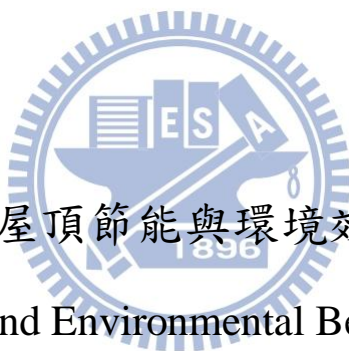


國立交通大學

工學院永續環境科技學程

碩士論文



企業綠屋頂節能與環境效益評估

Energy Saving and Environmental Benefit Assessment
for Corporate Green Roof

研究生：周政隆

指導教授：高正忠教授

中華民國一百零二年六月

企業綠屋頂節能與環境效益評估

Energy Saving and Environmental Benefit Assessment for Corporate Green Roof

研 究 生：周 政 隆

Student : Cheng-Lung Chou

指導教授：高 正 忠

Advisor : Jehng-Jung Kao

國 立 交 通 大 學

工學院永續環境科技學程



Submitted to Degree Program of Environmental Technology for Sustainability

College of Engineering

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Science

In

Environmental Technology for Sustainability

June 2013

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國 一 百 零 二 年 六 月

國立交通大學工學院永續環境科技學程

摘 要

由於綠屋頂具有隔熱降溫、減緩暴雨逕流等功能，而企業在展現社會責任、節能減碳與環境美化上，建構綠屋頂是適切且容易著力的方向，因而國外企業已積極推廣綠屋頂(Cooperate Green Roof, CGR)。然而針對 CGR 的效益，目前國內並無適當的方法可用以評估 CGR 效益，本研究因而以 CGR 較顯著之節能及環境效益為主軸，建立一套方法評估 CGR 在隔熱降溫上對節能的助益，以及環境上對降低溫室氣體排放及截水之效益。

節能評估主要採用 eQUEST 軟體模擬以及熱傳導係數法估算 CGR 建置前後的能源消耗差異，亦考量不同 CGR 型式，包括介質厚度、植栽特性等環境狀況及熱阻等對 CGR 隔熱降溫節能效益的影響。環境效益則主要包括溫室氣體減量及截水，溫室氣體減量主要包括二部分，一部分是由於節能所造成，另一部分是由於植栽吸收及固定二氧化碳的能力，前者依所減少電力的排放係數來推估，後者則以可能種植的植物吸收及固定二氧化碳的係數來推估。而降低降雨逕流的截水效益則以其他研究所建立的截水公式推估。且將分別參考碳稅及國外都市逕流收費費率，探討這些 CGR 效益可展現的成本效益。

本研究針對企業辦公大樓就薄層型及密集型 CGR 進行研究，依所建立方法估算之單位成本分別為 212 及 301 NT\$/m²-yr，而 10、15 及 20 年三種不同更新年限之傳統屋頂的單位成本分別為 241、182、134 NT\$/m²-yr，密集型 CGR 因初設成本較高，年均成本亦較高，薄層型 CGR 雖然較 15 及 20 年更新年限之傳統型屋頂高，主要是因國內電價偏低及未考量綠屋頂其他效益，但已比 10 年更新年限低。本研究除了探討及示範所建議方法的可行性與實用性，亦期所得的結果可作為企業進行建置 CGR 相關決策分析時的重要參考依據。

關鍵字：企業綠屋頂、節能減碳、雨水截流、eQUEST、建築能耗模擬、溫室氣體減量、成本效益分析。

Energy Saving and Environmental Benefit Assessment for Corporate Green Roof

Student : Cheng-Lung Chou

Advisor : Jehng-Jung Kao

Degree program of Environmental Technology for Sustainability

College of Engineering

National Chiao Tung University

ABSTRACT

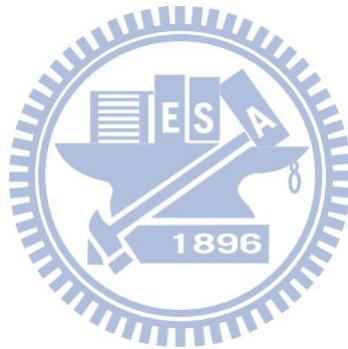
Green roof technology has the functions of roof insulation, room temperature decreasing, and rainwater runoff detention, corporate green roof (CGR) establishment is thus widely promoted in many countries and is regarded as an appropriate approach for demonstrating the corporate social responsibility in energy conservation, carbon-emission reduction and landscape aesthetics. However, the method for evaluating the cost-benefit of domestic CGRs is so far not available. This study was thus initiated to develop a cost-benefit analysis method to evaluate major benefits of CGRs including the heat reduction for energy saving, carbon-emission reduction and rainwater runoff detention for a local corporate building.

The eQUEST simulation program and thermal conductivity coefficient (U-value) method are applied to estimate the energy savings of CGRs, with consideration of different CGR type and thickness of soil medium. The environmental benefits of CGRs are mainly carbon-emission reduction and rainwater runoff detention. The carbon emission reduction is approximated based on the avoided emission from energy saving and the amount of carbon sequestered by CGRs. The rainwater detention of CGRs is calculated by an experimental equation. The benefits are estimated based on the local electricity fee, a suggested carbon tax, and a stormwater charge.

A case study for a corporate office building was implemented for both extensive and intensive CGRs. The proposed benefit-cost analysis method was applied to estimate the potential benefits and costs of CGRs, and compared with the conventional roof with a life span of 10, 15, or 20 years. The annual costs for extensive and intensive CGRs are 212

and 301 NT\$/m²-yr, while the costs for the conventional roof for different life spans are 241, 182, and 134 NT\$/m²-yr, respectively. The results show that the intensive CGR is not cost effective due to its high initial installation cost. Although the extensive CGR is more expensive than the conventional roof with a life span of 15 or 20 years, it is superior to the latter with a life span of 10 years. The CGR will be more cost effective if the electricity rate increases and other benefits such as heat island mitigation are also considered. This study has demonstrated the applicability of the proposed CGR cost-benefit analysis method, and the results are expected to facilitate related decision-making analyses for a company to install CGRs.

Keywords: corporate green roof, energy saving, carbon emission reduction, runoff detention, eQUEST, cost-benefit analysis.



致謝

首先感謝指導教授高正忠老師，對於學生在這段再職碩班求學期間的指導及諄諄教誨，尤其在工作及學業上難免無法兼顧的情況下，您的體諒及不厭其煩的教導，支持及鼓勵學生勉力的完成論文，對此深表誠摯的感激與謝意。也非常感謝陳鶴文老師、陳維燁老師及潘子欽博士於百忙之中抽空來評審學生的論文，並於口試時給予寶貴的指導意見，使本論文更加完整及嚴謹，特此表示由衷的感謝。

感謝實驗室的學長姐宥禔、彥宏、科智等幫助，除了指正論文撰寫上的盲點，並提供文獻相關的資訊及著力方向，使學生在研究的過程更加順利；並感謝同屆同學儼輝、瑞珠的加油打氣及經驗的傳承；感謝學妹佩樺、廷涵在論文口試過程及相關事務的幫忙；感謝所辦戰小姐在行政事務上的協助。

另外，在研究期間資料的查詢上亦得到許多人的協助，感謝飈洪中心「大氣研究資料庫」所提供新竹測站之外氣資料，冠呈公司陳相輪博士在建築能源模擬上之技術協助，公司同仁敏政提供相關之綠化及植栽經驗，建築師趙熙雍先生講解屋頂設計之重點及考量，以及所有提供材料、施工、成本資料的廠商，感謝以上諸位的幫忙與指導，使本論文的內容及資訊更加充實。

最後，要感謝我親愛的家人，因為您們無悔的支持與鼓勵，讓我在漫長的求知過程中，面對各種困難與挑戰得以堅持下去，僅將此論文獻給您們。

周政隆 謹誌於交大

民國一百零二年六月

目錄

中文摘要	i
英文摘要	ii
致謝	iv
目錄	v
表目錄	viii
圖目錄	x
符號說明	xi
第一章 前言	1
1.1 研究緣起	1
1.2 研究目的	4
1.3 論文內容	5
第二章 文獻回顧	6
2.1 綠屋頂及分類	6
2.1.1 綠屋頂	6
2.1.2 綠屋頂分類	7
2.2 國內外綠屋頂發展	9
2.2.1 國外綠屋頂發展	9
2.2.2 國內綠屋頂發展	9
2.2.3 企業綠屋頂發展	10
2.3 企業綠屋頂效益	11
2.4 綠屋頂節能減碳效益	13
2.4.1 節能效益	13
2.4.2 溫室氣體減量效益	14
2.5 綠屋頂環境效益：截水效益	15

2.6 綠屋頂成本效益	17
第三章 研究流程與方法	20
3.1 研究流程.....	20
3.2. 綠屋頂分類.....	23
3.3 CGR 效益	24
3.3.1 節能效益	24
3.3.1.1 能源模擬模式	25
3.3.1.2 熱傳導係數法	25
3.3.1.3 能源轉換係數	27
3.3.2 溫室氣體減量效益.....	28
3.3.2.1 節能減少之碳排放量.....	28
3.3.2.2 植栽吸收及固定二氧化碳.....	29
3.3.3 截水效益	31
3.3.3.1 區域年降雨量說明.....	31
3.3.3.2 綠屋頂截水推估公式.....	32
3.4 傳統屋頂與綠屋頂成本	32
3.5 企業綠屋頂成本效益分析	35
第四章 案例研討.....	39
4.1 案例介紹.....	39
4.2 節能效益.....	41
4.2.1 能源模擬模式	41
4.2.2 熱傳導係數法	50
4.2.3 節能效益說明	55
4.3 溫室氣體減量效益	58
4.3.1 節能之減碳效益	58
4.3.2 植栽之減碳效益	59

4.3.3 減碳效益說明	59
4.4 截水效益.....	60
4.4.1 逐時雨量統計	60
4.4.2 截水量估算	61
4.5 綠屋頂經濟效益.....	63
4.5.1 節能經濟效益.....	63
4.5.2 減碳經濟效益.....	63
4.5.3 截水經濟效益.....	64
4.6 企業綠屋頂成本效益分析	65
4.6.1 傳統屋頂與綠屋頂之年均成本	65
4.6.2 綠屋頂成本效益	67
4.6.3 綠屋頂總計年均成本分析	68
4.6.4 參數不確定分析	69
第五章 結論與建議.....	80
5.1 結論.....	80
5.2 建議.....	84
參考文獻	86
附錄 A	93
附錄 B	96

表目錄

表 2.1	「密集型」與「薄層型」綠屋頂的比較表.....	8
表 2.2	傳統型屋頂與綠屋頂初設成本比較表	18
表 3.1	綠屋頂分類及特性	23
表 3.2	傳統屋頂及綠屋頂熱傳透率 U 值	27
表 3.3	我國歷年電力排放係數調整表	28
表 3.4	植栽單位面積二氧化碳吸收及固定量	29
表 3.5	植栽單位面積二氧化碳吸收及固定量	30
表 3.6	新竹區歷年平均年降雨量	31
表 3.7	傳統綠屋頂與綠屋頂之初設成本估算表	33
表 3.8	台灣電力公司二段式分時電價表	36
表 3.9	世界各國已開徵碳稅時程及價格	37
表 4.1	建築基本資訊 (Building Basic Information)	41
表 4.2	建築外牆及內裝資訊 (Building Envelop Information)	42
表 4.3	辦公大樓建築內部負載表 (Building Internal Load)	44
表 4.4	辦公大樓運作時程表(Operation Schedule)	44
表 4.5	空調主要設備規格表 (HVAC Equipment List)	45
表 4.6	傳統型屋頂及綠屋頂熱傳透率 U 值 (1).....	46
表 4.7	eQUEST 模擬估算之傳統型屋頂空調負載量	47
表 4.8	eQUEST 模擬傳統及綠屋頂之各月份熱傳量	49
表 4.9	eQUEST 模擬綠屋頂之各月份節能效益	50
表 4.10	氣象數據全年度總溫差數量差異	53
表 4.11	熱傳導係數法估算傳統及綠屋頂之節能效益	54
表 4.12	熱傳導係數法估算傳統及綠屋頂之各月份熱傳量	54
表 4.13	熱傳導係數法估算綠屋頂之各月份節能效益	55

表 4.14	eQUEST 及熱傳導係數法所估算節能效益比較表	56
表 4.15	傳導係數法之空調系統 COPs 值計算	57
表 4.16	eQUEST 及熱傳導係數法所估算之節能電量比較表	57
表 4.17	eQUEST 及熱傳導係數法所估算節能之減碳效益	58
表 4.18	綠屋頂估算之植栽減碳效益	59
表 4.19	綠屋頂估算之節能與植栽減碳效益比較表	60
表 4.20	101 年新竹測站逐時降雨資料各月份統計表	61
表 4.21	薄層及密集型綠屋頂截水效益估算表	62
表 4.22	綠屋頂節能經濟效益估算表	63
表 4.23	綠屋頂減碳經濟效益估算表	64
表 4.24	綠屋頂截水經濟效益估算表	65
表 4.25	傳統屋頂與綠屋頂之年均成本估算表	66
表 4.26	企業綠屋頂經濟效益分析估算表	67
表 4.27	傳統屋頂與綠屋頂總計年均成本估算表	68
表 4.28	傳統屋頂與綠屋頂成本效益分析表	69
表 4.29	通貨膨脹率 f 與不含通貨膨脹率之折現率 u 參數組合表 ...	70
表 4.30	f 值、 u 值參數組合與年均成本估算表	71
表 4.31	各國平均電價比較表	73
表 4.32	電價變化對綠屋頂總成本影響分析表	74
表 4.33	薄層型綠屋頂 U 值變化對總成本影響分析表	75
表 4.34	傳統型屋頂及綠屋頂熱傳透率 U 值(2)	76
表 4.35	傳統型屋頂 U 值變化對總成本影響分析表	77

圖目錄

圖 3.1	研究流程圖	22
圖 4.1	辦公大樓建築立面圖	40
圖 4.2	辦公大樓綠屋頂平面圖.....	40
圖 4.3	辦公室大樓三維的建築模型(東北面向).....	43
圖 4.4	辦公室大樓三維的建築模型 (西南面向)	43
圖 4.5	傳統型屋頂層空調負載比率.....	48
圖 4.6	eQUEST 模擬傳統及綠屋頂之各月份熱傳量	49
圖 4.7	eQUEST 模擬綠屋頂之各月份節能比率	50
圖 4.8	新竹測站各月平均氣溫及 25°C 之溫差	52
圖 4.9	新竹市各月的總溫差(ΔT)量.....	52
圖 4.10	熱傳導係數法估算綠屋頂之各月份節能比率	55
圖 4.11	u 值、f 值參數組合與年均成本關係圖(1).....	72
圖 4.12	u 值、f 值參數組合與年均成本關係圖(2).....	72
圖 4.13	電價變化對綠屋頂總成本影響之趨勢圖(1).....	74
圖 4.14	U 值變化對綠屋頂總成本影響之趨勢圖.....	78
圖 4.15	電價變化對綠屋頂總成本影響之趨勢圖(2).....	78

參數符號說明表

符號	說明	單位
A	屋頂或綠屋頂面積	m^2
A _i	植栽之栽種面積基準	m^2
C _{GRI}	綠屋頂的初設成本	NT\$/ m^2
C _{GR}	綠屋頂的年均成本	NT\$/ $\text{m}^2\text{-yr}$
C _{NR} ^Y	傳統屋頂壽命為 Y 年的年均成本	NT\$/ $\text{m}^2\text{-yr}$
C _{NRI}	傳統屋頂的初設成本	NT\$/ m^2
COP	空調設備性能系數	-
COP _S	空調系統性能系數	-
dx	第 x 層材料之厚度	m
ECO ₂	CGR 節能之溫室氣體減量值	kg eCO ₂ /yr
E _i	節省電力之溫室氣體排放係數	kg eCO ₂ /度
GCO ₂	屋頂植栽綠化之年總 CO ₂ 固定量	kg eCO ₂ /yr
Gi	植栽種類之單位面積 CO ₂ 固定量	kg eCO ₂ / $\text{m}^2\text{-yr}$
h _o	外表面的熱傳透率	W/($\text{m}^2\text{°K}$)
h _i	內表面的熱傳透率	W/($\text{m}^2\text{°K}$)
i	折現率	%
k _x	第 x 層材料之熱傳導係數	W/($\text{m}^2\text{°K}$)
P	降雨量	mm
Q	熱通量	W
Q _i	電力能源之減少量	度/yr

ra	中空層之熱阻	$(\text{m}^3 \text{ } ^\circ\text{K})/\text{W}$
R	熱阻值	$(\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{K})/\text{W}$
S _D	綠屋頂土壤基質之厚度	mm
ΔSW_s	基質截水深度	m
ΔSW_d	排水板截水深度	m
Δt	降雨延時	time
T _i	室內溫度	$^\circ\text{C}$
T _o	外氣溫度	$^\circ\text{C}$
u	不含通貨膨脹的折現率	%
U	熱傳透率	$\text{W}/(\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{K})$
θ_f	最終含水率	%
θ_i	初始含水率	%
θ_s	飽和含水率	%

第一章 前言

1.1 研究緣起

台灣由於都市人口集中，且建築物多為人工水泥鋪面，其吸熱及高度不透水特性，不僅導致建築物蓄熱及空調負荷增加，建築物、空調設備之排熱，更形成都市熱島效應；此外，不透水鋪面使得土壤的保水性喪失，造成暴雨時之洪峰流量提高，因而增加都市淹水災害發生的機率（陳, 98 年）。綠屋頂由於可提高建築物綠地覆蓋率，增加生態綠化及生物棲息地、延長建築物頂使用壽命（Porsche and Kohler, 2003）及降低維護成本，ARCADIS（2004）指出綠屋頂利用植栽及覆土層的隔熱、反射及蒸發潛熱作用，可降低屋頂的表面溫差高達 50% 及室內溫度 4~6°F；綠屋頂亦可以截留雨水（Battie and Berghage, 2004），降低雨水逕流量，基於這些好處，加上台灣氣候適合植物生長，綠屋頂因而頗適合在台灣推廣，以彌補綠地不足及降低熱島效應，政府及民間單位亦因而正積極推動綠屋頂中（錫瑠環境綠化基金會, 96 年），若能再進一步推廣綠屋頂至企業，相信效益會更好，唯目前國內企業甚少建置綠屋頂，相關研究亦很少，故本研究擬發展方法及工具協助分析國內企業建置綠屋頂的節能減碳、截水及成本效益，以輔助企業建置綠屋頂。

綠屋頂一般分為密集型（Intensive）、薄層型（Extensive）二種不同型式，密集型類似園藝型屋頂花園，土壤層的深度至少高於 15 公分，可種植灌木及較高喬木等植栽，可供休憩及賞景用途；薄層型屋頂土壤介質層大約在 5~15 公分，適合種植耐候型草類及景天類等低矮植物，澆灌及維護需求較低（Dunnett and Kingsbury, 2007）。由於密集型成本及維護均較高，故本研究主要針對較易推廣的薄層型綠屋頂進行研究。

對於企業而言，為提升企業社會責任及降低營運成本，國外企業已積極建置綠屋頂 (Corporate Green Roof, CGR)，如美國福特汽車位於密西根州的紅河卡車工廠、日本福岡的 ACROS Fukuoka 商業建築大樓等 (Earth Pledge, 2005)，充份運用綠屋頂的效能及功用，在展現社會責任、節能減碳與環境美化上，增進企業之環境永續性。雖然綠屋頂在國外已逐步受企業所重視，但目前仍無適當之方法或工具可供企業於 CGR 設置前，預先評估 CGR 之實質效益，因而較不易提高企業設置 CGR 之意願。雖然 CGR 的效益不少，唯本研究受限於人力時間，故主要以目前普遍受重視之節能減碳及減緩降雨逕流之截水效益為研究方向，然而如何評估這些效益仍有待研究，本研究因而建立一套方法評估 CGR 這三項效益。

綠屋頂隔熱節能效應在於屋頂結構物之隔熱，以及土壤與綠化植栽之遮閉與表面水份蒸發所引起「潛熱釋放」之冷卻效應 (謝, 94 年)，由於 CGR 可隔熱降低室內溫度減少空調耗能，因而具有節能效益，評估 CGR 降溫的研究主要可分為三種：(1) 建立熱傳模式推估 (Al-Sanea, 2002; 蘇, 98 年)；(2) 以建築物耗源模式推估 (DOE-2: Wong *et al*, 2002; eQUEST: Hirsch, 2003)；(3) 簡易的係數法，如採用 U-value 推估之熱傳導係數法 (Clark, 2008; 唐等, 2010)，由於第一類所建立的模式大多是針對特定綠屋頂或實驗場所建立，且不易取得模式及不見得適用於台灣的 CGR，故未採用，而第三類方法過於簡單，用於政策分析可能適用，但用於單一 CGR 可能誤差較大，故本研究主要採用第二類的方法，並與 U-value 所估算結果比較，第二類方法用於評估綠屋頂建築物耗能模式曾有 EnergyPlus

(Sailor, 2008)，ESP-r (Strachan, 2008)，本研究主要選擇在台灣已有應用經驗的類似模式 eQUEST (Hirsch, 2003)，eQUEST 是基於 DOE-2 模式所發展，亦提供友善的電腦使用介面，其亦經常用於建築物耗能、空調設

計，以及運用於綠建築日常節能之空調節能模擬計算，本研究主要以 eQUEST 模擬分析綠屋頂對建築節能的影響程度。

企業碳足跡已是國際上所重視的議題，亦是國內正研擬推動的環保政策，因而國內各企業亦積極重視減碳的績效，CGR 的減碳效益基本上來自於二部分，第一部分即是因節能省電所減少的溫室氣體排放，第二部分則為植栽之吸收與固定二氧化碳所造成。前者主要是因減少耗用市電，間接減少生產市電所排放的溫室氣體，一般採用排放係數來推估，本研究將採用電力公司所公佈的排放係數及 eQUEST 模擬、U-value 推估所得的節電量推估減碳效益。而後者主要依據植栽之吸收及固定二氧化碳的係數計算（朱，93 年；葉，101 年），求得綠屋頂植栽對溫室氣體減量的直接效益。

CGR 截水效益主要是透過植栽、土壤介質層及保水裝置來達到雨水截水及延長逕流之時間（Mentens *et al.*, 2005, Villarreal, 2006; Hilten *et al.*, 2008），其效果會受到受到降雨、土壤基質深度、植被、坡度等因子所影響（VanWoert *et al.*, 2005, Getter *et al.*, 2009, Wolf *et al.*, 2008,），唯國外實驗及數據與國內的特性略有不同，例如降雨強度、介質特性、及植栽種類等，本研究將以李（99 年）、廖（100 年）所建立的截水效益經驗公式估算截水量；以土壤基質厚度、飽合含水率、排水板蓄水深度為參數，依據集水區綠屋頂面積比例，推估綠屋頂之截水效益。

企業在追求永續發展上著重於環保與成本效益能相對平衡，在建築綠化改善及相關投資考量上，通常須重視其投入成本及回收效益，探討 CGR 成本效益有必要先分析其設置成本，綠屋頂初設成本主要包含防水層、排水板、土壤介質層、綠化植栽、以及施工運雜費等（Wong *et al.*, 2003b; Carter and Keller, 2008）；此項綠屋頂建置費用在國內因屬推廣階段，尚無較多經驗數據可以引用，概以國內既有台北市信義區公所、葉（101 年）研究

估價案例、以及本研究案例所得之估價成本，採用現有薄層型及密集型綠屋頂建置費用，作為後續估算及比較成本的依據。

另外，以生命週期（Life-cycle cost, LCC）探討 CGR 成本效益，綠屋頂最具經濟效益在於延長屋頂防水層壽命及更新週期、其次為節能減碳所降低之成本、再則是降低都市暴雨逕流相關之投資費用（Carter and Keeler, 2008）。綠屋頂防水層之更換期限；可從一般預估之 10~15 年延長到 25 年（Kosaere and Ries, 2007），而綠屋頂之隔熱降溫對節能效益的影響主要是電費之支出，溫室氣體減量則是切中未來碳稅抵減之議題，以節能所造成減少電力的排放係數來推估，加上植栽吸收及固定二氧化碳的對應之係數來估算減排之總量，參考碳稅（Carbon Tax）或國際碳價格成本，即可換算相關減量之成本。而降低降雨逕流的截水效益則以截水公式推估，且將參考國外都市逕流收費費率（Carter and Keeler, 2008），以合理推算其減量對應之成本。

CGR 之節能減碳及截水效益，目前並沒有一個具體的方法可供評估這些效益，故本研究將試著發展方法或工具，用以評估 CGR 成本及這些效益，並以一企業辦公大樓建築為案例，以驗證所發展方法的合理及適用性。

1.2 研究目的

本研究主要是建立一套 CGR 分析方法，用以評估企業發展 CGR 之節能減碳與截水效益，以期作為企業建置 CGR 預先評估 CGR 之成本與節能減碳及截水效益。主要研究目的有以下二項：

