

國 立 交 通 大 學

環境工程研究所

碩士論文

城市綠屋頂成本效益分析

Cost-Benefit Analysis of Green Roofs in a City



研 究 生：葉彥宏

指 導 教 授：高正忠

中 華 民 國 一 百 零 一 年 一 月

城市綠屋頂成本效益分析

Cost-Benefit Analysis of Green Roofs in a City

研究生：葉彥宏

Student : Yen-Hung Yeh

指導教授：高正忠

Advisor : Jehng-Jung Kao

國立交通大學

環境工程研究所

碩士論文



Submitted to Institute of Environmental Engineering
College of Engineering

National Chiao Tung University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Science

in

Environmental Engineering

January, 2012

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一百零一年一月

摘要

綠屋頂由於具有降溫節能、減碳、空污減量、截水等效益，已在不少國家推廣中，國內亦正起步中，唯相關研究甚少，且設置綠屋頂對於整個城市的成本效益目前亦缺乏有系統的方法可估算之，本研究因而發展一套方法分析及估算國內城市推廣綠屋頂的成本效益。

所發展的城市綠屋頂成本效益評估方法，首先依屋頂可設置綠屋頂的最大面積及合理綠屋頂比率估算城市可設置綠屋頂面積。效益部分主要評估降溫節能、減碳、空污減量及截水等四項；降溫節能部分採用 1D-HF 方法及 eQUEST 模式模擬分析增設綠屋頂所減少的建築耗能；減碳部分除了節能所造成的減碳效益以外，亦依植物減碳能力估算城市綠屋頂之減碳效益；空污減量部分則採用乾沈降模式推估綠屋頂空氣污染減量效益；截水部分採用綠屋頂截水效益經驗公式推估總截水量及依據綠屋的飽和截水深度推估尖峰逕流減少量。各效益的經濟效益則分別依據電價、碳稅、空污防治與損害成本及可能節省的雨水系統擴充成本估算之，且分別推估一般及綠屋頂成本，最後綜合評估城市綠屋頂之成本效益。

本研究以新竹市進行案例研討，並依據 10、15 及 20 年三種不同的一般屋頂更新年限分析，結果顯示除了在一般屋頂年限為 20 年時綠屋頂的成本效益較差以外，其他均較佳，約在 5 百萬至 6 億 6 千 5 百萬元間，經濟效益主要以節能為最大宗約 3 億 750 萬元；而額外考量碳稅與雨水下水道使用費時可再增加約 1 億元的效益，碳稅約 8 千 4 百萬元，雖在一般屋頂更新年為 20 年時，綠屋頂成本效益仍較差，但主要是因本研究尚未把減緩熱島等其他效益納入，且國內屋頂的更新年限預期小於 20 年，每年節能量約 1 億 4 千 9 百萬度，減碳約 11.1 萬噸 eCO₂，加上可降低 O₃ 及其前驅物的形成等，故綠屋頂對新竹市而言有推廣之潛力，且未來碳稅之推

行，預期有助於其推廣，本研究成果亦可供其他城市進行相關決策分析時之參考依據。

關鍵字：綠屋頂、降溫、節能、減碳、空污減量、截水、成本效益分析、
建築耗能模式、乾沈降模式、永續環境系統分析



Abstract

Green roof (GR) technology can reduce internal room temperature, save energy, decrease carbon emissions, remove air pollutants, and reduce runoff, and thus it is widely promoted in many countries. However, the method for evaluating the cost-benefit of GRs in a city is so far not available. This study was thus initiated to develop a benefit-cost analysis (BCA) method to evaluate major benefits of GRs for a domestic city.

To implement the BCA method at the city scale, the rooftop area available for installing GRs is first estimated based on the maximal rooftop area and a reasonable GR ratio. Four major GR benefits are considered: energy saving, carbon emission reduction, air pollutant removal, and runoff detention. The one-dimensional heat flux (1D-HF) method and the eQUEST model are applied to compute the energy saving. The carbon emission reduction is determined based on the avoided emissions from energy saving and the amount of carbon sequestered by GRs. The quantity of air pollutants removed by GRs is approximated by a dry deposition model. The overall rainfall detention capability of GRs is calculated by an experimental equation, and the peak runoff reduction is estimated by the potential saturated detention depth of GRs. And the cost information of GRs is obtained from a local survey. The economic values of all GR benefits are estimated and compared with the GR life cycle cost.

A case study was implemented for Hsinchu City. The proposed BCA method was applied to estimate the potential benefits and cost for executing a city-wide GR program. The conventional roof is assumed to be replaced by three possible periods: 10, 15, and 20 years. The results show that the GR program worse than the conventional roof only with a replacement period of 20 years, for other two replacement periods the GR program can have economic benefit of about NT\$5-666 million, of which the energy saving is about NT\$300 million and is the largest portion among all benefits. If a carbon tax

and a stormwater fee were applied, it would increase the GR economic benefit of about NT\$100 million, of which the carbon tax is about NT\$84 million. Although the GR program is worse than the conventional roof with the replacement period of 20 years, additional GR benefits such as mitigating head island are not considered and the domestic roof replacement frequency is usually shorter than 20 years. The energy saving is about 149 million KWH, and the carbon emission reduction is about 111 thousand ton eCO₂. The GR program can also slightly reduce O₃ and its precursors. Therefore, promoting a city-wide GR program in Hsinchu City is desirable. The incentive for implementing the program can be further increased if a carbon tax is applied. The proposed BCA method and the results are expected to facilitate related decision analyses for other cities.

Keywords: green roof; thermal reduction; energy saving; carbon emission reduction; air pollutant removal; runoff detention; cost-benefit analysis; building energy consumption simulation model; dry deposition model; sustainable environmental systems analysis.

致謝

首先感謝指導教授高正忠老師在學一年半以來對學生的啟發，讓學生了解抓重點與研究上應學習與改進的地方。也非常感謝口試期間陳鶴文教授及陳維燁教授的細心指導與建議，讓論文內容更趨嚴謹，學生受益良多，特此表達由衷感謝。

感謝實驗室的學長姐子欽、宥禔、冠華、岳奇、科智等幫助我解決研究及生活上的瓶頸，使學生的碩士過程更加順利；感謝同屆好友維祐及嘉仁在這段時間的陪伴及打氣；感謝學妹蕙涵及佩樺平時的貼心問候，以及平時實驗室事務的幫忙與協助；感謝所辦小姐在行政上的幫忙，使我的研究生活得以更加順利。

另外在研究期間的資料索取上亦得到許多人的幫忙，新竹市政府單位的職員們及協助提供成本資料的廠商，感謝以上諸位的幫忙與指導，使本論文的完成能更加順利。最後，要感謝我的家人爸媽、堂哥葉董、在德國的弟弟及還只是小學四年級的妹妹，因為你們無悔的支持與鼓勵，讓我在面對各種困難能得以堅持下去，僅將此論文獻給我身邊所有人。

葉彥宏 謹誌於交大

民國一百零一年一月

目錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	iii
致謝.....	v
目錄.....	vi
圖目錄.....	ix
表目錄.....	x
符號說明.....	xiii
第一章 前言.....	1
1.1 研究緣起.....	1
1.2 研究目的.....	5
1.3 論文內容.....	5
第二章 文獻回顧.....	6
2.1 國內外綠屋頂發展.....	6
2.2 綠屋頂降溫節能.....	7
2.2.1. 建築耗能模式.....	7
2.2.2. 熱通量計算.....	8
2.3 綠屋頂減碳.....	9
2.4 綠屋頂空污減量.....	10
2.5 綠屋頂截水能力.....	11
2.6 綠屋頂成本效益分析.....	12
第三章 研究流程與方法.....	15
3.1 研究流程.....	15
3.2 可供建置綠屋頂面積估算.....	17
3.3 城市綠屋頂效益評估.....	17

3.3.1 降溫節能.....	17
3.3.1.1 1D-HF 法	17
3.3.1.2 eQUEST 法.....	18
3.3.2 減碳.....	20
3.3.3 空污減量.....	21
3.3.4 截水.....	27
3.4 一般屋頂及綠屋頂成本概估.....	29
3.5 城市綠屋頂成本效益分析.....	31
第四章 案例研討.....	35
4.1 案例區及案例建築簡介.....	35
4.2 綠屋頂面積估算.....	41
4.3 城市綠屋頂降溫節能效益評估.....	42
4.3.1 1D-HF 法	42
4.3.2 eQUEST 法.....	46
4.4 減碳效益評估.....	54
4.5 空污減量效益評估.....	56
4.6 截水效益評估.....	64
4.6.1 降低雨水地面逕流	64
4.6.2 降低尖峰流量	65
4.7 一般屋頂及綠屋頂成本概估.....	67
4.8 城市綠屋頂成本效益分析.....	70
第五章 結論與建議.....	78
5.1 結論.....	78
5.2 建議.....	81
參考文獻.....	83
附錄 A.....	95

A.1 eQUEST 簡介	95
A.2 本研究建築耗能模擬參數	96
附錄 B	99
B 空氣污染健康損害成本估算	99
附錄 C	102
C 空污減量參數表	102
附錄 D	105
D 空污減量參數結果	105



圖目錄

圖 3.1 研究流程圖.....	16
圖 4.1 新竹市都市計畫區雨水下水道系統排水分區示意圖	38
圖 4.2 新竹市水患治理計畫工程點.....	38
圖 4.3 新竹市 GIS 建築物圖資	41
圖 4.4 新竹測站各月平均氣溫及及 26°C 之溫差	44
圖 4.5 新竹市各月的總 ΔT 數量	44
圖 4.6 新竹市 2010 年各月節能所占比例.....	45
圖 4.7 一層樓住宅建築各月節能量.....	47
圖 4.8 二層樓住宅建築各月節能量.....	48
圖 4.9 三層樓住宅建築各月節能量.....	49
圖 4.10 一層樓辦公建築各月節能量.....	50
圖 4.11 二層樓辦公建築各月節能量.....	51
圖 4.12 三層樓辦公建築各月節能量.....	52
圖 4.13 新竹市 2010 年 NO_2 模擬結果對數座標圖.....	58
圖 4.14 新竹市 2010 年 SO_2 模擬結果對數座標圖	59
圖 4.15 新竹市 2010 年 O_3 模擬結果對數座標圖.....	61
圖 4.16 新竹市 2010 年 PM_{10} 模擬結果對數座標圖	63

表目錄

表 2.1	一般屋頂成本估算	13
表 3.1	綠屋頂和一般屋頂模擬參數表	18
表 3.2	電力排放係數.....	20
表 3.3	不同植物之 z_0 及 d	22
表 3.4	乾沉降下不同污染物 x 之計算參數	25
表 3.5	綠屋頂與一般屋頂每平方公尺初設成本比較	30
表 3.6	各國綠稅價格.....	32
表 3.7	固定污染源空污費費率	32
表 3.8	單位污染減量成本	33
表 3.9	不同建築用途之 Stormwater credit.....	33
表 4.1	新竹市近年氣溫大於 26 及 28°C 天數統計資料	36
表 4.2	新竹市近年總用電量	36
表 4.3	新竹市易淹水地區水患治理計畫工程	37
表 4.4	新竹測站主要污染物年平均濃度統計表	39
表 4.5	薄層綠屋頂與一般屋頂 U 值.....	43
表 4.6	新竹市綠屋頂和一般屋頂模擬參數表	43
表 4.7	新竹市各類建築利用 1D-HF 分析之節能效益	45
表 4.8	新竹市辦公及住宅建築之比例及總樓地板面積	46
表 4.9	各類建築屋頂面積	46
表 4.10	節能效益比較表.....	53
表 4.11	新竹市減碳效益.....	55
表 4.12	新竹市 2010 年 NO_2 模擬結果.....	57
表 4.13	新竹市 2010 年 SO_2 模擬結果	59
表 4.14	新竹市 2010 年 O_3 模擬結果.....	61

表 4.15 新竹市 2010 年 PM ₁₀ 模擬結果	63
表 4.16 新竹市綠屋頂不同設置比例的空污效益	64
表 4.17 新竹市截水效益.....	65
表 4.18 新竹市降低尖峰逕流量效益	67
表 4.19 一般屋頂平均成本估算表	68
表 4.20 綠屋頂單位建置成本範圍資料	69
表 4.21 各污染物單位損害成本參數表	72
表 4.22 住宅及辦公單位面積 Stormwater credit.....	73
表 4.23 新竹市排水系統擴充成本估算	74
表 4.24 不同一般屋頂更新年限與綠屋頂年均成本差異估算	75
表 4.25 新竹市綠屋頂總效益	75
表 4.26 新竹市綠屋頂與一般屋頂的成本效益差異分析	75
表 4.27 額外考量碳稅與雨水下水道使用費狀況下的綠屋頂總效益	76
表 4.28 額外考量碳稅與雨水下水道使用費狀況下的成本效益差異分析	77
表 A.1 住宅區室內發散熱假定參數	96
表 A.2 住宅空調系統相關參數	97
表 A.3 辦公區室內發散熱假定參數	98
表 A.4 辦公空調系統相關參數	98
表 B.1 劑量反應函數之斜率 (f_{CR}).....	100
表 B.2 健康衝擊的貨幣值表	101
表 C.1 (a)Pasquill 穩定度分類表及(b)日間日照強度判別表	102
表 C.2 不同穩定度下估算 L 值函數之係數 a 和 b	102
表 C.3 計算 R_c 所需之參數	103
表 C.4 不同土地使用種類及季節之參數	104
表 D.1 2010 年 NO ₂ , SO ₂ 及 O ₃ 的 Ra, Rb 及 Rc 各月模擬結果表....	105

表 D.2 2010 年 PM₁₀ 的 Vg, Rs 及 Vd 各月模擬結果表 106

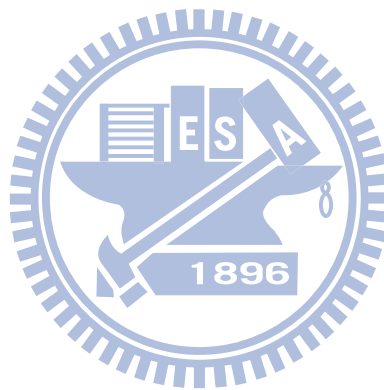


參數符號說明表

符號	說明	單位
ΔQ	通過一般及綠屋頂熱通量的差值	W
A	屋頂面積	m ²
ΔT	建築物內部和周邊之溫度差值	°C
U_{concrete}	一般屋頂熱傳係數	W/ m ² °K
U_{total}	綠屋頂熱傳係數	W/ m ² °K
U_{gr}	綠屋頂基質部份的熱傳導係數	W/ m ² °K
Q_x	在一定時間內，不同污染物 x 能夠被植物所移除的數量多寡	g
F	污染物的質通量	g/ m ² s
L	植物面積	m ²
T	時段	s
VD_x	污染物 x 的乾沉降速率	cm/ s
C_x	污染物 x 的濃度	µg/m ³
R_a	Aerodynamic resistance	s/ m
R_b	Quasi-laminar boundary layer resistance	s/ m
R_c	Canopy resistance	s/ m
$u(z)$	高度 z 的風速	m
u_*	摩擦風速	m
d	Displacement length	m
z_o	Roughness length	m
L	Monin-Obukhov stability length	m
$r_{\text{sm},x}$	Minimum leaf stomata and Mesophyll resistance	s/ m

$r_{lu,x}$	Leaf cuticles resistance	s/ m
r_{dc}	Resistance for gas-phase transfer by buoyant convection in canopies	s/ m
$r_{cl,x}$	Resistance by leaves, twigs, bark or other exposed surfaces in the lower canopy	s/ m
r_{sc}	Transfer resistance	s/ m
$r_{gs,x}$	Ground surface resistance	s/ m
r_i	Minimum bulk canopy stomatal resistances for water vapor	s/ m
G	太陽輻射	W/m ²
T_s	空氣表面溫度	°C
V_g	重力沉降速度	m/ s
R_s	Surface resistance	s/ m
d_p	粒子顆粒之直徑大小	m
θ_f	最終含水率	%
θ_s	飽和含水率	%
θ_i	初始含水率	%
Δt	降雨延時	time
ΔSW_s	基質截水深度	m
ΔSW_d	排水板截水深度	m
P	降雨量	mm
S_D	綠屋頂土壤基質之厚度	mm
DSR_{GR}	綠屋頂的飽和截水深度	m
θ_{ave}	基質的初始平均含水率	%
B_D	排水板單位面積之蓄水深度	cm

C_{NR}	一般屋頂的年均成本	NTD/m ² /yr
C_{NRI}	一般屋頂的初設成本	NTD/m ²
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_{RP}	每 15 年更新部分植栽的費用	NTD/m ²



第一章 前言

1.1 研究緣起

城市由於人口集中建地增加，唯水泥建築不但耗能，增加地表逕流，且導致綠地減少，造成熱島效應，由於綠屋頂具有降溫、減少溫室氣體、空污減量、減少水資源流失、延長屋頂壽命、減少都市熱島效應、提供生物棲息空間等效益 (Castleton *et al.*, 2010; Getter *et al.*, 2009; Wong *et al.*, 2003)，因而已有不少國家推廣中，例如德國已有 145 百萬平方英尺面積的綠屋頂 (Herman *et al.*, 2003)；美國芝加哥亦約有 3 百萬平方英尺的綠屋頂 (Taylor *et al.*, 2007)。台灣由於地狹人稠，綠地所佔比例更是明顯偏低，因而綠屋頂也逐漸受到國內各界所重視，唯國內城市推廣綠屋頂的預期效益會有多大，目前並沒有方法可評估之，故本研究發展一套方法用以評估台灣城市建置綠屋頂之效益，雖然綠屋頂有不少效益，唯限於人力時間，本研究主要分析降溫節能、減碳、空污減量及截水等四個較重要的效益，並估算可能的成本及進行成本效益分析，以供國內規劃城市綠屋頂與相關決策分析時之重要參考依據。

在探討城市推廣綠屋頂的效益與成本之前，首先需要了解所分析城市可用以設置綠屋頂的面積，本研究採以城市的建築區圖層來估算，唯建築區圖層並不是真正的屋頂面積，需要分析屋頂面積佔建築區的比例，目前打算依航照圖估算之由於並非整個屋頂都能設置綠屋頂，一般綠屋頂佔屋頂面積的比例參考 (Casey Trees Endowment Fund and Limno-Tech Incorporation, 2005) 等實例來決定。

綠屋頂的降溫節能效益，主要由於綠屋頂可減少太陽輻射藉由屋頂進入建築物之熱通量 (Barrio, 1998)，及增加屋頂對太陽輻射之反射量，使夏季室內溫度可因綠屋頂之建置而有效降低 (Clark *et al.*, 2008; Castleton *et*

al., 2010), 進而減少空調耗能, 在國外冬季亦可因保暖減少暖氣之能耗 (Clark *et al.*, 2008), 這些效能主要受土壤基質之厚度、含水量及植物葉片密度等因子影響 (Barrio, 1998)。綠屋頂降溫節能效益評估方法可分為兩種: 以熱通量及建築耗能模式模擬, 熱通量法較模式模擬簡易, 有 One-dimensional heat flux equation (1D-HF) (Clark *et al.*, 2008)、Bowen ratio energy balance model (He and Jim, 2010; Jim and He, 2010)、Shield effectiveness model (He and Jim, 2010) 及 Simple energy balance model (Feng *et al.*, 2010) 等數種分析方法, 本研究選擇上列方法中的 1D-HF 法; 建築耗能模式如 eQUEST (Hilten, 2005; Kosareo and Ries, 2007)、Environmental Systems Performance-research (ESP-r) (Saiz *et al.*, 2006) 及 EnergyPlus (Clark *et al.*, 2008; Castleston *et al.*, 2010) 等, 本研究採用美國 LEED (Hilten, 2005; Kosareo and Ries, 2007) 認可的 eQUEST 評估綠屋頂的降溫節能效益, 此外, 由於估算綠屋頂的節能效益時, 不同類型建築的效益並不相同, 故亦把城市建築作分類, 並估算每種類型建築的比例及總面積, 且主要類型建築選一代表性建築作為估算效益之依據並與 1D-HF 法結果比較, 因台灣冬季使用暖氣機會並不多, 所以本研究主要針對代表性建築估算夏季空調用電之節能效益, 再據以推估城市推廣綠屋頂之降溫節能效益。

綠屋頂減碳效主要分二部分, 第一部分是因綠屋頂可減少空調使用率及耗能, 進而減少電廠排放溫室氣體 (Niu *et al.*, 2010), 此部分效益可依前述的節能量乘以電廠的排放係數推估之; 第二部分則是綠屋頂所種植的植物及使用的土壤基質所吸收的 CO_2 ; 植物有吸收 CO_2 的功能 (Li *et al.*, 2010), 且碳亦存於植物的 Biomass 中, 此外空氣中的碳亦會隨著植物的枯枝及滲漏水存於土壤基質當中 (Getter *et al.*, 2009), 此部分的減碳效益, 本研究採用 Getter *et al.* (2009) 的實驗結果, 計算不同種類植物吸收碳的能力, 並綜合節能所得減碳結果, 推估城市綠屋頂減碳效益。

綠屋頂的空污減量效益，主要由於綠屋頂可藉乾沉降、改變微氣候 (Yang *et al.*, 2008)及過濾 (Carter *et al.*, 2008)等機制降低都市空氣污染物的濃度，植物的枝幹、葉子等構造提供較大的表面積及粗糙度，使植物成為污染物吸收源之一 (Beckett *et al.*, 1998; Hill, 1971)。此外，綠屋頂可因減少空調使用率及耗能，進而減少電廠排放之污染氣體 (Yang *et al.*, 2008)，另可降低屋頂周圍溫度，減緩而降低因光化學作用所生成的二次空氣污染物 (e.g., Ozone), (Akbari, 2002; Rosenfeld *et al.*, 1998)；目前評估綠屋頂空污減量方法可分為兩種：現地量測及利用乾沉降模式模擬不同空氣污染物之減量，此方法雖可量測實際值，但不適用於大範圍評估 (Morikawa *et al.*, 1998; Corrie *et al.*, 2005; Tan and Sia, 2005)；第二種是採用乾沉降模式推估，如 Big-leaf resistance (BLR) model (Yang *et al.*, 2008)及 UFORE (City of Toronto and OCE-ETech, 2005; Corrie and Bass, 2005; Casey Trees Endowment Fund and Limno-Tech Incorporation, 2005)等方法，由於 BLR 模式較適合用於綠屋頂所使用之植物種類 (e.g. herbaceous)，本研究因而採用它推估綠屋頂減少各空氣污染物(包括 NO₂, SO₂, O₃, PM₁₀)的量，並據以評估城市綠屋頂之空污減量效益。

