

國立臺灣大學生物資源暨農學院

生物環境系統工程學系

碩士論文



Department of Bioenvironmental Systems Engineering

College of Bioresources and Agriculture

National Taiwan University

Master Thesis

綠屋頂土壤熱通量之監測與模擬

Monitoring and Simulation of Soil Heat Flux from Green Roofs

李冠緯

Kuan-Wei Lee

指導教授：謝正義 博士

Advisor: Cheng-I Hsieh, Ph.D.

中華民國 112年 7月

July, 2023

謝辭



念碩士的日子即將進入尾聲，在碩士的這段期間，很感謝自己努力在完成研究上，雖然在做研究的過程中，容易因為資料前處理的繁瑣以及不確定性而造成挫折感很重，但很感謝朋友以及家人的鼓勵，讓自己能夠持續在做研究上繼續前進。除研究之外，也努力修習較為相關的課程讓自己具備一定的相關知識量。

碩士能夠走到最後都要歸功於我的指導教授謝正義教授，感謝教授每次 meeting 時點出研究可能的問題以及根據未來研究方向給予的建議，讓我也能一步一步慢慢完成論文，也因為教授的建議能讓論文的成果越來越豐富。除此之外，在擔任碩士生期間，也感謝教授願意支持我出國交換的決定，彌補我大學因為疫情沒有交換的遺憾。除此之外，也感謝在碩士論文口試時擔任口試委員的林寶秀教授及詹瀅潔教授，感謝教授們於口試時提出的問題及建議，使我的論文能夠更加完善。在研究室內也感謝黃一航學長，感謝學長在我遇到困難或是有疑惑的地方，能夠給建議我可執行的方向，也感謝學長針對論文點出我的問題，也感謝林寶秀教授研究室的學生，幫我解答實驗數據上的問題。

除了做研究，在日常生活中，感謝生工 b04 的朋友們穎君、柏年、宇弘、均澤、長庭以及碩士期間認識的人們在我碩士生涯期間陪我吃飯或聊天，也感謝生工系的學弟們力寬、宸瑄、泓文陪我打球紓壓，在快要接近碩士尾聲時，感謝交換期間認識的朋友們 Zoe、Jeremy、Duke 紿予我的鼓勵，讓我也能有動力繼續完成我的碩士學位。最後也謝謝我的家人們的支持與陪伴讓我也能以自己的步調完成碩士學位。再一次感謝在碩士期間幫助我的教授與朋友們！

冠緯 2023.08

摘要

隨著氣候變遷與都市熱島效應日益嚴重，建築能源消耗量也逐漸上升。為了能夠有效減緩此現象以達到永續環境的目標，綠屋頂阻隔熱能的效果也備受重視。

本研究之主要目標為了解在台北的氣候下綠屋頂的隔熱效果，因此於研究中選取三個不同維護管理程度(零維護、低維護、高維護)以及植被的綠屋頂進行溫度及熱通量的實測。此外也使用解析解以及半階微分法(half-order time derivative method)與土壤熱通量實測值進行比較，評估模式的準確度。

在模擬部分，半階微分法與實測值近似，其推估的熱通量可有效作為綠屋頂的實測熱通量，但是解析解則無法有效模擬且維護程度越高其模擬結果越差。

在監測部分，研究結果顯示葉面積指數(leaf area index)越大的綠屋頂，其土壤表面溫度相對於水泥表面溫度可降低最多。此外，在綠屋頂底部土壤熱通量方面，除了零維護綠屋頂在白天仍有熱通量進入室內，其餘綠屋頂的熱通量皆為整日離開室內。

研究的最後進行成本效益評估，將綠屋頂的初始成本與維護成本納入計算，加入各綠屋頂所帶來的節電效益進行比較。在利用實驗資料及成本資料進行計算後，最後的結果發現在三個綠屋頂中，零維護綠屋頂有最低成本。

關鍵詞:綠屋頂、半階微分法、土壤溫度、土壤熱通量、綠屋頂成本效益分析



Abstract

With the increasing severity of the urban heat island effect and climate change, the energy consumption of buildings is also gradually increasing. To effectively mitigate this phenomenon and achieve sustainable environmental goals, the thermal insulation effect of green roofs is highly valued.

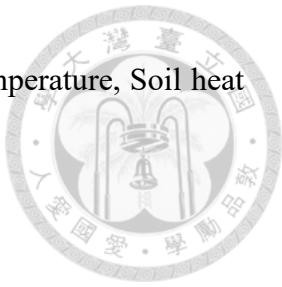
The main objective of this study is to investigate the thermal performance of green roofs in the climate of Taipei. For this purpose, three green roofs with different maintenance levels (zero maintenance, low maintenance, high maintenance) and vegetation were selected for temperature and heat flux measurements. Additionally, analytical solutions and half-order time derivative method were employed and compared with measured soil heat flux values to evaluate the accuracy of the models.

In the simulation part, half-order time derivative method approximates well with the measured values, and its estimated heat flux can effectively serve as the measured heat flux for green roofs. However, the analytical solution cannot simulate effectively, and the higher the maintenance level, the poorer the simulation results.

In the monitoring part, the research results show that green roofs with a higher leaf area index can significantly reduce soil surface temperature compared to cement surface temperature. Furthermore, about soil heat flux at the bottom of the green roofs, except for zero-maintenance green roof which still has heat flux entering indoors during the daytime, the heat flux for the other green roofs is predominantly leaving the indoors throughout the day.

Lastly, a cost-benefit evaluation was conducted, considering the initial cost and maintenance cost of green roofs, along with the energy-saving benefits provided by each green roof. After performing calculations using experimental data and cost data, the results revealed that zero-maintenance green roof had the lowest cost of three green roofs.

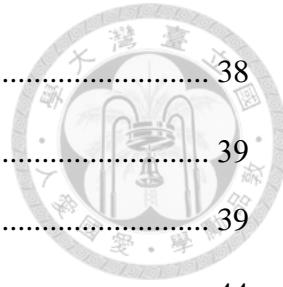
Keywords: Green roofs, Half-order time derivative method, Soil temperature, Soil heat flux, Cost-benefit evaluation of green roofs





目錄

謝辭	I
摘要	II
Abstract.....	III
目錄	V
圖目錄	VII
表目錄	IX
第一章 緒論	1
1.1 文獻回顧	1
1.2 研究動機與流程	5
第二章 綠屋頂實驗場	7
2.1 綠屋頂實驗區域與特性	7
2.2 綠屋頂結構	14
2.3 儀器配置	16
第三章 研究方法	19
3.1 模型概述	19
3.2 一維熱傳導公式(實測值).....	19
3.3 解析解	20
3.4 半階微分法	21
第四章 模擬結果與討論	23
第五章 實測結果與討論	29
5.1 溫度	29
5.1.1 零維護土壤溫度比較	29
5.1.2 低維護土壤溫度比較	32
5.1.3 高維護土壤溫度比較	35



5.1.4 綠屋頂底部溫度比較	38
5.2 热通量	39
5.2.1 土壤热通量 G_1 比較	39
5.2.2 土壤热通量 G_2 比較	44
5.2.3 土壤热通量 G_1 與 G_2 比較	48
5.2.4 底部热通量 G_3 比較	51
5.3 對照組热通量比較	56
第六章 綠屋頂成本效益	59
第七章 結論	62
References	64
Appendix A: 儀器圖片	70
Appendix B: 阻尼深度 D 與熱傳導度 K 計算值	71
Appendix C: 低維護、高維護綠屋頂的預測热通量	73
Appendix D: 太陽輻射	76
Appendix E: 土壤含水量	78

圖 目 錄



圖 1 實驗地點周邊空照圖(取自 Google Map)	7
圖 2 三種綠屋頂初始(2019 年)植栽組合及空間配置	10
圖 3 零維護綠屋頂俯視圖 (a) - (d): 2019 年 (e) - (h): 2020 年	11
圖 4 低維護綠屋頂俯視圖 (a) - (d): 2019 年 (e) - (h): 2020 年	12
圖 5 高維護綠屋頂俯視圖 (a) - (d): 2019 年 (e) - (h): 2020 年	13
圖 6 三種綠屋頂的結構及儀器位置示意圖	15
圖 7 2019 年零維護土壤熱通量($z=1\text{cm}$)實測值與解析解和半階微分法比較圖..	24
圖 8 2020 年零維護土壤熱通量($z=1\text{cm}$)實測值與解析解和半階微分法比較圖..	24
圖 9 2019 年零維護土壤熱通量($z=1\text{cm}$)實測值與解析解預測值關係圖.....	25
圖 10 2020 年零維護土壤熱通量($z=1\text{cm}$)實測值與解析解預測值關係圖	26
圖 11 2019 年零維護土壤熱通量($z=1\text{cm}$)實測值與半階微分法預測值關係圖	27
圖 12 2020 年零維護土壤熱通量($z=1\text{cm}$)實測值與半階微分法預測值關係圖	27
圖 13 2019 年零維護綠屋頂土壤溫度與環境溫度圖	30
圖 14 2020 年零維護綠屋頂土壤溫度與環境溫度圖	31
圖 15 2019 年低維護綠屋頂土壤溫度與環境溫度圖	32
圖 16 2020 年低維護綠屋頂土壤溫度與環境溫度圖	33
圖 17 2019 年零維護底部($z=16.1\text{cm}$)與低維護土壤底部($z=15\text{cm}$)溫度比較	34
圖 18 2020 年零維護底部($z=16.1\text{cm}$)與低維護土壤底部($z=15\text{cm}$)溫度比較	35
圖 19 2019 年高維護綠屋頂土壤溫度與環境溫度圖	36
圖 20 2020 年高維護綠屋頂土壤溫度與環境溫度圖	37
圖 21 2019 年空氣溫度與綠屋頂底部溫度之日變化圖	38
圖 22 2020 年空氣溫度與綠屋頂底部溫度之日變化圖	39
圖 23 2019 年各季節土壤熱通量 G_1 ($z=1\text{cm}$) 與淨輻射之日變化圖	40
圖 24 2020 年各季節土壤熱通量 G_1 ($z=1\text{cm}$) 與淨輻射之日變化圖	41

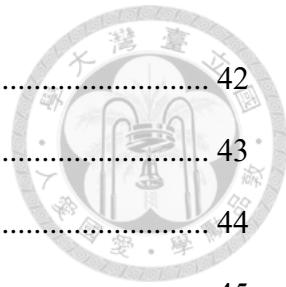


圖 25 2019 年各綠屋頂土壤熱通量 G_1 之日變化圖	42
圖 26 2020 年各綠屋頂土壤熱通量 G_1 之日變化圖	43
圖 27 進入綠屋頂與離開綠屋頂的總熱通量 $G_{1,total}$	44
圖 28 2019 年各季節土壤熱通量 G_2 之日變化圖	45
圖 29 2020 年各季節土壤熱通量 G_2 之日變化圖	46
圖 30 2019 年各綠屋頂土壤熱通量 G_2 之日變化圖	47
圖 31 2020 年各綠屋頂土壤熱通量 G_2 之日變化圖	47
圖 32 室內方向與室外方向的總熱通量 $G_{2,total}$	48
圖 33 2019 年及 2020 年零維護綠屋頂 G_1 及 G_2 之日變化圖	49
圖 34 2019 年及 2020 年低維護綠屋頂 G_1 及 G_2 之日變化圖	50
圖 35 2019 年及 2020 年高維護綠屋頂 G_1 及 G_2 之日變化圖	51
圖 36 2019 年各季節底部熱通量 G_3 之日變化圖	52
圖 37 2020 年各季節底部熱通量 G_3 之日變化圖	53
圖 38 2019 年各綠屋頂底部熱通量 G_3 之日變化圖	54
圖 39 2020 年各綠屋頂底部熱通量 G_3 之日變化圖	54
圖 40 室內方向與室外方向的總底部熱通量 $G_{3,total}$	55
圖 41 上班時間(9:00-18:00)室內方向的總熱通量	56
圖 42 2021 年 1 月/2 月底部熱通量與淨輻射之日變化圖	57
圖 43 2021 年春天底部熱通量與淨輻射之日變化圖	57
圖 44 2021 年夏天底部熱通量與淨輻射之日變化圖	58

表目錄



表 1 不同屋頂型式比較的文獻	3
表 2 不同 LAI 綠屋頂比較的文獻	5
表 3 綠屋頂維護管理分類	8
表 4 綠屋頂植栽類別與特性	9
表 5 介質層材料性質	15
表 6 各綠屋頂儀器位置	16
表 7 2019 年與 2020 年土壤熱通量($z=1\text{cm}$)實測值與解析解預測值關係圖的回歸分析表	28
表 8 2019 年與 2020 年土壤熱通量($z=1\text{cm}$)實測值與半階微分法預測值關係圖的回歸分析表	28
表 9 零維護綠屋頂各層平均溫度與振幅	31
表 10 低維護綠屋頂各層平均溫度與振幅	33
表 11 高維護綠屋頂各層平均溫度與振幅	37
表 12 2021 年上班時間裸露屋頂與各綠屋頂的夏天總熱通量	60
表 13 各綠屋頂的年均成本	61

第一章 緒論



根據氣候資料顯示，全球暖化越趨嚴重，在聯合國下的政府間氣候變遷專門委員會 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 提出的第六次評估總結報告決策者摘要中(IPCC, 2023)，提到在 2011 至 2021 年間的平均地表溫度已比 1850 至 1900 年間的平均地表溫度高 1.1°C ，天氣將越來越熱，都市熱島效應也會越顯嚴重，也因此在炎熱天氣下，如何減少進入屋內的熱顯得重要。為了減緩全球暖化可能造成的影响，目前實施方法之一為建置綠屋頂。

綠屋頂為利用不同植栽進行屋頂綠化的工程，其基本組成主要有植被層、介質層、過濾層、蓄排水層、防水層。在綠屋頂的分類上，歐美各國不盡相同，但是大多根據介質層厚度 15 公分做區分(Hakimdavar et al., 2014)，若厚度小於 15 公分則為薄層式綠屋頂(Extensive Green Roof, EGR)，以景天科的植物居多，若厚度大於 15 公分則為密集式綠屋頂(Intensive Green Roof, IGR)，以禾本科植物、多年生草本植物以及灌木居多。台灣則根據介質厚度和植栽將綠屋頂分為庭園式屋頂綠化、盆栽型屋頂綠化及薄層型屋頂綠化(內政部建築研究所, 2015)。庭園式屋頂綠化介質厚度多為 30 至 120 公分，植被以複層型設計為主，主要有喬木、灌木、草坪、地被植物等；盆栽型屋頂綠化介質厚度多為 7.5 至 30 公分，植被以草花等觀賞植物、果樹、瓜果類植物為主；薄層式綠屋頂介質厚度多為 10 至 30 公分，植被以草坪、地被植物和攀緣植物為主且耐候性強。

1.1 文獻回顧

許多文獻在不同氣候下，將不同型式的屋頂進行比較，可發現綠屋頂所帶來之最大效益為屋頂表面溫度下降及減少進入屋內的熱通量。Teemusk and Mander (2010) 實驗位於 Tartu, Estonia，發現介質深度有 10 公分的綠屋頂其表面溫度振幅相對於其傳統屋頂(鋼板屋頂)的表面溫度振幅低了約 20°C 左右。Getter et al. (2011) 比較在美國中西部的氣候下， 325m^2 且介質深度為 5 公分的 EGR 與傳統的礫石屋



頂不同層的溫度與熱通量變化，分為晴天、陰天及雨天比較。實驗結果顯示春天與秋天具有相似的情形，進入屋頂內部與離開屋頂的熱通量較礫石層屋頂小，溫度的峰值也較小；夏天可以發現溫度的峰值在兩種屋頂層的差異比其他季節大，降低的熱通量也多，綠屋頂使通過屋頂的熱通量在冬季平均降低了 13%，在夏季平均降低了 167%，這比例是利用綠屋頂的熱通量減去礫石屋頂的熱通量，再除以礫石屋頂的熱通量所得，而量值為每個季節的月均熱通量。Karachaliou et al. (2016) 在 Athens, Greece 進行大型 IGR 綠屋頂的隔熱效能評估，發現在夏天時刻下，其綠屋頂的土壤表面溫度相對水泥表面溫度可下降 15K，而密度較密的植被下其土壤溫度會較密度較稀的植被下降 6K。Scharf and Zluwa (2017) 比較在 Vienna, Austria 西南方氣候下，七種不同型態的綠屋頂的隔熱效果。這七種綠屋頂根據不同的建構形式、土壤材料、土壤層厚度所區分，有五個屬於 EGR，兩個屬於 IGR。實驗結果發現當土壤層越厚，綠屋頂隔熱效果越好；另外也發現當土壤層含水量高並結合高孔隙容量時，隔熱效果亦有增加現象。Peng et al. (2019) 比較位於 Nanjing, China 的裸露屋頂、EGR、IGR 三者的熱變化，實驗結果發現後兩者相較於裸露屋頂，溫度在屋頂表面呈現白天較低而晚上較高的現象。另外，在熱通量部分亦可發現相對於裸露屋頂振幅較小的現象。最後在 EGR 與 IGR 的比較結果中，EGR 表面溫度較低，IGR 在夏天冷負荷(cooling load)也較低但在冬天的熱負荷(heating load)則較高，由此來看 IGR 不見得較好。Tang and Zheng (2019) 在 Shanghai, China 進行實驗，比較在夏天有無空調的情況下，連續幾個晴天下的 EGR 與一般屋頂的溫度以及熱通量差異，從結果發現綠屋頂減少 76.1% 的熱通量並降低 14.7% 的冷卻能源消耗。表 1 整理不同型式屋頂比較的文獻。

表 1 不同屋頂型式比較的文獻



Ref.	Location	Type	Plants	Soil Thickness (cm)	Results
[1]	Tartu, Estonia	---	Sedum acre Sod	10 12	Amplitude of green roof surface temperature was 20°C lower than traditional roof
[2]	Michigan, USA	EGR	Hylotelephium Saxifraga Sedum	5	Compared to gravel roofs, green roofs reduced heat transfer by 13% in winter and by 167% in summer
[3]	Athens, Greece	IGR	Artemisia Satureja Origanum Lavandula Salvia	--	The soil surface temperature of the green roof is 15K lower than the conventional roof
[4]	Vienna, Austria	EGR IGR IGR	grass-herbs- succulents mix	12 20 30	The thicker the soil of green roof, the better the insulation
[5]	Nanjing, China	EGR IGR	Sedum lineare grass-herbs-trees mix	5 35	Compared with EGR, IGR made lower cooling load in summer but higher heating load in winter
[6]	Shanghai, China	EGR	Sedum lineare	9.5	In summer, compared to bare roof, the green roof reduced heat flux by 76.1% and cooling loads by 14.7%

References:

- [1] Teemusk and Mander (2010) [2] Getter et al. (2011) [3] Karachaliou et al. (2016) [4] Scharf and Zluwa (2017) [5] Peng et al. (2017) [6] Tang and Zheng (2019)

除了比較不同型式的屋頂外，尚有文獻使用 LAI (Leaf Area Index) 作為不同綠屋頂的比較。Berardi (2016) 利用 ENVI-met 模擬加拿大多倫多大學建築，增加綠屋頂時，其增加 LAI 或是土壤厚度皆能有效減少建物全年總能耗，LAI 增加 1 則總能耗可多減少 0.3% 到 0.4%。Vera et al. (2017) 使用 EnergyPlus 模擬 Albuquerque, USA、Santiago, Chile 以及 Melbourne, Australia 的綠屋頂，他們發現加熱能耗多寡取決於天氣。在阿爾伯克基因為冬天平均太陽輻射 $< 300\text{W/m}^2$ 和風速約 $1\text{~}2\text{ m/s}$ ，LAI 越高，其冬天的加熱能耗也較高；而在聖地牙哥和墨爾本，因為冬天平均太陽輻射 $> 670\text{W/m}^2$ 和風速約在 $3\text{~}4\text{ m/s}$ ，LAI 越高則冬天加熱能耗越低。Gomes et al. (2019) 使用 EnergyPlus 模擬在地中海氣候下的 Lisbon, Portugal，LAI 對建築物能耗的影響，實驗結果發現若以總能耗來看，同樣的土壤厚度、灌溉速率及植被高度下，LAI = 5 時的綠屋頂其建築物能耗會比 LAI = 1 的時候低，但是若將加熱以及冷卻所需能耗分開來看，發現 LAI = 5 的綠屋頂雖然在冷卻能耗需求部分比 LAI = 1 時低，但是其加熱能耗需求部分卻較高，其造成的原因與高 LAI 有較多的陰影與蒸發散有關。Samah et al. (2020) 模擬在 New Delhi 的氣候下，其 LAI 變大時的變化，而實驗可發現近表面溫度高峰值下降 22°C 、室內溫度高峰值下降 4°C 以及進入室內的熱通量下降 $50\text{ kJ/h/m}^2(13.9\text{W/m}^2)$ 。前述所提文獻皆考量 LAI 為定值的情況下，但 Zhou et al. (2018) 認為 LAI 是會隨著時間有些變動，因而提出一個綠屋頂模型將變動的 LAI 納入，驗證過程也發現誤差變小。表 2 整理不同文獻綠屋頂 LAI 變化的影響。

表 2 不同 LAI 綠屋頂比較的文獻

Ref.	Location	LAI	Results
[1]	Toronto, Canada	1.0、2.0	When LAI increased 1, the total energy consumption decreased 0.3% to 0.4% more
[2]	Albuquerque, USA Santiago, Chile Melbourne, Australia	0.1、1.0 、3.0、5.0	Due to the weather, heating loads decreased in Albuquerque while increased in Santiago and Melbourne when LAI increased
[3]	Lisbon, Portugal	1.0、5.0	When LAI increased, the cooling load decreased while the heating load increased
[4]	New Delhi, India	2.0 to 7.0	When LAI increased, the peak value of room temperature and heat gain inside the room are reduced
[5]	Shanghai, China	0.1、1.5 、3.0、5.0	When using a seasonally variable LAI, the simulation results will be more relevant to actual data

References:

- [1] Berardi (2016) [2] Vera et al. (2017) [3] Gomes et al. (2019) [4] Zheng and Weng (2020) [5] Zhou et al. (2018)

1.2 研究動機與流程

在前述所提當中，比較不同綠屋頂的方法有許多種，包括實測不同材料、與裸露屋頂、不同型式(EGR 及 IGR)、土壤厚度等，亦針對不同 LAI 去模擬綠屋頂溫度、熱通量變化，但是綠屋頂的熱變化在不同氣候下有所不同，這些文獻都是在國外進行綠屋頂的實驗或模擬，較少文獻在探討台灣副熱帶的氣候下台北不同維護程度綠屋頂的熱通量變化。除此之外，亦想知道在不同季節下其熱通量表現的差異性及可能帶來的節能效益，因而本研究目的為以實驗結果來分析零維護管理、低維



護管理以及高維護管理的綠屋頂在台灣氣候下其溫度、熱通量各季節的日變化，最後再利用節省的能源以評估哪種綠屋頂的效益最大。此研究中零維護強度與低維護強度的綠屋頂屬於 EGR，而高維護強度的綠屋頂屬於 IGR。此研究的流程如下：

1. 在 2019 年至 2021 年間量測三種綠屋頂(零維護、低維護及高維護)的土壤溫度、綠屋頂底部熱通量、土壤含水量及太陽輻射量等實測資料。
2. 將零維護綠屋頂利用一維熱傳導公式計算的土壤熱通量和半階微分法及解析解預測的熱通量進行比較驗證，得準確度高的模型，以便預測低維護及高維護的土壤熱通量方便進行後續分析。
3. 分析 2019 年至 2021 年間三個綠屋頂的土壤溫度及土壤熱通量變化和裸露屋頂的熱通量變化。
4. 藉由底部熱通量進行成本效益分析，評估最佳情況為何。

第二章 綠屋頂實驗場



2.1 綠屋頂實驗區域與特性

本實驗地點位於國立臺灣大學園藝暨景觀學系造園館的三樓，約在 $121^{\circ}32'22''$ N 及 $25^{\circ}0'50''$ E，屬於副熱帶氣候區域。其建築物位於臺大校園較偏東南側邊界上，建築物的北側及西側為植物居多，東側為基隆路的車道，南側則為台大農學院的產品加工館，實驗地點其面積大約 536.5 m^2 ，實驗位置如圖一紅框所示。



圖 1 實驗地點周邊空照圖(取自 Google Map)

在這次的實驗中根據不同的綠屋頂組合，有三種不同的維護類型，依據修剪、除草、施肥、病蟲害防治、澆灌頻度(以達到田間容水量的標準進行澆水)以及補株(移除死株並種植新的植株)的間隔時間不同，分為零維護管理(無維護)、低維護管理(每三個月維護一次)以及高維護管理(每一個月維護一次)。三種維護管理的工作內容以及間隔頻率詳列於表 3。

表 3 綠屋頂維護管理分類



綠屋頂維護程度	主要工作內容	工作時間間隔
零維護管理	除了病蟲害防治以外，不會進行任何管理工作	
	修剪、除草、施肥	三個月
	病蟲害防治 澆灌頻度	不定期 五天定時澆灌
低維護管理	補株	六個月
	修剪、除草、施肥	一個月
	病蟲害防治 澆灌頻度	不定期 每天澆灌
高維護管理	補株	三個月

在植栽組合的部分，根據不同的維護程度以及介質厚度去選擇適合的植栽種植，一開始先讓每種綠屋頂的植被覆蓋率達到 90%，而後再進行養護大約兩個月，使綠屋頂綠覆蓋率達到 100%即進行實驗。表 4 為各維護程度之綠屋頂所用的植栽及其植栽特性，而圖 2 為 2019 年一開始植栽組合的空間配置圖。

植栽組合與植栽高度可能因時間關係而有不同變化，各維護的綠屋頂其分別四個不同季節的照片如圖 3 至圖 5 所示，2019 年的綠屋頂照片，春天拍攝於 4 月 12 日，夏天拍攝於 7 月 26 日，秋天拍攝於 10 月 18 日，冬天拍攝於 2020 年 1 月 7 日。2020 年的綠屋頂照片，春天拍攝於 3 月 9 日，夏天拍攝於 6 月 12 日，秋天拍攝於 9 月 11 日，冬天拍攝於 12 月 14 日。由圖 3 可以看出零維護綠屋頂的植栽及其 LAI 隨時間有大幅度的變化；圖 4 顯示低維護綠屋頂的植栽及其 LAI 隨時間有小幅度的變化；圖 5 顯示高維護綠屋頂的植栽及其 LAI 因維護頻率高其隨時間的變化很小。

表 4 綠屋頂植栽類別與特性



綠屋頂維護程度	植被種類	植被特性
零維護管理	A. 韭蘭(Rosepink Zephyrlily) B. 小蚌蘭(Dwarf Boat Lily) C. 粉團蓼(Pink Bubbles) D. 小花馬齒牡丹(Portulaca umbraticola) E. 圓葉景天(Sedum makinoi)	耐旱、矮小植物
低維護管理	F. 蔓性野牡丹(Spanish Shawl) G. 繁星花(Star Cluster) H. 銀紋沿階草(Striped Mondo Grass) I. 彩虹馬齒牡丹(Moss Rose 'Hana Misteria') J. 鋪地錦竹草(Spiderwort)	耐旱能力較零維護低，選擇中型草本植物並不與零維護植物重複
高維護管理	K. 月菊(Common Jasmin Orange) L. 馬纓丹(Common Lantana) M. 紫嬌花(Society Garlic) N. 藍星花(Blue Daze) O. 台北草(Manila Grass)	具觀賞價值、花期長、有花香、生長強健具一定抗性的植物