1. 發展一套方法評估 CGR 節能減碳與截水效益：由於國內企業對於綠屋頂設置仍屬於摸索階段，尚無一套可供評估其效益的方法，一般皆以其

功能面或成本為考量主軸，並無客觀的評估方式可供參考，藉由本研究所建立的評估工具，可讓企業在考量設置綠屋頂時有所遵循，並能具體運用在先期規劃作業上。

2. 建立 CGR 成本效益分析方法，以供作為企業建置 CGR 之重要依據：本研究依據較顯著之節能減碳與截水效益，建立適當之評估方法與工具分析這些效益的經濟價值，並與綠屋頂成本進行比較分析，所建立方法可供企業在建置前分析 CGR 的成本效益。

1.3 論文內容

第二章主要介紹及回顧國內外綠屋頂其發展與運用現況，並說明其分類及適用特性，以及探討企業在建構綠屋頂之各面向效益；第三章為研究流程與方法，主要說明本研究之研究流程，首先討論綠屋頂之分類，然後探討 CGR 之各項效益，並建立 CGR 在隔熱節能與環境溫室氣體減量及截水效益分析方法，最後依所建立方法分析 CGR 的成本效益；第四章以企業普遍建構之辦公大樓綠屋頂為案例進行評估，以探討其具體之節能與環境效益，並分析其成本效益；最後第五章說明本研究重要成果與結論及提供未來研究建議。

第二章 文獻回顧

本章主要是回顧及討論與本研究相關的文獻，除了探討過去已有的相關研究成果，並說明本研究的可行性及重要性。相關重要文獻主要可分為綠屋頂及分類、國內外綠屋頂發展現況、企業綠屋頂效益分析等主題，企業綠屋頂效益主要包含節能、減碳及截水效益等，以下各節一一討論各主題之相關文獻。

2.1 綠屋頂及分類

2.1.1 綠屋頂

在氣候變遷日趨劇烈的 21 世紀，全球大部分人口集中於都市區域，而水泥建築所塑造的都市叢林，以及人為毀壞之生態環境極須改善，綠屋頂是還原自然生態的一個補救方法。依香港雅邦（2007）之說明，綠屋頂（Green roof）亦被稱為生態屋頂（Eco-roof）、植栽屋頂（Vegetated roof）或自然屋頂（Nature roof）等，是一棟建物之屋頂全部或部份構建，覆蓋生長介質（土壤或輕質材料）以及綠化植物，其下還包含屋頂防水層、防止根部入侵的防根層板，以及排水及過濾層等。這些綠屋頂的基本功能必須涵括：1) 延長屋頂防水層的使用期限，2) 保護屋頂表面不受植物根部侵入，3) 維持屋頂適度排水及貯水功能，及 4) 容許植物生長及支持生態多樣性等。

錫瑠基金會（97 年）指出綠屋頂有建築隔熱降溫之節能效應，並可減緩暴雨逕流，其亦可淨化空氣及增加生物棲息地等益處，綠屋頂的綠化可提昇都市的環境品質，以及促進居住的舒適與健康。Oberndorferd *et al.*

（2008）亦指出綠屋頂可減少雨水逕流、調和較佳的建築溫度、降低熱島效應（Heat-island effects），以及增加都市中的野生棲地等，其他潛在

的好處還包括帶來綠色空間的舒適環境，提昇並改善空氣品質、增加建築隔音的能力、並有效延長屋頂隔熱以及防水層的使用壽命。石（98 年）則說明人類在都市及建築開發上造成綠地銳減，間接影響環境及自然的循環過程，而綠屋頂可於城市上空找回綠地，為對自然環境破壞後的一種彌補方式。蘇（98 年）點出綠屋頂的主要優點，包括舒適和美學、環境、經濟等面向的效益；且具有節省能源成本、延長屋頂壽命，降低暴雨逕流、調節都市氣候，增加生物多樣性和棲地、提供及改善建築美觀等優點，也促使國內外不少市政當局為獲得更好的城市景觀及環境品質，因而大力推動並獎勵民眾設置綠屋頂。國內地方政府包括台北市及高雄市亦都已開始重視綠屋頂，而國內部分企業亦已正設置中。

2.1.2 綠屋頂分類

綠屋頂的型式一般主要分為兩種類型，區分為「密集型」（Intensive green roof）與「薄層型」（Extensive green roof）。表 2.1 比較二種類型的綠屋頂，密集型指的是土壤基質較厚的屋頂花園，甚至是屋頂層設置之公園（Parks on rooftop），可以在其上種植樹木及增加景觀設施等，通常以園藝觀賞及空間活動為目的，由於土壤基質厚度足夠，因此在植物的選擇上較不受限，能種植較高大及多樣的庭園植物，唯設置與維護成本均較高且較重，須要作較好防水及承載設計。薄層型是目前較為流行的綠屋頂方式，其組成方式是較為輕薄的生長介質，因此在植物的選擇上較嚴苛，適用的植物必須具有耐旱、適應強風、積水的環境，可能是高山蘚苔、沙漠的多肉植物或本地草本植物，但維護成本較低，且易於維護（Peek, 2008）。

表 2.1 「密集型」與「薄層型」綠屋頂的比較表

項目	薄層(Extensive)型	密集(Intensive)型
特性	<ul style="list-style-type: none"> - 淺薄的生長介質 (50mm-150mm) - 極少或不需要灌溉 - 嚴苛的植物生長環境 - 植物的選擇強韌、低矮、具自生性的地被與草地 - 通常設施簡便或僅供維護使用 - 可在廣闊範圍內應用 - 目的為環境永續或美化屋頂層 	<ul style="list-style-type: none"> - 深厚的土壤層 (200mm-2000mm) - 需要適當的灌溉系統 - 良好的植物生長環境 - 適合喬木、灌木及多樣化植物種類 - 常設有景觀設施及步道 - 設於平緩屋頂 - 目的可能為主題式公園、屋頂花園或療癒庭園等
優點	<ul style="list-style-type: none"> - 維護管理成本較低 - 適用於面積廣闊的範圍 - 適用於翻新工程或老舊建物 - 適用於傾斜度為 0-30° 的屋頂 - 可以讓植物自行生長 - 重量輕，通常不需強化屋頂結構， - 建置成本較低廉 	<ul style="list-style-type: none"> - 通常具景觀視覺效果 - 可作多種用途:休憩或娛樂 - 植物和生態相容性佳 - 具有良好的隔熱效果 - 植物種類多，層次豐富，可提供多樣化的生物棲地
缺點	<ul style="list-style-type: none"> - 植物的選擇受限制 - 景觀或視覺吸引力較低 - 植栽多低矮且植物種類較單純 - 無法提供多層次與豐富棲息空間，故生態性較不足 	<ul style="list-style-type: none"> - 需要充分的灌溉及排水 - 設置及維護成本較高 - 通常不適用於綠化屋頂翻新工程 - 屋頂結構承載重量較大 - 所需的維護管理需求高 - 若有滲水問題時處理較困難

資料來源：香港雅邦（2007）；陳（98 年）

2.2 國內外綠屋頂發展

2.2.1 國外綠屋頂發展

Dunnett (2008) 介紹綠屋頂的背景及發展歷史，指出綠屋頂源自於公元前 600 年的巴比倫王朝，在幼發拉底河流域附近的宮殿上，建造了一座空中花園。近代綠屋頂出現於 1868 年在巴黎的世界博覽會，展出了充滿自然風味的綠化植栽的屋頂建築，這時有許多實驗型態的綠屋頂從西歐的區域往外開始發展，其中包含了 1903 年在巴黎的公寓樓房建造了綠色植栽的屋頂及露台；1914 年在芝加哥一個餐廳設計了屋頂花園；最著名的綠屋頂花園是在 1930 年代倫敦的 Department store Derry and Toms 百貨公司。

現代綠屋頂概念發展開始於 1970 年代，蘇（98 年）在綠屋頂的運用推廣上提及，德國開啟了全球綠屋頂的研究及應用，實施許多獎勵的措施並訂定相關法律，讓綠屋頂迅速推廣；其他國家亦相繼推廣，如加拿大多倫多亦發展了綠屋頂技術及效益評估、日本東京則著重於屋頂隔熱效應，並視為降低熱島效應的方法，美國芝加哥、波特蘭等地運用政策獎勵及實質的補助，將綠屋頂廣泛運用並落實有效的推廣措施。

2.2.2 國內綠屋頂發展

目前國內綠屋頂已逐漸起步，且已在不少城市開始推廣中，台北市、新北市、桃園市、新竹縣市、台南市、宜蘭縣等都已將綠屋頂納入建築綠覆面積中，高雄市更在建築自治條例草案中規範第一類建築屋頂綠化須至少一半。雖然尚不普及，但已有不少地方建置了綠屋頂，台北市亦配合 2010 配城市花博建置了一些綠屋頂，且推動了含括了屋頂及露台的綠化工作之城市花園計劃。相關研究亦正進行中，如廖（100 年）及李（98 年）針對

綠屋頂截水效益進行研究，葉（101 年）研究新竹市若推廣綠屋頂，分析其可能的空污減量、降溫節能及截水效益；謝（94 年）研究不同植栽對建築物之隔熱結果；許（95 年）於屋頂土壤層種植台北草與桂花植栽層，探討植栽綠化相較於裸露混凝土屋頂熱性能之影響；蘇（98 年）則針對屋頂植草及覆土層之熱效應做進一步研究，探討不同厚度覆土層內土壤溫度變化，以及覆蓋材料、綠化植栽對表面溫度之變化及影響。

民間亦有錫瑠環境錄化基金會協助推廣中。主要推廣薄層型綠屋頂型式，藉由合作廠商的參與及研究，開發出適合環境之蓄排水板、透水管、阻根/過濾層以及取代土壤之輕質介質；適時推動了一些成功的綠屋頂實例，例如台北市吳興國小、信義區公所及松山工農等（錫瑠基金會，98 年）。

2.2.3 企業綠屋頂發展

近年來國內外綠屋頂已蓬勃發展，除了城市、政府單位極力推廣綠屋頂率先配合外，在民間團體、私人企業也已積極建置綠屋頂，ARCADIS（2004）說明較具代表性的是福特汽車位於密西根州的紅河卡車工廠，由密西根州立大學的綠屋頂研究計劃於 2000 年共同合作期間，評估將福特汽車公司在 Dearborn 佔地 1,200 英畝有 90 年歷史的老工廠設置薄層型綠屋頂；設計了 60 萬平方英尺位於裝配廠的屋頂綠化裝置，具有隔熱節能、減少暴雨逕流及提供其他環境益處，可能為全球最大的綠屋頂，是一個永續性、環保及肩負產業以及社會責任的重要指標，不僅是創造空氣、水與土壤的清潔環境，且具有提昇製造汽車工廠的企業形象。

Earth Pledge（2005）在介紹綠屋頂商業建築案例中，提到日本福岡市的 ACROS（Asian Crossroads Over the Sea）國際展覽會館，南面的外觀是由 15 層充滿綠樹植栽的綠屋頂露台平面所組成，主要是同時滿足建築發

展效益及綠色公共空間的需求。Greenroofs.com (2010) 在綠屋頂專案資訊中說明加拿大高桂林港 (Port Coquitlam) 地區在 2006 年法令修正要求建築物超過 5,000 平方公尺 (53,281 平方英尺)，須設置相關的綠色環保技術 (Green technology) 降低都市熱島效應、增加節能效益以及提昇自然暴雨的管理，該地區沃爾瑪商場建置了 113,467 平方英尺的綠屋頂，是該區自立法以來最大的綠屋頂建築。

Dunnet (2008) 於綠屋頂案例研究中敘述在英國北部的 Moorgate Crofts 商業中心，設置有兩種不同的綠屋頂型式，在上層的綠屋頂主要是 4 英吋薄層型重植景天屬植物，覆蓋在會議室及面談室的屋頂；下層綠屋頂則規劃為社區公共的綠屋頂露台，規劃為簡易且利用最少資源的型式，包括不須施用肥料及最小或不須澆水灌溉，種植半薄層型 (Semi-extensive) 的自然混合的植物 (40% 原生種)，兼具視覺美觀及抗旱耐候等特性。

民間企業基於社會責任及以政府的環境綠化政策，已逐步化被動從而積極參與屋頂綠化的行動，由綠屋頂網站 Greenroofs.com 建立的專案資訊中揭露，於目前在世界各地建構的綠屋頂個案，企業綠屋頂所佔的比例已逐漸提高，綠屋頂已是一般企業在提昇社會形象以及建立友善環境的一種可行的方式。

2.3 企業綠屋頂效益

綠屋頂對於企業在節能減碳及環境保護上，具有不同程度的價值。Agarwal *et al.* (2004) 說明了綠屋頂的效益可概略分為三大類：(1) 環境面效益，(2) 社會面效益，(3) 經濟面效益，如下說明：

- (1) 環境面效益：改善空氣品質，降低暴雨逕流及污水過濾作用，溫度調節及降低熱島效應，創造微氣候 (Microclimate) 以及提供野

生棲地等。

(2) 社會面效益：提供健康生活所需要的美化和休憩空間，建築綠化增加視覺美觀，綠屋頂開放空間促進社區敦睦與互動。

(3) 經濟面效益：延長屋頂防水層使用期限，屋頂隔熱降低建築空調耗能，綠屋頂能提昇防火隔離 (Firebreaks) 降低火災漫沿的程度，降低暴雨處理設施及費用 (某些地區適用)。

錫瑠基金會 (97 年) 在綠屋頂推廣交流討論會中說明，綠屋頂對企業主的好處是展現在實質的利益上，由於延長屋頂防水層的壽命，降低了屋頂生命週期及運作的成本，適度綠屋頂不僅美學上較傳統屋頂宜人，也增加建築的美觀與價值，另外在公共利益上主要是：控制暴雨逕流、改善排放水質、減少都市熱島效應、降低二氧化碳對全球暖化的影響以及改善空氣品質。

陳 (98 年) 提到綠屋頂具有生物多樣性的價值，可作為都市大型生物棲地之間的跳島，其次在都市水文的管理，涵養水源吸收城市的表面逕流，也有助於降低都市熱島效應，植物可吸收溫室氣體，改善空氣品質，隔絕並吸收環境的噪音。在經濟效益上可延長屋頂層的使用壽命，減少維護與更換的成本，大幅降低空調使用的耗能及相關設備的投資費用，另外利用綠屋頂種植蔬果、花卉、藥草等植栽，可產生額外的附加價值。最後在社會效益上是著重於舒適與美學的觀點，可作為公共的休憩用途，提供社區鄰里的綠地空間，建築景觀綠美化的效果，可增加建物的價值與市場銷售力。

綜合以上所述，綠屋頂的運用對企業有多方面的效益，且綠屋頂效益確實都會得到展現，但對一般企業而言，主要考量點則偏重於實質且可量化之效益，且有助於降低企業營運及維護之成本，因此歸納下列幾項為本

研究探討的主要方向：

- (1) 建築隔熱及節能效益。
- (2) 溫室氣體排放(節能及植栽 CO₂ 固定或濾除)
- (3) 雨水貯留及截水效益
- (4) 成本效益

2.4 綠屋頂節能減碳效益

2.4.1 節能效益

蘇(98年)於屋頂植草覆土層熱效應之研究中指出，都市化大量的建築及水泥鋪面，在吸收大量的日照輻射熱後，逐漸釋放而形成都市熱島現象。若在建構物屋頂層或平面露台種植大量綠化植栽，可以形成有效的隔熱層對城市降溫，以及抵抗日漸惡化的都市熱島效應。蘇以實驗方式探討覆土層之溫度變化，以及覆蓋物草皮降溫的熱效應，其研究結果可歸納為：綠屋頂使用草皮綠化設計有效的土壤厚度至少為 15 公分，覆蓋表面的草皮（假儉草、台北草、百慕達草）分別可降低屋頂表面溫度達 11.2 至 12.62℃。

許(95年)於屋頂綠化熱效益之研究中，探討植栽綠化對於裸露混凝土屋頂熱性能之影響，採用實驗法量測台北草與桂花等四種不同植栽層(15公分土壤覆蓋)與傳統屋頂層之差別，依據研究結果顯示，適度綠化屋頂植栽可有效降低屋頂層表面溫度 9.4~11.5℃，減少混凝土對於周遭環境的反輻射熱，可大幅降低周圍空氣溫度 1.3~1.8℃，改善現今都市環境所造成之熱島效應，並可有效降低屋頂下方室內空氣溫度，調節建築物室內熱環境。

唐等(2010)探討屋頂綠化土壤層及植栽層的等效熱阻，在考慮綠化

植物之遮蔽作用，以及土壤層的被動蒸發作用，於夏季室內環境空調控制之下，以薄層型綠屋頂 10~15 公分土壤層及耐候性草類，測定綠屋頂等效熱阻作為節能設計參數。由實驗數據也得知綠屋頂可使室內表面平均溫度降低約 3°C，傳入室內的傳導熱減少 70% 以上，可以得知綠屋頂確實有效改善室內熱環境及減少空調耗能。

Wong *et al.* (2003a) 運用 DOE-2 能源模擬程式評量綠屋頂全年耗能的狀況，實測三種不同植栽：草皮、灌木、喬木於綠屋頂的等效熱阻 (R-values)，利用兩種不同土壤介質及不同厚度，模擬一棟五層樓高的商業建築大樓，結果顯示綠屋頂可以節省 0.6~14.5% 全年的能源消耗，其中矮樹灌木 (Shrubs) 降溫節能效果較佳，可降低 21% 的空間尖峰空調負荷 (Peak space load)。

2.4.2 溫室氣體減量效益

Schneider (2011) 敘述了綠屋頂在氣候變遷及永續建築所扮演的角色，綠屋頂不僅在節能與固定二氧化碳上對降低溫室氣體排放有所助益外，另一形式植栽綠屋頂 (Vegetated roof) 所形成的都市屋頂農業，生產的蔬菜亦可降低食物及運輸帶來的相關溫室氣體排放量，不僅增加都市自主的食物來源，亦對環境產生和諧共生的互助關係。唯此部分目前較不適合企業綠屋頂，故本研究未納入。

黃 (95 年) 於辦公建築生命週期節能與二氧化碳減量評估之研究中指出，建築物在使用階段之二氧化碳排放量，日常能源所佔排放比率高達 80%，這包含了空調、照明、給水泵浦、昇降設備、事務機器等耗能，因此，針對日常節能的觀點提出二氧化碳減量之對策，這其中尤以空調耗能佔了日常能源達 42.1%，所以，減少空調耗能为降低溫室氣體排放的重要方向。

綠屋頂另一個溫室氣體減量之效益主要是因植栽所產生的二氧化碳吸收及固定量，朱（93 年）於校園綠建築綠化指標之植栽 CO₂ 固定量調查研究中，提及綠化利用植物的光合作用來固定空氣中的二氧化碳，降低溫室氣體的排放，不締是減緩地球溫室效應及都市高溫化的好方法；其透過綠建築中的「綠化指標」對 CO₂ 固定量的計算方式，整理出適合地域性的植栽對應之 CO₂ 固定量；也針對建築物申請綠建築認證作出建議，儘量在屋頂及陽台上加強綠化設計，以彌補綠化量及綠地之不足，但應注意覆土量及防水措施，以避免屋頂樓板結構安全及漏水之維護問題。

Getter *et al.* (2009) 以位在美國密西根州及馬里蘭州的 12 個綠屋頂為案例，探討薄層型綠屋頂不同植栽所潛在之碳累積及固定量，第一階段實驗以主要之景天類 (Sedum) 植栽為主，並區分土壤介質厚度為 2.5 至 12.7 公分，所得結果為薄層型植栽之平均碳儲存量為 162 g C/m²，第二階段固定土壤介質厚度為 6.0 公分，以不同景天類 (S. acre, S. album, S. kamtshaticum, or S. spurium) 植栽為區別，依序取樣量測及分析各物件之含碳濃度，所得平均碳儲存量分別為：植栽部份 168 g C/m²、土壤層生物質 (Biomass) 107 g C/m²，以及土壤介質固定量則為 100 g C/m²，總計薄層型綠屋頂吸附及固定量為 375 g C/m²。其實驗結果及分析數據可作為綠屋頂減碳效益之參考。

2.5 綠屋頂環境效益：截水效益

Mentens *et al.* (2004) 依據近二十年來發表於德國暴雨逕流之相關文獻，以經驗模式探討不同型式屋頂之表面逕流，依據屋頂的特性（如型式、斜度等）及降雨量等數據推估年度降雨量與逕流量之關係，綠屋頂土壤介質層厚度的影響較大；其並強調綠屋頂在暴雨管理上扮演一個多重效益的

角色，不僅提高降雨截水量 (Rainfall retention) 分別達 45% - 薄層型；75% - 密集型；另外在降低區域暴雨逕流量約 2.7%；單一建築可減少約 54%，顯示綠屋頂可降低暴雨逕流量及適度減低都市泛洪之風險。

Villarreal (2007) 指出薄層綠屋頂可減緩雨水尖峰逕流，已逐漸成為都市暴雨逕流在來源控制上的措施之一，其依據實場實驗比較傳統屋頂 (Conventional roof) 及薄層型綠屋頂對於雨水儲存及降緩暴雨尖峰之影響程度，以不同之屋頂斜度及降雨量強度作分析；發現可降低降雨尖峰值達 31~65%，在恆定 (Constant intensity) 降雨強度之狀況下，最高約有 29% 的雨水可藉由綠屋頂、土壤層吸收而降低整體之雨水排放量。

Berghage *et al.* (2009) 於降雨逕流管理工具探討中，綜合 72 次降雨實驗結果指出，綠屋頂可降低約 50% 之降雨逕流量，並且有效地減緩降雨之尖峰值及延後尖峰時間，在降雨逕流之水質觀察中提及 pH 值的增加有助於中和酸雨之危害並去除大氣中之硝酸鹽 (Atmospheric nitrate)；因此建議綠屋頂可作為最佳管理作業措施 (BMPs) 之一，生物過濾 (Bio-infiltration) 及雨水澆灌均可以有效降低建築物降雨時之逕流量及緩合尖峰值及時間，並維持較佳之逕流排放水質，甚至不須額外處理而直接排放。

Hilton *et al.* (2008) 探討綠屋頂對調節暴雨之有效性，以實驗量測模組化方塊、景天類植栽及土壤介質所組成之綠屋頂，並運用電腦模擬模式 HYDRUS-1D，以 24hr 暴雨之設計基準，分析綠屋頂對降雨之保水能力、降低之尖峰值；以及逕流延緩時間等，其研究結果顯示降雨之強度影響綠屋頂對暴雨之調節能力，當降雨量小於 1 英吋時，薄層式之綠屋頂可完整地保留雨水；當降雨量較大時，雖無法完全截留雨水，但可減緩及遲滯暴雨尖峰及逕流之時間，此研究方法雖較為詳盡，唯須監測土壤水份滲透深

度、表面流通量及介質含水特性等，故不適用於本研究採用。

李（98 年）建立國內綠屋頂截水推估公式，以所建立之實驗座台針對不同的降雨事件、基質厚度、植栽與無植栽狀況等，分別收集表面逕流及滲漏水，並考量飽和水力傳導係數、降雨時間、基質含水率及厚度等重要因子，以此推估截水量與各因子的關係，並且建立三個半經驗公式據以比對分析綠屋頂之截水能力。廖（100 年）進一步推導國內綠屋頂截水效益經驗公式，以建置降雨模擬器排除天候變異難掌握之因素，模擬不同狀況之降雨強度，依據不同土壤介質厚度、特性以及植栽等重要因子，推估其於綠屋頂截水能力之影響程度，並分析介質含水率與表面逕流在降雨期間隨時間變化之情況，並依實驗結果建立一些綠屋頂截水公式。本研究採用其所歸納出的基值截水及排水板截水經驗公式，作為綠屋頂截水效益之估算方法。



2.6 綠屋頂成本效益

為提升企業社會責任及降低營運成本，企業於 CGR 設置前需預先評估 CGR 之實質效益，主要是考量初設成本及回收之年限，若具有足夠成本效益之誘因，較能提高企業設置 CGR 之意願。一般綠屋頂之設置成本估算取決於不同國家、地區物料及人力之成本差異，就所蒐集文獻以表列傳統型屋頂與綠屋頂初設成本如下：

表 2.2 傳統型屋頂與綠屋頂初設成本比較表

國別	傳統型屋頂	薄層型綠屋頂	密集型綠屋頂	文獻
美國	-	161-269 \$/m ²	-	Chang <i>et al.</i> (2011)
	242 \$/m ²	306 \$/m ²	-	Niu <i>et al.</i> (2010)
	83.78 \$/m ²	100-300 \$/m ²	-	Carter and Keeler (2008)
	167 \$/m ²	+ 39%	-	Clark <i>et al.</i> (2008)
新加坡	49.25 \$/m ²	89.86 \$/m ²	178.93 \$/m ²	Wong <i>et al.</i> (2008)
德國	40 - 50 \$/m ²	85-90 \$/m ²	-	Porsche and Kohler (2003)
台灣	1,500 NT\$/m ²	2,640-3,000 NT\$/m ²	-	信義區公所 (100 年)、黃 (98 年)
	1,280-4,160 NT\$/m ²	3,200-7,500 NT\$/m ²	8,000-30,000 NT\$/m ²	李 (98 年)
	1,528 NT\$/m ²	2,683 NT\$/m ²	-	葉(101 年)

