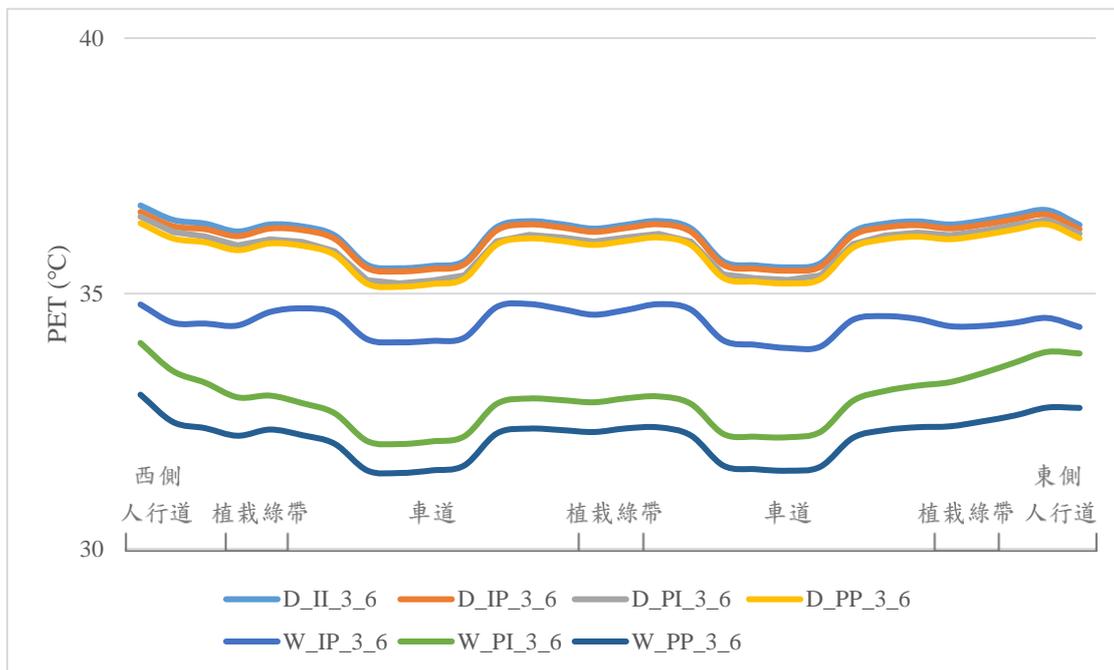


圖 4-9-3 各方案傍晚時段(下午 2 點至下午 6 點)的平均 PET 剖面圖
(植栽綠帶為 3 且為高 LAI 之方案) **第二節 不同方案對行人熱舒適影響之分析**

本節討論不同方案之間的熱舒適差異，根據各方案的平均 PET 結果發現方案 D_II_0 在所有方案裡擁有最高的平均 PET，故以方案 D_II_0 為對照組，將各方案與方案 D_II_0 之間的平均 PET 差值當作應變項，針對中午時段(中午 12 點

至下午 2 點)及傍晚時段(下午 4 點至下午 6 點)進行各方案間之平均 PET 降溫的比較。

一、 各方案在中午時段的平均 PET 降溫效果

依據中午時段(中午 12 點至下午 2 點)的平均 PET 降溫效果,方案 W_PP_3_6 的平均 PET 降溫效果最優,為 14.85°C;最差則為方案 D_PP_0,為-0.15°C,兩者差值為 15.00°C。由大至小依序為方案 W_PP_3_6(14.85°C)、方案 W_PI_3_6(13.47°C)、方案 W_PP_3_1(12.47°C)、方案 W_IP_3_6(11.37°C)、方案 W_PI_3_1(10.56°C)、方案 D_PP_3_6(9.87°C)、方案 D_PI_3_6(9.58°C)、方案 W_PP_0(9.17°C)、方案 D_IP_3_6(9.11°C)、方案 D_II_3_6(8.83°C)、方案 W_IP_3_1(7.91°C)、方案 D_PP_3_1(4.63°C)、方案 W_PI_0(4.54°C)、方案 D_PI_3_1(4.38°C)、方案 D_IP_3_1(4.18°C)、方案 D_II_3_1(3.80°C)、方案 W_IP_0(3.40°C)、方案 D_PI_0(0.31°C)、方案 D_IP_0(0.17°C)、方案 D_PP_0(-0.15°C) (表 4-4)。

依據中午時段(中午 12 點至下午 2 點)的平均 PET 最大降溫值,方案 W_PP_3_6 的 PET 最大降溫值最大,為 19.10°C;最小則為方案 D_PI_0,為 0.40°C。依據中午時段(中午 12 點至下午 2 點)的平均 PET 最小降溫值,方案 W_PP_3_6 的 PET 最小降溫值最大,為 9.40°C;最小則為方案 D_PI_0,為-1.95°C (表 4-4)。

表 4-4 各方案在中午時段(中午 12 點至下午 2 點)之 PET 降溫效果表

編號	方案名稱	平均降溫 ($\Delta\overline{PET}$, °C)	最小 降溫值 ($\Delta\overline{PET}$, °C)	最大 降溫值 ($\Delta\overline{PET}$, °C)	編號	方案名稱	平均降溫 ($\Delta\overline{PET}$, °C)	最小 降溫值 ($\Delta\overline{PET}$, °C)	最大 降溫值 ($\Delta\overline{PET}$, °C)
1	D_II_0*				13	W_IP_0	3.40	1.14	6.18
2	D_II_3_1	3.80	3.06	7.56	14	W_IP_3_1	7.91	4.56	11.90
3	D_II_3_6	8.83	3.29	13.83	15	W_IP_3_6	11.37	6.48	15.74
4	D_IP_0	0.17	0.00	1.30	16	W_PI_0	4.54	1.06	8.64
5	D_IP_3_1	4.18	0.92	8.91	17	W_PI_3_1	10.56	5.76	14.62
6	D_IP_3_6	9.11	3.48	14.35	18	W_PI_3_6	13.47	7.59	17.84
7	D_PI_0	0.31	-1.95	0.40	19	W_PP_0	9.17	5.16	12.61
8	D_PI_3_1	4.38	0.87	9.20	20	W_PP_3_1	12.47	8.15	16.52
9	D_PI_3_6	9.58	3.64	14.66	21	W_PP_3_6	14.85	9.40	19.10
10	D_PP_0	-0.15	-1.73	0.59					
11	D_PP_3_1	4.63	0.91	9.68					
12	D_PP_3_6	9.87	3.84	15.18					

(一)、 不同鋪面種類組合下的方案平均 PET 降溫差異

圖 4-10 為同行道樹組成下的方案在中午時段(中午 12 點至下午 2 點)的平均 PET 降溫效果。由圖 4-10-1 可以發現，植栽綠帶數量為 0 且含水狀態為永久凋萎點的方案，平均 PET 降溫不明顯，甚至些許增溫，鋪面種類組合的平均 PET 降溫效果由高至低依序為車道不透水且人行道透水、車道透水且人行道透水、車道透水且人行道不透水；植栽綠帶數量為 0 且含水狀態為田間含水量的方案，平均 PET 降溫約 5.70 (3.40- 9.17 之間) °C，鋪面種類組合的平均 PET 降溫效果由高至低依序為車道透水且人行道透水、車道透水且人行道不透水、車道不透水且人行道透水。

由圖 4-10-2 可以發現，植栽綠帶數量為 3 且低 LAI、含水狀態為永久凋萎點的方案，平均 PET 降溫約 4.25 (3.80- 4.63 之間) °C，鋪面種類組合的平均 PET 降溫效果由高至低依序為車道透水且人行道透水、車道透水且人行道不透水、車道不透水且人行道透水、車道不透水且人行道不透水；植栽綠帶數量為 3 且低 LAI、

含水狀態為田間含水量的方案，平均 PET 降溫約 10.31 (7.91- 12.47 之間) °C，鋪面種類組合的平均 PET 降溫效果由高至低依序為車道透水且人行道透水、車道透水且人行道不透水、車道不透水且人行道透水。

由圖 4-10-3 可以發現，植栽綠帶數量為 3 且高 LAI、含水狀態為永久凋萎點的方案，平均 PET 降溫約 9.35 (8.83- 9.87 之間) °C，鋪面種類組合的平均 PET 降溫效果由高至低依序為車道透水且人行道透水、車道透水且人行道不透水、車道不透水且人行道透水、車道不透水且人行道不透水；植栽綠帶數量為 3 且高 LAI、含水狀態為田間含水量的方案，平均 PET 降溫約 13.12 (11.37- 14.85 之間) °C，鋪面種類組合的平均 PET 降溫效果由高至低依序為車道透水且人行道透水、車道透水且人行道不透水、車道不透水且人行道透水。

整體來看，含水狀態為永久凋萎點之方案的平均 PET 降溫效果皆差於含水狀態為田間含水量之方案，含水狀態為永久凋萎點時，鋪面種類組合的平均 PET 降溫效果差異小；含水狀態為田間含水量時，鋪面種類組合的平均 PET 降溫效果差異大。

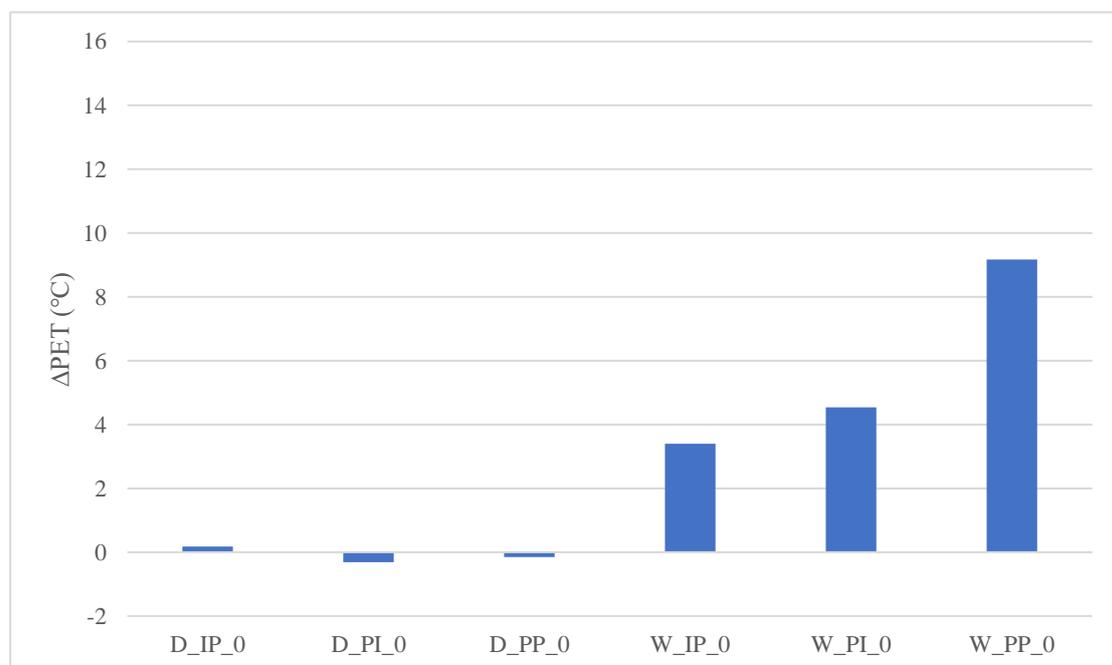


圖 4-10-1 同行道樹組成下的方案在中午時段(中午 12 點至下午 2 點)的平均 PET 降溫效果 (植栽綠帶為 0 之方案)

