

國立交通大學
環境工程研究所
碩士論文

綠屋頂生命週期與節能效益評估
Life Cycle and Energy Saving Assessment for
Green Roof



研究生：鄭維祐

指導教授：高正忠

中華民國一百零一年六月

綠屋頂生命週期與節能效益評估

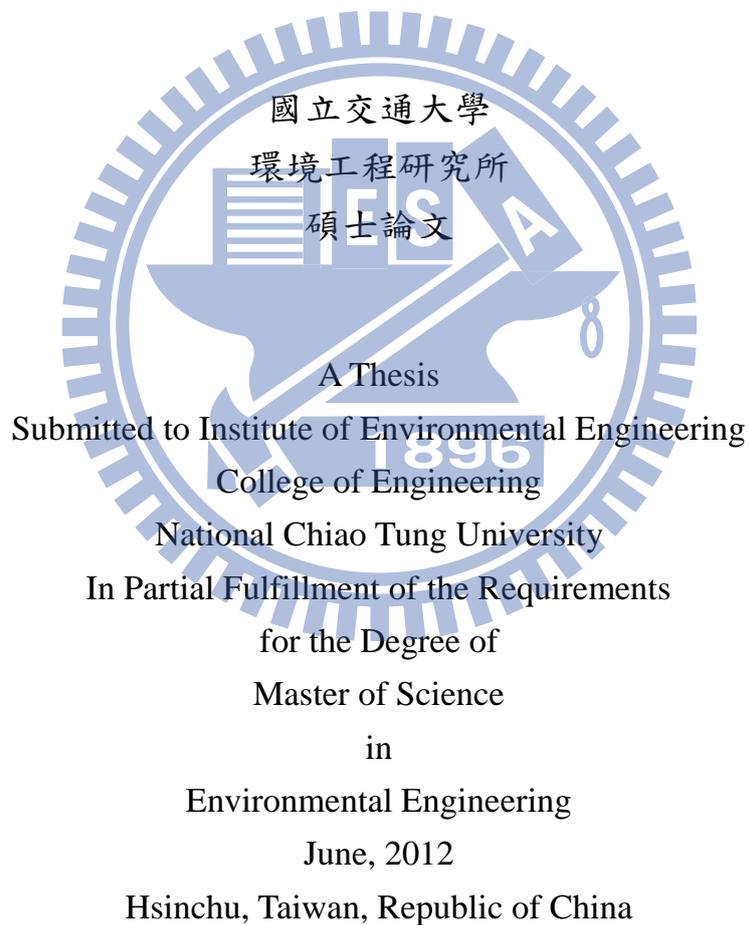
Life Cycle and Energy Saving Assessment for Green Roof

研究生：鄭維祐

Student : Wei-Yu Cheng

指導教授：高正忠

Advisor : Jehng-Jung Kao



中華民國一百零一年六月

摘要

全球暖化日益嚴重，建築物之節能減碳已成為都市重要議題。由於綠屋頂可降低屋頂熱量傳輸及具有碳吸附功能，為有效之建築物節能減碳措施，除此之外，綠屋頂亦具有其他環境效益。本研究因而以建築耗能模式及生命週期分析工具評估綠屋頂於台灣地區施行之效益。本研究針對國內數棟案例建築物之綠屋頂就其節能減碳、生命週期及成本效益進行評估。

建築物節能部份，本研究先量測綠屋頂之 U-value 與並使用標準氣象年氣象資料，以 1D-HD 法及 Energy Plus 建築耗能軟體模擬綠屋頂下的能耗差異，以評估其節能效益，節能結果亦與綠屋頂植物之二氧化碳吸收效果合併評估其減碳效益。在生命週期評估部份，依案例建築物綠屋頂與一般屋頂材料組成採用 Simapro 軟體分析綠屋頂在生命週期期間對環境之影響，並依與一般屋頂環境衝擊差異分析綠屋頂的環境效益。且依市場價格推估一般屋頂及綠屋頂建構、維護更換成本，最後進行成本效益評估，以探討都市建築物建置綠屋頂之適宜性。

本研究實測 10 公分薄層綠屋頂 U-value 約在 0.42 左右。節能效益依二方法的模擬結果，三案例約有 12 至 15kWh/m²/yr 間效益；減碳效益則約有 5,964 至 7,293 kg CO_{2e}/yr 間的減碳效益；環境效益部份在一般屋頂壽命 20 年至 10 年，綠屋頂在人類、水體與陸域生物毒性等面向所減少環境衝擊量在 1×10^6 至 1.8×10^6 kg 1,4-DB_{eq}，約減少 51% 至 75%；成本效益評估結果綠屋頂在一般屋頂壽命在 15 年以下有 5-50 元/m²/yr 左右的經濟效益，若電價上漲，綠屋頂的經濟效益將更為明顯。

關鍵字：綠屋頂、U-value、建築耗能模式、生命週期評估、節能減碳、成本效益評估、永續環境系統分析。

Abstract

To prevent the increasingly serious threat of global warming to life on earth, building energy saving and greenhouse gas (GHG) emission reduction has become a major issue for most cities. Green roofs can effectively reduce heat flux and sequester carbon by vegetative cover, thereby decreasing building energy consumption and GHG emissions. This study thus applied a building energy simulation model and a life cycle assessment (LCA) software to assess the environmental benefits of local green roofs based on their energy savings, GHG emission reductions, and life cycle and cost-benefit assessments.

For evaluating the energy saving, the U-value of a green roof was measured first. With the measured U-value and the typical meteorological year of the study area, the one-dimensional heat flux (1D-HF) method and the EnergyPlus model were used to estimate the energy saving. The GHG emission reduction was computed based on the emission factor of local electricity and the carbon sequestration capability of a green roof. The difference between a conventional roof and a green roof for various life cycle environmental impacts was evaluated by Simapro. Finally, a life cycle cost-benefit analysis was implemented based on the market prices of roof materials, replacement costs, life spans, and economic values of energy savings and GHG emission reductions. The results obtained in this study are intended to evaluate the applicability of green roofs for buildings in local cities.

The U-value of a local extensive green roof with 10cm substrate depth was measured and estimated to be 0.42. The energy savings of three studied cases are approximately 12-15kWh/m²/yr. The GHG emission reductions range between 5,964 and 7,293 kg CO_{2e}/yr. While compared to the conventional roof with a life span of 10-20 years, the green roof LCA result shows about 1x10⁶-1.8x10⁶ kg 1,4-DB_{eq} impact reductions for human ecotoxicity, aquatic ecotoxicity, and terrestrial ecotoxicity. The life cycle cost benefit analytical results show \$5-50/m²/yr economic benefit over the conventional roof with a life span of 10-15 years. The economic benefit is expected to significantly increase after the government raises electricity tariffs in near future.

Key words: Green roof; U-value; building energy simulation model; life cycle assessment; energy saving; GHG emission reduction; cost-benefit analysis; and sustainable environmental systems analysis.

致謝

經過兩年的時光，終於完成了這本論文，研究期間感謝教授的指導與諄諄教誨；宥禎學姐處處幫忙，協助我解決許多研究上的問題；岳奇與科智學長與彥宏的陪伴，讓我碩一充滿回憶；研究室同學的砥礪與共，讓我有充實的碩二時光，還有學妹們，廷涵與佩樺，感謝兩人精神上的支持，讓我能更專注於論文，還有許許多多的，感謝。

研究室外，感謝爸媽的鼓勵與扶持，女朋友的陪伴，讓我壓力大能有所依靠，讓我失落時能有所支撐，沒有你們，就沒有今天的我，感謝；除此之外，特別感謝大溪高中的廷熙學長，給我許多研究上的協助與實驗過程中的幫忙，讓我能順利完成，還有信義區公所、建成國中的所方校方的幫忙，提供資料、廠商的支援，器材使用說明等，感謝。

鄭維祐 謹誌於交大
民國一百零一年六月



目錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
致謝.....	III
目錄.....	IV
圖目錄.....	VII
表目錄.....	IX
符號說明.....	XI
第一章 前言.....	1
1.1 研究緣起.....	1
1.2 研究目的.....	3
1.3 論文內容.....	4
第二章 文獻回顧.....	5
2.1 綠屋頂種類與效益及國內外綠屋頂之發展.....	5
2.2 綠屋頂節能效益評估.....	7
2.2.1 U-value.....	7
2.2.2 以建築能耗模式評估綠屋頂節能效益.....	8
2.3 綠屋頂生命週期評估.....	10
2.3.1 綠屋頂生命週期評估.....	10
2.3.2 生命週期評估方法與工具.....	11
2.4 綠屋頂成本效益分析.....	13
第三章 研究流程與方法.....	15
3.1 研究流程.....	15
3.2 案例資料收集與整理.....	18
3.3 綠屋頂節能效益評估.....	21

3.3.1 .. U-value	21
3.3.2 .. 以 U-value 推估屋頂隔熱節能效益	23
3.3.3 Energy Plus (E+) 簡介	24
3.3.4 氣象資料	25
3.3.5 E+模型建立	25
3.3.6 綠屋頂節能效益評估	27
3.4 綠屋頂生命週期評估	27
3.4.1 Sima Pro 生命週期評估軟體介紹	27
3.4.2 LCA 進行程序	28
3.4.3 資料庫參數輸入	31
3.4.4 綠屋頂建築減碳效益評估	32
3.4.5 綠屋頂建築環境效益評估	32
3.5 綠屋頂成本推估	33
3.6 綠屋頂成本效益評估	34
第四章 結果與討論	37
4.1 案例建築	37
4.2 綠屋頂節能效益評估	39
4.2.1. 綠屋頂 U-value	39
4.2.2. 綠屋頂節能效益評估	44
4.3 綠屋頂生命週期評估	59
4.3.1 綠屋頂減碳效益評估	59
4.3.2 綠屋頂建築環境效益評估	61
4.4 綠屋頂成本效益評估	75
第五章 結論與建議	91
5.1 結論	91
5.2 建議	93

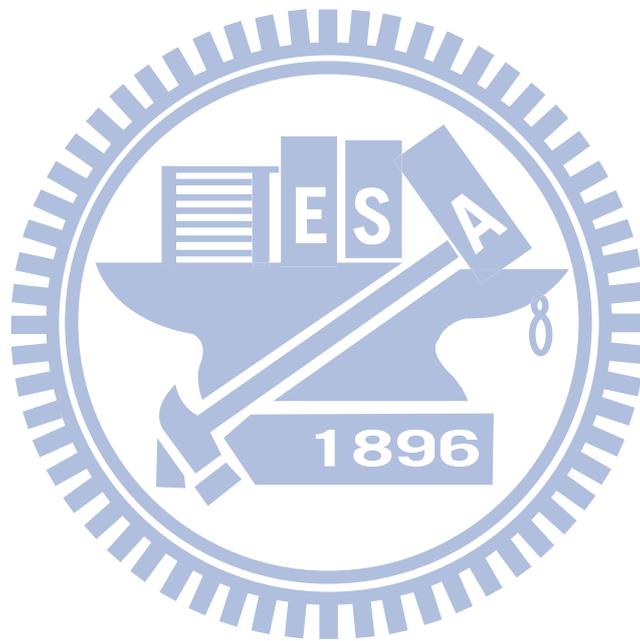
參考文獻.....	93
附錄 A.....	98
A.1 以熱通量計測量 U-value	98
A.2 以熱像儀測量 U-value	101



圖目錄

圖 3.1 研究流程圖	17
圖 4.1 案例 A 環工館配置圖	37
圖 4.2 案例 B 建成國中教室配置圖	38
圖 4.3 大溪高中綠屋頂(GR)及一般屋頂(CR)監測點示意圖	40
圖 4.4 案例 C 綠屋頂各點依量測值所估算之 U-value (a)GR-1;(b)GR-2; (c)GR-3.....	41
圖 4.5 案例 C 一般屋頂 U-value 測量結果(a)點 CR-1 測量結果 ; (b)點 CR-2 測量結果	43
圖 4.6 新竹各月超過攝氏 26 度的總溫度差 x 小時數.....	45
圖 4.7 案例 A 1D-HF 法所估算之各月節能量.....	45
圖 4.8 案例 A EnergyPlus 模式所模擬的各層節能量.....	46
圖 4.9 案例 A Energy Plus 模式所模擬各月節能量.....	47
圖 4.10 臺北各月超過攝氏 26 度的溫度差 x 小時數.....	49
圖 4.11 臺北新竹氣溫比較.....	50
圖 4.12 案例 B 1D-HF 法所估算之各月節能量.....	51
圖 4.13 案例 B Energy Plus 模式所模擬的各層節能量.....	52
圖 4.14 案例 B Energy Plus 模式所模擬各月節能量.....	53
圖 4.15 案例 C 1D-HF 法所估算之各月節能量.....	55
圖 4.16 案例 C Energy Plus 模式所模擬的各層節能量.....	56
圖 4.17 案例 C Energy Plus 模式所模擬各月節能量.....	56
圖 4.18 案例 C Impact 2002+綜合級分結果.....	69
圖 4.19 案例案例 D 以 Impact 2002+單一模式評估結果	75
圖 4.20 案例 A 1D-HF 法各月份所省電費.....	79
圖 4.21 案例案例 A Energy Plus 模式模擬各月所省電費.....	80

圖 4.22 案例 B 1D-HF 法各月份所省電費.....	83
圖 4.23 案例 B Energy Plus 模式模擬各月所省電費.....	84
圖 4.24 案例 C 1D-HF 法各月份所省電費.....	87
圖 4.25 案例 C Energy Plus 模式模擬各月所省電費.....	88
圖 4.26 各國電價趨勢.....	90



表目錄

表 2.1 綠屋頂效益.....	6
表 3.1 案件建築物綠屋頂資料.....	20
表 3.2 臺灣電力公司各級電價.....	36
表 4.1 案例 C 綠屋頂基本資料.....	38
表 4.2 案例 D 綠屋頂基本資料.....	39
表 4.3 各案例節能效益結果.....	58
表 4.4 案例 A、B 與 C 減碳效益.....	61
表 4.5 案例 C 綠屋頂層組成.....	62
表 4.6 案例 C 原一般屋頂組成.....	63
表 4.7 案例 C 一般屋頂以 CML 2 法所估算之環境衝擊.....	65
表 4.8 案例 C 綠屋頂環境衝擊差異.....	66
表 4.9 案例 C 綠屋頂節能環境衝擊差異.....	67
表 4.10 案例 C 一般屋頂以 Impact2002+法所估算之環境衝擊.....	68
表 4.11 案例 C 綠屋頂環境衝擊差異.....	68
表 4.12 案例 D 綠屋頂層組成.....	70
表 4.13 案例 D 原一般屋頂組成.....	71
表 4.14 案例 D 一般屋頂環境衝擊.....	72
表 4.15 案例 D 綠屋頂環境衝擊差異.....	73
表 4.16 案例 D 一般屋頂以 Impact2002+法所估算之環境衝擊.....	74
表 4.17 案例 D 綠屋頂環境衝擊差異.....	74
表 4.18 一般屋頂推估單位成本.....	76
表 4.19 綠屋頂推估單位成本.....	78
表 4.20 案例 A 綠屋頂成本效益(a)成本效益；(b)綠屋頂成本.....	82
表 4.21 案例 B 綠屋頂成本效益.....	86



符號說明

符號	說明	單位
U_t	綠屋頂熱傳係數	$W/m^2 \cdot ^\circ K$
ΔQ	通過一般及綠屋頂熱通量的差值	W
r_{int}	內氣膜常數	$m^2 \cdot ^\circ K/W$
r_{ext}	外氣膜常數	$m^2 \cdot ^\circ K/W$
U_{CR}	一般屋頂熱傳係數	$W/m^2 \cdot ^\circ K$
U_{GR}	綠屋頂基質部份的熱傳導係數	$W/m^2 \cdot ^\circ K$
A	屋頂面積	m^2
T	室外溫度	$^\circ C$
i	折現率(discount rate)	%
C_{GR}	綠屋頂的年均成本	NTD/ m^2 /yr
C_{GRI}	綠屋頂的初設成本	NTD/ m^2
C_{GRP}	每 15 年更新部分植栽的費用	NTD/ m^2
a	綠屋頂壽命常數	year
b	綠屋頂植被更換常數	year
c	綠屋頂植被更換常數	yaer

第一章 前言

1.1 研究緣起

隨著全球暖化日趨嚴重，都市室內空調的使用量隨著上升，亦伴隨其它都市環境問題，如何降低室內溫度以降低空調使用量及趨緩都市環境問題為現今都市發展之重要課題之一。綠屋頂為一包含土壤基質及植物之綠覆面，覆蓋於建築頂層(Sailor *et al.*, 2008)，具備阻隔太陽輻射、降低室內溫度、減少酸沉降、吸附二氧化碳、淨化空氣、截水、形成生物跳島...等效益(Blackhurst *et al.*, 2010)，是一個有效減緩都市氣溫上升與都市建築物對環境衝擊的措施。唯在臺灣地區綠屋頂推廣尚在起步階段，因而有必要研究綠屋頂之適用性，在評估綠屋頂時除了分析其降溫節能效益，亦有必要考量其生命週期，推估成本，進行綠屋頂成本效益評估，方能完整的評估其適用性，有效評估其環境效益(Kosareo and Ries, 2007)。本研究因而採用建築物耗能模式及生命週期評估軟體，配合臺灣地區天候狀況與建築資料評估綠屋頂的降溫節能與環境效益，並推估綠屋頂建構成本，分析其成本效益，並據以評估其在國內推廣的適用性。

國內只有極少數的研究曾分析綠屋頂的降溫效益，謝(94年)曾以模擬小屋監測綠屋頂及綠牆的降溫效果。國外則已有綠屋頂節能效益研究(Sailor, 2008; Trcka *et al.*, 2007; Peuportier *et al.*, 2001)，採用建築物能耗模式評估綠屋頂降溫節能效率。由於不易針對每個綠屋頂進行監測，故本研究亦將以國內外常用 1-dimensional heat flux equation (1D-HF) (Clark *et al.*, 2008)與 Energy Plus (USDOE, 2012)模擬分析綠屋頂的降溫節能效益。

在執行模式模擬前必須收集建築物之 U-value (Heat transfer coefficient, U-value)，一般建築物牆面、屋頂與玻璃的 U-value 可由建築規範取得(建築師公會，99年)，但綠屋頂的 U-value 目前國內尚無數值可供使用，考慮

臺灣環境與他國之差異，直接引用國外參數可能與實際情況差異太大，本研究因而以熱通量計、感溫線、熱像儀等儀器於大溪高中綠屋頂利用熱通量計收集室內熱傳遞量變化，配合感溫線收記錄室內外溫度變化，使用熱通量公式(Baker, 2011)，估算綠屋頂之 U-value，據以估算一適合臺灣地區綠屋頂 U-value 值。

除綠屋頂 U-value 值外，仍需氣象資料，考慮臺灣地區近年來氣候變化趨劇，短期的氣象資料可能無法代表長時間之氣象情形(林，2005)，本研究因而採用標準氣象年氣象資料，供後續節能模式模擬之用。

綠屋頂節能效益部份，主要利用 1D-HF 法與 Energy Plus 兩方法，配合估算綠屋頂 U-value 值，配合前述所取得之案例建築資料，估算綠屋頂建置前後用電量變化，估算節能量，並比較兩方法結果，評估綠屋頂節能效益。

評估綠屋頂的適用性，除了評估其節能效益，亦應依整個生命週期評估其對環境所帶來的效益與影響，所以在評估時，非僅計算綠屋頂的局部效益與影響，亦應考量其在整個生命週期的環境效益與影響，故本研究運用國際上常用的 Simapro (Goedkoop, 2008)軟體進行綠屋頂生命週期評估。主要評估分析信義區公所與大溪高中兩個建築物建置綠屋頂在其生命週期內之環境效益與影響。生命週期評估前，必須決定欲分析之周界範圍，不同的範圍界定，會影響到分析結果，國外曾有研究(Wong *et al.*, 2003; Chen *et al.*, 2001; Lui, 2008)將綠屋頂生命週期分為原料、材料運輸、建置、使用維護等部份比較其效益，本研究生命週期評估始於綠屋頂原料部份，包括運輸、使用維護階段，並假設綠屋頂生命週期為 40 年，作為評估範圍，採用常用的 CML 2 與 impact2002+ (Humbert *et al.*, 2005)兩方法評估綠屋頂環境效益，評估重點亦包含屋頂壽命延長(Saiz *et al.*, 2006)，且將依據

國內電廠之排放係數計算出之溫室效應氣體當量，估算綠屋頂之減碳效益。

除了估算節能減碳效益及環境效益與影響，亦有必要分析成本，國外 (Carter *et al.*, 2008; Kosareo *et al.*, 2007; Wong *et al.*, 2003) 曾將綠屋頂成本分為原料、運送、建置、維護與更換等項目分析，其中原料包括綠屋頂植物、基質、保水層、隔水層等成本；運送部份則是考慮原料在運送所耗費油料並估算建製花費與每年維護綠屋頂所需成本，主要採用市場價格估計。本研究亦採用類似方式進行，收集國內綠屋頂實際建置的成本資料，再依所收集資料估算綠屋頂及其他相關項目的成本，與一般屋頂上方防水隔熱層成本，以作為成本效益評估之依據。

本研究因而針對國內數個薄層式綠屋頂案例進行建築物耗能模式模擬及生命週期評估，且將實測綠屋頂的 U-values，亦將收集估算綠屋頂成本，配合以上模式模擬之結果進行案例建築物之成本效益綜合評估。

1.2 研究目的

本研究主要分析綠屋頂在國內推廣的適用性，將分析其節能效益與生命週期中的環境效益與影響，且將進行成本效益綜合評估以作為評估其適用性的依據，以供國內推行綠屋頂及相關決策之參考。主要研究目的為以下四項：

1. 臺灣地區綠屋頂 U-value 估算：本研究將於桃園縣大溪高中，利用熱通量計、感溫線、熱像儀等儀器，以 Baker (2011) 所提出之 U-value 公式，估算薄層式綠屋頂 U-value 值。
2. 綠屋頂節能效益推估：將以 Energy Plus 模擬估算數個不同類型建築物建置綠屋頂的降溫節能效益。且由於國內尚無綠屋頂的 U-value 可供使用，故本研究亦將實測及採用不同方法估算 U-value。

3. 綠屋頂生命週期環境效益與影響評估：將評估綠屋頂整個生命週期中的環境效益與影響，以 Simapro 軟體進行分析。
4. 綠屋頂成本效益評估：依據所收集各綠屋頂建置成本與相關資料估算成本，且綜合節能效益與生命週期評估的結果分析其成本效益，以供推廣綠屋頂及相關規劃決策之參考。

1.3 論文內容

後續章節中，第二章回顧綠屋頂種類與國內外綠屋頂發展情況、綠屋頂節能效益評估方與工具、綠屋頂生命週期評估、綠屋頂成本效益綜合評估等相關文獻；第三章將介紹本研究流程與所採用評估模式，並就研究流程步驟一一詳細說明；第四章則說明本研究案例建築物資料收集、建築物節能效益評估、生命週期評估及成本效益綜合評估結果，並與一般屋頂比較綠屋頂減碳、環境效益與成本；最後第五章總結。



第二章 文獻回顧

綠屋頂於國外已研究發展多年，本章節主要探討綠屋頂國內外綠屋頂之相關發展成果，回顧綠屋頂種類與效益及國內外綠屋頂之發展、綠屋頂節能效益評估相關研究、綠屋頂生命週期評估相關研究及成本效益綜合評估等主題，以下各節逐一說明之。

2.1 綠屋頂種類與效益及國內外綠屋頂之發展

綠屋頂為於屋頂覆蓋土壤植被的屋頂型式，其基本分層為植被層、基質層、過濾層、排水層、阻根層與阻水層(Lui, 2008; Kosareo and Ries, 2007)，在分類上，可依介質層之厚度區分為薄層型(extensive)與密集型(intensive)兩種，薄層型綠屋頂介質厚度在5cm到15cm之間，而密集型則是介於15cm至120cm之間，薄層型綠屋頂因受限於介質厚度，可種植之植物高度也因此受到限制(Kosareo and Ries, 2007)；綠屋頂亦可由設計內容與施工方式分為庭園式、盆栽式與薄層式綠屋頂(錫瑠基金會，96年)，本研究研究薄層式與庭園式綠屋頂的效益，案例之一信義區公所即為薄層式綠屋頂，而另一案例台北市立建成國中則為庭園式綠屋頂。

在綠屋頂環境效益部份，過往文獻曾將其分類為可否估計或轉化為當量之別，表 2.1 為整理相關文獻(e.g., Carter and Keeler, 2008; Peuportier, 2001; 李，99年)所列之環境效益與其計算單位或當量，包括節能減熱、減少地表逕流、屋頂延壽、降低噪音、提升空氣品質、減緩溫室效應、減低臭氧層破壞、減少酸沉降、減緩優養化、減少生物毒性、增加動植物棲地/生物多樣性、熱島效應、增加建築美觀等效益，本研究利用建築耗能評估軟體與生命週期評估軟體進行分析，評估面相為建築物節能、環境效益與成本效益分析，唯部份環境效益，如減少地表逕流、提升空氣品質、降低

噪音及難以評估的熱島效應等對於單一建築物而言不易評估其效益，且考慮人力有限，故本研究未納入考量。

表 2.1 綠屋頂效益

效益	估算方式	單位	估計
建築物節能	真值	MJ	可
減少地表逕流	真值	M ³	可
屋頂延壽	真值	年	可
降低噪音	真值	分貝	可
提升空氣品質	當量	Kg CO	可
減緩溫室效應	當量	Kg CO ₂	可
減低臭氧層破壞	當量	Kg CFC-11	可
減少酸沉降	當量	Kg SO ₂	可
減緩優養化	當量	Kg PO ₄ ³⁻	可
減少生物毒性	當量	風險	可
動植物棲地/生物多樣性	/	/	難
熱島效應	/	/	難
增加建築美觀			難

整理自 Carter and Keeler (2008); Peuportier (2001); 李(99 年)。

綠屋頂的發展在歐美國家已相當普遍常見，例如 Casey Trees 基金會 (2005) 曾計劃於美國華盛頓哥倫比亞特區進行再綠化(Re-Greening) 擬在 2020 年時，將綠屋頂覆蓋面積提升至 20 萬平方英尺(20-20-20)；歐洲德國亦積極推廣綠屋頂，該國所提出的 FLL 規範手冊(Landscape Research Development & Construction Society, 1975) 亦經常為各國建置綠屋頂的重要參考規範；瑞典亦於馬爾摩(Malmo) 在民房上方建置薄層式綠屋頂 (Berndtsson *et al.*, 2008)。亞洲部份，日本亦積極推動綠屋頂，如 2005 年完成的昭合紀念公園、鐵父市歷史文化傳承館等(日經 BP 社，2006)，且已建立手冊，亦有不少專業廠商提供綠屋頂的產品，已漸漸形成一個當地產業。

國內綠屋頂目前則尚處於初期推廣階段，錫瑠基金會曾於吳興國小、松山工農、信義區公所進行綠屋頂試作(錫瑠基金會，98 年)；台北市產發局

亦在部份台北市區公所，如松山區公所、內湖區公所建置綠屋頂，雖然逐漸增加，但建置數量仍不多，尚屬起步階段。

綠屋頂在推廣之初，有必要先評估其效益，以作為擬定相關政策之依據，而唯效益評估應提供較全面性的評估數據，瞭解總體環境與經濟效益，故本研究針對台北市與桃園縣內數個綠屋頂建築進行生命週期與成本效益評估。

2.2 綠屋頂節能效益評估

綠屋頂主要節能效益源於頂層植物與介質隔絕與儲存太陽所傳遞之熱通量(Barrio, 1998)，過去已有一些研究探討綠屋頂設置前後耗能變化進行模式模擬；建築物進行耗能評估時，綠屋頂 U-value 為主要參數之一，本節將對綠屋頂 U-value 計算與有關於建築物節能效益相關文獻進行回顧。

2.2.1 U-value

U-value 為計算建築材料熱通量值之主要參數，可用以估算建材的隔熱能力，亦為建築物耗能模式模擬之重要參數之一，是推估綠屋頂節能效益不可缺少的參數。Alcazar and Bass (2005)則曾進行綠屋頂 U-value 之實驗，分析綠屋頂在不同含水率下之 U-value 估計值，在 0%至 80%含水率之間之綠屋頂 U-value 值在 0.42 至 0.53 之間。

U-value 亦可以利用相關參數估計之，例如 USDOE (2010)與 Barrio(1998)即曾提出一些熱通量估算公式，所使用之參數為葉面積指數(Leaf area index, LAI)、葉面反射率(Leaf reflectivity)、土壤熱吸收率(Conductivity of soil)、土壤密度與比熱等參數，估算綠屋頂之 U-value，唯要取得這些參數須要進行更多實驗，故本研究並未採用。除上述公式外，

