

# 發泡煉石薄層屋頂熱效應之研究

## Thermal Performance of LECA Thin-Layer Roof

黃宜瑜<sup>1</sup>  
Yi-Yu Huang

馬天日<sup>2</sup>  
Tien-Jih Ma

朱雅雯<sup>3</sup>  
Ya-Wen Zhu

### 【中文摘要】

薄層屋頂為有效降低建築物能源消耗的重要方法之一。過去薄層屋頂熱效應相關研究多集中在整體綠屋頂對於裸露屋頂表面溫度之降溫效果，鮮少研究單獨針對土深及土壤中發泡煉石比例進行降溫效能之探討。過去研究結果證實綠屋頂可有效降低裸露屋頂表面溫度約250C，其中，較高比例的功效係歸功於土壤介質層的作用，而非植物層的作用。因此，如何發展出一個量輕、降溫效果佳的介質層便十分值得研究。

本實驗地處亞熱帶氣候區，實驗基地位於台中市西屯區東海大學男生宿舍30棟5樓平屋頂上。實驗設計共分為二個階段。第一階段探討不同深度之純土薄層屋頂，對於裸露屋頂表面溫度與熱振幅減少之效果。研究結果發現，從10 cm、15 cm、20 cm與25 cm純土薄層屋頂之邊際降溫效果來看，10 cm純土深度具有最高之邊際降溫效果。10 cm純土薄層屋頂可有效減少裸露屋頂表面溫度17.4110C（從52.6730C降至35.2620C），可有效減少55.75%裸露屋頂表面溫度之熱振幅量。第二階段以10 cm純土深度為基準，探討混入不同比例發泡煉石之薄層屋頂，對於裸露屋頂表面溫度與熱振幅減少之效果。研究結果發現混入1 cm與4 cm發泡煉石的薄層屋頂，其降溫效果比純土薄層屋頂更優化1.4170C（從36.2270C到34.8100C）與0.3770C（從36.2270C到35.8500C）。唯其熱振幅減少之效果比純土薄層屋頂劣化1.16%（從62.88%到61.72%）與4.50%（從62.88%到58.38%）。相關研究成果可應用在薄層屋頂介質層的選配。

【關鍵字】薄層屋頂，熱效應，介質深度，發泡煉石比例

---

<sup>1</sup>東海大學景觀學系助理教授

<sup>2</sup>東海大學景觀學系研究生，通訊作者

<sup>3</sup>東海大學景觀學系研究生

地址：台中市西屯區台灣大道四段 1727 號

電話：0912-751-260

E-mail：yyhuang@thu.edu.tw

## **【Abstract】**

Thin-layer roofs are one of the most important ways to reduce the cooling energy load of buildings. In the past, the study of thermal performance of the thin-layer roofs mainly focused on the temperature reduction of bare rooftop by the whole thin-layer roof systems, few studies have explored the separate thermal performances attributed by different soil depth and different proportion of LECA content in the soil. Previous studies have confirmed that the extensive green roofs can effectively reduce the temperature of bare rooftop by about 25<sup>0</sup>C, among them, a higher degree of temperature reduction is attributed by the growth medium layer rather than the plant layer. Therefore, to develop a growth medium of lighter weight with better temperature reduction effects is worthy of further exploration.

The experimental site is located on the flat rooftop of fifth floor of Male Dormitory 30, Tunghai University, Xitun District, Taichung City, and in a subtropical monsoon climate. The experiment was conducted in two stages. In the first stage, we explored the effects of different depths of pure soil on the temperature reduction and heat amplitude reduction of bare rooftop by thin-layer roofs. The results demonstrated that the thin-layer roof of 10 cm depth of pure soil has the highest marginal temperature reduction effects, and can effectively reduce temperatures and alleviate the heat amplitude of bare rooftop by 17.411<sup>0</sup>C (from 52.673<sup>0</sup>C down to 35.262<sup>0</sup>C) and 55.75 %, respectively. In the second stage, we explored temperature reduction and heat amplitude reduction of bare rooftop with different proportion of LECA based on the depth of 10 cm growth medium. The results indicated that the temperature reduction of bare rooftop attributed by the thin-layer roofs mixed with 1 cm and 4 cm LECA is superior than the pure soil thin-layer roof by 1.417<sup>0</sup>C (from 36.227<sup>0</sup>C to 36.227<sup>0</sup>C) and 0.377<sup>0</sup>C (from 36.227<sup>0</sup>C to 35.850<sup>0</sup>C). However, the heat amplitude reductions of bare rooftop attributed by 1 cm and 4 cm LECA were worsened than pure soil thin-layer roof by 1.16% (from 62.88% to 61.72%) and 4.50% (from 62.88% to 58.38%). These findings can help making better decision on the mix of growth medium to achieve optimal thermal performance.

**【Keywords】** thin-layer roofs, thermal performance, medium depth, last eukaryotic common ancestor (LECA) proportion

## 壹、前言

隨著都市化的發展，人口和建築迅速擴張，建築物高度集中，引發許多環境問題（Wong et al., 2002）。近年台灣夏季氣候屢創新高，近 8 年來年均溫持續上升，因此如何降低城市溫度將是重要之議題。而這問題並非單由於全球暖化影響，而是人為過度開發導致綠地減少，進而引發都市「熱島效應」所致（林憲德，2005）。就各都市每人平均擁有的公園綠地面積來說，台北市 4.95 平方公尺、高雄市 4.88 平方公尺、台中市 8.72 平方公尺，比起歐美都市每人可擁有約 30 平方公尺的綠化面積來說，台灣都市綠地面積嚴重不足（黃國倉，2011）。Renato 等人（2005）指出，道路、建築物面積的增長，使城市綠地面積減少。最令人擔憂的是，空氣品質惡化和都市平均氣溫的升高。過度都市化增加了都市的儲熱量，降低了與周邊地區的熱交換，城市中有更多的熱能被俘獲，這種現象稱為「熱效應（Thermal Effects）」，可將氣溫提高至 10°C 以上。

屋頂約佔整體城市面積 20%。在降低建築物能源消耗和減輕所造成的環境問題方式方面，常見的有採用冷卻屋頂（即白色或反射型）與綠屋頂兩種方式（Ulubeyli & Arslan, 2017）。這兩種方式都可以降低屋頂表面溫度，從而降低釋放大氣中的熱通量（Kolokotsa et al., 2013）。薄層綠屋頂被認為是降低能源消耗（如：冷氣、暖氣等）與改善空氣汙染（如：透過植被蒸散作用，減少二氧化碳）最有效的技術，並能最大限度地彌補都市中綠地的不足（Clark & Adriaens, 2008）。此外，綠屋頂也具有減緩都市淹水問題的有效手段。Dunnett 與 Nolan（2004）的研究指出，具有植栽的綠屋頂可有效保留 82.8% 的雨水，因此，屋頂綠化不僅可減少雨水徑流量，還可保留水份以利水資源再利用。Fioretti et al.（2010）研究指出綠屋頂可截流雨水，改變都市徑流峰值的大小和時間。

Wong（2003）指出屋頂綠化可以有效地減緩熱效應產生。國內學者林寶秀（2010）指出，透過夏季微氣候觀測建築物屋頂樓板溫度，一天之中以中午時段（12:00~15:00）最高達 50°C 以上，而入射短波輻射是造成屋頂表面溫度上升的主因。透過屋頂綠化提供屋頂額外的隔熱效果，有助於減少建築物之能源消耗（Coma, et al., 2016）。並且綠屋頂在炎熱的天氣中，也可避免高熱波動降低材料的熱應力，而保護屋頂，免受極端溫度的影響（Teemusk, 2009），提高屋頂的耐久性（Kosareo & Ries, 2007）。近年來，有許多關於綠屋頂系統（GRS）的研究指出，綠屋頂可提供人們多重好處，如：城市森林面積的增加、減少徑流、減少都市熱島效應、延長屋頂壽命、降低噪音、保護生物多樣性和建築節能（Squezada et al., 2017）。

在密集的城市中心，充足的綠色表面是防止能源浪費的最好方式之一。不幸的是，由於市中心地面的發展，越來越多的綠地正在消失，因此，將平屋頂表面進行綠化成為一個有效的選擇（Haefeli et al., 1998）。Niachou 等（2001）的研究指出，綠屋頂可有效降低屋頂樓板的溫度與熱振幅，有助於建築物夏季冷氣消耗與冬季的暖氣消耗，因此可節省不少建物能源消耗。影響綠屋頂降溫的因素包括介質的熱性能和深度，以及植被的

類型、株高和葉面積指數等 (Sailor, 2008)。綠屋頂的冷卻效果，是由於土壤蒸發、植物蒸騰、和植物遮蔽以及隔絕屋頂樓板的綜合作用 (Harazono, 1990)。