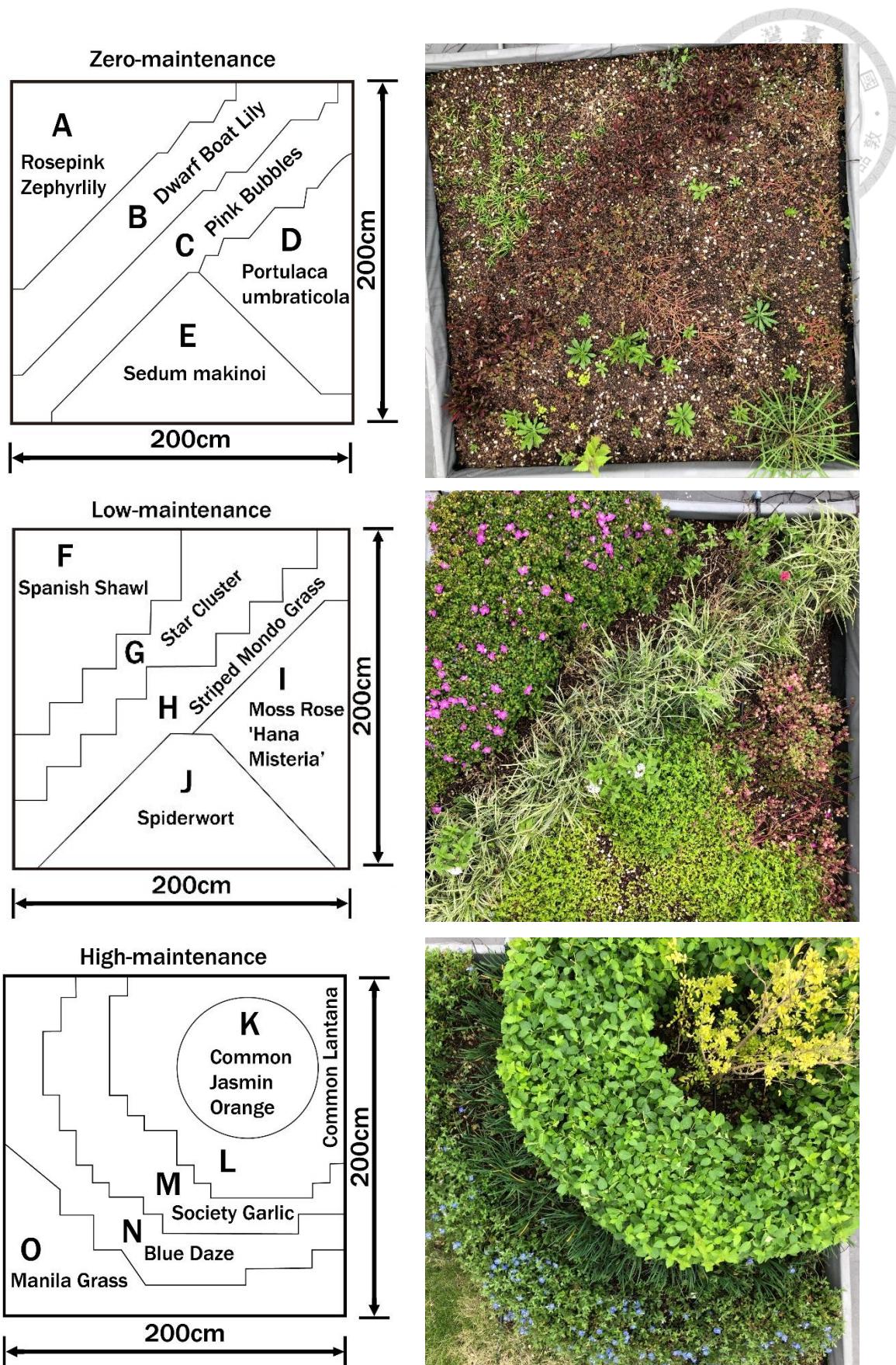


圖 2 三種綠屋頂初始(2019 年)植栽組合及空間配置

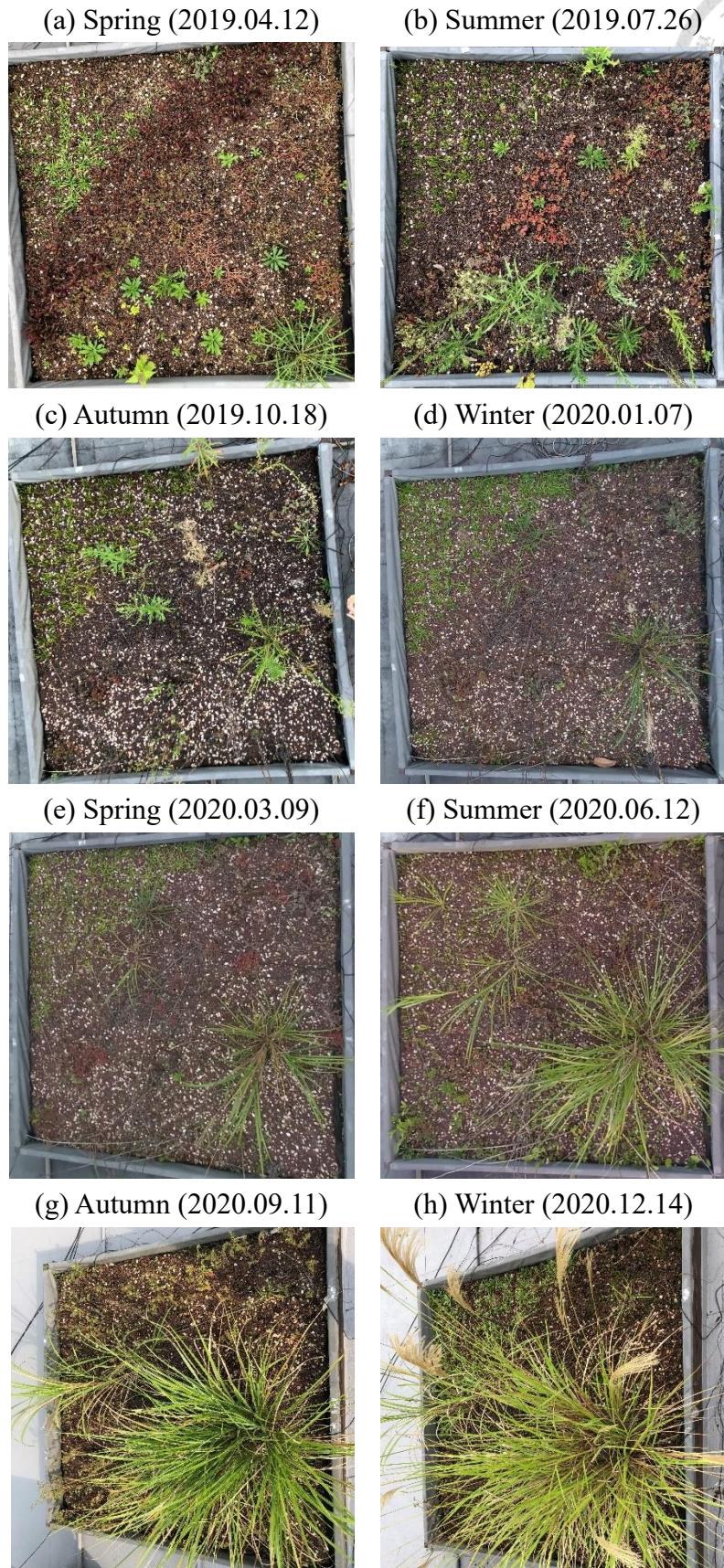


圖 3 零維護綠屋頂俯視圖 (a) - (d): 2019 年 (e) - (h): 2020 年



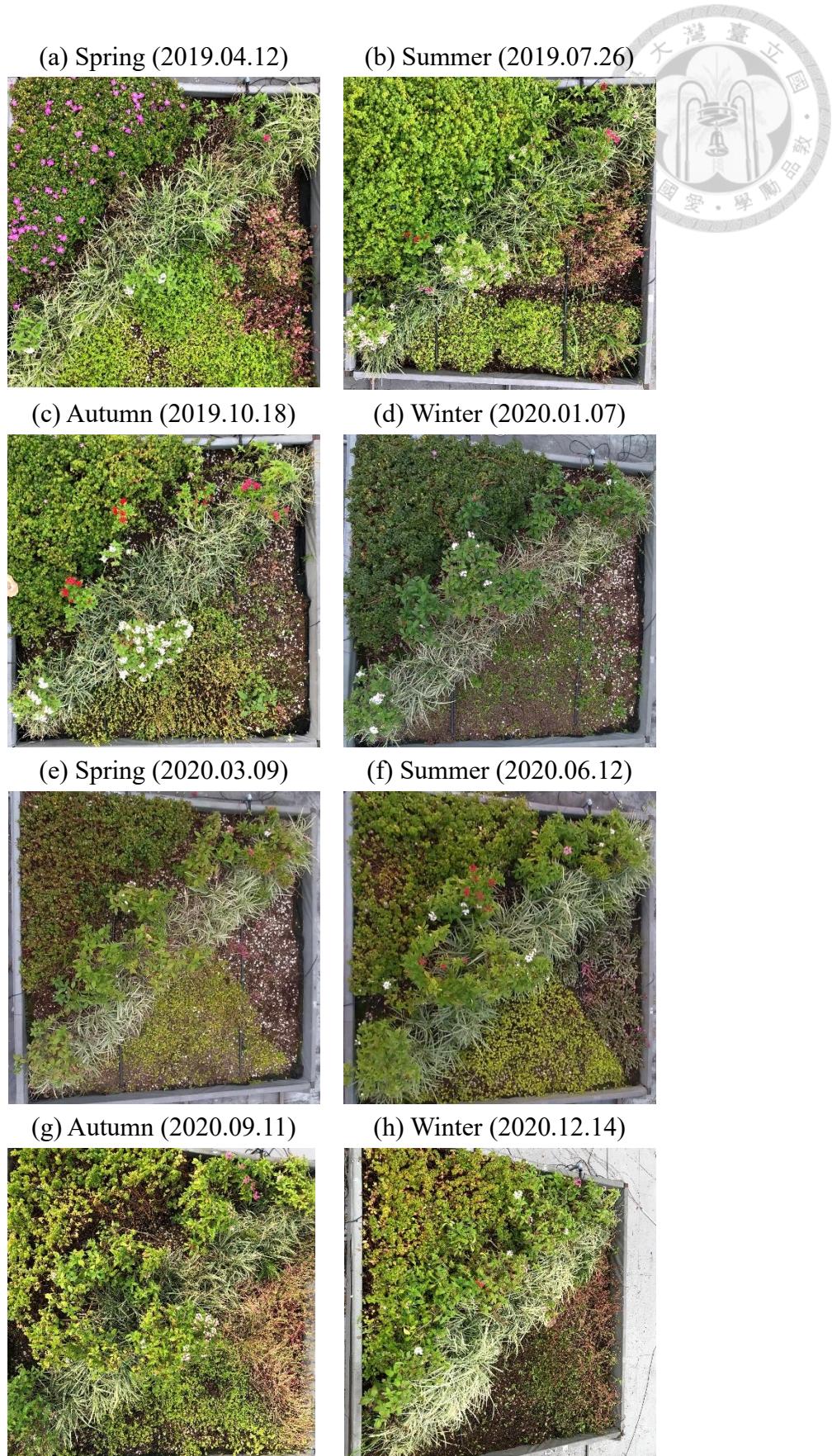


圖 4 低維護綠屋頂俯視圖 (a) - (d): 2019 年 (e) - (h): 2020 年

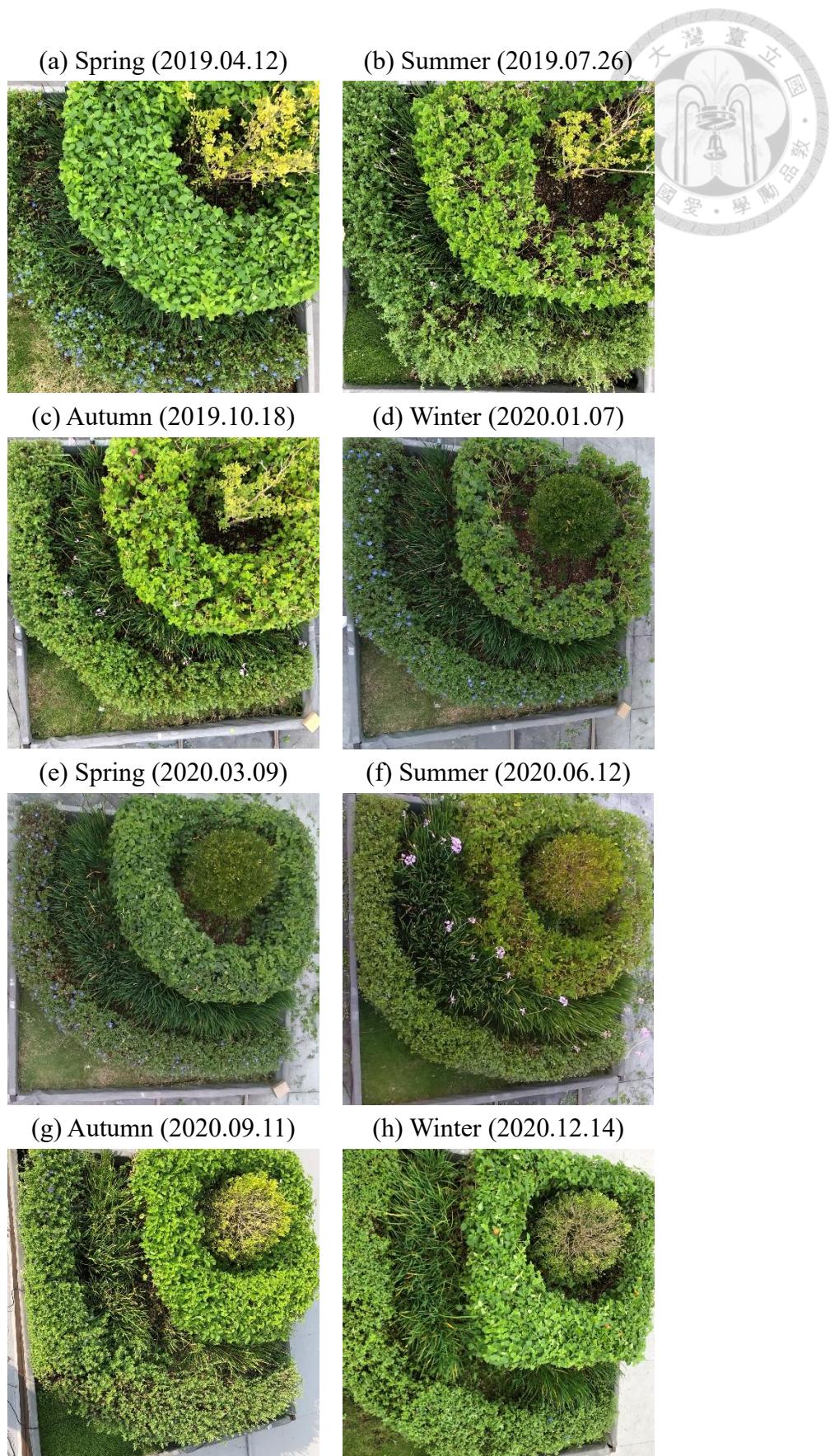


圖 5 高維護綠屋頂俯視圖 (a) - (d): 2019 年 (e) - (h): 2020 年



2.2 綠屋頂結構

本研究所安裝的三種不同植栽組合的綠屋頂，皆由植被層(Vegetation)、介質層(Soil layer)、過濾層、蓄排水層及防水層所組成。每槽尺寸為 2 公尺 x 2 公尺，種植面積共有 4 平方公尺。盆栽外圍則使用南方松(Southern pine)作為保護。

植被層的部分，其植栽組成以及空間配置已詳述於 2.1 節。介質層依據不同的維護程度其介質厚度會有所不同，零維護管理的綠屋頂為 10 cm，低維護管理的綠屋頂為 15 cm，而高維護管理的綠屋頂為 30 cm。而在介質組成的部分，採用由黏土經高溫鍛燒後的輕質骨材-發泡煉石作為主要成分，各組成材料的性質如表 5 所示。

在過濾層、蓄排水層以及防水層的部分，過濾層所使用的黑色不織布(non-woven fabric)厚度為 0.2 mm，蓄排水層使用厚度為 6 cm 的植物生長座(the plants growth base, 寶銳企業)，而防水層則使用厚度為 0.052 cm 的灰色帆布(gray canvas)。

三種綠屋頂的結構示意圖如圖 6 所示。

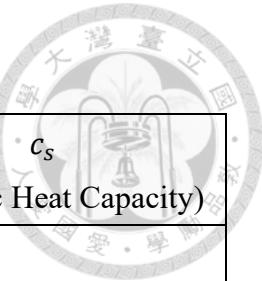


表 5 介質層材料性質

Materials	Volume ratio	ρ_b (bulk density)	c_s (Specific Heat Capacity)
發泡煉石 Expanded Clay			
Coarse grain (12-16 mm)	10%	0.25 g/cm ³ [1]	1.00 kJ/kg·K[3]
Medium grain (5-12 mm)	10%	0.29 g/cm ³ [1]	
Fine grain (0.06-4 mm)	30%	0.49 g/cm ³ [2]	
東洋蘭石(浮石) Pumice stone	15%	0.48 g/cm ³ [4]	0.87 kJ/kg·K[5]
蛭石 Vermiculite	10%	0.16 g/cm ³ [6]	1.08 kJ/kg·K[6]
泥炭土 Peat	10%	0.1911 g/cm ³ [7]	1.31 kJ/kg·K[7]
椰子纖維(0.1-2 cm) Coir Fibre	15%	0.0054 g/cm ³ [8]	21.08 J/kg·K[9]

References:[1] Vaiciene et al. (2019) [2] Rumšys et al. (2017) [3] Schiavoni et al. (2016) [4] Karthika et al. (2021) [5] "Properties of Pumice" (2015-2023) [6] "Vermiculite Data" (2023) [7] Gnatowski et al. (2022) [8] Maia Pederneiras et al. (2021) [9] Abdulkareem et al. (2016)

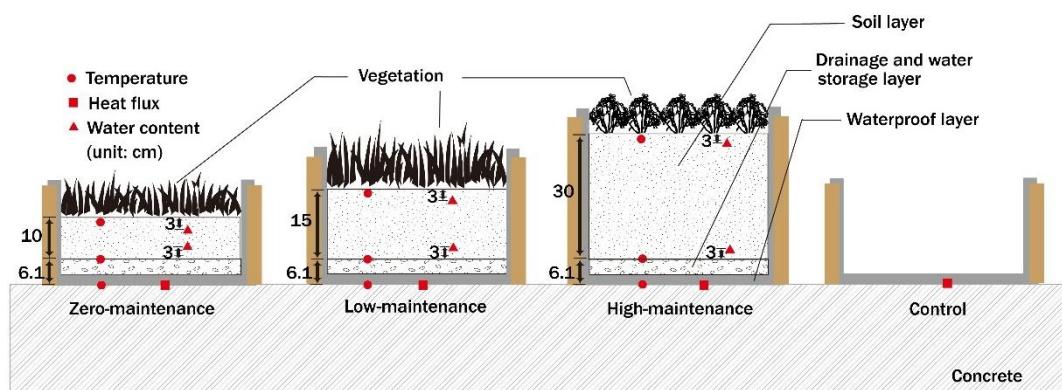


圖 6 三種綠屋頂的結構及儀器位置示意圖



2.3 儀器配置

本綠屋頂實驗中，測量了土壤溫度、土壤含水量以及土壤熱通量各測量位置如圖 6 所示，而表 6 整理實驗地資訊及綠屋頂所使用之儀器位置，全部使用之儀器圖片可見 Appendix A 的圖 A1。

表 6 各綠屋頂儀器位置

綠屋頂維護程度	零維護	低維護	高維護
實驗時間		2019/03/01~2021/02/28	
海拔高度(m)		20.81	
經緯度		121°32'22" N 及 25°0'50" E	
氣候類型		副熱帶氣候	
LAI	0-1	3-4	5
量測深度(cm)			
土壤溫度	-1, -10, -16.1	-1, -15, -21.1	-1, -30, -36.1
土壤含水量	-3, -7	-3, -12	-3, -27
土壤熱通量盤	-16.1	-21.1	-36.1

2019 至 2020 年之間，零維護及低維護綠屋頂植物生長情況不斷變動，而高維護綠屋頂因定期修剪、澆水，LAI 基本上不會有變動。在 2019 年，因零維護綠屋頂的植栽較少，LAI 值為 0 至 1 之間，而低維護的植栽平均 LAI 為 3 至 4 之間，高維護綠屋頂 LAI 值約為 5。在 2020 年，零維護綠屋頂雖然原植物生長不佳，但圖 3 可發現芒草突然迅速生長且植被高度較低維護高，而高維護綠屋頂 LAI 則維持 5。

土壤溫度的部分則使用 T-type 熱電偶測量，其精確度為 $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ 或 0.75%，測量時間則介於 2019 年 3 月至 2021 年 2 月，利用 CR-1000 Datalogger 蒐集資料。在每



個不同維護程度的綠屋頂上，各有三個測量溫度的平面，分別是土壤下一公分、土壤底部以及綠屋頂底部等三個不同深度的位置，而每一個平面平均分成四個區域，每個區域中心放置一個熱電偶測量溫度，將四個溫度值平均後做為每一個平面的溫度值。屋頂水泥地的表面溫度使用 SI-111 作為量測儀器，其精確度可分為兩部分，若目標溫度與感測器溫度差 20°C 以內，精確度為 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ ，若目標溫度與感測器溫度差相差 20°C 以上，精確度為 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，其位置距離地面約 27 公分，測量時間亦介於 2019 年 3 月至 2021 年 2 月。空氣溫度則使用環保署古亭測站的溫度資料進行分析，資料為每一小時一筆。

太陽輻射熱則使用 NR01 測量，其 12 小時總和的精確度為 $\pm 10\%$ ，儀器高度距離屋頂水泥地表面約 45 公分，分別測量短波入射、短波反射、長波入射以及長波輻射等四項量值，測量時間介於 2019 年 3 月至 2021 年 2 月，而淨輻射的計算方式為短波入射加上長波入射減去短波反射及長波輻射所得。HukseFlux Heat flux plate 用於測量綠屋頂底部熱通量，其 12 小時總和的精確度為 $-15\% \sim 5\%$ ，測量時間介於 2019 年 3 月至 2021 年 2 月。從 2021 年開始至 7 月底，熱通量盤多一個對照組，將熱通量盤放置於屋頂水泥表面上，然後將帆布置於儀器上方，所測得的熱通量為帆布至屋頂水泥表面的熱通量。

土壤溼度使用 ECH20 EC-5 土壤溼度感測器來量測土壤的體積含水量(V/V)，其精確度為 ± 0.03 ，在每一個綠屋頂當中含有四個溼度計，有兩個放置於土壤表面以下三公分，有兩個放置於土壤底層以上三公分。量測時間介於 2019 年 3 月至 2021 年 2 月。此土壤溼度感測器收集資料為五分鐘一筆，在四個季節中高維護綠屋頂每天都會在兩個時刻點進行定量噴灌的動作，春天及秋天早上八點噴灌五分鐘以及早上十點噴灌四分鐘；夏天噴灌時間為各三分鐘；冬天噴灌時間為各一分鐘。低維護綠屋頂則於早上八點左右進行噴灌四分鐘，噴灌時間為每五天噴灌一次。零維護則沒有進行定量噴灌。

在此研究中，2019 年及 2020 年所測量的土壤溫度、土壤含水量、底部熱通量、太陽輻射量、水泥溫度皆為每五分鐘一筆，將這些資料平均成 30 分鐘一筆後，再

將一個季節三個月每天的資料進行平均，得出四個季節各自的平均的日變化圖，春天為 3 到 5 月，夏天為 6 到 8 月，秋天為 9 到 11 月，冬天為 12 月到隔年 2 月。



第三章 研究方法



3.1 模型概述

計算綠屋頂的熱性能時，綠屋頂模型簡單分為三層以利計算：植被層(canopy)、土壤層(substrate)、支撐層(support)。計算整個綠屋頂的傳熱的模型有很多種，Quezada-Garcia et al. (2020) 將不同的綠屋頂模型進行理論比較，說明每個不同模型的假設、植被層與土壤層的計算數學公式、不同形式的熱計算等。這些模型因考量的範圍較大較難預測，故將整個綠屋頂研究尺度控制在土壤層及支撐層這兩層，著重於從綠屋頂表面進入到室內的傳導熱，支撐層亦包含過濾層、蓄排水層以及防水層。傳導熱的計算公式採用的是一維的熱傳導公式，並假設土壤層為均質，先利用 Wang and Bras (1999) 所提出的半階微分法預測的熱通量與實測值比較驗證再進行分析。除此之外亦使用解析解進行比較，自然界中可發現溫度隨時間會有正弦函數的變化，採用 Campell and Norman (1998) 所敘述的解析解去推估土壤層不同層的溫度和熱通量，此方法常見於溫度和熱通量推估。

3.2 一維熱傳導公式(實測值)

在熱傳的計算當中，土壤的熱傳影響是不能忽略的。而土壤熱傳可使用以下方程式來表示：

$$\rho_s c_s \frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{\partial G}{\partial z} \quad (3.2.1)$$

其中 ρ_s 表示土壤密度， c_s 表示土壤比熱， $\rho_s c_s$ 表示體積熱容量， G 表示土壤的熱通量密度。在計算的過程中，熱通量隨深度的變化表示如下：

$$\frac{\partial G}{\partial z} = - \frac{G(z_2, t) - G(z_1, t)}{z_2 - z_1} \quad (3.2.2)$$

合併式(3.2.1)及式(3.2.2)後，可得到的公式如下：

$$G(z_1, t) = G(z_2, t) + \int_{z_1}^{z_2} \frac{\partial (\rho_s c_s T)}{\partial t} dz \quad (3.2.3)$$

其中 $G(z_2, t)$ 部分一般為採用熱通量盤所測得的熱通量，但因無熱通量盤在土壤層



中間，故本研究採用以下公式來計算。根據傅立葉的熱傳公式，熱通量跟溫度梯度成正比，而熱傳公式如下：

$$G = -K \frac{\partial T}{\partial z} \quad (3.2.4)$$

其中 K 為熱傳導度 (thermal conductivity)， K 值計算方法如 Appendix B。而有了 z_1 跟 z_2 下的溫度 T_1 及 T_2 後，即可得 $\frac{z_1+z_2}{2}$ 深度下的 G ，也因而式(3.2.4)的公式如下：

$$G\left(\frac{z_1+z_2}{2}, t\right) = -K \frac{T_2 - T_1}{z_2 - z_1} \quad (3.2.5)$$

不過在用上述公式時，建議其兩個溫度探針位置 z_1 跟 z_2 差距不要太大，例如在十公分以內 (Sauer and Horton, 2005 ; Liebethal et al., 2005)。

將式(3.2.5)代入式(3.2.3)後並用 $\frac{z_1+z_2}{2}$ 代入 z_2 ，即可得熱通量的公式如下：

$$G(z_1, t) = -K \frac{T_2 - T_1}{z_2 - z_1} + \int_{z_1}^{\frac{z_1+z_2}{2}} \frac{\partial(\rho_s c_s T)}{\partial t} dz \quad (3.2.6)$$

其中在零維護綠屋頂的計算當中， z_1 為土壤表面下一公分，而 z_2 為土壤底部的深度，也就是十公分。

3.3 解析解

在解析解所使用的公式當中，土壤熱傳亦是從式(3.2.1)及式(3.2.4)推導而來。將此兩式進行合併並將 K 視為不隨土壤深度而改變的常數後，可得到的熱傳導公式如下：

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (3.3.1)$$

其中

$$\alpha = \frac{K}{\rho_s c_s} \quad (3.3.2)$$

為熱擴散係數 (thermal diffusivity)。

假設土壤為無限深且屬於熱均質狀態，則土壤表面溫度則可以以下正弦函數的公式來表示：



$$T(0, t) = T_{ave} + A(0) \sin [w(t - t_0)] \quad (3.3.3)$$

其中

$$w = \frac{2\pi}{24 \times 3600} = 7.3 \times 10^{-5} \quad (3.3.4)$$

為一日(diurnal)的角頻率(s^{-1})， T_{ave} 為土壤表面的平均溫度， $A(0)$ 為土壤表面的溫度振幅，計算方式為一日當中最大值溫度與最小值溫度的差值除以2， t 為時間， t_0 為相位調整，表示所設定的正弦函數的起始點。而在任一土壤深度(z)的溫度則可以用以下公式表示：

$$T(z, t) = T_{ave} + A(0) e^{-\frac{z}{D}} \sin [w(t - t_0) - \frac{z}{D}] \quad (3.3.5)$$

其中 D 為阻尼深度(damping depth)。

當有了土壤熱通量式(3.4.2)以及任意土壤深度下的溫度式(3.3.3)，可藉由微分得土壤的表面熱通量公式如下：

$$G(0, t) = \frac{\sqrt{2}A(0)K \sin [w(t - t_0) + \frac{\pi}{4}]}{D} \quad (3.3.6)$$

而任意深度(z)的熱通量公式則可藉由微分式(3.3.5)如下：

$$G(z, t) = \frac{A(0)K e^{-\frac{z}{D}} (\sin [w(t - t_0) - \frac{z}{D}] + \cos [w(t - t_0) - \frac{z}{D}])}{D} \quad (3.3.7)$$

3.4 半階微分法

根據第3.3節所述，當設定熱傳導度(K)是一個不隨深度可改變的常數時，一維的熱傳導公式可表示為式(3.3.1)。為了推估綠屋頂土壤所造成的熱通量影響，需要知道土壤溫度的起始條件以及邊界條件，兩條件如下(Hsieh et al., 2009)：

$$T = T_0, \quad \text{for } t = 0, \quad z \leq 0 \quad (3.4.1)$$

$$T = T_0, \quad \text{for } t > 0, \quad z \rightarrow -\infty \quad (3.4.2)$$

其中 T_0 為起始溫度，為 $t = 0$ 的情況下所測得的實測土壤溫度，而起始時間則是設定為半夜12點，因此時熱通量相對白天時刻小很多。而式(3.4.1)表示在 $t = 0$ 的情況下，不管土壤的深度，其土壤起始溫度都是一樣的，因為假設此時的土壤熱通量



為 0，沒有溫度變化就不會有熱通量變化。

有了起始條件、邊界條件和一維熱傳導公式後，Wang and Bras (1999)推導出用來計算土壤熱通量的公式，可計算任何深度及時間的熱通量，其公式如下：

$$G(z, t) = \sqrt{\frac{K\rho_s c_s}{\pi}} \int_0^t \frac{dT(z, s)}{\sqrt{t-s}} \quad (3.4.3)$$

其中 s 為積分變數。此公式經由轉換後可以寫成以下公式：

$$\begin{aligned} G(z, t) &= \sqrt{\frac{K\rho_s c_s}{\pi}} \int_0^t \frac{\partial T(z, s)}{\partial s} \frac{ds}{\sqrt{t-s}} \\ &= 2 \sqrt{\frac{K\rho_s c_s}{\pi}} \int_0^t \frac{\partial T(z, s)}{\partial s} d\sqrt{t-s} \end{aligned} \quad (3.4.4)$$

若要計算離散項，可利用以下公式 (Gao et al., 2017)：

$$G(z, t) = 2 \sqrt{\frac{K\rho_s c_s}{\pi}} \times \sum_{i=0}^{N-1} \frac{T_{i+1} - T_i}{t_{i+1} - t_i} [\sqrt{t_N - t_i} - \sqrt{t_N - t_{i+1}}] \quad (3.4.5)$$

其中 N 為計算區間的數量。

第四章 模擬結果與討論



在此章節中，將綠屋頂的實測熱通量值與解析解和半階微分法所預測的熱通量值進行比較，以評估模式是否能利用溫度準確預測熱通量。

圖 7 與圖 8 分別為零維護綠屋頂在 2019 年及 2020 年四個季節在土壤下一公分 ($z = 1\text{cm}$) 的實測熱通量與解析解和半階微分法預測熱通量的比較圖。在圖 7 及圖 8 皆可看到相同的趨勢。相對於實測值來說，解析解預測的數值在清晨時間是高估狀態，在早上 8 點至 12 點左右為低估狀態，以 2019 年的夏天及冬天來看，實測值最高值分別為 114.48 W/m^2 和 67.78 W/m^2 而預測值最高值則分別為 70.93 W/m^2 和 43.75 W/m^2 ，明顯低估。在晚上時段，又明顯高估熱通量值，亦以 2019 年的夏天及冬天來看，實測值最低值分別為 -51.52 W/m^2 和 -42.00 W/m^2 而預測值最低值則分別為 -71.04 W/m^2 和 -42.80 W/m^2 。圖中亦可以看出解析解所推估的高峰值其時間早於實測值的高峰值時間。

在半階微分法預測值與實測值的比較圖中，預測值會有高估的狀態，白天高估的狀態較為明顯，但是到了晚上之後，高估較不明顯，半階微分法所預測的值與實測值更相似。由圖 7 及圖 8 也可以看到半階微分法的預測值高峰時間與實測值相同，而且其預測的熱通量之日變化與實測的變化趨勢是一致的，由此可知半階微分法所預測的熱通量相對於解析解所預測的熱通量準確度較高。