資料來源：葉(101 年)以及本研究整理

Kosaere and Ries (2006) 提及建築物業主遲疑綠屋頂之運用效益性，主要原因是初設成本高，以及建造、維護上之不確定性，因而其依成本效益觀點分析了傳統式屋頂與綠屋頂之差異，該研究結果顯示，薄層型綠屋頂重量負荷較輕，不需額外考量屋頂層及下方樑柱結構之補強，而綠屋頂防水層之更換期限從預估之 10~15 年可延長到 25 年，且在隔熱節能上可降低運轉電費、並減水都市暴雨逕流之設置、以及提高空氣品質。因此就以 Life-cycle cost (LCC) 而言，薄層型綠屋經濟效益上，可逐年抵銷 (Offset) 其初設之成本，較傳統屋頂有較佳之成本效益。

Carter *et al.* (2008) 指出綠屋頂之總成本及經濟效益，將影響社會及企業構建之方向及決定，並有助於相關政策工具及教育素材之發展。從都市實驗性質之薄層型綠屋頂，比較傳統式屋頂所蒐集之相關資料，運用生命週期之成本效益模式 (Life-cycle cost- benefit analysis) 來分析，以主要四項成本為計算基準，分別為建造及維護成本、暴雨逕流截水效益、節能減碳費用、空氣品質改善效益；最後歸納推估結果顯示，綠屋頂最有經濟效益在於延長屋頂防水層壽命及更新週期、降低都市暴雨逕流相關之投資費用，再則是節能減碳所降低之成本。

Bianchini and Hewage (2012) 在以生命週期方法分析綠屋頂社會成本效益之可能性 (Probabilistic)，其中以綠屋頂在私人成本效益上作為說明，雖初設成本及運作維護上費用較高，但自然型態園藝造景能增加建築的市場價值，更可以獲得一次性的減稅，也因降低都市不透水 (Impervious) 面積，而獲得每年抵減暴雨徵收費用，以及降低暴雨下水道設施建造的成本，而在隔熱節能、延長屋頂壽命上綠屋頂也有一定之效益。另外在社會成本效益上也具有相當知名之貢獻，包含降低空氣污染、減少二氧化碳排放量、提高空氣品質、降低洪災風險、增加生物棲息地、建築景觀美化、提供休憩空間以及調和都市熱島效應。

參考上述文獻，本研究針對綠屋頂之建造及維護成本，以及節能、減碳、環境效益—截水等三項重要效益，依據企業兼顧社會責任、環境保護及實質經濟利益之導向，發展適當之綠屋頂成本效益評估模式，以作為企業綠屋頂規劃與決策分析之用。

第三章 研究流程與方法

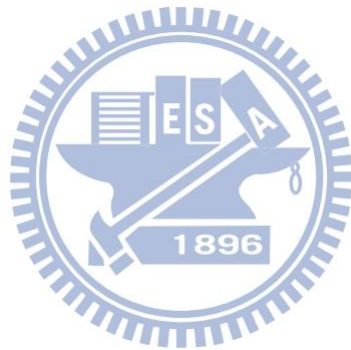
本章首先介紹研究流程，接著說明 CGR 的分類及型式，進而討論 CGR 節能及環境二大主要效益，收集及建立方法或公式評估 CGR 在隔熱降溫上對節能之助益，以及環境方面溫室氣體減量及截水之效益，且分析 CGR 設置與維護成本與效益之關係，最後以案例分析 CGR 之成本效益，所建立的評估方法，將供作為企業建構綠屋頂相關決策之參考。以下概要說明研究流程之後即一一詳細說明各研究步驟。

3.1 研究流程

本研究之進流程如圖 3.1 所示，主要分為文獻及資料收集、綠屋頂分類、CGR 效益探討、CGR 節能與環境效益分析方法之建立、CGR 成本效益分析、案例建立及研討等六個步驟，以下分別摘要說明之：

1. 文獻及資料收集：主要收集國內外 CGR 相關文獻，包括綠屋頂發展現況、施工技術及設置的限制、綠屋頂型式、綠屋頂在節能與環境方面相關之效益、建築能源計算及模擬，溫室氣體減量及截水效益之計算，以及建築綠化政策及政府補助等文獻。
2. 綠屋頂分類：綠屋頂主要區分為薄層型及密集型兩種型式，依據設置之土壤介質種類、厚度、排水層以及植栽適用種類等有所區別，並就以企業綠屋頂考量之成本效益，探討較為可行及適合之綠屋頂型式。
3. CGR 效益探討：綠屋頂除可增加建築物綠地覆蓋率，亦具有隔熱降溫、降低熱島效應及環境噪音、減少暴雨逕流及雨水貯留、CO₂ 固定或濾除、保護建築屋頂、作為生物棲地、景觀綠美化等功能。其中具體能對企業成本有所助益的是降低空調耗能，及環境上降低溫室氣體排放、雨水截水等效益，本研究以此為探討及分析這些效益為主要目標。

4. CGR 節能與環境效益分析方法之建立：建立 CGR 節能效益分析模式，本研究將以建築耗能模式 eQUEST、熱傳導係數 U-value 計算綠屋頂節能方面之效益，以及估算環境方面溫室氣體減排及截水之效益。
5. CGR 成本效益分析：分析 CGR 設置與維護成本及上述效益之關係，以此建立一套 CGR 成本效益評估方法。
6. 案例研討：本研究以企業建築辦公大樓為案例，收集建築與 CGR 相關之數據資料，接著應用所發展之節能與環境效益分析之方法，模擬及計算其於節能及環境上之效益，並歸納分析所建立的方法之適宜性，並作為企業建置 CGR 及相關決策分析之重要參考依據。



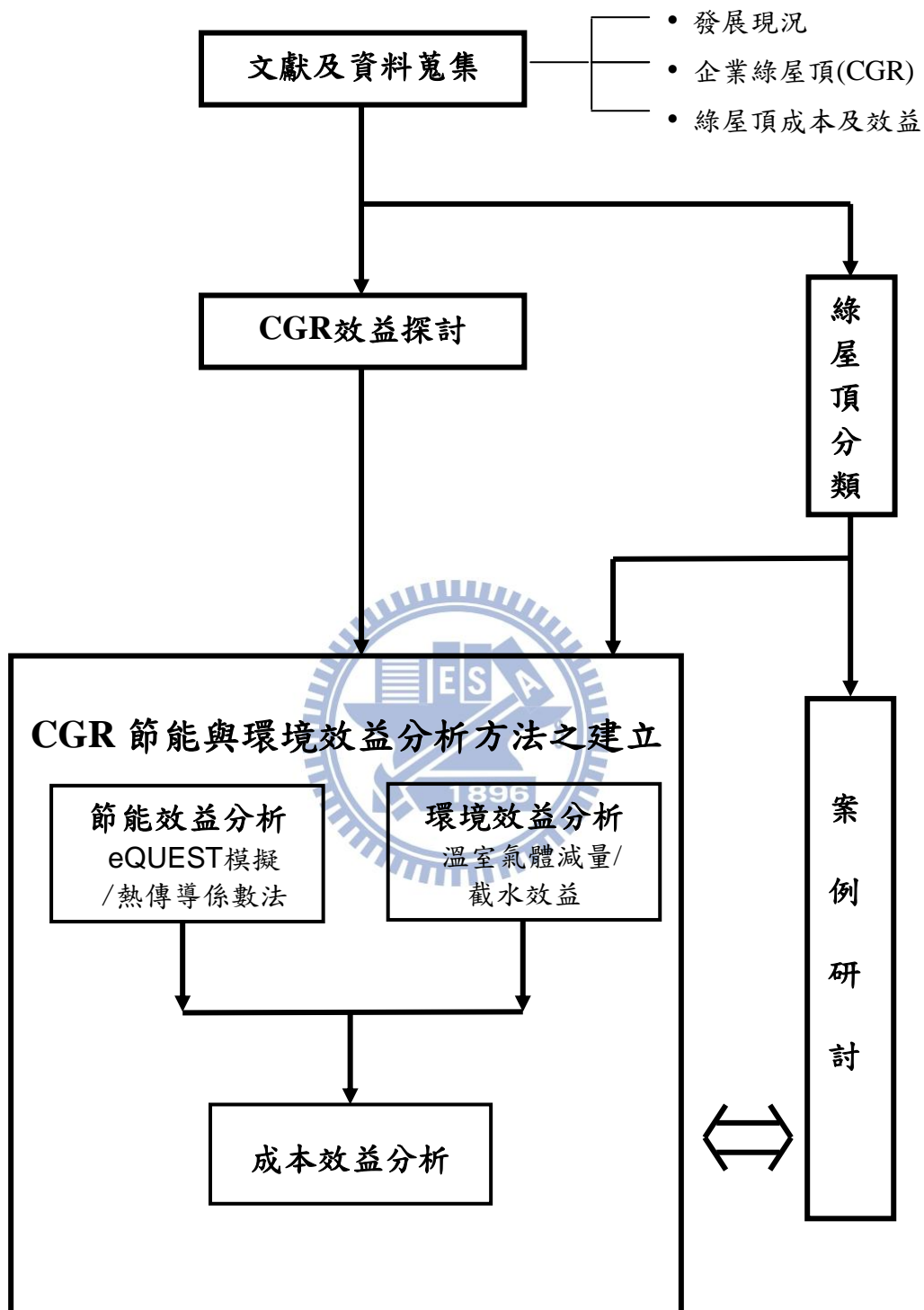


圖 3.1 研究流程圖

3.2 綠屋頂分類

綠屋頂依主要特色及運用的簡易度，主要大致可區分為兩類（陳, 98 年），薄層型（Extensive）植栽種植之覆土多為輕量基質；比較輕巧且屋頂結構承載較低，可選用植物種類較少；多為景天類植物，維修要求及維護成本較低，是目前國內外廣泛使用的綠屋頂類型。密集型（Intensive）主要是趨近於傳統園藝綠化之型式，可供人員休憩及聚會所用，植栽種植之覆土泥層較厚，可供選用的植物種類較多；遍及各類多樣性園藝植栽，維修要求及維護成本較高，適用於綠化意圖強烈之建築物。表 3.1 比較二種類型 CGR 的特性及差異：

表 3.1 綠屋頂分類及特性

項目	薄層型（Extensive）	密集型（Intensive）
生長介質厚度	5~15 公分	20 ~ 200 公分
可接近性	樣式單調但仍可親近使用	通常可供人員休憩及聚集
結構重量	較輕巧（80~150 kg/m ² ）	較高（300~3300 kg/m ² ）
植物多樣性	較少（耐候型，景天類或草類等低矮植物）	多樣（遍及各類喬木、灌木等較大型植物）
設置成本	較低（1,600 ~4,000 NT\$/m ² ）	較高（4,000 ~20,000 NT\$/m ² ）
維護費用	偏低（3 ~11 NT\$/m ² ）	偏高（26 ~176 NT\$/m ² ）

資料來源：Peek（2008）；香港雅邦（2007）；陳（98 年）及本研究整理

綠屋頂在德國的一些城市已行之多年，而美國、日本、加拿大等的一些城市，甚至是新加坡與大陸的北京市則亦於近幾年推廣綠屋頂（石佳玉, 98 年）。除了城市、政府單位極力推廣綠屋頂率先配合外，在民間團體、

私人企業也已積極建置綠屋頂，如美國福特汽車位於密西根州的紅河卡車工廠 (ARCADIS, 2004)，利用廠房建立了約 10.4 公畝的薄層型綠屋頂，栽種原生種景天科(Sedums)植物，以耐乾旱及適應嚴寒的極端氣候。日本福岡的 ACROS Fukuoka 商業建築大樓 (Earth Pledge, 2005)，亦充份運用綠屋頂的效能及功用，將建築佔用的面積以階梯式的平台屋頂綠化，與鄰近的公園展現綠地及綠化視野的延伸。

CGR 推廣可能源起於建築物大量構建後，為了提昇綠化面積或減緩生態棲息地破壞，基於環境面之考量而觸發的綠化行動；近年來國外大力推廣綠屋頂，國內亦正推動中，CGR 不僅為環境面之設想，也趨向於建築物在經濟或成本效益上，一棟附屬綠屋頂之建築物能提高其資產價值，不論在外觀美化及彰顯聲譽上，或節能及環境成本效益方面，都具有實質且可量化之附加效益，且就技術及國內外實際運用之案例而言，薄層型綠屋頂在成本及效益上有較佳的表現 (Wong *et al.*, 2003b)，因此本研究以薄層型綠屋頂作為探討的主要型式。下一節說明本研究如何分析 CGR 的效益。

3.3 CGR 效益

企業綠屋頂的效益很多，在國外有很多深入的研究 (請參見第二章)。本研究主要針對 CGR 節能效益與環境效益分析之。

3.3.1 節能效益

CGR 在建築隔熱及節能上具有相當程度的貢獻，最直接的效益是降低每月的電費支出，CGR 的節能效益採用能源模擬 eQUEST (Hirsch, 2003) 模式分析，並與 U-value 推估之熱傳導係數法 (Clark, 2008；唐等, 2010) 所估算結果比較，以下分別說明此兩項推估方法。

3.3.1.1 能源模擬模式

藉由建築耗能模式模擬 CGR 降低熱傳導效應、空調負荷以及對建築分時/年度的能源消耗量，包括 DOE-2 (Hirsch, 2003)，eQUEST (Hirsch, 2003)，Energy Plus (Sailor, 2008; Clark, 2008) 等，因 eQUEST 具有友善之使用介面，包含簡易輸入、3 維圖型及輸出圖表等優點；並依據「標準氣象年」(TMY2) 建立之分區氣象資料 (林等, 94 年)，可逐時模擬建築物件分時之耗能狀態，故本研究擬採用它來模擬 CGR 的節能效益。

以 eQUEST 模擬 CGR 節能效益，主要包括下列六項主要輸入步驟：
(1). 基本資訊 (Project & Site)、(2). 建築外形 (Building Shell)、(3). 內部負荷 (Internal Loads)、(4). 水側空調 (Water-Side HVAC)、(5). 氣側空調 (Air-Side HVAC)、(6). 公用事業費率 (Utility & Economics) 等輸入步驟，較詳細介紹請參見附錄 A。

3.3.1.2 熱傳導係數法

採用 U-value 推估綠屋頂的熱傳透率，依外氣與室內溫度設定之溫差，估算綠屋頂所形成的隔熱層對空調耗能之影響，外氣溫度原則上採用與 eQUEST 模擬相同之「標準氣象年」(TMY2) 所建立之氣象資料，但近年來全球氣候變遷異常以及碳排放溫室效應之影響，外氣溫度可能有極端之反應變化，因此，本研究利用最近之新竹測站全年氣象資料 (中央氣象局，101 年)，估算其全年度總溫差數量作為差異之比較。

熱傳透率 U 值估算取決於相關屋頂構件及綠化層之 R-value (詳如附錄 B)。其總熱傳透率 U 以及熱通量 Q 的適用計算公式 (內政部營建署，100 年) 如下：

$$U = 1 / (1/h_o + \sum dx / k_x + r_a + 1/h_i) \quad (3.1)$$

$$Q = U \times (T_o - T_i) \times A \quad (3.2)$$

其中

U：熱傳透率「W/(m²°K)」，

r_a：中空層之熱阻「m³°K/W」，

h_o：外表面的熱傳透率「W/(m²°K)」，

h_i：內表面的熱傳透率「W/(m²°K)」，

k_x：第 x 層材料之熱傳導係數「W/(m²°K)」，

dx：第 x 層材料之厚度「m」

Q：熱通量「W」，

T_o：外氣溫度「°C」，

T_i：室內溫度「°C」，

A：屋頂或綠屋頂面積「m²」。



但綠屋頂在實際環境氣候下，除了屋頂結構物的隔熱之外，還有植物與土壤表面水份蒸發帶來的潛熱釋放效果，因此無法以常規的傳熱過程及熱傳透率來估算，就現有綠屋頂等效熱阻文獻（Wong *et al.*, 2003a；Clark *et al.*, 2008）的分析，綠屋頂的 R-value 相較傳統屋頂為高，此外本研究假設 T_i 全年空調設定溫度為 25°C，T_o 為全年週邊外氣逐時溫度，並利用各層材料 R-value 計算綠屋頂之熱傳透率 U 值（如表 3.2 所列），以及 3.2 式來估算綠屋頂較傳統屋頂之全年空調節能。

表 3.2 傳統屋頂及綠屋頂熱傳透率 U 值

項目	傳統型 屋頂 [W/ m ² °K]	薄層型 綠屋頂 [W/ m ² °K]	密集型 綠屋頂 [W/ m ² °K]	資料來源
1.	0.5	0.24	-	Clark <i>et al.</i> (2008)
2.	2.4	1.19	0.45	Wong <i>et al.</i> (2003a)

3.3.1.3 能源轉換係數

節能效益需由空調熱能換算為實際耗電量，以便以電價為後續成本效益之估算，一般大型空調機組概以 COP（Coefficient Of Performance，性能係數）作為其能源轉換之指標係數，其公式如 3.3 所示：

$$COP = \frac{\text{空調容量 (Cooling Capacity)}}{\text{輸入電力 (Power Input)}} \quad (3.3)$$

上述之性能指標僅為空調主機在標準狀態下之性能係數，無法完整反應空調系統之耗能，應整合空調系統中所有設備元件之耗能（田，97 年），不僅只以冰水主機的效率為基準，需包含冰水泵浦、冷卻水塔、冷卻水泵、空調箱、可變風箱等主要空調供應設備。因此定義整體系統 COPs 值公式如 3.4 所示，利用系統 COPs 值即可由空調節能量換算為系統總輸入功率，求得全年節能之總輸入電能。

$$COP_s = \frac{\text{系統空調容量 (System Cooling Capacity)}}{\text{系統總輸入電力 (System Total Power Input)}} \quad (3.4)$$

其中，各參數的單位如下列：空調容量「kW」；輸入電力「kW」；COP 為空調主機性能係數「無單位」；COP_s 為空調系統性能係數「無單位」。

3.3.2 溫室氣體減量效益

CGR 之溫室氣體效益主要來自於降低傳統電力需求，所轉換的二氧化碳減量，另外是綠屋頂植栽所產生之碳固定量及二氧化碳吸收量，這都是綠屋頂在溫室氣體減量之效益，以下就各項加以說明。

3.3.2.1 節能減少之碳排放量

以建築能源使用情形來分析，主要在於空調系統運轉所使用之電力耗能，因此以碳排放係數來換算因節能所致之溫室氣體減量，表 3.3 所列為電力使用之二氧化碳排放係數，本研究將採用最新電力碳排放係數：0.536 kg eCO₂/度（經濟部能源局, 100 年），作為節能減少溫室氣體減量之計算。

表 3.3 我國歷年電力排放係數調整表

年度	排放係數- 調整前 (kg eCO ₂ /度)	排放係數-調整後 (kg eCO ₂ /度)
96	0.633	0.559
97	0.631	0.557
98	0.617	0.543
99	0.612	0.535
100	0.621	0.536

資料來源：經濟部能源局，(100 年)

依據全年 eQUEST 所模擬的電力使用及燃料燃燒節能數據，再依表 3.3 之碳排放係數 (kg eCO₂/度)，即可以下式換算因節能之溫室氣體減量：

$$ECO_2 = \sum (E_i \times Q_i) \quad (3.5)$$

其中 ECO_2 ：CGR節能之溫室氣體減量值（ $kg\ eCO_2/yr$ ）； E_i ：節省電力之溫室氣體排放係數，如表3.3所列； Q_i ：電力能源之減少量(度/yr)。

3.3.2.2 植栽吸收及固定二氧化碳

CGR 對環境的貢獻包括植物的光合作用來固定空氣中的二氧化碳，進而可減緩地球氣候的暖化。過去綠建築及都市相關法規為鼓勵綠化，有綠覆率、喬木植栽、栽種密度之規定，通常以覆土深度、樹徑、喬林數量來規定綠化量，因此本項植栽吸收及固定二氧化碳量也以類似綠建築綠化量的評估方法，以植栽種類及綠覆面積，作為簡易之二氧化碳固定效果的計算。

屋頂綠化植栽所產生的二氧化碳吸收及固定量，依據何等（98 年）的量化換算公式，其量化數據為植栽從幼苗至成樹的四十年每平方米綠地 CO_2 固定效果，下表為詳細之數據：

表 3.4 植栽單位面積二氧化碳吸收及固定量

植栽種類		栽種條件	固定量 G_i ($kg/m^2 \cdot 40\ yrs$)	栽種面積 A_i (m^2)	計算值 $G_i \times A_i$
生態 複層	大小喬木、灌木、花 草密植混種區	喬木種植間距 3.5m 以 下且土壤深度 1.0m 以 上	1200		
喬木	闊葉大喬木	土壤深度 1.0m 以上	900		
	闊葉小喬木、針葉喬 木、疏葉喬木	土壤深度 1.0m 以上	600		
	棕櫚類	土壤深度 1.0m 以上	400		
灌木		土壤深度 0.5m 以上 (每 m^2 至少栽植 4 株以上)	300		
多年生蔓藤		土壤深度 0.5m 以上	100		
草花花圃、自然野草 地、草坪		土壤深度 0.3m 以上	20		

資料來源：何等（98 年）

在薄層型栽種之耐候性草類 (Turfig)，以表 3.5 近似之草花花圃、自然野草地之二氧化碳固定量 $20 \text{ kg/m}^2\text{-}40 \text{ yrs}$ 為基準，密集型栽種之矮樹灌木 (Shrubs) 以灌木之二氧化碳吸收及固定量 $300 (\text{kg/m}^2\text{-}40 \text{ yrs})$ 為基準，唯此項是以植栽四十年之二氧化碳吸收及固定量效果，為了與其他效益值作比較，本研究改以一年平均值為基準，以利於與其他效益值在相同時間下作比較，各植栽一年平均 CO_2 固定量如表 3.5 所列。

表 3.5 植栽單位面積二氧化碳吸收及固定量

植栽種類	二氧化碳固定量 $G_i (\text{kg eCO}_2/\text{m}^2)$
大小喬木、灌木、花草密植混種區	30.0
闊葉大喬木	22.5
闊葉小喬木、針葉喬木、疏葉喬木	15.0
棕櫚類	10.0
灌木	7.5
多年生蔓藤	2.5
草花花圃、自然野草地、草坪	0.5

資料來源：何等 (98 年)及本研究整理

CGR 綠化植栽二氧化碳固定量計算是以面積及表 3.5 CO_2 固定單位量，依下列公式計算：

$$\text{GCO}_2 = \Sigma (G_i \times A_i) \quad (3.6)$$

其中

GCO_2 ：屋頂植栽綠化之年總 CO_2 固定量 ($\text{kg eCO}_2/\text{yr}$)；

G_i ：植栽種類之單位面積 CO_2 固定量 ($\text{kg eCO}_2/\text{m}^2\text{-yr}$)，可由表 3.5 查得；

A_i ：植栽之栽種面積基準 (m^2)。

CGR 在隔熱節能及植栽綠化所帶來之溫室氣體減量，依上述所述方法計算，本研究採用一年為時間單位基準，配合建築物能耗模式模擬所分析之節能總量，以及綠化植栽之種類、所佔面積；再比較傳統屋頂及各式綠屋頂型式後，其間的差異即是二種綠屋頂之溫室氣體減量效益。

3.3.3 截水效益

CGR 綠屋頂截水能力會受到基層特性、基質厚度、土壤含水率、降雨及植栽選擇等因子影響（李, 98 年），評估不同型式綠屋頂之截水能力，須蒐集該區域近幾年度之降雨量及時間，運用相關理論及實驗數據所建立之公式，導入不同基質厚度、含水率及飽和透水係數，以及年度平均降雨量及時間等，以較簡易的方式推估 CGR 綠屋頂之降雨截水效益。

3.3.3.1 區域年降雨量說明

依據中央氣象局歷年氣象資料，取據 95~99 年新竹區氣象站逐日雨量資料，彙整該區平均年降雨量以下表所示：

表 3.6 新竹區歷年平均年降雨量

單位(mm)

月份 年份	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
95 年	43.0	87.6	167.8	414.3	345.1	461.7	162.5	52.1	165.1	0.1	99.0	129.2
96 年	81.5	64.8	192.6	225.2	136.3	488.9	2.9	187.8	200.7	257.0	104.1	22.1
97 年	72.7	97.4	186.9	188.9	210.6	224.8	345.7	19.2	705.1	28.9	67.1	19.3
98 年	9.2	36.4	179.5	74.4	25.7	248.1	48.5	321.3	19.0	46.9	68.9	41.6
99 年	85.3	225.5	84.0	168.5	224.0	349.1	77.2	130.0	93.7	80.0	26.7	61.1
平均值	58.3	102.3	162.2	214.3	188.3	354.5	127.4	142.1	236.7	82.6	73.2	54.7