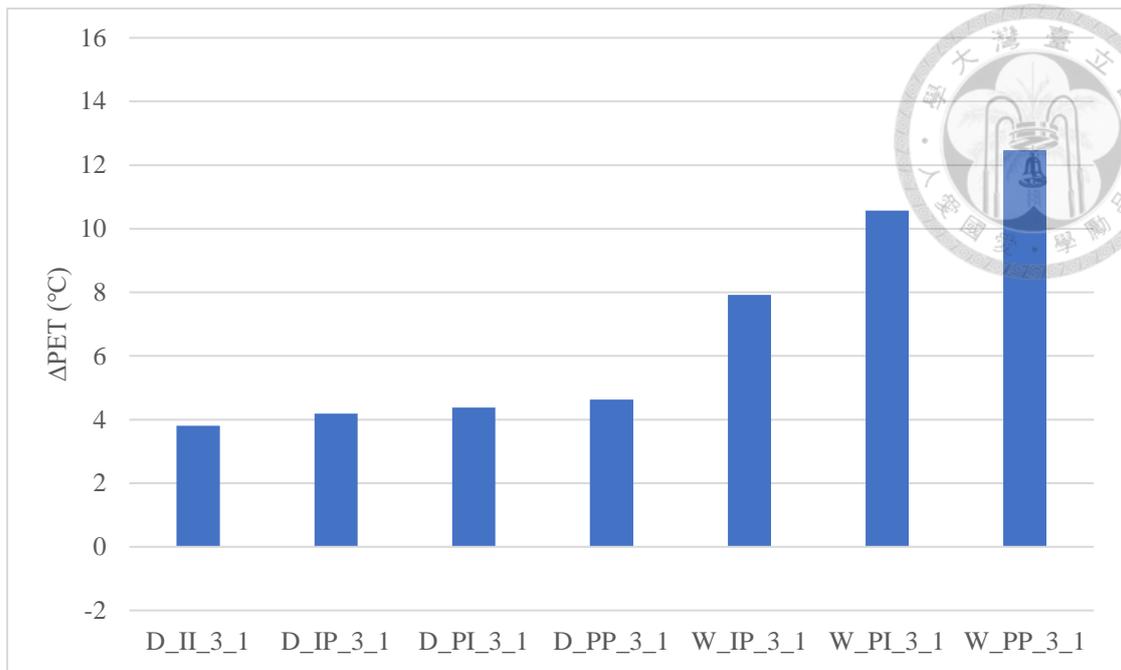


圖 4-10-2 同行道樹組成下的方案在中午時段(中午 12 點至下午 2 點)的平均 PET 降溫效果 (植栽綠帶為 3 且為低 LAI 之方案)

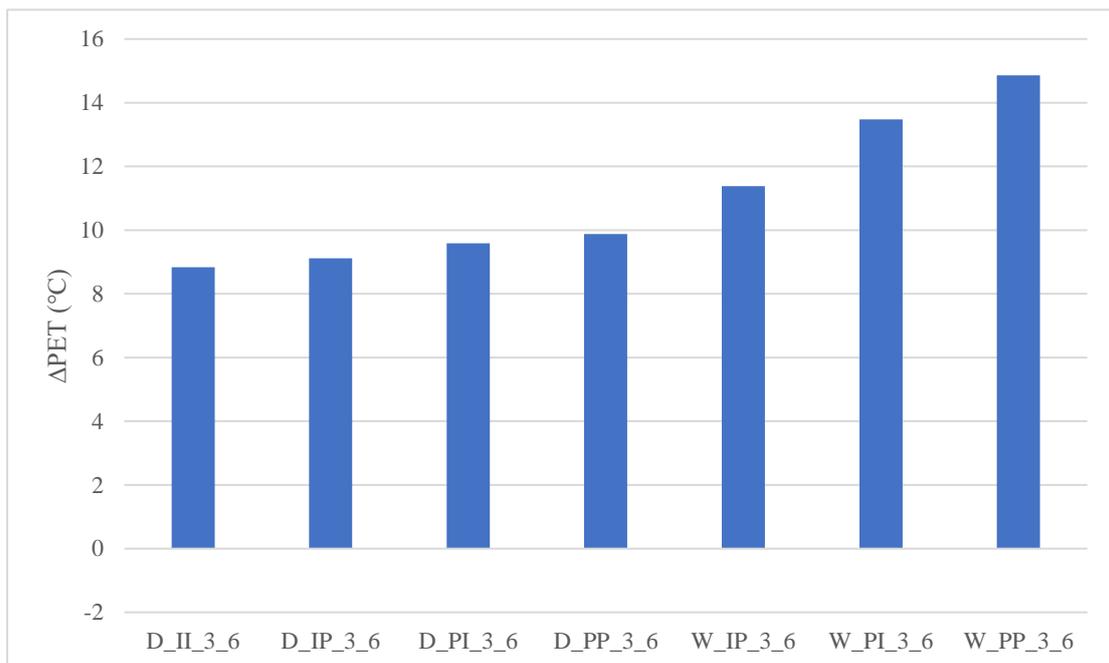


圖 4-10-3 同行道樹組成下的方案在中午時段(中午 12 點至下午 2 點)的平均 PET 降溫效果 (植栽綠帶為 3 且為高 LAI 之方案)

(二)、 不同行道樹組成下的方案平均 PET 降溫差異

圖 4-11 為同鋪面種類組合下的方案在中午時段(中午 12 點至下午 2 點)的平均 PET 降溫效果。由圖 4-11-1 可以發現，鋪面種類組合為車道不透水且人行道

不透水、含水狀態為永久凋萎點的方案，平均 PET 降溫約 6.32 (3.80- 8.83 之間) °C，行道樹組成平均 PET 降溫效果由高至低依序為植栽綠帶數量為 3 且高 LAI、植栽綠帶數量為 3 且低 LAI。

由圖 4-11-2 可以發現，鋪面種類組合為車道不透水且人行道透水、含水狀態為永久凋萎點的方案，平均 PET 降溫約 4.49 (0.17- 9.11 之間) °C，行道樹組成平均 PET 降溫效果由高至低依序為植栽綠帶數量為 3 且高 LAI、植栽綠帶數量為 3 且低 LAI、植栽綠帶數量為 0；鋪面種類組合為車道不透水且人行道透水、含水狀態為田間含水量的方案，平均 PET 降溫約 7.56 (3.40- 11.37 之間) °C，行道樹組成平均 PET 降溫效果由高至低依序為植栽綠帶數量為 3 且高 LAI、植栽綠帶數量為 3 且低 LAI、植栽綠帶數量為 0。

由圖 4-11-3 可以發現，鋪面種類組合為車道透水且人行道不透水、含水狀態為永久凋萎點的方案，平均 PET 降溫約 4.55 (-0.31- 9.58 之間) °C，行道樹組成平均 PET 降溫效果由高至低依序為植栽綠帶數量為 3 且高 LAI、植栽綠帶數量為 3 且低 LAI、植栽綠帶數量為 0；鋪面種類組合為車道透水且人行道不透水、含水狀態為田間含水量的方案，平均 PET 降溫約 9.52 (4.54- 13.47 之間) °C，行道樹組成平均 PET 降溫效果由高至低依序為植栽綠帶數量為 3 且高 LAI、植栽綠帶數量為 3 且低 LAI、植栽綠帶數量為 0。

由圖 4-11-4 可以發現，鋪面種類組合為車道透水且人行道透水、含水狀態為永久凋萎點的方案，平均 PET 降溫約 4.78 (-0.15- 9.87 之間) °C，行道樹組成平均 PET 降溫效果由高至低依序為植栽綠帶數量為 3 且高 LAI、植栽綠帶數量為 3 且低 LAI、植栽綠帶數量為 0；鋪面種類組合為車道透水且人行道透水、含水狀態為田間含水量的方案，平均 PET 降溫約 12.16 (9.17- 14.85 之間) °C，行道樹組成平均 PET 降溫效果由高至低依序為植栽綠帶數量為 3 且高 LAI、植栽綠帶數量為 3 且低 LAI、植栽綠帶數量為 0。

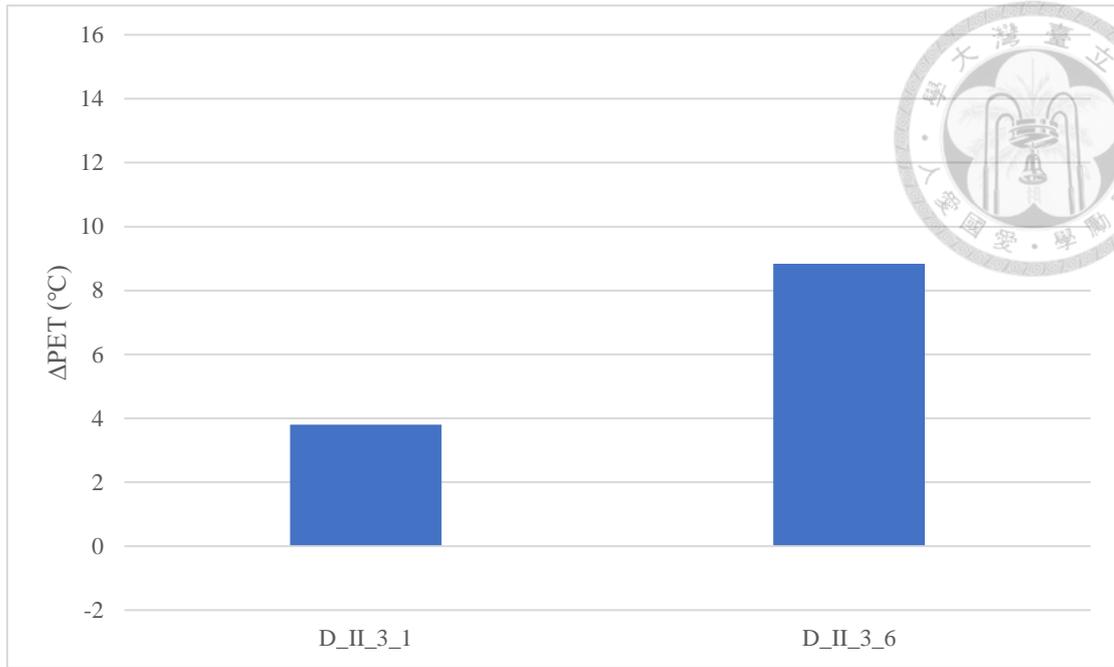


圖 4-11-1 同鋪面種類組合下的方案在中午時段(中午 12 點至下午 2 點)的平均 PET 降溫效果 (鋪面種類組合為車道不透水且人行道不透水之方案)