Getter et al. (2009)、Oberndorfer et al. (2007)、Wong et al. (2003) 及 Feng et al., (2010) 等指出綠屋頂具有截流雨水、節能減熱、減少地表逕流、延長屋頂壽命、提升空氣品質、減緩溫室效應、增加綠覆面積、增加建築美觀等效益，故值得在國內推動薄層綠屋頂。但過去薄層綠屋頂熱效應相關研究多集中在整體綠屋頂對於屋頂樓板表面溫度之降溫效果，鮮少研究單獨針對土深及土壤中發泡煉石 (LECA) 比例進行降溫效能之探討。Stovin 等 (2015) 指出，加入發泡煉石 (LECA) 之綠屋頂，因底部密度較低、透光率較高和透水性強，而產生底部多孔隙與植物根部產生結合作，使植物生長更好。又因發泡煉石孔隙比例高，與純土相比，應可增加熱傳導的阻力，進而降低屋頂樓板溫度。因此，如何發展出一個重量輕、降溫效果佳的介質層便十分值得研究。

## 貳、文獻回顧

### 一、薄層綠屋頂之熱效應

Razzaghamanesh 等 (2016) 的研究發現，使用低反照率的材料 (low albedo materials) 替代植被表面，是讓城市產生熱效應、進而促使城市溫度升高的主要原因之一。綠屋頂之特性為增加反照率和蒸散量，此舉可將城市的環境溫度降低多達 3°C (Smith & Roebber, 2011)。在 Razzaghamanesh 等 (2016) 的研究中，以澳洲阿德萊德城作為研究對象，進行數值模擬以估計減少熱效應的潛力。結果顯示現有的低反照率材料如瀝青、金屬屋頂和磚路面，會增加都市熱效應。城市發展缺乏自然植被，也會導致城市氣溫上升。綠屋頂的實證研究顯示，依據介質類型和深度的不同，綠屋頂白天時可以降溫可 2~5°C，夜晚時可比周圍空氣溫度高出 3~6°C。Lie 等 (2014) 研究 Baltimore-Washington 市區綠屋頂減緩熱島效應的結果指出，若綠屋頂架設率達到全市屋頂的 30% 時，可有效降低熱島效應約攝氏 1°C。Yang (2017) 等指出，夏季時綠屋頂可讓室內溫度維持在 20°C 至 30°C 之間。Wong 等 (2002) 在新加坡的實驗結果指出，由於土壤溼度的隔熱效果與植栽的遮蔽作用，植栽層下方的表面溫度比屋頂樓板表面溫度低，而且綠屋頂最多可減少屋頂表面溫度 30°C。Onmura (2001) 在日本草皮屋頂花園降溫研究中，發現日間樓板表面溫度可從 60°C 降低至 30°C，減少 50% 的熱通量。Liu & Baskaran (2003) 在加拿大的實驗指出，綠屋頂每日溫度波動僅 6°C，與裸露屋頂相差 45°C。Liu (2004) 指出，綠屋頂在夏日最高降低樓板溫度 40°C，並減少 70%~90% 的熱通量。Foustalieraki (2017) 在希臘的實驗指出，綠屋頂可降低屋頂樓板溫度約 21.9°C，並且可降低室內空氣溫度 1.1°C，可讓建築物能源消耗總體節能 15.1%。

綠屋頂之熱效應議題，世界各地均有學者進行研究。在各種不同氣候條件下，綠屋頂對於屋頂樓板溫度的下降是非常有幫助的。相關文獻本研究整理如下 (表 2-1)：



表 2-1、綠屋頂降溫相關研究之整理

| 作者/年份/氣候類型                       | 綠屋頂組成   | 研究結果   |
|----------------------------------|---|--|
| Onmura/2001/溫帶海洋氣候               | 草坪花園的大小為 4m×9m，包括排水層和防根層，介質層（純土）總厚度約為 8cm。草坪的厚度約為 3 cm。                 | 透過草坪花園，日間樓板表面溫度可從 60°C 降低至 30°C，並減少熱通量 50%。  |
| K.L. Getter et al./2011/溫帶大陸濕潤氣候 | 將排水墊置於防根層上，然後放置防水羊毛(防水層)，接著鋪設介質層，該介質層為 5cm，介質層由熱膨脹石板、沙子和有機物質組成。         | 綠屋頂在夏日最多可降低屋頂樓板 20°C，熱振幅可降低 67%；秋天可降低 5°C，熱振幅可降低 13%   |
| Orazio & Perna/2012/溫帶氣候         | 介質層之土壤由瀝青和堆肥所組成。  | 在炎熱的夏天，與裸露屋頂相比，綠色屋頂的表面溫度降低了 10°C   |
| Eksi et al. /2017/溫帶大陸氣候         | 綠屋頂組成包含保護層、排水層、過濾層、介質層、植栽層。介質層由 85%的熱膨脹石，與 15%有機物（堆肥）的組合。               | 在夏季時，屋頂樓板的表面比綠屋頂的表面溫度高出 13°C。  |
| Jim et al./2011/亞熱帶氣候            | 介質層，由 80cm 的底土和 20cm 的表層土組成，土壤內含成熟的堆肥，為樹木提供了充足的生根室。                     | 綠屋頂在春季最多降低 26.8°C、夏季降低 26.8°C、秋天降低 24°C、冬天降低 19.7°C。   |
| Jim et al./2012/亞熱帶氣候            | 綠屋頂組成包含防根墊、排水層（2.5cm）、過濾層、保水層(5cm)和介質層（5cm）。介質層由土壤混合 20%成熟堆肥混合的礦物土壤所組成。 | 綠屋頂每天最高可降溫 5.2°C，植栽上方 10 公分處環境溫度約降 0.7°C   |
| 劉文燦/2014/亞熱帶氣候                   | 綠屋頂組成包含保護層、排水層、過濾層、介質層、植栽層。介質層由輕質介質：泥炭土、珍珠石、砂質壤土所組成。                    | 環境溫度越高，具有植栽薄層綠屋頂的效果比裸露土壤薄層屋頂更有效，溫度效果依序為:非洲鳳仙花（1.40 至 4.46°C）、樹蘭（1.37 至 3.32°C）、紫藤（1.10 至 3.29°C）、百慕達草（0.45 至 1.87°C） |

|                              |   |   |
|------------------------------|---|---|
| Yang et al./2017/亞熱帶季風氣候     | 綠屋頂組成包含保護層、排水層、過濾層、植栽層、介質層(約4cm厚,由泥土、粉狀珍珠岩、蛭石骨料和有機肥料組成)。  | 透過綠屋頂架設,在夏季可讓室內溫度維持在20°C至30°C之間。  |
| Sonne/2006/副熱帶濕潤氣候           | 介質層由土壤組成,並種植15cm到20cm植物和高達約60cm的當地植被。   | 夏季時,屋頂表面的最大平均溫度為54°C,而綠屋頂表面平均溫度為33°C。並指出透過架設綠屋頂,最多可降低屋頂表面22°C。              |
| Alvizuri et al./2017/副熱帶濕潤氣候 | 綠屋頂組成包含保護層、排水層(2mm)、過濾層、介質層(1.5cm至5cm)(純土)、植栽層。綠屋頂組成包含保護層、排水層、過濾層、植栽層、介質層(約4cm厚,由泥土、粉狀珍珠岩、蛭石骨料和有機肥料組成)。 | 綠屋頂的面溫度明顯低於黑色瀝青屋頂16°C。  |
| Liu and Baskaran/2003/寒帶氣候區  | 綠屋頂裝置組成包含防水層、排水層、過濾層、介質層(15cm純土)、植栽層。   | 在春季和夏季,每日屋頂溫度波動範圍為45°C,而綠屋頂將溫度波動降低至6°C。夏天屋頂樓板可以達到70°C,但在綠屋頂測量之溫度,很少能達到30°C。 |
| Wong et al./2003/熱帶雨林氣候      | 綠屋頂組成包含保護層、排水層、介質層(純土)、植栽層  | 植栽對日照的遮蔽作用,使得植栽層下方表面溫度低於裸露的鋪面,屋頂綠化最多可減少屋頂表面溫度30°C。                          |

根據過去研究成果,綠屋頂具有顯著的降溫效果,然鮮少文獻單獨探討土壤深度變化對降溫效果之影響,也沒有文獻探討如何利用發泡煉石發展重量更輕、降溫效果更好的綠屋頂栽培介質。

## 二、發泡煉石相關研究

發泡煉石重量非常輕,且具有一定的保水力和儲存營養之功效(Dunnett & Kingsbury, 2008),薄層綠色屋頂之介質層需要輕便、物理穩定以及排/保水性良好,使