資料來源：中央氣象局（101 年）

3.3.3.2 綠屋頂截水推估公式

依據葉（101 年）分析綠屋頂的截水效益，主要可分為降低雨水地面逕流以及降低降雨尖峰流量兩部份，降低雨水地面逕流部份，本研究採用廖（100 年）所歸納出的綠屋頂基值截水及排水板截水經驗公式估算截水量，如下式所列：

$$\theta_f = \theta_s - (\theta_s - \theta_i) e^{-\beta \Delta t} \quad (3.7)$$

$$\Delta SW_s = (\theta_f - \theta_i) S_D \quad (3.8a)$$

$$\Delta SW_d = (P - \Delta SW_s) \times (0.0117P - 0.2289) \quad (3.8b)$$

其中 θ_f 為最終含水率（%）， θ_s 為飽和含水率（%）， θ_i 為初始含水率（%）， β 依廖（101 年）降雨時為 0.01969，無降雨則為 -0.00905， Δt 為降雨延時， S_D 為綠屋頂土壤基質之厚度（mm）， ΔSW_s 為基質截水深度（m）， ΔSW_d 為排水板截水深度（m）， P 為降雨量（mm）；利用式 3.7 估算降雨後的最終含水率，並用式 3.8a 估算降雨後的基值截水深度，並配合式 3.8b 估算排水板可截之深度，最後將 3.8a 與 b 加總並與綠屋頂面積相乘，即為總截水量。

3.4 傳統屋頂與綠屋頂成本

企業在追求永續發展上著重於環保與成本效益能相對平衡，在建築綠化改善及相關投資考量上，通常須重視其投入成本及回收效益，探討 CGR 成本效益有必要先分析其成本影響因子，包括初設成本（主要包含防水層、排水板、土壤介質層、綠化植栽、以及施工運雜費等）；固定維護費用、屋頂更新週期及成本等，本研究針對傳統型屋頂及薄層型、密集型綠屋頂，依上述所列主要因子分析如下：

1. 初設成本：參考表 2.2 傳統型屋頂與綠屋頂設成本比較表，本研究將採用葉（101 年）所調查的資料，參考本案例造園工程公司及相關綠屋頂材料及施工廠商（老圃、寶瑞、方智, 102 年）所提供之部份估價，並依消費者物價指數 CPI（行政院主計總處，102 年）平均漲跌率 1.4% 估算，即得表 3.7 所列之初設成本估算表，傳統型屋頂為 1,550 NT\$/m²、薄層型綠屋頂為 2,721 NT\$/m²、密集型綠屋頂為 4,625 NT\$/m²，以此作為後續估算及比較成本的依據。

表 3.7 傳統屋頂與綠屋頂之初設成本估算表

項目	規格	傳統型 屋頂 (NT\$ / m ²)	薄層型 綠屋頂 (NT\$ / m ²)	密集型 綠屋頂 (NT\$ / m ²)
水泥磚	0.05 m	315		
輕質混凝土	0.05 m	350		
油毛氈或 PU 層	0.01 m	453		
水泥砂漿	0.1 m	337		
植栽(景天植物/灌木)	-		600	1,750
土壤基質	0.1/0.3 m		300	750
防水層	m ²		380	380
保排水板	m ²		476	476
不織布	m ²		95	95
阻根層	m ²		95	95
施作人工	-		609	797
小計 (含稅)	-	1455	2,555	4,343
		1,528	2,683	4,560
2012 CPI 指數	%	1.433		
總計	NT\$/m ²	1,550	2,721	4,625

資料來源：葉(101 年)；老圃、寶瑞、方智（102 年）

2. 維護費用：傳統屋頂與綠屋頂之維護檢視需求略同，依 Wong *et al.* (2003) 概估，檢視排水系統及維護約一年兩次，此外，每個月亦須要巡視約二次，綠屋頂仍需視損壞額狀況，可能需額外更換部份植栽及除草，故本研究假設例行檢視維護由建築所有人負責，未納入成本計算。
3. 更新成本：傳統屋頂依耐用性而言約 20 年需要更新 (Acks, 2003; Carter and Keeler, 2008)，雖部份文獻敘述以 10 至及 20 為更新期限，本研究假設企業建築屋頂以 20 年為期限。而綠屋頂則由於可阻隔紫外線，以及形成保護層降低溫度波動等作用，預期可延長屋頂的壽命 20 年至 40 年 (Wong *et al.*, 2003b; Oberndorfer *et al.*, 2007)，本研究採用 Acks (2003) 以及 Carter and Keeler (2008) 較保守的估計，假設可延長屋頂壽命至 40 年。故本研究以傳統屋頂 20 年、綠屋頂 40 年之年限，作為更新成本之估算依據。
4. 使用期間：由於假設傳統屋頂 20 年更新一次，而綠屋頂可延長其一倍的壽命，故本研究依據 40 年使用期間，作為兩者年均成本估計的基準。
5. 折現率 (Discount Rate)：依主計處消費者物價指數 (行政院主計總處, 101 年) 平均漲跌率而言，過去五年的 CPI 值是在 -0.8 至 3.52% 之間，去年 (101 年) 是 1.93%，平均值約 1.4%。依中央銀行全球資訊網公告的五大銀行 (中央銀行全球資訊網, 101 年) 過去五年的一年期定存利率在 0.77% 至 2.735%，去年為 1.355%。而依經濟部再生能源電能躉購費率 (經濟部能源局, 100 年) 折現率是設為 4.25%。本研究採用法規的折現率，通貨膨脹率則設為 2%，本研究依此作為估算依據。

參考葉（101 年）綠屋頂成本計算公式，估算傳統屋頂與綠屋頂的年均成本，並計算其間的差異，以作為後續分析之依據。

$$C_{NR}^{10} = C_{NRI} \left(1 + \frac{1}{(1+u)^{10}} + \frac{1}{(1+u)^{20}} + \frac{1}{(1+u)^{30}} \right) \left(\frac{i(1+i)^{40}}{(1+i)^{40}-1} \right) \quad (3.9a)$$

$$C_{NR}^{15} = C_{NRI} \left(1 + \frac{1}{(1+u)^{15}} + \frac{1}{(1+u)^{30}} \right) \left(\frac{i(1+i)^{40}}{(1+i)^{40}-1} \right) \quad (3.9b)$$

$$C_{NR}^{20} = C_{NRI} \left(1 + \frac{1}{(1+u)^{20}} \right) \left(\frac{i(1+i)^{40}}{(1+i)^{40}-1} \right) \quad (3.9c)$$

$$C_{GR} = (C_{GRI} + C_{NRI}) \left(\frac{i(1+i)^{40}}{(1+i)^{40}-1} \right) \quad (3.10)$$

其中 C_{NR}^Y 為傳統屋頂壽命為 Y 年的年均成本 (NT\$/m²-yr)； C_{NRI} 為傳統屋頂的初設成本(現值)；i 為折現率 (discount rate；%)；u 為不含通貨膨脹的折現率 (%)； C_{GR} 為綠屋頂的年均成本 (NT\$/m²-yr)； C_{GRI} 為綠屋頂的初設成本 (NT\$/m²)。期間二種屋頂的維護成本假設相似，故未納入。

依序計算傳統屋頂及綠屋頂之單位面積年均成本後，然後再依所推估的企業綠屋頂面積計算總差異，以作為後續分析之依據。

3.5 企業綠屋頂成本效益分析

本研究針對企業綠屋頂主要之節能、減碳及截水項目，估算其轉換之成本效益如以下分析：

1. 節能效益：以 eQUEST 軟體模擬 CGR 隔熱降溫所達到的節能效益，可以透過填入電費及分時電價如表 3.8（季節及尖離峰不同費率，目前台電全年平均每度電價約為 2.67 元），直接計算每年使用電力的能源費用。

表 3.8 台灣電力公司二段式分時電價表

(二)時間電價(二段式需量契約)

分 類				夏 月 (6月1日至9月30日)	非夏月 (夏月以外時間)
基本電費	按 戶 計 收	單 相	每戶每月	129.10 元	
		三 相	每戶每月	262.50	
	經 常 契 約		每瓩每月	236.20	173.20
	非 夏 月 契 約		每瓩每月	—	173.20
	週 六 半 尖 峰 契 約		每瓩每月	47.20	34.60
流動電費	離 峰 契 約		每瓩每月	47.20	34.60
	週 一 至 週 五	尖 峰 時 間	07:30~22:30	每 度	3.62
		離 峰 時 間	00:00~07:30 22:30~24:00	每 度	1.80
	週 六	半 尖 峰 時 間	07:30~22:30	每 度	2.65
		離 峰 時 間	00:00~07:30 22:30~24:00	每 度	1.80
	週 日 及 離 峰 日	離 峰 時 間	全 日	每 度	1.80

資料來源：台灣電力公司（101 年）

2. 減碳效益：電力節能及綠化植栽所降低二氧化碳排放量，如前節所述係利用碳排放係數換算及國際參考之碳稅費率（Carbon Taxes），可量化計算其減碳之成本效益；如表 3.9 為世界各國目前已開徵碳稅的國家，其費率依碳排放量及產業類別不同加以課徵；台灣依行政院賦稅改革委員會委由中經院發表的研究報告（蕭, 98 年），為維持本國產業的競爭力，提升能源效率，並求不對產業造成衝擊，建議將溫室氣體環境稅的稅額訂為 NT \$ 750 /tCO₂e 開徵，本研究以此為碳稅計算基準。唯國內碳稅稅率還在研擬階段，所估算效益將只供參考。

表 3.9 世界各國已開徵碳稅時程及價格

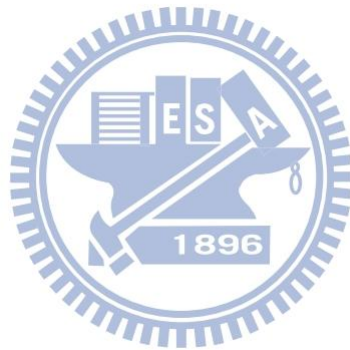
國家	時程	實施範圍	徵收價格
芬蘭	1990	排除部分能源密集使用的公司(可能因為避免重複課稅或加入碳交易)	20 歐元/每公噸
瑞典	1991	不對發電部門課征碳稅與能源稅，對於工業部門也收取較低的碳稅，再生能源部門獲得減免	150 美元/每公噸
挪威	1991	對化石燃料與礦油等徵稅，但對部分工業給予減免	21 美元/每公噸
丹麥	1992	對所有能源使用者課徵，包括工業部門。商業與住家有差別費率。工業若參加自願性提高能源效益的計畫，可減免碳稅。	14 美元/每公噸 (商業)、 7 美元/每公噸 (家戶)
瑞士	2008	對化石燃料徵稅，但不徵收化石燃料用來發電的部門。公司若欲參加該國的碳交易制度，便可免徵碳稅。	11.41 美元/每公噸
印度	2010	向所有國產和進口的煤炭徵收碳稅，挹注國家新能源基金來發展再生能源。	1.07 美元/每公噸
荷蘭	1990	針對石油與天然氣徵稅，對發電的燃料課稅但不對電力本身徵稅。	2.29 歐元/每公噸
愛爾蘭	2010	對煤氣、天然氣、汽油等油品徵稅。對固態燃料則暫緩徵收(木材、木材屑，與泥碳(泥碳是愛爾蘭鄉間常用的燃料))。	15 歐元/每公噸
哥斯大黎加	1997	在燃料稅中，3.5%撥為碳稅。部分稅收專門提供地主誘因，在土地上從事永續發展與森林保育。	3.5% (燃料稅)

資料來源：台達電子文教基金會 (100 年)，本研究整理

3. 截水效益：本研究採用美國華盛頓州之雨水下水道使用費費率：
 $0.0033 \text{ US\$}/\text{m}^2\text{-yr}$ (DDOE, 2011)，以及採用 Carter and Keeler (2008) 所建議的優惠方案給予的 Stormwater credit，抵用費率為 $0.04 \text{ US\$}/\text{m}^2\text{-yr}$
 以估算截水效益。唯國內尚未研擬及徵收雨水逕流費，所估算效益將只

供參考。

4. 綠屋頂成本效益分析：本研究將利用上述數節之估算方法，依序得到 10、15 及 20 年更新年限之傳統型屋頂與綠屋頂之年均成本，以及綠屋頂之節能、減碳、節水效益，最後估算其總成本及單位成本並說明其差異。
5. 參數不確定分析：綠屋頂年均成本及相關效益，可能受到經濟變化趨勢及電價漲跌而影響，因此，以較重要之參數組合：通貨膨脹率 f 與不含通貨膨脹率之折現率 u 、電價變化以及熱傳透率 U 值等因素作為不確定分析，所得結果可提供為企業綠屋頂評估之參考。



第四章 案例研討

本章主要是應用所發展之節能與環境效益分析之方法，以所蒐集企業業廠房附屬之辦公大樓為案例，模擬及計算其於節能及環境上實質之效益。首先介紹案例的背景及相關資訊，然後依傳統屋頂及綠屋頂型式導入 eQUEST 進行能源模擬分析，進而將節能效益及植栽綠化所降低之碳排放量加以計算；並運用截水推算公式計算其截水量。最後依據所得結果，運用生命週期成本之方法，求取不同屋頂型式之成本效益。以下一一說明之。

4.1 案例介紹

本研究企業綠建築 CGR 案例的主體為某公司的辦公大樓，位於新竹市新竹科學園區，於 97 年 3 月開始建造，歷經二年三個月分次完成地下四層至十層之辦公室建築及機電工程；新建辦公大樓樓地板面積則為 91,438 m²，而於屋頂層之屋頂綠化面積則為 4,263 m²，屬於薄層式綠屋頂型式，且同時規劃申請美國（LEED）及台灣（EEWH）綠建築認證，其建築立面圖及屋頂綠化平面圖如下圖 4.1, 4.2 所示。

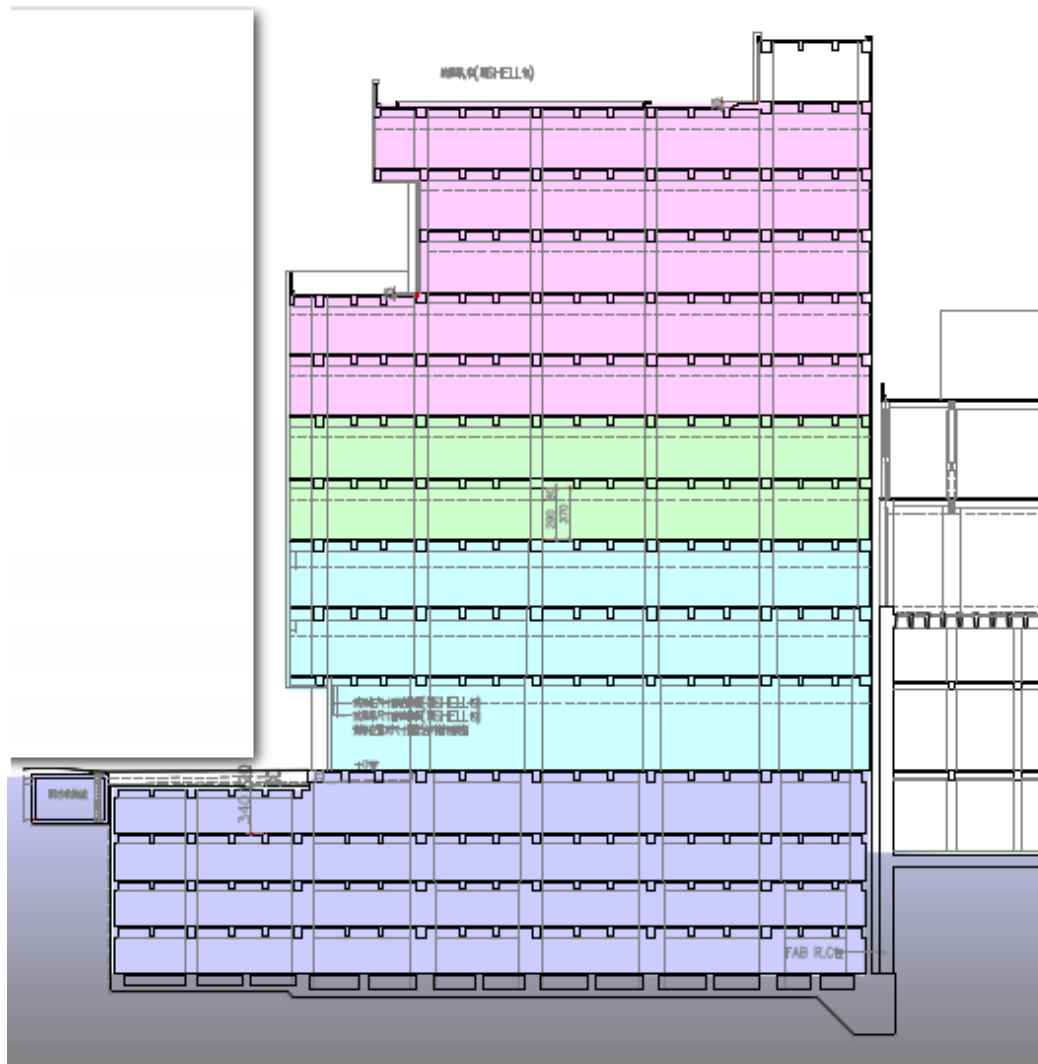


圖 4.1 辦公大樓建築立面圖

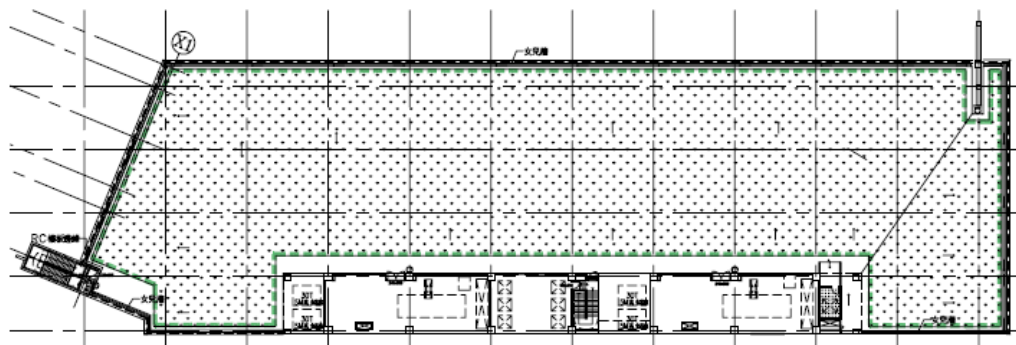


圖 4.2 辦公大樓綠屋頂平面圖

4.2 節能

本研究採用建築物耗能模擬程式 eQUEST (Hirsch, 2003 ; Carter *et al.*, 2008), 以及 U-value 推估之熱傳導係數法 (Clark, 2008 ; 唐, 2010), 分析企業綠屋頂的節能效益, 並就所估算結果比較其差異。以下分別說明之。

4.2.1 能源模擬模式

依前一章所述, 本研究以 eQUEST 軟體模擬綠屋頂的節能效益, 依辦公大樓為模擬主體, 據實際所在方位、建築幾何尺寸、材質及人員、照明、設備負載, 空調水側、氣側設備, 並以目前最新能源費用(電費)等六組輸入模組, 建立本研究之能源模擬數據, 其建築基本資訊如下表所示:

表 4.1 建築基本資訊 (Building Basic Information)

分類	設計參數	辦公大樓
建築 規模 及 外殼	建築方位	面朝東北
	空調區域	90,035 m ²
	幾何尺寸	120 m × 25m
	樓層數	地下四層、地上十層
	位置,經緯度	新竹,經緯度: N 24.15, E 120.68
	窗戶玻璃熱傳透率	U 值: 6.92 W/ m ² °K
	玻璃面積百分比	26.4 %
	屋頂隔熱狀況	U值: 1.43 W/ m ² °K
	樓板隔熱狀況	U值: 1.92 W/ m ² °K
	外牆建材	補強框架帷幕牆
空調	溫度設定	夏季(含春、秋及冬季) : 25°C
	設備型式	冰水機組及可變風量空調系統 詳表4.5 空調設備表
	設備效率	符合 ASHRAE Standard 90.1-2007
	容量設計	安全係數: 1.1
	通風設計	符合 ASHRAE Standard 62.1-2007
	外氣置換	符合 ASHRAE Standard 62.1-2007洩漏量

設定	負荷設定	依據 ASHRAE Fundamental
	人員密度	詳表4.3內部負載表
	運作時程	詳表4.3運作時程表
	換氣量	0.4
照明	照明密度	詳表4.3內部負載表
	自動控制	Yes
能源	電費	詳表3.8 時間電價(二段式需量契約)
其他	設備密度	詳內部負載表

1. 模擬資料輸入

本研究首先依建築平面及立面圖，以及外牆及內裝的幾何尺寸，包含外牆帷幕、窗戶玻璃、內部隔牆、門扇及樓板等材質，選定適切之熱傳透率 U 值，表 4.2 所列為外牆及內裝模擬資料，圖 4.3 及 4.4 所示為虛擬之三維建築模型。

表 4.2 建築外牆及內裝資訊 (Building Envelop Information)

項目	平均窗玻 熱傳透率 U 值(W/ m ² °K)	平均外牆 熱傳透率 U 值(W/ m ² °K)	窗玻 面積 (m ²)	外牆 面積 (m ²)	窗玻/ 外牆 (%)
一．外牆部份					
東北	6.92	0.70	3,453	5,356	64%
東南	6.92	0.70	556	1,550	36%
西南	6.92	0.70	124	5,480	2%
西北	6.92	0.70	471	1,314	36%
外牆	6.92	0.70	5,075	15,014	34%
二．內裝部份					
項目	平均熱傳透率 U 值(W/ m ² °K)		面積 (m ²)		
屋頂	1.43		4,263		
內牆	0.30		105,634		
天花	2.84		45,928		
樓板	0.30		4,870		

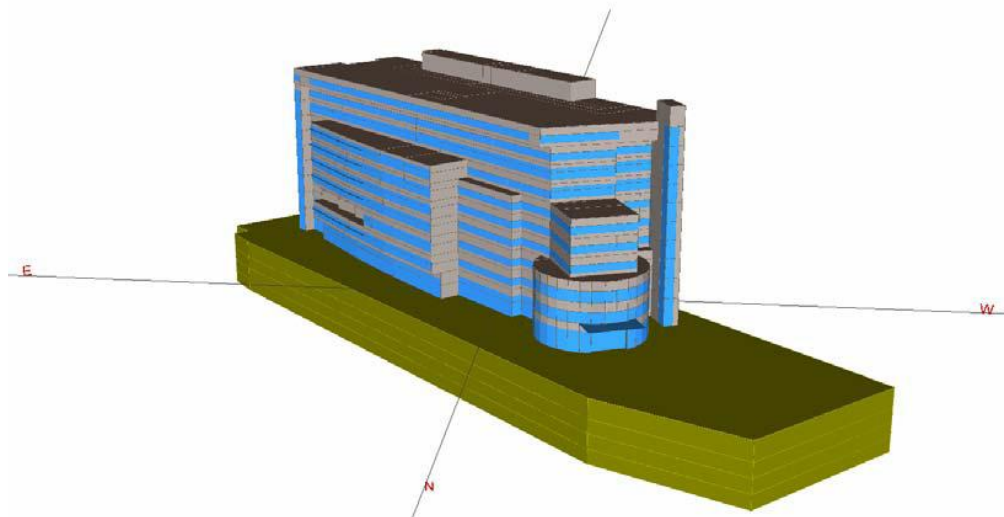


圖 4.3 辦公室大樓三维的建築模型(東北面向)

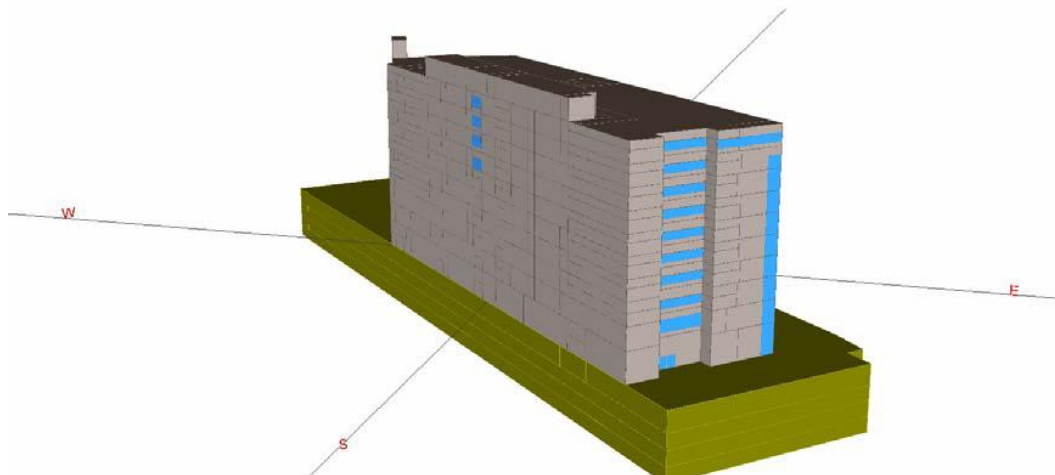


圖 4.4 辦公室大樓三维的建築模型（西南面向）

完成建築資料及虛擬三維模型後，接著需定義建築內部負載狀況，本研究主要參考 ASHRAE Standard 90.1-2007、ASHRAE Standard 62.1-2007 之人員密度及負載建議值，依辦公大樓區域之劃分，依序定義及鍵入空間名稱、所佔面積、人員密度以及室內之照明、負載耗能等，表 4.3 所列為各空間之內部負載表。

表 4.3 辦公大樓建築內部負載表 (Building Internal Load)