綠屋頂的截水效益主要是由於綠屋頂可藉基質含水、植物吸收水及植物蒸發蒸散 (李, 2009; Mitchell *et al.*, 2008; Hilten *et al.*, 2008; Berndtsson, 2010; Stovin, 2010)等機制裁流雨水及延長雨水在屋頂的逕流時間 (Berndtsson, 2010; Stovin, 2010)。評估綠屋頂截水效益有 Rational method (Montalto *et al.*, 2007; Uhl and Schiedt, 2008)、經驗公式、Curve method、Physical model、Analytical model、Water-balance model 及 Computational method (She *et al.*, 2010)等數種分析方法，由於本研究主要是評估城市大區域多個綠屋頂的總體效益，故針對單一場址的模式並不太適用於本研究，本研究因而採用廖(101 年)所歸納出的國內綠屋頂截水效益經驗公式估算

截水量，並採用飽和截水深度估算綠屋頂可能降低的尖峰逕流減量百分比，推估城市綠屋頂之截水效益。

探討城市推廣綠屋頂的效益有必要分析其成本，綠屋頂的成本主要包含建置、額外屋頂防水、培養基質、植物、運輸、維護、更換等經費 (Kneifel, 2010; Wong *et al.*, 2003; Carter and Keeler, 2008)，並依其設計及功能的不同而改變 (Clark *et al.*, 2008; Niu *et al.*, 2010)，含不同型式綠屋頂以及依照不同氣候條件下，植物種類之選取等 (Wong *et al.*, 2003)；目前估算綠屋頂成本方法可分兩類：利用市場價格 (Porsche and Kohler, 2003; Wong *et al.*, 2003)或利用實際案例之價格 (Carter and Keeler, 2008; Niu *et al.*, 2010)，唯台灣綠屋頂仍屬推廣階段，尚未建立本土綠屋頂建置成本資料，故本研究採用台灣現有薄層式綠屋頂建置案例實際資料估算綠屋頂所需成本，作為城市綠屋頂成本效益分析之依據。

推廣城市綠屋頂之前，宜先分析綠屋頂的成本效益，過去 Kosareo and Ries(2007), Wong *et al.* (2003), Porsche and Kohler(2003)及 Kneifel(2010)等曾依據生命週期分析綠屋頂的成本效益，唯這些方法主要針對單一綠屋頂進行分析，不太適用於用於推估城市規模的效益。本研究估算出四種主要效益所具有之經濟效益，降溫節能部份依綠屋頂所節省之電能損耗，轉換為節省的電費；減碳部分參考綠稅(Carbon Tax Center)或國際碳價格成本推估減碳之效益；空污減量部分則估算空污設備因空污減量所降低之環境成本(行政院環保署環境資料庫)以及排放處理成本(倪等, 96年)，並利用台灣現有空氣污染防制費用、倪等(96年)所建立空污防治技術成本函數等估算空污減量之經濟效益；截水部分 Clark *et al.*, (2008); Niu *et al.*, (2010)等曾基於雨水下水道使用費(Stormwater fee)評價綠屋頂的截水效益，雖然台灣並未收此費用，但本研究據以估算截水之經濟效益，並利用排水系統工程單價曲線圖(內政部營建署)，分析因綠屋頂截留所可能減少的費用，最後綜

合所有效益並與綠屋頂設置成本比較，以期作為綠屋頂規劃與決策分析方法之重要參考依據。

1.2 研究目的

本研究之目的主要在於發展適當模式方法，評估城市綠屋頂成本效益之分析，以作為台灣城市綠屋頂規劃與決策分析之用。主要研究目的為下列二項：

1. 城市綠屋頂效益評估方法之建立：綠屋頂在國內仍屬初期發展與示範階段，故有必要了解其預期效益，以作為國內各縣市研擬推廣綠屋頂相關政策之依據，唯國內相關研究甚少，本研究因而針對綠屋頂降溫節能、減碳、空污減量、及截水等四項重要效益建立適當的方法估算之。
2. 城市綠屋頂成本效益分析：本研究以新竹市為案例區，依所建立的方法估算在該市推動綠屋頂的四項效益，且收集典型綠屋頂相關成本資料，分析綠屋頂的成本，然後結合四項綠屋頂效益進行成本效益分析，以期作為研擬規劃相關政策與決策之參考依據。

1.3 論文內容

本論文之後續章節中，第二章回顧國內外綠屋頂發展之現況、綠屋頂節能、綠屋頂減碳、綠屋頂空污減量、綠屋頂截水能力、綠屋頂成本及綠屋頂效益分析等相關文獻；第三章首先簡介本研究流程，並說明本研究所採用之方法與參數，然後針對研究流程的每一個步驟詳細說明之；第四章則介紹以案例研討的過程與結果，包括相關資訊的統整及分析，並應用前述第三章所建立之系統化方法及參數評估新竹市綠屋頂之成本效益；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

本章中主要回顧及討論與本研究相關之文獻，探討過去綠屋頂之相關研究成果。文獻回顧主要分為國內外綠屋頂發展、綠屋頂降溫節能、減碳、空污減量、截水能力及成本效益分析等主題。以下一一說明之。

2.1 國內外綠屋頂發展

早在 1970 年晚期，德國就已將綠屋頂視為都市綠化的推廣政策之一，且開始針對其建置方式及效益研究分析 (Kohler, 2003)，德國已至少有 145 百萬平方英尺面積的綠屋頂 (Herman *et al.*, 2003)，並持續以每年 13.5 百萬平方公尺的速度增加，Haemmerle (2002) 曾估算德國每年新建的屋頂中，有 14% 為綠屋頂。

美國方面，目前華盛頓州有 20-20-20 的計畫，預計在 2020 年綠屋頂面積達到兩千萬平方呎 (Niu *et al.*, 2010)，美國芝加哥目前約有 3 百萬平方英尺的綠屋頂 (Taylor *et al.*, 2007)，且各州亦開始針對城市綠屋頂推廣政策，加以研究分析，如華盛頓州的非官方組織 (Casey Trees Endowment Fund) 就曾對該城市進行城市綠屋頂成本效益分析，以作為未來都市更新的推廣用途；目前美國各州多以政策補助來鼓勵民眾建置綠屋頂，如將綠屋頂作為 Stormwater Best Management Practices (BMPs) 的推廣選項之一，並且因建置綠屋頂，可使原來需付的下水道使用費 (Stormwater fee) 降低 (Carter and Keeler, 2008; Clark *et al.*, 2008)。

亞洲方面，以日本及新加坡為綠屋頂推廣先驅，雖然在德國已有許多綠屋頂植物適應性等相關研究，但 Yeo (2003) 曾說明，相較於德國，新加坡位處亞熱帶，更適合綠屋頂植物之種植，Wong *et al.* (2003) 曾針對新加坡綠屋頂推廣做過 Life Cycle Cost (LCC) 的評估分析，發現雖然薄層式綠屋

頂初始成本較一般屋頂來的高，但其 LCC 是比一般屋頂來的低許多，唯此研究未無考慮綠屋頂降溫節能效益。

國內方面，由於地狹人稠，綠地所佔比例更是明顯偏低，因而綠屋頂也逐漸受到國內各界所重視，唯綠屋頂仍屬推廣階段，雖有吳興國小、松山工農及信義行政大樓（錫瑠基金會，98 年）等實際案例，但國內城市推廣綠屋頂的預期效益會有多大，目前並沒有方法可評估之。

2.2 綠屋頂降溫節能

綠屋頂可降低由屋頂內外之熱通量(Barrio, 1998)，使其可作為夏季降溫、冬季保暖的節能方案。目前綠屋頂降溫節能效益評估方法可分為兩種，以建築耗能模式模擬及熱通量計算，以下分別說明。

2.2.1 建築耗能模式

EnergyPlus(Clark *et al.*, 2008; Castleston *et al.*, 2010)及 Environmental Systems Performance-research (ESP-r)(Saiz *et al.*, 2006)為目前常用於綠屋頂節能效益的軟體，EnergyPlus 部份，Clark *et al.* (2008)及 Castleston *et al.* (2010)等人曾針對綠屋頂建築物耗能模擬模式作過分析，發現大多建築物耗能模擬軟體，較難分析綠屋頂節能效益，進而選用 EnergyPlus 作為評估工具，此軟體是由 US Department of Energy 所研發，並可模擬在建築物上直接建置綠屋頂的情況，此軟體主要依據設計者所輸入之氣候條件、原物料、建築物用途及基本參數，模擬出建築物的 cooling、heating、lighting、ventilating 及 energy flows；ESP-r 則是依樓層級距，將建築物分為 16 個 Zone，針對不同的 Zone 有不同的降溫程度，Saiz *et al.* (2006)曾利用此套軟體評估綠屋頂節能效益，結果顯示雖然整年的節能僅有 1%，但在夏季時期可減少 6% 的降溫負荷，且在最靠近屋頂的樓層中，可減少 25% 的尖峰降溫負荷。

eQUEST(Hirsch, 2003)亦是目前常用於模擬建築物耗能的軟體之一，Hiltner (2005)曾利用 HTDRUS-1D 及 eQUEST 分析屋頂面積為 929m² 的案例建築，且樓層高分別為 1、3 及 8 層樓，結果顯示隨著樓層數的增加，各層樓的節能效益百分比亦隨之降低，唯由於主要的降溫節能在頂部樓層，故 8 層樓與 3 層樓的節能結果差距不大；Carter and Keeler (2008)曾引用 Hiltner (2005)的結果，針對綠屋頂生命周期進行成本效益分析；Kosareo and Ries (2007) 也曾使用此耗能模擬軟體，針對屋頂面積為 1115m² 的案例進行分析，一般屋頂每年的耗能為薄層式屋頂的兩倍左右，並進行一般屋頂及薄層式屋頂的生命周期評估。

2.2.2 熱通量計算

熱通量計算方法較上述模式簡易，有 Bowen ratio energy balance model (BREBM) (He and Jim, 2010; Jim and He, 2010)、Shield effectiveness model (SEM) (He and Jim, 2010)及 Simple energy balance model (Feng *et al.*, 2010) 等數種分析方法。BREBM 可估算通過綠屋頂的熱通量，唯此模式需輸入較多參數，如地區微氣候、淨輻射、氣溫梯度、蒸氣壓梯度及土壤熱輻射等資料，Jim and He (2010)曾以此模式估算綠屋頂之節能效益，此模式亦可和 SEM 結合估算其效益，He and Jim (2010)利用 BREBM 針對各種不同熱輻射吸收進行分析，結合 SEM 評估 radiation shield effects，結果顯示夏季綠屋頂的植物層可將大量的熱吸收和儲存，並將其轉換為有效的緩衝層，足以和日間溫度波動抗衡，使室內溫度降低；熱平衡模式部份，雖然此模式為簡單且實用的評估方法，但是需要的資料太過龐大，且不易量測，如熱輻射、周邊溫度、空氣露點溫度、在植物上的風速、土壤水含量、葉子和土壤的溫度等資料，故未採用。Feng *et al.* (2010)以此模式評估薄層式綠屋頂降溫效益，並用現地實測值驗證，該研究結果顯示，綠屋頂建置後，太陽輻射大約只有 1.2% 會進入室內。

1D-HF(one-dimensional heat flux)法為一維的熱通量公式，主要考量綠屋頂建置前後熱通量之變化，Clark *et al.* (2008)曾使用此法並結合EnergyPlus 及 ESP-r 分析比較一般屋頂與綠屋頂的節能效益差異，其中EnergyPlus 及 ESP-r 使用的 U 值比 1D-HF 來的低，唯該研究並未實測案例屋頂的 U 值。

本研究採用 Hilten (2005)及 Kosareo and Ries (2007)所使用的 eQUEST 建築耗能軟體，以及 Clark *et al.* (2008) 的 1D-HF 法，最後綜合上述兩種方法加以比較分析。

2.3 綠屋頂減碳

綠屋頂減碳效主要分二部分，第一部分是因綠屋頂可減少空調使用率及耗能，進而減少電廠排放溫室氣體(Niu *et al.*, 2010)，第二部分則是綠屋頂所種植的植物及使用的土壤基質所吸收的 CO₂，Niu *et al.* (2010)曾將節能轉換為減碳之效益，本研究亦將採用同樣方法依據電廠排放係數估算減碳效益。

植物及土壤吸收碳部份如 Getter *et al.* (2009)所述，是因碳會存於植物的 Biomass 中，且空氣中的碳亦會隨著植物的枯枝及滲漏水存於土壤基質當中。Li *et al.* (2010)曾評估周界 CO₂ 之濃度對綠屋頂之影響，該研究分為兩部分：實際量測植物對 CO₂ 的吸收及排放速率，接著用其結果評估周界 CO₂ 濃度對綠屋頂減碳效益影響，該研究發現在夏季時期，植物白天的 CO₂ 吸收速率遠大於夜間 CO₂ 排放速率，且綠屋頂減碳能力和綠屋頂植物的設置位置及周邊空氣流動等相關，唯此研究並未估算植物吸收碳的能力，故不適用於本研究；另 Getter *et al.* (2009)曾分析過綠屋頂常用景天科植物(Sedum)的儲碳能力，該研究分為兩部份探討，第一部分評估在地面上 Biomass 吸收碳的能力，最後綜合考量地面上、下 Biomass 及基質吸收碳

的能力，結果顯示對於使用 Sedum 植物的綠屋頂，其吸收能力為 375g-C/m²，本研究採用此數據估算綠屋頂植物吸收碳的量

2.4 綠屋頂空污減量

傳統空污減量較著重於管控固定污染源，但卻無法有效減少空氣中已存在之空氣污染物 (Yang *et al.*, 2008)，綠屋頂卻可針對目前空氣中存在之污染物進行減量，目前綠屋頂的空污減量評估方法可分為兩種：現地量測及利用乾沉降模式模擬不同空氣污染物之減量。

現地量測部份，常對不同植物吸碳能力加以定量，Morikawa *et al.* (1998) 曾針對 217 種不同植物對 NO_x 的吸收能力加以定量，Clark *et al.* (2008) 即利用該研究結果估算綠屋頂之空污減量效益，唯並未考慮其他常見污染物。

乾沉降模式部份，目前美國常用之方法為 Urban Forest Effects(UFORE) (City of Toronto and OCE-ETech, 2005; Currie and Bass, 2005; Casey Trees Endowment Fund and Limno-Tech Incorporation, 2005) 模式，該模式是由 USDA Forest Service Northeastern Regional Station 發展而來，且具有許多不同的模組，其中，Module D 是用來估算空氣污染物每小時去除率及移除之經濟效益。Currie and Bass (2005) 曾利用其估算綠屋頂及綠牆對於多倫多地區的空污減量效益，在 Casey Trees Endowment Fund and Limno-Tech Incorporation. (2005) 的報告中也曾利用此模組，評估在華盛頓地區不同植物種植情境的減量效果，發現如全市皆為綠屋頂時，每年可達 58 metric tons 的空污減量，唯此模式主要適合美洲地區的評估，並不太適用於其他地區。

Big-leaf resistance (BLR) (Yang *et al.*, 2008) 模式是屬於乾沉降模組，利用氣象資料，估算不同空氣污染物在環境中的乾沉降速度，此法可針對不同植物種類的沉降速度進行評估。Yang *et al.* (2008) 曾利用此模式，估算美

國芝加哥綠屋頂空氣污染物的減量效益，相較於前述方法，此法較適用於大範圍評估，故本研究採用 BLR 模式推估綠屋頂減少各空氣污染物(包括 NO₂, SO₂, O₃, PM₁₀)的量。

2.5 綠屋頂截水能力

由於綠屋頂可有效截流雨水及延長雨水在屋頂的逕流時間 (Berndtsson, 2010; Stovin, 2010)，故可作為 Stormwater Best Management Practices (BMPs)的推廣選項之一(Villarreal *et al.*, 2004)。Stovin (2010)提到因綠屋頂不需額外的土地，所以在人口密集且不透水層居多的城市中，是值得推廣的方案。

在美國，常以 Curve Number (CN)評估非點污染源，而一般不透水層屋頂的 CN 為 98，Carter and Rasmussen (2006)曾量測綠屋頂的 CN 為 86，進而求得綠屋頂基質的保水率。Carter and Jackson (2007)亦曾利用 CN 法評估在不同的空間條件下，綠屋頂如何設置對城市的截水效益最佳。唯國內並未使用 CN 法作為非點污染源估算指標，故不太適合國內使用。

Voyde *et al.* (2010)曾以水平衡估算綠屋頂的雨水逕流體積及尖峰逕流，亦考量紐西蘭綠屋頂植物的蒸散速率，公式如下所列：

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = P - R - ET \quad (2.1)$$

其中 P 為降雨，R 為屋頂上之逕流，ET 為蒸散速率，S 為基質保水度，結果顯示綠屋頂植物可藉由蒸散作用及保水能力降低雨水之地表逕流。此外，Mitchell *et al.* (2008)亦曾利用 Aquacycle and Single-source urban evapotranspiration interception scheme 等兩套模式進行分析並比較，發現綠屋頂可藉由植物的蒸散能力有效降低地表逕流及尖峰流量，唯本研究難以針對各植物之蒸散速率(ET)一一監測，故未採用。

電腦模擬程式模擬部份，如 Hilten *et al.* (2008) 曾採用 Hydrus-1D(Simunek *et al.*, 2008)分析 Sedum 種類植物的截水程度，結果顯示降雨的強度對於截水影響頗大，唯此程式需要監測土壤表面水通量及水力特性等，並不適用於大範圍城市截水效益之估算。

She *et al.* (2010)則利用物理模式分析截水效益，發現如果屋頂基質裡的水量超過其可容許的水量，且土壤基質未完全飽和，部份的雨水會存留在基質表層。由於本研究主要是評估城市大區域多個綠屋頂的總體效益，而上述截水估算方法，主要是針對單一場址，故並不太適用於此研究，故本研究採用廖(101 年)所歸納出的國內綠屋頂截水效益經驗公式估算城市綠屋頂之截水效益。

2.6 綠屋頂成本效益分析

推廣綠屋頂之前，宜分析成本效益，在新加坡，為了推廣綠屋頂之建置，Wang *et al.* (2010)曾分析綠屋頂的 Life Cycle Cost(LCC)，雖然綠屋頂初設成本較一般屋頂來的高，但整個生命周期的花費卻較低，唯該研究綠屋頂只考量節能部份，並未納入其他綠屋頂效益，故有低估之可能；另外 Porsche and Kohler (2003)曾分析比較德國、美國及巴西綠屋頂的 LCC，並比較這三個國家的綠屋頂效益，美國雖然沒有像德國政府的政策補助，但在成本的控制上來的好，至於巴西，因為民眾對於綠屋頂景觀之愛好，也成為該地區綠屋頂接受度頗高的原因。

要進行成本效益分析之前，有必要針對一般與綠屋頂的成本進行估算，表 2.1 為本研究所蒐集文獻中一般屋頂成本的估算方法，目前大多以屋頂防水層的成本作為一般屋頂之成本，從表上亦可看出，一般屋頂的種類不盡相同，故有些數據不能直接比較。

表 2.1 一般屋頂成本估算

文獻	價格	資料來源或取得方法	考量
Carter and Keeler. (2008)	\$83.78/m ²	Means Construction Coast Data (2005)	考量混凝土上方(防水層)的成本
Niu et al. (2010)	\$242/m ²	依一棟屋頂面積為 1795m ² 的辦公大樓作案例	Thermoplastic elastomerolefin and single-ply system 兩種屋頂為代表
Clark et al. (2008)	\$167/m ²	選 Ann Arbor 校園內 75 個屋頂做為案例，並請廠商估價重新施作屋頂的價格	平均屋頂面積為 1870m ²
Wong et al. (2003)	\$64/m ²	Roof deck 的成本詢問兩家建築公司	Roof deck 成本分為兩部分：precast prestressed concrete planks and structure concrete 來估算，但不考量梁柱的成本
Elsa. (2008)	將一般屋頂設為基準，並無實際值	成本資料由香港科技報告取得 (ASD, 2007)	只考量綠屋頂建置需要的額外成本，將一般屋頂的建置成本設為基準

成本效益分析是一個常用於決策推廣的工具，此法亦是一種有系統收集與評估公共政策之利弊得失的政策分析工具，故推廣城市綠屋頂之前，宜先分析綠屋頂的成本效益，隨著綠屋頂逐漸受到都市的重視，有必要將其效益轉換為經濟效益，在美國 Athens, GA，Carter and Keeler (2008) 考量薄層式綠屋頂的建築維護成本、截水、降溫節能及空污減量，分析大眾及個人的各別效益；此外，Clark *et al.* (2008) 亦曾採用相同方法，比較一般屋頂與綠屋頂的成本效益，唯該研究是針對單一建築物作分析，並不適用於城市範疇的分析；在華盛頓地區，Niu *et al.* (2010) 評估該城市綠屋頂成本效益分析，唯其只考量降溫及截水為綠屋頂主要之效益，且空污減量部份

只利用電廠的空污排放係數評估 NO₂ 及 SO₂ 的減量效益，且因所轉換之經濟係數並無一確定值，使其評估結果不確定性頗高。

本研究參考上述文獻針對綠屋頂降溫節能、減碳、空污減量、及截水等四項重要效益建立適當的方法估算之，並依照台灣本土特徵發展適當模式方法，評估城市綠屋頂成本效益，以作為台灣城市綠屋頂規劃與決策分析之用。



第三章 研究方法

本研究重點主要期望建立適當方法推估城市推廣綠屋頂之成本效益，以作為國內各城市綠屋頂推廣決策分析之用，本章首先針對本研究流程作概要介紹，接著針對綠屋頂面積估算、效益評估、成本概估等方法作詳細說明，之後說明城市綠屋頂成本效益分析方法，以下各節一一說明之。