植物根部水份不會過度飽和為主要目標 (Rowe et al., 2006)。基於這些因素，目前薄層綠屋頂之研究為了減輕屋頂載重或植栽生長，多運用以礦物為基礎的組成成分為主 (Beattie & Berghage, 2004)，例如：再生破碎磚、屋面瓦、鋼廠渣和輕膨脹粘土骨料 (LECA)。Stovin 等 (2015) 運用三種介質物作為基底，分別為 Alumasc ZinCo Sedum Substrate (SCS)、Alumasc ZinCo Heather & Lavender Substrate (HLS)、以及 Lightweight Expanded Clay Aggregate (LECA)，比較其排/保水特性、蒸散率和植物生長情形。研究結果顯示，加入發泡煉石 (LECA) 之綠屋頂，因底部密度較低、透光率較高和透水性強，而產生底部多孔隙與植物根部的結合作用，跟在生長在 HLS 與 SCS 中的景天科植物相比，在 LECA 介質中生長的景天科植物更為茂密。LECA 是一種輕質，低密度的基材，其特點是孔隙率高、有機物含量高，因此植栽會得到更多的養分。Berretta (2014) 指出 LECA 具有較高的有機物含量，並且使綠屋頂之底層和上層間的含水量具顯著的差異。另外 LECA 的高孔隙率也會導致綠屋頂中水分含量的快速變化，使介質層容易乾燥。Sung (2012) 進行實驗，在 1 公升的盆中放置 LECA 測試含水量之變化，發現第一天盆中含水量直落為 2.1%，而到第二天盆中含水量為 0.0%，完全乾燥狀態。因此建議使用 LECA 時，應與其他材料混合，並用土壤作修正。根據過去文獻整理，發泡煉石用於綠屋頂的優點為 1.輕重量、2.有機質含量高、3.孔隙率大對根部生長好。缺點是保水性差，故建議一定要與其他土壤做混合，並種耐旱植物。

由上述文獻回顧得知，發泡煉石含水性較差，因此本研究將土壤與發泡煉石進行混合，希望研究出既可促進降溫效果降溫效果、又可減輕屋頂載重的介質。過去文獻關於發泡煉石運用在薄層綠屋頂之研究，多集中在探討排/保水量與植物生長作用為研究重點，鮮少探討發泡煉石與薄層屋頂之降溫關係。

## 參、研究方法

### 一、實驗設計

#### (一) 實驗地點

實驗場地位於台灣第三大城市—台中市西屯區台灣大道四段 1727 號東海大學男生宿舍 30 棟 5 樓平屋頂上 (24°10'53.9"N 120°36'04.2"E) (圖 3-1)，該場地屬亞熱帶氣候區。屋頂上方除少量必要的管線外，其餘大多為空曠的場地。屋頂表面鋪設隔熱磚，排水良好。本實驗架設在空曠場地的中央，日照充足，並不會受到周圍女兒牆陰影的干擾。





圖 3-1、實驗地點

### (二) 設備架設

以 5 mm 厚玻璃製做四個長 50 cm、寬 50 cm、高 30cm 之植栽槽。為阻隔屋頂表面隔熱磚的熱傳導效果會干擾植栽槽底部溫度的量測，裁切四片長 50 cm、寬 50 cm、厚 5cm 之保麗龍板，置於四個玻璃植栽槽下方。玻璃植栽槽的好處之一為植栽槽本身較不會產生干擾溫度量測的陰影。此四個植栽槽為實驗組，溫度探針置放於植栽槽中心內部最底部的位置。對照組為長 50 cm、寬 50 cm、厚 3cm 之隔熱磚。與實驗組一樣，下面墊著第五片長 50 cm、寬 50 cm、厚 5cm 之保麗龍板。對照組的溫度探針量測隔熱磚中心表面的溫度。實驗組（四個植栽槽）與對照組均直接暴露在陽光下，日照強度均一旦充足。



圖 3-2 放置水泥板上之植栽槽與

### (三) 儀器架設

本實驗採用的儀器為資料擷取器 (HOBO micro station)，用來記錄大氣溫濕度計 (Temperature/Relative Humidity Smart Sensor, S-THB-M002)、日照感測器 (Solar Radiation smart sensor, S-LIB-M003) 與溫度計 (12-Bit Temperature Smart Sensor, S-TMB-M002) 所量測到的資料。大氣溫濕度計用來量測環境溫與相對濕度；日照感測器用來量測日射量；溫度計用來量測實驗組缸底中央的溫度與對照組隔熱磚的表面溫度。大氣溫溼度計與日射感測器置放於離地面高 200 cm 處以避免受到屋頂隔熱磚反射的干擾。針對儀器所偵測到的讀數，資料擷取器每 10 分鐘擷取一次，每個儀器一天共可擷

取 144 個數據。

#### (四) 植栽選擇

因應屋頂嚴苛的生長條件，又希望所種植的作物可作為食物之用，本研究選擇既耐旱、生長勢強勁的地瓜葉進行實驗。地瓜葉耐旱性強，環境越熱，地瓜葉生長越好。地瓜葉生長勢強，覆蓋度佳，可提供不錯的降溫效果。不必施肥、全年可採收。夏天每隔 10~15 天、冬天 20~30 天就可採收一次。

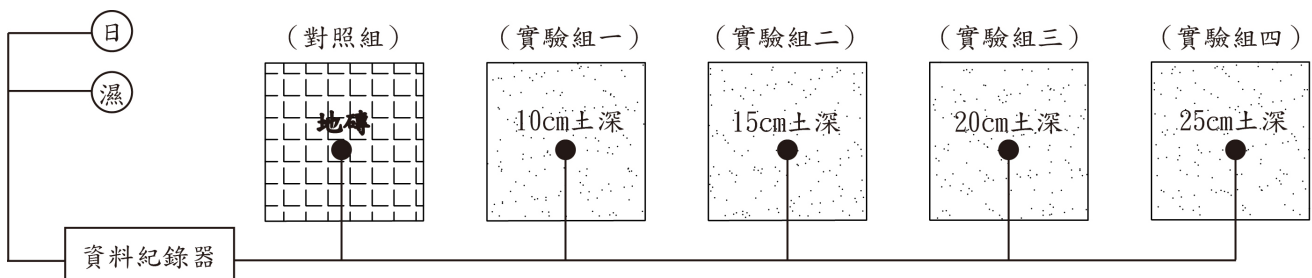
#### 二、二階段實驗設計

本實驗分三個階段進行。第一階段為比較不同土深薄層屋頂之熱效應，目的為獲得最適土深，以利第二階段實驗的進行。第二階段為比較不同比例發泡煉石薄層屋頂的熱效應，目的為獲得最適發泡煉石比例，以利第三階段的進行。但因實驗仍在進行中，本論文僅就第一階段與第二階段實驗成果進行發表。

#### (一) 第一階段實驗設計

設置純土深 10cm、15cm、20cm、25cm 之薄層屋頂(圖 3-4、3-5)。降溫效果為同一時間點對照組溫度減去實驗組溫度。熱振幅減緩效果公式如式(1)所示：

$$\text{熱振幅減緩效果} = 1 - \left( \frac{\text{實驗組最高與最低之溫差}}{\text{對照組最高與最低之溫差}} \right) \quad \text{式 (1)}$$



說明：●表示溫度測量點 (日)表示日射感應器 (濕)表示溫溼度感應器

圖 3-4 第一階段實驗設計平面圖

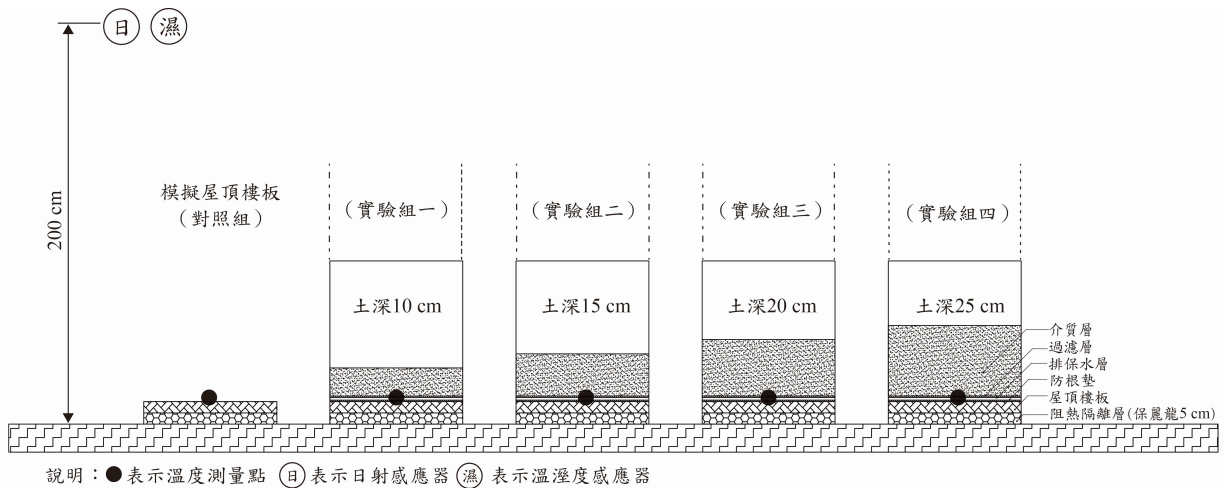


圖 3-5 第一階段實驗設計剖面圖

### (二) 第二階段實驗設計

設置土深 10cm (全純土)、土深 9cm 發泡煉石 1cm (發泡煉石 10%)、土深 6cm 發泡煉石 4cm (發泡煉石 40%)、土深 3cm 發泡煉石 7cm (發泡煉石 70%) 之薄層屋頂 (圖 3-7、3-8)。實驗組溫度感應器放置於每缸植栽槽中央土壤的最底部；對照組的溫度感應器放置於隔熱磚表面的中央。