Baker (2011)亦提出一個估算 U-value 公式，該公式所需參數為室內外溫度、材質熱通量等參數，這些參數較容易量測，故本研究主要採用此公式估算。由於直接使用國外綠屋頂 U-value 可能造成評估上的誤差，故本研究以熱通量計等儀器進行實驗實場及模場監測，並採用此公式估算臺灣地區綠屋頂之 U-value。

2.2.2 以建築能耗模式評估綠屋頂節能效

綠屋頂節能效益主要分析綠屋頂建置後，因綠屋頂減少熱通量而使空調或暖氣使用下降量作評估其節能效率，在建築物耗能模式部份，文獻中使用過 Environmental Systems Performance-research (ESP-r)(Saiz *et al.*, 2006; Clark *et al.*, 2008)、eQuest (Kosareo and Ries, 2006)、與 Comfire (Peuportier, 2001)、One-dimensional heat flux equation(Clark *et al.*, 2008)與 Energy Plus (Sailor, 2008; Clark *et al.*, 2008)等模式進行分析，其中以 Energy Plus 與 ESP-r 較常用於綠屋頂節能效益評估，一般可利用建築物耗能模式模擬一般屋頂年用電量或空調用量，再依據屋頂 U-value 以綠屋頂模式進行模擬，並比較用電量變化及評估節能效益，以下介紹其發展與研究。

ESP-r (Hand, 2010)為英國 Strathclyde 大學所發展之建築物耗能軟體，現今支援多種系統，並開程式碼供發展者開發使用；ESP-r 在操作部份，與其他耗能模擬軟體相同，配合氣象資料、建材資料與配置資料，模擬實際環境，並可將建築物分區比較不同區域內部耗能情況，現今程式已內建建築物立體圖層繪製功能，方便模式建立，可供分析綠屋頂節能效益，綠屋頂應用部份，過去 Saiz *et al.*(2006)利用 ESP-r 分析綠屋頂建築各樓層之節能效果，其結果顯示建築物 16 個分層中，位於頂層兩個分層節能效果較顯著，且最上層有 20% 以上之節能效益，遠離綠屋頂的樓層則節能效益會降低，節能效益主要集中於前三層。

eQuest (LBNL, 2010)則為美國 Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL)所開發一個便捷建築物耗能模擬軟體，目前已有 20 年開發歷史，其所使用核心為 DOE-2，可設定三種不同日工作型式，如平日、假日或節日；在使用上可以利用 Wizards 模式方便內部參數輸入，並可以利用直接輸入建築物圖層檔，快速建立建築物耗能模式；使用資料部份亦與其他耗能模式相似，需輸入空調資料、氣象檔、建築資料等，在氣象檔部份，可以支援不同氣象資料，如 TMY、TMY2 等，在綠屋頂節能效益評估上，過去 Kosareo and Ries(2006)在進行綠屋頂生命週期評估研究時即曾使用 eQuest 模式模擬薄層式與密集型綠屋頂進行節能分析，一年每單位綠屋頂約可以減少 8.70 至 17.39kWh/m²/年左右之能源消耗。

一維熱傳公式(One-dimensional heat flux equation, 1D-HF)主要依據 U-value、室內外溫度差、表面積等參數估算熱通量，過去 Clark *et al.*(2008)分析綠屋頂環境效益曾利用 1D-HF 法依據綠屋頂與一般屋頂之 U-values、逐時氣象檔估算各小時兩種屋頂熱通量差異，並利用空調系統每千瓦小時耗能\$0.8/KWh 與天然氣暖氣機耗能\$0.2/KWh 比較兩種屋頂年電費花費差異，本研究採用此方法估算並與 Energy Plus 模擬結果進行比較。

Energy Plus 為美國能源局(USDOE, 2012)所開發，主為核心為 building loads Analysis and System Thermodynamics(BLAST)和 DOE-2，主要供模擬建築物內部份熱流情況並據以推估空調使用情形，近年亦新增 Life Cycle Cost (LCC)分析功能，Sailor (2008)曾以該模式模擬休士頓與芝加哥建置綠屋頂情況下，各月份空調與暖氣設備使用下降量，結果發現兩案例在空調系統節能量單年約有 1360GJ 至 1535GJ，節約量約 2%。Clark *et al.*(2008)亦曾用 Energy Plus 評估綠屋頂節能效益，並與其他模式，如 ESP-r 與 1D-HF 法結果進行比較，本研究亦採用 Energy Plus 評估綠屋頂節能效益，並與依據 1D-HF 公式估算結果比較。

上述各建築物耗能模式階能用於評估綠屋頂節能效益，其中 Energy Plus 除與其他建築物耗能模式如 ESP-r、eQuest 相同，係利用空調資料、建築藍圖與建材資料、所在地氣候資料、內部人員、照明與電器用量、開窗率、天花板面積單位人口熱發散率(heat load of per person)等資料，分析建築物耗能、空調用量、暖氣、室內通風...等建築資訊外，Energy Plus 可配合葉面積指數(Leaf area index, LAI)、葉面反射率(Leaf reflectivity)、土壤熱吸收率(Conductivity of soil)、土壤密度與比熱等參數模擬綠屋頂材質 U-value，建立綠屋頂環境，評估綠屋頂節能效益，在模式建立部份，Energy Plus 雖無如 ESP-r 內建建築物圖層程式，但可以使用 Google SketchUp 外掛程式 Oper Studio (USDOE,2012)，以構圖方式輸入建築物空間配置，且考慮 Energy Plus 較能有效模擬綠屋頂環境，本研究使用 1D-HF 法與 Energy Plus 兩方法評估綠屋頂節能效益。

2.3 綠屋頂生命週期評估

生命週期評估是指對一產品各階段，從原料、生產、使用至回收或廢棄評估其對環境之衝擊影響，評估面向一般包括溫室效應、臭氧層破壞、氣候變遷、健康風險...等，本研究採用此方法評估綠屋頂的環境效益，以下主要回顧綠屋頂之生命週期評估研究及常用評估模式等相關文獻。

2.3.1 綠屋頂生命週期評估

生命週期評估是評估綠屋頂環境效益時常用的方法之一，Kosareo and Ries (2007)曾針對薄層型及密集型兩種型式之綠屋頂，與一般屋頂利用 Impact 2002+方法(Humbert *et al.*, 2005)進行 LCA，其主要評估截水與水質(Storm water quantity and quality parameters)、臭氧層破壞(ozone layer depletion)、酸沉降(Acid deposition)、非生物資源之消耗(abiotic depletion)與全球暖化(global warming)等環境衝擊，兩類型綠屋頂對環境衝擊皆較一

般屋頂少，且密集型綠屋頂環境衝擊減量較薄層型綠屋頂多，各面向減少量皆在 50% 以上，並以單一級分進行評估，薄層式綠屋頂約較一般屋頂衝擊量少 50%，本研究雖有密集型綠屋頂進行節能效益評估，唯因其建置年代久遠，不易進行 LCA，故本研究主要針對薄層型綠屋頂進行 LCA，唯由於水質淨化部份分析上較為困難，故本研究未納入分析。

Saiz *et al.*(2006)則針對馬德里一棟大樓使用 Simapro 5.0 進行綠屋頂生命週期分析，將綠屋頂分為原料(materials)、使用(Use)、維護(Maintenance)三階段，先對一般屋頂(White roof)就非生物資源消耗、全球暖化、臭氧層破壞、對人之毒性(human toxicity)、酸化(acidification)、優養化(eutrophication)等項目進行評估，並就建置綠屋頂後各項環境衝擊進行比較以分析其環境效益，其結果顯示在綠屋頂生命週期 50 年中，上述各項環境效益皆有 1%~5.3%，其中以非生物資源之消耗與優養化兩項較為明顯，皆在 5% 以上，此外從結果亦可以發現，綠屋頂在使用階段，相較原料與維護階段暫有過半以上的比例，可以瞭解綠屋頂環境效益主要是在使用階段，本研究利用生命週期評估分析綠屋頂環境效益，以利於後續成本效益評估之依據。

2.3.2 生命週期評估工具

LCA 主要評估流程為決定邊界與目的、列表、進行環境衝擊分析及統計比較，衝擊評估方法則包括 Eco-indicator 95、impact2002+ (Humbert *et al.*, 2005)、CML2 等。LCA 工具則包括 Boustead Model (BCL, 2011)、Gabi (PE company, 2011)、Simapro (Humbert *et al.*, 2005)、JEMAI LCA (JEMAI, 2007)、Eco-report (VHK,2011)、及國內工研院發展的 DoITPro 等，本節主要介紹本研究群已有建置的工具 Simapro。

Boustead Model (BCL, 2011)為歐洲BCL所開發之環境衝擊評估軟體，可以衝擊評估方法 impact 2002+進行評估，應用於工業製程，評估污染排放所造成之影響，使用者可以自行增加污染排放資料，如廢水、空污等。Gabi (PE Company, 2011)則是由德國 Stuttgart 大學與 PE Company 所共同開發之生命週期評估軟體，可針對工業製程、建材評估、農畜牧業環境影響等方面進行生命週期評估。Eco-report (VHK, 2011)則為荷蘭 Van Holsteijn en Kemna 所發展，可計算產品 LCC 亦可分析產品各階段之環境衝擊，亦內建衝擊指標供估計環境衝擊使用。JEMAI LCA (JEMAI, 2007)為日本社團法人產業環境管理協會所建立之生命週期軟體，所使用資料庫為日本的資料，加權處理後輸出結果。因本研究群目前已建置 Simapro，且在園藝材料部份資料庫較為完整，本研究採用此軟體進行綠屋頂環境效益評估。

Simapro (Goedkoop, 2008)為荷蘭發展之 LCA 工具，是國際上經常使用的 LCA 軟體之一，依據原料開始至成品過程中所使用各種物品進行 LCA，以下為 Simapro 模式之功能特色：

1. 可以將產品分為原料、使用與廢棄三部份進行評估，以瞭解各部份對環境之影響。
2. 可以比較產品依不同製程製造之差異。
3. 可將數據進行整理，標準化、特徵化。
4. 內建歐盟地區、美國與 ISO 之環境法規規範。
5. 提供輔助介面便於使用者建立產品生命週期。
6. 提供 Eco-indicator 95、impact2002+、CML 2 等 LCA 衝擊評估方法。

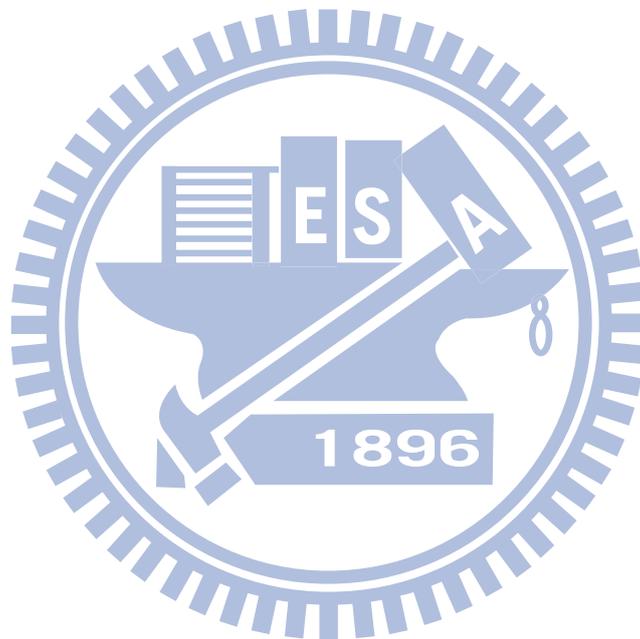
Simapro 模式對於工業製程、建材評估、農畜牧業等方面生命週期，皆有資料庫，亦可以配合不同環境衝擊係數估算環境衝擊，本研究利用 Simapro 模式，輸入兩案例建築綠屋頂使用材料，比較與一般屋頂環境衝擊差異，

以分析綠屋頂環境效益，因為 Simapro 資料庫在綠屋頂材料部份較為完整，故本研究採用 Simapro 進行綠屋頂效益評估。

2.4 綠屋頂成本效益分析

綠屋頂因初設成本較一般屋頂高，但長期而言其效益預期較好，故有必要進行生命週期成本效益分析，且與一般屋頂的成本比較，Clark *et al.*, (2008)以 40 年為基準評估比較綠屋頂與一般屋頂的環境效益及成本，考量延長屋頂壽命、截留雨水及節能等效益，其結果發現綠屋頂約比一般屋頂少 20.3-25.2% 的成本，若再考量空污減量效益，則可進一步下降為少 24.5-40.2%；Niu *et al.*(2010)延續前一研究且針對華盛頓哥倫比亞特區中綠屋頂進行成本效益分析，其指出成本會隨著設計與功能不同而不同，依其調查，薄層型綠屋頂成本平均為 US\$306/m²，標準差為 US\$44.56/m²，維護費為美金 13 至 21 元/m²，唯其假設二年後植物長成後才需要故未納入考量，其評估截水與降溫節能效益，及配合電廠空污排放係數估算空污減量效益，綜合比較結果發現綠屋頂約比一般屋頂少 30-40%；Carter and Keeler. (2008)則曾針對不同類型建築物推估一般屋頂與綠屋頂初設與維護成本總合分別為 US\$83 與 \$155 元/M²，但假設綠屋頂可延長一般屋頂至少一倍的壽命，並將截水、節能、淨化空氣等效益利用雨水設施費、電費與 NO_x 處理費用轉換經濟效益，並據以進行成本效益分析，且就社會與個人效益部份分別比較，結果顯示綠屋頂可減少污水處理單元 US\$9.06/m²，節能與淨化空氣則減少 US\$0.37 與 0.11/m²，個人部份可少交雨水措施費 US\$0.04 元/m²，顯示綠屋頂成本效益優於一般屋頂可看出綠屋頂可減輕環境衝擊及節能；Wang, *et al.* (2010)則針對新加坡綠屋頂進行生命週期成本分析，在初設與維護成本部份，綠屋頂成本較一般屋頂高，但考慮綠屋頂節能效益與成本比較結果顯示，在其生命週期中，綠屋頂總成本是低於一般屋頂。由

上述研究中，可看出綠屋頂雖然初設成本較高，但所有研究都顯示在其生命週期下，比一般屋頂更具成本效益，唯這些國外的數據不見得適用於國內，故本研究依據國內的情形評估綠屋頂的成本效益，並與一般屋頂作比較，本研究除了設置維護成本以外，亦考量降溫節能的效益，雖然本研究亦會進行生命週期評估，分析綠屋頂與一般屋頂對各面向環境衝擊的差異，但不會納入成本效益計算中，由於本研究群另有研究評估截水及空污減量的效益，故本研究亦未將這二項效益納入考量。



第三章 研究方法

本研究主要目的為評估綠屋頂對建築物之降溫節能效益與進行生命週期評估，分析綠屋頂各階段環境效益，且推估其成本，以及綜合分析綠屋頂成本效益，以供綠屋頂推廣相關規劃與決策參考。本章首先概要說明研究流程，之後針對主要研究內容，包括案例資料收集與整理、綠屋頂生命週期評估模式與綠屋頂耗能模式建立、綠屋頂成本推估、綠屋頂成本效益綜合評估等一一詳細說明之。

3.1 研究流程

本研究流程如圖 3.1 所示，主要分為資料收集與整理、綠屋頂耗能效益評估模式建立、綠屋頂生命週期評估模式建立、綠屋頂成本推估、綠屋頂成本效益綜合評估等五大部份，以下 概要介紹各部分：

1. 資料收集與整理：資料收集部份包括綠屋頂節能與生命週期評估相關模式方法、國內外屋頂 U-value 計算方法與內部熱源估算規範、氣象資料庫等相關文獻，並收集整理數棟建築模式建立所需之相關資料，包括建築平面圖、內部熱源資料或估算方法、空調設置資料、標準氣象年資料、綠屋頂建材與成本資料等整理。
2. 綠屋頂節能效益模式建立：本研究使用紅外線熱像儀、熱通量計、感溫線…等儀器實地測量綠屋頂植被之 U-value，以供模式模擬綠屋頂節能效益，輸入建築物平面圖、空調配置與內部配置與林(建築物能源管理網站，民國 97 年)所提出台灣氣象標準年台北標準氣象資料…等資料，並以 Energy Plus (USDOE, 2012)建立建築物耗能模式，評估綠屋頂節能效益。

3. 綠屋頂生命週期評估模式建立：生命週期評估主要考慮綠屋頂與一般屋頂在生命週期期間對環境效益與衝擊之差異，本研究使用 Simapro (Goedkoop, 2008) 模式進行評估，唯資料庫部份雖有工研院自建資料庫，但取得困難，故 Simapro 部份為使用內建荷蘭資料庫 (Goedkoop, 2008)。
4. 綠屋頂成本推估：為了進行後續的成本效益評估，本部份主要為收集數棟建築物綠屋頂建置所需之建材、基質、植被與其他耗材成本，估算建築物綠屋頂建製所需成本。
5. 綜合成本效益評估：本研究先比較建築物空調使用變化量轉換為電費與綠屋頂估算建置成本作比較，初步瞭解其經濟效益，此外，亦分析其他環境效益，如溫室效應氣體減量等，最後進行綜合成本效益評估。



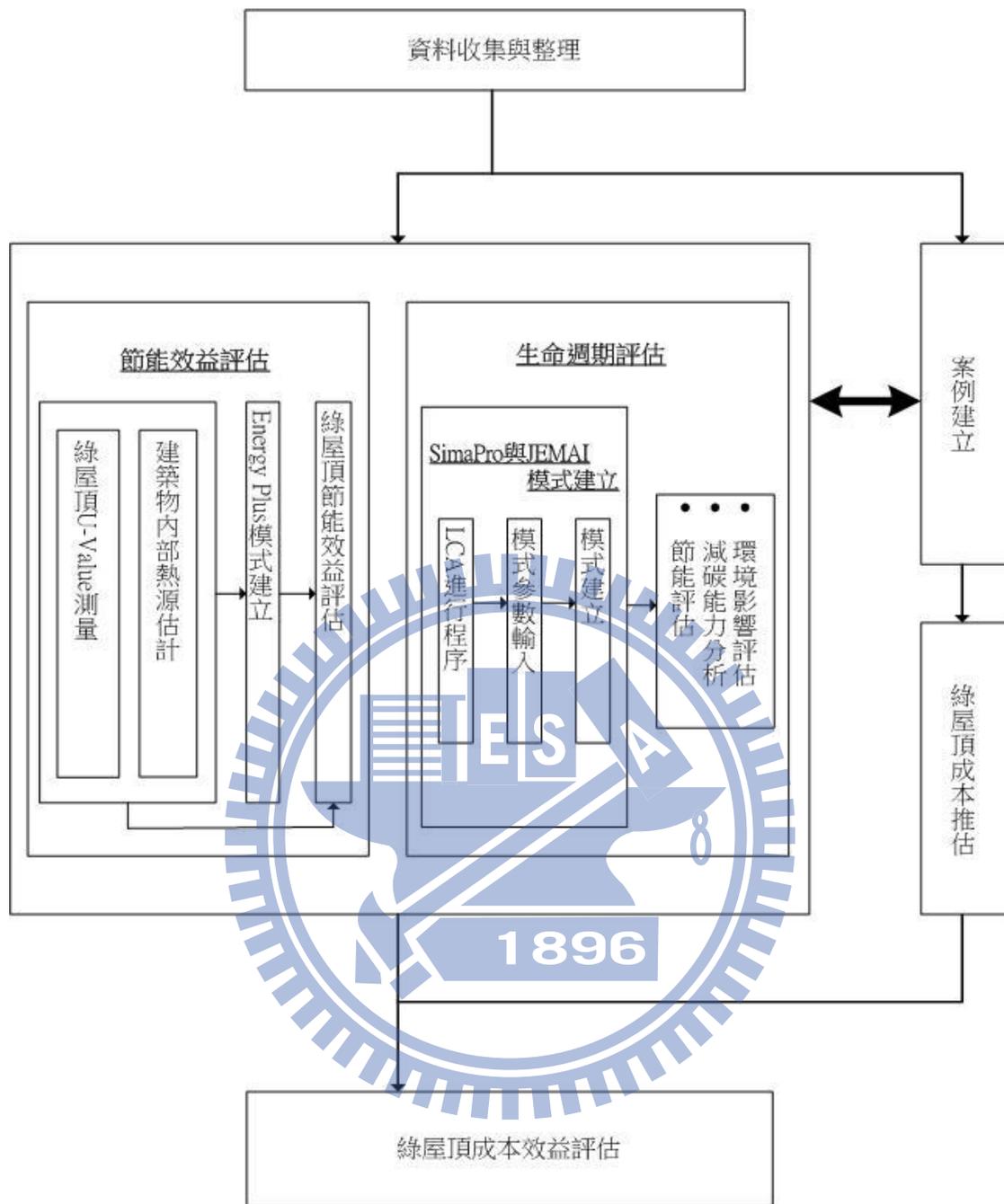


圖 3.1 研究流程圖

3.2 案例資料收集與整理

本研究針對數棟案例建築物進行研究，節能效益部份對交大環工館、建成國中與信義區公所進行模擬，生命週期評估部分則針對信義區公所與大溪高中進行，以下將交大環工館、建成國中、信義區公所與大溪高中簡稱為案例建築物 A、B、C 與 D。其中信義區公所綠屋頂為臺北市錫鑄基金會所建置，因大溪高中綠屋頂下方教室未安裝空調，雖然有降溫效益，但預期節能效益不大，故本研究未針對它進行節能效益分析。而交大環工所尚未設置綠屋頂，故無法進行生命週期評估，建成國中則因建置年代久遠，故未納入生命週期評估。

為了比較綠屋頂之環境效益，在資料收集與整理部份，本研究需收集建築物相關資料供 Energy Plus 模式模擬評估綠屋頂節能效益；另一部份，生命週期評估模式則需收集綠屋頂建置之相關材料與成本資料等，以配合模式之估算與後續綜合成本效益評估分析之用。以下重點說明 Energy Plus 模式、生命週期與成本效益評估所需之建築物與綠屋頂資料。

Energy Plus 輸入需要收集以下資料：

1. 建築物地理資訊，包括緯度、時區、高程與各月地表溫度等資料。
2. 人員與電器使用隨時間變化情況，國定假日日期，是否採用補假原則等資料。
3. 建築物牆面、屋頂、地板、窗戶所使用建材資料，包括建材之 U-value 值。
4. 建築物平面圖，包括內部空間隔間、高度與空調配置資料。
5. 照明、電器與人員容量與用電密度資料。
6. 空調資料，包括送風量、性能係數(Coefficient of performance, COP) 等資料。

以下為三棟案例建築物節能效益評估方式：

1. 案例 A：交大環工館部份，目前並未建置綠屋頂，故本研究依據案例建築物 D 所測量綠屋頂 U-value 結果，模擬在該建築建置綠屋頂的節能效益。
2. 案例 B：建成國中部份，本研究主要模擬比較厚層綠屋頂下方教室與未建置綠屋頂下各月份耗能差異，並據以分析節能效益。
3. 案例 C：信義區公所主要為分析綠屋頂建置前後，各月分用電量變化情形。

生命週期與成本效益評估則除了一些基本資料以外，主要收集以下資料：

1. 一般屋頂材質資料，主要為鋼筋結構層上方防水隔熱層部份材質資料。
2. 綠屋頂組成資料，包括植被、基質與厚度、培養土、下方過濾棉與排水板材料與用量。
3. 一般屋頂及綠屋頂建置成本，包括各層成本、維護與更新花費。
4. 其他綠屋頂相關設施材質資料，包括產地、維護時間與材料使用量。
5. 綠屋頂各層所含材質、用量、比例與比重。

由於未取得臺灣本土生命週期評估資料庫，故本研究採用 Simapro 軟體及其內建資料庫進行生命週期評估。

生命週期評估主要是針對案例 C 及 D，案例 C 為錫鑄基金會委外建製，綠屋頂面積 590m²，案例 D 則是由大溪高中師生所建置，綠屋頂面積 36m²，綠屋頂分層材料項目與用量如表 3.1 所列，用量主要依材料比重與面積估算，下方的一般屋頂組成則請教林建成建築師事務所而得，亦列於該表中，

為鋼筋結構層上方部份，含防水隔熱層。

表 3.1 案件建築物綠屋頂資料

信義區公所	用量(Kg)	大溪高中	用量(Kg)	
綠屋頂部份				
植被	75000	植被	864	
培養土		陶粒		
PVC 蓄排水版		培養土		1620
透水墊布		排水板		64
抗根酸 PE 防水布		過濾綿		1
屋頂部份				
五角水泥磚	36580			
保麗龍	117	保麗龍	0.00185	
發泡混凝土	40710	輕質混凝土	4140	
油毛氈	2950	油毛氈	180	
水泥砂漿	21240	水泥砂漿	1296	

其它原料組成，如水泥砂漿與發泡混凝土等、運輸部份資料，於 4.3.2 節說明之。

3.3 綠屋頂節能效益評估

本節主要說明如何評估綠屋頂節能效益，首先說明如何依前一節所建立的 U-value 推估綠屋頂隔熱節能效益，之後說明如何建立 Energy Plus 模式，包括所需輸入之參數與模擬流程，然後依據模擬結果進行節能效益評估，亦與依 U-value 所得結果比較。

3.3.1 U-value

因綠屋頂隔熱降溫推估與 Energy Plus 模式模擬皆須使用 U-value，國外依屋頂類型與植物種類有整理出其估計值(Hilten *et al.*, 2005 ; Clark *et al.*, 2008)，但是考慮國外氣候與臺灣地區差異，且在綠屋頂分類上較不精細，直接用上可能會產生誤差；國內雖然亦有綠建築屋頂 U-value 規範與計算軟體（內政部營建署），唯並未提供綠屋頂的 U-value，故本研究於桃園縣大溪高中綠屋頂及模擬綠屋頂以熱通量計、感溫線、資料收集器、熱像儀等儀器實測等數值，然後依以下兩公式(Baker, 2011)估算 U-values：

$$U_t = \frac{\sum_0^{i=t} Q_i}{\sum_0^{i=t} T_{i_i} - \sum_0^{i=t} T_{e_i}} \quad (W/m^2K) \dots\dots\dots (3.1)$$

$$U_t = \frac{1}{\frac{\sum_0^{i=t} \Delta T_{s_i}}{\sum_0^{i=t} Q_i} + r_{int} + r_{ext}} \quad (W/m^2K) \dots\dots\dots (3.2)$$

其中 U_t 為 U-value； Q_i 為熱傳透量； T_{i_i} 與 T_{e_i} 為室內與室外溫度； ΔT_{s_i} 為內外牆面溫度差； r_{int} 與 r_{ext} 則是為了修正內外牆面空氣層所造成 U-value 變化的常數，一般設為內氣膜 $r_{int} = 0.13 m^2K/W$ 與外氣膜 $r_{ext} = 0.04 m^2K/W$ (內政部營建署，2010)，以下式 3.1 簡稱 U-air，式 3.2 簡稱 U-surface。

測量過程如下：

1. 量測表面及室內外溫度：使用感溫線與溫濕度計收集室內外溫度

資訊，室內外各配置兩條懸空感溫線，此外亦利用感溫線收集天花板及基質土表面溫度，上表面與下表面各一條感溫線，用以計算內外溫差。

2. 量測熱通量：安置熱通量計於綠屋頂及無綠屋頂對照組的下方室內，綠屋頂及對照組屋頂下方天花板均各置 3 具熱通量計，綠屋頂下方配置位置為兩塊較高植物覆蓋度與一塊覆蓋度較低之綠屋頂下方，一般屋頂位置則與綠屋頂相對位置相應，以資料收集器收集其熱通量數據。
3. 資料收集器記錄頻率：每 2 分鐘一次。
4. 量測時段：由於綠屋頂遇雨會改變綠屋頂 U-value，故本研究收集至少 10 天乾燥綠屋頂狀況下之溫度與熱通量值變化。

資料分析方法部份說明如下：

1. 資料收集器所收集資料格式為逗點分隔之 .dat 檔，包括日期時間、預設各測點點溫度、各點熱通量值，利用 Excel 輸入一表格，事後直接收集之資料黏貼上去即可算出各點熱傳導係數變化情形與圖表。
2. 利用式 U- air 與式 U- surface 估算綠屋頂 U-value。
3. 分析一般屋頂與綠屋頂室內外溫度差距、綠屋頂表層與底層溫度差異變化。

本研究亦採用 FLIR T335 紅外線熱像儀量測屋頂及綠屋頂表面溫度，所測得的溫度除了可取代部分感溫線所測的溫度，以此方式量測可測量整個面各點的溫度，可據以分析平面空間上的溫度差異。

由於測量之綠屋頂 U-value 為含屋頂之值，故需利用下式計算薄層式

綠屋頂 U-value :

$$\frac{1}{U_t} = \frac{1}{U_{GR}} + \frac{1}{U_{CR}} \dots\dots\dots(3.3)$$

其中 U_t 為綠屋頂與一般屋頂 U-value 總合； U_{GR} 與 U_{CR} 分別為綠屋頂與一般屋頂 U-value 值，經計算後即可知綠屋頂 U-value。