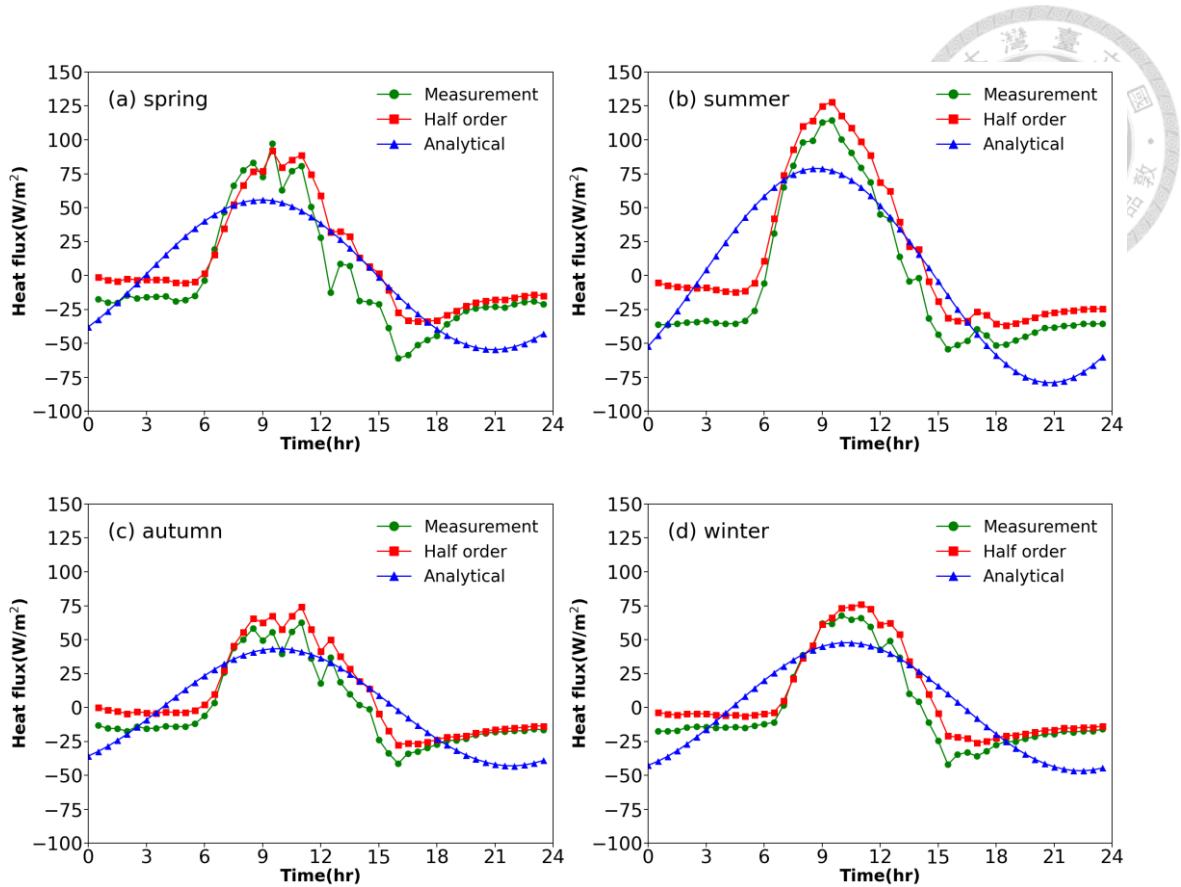


圖 7 2019 年零維護土壤熱通量($z=1\text{cm}$)實測值與解析解和半階微分法比較圖

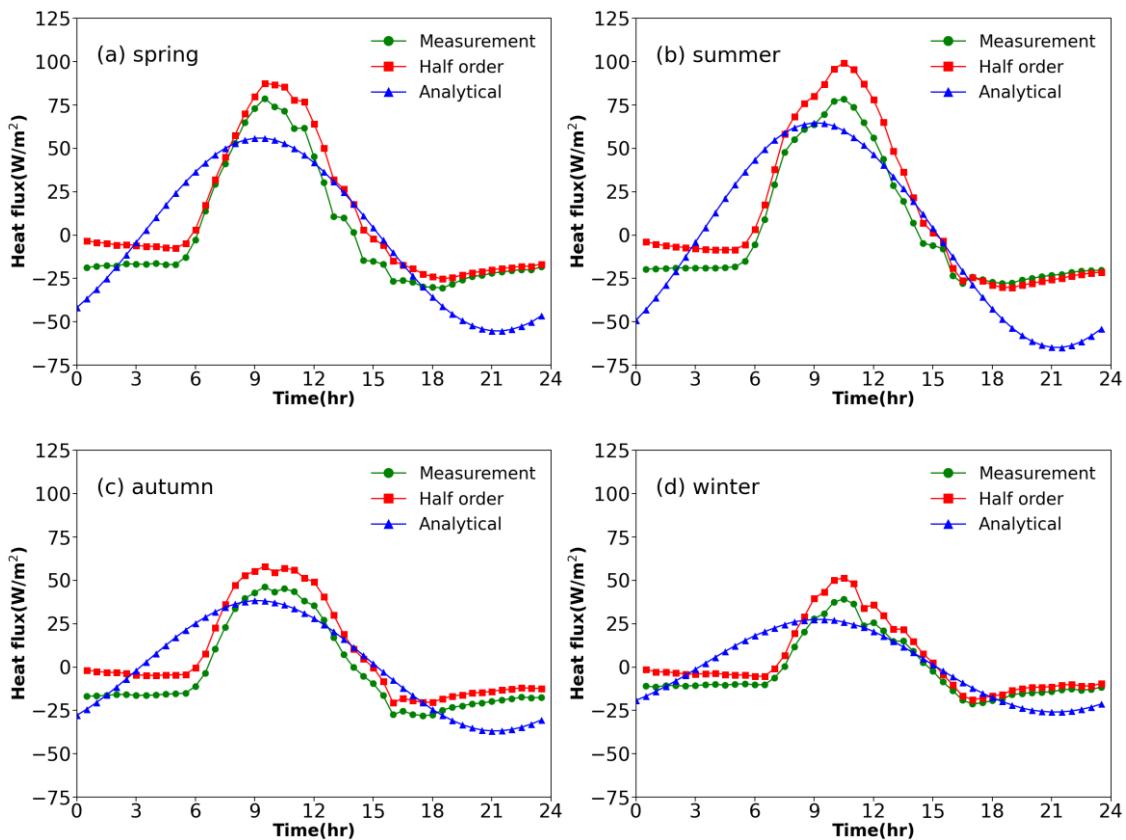


圖 8 2020 年零維護土壤熱通量($z=1\text{cm}$)實測值與解析解和半階微分法比較圖



圖 9 及圖 10 則分別為 2019 年及 2020 年四個季節的實測值與解析解預測值關係圖。在解析解所預測的熱通量與實測值關係圖比較中，在 2019 年，四個季節的圖所回歸出來的直線平均斜率為 0.86，平均 R^2 為 0.62，而平均 RMSE 為 24.70；在 2020 年，平均斜率為 0.8， R^2 為 0.67，而 RMSE 為 17.66，可知兩年當中實測值與解析解的預測值相關性並不高。除此之外，在圖 9 及圖 10 皆可發現其關係圖的點並不集中，可知解析解的預測值並沒有達到模擬值與實測值相似的情形，因而可以得知此方法在零維護綠屋頂下並無法準確預測土壤熱通量。

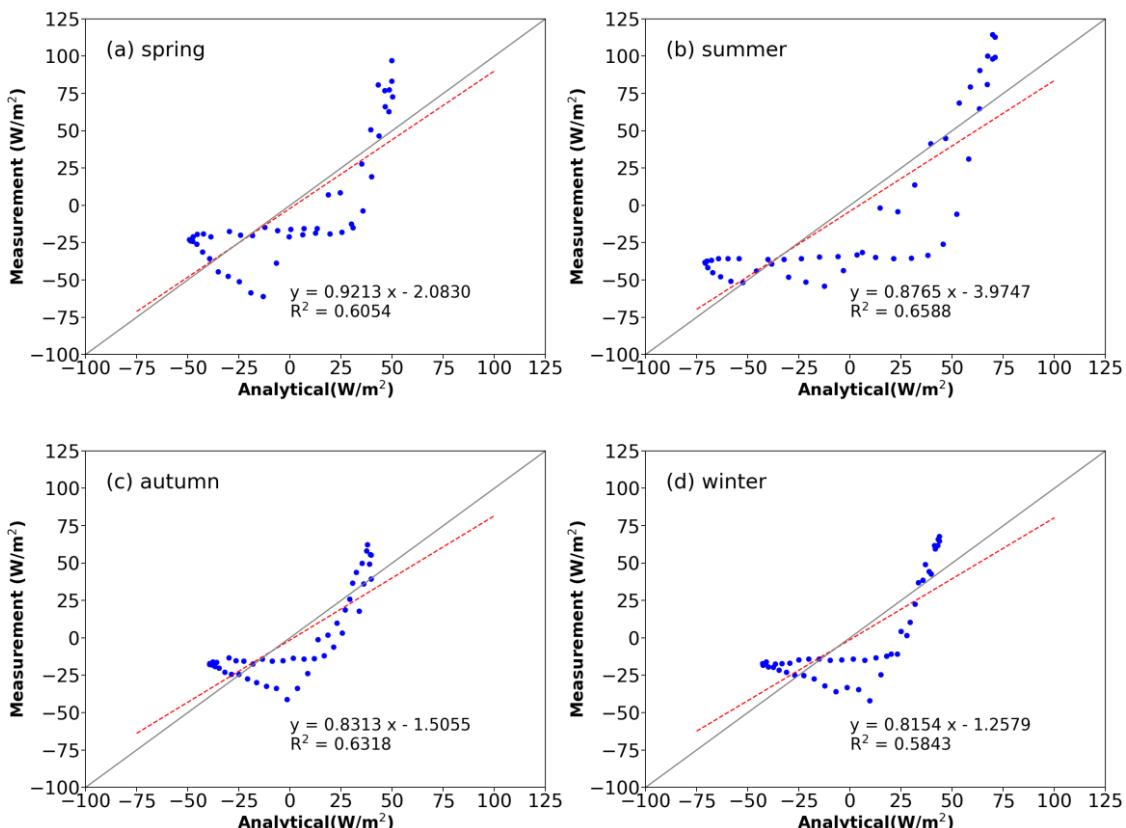


圖 9 2019 年零維護土壤熱通量($z=1\text{cm}$)實測值與解析解預測值關係圖

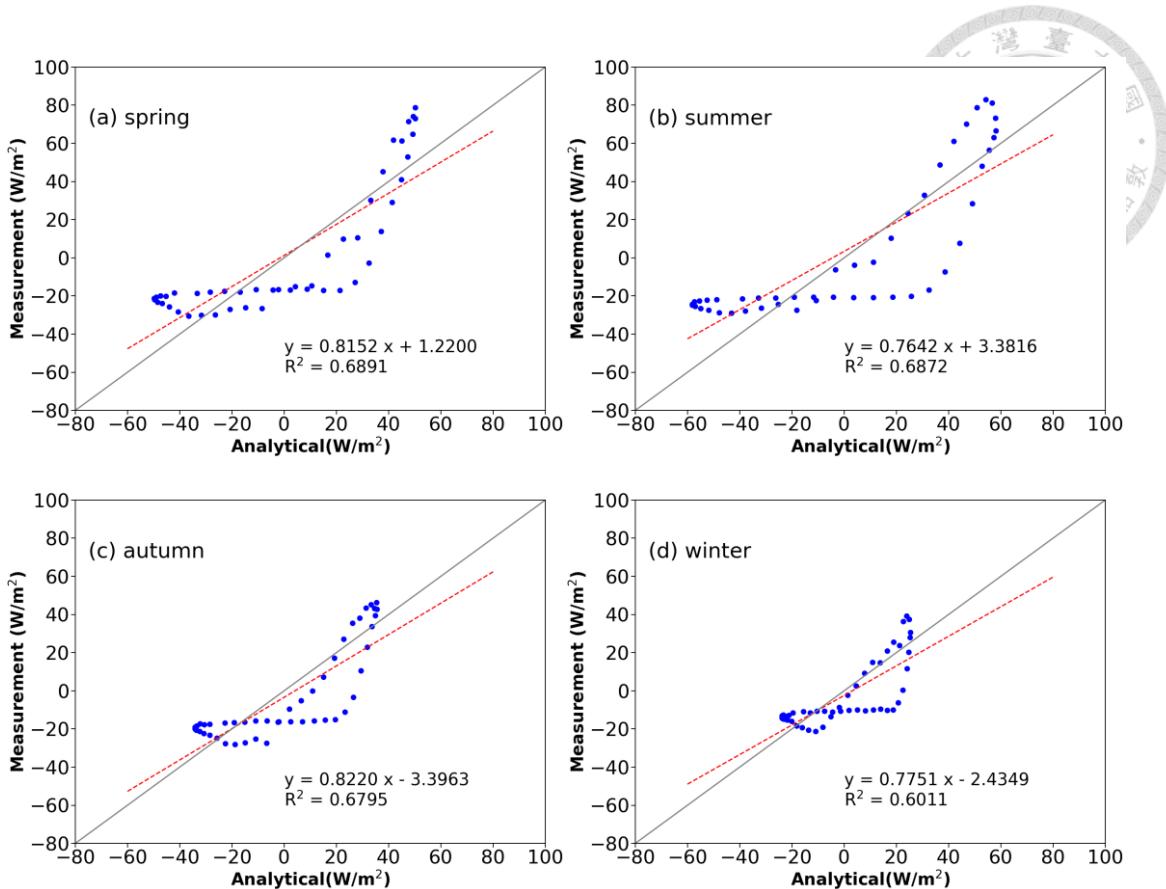


圖 10 2020 年零維護土壤熱通量($z=1\text{cm}$)實測值與解析解預測值關係圖

圖 11 及圖 12 則分別為 2019 年及 2020 年四個季節的實測值與半階微分法預測值關係圖。由圖中可以發現相較於圖 9 與圖 10，所呈現的點散布較為接近且回歸可成為一條線。在 2019 年的圖中，在解析解的圖平均 R^2 只能到達 0.62，斜率約為 0.86，但是由半階微分法所推估的熱通量關係圖，平均 R^2 可以到達 0.96，其所回歸的直線斜率可以到達 0.99。表 7 與表 8 分別為零維護綠屋頂解析解預測值與實測值關係圖和半階微分法預測值與實測值的回歸分析表。由表中的 RMSE 分析，可發現在 2019 年及 2020 年四個季節皆是解析解的部分 RMSE 值較高，而半階微分法的值較低，以 2019 年及 2020 年夏天為例，2019 年夏天的 RMSE 從 32.47 降低至 19.04，而 2020 年夏天的 RMSE 從 23.42 降低至 10.71，從 R^2 、斜率以及 RMSE 來看，半階微分法更能夠準確預測熱通量值。在低維護以及高維護的部分，因為無實測熱通量值，故只比較半階微分法預測值以及解析解預測值，比較圖可見於 Appendix C。

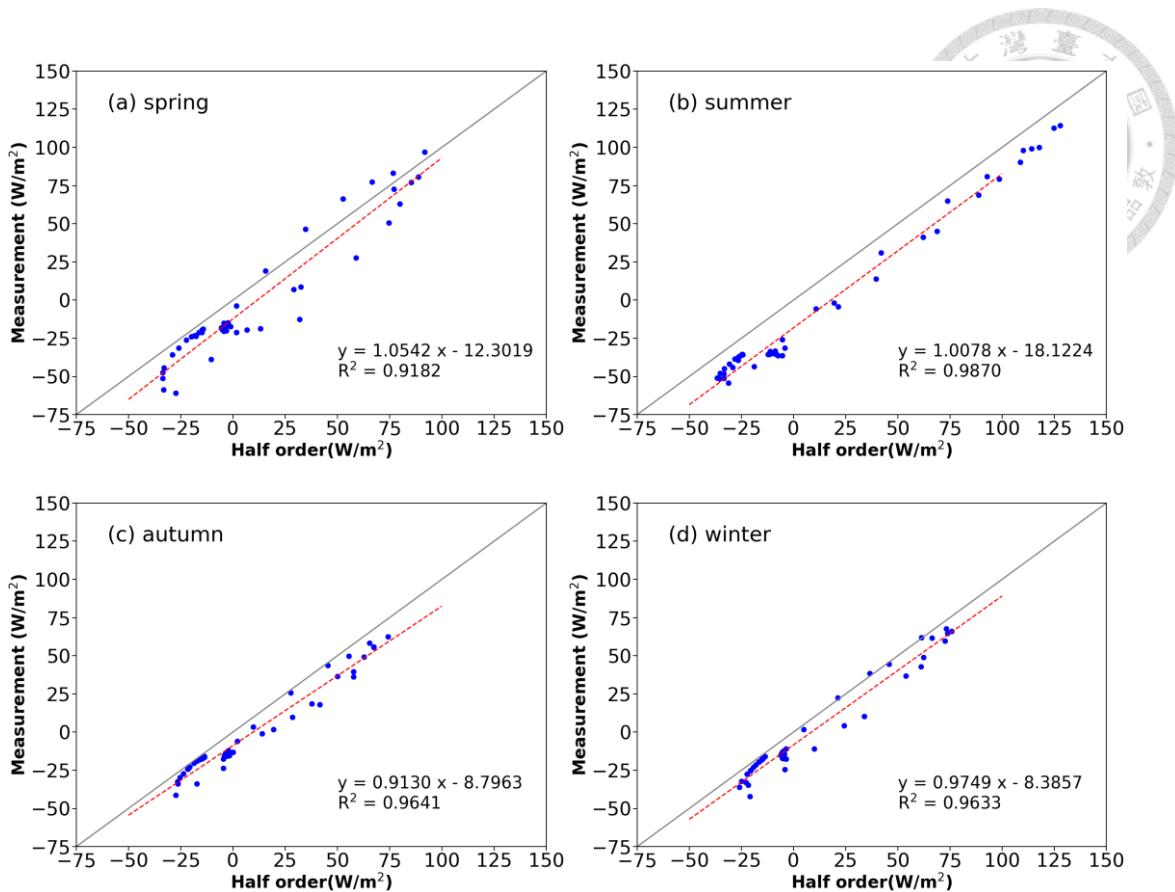


圖 11 2019 年零維護土壤熱通量($z=1\text{cm}$)實測值與半階微分法預測值關係圖

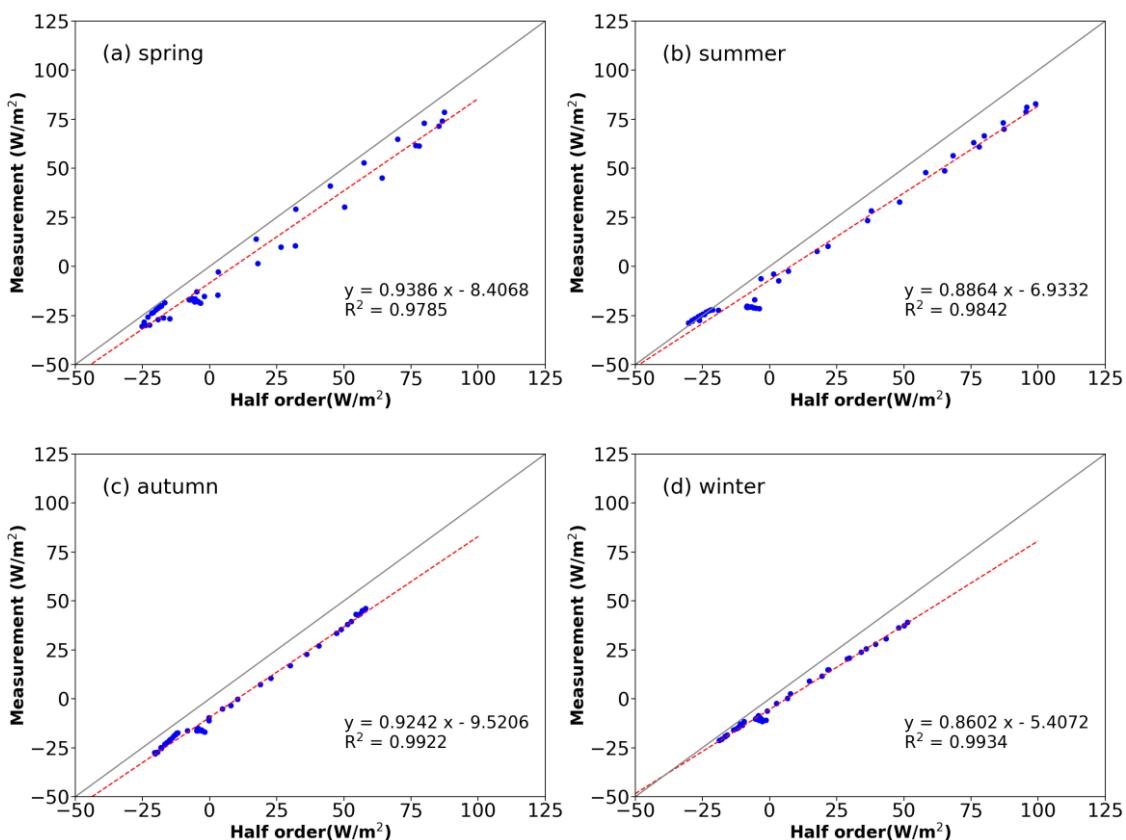


圖 12 2020 年零維護土壤熱通量($z=1\text{cm}$)實測值與半階微分法預測值關係圖

表 7 2019 年與 2020 年土壤熱通量($z=1\text{cm}$)實測值與解析解預測值關係圖的回歸分析表

零維護	2019				2020			
	斜率	截距	R^2	RMSE	斜率	截距	R^2	RMSE
春天	0.9213	-2.0830	0.6054	26.35	0.8152	1.2200	0.6891	20.37
夏天	0.8765	-3.9747	0.6588	32.47	0.7642	3.3816	0.6872	23.42
秋天	0.8313	-1.5055	0.6318	18.34	0.8220	-3.3963	0.6795	14.94
冬天	0.8154	-1.2579	0.5843	21.65	0.7751	-2.4349	0.6011	11.92

表 8 2019 年與 2020 年土壤熱通量($z=1\text{cm}$)實測值與半階微分法預測值關係圖的回歸分析表

零維護	2019				2020			
	斜率	截距	R^2	RMSE	斜率	截距	R^2	RMSE
春天	1.0542	-12.3019	0.9182	16.83	0.9386	-8.4068	0.9785	10.64
夏天	1.0078	-18.1224	0.9870	19.04	0.8864	-6.9332	0.9842	10.71
秋天	0.9130	-8.7963	0.9641	11.37	0.9242	-9.5206	0.9922	10.50
冬天	0.9749	-8.3857	0.9633	10.62	0.8602	-5.4072	0.9934	6.76

由此章節的分析當中，半階微分法預測的熱通量與零維護綠屋頂利用第 3.2 節計算的實測值進行比較後，兩者的熱通量的關係圖斜率接近 1 且 R^2 值都在 0.96 以上，半階微分法的 RMSE 相對解析解也明顯較低，可知此方法預測的準確性高，故後續綠屋頂的熱通量 G_1 和 G_2 則會用半階微分法預測的熱通量進行分析比較，在 Hsieh et al. (2009) 及 Smalls-Mantey L. et al. (2013) 均可看到半階微分法預測的準確性。

第五章 實測結果與討論



在此章節中先討論 2019 至 2020 間隨時間的溫度變化，再探討熱通量的日變化圖。

5.1 溫度

5.1.1 零維護土壤溫度比較

圖 13 及圖 14 為 2019 年及 2020 年各季節空氣溫度、水泥屋頂表面溫度(roof T)、零維護綠屋頂的平均溫度日變化圖，可以發現一日的溫度變化皆隨著當季節的太陽輻射而白天升溫及晚上降溫，最低溫的時刻則發生於清晨 5 點至 6 點之間。在白天時刻，夏天短波輻射量最大(Appendix D 的圖 D1 及圖 D2)因而土壤表面下一公分($z=1\text{cm}$)的溫度尖峰為四個季節中最大，2019 年在早上 11 點半可達到 38.29°C 而 2020 年在中午 12 點可達到 41.91°C ，並且白天時刻溫度上升的幅度比空氣溫度還大。若將 $z=1\text{cm}$ 的土壤溫度與水泥表面溫度比較，可發現零維護植被在各季節皆具有降溫的效果且夏天差異最大，其中 2019 年夏天有最大差值 14.38°C ，春天為 8.79°C ，秋天為 5.28°C ，冬天為 8.14°C ；2020 年夏天有最大差值 15.94°C ，春天為 6.92°C ，秋天為 9.30°C ，冬天為 2.28°C 。Parizotto and Lamberts (2011)亦研究 EGR 綠屋頂的降溫效果，其綠屋頂的表面溫度相對於傳統水泥表面溫度，最大的溫度峰值差亦可達到 18.1°C ，而在 Liang and Hung (2011)的實驗結果中，其最高溫度差異可達到 28.9°C 。至於在 2019 年夜間時， $z=1\text{cm}$ 的土壤溫度與水泥溫度差異不大。若將 $z=1\text{cm}$ 的土壤溫度與空氣溫度進行比較，可發現其溫度較環境溫度低，其原因為輻射冷卻所導致，但若是 2020 年，其 $z=1\text{cm}$ 的溫度並沒有明顯比環境空氣溫度低，這是因為零維護綠屋頂的植被開始急速生長且變密，導致輻射冷卻效應變弱。

關於土壤底部($z=10\text{cm}$)以及綠屋頂底部($z=16.1\text{cm}$)的溫度，越往室內的方向其溫度的高峰值發生時間會延後且溫度振幅變小。2019 年的部分，土壤底部其溫度

振幅在 3°C 以內，而綠屋頂底部的溫度振幅在 1°C 以內；而 2020 年的部分土壤底部其溫度振幅在 4°C 以內，而綠屋頂底部的溫度振幅在 2°C 以內(表 9)，這是因為土壤可儲存熱所導致。若將水泥溫度的溫度高峰值與綠屋頂底部溫度高峰值比較，可發現差異達到 10°C 以上，其中又以夏天差異最顯著，可達 20°C。Liu and Minor (2005) 的研究中，在 Toronto, Canada 夏天的氣候下，75mm 土壤厚度的 EGR 綠屋頂底部溫度相對於傳統屋頂溫度，溫度差異達 28°C，亦達到 20°C 以上。

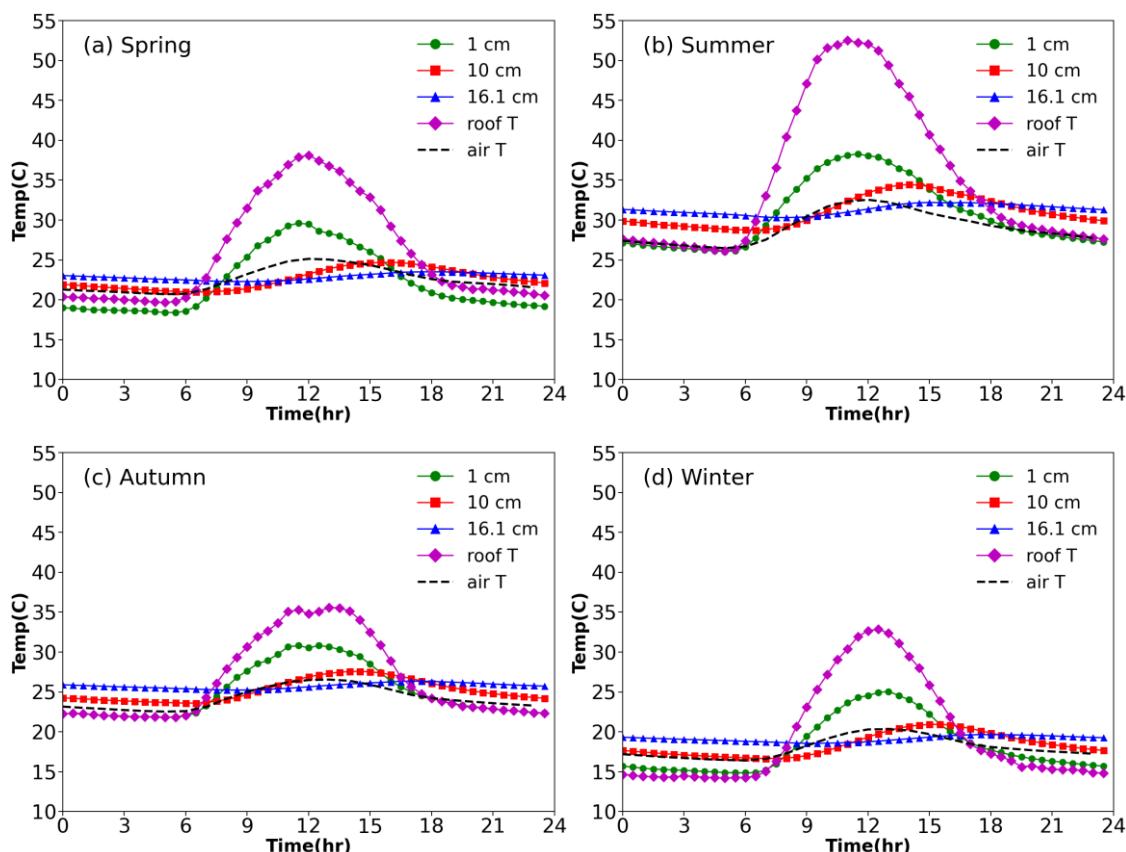


圖 13 2019 年零維護綠屋頂土壤溫度與環境溫度圖

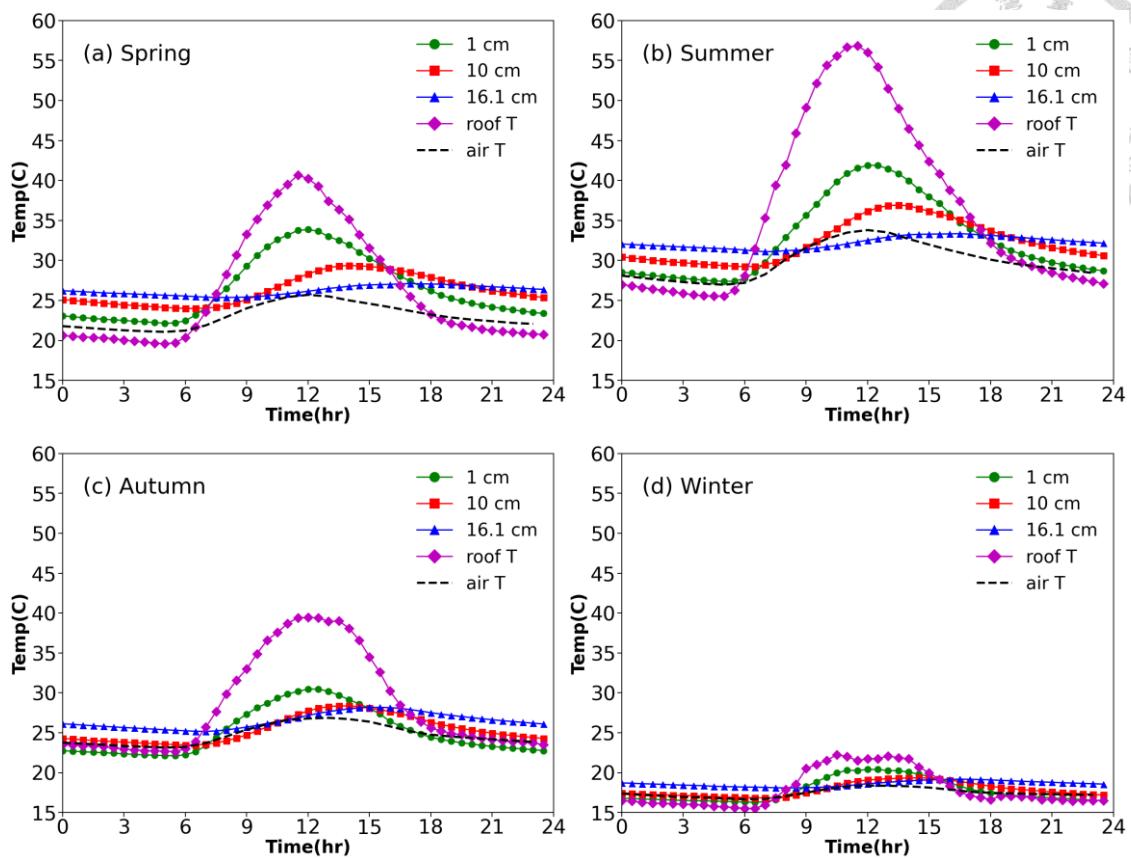


圖 14 2020 年零維護綠屋頂土壤溫度與環境溫度圖

表 9 零維護綠屋頂各層平均溫度與振幅

()	春天		夏天		秋天		冬天	
	平均溫度	振幅	平均溫度	振幅	平均溫度	振幅	平均溫度	振幅
2019								
z=1cm	24.00	5.60	32.16	6.12	26.32	4.50	19.96	5.10
z=10cm	22.84	1.85	31.60	2.86	25.58	1.98	18.79	2.14
z=16.1cm	22.90	0.61	31.25	0.95	25.79	0.56	19.10	0.55
裸露屋頂	25.88	9.23	35.25	13.18	26.49	6.89	19.59	9.33
空氣	22.54	2.21	29.05	3.03	24.21	2.01	18.01	1.95
2020								
z=1cm	28.01	5.86	34.64	7.27	26.30	4.18	18.34	2.06
z=10cm	26.69	2.69	33.08	3.84	25.92	2.45	18.10	1.26
z=16.1cm	26.24	0.86	32.23	1.12	26.68	1.52	18.64	0.54
裸露屋頂	26.32	10.55	36.23	15.66	28.38	8.40	17.95	3.37
空氣	23.03	2.32	29.90	3.42	24.73	1.87	17.46	0.86



5.1.2 低維護土壤溫度比較

圖 15 與圖 16 為 2019 年與 2020 年為低維護綠屋頂的溫度變化圖。低維護綠屋頂的溫度趨勢與零維護相同，在白天時刻亦有 $z=1\text{cm}$ 的土壤溫度高於空氣溫度的現象，但土壤溫度部分皆比零維護低，可看出降溫效果優於零維護綠屋頂，主要是因為其維護程度較高故 LAI 比零維護大，可以阻隔的輻射量變多而導致。至於在 2019 年低維護 $z=1\text{cm}$ 與水泥溫度差異，夏天的溫度最大差值可達 17.56°C ，春天為 11.56°C ，秋天為 7.53°C ，冬天為 10.93°C ；2020 年則夏天有最大差值 19.67°C ，春天為 8.96°C ，秋天為 10.79°C ，冬天為 3.46°C ，與零維護綠屋頂相同具有夏天最大降溫效果但所減少的溫度量值大於零維護綠屋頂。