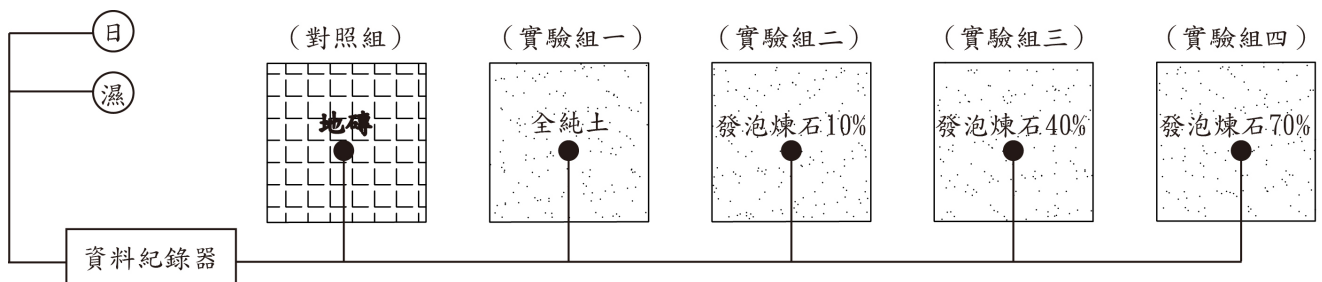


圖 3-7 第二階段實驗設計平面圖

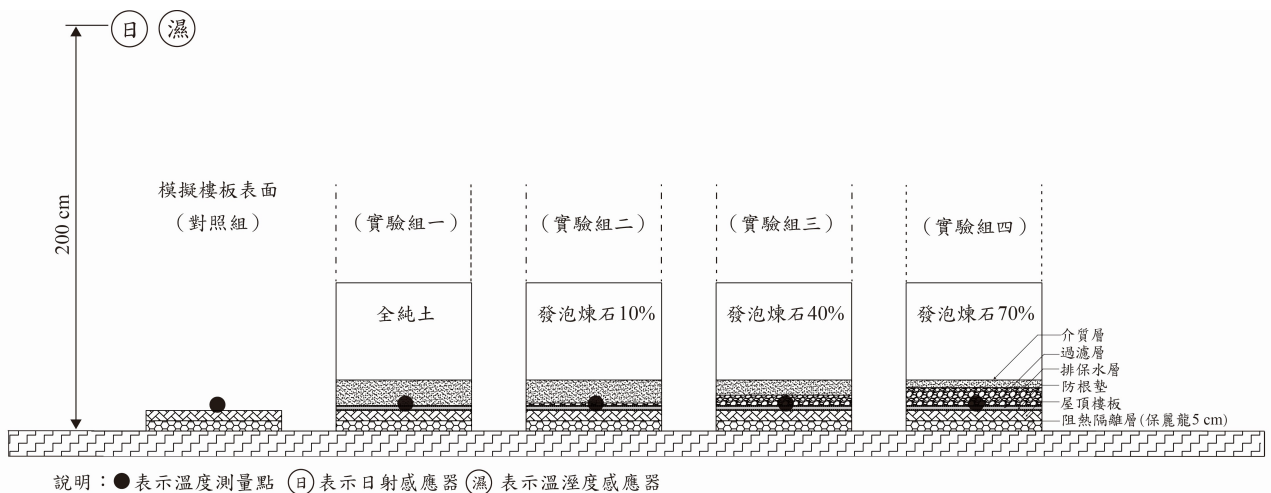


圖 3-8 第二階段實驗設計剖面圖

## 肆、分析結果

### 一、監測期間溫度、相對濕度和太陽輻射量

第一階段測量時間為 2017/5/13~23，共計 11 天。環境溫度從 19.37°C 至 33.29°C (表 4-1)，平均環境溫度為 25.37°C；屋頂樓板溫度範圍從 18.82°C 至 52.67°C，平均屋頂樓板溫度 28.83°C；太陽輻射量最大值為 1170.6 (W/m<sup>2</sup>)；平均相對溼度為 84.41%。

表 4-1 第一階段氣候狀況

|                             |                     |
|-----------------------------|---------------------|
| 測量時間                        | 2017/5/13–2017/5/23 |
| 環境溫度範圍 (°C)                 | 19.37–33.29         |
| 平均環境溫度 (°C)                 | 25.37               |
| 屋頂樓板溫度範圍 (°C)               | 18.82–52.67         |
| 平均屋頂樓板溫度 (°C)               | 28.83               |
| 最大太陽輻射量 (W/m <sup>2</sup> ) | 1170.6              |
| 平均相對溼度 (%)                  | 84.41               |
| 選定後續分析之日期 (以框線註記)           | 2017/5/14–15        |

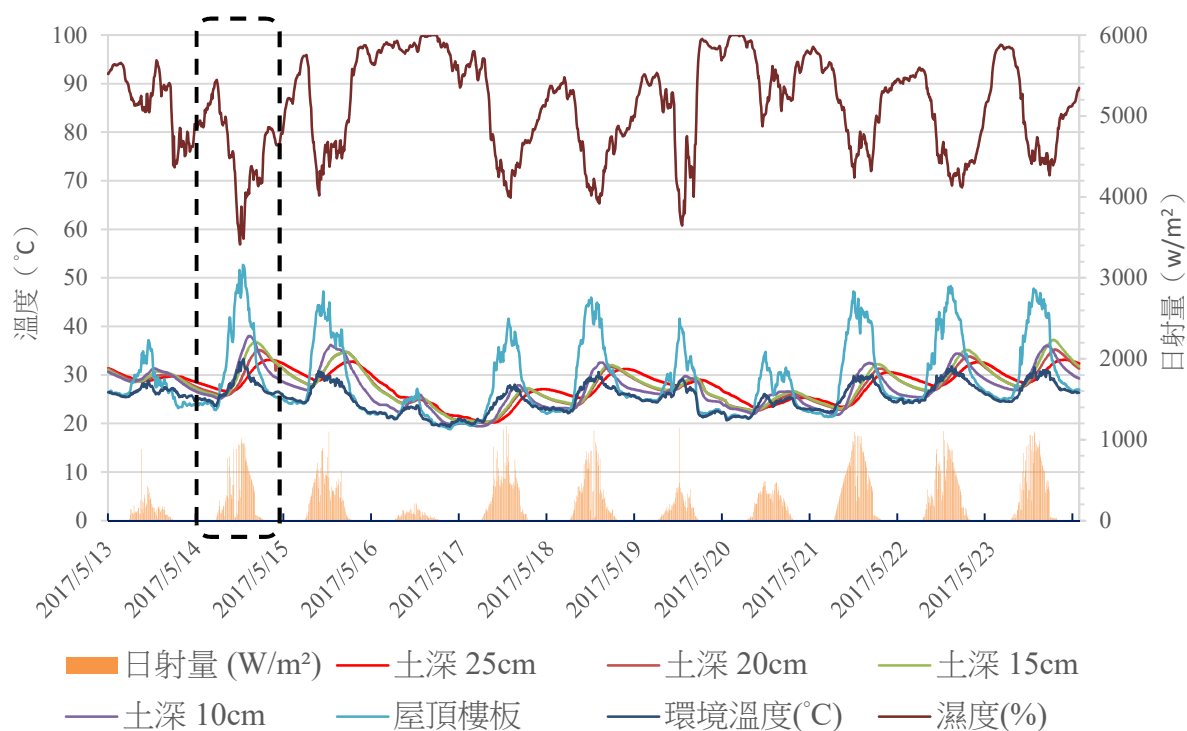


圖 4-1 第一階段薄層屋頂之環境溫度、日射量與相對濕度圖

第二階段測量時間為 2017/7/14~2017/7/26，共計 13 天。環境溫度從 25.53°C 至 33.94°C (表 4-2)，平均環境溫度為 29.41°C；屋頂樓板溫度範圍從 25.45°C 至 52.24°C，

平均屋頂樓板溫度為 33.94°C；最大太陽輻射量為 1138.1 (W/m<sup>2</sup>)；平均相對溼度為 80.85%。

表 4-2 第二階段氣候狀況

| 測量時間                        | 2017/7/14–2017/7/26 |
|-----------------------------|---------------------|
| 環境溫度範圍 (°C)                 | 25.53–33.94         |
| 平均環境溫度 (°C)                 | 29.41               |
| 屋頂樓板溫度範圍 (°C)               | 25.45–52.24         |
| 平均屋頂樓板溫度 (°C)               | 33.94               |
| 最大太陽輻射量 (W/m <sup>2</sup> ) | 1138.1              |
| 平均相對溼度 (%)                  | 80.85               |
| 選定後續分析之日期 (以框線註記)           | 2017/7/25–26        |

