

都會區綠屋頂保溫、降溫效益研究

陳秋銓¹

摘要

本研究的目的是在於驗證住宅區屋頂薄層綠化之日間降溫效果、夜間室內保溫效果、熱傳導及時滯效應。於住宅區設置對照與實驗組，並記錄大氣溫度、對照區、試驗下方、植栽均值及2樓室內溫度變化，進行描述性統計分析及單因子變異數檢定。

研究結果顯示中午時段屋頂綠化確實可以降低建築物的屋頂樓地板表面溫度10.2-14.2°C，最高降溫為20.6-26.2°C；另以單因子變異數分析驗證降溫效益，結果顯示不同監測區對太陽輻射熱能隔絕降溫有明顯差異，其中以2樓室內降溫13.9083°C效益最顯著。

半夜(24:00)比較分析結果顯示屋頂綠化可保存輻射熱能維持建築物屋頂樓地板表面溫度1.6-2.1°C，最高可溫差高達1.9-4.1°C，具保溫效果。單因子變異數分析結果驗證保溫效益具有差異性，其中以2樓室內保溫2.2464°C效果佳。

熱傳導研究結果顯示實驗區平均熱傳導Q為42.53W，對照區平均熱傳導Q為73.40W，屋頂綠化可以降低熱傳導量(42%)，達到降溫效益。

時滯效應分析結果顯示相較於對照區，實驗區在16:05-16:15分是室內最高溫度(平均23.98°C)的室內環境，可延遲溫度時間平均約100分，避開用電量尖峰時段，可節省空調耗電量。

整體而言，本研究驗證出住宅區屋頂薄層綠化之日間保溫效果、夜間室內保溫效果、熱傳導及時滯效應，若都會區建築物能充分施作綠屋頂，可以減少居家用電量(降低空調系統使用頻率)，初估具有節能(48.8%)的經濟效益。

關鍵字：綠屋頂、保溫、降溫、節能、熱傳導、時滯效應

¹ 中州科技大學景觀系助理教授。

投稿日期：2014年10月13日；第一次修正：2015年02月26日；第二次修正：2015年05月13日；第三次修正：2015年08月03日；第四次修正：2015年09月23日；接受日期：2015年09月30日。

Research of Green Roof Heat Accumulating and Cooling Efficiency in Urban

Chiu-Chuan Chen

Assistant Professor, Department of Landscape Architecture, Chung Chou University of Science and Technology.

Abstract

The purpose of this study was to verify the daytime residential roof greening of the cooling effect, night accumulating of heat effect, thermal conduction and time-lag effect indoors. Set in a residential area in control and experimental groups, and record the ambient temperature, control area, under test, planting mean and the second floor indoor temperature change, descriptive statistical analysis and oneway ANOVA of checks.

The results showed that green roofs can indeed noon time reduce the roof of the building surface temperature 10.2-14.2°C. When the maximum cooling of 20.6-26.2°C; the other oneway ANOVA to verify the cooling efficiency, the results show a different monitoring area of solar radiation cooling a significant difference. The 2nd floor indoor cooling temperature is 13.9083°C, and efficiency is the most significant.

Midnight (24:00) comparative analysis showed that green roofs it can actually improve energy saving when the building roof temperature is 1.6-2.1°C, the maximum be warmed up to 1.9-4.1°C, thus, achieving the accumulation of heat effect.. oneway ANOVA results show the effectiveness of the accumulation heat have differences, which 2nd floor indoor heat preservation 2.2464°C.

Thermal conduction studies showed the average thermal conduction Q in the test zone is 42.53W and control zone is 73.40W, green roofs can reduce the amount of heat conduction by (42%) to achieve cooling efficiency.

Time-lag effect showed that compared to the control zone, test zone at 16: 05 to 16: 15 is the highest indoor temperature (average 23.98°C) in the indoor environment, green roofs can be delayed about 100 minutes, to avoid the peak hours of electricity consumption, thus, saving air conditioning power consumption.

Overall, this study was to verify the daytime residential roof greening of the cooling effect, night accumulating of heat effect, thermal conduction and time-lag effect indoors, if the building can be applied to the urban area as a green roof can reduce home power consumption (reducing air conditioning the system uses frequency), initially estimated for energy-savings (48.8%) that economically efficient.

Keyword: Green Roof, Accumulating of Heat, Cooling, Energy-saving, Thermal Conduction, Time-lag.

一、前言

近年來由於地球暖化問題日益嚴重，氣候異常變遷，生態破壞的事件層出不窮；都市化的問題也趨於明顯，快速的發展使都市中綠地面積急速下降，導致都市景觀及生態環境惡化，都市居住環境品質亦隨之下降(林憲德，1994；Landsberg,1981；Qke,1982；Rosenzweig *et al.*,2005；Sendo *et al.*,2010；Takakura *et al.*,2000；Wong *et al.*,2005)；都市土地大都被人工地盤覆蓋，人工地盤大部分為混凝土、瀝青等熱傳導率佳及不透水材質(Wong *et al.*, 2003)，造成都市中所產生的溫室氣體不易消散，間接使建築耗能。不透水層使雨水無法自然滲透，造成雨水逕流量增加，而導致都市洪災等問題(石婉瑜，2004；Mentens *et al.*, 2006)，造成熱島效應日益嚴重。節能減碳的推廣，不再只是口號，隨著全球都市永續發展的潮流，落實在生活中各個層面，且許多國家已經意識到都市生態環境與居住品質的重要性，屋頂綠化更是一個積極增加地球綠地面積有效的方式；在地狹人稠的台灣，尤其是都會區中，都市熱島效應日趨嚴重，如能將綠屋頂廣泛的推動，對於台灣減緩溫室效應、熱島效應將會得到正面的效益。