空間名稱 (No#)	面積 (m ²)	人員 (People)	照明 (W/m ²)	設備 (W/m ²)
1FL 大廳, 餐廳	4,870	286	13/8	25/35
2FL 電腦機房, 演講廳	5,078	165	25/10	150/35
3FL 辦公室	4,962	225	11	100/35
4FL 辦公室	4,824	219	11	100/35
5FL 辦公室	4,823	219	11	100/35
6FL 辦公室	4,825	219	11	100/35
7FL 辦公室	4,515	205	11	100/35
8FL 辦公室	3,884	176	11	250/35
9FL 辦公室	3,884	176	11	250/35
10FL 辦公室	4,458	193	11	250/35
屋頂層平面	4,263	-	-	-

另外，以主要之人員（上班時間）及設備、照明使用時間為基準，需定義其週間工作日及假日之運作時程及比例，表 4.4 為相關之運作時程，以該表逐時百分比模擬全年之運作狀況，據以累計全年建築耗能值。

表 4.4 辦公大樓運作時程表(Operation Schedule)

運作時程 (人員、設備、照明)												
週間工作日: 週一 ~ 週五												
時間	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
比例	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.5	0.7	0.8	0.5
時間	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
比例	0.5	1	1	1	1	1	1	1	0.8	0.3	0.2	0.2
假日: 週六, 週日, 國定假日												
時間	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
比例	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.6	0.6	0.6	0.3
時間	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
比例	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

本案例之建築耗能主要為空調系統，次之為照明及附屬電力設備；空調系統關設備規格如表 4.5 所列，區分為主機水側（Water-side）：包含冰水主機（Chiller）、冷卻水塔（Cooling tower）、泵浦（Pump）等主要設備；以及負載空氣側（Air-side）：包含空調箱（Air-Handling Unit）、可變風量系統（Variable Air Volume）等空調器具。

表 4.5 空調主要設備規格表（HVAC Equipment List）

設備名稱	編號	容量	耗能	效率
冰水主機	CHR-1,2	1,000 R.T	1,152 kW	COP = 6.1
冷卻水塔	CTR-1,2	1,250 Tons	60 kW	-
冰水泵浦	CHP-1,2	545 CMH	180 kW	81%
冷卻泵浦	CWP-1,2	680 CMH	150 kW	80%
空調箱	AHU-1~28	60,000 CMH	1,104 kW	75%
可變風量	VAV-001~ 421	1,200 CMH	190kW	-

2. 屋頂層熱傳透率 U 值

以 e QUEST 分析屋頂建綠屋頂與傳統屋頂之空調負載，主要差異為屋頂層熱阻值 R-value 之不同，依據本案例所用建材厚度及內外空氣膜層熱阻計算，如表 4.6 傳統型屋頂及綠屋頂熱傳透率 U 值列表所示：傳統型屋頂為 RC 結構樓板、防水襯墊以及上層固定之隔熱用透水磚，薄層型綠屋頂則假設以相同屋頂層構件，再額外加上防水/保護層、植栽生長座（含儲、排水功能）、10 公分厚度之輕質土壤介質以及植栽草皮所構成；密集型近似於薄層型綠屋頂，唯土壤介質為一般壤土，以輕質疏水石、HDPE 導水板為排水層，以及種植小型灌木為綠色植栽。利用總熱傳透率 U 值的計算公式 3.1，薄層型綠屋頂其估算之熱傳透率較傳統屋頂（0.62 /1.39 w/m². °K）大幅降低 55%，密集型則及 83%（0.24 /1.39w/m². °K），單以此屋頂層之節能效益而言，綠屋頂之隔熱有助於降低夏季高溫時之空調負載。

表 4.6 傳統型屋頂及綠屋頂熱傳透率 U 值(1)

構造	組成	厚度 dx [m]	熱傳係數 K [W/m ² K]	熱阻值 R [(m ² K)/W]	熱傳透率 U=1/ΣR [W/(m ² K)]
傳統型屋頂	外氣膜	-	23.00	0.04	1.39
	輕質透水磚	0.05	0.17	0.29	
	PU 防水氈	0.002	0.05	0.04	
	油毛氈防水層	0.01	0.11	0.09	
	RC 結構樓板	0.15	1.40	0.11	
	內氣膜	-	7.00	0.14	
薄層型綠屋頂	外氣膜	-	23.00	0.04	0.62
	覆地植物	-	-	0.36	
	植栽墊/輕質泥土	0.1	0.47	0.21	
	過濾層(抗草酸不織布)	0.01	0.044	0.23	
	PP 生長座(1). PP 儲水板	0.01	0.22	0.05	
	(2). 水/靜止	0.03	0.60	0.05	
	輕質透水磚	0.05	0.17	0.29	
	PU 防水氈	0.002	0.05	0.04	
	油毛氈防水層	0.01	0.11	0.09	
	RC 結構樓板	0.15	1.40	0.11	
	內氣膜	-	7.00	0.14	
密集型綠屋頂	外氣膜	-	23.00	0.04	0.24
	樹木/ 矮樹，灌木	-	-	1.61	
	土壤層(壤土)	0.3	1.05	0.29	
	過濾層(抗草酸不織布)	0.01	0.044	0.23	
	輕質疏水石	0.1	0.10	1.00	
	保護層(抗草酸不織布)	0.01	0.044	0.23	
	HDPE 導水板	0.01	0.42	0.02	
	輕質透水磚	0.05	0.17	0.29	
	PU 防水氈	0.002	0.05	0.04	
	油毛氈防水層	0.01	0.11	0.09	
	RC 結構樓板	0.15	1.40	0.11	
	內氣膜	-	7.00	0.14	

資料來源： Wong *et al.* (2003) ；內政部營建署（100 年）

3. 模擬結果：

依上述主要數據資料及屋頂熱傳透率 U 值輸入 eQUEST 電腦模擬程式，首先模擬傳統型屋頂之結果作為比較基準，本研究以全年室內溫度 25℃為空調設計基準，冬季室內溫度若低於 25℃則不計空調負載。結果如表 4.7 所列，圖 4.5 所示為各項負載所佔比例，以下重點說明所得結果：

- a. 各月份空調負載量因外氣狀況、統計天數、運作時程表週間工作日以及假日所佔天數比率而有所差異。
- b. 屋頂層空調負載以夏季六至八月為尖峰期（14,466 ~20,208 kWh）。
- c. 空調負載以辦公大樓內設備發熱量（電腦、網路主機、事務機器..等）為主，如圖 4.5 所示，約佔屋頂層空調負載之 42%。
- d. 屋頂熱傳量 68,892(kWh)，如圖 4.5 所示，約佔屋頂層空調負載之 9%。

表 4.7 eQUEST 模擬估算之傳統型屋頂空調負載量（kWh）

月份	外牆 熱傳	屋頂 熱傳	玻璃 熱傳	玻璃 輻射	內牆 熱傳	人員 顯熱	人員 潛熱	照明 發熱	設備 發熱	滲透 顯熱	滲透 潛熱
1	81	0	0	2,100	4,909	8,248	5,510	5,775	27,148	0	266
2	99	0	0	2,379	4,618	6,245	4,181	4,223	21,932	1	278
3	159	1	0	2,772	5,460	8,566	5,717	6,029	27,832	3	306
4	613	453	17	3,400	5,616	8,571	5,685	6,072	27,552	18	427
5	1,501	7,373	169	4,115	6,179	8,092	5,345	5,643	26,845	71	862
6	2,287	14,466	528	5,601	6,060	8,261	5,490	5,823	26,894	229	1,475
7	2,955	20,208	707	5,907	6,277	8,951	5,930	6,382	28,676	192	1,188
8	2,769	17,721	657	5,255	6,270	8,370	5,545	5,873	27,438	175	1,106
9	1,625	7,303	219	3,644	5,992	8,284	5,490	5,851	26,943	68	821
10	867	1,367	116	3,052	6,013	8,670	5,730	6,136	28,074	93	1,847
11	188	0	0	2,736	5,433	8,218	5,481	5,760	26,790	3	511
12	97	0	0	2,160	5,140	8,876	5,915	6,292	28,498	1	470
總計	13,240	68,892	2,414	43,119	67,966	99,353	66,019	69,859	324,624	852	9,559

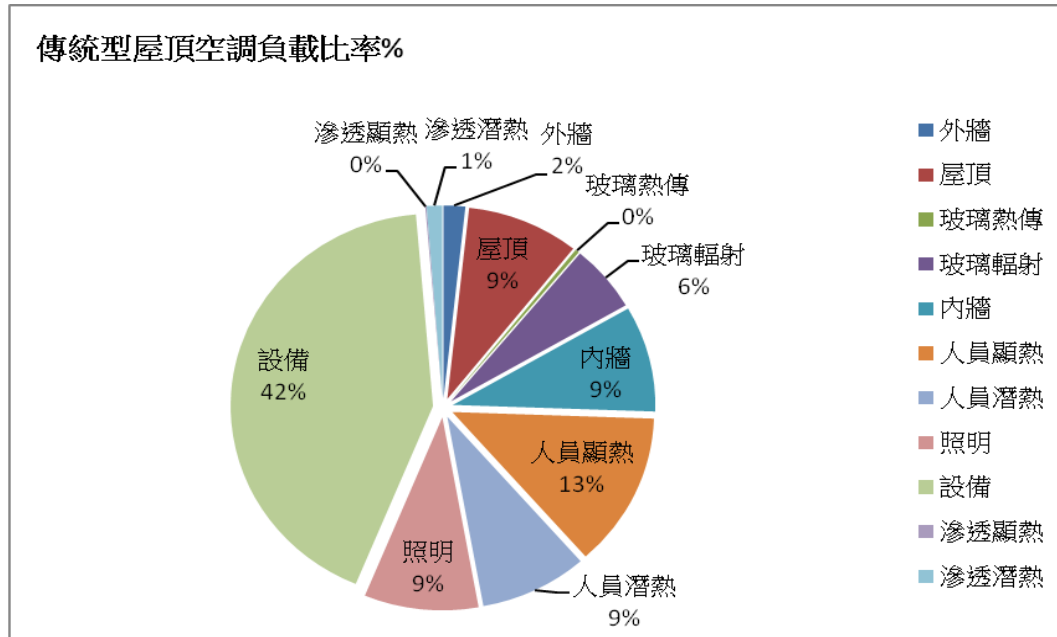


圖 4.5 傳統型屋頂層空調負載比率

4. 節能效益：

以傳統型屋頂空調負載耗能為比較基準，再以表 4.6 所估算的薄層、密集型綠屋頂熱傳透率 U 值分別輸入電腦模擬程式，所得結果如表 4.8 及圖 4.6 所示，以綠屋頂之全年度節能總量而言，薄層型綠屋頂之節能效益為 37,983 kWh/yr)；密集型為 56,848 (kWh/yr)，相較於傳統型屋頂可節能達到 55% 以及 83%，全年節能效益較佳的部份，主要是在夏季約六至八月份，以傳統型屋頂空調負載耗能為比較基準之節能效益計算結果如表 4.9 及圖 4.7 所示，夏季期間各月份佔全年總節能量約 21.0~29.3%。

表 4.8 eQUEST 模擬傳統及綠屋頂之各月份熱傳量(kWh)

月份	傳統型 屋頂	薄層型 綠屋頂	密集型 綠屋頂
1	0	0	0
2	0	0	0
3	1	0	0
4	453	172	60
5	7,373	3,290	1,278
6	14,466	6,460	2,510
7	20,208	9,108	3,558
8	17,721	7,984	3,118
9	7,303	3,311	1,297
10	1,367	584	222
11	0	0	0
12	0	0	0
總計	68,892	30,909	12,043
節能效益 (%)	-	55%	83%

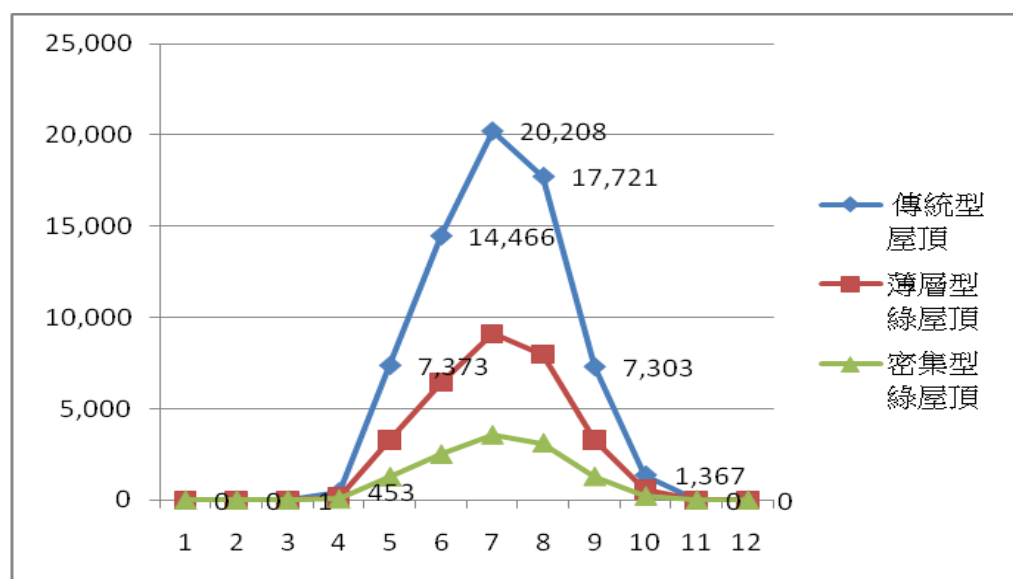


圖 4.6 eQUEST 模擬傳統及綠屋頂之各月份熱傳量(kWh)

表 4.9 eQUEST 模擬綠屋頂之各月份節能效益

月份	薄層型 綠屋頂		密集型 綠屋頂	
	(kWh)	(%)	(kWh)	(%)
1	0	0%	0	0%
2	0	0%	0	0%
3	1	0.0%	1	0%
4	281	0.7%	392	0.7%
5	4,082	10.7%	6,094	10.7%
6	8,007	21.1%	11,957	21.0%
7	11,100	29.2%	16,650	29.3%
8	9,737	25.6%	14,603	25.7%
9	3,992	10.5%	6,006	10.6%
10	782	2.1%	1,145	2.0%
11	0	0%	0	0%
12	0	0%	0	0%
總計	37,983	100%	56,848	100%

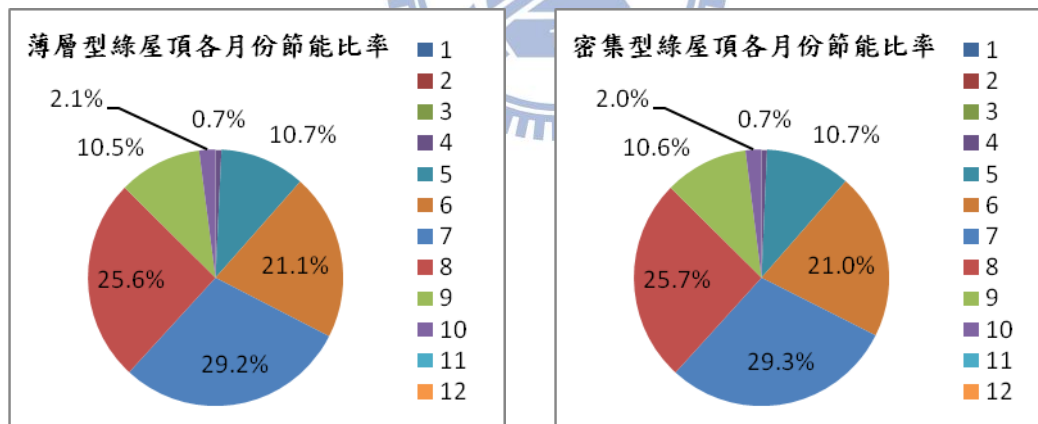


圖 4.7 eQUEST 模擬綠屋頂之各月份節能比率

4.2.2 熱傳導係數法

採用 R-value 推估綠屋頂的總熱傳透率 U 值，依據該區域氣候及氣象資料，依據熱通量 Q 的適用計算公式 3.2，估算綠屋頂所形成的隔熱層對

空調負荷之差異，以計算節能效益之結果：

1. 案例參數：

(1) 熱傳透率 U 值：相關屋頂構件及綠化層之 R-value 詳如表 4.6 所示。依熱傳透率 U 值的適用計算公式 3.1，推算傳統屋頂、薄層式、以及密集型綠屋頂之熱傳透率 U 值分別是 1.39、0.62 及 0.24 $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ 。

(2) 綠屋頂面積：依 4.1 節綠屋頂平面圖估算，約為 4,263 平方公尺。

(3) 溫差 (ΔT)：本研究利用區域之逐時氣象資料，依辦公室舒適度考量設定 25°C 為冷氣運轉之溫度條件，估算案例所在區域(新竹市)之外氣及室內全年度之溫差數量；詳細計算方式如下一點之說明。

2. 外氣溫差：熱傳導係數法係採用新竹市「標準氣象年」(TMY2) 建立之逐時氣象資料，其取據十年間各月份的氣象資料，從氣象要素中依權重選取出具代表性的平均月，再將十二個月結合成一個氣象年，作為建築能源模擬及估算所用(林等, 94 年)，圖 4.8 為估算之各月平均氣溫及超過空調設定點 25°C 之溫差趨勢圖，而圖 4.9 為新竹市各月總溫差數量統計圖。若與最近之新竹測站 2012 全年氣象資料(中央氣象局，101 年)比較其總溫差數量，其結果如表 4.10 所列，因「標準氣象年」(TMY2) 其特性為長期氣候之平均狀態、並排除異常氣候所造成的影響，因此與 2012 全年實際之氣象資料，其估算結果較為平實且數值有較低 8.9% 之差異。

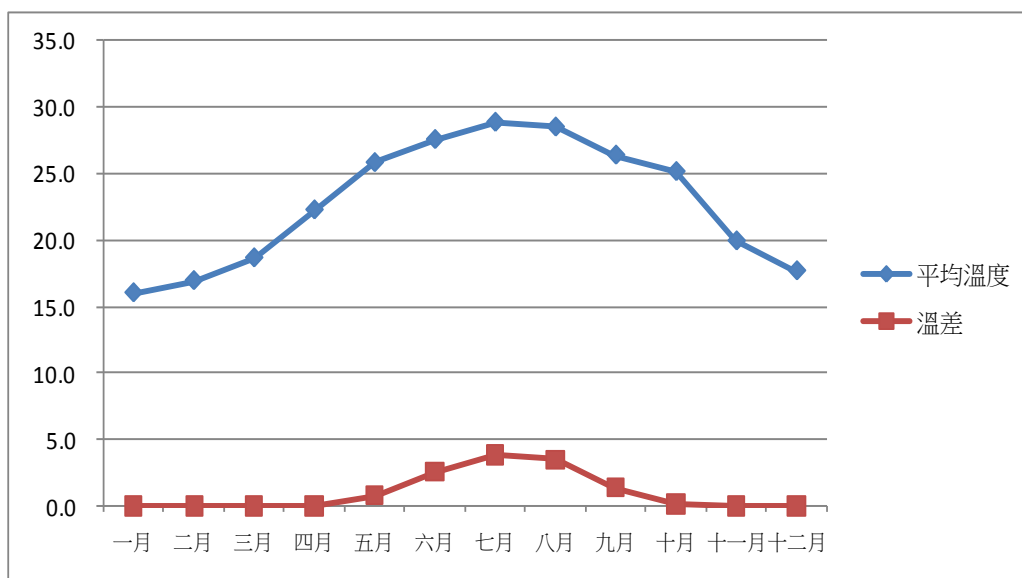
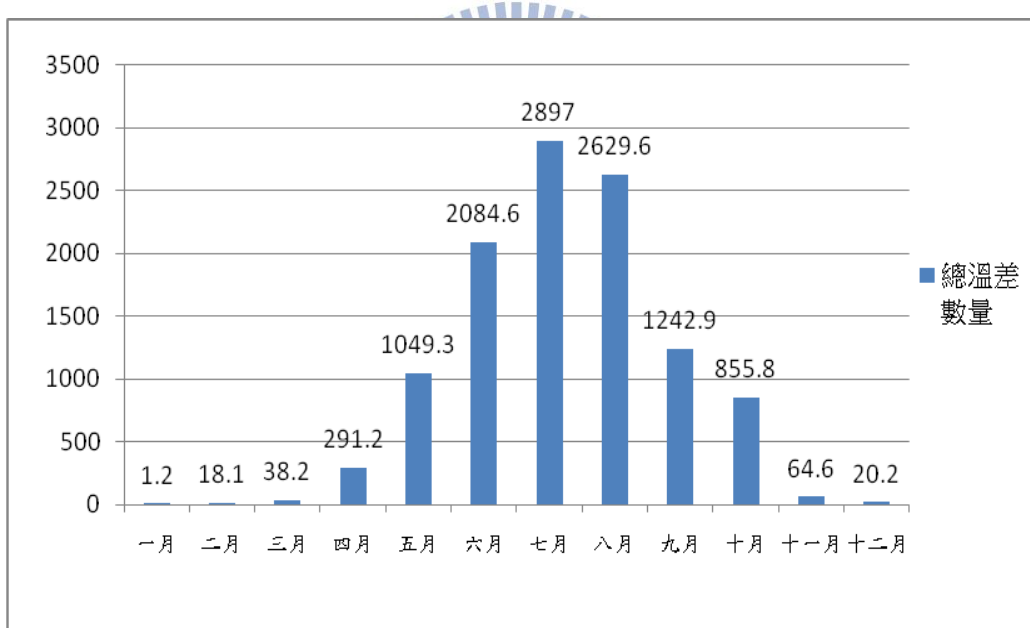


圖 4.8 新竹測站各月平均氣溫及及 25°C 之溫差



月份	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
總溫差數量	1.2	18.1	38.2	291.2	1,049.3	2,084.6	2,897.0	2,629.6	1,242.9	855.8	64.6	20.2

圖 4.9 新竹市各月的總溫差(ΔT)量

表 4.10 氣象數據全年度總溫差數量差異

月份	總溫差數量差異		
	2012 年 新竹測站 氣象資料	電腦模擬法 新竹標準 氣象年	差異
1	0	1.2	1.2
2	3.3	18.1	18.1
3	52.7	38.2	38.2
4	537.2	291.2	291.2
5	1163.6	1049.3	1049.3
6	2048	2084.6	2084.6
7	3493.7	2897	2897
8	2661.6	2629.6	2629.6
9	1615	1242.9	1242.9
10	494.2	855.8	855.8
11	114.2	64.6	64.6
12	5.4	20.2	20.2
總計	12,188.9	11,192.7	996.2

3. 節能效益：本研究採用熱傳導係數法，以熱通量 Q 公式（公式 3.2；內政部營建署，100 年）分別計算傳統屋頂、薄層型以及密集型綠屋頂之熱傳量，傳統屋頂與綠屋頂 U 值如表 4.6 所列，相差為 $0.77 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{K}$ （薄層式）及 $1.15 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{K}$ （密集式），以此估算結果如表 4.11 所列各項節能效益；表 4.12 為薄層及密集型綠屋頂各月份節能量，依據估算之綠屋頂總面積之節能效益：薄層型為 36,845 (kWh/year)；密集型為 54,749 (kWh/year)，相較於傳統式頂之隔熱方式可節能達到 55% 以及 82%，具有相當高之節能效益；參考表 4.13 及圖 4.10 於夏季六至八月期間，相較於傳統型屋頂可顯著降低屋頂層之空調耗能 18.6~25.9%。

表 4.11 熱傳導係數法估算綠屋頂之節能效益

型式	傳統型 屋頂	薄層型 綠屋頂	密集型 綠屋頂
熱傳導值 $U - W/(m^2.K)$	1.39	0.62	0.24
總溫差數量 $\Delta T - (^{\circ}K)$	11,193		
綠屋頂面積 G.R Area - (m^2)	4,263		
總熱傳量 $Q - (kWh / year)$	66,408	29,563	11,659
節能量 ($kWh / year$)	-	36,845	54,749
節能效益(%)	-	55%	82%

表 4.12 熱傳導係數法估算傳統及綠屋頂之各月份熱傳量 (kWh)

月份	總溫差 時數	傳統型 屋頂	薄層型 綠屋頂	密集型 綠屋頂
1	1	7	3	1
2	18	107	48	19
3	38	227	101	40
4	291	1,728	769	303
5	1,049	6,226	2,771	1,093
6	2,085	12,368	5,506	2,171
7	2,897	17,188	7,652	3,018
8	2,630	15,602	6,945	2,739
9	1,243	7,374	3,283	1,295
10	856	5,078	2,260	891
11	65	383	171	67
12	20	120	53	21
總計	11,193	66,408	29,563	11,659

表 4.13 熱傳導係數法估算綠屋頂之各月份節能效益

月份	薄層型 綠屋頂		密集型 綠屋頂	
	(kWh)	(%)	(kWh)	(%)
1	4	0%	6	0%
2	60	0.2%	89	0.2%
3	126	0.3%	187	0.3%
4	959	2.6%	1,424	2.6%
5	3,454	9.4%	5,133	9.4%
6	6,862	18.6%	10,197	18.6%
7	9,537	25.9%	14,171	25.9%
8	8,656	23.5%	12,863	23.5%
9	4,091	11.1%	6,080	11.1%
10	2,817	7.6%	4,186	7.6%
11	213	0.6%	316	0.6%
12	66	0.2%	99	0.2%
總計	36,845	100%	54,749	100%