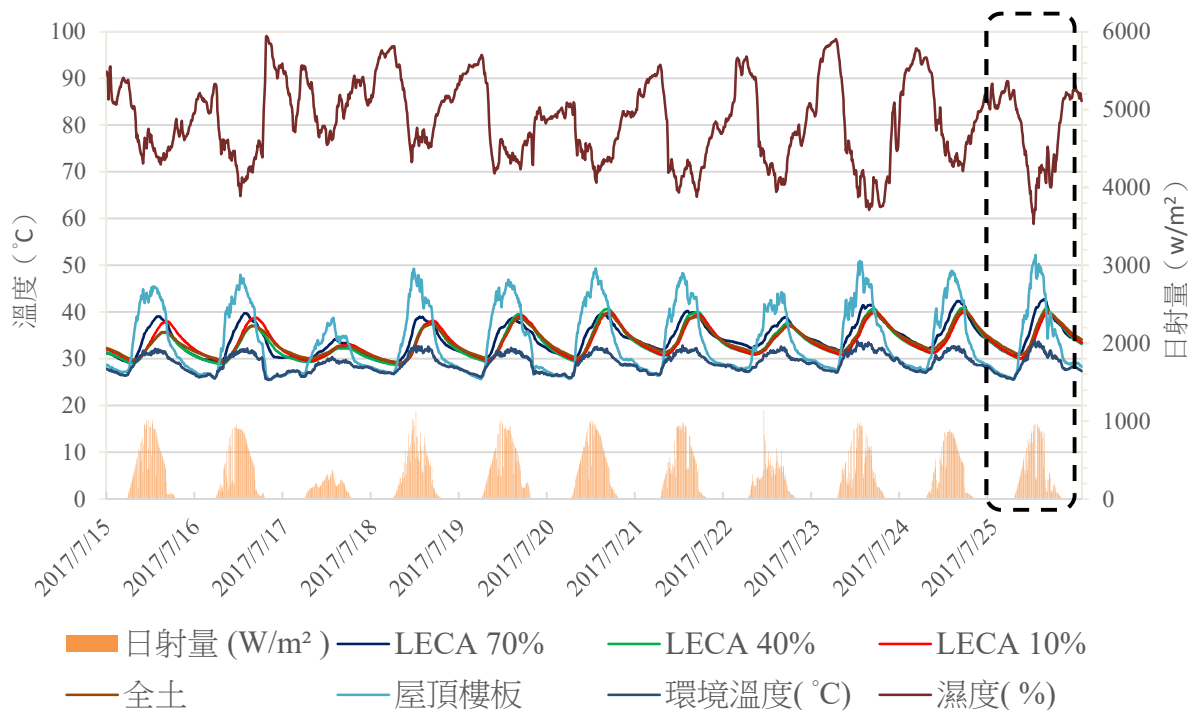


圖 4-2 第二階段薄層屋頂之環境溫度、日射量、相對濕度圖

由於氣溫越高，薄層屋頂降溫效果越顯著，因此每階段挑選日最高溫最高、相對濕度低、日射量變化相對平穩的一天進行後續的分析。因此，第一階段挑選 2017/5/14 (圖 4-1)，第二階段挑選 2017/7/25 (圖 4-2)。

## 二、第一階段熱效應分析

### (一) 熱振幅減緩效果之比較

階段一調查不同土壤深度薄層屋頂之熱振幅減緩效果。從 2017/5/14 早上 6 點至下午 6 點，平均環境溫度為 28.70°C，屋頂樓板平均溫度為 38.46°C。土壤深度 10 cm、15

cm、20 cm、25 cm 薄層屋頂的其熱振幅下降幅度各為 55.75%、61.58%、68.12%、78.73% (表 4-4)。研究結果顯示，土壤深度越深的薄層屋頂，其熱振幅減緩的效果便越明顯。

表 4-4 不同土深純土薄層屋頂熱振幅減緩分析表 (2017/05/14 06:00–18:00)

|          |         | 平均溫度(°C) | 溫度範圍(°C)      | 溫差(°C) | 熱振幅降幅  |
|----------|---------|----------|---------------|--------|--------|
| 環境溫度     |         | 28.70    | 24.60 ~ 33.28 | 8.68   |        |
| 屋頂樓板表面溫度 |         | 38.46    | 23.47 ~ 52.67 | 29.20  |        |
| 植栽槽底部溫度  | 土深 10cm | 31.89    | 25.11 ~ 38.03 | 12.92  | 55.75% |
|          | 土深 15cm | 31.21    | 25.52 ~ 36.74 | 11.22  | 61.58% |
|          | 土深 20cm | 29.74    | 25.79 ~ 35.10 | 9.31   | 68.12% |
|          | 土深 25cm | 28.70    | 26.54 ~ 32.76 | 6.22   | 78.70% |

## (二) 降溫效果之比較

為了解不同土深薄層屋頂在各時段的降溫效果，本研究擬以 1 小時為單位，計算每小時薄層屋頂的降溫效果。分析結果顯示(表 4-5、圖 4-4、圖 4-5)，土壤深度越深，則純土薄層屋頂之降溫效果便越佳。研究結果顯示，2017/5/14 上午 11:00 至 12:00，薄層屋頂達到最佳的降溫效果。當屋頂樓板表面溫度達到 48.84°C 時，10cm 純土薄層屋頂的降溫效果為 16.35°C；15cm 的效果為 18.58°C；20cm 的效果為 20.75°C；25cm 的降溫效果為 21.51°C。雖薄層屋頂土壤深度越深，降溫效果越好，但屋頂樓板的載重也越重，這對建築物而言，並不是一件好事。為平衡屋頂樓板降溫效果與樓板載重，接下來本研究計算不同土深薄層屋頂之邊際降溫效果，並根據此結果，來決定第二階段最適的薄層屋頂介質深度。

表 4-5 不同土深純土薄層屋頂降溫效果分析表

| 時間    |         | 6:00– | 7:00– | 8:00– | 9:00– | 10:00– | 11:00– | 12:00– | 13:00– | 14:00– | 15:00– | 16:00– | 17:00– |
|-------|---------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|       |         | 7:00  | 8:00  | 9:00  | 10:00 | 11:00  | 12:00  | 13:00  | 14:00  | 15:00  | 16:00  | 17:00  | 18:00  |
| 環境溫度  |         | 25.62 | 25.92 | 26.93 | 27.85 | 29.26  | 31.29  | 32.48  | 31.49  | 29.60  | 28.99  | 28.16  | 27.74  |
| 樓板溫度  |         | 26.54 | 29.67 | 35.24 | 39.15 | 43.84  | 48.84  | 49.62  | 48.86  | 42.33  | 39.23  | 32.47  | 29.91  |
| 植栽槽底部 | 土深 10cm | 25.15 | 25.56 | 26.35 | 28.04 | 29.81  | 32.49  | 34.82  | 36.95  | 37.95  | 37.25  | 35.59  | 33.71  |
|       | 土深 15cm | 25.55 | 25.66 | 26.04 | 27.05 | 28.36  | 30.27  | 32.32  | 34.22  | 35.78  | 36.55  | 36.68  | 36.21  |
|       | 土深 20cm | 25.89 | 25.80 | 25.86 | 26.24 | 26.99  | 28.09  | 29.57  | 31.25  | 32.91  | 34.18  | 34.92  | 35.04  |
|       | 土深 25cm | 26.92 | 26.73 | 26.57 | 26.59 | 26.85  | 27.34  | 28.11  | 29.11  | 30.21  | 31.19  | 31.93  | 32.49  |
| 降溫幅度  | 土深 10cm | 1.40  | 4.11  | 8.89  | 11.10 | 14.04  | 16.35  | 14.81  | 11.91  | 4.38   | 1.98   | -3.12  | -3.80  |
|       | 土深 15cm | 1.00  | 4.01  | 9.20  | 12.10 | 15.48  | 18.58  | 17.30  | 14.65  | 6.54   | 2.68   | -4.21  | -6.30  |
|       | 土深 20cm | 0.65  | 3.87  | 9.38  | 12.91 | 16.85  | 20.75  | 20.06  | 17.62  | 9.42   | 5.05   | -2.45  | -5.13  |
|       | 土深 25cm | -0.38 | 2.94  | 8.67  | 12.55 | 16.99  | 21.50  | 21.51  | 19.75  | 12.11  | 8.04   | 0.54   | -2.58  |