利用天然有機介質(輕量介質)作為屋頂薄層綠化栽培基質，採用簡易施工材料及工法，達成降低施設成本，以達到降溫節能的效益，促使屋頂綠化使用普及化，降低熱島效應以營造舒適室內外生活環境，並為台灣生態住宅、生態社區、生態城市的營造挹注一股活力。有鑑於此，本研究的目的在於驗證住宅區屋頂薄層綠化之日間保溫效果、夜間室內保溫效果、熱傳導及時滯效應。

二、文獻回顧

科技的進步使人類的生活更加便利，但造就氣候異常、地球沙漠化、都市高溫化及臭氧層破壞等現象，嚴重威脅人類的生存空間，使生態多樣化的環境面臨嚴重破壞。不當的都市建築政策，使居住環境急速惡化，例如都市人口過度集中、環境不透水鋪面急速增加、建物通風不良、節能設計不當，造成能源浪費與都市氣候高溫化。國內外對於建築物進行綠屋頂研究中，證實屋頂綠化確實有降溫效益(Eumorfopoulou & Aravantinos, 1998；Onmura *et al.*, 2001；Wong *et al.*, 2003)。屋頂綠化可減輕結構物受溫度變化之影響，係綠化植栽的表面溫度變化穩定，早在1900年日本學者研究已實證室外的人工地盤綠化中，用草皮綠化屋頂，可以將傳導至樓地板的熱量抑制在1/4 以下，降低樓地板的表面溫度12~15℃；另外在1994年的夏天及1995年的冬天於住宅、公營機構公司進行屋頂綠化的試驗中，顯示屋頂綠化夏季具降溫作用，冬季更具備保溫作用(都市綠化技術開發機構，1998a)。國內外相關研究主題多元，降溫效益研究數量最多，保溫及節省電效益則較少相關研究。

為了減緩都市環境壓力，國內外許多研究證實薄層屋頂綠化具有減緩都市熱效應(Wong *et al.*, 2003；Hien & Jusuf, 2008；日本財團法人都市綠化技術開發機構，1998a；黃國倉，2011；陳秋銓等，2012)、建物節能(Chen & Lee, 2013a,b；許瑞銘，2006；連祥萍，2009；蘇榮宗，2009；方智芳，2011a；方智芳，2011b；陳秋銓等，2012)、減少都市暴雨逕流(日本財團法人都市綠化技

術開發機構，1998 a；石婉瑜，2004；Mentens *et al.*, 2006；施几文，2009；Voyde *et al.*, 2010)、增加棲地(Nagase & Dunnett,2010)等機能，近年來受到各國政府機關重視重視。而採用實地量測方式來證實植栽層表面的反輻射熱低於混凝土表面，屋頂綠化可有效減輕都市環境中熱島效應問題是常用的方法(Eumorfopolou *et al.*,1998；Giridharan *et al.*,2005；Wong *et al.*,2003；Chen & Lee, 2013a；許瑞銘，2006)。

德國綠化機構研究辦公大樓綠化降溫效益，夏季大氣氣溫大約在30°C時，沒有綠化的屋頂溫度高達40°C~50°C，而綠化屋頂基層10cm處僅有20°C，有效地阻止了屋頂表面溫度的升高，進而降低了屋頂下的室內溫度(Palomo & Barrio, 1998；許萍等2004)。若進行同棟校舍之「綠屋頂」與「裸露屋頂」溫度差異比較，張育森等人(2009)結果顯示5月到9月不論是平均溫、最高溫或最低溫，進行綠化之屋頂表面皆較裸露屋頂為低。除此之外，夏季高溫時期(6-9月)，屋頂綠化皆可較裸露屋頂降低其表面平均溫度達 10°C以上，在最熱的7月與8月甚至可降溫13 與12°C；屋頂綠化後表面最高溫也可維持在50°C以下，顯示屋頂綠化確實可顯著地降低建築物表面溫度，進而調節室內溫度達節能減碳效果(Onmura *et al.*,2001；Niachou *et al.*,2001；Chen & Lee, 2013a；陳秋銓等，2012)。然而，台灣的住宅區屋頂薄層綠化是否同樣具有降溫的效果，值得進一步驗證。

日本研究機構1994 年的夏天及1995 年的冬天於住宅、公營機構公司進行屋頂綠化的試驗中，量測的數據顯示屋頂綠化在夏季具降溫作用，在冬季更具備保溫作用（都市綠化技術開發機構，1998a），台灣屋頂進行綠化研究發現冬季最低溫度時明顯高於未綠化屋頂。如果屋頂綠化是採用地毯式種植的地被植物，則地被植物及其下的輕量介質組成的“毛毯”層可以取代屋頂的保溫層，達到冬季保溫夏季隔熱的作用(林寶秀，2010)。同樣的，台灣的住宅區屋頂薄層綠化是否同樣具有保溫的效果，亦值得進一步驗證。

另外，在節能效益方面，德國綠化機構研究建築物屋頂綠化降溫方面，主要以降低建築物溫度、減少冷氣用電量，透過屋綠頂建築用電量調查分析省電幅度。以Athens 商業建築的綠屋頂能源與環境研究資料，能源使用效率透過精確的動態模擬模型計算省能效率，熱表現結果顯示可顯著降低夏季建築物冷卻空調的用電量，約減少40%的用電量(許萍等2004；吳金順，2004；李岳岩和周若祁，2006；李中原，2008；唐鳴放和王科,2010；Palomo & Barrio, 1998；Spala *et al.*,2008；Chen & Lee, 2013b)。然而，台灣的住宅區屋頂薄層綠化所擁有的節能效益為何?值得深入分析。