關於土壤底部($z=15\text{cm}$)以及綠屋頂底部($z=21.1\text{cm}$)的溫度，將表 9 與表 10 進行比較可以發現土壤底部溫度振幅以及綠屋頂底部溫度振幅比零維護小，因低維護綠屋頂土壤厚度為 15 公分，較零維護綠屋頂多 5cm，而低維護土壤底部溫度振幅小於 2°C 而綠屋頂底部溫度振幅小於 0.5°C 。

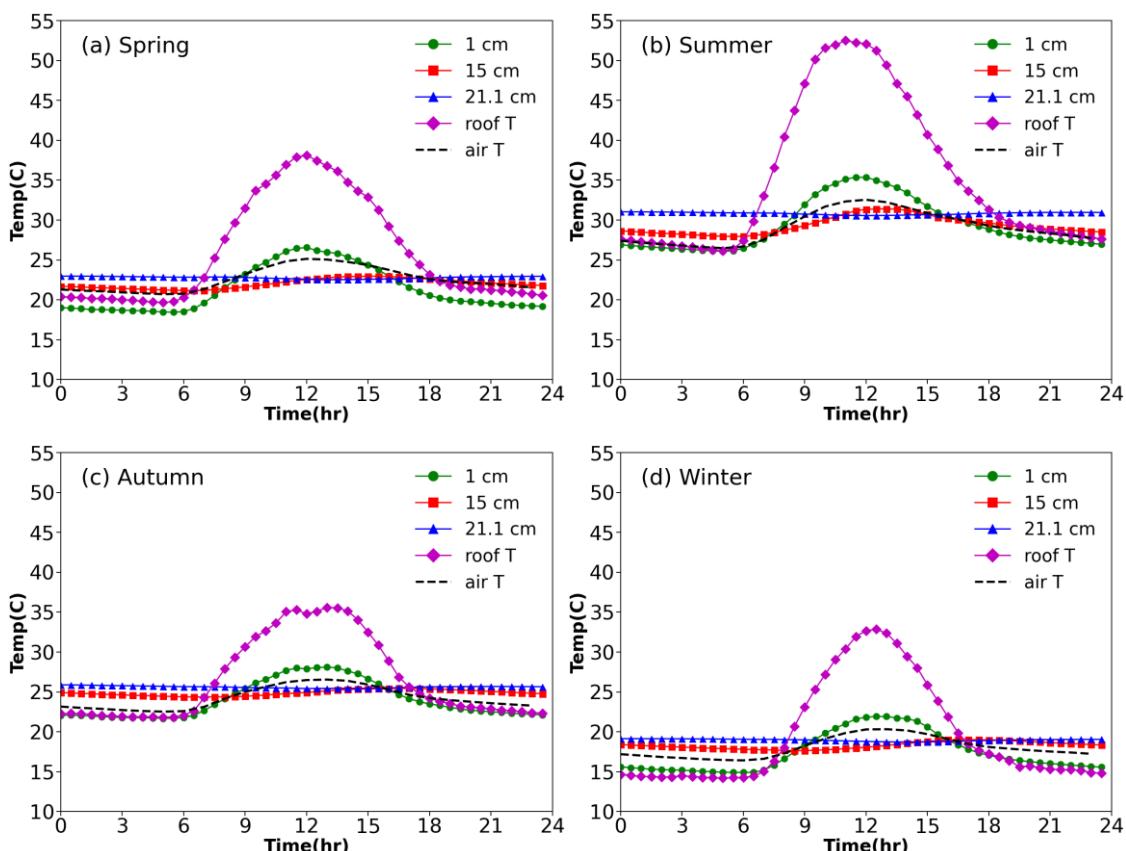


圖 15 2019 年低維護綠屋頂土壤溫度與環境溫度圖

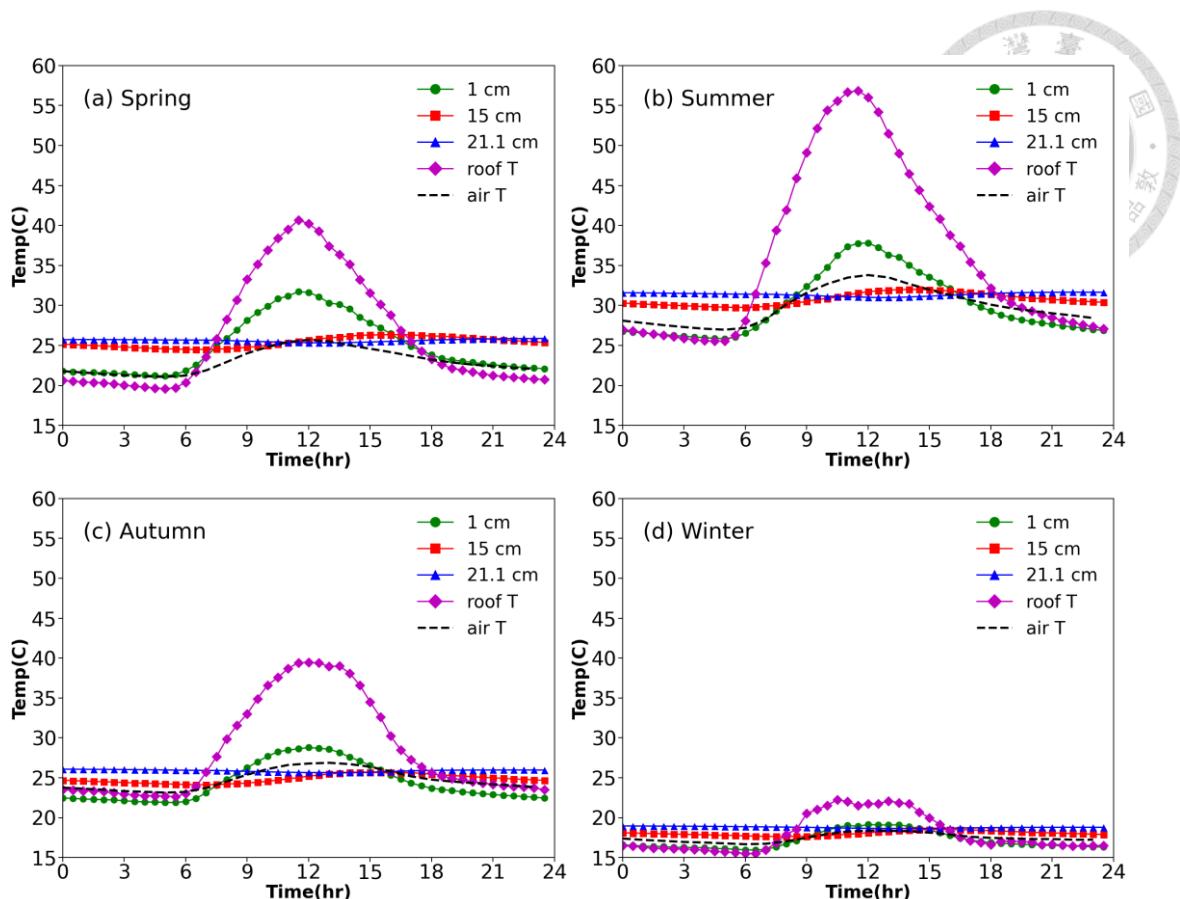


圖 16 2020 年低維護綠屋頂土壤溫度與環境溫度圖

表 10 低維護綠屋頂各層平均溫度與振幅

(°C)	春天		夏天		秋天		冬天	
	平均溫度	振幅	平均溫度	振幅	平均溫度	振幅	平均溫度	振幅
2019								
z=1 cm	22.49	4.06	30.71	4.64	24.90	3.21	18.41	3.50
z=15 cm	22.05	0.90	29.66	1.73	24.91	0.54	18.32	0.69
z=21.1 cm	22.74	0.22	30.79	0.24	25.66	0.22	18.93	0.21
裸露屋頂	25.88	9.23	35.25	13.18	26.49	6.89	19.59	9.33
空氣	22.54	2.21	29.05	3.03	24.21	2.01	18.01	1.95
2020								
z=1 cm	26.46	5.26	32.09	5.73	25.62	3.18	17.54	1.60
z=15 cm	25.43	0.92	30.91	1.11	24.90	0.76	18.08	0.44
z=21.1 cm	25.60	0.28	31.43	0.43	25.98	0.33	18.80	0.16
裸露屋頂	26.32	10.55	36.23	15.66	28.38	8.40	17.95	3.37
空氣	23.03	2.32	29.90	3.42	24.73	1.87	17.46	0.86

除了不同綠屋頂不同深度的比較外，亦想知道大約同一個深度下，不同維護程度的綠屋頂溫度差異，由圖中可以發現零維護綠屋頂雖然深度比較深且溫度的趨勢上兩者相似，但是其溫度的量值皆高於低維護，可知零維護的隔熱效果較差(圖 17；圖 18)。

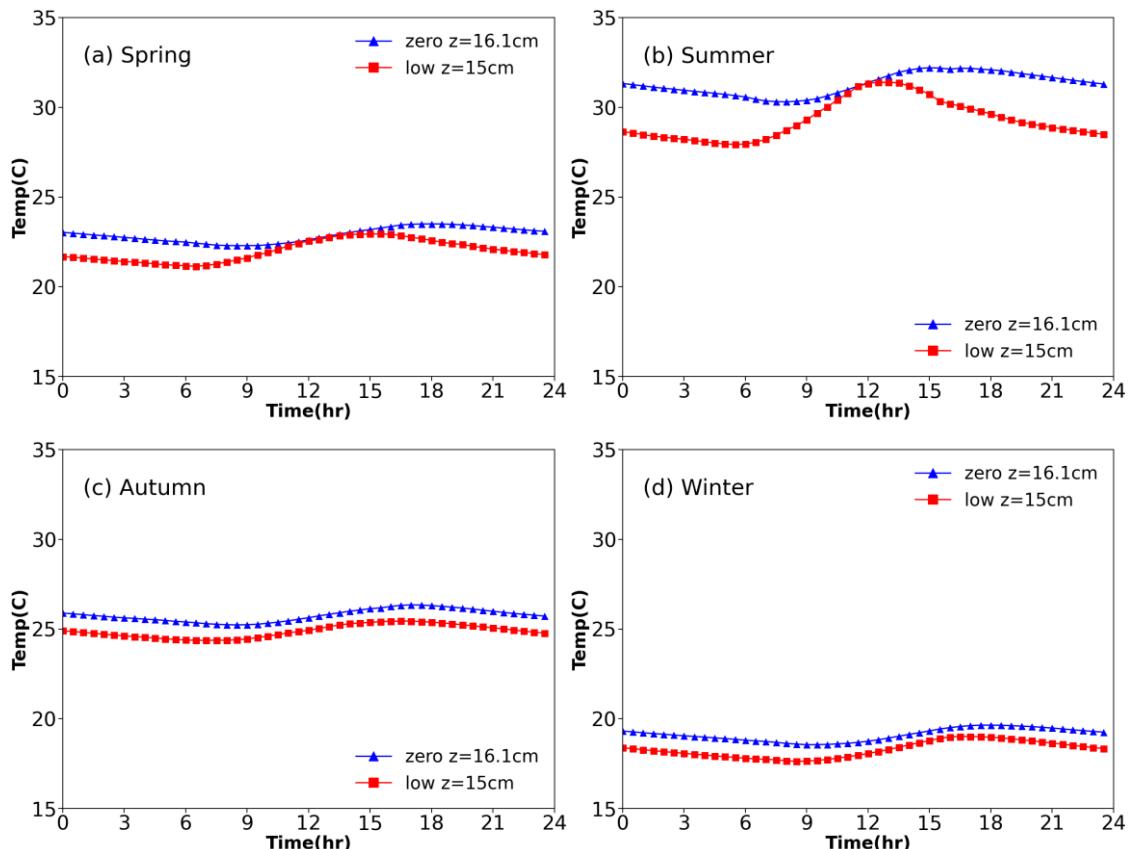


圖 17 2019 年零維護底部($z=16.1\text{cm}$)與低維護土壤底部($z=15\text{cm}$)溫度比較

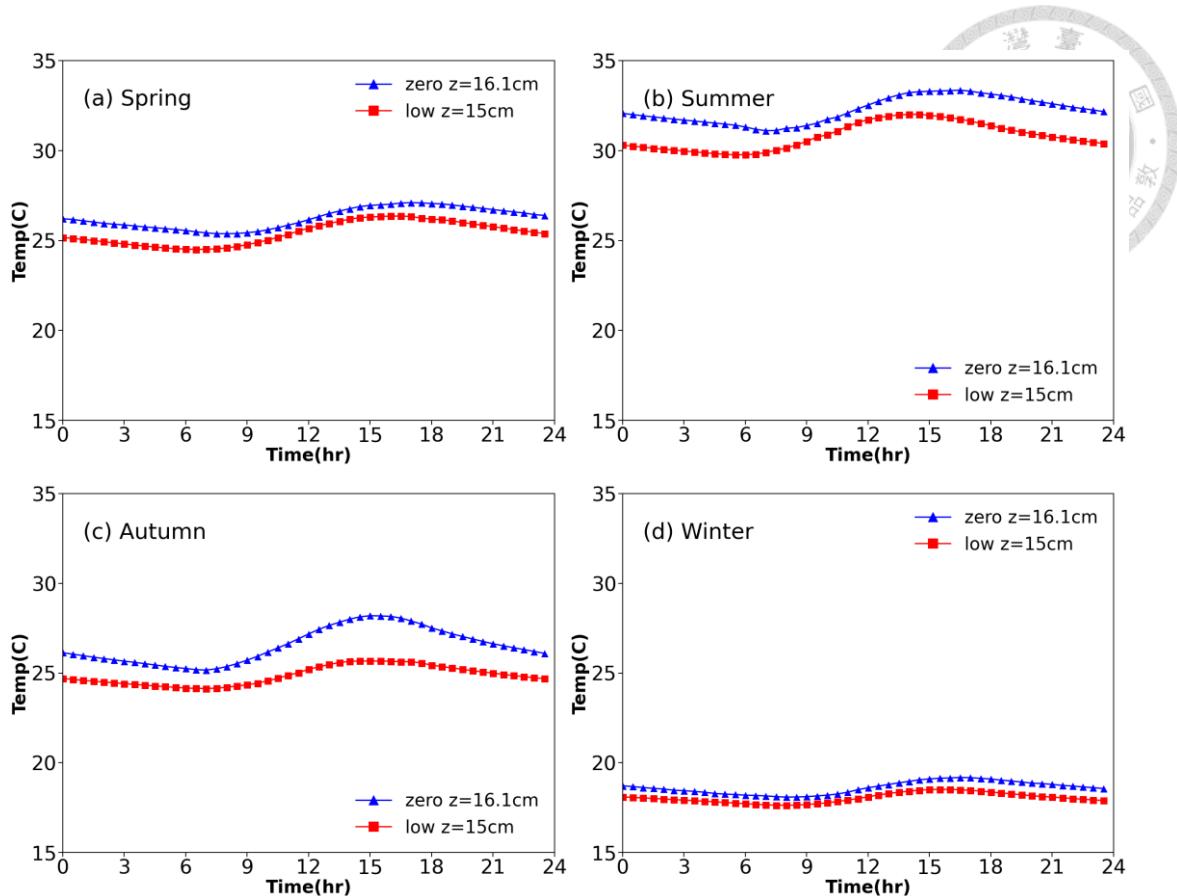


圖 18 2020 年零維護底部($z=16.1\text{cm}$)與低維護土壤底部($z=15\text{cm}$)溫度比較

5.1.3 高維護土壤溫度比較

圖 19 與圖 20 為 2019 年與 2020 年為高維護綠屋頂的溫度變化圖。溫度的趨勢一樣與零維護和低維護相同，土壤表層溫度會隨著太陽輻射而變化，土壤表面下一公分($z=1\text{cm}$)溫度低於空氣溫度為植物蒸散作用及植被阻隔輻射量所導致(M. D’Orazio et al., 2012)，而隨著土壤深度越來越深，溫度振幅會小很多。在土壤下一公分位置的溫度和水泥表面溫度相比，差異值又比零維護和低維護綠屋頂多更多，2019 年夏天最大差值可達 20.27°C ，春天為 13.88°C ，秋天為 8.4°C ，冬天為 12.08°C ；2020 年有夏天最大差值 21.88°C ，春天為 10.57°C ，秋天為 13.06°C ，冬天為 4.09°C 。將兩年的夏天溫度最大差值進行平均，高維護夏天溫度最大差值可達 21°C ，零維護夏天溫度最大差值可達 15°C ，低維護夏天溫度最大差值可達 19°C ，由此可知，高維護綠屋頂的植被下降溫效果是三種綠屋頂中最好的，高維護是三個綠屋頂中 LAI 最大的，可證 LAI 越大土壤溫度降溫效果越好。

土壤底部溫度($z=30\text{ cm}$)和綠屋頂底部溫度($z=36.1\text{ cm}$)來看，可以發現溫度維持一個穩定值，土壤溫度振幅為三個綠屋頂中最小，底部溫度振幅小於 0.4°C ，而底部溫度振幅小於 0.3°C ，這是因為高維護綠屋頂的土壤厚度為 30 公分，有一定的厚度而影響熱傳，因而溫度振盪幅度小，將底部溫度振幅與裸露屋頂比較，可發現振幅明顯小很多(表 11)。而表 11 可發現底層平均溫度高於土壤底層平均溫度的現象，因為此時土壤熱通量從綠屋頂底部傳遞至土壤底部所導致。

除了植被的熱阻隔可以降低綠屋頂的溫度之外，還有一項是土壤含水量。由 Getter et al. (2011) 知土壤含水量會影響溫度，使得溫度較低，高維護綠屋頂土壤($z=1\text{ cm}$)的溫度較低亦受高土壤含水量的影響，含水量日變化圖可見於 Appendix E 的圖 E1 及圖 E2，高維護平均土壤含水量約為 0.56，明顯高於零維護與低維護，零維護為 0.3 至 0.45 之間，而低維護為 0.53 左右。

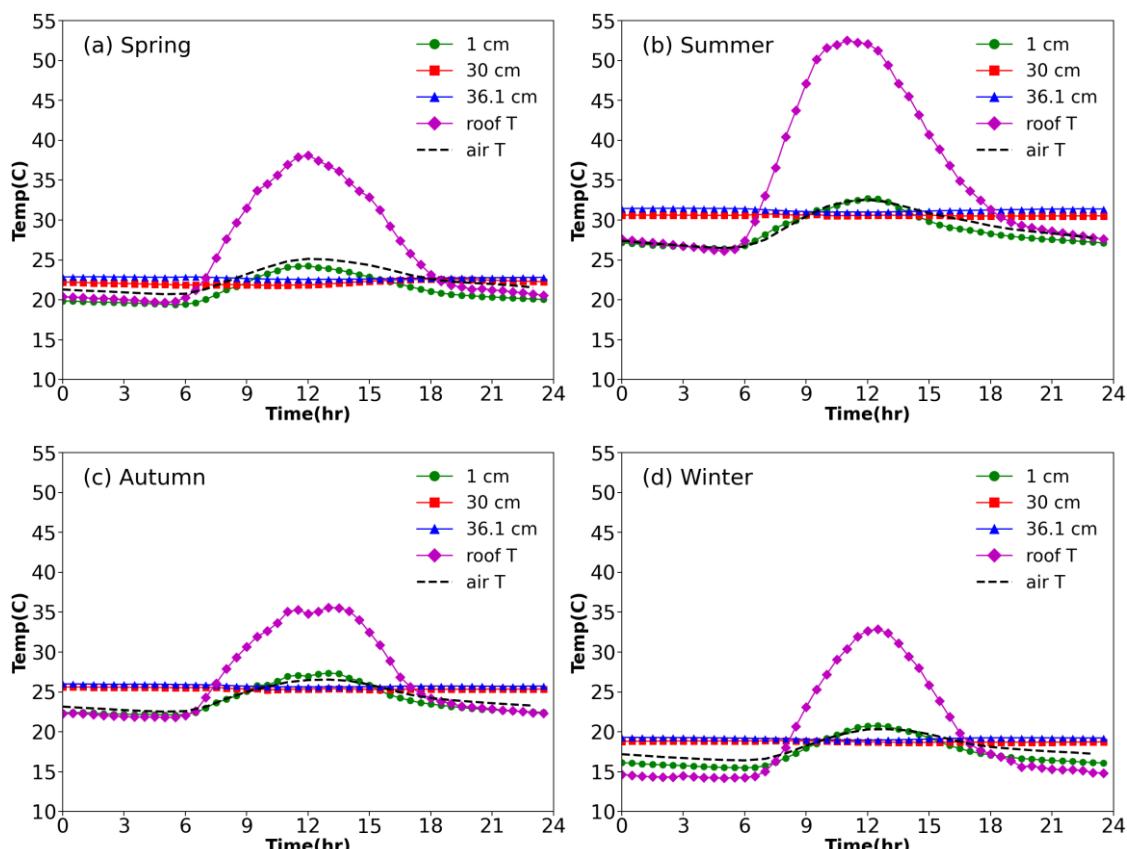


圖 19 2019 年高維護綠屋頂土壤溫度與環境溫度圖

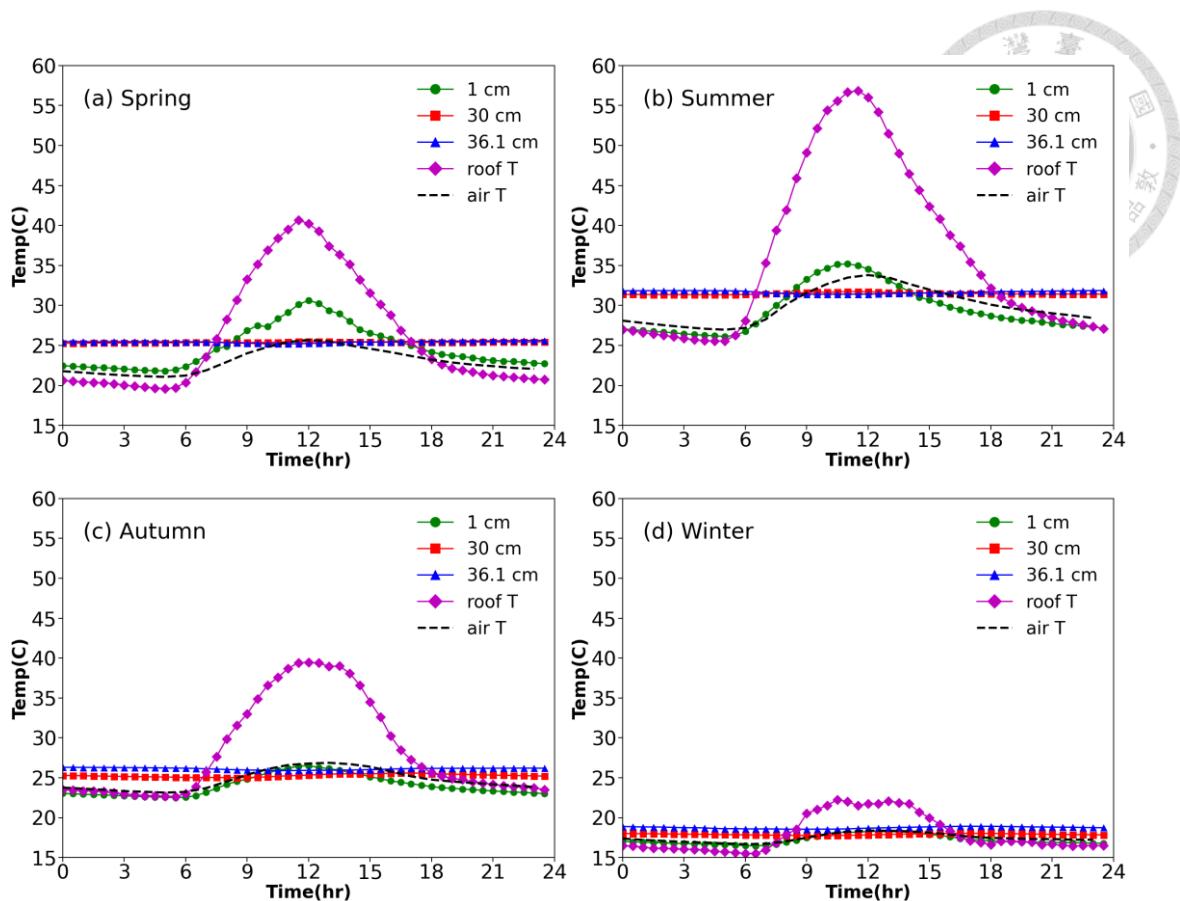


圖 20 2020 年高維護綠屋頂土壤溫度與環境溫度圖

表 11 高維護綠屋頂各層平均溫度與振幅

()	春天		夏天		秋天		冬天	
	平均溫度	振幅	平均溫度	振幅	平均溫度	振幅	平均溫度	振幅
2019								
z=1cm	21.82	2.41	29.56	3.12	24.74	2.61	18.13	2.63
z=30cm	22.20	0.38	29.87	0.27	25.45	0.17	18.79	0.11
z=36.1cm	22.72	0.16	31.23	0.24	25.81	0.19	19.13	0.17
裸露屋頂	25.88	9.23	35.25	13.18	26.49	6.89	19.59	9.33
空氣	22.54	2.21	29.05	3.03	24.21	2.01	18.01	1.95
2020								
z=1cm	26.24	4.41	31.17	4.02	24.63	1.87	17.37	0.91
z=30cm	25.40	0.12	31.58	0.17	25.31	0.28	17.90	0.14
z=36.1cm	25.43	0.21	31.64	0.23	26.05	0.16	17.86	0.30
裸露屋頂	26.32	10.55	36.23	15.66	28.38	8.40	17.95	3.37
空氣	23.03	2.32	29.90	3.42	24.73	1.87	17.46	0.86



5.1.4 綠屋頂底部溫度比較

除了各種維護的綠屋頂的不同深度溫度比較以外，也將不同綠屋頂的最底部溫度進行比較，圖 21 與圖 22 分別為 2019 年及 2020 年空氣溫度與三個不同管理程度的綠屋頂底部溫度之日變化圖。從圖 21 可以看到綠屋頂底部的溫度峰值會比空氣溫度低且在白天時溫度低於空氣溫度，可顯現綠屋頂的降溫效果，而將三種綠屋頂比較時，可看到低維護和高維護綠屋頂兩者溫度維持一定溫度且溫度的日變動幅度較小。而從圖 22 中，可看到另外一個不一樣的現象是，在春秋冬的季節下，零維護綠屋頂的底部溫度高於空氣溫度。至於零維護綠屋頂因土壤厚度較薄，溫度振幅則有較大的變化。

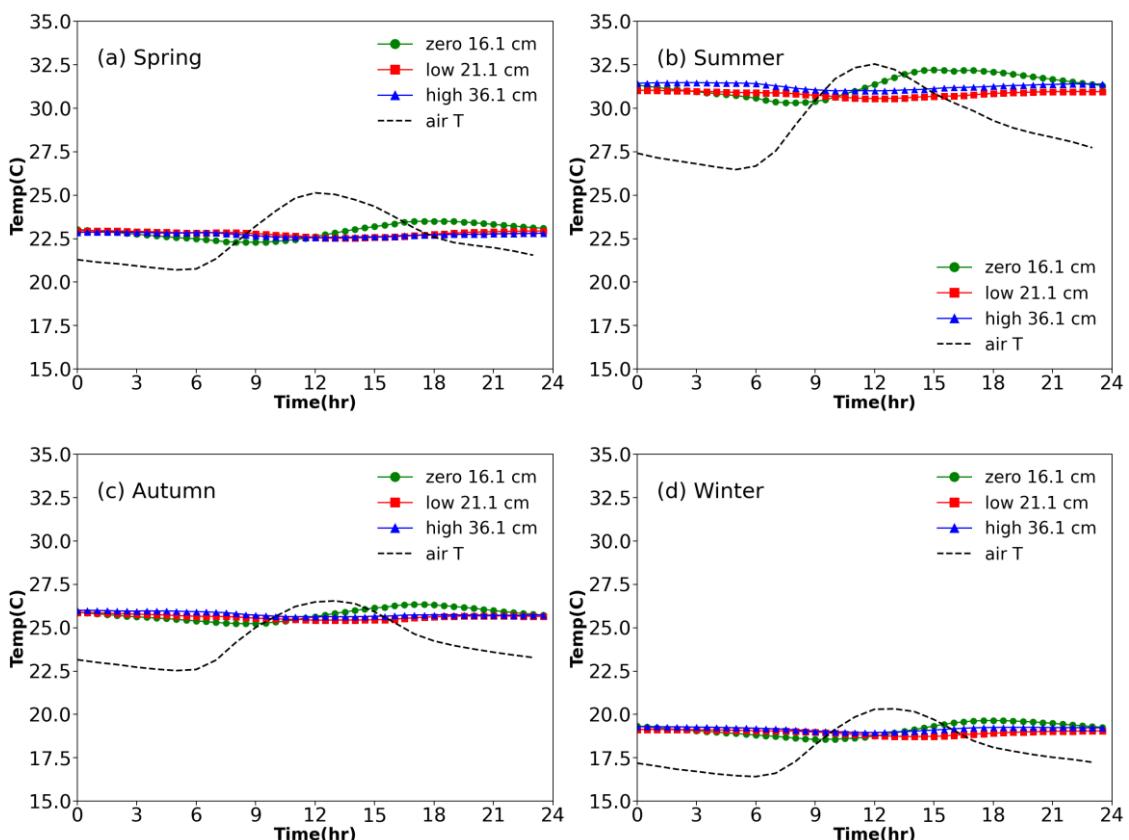


圖 21 2019 年空氣溫度與綠屋頂底部溫度之日變化圖

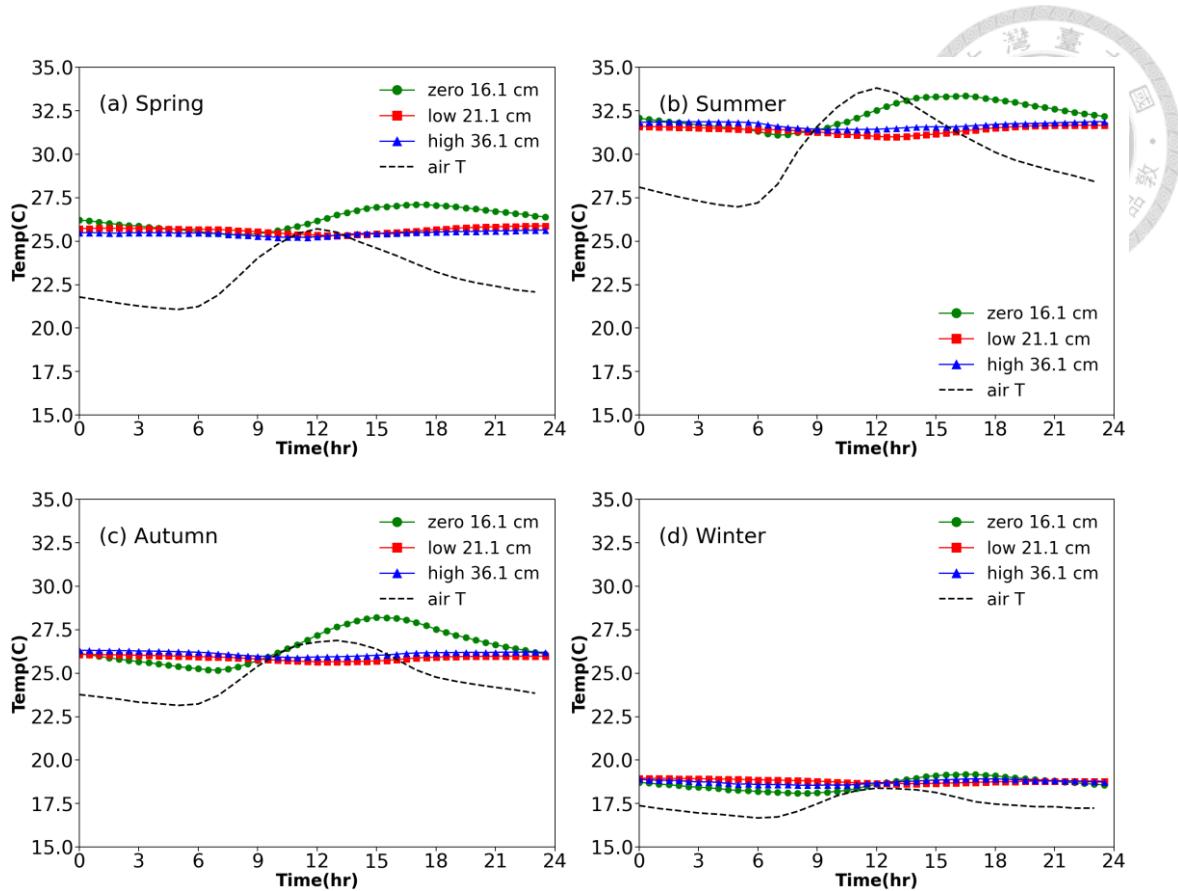


圖 22 2020 年空氣溫度與綠屋頂底部溫度之日變化圖

5.2 热通量

在此章節之中，主要分析土壤熱通量 G_1 、 G_2 及底部熱通量 G_3 的比較，而如第四章所述，半階微分法可準確預測土壤熱通量，因而在低維護及高維護沒有實測熱通量的情況下，使用半階微分法預測 G_1 、 G_2 後進行比較分析，而 G_3 則是利用熱通量盤所測得的實測數據進行分析。