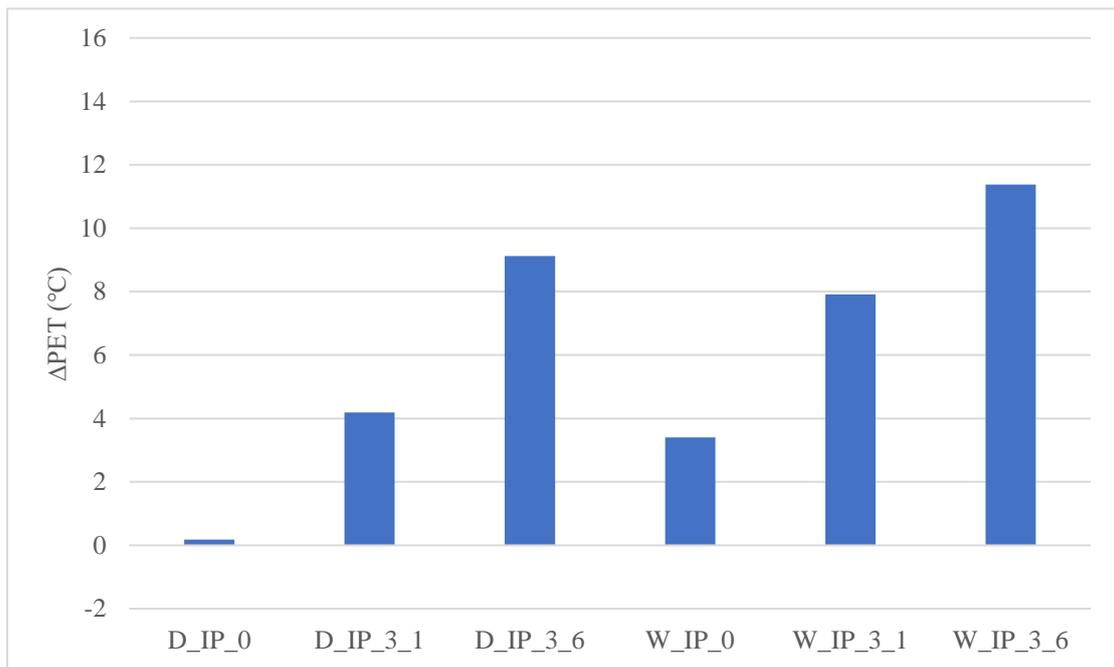


圖 4-11-2 同鋪面種類組合下的方案在中午時段(中午 12 點至下午 2 點)的平均 PET 降溫效果 (鋪面種類組合為車道不透水且人行道透水之方案)

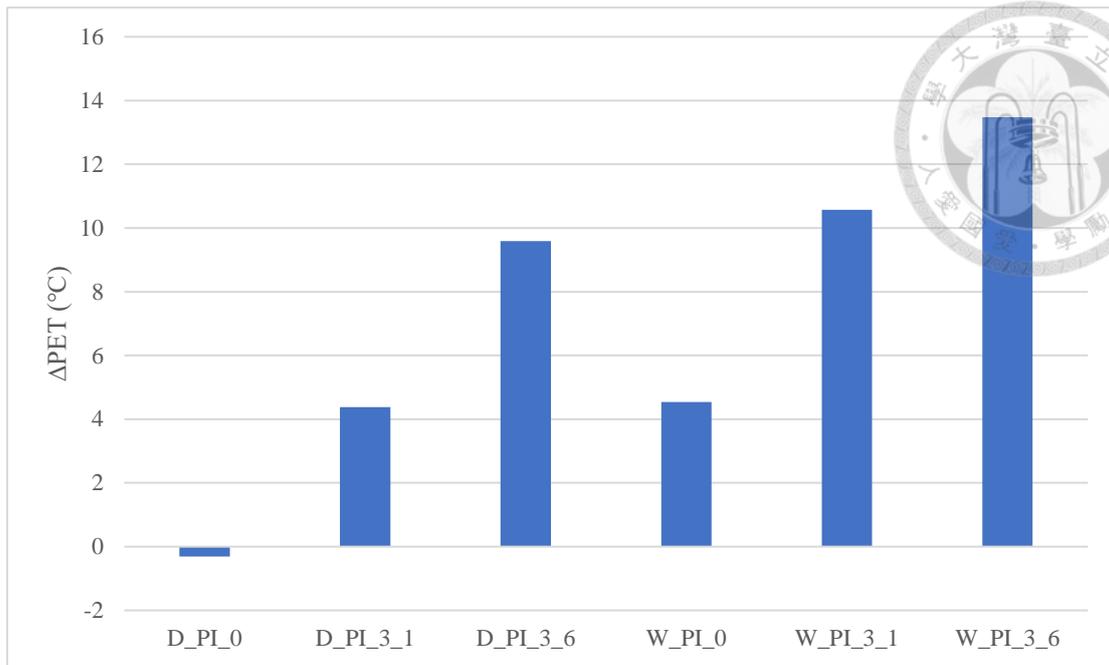


圖 4-11-3 同鋪面種類組合下的方案在中午時段(中午 12 點至下午 2 點)的平均 PET 降溫效果 (鋪面種類組合為車道透水且人行道不透水之方案)

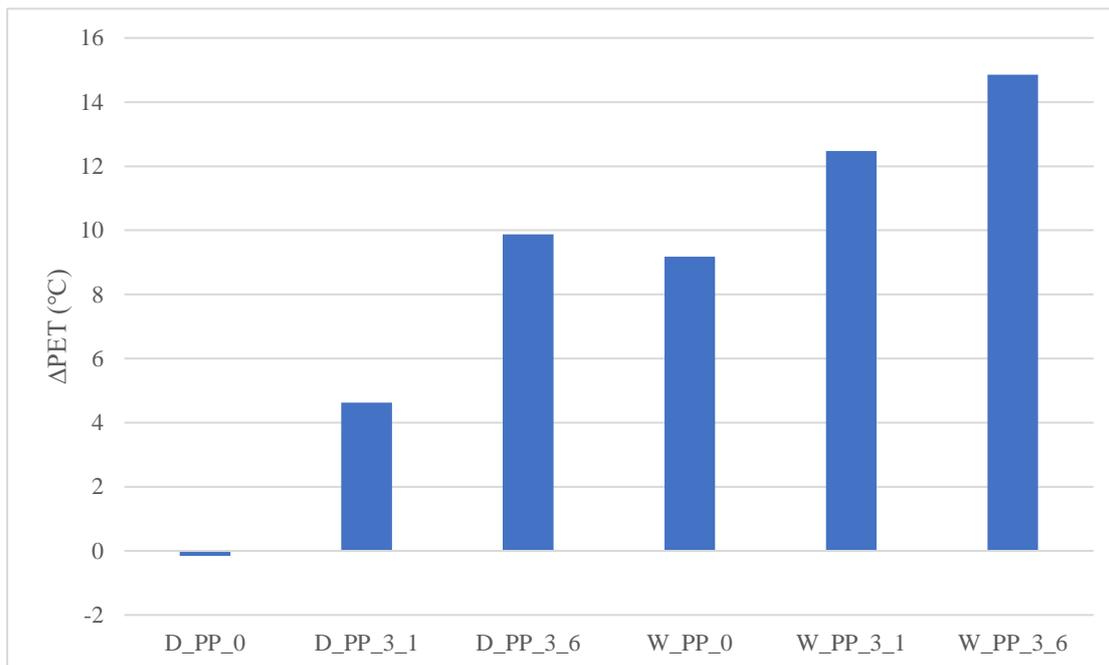


圖 4-11-4 同鋪面種類組合下的方案在中午時段(中午 12 點至下午 2 點)的平均 PET 降溫效果 (鋪面種類組合為車道透水且人行道透水之方案)

二、 各方案在傍晚時段的 PET 降溫效果

依據傍晚時段(下午 4 點至下午 6 點)的平均 PET 降溫效果，方案 W_PP_3_6 的平均 PET 降溫效果最優，為 5.98°C；最差則為方案 D_PI_0，為 0.15°C，兩者差值為 5.83°C。由大至小依序為方案 W_PP_3_6(5.98°C)、方案 W_PP_3_1(5.49°C)、方案 W_PP_0(5.26°C)、方案 W_PI_3_6(4.77°C)、方案 W_PI_3_1(4.25°C)、方案 W_IP_3_6(3.78°C)、方案 W_IP_3_1(3.09°C)、方案 W_PI_0(3.04°C)、方案 W_IP_0(2.54°C)、方案 D_PP_3_6(1.63°C)、方案 D_PI_3_6(1.50°C)、方案 D_IP_3_6(1.36°C)、方案 D_II_3_6(1.24°C)、方案 D_II_3_1(0.98°C)、方案 D_PP_3_1(0.74°C)、方案 D_PI_3_1(0.63°C)、方案 D_IP_3_1(0.52°C)、方案 D_PP_0(0.34°C)、方案 D_IP_0(0.20°C)、方案 D_PI_0(0.15°C) (表 4-5)。

依據傍晚時段(下午 4 點至下午 6 點)的平均 PET 最大降溫值，方案 W_PP_3_6 的 PET 最大降溫值最大，為 15.58°C；最小則為方案 D_IP_0，為 0.31°C。依據傍晚時段(下午 4 點至下午 6 點)的平均 PET 最小降溫值，方案 W_PP_0 的 PET 最小降溫值最大，為 3.32°C；最小則為方案 D_IP_3_1，為 -0.91°C (表 4-5)。

表 4-5 各方案在傍晚時段(下午 4 點至下午 6 點)之 PET 降溫效果表

編號	方案名稱	平均降溫 (ΔPET , °C)	最小 降溫值 (ΔPET , °C)	最大 降溫值 (ΔPET , °C)	編號	方案名稱	平均降溫 (ΔPET , °C)	最小 降溫值 (ΔPET , °C)	最大 降溫值 (ΔPET , °C)
1	D_II_0*				13	W_IP_0	2.54	1.43	3.70
2	D_II_3_1	0.98	-0.57	6.92	14	W_IP_3_1	3.09	0.90	10.97
3	D_II_3_6	1.24	-0.84	9.97	15	W_IP_3_6	3.78	1.17	13.21
4	D_IP_0	0.20	0.03	0.31	16	W_PI_0	3.04	2.03	5.53
5	D_IP_3_1	0.52	-0.91	7.59	17	W_PI_3_1	4.25	1.74	11.48
6	D_IP_3_6	1.36	-0.74	10.11	18	W_PI_3_6	4.77	1.90	14.53
7	D_PI_0	0.15	-0.11	0.58	19	W_PP_0	5.26	3.32	8.08
8	D_PI_3_1	0.63	-0.70	7.54	20	W_PP_3_1	5.49	2.60	13.45
9	D_PI_3_6	1.50	-0.57	10.17	21	W_PP_3_6	5.98	2.81	15.58
10	D_PP_0	0.34	0.02	0.77					
11	D_PP_3_1	0.74	-0.61	7.67					
12	D_PP_3_6	1.63	-0.48	10.32					

(一)、 不同鋪面種類組合下的方案平均 PET 降溫差異

圖 4-12 為同行道樹組成下的方案在傍晚時段(下午 4 點至下午 6 點)的平均 PET 降溫效果。由圖 4-12-1 可以發現，植栽綠帶數量為 0 且含水狀態為永久凋萎點的方案，平均 PET 降溫不明顯，降溫約 0.23 (0.15- 0.34 之間) °C，鋪面種類組合的平均 PET 降溫效果由高至低依序為車道透水且人行道透水、車道不透水且人行道透水、車道透水且人行道不透水；植栽綠帶數量為 0 且含水狀態為田間含水量的方案，平均 PET 降溫約 3.61 (2.54- 5.26 之間) °C，鋪面種類組合的平均 PET 降溫效果由高至低依序為車道透水且人行道透水、車道透水且人行道不透水、車道不透水且人行道透水。

由圖 4-12-2 可以發現，植栽綠帶數量為 3 且低 LAI、含水狀態為永久凋萎點的方案，平均 PET 降溫約 0.72 (0.52- 0.98 之間) °C，鋪面種類組合的平均 PET 降溫效果由高至低依序為車道不透水且人行道不透水、車道透水且人行道透水、車道透水且人行道不透水、車道不透水且人行道透水；植栽綠帶數量為 3 且低 LAI、含水狀態為田間含水量的方案，平均 PET 降溫約 4.28 (3.09- 5.49 之間) °C，鋪面種類組合的平均 PET 降溫效果由高至低依序為車道透水且人行道透水、車道透水且人行道不透水、車道不透水且人行道透水。