熱傳導及時滯效應 Incropera(1996)提到熱傳導指的是包括各種形式熱能轉移現象的總稱，根據物理機制的不同，熱傳的基本方式分為傳導、對流和輻射三種，由高溫向低溫處傳遞，任何熱交換均來自其中之一或綜合型態呈現。藉由建築熱傳導相關研究，得知瞭解建築物傳熱情形，是一種不穩定傳熱的型態，在固體介質的熱傳透行為中會因為固體的熱容量而吸放熱量，產生熱流的時滯效應，使高溫時間的延遲(曾筱霽，2011)。許瑞銘(2006)提到建築物的熱平衡必預評估建築的熱獲得和熱損失，為取得建築中的熱平衡，讓室內處於穩定的適宜溫度，在室內達到熱舒適環境，應使以上各項熱獲得量的總和等於熱損失量的總和。建築中熱獲得和熱損失的量，與建築設計密切相關，即建築的朝向、外型、窗牆比，及外殼構造的型式都對建築的室內熱環境和節能有很大影響。林憲德(1994)認為時滯現象(Time-lag)是反應建築物熱容量所產生的時滯與吸熱、放熱現象；周鼎金(1996)指時滯現象為氣溫變化與太陽輻射強度產生時間差距之現象。然而必須思考

的是，台灣的住宅區屋頂建築所具備的熱傳導與時滯效益為何?應深入討論。

綜合上述，關於屋頂薄層綠化效益的研究，國內多採用實驗的方式進行，然而住宅區屋頂薄層綠化之日間保溫效果、夜間室內保溫效果、熱傳導及時滯效應等議題上，仍然是個值得深入討論的議題。

三、研究設計與方法

本研究目的在於驗證住宅區屋頂薄層綠化之日間保溫效果、夜間室內保溫效果、熱傳導及時滯效應。採用實地實證研究試驗，進行屋頂受日照後對裸露樓頂板對照區、屋頂試驗區域(425x300x20cm)，輻射熱能吸收溫度變化監測，探討屋頂表面傳熱溫度差異變化(降溫及保溫效益)；並比較施作屋頂薄層綠化前與施作後同期不同年度用電量變化。

(一)實證地點：

台中市神岡區二樓層 RC 建築物頂樓，周圍空曠無設施物遮蔽。

(二)實證設施：

分為實驗區(綠化屋頂)與對照區(建築物裸露屋頂)，2011 年 8 月施設完成，栽培維護六個月後植栽覆蓋率達 95% 以上再進行降溫保溫效益調查(圖 11)，以 12:00-13:00 高溫時段探討降溫效益，以 23:00-24:00 低溫時段探討保溫效益，自 2012 年 3 月至 2012 年 5 月進行監測。

本研究於神岡區二樓屋頂設置實證試驗區設置長425cm×寬300cm×高20cm 的植栽槽，植栽槽由下而上依序鋪設架高層、防水層、排水層、過濾層(不織布、水陶石)、介質層及植栽層，植栽槽周圍以空心磚間隔收邊以減輕荷重(圖4)。

各層結構說明如下(圖1)：

1. 架高層：在植栽槽最下方設置造園使用之排水板(PVC材質製成，長32.5cm×寬32.5cm×高2cm)，將薄層屋頂綠化所有材料架離地面2cm，避免樓板與植栽槽底部直接接觸，藉以保持底層通風、乾燥，防止減少植栽根部破壞樓板造成樓板滲水現象發生(圖1)。
2. 防水(阻根)層：於架高層上方鋪設防水布(2 mm)，隔絕薄層綠化植栽根系竄出及水分滲出，避免破壞樓板結構，發生滲漏水現象(圖1)。
3. 排水層：採用造園使用之排水板(PVC材質製成，32.5cm×32.5cm×2cm) (圖1)。
4. 過濾層：包含不織布(1mm)及水陶石(4cm)，採用不織布全面鋪設於排水板上方作為底層過濾，避免介質流失堵塞排水孔；水陶石4cm作為過濾及保水功能(圖1)。
5. 介質層：板狀綠墊(21x31x8cm)(圖2)(經過測試篩選不同有機纖維質配置比例的輕量介質)，作為植物栽培介質，以支撐植株及提供植物養份，綠墊介質厚度為8 cm，外面以不織布包裹減少有機纖維質流失避免排水孔堵塞(圖1)。
6. 植栽層：以6種常見植物綠莧、蚌蘭、天使花、蔓性馬纓丹、蔓性野牡丹(種植密度為25 株/m²)、假儉草為試驗材料。植物皆由同一苗圃溫室培育，種植時每株植栽約等同大小(圖2,4)。