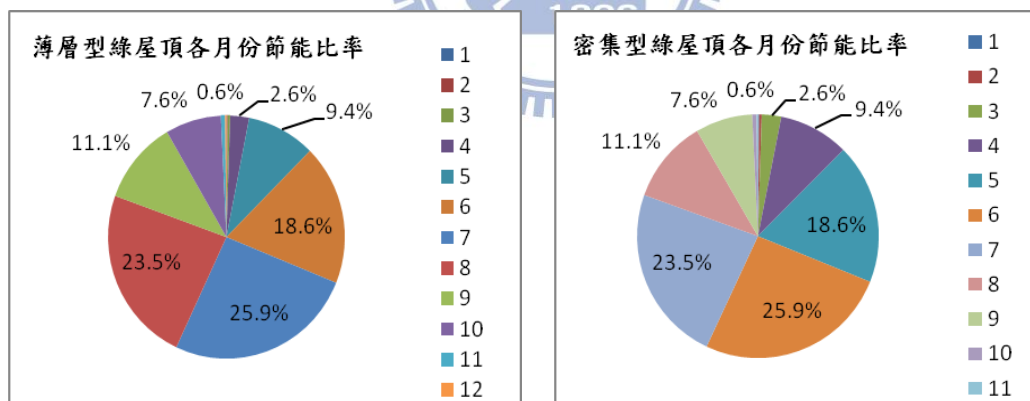


圖 4.10 熱傳導係數法估算綠屋頂之各月份節能比率

4.2.3 節能效益說明

本案例以電腦模擬模式 eQUEST 及熱傳導係數法 U 值估算綠屋頂全年之熱傳量 (kWh/yr) 及節能效益 (kWh/yr；%)，表 4.14 比較所得結果，此兩

項估算方式差異約 3.7%（估算基準-傳統型屋頂：68,892/66,408 kWh/year），以估算之節能效益及比率而言，薄層型綠屋頂皆約為 55%，密集型綠屋頂則分別為 83% 及 82%。雖然 eQUEST 所得結果可能較接近實際情形，但較簡易的熱傳導係數法所得結果仍在可接受的誤差範圍內。

表 4.14 eQUEST 模擬及熱傳導係數法所估算節能效益比較表

估算方法	傳統型 屋頂	薄層型 綠屋頂		密集型 綠屋頂	
	估算 基準 (kWh/yr)	空調 熱傳量 (kWh/yr)	節能量 (kWh/yr; %)	空調 熱傳量 (kWh/yr)	節能量 (kWh/yr; %)
電腦模擬模式 eQUEST	68,892	30,909	37,983	12,043	56,848
			55%		83%
熱傳導係數法 U-value	66,408	29,563	36,845	11,659	54,749
			55%		82%

如同 3.3 節所述，節能效益需由空調熱能換算為實際耗電量，以便後續成本效益估算。傳導係數法是利用系統 COPs 值將空調熱能直接換算為全年度耗電量，如公式 3.4 將空調系統設置容量 (kW) 除以空調所有設備元件耗能(kW)，即可求得系統 COPs 值，表 4.15 為本案例系統 COPs 值之計算結果；而 eQUEST 模擬運用內建設備性能曲線，依外氣狀況及空調設備運轉效率，可逐時自動運算空調熱能及電量，是較為貼近實際運轉狀況之模式。表 4.16 為 eQUEST 及熱傳導係數法估算全年電量之結果，在電力節能部份，薄層型綠屋頂效益為 53 %、55%，密集型綠屋頂則分別為 81% 及 82%。

表 4.15 傳導係數法之空調系統 COPs 值計算

設備名稱	編號	輸出容量	輸入電力	效率
冰水主機	CHR-1,2	1,000 R.T	1,152 kW	COP = 6.1
冷卻水塔	CTR-1,2	1,250 Tons	60 kW	-
冰水泵浦	CHP-1,2	545 CMH	180 kW	81%
冷卻泵浦	CWP-1,2	680 CMH	150 kW	80%
空調箱	AHU-1~28	60,000 CMH	1,104 kW	75%
可變風量箱	VAV-001~ 421	1,200 CMH	190kW	-
空調系統 COPs	All Units	7,032 kW (2,000 R.T) -	2,816kW	2.5

表 4.16 eQUEST 模擬及熱傳導係數法所估算之節能電量比較表

估算方法	傳統型屋頂	薄層型綠屋頂		密集型綠屋頂	
	估算基準 (度電)	空調耗電 (度電)	節能電量 (度電; %)	空調耗電 (度電)	節能電量 (度電; %)
電腦模擬模式 eQUEST	26,068	12,170	13,898	4,836	21,232
			53%		81%
熱傳導係數法 U-value	26,563	11,825	14,738	4,664	21,900
			55%		82%

4.3 溫室氣體減量

CGR 溫室氣體減量之效益部份主要依 3.3.2 節所說明的方法進行，分別是降低傳統電力需求所轉換的二氧化碳減量，以及綠屋頂植栽所產生之碳固定量及二氧化碳吸收量，以下分為案例參數、節能之減碳效益、植栽之減碳效益及計算結果與說明：

4.3.1 節能之減碳效益

1. 電腦模擬模式：將該法所估算節能結果：薄層型為 13,898 kWh/yr、密集型為 21,232 kWh/yr 與電力的排放係數 0.536 kg eCO₂/度電（經濟部能源局，100 年）相乘，即可得綠屋頂每年節能減碳效益分別為薄層型 7,449 kg eCO₂/yr、密集型 11,380 kg eCO₂/yr。
2. 熱傳導係數法：依電力排放係數 0.536 kg eCO₂/度電與依該法所估算綠屋頂每年的節能結果：薄層型 14,738 kWh/yr、密集型為 21,900 kWh/yr 分別相乘，即可得薄層型為 7,900 kg eCO₂/yr、密集型為 11,738 kg eCO₂/yr，約為電腦模擬模式所估算減碳效益結果的 1.03 倍。

上述兩種模式所估算之減碳效益結果，彙整如表 4.17 所示。

表 4.17 eQUEST 及熱傳導係數法所估算節能之減碳效益

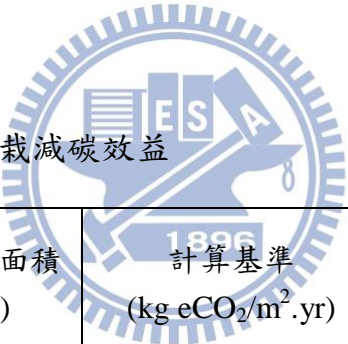
估算方法	轉換基準	減碳效益 (kg eCO ₂ /yr)	
	100 年電力 排放係數	薄層型 綠屋頂	密集型 綠屋頂
電腦模擬模式 eQUEST	0.536 (kg eCO ₂ /度電)	7,449	11,380
熱傳導係數法 COP 計算		7,900	11,738

4.3.2 植栽之減碳效益

依 3.3.2.2 節所述方法，以類似綠建築綠化量的評估方法，將植栽種類及綠覆面積，作為簡易之二氧化碳固定效果的計算，如表 4.18 所示說明如下：

1. 薄層型綠屋頂：以表 3.5 類似之草花、自然野草地、草坪之吸附碳能力 $0.5 \text{ kg eCO}_2/\text{yr}$ 計算，與綠屋頂之面積 $4,263\text{m}^2$ 相乘，即可得薄層型綠屋頂之植栽減碳效益為 $2,132 \text{ kg eCO}_2/\text{yr}$ 。
2. 密集型綠屋頂：將綠屋頂之面積 $4,263\text{m}^2$ ，與表 3.5 類似之灌木之吸附碳能力 $7.5 \text{ kg eCO}_2/\text{yr}$ 相乘，即可得密集型綠屋頂之植栽減碳效益為 $31,973 \text{ kg eCO}_2/\text{yr}$ 。

表 4.18 綠屋頂估算之植栽減碳效益



估算方法	綠屋頂面積 (m^2)	計算基準 ($\text{kg eCO}_2/\text{m}^2.\text{yr}$)	減碳效益 ($\text{kg eCO}_2/\text{yr}$)
薄層型 綠屋頂	4,263	0.5 (草花花圃、自然野 草地、草坪)	2,132
密集型 綠屋頂		7.5 (灌木)	31,973

4.3.3 減碳效益說明

上述計算結果彙整如表 4.19，薄層型綠屋頂植栽相較於節能之減碳效益僅約略為 27~29%，若密集型綠屋頂能全面積植灌木，則節能之減碳效益可高達 2.7~2.8 倍。

表 4.19 綠屋頂估算之節能與植栽減碳效益比較表

估算方法	節能減碳效益 (kg eCO ₂ /yr)		植栽減碳效益 (kg eCO ₂ /yr)	備註
	電腦模擬模式	熱傳導係數法		
薄層型 綠屋頂	7,449	7,900	2,132	27~29%
密集型 綠屋頂	11,380	11,738	31,973	2.7~2.8 倍

4.4 截水

本節主要依 3.3.3 節所說明之方法評估企業設置綠屋頂之截水效益。綠屋頂的截水效益依序為統計全年度逐時降雨量、評估降低之雨水地面逕流量，以下分別說明。

4.4.1 逐時降雨量統計

本研究依大氣資料庫新竹測站 101 年逐時降雨資料（中央氣象局, 101 年）估算，統計各月份降雨量如表 4.20 所示，全年度降雨量總計為 2,741.2 mm。



表 4.20 101 年新竹測站逐時降雨資料各月份統計表

月 份	降 雨 量 (mm)
1	140.6
2	228.9
3	96.6
4	346.6
5	251.3
6	427.2
7	74.6
8	608.5
9	82.3
10	29.3
11	308.4
12	146.9
總 計	2,741.2

4.4.2 截水量估算

本研究採用廖 (101 年)所歸納出之綠屋頂基值截水及排水板截水經驗公式，主要依式 3.7、3.8a 及 3.8b 估算，主要降低雨水地面逕流效益結果說明如下：

1. 估算基準：

(1) 綠屋頂面積：4,263 m²

(2) 逐時降雨資料：大氣資料庫新竹測站 101 年逐時降雨資料估算，全

年度降雨量總計為 2,741.2 mm。

(3) 土壤基質厚度：本研究採用薄層型 10 cm、密集型 30cm 作為估算之基準。

2. 降低雨水地面逕流效益：如表 4.21 所列，依式 3.7 及 3.8a 估算的基質年截水深度(ΔSW_s)薄層型為 0.284m、密集型為 0.852m，而依式 3.8b 計算之排水板年截流深度 (ΔSW_d)約為 0.087m，將此兩值加總薄層型為 0.371m、密集型為 0.939m，並與本案例辦公大樓綠屋頂面積 4,263m²相乘，可得每年綠屋頂的截水量薄層型為 1,583m³、密集型為 4,004m³。

表 4.21 薄層及密集型綠屋頂截水效益估算表

參數	薄層型	密集型
土壤基質厚度 (S_D) (mm)	100	300
新竹市 2010 年降雨量 (mm)	2741.2	2741.2
基質年截流深度 (ΔSW_s) (m)	0.284	0.852
排水板年截流深度 (ΔSW_d) (m)	0.087	0.087
綠屋頂年截流深度 (m)	0.371	0.939
綠屋頂面積 (m ²)	4,263	4,263
總截水量 (m ³ /yr)	1,583	4,004

4.5 綠屋頂經濟效益

本節主要依 3.3.5 節所說明之方法評估企業綠屋頂建置之成本效益分析，以下分別以節能、減碳、截水等經濟效益及企業綠屋頂成本效益分析分別說明之。

4.5.1 節能經濟效益

本研究將 4.2 節所估算的電腦模擬模式 eQUEST 節能效益：薄層型 13,898 kWh/m²/yr、密集型 21,232 kWh/m²/yr，以及熱傳導係數法節能效益：薄層型 14,738 kWh/m²/yr、密集型 21,900 kWh/m²/yr，乘上台電目前電價平均每度電約台幣 2.67 元(台灣電力公司，101 年)，可得綠屋頂節能經濟效益如表 4.22 所示。

表 4.22 綠屋頂節能經濟效益估算表

估算方法	估算基準 (NT\$/ kWh)	節能經濟效益 (NT\$/ yr)	
		薄層型綠屋頂	密集型綠屋頂
電腦模擬模式 eQUEST	2.76	38,358	58,601
熱傳導係數法 COP 計算		40,677	60,443

4.5.2 減碳經濟效益

將本研究 4.2 節估算之電腦模擬模式 eQUEST 節能量換算以及植栽吸收能力，減碳效益估計每年分別可減少薄層型 9,581 kg eCO₂/yr、密集型 43,353 kg eCO₂/yr，而依熱傳導係數法節能量換算以及植栽吸收能力，減

碳效益估計每年分別可減少薄層型 10,032 kg eCO₂/yr、密集型 43,711 kg eCO₂/yr，以上減碳效益分別與蕭 (98 年) 的碳稅建議值 750 NTD/ton eCO₂ 相乘，即可得電腦模擬模式 eQUEST 每年節省碳稅，估計分別可減少薄層型 7,186 NT\$/yr、密集型 32,515 NT\$/yr，以及熱傳導係數法每年節省碳稅，估計分別可減少薄層型 7,524 NT\$/yr、密集型 32,783 NT\$/yr，如表 4.23 所示估算結果。唯國內尚未實施相關碳稅徵收法則，須俟日後公佈實施才會產生此效益。

表 4.23 綠屋頂減碳經濟效益估算表

估算方法	估算基準 (NT\$/ton eCO ₂)	減碳經濟效益 (NT\$/ yr)	
		薄層型綠屋頂	密集型綠屋頂
電腦模擬模式 eQUEST	750	7,186	32,515
熱傳導係數法 U-value		7,524	32,783

4.5.3 截水經濟效益

此部分以本研究 4.4 節截水估算結果，並依國外的雨水下水道使用費 (Stormwater fee) 來估算截水經濟效益，主要是採用美國華盛頓州目前現有之雨水下水道使用費費率 0.003 US\$/m²/yr (DDOE, 2011)，第二部份則採用 Carter and Keeler (2008) 所建議的優惠方案給予的 Stormwater credit，抵用費率為 0.04 US\$/m²/yr，各項費率分別與中央銀行目前台幣兌換美元的匯率為 29.730 元相乘，即得綠屋頂截水經濟效益如表 4.24 所示。此項截水經濟效益概以綠化面積給予抵減費用，無法區分綠屋頂不同型式之差

別，且所得經濟效益不大。

表 4.24 綠屋頂截水經濟效益估算表

估算方法	估算基準 (NT\$/m ² -yr)	截水經濟效益 (NT\$/yr)	
		薄層型綠屋頂	密集型綠屋頂
Stormwater Fee	0.089	386	386
Stormwater Credit	1.189	5,144	5,144
平均值 (Average)	0.639	2,765	2,765

4.6 企業綠屋頂成本效益分析

本研究主要是探討企業綠屋頂成本效益，針對傳統型屋頂、薄層型、密集型綠屋頂，其於節能、減碳以及截水成本上所展現之實質成本效益，雖國內尚未實施碳稅與雨水下水道使用費，但先行分析此兩項之成本效益，以作為未來企業對綠屋頂的評估依據，以下分別說明之。

4.6.1 傳統屋頂與綠屋頂之年均成本

傳統屋頂與綠屋頂之年均成本：依本研究 3.3.4 節的方法估算傳統屋頂與綠屋頂之年均成本，初設成本以葉(101 年)及參考消費者物價指數(行政院主計總處，101 年)去年 CPI 指數 1.4%作為估價基準，如表 3.7 傳統屋頂與綠屋頂初設成本估算表，傳統屋頂為 1,550 NT\$/m²，薄層型綠屋頂為 4,271 NT\$/m² (1,550 + 2,721)，密集型為 6,175 NT\$/m² (1,550 + 4,625)，

維護費用假設二種屋頂相近，故未納入成本計算，更新年限以傳統屋頂 10、15 及 20 年為更新期限分別計算年均成本，綠屋頂假設延長屋頂更新年限至 40 年，更新成本主要是換防水層以上組件，由於考量會增加拆除及廢棄物處理問題，故仍以初設成本費用計算，折現率 i 訂為 4.25%（經濟部能源局，100 年）、通貨膨脹率 f 設為 2%、不含通貨膨脹率的折現率 u 則為 2.21% 作為估算依據，然後依序以公式 3.9、3.10 分別計算傳統型屋頂以及綠屋頂之年均成本，所得結果如表 4.25 所列，薄層型綠屋頂在年均成本上有較佳之優勢，不僅遠低於密集型綠屋頂，僅是後者的 69%，也略低於 10 年更新年限之傳統型屋頂。

表 4.25 傳統屋頂與綠屋頂之年均成本估算表

分類	傳統型 屋頂			薄層型 綠屋頂	密集型 綠屋頂
更新期限 (year)	10	15	20	40	40
初設成本 (NT\$/m ²)	1,550	1,550	1,550	4,271	6,175
維護費用 (NT\$/m ²)	-	-	-	-	-
更新成本 (NT\$/m ²)	1,550	1,550	1,550	4,271	6,175
折現率 (%)	4.25				
單位年均成本 (NT\$/m ² -yr)	241	182	134	224	324
屋頂面積 (m ²)	4,263				
屋頂年均成本 (NT\$/yr)	1,028,699	776,040	570,241	954,396	1,379,863

4.6.2 綠屋頂經濟效益

依 4.5.1~4.5.2 節彙整之節能、減碳、截水等平均之成本效益，如表 4.26 說明：節能部份所佔比率最高約 63-80%，主要貢獻來自於綠屋頂之隔熱效果，減碳部份約佔 15-34%次之，密集型屋頂由於植栽部份假設採用全面積之灌木，因此於植栽減碳部份佔有較高比率，截水部份成本效益則僅佔 3-6%，因僅採用雨水下水道使用費費率以及抵用費率，且依綠化面積計算，因此從截水量來說密集型較薄層型為高，但由於截水效益是依面積計算，故截水效益並無差別。最後總計各項年均效益相互比較，薄層型綠較傳統型每年可節省成本 40,638 NT\$/yr，而密集型綠屋頂每年可節省成本 94,936 NT\$/yr：約為薄層型之 1.9 倍。

表 4.26 企業綠屋頂經濟效益分析估算表

綠屋頂效益分類		各項平均效益 NT\$/ yr, (%)			
		薄層型綠屋頂		密集型綠屋頂	
節能	電腦模擬模式 eQUEST	38,358	39,518 (80%)	58,601	59,522 (63%)
	熱傳導係數法 U-value	40,677		60,443	
減碳	節能轉換 eQUEST	5,587	7,355 (15%)	8,535	32,649 (34%)
	節能轉換 U-value	5,925		8,804	
	植栽部份	1,599		23,980	
截水	Stormwater Fee	386	2,765 (6%)	386	2,765 (3%)
	Stormwater Credit	5,144		5,144	
總 計 (NT\$/ yr)		49,638		94,936	

4.6.3 綠屋頂成本效益分析

依上述二節統計之屋頂年均成本與綠屋頂每年之經濟效益相減，並依傳統型屋頂 10 年、15 年及 20 年等三個不同更新年限估算，可得表 4.27 之成本效益估算表以及表 4.28 成本效益分析表。密集型綠屋頂由於初設成本較高，雖其每年可獲得之效益較高，但整體而言其總計年均成本高於其他型式，且與傳統型屋頂 10 年、15 年及 20 年等三個更新年限比較，每年單位成本皆高出 60、119、167 NT\$/m².yr，明顯不符投資成本效益。薄層型綠屋頂初設成本較為適當，加上每年可望回收之效益，已比 10 年更新年限之傳統型屋頂低 29 NT\$/m².yr，雖然相較於 15 年及 20 年更新年限之傳統型屋頂仍高出 30、78 NT\$/m².yr，但主要是因國內電價較低，加上未考量綠屋頂其他效益，因此選用薄層型綠屋頂較其他型式適切且有正面之意義。

表 4.27 傳統屋頂與綠屋頂成本效益估算表

分類	傳統型 屋頂			薄層型 綠屋頂	密集型 綠屋頂
更新期限 (year)	10	15	20	40	40
屋頂年均成本 (NT\$/yr)	1,028,699	776,040	570,241	954,396	1,379,863
綠屋頂效益 (NT\$/yr)	-	-	-	-49,638	-94,936
總成本 (NT\$/yr)	1,028,699	776,040	570,241	904,758	1,284,927
單位成本 (NT\$/m ² .yr)	241	182	134	212	301

表 4.28 傳統屋頂與綠屋頂成本效益分析表

分類	更新期限 (year)	傳統型屋頂 (NT\$/m ² .yr)		
		10	15	20
薄層型綠屋頂 (NT\$/m ² .yr)	40	-29	30	78
密集型綠屋頂 (NT\$/m ² .yr)	40	60	119	167

4.6.4 參數不確定分析

如上節所述，年均成本係採用假設之折現率 i 與不含通貨膨脹率之折現率 u 所估算，若因未來經濟趨勢發生變化，如能源短缺造成通貨膨脹及電價高漲等，或估算方法及參數存在誤差，皆有可能影響整體評估結果，具有相當之不確定性。因此，針對重要之參數如通貨膨脹率 f 、不含通貨膨脹率之折現率 u ，依表 4.29 之不同參數組合變化，比較依其所估算之年均成本。

表 4.29 通貨膨脹率 f 與不含通貨膨脹率之折現率 u 參數組合表

項次	參數組合	
	通貨膨脹率 (f)	不含通貨膨脹率之折現率 (u)
1	$f = 3.5$	$u = 2.7$
2	$f = 3.5$	$u = 1.4$
3	$f = 3.5$	$u = 0.7$
4	$f = 2.0$	$u = 2.7$
5	$f = 2.0$	$u = 1.4$
6	$f = 2.0$	$u = 0.7$
7	$f = 1.4$	$u = 2.7$
8	$f = 1.4$	$u = 1.4$
9	$f = 1.4$	$u = 0.7$

依上述重要參數採用不同組合所估算傳統型屋頂、薄層型與密集型綠屋頂之年均成本如表 4.30 所列，並以圖 4.11、4.12 說明通貨膨脹率 f 、不含通貨膨脹率之折現率 u 參數組合與年均成本之關係如下：

1. 圖 4.11 虛線紅框處為本案例目前採用之參數組合 ($u=2$, $f=2.21$)，當參數通貨膨脹率 f 值變化時，傳統型屋頂、薄層型及密集型綠屋頂之年均成本亦隨之正向波動，但並未改變年均成本比較結果之順序。
2. 圖 4.12 當參數不含通貨膨脹率之折現率 u 值變化時，傳統型屋頂、薄層型及密集型綠屋頂之年均成本亦隨之正向波動，但薄層型及密集型綠屋頂之年均成本變化量較大，於 u 值較低等於 0.7 時，薄層型綠屋頂之年均成本可低於 15 年更新年限之傳統型屋頂。

3. 綜合上列所述，在傳統型屋頂以及綠屋頂之年均成本估算上，不含通貨膨脹率之折現率 u 值降低時，薄層型及密集型綠屋頂之年均成本亦隨之降低，對於年均成本估算具有較高之不確定性。

表 4.30 f 值、 u 值參數組合與年均成本估算表

屋頂型式 / 更新期限(yr)		傳統型 屋頂 (10 年)	傳統型 屋頂 (15 年)	傳統型 屋頂 (20 年)	薄層型 綠屋頂 (40 年)	密集型 綠屋頂 (40 年)
f 值	u 值	年均成本 (NT\$/ yr)				
1.40%	0.70%	889,747	667,715	460,384	678,464	980,921
1.40%	1.40%	912,265	685,841	487,789	764,885	1,105,868
1.40%	2.70%	954,937	722,401	540,698	938,844	1,357,377
2.00%	0.70%	985,778	739,782	510,073	751,691	1,086,792
2.00%	1.40%	1,005,551	755,973	537,669	843,100	1,218,951
2.00%	2.21%	1,028,699	776,040	570,241	954,396	1,379,863
2.00%	2.70%	1,043,163	789,144	590,653	1,025,583	1,482,786
3.50%	0.70%	1,246,960	935,788	645,217	950,852	1,374,739
3.50%	1.40%	1,256,714	944,798	671,967	1,053,687	1,523,417
3.50%	2.70%	1,276,796	965,885	722,939	1,255,278	1,814,878

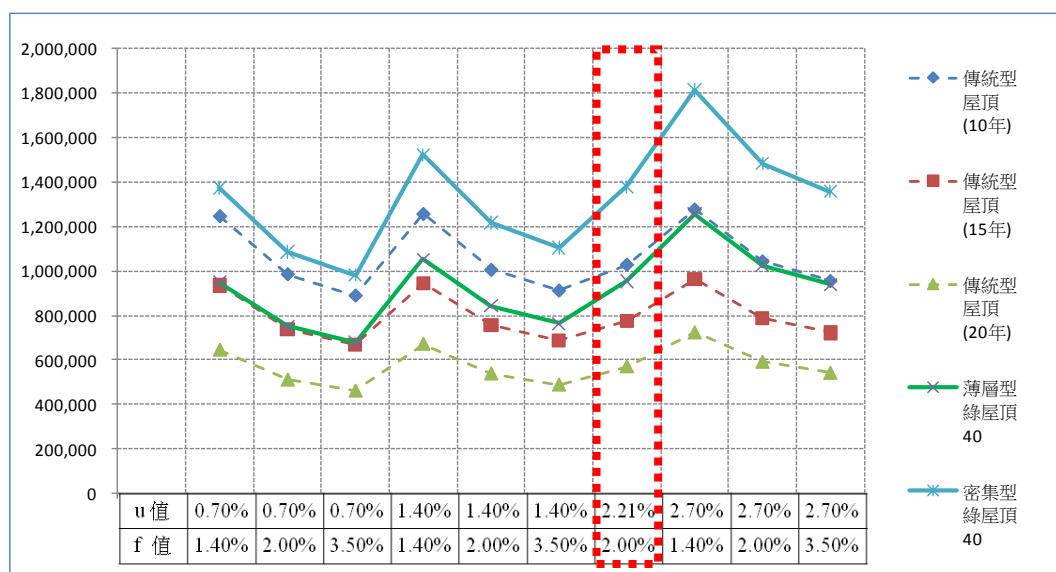


圖 4.11 u 值、f 值參數組合與年均成本關係圖(1)