5.2.1 土壤熱通量 G_1 比較

圖 23 及圖 24 分別為 2019 年及 2020 年土壤深度 1cm 的土壤熱通量 G_1 與淨輻射之日變化圖。在 2019 年的白天時刻可以看到不同維護層的綠屋頂，其熱傳差異性在夏天較明顯，低維護綠屋頂有最大峰值 156.77 W/m^2 ，而高維護綠屋頂則有最小峰值 65.11 W/m^2 ，兩者差異達 91.66 W/m^2 ，其餘季節則差異不顯著；在 2020 年時，則可以看見四個季節進入的熱通量差異不顯著。在 Peng et al. (2019) 的研究

中，LAI 越大的綠屋頂，進入的土壤熱通量會越小，但是本研究得到的結果並無與此研究相同，圖中可發現在某些季節，維護程度比較大的綠屋頂進入的土壤熱通量比較大的現象，可知綠屋頂的傳熱並非只受到 LAI 的影響，亦有可能是土壤含水量的影響，水可以增加土壤熱容量並儲存熱以減少熱通量，但同時也可以增加熱傳導度促進往下傳的熱通量(Jim, C. Y., 2014；Peng et al., 2019)，以致 2019 年夏天低維護綠屋頂的熱通量傳遞較零維護綠屋頂高，由式(3.2.3)亦可知土壤熱儲存也會影響熱通量變化。圖中亦可看出在白天時刻各綠屋頂像是一個吸熱器快速進入大量的熱，但是到晚上時像是一個散熱器慢慢散失出去的，與 He et al. (2016)所發現的結果相同。除此之外，白天時刻將淨輻射與綠屋頂熱通量比較時，可發現綠屋頂減少了大量的熱進入且 G_1 變化基本上隨著太陽輻射量而有起伏(Getter et al., 2011)。

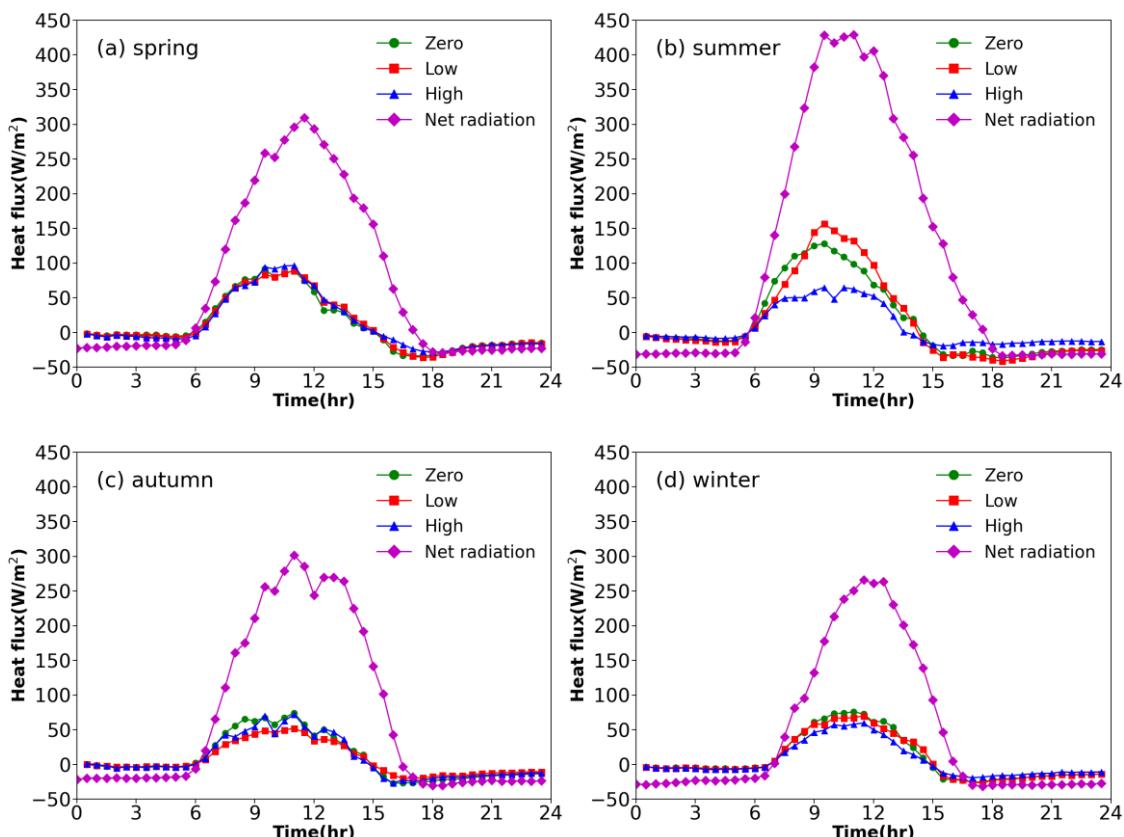


圖 23 2019 年各季節土壤熱通量 G_1 ($z=1\text{cm}$) 與淨輻射之日變化圖

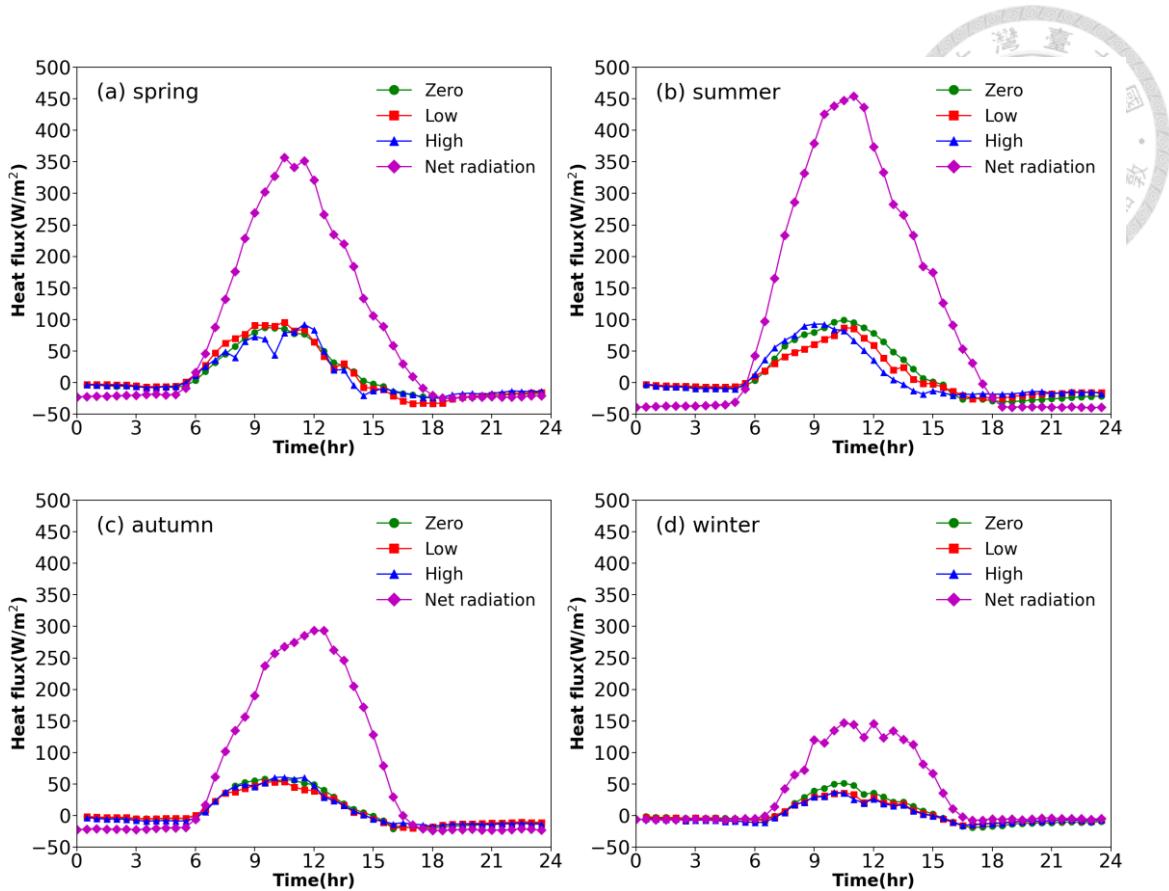


圖 24 2020 年各季節土壤熱通量 G_1 ($z=1\text{cm}$) 與淨輻射之日變化圖

除了在每一個季節看不同維護層的熱通量外，接下來將同一個維護程度下的綠屋頂不同季節的土壤熱通量的比較。圖 25 與圖 26 分別為零維護、低維護、高維護綠屋頂四個季節的 G_1 日變化圖。在零維護綠屋頂的 G_1 圖中，2019 年時白天的時刻夏天有最大峰值 127.93 W/m^2 而秋天有最小峰值 74.16 W/m^2 ；2020 年時，夏天有最大峰值 99.06 W/m^2 ，而冬天則有最小峰值 51.32 W/m^2 ，可知淨輻射影響夏天進入的熱通量。在低維護綠屋頂的 G_1 圖中，2019 年白天時刻夏天有最大峰值 156.77 W/m^2 ，而秋天有最小峰值 52.18 W/m^2 ；2020 年白天時刻春天有最大峰值 95.85 W/m^2 ，而冬天則有最小峰值 35.74 W/m^2 。從零維護及低維護的圖中，可以發現進入的土壤熱通量多寡與進入的淨輻射量有一定相關性。在高維護綠屋頂的 G_1 圖中，2019 年白天時刻春天有最大峰值 96.51 W/m^2 ，而冬天則有最小峰值 59.70 W/m^2 ；2020 年白天時刻夏天有進入的熱最大峰值 92.79 W/m^2 ，冬天則有最小峰值 37.13 W/m^2 ，晚上時刻在這三個綠屋頂當中各季節的差異性並不顯著。在這兩年份



當中，很明顯高維護進入的土壤熱通量 G_1 明顯不是夏天最大，原因為夏天的高維護綠屋頂中，紫嬌花正開花當中(如圖 5)，促進蒸散作用發生，植物藉由蒸散作用帶走土壤的熱，進而導致由室外進入土壤方向的熱變少。而從圖 25 亦可以發現，夏天的熱通量波峰偏前，這是因為太陽入射角度關係導致溫度迅速上升的時間提早，進而使得熱通量上升時間較其餘季節高，而最後圖 25 與圖 26 皆可看出春夏進入的熱較秋冬進入的熱多。

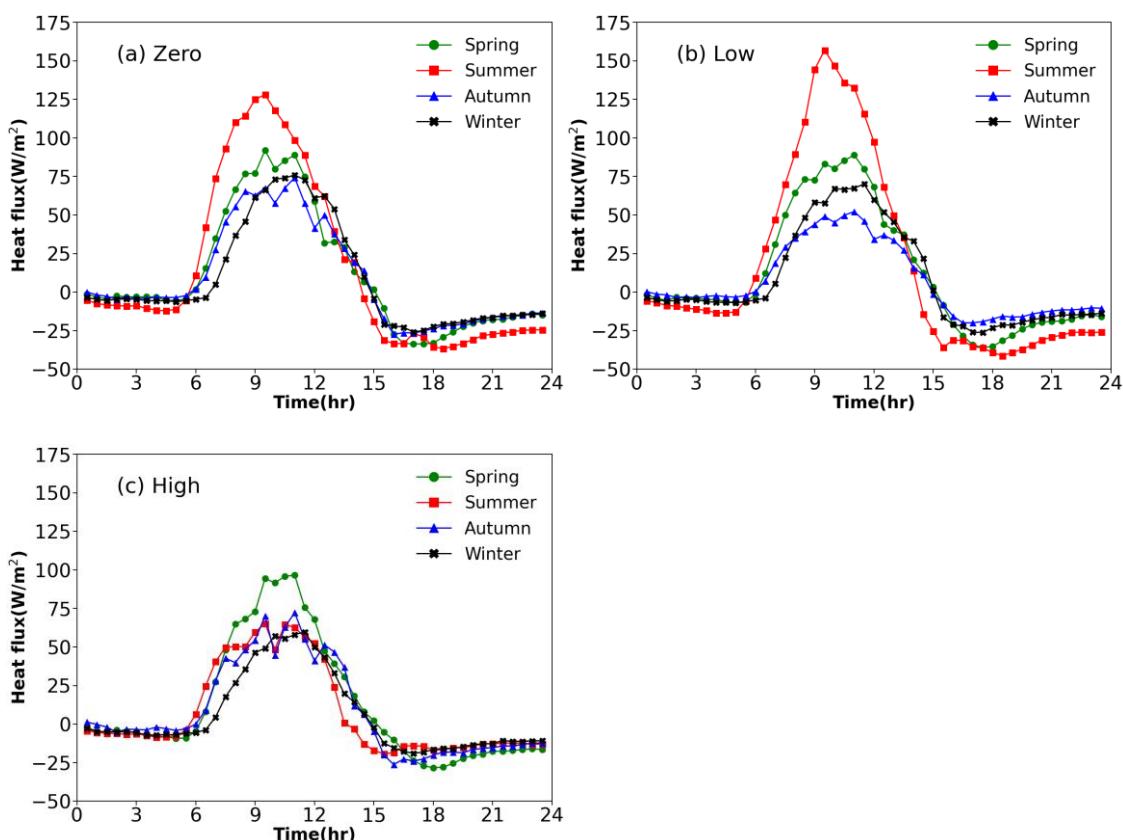


圖 25 2019 年各綠屋頂土壤熱通量 G_1 之日變化圖

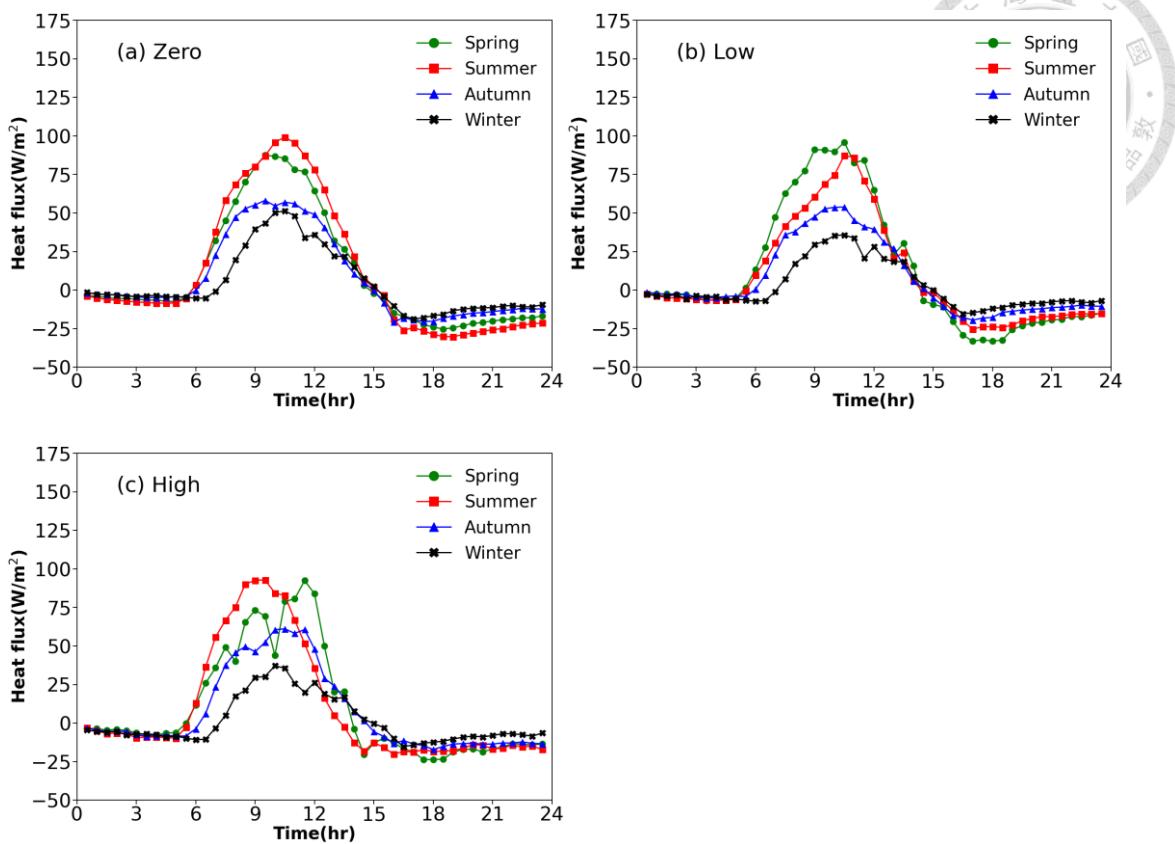


圖 26 2020 年各綠屋頂土壤熱通量 G_1 之日變化圖

圖 27 分別將 2019 年及 2020 年的進入綠屋頂的總熱通量和離開綠屋頂的總熱通量 $G_{1,\text{total}}$ 畫成圖進行比較， $G_{1,\text{total}}$ 為整日的熱通量 G_1 總和。在 2019 年進來的熱通量當中，三種綠屋頂在春天時熱通量差異最小，高維護有最大值 475 Wh/m^2 ，而零維護有最小值 456 Wh/m^2 ，差異達 19 Wh/m^2 ，夏天的差異性最大，低維護有最大值 719 Wh/m^2 ，而高維護有最小值 347 Wh/m^2 ，差異達 372 Wh/m^2 ；而在 2020 年時進入的熱通量，秋天時差異最小，零維護有最大值 324 Wh/m^2 ，而低維護有最小值 281 Wh/m^2 ，差異達 43 Wh/m^2 ，在夏天時差異最大，零維護有最大值 530 Wh/m^2 ，低維護有最小值 396 Wh/m^2 ，差異達 134 Wh/m^2 。從數據可知，三種不同的綠屋頂在夏天的時候才有顯著熱通量差異，可以知道當溫度高且淨輻射量大時 LAI 的變化會影響進入的總熱通量值。圖中亦可以發現在 2019 年夏天及冬天時，高維護可以大幅降低進入的熱通量，而春天及秋天阻隔熱的效果較不明顯。除此之外，將 2019 年及 2020 年相比較時，可發現零維護綠屋頂進入的土壤熱通量變小了，這是

因為零維護綠屋頂在 2019 年時較無明顯植被，但是在 2020 年時雜草迅速生長所導致(圖 3)。在 2019 年離開的熱通量中，春天的差異最小，低維護有最大值 216 Wh/m^2 ，高維護有最小值 198 Wh/m^2 ，差異可達 18 Wh/m^2 ，夏天時的差異最大，低維護有最大值 345 Wh/m^2 ，而高維護有最小值 174 Wh/m^2 ，差異可達 171 Wh/m^2 ；而在 2020 年的離開的熱通量當中，秋天的差異最小，零維護與高維護有最大值 151 Wh/m^2 ，低維護有最小值 135 Wh/m^2 ，差異可達 16 Wh/m^2 ，夏天的差異最大，零維護有最大值 242 Wh/m^2 ，低維護有最小值 181 Wh/m^2 ，差異可達 61 Wh/m^2 。由數據及圖中可發現離開的熱通量相比進入的熱通量，其量值減少許多，而趨勢也與進入的熱通量同，若進入的土壤熱通量多，則離開的土壤熱通量也多。

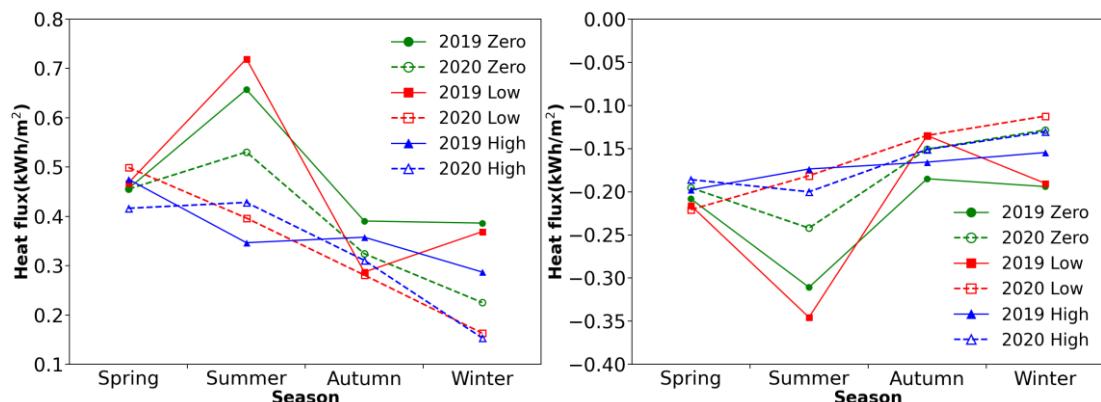


圖 27 進入綠屋頂與離開綠屋頂的總熱通量 $G_{1,\text{total}}$

5.2.2 土壤熱通量 G_2 比較

除了探討 G_1 之外，亦探討各綠屋頂土壤熱通量 G_2 的比較，圖 28 及圖 29 分別為 2019 年及 2020 年為不同維護程度綠屋頂土壤底部的熱通量。在此部分， G_2 位置位於土壤底部，分別是零維護的 10 公分，低維護的 15 公分以及高維護的 30 公分。很明顯因為土壤厚度的關係，兩張圖振幅部分大多呈現零維護大於低維護及高維護，而且高維護的熱通量振幅明顯低許多且傳熱越穩定，可知高維護土壤厚度厚及土壤含水量高的影響，與 Theodosiou, T. G. (2003)發現的相同。比較不同的是 2019 年春天的高維護熱通量振幅明顯較其他季節高，這是因為在春天高維護第二

層溫度振幅相對其餘季節大。另外則是 2019 年的夏天，低維護的熱通量值比較大且大於零維護，而這也與前述所分析的 G_1 有關，在 G_1 部分進來的熱通量低維護就比高維護大許多，也因而即使土壤厚度較厚， G_2 仍舊有低維護大於零維護的現象發生。

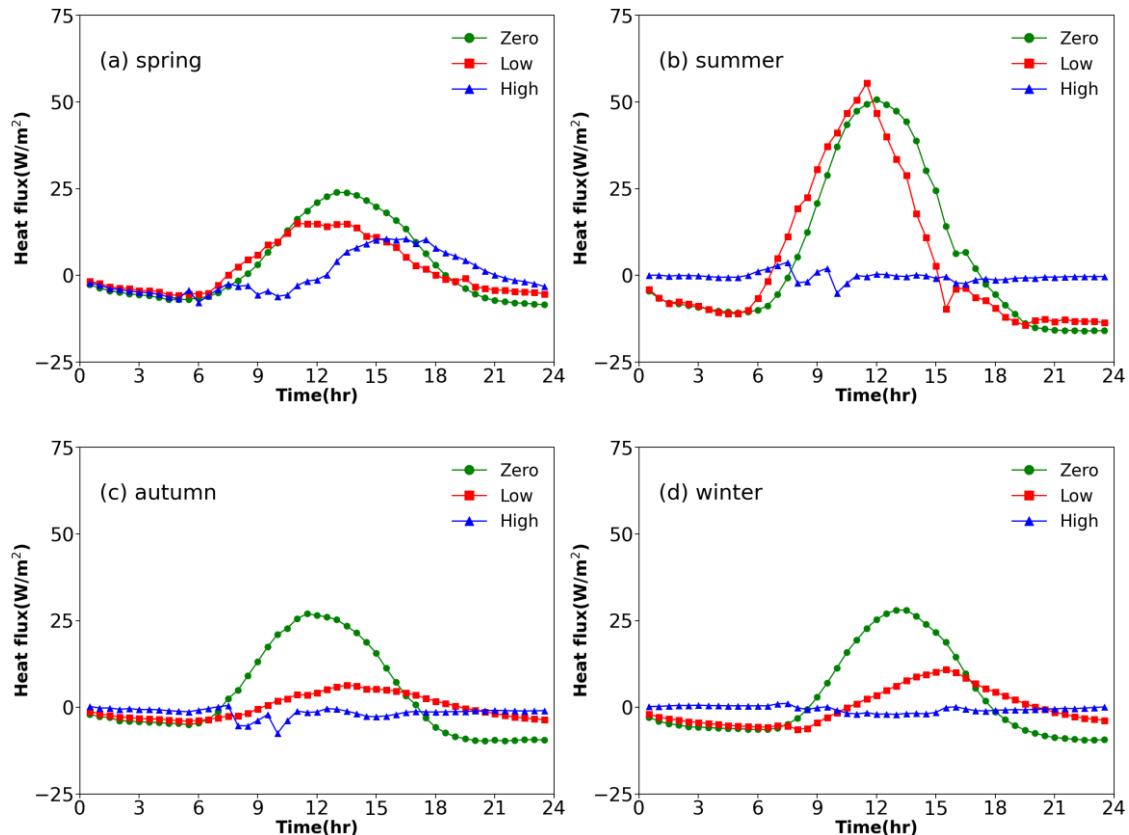


圖 28 2019 年各季節土壤熱通量 G_2 之日變化圖

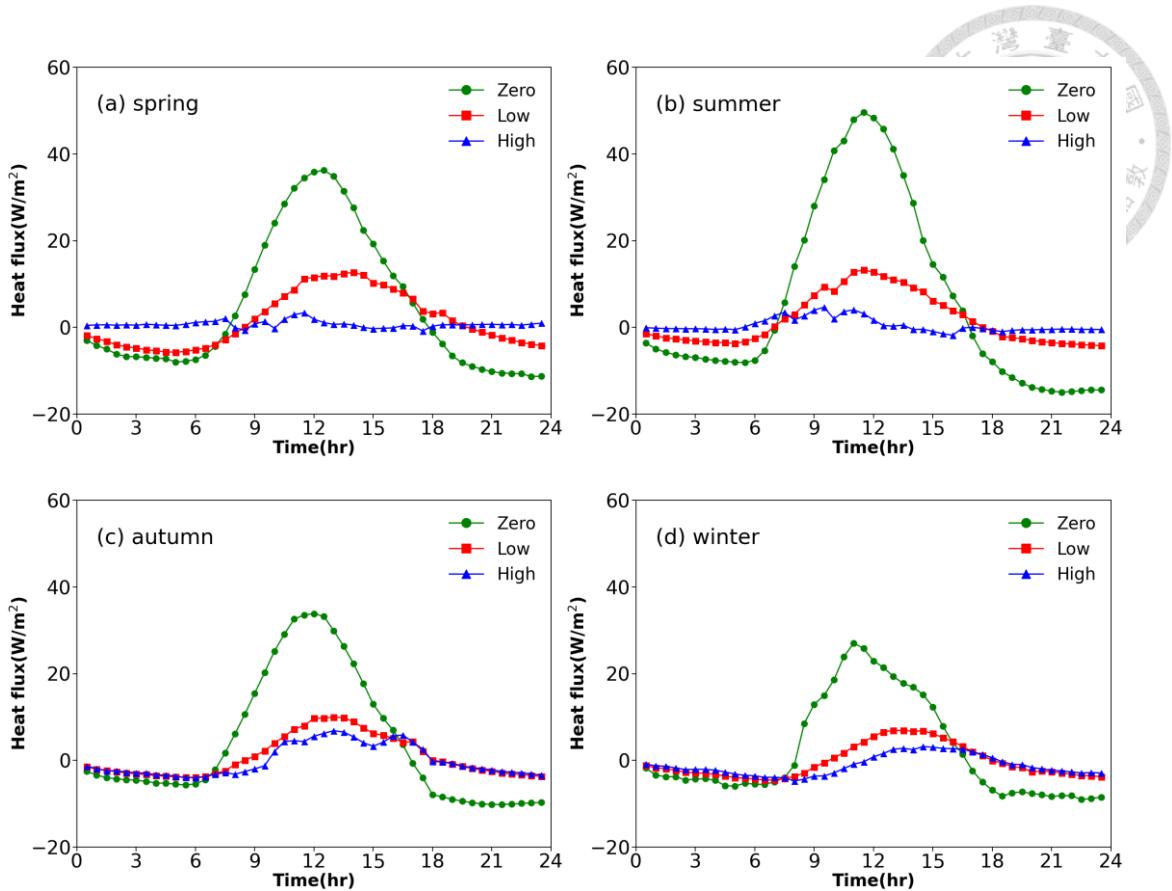


圖 29 2020 年各季節土壤熱通量 G_2 之日變化圖

除了各季節比較不同綠屋頂外，亦比較同一個綠屋頂下土壤底部熱通量的季節變化。圖 30 與圖 31 分別為 2019 年及 2020 年各綠屋頂各季節的土壤底部熱通量之日變化圖。在 2019 年的圖當中，很明顯還是可以看出零維護以及低維護綠屋頂的夏天進入的熱通量明顯比其他大很多，而高維護的部分則差異不顯著。在 2020 年的圖當中，各季節的差異性沒有 2019 年來的這麼大，零維護綠屋頂和低維護綠屋頂的依然是夏天進入的熱通量比較大，而冬天進入的比較小，不過低維護的季節性熱通量變化較不顯著，高維護綠屋頂則是四個季節無差異。