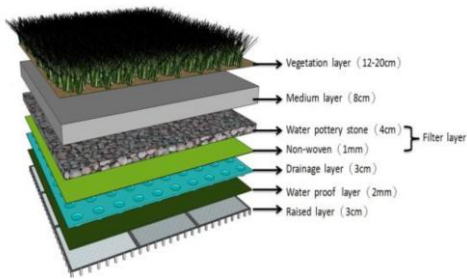


圖 1 屋頂薄層綠化各層設施結構示意圖

圖 2 板狀綠墊(21x31x8cm) 栽培介質

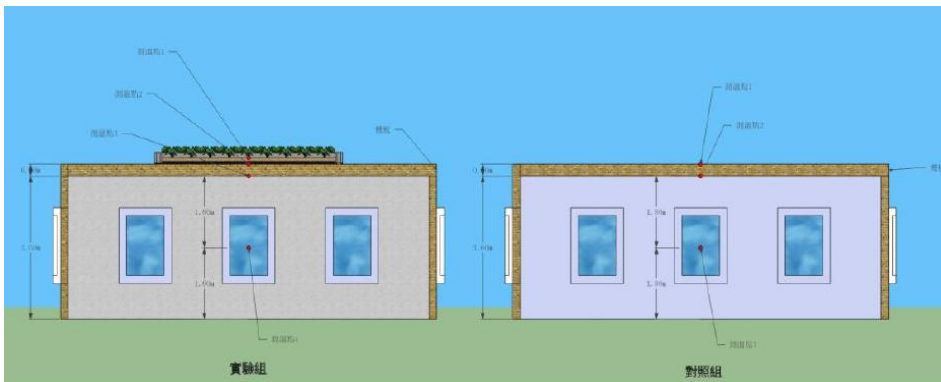


圖 3 屋頂薄層綠化實驗區、對照區監測點示意圖



圖 4 屋頂綠化設施 6 個月後植栽綠覆率完整現況

(三)監測儀器：

溫度記錄器、K-type 熱偶線 (Thermo-couple)、戶外型微氣候氣象站及資料擷取記錄分析電腦(圖 5)。



圖 5 監測儀器圖

(四)監測方式

分為監測時段、測點規劃、紀錄方式

1.監測時段：監測期間自2012年1月至2012年5月，24小時全天候監測。

2.測點規劃：

(1)對照組--未施設薄層綠化之 2 樓頂板上方之溫度(測點1)，未施設薄層綠化之 2 樓頂板下方之溫度(測點2)、2樓室內溫度測定取距地面180cm設置測溫點(測點3)(圖3)。

(2)實驗組：(a)植栽區--測溫點是植栽基部與栽培介質的介面之溫度(測點1)。(b)薄層試驗區下方--測溫點是2樓頂板上與防水布下之介面溫度(測點2)。(c)施設薄層綠化之 2 樓頂板下方之溫度(測點3)。(d)2樓室內溫度測定取距地面180cm設置測溫點(測點4)(圖3)。

(3)大氣溫度：戶外型微氣候氣象站與氣象局監測之溫度。

3.紀錄方式：每10分鐘監測一筆資料並用資料擷取及記錄系統將數據資料儲存，全天候監測(圖5)。

(五)熱傳導計算：

固體內部之熱流動狀態。是熱的形式之一，物體內部溫度有差異時，其內部與鄰接物質，不經由物質運動即可產生熱的移動現象。

$$Q=KA\Delta t/L$$

Q：傳導散熱量的單位為W,在熱傳導式子中，正q值表示熱流從表面往系統內流動，而負值是熱流離開系統。

K：熱傳導係數(傳統RC樓頂板牆--1.4)(W/m °C)

A：導體的橫截面積(0.3m*4.25m=1.28m²)

L：傳熱路徑長度是距離(厚度)(0.3m)

△t：傳熱路徑兩端的差異溫度(°C)

(六)資料分析：

監測期間自 2012 年 3 月至 2012 年 5 月每 10 分鐘監測的溫度資料輸入 Microsoft Office Excel 2007 進行統計分析，並輸入標準差，以折線圖顯示，單因子變異數分析不同植栽種類及屋頂薄層綠化型式整體熱效益之差異性及微氣候環境之改善效益。

四、結果與討論

(一)屋頂綠化對建築物降溫與保溫效果分析

1.屋頂綠化對建築物降溫與保溫效果分析

3-5月份溫度變化經過月均溫平均數分析之後，對照區與試驗下方溫差值+1.51°C，與植栽區均值溫差值+2.90°C，與2樓室內溫差值+1.74°C；也就是說屋頂綠化處理下的室內溫差降低1.74°C；顯示施作屋頂薄層綠化可達降溫之效益(Wong *et al.*, 2003； Hien & Jusuf, 2008； Chen & Lee, 2013a；日本財團法人都市綠化技術開發機構, 1998a；黃國倉, 2011；陳秋銓等, 2012)，降溫約 1.51-2.90°C(表1)。屋頂綠化對於室內溫度改善不僅中午(12:00-13:00)具降溫(12.50°C)的效益，兼具入夜後(20:00-24:00)保溫(增溫1.83-3.65°C)功效（都市綠化技術開發機構, 1998a；林寶秀,2010；Chen & Lee, 2013a），使得室內溫度變化區間僅±0.55°C，呈現近似恆溫效益(圖6)。

表 1 3-5 月五個時段平均溫度變化

3-5月	大氣溫度	對照區	試驗下方	植栽均值	2樓室內溫度
08:00	22.96	24.86	23.88	23.32	24.50
12:00	26.65	37.29	24.69	27.60	24.79
16:00	25.63	26.88	26.82	24.04	25.57
20:00	23.48	23.23	25.39	22.20	25.06
24:00	22.18	20.82	24.77	21.47	24.47
月均溫	24.18	26.62	25.11	23.72	24.88

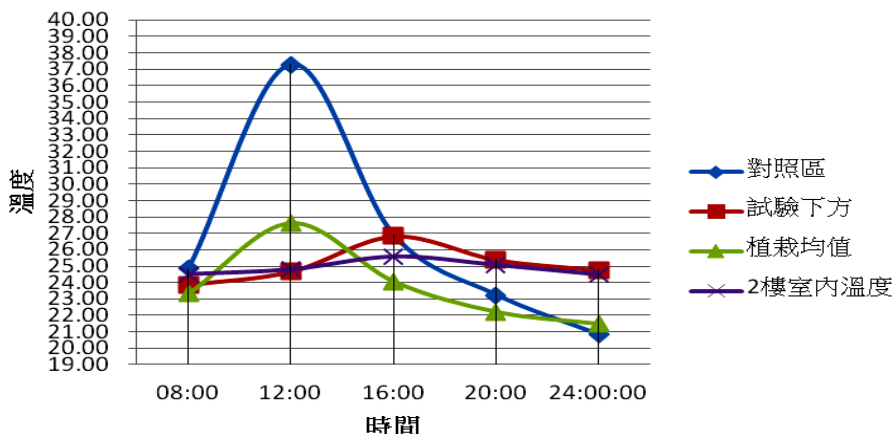


圖 6 3-5 月各時段平均溫度變化 XY 散佈圖

(二)屋頂綠化之建築物降溫效益分析

以屋頂綠化12:00-13:00時段為分析時段，比較建築物不同監測區與「對照區之溫度差」，結果顯示屋頂綠化組建築物降溫效益顯著。

表 2 屋頂綠化之建築物降溫效益分析表

	個數	平均數	標準差	標準誤	平均數的 95% 信賴區間		最小值	最大值
					下界	上界		
					1.試驗下方	84		
2.植栽區	84	10.1950	5.56510	.60720	8.9873	11.4027	.76	22.36
3.2 樓室內溫度	84	13.9083	8.13483	.88758	12.1430	15.6737	-.30	28.20