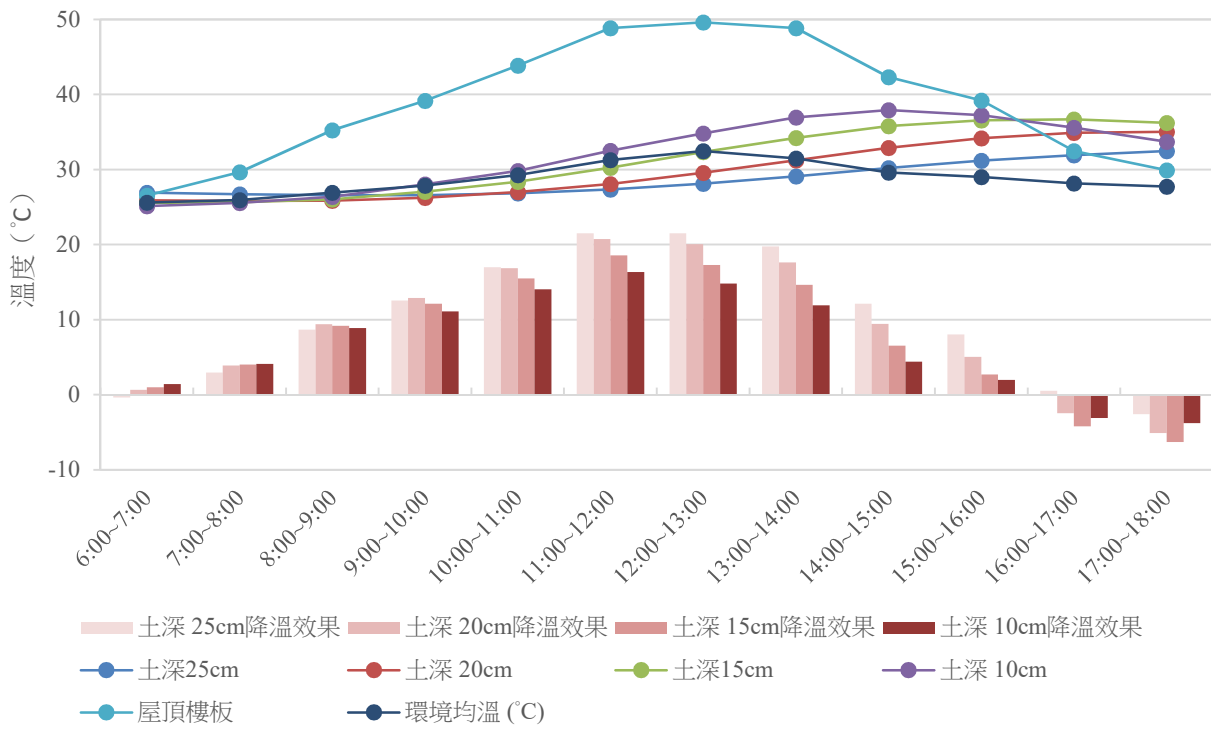


圖 4-4 不同土深純土薄層屋頂降溫效果分析圖 (2017/5/14 早上 6:00 至晚上 18:00)

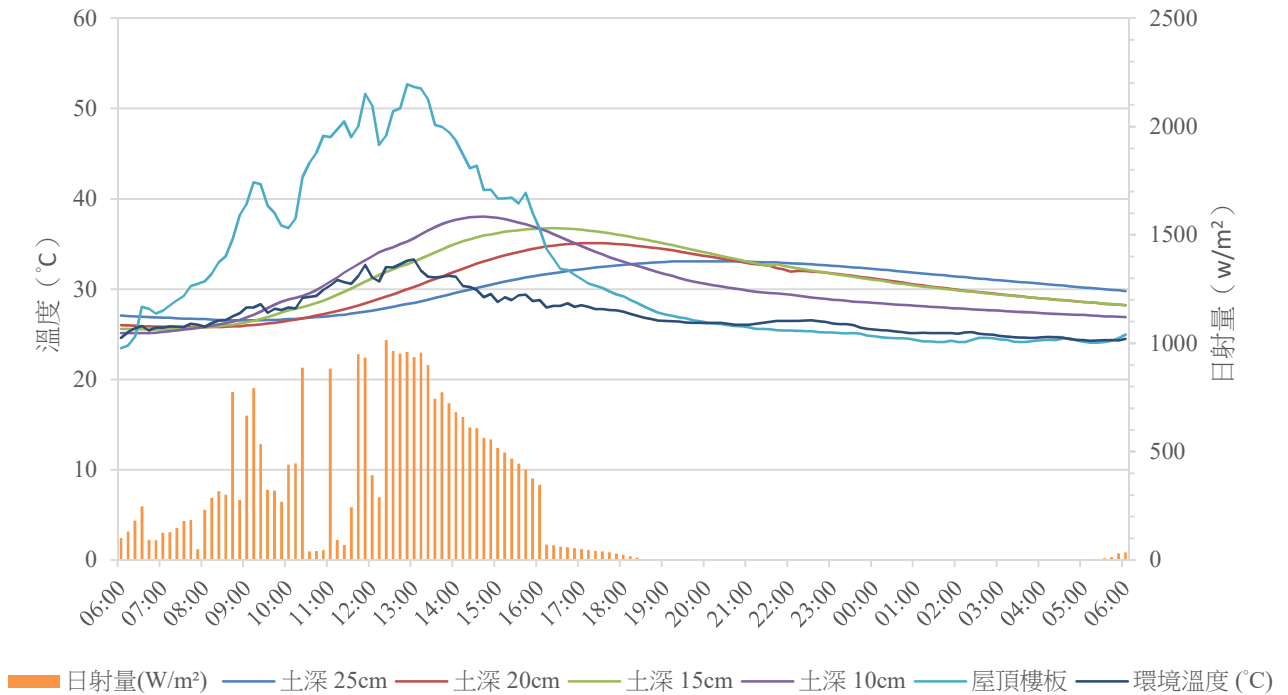


圖 4-5 不同土深純土薄層屋頂降溫效果分析圖（5/14 清晨 6:00 至 5/15 清晨 6:00）

（三）不同土深薄層屋頂邊際降溫效果分析

本階段計算不同土壤深度薄層屋頂之邊際降溫效果，以求得第二階段薄層屋頂最適的介質深度。不同土壤深度之邊際降溫效果定義如式（2）所示：

$$\text{不同土壤深度薄層屋頂之邊際降溫效果} = \frac{\text{降溫幅度的變化}}{\text{土壤深度的變化}} \quad \text{式 (2)}$$

2017/5/14 上午 11:00 至 12:00（表 4-5），土壤深度 10cm、15cm、20cm、25cm 之薄層屋頂底部溫度分別為 32.49°C、30.27°C、28.09°C、27.34°C。根據邊際降溫效果公式的計算，土壤深度 10cm、15cm、20cm、25cm 之邊際效果分別為 1.63°C、0.45°C、0.43°C、0.15°C。分析結果顯示，土壤深度超過 10cm 以上，其邊際降溫效果呈現遞減的現象。故本研究選擇邊際效果最高之 10cm 土壤深度，進行後續第二階段的實驗。不同土深薄層屋頂之邊際降溫效果的估算詳如表 4-6。

表 4-6 不同土深純土薄層屋頂邊際降溫效果之計算（2017/5/14 11:00~12:00）

| 土壤深度       | 降溫幅度<br>(°C) | 降溫幅度的變化<br>(°C) | 土壤深度的變化<br>(cm) | 邊際降溫效果<br>(°C) |
|------------|--------------|-----------------|-----------------|----------------|
| 土深<br>10cm | 16.35        | 16.35           | 10              | 1.63           |
| 土深<br>15cm | 18.58        | 2.23            | 5               | 0.45           |
| 土深         | 20.75        | 2.17            | 5               | 0.43           |



|      |       |      |   |      |
|------|-------|------|---|------|
| 20cm |       |      |   |      |
| 土深   | 21.50 | 0.75 | 5 | 0.15 |
| 25cm |       |      |   |      |

### 三、第二階段熱效應分析

#### (一) 熱振幅減緩效果之比較

階段二調查不同比例發泡煉石加入土壤後是否會改變薄層屋頂之熱振幅減緩效果(表 4-6)。從 2017/7/25 上午 6 點至下午 6 點，平均環境溫度為 30.78°C，屋頂樓板平均溫度為 40.34°C。純土薄層屋頂之熱振幅下降幅度為 62.88%；發泡煉石 10%之下降幅度為 61.72%；發泡煉石 40%之下降幅度為 58.38%；發泡煉石 70%之下降幅度為 53.17%。研究結果顯示，發泡煉石比例越高，熱振幅減緩的幅度便越小。

表 4-6 不同比例發泡煉石薄層屋頂熱振幅減緩分析表 (2017/07/25 06:00–18:00)

|         |          | 平均溫度(°C) | 溫度範圍(°C)      | 溫差 (°C) | 熱振幅降幅  |
|---------|----------|----------|---------------|---------|--------|
| 環境溫度    |          | 30.78    | 26.54 ~ 33.94 | 7.4     |        |
| 屋頂樓板溫度  |          | 40.34    | 26.50 ~ 52.23 | 25.73   |        |
| 植栽槽底部溫度 | 全土       | 35.99    | 30.90 ~ 40.45 | 9.55    | 62.88% |
|         | LECA 10% | 35.28    | 30.09 ~ 39.94 | 9.85    | 61.72% |
|         | LECA 40% | 35.69    | 30.04 ~ 40.75 | 10.71   | 58.38% |
|         | LECA 70% | 37.51    | 30.72 ~ 42.77 | 12.05   | 53.17% |