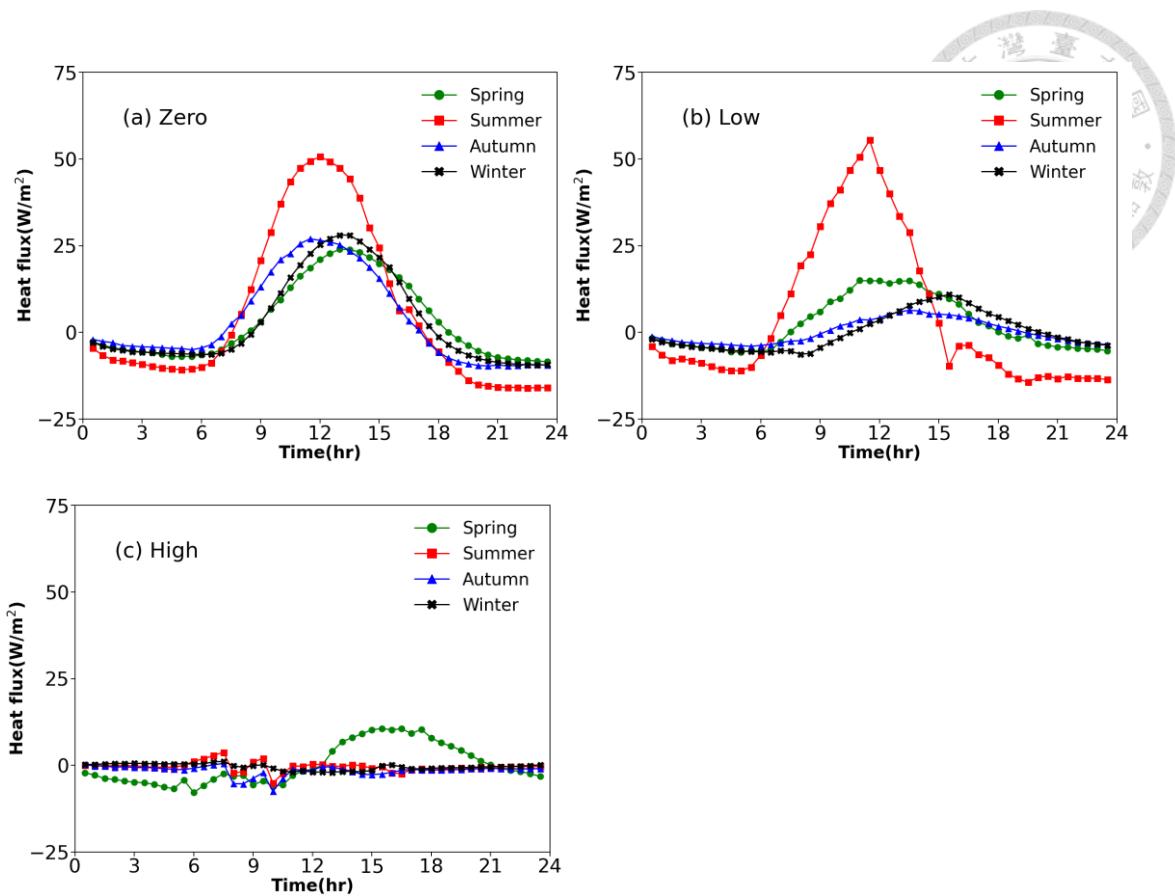


圖 30 2019 年各綠屋頂土壤熱通量 G_2 之日變化圖

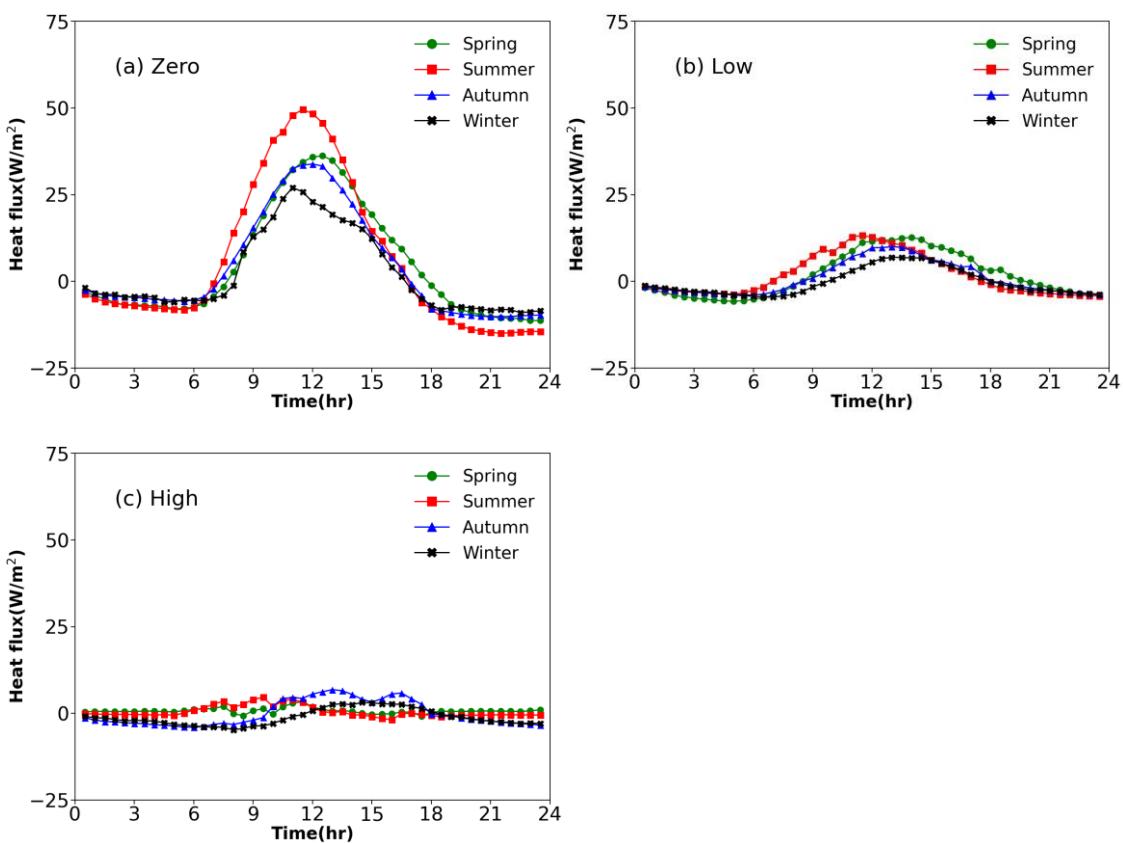


圖 31 2020 年各綠屋頂土壤熱通量 G_2 之日變化圖



圖 32 分別將 2019 年及 2020 年的朝室內方向的總熱通量和朝室外方向的總熱通量 $G_{2,\text{total}}$ 畫成圖進行比較， $G_{2,\text{total}}$ 為整日的熱通量 G_2 總和。因為三個不同維護程度的綠屋頂其土壤厚度及土壤含水量都不一樣，所以在進入的總熱通量圖當中，各個季節都是零維護大於低維護大於高維護，將各綠屋頂兩年的熱通量共八個數值進行平均後，零維護進入的總熱通量 $G_{2,\text{total}}$ 為 191 Wh/m^2 ，低維護進入的總熱通量 $G_{2,\text{total}}$ 為 86 Wh/m^2 ，而高維護進入的總熱通量 $G_{2,\text{total}}$ 為 20 Wh/m^2 。另外，零維護及低維護其一日總熱通量隨著季節是有波動的，但是高維護則相對較無波動，可知高維護具有阻隔熱傳的效果，與圖 30 及圖 31 發現的結果相同。不過在離開的熱通量圖當中，低維護散失的熱通量不見得比高維護大，在 2019 年春天以及 2020 年秋天時低維護散失的熱較高維護小。

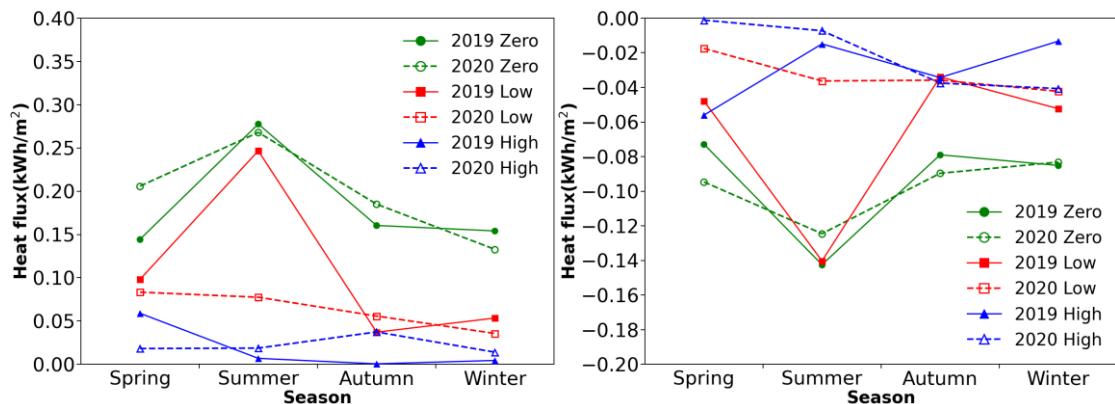


圖 32 室內方向與室外方向的總熱通量 $G_{2,\text{total}}$

5.2.3 土壤熱通量 G_1 與 G_2 比較

第 5.2.1 及 5.2.2 章節皆為分別看 G_1 及 G_2 來做分析的結果與比較，圖 33 至圖 35 則是將 G_1 及 G_2 進行比較，並將 2019 年及 2020 年皆畫於圖中， G_1 的位置皆位於土壤表面下 1 公分，而 G_2 的位置在零維護、低維護、高維護分別是 10 公分、15 公分及 30 公分。圖 33 為零維護的比較圖，四個季節皆可明顯看出 G_2 比 G_1 峰值小且 G_2 的波峰位置較 G_1 後面，在 2019 年，藉由零維護的土壤，熱通量的峰值春天可以減少 67.93 W/m^2 ，夏天可以減少 77.27 W/m^2 ，秋天可減少 47.19 W/m^2 ，冬天



可減少 47.82W/m^2 ；在 2020 年，春天可以減少 51.19W/m^2 ，夏天可以減少 49.55W/m^2 ，秋天可減少 24.25W/m^2 ，冬天可減少 24.30W/m^2 。由數據可知零維護土壤仍有減少熱通量進入的效益且春天及夏天減少的熱通量最多。

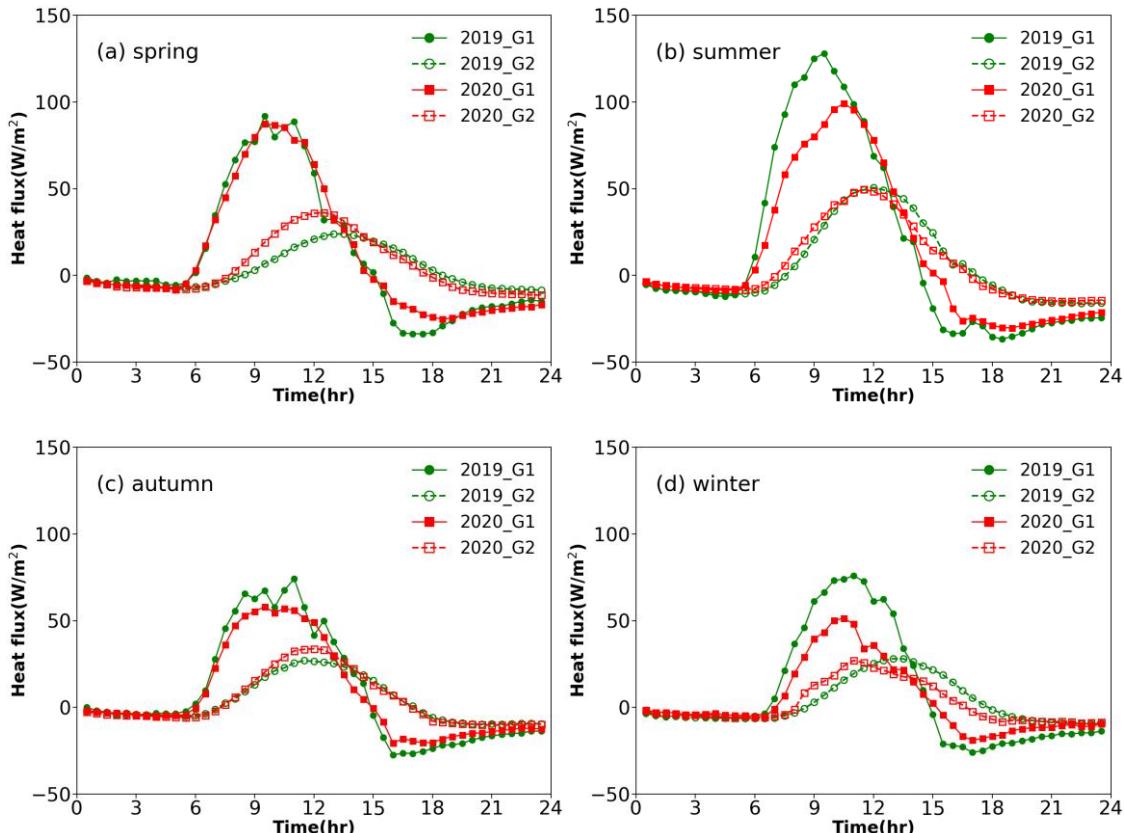


圖 33 2019 年及 2020 年零維護綠屋頂 G₁ 及 G₂ 之日變化圖

圖 34 為低維護的比較圖，因土壤厚度增加，可以發現其可阻隔的熱通量變大，而且 G₂ 波峰時間也有延後，並且在 2019 年，其春天及秋天的 G₁ 及 G₂ 趨勢是相似的。在 2019 年，熱通量的峰值春天可以減少 73.80W/m^2 ，夏天可以減少 101.35W/m^2 ，秋天可減少 45.81W/m^2 ，冬天可減少 59.05W/m^2 ；在 2020 年，春天可以減少 83.18W/m^2 ，夏天可以減少 74.01W/m^2 ，秋天可減少 43.83W/m^2 ，冬天可減少 28.80W/m^2 ，減少的熱通量皆比零維護綠屋頂大。

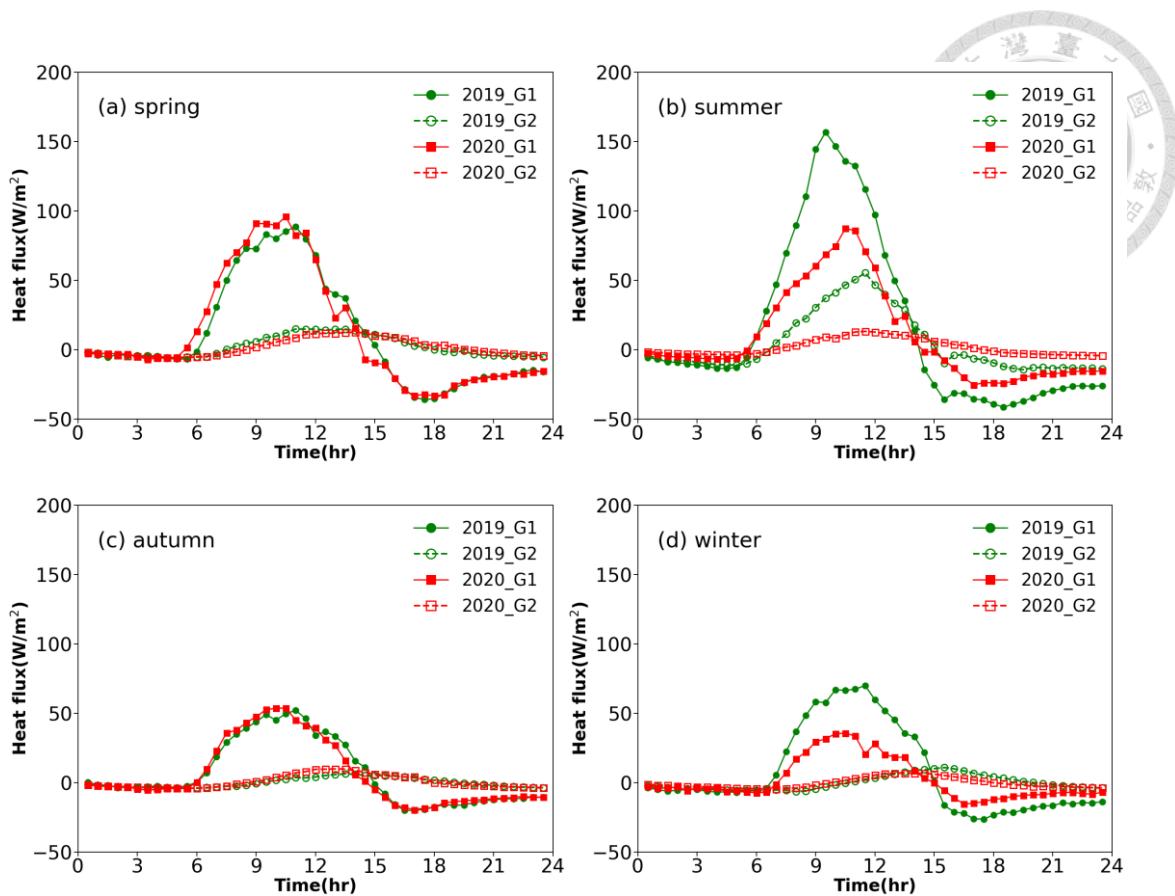


圖 34 2019 年及 2020 年低維護綠屋頂 G₁ 及 G₂ 之日變化圖

圖 35 為高維護的比較圖，因土壤厚度已達 30 公分，其 G₂ 的振幅相較於 G₁ 來說明顯少許多，可知土壤厚度在減少熱通量當中扮演重要角色。在 2019 年，熱通量的峰值春天可以減少 85.91W/m²，夏天可以減少 61.32W/m²，秋天可減少 71.67W/m²，冬天可減少 58.54W/m²；在 2020 年，春天可以減少 88.94W/m²，夏天可以減少 88.13W/m²，秋天可減少 54.19W/m²，冬天可減少 33.94W/m²。

將三種綠屋頂的 G₁ 與 G₂ 的峰值差異進行比較，可以發現除了 2019 年夏天及冬天之外，其餘季節皆為高維護綠屋頂 G₁ 與 G₂ 的峰值差異最顯著，將每個綠屋頂各自季節的差異值共六個數值進行平均後，高維護的差異值最大，為 70.46W/m²，其次是低維護綠屋頂，為 58.24W/m²，最後則是零維護綠屋頂，為 44.07W/m²，可知土壤厚度在阻隔熱能上所帶來的重要性。

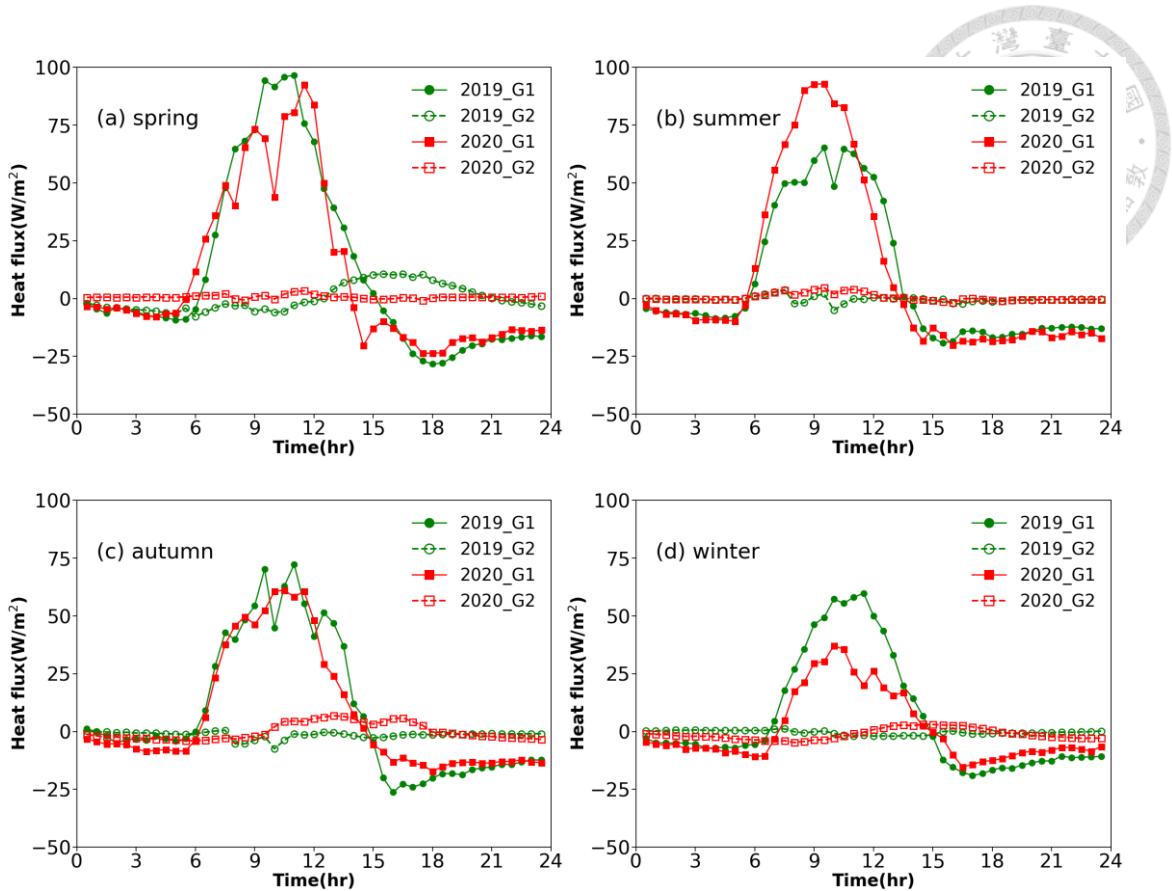


圖 35 2019 年及 2020 年高維護綠屋頂 G₁ 及 G₂ 之日變化圖

5.2.4 底部熱通量 G₃ 比較

為了知道建築物室內在綠屋頂下所產生的效益為何，亦探討底部熱通量 G₃。

圖 36 及圖 37 分別為 2019 年及 2020 年為各不同維護程度綠屋頂底部的熱通量盤所測得的熱通量。G₃ 的位置為綠屋頂與屋頂的交界面，零維護為 16.1cm，低維護為 21.1cm 而高維護為 36.1cm。兩年皆可發現零維護綠屋頂在到綠屋頂最底部的時候，仍舊有室內方向的熱通量，而低維護及高維護因為土壤層相對較厚一些，全天的熱通量變化皆為負值，表示此時是由室內朝綠屋頂方向散失的，而其原因可能為其植被的 LAI 增加使得遮蔭變多可阻隔熱，亦含植被的蒸散作用，造成綠屋頂土壤內的熱通量向外散失，而綠屋頂土壤從室內所吸收的熱也藉由前述作用將熱往室外方向擴散，使得熱通量為負值，但值皆不大。而高維護綠屋頂散失的熱又較低維護低，可能是因為高維護綠屋頂對於升溫和太陽輻射有種熱慣性(M. D'Orazio et al., 2012)。整日呈現負值狀態亦可見於 Lin & Lin (2011)、Squier and Davidson (2016)、

Peng et al. (2019)的研究中。由前面第 5.1 節分析低維護與高維護的溫度圖時，可以發現綠屋頂的底部溫度較土壤底部溫度高，可見底部熱通量是朝室外方向傳遞的。除此之外，高維護因為土壤厚度有達 30 公分，故可看見底部熱通量幾乎為定值，較沒有振幅變化。在零維護綠屋頂的情況下，白天都是有室內方向的熱通量，可知夏天隔熱的效益相對其餘綠屋頂較差，而在晚上時刻，綠屋頂散出去的熱為零維護最大，高維護散失的熱最少，這是因為土壤底部與綠屋頂底部的溫度差異，在零維護綠屋頂下是最為顯著的。

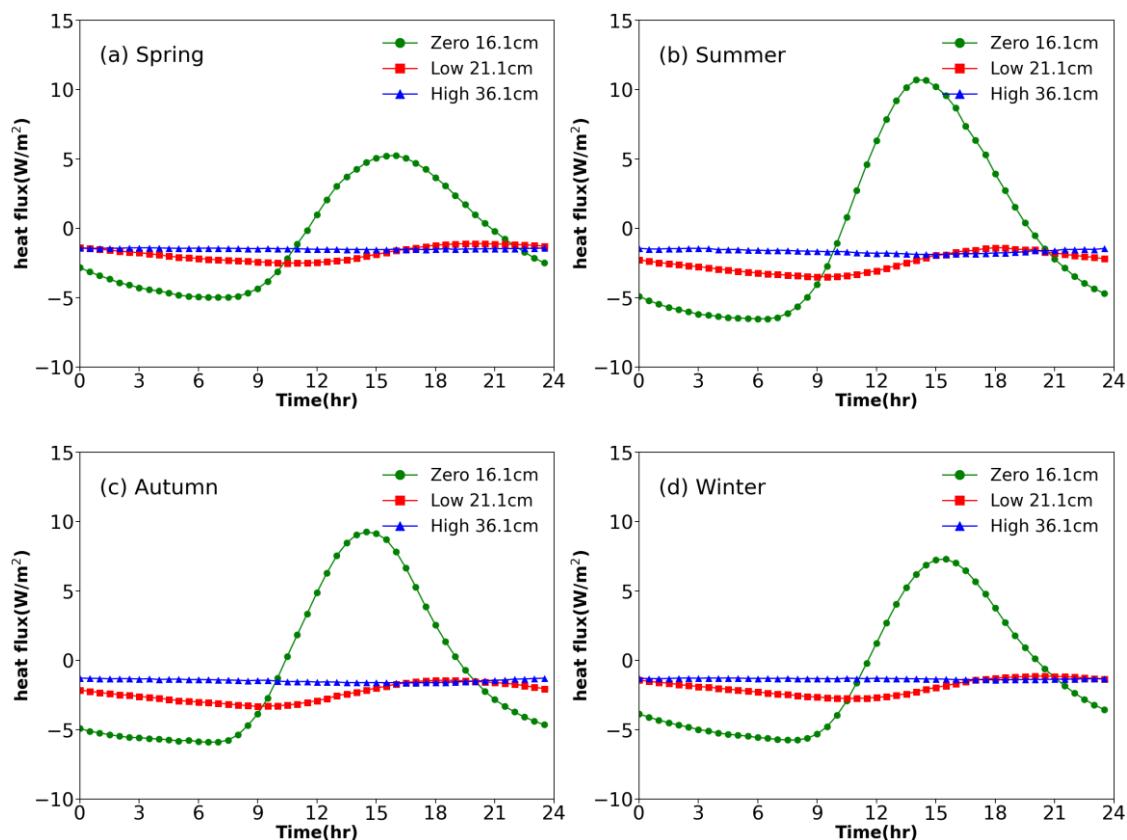


圖 36 2019 年各季節底部熱通量 G_3 之日變化圖

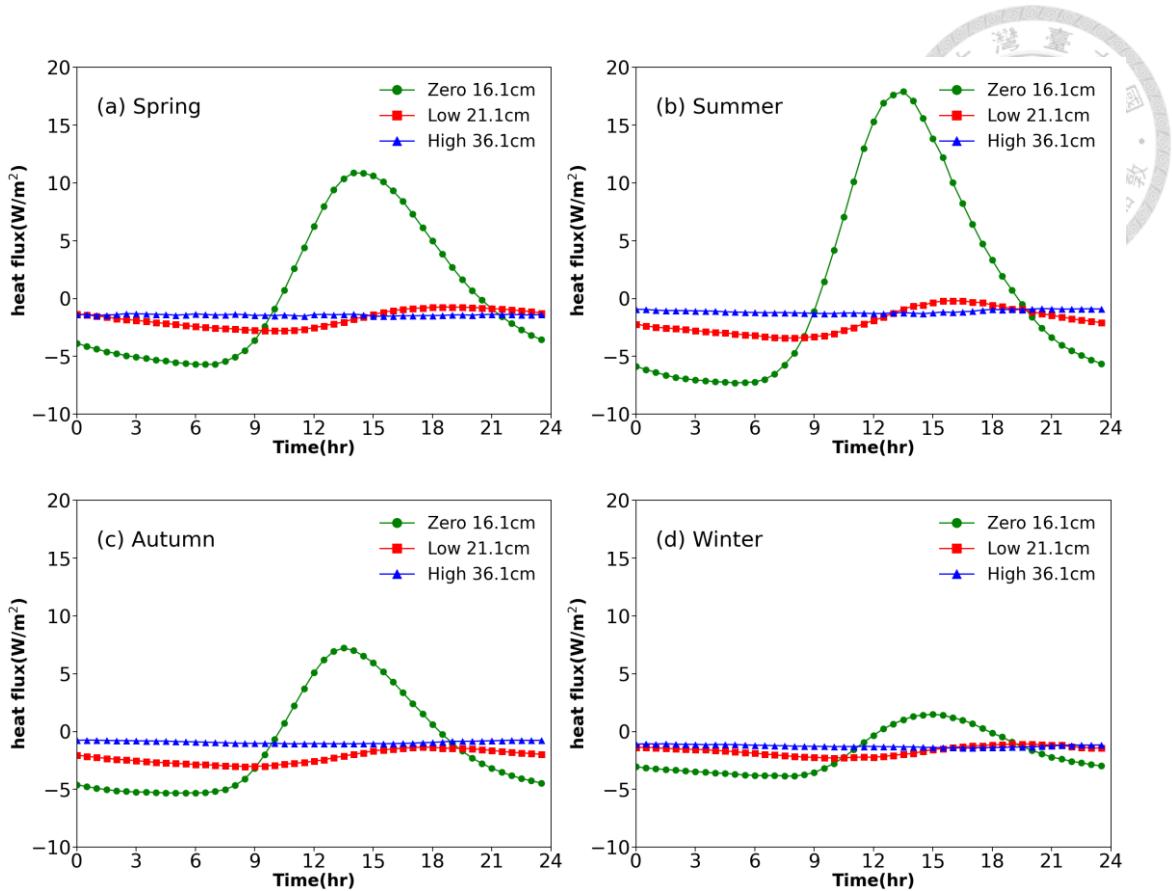


圖 37 2020 年各季節底部熱通量 G_3 之日變化圖

除了各季節比較不同綠屋頂外，亦比較同一個綠屋頂下的 G_3 不同季節的變化。

圖 38 與圖 39 分別為 2019 年及 2020 年各綠屋頂的底部熱通量 G_3 之日變化圖。由零維護的圖中可得知 2019 年各季節仍有熱通量進入建築內，白天時段夏天熱通量進入最多而春天熱通量進入最少，低維護跟高維護綠屋頂則是四個季節整日皆為負值，表示熱通量的方向皆為穩定離開建築物；在 2020 年亦是夏天進入最多熱通量。在低維護綠屋頂以及高維護綠屋頂的圖中，可以發現 2019 年及 2020 年各個季節的熱通量差異並不顯著，低維護散失出去的熱通量介在 -5 到 0 W/m^2 之間，高維護散失出去的熱通量介在 -2 到 -1.2 W/m^2 之間，波動相較於低維護來說較小。