由獨立樣本單因子變異數分析，變異數同質性Levene統計量(6.228)檢定達顯著，同質性高，變異數不齊次的情況下改採平均數檢定；採用均等平均數的Robust檢定，檢定變異數齊次性，Welch(p=0.000)、Brown Forsythe(p=0.003)檢定，樣本的溫度變化有顯著差異。

經由多重比較 Scheffe 法分析比較，植栽區與試驗下方、2 樓室內溫度及試驗區，平均差異在 0.05 水準溫差值均為顯著的。以建築物對照區之溫度差為依變項，比較自變項，發現不同監測區對太陽輻射熱能隔絕降溫有明顯差異，試驗下方 13.9176°C、2 樓室內溫度 13.9083°C，降溫效益顯著(表 2)。

建築物不同監測區對「對照區之溫度差」之影響，進行單因子變異數分析，分析結果顯示建築物不同監測區，其「對照區之溫度差」達顯著差異之結果(F=3.672，P=.003)。因此建築物不同監測區的確會影響「對照區之溫度差」，1>3、3>2，試驗下方及2樓室內溫度降溫效益最顯著(表 3)。

表 3 12:00-13:00 建築物不同監測區對「對照區之溫度差」單因子變異數分析

試驗區塊	對照區溫度差		F 檢定	顯著性	Post Hoc 檢定
	平均數	標準差			
1.試驗下方	13.9176	7.88946	3.672	.003	1>3 3>2
2.植栽區	10.1950	5.56510			
3.2 樓室內溫度	13.9083	8.13483			

(三)「屋頂綠化區」與「屋頂裸露區」降溫效益探討

3~5月進行屋頂綠化與否對屋頂表面溫度影響進行討論，其中平均溫、最高溫，綠化之屋頂表面皆較裸露屋頂溫度低。12:00-13:00平均溫，屋頂綠化較裸露屋頂降低溫度達10.2-14.2°C與日本都市綠化技術開發機構(1998a)研究結果降低屋頂表面溫度12~15°C相近，較唐鳴放和王科(2010)研究上海市綠屋頂可使屋頂表面平均溫度降低約3°C，降溫效益更為顯著；12:00-13:00最高溫，甚

至可以降溫高達20.6-26.2°C(表4) 與Palomo & Barrio(1998)研究德國屋頂綠化於最高溫時段降溫約20-30°C相近；而在12:00-13:00最低溫，3-4月屋頂綠化之溫度均較裸露屋頂高出0.9-2.0°C(表4)，經由檢視氣象局資料及原始資料發現當日均有明顯降雨，導致裸露屋頂溫度偏低，應是降雨所造成之影響；而5月屋頂綠化之溫度均較裸露屋頂降低1.3°C(表4)，經由檢視氣象局資料及原始資料發現前幾日均有明顯降雨，當日則為晴朗的天氣，導致裸露屋頂溫度升高，屋頂綠化區因前幾日降雨，蓄含大量水氣，短時間內太陽輻射對薄層綠化介面無明顯增溫效果，該項微氣候變化應是造成本項溫差的主因。

屋頂綠化中午時段確實可以降低建築物的屋頂樓地板表面溫度10.2-14.2°C，最高溫時甚至可以降溫高達20.6-26.2°C，進而調節室內溫度達節能減碳效果(Eumorfopoulou *et al.*,1998；Palomo & Barrio, 1998；Takakura *et al.* , 2000；Onmura *et al.*,2001；Niachou *et al.*,2001；Wong *et al.*, 2003；Hien & Jusuf, 2008；Chen & Lee, 2013a；許萍等2004；許瑞銘，2006；張育森等，2009；林寶秀，2010；陳秋銓等，2012)。

表 4 3-5 月 12:00-13:00「屋頂綠化區」與「屋頂裸露區」之溫度差異比較

	12:00-13:00	3 月	4 月	5 月	春季(3-5 月均值)
平均溫(°C)	屋頂綠化	20.7	25.6	28.7	24.97
	屋頂裸露	34.9	35.8	42.0	37.57
	差值	-14.2	-10.2	-13.3	-12.59
最高溫(°C)	屋頂綠化	26.9	29.7	31.2	29.23
	屋頂裸露	53.1	50.3	56.7	53.37
	差值	-26.2	-20.6	-25.5	-24.13
最低溫(°C)	屋頂薄層綠化	13.5	22.8	26.2	20.84
	屋頂裸露	12.6	20.8	27.5	20.30
	差值	0.9	2.0	-1.3	0.5

(四)屋頂綠化之建築物保溫效益分析

本研究以23：00-24：00為分析時段，分析建築物不同監測區與「對照區之溫度差」，結果顯示屋頂綠化之建築物保溫效益顯著。

表 5 建築物保溫效益分析表

	個數	平均數	標準差	標準誤	平均數的 95% 信賴區間		最小值	最大值
					下界	上界		
1.試驗下方	84	-2.3682	1.14809	.12527	-2.6173	-2.1190	-8.57	-.63
2.植栽區	84	-.3695	7.47470	.81556	-1.9916	1.2526	-42.70	3.56
3.2 樓室內溫度	84	-2.2464	1.49452	.16307	-2.5708	-1.9221	-9.10	.80