#### (二) 降溫效果之比較

研究結果顯示(表 4-7、圖 4-6、圖 4-7)，當發泡煉石比例低(10%與 40%)時，發泡煉石薄層屋頂之降溫效果比純土薄層屋頂佳。但當發泡煉石(70%)比例高時，發泡煉石薄層屋頂之降溫效果則比純土薄層屋頂差。7月 25 日當天上午 10:00~11:00 時段，薄層屋頂達到最大的降溫效果。10 公分純土薄層屋頂的降溫效果為 14.70°C；10%發泡煉石的效果為 15.87°C；40%的效果為 15.21°C；70%的效果為 11.01°C。

以降溫效果來說，土壤中加入發泡煉石 10%為較好的選擇，因比純土薄層屋頂更具有降溫效果，最大達 1.17°C，又可降低屋頂載重。但如果以降低屋頂載重為主要目的來說，土壤中加入發泡煉石 40%為較好的選擇，因最大降溫效果會比純土薄層屋頂好上 0.51°C，但好處是可以不少的土壤載重。不建議於土壤中加入 70%的發泡煉石，因降溫效果比純土薄層屋頂更差，最大可差到 3.69°C。

表 4-7 不同時段、不同比例發泡煉石薄層屋頂之降溫效果分析表

| 時間       | 6:00-7:00 | 7:00-8:00 | 8:00-9:00 | 9:00-10:00 | 10:00-11:00 | 11:00-12:00 | 12:00-13:00 | 13:00-14:00 | 14:00-15:00 | 15:00-16:00 | 16:00-17:00 | 17:00-18:00 |
|----------|-----------|-----------|-----------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 環境溫度     | 27.04     | 28.49     | 29.73     | 30.93      | 32.87       | 33.15       | 33.06       | 32.16       | 30.70       | 31.20       | 30.37       | 29.90       |
| 樓板溫度     | 28.20     | 34.32     | 38.59     | 42.53      | 48.78       | 49.47       | 49.51       | 46.73       | 38.59       | 38.41       | 35.64       | 34.09       |
| 植栽槽底部    |           |           |           |            |             |             |             |             |             |             |             |             |
| 全土       | 31.05     | 30.93     | 31.32     | 32.40      | 34.08       | 36.42       | 38.26       | 39.74       | 40.37       | 39.74       | 39.04       | 38.28       |
| LECA 10% | 30.30     | 30.13     | 30.53     | 31.47      | 32.91       | 35.02       | 37.08       | 38.80       | 39.83       | 39.62       | 39.04       | 38.33       |
| LECA 40% | 30.20     | 30.11     | 30.53     | 31.47      | 33.57       | 36.07       | 38.21       | 39.96       | 40.68       | 39.87       | 38.97       | 38.01       |
| LECA 70% | 30.80     | 31.35     | 33.06     | 35.01      | 37.77       | 40.54       | 41.74       | 42.60       | 41.60       | 39.55       | 38.51       | 37.72       |
| 溫度降低     |           |           |           |            |             |             |             |             |             |             |             |             |
| 全土       | -2.85     | 3.39      | 7.27      | 10.13      | 14.70       | 13.05       | 11.25       | 6.98        | -1.78       | -1.33       | -3.40       | -4.19       |
| LECA 10% | -2.10     | 4.19      | 8.07      | 11.06      | 15.87       | 14.46       | 12.43       | 7.93        | -1.24       | -1.21       | -3.40       | -4.24       |
| LECA 40% | -2.00     | 4.21      | 8.07      | 11.06      | 15.21       | 13.40       | 11.30       | 6.77        | -2.09       | -1.46       | -3.33       | -3.92       |
| LECA 70% | -2.60     | 2.96      | 5.54      | 7.52       | 11.01       | 8.93        | 7.77        | 4.12        | -3.01       | -1.14       | -2.88       | -3.64       |

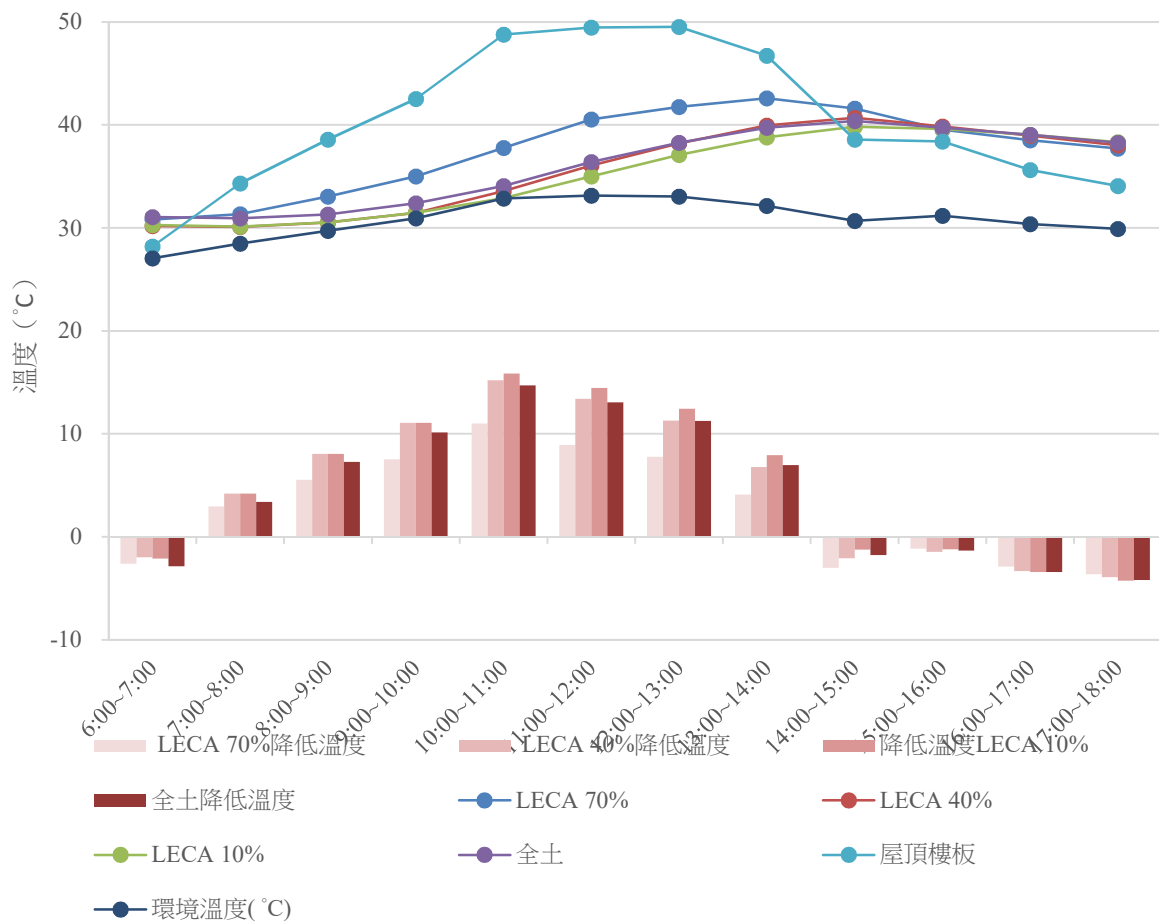


圖 4-6 各時段降溫效果分析圖 (7/25 清晨 6:00 至 7/25 晚上 18:00)

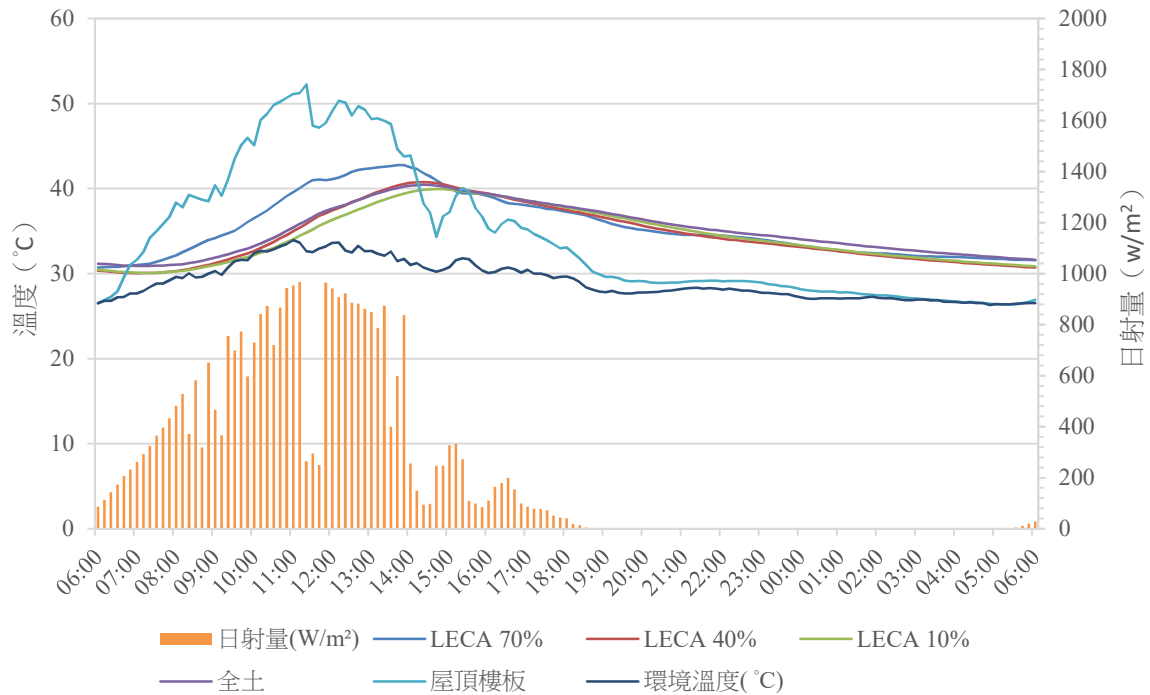


圖 4-7 不同比例發泡煉石薄層綠屋頂之降溫效果分析圖(7/25 清晨 6:00 至 7/26 清晨 6:00)