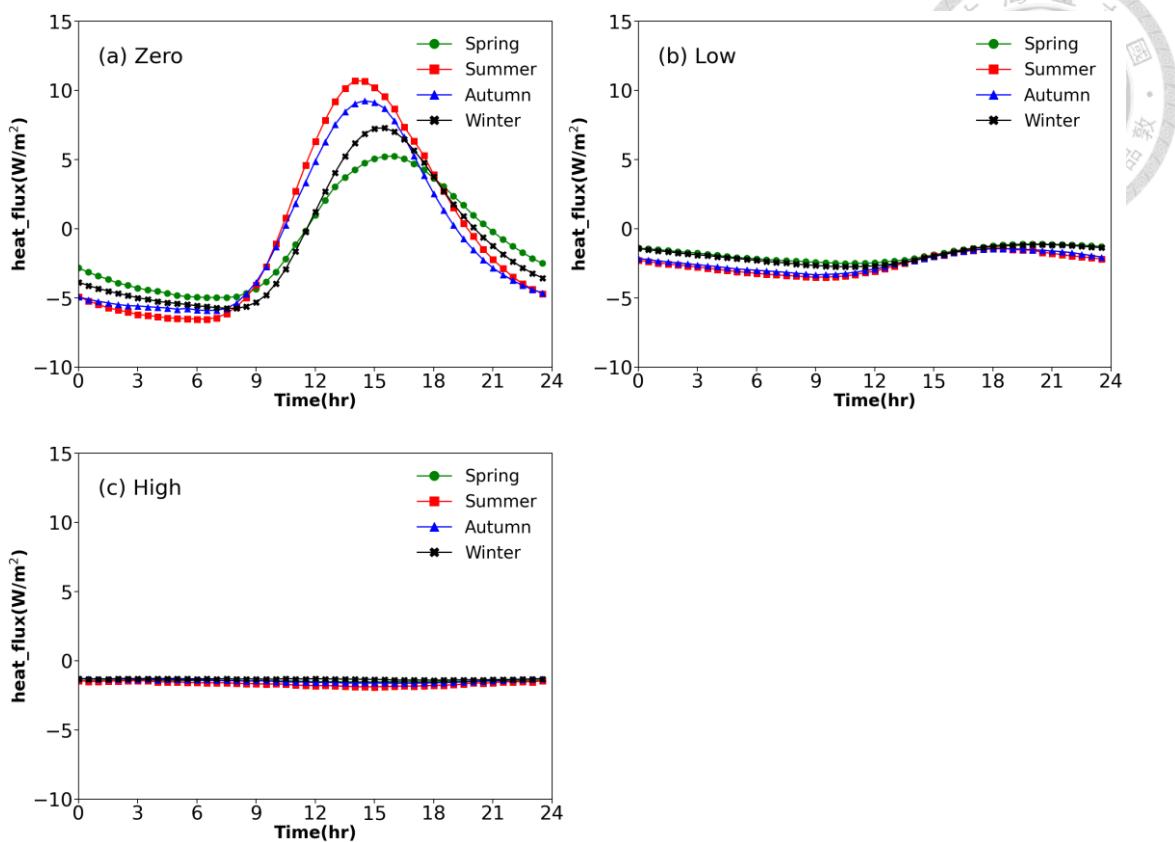


圖 38 2019 年各綠屋頂底部熱通量 G_3 之日變化圖

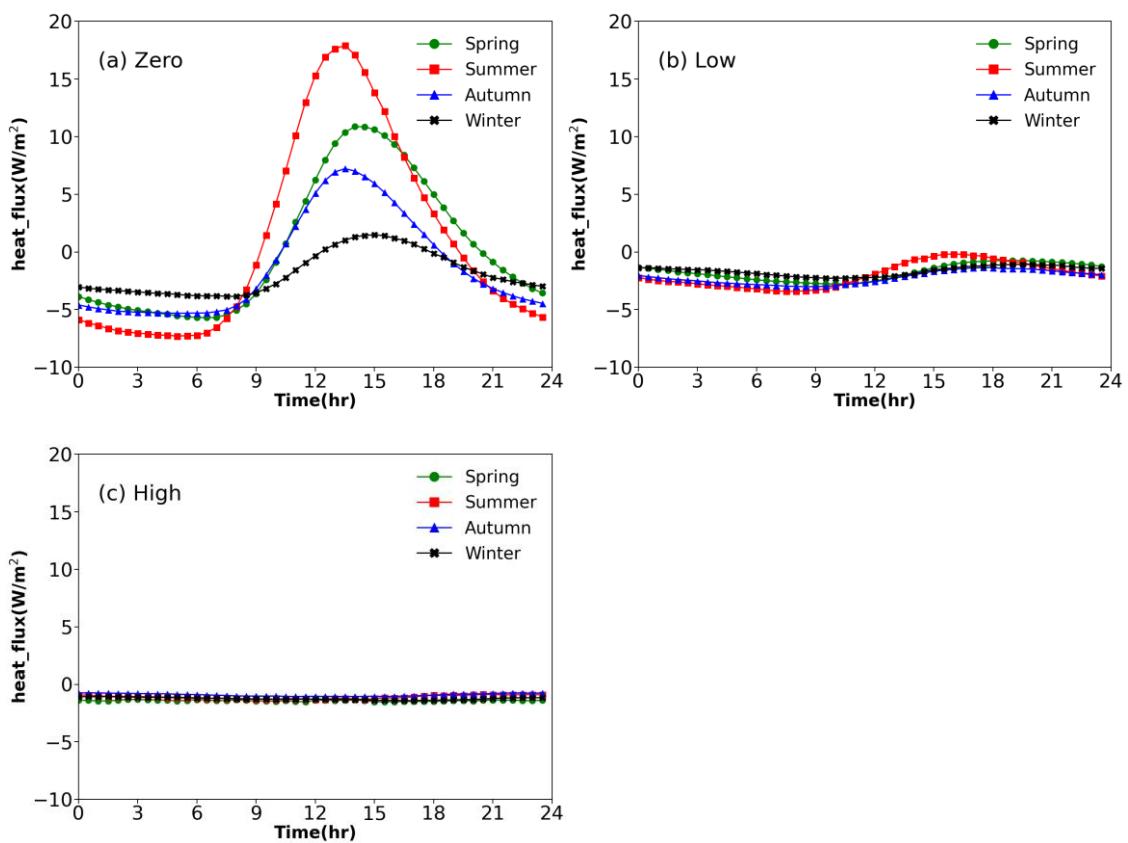


圖 39 2020 年各綠屋頂底部熱通量 G_3 之日變化圖

圖 40 分別整理了 2019 年及 2020 年室內方向和室外方向的總底部熱通量 $G_{3,\text{total}}$ ， $G_{3,\text{total}}$ 為整日熱通量 G_3 的總和。很明顯在兩年期間，總熱通量皆為零維護進入的熱多，將各綠屋頂兩年共八個數值進行平均之後，零維護室內方向的總底部熱通量 $G_{3,\text{total}}$ 為 47Wh/m^2 ，室外方向的總底部熱通量也是最多的，為 -62Wh/m^2 ，而低維護與高維護在室內方向的熱通量皆為零。室外方向的總熱通量最少的是高維護，為 -31.8Wh/m^2 ，其次是低維護綠屋頂的 -48.5Wh/m^2 ，由這兩張圖可以看到高維護綠屋頂在吸收和阻隔熱的能力相對於其他綠屋頂較為穩定，不會突然吸收很多熱又釋放很多熱。

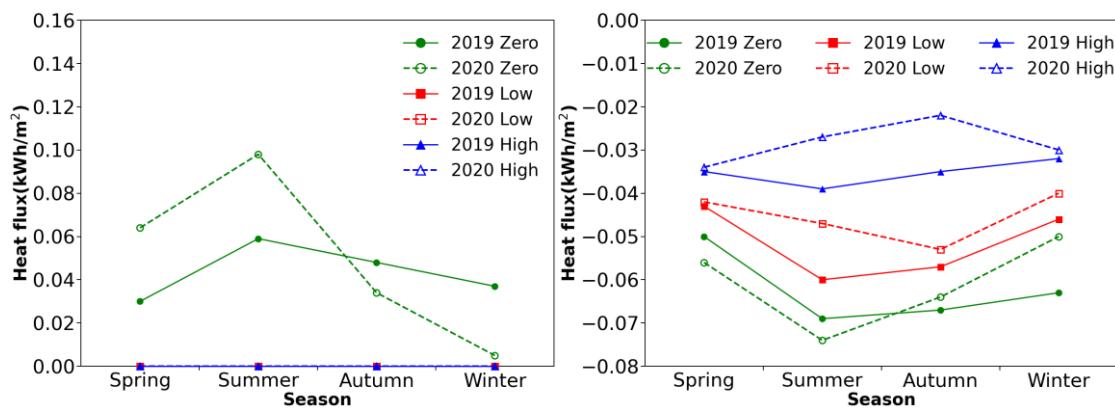


圖 40 室內方向與室外方向的總底部熱通量 $G_{3,\text{total}}$

為了探討上班時間綠屋頂可以帶來的能源效益，圖 41 整理了 2019 年及 2020 年各維護綠屋頂在上班時間(早上 9 點至下午 6 點)朝室內方向的總熱通量。很明顯在四個季節裡面，零維護綠屋頂皆為朝室內方向的熱通量，為辦公室帶來不少熱能，而低維護及高維護綠屋頂皆為朝室外的熱通量，其中低維護的離開總熱通量高於高維護，將兩年的總底部熱通量共八個數值進行平均後，可達 19Wh/m^2 。

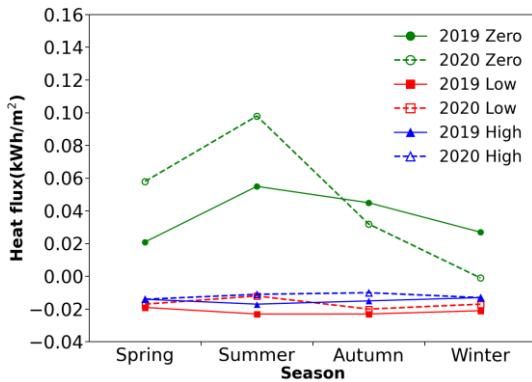


圖 41 上班時間(9:00-18:00)室內方向的總熱通量

5.3 對照組熱通量比較

前面皆在探討 2019 年及 2020 年的溫度與熱通量變化，接下來將探討 2021 年 1 月至 8 月的熱通量比較，在這一年多放了一個熱通量盤在對照組，故將之與其餘綠屋頂熱通量比較。對照組意即沒有綠屋頂，只有一層帆布覆蓋於熱通量盤儀器上。

圖 42 至圖 44 分別為 2021 年冬天、春天、夏天的底部熱通量 G_3 比較圖。明顯看出三種綠屋頂底部的熱通量皆遠小於淨輻射量以及沒有綠屋頂的屋頂水泥表面所測得的熱通量，且熱通量振幅也明顯比較小。若將對照組熱通量峰值與 2019 年及 2020 年春天的平均 G_1 峰值進行比較，對照組熱通量為 168.63W/m^2 ，零維護為 83.21W/m^2 ，低維護為 80.04W/m^2 ，而高維護為 72.11W/m^2 ，可知綠屋頂的隔熱效果。若將對照組熱通量與 G_3 進行比較，對照組為 168.63W/m^2 ，零維護為 13.63W/m^2 ，低維護為 0.98W/m^2 ，而高維護為 -1.30W/m^2 ，可發現若沒綠屋頂則會有更多熱通量進入室內。由上述可知綠屋頂可藉由植被阻擋太陽輻射和蒸發散的增加來進行隔熱，增加了建築降溫的能力(Cook and Larsen, 2021)。

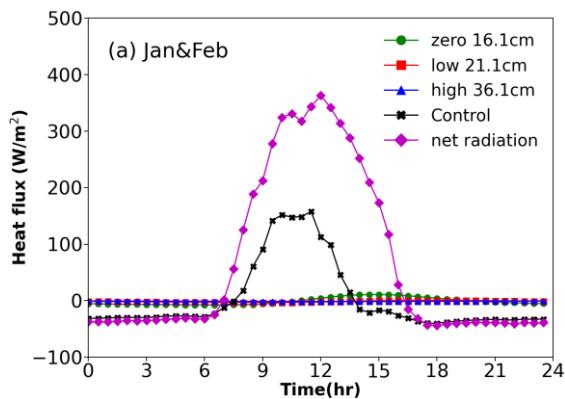


圖 42 2021 年 1 月/2 月底部熱通量與淨輻射之日變化圖

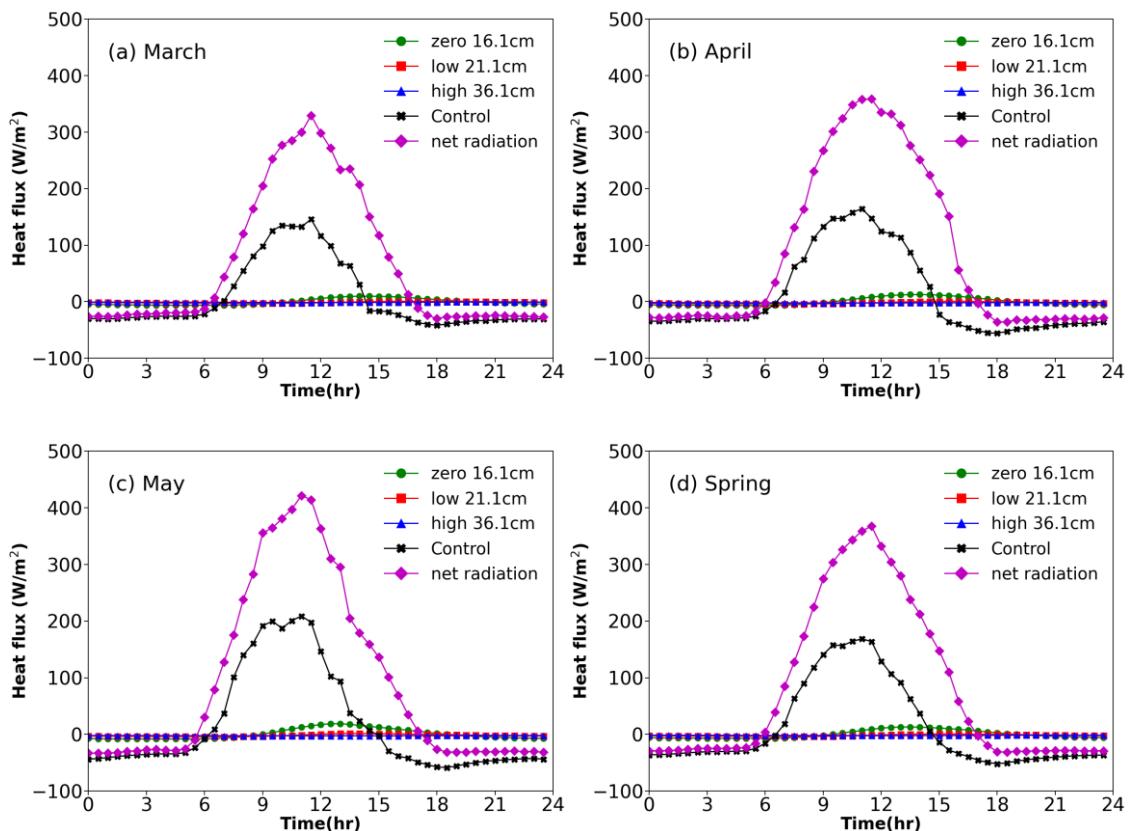


圖 43 2021 年春天底部熱通量與淨輻射之日變化圖

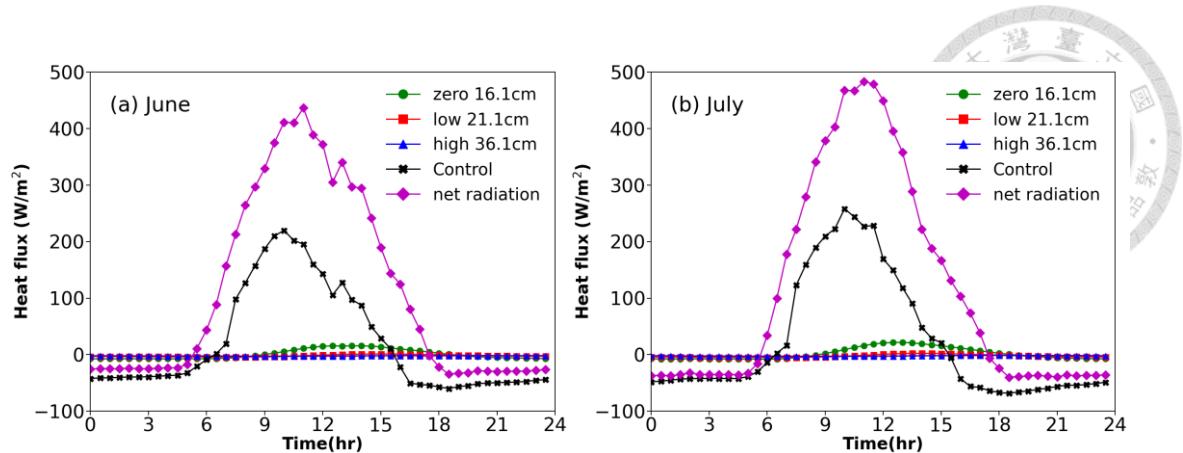


圖 44 2021 年夏天底部熱通量與淨輻射之日變化圖

第六章 綠屋頂成本效益



在分析綠屋頂的成本時，使用生命週期評估來評估綠屋頂的成本及效益最為常見(Scolaro and Ghisi, 2022)，其考量的面向包含減碳、截水、減少熱島效應等，結構上也有土壤可能造成的載重問題要考慮。因前述效益較不易計算，故此篇研究主要聚焦在個別成本與效益評估，也就是綠屋頂的建置成本(初始成本、維護成本)以及節能所帶來的效益，將兩者一併考量後計算何種綠屋頂所帶來的效益最高。

綠屋頂的建置成本主要分成材料的植栽層、介質層、蓄排水層、防水層以及人工施工費用和硬體費用，而維護成本則是修剪、補株等人力以及自動澆水的水費及電費。綠屋頂的建置成本會因地區、土壤材料而有所差異，此三種綠屋頂的初始成本分別為，零維護綠屋頂為 $6200\text{ 元}/\text{m}^2$ ，低維護為 $6800\text{ 元}/\text{m}^2$ ，而高維護為 $7350\text{ 元}/\text{m}^2$ ；在年均維護成本的部分，零維護為 $0\text{ 元}/\text{m}^2$ ，低維護約為 $400\text{ 元}/\text{m}^2$ ，而高維護約為 $1200\text{ 元}/\text{m}^2$ 。在台灣大多為鋼筋混凝土構造的房子，而綠屋頂的使用年限也應跟著台灣房子使用年限來設定，故設定綠屋頂使用年限為 50 年，為了將第一年的建置成本轉換成未來每年的成本，需要折現率來進行換算。根據 110 年經濟部再生能源電能躉購率（經濟部能源局, 2021）設定折現率為 5.25%。

在能源部分，最需要進行節省能源的為辦公大樓，因而探討當綠屋頂蓋於辦公大樓的屋頂上時，上班時間早上 9 點至下午 6 點的熱通量變化對屋頂層的影響，而因為此為綠屋頂底部進入屋頂水泥層的熱通量，故忽略屋頂水泥層的蓄熱能力，將減少的熱通量直接換算成可減少的電費。在實驗的綠屋頂底下的樓層，夏天室內冷氣於白天常常開啟並為整年主要開冷氣時段，故選擇分析夏天綠屋頂熱通量對能源減少的影響。表 12 整理 2021 年夏天各綠屋頂底部的一日及季節總熱通量，選擇 6 月與 7 月的數值計算夏天日總熱通量，再乘上夏天的日數 92 天以獲得季節總熱通量。由表中亦可以發現零維護大多為進入室內的熱通量，可知在零維護的屋頂下，不斷有熱通量進入會導致室內開空調耗能變高，其中亦可看到低維護和高維



護為離開室內方向的熱通量。在 110 年台電公布的電價表中，一般辦公大樓所花的電約為一個月 331~500 度，電費在夏月(6 月 1 日至 9 月 30 日)收 3.52 元。

表 12 2021 年上班時間裸露屋頂與各綠屋頂的夏天總熱通量

(kWh/m ²)	裸露屋頂	零維護	低維護	高維護
日總熱通量 G _{3,total}	0.762	0.110	-0.001	-0.021
季節總熱通量	70.104	10.120	-0.092	-1.932

得知表 12 的季節總熱通量後，將綠屋頂與裸露屋頂進行比較，以裸露屋頂為基準，零維護綠屋頂節省了 59.984 kWh/m^2 ，低維護綠屋頂節省了 70.196 kWh/m^2 ，而高維護綠屋頂節省了 72.036 kWh/m^2 。得出上述數值後即可得未來 50 年的年均節省電費。

為了將綠屋頂一開始的初始成本換算成未來 50 年的年均建置成本，使用以下公式來計算：

$$A = P \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (6.1.1)$$

其中 A 為換算後未來 50 年的年均成本，P 為綠屋頂的初始成本，i 為折現率 5.25%，N 為 50 年。

表 13 整理了各綠屋頂經由換算後每平方公尺的年均成本、可節省的電費及其成本總和，可發現在 2021 年夏天高維護綠屋頂可節省的能源最多，減少的電費最大，但因建置與維護成本高，使得效益尚不能抵成本，因此以現有的成本資料以及實驗資料進行成本分析可發現裸露屋頂的成本是最低的，而零維護綠屋頂是三個綠屋頂中成本最低的。

表 13 各綠屋頂的年均成本

(NT\$/m ² /yr)	裸露屋頂	零維護	低維護	高維護
建置成本	0	352.82	386.96	418.26
維護成本	0	0	400	1200
節省電費	0	-211.14	-247.09	-253.57
總成本	0	141.68	539.87	1364.69

第七章 結論



本論文研究三種維護程度綠屋頂(零維護、低維護、高維護)的溫度及熱通量變化以及綠屋頂所帶來的節能效益，所獲得的結論如下：

1. 解析解無法準確預測熱通量(R^2 約 0.65)，而半階微分法所預測的熱通量準確性高(R^2 約 0.97)。
2. 將夏天綠屋頂土壤下一公分的溫度與水泥溫度進行比較，發現高維護綠屋頂溫度差異最為顯著，溫度差異達 21°C 左右，其次是低維護綠屋頂，溫度差異 19°C 左右，最後是零維護綠屋頂，溫度差異 15°C 左右。
3. 在 $G_{1,\text{total}}$ (土壤下一公分之總熱通量)的分析中，不同綠屋頂的差異在 2019 年的夏天最為顯著，高維護綠屋頂與低維護綠屋頂差異達到 300Wh/m^2 以上，其餘季節則差異不明顯，皆在 130Wh/m^2 以內。
4. 在 $G_{2,\text{total}}$ (土壤底部之總熱通量)的分析中，主要以零維護進入室內方向的熱通量最大，可達 191Wh/m^2 ，而高維護的熱通量最小，可達 20Wh/m^2 ，可知土壤厚度可大幅影響進入室內的 $G_{2,\text{total}}$ 。除了 $G_{2,\text{total}}$ 外，當比較 G_1 與 G_2 的峰值差異時，大部分季節高維護綠屋頂的差異值最顯著，差異值可達 70.46W/m^2 ，其次是低維護綠屋頂的 58.24W/m^2 ，最後是零維護綠屋頂的 44.07W/m^2 ，可知土壤厚度在阻隔熱能上的重要性。
5. 在 $G_{3,\text{total}}$ (綠屋頂底部之總熱通量)的分析中，零維護仍舊有進入室內的熱通量， $G_{3,\text{total}}$ 為 47Wh/m^2 ，但低維護和高維護綠屋頂整日皆為離開室內方向的熱傳， $G_{3,\text{total}}$ 分別為 -48.5Wh/m^2 及 -31.8Wh/m^2 ，而上班時間離開室內方向的總熱通量以低維護最多，可達 19Wh/m^2 。
6. 若將裸露屋頂的熱通量與綠屋頂的熱通量 G_1 及 G_3 峰值進行比較，可發現綠屋頂的隔熱效果顯著。在 G_1 部分裸露屋頂上對照組熱通量為 168.63W/m^2 ，零維護為 83.21 W/m^2 ，低維護為 80.05W/m^2 ，而高維護為 72.11 W/m^2 ，可知綠屋

頂的隔熱效果。在 G₃ 部分，對照組為 168.63W/m^2 ，零維護為 13.63W/m^2 ，低維護為 0.98W/m^2 ，而高維護為 -1.30W/m^2 ，

7. 在成本部分(建置成本加維護成本，以五十年壽命週期計算)，零維護綠屋頂為 352.82元/m^2 ，低維護綠屋頂為 386.96元/m^2 ，高維護為 418.26元/m^2 。而在節省的電費當中，相對於裸露屋頂，零維護節省電費為 211.14元/m^2 ，低維護省 247.09元/m^2 ，高維護省 253.57元/m^2 。以現有的成本資料和節省的電費總和後，可以發現零維護綠屋頂成本是綠屋頂中最低的。

References

- Abdulkareem, S., Olumayode, O., Aweda, J. O., Abdulrahim, A. T., Ajiboye, T. K., Ahmed, I., & Adebisi, J. (2016). Investigation of Thermal Insulation Properties of Biomass Composites. *International Journal of Technology*, 7, 989.
<https://doi.org/10.14716/ijtech.v7i6.3317>
- Berardi, U. (2016). The outdoor microclimate benefits and energy saving resulting from green roofs retrofits [Article]. *Energy and Buildings*, 121, 217-229.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.021>
- Campell, G. S., & Norman, J. M. (1998). An Introduction to Environmental Biophysics (Second Edition). Springer-Verlag, Inc., New York.
- Cook, L. M., & Larsen, T. A. (2021). Towards a performance-based approach for multifunctional green roofs: An interdisciplinary review. *Building and Environment*, 188, 107489.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107489>
- D'Orazio, M., Di Perna, C., & Di Giuseppe, E. (2012). Green roof yearly performance: A case study in a highly insulated building under temperate climate. *Energy and Buildings*, 55, 439-451.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.09.009>
- Gao, Z., Russell, E. S., Missik, J. E. C., Huang, M., Chen, X., Strickland, C. E., Clayton, R., Arntzen, E., Ma, Y., & Liu, H. (2017). A novel approach to evaluate soil heat flux calculation: An analytical review of nine methods. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(13), 6934-6949.
<https://doi.org/10.1002/2017JD027160>
- Getter, K. L., Rowe, D. B., Andresen, J. A., & Wichman, I. S. (2011). Seasonal heat flux properties of an extensive green roof in a Midwestern US climate [Article].

- Energy and Buildings*, 43(12), 3548-3557.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.018>
- Gnatowski, T., Ostrowska-Ligęza, E., Kechavarzi, C., Kurzawski, G., & Szatyłowicz, J. (2022). Heat Capacity of Drained Peat Soils. *Applied Sciences*, 12(3).
- Gomes, M. G., Silva, C. M., Valadas, A. S., & Silva, M. (2019). Impact of Vegetation, Substrate, and Irrigation on the Energy Performance of Green Roofs in a Mediterranean Climate. *Water*, 11(10), Article 2016.
<https://doi.org/10.3390/w11102016>
- Hakimdavar, R., Culligan, P. J., Finazzi, M., Barontini, S., & Ranzi, R. (2014). Scale dynamics of extensive green roofs: Quantifying the effect of drainage area and rainfall characteristics on observed and modeled green roof hydrologic performance. *Ecological Engineering*, 73, 494-508.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.09.080>
- He, Y., Yu, H., Dong, N., & Ye, H. (2016). Thermal and energy performance assessment of extensive green roof in summer: A case study of a lightweight building in Shanghai. *Energy and Buildings*, 127, 762-773.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.016>
- Hsieh, C. I., Huang, C. W., & Kiely, G. (2009). Long-term estimation of soil heat flux by single layer soil temperature. *INTERNATIONAL JOURNAL OF BIOMETEOROLOGY*, 53(1), 113-123.
<https://doi.org/10.1007/s00484-008-0198-8>
- IPCC, 2023: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 36 pages. (in press)





Jim, C. Y. (2014). Passive warming of indoor space induced by tropical green roof in winter. *Energy*, 68, 272-282.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.105>

Karachaliou, P., Santamouris, M., & Pangalou, H. (2016). Experimental and numerical analysis of the energy performance of a large scale intensive green roof system installed on an office building in Athens. *Energy and Buildings*, 114, 256-264.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.055>

Karthika, R. B., Vidyapriya, V., Nandhini Sri, K. V., Merlin Grace Beaula, K., Harini, R., & Sriram, M. (2021). Experimental study on lightweight concrete using pumice aggregate. *Materials Today: Proceedings*, 43, 1606-1613.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.762>

Liang, h.-h., & Huang, K.-T. (2011). Study on rooftop outdoor thermal environment and slab insulation performance of grass planted roof. *International Journal of Physical Sciences*, 6.

Liebethal, C., Huwe, B., & Foken, T. (2005). Sensitivity analysis for two ground heat flux calculation approaches. *Agricultural and Forest Meteorology*, 132(3), 253-262.

<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2005.08.001>

Lin, Y.-J., & Lin, H.-T. (2011). Thermal performance of different planting substrates and irrigation frequencies in extensive tropical rooftop greeneries. *Building and Environment*, 46(2), 345-355. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.07.027>

Liu, K. K. Y., & Minor, J. (2005). Performance evaluation of an extensive green roof. *Greening Rooftops for Sustainable Communities*

Maia Pederneiras, C., Veiga, R., & de Brito, J. (2021). Physical and Mechanical Performance of Coir Fiber-Reinforced Rendering Mortars. *Materials*, 14(4).

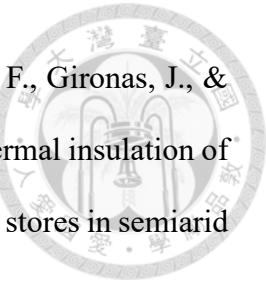
Parizotto, S., & Lamberts, R. (2011). Investigation of green roof thermal performance in temperate climate: A case study of an experimental building in Florianópolis city,



- Southern Brazil. *Energy and Buildings*, 43(7), 1712-1722.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.03.014>
- Peng, L. L. H., Yang, X., He, Y., Hu, Z., Xu, T., Jiang, Z., & Yao, L. (2019). Thermal and energy performance of two distinct green roofs: Temporal pattern and underlying factors in a subtropical climate. *Energy and Buildings*, 185, 247-258.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.12.040>
- Properties of Pumice. (2015-2023). In *Compare Rocks*. Retrieved from
<https://rocks.comparenature.com/en/properties-of-pumice/model-127-6>
- Quezada-García, S., Espinosa-Paredes, G., Polo-Labarrios, M. A., Espinosa-Martínez, E. G., & Escobedo-Izquierdo, M. A. (2020). Green roof heat and mass transfer mathematical models: A review. *Building and Environment*, 170, 106634.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106634>
- Rumšys, D., Bačinskas, D., Spudulis, E., & Meškėnas, A. (2017). Comparison of Material Properties of Lightweight Concrete with Recycled Polyethylene and Expanded Clay Aggregates. *Procedia Engineering*, 172, 937-944.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.105>
- Samah, H. A., Tiwari, G. N., & Nougblega, Y. (2020). Cool and Green Roofs as Techniques to Overcome Heating in Building and its Surroundings under Warm Climate. *International Energy Journal*, 20(3), 359-372.
- Sauer, Thomas J. and Horton, Robert, "Soil Heat Flux" (2005). Publications from USDA-ARS / UNL Faculty.1402.
<https://digitalcommons.unl.edu/usdaarsfacpub/1402>
- Scharf, B., & Zluwa, I. (2017). Case study investigation of the building physical properties of seven different green roof systems. *Energy and Buildings*, 151, 564-573. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.050>
- Schiavoni, S., D'Alessandro, F., Bianchi, F., & Asdrubali, F. (2016). Insulation materials



- for the building sector: A review and comparative analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 988-1011.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.045>
- Scolaro, T. P., & Ghisi, E. (2022). Life cycle assessment of green roofs: A literature review of layers materials and purposes. *Science of The Total Environment*, 829, 154650.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154650>
- Smalls-Mantey, L., DiGiovanni, K., Olson, M., & Montaldo, F. A. (2013). Validation of two soil heat flux estimation techniques against observations made in an engineered urban green space. *Urban Climate*, 3, 56-66.
<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2012.11.001>
- Squier, M., & Davidson, C. I. (2016). Heat flux and seasonal thermal performance of an extensive green roof. *Building and Environment*, 107, 235-244.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.07.025>
- Tang, M., & Zheng, X. (2019). Experimental study of the thermal performance of an extensive green roof on sunny summer days. *Applied Energy*, 242, 1010-1021.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.153>
- Teemusk, A., & Mander, U. (2010). Temperature regime of planted roofs compared with conventional roofing systems. *Ecological Engineering*, 36(1), 91-95.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.09.009>
- Theodosiou, T. G. (2003). Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique. *Energy and Buildings*, 35(9), 909-917.
[https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(03\)00023-9](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(03)00023-9)
- Vaiciene, M., Malaiskiene, J., & Kizinievic, O. (2019). Possibilities of Plastic Waste Application in Expanded Clay Concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 471(3), 032009.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/471/3/032009>



- Vera, S., Pinto, C., Tabares-Velasco, P. C., Bustamante, W., Victorero, F., Gironas, J., & Bonilla, C. A. (2017). Influence of vegetation, substrate, and thermal insulation of an extensive vegetated roof on the thermal performance of retail stores in semiarid and marine climates. *Energy and Buildings*, 146, 312-321.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.037>
- Vermiculite Data. (2023). In *The Vermiculite Association: Resources*. Retrieved from <https://www.vermiculite.org/>
- Wang, J., & Bras, R. L. (1999). Ground heat flux estimated from surface soil temperature. *JOURNAL OF HYDROLOGY*, 216(3-4), 214-226.
[https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00008-6](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00008-6)
- Zhou, L. W., Wang, Q., Li, Y., Liu, M., & Wang, R. Z. (2018). Green roof simulation with a seasonally variable leaf area index. *Energy and Buildings*, 174, 156-167.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.06.020>
- 內政部建築研究所. (2015). 屋頂綠化技術手冊.