由圖 4-12-3 可以發現，植栽綠帶數量為 3 且高 LAI、含水狀態為永久凋萎點的方案，平均 PET 降溫約 1.43 (1.24- 1.63 之間) °C，鋪面種類組合的平均 PET 降溫效果由高至低依序為車道透水且人行道透水、車道透水且人行道不透水、車道不透水且人行道透水、車道不透水且人行道不透水；植栽綠帶數量為 3 且高 LAI、含水狀態為田間含水量的方案，平均 PET 降溫約 4.85 (3.78- 5.98 之間) °C，鋪面種類組合的平均 PET 降溫效果由高至低依序為車道透水且人行道透水、車道透水且人行道不透水、車道不透水且人行道透水。

整體來看，含水狀態為永久凋萎點之方案的平均 PET 降溫效果皆差於含水狀態為田間含水量之方案，含水狀態為永久凋萎點時，鋪面種類組合的平均 PET

降溫效果差異小；含水狀態為田間含水量時，鋪面種類組合的平均 PET 降溫效果差異大。

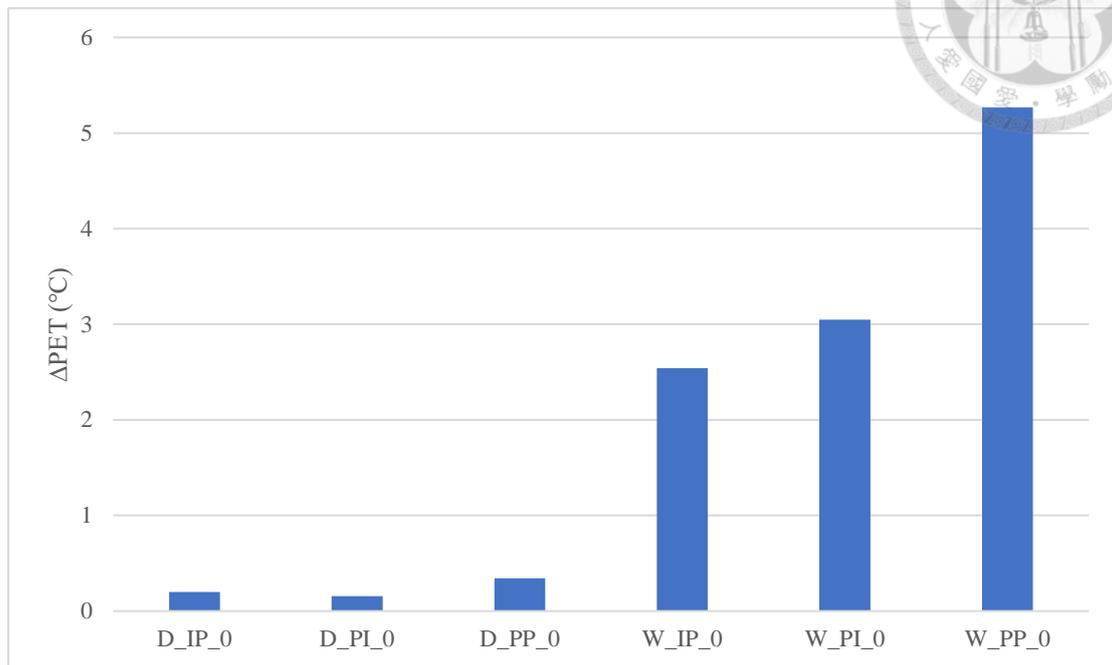


圖 4-12-1 同行道樹組成下的方案在在傍晚時段(下午 4 點至下午 6 點)的平均 PET 降溫效果 (植栽綠帶為 0 之方案)

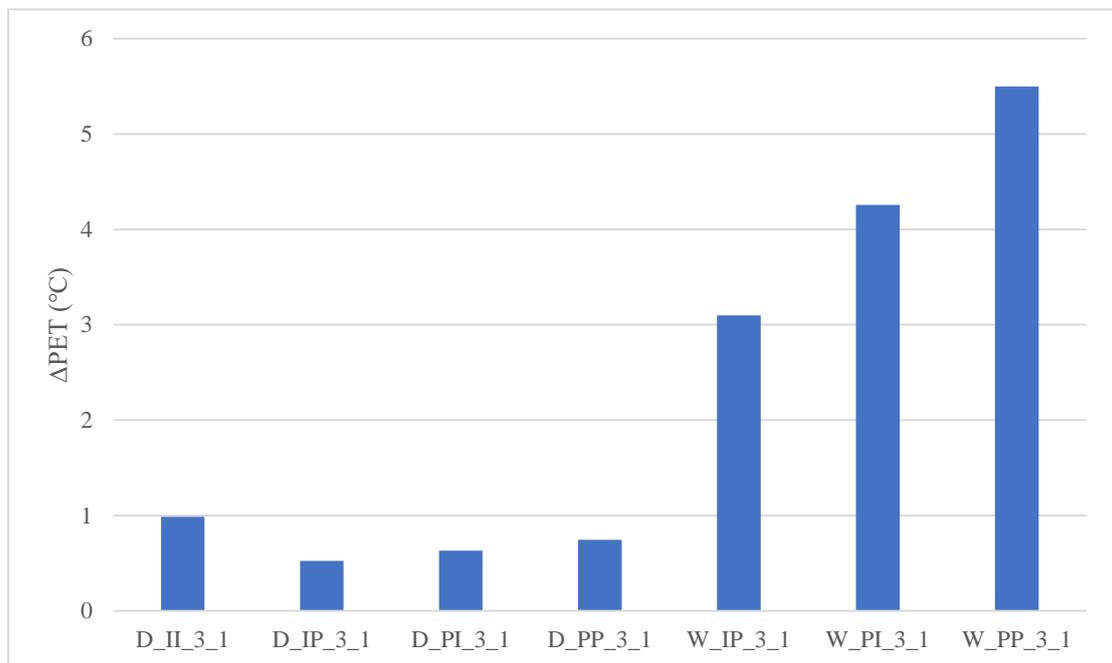


圖 4-12-2 同行道樹組成下的方案在在傍晚時段(下午 4 點至下午 6 點)的平均 PET 降溫效果 (植栽綠帶為 3 且為低 LAI 之方案)

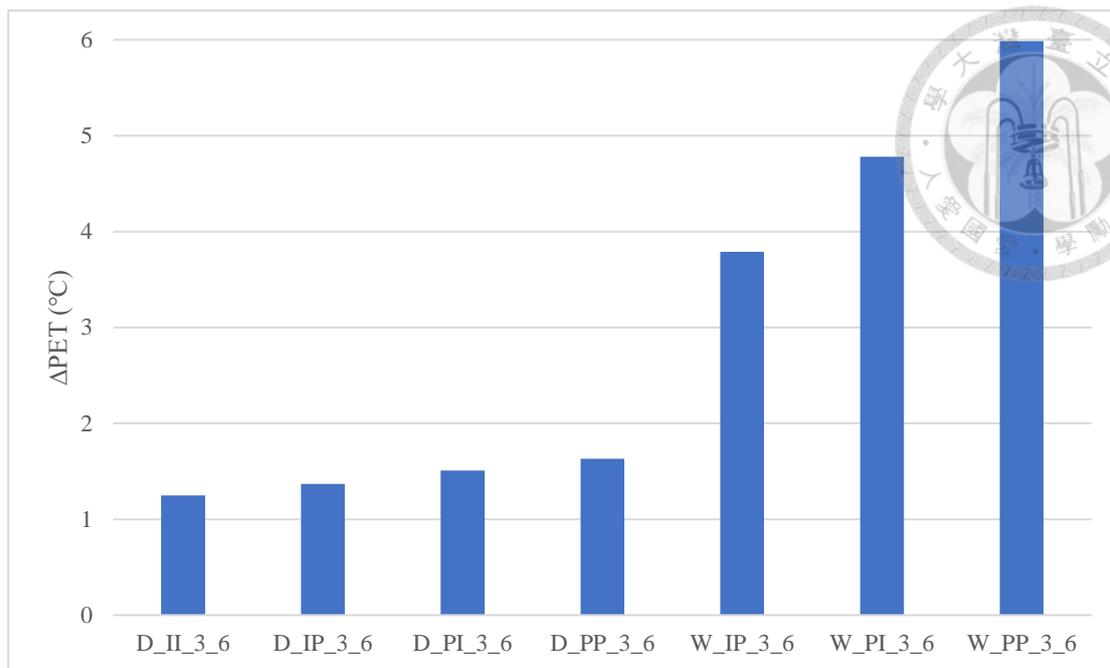


圖 4-12-3 同行道樹組成下的方案在在傍晚時段(下午 4 點至下午 6 點)的平均 PET 降溫效果 (植栽綠帶為 3 且為高 LAI 之方案)

(二)、 不同行道樹組成下的方案平均 PET 降溫差異

圖 4-13 為同鋪面種類組合下的方案在傍晚時段(下午 4 點至下午 6 點)的平均 PET 降溫效果。由圖 4-13-1 可以發現，鋪面種類組合為車道不透水且人行道不透水、含水狀態為永久凋萎點的方案，平均 PET 降溫約 1.11 (0.98- 1.24 之間) °C，行道樹組成平均 PET 降溫效果由高至低依序為植栽綠帶數量為 3 且高 LAI、植栽綠帶數量為 3 且低 LAI。

由圖 4-13-2 可以發現，鋪面種類組合為車道不透水且人行道透水、含水狀態為永久凋萎點的方案，平均 PET 降溫約 0.69 (0.20- 1.36 之間) °C，行道樹組成平均 PET 降溫效果由高至低依序為植栽綠帶數量為 3 且高 LAI、植栽綠帶數量為 3 且低 LAI、植栽綠帶數量為 0；鋪面種類組合為車道不透水且人行道透水、含水狀態為田間含水量的方案，平均 PET 降溫約 3.14 (2.54- 3.78 之間) °C，行道樹組成平均 PET 降溫效果由高至低依序為植栽綠帶數量為 3 且高 LAI、植栽綠帶數量為 3 且低 LAI、植栽綠帶數量為 0。

由圖 4-13-3 可以發現，鋪面種類組合為車道透水且人行道不透水、含水狀態

為永久凋萎點的方案，平均 PET 降溫約 0.76 (0.15- 1.50 之間) °C，行道樹組成平均 PET 降溫效果由高至低依序為植栽綠帶數量為 3 且高 LAI、植栽綠帶數量為 3 且低 LAI、植栽綠帶數量為 0；鋪面種類組合為車道透水且人行道不透水、含水狀態為田間含水量的方案，平均 PET 降溫約 4.02 (3.04- 4.77 之間) °C，行道樹組成平均 PET 降溫效果由高至低依序為植栽綠帶數量為 3 且高 LAI、植栽綠帶數量為 3 且低 LAI、植栽綠帶數量為 0。

由圖 4-13-4 可以發現，鋪面種類組合為車道透水且人行道透水、鋪面含水狀態為永久凋萎點的方案，平均 PET 降溫約 0.90 (0.34- 1.63 之間) °C，行道樹組成平均 PET 降溫效果由高至低依序為植栽綠帶數量為 3 且高 LAI、植栽綠帶數量為 3 且低 LAI、植栽綠帶數量為 0；鋪面種類組合為車道透水且人行道透水、鋪面含水狀態為田間含水量的方案，平均 PET 降溫約 5.58 (5.26- 5.98 之間) °C，行道樹組成平均 PET 降溫效果由高至低依序為植栽綠帶數量為 3 且高 LAI、植栽綠帶數量為 3 且低 LAI、植栽綠帶數量為 0。

整體來看，含水狀態為永久凋萎點之方案的平均 PET 降溫效果皆差於鋪面含水狀態為田間含水量之方案，鋪面含水狀態為永久凋萎點時，鋪面種類組合的平均 PET 降溫效果差異小；含水狀態為田間含水量時，鋪面種類組合的平均 PET 降溫效果差異大。