由獨立樣本單因子變異數分析，變異數同質性Levene統計量(6.178)檢定達顯著，同質性高，變異數不齊次的情況下改採平均數檢定；採用均等平均數的Robust檢定，檢定變異數齊次性，Welch(p=.000)、Brown Forsythe(p=.000)檢定，樣本的溫度變化有顯著差異。

經由多重比較 Scheffe 法分析比較，2 樓室內溫度、試驗下方、植栽區，平均差異在 0.05 水準溫差值均為顯著的。以建築物對照區之溫度差為依變項，比較自變項，發現不同監測區入夜後對太陽輻射熱能散失與保存有明顯差異，試驗下方 2.3682°C 及 2 樓室內溫度 2.2464°C，保溫效果佳(表 5)。

建築物不同監測區對「對照區之溫度差」影響，進行單因子變異數分析，分析顯示建築物不同監測區，其「對照區之溫度差」達顯著差異之結果 (F=20.407, P=.000)。因此建築物不同監測區的確會影響「對照區之溫度差」，1>3、3>2，2樓室內溫度及試驗下方保溫效益顯著(表6)。

表 6 23：00-24：00 建築物不同監測區對「對照區之溫度差」單因子變異數分析

試驗區塊	對照區溫度差		F 檢定	顯著性	Post Hoc 檢定
	平均數	標準差			
1.試驗下方	-2.3682	1.14809	20.407	.000	1>3 3>2
2.植栽區	-.3695	7.47470			
3.2 樓室內溫度	-2.2464	1.49452			

(五)「屋頂綠化區」與「屋頂裸露區」之保溫效益探討

3~5月進行屋頂綠化與否對屋頂表面溫度影響的情形進行討論，其中平均溫、最低溫，綠化之屋頂表面皆較裸露屋頂溫度高。23:00-24:00平均溫，屋頂綠化皆可較裸露屋頂升高其溫度達 1.6-2.1°C；23:00-24:00最低溫，可以升溫高達 1.9-4.1°C(表7) (林寶秀，2010)；在23:00-24:00最高溫(4、5月)，升高其溫度達0.2-1.6°C(表7)；在23:00-24:00最高溫(3月)，因為屋頂裸露區當日中午溫度高達47.8°C，經由12小時太陽輻射散熱降溫過程，於23:00-24:00時屋頂裸露區與綠化區溫度仍高達25.6°C、24.3°C，當日中午高溫氣候型態應是造成該項數值不同於其他月份之主因。屋頂薄層綠化春季入夜24：00時確實可以保存輻射熱能提高建築物屋頂樓地板表面溫度1.6-2.1°C，最低溫甚至可以升溫高達1.9-4.1°C，進而達到保溫之效果(都市綠化技術開發機構，1998a；林寶秀，2010)。

表 7 3-5 月 23:00-24:00「屋頂綠化區」與「屋頂裸露區」之溫度差異比較

	23:00-24:00	3 月	4 月	5 月	春季(3-5 月均值)
平均溫 (°C)	屋頂綠化	20.3	25.3	27.9	24.50
	屋頂裸露	18.3	23.7	25.8	22.60
	差值	2.0	1.6	2.1	1.90
最高溫 (°C)	屋頂綠化	24.3	29.1	31.3	28.21
	屋頂裸露	25.6	28.9	29.7	28.07
	差值	-1.3	0.2	1.6	0.15
最低溫 (°C)	屋頂綠化	13.7	22.2	25.2	20.35
	屋頂裸露	11.8	19.7	21.1	17.53
	差值	1.9	2.5	4.1	2.81

(六)建築物熱傳導分析

本研究以實測數據為基礎，應用熱傳導公式，計算不同區位建築物熱傳導值，結果顯示3-5月對照區平均熱傳導Q為73.40W，實驗區平均熱傳導Q為42.53W，分析得知進行屋頂綠化可以降低熱傳導量(42%)(表8)(許瑞銘，2006；曾筱霽，2011)，達到降溫效益。

表 8 建築物對照區與實驗區(屋頂綠化)各月最高溫度及溫差表

日期	項目	對照區	對照區室內頂板	溫差值(Δt)	熱傳導量Q(w)	實驗區	實驗區室內頂板	溫差值(Δt)	熱傳導量Q(w)
3/18	溫度℃	53.12	40.43	12.69	75.80W	26.92	20.81	6.11	36.50W
	時間		14:05				14:45		
4/8	溫度℃	50.33	38.39	11.49	68.63W	29.71	21.62	8.09	48.33W
	時間		13:35				14:15		
5/9	溫度℃	56.71	44.01	12.70	75.87W	31.23	24.06	7.17	42.83W
	時間		13:55				14:25		
平均熱傳導Q					73.40W	平均熱傳導Q			42.53W

(七)時滯效應分析

時滯現象(time-lag)為氣溫變化與太陽輻射強度產生時間差距之現象；林憲德(2003)認為是反應建築物熱容量所產生的時滯與吸熱、放熱現象；在實際傳熱行為中，固體介質的熱傳透行為中會因為固體的熱容量而吸放熱量，產生熱流的延遲現象（即所謂的時滯效應），而使熱流量產生複雜的時間變動因素。

建築物傳熱情形，是一種不穩定傳熱的型態，在固體介質的熱傳透行為中會因為固體的熱容量而吸放熱量，產生熱流的時滯效應，使高溫時間的延遲。；在一天當中時滯效應發生在，氣溫最高的時間約略出現在午後1點至4點，與太陽日射量最強的時間慢了1~4小時，因此，本研究將時滯效應數據量測範圍設定在上午8：00 至下午17：00，分析時滯效應所產生的溫度變化以及最高溫度時間的延遲，探討屋頂對照區、實驗區對室內樓頂板溫度時滯效應的影響。