3.1 研究流程

本研究之流程如圖 3.1 所示，主要分為資料收集及整理、綠屋頂面積估算、綠屋頂效益評估、綠屋頂成本概估、城市綠屋頂成本效益分析及案例研討等工作項目，以下概要說明之：

1. 資料收集及整理：主要收集國內外綠屋頂發展及綠屋頂效益估算方法，包括綠屋頂降溫節能、減碳、空污減量、及截水等效益之相關文獻，並收集案例研討所需資料，包含案例區所在地面及探空氣象資料、案例區建築物圖層及分類資料等。
2. 綠屋頂面積估算：主要是估算可能設置綠屋頂的面積大小，並以城市的建築區圖層來估算綠屋頂可設置面積。
3. 綠屋頂效益評估：主要可分為降溫節能、減碳、空污減量、及截水等四項效益，目前國外文獻雖已有一些估算方法，唯國內相關研究甚少，本研究參考相關文獻及國內的特性建立推估此四效益方法。
4. 綠屋頂成本概估：雖然國外已有許多綠屋頂成本資料，唯地點及型式不同，成本價格亦有所不同，故本研究收集台灣現有薄層式綠屋頂建置案例實際資料估算綠屋頂所需成本。

5. 城市綠屋頂成本效益分析：本研究首先比較成本及所估算之四項效益，成本與各效益間的關係。然後依照台灣本土特徵，分別將四項效益轉換成經濟效益及外部效益，經濟效益以節能及節能與減碳為主，主要評估綠屋頂對設置者可產生的經濟效益；外部效益則主要以減碳、空污減量與截水為主，主要評估城市綠屋頂推廣政策可衍生的外部效益。
6. 案例研討：本研究以新竹市為案例區，依前述流程進行研究，推估該市若推廣綠屋頂之成本效益，以供該市及其他城市推廣綠屋頂決策分析之參考依據。

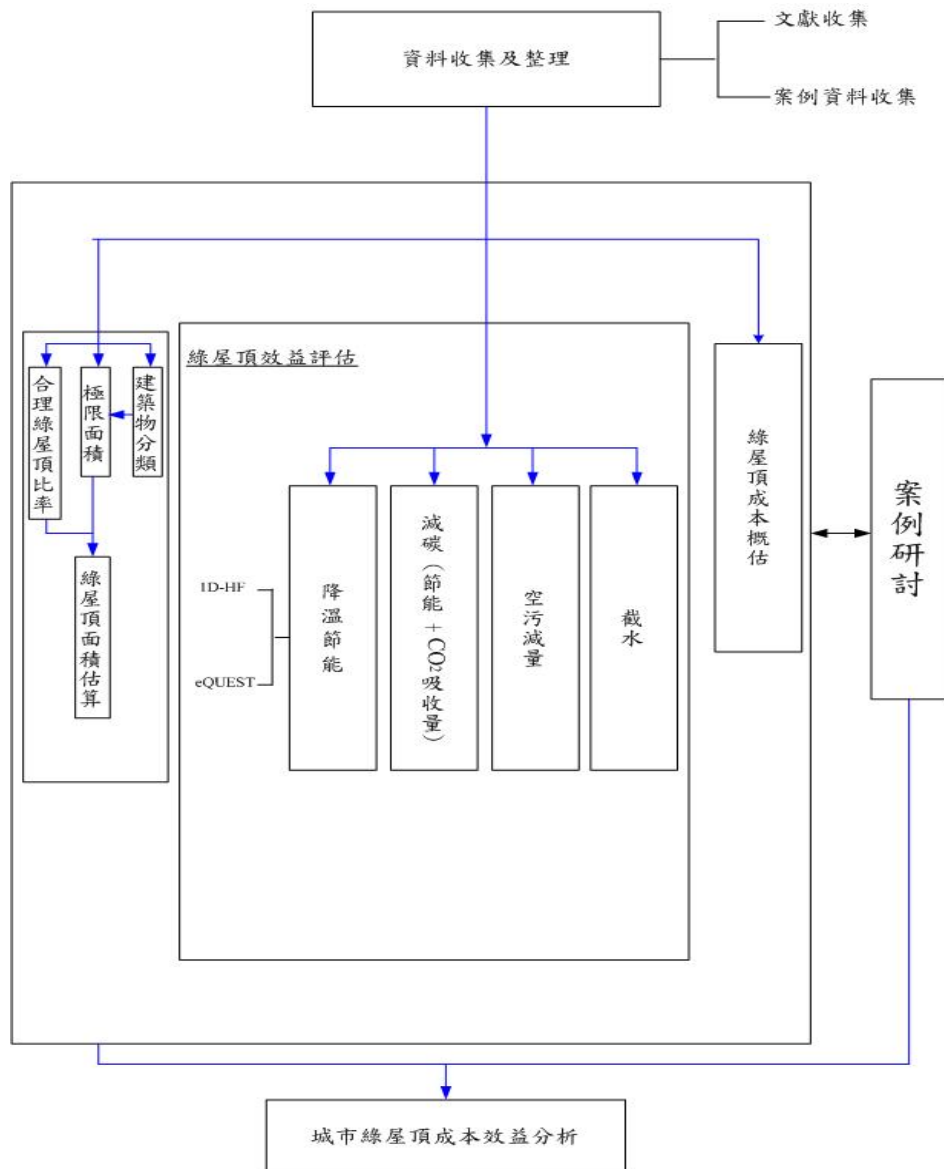


圖 3.1 研究流程

3.2 可供建置綠屋頂面積估算

在探討城市推廣綠屋頂的效益與成本之前，首先需要了解所分析城市可用以設置綠屋頂的面積，本研究採建築物圖層估算城市建築物屋頂面積，唯此類圖層是建築物屋頂之基地面積，並不是建築物實際屋頂面積，故參考城市之航照圖進行取樣比對，推估屋頂面積佔基地面積的比例；此外，一棟建築物一般無法將屋頂的全部面積用於設置綠屋頂，故本研究依據 Casey Trees Endowment Fund and Limno-Tech Incorporation (2005)的報告中，採用 80%的屋頂面積作為綠屋頂可設置之最大面積，最後利用推估的屋頂面積與最大面積相乘，估算城市綠屋頂的總面積。

3.3 城市綠屋頂效益評估

以下針對綠屋頂降溫節能、減碳、空污減量、及截水等四項重要效益分別說明本研究估算各效益的方法。



3.3.1 降溫節能

本研究參考 Clark *et al.*(2008)建立之 1D-HF 法，並以 eQUEST 建築物耗能模擬系統 (Hirsch, 2003; Carter and Keeler, 2008; Hilten *et al.*, 2005; Kosareo and Ries, 2007) 分析綠屋頂的節能效益，此兩種方法皆依據屋頂之熱通量來估算綠屋頂之降溫節能效益，以下分別說明二方法。

3.3.1.1 1D-HF 法

此方法之計算方式如下式所示：

$$\Delta Q = (U_{concrete} - U_{total}) \times A \times \Delta T \quad (3.1)$$

$$\Delta Q = (U_{concrete} - U_{total}) \times A \times (T - 26^{\circ}\text{C}) \quad (3.2)$$

其中 ΔQ 為通過一般及綠屋頂熱通量的差值(W)，A 為屋頂面積(m^2)， ΔT 為建築物內部和周邊之溫度差值($^{\circ}C$)， $(U_{concrete}-U_{total})$ 為一般和綠屋頂熱傳係數的差值($W/m^2 \cdot ^{\circ}K$)， $(T-26^{\circ}C)$ 部份，因本研究假設全年冷氣啟動的溫度為 $26^{\circ}C$ ，T 則為全年周邊逐時周邊溫度($^{\circ}C$)，故式 3.2 估算的為全年冷氣之節能量。本研究以表 3.1 所列為一般屋頂($U_{concrete}$)、綠屋頂基質(U_{gr})及綠屋頂的 U_{total} 值，其中綠屋頂基質部份的熱傳導係數(U_{gr})依本研究群實測國內案例為 0.410，綠屋頂 U_{total} 值的計算方式如下式所列：

$$\frac{1}{U_{total}} = \frac{1}{U_{concrete}} + \frac{1}{U_{gr}} \quad (3.3)$$

利用 3.2 式來估算綠屋頂降溫節能效益。所得結果將與 eQUEST 模擬所得結果比較，因台灣冬季使用暖氣機會並不多，所以本研究主要針對代表性建築估算溫度較高時空調用電之節能效益，再據以推估城市推廣綠屋頂之降溫節能效益。

表 3.1 綠屋頂和一般屋頂模擬參數表

屋頂分類	綠屋頂	一般屋頂
吸收度	0.310	0.900
U 值 [$W/m^2 \cdot ^{\circ}K$]	$U_{gr}=0.410$ $U_{total}=0.322$	$U_{concrete}=1.490$

3.3.1.2 eQuest 法

eQUEST(Hirsch, 2003)是目前常用於模擬建築物耗能的軟體之一，主要核心為 DOE-2 模式(Hirsch, 2003)，並加上較友善的使用與圖形介面，依據氣象資料(TMY2)估算建築物全年逐時能耗資料。較詳細介紹請參見附錄 A.1。

由於後續估算綠屋頂的效益時，不同類型建築的效益並不相同，目前國內外用於建築物耗能模擬中有三種建築分類方法：依建築物用途別 (Kneifel, 2010; 黃, 91 年)、屋頂面積 (Niu *et al.*, 2010)及樓層(內政部營建署)三種。唯建築物用途資料不易取得，建築物基地圖層亦不易用以判識建築物類型，故本研究分為兩個步驟進行分類，首先依內政部營建署核發建物使用執照按用途別分類之資料將建物分為兩類：辦公類及住宅建築，並估算新竹市的住辦比例，再依核發建物使用執照按樓層別資料將建物分成三類樓層：1 樓、2 樓及 3 樓以上，3 樓以上建物部分則因綠屋頂節能效益大多集中在靠近屋頂的三層樓之內，依 Saiz *et al.*(2006)的研究結果，最上方樓層的節能效益約占總節能的 97%，可知綠屋頂節能效益幾乎集中在最上方三層樓，且 eQUEST 在模擬 3 層樓以上的建築物時，會利用 Floor Multiplies 簡化中間樓層的模擬過程，故本研究主要考量最上方 3 層樓的節能效益為代表，並估算各類建築的屋頂面積，作為效益估算依據。

本研究依照上述所說明的建築分類模擬辦公類及住宅在不同樓層代表性建築的節能效益，最後換算為單位屋頂面積以便與 1D-HF 所得結果比較；在進行 eQUEST 建築物耗能模擬系統分析之前，需先進行標準建築物樣本之基本假設與模擬因子之選定，本研究將其分為四項：建築物樣本基本假設、屋頂構造、室內發散熱及空調系統，以下擇要說明之，較詳細模擬因子介紹及室內發散熱與空調系統請參見附錄 A.2。

1. 建築物樣本之基本假設：本研究參考換氣與空氣調節設備技術規範(75 年)，選用國內市面上最常見 U 值為 $3.500[\text{W}/\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{K}]$ 的 20cm 鋼筋混凝土外牆(編號 W002)。

2. 屋頂構造:建築物一般屋頂部分主要參考換氣與空氣調節設備技術規範(75年),U值同前一方法,亦採用表3.1所列的值,而綠屋頂和一般屋頂除了U值不同,吸收度亦不同,如表3.1所列。

3.3.2 減碳

綠屋頂減碳效益主要分二部分:降溫節能及綠屋頂植物和基質吸收兩種(本研究暫不考量植物的固碳作用),第一部分可依前述的節能量乘以電力的排放係數推估之,各年電力排放係數如表3.2所列,本研究採用99年度電力轉換係數推估之;第二部份,本研究採用 Getter *et al.* (2009)的實驗結果,以10cm土壤基質種植景天科植物,其吸附碳的能力為 375 g-C m^{-2} ,並與城市綠屋頂之總面積相乘,推估此部份之效益,最後將兩部分之減碳效益加總,推估城市綠屋頂減碳效益。

表 3.2 電力排放係數

年度	轉換係數 (kg eCO ₂ /度)
94	0.626
95	0.637
96	0.632
97	0.631
98	0.616
99	0.612

資料來源:台灣電力公司(99年)

3.3.3 空污減量

本研究採用 Big-leaf resistance (BLR) model (Yang *et al.*, 2008)推估綠屋頂減少各空氣污染物(包括 NO₂, SO₂, O₃, PM₁₀)的量，根據 Nowak (1994a)，在一段時間及一定綠屋頂面積，針對不同空氣污染物之減量，可以下列公式估算：

$$Q_x = F_x \times L \times T \quad (3.4)$$

其中 Q_x 是代表在一定時間內，不同污染物 x (e.g., NO₂, SO₂, O₃, PM₁₀)，能夠被植物所移除的數量多寡(g)，F 代表污染物的質通量(g m⁻² s⁻¹)，L 為植物面積 (m²)，T 則代表時段 (s)

1. 污染物之質通量, (Nowak, 1994a):

$$F_x = VD_x \times C_x \quad (3.5)$$

其中 VD_x 為污染物 x 的乾沉降速率 (dry deposition velocity) (cm/ s); C_x 為空氣中污染物 x 的濃度(μg/ m³).

2. O₃, SO₂, 及 NO₂ 的乾沉降速率 (VD_x) (Nowak, 1994a):

$$VD_x = (R_a + R_b + R_c)^{-1} \quad (3.6)$$

其中 R_a 為 Aerodynamic resistance; R_b 為 Quasi-laminar boundary layer resistance; 而 R_c 為 Canopy resistance。

- (a) R_a (Nowak, 1994a)

$$R_a = u(z)/u_*^2 \quad (3.6a)$$

其中 $u(z)$ 為高度 z 的風速， u_* 為摩擦風速，且依 Ψ_m 動量穩定方程式估算，如下列：

$$u_* = ku(z-d) / \{ \ln[(z-d) / z_0] - \Psi_m [(z-d)/L] + \Psi_m [z_0/L] \} \quad (3.6b)$$

其中 k 為 Von Karman Constant (0.4); z 為高度 (m); d 為 Displacement length (m); z_0 為 Roughness length (m); 而 L 為 Monin-Obukhov stability length (m)，表 3.3 所列為不同植物種類的 z_0 及 d ；本研究同 Yang *et al.* (2008) 亦採用 Short grass 來代表薄層式率屋頂； L 是依大氣資料庫地方測站資料，並使用 Turner classes 分類方法判斷每小時之大氣穩定度，附錄 C.1(a)及(b)詳列此分類方法 (Panofsky and Dutton, 1984)，然後再依下式 (Zannetti, 1990) 估算 L 值：

$$\frac{1}{L} = a \times z_0^b \quad (3.6c)$$

其中不同大氣穩定下之係數 a, b 值請參見附錄 C.2 所列。

表 3.3 不同植物之 z_0 及 d

植物種類	Average height h_0 (m)	$z_0 = 0.1h_0$ (m)	$d = 0.7h_0$ (m)
Short grass	0.150	0.015	0.105
Tall herbaceous plants	1.000	0.100	0.700
Deciduous trees	5.000	0.500	3.500

資料來源：Yang *et al.* (2008)

當 $L < 0$ ，在不穩定狀態下 (van Ulden and Holtslag, 1985)：

$$\Psi_m = 2 \ln \left[\frac{(1+X)}{2} \right] + \ln \left[\frac{(1+X^2)}{2} \right] - 2 \tan^{-1}(X) + 0.5 \quad (3.6d)$$

其中 X 為一無單位之因子，依 Dyer and Bradley(1982)所建議下列式子計算：

$$X = \left(1 - 28 \frac{z}{L} \right)^{0.25} \quad (3.6e)$$

當 $L > 0$ ，在穩定狀態下：

$$\Psi_m = -17 \left[1 - \exp \left(-0.29 \frac{(z-d)}{L} \right) \right] \quad (3.6f)$$

(b) R_b (Pederson *et al.*, 1995)

$$R_b = \frac{2S_c^{2/3} \times P_r^{-2/3}}{ku_*} \quad (3.6g)$$

其中 k 是 Von Karman Constant (0.4); S_c 是 Schmidt number, 且 $S_c = \nu / D$, ν 是 Kinematic viscosity of air, D 是氣體的分子擴散係數, O_3 的 $S_c = 1.000$, NO_2 的 $S_c = 0.980$, SO_2 的 $S_c = 1.150$; P_r 為 Prandtl number, 空氣的 P_r 常數為 0.720。

(c) R_c (Wesely *et al.*, 1989)

$$R_c = \left[1/r_{sm,x} + 1/r_{lu,x} + 1/(r_{dc} + r_{cl,x}) + 1/(r_{sc} + r_{gs,x}) \right]^{-1} \quad (3.6h)$$

其中 $r_{sm,x}$ 是由 Minimum leaf stomata and Mesophyll resistance 所組合而成; $r_{lu,x}$ 是 Leaf cuticles resistance; r_{dc} 是 Resistance for gas-phase transfer by buoyant convection in canopies; $r_{cl,x}$ 是 Resistance by leaves, twigs, bark or other exposed surfaces in the lower canopy; r_{sc}

是 Transfer resistance，且和植物頂篷之高度和密度有關； $r_{gs,x}$ 是 Ground surface resistance，下標 x 則代表不同污染物 x ，S 和 O 分別為 SO_2 和 O_3 ，也利用此兩物種代表其路徑。

(1) $r_{sm,x}$ (Mesophyll resistance)

$$r_{sm,x} = r_s D_{H_2O} / D_x + r_{m,x} \quad (3.6i)$$

其中 r_s 是 Leaf stomata resistance; D_x 是不同污染物 x 在空氣中的分子擴散係數; D_{H_2O} 是水蒸氣的分子擴散係數，而在方程式 3.6i 中之 $r_{m,x}$ 可藉由不同污染物 x 的 H^* 及 f_0 ，分別計算之。

$$r_{m,x} = (H^*/3000 + 100f_0)^{-1} \quad (3.6j)$$

其中不同污染物 x 之 H^* 及 f_0 請參見表 3.4。

$$r_s = r_i \left\{ 1 + [200(G + 0.1)^{-1}]^2 \left\{ 400[T_s(40 - T_s)]^{-1} \right\} \right\} \quad (3.6k)$$

其中 r_i 是 Minimum bulk canopy stomatal resistances for water vapor; G 是太陽輻射 (W/m^2); T_s 是空氣表面溫度且介於 0 到 40 °C 之間。

(2) r_{dc} (Resistance for gas-phase transfer by buoyant convection in canopies)

$$r_{dc} = 100 \left[1 + 1000(G + 10)^{-1} \right] (1 + 1000\theta)^{-1} \quad (3.6l)$$

其中 G 是太陽輻射 (W/m^2); θ 為與地面的角度; r_{dc} 之單位為 s /m。

(3) $r_{lu,x}$

附錄 C.3 所列為 r_{lu} 在不同氣候下的基準值，而針對不同污染
物物種 x ，須依下式作修正：

$$r_{lu,x} = r_{lu} (10^{-5} H^* + f_0)^{-1} \quad (3.6m)$$

其中 $r_{lu,x}$ 為污染物物種 x 的 r_{lu} 值； H 是亨利常數； f_0 為
Reactivity factor for oxidation of biological substances。

(4) $r_{cl,x}$ (Resistance by leaves, twigs, bark or other exposed surfaces in
the lower canopy)

$$r_{cl,x} = [H^* / (10^5 r_{cl,S}) + f_0 / r_{cl,O}]^{-1} \quad (3.6n)$$

其中 $r_{cl,S}$ 及 $r_{cl,O}$ 請參見附錄 C.3。

(5) $r_{gs,x}$ (Ground surface resistance)

$$r_{gs,x} = [H^* / (10^5 r_{gs,S}) + f_0 / r_{gs,O}]^{-1} \quad (3.6o)$$

其中 $r_{gs,S}$ 及 $r_{gs,O}$ 請參見附錄 C.3。

表 3.4 乾沉降下不同污染物 x 之計算參數

污染物物種	化學式	D_{H_2O}/D_x	H^*	f_0
二氧化硫	SO ₂	1.900	1.000 x 10 ⁵	0.000
臭氧	O ₃	1.600	0.010	1.000
二氧化氮	NO ₂	1.600	0.010	0.100

資料來源：Wesely *et al.* (1989)

3. PM₁₀ 之乾沉降速率計算(Yang *et al.*, 2008):

$$V_d = V_g + (R_a + R_s)^{-1} \quad (3.7)$$

其中 V_g 是重力沉降速度; R_a 是 Aerodynamic resistance; R_s 是 Surface resistance。

(a) V_g

$$V_g = \rho d_p^2 g C / 18 \eta \quad (3.7a)$$

其中 ρ 是粒子顆粒之密度，此處採用 1800 kg/m^3 (Lim *et al.*, 2006); d_p 是粒子顆粒之直徑大小; g 是重力加速度; η 是空氣的黏滯係數; C 是 Correction factor for small particles 且計算方法為(Zhang *et al.*, 2001) :

$$C = 1 + 2\lambda \left(1.257 + 0.4e^{-0.55d_p/\lambda} \right) / d_p \quad (3.7b)$$

其中 λ 是 Mean free path，為緯度的函數，計算式如下：

$$\lambda = \mu / \left[0.499 \rho \left(\sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \right) \right] \quad (3.7c)$$

(b) R_s (Surface resistance)

$$R_s = 1 / \varepsilon_0 u^* (E_B + E_{IM} + E_{IN}) R_1 \quad (3.7d)$$

其中 ε_0 是一經驗常數 3; u^* 是摩擦風速; E_B 、 E_{IM} 、和 E_{IN} 則是 Brownian diffusion, impaction 和 interception 的收集效率; R_1 是一修正係數，表示顆粒黏在表面之程度。

(1) E_B

$$E_B = S_c^{-\gamma} \quad (3.7e)$$

其中 γ 會隨著土地使用種類之不同而改變，請參見附錄 C.4。

(2) E_{IM} (Peter and Eiden, 1992)

$$E_{IM} = [S_t / (\alpha + S_t)]^\beta \quad (3.7f)$$

其中 α 請參見表 3.8; β 則採用 2; Impaction process 主要受由 Stoke number (S_t) 所影響，植物表面上之計算方式為 $S_t = V_g u^* / gA$ (Slinn, 1982)，在平滑表面之計算方式則為 $S_t = V_g u^* / \nu$ (Giorgi, 1988); A 為收集器之特徵半徑，請參見附錄 C.4。