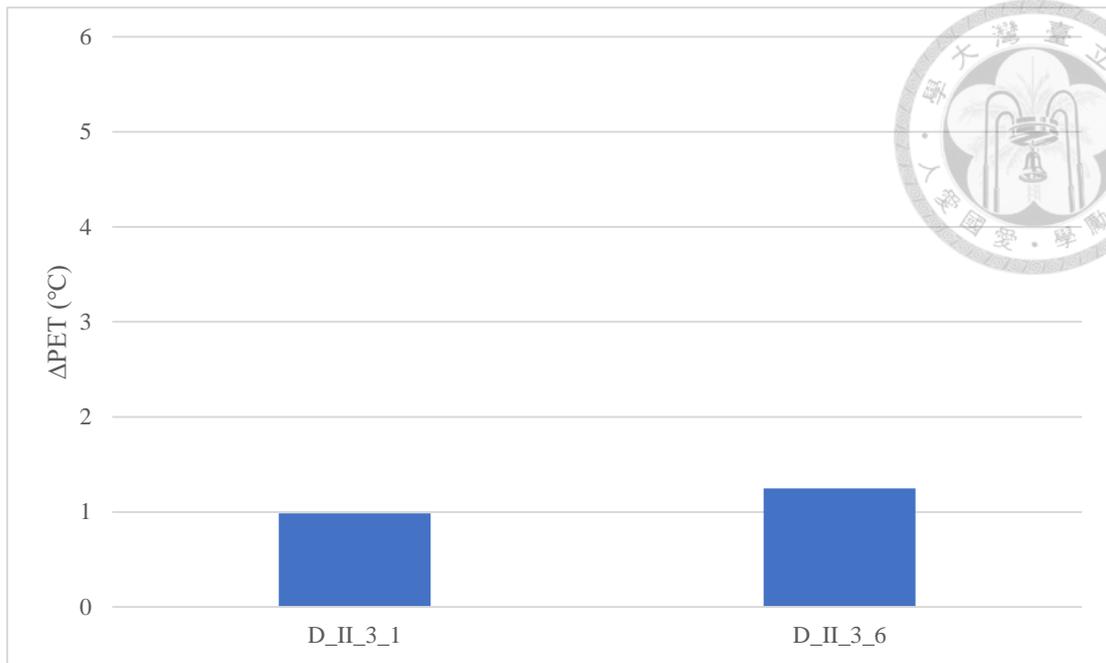


圖 4-13-1 同鋪面種類組合下的方案在傍晚時段(下午 4 點至下午 6 點)的平均 PET 降溫效果 (鋪面種類組合為車道不透水且人行道不透水之方案)

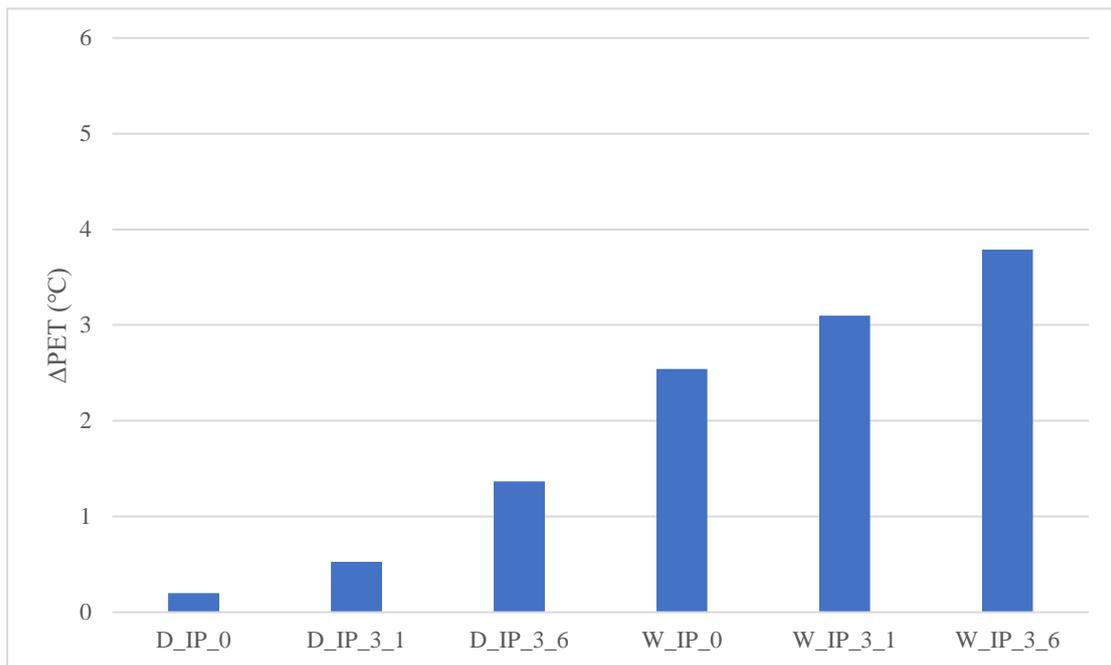


圖 4-13-2 同鋪面種類組合下的方案在傍晚時段(下午 4 點至下午 6 點)的平均 PET 降溫效果 (鋪面種類組合為車道不透水且人行道透水之方案)

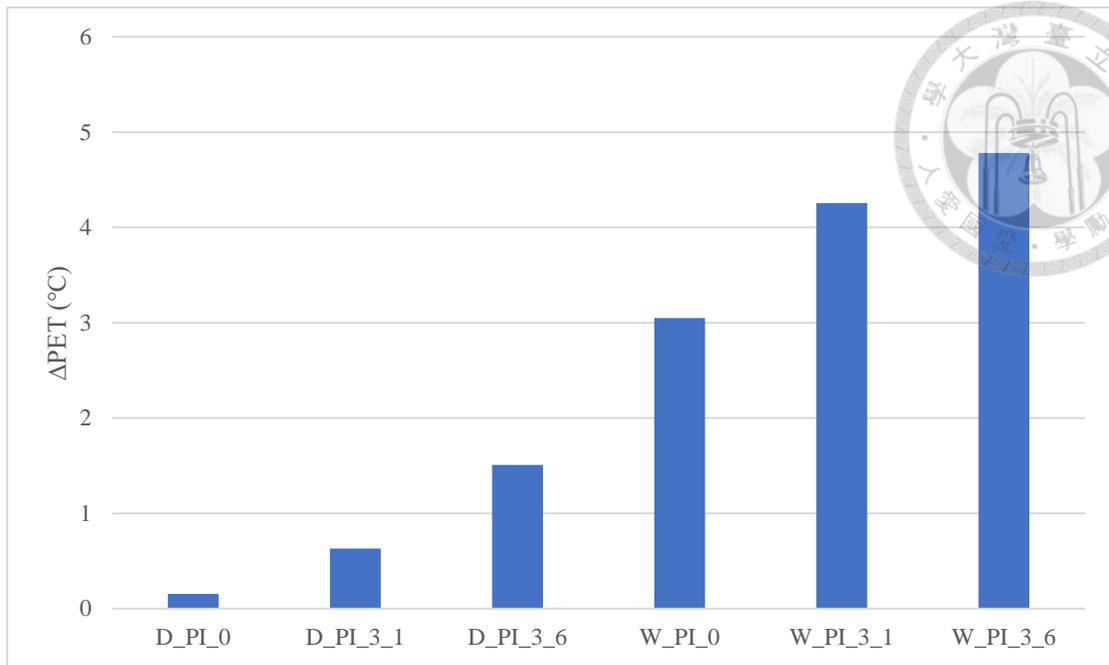


圖 4-13-3 同鋪面種類組合下的方案在傍晚時段(下午 4 點至下午 6 點)的平均 PET 降溫效果 (鋪面種類組合為車道透水且人行道不透水之方案)

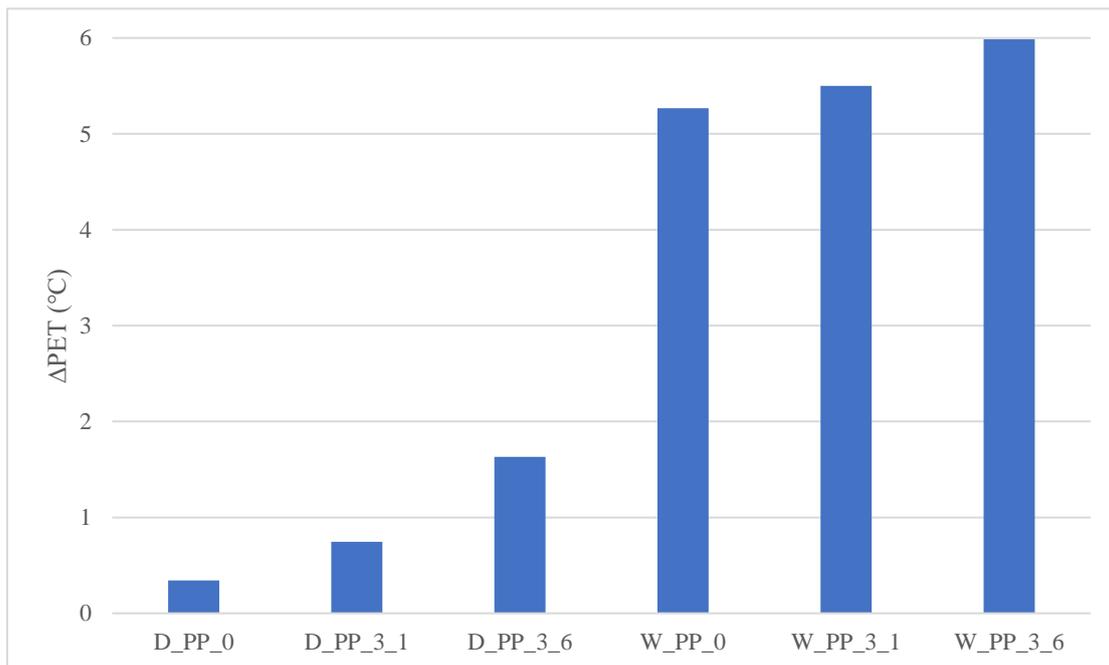


圖 4-13-3 同鋪面種類組合下的方案在傍晚時段(下午 4 點至下午 6 點)的平均 PET 降溫效果 (鋪面種類組合為車道透水且人行道透水之方案)

三、 不同行道樹組成與鋪面含水情形對 PET 降溫影響之分析

本研究指的行道樹組成與鋪面含水情形包含植栽綠帶數量、植栽種類、車道鋪面種類、人行道鋪面種類和鋪面含水狀態等。本階段將探討不同行道樹組成與鋪面含水情形與 PET 之間的關係。將分別以植栽綠帶數量、植栽 LAI 值、車道鋪面種類、人行道鋪面種類和鋪面含水狀態，進行中午時段(中午 12 點至下午 2 點)及傍晚時段(下午 4 點至下午 6 點)的獨立樣本 t 檢定，觀察其 PET 降溫效果是否具有顯著差異。

以獨立樣本 t 檢定來看植栽綠帶數量在中午時段(中午 12 點至下午 2 點)及傍晚時段(下午 4 點至下午 6 點)的 PET 降溫效果是否具有顯著差異，結果顯示在中午時段植栽綠帶數量為 0 和植栽綠帶數量為 3 的方案具有顯著差異 ($p < 0.05$)，在傍晚時段植栽綠帶數量為 0 和植栽綠帶數量為 3 的方案亦具有顯著差異 ($p < 0.05$)。