以上實測所使用儀器及詳細步驟與說明請參見附錄 A。

3.3.2 以 U-value 推估屋頂隔熱節能效益

本研究採用 1D-HF 法(Clark *et al.*, 2008)推估一般屋頂與綠屋熱通量，雖然近年台灣冬天也漸漸更冷，但以往台灣冬天暖氣用得不多，故本研究並未考量這部分的效益，主要考量天氣較熱時的降溫減少空調的效益，且假設攝氏 26 度以上才開空調，本研究所採用的公式如下列。

$$\Delta Q = (U_{CR} - U_{GR}) \times A \times (T - 26) \dots\dots\dots (3.4)$$

其中

ΔQ : 熱通量變化(heat flux, W)。

$U_{CR} - U_{GR}$: 綠屋頂與一般屋頂 U-value 差值 (W/m²/K)。

A : 綠屋頂面積(m²)。

T : 室外溫度(K)。

式(3.4)中各項參數資料來源如下：

$U_{Concrete} - U_{Green Roof}$: 本研採用於大溪高中自行測量之綠屋頂 U-value 值，此處綠屋頂 U-value 係指綠屋頂與下方屋頂總 U-value，一般屋頂部份，本研究採用屋頂材質資料估算 U-value 值。

A : 面積部份因主要為比較綠屋頂與一般屋頂熱通量差異，故採用綠屋頂面積。

T：本研究利用氣象標準年逐時資料為室外溫度，因本研究設定內部空調系統溫度控制於 26 度，故 $(T - 26)$ 。為室外溫度與控制溫度之差值。

氣象檔為逐時資料，本研究假設單位小時內熱通量為定值，故計算出之熱通量值單位為 Wh。

3.3.3 Energy Plus (E+) 介紹

Energy Plus(以下簡稱 E+)(USDOE, 2012) 是由 American Energy Usage Statistics 所開發，軟體核心主要源至於 Building Loads Analysis and System Thermodynamics(BLAST)和 DOE-2，上述兩系統主要是用於設計室內空調大小、分析室內熱流分佈，供規劃空調系統設置大小及分析建材隔熱能力，使用者輸入建築物平面圖與材質資料分析熱流或計算空調使用情形，發展至今已開發許多外掛程式，如 Design Builder (Chambers, 2011)、Open Studio(USDOE, 2012)，可直接利用 Energy Plus 核心作簡單建築耗能分析或方便其快速建立建築物模型、更改建材性質、HVAC 設定等，但主要耗能估算仍由 Energy Plus 運算；除了應用於建築空調規劃外，近年亦新增 Life Cycle Cost(LCC)分析功能，應用於綠建築之降溫節能研究，可以模擬建築使用綠建材環境，如 E+於材料部份可以利用相關參數，建立綠屋頂(EcoRoof)環境，唯所需輸入之參數，如 LAI、葉面反射率等資料取得較困難，故本研究未改用，主要依據綠屋頂的以 U-value 模擬綠屋頂下的隔熱效能。以下首先說明 E+所需的氣象資料，然後說明如何建立 E+模式，包括其所需的重要參數輸入。

3.3.4 氣象資料

為模擬建築物溫度變化，需配合氣象檔，氣象資料可分為兩種，一為長時距的實際氣象資料，另一為具代表性的合成氣象資料，由於長時距模擬頗費時費工，且臺灣地區近年來氣候變化趨劇，短期的氣象資料可能無法代表長時間之氣象情形(林，94 年)，故本研究使用林(97 年)所提出之標準氣象年台北與新竹地區資料以供模式模擬。

3.3.5 E+模式建立

建立案例建築物 E+模式時，主要包括建築物地理位置(Location)、空調電器與人員變動時程(Schedules)、建材材質(Construction)與建築模型(Zone)、內部熱源(Internal gains)、空調(HVAC)、輸出資料設定(Output reporting)等部份，於本節說明。

1. 建築物地理位置:本研究輸入三棟案例建築物之經緯度、高程、與北方之偏差角度、所在地區類型與時區等資料，另須決定欲模擬之時間區段，本研究模擬一年中各月份之空調與一般用電狀況，亦須輸入補假原則。
2. 空調電器與人員變動:輸入臺灣地區國定假日與考慮辦公室與學校人員與用電隨時間變化情況，建立使用變化時程，以供模式據以模擬空調與室內熱流量變化。
3. 建材材質與建築模型: 本研究建立三維建築模型，將欲分析節能效益之建築由頂層而下分成數區，評估各層之節能效益，本研究使用區公所與校方所提供之建築平面圖，包括建築平面圖與建材資料、內部空間高度、內部空調配置位置相關資訊，並利用繪圖軟體 Sketch Up 8 配合 Energy Plus 外掛程式 Open Studio 進行建築

物外部資料與建材輸入，部份建築材料參數如無法取得，本研究輸入材質相近 RC 結構材料參數、U-value 之建議值進行模擬。

4. 內部熱源與空調輸入部份：因各樓層內部實際人員數與電器與照明設備使用資訊用電密度的收集上有所難度，故此部份本研究部份資訊依物建議值輸入。燈具使用資訊公式（內政部營建署）如下：

$$\frac{W}{M^2} = \frac{(\text{安定器瓦特數} + \text{燈管瓦特數}) \times N}{A} \dots\dots\dots (3.5)$$

其中 A 為被照面積；N 為燈管數量。

本研究利用式(3.5)估算用電密度，以供建築物耗能模式利用，唯人員數在資料收集上較為困難，本研究使用建議值估算。

5. 電器用電密度:因電器複雜且資料取得困難度高，本研究利用建築物用電參考指標(經濟部，100 年)所提供之用電密度建議值輸入。
6. 室內空調資料：主要收集案例 A、B 及 C 之空調資料，包括空調風量、空調 COP 值、空調噸數等資料，其他部份主要採用空調系統建議值或內建值。案例 A 資料使用管理者所提供資料輸入之，其上方目前並無綠屋頂，本研究主要依據利用實驗所得之綠屋頂 U-value，據以模擬該案例建立綠屋頂之節能效益。

案例 B 主要為教室區，用電情形較單純，本研究實際輸入燈具數、人口、空間配置與空調資料進行模擬，模擬方式亦為更改教室上屋頂 U-value，比較綠屋頂與一般屋頂差異。

案例 C 資料為管理者所提供，雖未能測量所方綠屋頂 U-value，唯其綠屋頂排水板型式、介質厚度與大溪高中相似，故 U-value 利用於大溪高中所測得薄層綠屋頂 U-value 輸入之，唯內部人員數與電器使用量估計困

難、本研究利用辦公室類建築物用電參考指標(經濟部, 100 年)所提供之室內電器用電建議值輸入, 燈具用電量則使用燈具、點燈器瓦數與燈具數量等實際資料輸入之。

3.3.1. 綠屋頂節能效益評估

綠屋頂節能效益部份, 本研究利用案例建築物 A、B 與 C 資料, 以測得之 U-value, 利用 1D-DF 法估算綠屋頂節能效益, 並建立 Energy Plus 模式估計其節能量, 並比較兩模式節能結果。

3.4 綠屋頂生命週期評估

本節主要說明如何以 Simapro 軟體針對案例建築物進行綠屋頂生命週期評估, 以下首先就各小節分別就評估範圍、參數輸入、減碳與環境效益評估說明之。

3.4.1 Simapro 生命週期評估軟體操作步驟

由於國內目前並沒有公開的 LCA 資料庫可供使用, 故本研究採用國外 Simapro(Goedkoop, 2008)軟體進行 LCA 分析, 以下簡介 Simapro 軟體。

Simapro(Goedkoop, 2008)為荷蘭所發展的生命週期評估軟體, 為常用的生命週期評估軟體, Simapro 可以提供不同環境衝擊估算方法, 雖常用於工業製程與產品的生命週期評估, 但亦可用於其他方面, 內建資料庫有提供農業、建材等相關資料供估算環境衝擊, 此軟體可提供綠屋頂模擬建置階段所使用之原料資料、使用與後續廢棄處理所造成各種環境衝擊量, 亦可供與一般屋頂比較在原料、使用與廢棄各階段之環境衝擊差異, 以分析綠屋頂環境效益, 軟體使用部份, Simapro 主要是用選單式或文字方式進行輸入, 主要分為以下五個部分:

1. 建立專案：敘述名稱、內容、目的與說明。
2. 原料資料輸入：以內建資料或自行建立，Simapro 已建立數個領域，包括農業、塑膠、建材等部份。
3. 組裝成品：主要為對成品與原料進行聯結，並輸入在組裝時所使用之機具消耗電力、油料使用或運輸等資料。
4. 使用資料：主要用於考慮產品在生命週期間，在使用上所衍生之環境影響。
5. 評估方法：為選擇生命週期評估中，環境衝擊部份之加權方法。

3.4.2 LCA 進程序

依據 ISO14040 (ISO, 2006)，LCA 進程序一般分為 (1) 目標定義及範疇界定 (Goal definition and Scoping); (2) 生命週期盤查 (Life Cycle Inventory, LCI); (3) 生命週期衝擊評估 (Life Cycle Impact Assessment, LCIA); (4)(?) Life Cycle Interpretation; (5) 結果與報告 (Reporting and Results) 等五個步驟。Elsa(2008)曾依此程序針對香港薄層與密集式綠屋頂及一般屋頂進行 LCA，本研究亦是採用類似的程序進行 LCA，以下各小節一一說明本研究如何進行這五個步驟比較國內一般屋頂與綠屋頂對環境衝擊的差異。

3.5.2.1 目標定義及範疇界定 (Goal definition and Scoping)

本研究對綠屋頂進行 LCA 主要目的為評估案例建築 C 及 D 綠屋頂在生命週期間的各種環境衝擊，且與一般屋頂比較其間之差異，進而據以分析綠屋頂在生命週期間對各環境面向之可能效益。

本研究評估範圍主要為分析兩案例建築物薄層型綠屋頂與一般屋頂環境衝擊差異，綠屋頂與一般屋頂與評估範圍包括原料使用、運輸、使用、

維護與置換、廢棄等部份。運輸部份，由於無法取得各材質詳細的生產資料，故本研究假設綠屋頂各材料皆於臺灣地區製造，以各材料廠商出貨地點至案例路程作為運輸部份距離依據，以下說明案例 C 與 D 的評估範疇，案例 C 評估以下部份：

1. 綠屋頂建材原料：本研究收集綠屋頂建材所含原料與份量，運輸距離則是如上述說明，以各材料廠商出貨地點至案例路程作為依據，廢棄部分依據 Chen *et al.*, (2001)之研究指出約只佔總衝擊的 1%，故本研究未納入。
2. 綠屋頂使用部份：案例 C 部份，本研究分析節能所產生之環境效益，但因為未收集截水資料，故本研究未分析綠屋頂在截水部份環境效益，綠屋頂植物更新年限則依 Wong, *et al.* (2003)之假設為 15 年。
3. 綠屋頂生命週期：本研究依據 Carter and Keeler, (2008)之研究，本研究假設一般屋頂壽命 10-20 年，且綠屋頂可延長屋頂壽命至 40 年，故分析期間以 40 年為基準。

案例 D 在生命週期評估範疇部份說明如下：綠屋頂建材原料：此部份與案例 C 評估方式相同，收集案例 D 相關綠屋頂資料。

1. 綠屋等使用部份：因為案例 D 未進行綠屋頂節能效益評估，故在使用部份本研究未進行節能部份環境效益評估；且與案例 C 相同，案例 D 未分析截水部份環境效益。
2. 綠屋頂生命週期：與案例 C 相同，假設綠屋頂生命週期為 40 年。

一般屋頂部份，主要考慮為結構層上方可更換部份，即為鋼筋混凝土上方隔熱排水層，包括水泥砂漿、毛油氈、發泡混凝土或輕質混凝土、保麗龍、頂層水泥磚，由上述假設進行生命週期評估，在 40 年週期中，上

述一般屋頂各原料，約每 10-20 年需更換一次。

3.5.2.2 生命週期盤查(LCI)

接下來進行 LCI 分析，此部分主要分成以下數個步驟進行：

1. 原物料資料收集：本研究對二個綠屋頂及一般屋頂組成資料各部份所含原料，包括重量，厚度與比重進行整理，以瞭解使用量。
2. 評估資料：因國內生命週期盤查資料庫取得不易，故部分資料主要採用 Simapro 7 LCA 軟體所提供之資料。
3. 操作階段能源耗用：除了建置維護與運輸等，本研究亦採用能耗模式評估節能效益結果，評估方式請參見 3.4 節之說明。

3.5.2.3 生命週期衝擊評估(LCIA)

LCIA 主要評估生命週期間對於各面向的影響，本研究採用常用的 CML 2 (Saiz *et al.*, 2006)與 Impact2002+ (Humbert *et al.*, 2005)兩方法，CML 2 可評估大部份環境衝擊，而 Impact 2002+ 則可以依據四類衝擊分別給予單一級分，比較上較方便，二個方法對於各環境衝擊當量採用不同加權模式，即利用當量方式估算各材料所產生或排放之環境影響物質，CML 2 評估面向主要包括臭氧層破壞(Ozone layer depletion)、酸沉降(Acidification)、人類毒性(Human toxicity)、優養化(Eutrophication)、海洋生態毒性(Marine aquatic ecotoxicity)、水中生物毒性(Fresh water aquatic ecotox)、陸域生物毒性(Terrestrial ecotoxicity)、全球暖化(Global warming)、光化學煙霧(Photochemical oxidation)、資源耗損(Abiotic depletion)等面向，Impact2002+單一級分則是評估對人類健康(Human Health)、生態系統品質(Ecosystem quality)、氣候變遷(Climate change)與自然資源(Resources)等四部份衝擊，故本研究應用兩模式進行 LCIA，並與一般屋頂比較其間之差

異。

3.5.2.4 闡釋結果(Life Cycle Interpretation and Reporting)

本研究分為兩大部分討論及比較所得結果。

1. 原料的環境衝擊: 本研究分別就綠屋頂及一般屋頂建置原料(含運輸)所造成的環境衝擊進行評估, 先分析一般屋頂 20 年、15 年及 10 年等三個不同壽命下各項環境衝擊量, 再與綠屋頂(含一般屋頂, 但假設延長其壽命至 40 年, 中間不必更換)環境衝擊進行比較, 比較兩者各項環境衝擊差變化量, 評估綠屋頂在原料部份的環境效益。
2. 建築能耗: 節能效益評估方法請參見 3.4 節, 本研究就案例 C 結果, 評估綠屋頂在 40 年期間節能效益的各項環境衝擊減少量, 唯案例 D 未進行節能效益分析, 故未評估此部份環境效益。

綜合討論及比較不同屋頂的環境衝擊, 依上述結果綜合討論及比較綠屋頂與三種壽命一般屋頂的環境衝擊差異, 並據以分析綠屋頂環境效益。

3.4.3 資料庫參數輸入

在綠屋頂原料、使用維護部份，為供 LCA 軟體評估，需考慮以下參數。

1. 原料部份：綠屋頂組成資料，估算各單元原料比重，計算所使用原料使用量，本研究就兩案例所提供資料進行輸入。
2. 運輸部份：考慮材料運輸需要，一般多採用 LCA 軟體內建值估算之，本研究採用 Simapro 內建資料庫。
3. 能量消耗：在建置過程或在維護部份器材使用所產生之消耗甚微，主要為綠屋頂在使用過程對於建築物節能效益，本研究以 3.4 節能部份評估方法所得節能量，進行環境效益評估。
4. 維護部份：主要在使用階段，綠屋頂植物與基質置換率。

一般屋頂主要考慮建築物結構上方部份(不含鋼筋結構部分)，主要分為原料、運輸及維護部分，以下分別說明之。

1. 原料部份：本研究採用建築師事務所所提供之資訊，包括水泥磚、水泥砂漿、保麗龍、油毛氈等建材原料使用比與用量，配合屋頂面積各層厚度，估算原料使用量。
2. 運輸部份：因本研究未收集一般屋頂各原料產地資料，且部份資料收集較為困難，故本研究未考量一般屋頂原料運輸部份。
3. 維護部份：一般屋頂維護主要是檢視等，環境衝擊不大，主要的維護工作是防水層更換，且更換時即需要更換屋頂，唯目前並沒有找到國內防水層的平均更換年限，故本研究採用 10、15 及 20 年三個不同年限進行評估。

3.4.4 綠屋頂減碳效益評估

綠屋頂減碳效益評估部份，本研究主要以綠屋頂節能效益、LCA 模式所評估與綠屋頂表面植物固碳效益三方面估算。

1. 綠屋頂節能：利用 E+ 與 1D-HF 模式模擬出年節電量，配合臺灣電力公司所提出之發電廠碳排放係數，估算綠屋頂節能部份減碳量，電廠碳排放使用 98 年資料，將各種類發電碳排放係數依所占發電百分比加權平均，以 $0.612\text{kg CO}_2\text{e}/\text{度}$ 計算。
2. 表面植物固碳效益：本研究使用 Getter *et al.*(2009)所提出之綠屋頂兩年單位面積固碳量 $1.375\text{kg}/\text{m}^2$ 進行估算，生命週期 40 年，每年固碳量為 $0.687\text{kg}/\text{m}^2$ 。
3. LCA 模式：利用 LCA 模式對案例 C 進行生命週期評估，估算綠屋頂與一般屋頂二氧化碳當量差，估算其減碳量。

計算上述三部份綠屋頂減碳量，以評估綠屋頂減碳效益。

3.4.5 綠屋頂建築環境效益評估

本研究案例建築物綠屋頂為一般屋頂上方加裝設置薄層型綠屋頂，考慮綠屋頂對於屋頂保護作用與環境效益，本研究利用 Simapro 軟體對案例建築物分別就未設置綠屋頂與設置綠屋頂兩狀況，在生命週期間，評估以下部份。

1. 初設原料使用情況：一般屋頂所使用原料，如鋼筋、水泥、防水層用料與綠屋頂原料包括植物、基質、排水板、透水布、防水層等部份用量對環境衝擊差異。

2. 維護上的原料使用情況：一般屋頂與綠屋頂在生命週期間，屋頂維護與綠屋頂置換部份原料使用差異。
3. 在綠屋頂生命週期間，一般屋頂與綠屋頂所產生節能效益，進行環境效益評估。

綜合上述各項進行環境衝擊分析，比較一般屋頂與綠屋頂環境衝擊差異，以兩衝擊差距作為環境效益，以評估綠屋頂環境效益。

3.5 綠屋頂成本推估

在進行成本效益評估之前，有必要先收集建立綠屋頂成本資料，本研究雖亦針對密集式綠屋頂案例進行節能模擬，但由於該案例已建置很久，不易找到具代表性成本資料，且密集式綠屋頂的型式差異很大，成本及維護等需求均較高，建置密集式綠屋頂的比例不高，故本研究主要針對薄層綠屋頂建立成本資料，以作為後續進行成本效益評估之依據。

參考國內外相關文獻(Wong *et al.*, 2003; Carter and Keeler, 2008; 錫鑄基金會, 97 年)，綠屋頂成本主要可分為建製、運送、維護與更新等項目，並考慮折現率，以下說明各項目之內容。

1. 建置成本：綠屋頂組成材料與建造花費，其中綠屋頂組成材料包括植物、基質、排水板、透水布、防水層等部份。
2. 運輸成本：主要為在建製階段，材料運輸之花費。
3. 維護成本：有關綠屋頂後續養護成本，雖然國外文獻(Wong *et al.*, 2003)曾考慮維護成本，唯不太適用於國內情形，故本研究未採用，且由於國內薄層綠屋頂主要是種植養護較單純的植物為主，本研究因而假設綠屋頂巡查、維護為所有人自行負責，未計算此部分

之成本。

4. 更新：綠屋頂植物更新部份採用 Wong *et al.* (2003)之假設，以植物更換年限 15 年作為成本估算之依據。
5. 折現率：本研究採用經濟部能源再生能源躉購費率中所使用之折現率 4.25%。

本研究收集上列項目的相關成本資料，並利用下述式(3.6)以作為推估綠屋頂成本之依據。

$$C_{GR} = (C_{GRI}) \left(\frac{i(1+i)^a}{(1+i)^a - 1} \right) + C_{GRP} \left(\frac{1}{(1+i)^b} + \frac{1}{(1+i)^c} \right) \left(\frac{i(1+i)^a}{(1+i)^a - 1} \right) \dots\dots\dots (3.6)$$

其中 C_{GR} 為綠屋頂年均成本； C_{GRI} 為建置成本； C_{GRP} 為每 15 年更新部分植栽的費用； i 為折現率； a 、 b 與 c 為 40、30 與 15 年。

本研究依上式估算綠屋頂年均成本，並與一般屋頂年均成本進行比較分析。

3.6 綠屋頂成本效益評估

本研究分析綠屋頂的節能與減碳效益，且與前節推估之成本進行成本效益綜合評估，節能部份，以 1D-HF 法及 E+ 模式所模擬出之節能量，依表 3.2 所列之臺灣電力公司公告之各級電價估算所節省的電費。

表 3.2 臺灣電力公司各級電價

	夏日	非夏日
110 度以下部分	2.10 元/度	2.10 元/度
111~330 度部分	3.02 元/度	2.68 元/度
331~500 度部分	4.05 元/度	3.27 元/度
501~700 度部分	4.51 元/度	3.55 元/度
701 度以上部分	5.10 元/度	3.97 元/度

整理自臺灣電力公司(101年)。

減碳之經濟效益部份，本研究使用綠屋頂減碳效益估算雖國外已有收碳稅，約在新臺幣 600 元至 4500 元/tonCO_{2e}，但臺灣目前尚未收碳稅，故本研究採用蕭(98年)所建議 750 元/tonCO_{2e}，估算綠屋頂減碳之經濟效益。

綜合上述兩項經濟效益，配合綠屋頂推估成本，評估綠屋頂成本效益。

第四章 結果與討論

本章說明及討論依據第三章所述之研究流程與方法進行之結果，主要分為案例建築物介紹、綠屋頂 U-value、綠屋頂節能效益評估、案例建築物綠屋生命週期評估及綠屋頂成本效益評估等部份部分，以下將依續說明及討論。

4.1 案例建築

本研究案例分別為(A)環工館;(B)建成國中;(C)信義區公所與(D)大溪高中，其中針對案例 A、B 及 C 進行綠屋頂節能減碳效益評估，針對案例 C 及 D 則進行生命週期評估，以下介紹各案例。

案例 A 為本校環工館，本研究假設在該館屋設置類似大溪高中型式之薄層式綠屋頂，該館如圖 4.1 所示，為門字行建築，右方樓層一至五樓為研究室，左方樓層三至五樓為研究室，兩樓層之間橫向樓層一樓為大廳，二樓為所辦公室與會議廳，三至四樓則為教室與教授研究室。



圖 4.1 案例 A 環工館配置圖

案例 B 為建成國中，部分屋頂有設置密集式綠屋頂，其下方有八間教學用教室，四層樓，照明燈具每間 8 盞，空調設備為窗型冷氣 1 台，並無使用其他電器，為一般上課用教室。

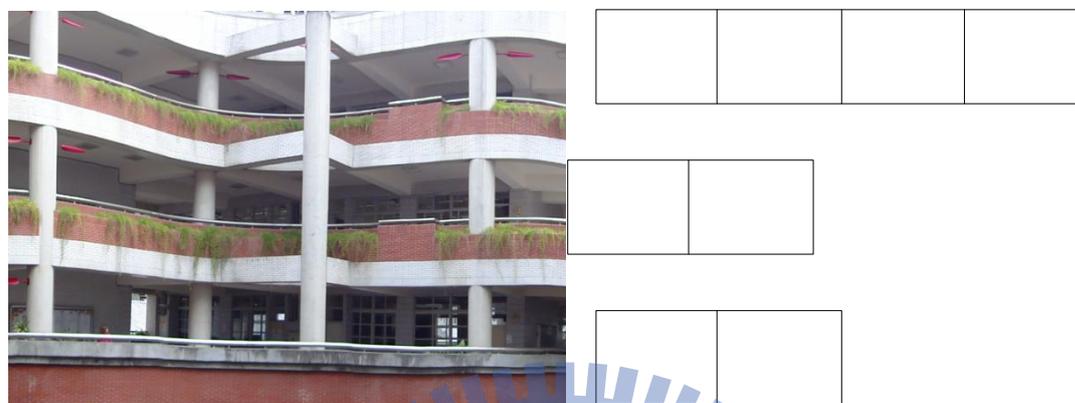


圖 4.2 案例 B 建成國中教室配置圖

案例 C 為臺北市信義區公所，為一長方型式辦公大樓，區公所屋頂設置一薄層式綠屋頂，由臺北市錫鐳基金會委外建置，下表為該綠屋頂資料。

表 4.1 案例 C 綠屋頂基本資料

植被	主要以萬年草、景天科等多種植物組成
基質	蛭石、真珠石與培養土 2:1
厚度	10 公分
排水層厚度	2 公分

綠屋頂面積為 590m²，種植植物種類繁多，但以萬年草與景天科為主，基質部份則是以蛭石、真珠石與培養土混合而成，綠屋頂下方樓層為 11 樓之辦公大樓，本研究除評估綠屋頂對信義區公所下方各層辦公室節能效益外，亦對綠屋頂進行綠屋頂生命週期評估。

案例 D 為桃園大溪高中，本研究於此綠屋頂進行 U-value 測量與生命週期評估，唯下方教室未裝設空調系統，故本研究未進行節能效益評估，下表為案例 C 綠屋頂資料。

表 4.2 案例 D 綠屋頂基本資料

植被	萬年草
基質	陶粒與培養土 2:1
厚度	8-10 公分
排水層厚度	2 公分

綠屋頂面積 36m²，由 4 個 9m² 小正方形綠屋頂組成，種植植物為萬年草等，基質則為陶粒與培養土以 2:1 進行鋪設，本研究於綠屋頂、其下方教室及其旁未設綠屋頂對照組教室進行綠屋頂 U-value 測量。

4.2 案例建築物綠屋頂節能效益評估

本研究在估算案例 A、B 及 C 綠屋頂節能效益前，須先有 U-value 值，以下首先說明由大溪高中所測量綠屋頂 U-value 結果，之後說明各案例節能效益估算結果。

4.2.1 綠屋頂 U-Value

如 3.3 節之說明，估算綠屋頂降溫節能須要知道綠屋頂的 U-value，由於未找到現成資料，本研究因而於大溪高中教室上方進行綠屋頂 U-value 實驗，實驗步驟請參見 3.3 節及附錄 A 之說明，本研究共監測綠屋頂三點及作為對照組一般屋頂二點的數據，包括室內外溫度、內外表面溫度與熱通量資料，並利用式 3.1 與 3.2 估算 U-value。

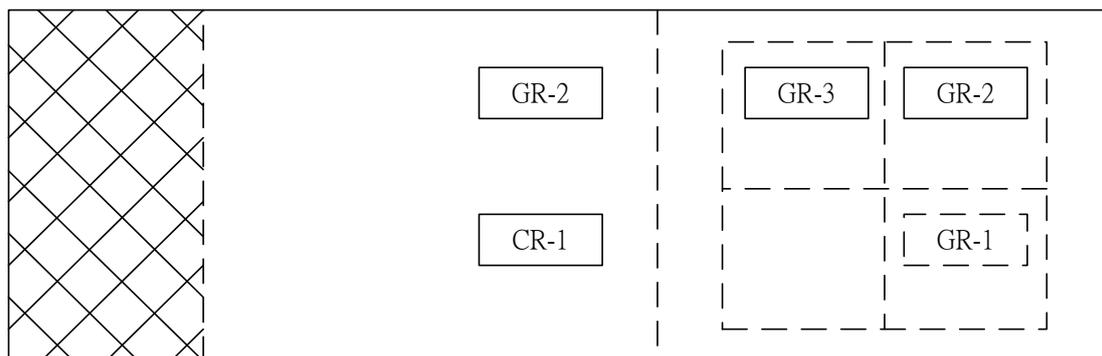
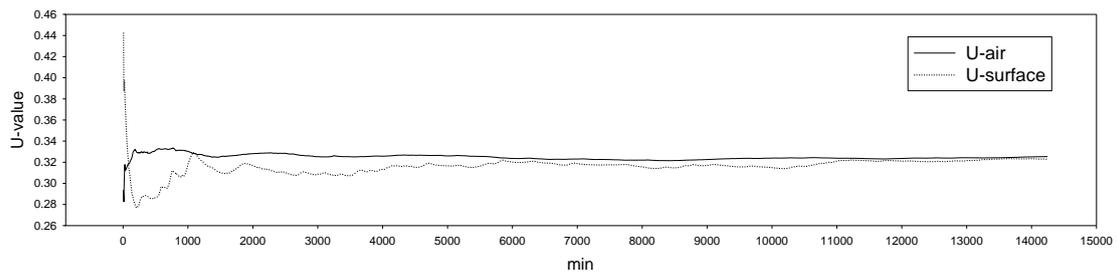
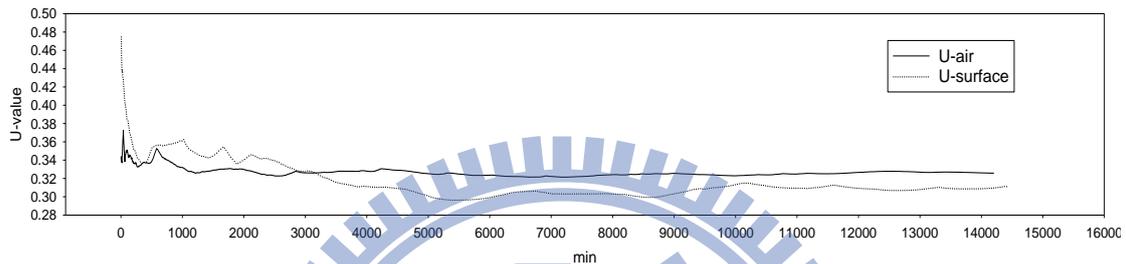