(3) E_{IN} :

$$E_{IN} = 0.5(d_p/A)^2 \quad (3.7g)$$

其中 A 是收集器之特徵半徑，請參見附錄 C.4。

(4) R_1 (Slinn *et al.*, 1982):

$$R_1 = \exp(-S_t^{1/2}) \quad (3.7h)$$

3.3.4 截水

綠屋頂的截水效益可分為兩部份：降低雨水地面逕流及降低降雨尖峰流量，降低雨水地面逕流部份，本研究採用廖(101 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：

$$\theta_f = \theta_s - (\theta_s - \theta_i) e^{-\beta \Delta t} \quad (3.8)$$

$$\Delta SW_S = (\theta_f - \theta_i) S_D \quad (3.9a)$$

$$\Delta SW_d = (P - \Delta SW_s) \times (0.0117P - 0.2289) \quad (3.9b)$$

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， Δt 為降雨延時， β 依廖(101 年)降雨時為 0.01969，無降雨則為 -0.00905， ΔSW_s 為基質截水深度， ΔSW_d 為排水板截水深度， P 為降雨量， S_D 為綠屋頂土壤基質之厚度(mm)；利用式 3.8 估算降雨後的最終含水率，並用式 3.9a 估算降雨後的基質截水深度，並配合式 3.9b 估算排水板可截之深度，最後將 3.9a 與 b 加總並與綠屋頂面積相乘，即為總截水量。

降低尖峰逕流量效益部份，雖然合理化公式(Ramser, 1927)常用以小集水區的尖峰逕流量，唯由於薄層綠屋頂基質厚度有限，故此法並不適用綠屋頂，故本研究採用飽和截水深度來推估，本研究依據基質厚度、飽和含水率、平均含水率及排水板的蓄水量估算飽和截水深度，由於雨水系統在設計時通常採用較大的設計雨量估算，而薄層綠屋頂由於厚度有限，故一般在大雨時其截水量應接近於飽和截水深度，本研究以下式估算綠屋頂的飽和截水深度：

$$DSR_{GR} = \left[\frac{(\theta_s - \theta_{ave}) \times S_D + B_D}{10^2} \right] \quad (3.10)$$

其中 DSR_{GR} 為綠屋頂的飽和截水深度(m)， θ_s 與 θ_{ave} 分別為基質的飽和含水率及初始平均含水率， S_D 為基質厚度(cm)， B_D 為排水板單位面積之蓄水深度(cm)。

唯飽和截水深度代表綠屋頂可減少的最大逕流深度，實際尖峰逕流減少深度應會小於此值，故有必要乘以一個百分比，唯此百分比會隨著雨型不同而不同，本研究將飽和截水深度乘以 100% 及 50% 估算尖峰截水深度(m)，並與集水分區中綠屋頂面積比例相乘，估算單位時間內可能降低的尖峰截水深度，最後除以新竹市五年再現期的設計時雨量，作為該區尖峰逕流減量百分比，唯此值是一個概估值，詳細推估需要建 SWMM 模式，至

於是否高估及低估，並不易判斷，也可能高估，因空間分佈若在上游為主或是未達飽和、初始含水率較高等，也可能低估，可能會減少更多的尖峰逕流量，可延遲尖峰時間。

3.4 一般屋頂及綠屋頂成本概估

綠屋頂成本會受到一些因子影響，包括初設成本(包括植物、基質、形式、排水與蓄水層、防水層及材料運輸與工資等)、氣候、維護與更新、使用期間、折現率、屋頂可及性、設計、功能、市場規模(Chang *et al.*, 2011; Niu *et al.*, 2010; Carter and Keeler, 2008; Clark *et al.*, 2008; Wong *et al.*, 2003; Porsche and Kohler, 2003)。因子不同成本亦會隨之變動，如表 3.5 所列，該表列出文獻中可找到的各國綠屋頂及一般屋頂的初設成本，與一般屋頂差異在約 40% 至三倍之間，變動範圍並不小。本研究針對一般薄層綠屋頂及一般屋頂，依以下數個因子分析綠屋頂成本：

1. 初設成本: 一般屋頂主要包含保力龍、混凝土、油毛氈、水泥砂漿及材料運輸與工資等。綠屋頂則主要包括植物、基質與厚度、排水與蓄水層、防水層及材料運輸與工資等，本研究向已建置的國內案例及相關廠商訪查這些成本資料。
2. 維護: 一般屋頂的維護檢視需求假設二種屋頂都相同，故未納入計算。綠屋頂部分雖然國外文獻有維護成本資訊，但預期不適合於國內，故未採用，依 Wong *et al.* (2003)，約半年或一年須維護一次。此外，每個月亦須要巡視約二次(Wong *et al.*, 2003)，加水或除草等，唯本研究假設巡視由建築所有人負責，故未納入計算。
3. 更新: (1) 一般屋頂約 10 至 20 年需要更新 (Clark *et al.*, 2008; Porsche and Kohler, 2003; Kodstro and Ries, 2007)，故本研究分為 10、15 及 20 年需更新一次。而綠屋頂則由於阻隔陽光紫外線及形成保護層降溫等

作用(Wong *et al.*, 2003)預期可延長屋頂的壽命 2 至 3 倍，本研究採用較保守的估計，假設可延長屋頂壽命一倍；(2) 植物則依 Wong *et al.* (2003)之假設每 15 年需要更新。一般屋頂的防水層可能不到 20 年即需要更新，唯更換期間不易推估且變動頗大，故本研究以其初設成本為估算依據，分析 10、15 及 20 三種不同年限。

4. 使用期間: 由於一般屋頂假設 20 年更新一次，而綠屋頂假設可延長其一倍的壽命，故本研究依據 40 年使用期間估計二者的年均成本。
5. 折現率: 依中央銀行全球資訊網公告的五大銀行平均存款一年期利率，2006 到 2011 年利率約在 0.770-2.635%之間，平均 1 年利率為 1.534%，而依主計處消費者物價指數(CPI)平均漲跌率而言，2006 到 2011 年的範圍在-0.870-3.530%之間平均漲跌率為 1.350%，若依此二數據計算，折現率範圍約在-0.110-6.250%之間，平均為 2.910%，而經濟部再生能源電能躉購費率中，折現率訂為 4.250%(經濟部能源局，99 年)，本研究依此作為估算依據。

表 3.5 綠屋頂與一般屋頂每平方公尺初設成本比較

國別	綠屋頂	一般屋頂	文獻
美國	\$161-269	-	Chang <i>et al.</i> (2011)
	\$306	\$242	Niu <i>et al.</i> (2010)
	\$100-300 (\$158.82)	\$83.78	Carter and Keeler (2008)
	+39%	\$167	Clark <i>et al.</i> (2008)
新加坡	\$89.86	\$49.25	Wong <i>et al.</i> (2003)
德國	\$85-90	\$40-50	Porsche and Kohler (2003)
台灣	NTD2680-3000	NTD1500	信義區公所(100 年)、黃 (98 年)

收集了上述資料後並依下列公式估算一般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。

$$C_{NR} = C_{NRI} \left(1 + \frac{1}{(1+i)^{10}} + \frac{1}{(1+i)^{20}} + \frac{1}{(1+i)^{30}} \right) \left(\frac{i(1+i)^{40}}{(1+i)^{40} - 1} \right) \quad (3.11a)$$

$$C_{NR} = C_{NRI} \left(1 + \frac{1}{(1+i)^{15}} + \frac{1}{(1+i)^{30}} \right) \left(\frac{i(1+i)^{40}}{(1+i)^{40} - 1} \right) \quad (3.11b)$$

$$C_{NR} = C_{NRI} \left(1 + \frac{1}{(1+i)^{20}} \right) \left(\frac{i(1+i)^{40}}{(1+i)^{40} - 1} \right) \quad (3.11c)$$

$$C_{GR} = (C_{RI}) \left(\frac{i(1+i)^{40}}{(1+i)^{40} - 1} \right) + C_{RP} \left(\frac{1}{(1+i)^{15}} + \frac{1}{(1+i)^{30}} \right) \left(\frac{i(1+i)^{40}}{(1+i)^{40} - 1} \right) \quad (3.12)$$

其中 C_{NR} 為一般屋頂的年均成本; C_{NRI} 為一般屋頂的初設成本; i 為折現率 (discount rate); C_{GR} 為綠屋頂的年均成本; C_{GRI} 為綠屋頂的初設成本; C_{RP} 為每 15 年更新部分植栽的費用。

計算出二種屋頂單位面積成本後，再計算其間的差異，然後再依所推估的城市綠屋頂面積計算總差異，以作為後續分析之依據。

3.5 城市綠屋頂成本效益分析

本研究估算出四種主要效益所具有之經濟效益，降溫節能部份依綠屋頂所節省之電能損耗，利用台電電價(目前每度電約台幣 2.1 元)，轉換為綠屋頂降溫節能所節省的電費。

減碳部分參考綠稅(Carbon Tax Center)或國際碳價格或成本推估減碳之效益，目前各國綠稅價格如表 3.6 所列，唯台灣未實施綠稅制度，本研究採蕭 (98 年)的建議值為 750NTD/ton eCO₂ 為碳稅價格。

表 3.6 各國綠稅價格

國家	平均碳稅 (USD/ ton eCO ₂)
法國 2001 年稅率	45.700
加拿大 2011 年稅率	25.000
芬蘭 1998 年稅率	61.800
挪威 1997 年稅率	34.400
瑞士 2000 年稅率	150.000
瑞典 1997 年稅率	39.220
德國 2000 年稅率	30.200
英國 2001 年稅率	19.200
丹麥 1999 年稅率	79.000

資料來源：黃 (96 年)

空污減量部分則利用台灣現有空氣污染防制費用、倪等(2007)所建立單位污染減量成本(維護成本法)及單位損害成本估算空污之經濟效益，空污費率及單位污染減量成本則如表 3.7 及表 3.8 所列，單位損害成本採用林(96 年)之估算方法，計算所需之空污單位損害成本，較詳細計算方式介紹請參見附錄 B，作為空污減量之經濟效益。

表 3.7 固定污染源空污費費率

污染物種類	費率 (千元/公噸)	
	一、三級防制區	二級防制區
NO ₂	12	15
SO ₂	10	12

資料來源：行政院環保署環境資料庫(100 年)

表 3.8 單位污染減量成本

污染物種類	PM ₁₀	SO _x	NO _x
處理成本 (元/公噸)	37708	25013	25525

資料來源：倪等 (96 年)

截水部份，本研究以國外現行雨水下水道使用費 (Stormwater fee)及國內雨水下水道單位建造成本估算截水之經濟效益，國外因設置綠屋頂的雨水下水道使用費減收可分為兩種：原有的雨水逕流費可獲得 55%之優惠及獲得額外之 Stormwater credit，第一部分採用美國華盛頓州目前現有之雨水下水道使用費費率(0.0033 USD/m² year)(DDOE, 2011)，第二部份則依不同建築用途，採用不同的 Stormwater credit (Carter and Keeler, 2008)，詳細費率如表 3.9 所列。

表 3.9 不同建築用途之 Stormwater credit

建築用途	Stormwater credit (USD/m ² .year)
辦公大樓	0.04
住家	0.08

資料來源：Carter and Keeler (2008)

國內雨水下水道單位建造成本部分，依內政部營建署雨水下水道建設資料，新竹市雨水下水道規劃總長度為 72.070km，目前已建設的長度為 40.940km，建設率為 58.4%(內政部營建署，100 年)，並規劃每年以 1km 的建設速度逐年完成，本研究利用新竹市現有雨水下水道圖資，將新竹市雨水排水系統依渠道流域流向分區，最後以內政部營建署提供之國內雨水下水道單位建造成本資料(內政部營建署，92 年)估算各區管線依各區尖峰逕流減量百分比擴充所需增加的成本，亦即以因綠屋頂截水減少未來擴充雨水下水道系統的成本作為評估其經濟效益之依據。

唯國內有些稅率還在研擬階段或尚未開徵，如雨水逕流費、綠稅等，本研究雖仍會估算這些效益，但由於尚未開徵，此部分的效益值將另外統計，並分別與綠屋頂及一般屋頂設置成本比較，作為國內城市綠屋頂規劃與決策分析方法之重要參考依據。



第四章 結果與討論

本研究以新竹市為研究對象分析城市推廣綠屋頂之成本效益，本章首先簡介案例區，然後依前述研究流程與方法說明所得的結果，內容主要包含城市綠屋頂面積估算、城市綠屋頂效益評估、城市綠屋頂成本概估、城市綠屋頂成本效益分析等主題。以下一一說明之。

4.1 案例區及案例建築簡介

新竹市屬於台灣之西北部，位於台灣北部區域內，市內有新竹平原，是新竹地區土地最肥沃之區，地形南高北低，由西北向東南遞增，土地總面積為 104.1 平方公里，全市東西長 13.5 公里，南北寬 12 公里，海岸線長 19.5 公里，市區內分為三個行政區：北區、東區及香山區。

近年因為氣候變遷，國內亦積極推廣節能之策略，國內曾建議民眾將室內空調維持在 26°C 至 28°C ，而新竹市曾在 98 年 8 月 2 號曾發生 39.4 之高溫，依中央氣象局新竹測站資料，民國 99 年此區氣溫大於 26°C 的天數為 140 天，大於 28°C 的天數則為 107 天，表 4.1 詳列新竹市十年間大於 26°C 及 28°C 的天數，資料顯示大於 26°C 天數將近占了半年的天數；這些日子的用電若能減少空調用量，預期可有效節能，表 4.2 所列為新竹市近年總用電量，新竹市 2010 年的用電量相較於 2009 年少了 14 百萬度電，並在近年新竹市積極推動打造低碳樂活城，且以節能減碳為推動方向，可見節能是目前新竹市極力推廣的政策之一。

表 4.1 新竹市近年氣溫大於 26°C 及 28°C 天數統計資料

年份	大於 26°C 天數	大於 28°C 天數
91	157	101
92	149	105
93	125	80
94	166	116
95	154	98
96	140	109
97	157	112
98	148	118
99	140	107

資料來源：中央氣象局新竹測站(100 年)

表 4.2 新竹市近年總用電量

年度	總用電量(度)
98	810,496,954
99	670,257,751

資料來源：環保署綠色生活網(100 年)

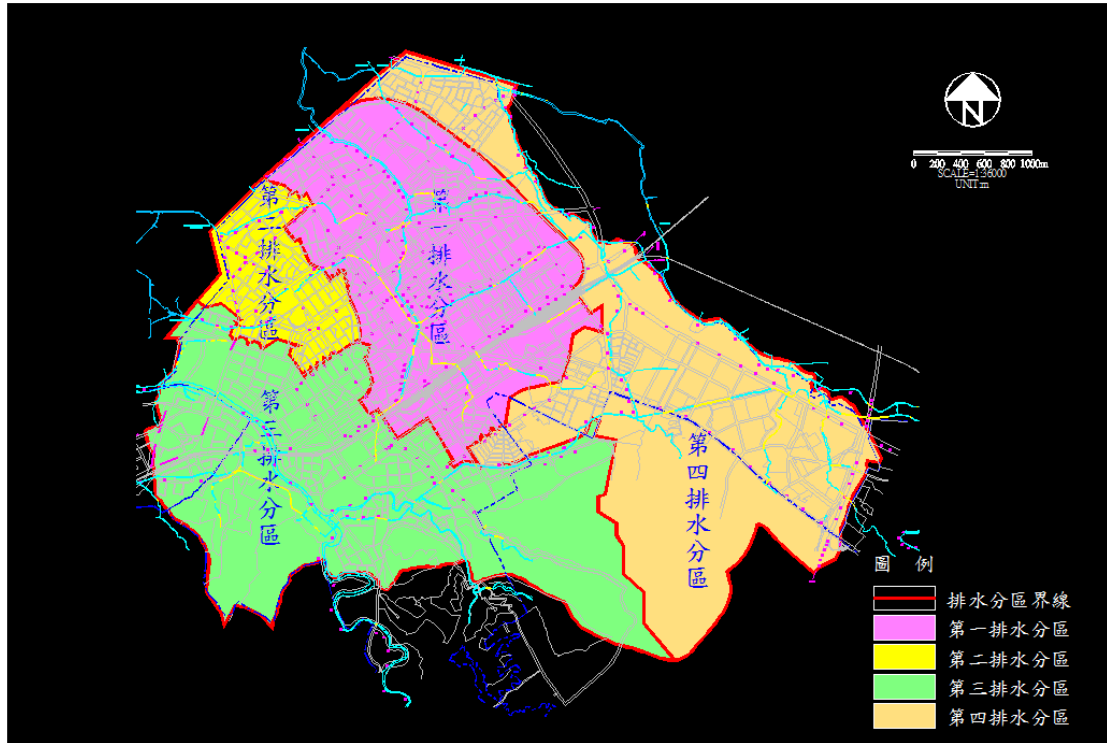
依中央氣象局資料新竹測站資料，在 1990 之前年均雨量約為 1,782.7 公厘，但因聖嬰現象及氣候變遷之影響，近年平均年雨量增至 1,850 公厘，且大部分降雨集中在每年四月至九月，新竹市地勢為由東向西之走向，行程大致由東向西之天然排水系統幹線，分別流向頭前溪、客雅溪、及鹽水港溪匯流出海，依據「新竹市雨水下水道系統重新規劃報告」，區內劃分成四個排水分區，另外亦有香山雨水下水道系統，其中第一排水分區面積約為 470 公頃，第三分區約 605 公頃，此兩分區之地表逕流引入東門溝與隆恩圳進入頭前溪，第二排水分區面積約 120 公頃，利用雷公圳進入客雅

溪，第四分區面積則約為 585 公頃，詳細排水分區如圖 4.1 所示，由於新竹市位處新竹丘陵之西北邊緣，下游平原地區則因通水斷面狹窄，每逢豪雨經常淹水，再加上科學園區之開發，使得地表儲蓄空間消失，洪峰暴雨逕流增加，目前經濟部水利署規劃三姓溪、海水川溪及八股溪等三條水系排水系統淹水整治計畫，表 4.3 列舉目前新竹市易淹水地區水患治理計畫工程，圖 4.2 為目前新竹市水患治理計畫工程點，可見水患亦是新竹市需注意的地方。

表 4.3 新竹市易淹水地區水患治理計畫工程

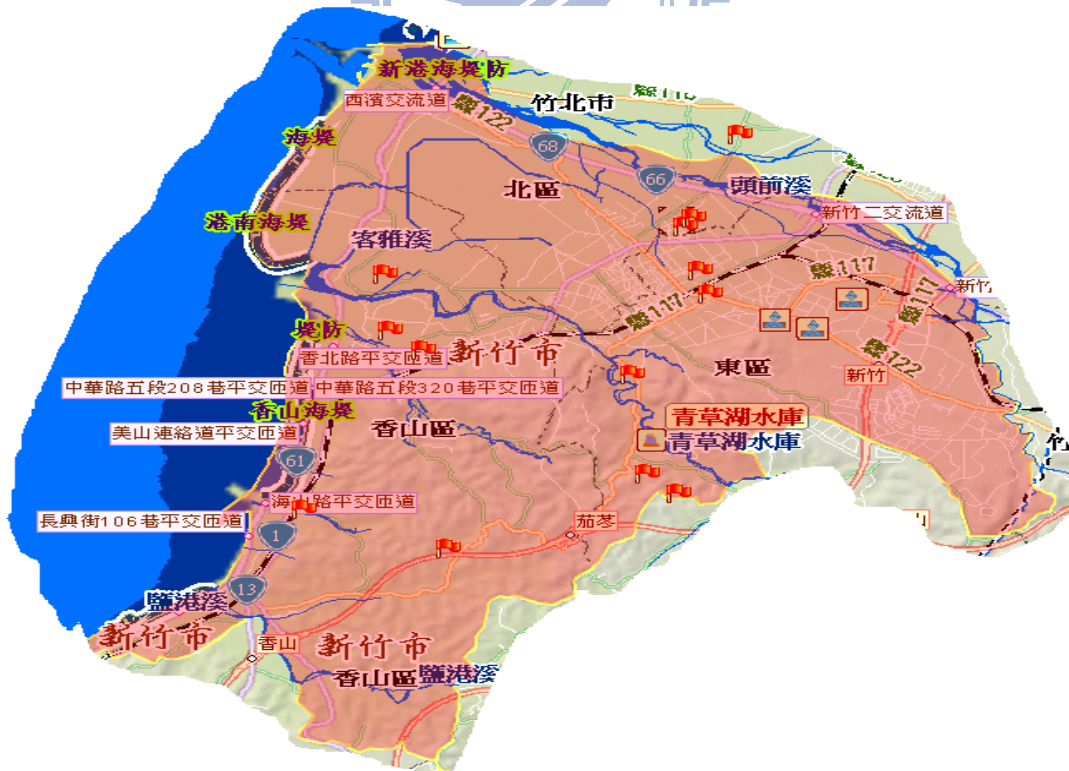
三姓溪排水系統清淤工程三件
三姓溪疏濬清淤工程
港南排水疏濬清淤工程
八股排水應急工程
東大排水(北大路至世界街區域)應急工程
三姓溪排水疏濬工程,三姓溪之線疏濬工程,港北溝之線疏濬工程等三件
八股排水(第五支線匯入點下游左側護岸)應急工程等四件
港南排水疏濬工程等六件
冷水坑溪疏濬工程

資料來源：經濟部水利署(100 年)



資料來源：新竹市雨水下水道系統重新檢討規劃(92年)

圖 4.1 新竹市都市計畫區雨水下水道系統排水分區示意圖



資料來源：經濟部水利署(100年)