Appendix A: 儀器圖片

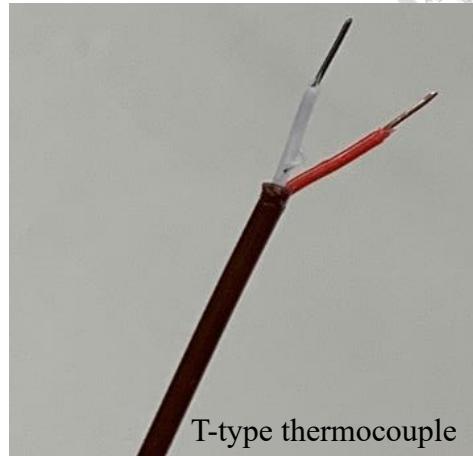
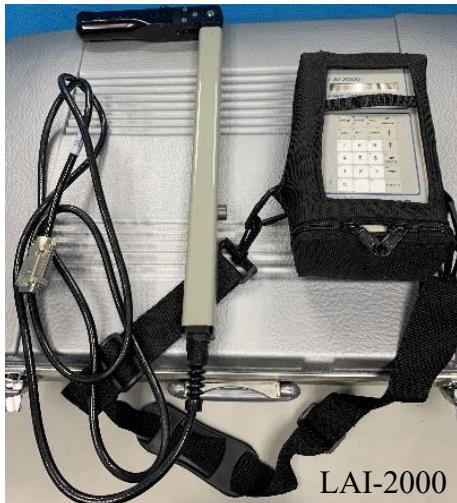


圖 A1 測量之儀器圖片

Appendix B：阻尼深度 D 與熱傳導度 K 計算值

在研究當中，首先計算三種不同維護程度的綠屋頂，各阻尼深度是多少。在式子(3.3.5)中，阻尼深度 D 值的公式如下：

$$D = \sqrt{\frac{2\alpha}{w}} = \frac{z_1 - z_2}{\ln(A_2) - \ln(A_1)} \quad (B1)$$

其中 α 為熱擴散係數(thermal diffusivity)， A_1 和 A_2 為在土壤深度 z_1 及 z_2 下的溫度振幅。表 B1 為不同年份不同季節下各維護程度所推估的 D 值。

表 B1 阻尼深度(cm)

季節		2019	2020
春天	零維護	9.03	12.87
	低維護	9.96	8.62
	高維護	16.31	8.30
夏天	零維護	13.11	15.74
	低維護	15.22	9.13
	高維護	12.32	9.44
秋天	零維護	12.23	18.66
	低維護	8.39	10.52
	高維護	10.98	15.90
冬天	零維護	11.53	20.11
	低維護	9.26	11.67
	高維護	9.56	16.28



得出 α 值後即可利用式子(3.3.2)去推 K 值(thermal conductivity)為何。若土壤由 n 種材料組成，則濕土壤的體積熱容量 $\rho_s c_s$ 可以利用混合公式如下：

$$\rho_s c_s = \theta \rho_w c_w + \emptyset_1 \rho_1 c_1 + \emptyset_2 \rho_2 c_2 + \dots + \emptyset_n \rho_n c_n \quad (D2)$$

其中 θ 為體積含水量，不同時段擁有不同的土壤含水量， \emptyset 為各材料的體積比例，各材料性質則由表 3 計算， $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ 為各土壤材料的 bulk density， c_1, c_2, \dots, c_n 為各乾土壤材料的比熱，有了 α 及 $\rho_s c_s$ 之後，即可推得熱傳導度 K 值。

Appendix C: 低維護、高維護綠屋頂的預測熱通量

圖 C1 及圖 C2 為 2019 年及 2020 年低維護綠屋頂利用半階微分法所預測的熱通量及解析解預測的熱通量($z=1\text{cm}$)比較圖。圖中可看出解析解所預測的熱通量在清晨時比半階微分法預測的高，在約白天 9 點到 12 點的位置預測的較低，最後在晚上 6 點之後，預測的離開熱通量更多，與第四章零維護綠屋頂分析的結果相同。圖 C3 及圖 C4 則為 2019 年及 2020 年高維護綠屋頂利用半階微分法所預測的熱通量及解析解預測的熱通量比較圖。高維護的綠屋頂分析所得到的結果與低維護綠屋頂分析結果相同。

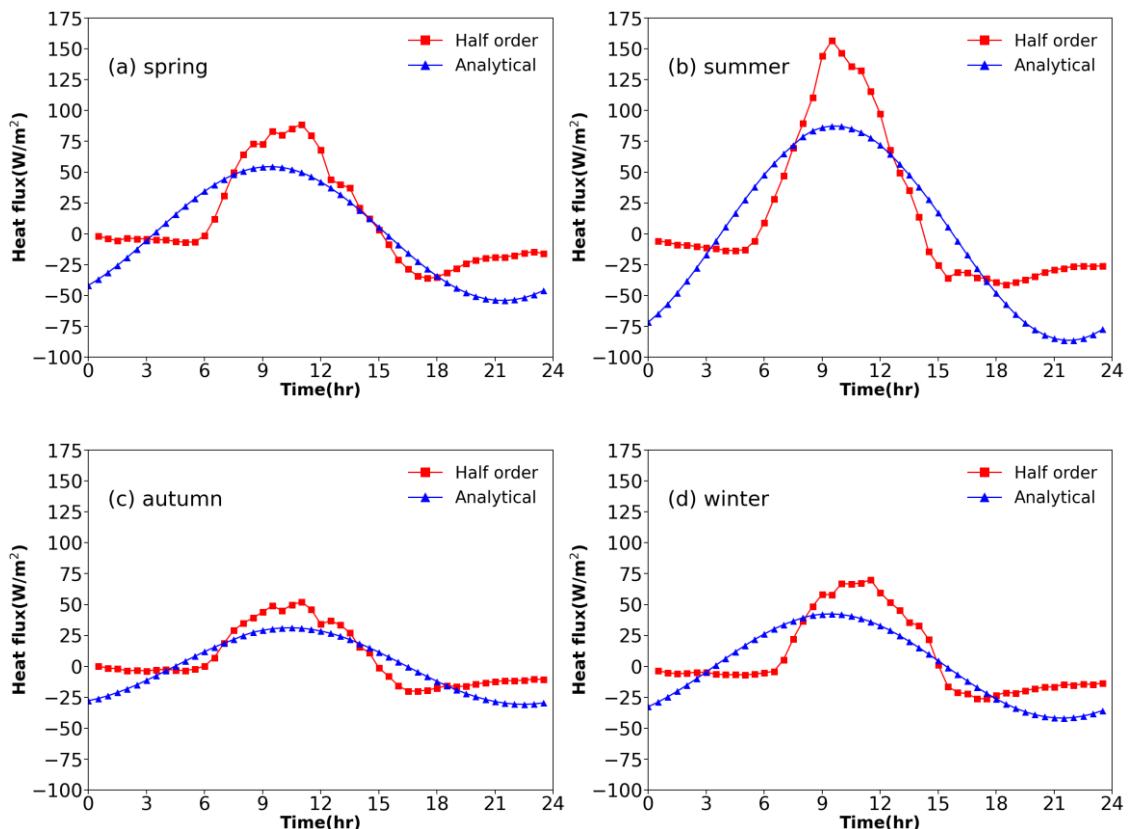


圖 C1 2019 年低維護熱通量解析解預測值和半階微分法預測值比較圖

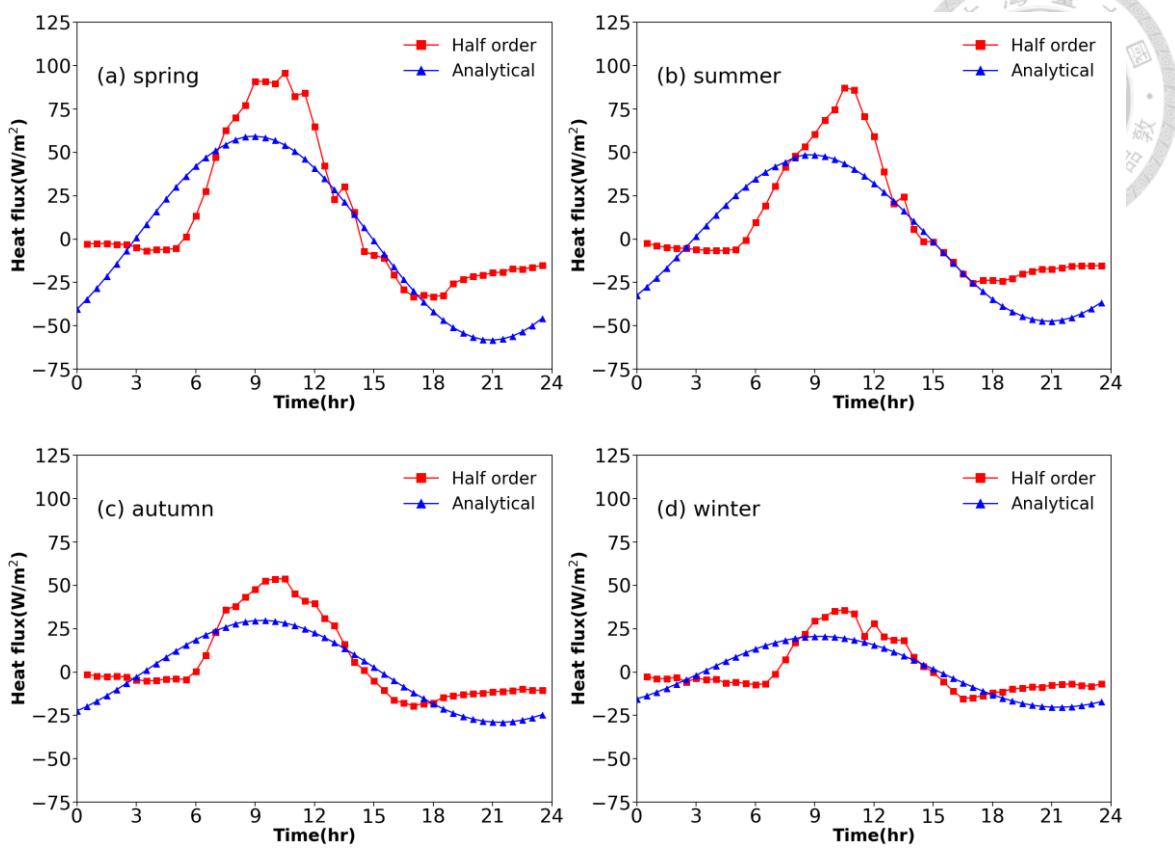


圖 C2 2020 年低維護熱通量解析解預測值和半階微分法預測值比較圖

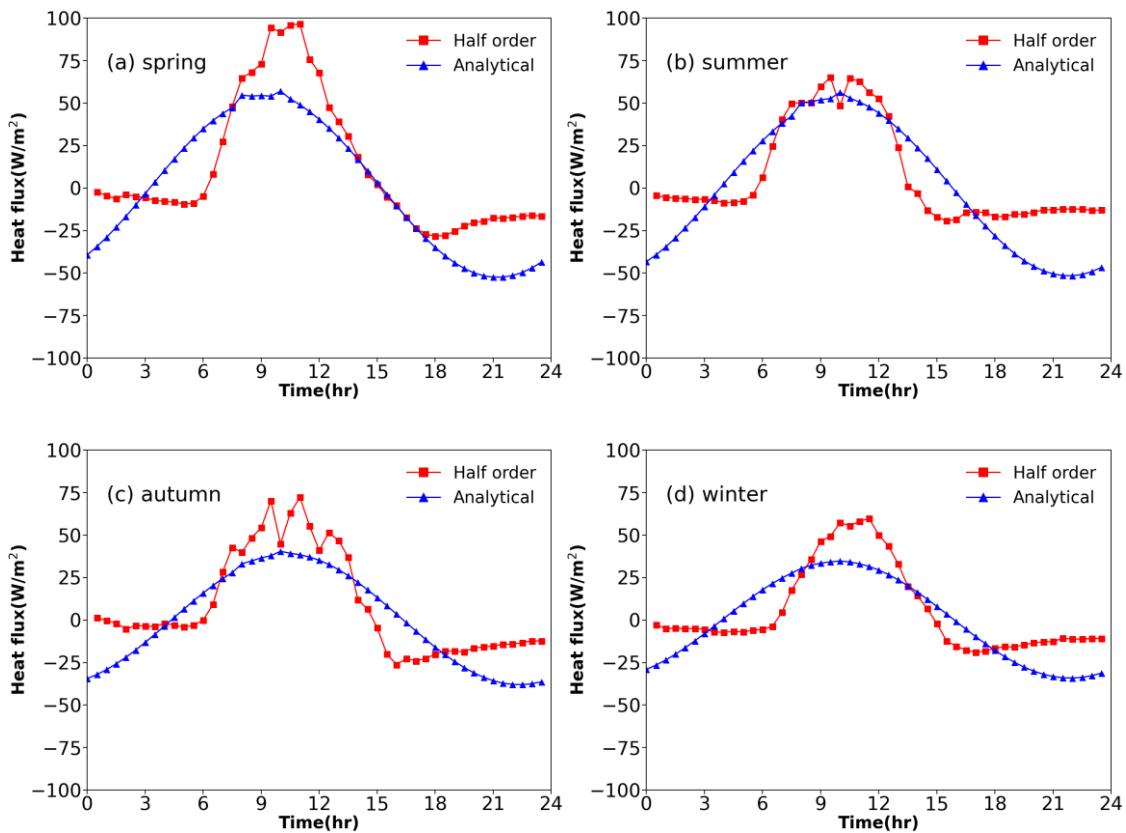


圖 C3 2019 年高維護熱通量解析解預測值和半階微分法預測值比較圖

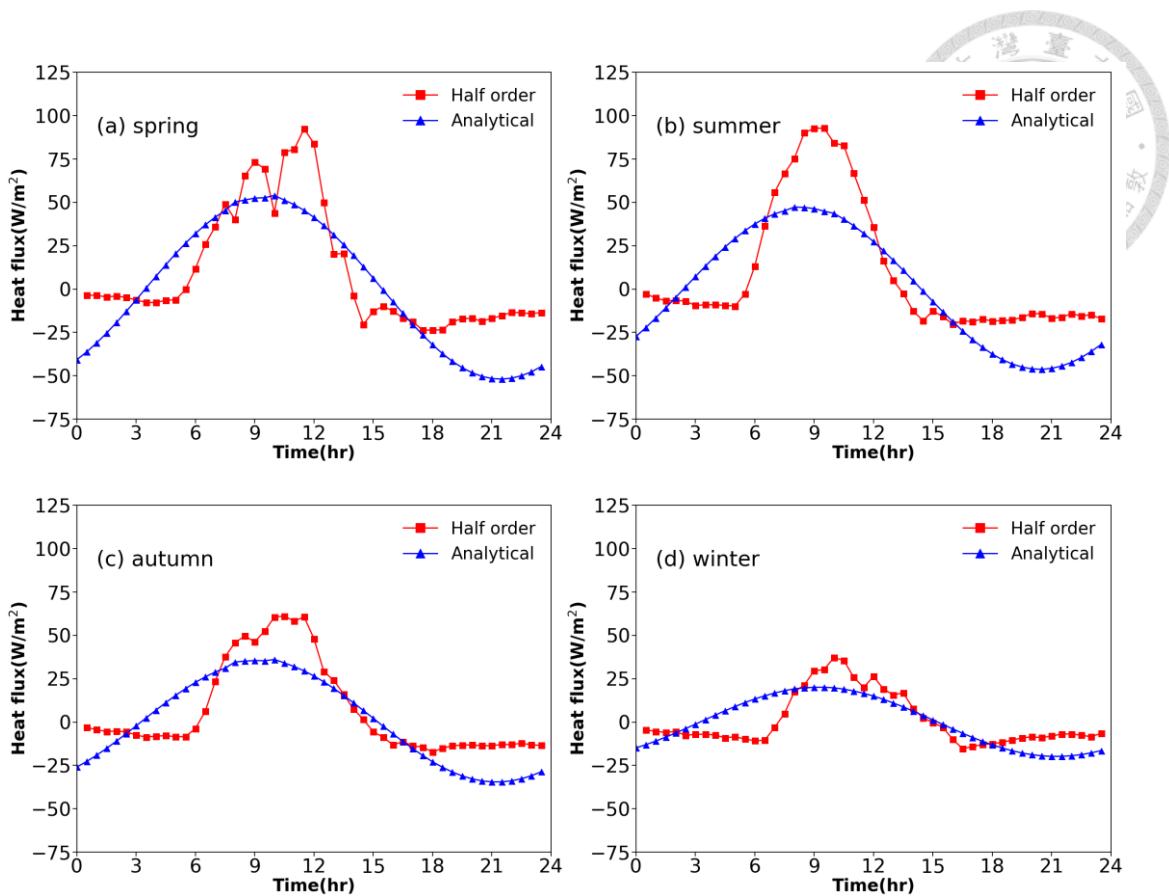


圖 C4 2020 年高維護熱通量解析解預測值和半階微分法預測值比較圖

Appendix D: 太陽輻射



圖 D1 與圖 D2 分別表示 2019 年和 2020 年平均一日太陽輻射隨時間變化圖，NR 為淨輻射。在 2019 年短波輻射的部分，在夏天有最大的高峰值 652.78 W/m^2 ，而冬天有最小值 410.89 W/m^2 ，可知夏天是最需要綠屋頂阻隔熱的季節。在長波入射及輻射部分，可以看到隨著時間的變化較為平穩，相對短波輻射來說較無變化，也因而淨輻射的變化趨勢與短波輻射入射的趨勢較為相同。另外圖 D1 中亦可觀測到淨輻射部分，因平均長波輻射量比長波入射量大，可以發現在白天時刻受到短波影響而入射的輻射多，晚上則因為長波輻射多而導致淨輻射為負值，四個季節皆有此趨勢。在 2020 年短波輻射部分，夏天時有最大尖峰輻射量 731.87 W/m^2 ，而冬天有最小尖峰輻射量 219.35 W/m^2 ，得到的趨勢與 2019 年相同，不過 2020 年的夏天顯得更熱。另外由此圖中亦可觀測到淨輻射部分，白天時刻受到短波影響導致淨輻射為正值，晚上則長波輻射主導使得淨輻射為負值，與 2019 年的結果相同。

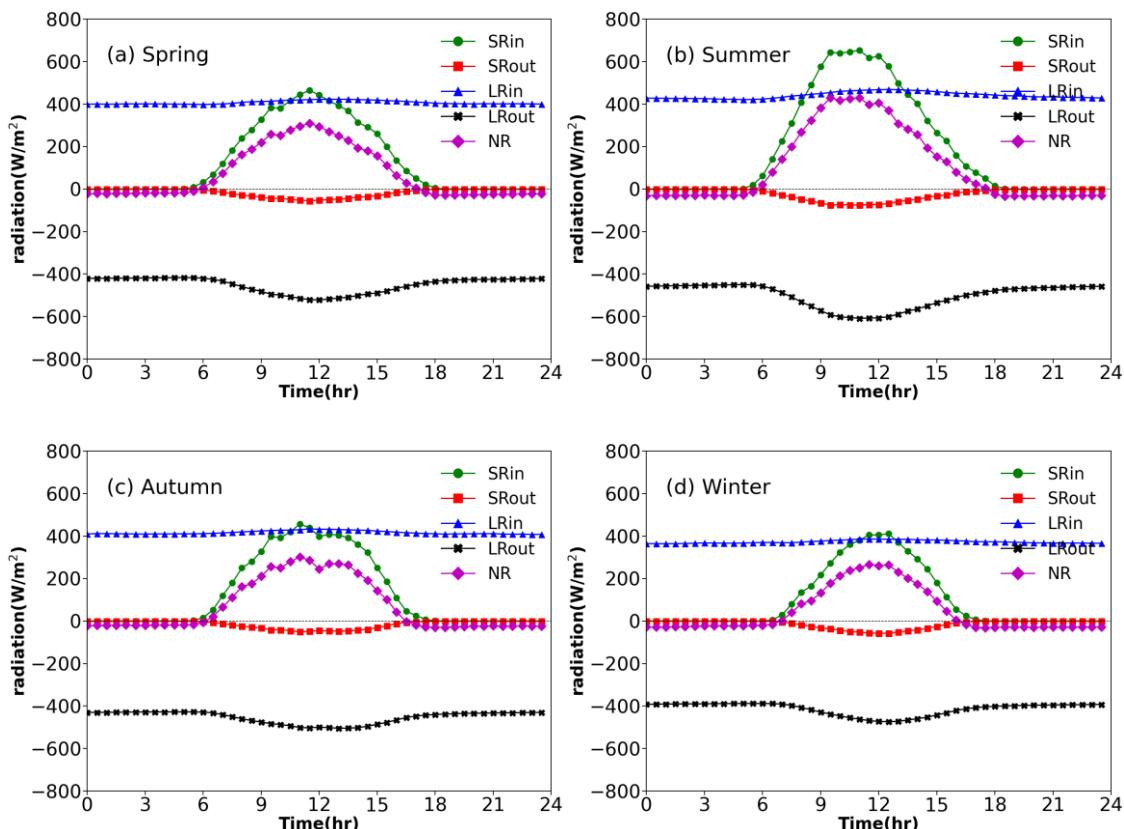


圖 D1 2019 年太陽輻射之日變化圖

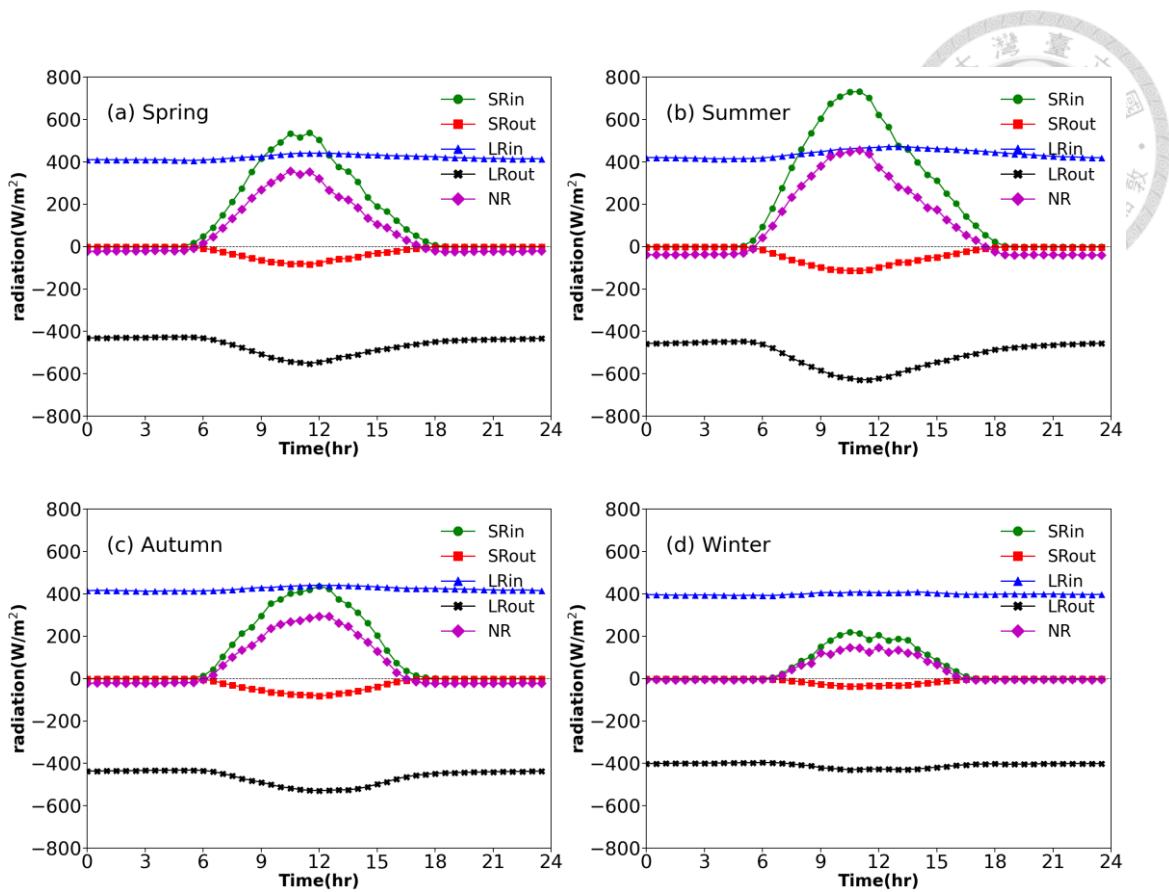


圖 D2 2020 年太陽輻射之日變化圖

Appendix E: 土壤含水量



圖 E1 與圖 E2 分別為 2019 年和 2020 年土壤含水量之日變化圖。由圖中可以看到體積含水量在一天各個時刻幾乎維持定值，撇除掉因為澆灌而產生的突然升高，2019 年在各個季節，高維護綠屋頂維持 0.56 左右，低維護綠屋頂維持在 0.5 與 0.6 之間，零維護綠屋頂因為無澆灌，每個季節土壤體積含水量較不同，落在 0.25 至 0.45 之間。2020 年高維護綠屋頂維持 0.45 到 0.6 左右，低維護綠屋頂維持在 0.3 與 0.55 之間，零維護綠屋頂落在 0.1 至 0.3 之間。相較於 2019 年的資料，2020 年土壤濕度較低。由 Getter et al. (2011) 知土壤含水量會影響溫度，使得溫度較低，高維護綠屋頂土壤溫度較低亦受高土壤含水量的影響。

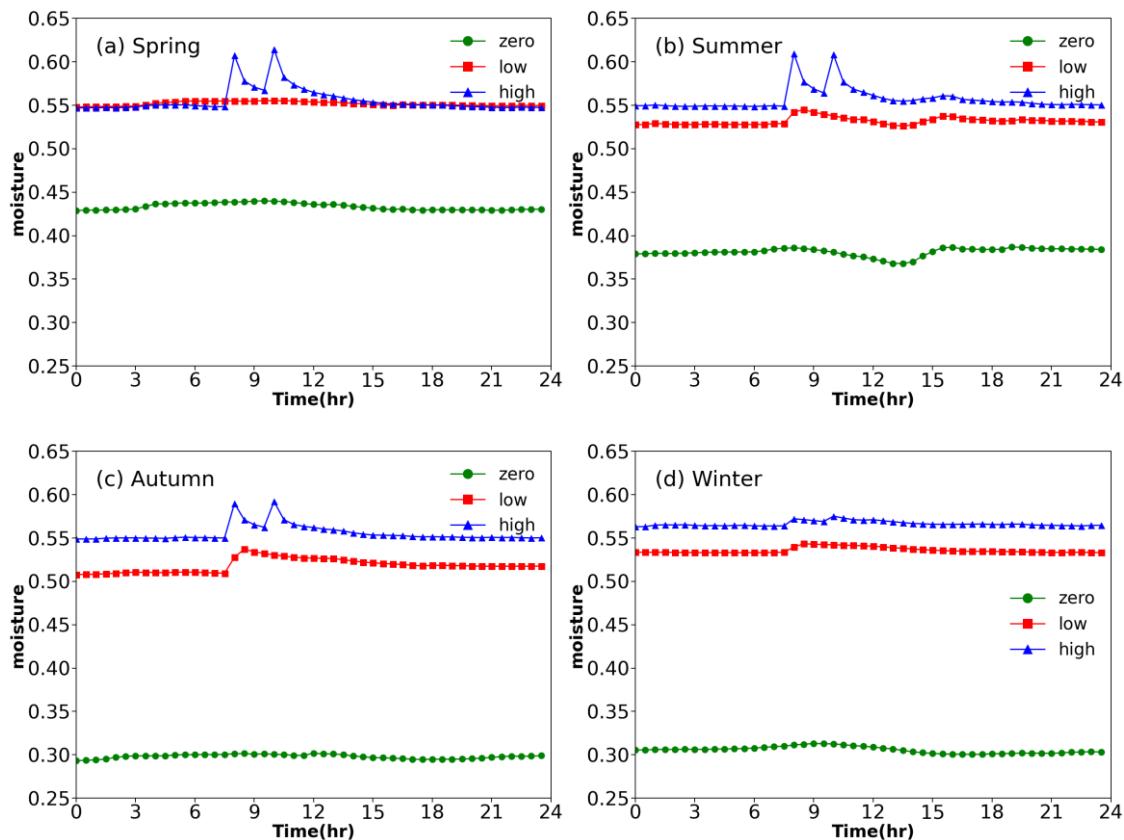


圖 E1 2019 年土壤含水量之日變化圖

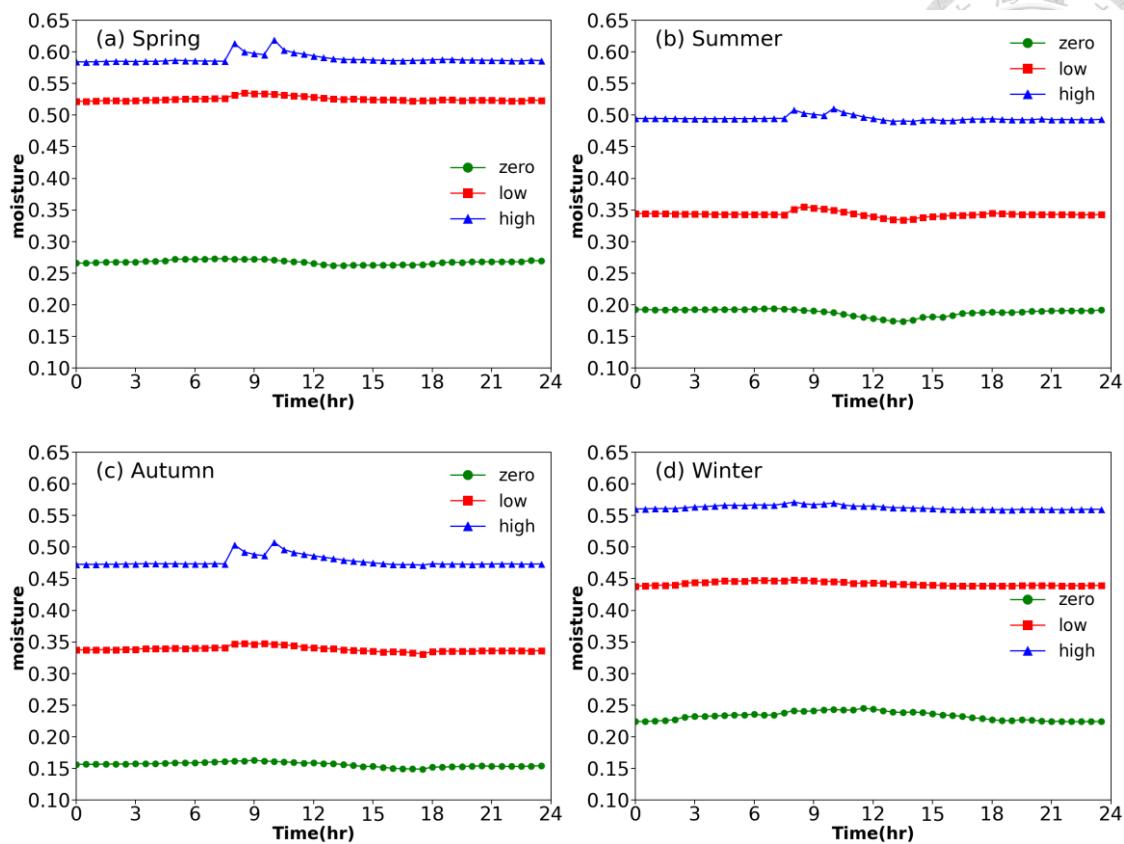


圖 E2 2020 年土壤含水量之日變化圖