表 9 建築物對照區與實驗區(屋頂綠化)各月最高溫度及發生時間表

日期	項目	對照區	對照區室內頂板	實驗區	實驗區室內頂板
3/18	溫度℃	53.12	44.78	26.92	23.75
	時間	14:05	14:45	14:45	16:05
4/8	溫度℃	50.33	40.67	29.71	22.03
	時間	13:35	14:05	14:15	16:05
5/9	溫度℃	56.71	49.26	31.23	26.15
	時間	13:55	14:35	14:25	16:15

以3/18、4/8、5/9探討各月份時滯效應，實驗結果顯示：

3/18對照區屋頂表面最高溫時間為14:05分(53.12°C)、室內頂板表面最高溫時間為14:45分(44.78°C)，時滯效應延遲40分；實驗區屋頂表面最高溫時間為2.14:45分(26.92°C)、室內頂板表面最高溫時間為16:05分(23.75°C)，時滯效應延遲80分(表9)。

4/8對照區屋頂表面最高溫時間為13:35分(50.33°C)、室內頂板表面最高溫時間為14:05分(40.67°C)，時滯效應延遲約30分；實驗區屋頂表面最高溫時間為14:15分(29.71°C)、室內頂板表面最高溫時間為16:05分(22.03°C)，時滯效應延遲約110分(表9)。

5/9對照區屋頂表面最高溫時間為13:55分(56.71°C)、室內頂板表面最高溫時間為14:35分(49.26°C)，時滯效應延遲約40分；實驗區屋頂表面最高溫時間為14:25分(31.23°C)、室內頂板表面最高溫時間為16:15分(26.15°C)，時滯效應延遲約110分(表9)；研究得知對照區14:05-14:45分為室內最高溫度環境(平均44.90°C)，時滯效應延遲溫度時間平均約36分；實驗區16:05-16:15分為室內最高溫度環境(平均23.98°C)，屋頂綠化可延遲溫度時間平均約100分，避開用電量尖峰時段，可節省空調耗電量(曾筱霽,2011；周鼎金,1996)。

(八)屋頂薄層綠化前後不同年度同期用電量比較分析探討

屋頂綠化後，建築物二樓101年3-4月用電量113 *K.W./Hr.*，比對屋頂裸露100年3-4月用電量421 *K.W./Hr.*，節省用電量308 *K.W./Hr.*；得知台中都會區建築物頂樓施作屋頂綠化可以減少居家用電量(降低電暖器及電毯使用頻率)，達到節能(73.2%)的效益(表10)。屋頂綠化後，建築物二樓101年5-6月用電量223 *K.W./Hr.*比對屋頂裸露100年5-6月用電量235 *K.W./Hr.*，節省用電量12 *K.W./Hr.* (5.1%)。

都會區建築物屋頂綠化後可以減少居家用電量(降低空調系統使用頻率)，達到節能(48.8%)的經濟效益(表10)與Palomo & Barrio(1998)研究德國建築物屋頂綠化降溫方面約減少40%的用電量相近(許萍等2004；李岳岩和周若祁，2006；Spala *et al.*,2008；Chen & Lee, 2013b)；與沙烏地阿拉伯首都利雅德，建築物屋頂綠化後所需空調的時數由12小時降至僅5小時約節能58%，相互印證屋頂綠化確實可以達成節能減碳環境效益(李中原，2008；吳金順，2004；唐鳴放和王科，2010；陳秋銓等，2012)。

表 10 都會區建築物施設屋頂綠化前後不同年度同期用電量(*K.W./Hr.*)

用電量(<i>K.W./Hr.</i>)	3-4 月	5-6 月	合計
屋頂裸露	421	235	656
屋頂薄層綠化	113	223	336
節電比率	73.2%	5.1%	48.8%

五、結論

本研究驗證出住宅區屋頂綠化之日間保溫效果、夜間室內保溫效果、降低熱傳導量及時滯效應延遲，達到節能減碳效益。

研究結果發現中午時段屋頂綠化確實降低建築物的屋頂樓地板表面溫度 $10.2-14.2^{\circ}\text{C}$ ，單日最高溫時甚至可以降溫高達 $20.6-26.2^{\circ}\text{C}$ ，進而調節室內溫度達節能減碳效果。入夜23:00-24:00時確實可以保存輻射熱能提高建築物屋頂樓地板表面溫度 $1.6-2.1^{\circ}\text{C}$ ，最低溫甚至可以升溫高達 $1.9-4.1^{\circ}\text{C}$ ，進而達到保溫之效果。隨著節氣溫度變化，發現隨著月份遞增入夜後的保溫效益遞減，相對的中午降溫效益差異不明顯，可能與台灣3、4、5月節氣為梅雨季節有關。

熱傳導研究結果發現對照區平均熱傳導 Q 為 73.40W ，實驗區平均熱傳導 Q 為 42.53W ，屋頂綠化可以降低熱傳導量(42%)，達到降溫效益。研究得知對照區14:05-14:45分為室內最高溫度環境(平均 44.90°C)，時滯效應延遲溫度平均約36分；實驗區16:05-16:15分為室內最高溫度環境(平均 23.98°C)，屋頂綠化後延遲溫度平均約100分，避開用電量尖峰時段，可節省空調耗電量，達到節能(48.8%)的經濟效益。

本研究為單一案例的結果，無法充分提供所有的住宅區建築物屋頂綠化後，營造室內舒適環境，減少居家用電量，達到節能的經濟效益建議資訊，更多的調查研究是必要的。本研究之結果可提供住宅區建築物一些訊息，在各項環境因子相互影響下，期望能兼顧舒適與節能的雙重要求。