圖 4.2 新竹市水患治理計畫工程點

環保署新竹測站 PSI 月平均值統計結果顯示，除每年春季以及秋季 PSI 較高外，其他月份大致屬空氣品質良好之月份；從新竹測站歷年 PSI 大於 100 之累積天數統計結果發現，顯示新竹市空氣品質在近年已提昇許多，PM₁₀ 部份，根據各年空品監測結果，PM₁₀ 年平均濃度皆符合空氣品質標準，但有逐年增加之趨勢(這部分有的可能是沙塵暴貢獻的)，SO₂ 及 NO₂ 之年平均濃度遠低於空氣品質標準，且在 96 年之後有平緩下降之趨勢，而 O₃ 則呈逐年上升趨勢，值得重視。

表 4.4 新竹測站主要污染物年平均濃度統計表

年度	NO ₂ (ppb)	SO ₂ (ppb)	O ₃ (ppb)	PM ₁₀ (ug/m ³)
90	21.000	4.000	22.000	47.000
91	20.000	4.000	23.000	43.000
92	18.290	3.720	21.950	43.230
93	21.100	4.300	26.240	51.310
94	20.400	4.120	23.870	52.230
95	20.070	4.020	27.040	52.270
96	18.800	4.250	25.420	50.160
97	18.200	4.500	28.700	51.000
98	ND	ND	ND	ND
99	18.400	3.800	25.900	47.600

資料來源：環保署空品網新竹測站(100 年)

以下為本研究所收集新竹市相關資料：

1. 新竹市建築物 GIS 圖層
2. 新竹市雨水下水道排水系統圖資：主要為 92 年新竹市所規劃「新竹市雨水下水道系統重新規劃檢討」之圖層資料。

3. 新竹市建築物統計資料：參考經濟部營建署新竹市建築統計資料，包含用途分類、樓層分類等資料。
4. 新竹市氣象資料：參考大氣資料庫新竹測站資料，包含新竹氣溫、風向、雨量、日照時數等。
5. 新竹市空氣污染物濃度資料：參考空品監測網新竹測站資料，包含空氣主要污染物(NO_2 , SO_2 , O_3 , PM_{10})的逐時資料。

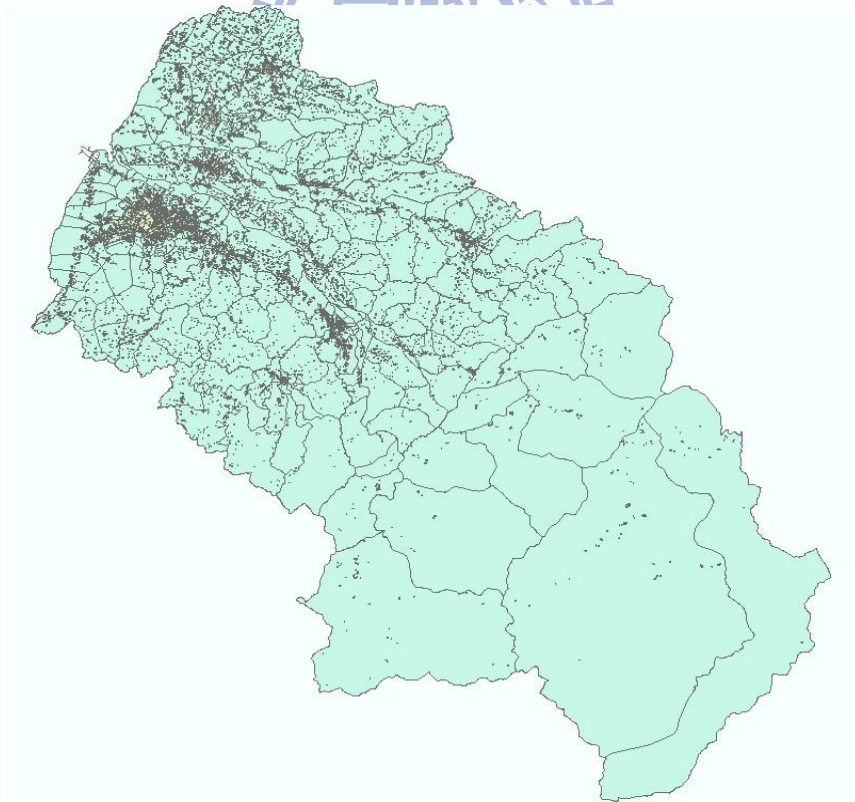
案例建築：

1. 住宅類樣本建築之基本假設：本研究採用林(100年)所建立的標準住宅公寓，其條件如下所列。
 - (1) 每層住宅面積： 90m^2 。
 - (2) 樓層高：每層樓淨高為3m。
 - (3) 空調使用：客廳、主臥室、書房、臥室為使用空調空間。
 - (4) 空間型態：以3房2廳2浴廁為主。
 - (5) 開窗率：30%。
 - (6) 使用時間：本研究設定以18點開燈至24點就寢為基準，白天則不開燈。
2. 辦公類樣本之基本假設：本研究採用賴(97年)所建立的標準辦公建築，其條件如下所列。
 - (1) 每層面積： 800m^2 。
 - (2) 樓層高：每層樓淨高及外周區深度為3.0m及5m。
 - (3) 空調使用：在建築物室內區域中，辦公室以及會議室佔總建築物面積的75%。
 - (4) 開窗率：建築物每一面中窗戶所佔的比率約為57%，窗戶約佔所有立牆面積40%。

(5) 使用時間：一般分為空調、照明、人員的使用時間，根據建築能源法規的解說與實例專輯(86 年)，不同的建築用途，亦有不同之使用時間規範，本研究假設採用 10 小時。

4.2 綠屋頂面積估算

新竹市全市轄區面積約為 104.070 平方公里，圖 4.3 為新竹市 GIS 建築物圖資，新竹市建築物屋頂面積約為 28.478 平方公里，占全市面積 27.360%，利用新竹之航照圖進行取樣比對，推估出新竹屋頂面積佔基地面積的比例為 66%，得新竹市屋頂面積為 18.800 平方公里，且依據 Casey Trees Endowment Fund and Limno-Tech Incorporation (2005)的報告中，使用 80%的屋頂面積作為綠屋頂可設置之極限面積，故新竹市可供建置綠屋頂面積為 15.036 平方公里，占全市面積的 14.450%。



資料來源：九福電子地圖

圖 4.3 新竹市 GIS 建築物圖資

4.3 城市綠屋頂降溫節能效益評估

以下說明新竹市綠屋頂降溫節能效益評估所得結果。

本研究採用 1D-HF 法 (Clark *et al.*, 2008) 以及 eQUEST 建築物耗能模擬系統 (Hirsch, 2003; Carter *et al.*, 2008; Hilten, 2005; Kosareo *et al.*, 2007) 分析新竹市綠屋頂的節能效益。以下分別說明之。

4.3.1 1D-HF 法

1D-HF(Clark *et al.*, 2008)法部份分為案例參數、溫差及節能效益等說明及討論此方法之執行情形與結果：

1. 案例參數：

- (1) 總 U 值: 各模式綠屋頂與一般屋頂 U 值表如表 4.5 所列，傳統和綠屋頂的 U_{total} 部份如表 4.6 所列，傳統屋頂($U_{concrete}$)採 $1.490[W/m^2 \text{ } ^\circ K]$ 的五腳磚油毛氈屋頂(編號 R008)，綠屋頂則依本研究群另一個研究測量綠屋頂的 $U_{gr}=0.41$ ，則 U_{total} 計算得 $0.322 [W/m^2 \text{ } ^\circ K]$ 。
- (2) 新竹市綠屋頂面積：依 4.2 節估算，約為 15.036 平方公里。
- (3) 溫差 (ΔT)：本研究利用大氣資料庫 2010 年新竹測站之氣象資料，以 $26^\circ C$ 為冷氣運轉之溫度條件，估算新竹市的溫差，然後依式 3.2 估算新竹市綠屋頂節能效益，於下一點詳細說明之。

表 4.5 薄層綠屋頂與一般屋頂 U 值

文獻	U 值 ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	資料來源或取得方法	結構
Clark <i>et al.</i> (2008)	$U_{total}=0.240$ $U_{concrete}=0.500$	依 R-value model 推估 一般屋頂依美國商用 建築的平均值 綠屋頂則假設每公分 為 4.700	10.200cm 基質
	$U_{total}=0.360$ $U_{concrete}=0.380$	以 EnergyPlus 推估	
Saiz <i>et al.</i> (2006)	$U_{total}=0.420$ $U_{concrete}=0.590$	不詳	9.000cm 基質 屋頂不確認是 混凝土
Elsa (2008)	$U_{total}=1.000$ $U_{concrete}=1.140$	不詳	15.000cm 基質
Hiltten (2005)	$U_{total}=0.200$ (0.035 Btu/h-ft ² -°F) $U_{concrete}=0.244$ (0.043 Btu/h-ft ² -°F)	估算而得,但未交代估 算方法	非混凝土屋頂 4.000 英吋基質 + 0.250 英吋 空氣層
本研究群實 測	$U_{gr}=0.410$	利用感溫線測量大溪 高中綠屋頂的 U 值	8.000-10.000cm 基質

表 4.6 新竹市綠屋頂和一般屋頂模擬參數表

屋頂分類	U 值 [$W/m^2 \cdot ^\circ K$]
綠屋頂	$U_{total}=0.322$
一般屋頂	$U_{concrete}=1.490$

2. 溫差: 圖 4.4 為新竹測站月均溫及各月冷氣運轉溫度條件之溫差趨勢圖, 而圖 4.5 為新竹市 2010 年各月 ΔT 統計圖, 可知氣溫高於 26 度大多集中在夏季 (6-9 月); 圖 4.6 所示為各月 ΔT 總量所佔比例, 夏季約占全年的 88%, 最為顯著。 ΔT 全年總量為 9547.2°K。

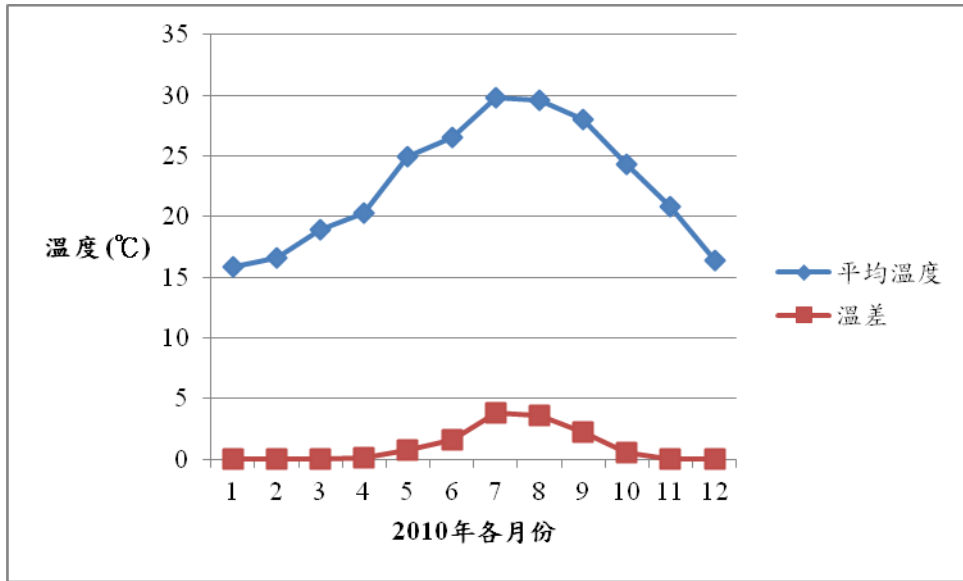


圖 4.4 新竹測站各月平均氣溫及及 26°C 之溫差

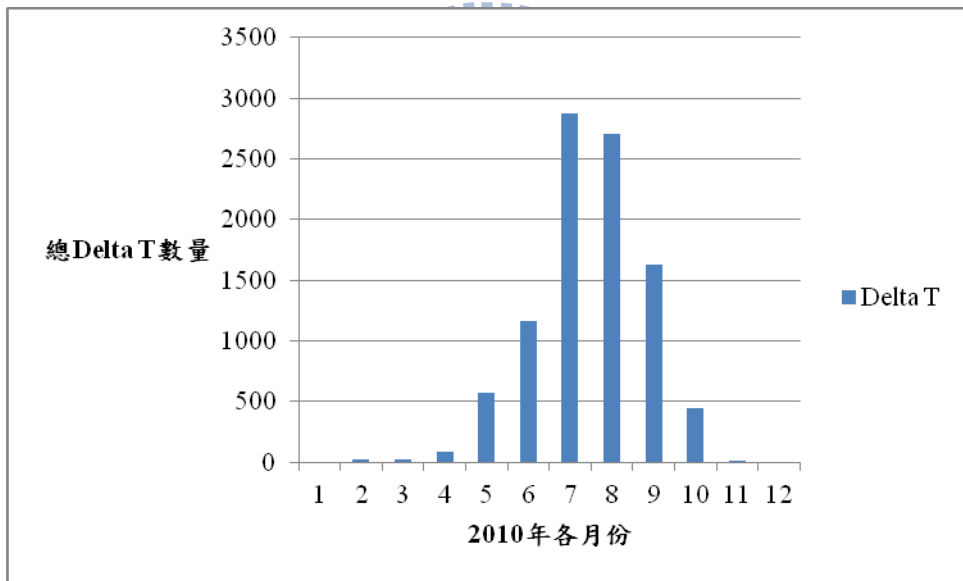


圖 4.5 新竹市各月的總 ΔT 數量

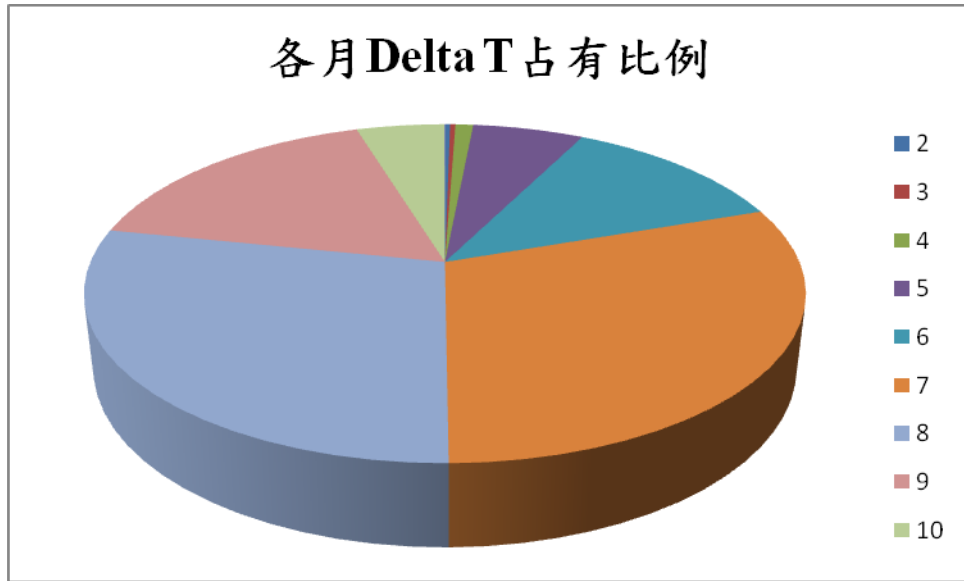


圖 4.6 新竹市 2010 年各月節能所占比例

3. 節能效益: 本研究利用 1D-HF 估算之結果如表 4.7 所列, 傳統和綠屋頂 U 值差($U_{\text{concrete}}-U_{\text{total}}$)為 $1.138 \text{ W/m}^2/\text{°K}$, 所估算之單位綠屋頂面積的節能效益為 $11.170 \text{ kWh/m}^2/\text{year}$, 總節能效益為每年 1 億 7 千萬度電, 約為新竹市 2010 年非營業用電 8 千 4 百萬度的 20% 左右; 影響 1D-HF 的因子主要在於 ΔT 及 U 值差, ΔT 以國內夏季最為顯著, 占 ΔT 總量的 88% 的效益, U 值差部份, 國內一般屋頂 U 值為 $1.490 \text{ W/m}^2/\text{°K}$, 為綠屋頂 $0.322 [\text{W}/\text{m}^2/\text{°K}]$ 的 4.2 倍左右, 預期綠屋頂在夏季可顯著降低空調的耗能, 具有相當之效益。

表 4.7 新竹市各類建築利用 1D-HF 法所估算之節能效益

參數	節能效益
Q/A ($\text{kWh}/\text{m}^2/\text{year}$)	11.170
ΔT ($^{\circ}\text{K}$)	9,547.200
Δh ($\text{W}/\text{m}^2/\text{°K}$)	1.170
屋頂面積 (m^2)	15,036,000
Q (kWh/year)	167,955,500

4.3.2 eQUEST 法

eQUEST(Hirsch, 2003)法部份主要依 3.3.1.2 節進行，以下分為案例參數、各類建築節能效益及 1D-HF 與 eQUEST 結果比較等說明此方法之執行情形與結果：

1. 案例參數

- (1) U 值: 如表 4.6 所列，一般屋頂採 $U_{\text{concrete}}=1.490[\text{W}/\text{m}^2\text{°K}]$ ，綠屋頂則為 $U_{\text{total}}=0.322[\text{W}/\text{m}^2\text{°K}]$ 。
- (2) 新竹市住宅與辦公建築比例：表 4.8 為依內政部營建署歷年核發建物使用執照(內政部，98 年)按用途別分類的統計資料，依該資料可估算住宅及辦公在新竹市所占比例各為 45% 及 55%。
- (3) 各類建築屋頂面積：如表 4.9 所列，1 層樓、2 層樓及 3 層樓以上在新竹市所占面積(比例)為 $1.230\text{km}^2(8.2\%)$ 、 $1.700\text{km}^2(11.3\%)$ 及 $12.100\text{km}^2(80.5\%)$ 。

表 4.8 新竹市辦公及住宅建築之比例及總樓地板面積

	辦公類	住宅	總計
樓地板面積 (m ²)	13,939,861	21,434,804	35,374,665
比例 (%)	45	55	100

資料來源：內政部(98 年)、住宅 e 化網(98 年)

表 4.9 各類建築屋頂面積

建築類型	1 層樓	2 層樓	3 層樓以上
比例 (%)	8.200	11.300	80.500
面積 (km ²)	1.540	2.120	15.130

資料來源：比例依內政部(98 年)之各層樓總樓地板除以樓層數後而得。

2. 住宅類建築：住宅類建築案例資料本研究參考林(100年)所建立的標準住宅公寓，請參見 4.1 節之說明。

(1) 一層樓住宅：以 eQuest 估算一棟 1 層樓代表性案例建築(屋頂面積為 90m^2)各月節能量，結果如圖 4.7 所示，以夏季最高，7 月時為 105.02 kWh/month ，最低為冬季時期，由於本研究只考量高於室外氣溫 26 度以上的節能效益，未考量其他效益，故冬季這部分節能效益很少；總節能量為 520 kWh/year ，佔總耗能($4,435.270\text{ kWh}$)約 11.000% ，5 至 9 月的節能量 (437.840 kWh)占全年總節能量的 84.300% ，為最大宗。

單位屋頂面積節能效益為 $5.770\text{ (kWh/m}^2\text{/yr)}$ ，將單位節能效益與表 4.8 所估算之 1 層樓總屋頂面積 1.540 km^2 及住宅建築比例(45%)相乘，即為全市一層樓住宅類建築的節能效益，每年節能的電量約為 400 萬度電。

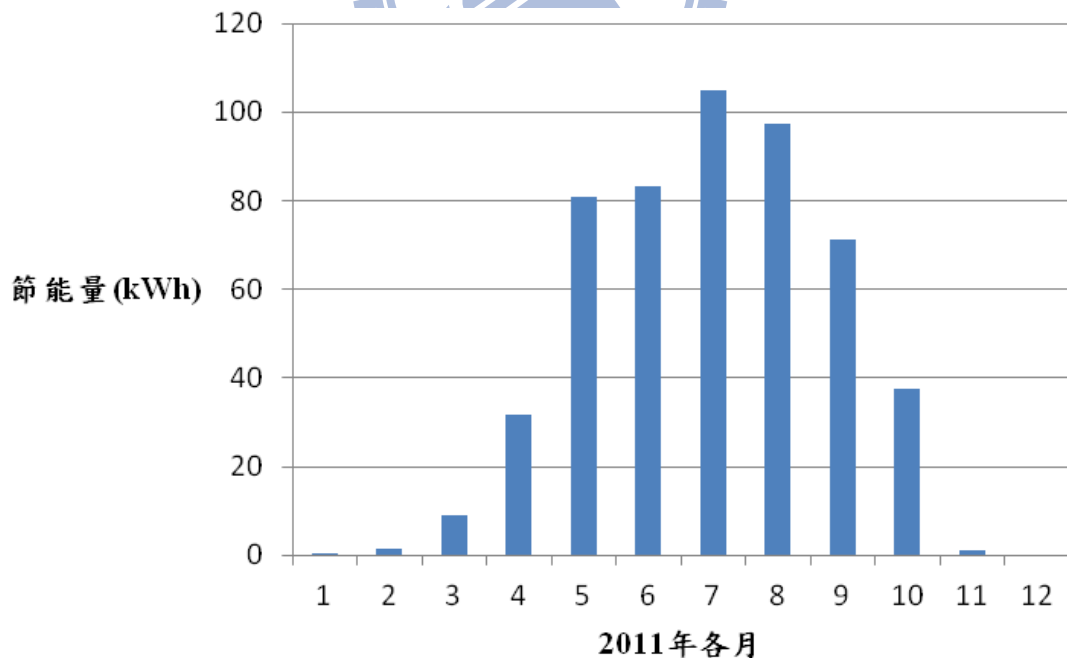


圖 4.7 一層樓住宅建築各月節能量

(2) 二層樓住宅：以 eQuest 模擬計算 2 層樓代表性案例建築(屋頂面積為 90m²)各月節能量結果如圖 4.8 所示，以夏季最高，7 月時為 148.300kWh/month，最低為冬季時期；總節能量為 733 kWh/year，高於 1 層樓住宅的總節能量(520 kWh/year)，可見第二個樓層，對於節能效益亦占一定比例的影響，各樓層的節能減量由上而下依序為 11.000%、5.500%，最上方樓層和 1 層樓住宅的減量相同；5 至 9 月的節能量 (618.200 kWh) 占全年總節能量的 84.300%，為最大宗。