## 伍、結論與建議

### 一、結論

第一階段研究結果顯示，隨著土壤深度越深，純土薄層屋頂之降溫效果也越佳，但樓板的載重也越重，對於建築物來說較為不利。為權衡屋頂樓板降溫效果與樓板載重，因此選擇了邊際降溫效果最好之 10cm 土深做後續之發展。

第二階段比較不同比例發泡煉石薄層屋頂的降溫效果。研究發現，在 10cm 介質層的情況下，當發泡煉石比例低（10%~40%）時，發泡煉石薄層屋頂的降溫效果比純土薄層屋頂佳，但當發泡煉石比例高（70%）時，發泡煉石薄層屋頂的降溫效果便比純土薄層屋頂差。

以下為本研究重要結果：

- (一) 純土薄層屋頂具有顯著的降溫與熱振幅減緩的效果。環境溫度越高，薄層屋頂降溫效果便越明顯。
- (二) 純土深度越深，純土薄層屋頂的降溫與熱振幅減緩的效果便越好。
- (三) 純土薄層屋頂雖土壤越深，降溫效果越明顯，但屋頂樓板的載重也越重，因此應綜合平衡考量。
- (四) 加入發泡煉石於土壤中，可有效達到減重與更佳的降溫效果，但隨著發泡煉

石比例增加，降溫效果便呈現遞減的趨勢。

## 二、建議

土培薄層屋頂確實可達到大幅降低屋頂樓板溫度之效果。雖土壤深度越深，降溫效果越佳，但為同時達到減輕屋頂樓板載重與增加樓板之降溫效果，增加建築物壽命，本研究建議可選擇 10cm 介質深度、並在土壤下方中混入 10~40%發泡煉石之薄層屋頂。這樣的屋頂，大約可在 32~33°C 的環境溫度下，可以成功降低屋頂樓板 15~16°C，減緩約 60%的熱振幅。

## 參考文獻

- (1) 黃國倉, (2011), 綠建築的屋頂綠化, 科學發展, 第 460 期, 頁 48-53。
- (2) 林憲德、孫振義、李魁鵬、郭曉青, (2005), 台南地區都市規模與都市熱島強度之研究, 都市與計劃, 32(1), 83-97。
- (3) Balter, J., Ganem, C., & Discoli, C. (2016). On high-rise residential buildings in an oasis-city: Thermal and energy assessment of different envelope materiality above and below tree canopy. *Energy and Buildings*, 113, 61-73.
- (4) Beattie, D., & Berghage, R. (2004). Green roof media characteristics: The basics. In *Second Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference, Awards and Trade Show* (pp. 2-4).
- (5) Berretta, C., Poë, S., & Stovin, V. (2014). Moisture content behaviour in extensive green roofs during dry periods: The influence of vegetation and substrate characteristics. *Journal of Hydrology*, 511, 374-386.
- (6) Choi, M. S. (2012). Investigation of the potential of calcareous grassland vegetation for green roof application in the UK (Doctoral dissertation, University of Sheffield).
- (7) Clark, C., Adriaens, P., & Talbot, F. B. (2008). Green roof valuation: a probabilistic economic analysis of environmental benefits. *Environmental science & technology*, 42(6), 2155-2161.
- (8) Coma, J., Pérez, G., Solé, C., Castell, A., & Cabeza, L. F. (2016). Thermal assessment of extensive green roofs as passive tool for energy savings in buildings. *Renewable Energy*, 85, 1106-1115.
- (9) Dunnett, N., & Kingsbury, N. (2008). *Planting Green Roofs and Living Walls*. Portland, OR: Timber Press.
- (10) Dunnett, N., & Nolan, A. (2002). The effect of substrate depth and supplementary watering on the growth of nine herbaceous perennials in a semi-extensive green roof. In *International Conference on Urban Horticulture 643* (pp. 305-309).
- (11) Eumorfopoulou, E., & Aravantinos, D. (1998). The contribution of a planted roof to the thermal protection of buildings in Greece. *Energy and buildings*, 27(1), 29-36.
- (12) Fioretti, R., Palla, A., Lanza, L. G., & Principi, P. (2010). Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate. *Building and Environment*, 45(8), 1890-1904.
- (13) Foustalieraki, M., Assimakopoulos, M. N., Santamouris, M., & Pangalou, H. (2017). Energy performance of a medium scale green roof system installed on a commercial building using numerical and experimental data recorded during the cold period of the year. *Energy and Buildings*, 135, 33-38.
- (14) Getter, K. L., & Rowe, D. B. (2006). The role of extensive green roofs in sustainable development. *HortScience*, 41(5), 1276-1285.
- (15) Getter, K. L., Rowe, D. B., Robertson, G. P., Cregg, B. M., & Andresen, J. A. (2009). Carbon sequestration potential of extensive green roofs. *Environmental science & technology*, 43(19), 7564-7570.
- (16) Harazono, Y., Teraoka, S., Nakase, I., & Ikeda, H. (1990). Effects of rooftop vegetation using artificial substrates on the urban climate and the thermal load of buildings. *Energy and buildings*, 15(3-4), 435-442.
- (17) Kosareo, L., & Ries, R. (2007). Comparative environmental life cycle assessment of green roofs. *Building and environment*, 42(7), 2606-2613.
- (18) Lazzarin, R. M., Castellotti, F., & Busato, F. (2005). Experimental measurements and numerical modelling of a green roof. *Energy and Buildings*, 37(12), 1260-1267.
- (19) Liu, K., & Baskaran, B. (2003, May). Thermal performance of green roofs through field evaluation. In *Proceedings for the First North American Green Roof Infrastructure*

- Conference, Awards and Trade Show (pp. 29-30).
- (20) Niachou, A., Papakonstantinou, K., Santamouris, M., Tsangrassoulis, A., & Mihalakakou, G. (2001). Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. *Energy and buildings*, 33(7), 719-729.
  - (21) Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R. R., Doshi, H., Dunnett, N., & Rowe, B. (2007). Green roofs as urban ecosystems: Ecological structures, functions, and services. *BioScience*, 57(10), 823-833.
  - (22) Onmura, S., Matsumoto, M., & Hokoi, S. (2001). Study on evaporative cooling effect of roof lawn gardens. *Energy and Buildings*, 33(7), 653-666.
  - (23) Poë, S., Stovin, V., & Berretta, C. (2015). Parameters influencing the regeneration of a green roof's retention capacity via evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 523, 356-367.
  - (24) Quezada-García, S., Espinosa-Paredes, G., Escobedo-Izquierdo, M. A., Vázquez-Rodríguez, A., Vázquez-Rodríguez, R., & Ambriz-García, J. J. (2017). Heterogeneous model for heat transfer in Green Roof Systems. *Energy and Buildings*, 139, 205-213.
  - (25) Razzaghmanesh, M., Beecham, S., & Kazemi, F. (2014). Impact of green roofs on stormwater quality in a South Australian urban environment. *Science of the Total Environment*, 470, 651-659.
  - (26) Razzaghmanesh, M., Beecham, S., & Salemi, T. (2016). The role of green roofs in mitigating Urban Heat Island effects in the metropolitan area of Adelaide, South Australia. *Urban Forestry & Urban Greening*, 15, 89-102.
  - (27) Sailor, D. J. (2008). A green roof model for building energy simulation programs. *Energy and buildings*, 40(8), 1466-1478.
  - (28) Santamouris, M., & Kolokotsa, D. (2013). Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures: The state of the art. *Energy and Buildings*, 57, 74-94.
  - (29) Smith, K. R., & Roebber, P. J. (2011). Green roof mitigation potential for a proxy future climate scenario in Chicago, Illinois. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50(3), 507-522.
  - (30) Teemusk, A., & Mander, Ü. (2009). Green roof potential to reduce temperature fluctuations of a roof membrane: A case study from Estonia. *Building and Environment*, 44(3), 643-650.
  - (31) Ulubeyli, S., & Arslan, V. (2017). Economic viability of extensive green roofs through scenario and sensitivity analyses: Clients' perspective. *Energy and Buildings*, 139, 314-325.
  - (32) Wong, N. H., Chen, Y., Ong, C. L., & Sia, A. (2003). Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment. *Building and environment*, 38(2), 261-270.