參考文獻

- 方智芳，2011a，薄層綠化屋頂介質及植栽之熱效益，「科學農業」，59：118-136。
- 方智芳，2011b，台灣中部地區生態屋頂減熱效果之研究，「造園學報」，17(4)：45-62。
- 李岳岩、周若祁，2006，日本的屋頂綠化設計與技術，「建築學報」，2：37-39。
- 許萍、車伍、李俊奇，2004，屋頂綠化改善都市環境效果分析，「環境保護」，7：41-44。
- 陳秋銓、李權宸、陳俊麟、施能衡、呂博清、李鏗翰，2012，綠屋頂及立面植生對於屋頂降溫效益之研究(I)，「健康與照顧科學學刊」，1(2)：88-103。
- 黃國倉，2011，綠建築的屋頂綠化，「科學發展」，460：48-53。
- 林寶秀，2010，植栽綠地降溫效果之研究，臺灣大學園藝學系博士論文。
- 許瑞銘，2006，屋頂綠化熱效益之研究，朝陽科技大學建築及都市設計研究所碩士論文。
- 曾筱霽，2011，不同屋頂降溫系統對室內溫度影響—以水池、噴霧、灑水為例，朝陽科技大學建築及都市設計研究所碩士論文。
- 連祥萍、劉東啟，2009，運用省水耐旱植物進行屋頂薄層綠化之熱效應研究，「興大園藝」，34(2)：73-86。
- 蘇榮宗，2009，屋頂植草覆土層熱效應之研究，國立高雄大學都市發展與建築研究所碩士論文。
- 林憲德，1994，「現代人類的居住環境」，台北：胡氏圖書出版社。
- 林憲德，2003，「熱濕氣候的綠色建築」，台北：詹氏書局。

- 李中原, 2008, 綠屋頂介紹: 觀念與案例, 「綠屋頂推廣交流討論會資料」, 台北市: 信義行政中心, 3-9。
- 張育森、賴允慧、侯炳丞, 2009, 綠屋頂介質與植物之關係, 「節能減碳綠工法~綠屋頂及綠牆交流討論及推廣展示活動」, 台北市, 17-24。
- 唐鳴放、王科, 2010, 屋頂綠化節能熱工參數研究, 「2010 上海市博世界屋頂綠化大會論文集」, 上海市: 世博會, 136-140。
- Chen C.C., Lee S.H., 2013a, Research of residential area ecological green roof for reduce the heat efficiency in Taichung, *Applied Mechanics and Materials*, 368-370: 1270-1273.
- Chen C.C., Lee S.H., 2013b, Research of Artificial sites green roof for energy-saving efficiency in Taiwan Taichung, *Applied Mechanics and Materials*, 368-370: 1342-1345.
- Eumorfopolou, E., Aravantions, D., 1998, "The contribution of planted roof to the thermal protection of buildings in Greece", *Energy and Buildings*, 27: 29-36.
- Giridharan, R., Lau, S.S.Y., and Ganesan, S. 2005, "Nocturnal heat island effect in urban residential developments of Hong Kong", *Energy and Buildings*, 37: 964-971
- Hien, W. N., and Jusuf, S. K., 2008, "GID-based greenery evaluation on campus master plan", *Landscape and Urban Planning*, 84:166-182.
- Incropera, F. P., Dewitt, D. P., 1996, "Fundamentals of heat and mass transfer", John Wiley & Sons.
- Landsberg, H. E., 1981, *The Urban Climate*, New York, Academic Press, Inc, 275.
- Mentens, J., Raes, D., and Hermy, M., 2006, "Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in urbanize 21st century?", *Landscape and Urban Planning*, 77:217-226.
- Niachou, A., Papakonstantinou, K., Santamouris, M., Tsangrassoulis, A., and Mihalakakou, G., 2001, "Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance", *Energy and Buildings*, 33: 719-729.
- Nagase, A., Dunnett, N., 2010, "Drought tolerance in different vegetation types for extensive green roofs: Effects of watering and diversity", *Landscape and Urban Planning*, 97: 318-237.
- Onmura, S., Matsumoto, M., and Hokoi, S., 2001, "Study on evaporative cooling effect of lawn gardens", *Energy and Buildings*, 33: 653-666.
- Palomo, E., Barrio, D., 1998, Analysis of the green roofs cooling potential in buildings, *Energy and Buildings*, 27: 179-193.
- Rosenzweig, C., Solecki, W.D., Parshall, L., Chopping, M., Pope, G., and Goldberg, R., 2005, "Characterizing the urban heat island in current and future climates in New Jersey", *Environmental Hazards*, 6: 51-62.
- Spala, A., Bagiorgas, H.S., Assimakopoulos, M.N., Kalavrouziotis, J., Matthopoulos, D., and Mihalakakou, G., 2008, On the green roof system. Selection, state of the art and energy potential investigation of a system installed in an office building in Athens, *Greece Renewable Energy*, 3(1):173-177.
- Sendo, T., Kanechi, M., Uno, Y., and Noboru, I., 2010, "Evaluation of Growth and Green Coverage of Ten Ornamental Species for Planting as Urban Rooftop Greening", *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, 79 (1):69-76.

- Takakura, T., Kitade S., and Goto, E., 2000, "Cooling effect of greenery cover over a building", *Energy and Buildings*, 31:1-6.
- Voyde, E., Fassman, E., and Simcock, R., 2010, "Hydrology of an extensive living roof under sub-tropical climate conditions in Auckland, New Zealand", *Journal of Hydrology*, 394: 284-395.
- Wong, N.H., Chen, Y., Ong, C.L., and Sia, A., 2003, "Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment", *Building and Environment*, 38:261-270.
- Wong, N.H., Tay, S.F., Wong, R., Ong, C.L., and Sia, A., 2005, "Life cycle cost analysis of rooftop gardens in Singapore", *Building and Environment*, 38:499-509.