圖 4.3 大溪高中綠屋頂(GR)及一般屋頂(CR)監測點示意圖

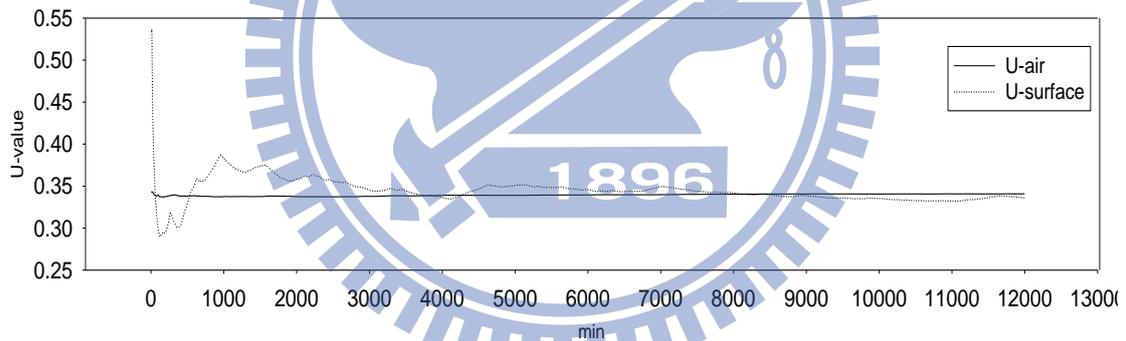
監測點佈置如圖 4.3 所示，綠屋頂簡寫為 GR，一般屋頂為 CR，依所測得之結果，綠屋頂部份不含量測初期較不穩定的數據，所估算的 U-value 值在 0.312 至 0.342 之間，對照組一般屋頂 U-value 值則是 1.312 左右，兩測點結果相近，以下說明各點測量結果。圖 4.4 為各點之 U-value 估算結果，圖 4.4 (a) 為屋頂點 GR-1 依監測數據及式 3.1 與 3.2 所估算之綠屋頂 U-values，點 GR-1 為左下綠屋頂，萬年草生長情況良好。由於一開始數據不穩定，故剔除前 200 分鐘的數據後作平均，依式 3.1 估算的平均值為 0.326，依式 3.2 估算的平均值為 0.317，差異約 4%，基本上二個式子所得結果相近，由於此點的植物生長情形較 GR-3 茂盛，故所測之 U-Value 值亦較 GR-3 低。



(a) GR-1



(b) GR-2



(c) GR-3

圖 4.4 案例 C 綠屋頂各點依量測值所估算之 U-value (a)GR-1；(b)GR-2；(c)GR-3

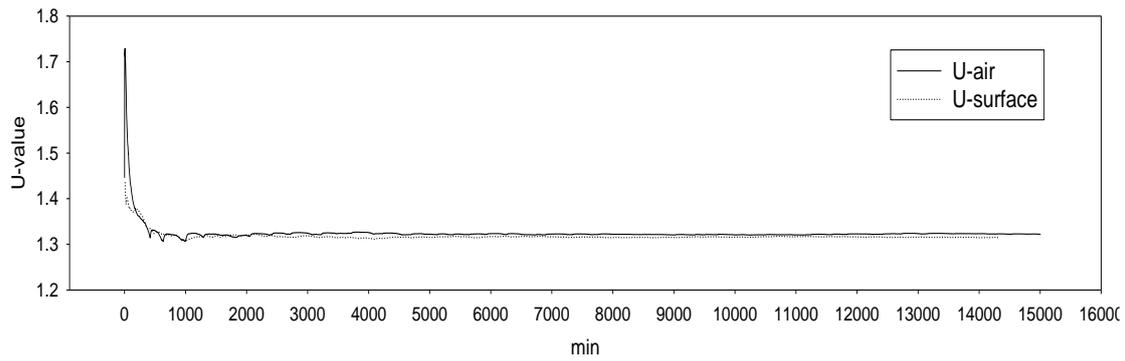
圖 4.4 (b)所示為點 GR-2 的 U-value 估算值，與點 GR-1 情況相似，起始數據變化幅度大，但隨後數值變化趨於穩定，此點亦剔除前 200 分鐘資料後作平均，因點 GR-2 植物生長情況與 GR-1 生長情形較為類似，兩點綠屋頂植物皆為萬年草，且生長情形同樣較點 GR-3 佳，故 U-value 值較低，

點 GR-2 依式(3.1)所得結果為 0.327，以式(3.2)估算值為 0.319，兩式估算結果相近，兩式結果相差 2%，平均為 0.323，點 GR-2 與點 GR-1 所估算 U-value 值相近，都在 0.32 左右。

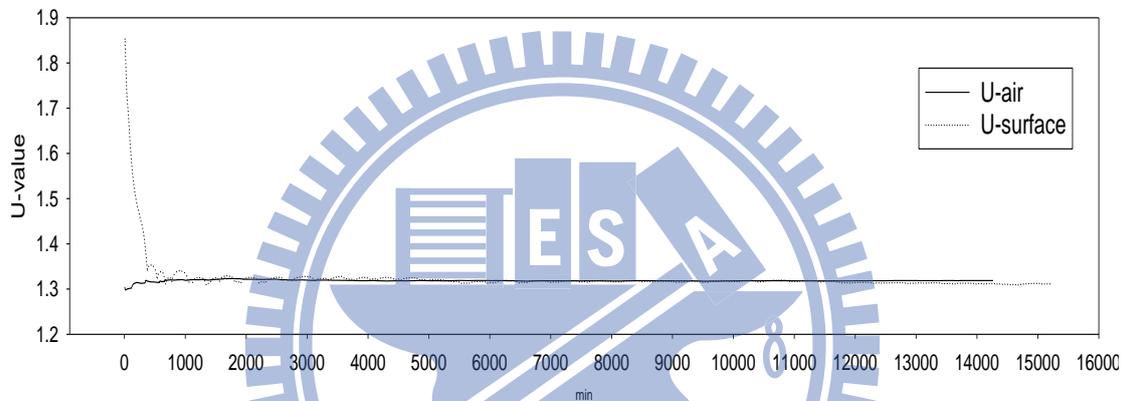
圖 4.4 (c)為點 GR-3 之 U-value 估算值，因植植物生長情形不佳，故測量時表面幾無植被，兩式平均結果約 0.340，以式(3.1)估算結果為 0.342，以式(3.2)估算則為 0.337，兩式結果相近，差距約 1%左右，因 GR-3 植物生長情況較差，植物覆蓋率低，熱通量較大，因而 U-value 較高。

就上述三點測量結果，考慮點 GR-3 所測量之值為植物生長情況不佳綠屋頂，故本研究以點 GR-1 與點 GR-2 所測量之結果平均，作為綠屋頂 U-value 值，此 U-value 值為綠屋頂含屋頂之值，如欲瞭解綠屋頂 U-Value 值，需估算對照組一般屋頂 U-Value，方能以式 3.3 估算綠屋頂本身的 U-value。

圖 4.5 為對照組一般屋頂 CR-1 與 CR-2 二點依測量結果所估算的 U-values。部份二點所估算 U-value 值在 1.32 左右，兩點式 3.1 所估算之值皆微微高於式 3.2，屋頂材質主要為表層鋪設水泥砂漿與鋼筋水泥混凝土建成，教室內部未裝設輕鋼架，由圖 4.5(a)顯示，在一般屋頂測量值變化較綠屋頂穩定，除一開始數據變化較大外，數值變化較小，U-Value 值在 1.32 左右，式 3.1 估算結果為 1.322，式 3.2 估算結果為 1.316，差距約 1%，平均 1.319。



(a)CR-1



(b)CR-2

圖 4.5 案例 C 一般屋頂 U-value 測量結果(a)點 CR-1 測量結果;(b)點 CR-2 測量結果

點 CR-2 部份，同樣位於與點 CR-1 測量點相同教室，唯點 CR-2 較靠近教室內部，點 CR-1 則靠近走廊，就測量結果顯示，兩點差異不大，依圖 4.4(b)顯示，點 CR-2 由式 3.1 數值變化較小，數值穩定，估算值約在 1.318，以式 3.2 估算部份，由圖顯示其 U-Value 值一開始與 CR-1 一樣變化幅度較大，雖然變化仍有微幅震盪外，數值仍穩定，值約在 1.312 左右，與式 3.1 所估算值相差不大。

綜合綠屋頂 GR-1GR-2 兩點 U-Value 值平均 0.32，一般屋頂兩點所測量之 U-Value 值平均為 1.315，利用下述公式 3.3，可以計算大溪高中薄層式綠屋頂 U-Value 值，經計算後可得大溪高中薄層式綠屋頂 U-Value 值為 0.42，此 U-Value 值將用於後案例 A 與 C 節綠屋頂節能效益評估與減碳效益評估部份。

以紅外線熱相儀測量綠屋頂 U-value 值，因為照相結果 GR-1、GR-2 與 GR-3 三點成像大小比例不同，且因為斜照，GR-1 與 GR-2 被前方所生長之植物遮掩，造成所截取之溫度資料並非為綠屋頂表面溫度，故目前此方法測 U-value 不適用。

4.2.2 案例建築物綠屋頂節能效益評估

節能減碳效益評估部份，U-value 值採用在大溪高中綠屋頂所測得的值 0.42 作為案例 A 與 C 綠屋頂層 U-values；案例 B 部份則目前無資料，故採用文獻(Wang *et al.*, 2003)中密集式綠屋頂層 U-value 值 0.20，並依所收集之案例 A、B 及 C 之建築資料，利用 3.2.2 節所說明之 1D-HF 法推估案例節能效益並與以 Energy Plus 所模擬的節能效益作比較。

案例 A 部份，以 1D-HF 法推估綠屋頂節能效益主要依據綠屋頂與一般屋頂 U-value 值與室外溫度差等資料，環工館原屋頂則依據屋頂材料，包括防水層、輕質混凝土、水泥砂漿與鋼筋混凝土，並利用林建成建築師事務所(100 年)所提供之屋頂材質資料推估 U-value 值為 1.4，室外溫度資料部份使用標準氣象年資料(林，97 年)，圖 4.6 所示為新竹標準氣象年各月超過所設定空調開啟溫度攝氏 26 度的總溫度差乘以小時數依據標準氣象年資料估算超過 26 度的溫度差與時數，單年累積 12802 度小時，主要在 5 至 10 月，7 月與 8 月較高，11 月至 3 月幾乎沒有超過 26 度的情形。

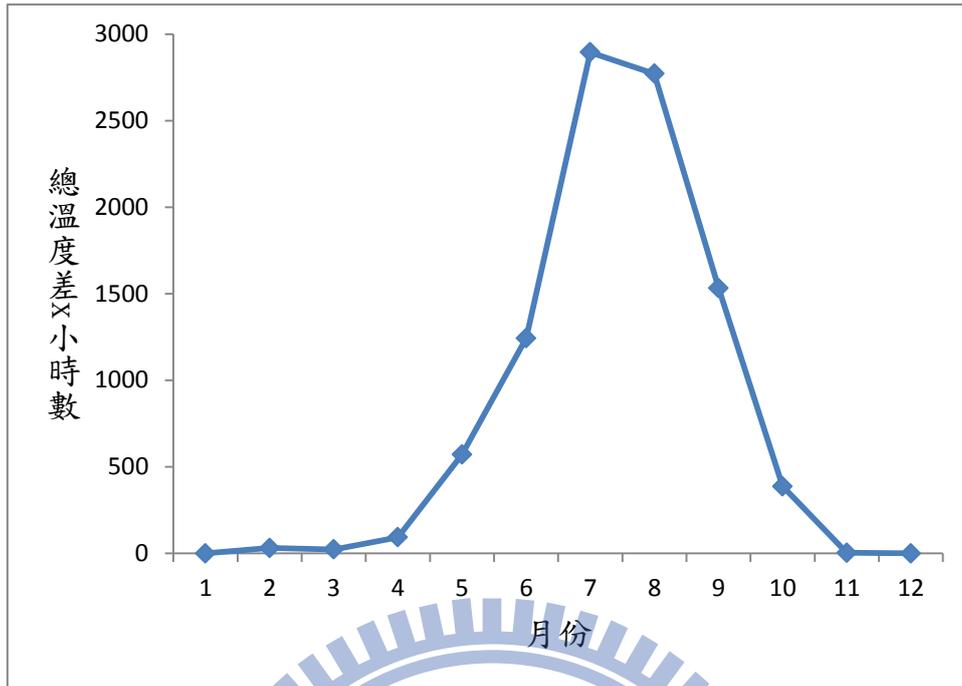


圖 4.6 新竹各月超過攝氏 26 度的總溫度差 x 小時數

利用上述資料配合綠屋頂與一般屋頂 U-value 值，代入式 3.4 估算案例 A 單位年節能效益為 7376kWh/年，圖 4.7 為各月份節能量。

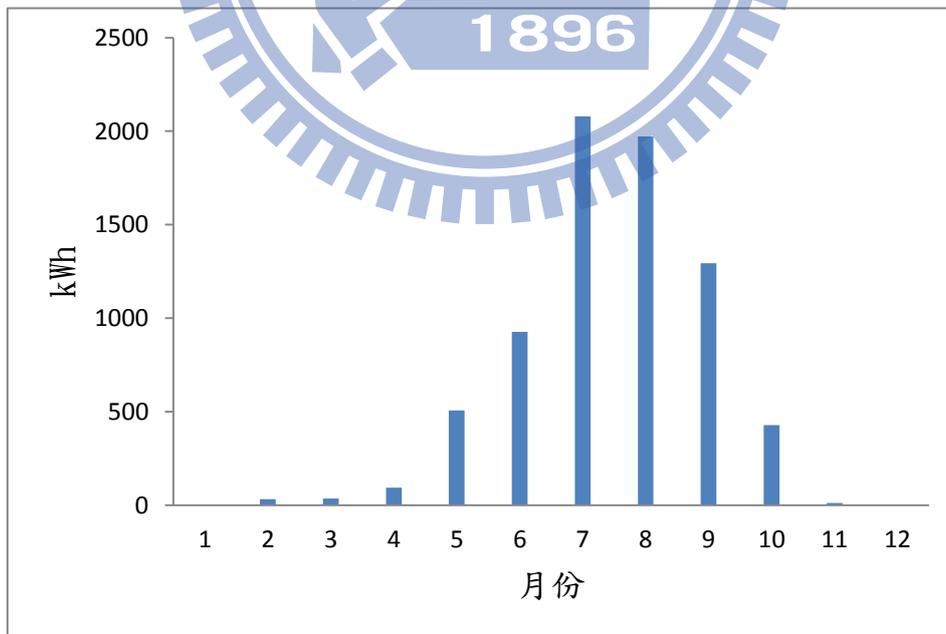


圖 4.7 案例 A 1D-HF 法所估算之各月節能量

如圖 4.7 所示，節能效益類似圖 4.6 主要集中在 5 月至 10 月，節能量在 400kWh 至 2000kWh 左右，主要以 7 月與 8 月最高，分別為 2079 kWh 與 1970kWh，各月份節能效益與圖 4.6 趨勢相同。

案例 A 亦以 Energy Plus 模式(USDOE, 2011)模擬，因其為學校類建築，故室內用電部份，本研究參照經濟部(100 年)所提之學校類用電參考指標，設定室內電器用電用電密度為 59 W/m^2 ，收集燈具耗能，並估算燈具數目後，設定研究室燈具用電為 800W，環工館未建置綠屋頂年耗電量模擬結果為 79 萬度，與學校提供之用電資料比較，模擬結果年用電量略高實際於資料，原因為本研究模擬所使用之電器用電密度乃採用建築規範，故可能與實際值不同，模擬建置綠屋頂後的年耗電量則為 78.2 萬度，年節省電量約為 8000 度，以單位面積綠屋頂計算每年約節省 16 度每平方公尺綠屋頂。

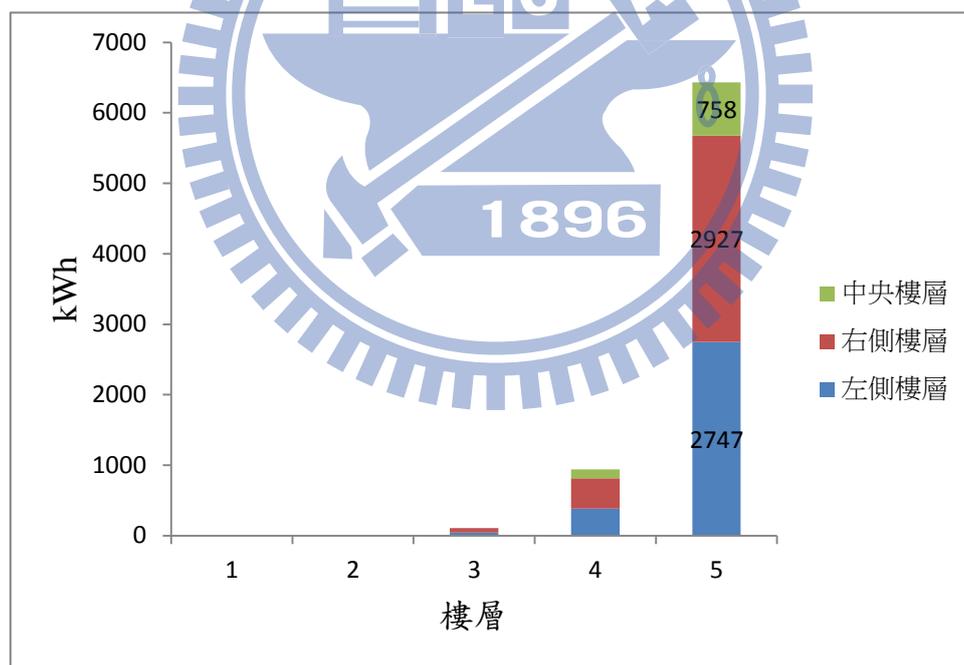


圖 4.8 案例 A EnergyPlus 模式所模擬的各層節能量

如以各樓層比較，如圖 4.8 所示，頂層部份的節能效益最佳，節能量約為 6432 度/年，占年總節能量 85%左右，其次為頂樓的下一層，年節能量約為 940 度/年，占年總節能量 12%左右，再次一層節能量就更少了，大約只

有 110 度每年，僅占總節能量 2% 左右，再往下則節能量甚微，由上可知節能效益主要集中在最上面二層，且節能量逐層減少。

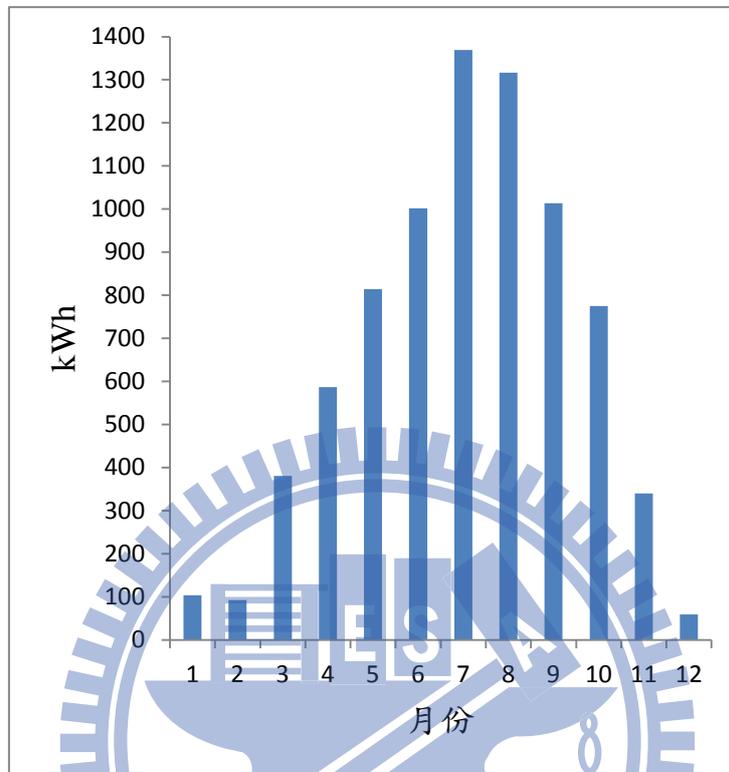
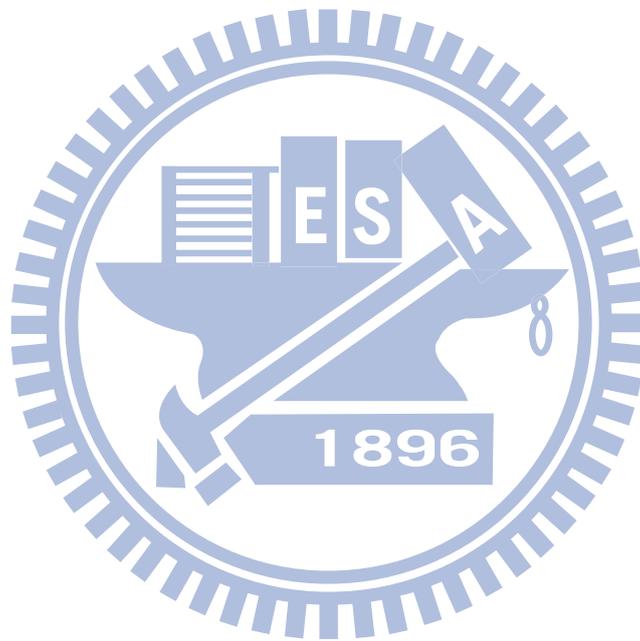


圖 4.9 案例 A Energy Plus 模式所模擬各月節能量

就各月節能量來，圖 4.9 為 Energy Plus 模擬案例 A 各月節能量結果，案例 A 節能量主要在 3 至 11 月，同樣以 7 月與 8 月兩月最高，此二個月節能量均在 1300kWh 左右，其它月份節能量大多在 1000kWh 以下，並以 12 月、1 月與 2 月最少，僅有少許節能量，各月節能量與所使用之氣象標準年資料趨勢相同，唯 1 月、2 月與 11 月由於幾乎無室外溫度超過 26 度的情況，故 1D-HF 所估的節能量幾乎為零。以 Energy Plus 模擬環工館各月節能量，在 1 月、2 月與 12 月，仍皆有少許之節能量，相較於 1D-HF 法只以溫度差作為估算依據，主要原因為 Energy Plus 在模擬上除考慮氣候情況、亦有考量室內外通風、人員、燈管與其它電器發熱量等內部因素進行模擬，所以模擬結果在冬天 12 月到 2 月之間，仍有少許節能量，因而與 1D-HF 法

所推估的結果不同，在年節能量比較，1D-HF 法所推估節能量較以 Energy Plus 模擬低，大約為其所估算之節能量 0.9 倍左右。



案例 B 有設置密集式綠屋頂，本研究仍先以 1D-HF 法推估節能效益，唯密集式綠屋頂 U-value 值國內無現成資料可使用，故本研究採用 Wang *et al.*, (2003)所列之密集式綠屋頂 U-value 值 0.20，原屋頂則亦參考林建成建築師事務所(100 年)所提供資料，推估原屋頂各層包括水泥砂漿、六角磚、輕質混凝土、鋼筋混凝土等之 U-value 值為 1.3，因而綠屋頂連同下方屋頂的 U-value 值可依 3.3 式計算，為 0.18。氣象資料則採用林(97 年)標準氣象年臺北氣象檔作為室外溫度資料之依據，綠屋頂部份，以八間教室面積作為式 3.4 所需之面積參數，圖 4.10 為臺北標準氣象年各月超過所設定空調開啟溫度攝氏 26 度總溫度差，氣象檔為逐時資料，故將總溫度乘以小時數估算超過 26 度的溫度差與時數。

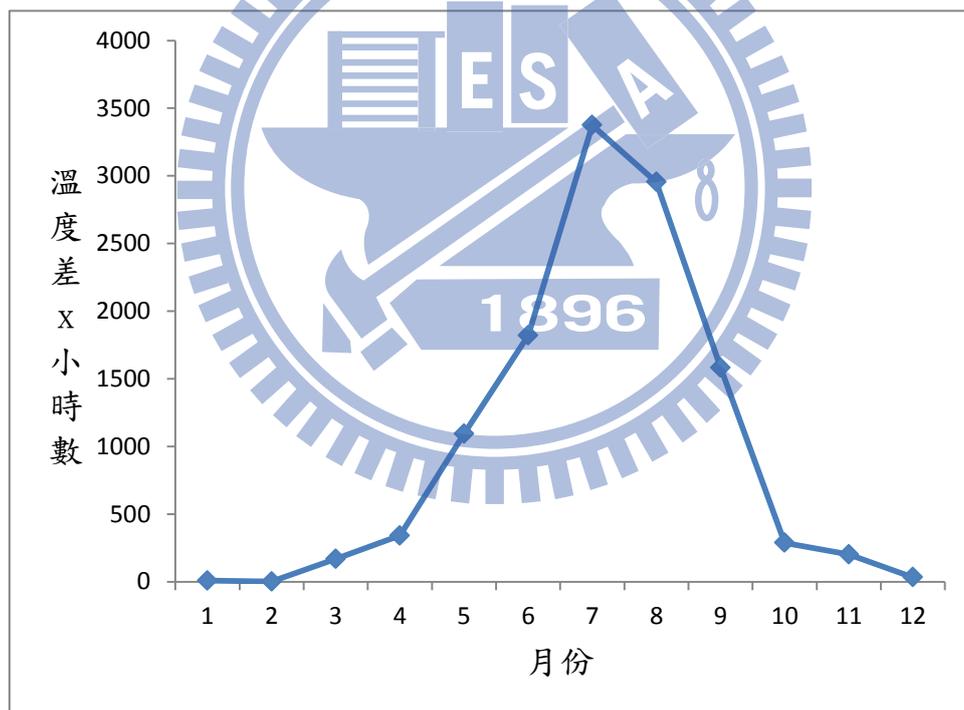


圖 4.10 臺北各月超過攝氏 26 度的溫度差 x 小時數

年總累積量為 11868 度小時，變化與新竹地區相似，12 月、1 月與 2 月僅有微量時間超過 26 度，其他月份大約在 180 度小時至 3400 度小時間，以 7 月與 8 月兩月最高，並 7 月為分界，7 月過後超過 26 度時間開始減少，

但以臺北結果與新竹標準氣象作比較，如圖 4.11 比較兩地的月均溫與及超過 26 度的小時平均溫度差，可看出雖然台北年均溫略高於新竹，但臺北超過 26 度時間較新竹少。