表 4-6 中午時段植栽綠帶數量對 PET 降溫的 t 檢定分析結果表

植栽綠帶數量	平均降溫 ($\Delta\overline{PET}$, °C)	標準差	<i>t</i>	
0	2.80	3.49	-79.922	***
3	8.93	3.52		

註:*** $p < 0.05$

表 4-7 傍晚時段植栽綠帶數量對 PET 降溫的 t 檢定分析結果表

植栽綠帶數量	平均降溫 ($\Delta\overline{PET}$, °C)	標準差	<i>t</i>	
0	1.92	1.91	-14.231	***
3	2.52	2.00		

註:*** $p < 0.05$

以獨立樣本 t 檢定來看植栽 LAI 值在中午時段(中午 12 點至下午 2 點)及傍晚時段(下午 4 點至下午 6 點)的 PET 降溫效果是否具有顯著差異，結果顯示在中午時段植栽 LAI 值為 1.5 和植栽 LAI 值為 6 的方案具有顯著差異 ($p < 0.05$)，在傍晚時段植栽 LAI 值為 1.5 和植栽 LAI 值為 6 的方案亦具有顯著差異 ($p < 0.05$)。

表 4-8 中午時段植栽 LAI 值對 PET 降溫的 t 檢定分析結果表

植栽 LAI 值	平均降溫 ($\overline{\Delta PET}$, °C)	標準差	t
1.5	6.85	3.31	-61.329
6.0	11.01	2.27	***

註:*** $p < 0.05$

表 4-9 傍晚時段植栽 LAI 值對 PET 降溫的 t 檢定分析結果表

植栽 LAI 值	平均降溫 (°CPET)	標準差	t
1.5	2.15	2.03	-15.795
6.0	2.90	1.90	***

註:*** $p < 0.05$

以獨立樣本 t 檢定來看車道鋪面種類在中午時段(中午 12 點至下午 2 點)及傍晚時段(下午 4 點至下午 6 點)的 PET 降溫效果是否具有顯著差異，結果顯示在中午時段密集配瀝青混凝土(不透水)和多孔隙瀝青混凝土(透水)的方案具有顯著差異 ($p < 0.05$)，在傍晚時段密集配瀝青混凝土(不透水)和多孔隙瀝青混凝土(透水)的方案亦具有顯著差異 ($p < 0.05$)。

表 4-10 中午時段車道鋪面種類對 PET 降溫的 t 檢定分析結果表

車道鋪面種類	平均降溫 ($\overline{\Delta PET}$, °C)	標準差	t
密集配瀝青混凝土 (不透水)	6.10	3.56	-19.493
多孔隙瀝青混凝土 (透水)	7.75	4.91	***

註:*** $p < 0.05$

表 4-11 傍晚時段車道鋪面種類對 PET 降溫的 t 檢定分析結果表

車道鋪面種類	平均降溫 ($\Delta\overline{PET}$, °C)	標準差	t
密集配瀝青混凝土 (不透水)	1.63	1.35	-33.159 ***
多孔隙瀝青混凝土 (透水)	2.82	2.20	

註:*** $p<0.05$

以獨立樣本 t 檢定來看人行道鋪面種類在中午時段(中午 12 點至下午 2 點)及傍晚時段(下午 4 點至下午 6 點)的 PET 降溫效果是否具有顯著差異，結果顯示在中午時段水泥混凝土地磚(不透水)和透水水泥混凝土地磚(透水)的方案具有顯著差異 ($p<0.05$)，在傍晚時段水泥混凝土地磚(不透水)和透水水泥混凝土地磚(透水)的方案亦具有顯著差異 ($p<0.05$)。

表 4-12 中午時段人行道鋪面種類對 PET 降溫的 t 檢定分析結果表

人行道鋪面種類	平均降溫 ($\Delta\overline{PET}$, °C)	標準差	t
水泥混凝土地磚 (不透水)	6.85	4.27	-4.349 ***
透水水泥混凝土地磚 (透水)	7.25	4.63	

註:*** $p<0.05$

表 4-13 傍晚時段人行道鋪面種類對 PET 降溫的 t 檢定分析結果表

人行道鋪面種類	平均降溫 ($\Delta\overline{PET}$, °C)	標準差	t
水泥混凝土地磚 (不透水)	1.99	1.77	-15.038 ***
透水水泥混凝土地磚 (透水)	2.58	2.10	

註:*** $p<0.05$

以獨立樣本 t 檢定來看鋪面含水狀態在中午時段(中午 12 點至下午 2 點)及傍晚時段(下午 4 點至下午 6 點)的 PET 降溫效果是否具有顯著差異，結果顯示在中午時段永久凋萎點和田間含水量的方案具有顯著差異 ($p < 0.05$)，在傍晚時段永久凋萎點和田間含水量的方案亦具有顯著差異 ($p < 0.05$)。



表 4-14 中午時段鋪面含水狀態對 PET 降溫的 t 檢定分析結果表

鋪面含水狀態	平均降溫 ($\Delta\overline{PET}$, °C)	標準差	<i>t</i>	
永久凋萎點	4.92	3.81	-63.265	***
田間含水量	9.75	3.78		

註:*** $p < 0.05$

表 4-15 傍晚時段鋪面含水狀態對 PET 降溫的 t 檢定分析結果表

鋪面含水狀態	平均降溫 ($\Delta\overline{PET}$, °C)	標準差	<i>t</i>	
永久凋萎點	0.79	0.68	-160.231	***
田間含水量	4.25	1.31		

註:*** $p < 0.05$

四、 行道樹組成與鋪面含水情形對 PET 降溫影響之分析

本研究指的行道樹組成與鋪面含水情形包含植栽綠帶數量、植栽種類、車道鋪面種類、人行道鋪面種類和鋪面含水狀態等。經由先前的分析可以得知不同的行道樹組成與鋪面含水情形其 PET 降溫效果有差異，因此將進一步探討行道樹組成與鋪面含水情形與 PET 之間的關係。將分別以中午時段(中午 12 點至下午 2 點)及傍晚時段(下午 4 點至下午 6 點)這兩個時段的資料，進行以鋪面含水狀態、車道鋪面種類、人行道鋪面種類、植栽綠帶數量、植栽 LAI 值為解釋變項，PET 降溫為應變項的迴歸分析。

在中午時段(中午 12 點至下午 2 點)，進行逐步迴歸分析的結果顯示，天鋪面含水狀態、車道鋪面種類、人行道鋪面種類、植栽綠帶數量、植栽 LAI 值對 PET 降溫有顯著影響，可能解釋力為 90.8% ($p < 0.001$) (表 4-16)。當鋪面含水狀態為田間含水量時，PET 降溫效果越好；當植栽 LAI 值越高時，PET 降溫效果越好，每提高 1% 的 LAI 值，PET 降溫效果可以提升 0.525(°C)；當植栽綠帶數量越高時，PET 降溫效果越好，每提高 1% 的植栽綠帶數量，PET 降溫效果可以提升 0.332(°C)；當車道鋪面種類為透水時，PET 降溫效果越好；當人行道鋪面種類為透水時，PET 降溫效果越好。

在傍晚時段(下午 4 點至下午 6 點)，進行逐步迴歸分析的結果顯示，鋪面含水狀態、車道鋪面種類、人行道鋪面種類、植栽綠帶數量、植栽 LAI 值對 PET 降溫有顯著影響，可能解釋力為 85.9% ($p < 0.001$) (表 4-17)。當鋪面含水狀態為田間含水量時，PET 降溫效果越好；當車道鋪面種類為透水時，PET 降溫效果越好；當植栽 LAI 值越高時，PET 降溫效果越好，每提高 1% 的 LAI 值，PET 降溫效果可以提升 0.211(°C)；當人行道鋪面種類為透水時，PET 降溫效果越好；當植栽綠帶數量越高時，PET 降溫效果越好，每提高 1% 的植栽綠帶數量，PET 降溫效果可以提升 0.083(°C)。

表 4-16 中午時段行道樹組成與鋪面含水情形對 PET 降溫的迴歸分析結果表

行道樹組成與鋪面 含水情形	B	SE	β	t	
(常數)	-1.380	0.040		-34.235	***
鋪面含水狀態	4.926	0.028	0.545	175.717	***
車道鋪面種類	1.796	0.029	0.196	61.246	***
人行道鋪面種類	0.786	0.029	0.086	26.814	***
植栽綠帶數量	1.085	0.014	0.332	80.196	***
植栽 LAI 值	0.926	0.007	0.525	127.646	***
F=19714.592 R ² =0.908					

註: 鋪面含水狀態建立虛擬變數, 永久凋萎點設為 0, 田間含水量設為 1; 車道鋪面種類建立虛擬變數, 密集配瀝青混凝土設為 0, 多孔瀝青混凝土設為 1; 人行道鋪面種類建立虛擬變數, 水泥混凝土磚設為 0, 透水水泥混凝土磚設為 1。

*** $p < 0.001$

表 4-17 傍晚時段行道樹組成與鋪面含水情形對 PET 降溫的迴歸分析結果表

行道樹組成與鋪面 含水情形	B	SE	β	t	
(常數)	-0.721	0.022		-32.485	***
鋪面含水狀態	3.343	0.015	0.832	216.693	***
車道鋪面種類	0.970	0.016	0.238	60.061	***
人行道鋪面種類	0.493	0.016	0.121	30.554	***
植栽綠帶數量	0.120	0.007	0.083	16.130	***
植栽 LAI 值	0.166	0.004	0.211	41.470	***
F=12150.725 R ² =0.859					

註: 鋪面含水狀態建立虛擬變數, 永久凋萎點設為 0, 田間含水量設為 1; 車道鋪面種類建立虛擬變數, 密集配瀝青混凝土設為 0, 多孔瀝青混凝土設為 1; 人行道鋪面種類建立虛擬變數, 水泥混凝土磚設為 0, 透水水泥混凝土磚設為 1。

*** $p < 0.001$

第三節 研究假設驗證

本研究包含 6 項研究假設：

H1: 植栽綠帶數量為 3 的方案，其行人的熱舒適度較植栽綠帶數量為 0 的方案佳。

H2: 植栽 LAI 值為 6 的方案，其行人的熱舒適度較植栽 LAI 值為 1.5 的方案佳。

H3: 車道鋪面種類為透水的方案，其行人的熱舒適度較車道鋪面種類為不透水的方案佳。

H4: 人行道鋪面種類為透水的方案，其行人的熱舒適度較人行道鋪面種類為不透水的方案佳。

H5: 鋪面含水狀態為田間含水量的方案，其行人的熱舒適度較鋪面含水狀態為永久凋萎點的方案佳。

H6: 植栽綠帶數量、植栽 LAI 值、車道鋪面種類、人行道鋪面種類、鋪面含水狀態對行人熱舒適度有顯著影響。

根據方案間比較可以得知：

(1) 以獨立樣本 t 檢定來看植栽綠帶數量的 PET 降溫效果是否具有顯著差異，結果顯示在中午時段和傍晚時段植栽綠帶數量為 0 和植栽綠帶數量為 3 的方案具有顯著差異 ($p < 0.05$)，且植栽綠帶數量為 3 的 PET 降溫效果較佳，因此 H1 假設成立。

(2) 以獨立樣本 t 檢定來看植栽 LAI 值的 PET 降溫效果是否具有顯著差異，結果顯示在中午時段和傍晚時段植栽 LAI 值為 1.5 和植栽 LAI 值為 6 的方案具有顯著差異 ($p < 0.05$)，且植栽 LAI 值為 6 的 PET 降溫效果較佳，因此 H2 假設成立。