單位屋頂面積節能效益為 8.140 (kWh/m²/yr)；將單位節能效益與表 4.8 所估算 2 層樓總屋頂面積 2.120km² 及住宅建築比例(45%) 相乘，即為全市二層樓住宅類建築的節能效益，每年節能的電量約為 777 萬度電。

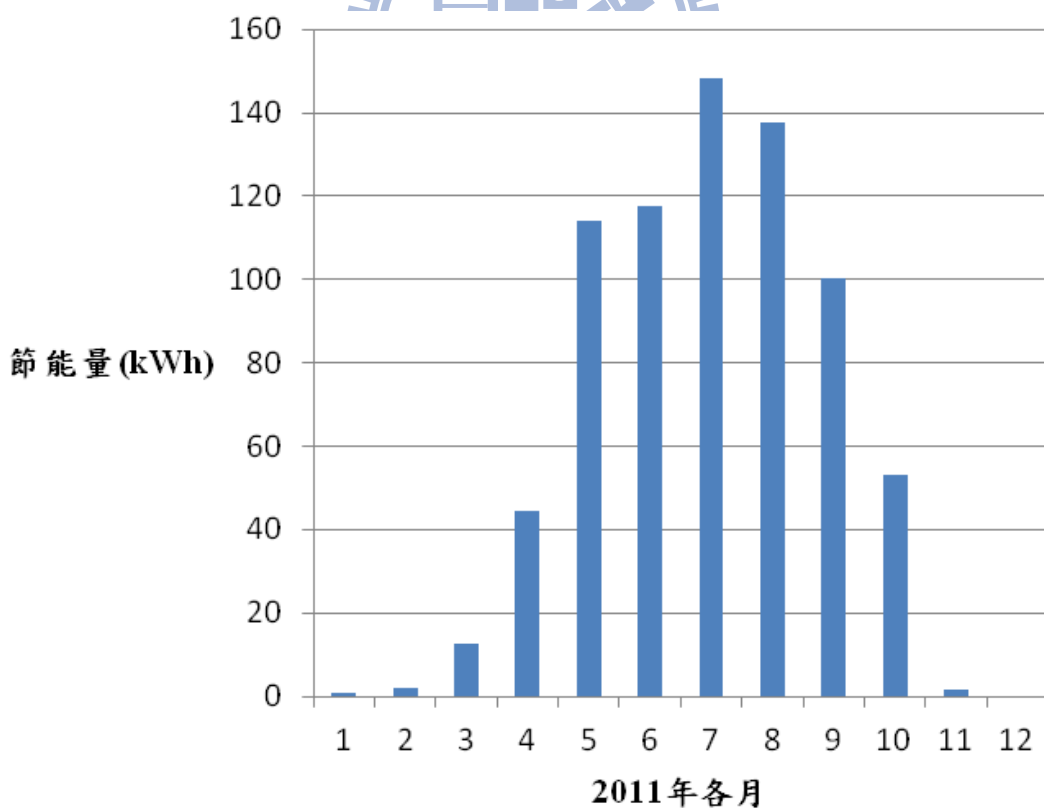


圖 4.8 二層樓住宅建築各月節能量

(3) 三層樓住宅：以 eQuest 模擬計算 3 層樓代表性案例建築(屋頂面積為 90m²)各月節能量結果如圖 4.9 所示，以夏季最高，7 月時為 157.800kWh/month，最低為冬季時期；總節能量為 780 kWh/year，略高於 2 層樓住宅的總節能量(733 kWh/year)，可見 3 層樓住宅的結果亦顯示節能效益大多集中於最靠近屋頂的 2 層，各樓層的節能減量由上而下依序為 11.000%、5.500%及 1.100%，由此可知，住宅部份的節能效益，主要集中在靠近屋頂的 3 層樓，此結果約為 Saiz *et al.* 2006 各樓層節能減量結果的一半(由上而下依序為 22.000%、9.000%及 2.000%)，兩者差異的可能原因為本研究假定溫度為 26°C 才開啟空調以及該研究主要考量尖峰用量；5 至 9 月的節能量 (658 kWh) 占全年總節能量的 84.300%，為最大宗。單位屋頂面積節能效益為 8.670 (kWh/m²/yr)；將單位節能效益與表 4.8 所估算 3 層樓以上的總屋頂面積 15.130km² 及住宅建築比例 (45%) 相乘，即為全市 3 層樓以上住宅類建築的節能效益，每年節能的電量約為 5,900 萬度電。

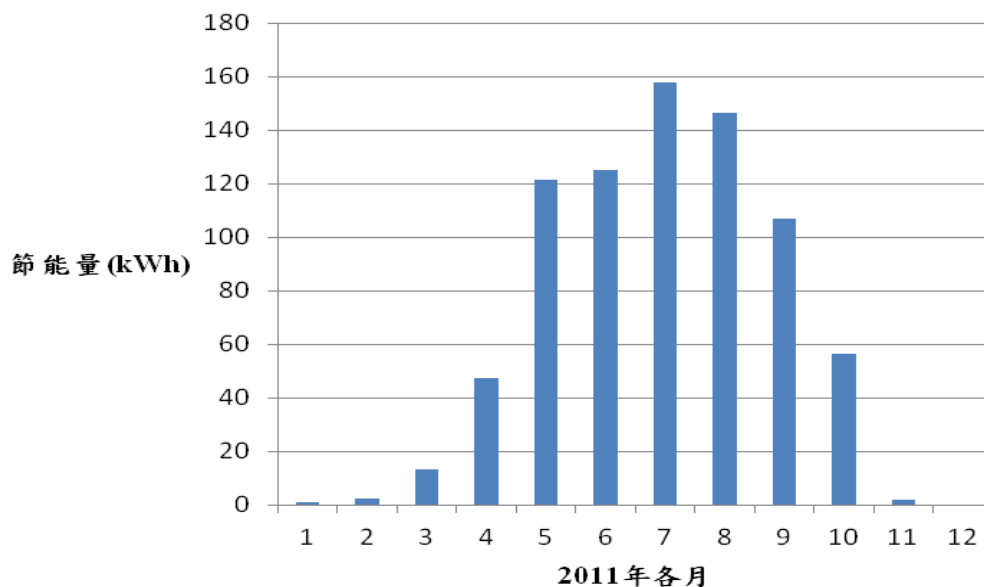


圖 4.9 三層樓住宅建築各月節能量

3. 辦公類建築：辦公類建築案例資料本研究參考賴(97 年)所建立的標準辦公建築，請參見 4.1 節之說明。

(1) 一層樓辦公建築：以 eQuest 估算一棟 1 層樓代表性案例建築(屋頂面積為 800m²)各月節能量，結果如圖 4.10 所示，和住宅建築相同，節能量在 5 月至 9 月最為顯著，其中 7 月時為 940kWh/month，但在冬季時期，由於空調預期使用率低，故幾乎沒有節能效益。總節能量為 4,856 (kWh/year)，約佔總耗能(45,174kWh)11%，5 至 9 月的節能量 (3,881 kWh)占全年總節能量的 80.000%，為最大宗。單位屋頂面積節能效益為 6.070 (kWh/m²/yr)；將單位節能效益與表 4.8 所估算 1 層樓辦公建築的總屋頂面積 1.540km²及辦公建築比例(55%)相乘，即為全市 1 層樓辦公類建築的節能效益，每年節能的電量約為 514 萬度電。

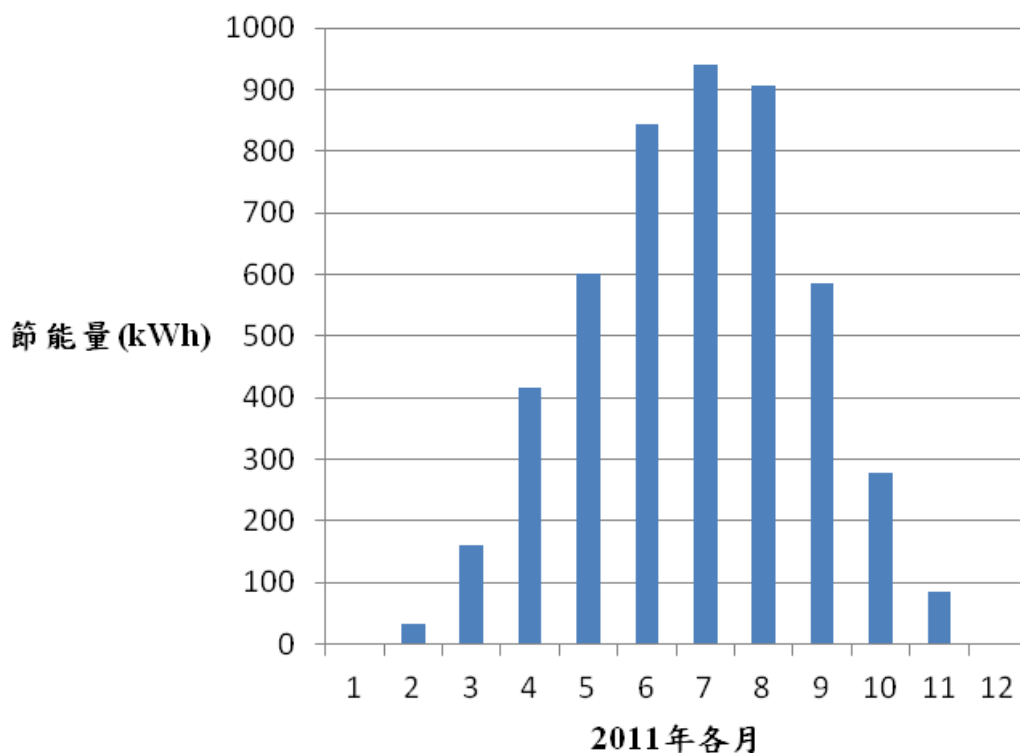


圖 4.10 一層樓辦公建築各月節能量

(2) 二層樓辦公建築：以 eQuest 估算一棟 2 層樓代表性案例建築(屋頂面積亦為 800m²)各月節能量，結果如圖 4.11 所示，和 1 層樓辦公建築相同，5 至 9 月的節能量 5,469 kWh，占全年總節能量的 80%，為最大宗，其中 7 月時最高，為 1,324.500 kWh/month。總節能量為 6,842 (kWh/year)，高於 1 層樓辦公建築的總節能量(4,856 kWh/year)，可見第二個樓層，對於辦公建築的節能效益亦占一定比例之影響，各樓層的節能減量由上而下依序為 11.000%、5.100%，最上方樓層的減量效益和 1 層樓辦公建築相同。

單位屋頂面積節能效益為 8.550 (kWh/m²/yr)；將單位節能效益與表 4.8 所估算 2 層樓辦公建築的總屋頂面積 2.120km² 及辦公建築比例 (55%)相乘，即為全市 2 層樓辦公類建築的節能效益，每年節能的電量約為 997 萬度電。

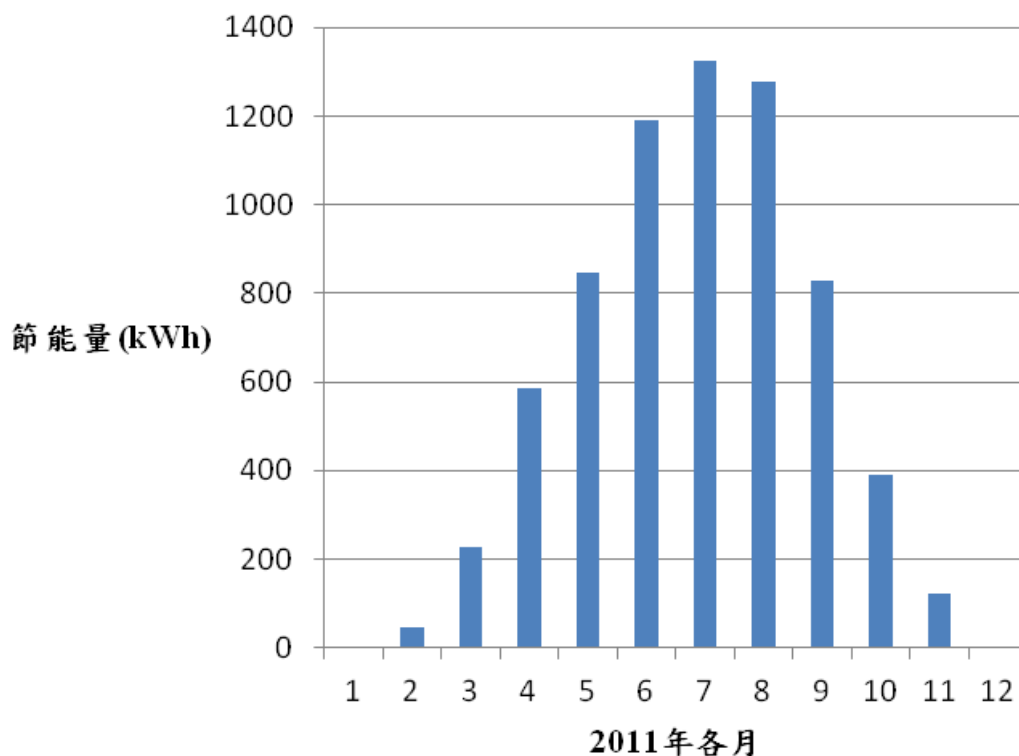


圖 4.11 二層樓辦公建築各月節能量

(3) 三層樓以上辦公建築：以 eQuest 估算一棟 3 層樓代表性案例建築(屋頂面積亦為 800m²)各月節能量，結果如圖 4.12 所示，5 至 9 月的節能量 5,821 kWh，占全年總節能量的 80%，為最大宗，其中亦 7 月時最大，為 1,410 kWh/month，但在冬季時期幾乎沒有節能效益。總節能量為 7,284 (kWh/year)，略高於 2 層樓辦公建築的總節能量 (6,842 kWh/year)；各樓層的節能減量由上而下依序為 11.000%、5.100%及 1.100%，對第 3 層而言，節能效益已不太顯著了，故節能效益主要集中在靠近屋頂的 3 層樓，不論是辦公或住宅類建築，皆顯示綠屋頂的節能效益大多集中於最靠近屋頂的 2 層。單位屋頂面積節能效益為 9.100 (kWh/m²/yr)；將單位節能效益與表 4.8 所估算 2 層樓辦公建築的總屋頂面積 15.130km² 及辦公建築比例(55%)相乘，即為全市 3 層樓以上辦公類建築的節能效益，每年節能的電量約為 7,500 萬度電。

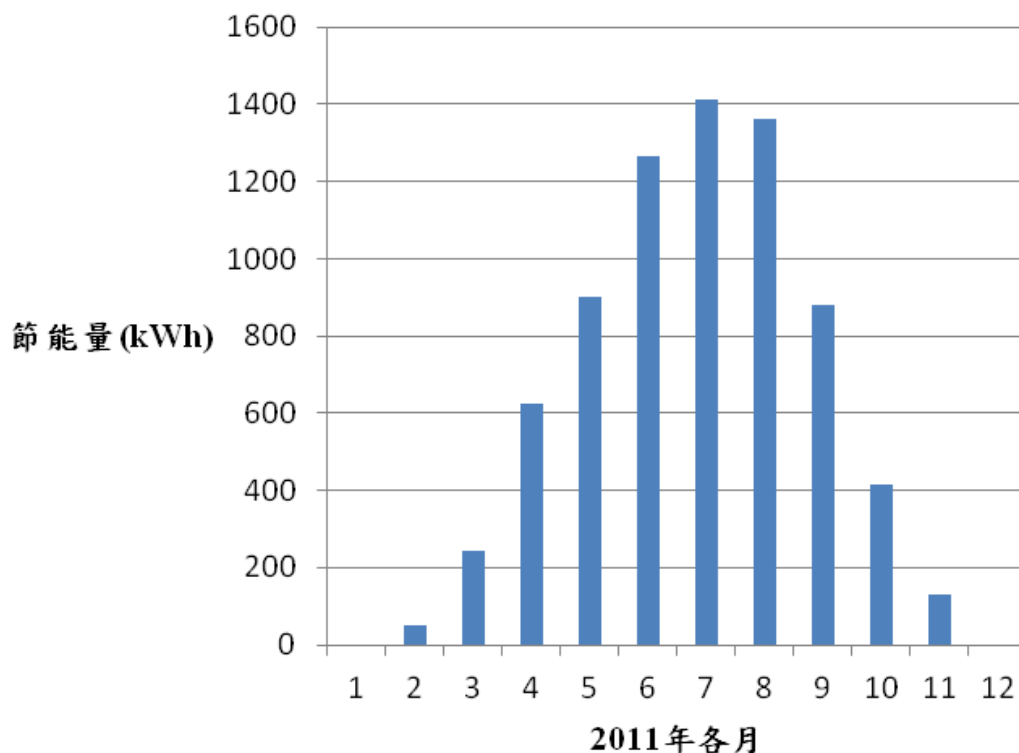


圖 4.12 三層樓辦公建築各月節能量

4. 1D-HF 與 eQUEST 結果比較：如表 4.10 所列，依 4.3.1 節以 1D-HF 法估算的結果為每年 1 億 7 千萬度電，eQUEST 部份，則依表 4.9 各代表建築屋頂面積比例作為其權重，和各類建築的單位屋頂節能效益相乘並加總，可得住宅與辦公建築各自的節能結果，分別為每年 7 千 1 百萬及 9 千萬度，可發現辦公類比住宅類來的大，此因辦公類建築的用電來源相較於住宅類相比較為耗電，且因較常使用中央空調，使其空調用電量較住宅類的分離式冷氣大。

將上述 eQUEST 住宅及辦公的結果加總，即可得全市節能效益為每年 1 億 6 千 1 百萬，單位屋頂面積的效益為 8.600kWh/m²/yr，可發現 1D-HF 估算結果比 eQUEST 的結果來的大，此乃因 1D-HF 在估算的時候，並未考量空調之使用時段，亦即 1D-HF 的通量包含任何溫度大於 26°C 的時段，故造成 1D-HF 估算的結果比 eQUEST 來的大。

表 4.10 節能效益比較表

估算方法	節能效益 (kWh /yr)
1D-HF	170,000,000
eQUEST	住宅類：71,000,000 辦公類：90,000,000 全市：161,000,000

4.4 減碳效益評估

減碳效益部份主要依 3.3.2 節所說明的方法進行，以下分為案例參數、節能的減碳效益、基質的吸收減碳效益及新竹市綠屋頂減碳效益等說明執行情形與結果：

1. 案例參數

(1) 新竹市綠屋頂面積：依 4.2 節估算，約為 15.036 平方公里。

(2) 新竹市單位面積節能效益：

(a) 1D-HF：依 4.3.1 節估算，為 11.170 kWh/m²/yr。

(b) eQUEST：依 4.3.2 節估算，約為 8.600 kWh/m²/yr。

2. 節能的減碳效益

(1) 1D-HF：依台電 99 年的排放係數 0.612 kg eCO₂/度電與依該法所估算單位綠屋頂每年的節能量 11.170 kWh/m²/yr 相乘，即為單位綠屋頂面積因節能所帶來的減碳效益 6.840 kg eCO₂/m²/yr，再與 4.2 節所估算的全市綠屋頂可能設置面積 15.036km² 相乘，即為全市減碳效益，每年可減約 10 萬噸 eCO₂。

(2) eQUEST：將該法所估算單位面積節能結果 8.600kWh/m²/yr 與台電 99 年排放係數相乘，即可得單位綠屋頂每年減碳效益 5.26 kg eCO₂/m²/yr，再與本研究估算的全市綠屋頂可能設置的面積相乘，即可估得全市減碳效益，每年的減碳效果為 8 萬噸 eCO₂，約為依 1D-HF 結果所估算減碳效益的 0.8 倍。

3. 基質的吸收減碳效益:本研究依據 Getter *et al.* (2009)的實驗結果,10cm 土壤基質種植景天科植物的吸附碳的能力為 375 g-C m^{-2} , 再作單位轉換, 即可得每年每平方公尺綠屋頂約可吸附 1.375 kg eCO_2 , 再與全市綠屋頂面積相乘, 即可得每年減碳效果約為 2.1 萬噸 eCO_2 , 可發現基質的吸收減碳效益皆小於節能的減碳效果, 大約只占節能減碳量 1/5 至 1/4, 可見綠屋頂的減碳效益大多還是以節能所造成的減碳為最大宗。
4. 新竹市綠屋頂減碳效益:如表 4.11 所列, 依據 1D-HF 法所估算的節能量及基質吸收能力, 減碳效益估計每年約可減 12.1 萬噸 eCO_2 , 而依 eQUEST 結果及基質吸收能力, 減碳效益每年約為 10.1 萬噸 eCO_2 , 對於目前新竹市推廣打造低碳中心的短期目標, 在 2012 年設定減量目標為 21.083 萬噸 eCO_2 (新竹市環保局, 100 年), 綠屋頂之減碳量約可達到此減量目標的一半左右。

表 4.11 新竹市減碳效益

參數	效益
1D-HF 單位面積減碳效益 ($\text{kg eCO}_2/\text{m}^2/\text{yr}$)	6.840
eQUEST 單位面積減碳效益 ($\text{kg eCO}_2/\text{m}^2/\text{yr}$)	5.260
基質單位面積減碳效益 ($\text{kg eCO}_2/\text{m}^2/\text{yr}$)	1.375
1D-HF+基質減碳效益 (噸 eCO_2/yr)	12.100 萬
eQUEST+基質減碳效益 (噸 eCO_2/yr)	10.100 萬

4.5 空污減量效益評估

本研究採用 Big-leaf resistance (BLR) model (Yang *et al.*, 2008)推估綠屋頂減少各空氣污染物(包括 NO₂, SO₂, O₃, PM₁₀)的量，依 3.3.3 節所說明之方法評估空污減量之效益，以下分別模式參數、各污染物減量效益及不同綠屋頂建置比例的減量效果等分別說明之：

1. 模式參數：

(1) 污染物質通量：本研究採用大氣資料庫 2010 年新竹測站氣象資料及環保署空品測站 2010 年空氣污染物 (包括 NO₂, SO₂, O₃, PM₁₀) 濃度資料，利用式 3.4 估算各污染物的逐時質通量，詳細參數模擬結果請參見附錄 D。