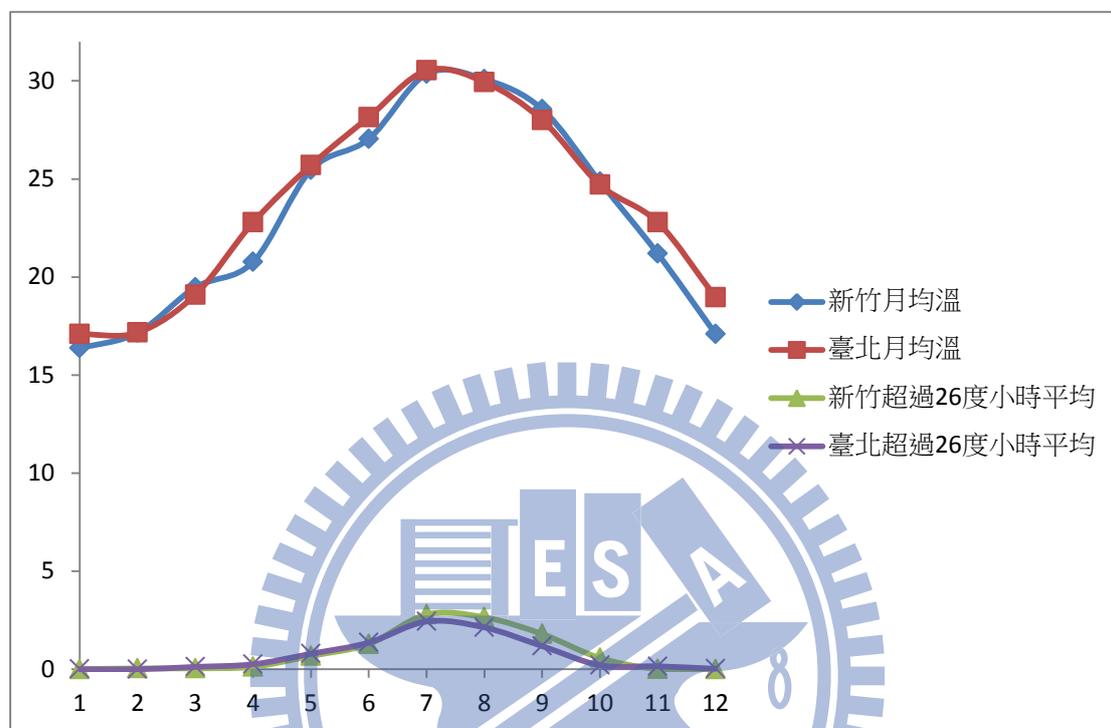


圖 4.11 臺北新竹氣溫比較

月均溫部份在 4 月、6 月、11 月與 12 月等月月均溫均略高於新竹，但在各月超過 26 度時平均溫度差部份，7 月至 10 月新竹高於臺北，故在超過 26 度總小時數部份，新竹亦略多於臺北。

由上述氣溫資料，配合屋頂 U-value 差與面積，以式 3.4 估算案例 B 綠屋頂節能量，單年總節能量為 6380 kWh，圖 4.12 為案例 B 以 1D-HF 法所估算之各月節能量。圖 4.12 顯示各月節能量比例與新竹相似，唯 7 月與 8 月兩月節能量較案例 A 低，最高在 7 月的 1813 kWh 與 8 月的 1588 kWh，主要原因為式 3.4 中用以估算之參數僅考慮溫度差、U-value 差與綠屋頂面積，有上述可知在超過攝氏 26 度的總溫度差部份，標準氣象年資料中臺

北低於新竹，綠屋頂面積案例 B 為 448m² 案例 A 則假設為 485m²，較案例 B 大，綠屋頂 U-value 部份，雖然案例 B 為密集式綠屋頂 U-value 值較案例 A 低，U-value 差 0.14，但因案例 B 下方屋頂 U-value 值也較案例 A 低，兩者差距為 0.1，就式 3.4 而言，案例 A 與案例 B 在 U-value 僅差 0.04，以至於年節能量案例 B 較案例 A 小。

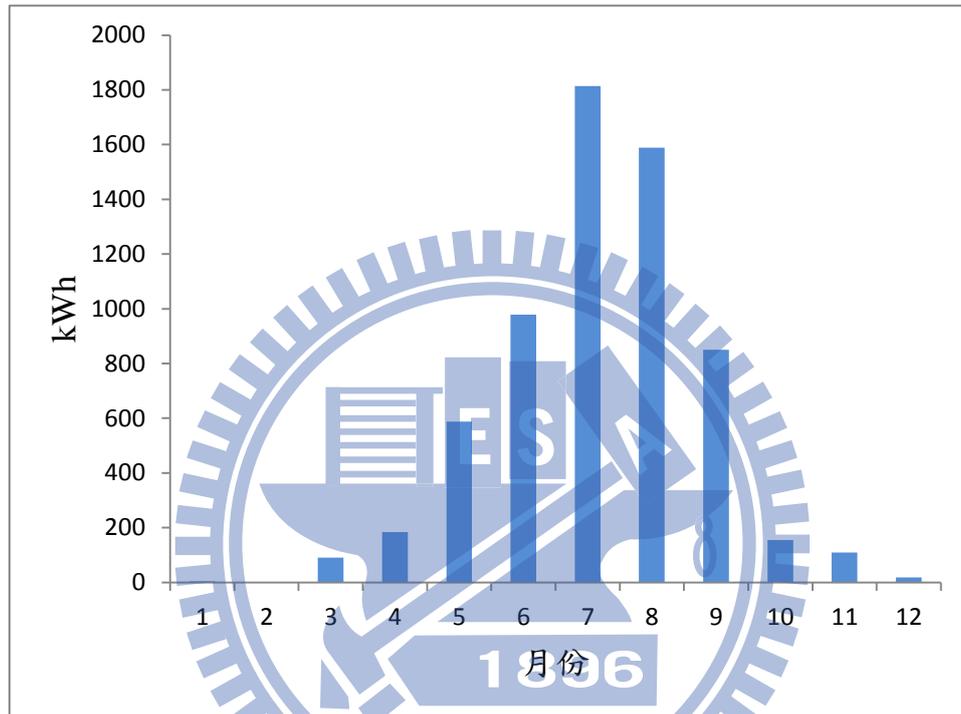


圖 4.12 案例 B 1D-HF 法所估算之各月節能量

案例 B 亦以 Energy Plus(USDOE, 2012)模擬，在內部熱源部份，本研究考慮燈具照明與人員兩部份，八間教室內除窗型空調外，無其它電器，故此部份在 Energy Plus 模擬上與其它案例不同，在年節能量部份，模擬建置綠屋頂後教室總年耗電量為 33.86 萬度，模擬建置綠屋頂前則為 34.58 萬度，年約節能 7000 度，約為 16 度每平方公尺綠屋頂，與案例 A 差不多，如以各樓層比較，如圖 4.13 所示，本研究將各樓層八間教室總節能量加總，頂層四樓部份的節能效益最佳，節能量約為 6592 度/年，占年總節能量 90% 左右，再下一層 3 樓節能量就減少許多，年節能量約為 585 度/年，僅僅占

年總節能量 8% 左右，再次一層節能量就幾乎沒有節能量，大約只有 30 度每年，占總節能量 1% 左右，由上述可知密集式綠屋頂節能效益主要集中在最上面二層，且頂層占大部份節能效益，其它樓層僅有少許節能量。

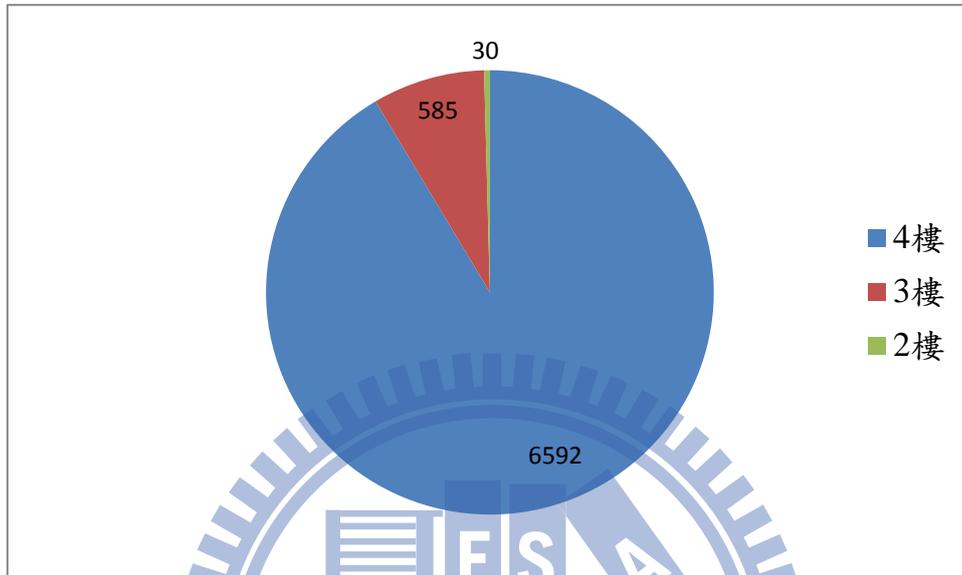


圖 4.13 案例 B Energy Plus 模式所模擬的各層節能量

圖 4.14 所示為 Energy Plus 模擬案例 B 各月節能量結果，各月節能量與所使用之氣象標準年資料趨勢相同，就各月節能量來，案例 B 各月節能量與案例 A 相似，在 3 至 11 月有較明顯的節能量，並且以 6 月至 10 月等四個月最高，6 月與 10 月節能量在 1000kWh 左右，7 月與 8 月兩月節能量在 1200kWh 左右，其它月份節能量皆在 900kWh 以下，並以 12 月、1 月與 2 月最少，僅有少許節能量。

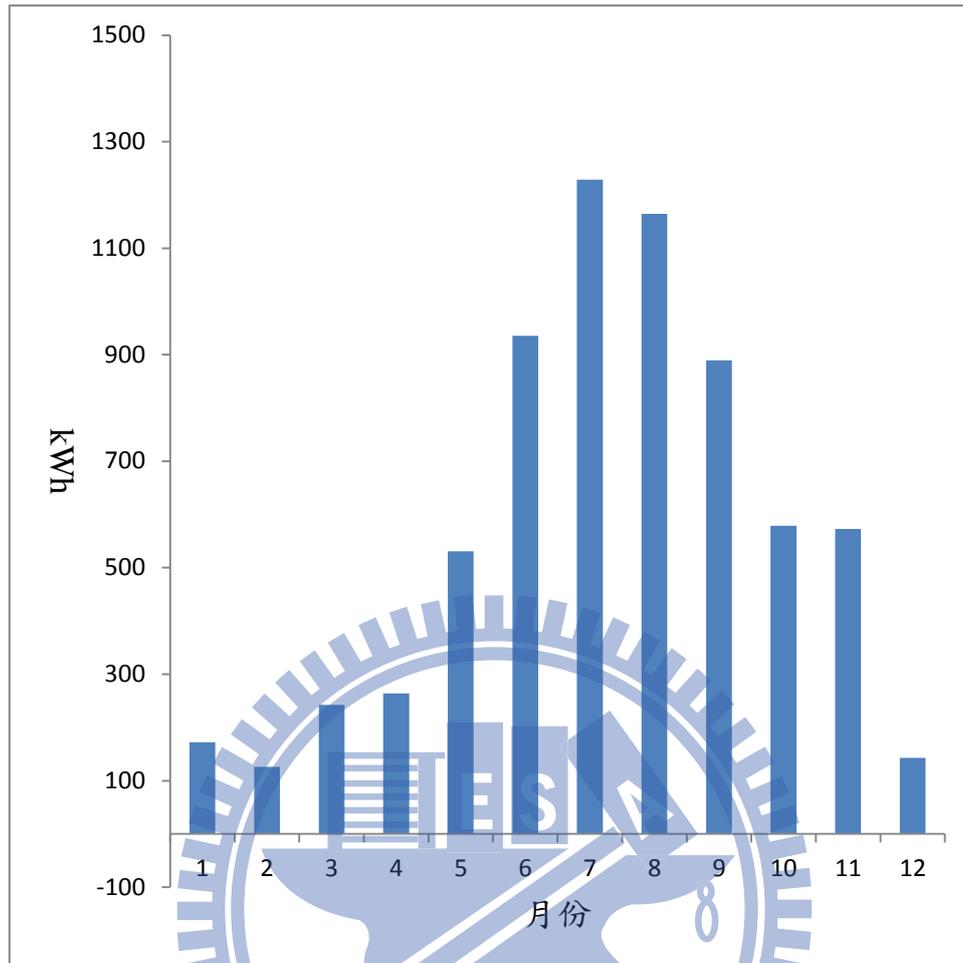


圖 4.14 案例 B Energy Plus 模式所模擬各月節能量

以 Energy Plus 模擬結果在 1 月、2 月與 12 月部份則與 1D-HF 法結果略有不同，以 1D-HF 所估的節能量在這三個月份中幾乎沒有節能量，乃因計算參數為溫度差，這三個月份中氣溫幾乎低於設定空調溫度，故幾乎無節能量。但 Energy Plus 模擬環工館在模擬上有考慮其他內部因素進行模擬，所以模擬結果在冬天 12 月到 2 月之間，仍有少許節能量，在年節能量比較部份，與案例 A 部份相似，1D-HF 法所推估節能量較以 Energy Plus 模擬低，大約為其所估算之節能量 0.88 倍左右。

案例 C 頂層綠屋頂為錫鑄基金會所設置薄層式綠屋頂，與案例 D 大溪高中綠屋頂植物種類相近，皆為萬年草，且介質厚度相似，故綠屋頂 U-value 假設與案例 D 實測值相同，綠屋頂層的 U-value 值為 0.42，原屋頂包括水泥磚、保麗龍、水泥砂漿、鋼筋混凝土等估算其 U-value 值為 1.1，利用式 3.3 計算後案例 C 綠屋頂總 U-value 值為 0.28，以 1D-HF 法評估案例 C 綠屋頂節能效益，氣象資料部份採用之標準氣象年臺北氣象檔(林，97 年)，綠屋頂面積依錫鑄基金會所提供之資料為 590m²，利用上述資料即可以式 3.6 估算案例 C 節能效益，溫度差與發生時數同案例 B，亦採用圖 4.10 所示的臺北各月份超過所設定空調開啟溫度攝氏 26 度總溫度差乘上小時數，氣溫超過攝氏 26 度時間年總累積量為 11868 度小時，依據此數據即可用 1D-HF 法此估算案例 C 綠屋頂節能效益。圖 4.15 所示為案例 C 以 1D-HF 法所估算之各月節能量，由於採用同一氣象資料，故各月節能量所佔比例與案例 B 相同，唯因此案例面積較案例 B 大，故 6 月到 9 月的節能量較案例 B 高，7 月與 8 月分別為 1990kWh 與 1742kWh，6 月與 9 月則是在 1000kWh 左右，年總節能量在 7000 度左右，如換算成單位綠屋頂面積比較，可以發現案例 B 節能效益為每年 14.24kWh/m²綠屋頂，案例 C 則是每年 12kWh/ m²綠屋頂，案例 B 較案例 C 有較好的節能效益，因為案例 B 為密集式綠屋頂，U-value 值較案例 C 低；如與案例 A 比較較，1D-HF 法案例 A 每年節能效益為 15 kWh/m²綠屋頂，高於案例 C，主要原因如圖 4.10 及圖 4.11 所示，新竹在超過攝氏 26 度的溫度差量高於台北，且案例 C 原屋頂在未建置綠屋頂前就已經有不錯的隔熱能力，故就綠屋頂節能效益部份較案例 A 低。

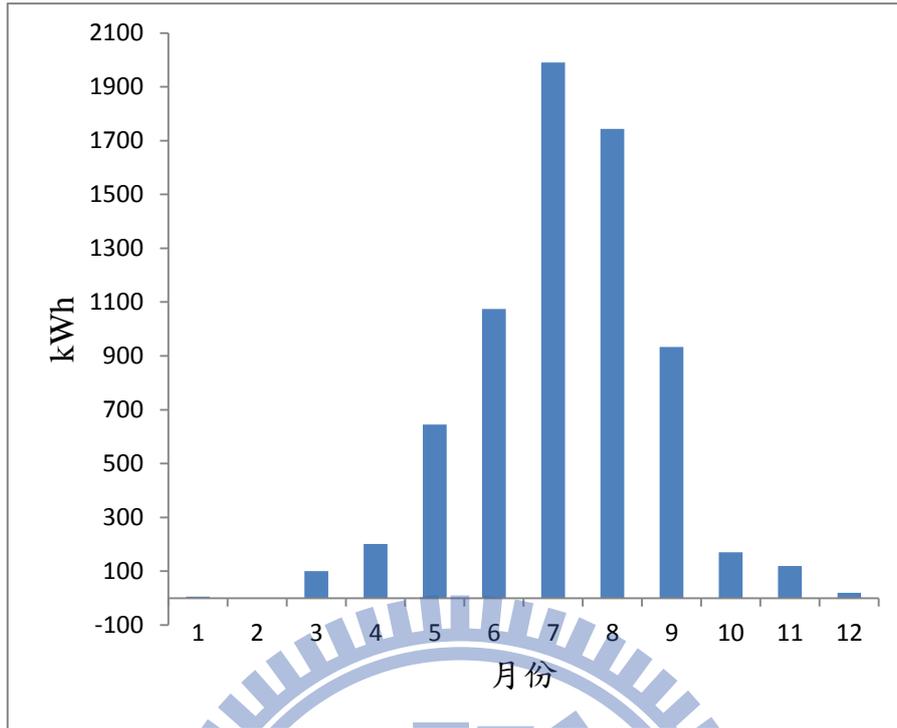


圖 4.15 案例 C 1D-HF 法所估算之各月節能量

案例 C 亦使用 Energy Plus (USDOE, 2012) 模擬，內部熱源部份，電器耗能參照經濟部(100 年)一般類辦公室用電參考指標，燈具部份則是估計燈管數後，配合點燈器與燈管耗能估算之，人員則依實地概估後輸入，有建置綠屋頂下方教室所模擬的總年耗電量為 274.69 萬度，與實際資料比較，信義區公所在綠屋頂建置後年耗電量為 272.9 萬度，兩者相差約 0.7% 左右，結果相近，模擬建置綠屋頂前則為 275.55 萬度，年約節能 8300 度左右，約為 14 度每平方公尺綠屋頂，較案例 A 少，。圖 4.16 所示為各樓層的節能量，頂層的節能量佔大部份，約為 7318 度/年，占年總節能量 88% 左右，之下幾層節能量則明顯較小，10 樓與 9 樓年節能量約為 772 度/年與 210 度/年，占年總節能量 9% 左右與 2% 左右，再之下其它樓節能量幾乎為 0，在信義區公所部份頂層與下兩層節能量已占 95% 以上總節能量，與案例 A 與案例 B 所得結果相似。

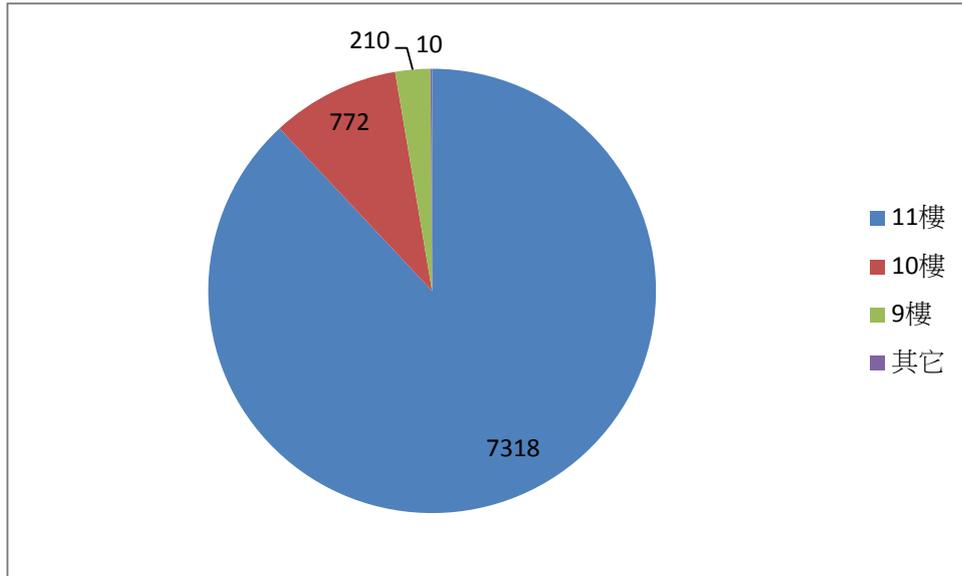


圖 4.16 案例 C Energy Plus 模式所模擬的各層節能量

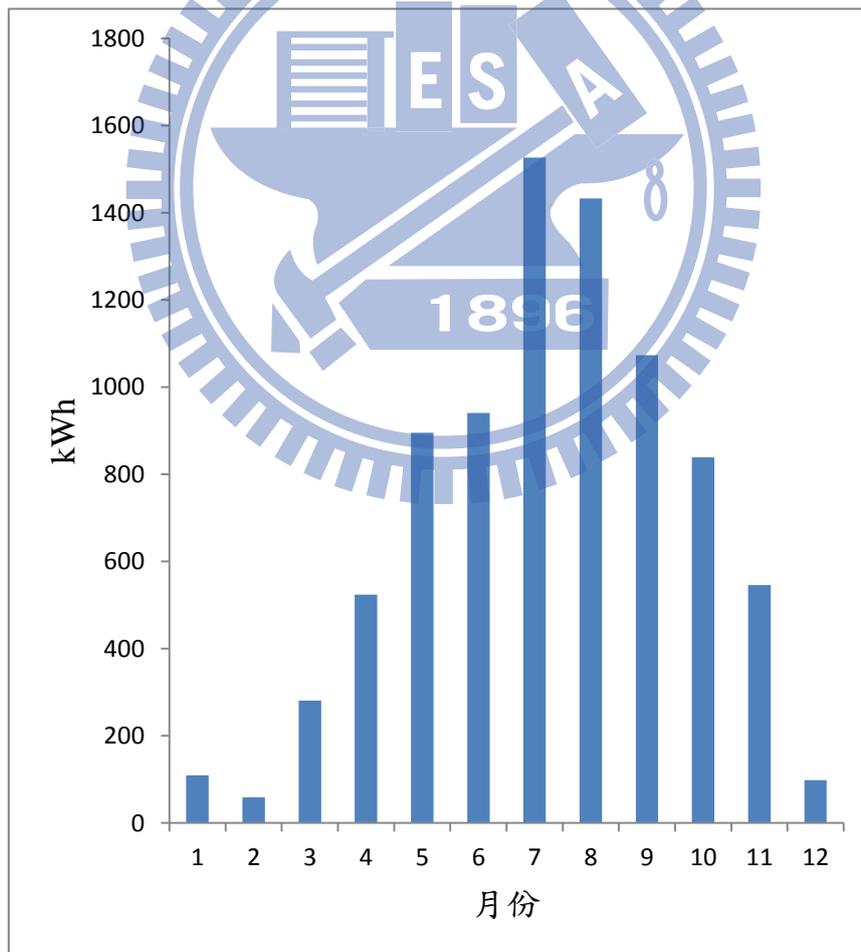


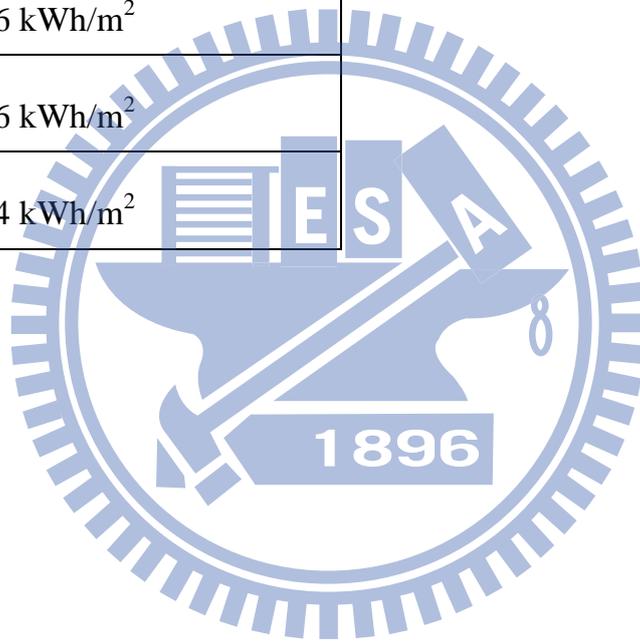
圖 4.17 案例 C Energy Plus 模式所模擬各月節能量

表 4.3 比較為各案例結果，1D-HF 法部份，案例 A、B 及 C 的單位綠屋頂面積節能效益分別為 15 kWh/m^2 、 14.24 kWh/m^2 及 12 kWh/m^2 ，以案例 A 最具節能效益，主要原因為新竹年平均溫度雖較臺北低 0.7 度左右，但各月份氣溫超過攝氏 26 度時間超過臺北，新竹為 12802 度小時，臺北則為 11868 度小時，多出約 1000 度小時；另一個原因為 U-value 的差異，因為案例 B 為密集式綠屋頂，故綠屋頂 U-value 值較案例 A 低，故雖然案例 B 超過 26 度的度小時數小於案例 A，但結果顯示案例 B 仍較案例 A 節效率低約 0.76 kWh/m^2 左右；而案例 A 與案例 C 結果的差異主要是因為空調開啟時間的差異，且案例 C 原本屋頂已有較案例 A 與案例 B 佳的隔熱能力，案例 A 原屋頂 U-value 為 1.4，綠屋頂層 U-value 為 0.42 經式 3.3 計算後為 0.32，綠屋頂 U-value 差為 1.08，而案例 C 原屋頂 U-value 為 1.1，經計算後建置綠屋後 U-value 值為 0.28，U-value 差為 0.82，可看出案例 C 建置綠屋頂可降低 U-value 的量較少，故計算後單位綠屋頂節能量較案例 A 少。

Energy Plus 模擬部份，與 1D-HF 法相似，案例 A 與案例 B 結果相近，案例 C 則低於其它案例，主要原因亦為考慮新竹與其他兩地氣候上的差異，新竹空調開啟時間較其他兩地時間長、薄層式綠屋頂與密集式綠屋頂 U-value 值等因素，因此案例 A 與案例 B 的節能效益相近，案例 C 則低於其它兩案例，比較在 Energy Plus 與 1D-HF 法結果，1D-HF 法的結果低於以 Energy Plus 模擬結果，大約為 85 至 90% 左右。

表 4.3 各案例節能效益結果

1D-HF 法	
案例 A	15 kWh/m ²
案例 B	14.24 kWh/m ²
案例 C	12 kWh/m ²
Energy Plus 模擬	
案例 A	16 kWh/m ²
案例 B	16 kWh/m ²
案例 C	14 kWh/m ²



4.3 案例建築物綠屋頂減碳與生命週期評估

本研究依據前一節綠屋頂節能效益結果與綠屋頂植物面積等兩部份推估綠屋頂的減碳效益，且依據綠屋頂與一般屋頂原料用量、更新頻率等資料進行綠屋頂生命週期評估，以下依序說明及討論所得結果。

4.3.1 綠屋頂減碳效益評估

綠屋頂減碳效益如 3.4.4 節之說明，主要是依據節能效益結果及植物減碳效能進行分析，節能效益的結果如 4.2.2 節所說明，主要是依 1D-HF 法與 Energy Plus 模式模擬所得結果，再依據台電電廠排放係數估算節能部份減碳效益；植物減碳能力估算則利用 3.4.4 節所述估算之，案例 C 部份，因在進行生命週期評估時也有評估減碳效益，故亦一併討論及比較所得結果。

表 4.4 所列為案例 A、B 與 C 之減碳效益。案例 A 部份中以 1D-HF 法節能量為 7376 度/年，使用 Energy Plus 模擬則為 8044 度/年，排放係數則依臺灣電力公司所公佈之發電廠碳排放係數(臺灣電力公司，98 年)，並依各種類發電所占百分比加權平均，為 0.612kg CO_{2e}/度。故依 1D-HF 法及 Energy Plus 模擬的節能結果計算分別可得 4,514 及 4947 kg CO_{2e}/年，植物減碳部份則採用 Getter *et al.* (2009)所提出之綠屋頂單位面積固碳量每年 0.034kg/m² 進行估算，結果為 1,815kg CO_{2e}/年，總減碳量依兩種不同節能效益評估方法分別為 6,329 kg CO_{2e}/年與 6,762 kg CO_{2e}/年。

案例 B 與案例 C 估算方式與案例 A 相同，案例 B 就節能部份所計算減碳效益分別為為 3,904 與 4,284 kg CO_{2e}/年；案例 C 則分別是 4,284 與 5,080 kg CO_{2e}/年；綠屋頂植物的減碳效益案例 B 綠屋頂面積 448m² 減碳效益為 1,680 kg CO_{2e}/年，案例 C 綠屋頂面積則為 590m²，植物減碳效益是

2,213 kg CO_{2e}/年，加總後案例 B 部份綠屋頂減碳效益以兩方法計算分別為 5,584 與 5964 kg CO_{2e}/年。

案例 C 以 Simpro 評估的減碳結果為 4.4×10^4 至 1.36×10^5 kg CO_{2e}，評估範圍為綠屋頂在生命週期 40 年間，且與一般屋頂更新次數在 1 次至 3 次比較所造成地球暖化部份的環境衝擊差異，一般屋頂的量較高，兩者差值即為綠屋頂減碳效益，此模擬結果未包括植被部份減碳，亦因為 1D-HF 法與 Energy Plus 有對節能部份進行減碳評估，故在 Simapro 部份並未就節能部份進行減碳評估，在生命週期 40 年間減碳效益為 4.4×10^4 至 1.36×10^5 kg CO_{2e}，其中在一般屋頂更新 1 次的情況下，一般屋頂與綠屋頂就地球暖化部份的環境衝擊當量差為 4.4×10^4 kg CO_{2e}，綠屋頂更新 3 次的情況下，差為 1.36×10^5 kg CO_{2e}，考慮綠屋頂生命週期 40 年，平均綠屋頂減碳量為 1100-3400 kg CO_{2e}/年。