(3) 以獨立樣本 t 檢定來看車道鋪面種類的 PET 降溫效果是否具有顯著差異，結果顯示在中午時段和傍晚時段車道鋪面種類為密集配瀝青混凝土(不透水)和車道鋪面種類為多孔隙瀝青混凝土(透水)的方案具有顯著差異 ($p < 0.05$)，且車道鋪面種類為多孔隙瀝青混凝土(透水的) PET 降溫效果較佳，因此 H3 假





設成立。

- (4) 以獨立樣本 t 檢定來看人行道鋪面種類的 PET 降溫效果是否具有顯著差異，結果顯示在中午時段和傍晚時段人行道鋪面種類為水泥混凝土磚(不透水)和人行道鋪面種類為透水水泥混凝土磚(透水)的方案具有顯著差異 ($p < 0.05$)，且人行道鋪面種類為透水水泥混凝土磚(透水)的 PET 降溫效果較佳，因此 H4 假設成立。
- (5) 以獨立樣本 t 檢定來看鋪面含水狀態在的 PET 降溫效果是否具有顯著差異，結果顯示在中午時段和傍晚時段鋪面含水狀態為永久凋萎點和鋪面含水狀態為田間含水量的方案具有顯著差異 ($p < 0.05$)，且鋪面含水狀態為田間含水量的 PET 降溫效果較佳，因此 H5 假設成立。
- (6) 在中午時段(中午 12 點至下午 2 點)，進行逐步迴歸分析的結果顯示，鋪面含水狀態、車道鋪面種類、人行道鋪面種類、植栽綠帶數量、植栽 LAI 值對 PET 降溫有顯著影響，可能解釋力為 90.8% ($p < 0.001$)；在傍晚時段(下午 4 點至下午 6 點)，進行逐步迴歸分析的結果顯示，鋪面含水狀態、車道鋪面種類、人行道鋪面種類、植栽綠帶數量、植栽 LAI 值對 PET 降溫有顯著影響，可能解釋力為 85.9% ($p < 0.001$)，因此 H6 假設成立。

表 4-18 研究假設驗證結果表

研究假設	結果
H1: 植栽綠帶數量為 3 的方案，其行人的熱舒適度較植栽綠帶數量為 0 的方案佳。	假設成立
H2: 植栽 LAI 值為 6 的方案，其行人的熱舒適度較植栽 LAI 值為 1.5 的方案佳。	假設成立
H3: 車道鋪面種類為透水的方案，其行人的熱舒適度較車道鋪面種類為不透水的方案佳。	假設成立
H4: 人行道鋪面種類為透水的方案，其行人的熱舒適度較人行道鋪面種類為不透水的方案佳。	假設成立
H5: 鋪面含水狀態為田間含水量的方案，其行人的熱舒適度較鋪面含水狀態為永久凋萎點的方案佳。	假設成立
H6: 植栽綠帶數量、植栽 LAI 值、車道鋪面種類、人行道鋪面種類、鋪面含水狀態對行人熱舒適度有顯著影響。	假設成立



第五章 結論與建議



第一節 結論

本研究經由文獻回顧及實地調查的結果進行方案研擬，發展成 21 個不同的行道樹組成與鋪面含水情形方案，再以 ENVI-met Version5 微氣候模擬軟體及其附屬軟體 Bio Met 2 進行數值模擬與 PET 計算，模擬結果取各方案上午 8 點至下午 6 的 PET 進行資料分析，探討不同行道樹組成與鋪面含水情形之間的熱舒適差異。結果可以分成幾個部分說明：

一、 不同行道樹組成與鋪面含水情形對行人熱舒適的影響程度不同

根據逐步迴歸分析的結果顯示，在中午時段(中午 12 點至下午 2 點)，鋪面含水狀態對 PET 降溫效果影響最大，其他依序為植栽 LAI 值、植栽綠帶數量、車道鋪面種類、人行道鋪面種類，可以發現，在最熱的時段，鋪面含水狀態會對環境造成最大的影響，若透水鋪面的含水狀態為田間含水量，配合高 LAI 的植栽，在中午時段將有最佳的降溫效益；而在傍晚時段(下午 4 點至下午 6 點)，鋪面含水狀態對 PET 降溫效果影響最大，其他依序為車道鋪面種類、植栽 LAI 值、人行道鋪面種類、植栽綠帶數量，可以發現，即使熱度減少，鋪面含水狀態之差異還是會對環境造成影響，而透水車道佔據街道大部分面積，多孔隙瀝青混凝土其物理特性升溫降溫快速，在傍晚時段會對街道環境帶來降溫效益。

二、 中午時段，東側人行道明顯比西側人行道有更高的 PET 值

根據各方案在中午時段的 PET 剖面情況，在中午時段(中午 12 點至下午 2 點)，東側人行道明顯比西側人行道有更高的 PET 值，而當植栽綠帶增加、植栽 LAI 值增加，東西兩側人行道的 PET 差距減小，且越靠近植栽綠帶，PET 值越低；根據各方案在傍晚時段的 PET 剖面情況，在傍晚時段(下午 4 點至下午 6 點)，東西兩側人行道的 PET 值相近，且越靠近植栽綠帶，PET 值越低。

三、 同行道樹組成下，鋪面含水狀態為永久凋萎點的 PET 值比鋪面含水狀態為田間含水量的 PET 值高

比較鋪面含水狀態對行人熱舒適的影響，可以發現在同行道樹組成下，鋪面含水狀態為永久凋萎點的 PET 值皆比鋪面含水狀態為田間含水量的 PET 值高，在上午 8 點至下午 6 點平均 PET 的最大差距可達 4.03°C PET (D_PP_3_1-W_PP_3_1)。而在降溫表現的部分，結果顯示在同行道樹組成下，鋪面含水狀態為田間含水量的 PET 降溫效果皆比鋪面含水狀態為永久凋萎點的 PET 降溫效果優，PET 降溫效果最大值為 $14.85^{\circ}\text{C PET}$ (W_PP_3_6)。

四、 同鋪面含水情形下，植栽綠帶數量為 0 的 PET 值比植栽綠帶數量為 3 的 PET 值高，且植栽為低 LAI 的 PET 值比植栽為高 LAI 的 PET 值高

比較行道樹組成對行人熱舒適的影響，可以發現在同鋪面含水情形下，植栽綠帶數量為 0 的 PET 值皆比植栽綠帶數量為 3 的 PET 值高，且植栽為低 LAI 的 PET 值皆比植栽為高 LAI 的 PET 值高，在上午 8 點至下午 6 點平均 PET 的最大差距可達 3.42°C PET (W_PI_0-W_PI_3_1)。而在降溫表現的部分，結果顯示在同鋪面含水情形下，植栽綠帶數量為 3 的 PET 降溫效果皆比植栽綠帶數量為 0 的 PET 降溫效果優，且植栽為高 LAI 的 PET 降溫效果皆比植栽為低 LAI 的 PET 降溫效果優，PET 降溫效果最大值為 $14.85^{\circ}\text{C PET}$ (W_PP_3_6)。

過去研究中，Lin 等人 (2021) 曾提出街道中，植栽綠帶數量越多，能提供更多遮蔭，環境氣溫越低，而葉面積指數越高，植栽冠層枝葉密度越高，有效阻擋太陽輻射，行人熱舒適度越佳，本研究結果和前者的研究結果相同。

五、 同行道樹組成下，鋪面種類組合狀態的 PET 值高低依序為，車道不透水且人行道不透水、車道不透水且人行道透水、車道透水且人行道不透水、車道透水且人行道透水

比較鋪面種類組合對行人熱舒適的影響，可以發現在同行道樹組成下，鋪面種類組合狀態的 PET 值高低依序為，車道不透水且人行道不透水、車道不透水

且人行道透水、車道透水且人行道不透水、車道透水且人行道透水，在上午 8 點至下午 6 點平均 PET 的最大差距可達 2.84°C PET (W_PI_3_6- W_PP_3_6)。而在降溫表現的部分，結果顯示在同行道樹組成下，鋪面種類組合狀態的 PET 降溫效果高低依序為，車道透水且人行道透水、車道透水且人行道不透水、車道不透水且人行道透水、車道不透水且人行道不透水，PET 降溫效果最大值為 14.85°C PET (W_PP_3_6)。從中也可以發現，透水車道佔據街道大部分面積，多孔隙瀝青混凝土其物理特性升溫降溫快速，若植栽綠帶為 0，在中午時段反而會有 PET 升溫的情況發生。

過去研究中，Stempihar 等人 (2012) 在研究結果指出，白天的時候，乾燥的多孔隙瀝青相較於密集配瀝青會有增溫的現象，其來自於較低的反射率、粗糙的表面捕獲了更多的空氣和熱量以及較低的導熱率，這使得車道表面溫度持續提升；而 Cheng 等人 (2019) 在道路實測中，也發現持續乾旱的日子中，多孔隙瀝青在白天有升溫的現象，本研究結果和前兩者的研究結果相同。

第二節 綜合討論

Tsoka 等人 (2018) 曾針對 52 項 ENVI-met 微氣候模擬研究進行綜合回顧，從中可以發現過去學者們使用 ENVI-met 模擬都市樹木配置、綠地規劃、屋頂花園、鋪面對街道微氣候的影響已相當成熟。過去有許多學者使用 ENVI-met 來評估樹木配置與綠地規劃對微氣候的影響 (Chow & Brazel, 2012; Lee et al., 2016; Lin et al., 2021)，最近幾年，也開始有學者使用 ENVI-met 來評估鋪面對微氣候的影響，大多探討鋪面反射率(Albedo)、發射率(Emissivity) 對氣溫及行人熱舒適度的影響，在鋪面反射率方面，提高街道鋪面面層之反射率能降低環境溫度、改善行人熱舒適 (Peron et al., 2015; Santamouris et al., 2012; Makropoulou, 2017)；而鋪面發射率方面，環境溫度能隨著街道鋪面面層之發射率的提高而降低 (Santamouris et al., 2012)。而過去學者使用 ENVI-met 探討街道透水鋪面對熱舒適度之影響的相關研究當中，大部分僅探討透水鋪面的有無對氣溫及熱舒適的影



響，學者已提出透水鋪面能有效改善氣溫與行人熱舒適(Huang & Chen, 2020; Battisti et al., 2018)，過去尚未有學者針對鋪面種類、鋪面含水狀態做更進一步的街道微氣候模擬研究，而實測研究則多探討鋪面的物理特性 (Stempihar et al., 2012)，其探討的物理特性包含鋪面體積熱容量、熱導率、反射率等，這些參數成為本研究之鋪面參數輸入的依據，除此之外，過去實測研究也包含實地前往已建設之透水鋪面測量表溫變化(Cheng et al., 2018)，但實際測量需考量現有的鋪面組合方案、天氣、儀器等限制，因此只能得出鋪面表面溫度的變化趨勢，但應用於街道規劃上尚有難度。而 ENVI-met 微氣候模擬軟體則能模擬不同方案，並從各方案的結果取得簡易推估式，提供設計者參考及應用。

本研究目標為使用 ENVI-met Version5 微氣候模擬軟體實地驗證且模擬不同的鋪面含水情形，依據臺北市工務局「鋪設透水性鋪面」的實務工法來建模，並實地驗證確定模型為可信賴模型，再進行方案的模擬計算，最終能量化不同鋪面含水情形下的行人熱舒適度，提供做為未來都市街道規劃設計之參考依據。在過去街道熱舒適的相關研究中，驗證項目多為空氣溫度，並觀察其逐時折線圖是否和實測結果擁有相同趨勢，本次研究分別針對鋪面含水狀態為永久凋萎點和鋪面含水狀態為田間含水量來做實地驗證，鋪面含水狀態為永久凋萎點驗證氣溫的 R^2 值為 0.95， d 值則為 0.98，可以發現鋪面含水狀態為永久凋萎點的模擬結果和實際測量結果相當一致，模型的可信度高；鋪面含水狀態為田間含水量驗證氣溫的 R^2 值為 0.70， d 值則為 0.67，模型具可信力，可以發現鋪面含水狀態為田間含水量的 T_a 在上午 8 點至上午 10 的實測值與模擬值在趨勢上有差異，原因為實測灑水從上午 8 點開始，而模擬從上午 5 點開始，故模擬情況和實測情況有所不同。