(2) 綠屋頂面積：如 4.2 所估算。

(3) 時段：本研究估算期間為 2010 年。

2. NO₂ 減量效益：新竹市設置綠屋頂可能的 NO₂ 減量效益模擬結果如表 4.12 所列，年平均濃度、乾沉降速率及質通量分別為 18.300 ppb, 0.110 cm/s 及 1.130 g/m²/yr，圖 4.13 為新竹市 2010 年 NO₂ 減量模擬結果對數座標圖，NO₂ 減量效益在秋冬兩季，植物氣孔及葉面表皮細胞對空氣污染物吸附作用較低，R_c 表面阻力值因而設定較大值，而春夏時植物葉肉細胞及氣孔對 NO₂ 的吸附阻力較小，R_c 表面阻力值設定較小值，因而有較佳之減量效益。

NO₂ 的減量效益亦受到乾沉降速率所影響，且呈類似變化趨勢，設置綠屋頂的 NO₂ 減量每年約可達 17 噸，台電每供應單位電力的 NO₂ 排放係數為 5.96×10⁻⁴ kg/度，因而設置綠屋頂每年所減 NO₂ 的量約相當於節能 2.83×10⁷ 度電所減的 NO₂ 量。唯由於 NO₂ 濃度在秋冬兩季較高，而植物表面阻力值較小及沉降速率較高的季節是在春夏兩季，使綠屋頂無法對 NO₂ 減量發揮其最大效益。雖然新竹市 NO₂ 年平均濃度遠低於法規

規範，但此物種為 O₃ 的生成前驅物質，對於 O₃ 濃度有逐年上升趨勢的
 新竹市而言，預期綠屋頂可降低臭氣的濃度

表 4.12 新竹市 2010 年 NO₂ 模擬結果

月份	平均濃度 (ppb)	乾沉降速率 (cm/s)	質通量 (g/m ² /yr)
1	21.990	0.061	0.790
2	18.260	0.060	0.650
3	22.670	0.113	1.520
4	20.620	0.110	1.340
5	18.210	0.120	1.300
6	16.410	0.177	1.720
7	13.200	0.216	1.690
8	14.480	0.208	1.780
9	15.750	0.064	0.590
10	15.230	0.063	0.560
11	17.480	0.062	0.640
12	25.320	0.062	0.930
平均	18.300	0.110	1.130

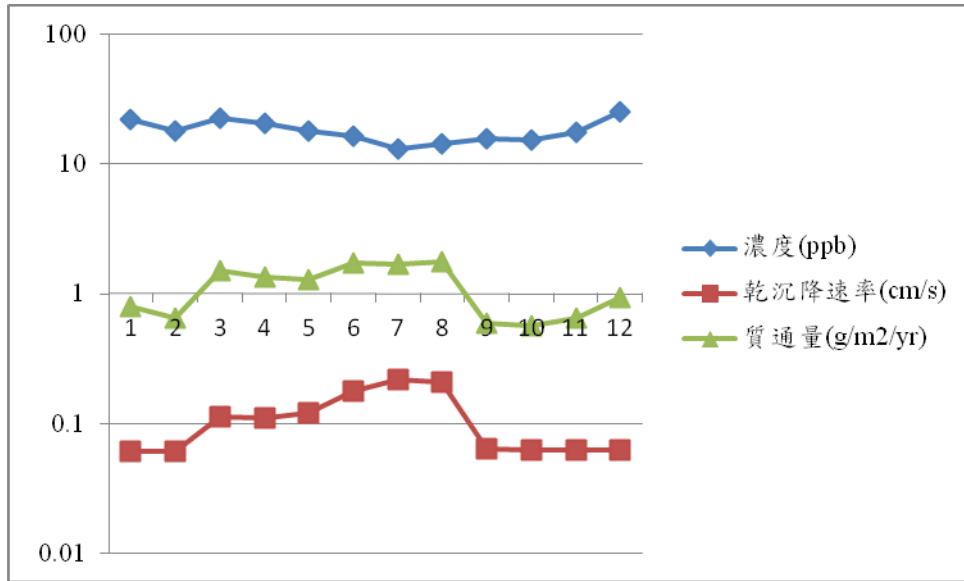


圖 4.13 新竹市 2010 年 NO₂ 模擬結果對數座標圖

3. SO₂ 減量效益: 本研究所模擬新竹市設置綠屋頂之 SO₂ 減量效益結果如表 4.13 所列, 年平均濃度、乾沉降速率及質通量分別為 3.800 ppb、0.297 cm/s 及 0.920 g/m²/yr, 圖 4.14 為新竹市 2010 年 SO₂ 模擬結果對數座標圖, 可發現 SO₂ 的減量效益 (質通量) 和 NO₂ 皆以春夏兩季為主, 且 SO₂ 的減量效益和其乾沉降速率呈相同的規則變化, 綠屋頂之 SO₂ 每年減量可達 13.800ton/yr, 唯類似 NO₂, 因 SO₂ 的濃度在秋冬兩季較高, 而沉降速率較高的季節卻在春夏兩季, 使綠屋頂無法對 SO₂ 的減量發揮最大效益。依台電每供應單位電力的 SO₂ 排放係數 (9.31×10^{-4} kg/kWh), 設置綠屋頂每年所減 SO₂ 的量約相當於節能 1.48×10^7 度電所減的量, 雖然 SO₂ 在新竹市並不是嚴重的空氣污染物, 但有效減量 SO₂ 的濃度, 可降低酸雨的形成機會。

表 4.13 新竹市 2010 年 SO₂ 模擬結果

	平均濃度 (ppb)	乾沉降速率 (cm/s)	質通量 (g/m ² /yr)
1	4.800	0.235	0.930
2	3.700	0.236	0.720
3	4.300	0.309	1.090
4	3.800	0.304	0.950
5	4.100	0.312	1.050
6	3.500	0.384	1.10
7	3.100	0.417	1.060
8	3.300	0.409	1.110
9	3.400	0.239	0.670
10	3.700	0.239	0.730
11	3.600	0.239	0.700
12	4.500	0.236	0.880
平均	3.800	0.297	0.920

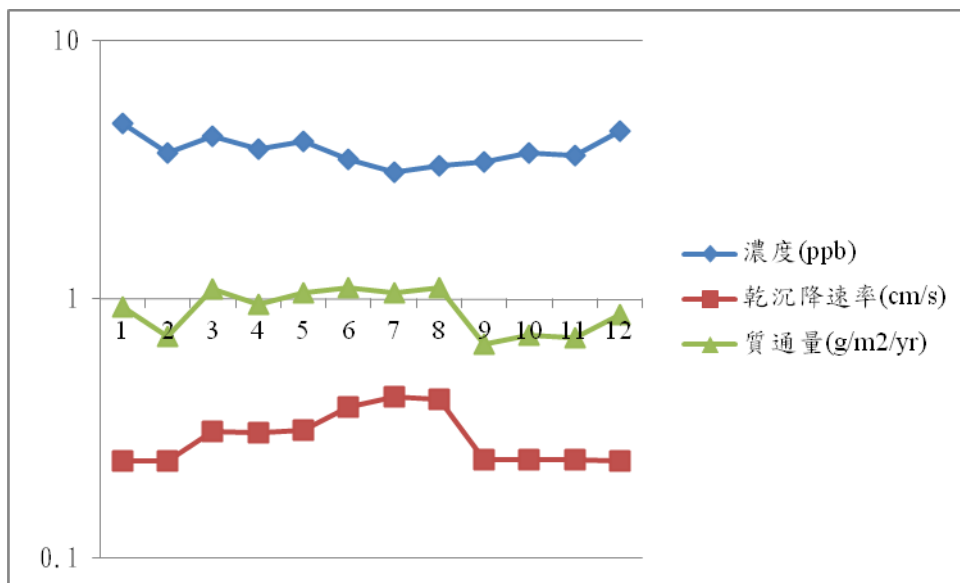


圖 4.14 新竹市 2010 年 SO₂ 模擬結果對數座標圖

4. O_3 模擬部份，平均濃度、乾沉降速率及質通量分別為 25.930 ppb, 0.444 cm/s 及 7.010 g/m²/yr，其餘各月模擬結果皆列於表 4.14，圖 4.15 為新竹市 2010 年 O_3 模擬結果對數座標圖， O_3 的質通量和濃度呈現類似變化趨勢，且因植物葉肉及氣孔的吸附作用，使 O_3 的乾沉降速率在春夏兩季較高，而 O_3 的沉降速率為 NO_2 (0.11cm/s)及 SO_2 (0.297cm/s)的 4 倍及 1.5 倍，故設置綠屋頂對於空污減量以 O_3 的減量效果較佳，綠屋頂之 O_3 每年減量估計可達 105.400 ton/yr， O_3 對人體黏膜有刺激性，也是目前國內管制的空氣污染物之一，主要來自於前驅物 (VOCs 及 NO_x)經光化學反應所形成，由於新竹市 O_3 逐漸上升，而建置綠屋頂除了對 O_3 本身具有相當的減量效果之外，亦可經由前驅物 (NO_2)的減量，減少 O_3 的生成機會。



表 4.14 新竹市 2010 年 O₃ 模擬結果

月份	濃度 (ppb)	乾沉降速率 (cm/s)	質通量 (g/m ² /yr)
1	21.300	0.373	4.910
2	25.800	0.371	5.910
3	25.500	0.465	7.330
4	28.000	0.457	7.910
5	30.100	0.472	8.770
6	18.300	0.512	5.870
7	19.300	0.560	6.670
8	25.400	0.548	8.600
9	26.900	0.397	6.600
10	33.600	0.389	8.080
11	31.900	0.386	7.610
12	25.100	0.381	5.910
平均	25.930	0.444	7.010

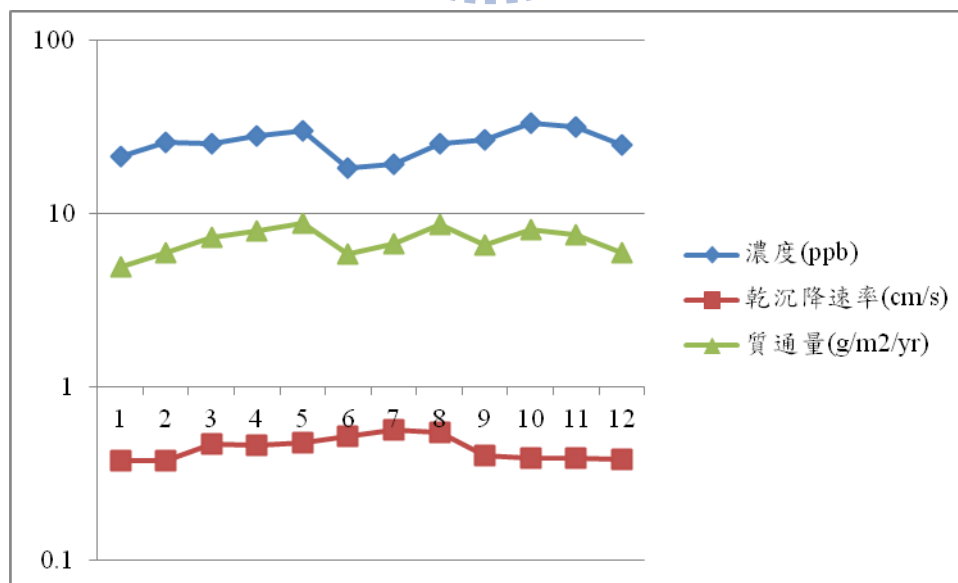


圖 4.15 新竹市 2010 年 O₃ 模擬結果對數座標圖

5. PM₁₀ 減量部份，其平均濃度、乾沉降速率及質通量分別為 47.250 ug/m³，0.254 cm/s 及 3.820 g/m²/yr，其餘數據如表 4.15 所列，圖 4.16 為新竹市 2010 年 PM₁₀ 模擬結果對數座標圖，PM₁₀ 的質通量和濃度呈現類似變化趨勢，和其他污染物種相比，濃度在春夏兩季遠較秋冬來的低，然而如前述，因植物葉肉及氣孔的吸附作用，使 PM₁₀ 的乾沉降速率在春夏兩季較高，故設置綠屋頂在 PM₁₀ 濃度較嚴重的秋冬兩季亦較無法發揮最佳的減量效果。綠屋頂之 PM₁₀ 每年減量估計可達 57.410 ton/yr，可相當於減少使用傳統發電約 7 百 80 萬度電(台電每度電的 PM₁₀ 排放係數為 0.0073kg/kWh(台電永續報告，99 年)。

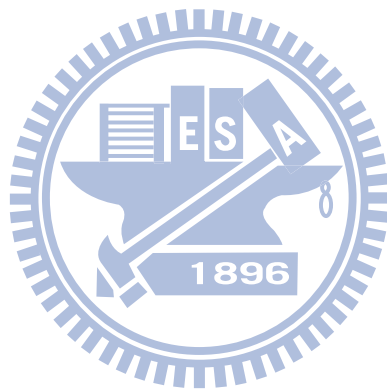


表 4.15 新竹市 2010 年 PM₁₀ 模擬結果

月份	濃度 (ug/m ³)	乾沉降速率 (cm/s)	質通量 (g/m ² /yr)
1	64.000	0.186	3.750
2	47.000	0.186	2.750
3	83.000	0.190	4.970
4	51.000	0.190	3.050
5	43.000	0.205	2.780
6	24.000	0.214	1.620
7	26.000	0.231	1.890
8	31.000	0.233	2.280
9	34.000	0.234	2.500
10	43.000	0.212	2.870
11	49.000	0.205	3.170
12	72.000	0.196	4.450
平均	47.250	0.207	3.010

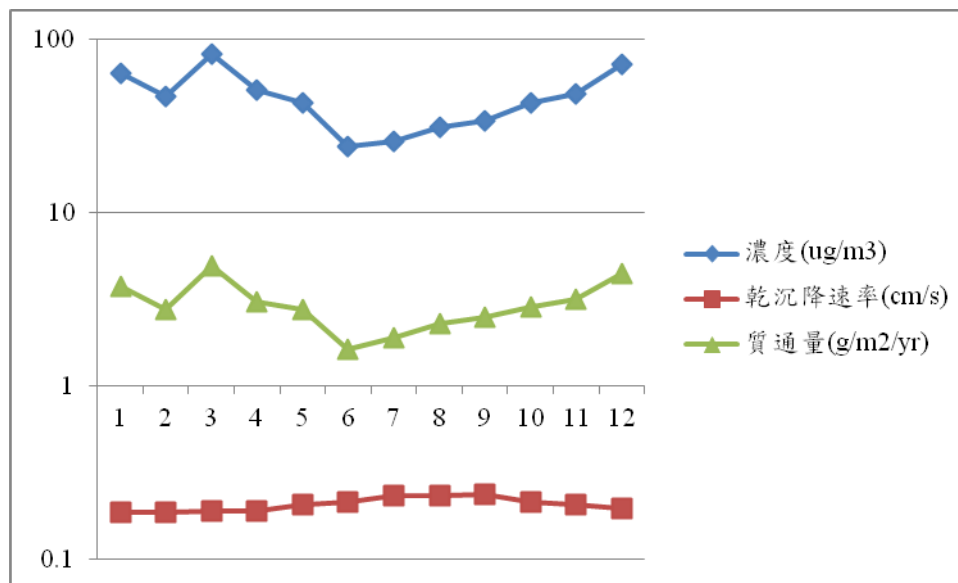


圖 4.16 新竹市 2010 年 PM₁₀ 模擬結果對數座標圖

6. 不同綠屋頂建置比例的減量效果：本研究以 40% 為區間並分為三個綠屋頂設置比例估算，新竹市可建置最大的綠屋頂面積如 4.2 所估算，為 15.036km²，如表 4.16 所列，在 20% 綠屋頂建設比例下，O₃ 每年約有可減量 21.100 噸，其前驅物(NO₂)則約可降低 3.600 噸，對於 60% 面積而言，O₃ 可減 63.200 噸，前驅物(NO₂)降低達 10.700 噸，至於 100% 的面積，O₃ 可達到每年減量約 105.400 噸，量不算多；PM₁₀ 部份，依新竹市目前正推行營建工程以洗掃街道方式抵換開方案粒狀污染物排放量增量中，PM₁₀ 的減量係數為 2.600kg/km 作換算，在 20% 建置面積下，每年的減量相當於掃街 4423 公里的減量效果，60% 而言，相當於 13,230 公里，至於 100% 的面積下，則約可相當 22,077 公里。

表 4.16 新竹市綠屋頂不同設置比例的空污效益

比例 (%)	NO ₂ (ton/yr)	SO ₂ (ton/yr)	O ₃ (ton/yr)	PM ₁₀ (ton/yr)
100	17.000	13.800	105.400	57.400
60	10.700	8.300	63.200	34.400
20	3.600	2.800	21.100	11.500

4.6 截水效益評估

本節主要依 3.3.4 節所說明之方法評估新竹市設置綠屋頂之截水效益。綠屋頂的截水效益分為兩部份評估：降低雨水地面逕流及降低降雨尖峰流量，以下分別說明之。

4.6.1 降低雨水地面逕流

國內截水公式(廖，101 年)：主要依式 3.8、3.9a 及 3.9b 估算，以下依案例參數及降低雨水地面逕流效益結果分別說明之：

1. 案例參數

- (1) 新竹市綠屋頂面積：依 4.2 節估算，為 15.036 平方公里。
- (2) 逐時降雨資料：本研究依大氣資料庫新竹測站 2010 逐時降雨資料估算。
- (3) 土壤基質厚度：本研究採用 10.000cm 作為估算的基準。

2. 降低雨水地面逕流效益：如表 4.17 所列，依式 3.8 及 3.9a 估算的基質年截水深度(ΔSW_S)為 0.284m，而依式 3.9b 計算之排水板年截流深度(ΔSW_d)約為 0.005m，將此兩值加總為 0.289m，並與綠屋頂面積相乘，可得每年綠屋頂的截水量約為 440 萬 m^3 ，為以類似 Mentens 公式所建立的經驗式估算結果(4 百萬 m^3)的 1.1 倍左右。

表 4.17 新竹市截水效益

參數	估算數值
土壤基質厚度 (S_D)(mm)	100
新竹市 2010 年降雨量 (mm)	1619.750
基質年截流深度 (ΔSW_S)(m)	0.284
排水板年截流深度 (ΔSW_d)(m)	0.005
綠屋頂年截流深度 (m)	0.289
綠屋頂面積 (km^2)	15.036
總截水量 (萬 m^3 /yr)	440

4.6.2 降低尖峰逕流量

此部分主要依 3.3.4 節所列的式 3.10 估算，以下分為案例參數及降低尖峰逕流量效益二部分說明此方法之執行情形與結果：

1. 案例參數：

- (1) 土壤基質厚度：本研究採用 10.000cm 作為估算的基準。
- (2) 基質的飽和含水率(θ_s)及初始平均含水率(θ_{ave})：依廖(101 年)的實驗結果，分別為 0.500 及 0.300 左右。
- (3) 排水板平均蓄水深度(B_D)：本研究依據一個常用的市售排水板估算，以 1.540cm 為估算基準。
- (4) 各集水區綠屋頂面積比例：如圖 4.1 所示，新竹市排水系統大至分為四區，唯考量排水系統效益需以集水區作為依據，由於第一、二區在同一集水分區，故將第二區併入第一區，然後估算各分區綠屋頂的可設置面積比例，第一、三及四分區的比例依序為 27.000%、52.240% 及 20.760%。

2. 降低尖峰逕流量效益：如表 4.18 所列，本研究利用式 3.10 估算新竹市 100% 及 50% 飽和截水深度(DSR_{GR})分別為 35.400mm 及 17.700mm，與集水分區中綠屋頂面積比例相乘，得單位時間各分區之可降低的尖峰截水深度範圍，第一、三及四分區依序為 5.480×10^{-7} - 1.100×10^{-6} m、 1.100×10^{-6} - 2.200×10^{-6} m 及 4.220×10^{-7} - 8.440×10^{-7} m，分別除以新竹市五年再現期的設計雨量 7.584×10^{-2} m，可得各分區尖峰逕流減量百分比，依序約為 4.170-8.340%、8.040-16.080% 及 3.200-6.400%，以此作為後續國內雨水排水系統擴充效益換算之依據。

表 4.18 新竹市降低尖峰逕流量效益

參數	估算數值
飽和截水深度(DSR_{GR})(mm)	100% : 35.400 50% : 17.700
各分區單位時間可降低的尖峰截水深度範圍 ($\times 10^{-3}m$)	第一分區 : 3.160-6.320
	第三分區 : 6.100-12.200
	第四分區 : 2.430-4.860
各分區尖峰逕流減量百分比(%)	第一分區 : 4.170-8.340
	第三分區 : 8.040-16.080
	第四分區 : 3.200-6.400

4.7 一般屋頂及綠屋頂成本概估

本節主要依 3.4 節所說明之方法評估國內一般屋頂及薄層式綠屋頂建置之成本，以下分別以初設成本、更新成本及成本概估分別說明之。

1. 初設成本：

- (1) 一般屋頂：本研究類似 Carter and Keeler (2008) 的分析方式，主要依據鋼筋混凝土之上方層(含防水層)分析成本，因一般屋頂的鋼筋混凝土在施工時和建築物為同一結構體，壽命一般較長，故本研究以其上方為一般屋頂初設成本的估算範圍。

本研究分別向林志成建築事務所(100年)及交大營繕組(100年)取得一般屋頂初設成本的相關資料，唯材料及工費不易拆開估算，故目前所得成本皆為含工帶料的資料，如表 4.19 所列，單價成本範圍依二單位所提供之資料，本研究取各資料的平均值約為每平方公尺 1,528 元作為後續估算及比較成本的依據。

表 4.19 一般屋頂平均成本估算表

	厚度 (m)	單價成本範圍(元/m ²)	單位成本(元/m ²)
水泥磚	0.050	250-379	315
輕質混凝土	0.050	200-500	350
油毛氈或 PU 層	0.010	406-500	453
水泥砂漿	0.020	100-310	205
總計	-	-	1528

資料來源：林志成建築事務所 (100 年)及交大營繕組 (100 年)