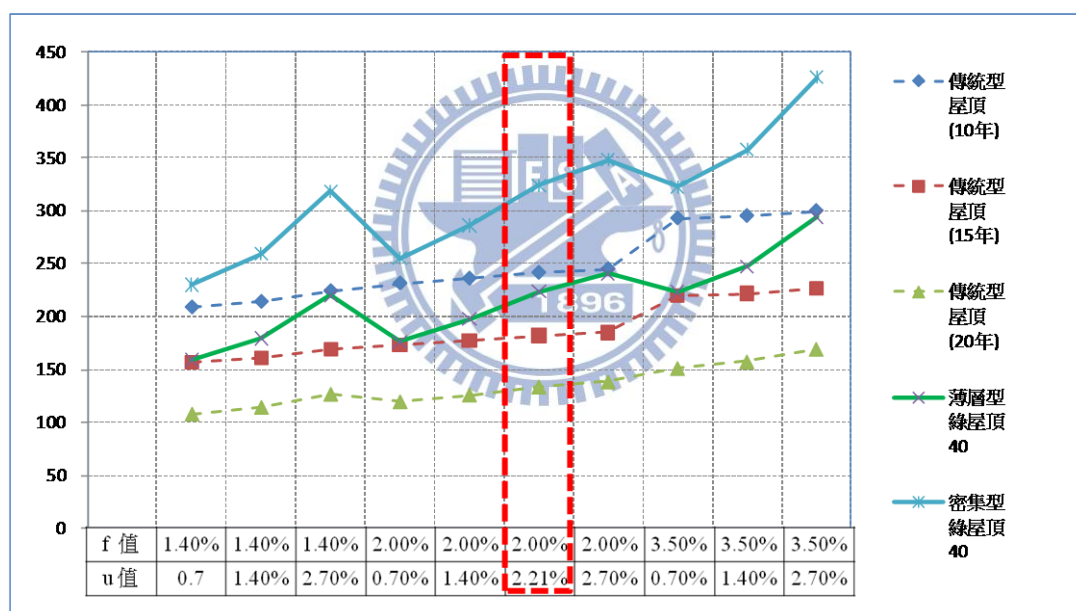


圖 4.12 u 值、f 值參數組合與年均成本關係圖(2)

另外，電價能顯著影響綠屋頂的節能效益及成本估算，尤以國際能源價格與海運成本大幅震盪，國內自 1981 年後電價調漲幅度不大，僅於 2006 年、2008 年（李，100 年）以及 2012 年作適度調整，與國際電價比較，國內電價水準仍屬於偏低範圍，未來因應實際發電成本及電能自由化，電價預期將逐漸調整趨近國際電價水平，因此以國外主要國家電價為依據，以

目前國內平均電價 2.67 NT\$/度電- kWh 與國外最高電價 8.23 NT\$/度電- kWh (如表 4.31 所列)，採用 3 級等距分別為 4.52 NT\$/度電- kWh、6.38 NT\$/度電- kWh、8.23 NT\$/度電- kWh，估算電價變化對總成本之影響。

表 4.31 各國平均電價比較表

國 別	NT\$ /度電- kWh	國 別	NT\$ /度電- kWh
美 國	2.05	波 蘭	3.59
挪 威	2.10	希 臘	3.70
紐西蘭	2.17	英 國	3.75
南 韓	2.18	瑞 士	3.88
臺 灣	2.67	匈 牙 利	3.95
以色列	2.86	新加坡	3.99
馬來西亞	2.87	比利時	4.08
大 陸	2.89	土 耳 其	4.08
香 港	2.93	葡 萄 牙	4.10
瑞 典	3.07	西 班 牙	4.38
泰 國	3.16	愛爾蘭	4.49
芬 蘭	3.35	智 利	4.55
丹 麥	3.39	德 國	4.63
墨西哥	3.45	捷 克	4.71
盧森堡	3.46	菲 律 賓	5.09
荷 蘭	3.55	日 本	5.28
法 國	3.58	義 大 利	8.23

資料來源：台電公司（2013）、國際能源總署（2012）

表 4.32 為電價變化對綠屋頂總計年均成本影響分析表，如圖 4.13 所示之趨勢，當電價變化價格調高時，薄層型、密集型之總成本逐漸降低，密集型總成本仍高於其他屋頂型式，但薄層型綠屋頂不僅低與 10 年更新年限之傳統型屋頂，且已漸趨近於 15 年更新年限之傳統型屋頂。

表 4.32 電價變化對綠屋頂總成本影響分析表

屋頂型式 (更新年限)	總成本 (NT\$/ yr)			
電費變化 (NT\$/度電-kWh)	2.67	4.52	6.38	8.23
傳統型屋頂 (10 年)	1,028,699	1,028,699	1,028,699	1,028,699
傳統型屋頂 (15 年)	776,040	776,040	776,040	776,040
傳統型屋頂 (20 年)	570,241	570,241	570,241	570,241
薄層型綠屋頂 (40 年)	904,758	877,377	849,848	822,467
密集型綠屋頂 (40 年)	1,284,927	1,199,024	1,158,201	1,117,598

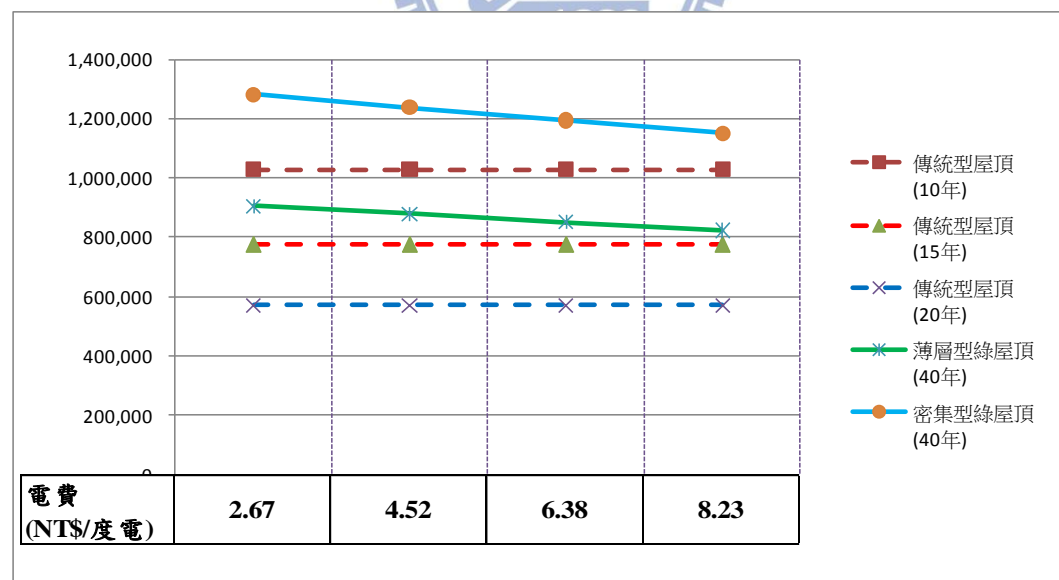


圖 4.13 電價變化對綠屋頂總成本影響之趨勢圖(1)

綠屋頂節能效益主要來自植栽、土壤介質以及屋頂層之隔熱效果，藉由 4.21、4.22 節 eQUEST 模擬及熱傳導係數法之估算，其主要影響之參數是熱傳透率 U 值之高低，本研究以案例假設之屋頂層估算其 U 值，並未含括其他可能性之配置，因此，以舊式傳統型屋頂較常見之 PU 模隔熱方式（內政部營建署，98 年），以及薄層型綠屋頂實測動態熱傳導係數（Dynamic U-value）約減 30% 之理論數據（Kotsiris *et al*, 2012），分別以傳統型屋頂 U 值 $2.83 \text{ W/m}^2\text{°K}$ 及薄層型 U 值 $0.43 \text{ W/m}^2\text{°K}$ ，估算其變化對綠屋頂總成本之影響。

表 4.33 為薄層型 U 值降低 30% 為 $0.43 \text{ W/m}^2\text{°K}$ 對綠屋頂總成本之影響分析，薄層型綠屋頂之總成本僅略為降低 11,617 NT\$/yr（1.3%），對上節所述綠屋頂總成本評估結果之順序並無任何影響。

表 4.33 薄層型屋頂 U 值變化對總成本影響分析表

傳統型 屋頂	薄層型 綠屋頂	密集型 綠屋頂	傳統型 屋頂 -10 年	傳統型 屋頂 -15 年	傳統型 屋頂 -20 年	薄層型 綠屋頂 -40 年	密集型 綠屋頂 -40 年
U 值變化 ($\text{W/m}^2\text{°K}$)			總成本 (NT\$/yr)				
1.39	0.62	0.24	1,028,699	776,040	570,241	904,758	1,284,927
1.39	0.43	0.24	1,028,699	776,040	570,241	893,141	1,284,927
差異			-	-	-	11,617 (1.3%)	

表 4.34 為傳統型屋頂改為較高之 U 值 $2.83 \text{ W/m}^2\text{°K}$ 時，薄層型、密集型綠屋頂 U 值則分別為 0.80 以及 $0.27 \text{ W/m}^2\text{°K}$ ，而表 4.35 為 U 值變化對綠屋頂總成本影響之分析，薄層型綠屋頂之總成本有較佳之降低幅度 75,065 NT\$/yr（8.3%），密集型則為 84,366 NT\$/yr（6.6%）。

表 4.34 傳統型屋頂及綠屋頂熱傳透率 U 值(2)

構造	組成	厚度 dx [m]	熱傳係數 [W/m ² K]	熱阻值 R [m ² °K/W]	熱傳透率 U _i =1/R [W/m ² °K]
傳統型屋頂	外氣膜	-	23.00	0.04	2.83
	PU 防水膜	0.002	0.05	0.04	
	水泥砂漿	0.015	1.5	0.01	
	鋼筋混凝土	0.15	1.4	0.11	
	水泥砂漿	0.015	1.5	0.01	
	內氣膜	-	7	0.14	
薄層型綠屋頂	外氣膜	-	23.00	0.04	0.80
	覆地植物(Turfing)	-	-	0.36	
	植栽墊/輕質泥土	0.1	0.47	0.21	
	過濾層(抗草酸不織布)	0.01	0.044	0.23	
	PP 生長座 (1). PP 板	0.01	0.22	0.05	
	(2). 水	0.03	0.6	0.05	
	PU 防水膜	0.002	0.05	0.04	
	水泥砂漿	0.015	1.5	0.01	
	鋼筋混凝土	0.15	1.4	0.11	
	水泥砂漿	0.015	1.5	0.01	
	內氣膜	-	7	0.14	
	外氣膜	-	23.00	0.04	0.27
	植栽(Shrubs)	-	-	1.61	
	土壤層	0.3	1.05	0.29	

密集型綠屋頂	過濾層(抗草酸不織布)	0.01	0.044	0.23
	疏水石	0.1	0.1	1.00
	保護層(抗草酸不織布)	0.01	0.044	0.23
	HDPE 導水板	0.01	0.42	0.02
	PU 防水膜	0.002	0.05	0.04
	水泥砂漿	0.015	1.5	0.01
	鋼筋混凝土	0.15	1.4	0.11
	水泥砂漿	0.015	1.5	0.01
	內氣膜	-	7	0.14

表 4.35 傳統型屋頂 U 值變化對總成本影響分析表

傳統型屋頂	薄層型綠屋頂	密集型綠屋頂	傳統型屋頂 -10 年	傳統型屋頂 -15 年	傳統型屋頂 -20 年	薄層型綠屋頂 -40 年	密集型綠屋頂 -40 年
U 值變化 ($\text{W/m}^2\text{°K}$)			總成本 (NT\$/yr)				
1.39	0.62	0.24	1,028,699	776,040	570,241	904,758	1,284,927
2.83	0.80	0.27	1,028,699	776,040	570,241	829,693	1,200,561
差異			-	-	-	75,065 (8.3%)	84,366 (6.6%)

由圖 4.14 U 值變化對綠屋頂總成本影響之趨勢圖分析，薄層型 U 值略降 30% 並未改變綠屋頂成本比較結果之順序，而傳統型屋頂 U 值提高至 $2.83 \text{ W/m}^2\text{°K}$ 時，密集型、薄層型綠屋頂之總成本大幅降低（6.6% ~ 8.3%），雖亦未改變比較結果之順序，但薄層型綠屋頂之總成本已趨近 15 年更新年限之傳統型屋頂。另外，若以電價變化對屋頂總成本之影響來分析，如圖 4.15 所示，當傳統型屋頂 U 值提高為 $2.83 \text{ W/m}^2\text{°K}$ ，相對應綠屋

頂之節能經濟效益大為提昇，密集型屋頂在電價 6.83 元/度時，已比 10 年更新年限之傳統型屋頂較佳，薄層型在電價 4.52 元/度時已比 15 年更新年限之傳統型屋頂為佳，在電價 8.23 元/度時，更已趨近 20 年限之傳統型屋頂。

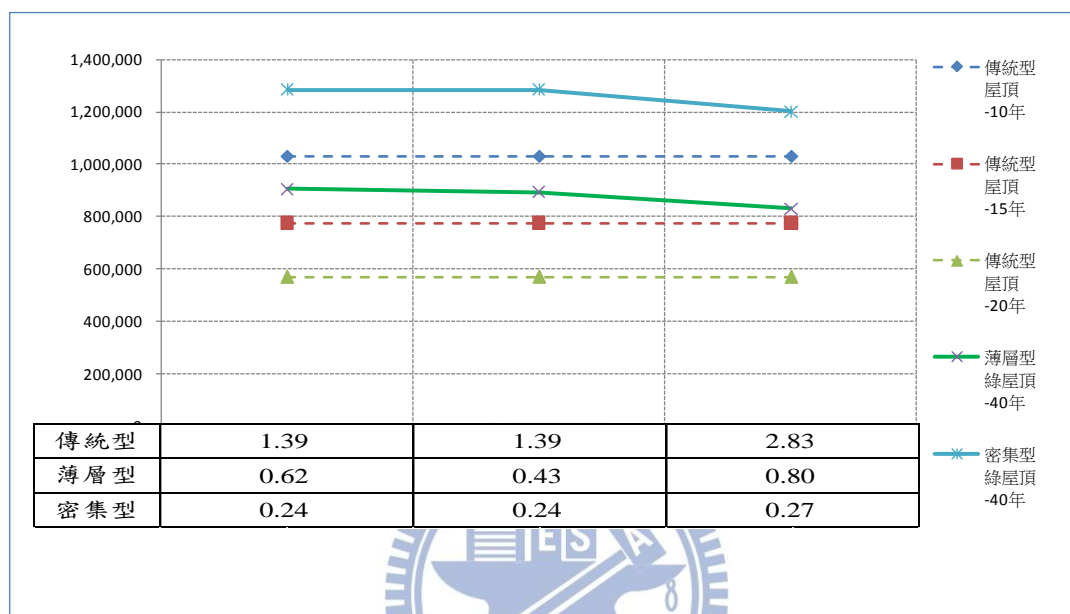


圖 4.14 U 值變化對綠屋頂總成本影響之趨勢圖

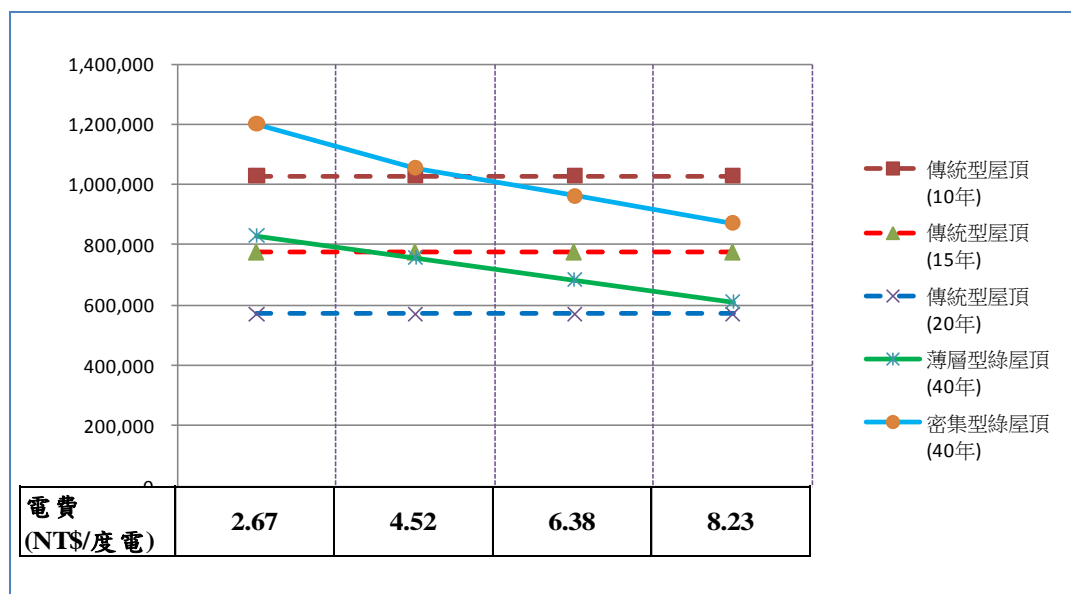
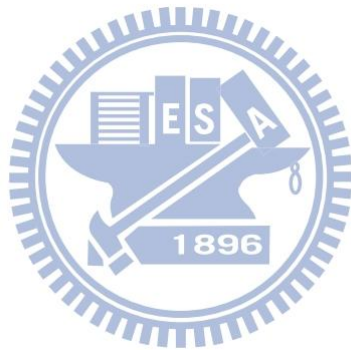


圖 4.15 電價變化對綠屋頂總成本影響之趨勢圖(2)

由以上參數不確定性分析得知，不含通貨膨脹率之折現率 u 、電價及屋頂熱傳透率 U 值變化，對綠屋頂總成本有直接關聯性之影響，當不含通貨膨脹率之折現率 u 較低、且電價隨國際水準逐漸調高時，密集型綠屋頂之總成本雖有降低之趨勢，但由於初設成本較高，仍無法與其他型式屋頂之總成本相較。而薄層型綠屋頂於上述不含通貨膨脹率之折現率 u 較低、且電價調高時，已可趨近 15 年更新年限之傳統型屋頂。若再考量傳統型屋頂設置綠屋頂作為改善，既有屋頂層熱傳透率 U 值較高 ($2.83 \text{ W/m}^2\text{°K}$) 之狀況下，薄層型綠屋頂之總成本應可低於 20 年更新年限之傳統型屋頂。



第五章 結論與建議

由於國內對綠屋頂的推廣尚在起步階段，在政策上也無實質之獎勵補助，僅在綠建築綠化量評估上列入面積之計算，因此企業在推動綠屋頂建置上，需考量其環境與經濟誘因，有必要評估其預期成本及可達成之效益，以作為相關決策分析時參考，本研究因而建立企業綠屋頂節能、環境及成本效益方法分析之，依據文獻及推估之節能、減碳及截水計算的公式，估算及比較薄層型、密集型綠屋頂與傳統屋頂之成本，以及節能減碳與截水之效益，並據以評估其總合之成本效益。以下首先說明本研究的重要成果與結論，並提供後續研究的參考方向及問題。

5.1 結論

本研究主要成果包括節能效益、減碳與截水環境效益分析、建立企業綠屋頂成本資料以及成本效益分析之方法，並以案例導入分析模式進行估算及比較分析，以下說明這些成果及重點結論。

1. 企業綠屋頂節能效益評估：本研究採用電腦模擬模式 eQUEST、熱傳導係數法，以案例所在地新竹之區域氣象資料，分別估算綠屋頂隔熱層對空調負荷之影響，以及其形成之節能效益，所得成果如下：

- (1) 電腦模擬模式：以能源模擬 eQUEST 程式 (Hirsch, 2003) 設定辦公室溫度 25°C 開啟空調，夜間各分區仍有部份人員工作，需維持最低載空調運轉，並運用內建設備性能曲線，可逐時自動運算系統耗能及電量，傳統型屋頂空調耗能為每年 26,068 度電 (kWh/yr)，薄層型綠屋頂節能效益可達 53% (13,898 度電, kWh/yr)、密集型為 81% (21,232 度電, kWh/yr)。

- (2) 熱傳導係數法：依屋頂熱傳透率 U 值，以熱通量公式（內政部營建署, 100 年）計算外氣與室內設定溫度差，並以空調系統 COPs 值轉換空調熱能為電力耗能（田, 97 年），以此估算傳統型屋頂耗電為每年 26,563 度電 (kWh/yr)，較 eQUEST 法所推估結果高 1.9%，薄層型綠屋頂節能效益則可達 55%（14,738 度電, kWh/yr）、密集型為 82%（21,900 度電, kWh/yr）。
2. 減碳效益評估：主要區分為節能部份之碳排放係數轉換，以及植栽所產生之碳固定量及二氧化碳吸收量，所得成果如下：
- (1) 節能部份：以節能所造成減少電力的排放係數 $0.536 \text{ kg eCO}_2/\text{度電}$ 推估（經濟部能源局，100 年），電腦模擬模式之薄層型每年減碳量為 $7,449 \text{ kg eCO}_2/\text{yr}$ 、密集型為 $11,380 \text{ kg eCO}_2/\text{yr}$ 。熱傳導係數法則得薄層型為 $7,900 \text{ kg eCO}_2/\text{yr}$ 、密集型為 $11,738 \text{ kg eCO}_2/\text{yr}$ ，約為電腦模擬模式所估算減碳效益結果的 1.03 倍。
- (2) 植栽部份：薄層型綠屋頂以草坪之吸附碳能力 $0.5 \text{ kg eCO}_2/\text{yr}$ （何等，98 年）計算，即可得植栽減碳效益為 $2,132 \text{ kg eCO}_2/\text{yr}$ 。密集型綠屋頂以類似之灌木之吸附碳能力 $7.5 \text{ kg eCO}_2/\text{yr}$ 相乘，即可得植栽減碳效益為 $31,973 \text{ kg eCO}_2/\text{yr}$ ，密集型綠屋頂植栽減碳量約為薄層型之 15 倍。
- (3) 總計減碳效益：薄層型綠屋頂總計減碳效益為 $9,806 \text{ kg eCO}_2/\text{yr}$ ，密集型綠屋頂總計減碳效益為 $43,532 \text{ kg eCO}_2/\text{yr}$ 。整體而言，密集型綠屋頂若能全面積種植灌木，其總計減碳效益約為薄層型的 4.4 倍。唯國內尚未收碳稅，故目前尚無實值的經濟效益。
3. 截水效益評估：依據廖（100 年）綠屋頂截水經驗公式推估，基質年截水深度薄層型為 0.371m 、密集型為 0.939m ，並與本案例辦公大樓綠

屋頂面積 $4,263\text{m}^2$ 相乘，可得每年綠屋頂的截水量：薄層型為 $1,583\text{m}^3$ 、密集型為 $4,004\text{m}^3$ 。

4. 企業綠屋頂成本效益分析：本研究依據節能降低電費之支出、參考碳稅換算減碳之效益、以綠化面積對應國外雨水下水道使用及抵用費率，綜合上述項目以分析企業綠屋頂之成本效益，所得結果如下。

(1) 節能效益：以台電(101 年)目前平均電價每度電約台幣 2.67 元估算，電腦模擬模式 eQUEST 之節能效益：薄層型每年可節省 38,358 NT\$/yr、密集型為 58,601 NT\$/yr。熱傳導係數法 U 值估算之節能效益：薄層型每年可節省 40,677 NT\$/yr、密集型為 60,443 NT\$/yr。

(2) 減碳效益：以蕭 (98 年)的碳稅建議值 750 NT\$/ton eCO_2 相乘，即可得電腦模擬模式 eQUEST 每年節省碳稅，估計分別可減少薄層型 7,186 NT\$/yr、密集型 32,515 NT\$/yr。熱傳導係數法每年節省碳稅，估計分別可減少薄層型 7,524 NT\$/yr、密集型 32,783 NT\$/yr，約為電腦模擬模式所估算減碳效益結果高 1.5%。

(3) 截水效益：依國外的雨水下水道使用費 0.003 US\$/ $\text{m}^2\text{-yr}$ (DDOE, 2011) 及抵用費率為 0.04 US\$/ $\text{m}^2\text{-yr}$ (Carter and Keeler, 2008) 為估算基準，以綠化面積直接給予抵減費用，因此薄層型、密集型之截水效益平均值皆為 2,765 NT\$/yr。