就上述案例 A 至 C 減碳效益結果，在未考慮以 Simapro 所評估減碳結果，三案例中以案例 C 最高，案例 B 最低，主要因為減碳量主要考慮兩部份，節能量與綠屋頂面積，以面積影響較大，在考慮案例 C 有較大綠屋頂面積與節電量，故也有較大的減碳量。

表 4.4 案例 A、B 與 C 減碳效益

單位: kg CO_{2e}/年

	案例 A	案例 B	案例 C
1D-HF	4514	3904	4284
Energy Plus	4923	4284	5080
SimaPro			1000-3400
植物減碳	332.75	307	405.33
植物減碳+1D-HF	4846.75	4211	4689.33
植物減碳+ Energy Plus	5255.75	4591	5485.33

4.3.2 綠屋頂建築環境效益評估

本研究就目前已收集之綠屋頂資料，針對案例 C 與案例 D 綠屋頂進行生命週期評估，其他案例由於資料不足，故未進行。分析比較綠屋頂與一般屋頂生命週期下環境衝擊的差異，並據以評估綠屋頂的環境效益。

案例 C 綠屋頂層組成資料為錫鑄基金會(錫鑄基金會，97 年)所提供，下方原一般屋頂材料組成則是依據林建成建築師事務所提供資料，如表 4.7 所列，綠屋頂植被主要為萬年草與景天科為主，所選用介質主要為根基旺綠化園藝公司所提供的根基旺栽培介質，依錫鑄基金會所提供的資料，為蛭石、真珠石與泥炭土以體積比 1:1:1 混合而成，其中蛭石與真珠石密度約 1-1.35g/cm³，泥炭土則約 1.5g/cm³，以面積 590m² 估計，約使用蛭石 26,284kg、真珠石 19,660kg 與泥炭土 29,500kg；下層透水布則是以不織布製成，用量約 4kg，下方排水板為聚氯乙烯(PVC)，單位重量 0.0998g/cm²，排水板總重約為 588kg；抗根 PE 防水布材質為聚乙烯(PE)，重量為 30.04kg；

運輸部份，因為案例 C 綠屋頂為臺北市錫鑄基金會委外建置，由於主要材料來自台南，故運送距離為台南至案例的距離約為 320 公里，亦分析 3.2.2 節案例 C 節能結果之環境效益。

表 4.5 案例 C 綠屋頂層組成

名稱	組成	密度或單位重	使用量
根基旺	蛭石	1.35 g/cm ³	26284kg
	真珠石	1.00 g/cm ³	19660kg
	泥炭土	1.50 g/cm ³	29500kg
透水布	不織布	6g/m ²	35.4kg
隔水板	聚氣乙烯	0.0998g/cm ²	588kg
阻根 PE 防水布	聚乙烯	50.92g/ m ²	30.04kg

資料來源：錫鑄基金會(98 年)

原一般屋頂部份，屋頂組成資料由所方提供，材質資料部份則是詢問林志成建築師事務所(100 年)各層材料比例與密度後計算而得，主要計算結構層混凝土上方包括水泥磚、水泥砂漿、保麗龍、發泡混凝土與油毛氈等層之組成，如表 4.8 所列，最上層為水泥磚，密度 3.10 g/cm³，以厚度 2cm 估計，使用量約為 36,500kg，水泥砂漿主要成份為水泥與砂以重量比 1:3 比例配置而成，依面積與厚度 4cm 估算用量為 23,600kg；發泡混凝土則是以水泥與砂以重量比 1:2 並加入空氣混合而成，厚度 5cm，使用量為 40,710kg；保麗龍厚度假設為 1cm 密度為 0.015 g/cm³ 用量為 117kg，油毛氈單位面積重量則為 0.5 g/cm²，用量為 2,950kg。

表 4.6 案例 C 原一般屋頂組成

名稱	組成	密度或單位重	使用量
五角水泥磚	水泥	3.10 g/cm ³	36580 kg
水泥砂漿	水泥	3.10 g/cm ³	5900 kg
	砂	1.51 g/cm ³	17700 kg
保麗龍	發泡聚苯乙烯	0.015 g/cm ³	117 kg
發泡混凝土	水泥	3.10 g/cm ³	13570 kg
	砂	1.51 g/cm ³	27140 kg
油毛氈	油毛氈	0.5 g/cm ²	2950 kg

資料來源：林志成建築事務所 (100 年)、信義區公所 (100 年)

本研究依據上述綠屋頂層與原一般屋頂的材質資料，分別就原一般屋頂假設更新防水隔熱層週期 20 年、15 年與 10 年情況以 Simapro (Goedkoop, 2008) 軟體進行生命週期分析，以生命週期 40 年，比較兩者環境衝擊差異，並據以分析綠屋頂環境效益，評估方法部份，因為 CML 2 (Saiz *et al.*, 2006) 可評估大部份環境衝擊，而 Impact 2002+ (Humbert *et al.*, 2005) 則可以依據四類衝擊分別給予單一級分，比較上較方便，故本研究分別以 CML 2 與 Impact 2002+ 兩方法進行評估及比較。

原一般屋頂在壽命假設為 10 年、15 年及 20 年下，以 CML 2 方法評估各項環境衝擊的影響如表 4.9 所列，主要環境衝擊為地球暖化(Global warming)、人類毒性(Human ecotoxicity)、水體、海洋與陸域毒性(Fresh water aquatic、Marine aquatic & Terrestrial ecotoxicity)等五項，其它環境衝擊量則較少，各項環境衝擊量由一般屋頂壽命 10 年開始遞減，一般屋頂壽命 15

年的環境衝擊量大約是一般屋頂壽命 10 年環境衝擊 75%，在一般屋頂 20 年的情形則是 50%。

設置綠屋頂後環境衝擊差異，為加綠屋頂後各項環境衝擊與一般屋頂的差異，差異如表 4.10 所列，差異值為更換綠屋頂各項環境衝擊量與原一般屋頂環境衝擊量之比值，在一般屋頂壽命為 20 年時，上述五項環境衝擊中，主要以海洋水體毒性環境衝擊減少量最多，由 15828.0834 kg 1,4-DB eq /m² 降至 8175.23 kg 1,4-DB eq /m²，減少 49% 以上，其它人類毒性、水域生物與陸域生物毒性減少量有 45% 至 49% 左右的減少比例，其它環境衝擊部份，減少衝擊量較少，環境衝擊減少比例在 40% 至 49% 左右；一般屋頂壽命為 15 年與 10 年時的環境衝擊由於更換次數較多而較大，也因而與綠屋頂的差異亦擴大，其中人類毒性、水域生物與陸域生物毒性兩項環境衝擊減少量主要是來自於綠屋頂延長一般屋頂壽命的效益，增加一般屋頂壽命，減少防水隔熱層更換次數，因而減少五角水泥磚、水泥砂漿、發泡混凝土等建材更換，所產生環境衝擊量因此下降，其它如地球暖化等環境衝擊減量亦以綠屋頂對一般屋頂延壽效益所產生。

案例 C 節能部份的環境效益結果如表 4.12 所列，在 40 年生命週期間，其節能量為 30.6 萬度，將此量輸入 Simapro 估算其在各面向的影響量，主要面向為地球暖化、人類毒性、水域生物與陸域生物毒性等，地球暖化約是 11 萬 kg CO₂ eq，人類毒性、水域生物與海洋生物毒性則是人類與水域生物毒性兩項約是 35000kg 1,4-DB eq 左右，海洋生物毒性 8×10⁷kg 1,4-DB eq。

表 4.7 案例 C 一般屋頂以 CML 2 法所估算之環境衝擊

影響類別	單位	CR20	CR15	CR10
Abiotic depletion	kg Sb eq	306.9	460.4	613.8
	kg Sb eq/m ²	0.5	0.8	1.0
Acidification	kg SO ₂ eq	165.0	247.6	330.1
	kg SO ₂ eq/m ²	0.3	0.4	0.6
Eutrophication	kg PO ₄ --- eq	36.0	54.0	72.0
	kg PO ₄ --- eq/m ²	0.0610	0.0915	0.1220
Global warming (GWP100)	kg CO ₂ eq	92676.9	139015.4	185353.9
	kg CO ₂ eq/m ²	157.1	235.6	314.2
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	0.0044	0.0067	0.0089
	kg CFC-11 eq/m ²	0.0000	0.0000	0.0000
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	11248.9	16873.4	22497.9
	kg 1,4-DB eq/m ²	19.1	28.6	38.1
Fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	3898.0	5847.0	7796.1
	kg 1,4-DB eq/m ²	6.6	9.9	13.2
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	9338569.2	14007854.0	18677138.0
	kg 1,4-DB eq/m ²	15828.1	23742.1	31656.2
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	153.2	229.8	306.3
	kg 1,4-DB eq/m ²	0.3	0.4	0.5
Photochemical oxidation	kg C ₂ H ₄	8.0	11.9	15.8
	kg C ₂ H ₄ /m ²	0.0134	0.0201	0.0268

表 4.8 案例 C 綠屋頂環境衝擊差異¹

影響類別	單位	GR	CR20	CR15	CR10
Abiotic depletion	kg Sb eq	188.7439	118.16	271.611	425.063
			61.5%	41.0%	30.7%
Acidification	kg SO2 eq	94.35302	70.6873	153.207	235.728
			57.2%	38.1%	28.6%
Eutrophication	kg PO4--- eq	20.06762	15.9222	33.917	51.9119
			55.8%	37.2%	27.9%
Global warming (GWP100)	kg CO2 eq	49679.93	42997	89335.5	135674
			53.6%	35.7%	26.8%
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	0.002307	0.00214	0.00436	0.00658
			51.9%	34.6%	26.0%
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	6057.836	5191.09	10815.5	16440
			53.9%	35.9%	26.9%
Fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	2059.095	1838.94	3787.95	5736.97
			52.8%	35.2%	26.4%
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	4823390	4515179	9184464	1.4E+07
			51.7%	34.4%	25.8%
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	85.60023	67.573	144.16	220.746
			55.9%	37.3%	27.9%
Photochemical oxidation	kg C2H4	4.536344	3.35529	7.30111	11.2469
			57.5%	38.3%	28.7%

¹ 差異值為改用綠屋頂後各項環境衝擊剩餘值，GR 為綠屋頂含一般屋頂環境衝擊，CR20、15 與 10 則為一般屋頂壽命分別為 20 年、15 年及 10 年下綠屋頂與一般屋頂的環境衝擊差異量。

表 4.9 案例 C 綠屋頂節能環境衝擊差異²

影響類別	單位	GR
Abiotic depletion	kg Sb eq	-838.455
Acidification	kg SO2 eq	-196.486
Eutrophication	kg PO4--- eq	-246.123
Global warming (GWP100)	kg CO2 eq	-110004
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	-0.00923
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	-36443.7
Fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	-38840.9
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	-8.1E+07
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	-99.5132
Photochemical oxidation	kg C2H4	-11.3526

² 差異值為為綠屋頂節能所減少之環境衝擊。

原一般屋頂以 Impact 2002+法(Humbert *et al.*, 2005)評估結果如表 4.12 所列，主要環境衝擊為 Aquatic ecotoxicity、Terrestrial ecotoxicity 與 Global warming 等三項，其它衝擊量則較少，一般屋頂壽命為 20 年、15 年與 10 年各項環境衝擊比例則與使用 CML 2 法結果相似，以壽命 10 年最多，壽命 15 年與 20 年約是壽命 10 年的 75%與 50%。在一般屋頂壽命 20 年情況下，綠屋頂安裝後環境衝擊差異如表 4.13 所列，環境衝擊減少量雖以 Aquatic ecotoxicity 與 Terrestrial ecotoxicity 兩項量最多，分別由 2275591 與 535138.8 減低至 1799637 與 433238.5，但兩項減少比例在 20%左右，其

它面向則是在 50% 左右，在一般屋頂壽命 15 年與 10 年，環境衝擊減少比例則依等比例增加。

表 4.10 案例 C 一般屋頂以 Impact2002+法所估算之環境衝擊

影響類別	單位	CR20	CR15	CR10
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	0.004479	0.006719	0.008958
	kg CFC-11 eq/m ²	0.0	0.0	0.0
Aquatic ecotoxicity	kg TEG water	2275591	3413387	4551182
	kg TEG water /m ²	3,050.2	3,856.9	5,785.4
Terrestrial ecotoxicity	kg TEG soil	535138.8	802708.2	1070278
	kg TEG soil/m ²	734.3	907.0	1,360.5
Terrestrial acid/nutri	kg SO2 eq	898.1	1347.2	1796.3
	kg SO2 eq/m ²	0.9	1.5	2.3
Aquatic acidification	kg SO2 eq	180.5	270.7	360.9
	kg SO2 eq/m ²	0.2	0.3	0.5
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-lim	4.0	6.1	8.1
	kg PO4 P-lim/m ²	0.0	0.0	0.0
Global warming	kg CO2 eq	91019.1	136528.7	182038.3
	kg CO2 eq/m ²	82.6	154.3	231.4

表 4.12 案例 C 綠屋頂環境衝擊差異

影響類別	單位	GR	CR20	CR15	CR10
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	0.002326	0.0022	0.0044	0.0066
			51.9%	34.6%	26.0%
Aquatic ecotoxicity	kg TEG water	1799637	475,954.3	1,613,749.9	2,751,545.4
			79.1%	52.7%	39.5%
Terrestrial ecotoxicity	kg TEG soil	433238.5	101,900.2	369,469.6	637,039.0
			81.0%	54.0%	40.5%
Terrestrial acid/nutri	kg SO2 eq	519.0375	379.1	828.2	1,277.2
			57.8%	38.5%	28.9%
Aquatic acidification	kg SO2 eq	103.4133	77.1	167.3	257.5
			57.3%	38.2%	28.7%
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-lim	2.157834	1.9	4.0	6.0
			52.7%	35.1%	26.4%
Global warming	kg CO2 eq	48730.64	42,288.5	87,798.1	133,307.6
			53.5%	35.7%	26.8%

原一般屋頂在壽命假設為 10 年、15 年及 20 年下，以 Impact 2002+法 (Sébastien Humbert *et al.*, 2005)綜合級分進行評估，結果如圖 4.18 所示，由結果顯示，主要為氣候變遷部份影響最大，其次為自然資源與人類健康，生態系統品質則最少，在一般屋頂壽命 20 年，減量由 22 減至 10Pt，減量 12Pt，剩餘量約是 45%，一般屋頂壽命 15 年與 10 年則分別減量 20 與 30Pt。

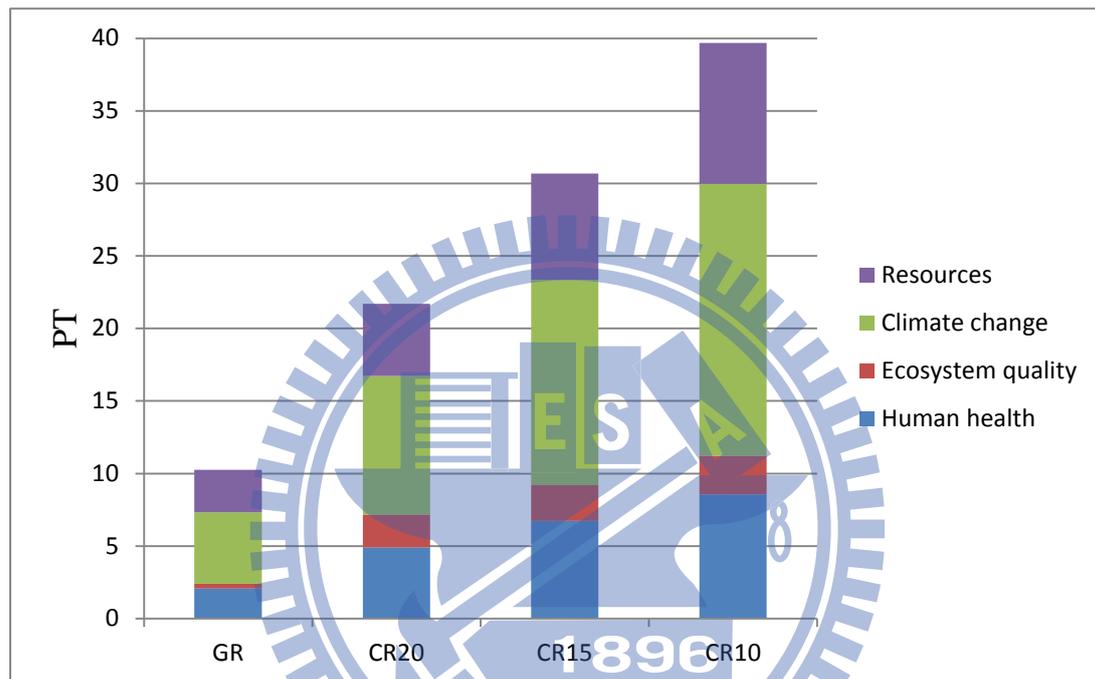


圖 4.18 案例 C Impact 2002+綜合級分結果

案例 D 綠屋頂層組成資料為大溪高中所提供，下方原一般屋頂材料組成亦是依據林建成建築師事務所提供資料，如表 4.11 所列，屋頂植物主要以萬年草為主，介質層為使用陶粒與以腐植質、土與砂混合而成的培養土以約 3：1 混合而成，厚度約 10cm 左右，總用量約為 4050kg 左右；下層過濾綿則是以不織布製成，用量約 1kg，下方排水板為聚氯乙稀(PVC)，單片排水板為 50cm²，用量為 144 個，重量為 64kg；防水布材質則為聚乙烯 (PE)，重量 2kg；唯運輸部份與節能部份，因為案例 D 無相關資料，且節

能部份因為案例 D 下方教室並無設置空調系統，並無進行分析，故案例 D 未對兩部份進行評估。

表 4.12 案例 D 綠屋頂層組成

名稱	組成	密度或單位重	使用量
基質	陶粒	0.3 g/cm ³	316kg
	培養土	1.8g/cm ³	1620kg
過濾綿	不織布	6g/m ²	1kg
排水板	聚氯乙炔	0.0998g/cm ²	64kg
防水布	聚乙烯	50.92g/ m ²	2kg

資料來源：大溪高中(100 年)

原一般屋頂部份，屋頂組成資料由校方提供，材質資料部份亦是詢問林志成建築師事務(100 年)各層材料比例與密度後計算而得，主要計算結構層混凝土上方包括水泥砂漿、保麗龍、輕質混凝土與油毛氈等層之組成，如表 4.12 所列，最上層為水泥砂漿與保麗龍，水泥砂漿主要成份與案例 C 相同，依面積與厚度 2cm 估算用量為 142kg 保麗龍厚度則是 1cm 密度 0.015 g/cm³ 用量為 7.14kg；輕質混凝土則是以水泥與砂以重量比 1:2 混合而成，厚度為 4cm，使用量為 2484kg；油毛氈單位面積重量則為 0.5 g/cm²，用量為 180kg。

表 4.13 案例 D 原一般屋頂組成

名稱	組成	密度或單位重	使用量
水泥砂漿	水泥	3.10 g/cm ³	36 kg
	砂	1.51 g/cm ³	108 kg
保麗龍	發泡聚苯乙烯	0.015 g/cm ³	7.14 kg
發泡混凝土	水泥	3.10 g/cm ³	828 kg
	砂	1.51 g/cm ³	1656 kg
油毛氈	油毛氈	0.5 g/cm ²	180kg

資料來源：林志成建築事務所 (100 年)、大溪高中(100 年)

案例 D 部份與案例 C 分析方式相同，以 Simapro (Goedkoop, 2008)軟體進行生命週期分析，分別就原一般屋頂假設更新防水隔熱層週期 20 年，15 年與 10 年情況，假設生命週期 40 年，利用 CML 2 與 impact 2002+兩方法，比較兩者環境衝擊差異，並據以分析綠屋頂環境效益。

原一般屋頂在壽命假設為 10 年、15 年及 20 年下，對各項環境衝擊的影響如表 4.13 所列，依結果顯示主要環境衝擊為海洋生態毒性，其次為地球暖化，在海洋生態毒性部份主要來源為原一般屋頂油毛氈所產生；因為未考慮節能與運輸，故一般屋頂環境衝擊主要在原料階段，各項環境衝擊以一般屋頂壽命 10 年最高，一般屋頂壽命 15 年、20 年環境衝擊則依比例減少。

綠屋頂與一般屋頂環境衝擊差異如表 4.14 所列，在一般屋頂壽命 20 年情況下，除人類毒性、水體與海洋生態毒性外，其餘皆少於一般屋頂屋頂，環境衝擊差異最明顯為地球暖化，減少比例約在 30%左右，地球暖化

由 45.90 kg CO₂ eq/m² 減少至 33.23 kg CO₂ eq/m²，其它環境衝擊部份除上述人類毒性、水體與海洋生態毒性外，減少比例在 3% 至 32%，與案例 C 相似，主要環境衝擊減量來至於綠屋頂對於一般屋頂壽命延長，故在一般屋頂壽命在 15 年與 10 年時，綠屋頂各項環境衝擊減量隨之增加，人類毒性、水體與海洋生態毒性部份主要原因為在陶粒製程中，所產生之廢棄物所造成，故環境效益較案例 C 少。

表 4.14 案例 D 一般屋頂環境衝擊

影響類別	單位	CR20	CR15	CR10
Abiotic depletion	kg Sb eq	12.913425	19.370137	25.82685
	kg Sb eq/m ²	0.3587062	0.53805936	0.7174125
Acidification	kg SO ₂ eq	8.6349402	12.95241	17.26988
	kg SO ₂ eq/m ²	0.2398594	0.35978916	0.47971888
Eutrophication	kg PO ₄ --- eq	1.0830414	1.6245621	2.1660828
	kg PO ₄ --- eq/m ²	0.0300844	0.04512672	0.06016896
Global warming (GWP100)	kg CO ₂ eq	1652.2201	2478.3302	3304.4402
	kg CO ₂ eq/m ²	45.895002	68.8425055	91.7900055
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	0.0001569	0.00023546	0.00031395
	kg CFC-11 eq/m ²	4.360E-06	6.540E-06	8.720E-06
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	297.94885	446.92327	595.89769
	kg 1,4-DB eq/m ²	8.2763569	12.4145352	16.5527136
Fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	119.12366	178.68548	238.24731
	kg 1,4-DB eq/m ²	3.3089905	4.96348555	6.61798083
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	291832.88	437749.32	583665.76
	kg 1,4-DB eq/m ²	8106.4688	12159.7033	16212.9377
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	2.63807	3.957105	5.27614
	kg 1,4-DB eq/m ²	0.0732797	0.10991958	0.14655944
Photochemical oxidation	kg C ₂ H ₄	0.4632586	0.69488798	0.9265173
	kg C ₂ H ₄ /m ²	0.0128682	0.01930244	0.02573659

表 4.15 案例 D 綠屋頂環境衝擊差異¹

影響類別	單位	GR	CR20	CR15	CR10
Abiotic depletion	kg Sb eq	10.24079	2.67264	9.12935	15.5861
	%		79.3%	52.9%	39.7%
Acidification	kg SO2 eq	7.017448	1.61749	5.93496	10.2524
	%		81.3%	54.2%	40.6%
Eutrophication	kg PO4--- eq	0.94951	0.13353	0.67505	1.21657
			87.7%	58.4%	43.8%
Global warming (GWP100)	kg CO2 eq	1195.758	456.463	1282.57	2108.68
	%		72.4%	48.2%	36.2%
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	0.000112	4.5E-05	0.00012	0.0002
	%		71.3%	47.5%	35.7%
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	378.0242	-80.075	68.8991	217.874
	%		126.9%	84.6%	63.4%
Fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	153.7381	-34.614	24.9474	84.5092
	%		129.1%	86.0%	64.5%
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	391397.5	-99565	46351.8	192268
	%		134.1%	89.4%	67.1%
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	2.570306	0.06776	1.3868	2.70583
	%		97.4%	65.0%	48.7%
Photochemical oxidation	kg C2H4	0.373525	0.08973	0.32136	0.55299
	%		80.6%	53.8%	40.3%

原一般屋頂以 Impact 2002+法(Humbert *et al.*, 2005)評估結果如表 4.18 所列，主要環境衝擊為 Aquatic ecotoxicity、Terrestrial ecotoxicity，其次為 Global warming，其於衝擊量則較少，一般屋頂壽命為 20 年、15 年與 10 年各項環境衝擊比例以壽命 10 年最多，壽命 15 年與 20 年約是壽命 10 年的 75%與 50%。在一般屋頂壽命 20 年情況下，綠屋頂安裝後環境衝擊差異如表 4.13 所列，Aquatic ecotoxicity 與 Terrestrial ecotoxicity 兩項較一般屋頂高外，其它面向則是有 50%左右的環境衝擊減量，在一般屋頂壽命 15 年與 10 年，環境衝擊減少比例則依等比例增加，在壽命 10 年時，Aquatic ecotoxicity 與 Terrestrial ecotoxicity 則是有 17%與 50%左右的減量。

表 4.16 案例 D 一般屋頂以 Impact2002+法所估算之環境衝擊

影響類別	單位	CR20	CR15	CR10
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	0.00	0.00	0.00
	kg CFC-11 eq/m ²	0.00	0.00	0.00
Aquatic ecotoxicity	kg TEG water	42931.92	64397.88	85863.83
	kg TEG water /m ²	1192.55	1788.83	2385.11
Terrestrial ecotoxicity	kg TEG soil	11384.75	17077.13	22769.51
	kg TEG soil/m ²	316.24	474.36	632.49
Terrestrial acid/nutri	kg SO2 eq	26.21	39.31	52.42
	kg SO2 eq/m ²	0.73	1.09	1.46
Aquatic acidification	kg SO2 eq	8.31	12.46	16.62
	kg SO2 eq/m ²	0.23	0.35	0.46
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-lim	0.16	0.23	0.31
	kg PO4 P-lim/m ²	0.00	0.01	0.01
Global warming	kg CO2 eq	1610.89	2416.33	3221.77
	kg CO2 eq/m ²	44.75	67.12	89.49

表 4.17 案例 D 綠屋頂環境衝擊差異

影響類別	單位	GR	CR20	CR15	CR10
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	0.000115	0.00	0.00	0.00
			70.66%	47.10%	35.33%
Aquatic ecotoxicity	kg TEG water	71596.17	-28664.25	-7198.29	14267.67
			166.77%	111.18%	83.38%
Terrestrial ecotoxicity	kg TEG soil	11855.66	-470.91	5221.47	10913.85
			104.14%	69.42%	52.07%
Terrestrial acid/nutri	kg SO2 eq	18.84318	7.37	20.47	33.58
			71.89%	47.93%	35.95%
Aquatic acidification	kg SO2 eq	6.630636	1.68	5.83	9.99
			79.79%	53.19%	39.90%
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-lim	0.135391	0.02	0.10	0.18
			86.75%	57.84%	43.38%
Global warming	kg CO2 eq	1153.473	457.41	1262.86	2068.30
			71.60%	47.74%	35.80%

原一般屋頂在壽命假設為 10 年、15 年及 20 年下，以 Impact 2002+單一級分進行評估，結果如圖 4.19 所列，由結果顯示，一般屋頂環境衝擊以

資料消耗與氣候變遷為主，綠屋頂環境衝擊部份則是人類毒性比例較高，總合來看，綠屋頂在一般屋頂防水隔熱層壽命 20 年的情況下，環境衝擊較一般屋頂高大約 0.2Pt 左右，在壽命在 15 年與 10 年則是較一般屋頂低 0.05Pt 至 0.3Pt。