從研究結果來探討不同鋪面含水狀態對行人熱舒適之影響，可以發現，當鋪面含水狀態為田間含水量（雨後放晴的鋪面含水狀態），其行人熱舒適降溫效益較鋪面含水狀態為永久凋萎點（無雨晴天的鋪面含水狀態）為佳，此結果和 Cheng

等人 (2019) 的研究結果相同，學者們透過長期道路監測，發現鋪面含水量多的透水鋪面，其表面溫度比鋪面含水量低的透水鋪面來的更低。本研究更進一步發現，透水鋪面在經過大雨或被充分浸濕，才能發揮其最大行人熱舒適降溫效益，若在無雨晴天、連續乾旱的鋪面含水狀態下，則須搭配種植高 LAI 的喬木，才能有較佳的行人熱舒適降溫效益。

第三節 建議

本研究經由文獻回顧及實地調查的結果進行方案研擬，發展成 21 個不同的行道樹組成與鋪面含水情形方案，再以 ENVI-met Version5 微氣候模擬軟體及其附屬軟體 Bio Met 2 進行數值模擬與 PET 計算，模擬結果取各方案上午 8 點至下午 6 的 PET 進行資料分析，探討不同行道樹組成與鋪面含水情形之間的熱舒適差異。根據研究結果提出以下建議作為實務操作與後續研究之參考。

一、 都市道路規劃設計

本研究結果顯示，植栽綠帶數量、植栽 LAI 值、車道鋪面種類、人行道鋪面種類和鋪面含水狀態皆會影響行人的熱舒適，其中中午時段(中午 12 點至下午 2 點)以鋪面含水狀態影響最大，植栽 LAI 值次之，傍晚時段(下午 4 點至 6 點)以鋪面含水狀態影響最大，車道鋪面種類次之。

配合臺北四季多雨的地理環境，以行人熱舒適度的考量之下，道路規劃設計時，應以種植高密度的植栽為優先考量，如榕樹、樟樹、茄冬、台灣欒樹、水黃皮、黃連木、欖仁等植栽，其能直接遮擋熱輻射以改善行人熱舒適度，接下來則是增設多孔隙瀝青混凝土的透水車道，最終再鋪設透水水泥混凝土磚的透水人行道，這樣的規劃設計方式將能帶來最大效益的行人熱舒適。

二、 後續研究建議

為配合研究的實測驗證，本研究僅選擇臺北市工務局提出「鋪設透水性鋪面計畫」的實施路段為研究基地，為南北走向且 30 公尺的道路，後續可針對東西走向、不同街寬比及層級的道路討論，也可以增長模擬時間，觀察日夜間的溫度

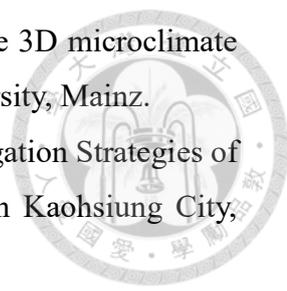
變化，以更大的區域尺度來看 UHI 的變動，使實務操作能因應差異做出效益最大的調整。



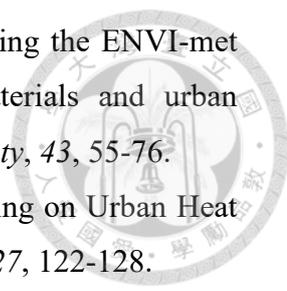
參考文獻



1. 內政部營建署 (2015)。市區道路透水性鋪面使用手冊。臺北市:中華民國內政部營建署。
2. 行政院公共工程委員會 (2001)。基層公共工程基本圖。臺北市:中華民國公共工程委員會。
3. 臺北市政府 (2007)。臺北市政府各機關辦理人行鋪面工程面層及底層設計原則。臺北市:臺北市政府。
4. 林宗輝、黃治峯、劉家銘、陳炳麟、陳鏗元 (2017)。打造臺北市海綿城市--以市區道路人行道透水性鋪面之透水率及都市效能為例。鋪面工程, 15(2), 35-50。
5. 卓吟樺 (2017)。都市道路組成與行人熱舒適關係之研究。碩士論文。臺灣大學園藝暨景觀學系, 臺北市。
6. ASHRAE. (2004). ASHRAE Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc.
7. Battisti, A., Laureti, F., Zinzi, M., & Volpicelli, G. (2018). Climate Mitigation and Adaptation Strategies for Roofs and Pavements: A Case Study at Sapienza University Campus. *Sustainability*, 10(10), 3788.
8. Chow, W.T.L. & Brazel, A.J. (2012). Assessing xeriscaping as a sustainable heat island mitigation approach for a desert city. *Building and Environment*, 47, 170-181.
9. Cheng, Y.Y., Lo, S.L., Ho, C.C., Lin, J.Y. & Yu, S.L. (2019). Field Testing of Porous Pavement Performance on Runoff and Temperature Control in Taipei City. *Water*, 11(12), 2635.
10. Fanger, P.O. (1970). Thermal comfort. Danish Technical Press, Copenhagen.
11. Ferrari, A., Kubilay, A., Derome, D., & Carmeliet, J. (2020). The use of permeable and reflective pavements as a potential strategy for urban heat island mitigation. *Urban Climate*, 31, 100534.
12. Gagge, A.P., Fobelets, A.P., & Berglund, L.G. (1986). A standard predictive Index of human reponse to thermal enviroment. *ASHRAE Transactions*, 92(2B), 709-731.
13. Höppe, P. (1999). The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*, 43, 71-75.

- 
14. Huttner, S. (2012). Further development and application of the 3D microclimate simulation ENVI-met. PhD thesis. Johannes Gutenberg-University, Mainz.
 15. Huang, J.M. & Chen, L.C. (2020). A Numerical Study on Mitigation Strategies of Urban Heat Islands in a Tropical Megacity: A Case Study in Kaohsiung City, Taiwan. *Sustainability*, 12(10), 3952.
 16. Helletsgruber, C., Gillner, S., Gulyás, Á., Junker, R.R., Tanács, E., & Hof, A. (2020). Identifying Tree Traits for Cooling Urban Heat Islands—A Cross-City Empirical Analysis. *Forests*, 11(10), 1064.
 17. Stempihar, J.J., Manzouri, T.P., Kaloush, K.E., & Rodezno, M.C. (2012). Porous Asphalt Pavement Temperature Effects for Urban Heat Island Analysis. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2293(1), 123-130.
 18. Katayama, T., Ishii, A., Hayashi, T., & Tsutsumi, J. (1993). Field surveys on cooling effects of vegetation in an urban area. *Journal of Thermal Biology*, 18(5-6), 571-576.
 19. Kántor, N., & Unger, J. (2011). The most problematic variable in the course of human-biometeorological comfort assessment – the mean radiant temperature. *Cent. Eur. J. Geosci.*, 3(1), 90-100.
 20. Lin, T.P. & Matzarakis, A. (2008). Tourism climate and thermal comfort in Sun Moon Lake, Taiwan. *International Journal of Biometeorology*, 52, 281-290.
 21. Lin, B.S., Cho, Y.H. & Hsieh, C.I. (2021). Study of the thermal environment of sidewalks within varied urban road structures. *Urban Forestry & Urban Greening*, 62, 127-137.
 22. Lin, B.S. & Lin, C.T. (2016). Preliminary study of the influence of the spatial arrangement of urban parks on local temperature reduction *Urban Forestry & Urban Greening*, 20(1), 348-357.
 23. Lobaccaro, G. & Acero, J.A. (2015). Comparative analysis of green actions to improve outdoor thermal comfort inside typical urban street canyons. *Urban Climate*, 14(2), 251-267.
 24. Lee, H., Mayer, H., & Chen, L. (2016). Contribution of trees and grasslands to the mitigation of human heat stress in a residential district of Freiburg, Southwest Germany. *Landscape and Urban Planning*, 148, 37-50.
 25. Lee, H., Mayer, H., & Kuttler, W. (2020). Impact of the spacing between tree crowns on the mitigation of daytime heat stress for pedestrians inside E-W urban

- street canyons under Central European conditions. *Urban Forestry & Urban Greening*, 48, 126558.
26. Makropoulou, M. (2017). Microclimate Improvement of Inner-City Urban Areas in a Mediterranean Coastal City. *Sustainability*, 9(6), 882.
27. Mayer, H. & Höppe, P. (1987). Thermal comfort of man in different urban environments. *Theoretical and Applied Climatology*, 38, 43-49.
28. Ng, E., Yau, R., Wong, K., Ren, C., & Katschner, L. (2012). Final Report of Hong Kong Urban Climatic Map and Standards for Wind Environment- Feasibility Study. *School of Architecture, The Chinese University of Hong Kong*.
29. O'Neill, M.S. & Ebi, K.L. (2009). Temperature Extremes and Health: Impacts of Climate Variability and Change in the United States. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 51(1), 13-25.
30. Pomerantz, M., Pon, B., Akbari, H., & Chang, S.C.B (2000). The Effect of Pavements Temperatures on Air Temperatures in Large Cities, *Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA94720*.
31. Peron, F., De Maria, M.M., Spinazzè, F., & Mazzali, U. (2015). An analysis of the urban heat island of Venice mainland. *Sustainable Cities and Society*, 19, 300-309.
32. Simpson, J. (1998) Urban forest impacts on regional cooling and heating energy use: Sacramento county study. *Geography*.
33. Sun, C.Y. (2011). A street thermal environment study in summer by the mobile transect technique. *Theoretical and Applied Climatology*, 106(3-4), 433-442.
34. Shahidan, M.F., Shariff, M.K.M., Jones, P., Salleh, E., & Abdullah, A.M. (2010). A comparison of *Mesua ferrea* L. and *Hura crepitans* L. for shade creation and radiation modification in improving thermal comfort. *Landscape and Urban Planning*, 97(3), 168-181.
35. Stempihar, J.J., Pourshams, T., Kaloush, K.E. , & Rodesne, M.C. (2012). Porous Asphalt Pavement Temperature Effects on Overall Urban Heat Island. *In Proceedings of the Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, DC, USA*, 16–19.
36. Taleghani, M., Sailor, D., & Ban-Weiss, G.A. (2016). Micrometeorological simulations to predict the impacts of heat mitigation strategies on pedestrian thermal comfort in a Los Angeles neighborhood. *Environmental Research Letters*, 11(2), 024003.

- 
37. Tsoka, S., Tsikaloudaki, A., & Theodosiou, T. (2018). Analyzing the ENVI-met microclimate model's performance and assessing cool materials and urban vegetation applications—A review. *Sustainable Cities and Society*, 43, 55-76.
38. Wang, Y. & Akbari, H. (2016). The effects of street tree planting on Urban Heat Island mitigation in Montreal. *Sustainable Cities and Society*, 27, 122-128.
39. YahiaErik, M.W. & Johansson, E. (2013). Evaluating the behaviour of different thermal indices by investigating various outdoor urban environments in the hot dry city of Damascus, Syria. *International Journal of Biometeorology*, 57(4), 61530.
40. Ziter, C.D., Pedersen, E.J., Kucharik, C.K., & Turner, M.G. (2019). Scale-dependent interactions between tree canopy cover and impervious surfaces reduce daytime urban heat during summer. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(15), 7575-7580.