(4) 企業綠屋頂成本效益分析：

a. 屋頂年均成本：依傳統屋頂 10 年、15 年及 20 更新年限，與薄層型、密集型綠屋頂 40 年比較其年均成本，分別為 241、182、134、224、324 NT\$/ $\text{m}^2\text{-yr}$ 。

b. 綠屋頂經濟效益：總計上節之綠屋頂各項效益，可得薄層型綠

較傳統型每年可節省成本 $11.6 \text{ NT\$/m}^2\text{-yr}$ ($49,638 \text{ NT\$/yr}$)，而密集型綠屋頂每年可節省成本 $22.3 \text{ NT\$/m}^2\text{-yr}$ ($94,936 \text{ NT\$/yr}$) 約為薄層型之 1.9 倍。

- c. 綠屋頂成本效益分析：依年均成本與綠屋頂效益相減，密集型綠屋頂相較 10 年、15 年及 20 年等三個更新年限之傳統型屋頂，每年分別高出 60 、 119 、 $167 \text{ NT\$/m}^2\text{-yr}$ ($256,227$ 、 $508,887$ 、 $714,685 \text{ NT\$/yr}$)，若不考量其他效益(如景觀、休憩等)，明顯不符投資成本效益。薄層型綠屋頂雖然相較於 15 年及 20 年更新年限之傳統型屋頂仍高出 30 、 $78 \text{ NT\$/m}^2\text{-yr}$ ($128,719$ 、 $334,517 \text{ NT\$/m}^2\text{-yr}$)，但已比 10 年更新年限之傳統型屋頂低 $29 \text{ NT\$/m}^2\text{-yr}$ ($123,941 \text{ NT\$/yr}$)，主要是因國內電價較低，加上未考量綠屋頂其他效益，因此選用薄層型綠屋頂除了具有環保之正面意義，且在經濟方面有較佳之投資效益。

- (5) 參數不確定分析：綠屋頂總成本與不含通貨膨脹率之折現率 u 、電價以及屋頂熱傳透率 U 值變化，具有直接關聯性之影響，當不含通貨膨脹率之折現率 u 較低、傳統屋頂採用之熱傳透率 U 值較高且電價隨國際水準逐漸調高時，密集型、薄層型綠屋頂之總計年均成本均可降低。因此，未來國內電價之調整、採用之屋頂層熱傳透率較高，以及不含通貨膨脹率之折現率 u 之變化，均會影響設置綠屋頂估算的經濟誘因，企業評估綠屋頂成本效益時，須納入考量。

5.2 建議

本研究依研究過程及案例探討所發現之問題及經驗，提出下列幾項建議，以供後續研究參考：

1. 節能效益評估：以 eQUEST 能源模擬程式/熱傳導係數法分析計算案例屋頂耗能之差異，因本研究以目前通用之薄層型綠屋頂評估為主，密集型綠屋頂僅假設以 100% 灌木之熱傳導係數為基準，未能以實務上各種不同植栽比例計算，後續研究建議以上述實際計算，以利節能效益評估之正確及完整性。
2. 減碳效益評估：以類似國內綠建築綠化量的評估方法，利用植栽分類不同所定義之二氧化碳吸收及固定量，雖是符合區域植栽物種及氣候要求，惟栽種條件仍以地面上綠化土壤深度為基準，區分為草坪 30 公分、灌木 50 公分，與本案例假設綠屋頂綠化之薄層型 10 公分、密集型 30 公分有別，需進一步研究其土壤深度與植栽減碳之差異。
3. 截水效益評估：本研究雖已估算薄層型、密集型屋頂之基質截水深度以及截水量，惟每年總截水量僅達 1,583、4,004 (m^3/yr)，若依此考量降低區域下水道承載之總量，因其量體甚小，所能發揮之效益不大，若日後法規強制要求綠屋頂之建置，可進一步估算上述之降低區域下水道承載效益。
4. 綠屋頂初設成本：國內綠屋頂尚未全面推廣，既有案例及施工廠商並不普遍，因而綠屋頂施作之成本可能偏高，也造成綠屋頂成本估算之不確定性，須進一步探討及分析其成本之合理性。

5. 國內尚未實施碳稅及徵收雨水逕流費，本研究以假設之碳稅、雨水下水道使用費及抵用費率為基準，惟近年來全球環保意識高漲，未來相關費率調整趨勢對綠屋頂評估之效益值得關注。
6. 近年來由於油電價格及國際原物料上漲的因素，民生物品及通膨也跟著大幅調高，考量通貨膨脹率及電價與綠屋頂之年均成本具有重要對應之參數關係，因而未來電價調整與通膨指數變化趨勢，須要更詳盡探討其相對綠屋頂成本效應之影響。
7. 本研究因所涉綠屋頂專業及人力有限，僅探討較易於量化之節能、減碳及截水等效益，因而綠屋頂於整體經濟效益考量上，仍較傳統型屋頂有些微差距，然而綠屋頂於社會及環境效益上仍有值得推崇的地方，譬如建築景觀美化、影響環境微氣候、改善空氣品質、降低洪災風險、增加生物棲息地、提供休憩空間以及調和都市熱島效應等益處，雖目前尚未直接量化其經濟效益，但應是未來研究探討的重點。

參考文獻

中央氣象局，(101 年)，“2012 新竹測站逐時資料”，中央氣象局海象測報中心，台北。

中央銀行，(101 年)，“五大銀行平均存款利率”，中央銀行全球資訊網。

http://www.cbc.gov.tw/sp.asp?xdurl=banking/rates_04.asp&ctNode=371

(accessed on 2013/01/16)。

內政部營建署，(98 年)，“學校及大型空間類建築規範”，內政部「建築物節約能源設計技術規範」，台北。

內政部營建署，(100 年)，“辦公廳類建築物節約能源設計技術規範”，

內政部「建築物節約能源設計技術規範」，台北。

方智公司，(102 年)，方智股份有限公司(直接詢價 Tel：(02)28232131)，

<http://fidtek.myweb.hinet.net/> (accessed on 2013/03/16)。

台達電子文教基金會，(100 年)，“世界各國目前碳稅與碳交易制度推行概況一覽”，台達電子文教基金會「低碳生活部落格」，

<http://lowestc.blogspot.tw/> (accessed on 2012/12/11)。

台灣電力公司，(101 年)，台灣電力公司電價表。

http://www.taipower.com.tw/content/q_service/images/main_3_6_3.pdf

(accessed on 2013/02/24)。

台灣電力公司，(100 年)，「2011 年各國電價比較(圖表)」。

[http://www.taipower.com.tw/UpFile/PowerTableFile/2011 年各國電價比較\(圖表說明\).pdf](http://www.taipower.com.tw/UpFile/PowerTableFile/2011年各國電價比較(圖表說明).pdf) (accessed on 2013/03/16)。

行政院主計總處，(101 年)，“101 年消費者物價指數 CPI”，中華民國統計資訊網「消費者物價基本分類指數 - 年」。

<http://www.stat.gov.tw/mp.asp?mp=4> (accessed on 2013/01/20)。

老圃公司，(102 年)，老圃造園工程公司(直接詢價 Tel：(02)28728448)，

<http://www.oldfarmer.com.tw/home/> (accessed on 2013/02/24)。

何明錦，陳瑞鈴，鄭元良，林憲德，江哲銘，周鼎金，章裕民，鄭政利，張又升，林子平，郭柏巖，吳麗真，(98 年)，「綠建築解說與評估手冊 (2009 年版)」，內政部建築研究所，台北。

石佳玉，(98 年)，「台北市執行綠屋頂政策之工具分析」，國立東華大學公共行政研究所，碩士論文，花蓮。

石婉瑜，(92 年)，「簡易綠化屋頂暴雨管理效能之評估—以台北市區為例」，國立臺灣大學園藝學研究所，碩士論文，台北。

田崇治，(97 年)，「空調系統動態效率之控制及運算方法研究」，國立台北科技大學能源與冷凍空調工程系碩士班，碩士論文，台北。

朱澄樹，(93 年)，「校園綠建築綠化指標之植栽 CO₂ 固定量調查研究--以大甲高中為例」，國立雲林科技大學營建工程系，碩士論文，雲林。

李京澄，(98 年)，「綠屋頂之降雨截水能力分析」，國立交通大學環境工程系研究所，碩士論文，新竹。

林憲德，黃國倉，(94 年)，「台灣 TMY2 標準氣象年之研究與應用」，中華民國建築學會建築學報，53 (2005)，台北。

唐鳴放，王科，(2010)，「屋頂綠化節能熱工參數研究」，中國重慶大學建築城規學院，中國建築防水，23 (2010)，重慶。

黃國倉，(95 年)，「辦公建築生命週期節能與二氧化碳減量評估之研究」，國立成功大學建築研究所，碩士論文，台南。

陳慶安，(98 年)，「城市推行綠屋頂的策略、措施與成效之分析研究」，國立臺灣大學生物資源暨農學院園藝學系，碩士論文，台北。

許瑞銘，(95 年)，「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，台中。

經濟部能源局，(100 年)，100 年度再生能源電能躉購費率。

http://web3.moeaboe.gov.tw/ECW/populace/content/Content.aspx?menu_

id=1097 (accessed on 2013/02/06)。

經濟部能源局，(100 年)，100 年度 CO₂ 電力排放係數。

http://verity.erl.itri.org.tw/EIGIC/images/_energy/vendor/co2/co2_100.pdf

(accessed on 2013/01/12)。

葉彥宏，(101 年)，“城市綠屋頂成本效益分析”，國立交通大學環境工程系研究所，碩士論文，新竹。

廖科智，(100 年)，“綠屋頂降雨截水公式之建立”，國立交通大學環境工程系研究所，碩士論文，新竹。

謝維芳，(94 年)，“不同植栽對建築物隔熱效果影響之研究”，國立中山大學園藝學系，碩士論文，台中。

蘇榮宗，(98 年)，“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，高雄。

香港雅邦，(96 年)，「香港綠化屋頂應用研究」，雅邦規劃設計有限公司，香港。

錫瑠環境綠化基金會，(97 年)，「綠屋頂推廣交流討論會資料」，台北。

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。

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/greenroof3.html> (accessed on 2013/03/12)。

Acks, K. (2003). “A framework for cost-benefit analysis of green roofs: initial estimates Green roof feasibility review_King county.” Pers.com.

ARCADIS (2004). “Ford Motor Heritage Green Roof Report.”
http://www.arcadis.com/About_Us.aspx.

ASHRAE Standard 90.1- 2007. (2007). ” Energy Standard for Building except Low-Rise Residential Buildings.” American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers.

- ASHRAE Standard 62.1-2007. (2007). "Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality." American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers.
- Al-Sanea, S.A. (2002). "Thermal performance of building roof elements." *Journal of Building and Environment*, 37 (2002), pp. 665-675.
- Beattie, D. J. and Berghage, R. D. (2007). "Green roof can detain and remove pollutants from storm water runoff." *Technical Paper*, Department of Agricultural and Biological Engineering, The Pennsylvania State University, PA. USA.
- Berghage, R. D., Beattie, D., Jarrett, A. R., Thuring, C., Razaei, F. and O'Connor, T. P. (2009). "Green roofs for stormwater runoff control." *EPA Publications*, 600, R-09, 026.
- Bianchini, F. and Hewage, K. (2012). "Probabilistic social cost-benefit analysis for green roofs: A lifecycle approach." *Journal of Building and Environment*, 58, pp. 152-162.
- Carter, Y. 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 Talbot, F.B. (2008). "Green roof valuation: A probabilistic economic analysis of environmental benefits." *Journal of Environmental Science & Technology*, 42 (2008), pp. 2155-2161.
- Christian, W. (2007). "Green roof: a case study." *Princeton Architectural Press*, c2007, pp. 32-33.
- Dunnett, N. and Kingsbury, N. (2007). "Planting Green Roofs and Living Walls." *Timber Press*, Portland, OR. USA, pp. 24-29.
- Earth Pledge Foundation. (2005). "Building case study: 19 ACROS Fukuoka." in *Green roofs : ecological design & construction*. Atglen, PA., USA, pp.

- 60-61.
- Getter, K. L., Rowe D. B., Robertson G. P., Cregg B. M. and Andresen J. A. (2009). "Carbon Sequestration Potential of Extensive Green roofs." *Environmental Science & Technology*, 43 (2009), pp. 7564-7570.
- Greenroofs.com. (2010). "The greeroof projects database: Walmart Supercentre port coquitlam." <http://greenroofs.com/projects/pview.php?id=1318>, (accessed on June 18, 2012).
- Hiltner, R. N., Lawrence, T. M. and Tollner, E. W. (2008). "Modeling stormwater runoff from green roofs with HYDRUS-1D." *Journal of Hydrology* (2008), 358, pp. 288-293.
- Hirsch, J.J. (2003). "eQUEST Introductory Tutorial." <http://doe2.com/equest> (accessed on 2012/06/11).
- Kosareo, L. and Ries, R. (2006). "Comparative environmental life cycle assessment of green roof." *Building and Environment*, 42 (2007), pp. 2608-2610.
- Kotsiris, G., Androutsopoulos, A., Polychroni, E. and Nektarios, P. A. (2012). "Dynamic U-value estimation and energy simulation for green roofs." *Energy and Building*, 45 (2012), pp. 240-249.
- Liu, K. and Baskaran, B. (2003). "Thermal performance of green roofs through field evaluation." National Research Council, Institute for Research in Construction, Ottawa, Canada.
- Mentens, J., Raes, D. and Hermy, M. (2004). "Green Roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century." *Landscape and Urban Planning*, 77 (2006) , pp. 217-226.
- Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R.R., Doshi, H., Dounnett, N., Gaffin, S., Kohler, M., Liu, K., K.Y. and Rowe, B. (2007). "Green roof as urban ecosystems: ecological structure, functions, and services."

- BioScience*, 57 (2007), pp. 823-833.
- Peek, S. (2008). "The evolution: from ancient roof gardens to high-tech extensive green roofing." *Award winning – green roof designs*, Atglen, PA., USA, pp. 24-29.
- Porsche, U. and Kohler, M. (2003). "Life cycle costs of green roofs." *Proceedings of World Climate & Energy Event*, 1-5 December 2003, Rio de Janeiro, Brazil.
- Sailor, D. (2008). "A green roof modeling for building energy simulation programs." *Energy and Building*, 40 (2009).
- Schneider, J. (2009). "Green roofs for healthy cities educates building professional." *Eco-Structure*, May-June (2009).
- Strachan, P. A., Kokogiannakis, G. and Macdonald, I. A. (2003). "Encapsulation of validation test in the ESP-r simulation program." *Building Simulation*, IBPSA conference, Montreal, Canada.
- The District of Columbia Department of the Environment (DDOE).
<http://ddoe.dc.gov/ddoe/cwp/view,a,1209,q,498382.asp>
(accessed on 2013/01/18).
- Wolf, D. and Lundholm, J.T. (2008). "Water uptake in green roof microcosms: Effects of plant species and water availability." *Ecological Engineering*, 33, pp. 179-186.
- Wong, N.H., Cheong, D., K.W., Yan, H., Soh, J., Ong, C.L. and Sia, A. (2003a). "The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore." *Energy and Buildings*, 35 (2003), pp. 356-357.
- Wong, N.H., Tay, S.F., Wong, R., Ong, C.L. and Sia, A. (2003b). "Life cycle cost analysis of rooftop gardens in Singapore." *Building and Environment*,

38 (2003), pp. 503-508.

Vanwoert, N. D., Rowe, D.B., Andresen, J. A., Rugh, C. L., Fernandez, R. T. and Xiao, L. (2005). "Green Roof Stormwater Retention: Effects of Roof Surface, Slope, and Media Depth." *Environmental Quality*, 34 (2005), pp. 1036-1044.

Villarreal, E. L. and Bengtsson, L. (2004). "Response of a sedum green-roof to individual rain events." *Ecological Engineering*, 25 (2005), pp. 1-7.



附錄 A

A.1 輸入模式及模擬程序

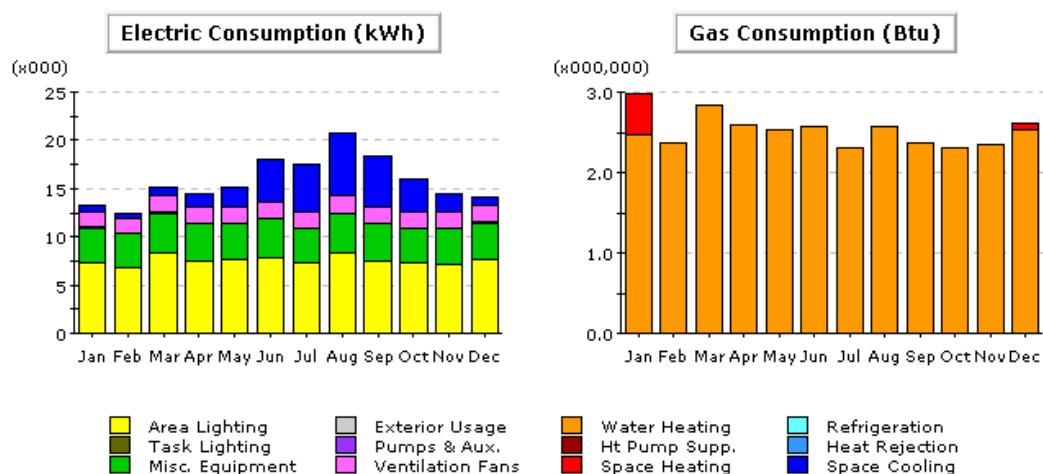
以 eQUEST 模擬 CGR 節能效益主要包括：基本資訊 (Project & Site)、建築外形 (Building Shell)、內部負荷 (Internal Loads)、水側空調 (Water-Side HVAC)、氣側空調 (Air-Side HVAC)、公用事業費率 (Utility & Economics) 等輸入步驟 (Hirsch, 2010)，以下一一說明之。

1. 輸入建築場地資訊和氣象資料：包括建築的經度、緯度、海拔高度等建築場地基本的資訊，以及相鄰的可能對你要分析的建築形成遮擋的建築、構造、或景觀、幾何尺寸，與分析建築的相對位置，當地的氣象資料。
2. 建築外形、結構、材料及相臨物件（建築、遮蔭物件），或可能傳遞或儲存（散發）熱量的牆體、屋頂和地板。僅選擇最重要部分進行建模，。但一般而言，都需要包含窗戶玻璃的性能、窗戶的尺寸、遮陽（overhangs 或 fins）等數據。
3. 建築實際運作的時程表：比如大樓工作人員何時開始工作，何時下班，每個星期的排程等，室內設定溫度，空調系統和室內其它設備的運行時刻表。另外需建立內部負荷表，如室內人員、設備、照明的發熱量等，對室內負荷有較大的影響，這也佔據建築物總體電耗較大的比例。關於這些負荷的工業標準資料來源於 ASHRAE 90.1 (2007)。
4. 空調系統水側設備及性能：對於一般建築而言，空調系統無疑是整個建築能源系統中最重要的部分，該部分的性能幾乎會影響其它所有的能效策略。可從供應商/製造廠商那裡獲得各個設備的效率資料，輸入空調主要設備如冰水主機、冷卻水塔、泵浦等設備的性能資料。

5. 空調系統氣側設備及性能：空調系統主要運行的設備，從外氣供應、循環空調以及空間排氣等，包含空調箱 (Air Handling Unit) 、盤管風機 (Fan Coil Unit)、可變風量供應設備(Variable Air Volume) 、進排氣風扇 (Ventilation Fan) 等設備的性能資料。
6. 公用費率：eQUEST 能夠預測逐時電力的需求特徵，如果知道具體的電價，就可以直接計算每年的能源費用。包含電費及分時電價(季節及尖離峰不同費率)，柴油、瓦等能源價格。

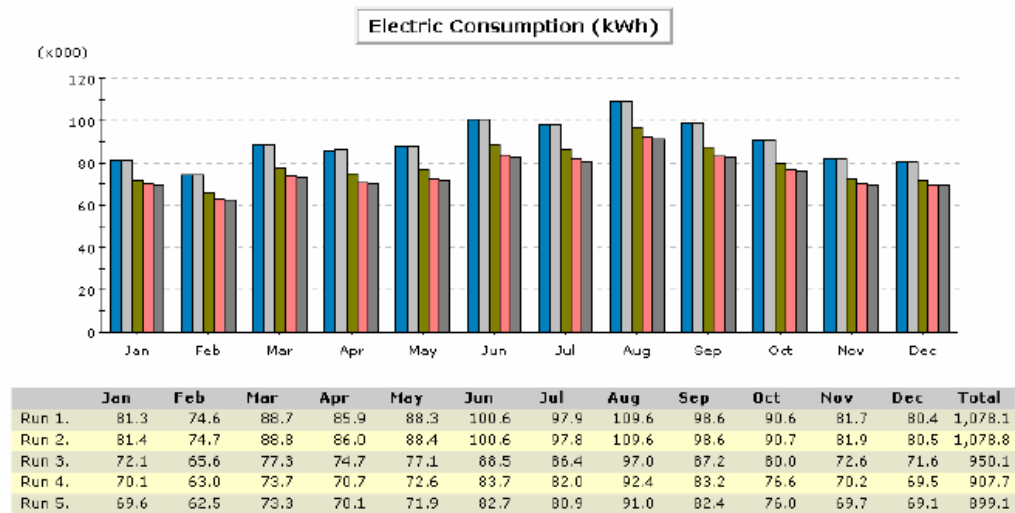
A.2 節能效益分析

以 eQUEST 輸入上述之各項模組資料，依模擬選定之氣候資訊及相關建築及室內空調負荷、設備運轉耗能等，將轉換為圖表顯示之耗能報告，包括單一運算報表(Single Run Report)，比較報表(Comparison Report)以及運算參數報表(Parametric Report)等，在單一運算報表可分析各項耗能情形，尤以空調耗能可以推算綠屋頂之隔熱效益；在比較報表項目以不同運算基準(Run) 區分一般屋頂以及 CGR 的耗能情形，因此可以模擬出不同 CGR 相較一般屋頂的節能效益。

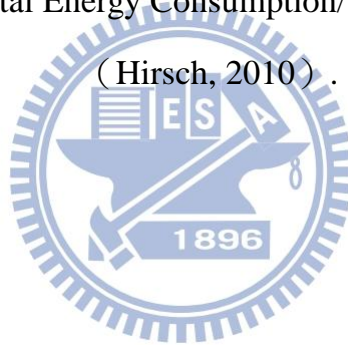


圖：Monthly Peak Demand by End use/ Single-run Report, (Hirsch, 2010) .

Monthly Total Energy Consumption (Comparison Report)



圖：Monthly Total Energy Consumption/ Comparison Report,
(Hirsch, 2010) .



附錄 B

表：綠屋頂材質熱傳係數表

組成	厚度 Dx [m]	熱傳係數 [W/m.°K]	熱阻值 R [m ² .°K/W]	資料來源
外氣膜	-	23.00	0.04	(1) 表 4-3.1 編號 (R005)：外氣膜
內氣膜	-	7	0.14	(1) 表 4-3.1 編號 (R005)：內氣膜
水泥砂漿	0.015	1.5	0.01	(1) 表 3-2.1 分類 (水泥)：水泥砂漿
輕質透水磚	0.05	0.17	0.29	(1) 表 4-3.1 編號 (R005)：泡沫混凝土 輕質具隔熱效果，相近 泡沫混凝土材質
鋼筋混凝土	0.15	1.4	0.11	(1) 表 4-3.1 編號 (R005)：鋼筋混凝土
PU 防水板	0.002	0.05	0.04	(1) 表 4-3.1 編號 (R006)：PU 板
油毛氈防水層	0.01	0.11	0.09	(1) 表 4-3.1 編號 (R005)：油毛氈
保護層(抗草酸不織布)	0.01	0.044	0.23	(1) 表 3-2.1 分類 (纖維材) - 纖維，類似材料
過濾層(抗草酸不織布)	0.01	0.044	0.23	(1) 表 3-2.1 分類 (纖維材) - 纖維，類似材料
植栽墊/輕質泥土	0.1	0.47	0.21	(1) 表 3-2.1 分類 (土, 石)：土壤 (火山灰質)
土壤層	0.3	1.05	0.29	(1) 表 3-2.1 分類 (土, 石) - 土壤 (壤土質)

疏水石	0.1	0.1	1.00	(1) 表 3-2.2 分類 (其他) - 輕石
覆地植物(Turfing)	-	-	0.36	(2) Table 1, Roof type a - Turfing
植栽(Shrubs)	-	-	1.61	(2) Table 1, Roof type a - Shrubs
PP 生長座 (1).PP 板	0.01	0.22	0.05	(3) 工程塑膠物性表 - 聚丙烯
(2). 水	0.03	0.6	0.05	(1) 表 3-2.2 分類 (其他) - 水 (靜止)
HDPE 導水板	0.01	0.42	0.02	(3) 工程塑膠物性表 : 高密度聚乙烯

資料來源：

- (1) 辦公廳類建築物節約能源設計技術規範 (內政部營建署, 100 年)
- (2) The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore (Wong *et al.*, 2003)
- (3). 工程塑膠物性表 (金智塑膠有限公司網站, <http://www.jin-zhi.com.tw/properties.htm>)