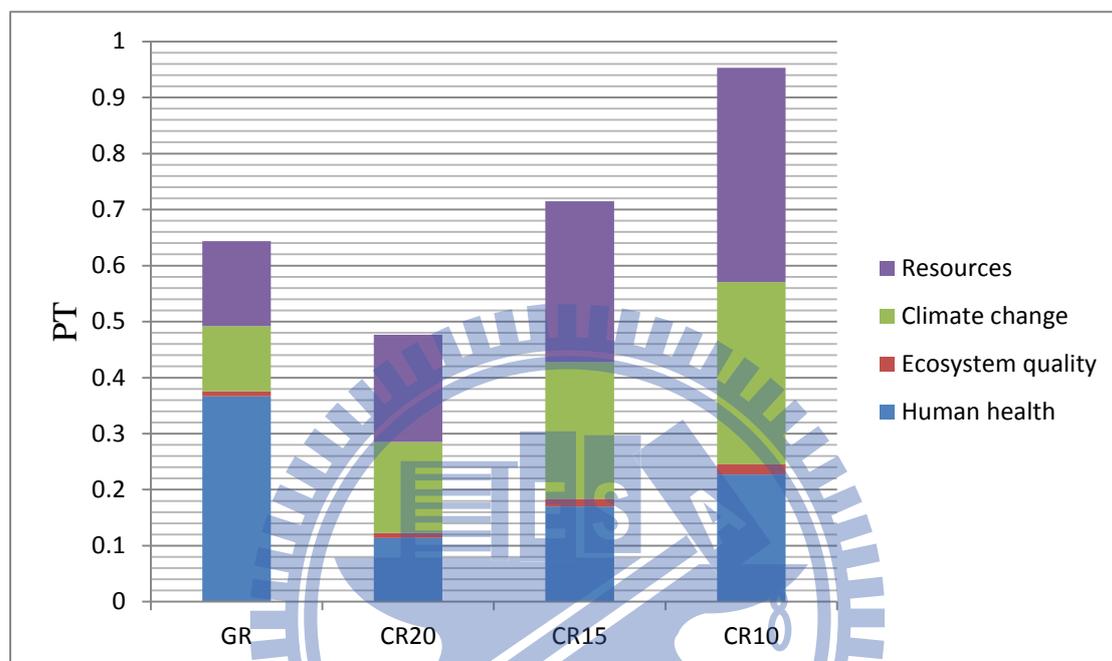


圖 4.19 案例 D 以 Impact 2002+ 單一模式評估結果

4.4 綠屋頂成本效益評估

本節依據一般屋頂與綠屋頂成本及前節綠屋頂節能與減碳效益所得結果，評估綠屋頂成本效益。

推估一般屋頂與綠屋頂成本主要分為初設成本與更新成本兩部份，就一般屋頂部份，因為鋼筋混凝土等結構層與建築物為建築物主要結構，與建築一體，故其使用壽命遠較上方防水隔熱層長，因而初設成本與更新成本僅考慮結構層上方包括防水與隔熱層等部份之成本。

在一般屋頂成本推估資料部份，本研究採用林志成建築師事務所(100年)與交通大學營繕組(100年)所提供資料，取兩份資料的平均值作為一般

屋頂初設成本，表 4.11 所列為一般屋頂在結構層上方各層單位成本資料，包括水泥磚、輕質混凝土、油毛氈與水泥砂漿等層，各層平均單位面積成本由上而下分別為水泥磚每平方公尺 315 元、輕質混凝土每平方公尺 350 元、油毛氈每平方公尺 453 元與水泥砂漿每平方公尺 205 元，總計一般屋頂初設成本為每平方公尺 1528 元。

表 4.18 一般屋頂推估單位成本

	厚度 (m)	平均單位成本(元/m ²)
水泥磚	0.05	315
輕質混凝土	0.05	350
油毛氈	0.01	453
水泥砂漿	0.02	205
總計		1528

資料來源：林志成建築事務所 (100 年)、交通大學營繕組 (100 年)

一般屋頂更新成本部份，因為更換防水隔熱層需重新鋪設，故一般屋頂單次更新成本假設與初設成本相同，本研究假設防水隔熱層大約 10 至 20 年需更新，故分別以 10 年、15 年與 20 年等三種使用壽命進行成本推估，並換算成年均成本，經估算後在 10 年、15 年與 20 年三種使用壽命下的年均成本分別為每平方公尺 190 元、146 元及 115 元。

綠屋頂成本推估部份，本研究分別向竹軒園景觀工程設計公司及寶銳企業兩家綠建材景觀公司詢問綠屋頂建置所需材料與成本估價資料，包括上層植被、介質與下層不織布、蓄排水板、阻根層與防水層，亦分別取得相關施作人工成本如表 4.12 所列，本研究亦取兩資料平均結果作為成本推

估之依據，植被兩間公司資料平均為每平方公尺 600 元；介質厚度設定為 10cm，兩資料平均為每平方公尺 300 元；其它包括不織布、蓄排水板、阻根層與防水層平均單位成本由上而下分別為不織布每平方公尺 95 元、蓄排水板每平方公尺 476 元、阻根層每平方公尺 95 元與防水層每平方公尺 380 元；加上施作人工部份平均每平方公尺 608 元；植被更新部分則依 Wong *et al.*(2003)所提出的假設，綠屋頂植被更新時間為 15 年，更新成本則假設與植被初設成本相同為每平方公尺 600 元，經式 3.6 計算後，綠屋頂年均成本為 166.5 元/m²/年，本研究亦分析綠屋頂不必更新植被情況，綠屋頂年均成本為 141 元/m²/年。

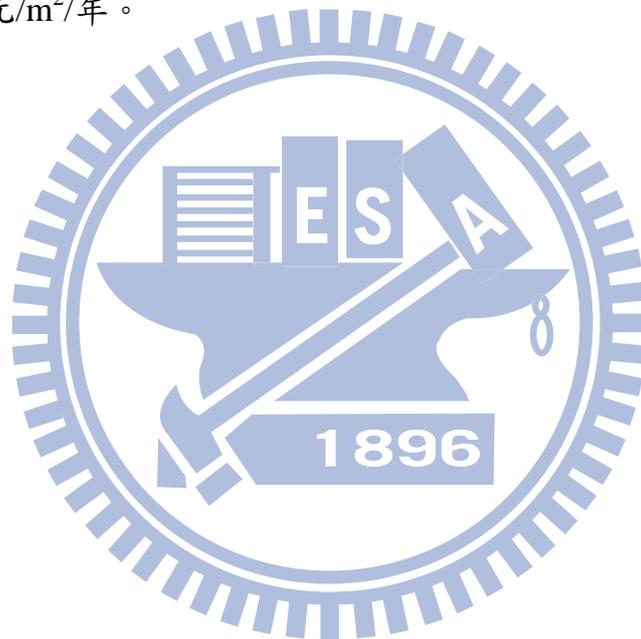


表 4.19 綠屋頂推估單位成本

項目	平均單位成本(元/m ²)
植被	630
介質	315
不織布	100
蓄排水板	500
阻根層	100
防水層	400
施作人工	640
總計	2683

資料來源：竹軒園景觀工程設計公司(100年)、寶銳企業有限公司(100年)

綠屋頂成本效益評估主要考量前述之建置成本及綠屋頂節能、減碳及延長一般屋頂使用壽命，綠屋頂節能部份係利用臺灣電力公司所提供之電價表，如表 3.2 所列，6 月至 9 月為夏日與其它月份為非夏日，考慮累進電價，配合 1D-HF 法與 Energy Plus 模擬所得結果，統計各月度數乘以電價，估算綠屋頂年總節能量而得經濟效益；減碳效益部份則是如 3.6 節所述，採用蕭(98 年)所建議 750 元/ton CO_{2e}，配合各案例減碳量，估算綠屋頂減碳之經濟效益，以下依序說明案例 A 至案例 C 所得結果。

案例 A 部份，由 1D-HF 法結果發現，在綠屋頂環境與一般屋頂環境各月用電度數皆超過 701 度，依表 3.3 所列，夏日與非夏日電價分別採用 5.1 元/度與 3.97 元/度，圖 4.19 所示為案例 A 以 1D-HF 法所得結果估算的

節省電費，全年為 36369 元/年，以 6 月至 9 月較高，分別為 4729 元、10603 元、10052 元與 6596 元，其它月份則較不明顯，因為夏日電價較高且 6 月至 9 月為用節能量較高月份，所以 6 月至 9 月所節省電 31980 元，占總省電費 87%。由於台灣的電價目前偏低，故所節省電費較國外低，近期國內亦將擬定新的電價，俟新的電價表調整後，應該綠屋頂會更具效益。

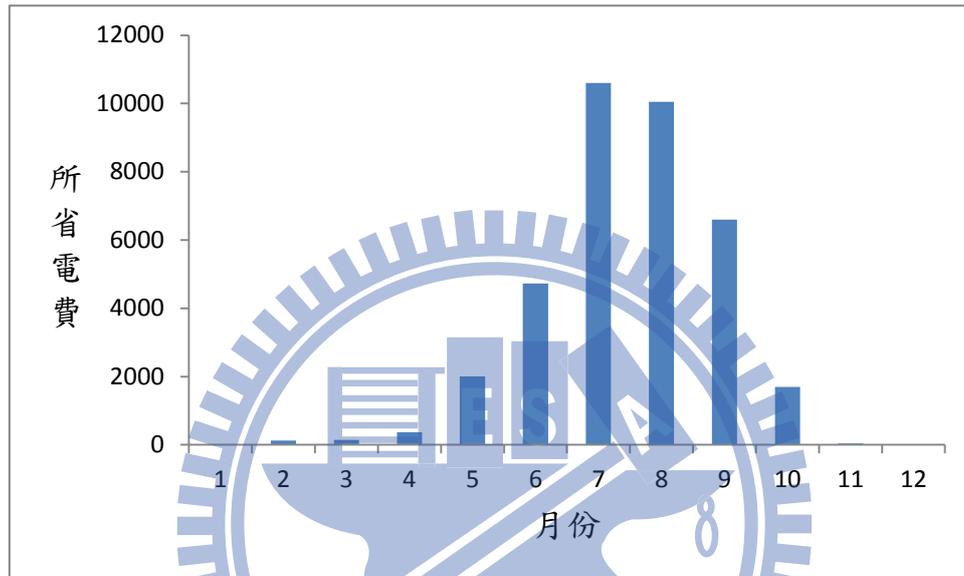


圖 4.20 案例 A 1D-HF 法各月份所省電費

圖 4.20 所示為案例 A 依據 Energy Plus 模式模擬結果估算各月份所省電費。所估算的節省電費為 37555 元/年，在 3 月至 11 月所省電費在 1500 元至 7287 元左右，其餘月份大約在 350 元以下，以模擬結果顯示所省電費以 7 月與 8 月最高，約有 7287 元與 6968 元，其餘月份則依序遞減。

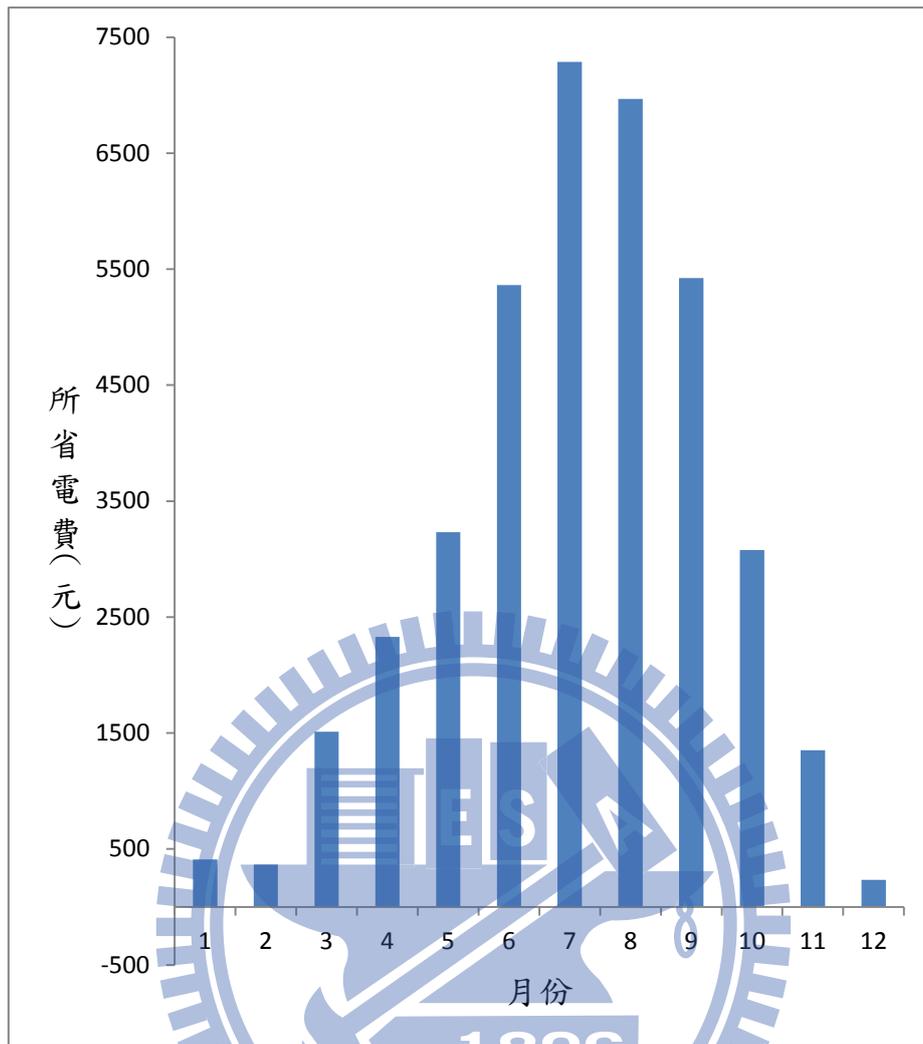


圖 4.21 案例 A Energy Plus 模式模擬各月所省電費

依兩方法所估得的節省電費分別為 1D-HF 法 36369 元/年與 Energy Plus 37555 元/年，以 Energy Plus 結果較高，因為其所估的年總節能量較 1D-HF 法約高 600 度左右，但因為 1D-HF 法節能量較高月份座落於夏日電價月份，故兩模式所省電費差距僅差 1200 元左右；案例 A 的綠屋頂面積 484m^2 ，故所省電費約為 75.14 至 77.59 元/ m^2 /年。

案例 A 在減碳效益包括植物與節能兩部份，依 4.3.1 節所估算結果，在 $4.51\text{ ton CO}_2\text{e}/\text{年}$ 至 $4.923\text{ ton CO}_2\text{e}/\text{年}$ 間，配合蕭(98 年)所建議 750 元/ $\text{ton CO}_2\text{e}$ 估算，減碳部份經濟效益分別為 9.81 元/ m^2 /年與 10.48 元/ m^2 /年。

綠屋頂年均成本為 166.5 元，一般屋頂初設成本為 1528 元，以 40 年計算的年均成本為 79.01 元，綠屋頂與一般屋頂年均成本總合為 245.51 元，與一般屋頂壽命假設為 10 年、15 年及 20 年的年均成本為 190 元、146 元與 115 元相減，在成本部份分別為 -55.51、-99.51 與 -130.51，此結果與前述電費節約與減碳效益總合估算，案例 A 在假設綠屋頂植被不必更新下，綠屋頂成本效益在一般屋頂壽命為 10 時以 1D-HF 及 EnergyPlus 所得結所得的成本效益分別為 54.94 與 58.07 元/ m²/年、在壽命為 15 年時則為為 10.94 與 14.07 元/ m²/年、在壽命為 10 年下，成本效益分為為 -20.06 與 -16.93 元/ m²/年，若綠屋頂植被每 15 年更新一次，則成本效益分別為 29.44 與 32.57 元/ m²/年、-14.56 與 -11.43 元/ m²/年及 -45.56 與 42.43 元/ m²/年。



表 4.20 案例 A 綠屋頂成本效益

單位：元/m²/年

(a) 成本效益

	電費節約 (EP)	節能減碳 (CC)	植物減碳 (CP)	一般屋頂 (RC)		差異值 ¹
				壽命	成本	
1D-HF	75.14	6.99	0.5	10	190	52.64/27.14
				15	146	8.74/-16.86
				20	115	-22.36/-47.76
Energy Plus	77.59	7.67	0.5	10	190	55.77/30.27
				15	146	11.77/-13.73
				20	115	-17.13/-44.73

(b) 綠屋頂成本

植被	綠屋頂成本(含一般屋頂初設成本)
不更換植被(GC _A)	220.01
15 年更換植被(GC _B)	245.51

¹ 差異值為綠屋頂(含一般屋頂初設成本)與一般屋頂之成本效益差異值。

計算方式為(GC_A-EP-CC-CP-RC)/(GC_B-EP-CC-CP-RC)

案例 B 以 1D-HF 法所得結果各月份用電量皆超過 701 度，故案例 B 在節能模擬部份亦採用夏日電價 5.1 元/度與非夏日電價 3.97 元/度評估節能部份成本效益，下圖 4.21 為案例 B 利用 1D-HF 法所模擬各月所省電費分佈，由結果發現，所省電費為 31242 元/年，除 5 到 9 月有明顯的電費節省，其它月份較不顯著，在用電高峰 6 至 9 月期間，以 7 月與 8 月有較高的電費節省，分別為 9520 元、8099 元，6 月與月 9 分別為 5000 至 4000 元的電費節省，占所省電費占全年 85% 左右，其餘月份較不明顯。

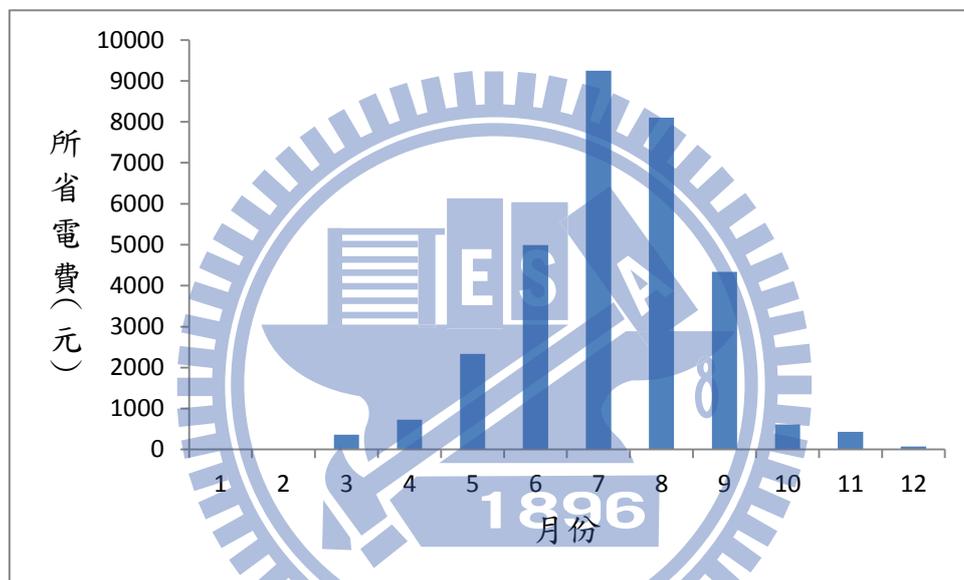


圖 4.22 案例 B 1D-HF 法各月份所省電費

案例 B 依 Energy Plus 模擬結果估算節省電費如圖 4.22 所示，節省電費為 31955 元/年，5 月至 11 月之間節省電費較多，在 2000 元至 6,000 元左右，以 7 月與 8 月最高，約有 6267 元與 5939 元，其餘月份較低，大約在 1000 元以下，分佈情形則是以 7 月與 8 月向左右遞減。

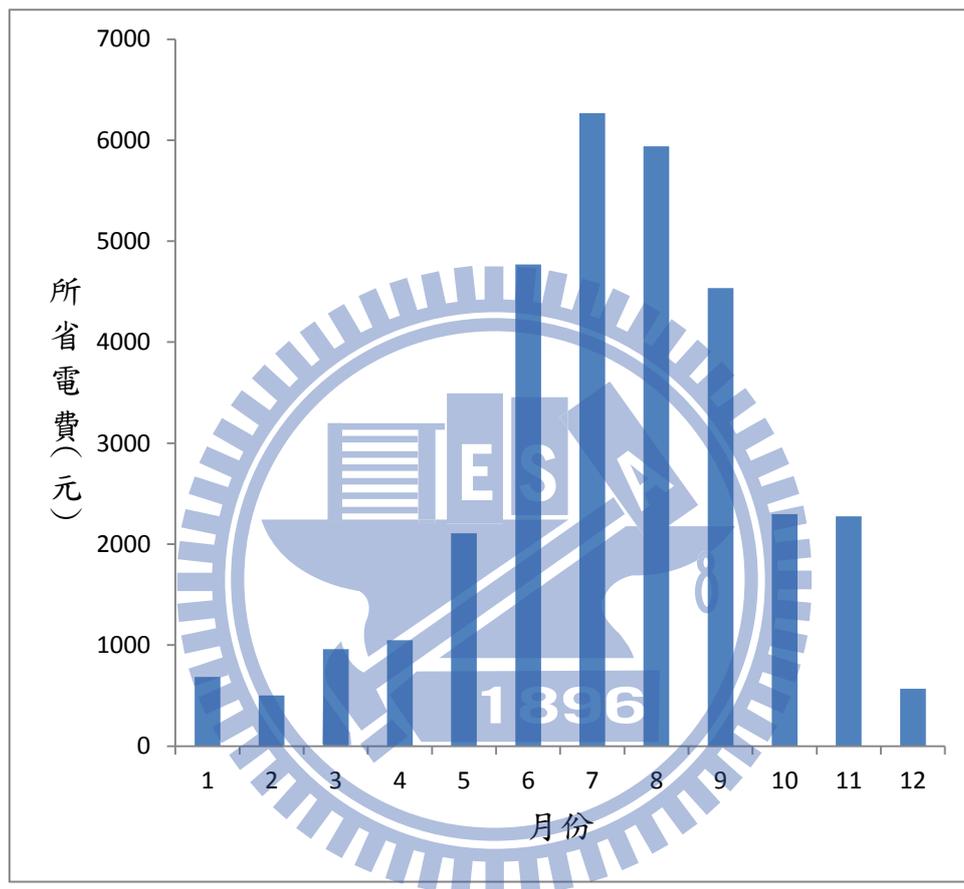


圖 4.23 案例 B Energy Plus 模式模擬各月所省電費

案例 B 以兩方法所估得的節省電費分別為 1D-HF 法 31,242 元/年與 Energy Plus 31,955 元/年，與案例 A 相似，亦以 Energy Plus 結果較高，案例 B 兩模式所省電費差距較案例 A 略少，在 700 元左右。案例 B 的綠屋頂面積為 448m²，單位綠屋頂面積所省電費為 1D-HF 法 69.74 元/m²/年與 Energy Plus 71.32 元/m²/年。

減碳效益部份，與案例 A 估算方法相同，依 4.3.1 節所估算結果，在 3.90 ton CO_{2e}/年至 4.28ton CO_{2e}/m²/年間，配合蕭(民國 98 年)所提出碳稅建

議 750 元/ton CO_{2e} 估算兩模式結果，分別為 9.34 元/m²/年與 9.92 元/m²/年。

成本計算方式與案例 A 相同，綠屋頂(含一般屋頂年均成本)與表 4.13(b) 相同，在不考慮與考慮植被更換年均成本分別為 220.01 與 245.51 元，一般屋頂壽命為 10 年、15 年及 20 年的年均成本分別為 190 元、146 元與 115 元，配合上述電費節約與減碳效益總合估算，在假設綠屋頂植被不必更換的情況下，案例 B 綠屋頂成本效益分別為在一般屋頂壽命為 10 年、15 年及 20 年下，成本效益依 1D-HF 與 Energy Plus 結果計算，分別為 49.07 與 51.23 元/m²/年、5.07 與 7.23 元/m²/年及-25.93 與-23.77 元/m²/年，若綠屋頂每 15 年需更換植被，案例 B 綠屋頂成本效益分別為 23.57 與 25.73 元/m²/年、-20.43 與-18.27 元/m²/年及-51.43 與-49.27 元/m²/年。



表 4.21 案例 B 綠屋頂成本效益

單位：元/m²/年

	電費節約 (EP)	節能減碳 (CC)	植物減碳 (CP)	一般屋頂 (RC)		差異值
				壽命	成本	
1D-HF	69.74	6.53	0.5	10	190	49.07/23.57
				15	146	5.07/-20.43
				20	115	-25.93/-51.43
Energy Plus	71.32	7.11	0.5	10	190	51.23/25.73
				15	146	7.23/-18.27
				20	115	-23.77/-49.27

註：計算方式同表 4.13。

案例 C 在節能部份因用各月電量亦超過 701 度，故案例 C 電費採用夏日電價 5.10 元/度與非夏日電價 3.97 元/度，運用兩模式分別估算節能所產生之經濟效益，下圖 4.23 為以 1D-HF 法所估算之結果，結果顯示在綠屋頂電費節省部份為 34287 元/年，各月省電費比例也與案例 B 相同，主要集中在 6 月至 9 月，占全年省電電費 85%，並以 7 月與 8 月最高，分別為 10000 與 9000 元/月左右，10 月至 4 月則較不明顯大約都在 900 元/月以下，依據案例 C 綠屋頂面積 590m² 估算綠屋頂在節能部份經濟效益為 58.11 元/ m²/年。

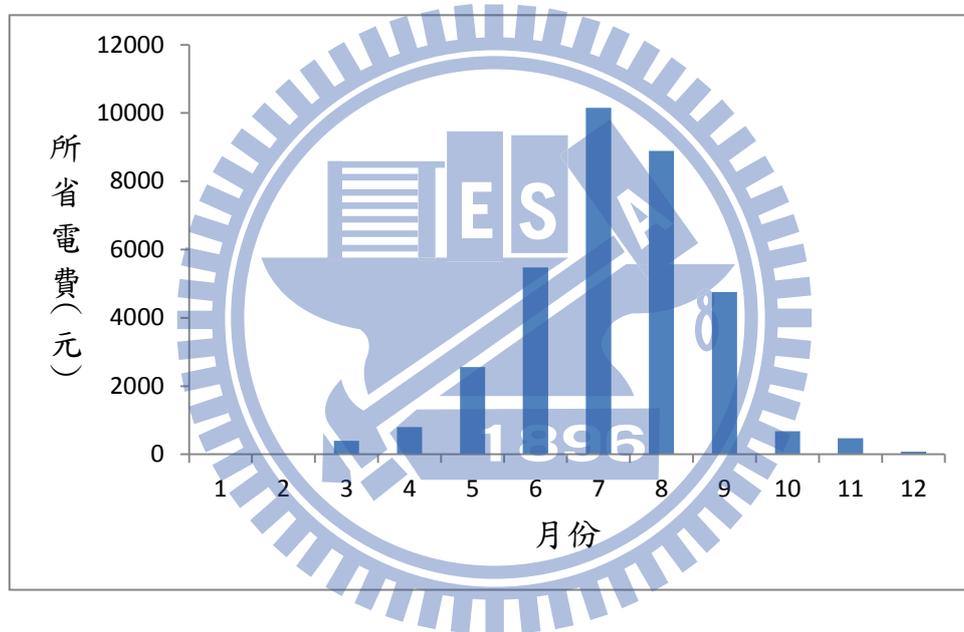


圖 4.24 案例 C 1D-HF 法各月份所省電費

案例 C 亦以 Energy Plus 模擬，如圖 4.24 所示，以 Energy Plus 模擬結果，一年可節省 38665 元左右，其中以 7 月與 8 月最高，兩月單月所省電費大概在 7500 元/月左右，單位面積節能量為 65.53 元/ m²/年。

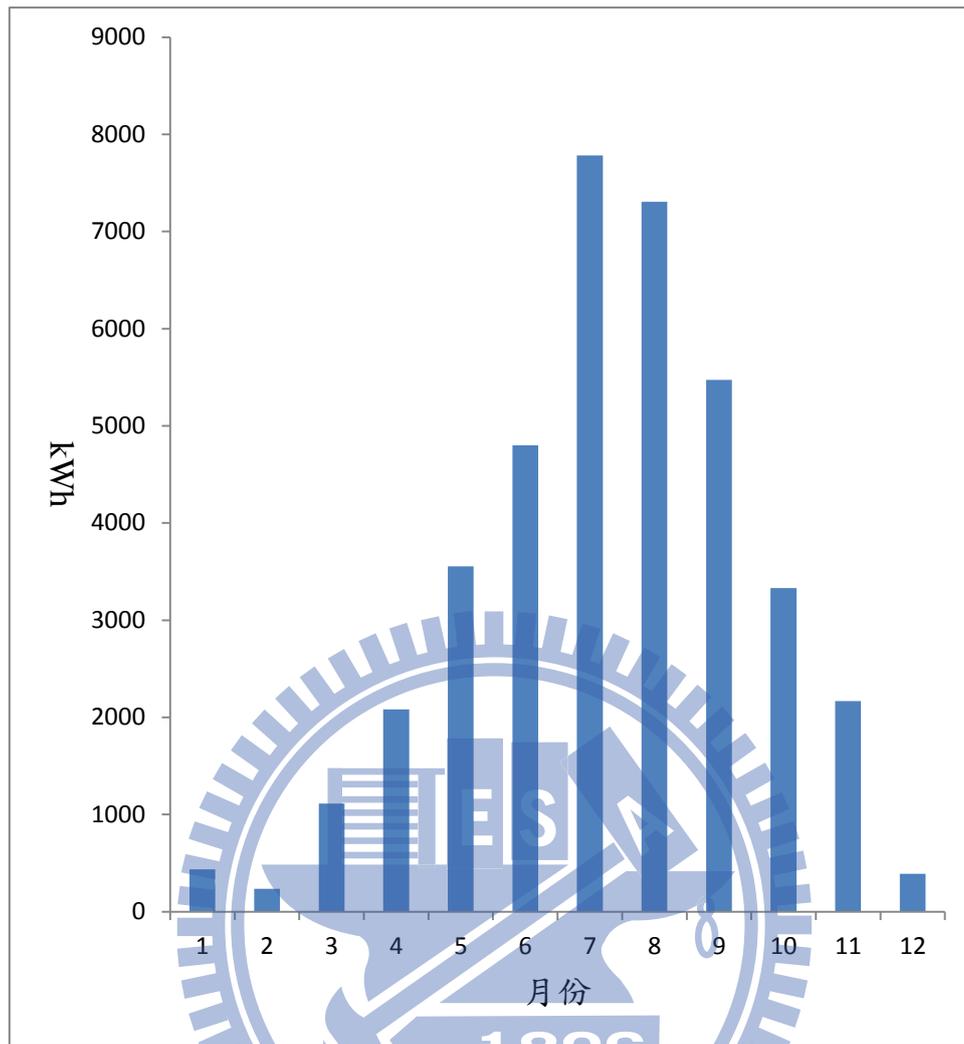


圖 4.25 案例 C Energy Plus 模式模擬各月所省電費

案例 C 減碳效益主要分為綠屋頂節能、植物減碳量及生命週期下與一般屋頂比較下的減碳量，在節能與植物減碳部份的經濟效益採用蕭(民國 98 年)所提出 750 元/ton CO_{2e}，分別為 1D-HF 法 11.06 元/ m²/年與 Energy Plus 12.08 元/ m²/年，生命週期評估所估算之減碳量的經濟效益則約為 1.27 元/ m²/年至 4.32 元/ m²/年間。

成本部份與案例 A 相同，綠屋頂含一般屋頂成本為 220.01 至 245.51 元、一般屋頂成本部份分別為 190 元、146 元與 115 元，配合節能效益、減碳效益，減碳部份包括節能、植物與生命週期評估的減碳量，案例 C 綠屋頂成本效益在綠屋頂不必更新植被的情況下，成本效益在一般屋頂壽命

10 年、15 年及 20 年下情況下且依 1D-HF 及 Energy Plus 所得結果分別為 43.48 與 51.92 元/ m²/年、-2.04 與 6.4 元/ m²/年及-34.57 與-26.13 元/ m²/年，若假設綠屋頂 15 年需更新植被，則在一般屋頂壽命 10 年、15 年及 20 年下成本效益分別為 17.97 與 26.42 元/ m²/年、-27.54 與-19.1 元/ m²/年及-60.07 至-51.63 元/ m²/年。

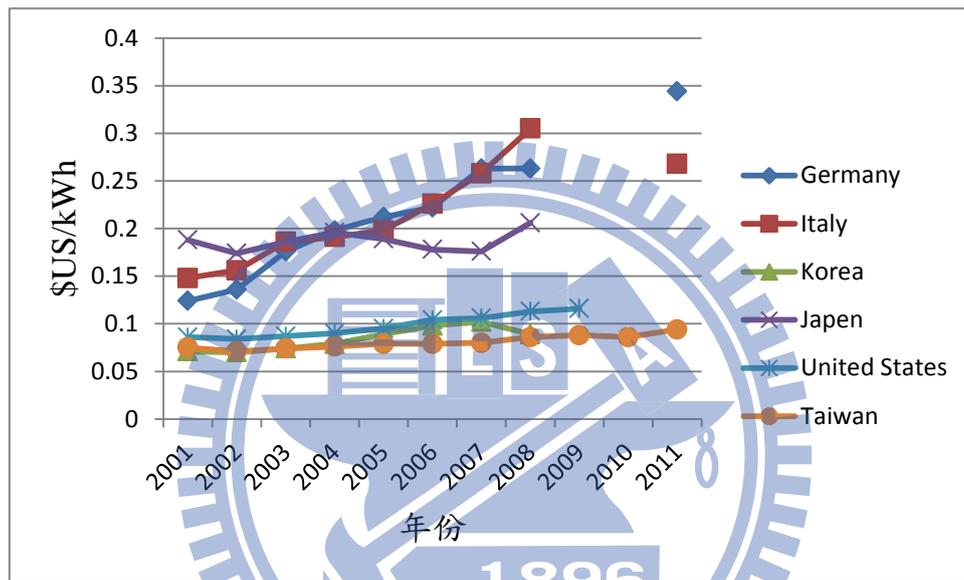
表 4.22 案例 C 綠屋頂成本效益

單位：元/m²/年

	電費節約 (EP)	節能減碳 (CC)	植物減碳 (CP)	一般屋頂 (RC)		LCA	差異值 ²
				壽 命	成 本		
1D-HF	58.11	8.25	0.5	10	190	4.32	43.48/17.97
				15	146	2.80	-2.04/-27.54
				20	115	1.27	-34.57/-60.07
Energy Plus	65.53	9.27	0.5	10	190	4.32	51.92/26.42
				15	146	2.80	6.4/-19.1
				20	115	1.27	-26.13/-51.63

² 案例 C 差異值基本上同表 4.13，唯綠屋頂部份亦納入以 Simapro 所估算之減碳效益。

案例 A、B 與 C 在綠屋頂不更新植被的情況下，每單位綠屋頂成本效益除一般屋頂防水層使用壽命為 20 年外，每年有 6.4 至 58.07 元/m²/年的效益，但在使用壽命為 20 年的情況下，案例 A、B 與 C 綠屋頂成本效益為負。而在綠屋頂 15 年更新植被情況下，則只有在一般屋頂防水層使用壽命在 10 年時，有 17.97 至 29.44 元/m²/年的效益，其它在使用壽命 15 至 20 年成本效益皆為負。



資料來源：EIA (2010)

圖 4.26 各國電價趨勢

綠屋頂成本效益在一般屋頂壽命為 15 年以下才具有經濟效益，原因為我國電價較國外低，由圖 4.25 所示，可看出我國電價遠低於德國與義大利等歐洲國家，且綠屋頂主要效益來自於節能所產生之電費節省，故在現行電價下，綠屋頂成本效益在一般屋頂使用壽命在 15 年以上尚無經濟誘因，唯近期改公佈將提高電價，預期綠屋頂的成本效益會提高。

第五章 結論與建議

本研究評估臺灣地區建置薄層式綠屋頂之節能效益、生命週期評估與成本效益，並與傳統屋頂作比較，以探討在臺灣建築物建置綠屋頂之可能效益。以下為本研究的重要成果與結論，並建議可能的研究方向及問題以供後續研究參考。

5.1 結論

本研究主要成果分為綠屋頂 U-value、節能效益評估、減碳效益、生命週期評估與成本效益評估等部份，以下依序一一說明之。

1. 綠屋頂 U-value：本研究依據 Baker (2011)所說明 U-value 測量方法於大溪高中在晴天下實地連續 10 日分區測量綠屋頂 U-value，且取植物生長情形良好的兩區綠屋頂的平值均平均，U-value 值大約在 0.42 左右。
2. 節能效益評估：本研究採用採用 1D-HF(Clark *et al.*, 2008)與 Energy Plus(USDOE, 2012)兩方法評估綠屋頂節能效益，成果如下：
 - (1) 1D-HF 法：此評估法主要是依據 U-value 與室外溫度高於攝氏 26 度的溫度差進行評估，案例 A、B 與 C 單位綠屋頂年節能量為 7376kWh、6380 kWh 與 7000kWh，單位面積節能量則在 12 至 15 kWh/m² 間，以案例 A 最高，主要是因為新竹在溫度超過 26 度的時間較臺北高且一般屋頂與綠屋頂 U-value 差較大；其次是案例 B，主要是因為案例 B 為密集式綠屋頂，綠屋頂 U-value 值較低，案例 C 則是因為原一般屋頂 U-value 已較案例 A 與 B 低，一般屋頂與綠屋頂 U-value 差較小，故單位節能量較案例 A 與 B 低。此部分未考量綠屋頂在冬天的保溫效益。

- (2) Energy Plus 法：在模擬三案例年耗電量變化得三案例綠屋頂節能效率在 14 至 16 kWh/m²，由於 Energy Plus 除考慮溫度外亦考其它部份如燈具、電器與人員等所產生熱能，故節能效益較 1D-HF 法的結果大。
3. 減碳效益評估：本研究依上述兩方法配合電廠碳排放係數、植被碳吸收能力與生命週期評估計算減碳效益，三案例依 1D-HF 法結果計算，結果綠屋頂減碳效益在 6600 至 9800 kg CO_{2e}/年，單位面積減碳量為 11.18 至 16.61 kg CO_{2e}/m²yr，若以 Energy Plus 法結果則是 7000 至 10600 kg CO_{2e}/年，單位面積減碳量為 11.86 至 17.96 kg CO_{2e}/m²yr，因減碳效益估算方法主要是以綠屋頂節能效益為依據，由於兩方法節能效益結果不同，故有所差異。
4. 生命週期評估：本研究以 Simapro (Goedkoop, 2008) 進行生命週期評估，且將節能效益亦納入評估，案例 C 及 D 在一般屋頂壽命 20 年情況下，以 CML 2 法(Humbert *et al.*, 2005)，各項環境衝擊減量大約在 40 至 49% 左右，若一般屋頂壽命在 15 年與 10 年情況下，各項環境衝擊減量則大約在 59 至 65% 與 69 至 74% 左右。若以 Impact 2002+法(Humbert *et al.*, 2005)，單一級分結果在一般屋頂壽命 20 年、15 年及 10 年情況下分別減少 50%、66% 與 75% 左右，單就節能所產生之環境效益以人類、水體與海洋毒性有較高效益，此三面向環境衝擊減量分別為 36000、40000、 8.1×10^7 kg 1,4-DB_{eq} 單位面積效益為 61 kg 1,4-DB_{eq}/年、65 kg 1,4-DB_{eq}/年與 137288 kg 1,4-DB_{eq}/年。
5. 成本效益評估：本研究收集一般屋頂與綠屋頂成本資料，包括初設、維護、更新等部份，由於文獻指出綠屋頂可延長一般屋頂數倍至 40-50 年間(Peuportier, 2001)，故本研究以 40 年為期間，且假設折現率為 4.25%

進行估算，一般屋頂在壽命為 20 年、15 年與 10 年年均成本分別為 115 元、146 元與 190 元/m²/年；綠屋頂含一般屋頂且假設則不需更換植被情況下為 220 元/m²/年，但若假設每 15 年須更換植被情況下則提高為 245.5(注意有效位數,取 1 位即可)元/m²/年。三案例在計算節能經濟效益 60 至 80 元/m²/年與減碳效益 10 至 15 元/m²/年兩部份配合綠屋頂與一般屋頂成本差異總合，在一般屋頂壽命 20 年情況下不具經濟效益，這主要是因國內電價偏低；一般屋頂壽命 15 年且假設綠屋頂植被不更換的情況下有 5 至 14 元/m²/年經濟效益，一般屋頂壽命 10 年情況下則是有 20 至 60 元/m²/年經濟效益。

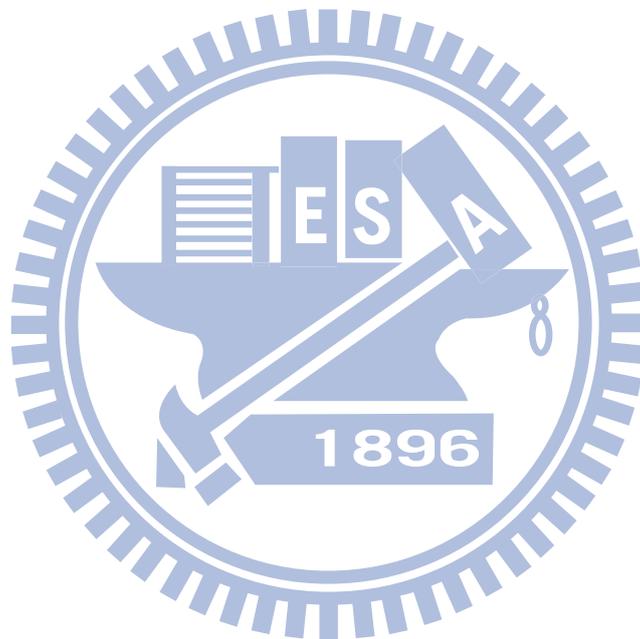
5.2 建議

本研究依研究過程的發現及經驗，提出下列幾項建議，以供後續研究參考：

1. 不同植物與覆蓋率的 U-value 實驗：實地實驗所測量結果僅為單一 U-value 值，無不同植物的之 U-value，宜量測不同植物與覆蓋率對 U-value 值的影響。
2. 不同電價下的節能經濟效益評估：由於國內電價偏低，導致綠屋頂的節能經濟效益亦因而偏低，宜分析不同電價下的影響。
3. 本土化生命週期評估：本研究因為國內資料收集困難，故使用國外資料庫，有必要建立或收集本土數據，以國內資料為主，以符合國內現況。
4. 更完整的成本效益評估：本研究以節能效益與減碳效益轉換經濟效益作為綠屋頂主要經濟效益來原，然綠屋頂亦有其它效益，例如截水、減少空污、降低噪音、減緩熱島效益、增加都市綠覆率及提供生物棲息等效益，可考量納入這些效益，發展出更完整評估方法。亦可考量分析不同

情況下的回收年限。

5. 不同情境的生命週期成本分析與效益評估：比較綠屋頂及一般屋頂的差異，會由於假設不同而有不同的結果，可考量進一步依不同情境，作更完整的分析。



參考文獻

內政部營建署，(98 年)，「學校類大型空間類及其他類建築物節約能源設計技術規範」，中華民國建築協會，台北。

內政部營建署，(98 年)，「辦公廳類建築物節約能源設計技術規範」，中華民國建築協會，台北。

交大營繕組，(100 年)，國立交通大學營繕組 (訪價)。

竹軒園公司，(100 年)，竹軒園景觀工程設計公司(市場訪價)。

林志成建築事務所，(100 年)，林志成建築師事務所 (訪查)。

林佩均，(100 年)，「不同屋頂綠化型式對屋頂隔熱效果影響之研究 - 以草本、灌木及棚架為例」，朝陽科技大學建築及都市設計研究所碩士論文，臺中。

林憲德、黃國倉，(94 年)，「台灣 TMY2 標準氣象年之研究與應用」，建築學報，第 53 期，79-94 頁。

陳佩好，(99 年)，「爬藤植物綠化對於建築物降溫效果之研究」，國立臺灣大學土木工程學系碩士論文，臺北。

劉安平，(98 年)，「屋頂植草覆土層熱效應之研究」，國立高雄大學都市發與建築研究所碩士論文，高雄。

蕭代基教授研究群，(98 年)，「綠色稅制改革之研究」，行政院賦稅改革委員會研究報告。

謝維芳，(94 年)，「不同植栽對於建築物隔熱效果影響之研究」，國立中興大學園藝系碩士論文，臺中。

寶銳公司，(100 年)，寶銳企業有限公司(直接詢價 Tel：(06)2676318)，
<http://www.greenroof.com.tw/> (accessed on 2012/01/11)。

蘇梓靖，(98 年)，「住宅耗能標示制度之研究」，國立成功大學建築學系碩士論文，臺南。

Baker, P. (2011). *U-values and traditional buildings*. Glasgow Caledonian University, U.K.

Berkelet Lab. (2011). *Engineering Reference*. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, USA.

Berkelet Lab. (2011). *Getting Started with Energy Plus*. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, USA.

Berkelet Lab. (2011). *Input&Output Reference*. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, USA.

Blackhurst, M., Hendrickson, C., Dist, M., and Matthews, H.S. (2010).
“Cost-Effectiveness of Green Roofs.” *Journal of Architectural Engineering*, 16, pp. 136-143.

Carter, T. and Keeler, A. (2008). “Life-cycle cost–benefit analysis of extensive vegetated roof systems.” *Journal of Environmental Management*, 87, pp. 350–363.

- Clark, C., Adriaens, P., and Brian, F.T. (2008). "Green Roof Valuation : A Probabilistic Economic Analysis of Environmental Benefits." *Environmental Science Technology*, 42, pp. 2155-2161.
- Barrio, P.E. (1998). "Anyalysis of the Green Roofs Cooling Potential in buildings." *Energy and Buildings*, 27,pp. 179-193
- Deutsch, B., Whitlow, H., Sullivan, M., and Savineau A. (2002). *RE-GREENING WASHINGTON, DC: A Green Roof,Vision Based on Quantifying Storm Water and Air Quality Benefits*. Casey Trees Endowment Fund, U.S.A.
- He, H., and Jim, C.Y. (2010). "Simulation of thermodynamic transmission in green roof ecosystem." *Ecological Modeling*, 221, pp. 2949-2958.
- Hilten, R.N. (2005). *An analysis of the energetic and stormwater mediation potential of green roofs*. The graduate faculty of The University of Georgia, Athens, Georgia, USA.
- Kosareo, L. and Ries, R. (2007). "Comparative environmental life cycle assessment of green roofs." *Building and Environment*, 42, pp. 2606–2613.
- Lui, S.T.E. (2008). *Life Cycle Assessment of Green Roof Systems in Hong Kong*. Master dissertation, The University of Hong Kong, Hong Kong.
- Marion, W. and Urban, K. (1995). *User's manual for TMY2*. National Renewable Energy Laboratory, U.S.A..

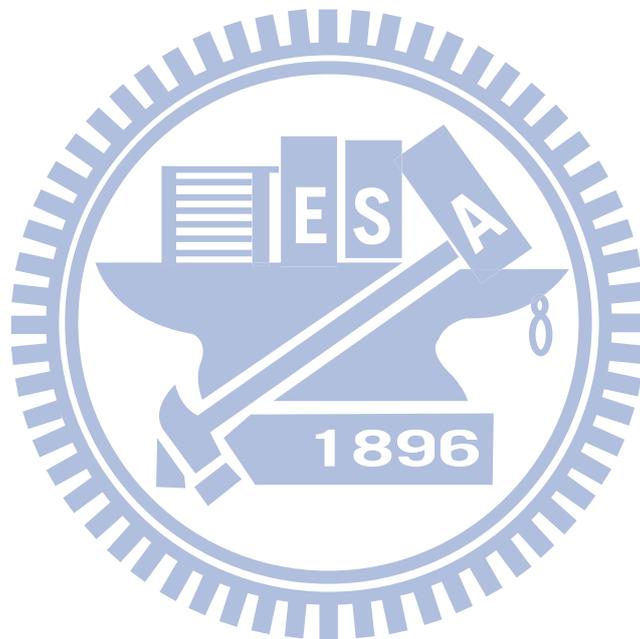
- Niachou , A., Papakonstantinou,K., Santamouris, M., Tsangrassoulis, A. and Mihalakakou, G. (2001). “Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance.” *Energy and Buildings*, 33, pp. 719-729.
- Niu, H.,Clark, C.,Zhou, H., and Adriaens, P. (2010). “Scaling of Economic Benefits from Green Roof Implementation in Washington, DC.” *Environmental Science Technology*, 44, pp. 4302–4308.
- Peuportier, B.L.P. (2001). “Life cycle assessment applied to the comparative evaluation of single family houses in the French context.” *Energy and Buildings*, 33, pp. 443-450.
- Sailor, D.J. (2008). “ A green roof model for building energy simulation programs,2003.” *Energy and Buildings*, 40, pp. 1466-1478.
- Saiz, S., Kennedy, C., Bass, B., and Pressnail, K. (2006). “ Comparative Life Cycle Assessment of Standard and Green Roofs.” *Environmental Science Technology*, 40, pp. 4312-4316.
- 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*, 33, pp. 173-177.

USDOE (2012). Energy Plus Energy Simulation Software.
<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/> (assessed on 2012/5/10).

U-Value Calculator according to BS EN ISO 6946 2007

<http://www.changeplan.co.uk/uvalue.htm> (accessed on 2012/05/11)

Wong, N.H., Tay, S.F., Wong, R., Ong, C.L., and Sia, A. (2003). "Life cycle cost analysis of rooftop gardens in Singapore." *Building and Environment*, 38, pp. 499-509.



附錄 A 以熱通量計與熱像儀測量綠屋頂 U-value

附 A.1. 以熱通量計測量 U-value

實驗目的：以熱通量計及感溫線等測量綠屋頂之熱傳導係數。

所需儀器工具及用途：

- (1) 熱通量計 (Heat flux sensor)：用於測量綠屋頂之熱通量。
- (2) 感溫線 (Temperature probe)：用於測量溫度。
- (3) 資料收集器 (Datalog)：用於接收熱通量及感溫線資料。
- (4) 溫濕度計 (Thermo-Hygrometer)：用以比對懸空感溫線所測之溫度。

注意事項：

- (1) 在事前準備之預備試驗時發現室內空調會影響熱通量計測值變動。
- (2) 熱通量計需緊密貼於表面。
- (3) 熱通量計與感溫線連接線需與資料收集器固定良好，避免鬆脫。
- (4) 感溫線須以不織布或其他物品阻隔，避免太陽直射。
- (5) 熱通量計在固定時，需以膠帶雙十字固定，避免鬆脫。
- (6) 固定熱通量計時，不可以使用膠水或鑽孔，會對熱通量值產生影響。



事前準備工作：

(1) 熱通量計

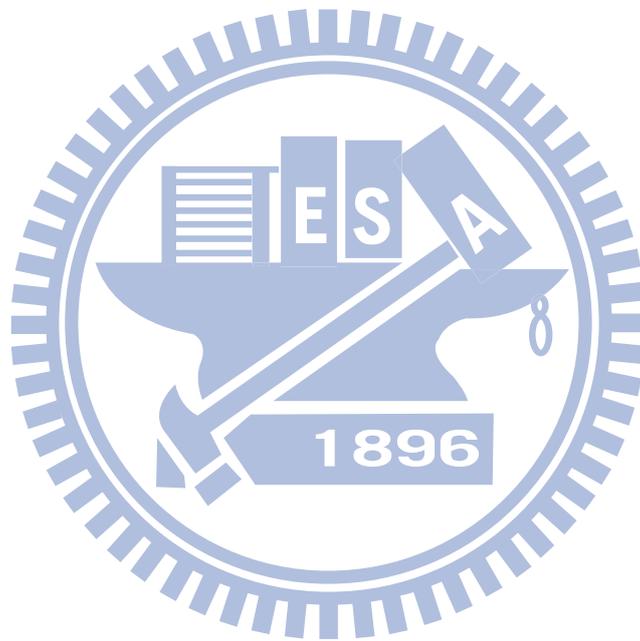
以已知 U-value 材料實測及比對熱通量儀器之準確性，且測試不同熱通量計所測結果之差異。步驟說明如下：

- A. 公式(附 1)部份之測試採用本研究室玻璃，收集室內與室外空氣溫，但因為室內空調影響，造成室內溫度與熱通量變化未成比例，故熱傳導係數變動頗大且不穩定。但未開空調時段，以兩公式測試同一物品熱傳導係數各時間點差距皆在 1 左右，但測值穩定，變動在 0.1 以內，推測公式(附 2)兩常數 $r_{int} + r_{ext}$ 所造成，將再探討如何設定合理的常數。
- B. 公式(附 2)部份本研究採用三夾板進行測試，三夾板為常見材料，依 U-Value Calculator(U-Value Calculator, 2011)配合木板厚度計算其熱傳導係數為 2.67，預備實驗進行一天共搜集 144 筆資料，扣除偏離值，偏離原因為資料收集器未收到數據致產生-7999 的值。後計算三夾板熱傳導係數為 2.7，與前值相近，誤差在 1.2%以內，尚在可接受範圍。
- C. 將六個熱通量計置於同一木板放置於室內測量熱通量計精確度是否有差異，進行三天共收集 432 筆資料，除一熱通量計因聯接線未固定好造成數據反轉偏離群體外，其餘 5 具熱通量變化曲線相同。

(2) 感溫線

- A. 將兩感溫線共同測試室外溫度，一置於陰影下，一直曝日光，結果顯示，直曝日光會造成數值變動不穩，推測為感溫線為金屬材質，故直射造成溫度異常升高。
- B. 比對感溫線與溫濕度計，結果發現約有攝氏 0.3 度左右之差距，感

溫線所測數值較高。



實驗程序與步驟：

公式(附 1)之測量步驟如下：

- (1) 有關於溫度測量部份，本研究擬使用感溫線與溫濕度計收集室內外溫度資訊，室內外各配置兩條懸空感溫線，唯設置於屋頂之感溫線需加隔熱設備，本研究使用自製木干與珍珠板加以遮蔽，注意遮蓋主要是避免陽光直射，仍應避免將感溫線包住，以免數據並不具代表性。
- (2) 將熱通量計安裝於綠屋頂及無綠屋頂對照組的下方室內，綠屋頂及一般屋頂下方天花板均各置 3 具熱通量計，綠屋頂下方配置位置為兩塊較高植物覆蓋度與一塊覆蓋度較低之綠屋頂下方，一般屋頂位置則與綠屋頂相對位置相應，配合資訊接收器，收集其熱通量資訊。
- (3) 資料收集器記錄頻率為每 2 分鐘一次。

公式(附 2)之測量方法如下：

- (1) 利用感溫線收集天花板表面溫度與土表溫度資料，置於熱通量計旁，上表面與下表面各一條感溫線，並計算其內外溫差。
- (2) 熱通量計採用公式(附 1)之配置所測得的同樣數據。
- (3) 另收集兩點綠屋頂底層屋頂表面的溫度數據。
- (4) 資料收集器記錄頻率同上。

資料分析方法及程序：

- (1) 資料收集器所收集資料格式為逗點分隔之.dat 檔，包括日期時間、預設之 32 點溫度、6 點熱通量值，因格式位置固定，且只有一個檔案，故已用 Excel 輸入一表格，事後直接將收集之資料黏貼上去即可算出各點熱傳導係數變化情形與圖表。
- (2) 所收集的資料將採用以下公式 3.1 與 3.2 計算 U-values：

附 A.2. 以熱像儀測量 U-value

實驗目的：以熱像儀收集綠屋頂表面溫度數據。

所需儀器工具及用途：

- (1) 紅外線熱像儀 (Termocamera)：主要用於拍攝之綠屋頂表面溫度。
- (2) 珍珠板尺：利用珍珠表面塗料金屬漆，表面放射率降低，使紅外線顯示明顯低溫，由於熱像儀無法把整個實驗區域拍入，故採用此尺為兩張紅外線照片合併時標示分隔用，作為接圖之依據。



熱像儀

珍珠板尺

事前準備工作：

- (1) 利用熱像儀拍攝同一物品，其距離為 5 公尺與 11 公尺，測量兩溫度，其結果顯示誤差在 2% 以內。
- (2) 利用感溫線測量同一物品，比對熱像儀所收集之溫度是否相同，測試方式為利用感溫線量測玻璃表面溫度，並將熱像儀放射率改為玻璃，調整適當距離，測量兩次結果感溫線 23.8 度、23.8 度，熱像儀為 24.1 度、24.2 度，熱像儀約高 0.3-0.4 度。

注意事項：

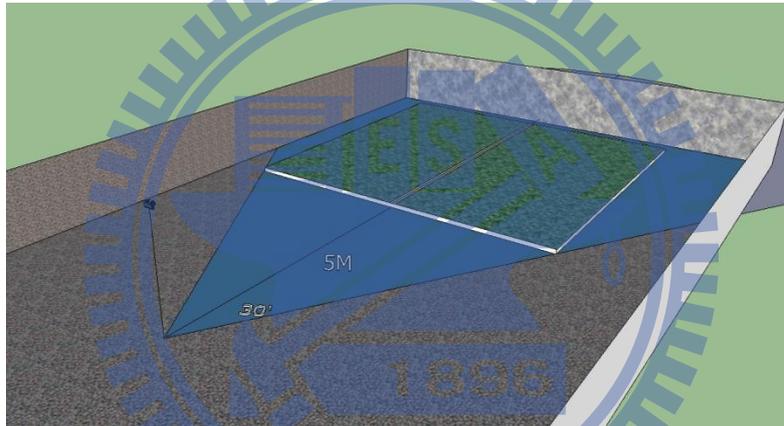
- (1) 熱像儀需用角架固定於定點，但熱像儀要用時才架上去，以免因風吹倒

損壞。

- (2) 標示用之珍珠板條亦需固定。
- (3) 拍照時畫面側邊需與珍珠板條對齊。

實驗程序與步驟：

- (1) 以角架固定紅外線熱像儀，每日 10 點至 4 點每 15 分鐘拍攝一次。
- (2) 置於下圖位置以斜拍方式截取圖片，並利用自製之珍珠板尺作為標示，分別拍攝左右兩半部綠屋頂。
- (3) 一般屋頂部份亦採用相同方式量測。



資料分析方法及程序：

- (1) 利用 FLIR 公司所提供之軟體，配合自製珍珠尺板標示，進行數據的截取與圖片合併。
- (2) 以熱像儀所得數據取代感溫線之數據，並以公式 3.2 計算 U-values。