- (2) 綠屋頂：本研究以 6m×20m 共 120m² 為估價案例，分別向竹軒園景觀工程設計公司及寶銳企業有限公司取得綠屋頂建置所需成本資料，包含植物、介質、排水層(蓄水層)、防水層及施作人工費等，其中基質厚度以 10.000cm 為代表；表 4.20 所列為本研究依兩家廠商所提供各品名的單位成本範圍，其中基質的範圍較大的原因在於使用材料的不同，如紅磚粒及花土混合有機稻殼是屬於單價較高的材料，而培養土及有機肥料則價格較低，故本研究取範圍區間的平均或代表值作為估算成本之依據，單位面積成本含稅約為 2,683 元，與台北市信義區公所提供的單位面積成本為每平方公尺 2,640 元頗接近，本研究以單位面積成本含稅 2,683 元作為後續估算及比較成本的依據。

表 4.20 綠屋頂單位建置成本範圍資料

品名	規格	單價成本範圍(元/m ²)	單位成本(元/m ²)
植栽	m ²	303-900	600
基質(10cm 厚)	m ²	170-900	300
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	m ²	583-635	609
總計	-	-	2555 2683(含稅)

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)

2. 更新成本：本研究假設一般屋頂部份 20 年需更新一次，但只防水層以上，不含下方的結構，更新成本假設與初設成本相同；綠屋頂部分則依 Wong *et al.* (2003)之假設每 15 年需要更新植物，如表 4.20 所列，重新植栽成本亦假設為每平方公尺 600 元。

3. 成本概估

(1) 一般屋頂年均成本(C_{NR})：由於防水層可能 10-20 年間會更換一次，故將一般屋頂的更新年限分為 10、15 及 20 年三種估算方法。分別依式 3.11a 式、3.11b 及 3.11c 估算，一般屋頂的年均成本在不同更新年數下約為每平方公尺 190 元、146 元及 115 元。

(2) 綠屋頂年均成本(C_{GR})：依式 3.12 之估算，綠屋頂的年均成本為每平方公尺為 166.5 元，與 10 年、15 年及 20 年更新一次的一般屋頂年均成本的差異分別為每平方公尺-23.5 元、20.5 元及 51.5 元，增

設綠屋頂約須比不同更新年數下的一般屋頂額外增加-12.400%、14.000%、及 45.000%的年均成本。

4.8 城市綠屋頂成本效益分析

本節主要依 3.5 節所說明之方法評估新竹市綠屋頂建置之成本效益分析，以下分別以降溫節能、減碳、空污減量、截水等經濟效益及新竹市綠屋頂成本效益分析分別說明之。

1. 降溫節能經濟效益：本研究將 4.3.1 節所估算的 1D-HF 單位面積節能效益 $11.170\text{kWh/m}^2/\text{yr}$ 及 4.3.2 節所估算之 eQUEST 單位面積節能效益 $8.600\text{kWh/m}^2/\text{yr}$ ，乘上台電目前電價每度電約台幣 2.100 元(台灣電力公司，100 年)，可得每年每單位平方公尺綠屋頂面積分別約可節省 23.460 元及 18.100 元，再與本研究 4.2 節估算的新竹市可建置綠屋頂面積 15.036 平方公里相乘，依 1D-HF 及估算可得每年約可節省 1 億 6 千 8 百萬度電共約 3 億 5 千 3 百萬元，而依 eQUEST 之結果估算則約可節省 1 億 3 千萬度電共約 2 億 7 千 2 百萬元，與目前新竹市推動節能減碳成效相比較，依 1D-HF 法的結果約為 2010 年非營業用電比前一年所節省 1 千 7 百萬元(環保署綠色生活網，100 年)的 20 倍，依 eQUEST 法的結果則約為 16 倍左右。
2. 減碳經濟效益：將本研究 4.4 節估算之 1D-HF 法節能量及基質吸收能力，減碳效益估計每年約可減 12.100 萬噸 eCO_2 ，而依 eQUEST 結果及基質吸收能力，減碳效益每年約為 10.1 萬噸 eCO_2 ，分別與蕭 (98 年)的碳稅建議值 750 NTD/ton eCO_2 相乘，即可得 1D-HF 法的節能量與基質吸收能力每年節省碳稅約為 9 千 1 百萬元，而依 eQUEST 與基質吸收能力，每年約可節省碳稅為 7 千 6 百萬元。唯國內尚未實施碳稅，須俟實施後才會產生此效益。

3. 空污減量經濟效益：此部分主要依台灣現有空氣污染防制費用(環保署，100年)、單位污染減量成本(維護成本法)(倪等，96年)及單位損害成本(林，96年)估算空污估算經濟效益，以下分別說明之。
- (1) 空氣污染防制費用：依本研究 4.5 節估算氮氧化物及硫氧化物的減量分別為每年減量 17.000 噸及 13.800 噸，分別與該污染物目前二級防制區的空污費率，氮氧化物及硫氧化物分別為每公噸 15 千元及 12 千元相乘，可得此部份效益，氮氧化物及硫氧化物每年分別約為 25 萬 5 千元及 16 萬 6 千元，故若以空污防制費計算，經濟效益約為每年 42 萬元，並不多。
- (2) 單位污染減量成本：將本研究 4.5 節估算之四種空氣污染物(依序為 NO_2 , SO_2 , PM_{10})的減量，每年分別為 17.000 噸、13.800 噸及 57.400 噸，分別與倪等(96年)所建立各污染物單位污染減量成本相乘， NO_2 , SO_2 , PM_{10} 的減量成本為每公噸 2 萬 6 千元、2 萬 5 千元及 3 萬 8 千元，可得 NO_2 , SO_2 及 PM_{10} 每年的減量成本約為 43 萬、35 萬及 216 萬元，故減量成本的總經濟效益為每年 3 百萬，也不算很顯著。
- (3) 單位損害成本：依本研究 4.5 節估算空氣污染物 SO_2 、 O_3 及 PM_{10} 減量每年分別為 13.800 噸、105.400 噸及 57.400 噸，分別與表 4.21 所列各污染物的單位損害成本相乘，其中表 4.21 為本研究依林(96年)之估算方法所建立各污染物單位損害成本相關參數表， SO_2 、 O_3 及 PM_{10} 的單位損害成本分別為每年每公噸 15 萬 3 千元、7 千 8 百元及 12 萬元，可得 SO_2 , O_3 , PM_{10} 每年的損害成本約為 210 萬、83 萬及 680 萬，故所減少的損害成本約為每年 973 萬。

表 4.21 各污染物單位損害成本參數表

參數	SO ₂	O ₃	PM ₁₀
衝擊反應(急性死亡率, YOLL)	22.250	12.420	58.650
衝擊反應(呼吸性急病入院數, case)	8.500	75.164	40.880
外部成本(千萬)	9.000	6.600	23.900
單位損害成本(NTD/噸/yr)	152,942	7,860	119,160

4. 截水經濟效益：此部分主要依國外的雨水下水道使用費(Stormwater fee)及國內雨水下水道擴充成本估算截水經濟效益，以下分別說明之。

(1) 雨水下水道使用費(Stormwater fee)

(a) 第一部分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 USD/m²/year) (DDOE, 2011)可獲得 55%之優惠，並配合中央銀行目前台幣兌換美元的匯率為 30.200 元，則可得雨水下水道使用費費率減少約為每年每平方公尺新台幣 0.055 元，並與本研究 4.2 節估算之綠屋頂面積為 15.036 平方公里相乘，可得約為每年 82 萬元，效益並不顯著。

(b) 第二部份則依不同建築用途，採用 Carter and Keeler (2008)所建議的優惠方案，依不同用途給予的 Stormwater credit，抵用費率如表 4.22 所列，將表 3.10 所列不同建築用途可獲得之 credit 分別與中央銀行目前台幣兌換美元的匯率為 30.200 元相乘，可得辦公大樓每年每平方公尺可獲得 1.208 元，住家部份每年每平方公尺則為 1.510 元，依本研究 4.2 節估算之綠屋頂面積為 15.036 平方公里，並與 4.3.2 節估算的新竹市住宅及所占比例為 45%及 55%相乘，可得住宅與辦公綠屋頂面積約為 6.770 及 8.266 平方公里，最後分別與各建築的抵用費率相乘並加總，可得總額約為 2022 萬。

表 4.22 住宅及辦公單位面積 Stormwater credit

建築用途	住宅	辦公
Stormwater credit(元/ m ² /year)	1.510	1.208
綠屋頂面積(km ²)	6.770	8.266
可抵用總額(萬)	1,020	1,000

(2) 雨水下水道擴充成本：依本研究 4.6.2 節估算綠屋頂各分區單位時間可降低的尖峰截水深度範圍，並以新竹市各排水系統分區估算排水系統截水效益。各分區分別如下說明。

- (a) 第一排水分區：如表 4.23 所列，本區尖峰逕流減量百分比約為 4.170%-8.340%，利用不同管線種類以上述減量範圍擴充及依國內雨水下水道單位建造成本資料(內政部營建署，92 年)乘以各類管線長度，可估得所節省的擴充成本約 1 千 8 百萬元到 3 千 2 百萬元之間。
- (b) 第三排水分區：將 4.6.2 估算的尖峰逕流減量百分比範圍在 8.040%-16.080%，依前述的方法估算節省的擴充成本約 1 千萬元到 1 千 5 百萬元之間。
- (c) 第四排水分區：如表 4.23 所列，本區尖峰逕流減量百分比為 3.200%-6.400%，本區減量和其他區相比較小，依同樣方法估算擴充成本約可省 1 千 4 百萬元到 3 千萬元。
- (d) 新竹市排水系統截水效益：如表 4.23 所列，將三區節省的成本加總，可得新竹市擴充成本約可省 4 千 2 百萬至 8 千萬，以折現率 4.250% 來估算，可得每年成本約在 250 萬至 450 萬之間，並以此作為後續成本效益估算的依據。

表 4.23 新竹市排水系統擴充成本估算

	第一分區	第三分區	第四分區
尖峰逕流減量百分比(%)	4.170-8.340	8.040-16.080	3.200-6.400
擴充成本(萬元)	1,832-3,223	961-1,542	1,431-3,051

5. 新竹市綠屋頂成本效益分析：本研究分為全市綠屋頂效益及額外考量碳稅與雨水下水道使用費兩種方式分析新竹市推廣綠屋頂的可能成本效益，以下分別說明之。

- (1) 全市綠屋頂成本效益：表 4.24 所列為依 4.7 節所估算之 10 年、15 年及 20 年等三個不同一般屋頂更新年限下與綠屋頂的年均成本差異分別為每平方公尺-23.500、20.500 及 51.500 元，與 4.2 節估算綠屋頂面積為 15.036km² 相乘，可得成本差異依序為-3 億 5 千萬元、3 億 1 千萬元及 7 億 7 千萬元；如表 4.25 所列之經濟效益，每年的經濟效益約介於 2 億 7 千 5 百萬元到 3 億 5 千 7 百萬元之間。如表 4.26 所列，將經濟效益與不同更新的年均成本差相減，可發現以 10 年、15 年及 20 年的成本效益每年約介於 6 億 2 千 5 百至 7 億 7 百萬元、負 3 千 5 百萬元至 4 千 7 百萬元及負 5 億元至負 4 億 1 千 5 百萬元；從上述結果可發現，節能效益佔最大宗，約佔 99%，雖然在一般屋頂 20 年更新一次的狀況下，綠屋頂的成本效益較差，但這主要是本研究尚未將減緩熱島效應等效益計入，且國內屋頂應該很少 20 年才需要更新，其餘兩種的狀況下，都顯示綠屋頂的建置對於都市中綠地較少的國內而言，有正向的意義。

表 4.24 不同一般屋頂更新年限與綠屋頂年均成本差異估算

一般屋頂更新年限	單位成本差(元/m ²)	成本(萬元)
10 年	-23.500	-35,000
15 年	20.500	31,000
20 年	51.500	77,000

表 4.25 新竹市綠屋頂總效益

綠屋頂效益	經濟效益範圍(萬元/yr)	平均 (萬元/yr)
降溫節能	1D-HF : 34,300 eQUEST : 27,200	30,750
空污減量	空污費 : 42 污染減量成本 : 300 損害成本 : 973	438
截水 (雨水系統擴充成本)	250 至 450	350
總計(元/yr)	27,500 至 35,700	31,500

表 4.26 新竹市綠屋頂與一般屋頂的成本效益差異分析

一般屋頂更新年限	10 年	15 年	20 年
最小(萬元/yr)	62,500	-3,500	-50,000
平均(萬元/yr)	66,500	500	-45,000
最大(萬元/yr)	70,700	4,700	-41,500

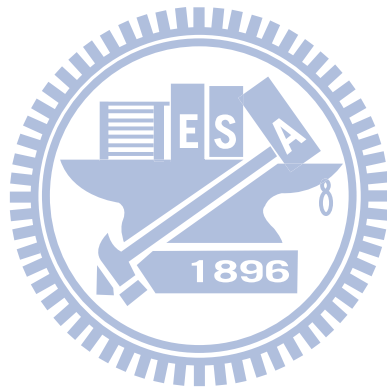
(2) 額外考量碳稅與雨水下水道使用費：若額外考量碳稅及雨水下水道使用費，如表 4.27 所列，每年的經濟效益約介於 3 億 5 千萬元到 4 億 7 千萬元之間，平均為 4 億 1 千萬，約為未考量的 1.3 倍，另如表 4.28 所列，將經濟效益與成本相減，可得以 10 年、15 年及 20 年三種不同一般屋頂更新年限的成本效益每年分別為 7 億至 8 億 2 千萬元、4 千萬元至 1 億 6 千萬元及負 4 億 2 千萬元至負 3 億元，以平均來看，考量碳稅與雨水下水道使用費的成本效益約為未考量的 5-20 倍左右，未來若推行此二稅率，預期有助於綠屋頂推廣；節能在此情境下所佔比例降低為 75%，碳稅約占 20%。

表 4.27 額外考量碳稅與雨水下水道使用費狀況下的綠屋頂總效益

綠屋頂效益	經濟效益範圍(萬元/yr)	平均 (萬元/yr)
降溫節能	1D-HF：34,300 eQUEST：27,200	30,750
碳稅	1D-HF：9,100 eQUEST：7,600	8,400
空污減量	空污費：42 污染減量成本：300 損害成本：973	438
截水(雨水下水道擴充成本)	250 至 450	350
截水(雨水下水道使用費)	華盛頓州：82 Credit：2,000	1,100
總計(萬元/yr)	35,000 至 47,000	41,000

表 4.28 額外考量碳稅與雨水下水道使用費狀況下的成本效益差異分析

一般屋頂更新年限	10 年	15 年	20 年
最小(萬元/yr)	70,000	4,000	-42,000
平均(萬元/yr)	76,000	10,000	-36,000
最大(萬元/yr)	82,000	16,000	-30,000



第五章 結論與建議

本研究建立方法推估城市推廣綠屋頂之成本效益，以作為國內各城市綠屋頂推廣決策分析之用，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

本研究主要成果包含城市綠屋頂降溫節能效益評估、減碳效益評估、空污減量評估、截水效益評估、建立國內綠屋頂成本資料及成本效益分析，以下說明這些成果及重點結論。

1. 城市綠屋頂降溫節能效益評估：本研究採用 1D-HF(Clark *et al.*, 2008) 及 eQUEST(Hirsch, 2003)兩種方法，分別估算新竹市設置綠屋頂的節能效益，所得成果如下：
 - (1) 1D-HF 法：此法主要依據 U 值與溫度差估算，總節能效益約為每年 1 億 7 千萬度電，約為新竹市 2010 年非營業用電 840 萬度的 20% 左右。
 - (2) eQUEST 法：本研究依住宅與辦公建築分別分析，且假設空調在高於 26 度時開啟，結果分別為每年約可省 7 千 1 百萬及 9 千萬度，而全市節能效益為每年 1 億 6 千 1 百萬。1D-HF 法因亦考量任何溫度大於 26°C 的時段，故估算結果比此法的結果大。
2. 減碳效益評估：本研究依 1D-HF 及基質吸收能力估算減碳效益每年約可減 12.100 萬噸 eCO₂，若依 eQUEST 之結果，則約為每年 10.100 萬噸 eCO₂。
3. 空污減量評估：本研究主要評估四種污染物的減量效益，分別為 NO₂, SO₂, O₃, PM₁₀，結果顯示減量以 O₃ 為最大宗，其次依序為 PM₁₀、NO₂

及 SO_2 ，量雖然不多，但對於較需注意 O_3 的新竹市而言，綠屋頂的建置仍具有正向的意義。

4. 截水效益評估：本研究主要評估降低雨水地面逕流及降低降雨尖峰流量兩部份，所得結果如下：

- (1) 降低雨水地面逕流：本研究估算的截水量約為每年 440 萬 m^3 。
- (2) 降低降雨尖峰流量：本研究所假設綠屋頂的飽和截水深度(DSR_{GR})約為 $3.540 \times 10^{-2} \text{m}$ ，唯排水系統效益需以集水區作為估算依據，故本研究將第二區併入第一區，而各分區尖峰逕流減量百分比依序約為設計雨量的 4.170-8.340%、8.040-16.080% 及 3.200-6.400%。

5. 建立國內一般及綠屋頂成本資料：本研究考量一般及綠屋頂的初設成本、維護、更新及使用期間等項目，並向已建置的國內案例及相關廠商訪查成本資料。

- (1) 一般屋頂：本研究分析結果含工帶料成本為每平方公尺 1,528 元；年均成本部份，一般屋頂在以 10、15 及 20 年為更新年限的年均成本(C_{NR})分別為每平方公尺 190 元、146 元及 115 元。
- (2) 綠屋頂：主要以植物、介質、排水層(蓄水層)、防水層及施作人工費等為估算依據，本研究取資料區間的平均並估算其單位面積成本含稅約為 2,683 元，與每平方公尺 2,640 元的台北市信義區公所頗接近；年均成本部份(C_{GR})，本研究未考量維護部分，每平方公尺為 166.500 元。

6. 綠屋頂成本效益分析：本研究估算出四種主要效益所具有之經濟效益，並綜合上述評估新竹市綠屋頂成本效益分析，所得結果如下。

- (1) 降溫節能經濟效益：依 1D-HF 及估算可得每年約可節省約 3 億 5 千 3 百萬元，而依 eQUEST 之結果估算共約 2 億 7 千 2 百萬元。

(2) 減碳經濟效益：假設碳稅每公噸 750 元時，以 1D-HF 法的節能量與基質吸收能力每年節省碳稅約為 9 千 1 百萬元，而依 eQUEST 與基質吸收能力，每年約可再增加 7 千 6 百萬元效益。

(3) 空污減量經濟效益

(a) 空氣污染防治費用：本研究以氮氧化物及硫氧化物每年分別約為 25 萬 5 千元及 16 萬 6 千元，經濟效益每年為 42 萬元，並不多。

(b) 單位污染減量成本： NO_2 , SO_2 及 PM_{10} 每年的減量成本約為 43 萬、35 萬及 216 萬元，總經濟效益為每年 3 百萬，亦不顯著。

(c) 單位損害成本：本研究估算 SO_2 , O_3 , PM_{10} 每年的損害成本約為 210 萬、83 萬及 680 萬，故所減少的損害成本約為每年 973 萬。

(4) 截水經濟效益

(a) 雨水下水道使用費：此部份以美國華盛頓州現有費率估算，結果得每年 82 萬元，效益並不顯著；另依 Carter and Keeler (2008)建議之優惠方案，總額約為 2,022 萬。

(b) 雨水下水道擴充成本：新竹市第一排水分區節省成本為 1,832 至 3,223 萬元，第三分區介於 961 至 1,542 萬元之間，第四分區則在 1,431 至 3,051 萬元之間，故新竹市節省的排水系統擴充成本為 4 千 2 百萬元到 8 千萬元左右，40 年年均成本則約在 250 萬到 450 萬元。

(5) 新竹市綠屋頂成本效益分析

(a) 依一般屋頂不同更新年限：依據一般屋頂更新年限 10 年、15 年及 20 年下比較綠屋頂的成本效益，分別為每年 6 億 2 千 5 百至 7 億 7 百萬元、負 3 千 5 百萬元至 4 千 7 百萬元及負 5 億元至負 4 億 1 千 5 百萬元，除了在一般屋頂更新年限為 20

年以外，綠屋頂的效益均較佳，雖然在更新年限為 20 年時，綠屋頂的效益較差，唯本研究並未考量綠屋頂…等其他效益，且國內一般屋頂的更新年限往往短於 20 年。

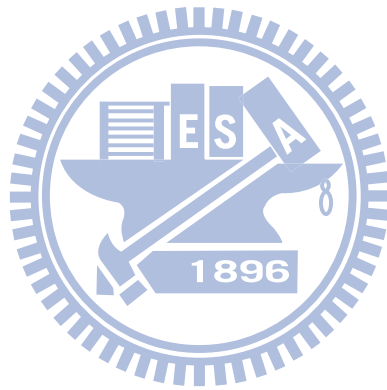
- (b) 額外考量碳稅與雨水下水道使用費：與一般屋頂更新年限為 10 年、15 年及 20 年的成本比較每年分別為 7 億至 8 億 2 千萬元、4 千萬元至 1 億 6 千萬元及負 4 億 2 千萬元至負 3 億元，碳稅效益約占 20%，可見碳稅亦有助於綠屋頂推廣。

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. 減碳效益評估：本研究並未考量植物的固碳作用，故未來可考量針對不同植物的固碳作用進行分析，以利減碳效益評估之完整性。
2. 氣象資料不確定性：本研究在評估截水效益並未考量氣象資料的不確定性，近年來氣候變遷，宜分析不確定對結果的影響。
3. 成本資料：因目前國內現有案例較少，且有些成本價格範圍較廣，如本研究取得的植栽及基質成本，會造成估算的不確定性，亦有必要進一步分析。
4. 截水量之效益：本研究雖有估算截水的量，但並沒有建立方法評估其效益，有必要進一步探討。
5. 國內雨水系統擴充效益：本研究雖以降低尖峰逕流量之百分比作為雨水排水系統擴充之依據，唯此值是一個概估值，詳細推估可考量採用建 SWMM 模式進一步分析之。

6. 降低洪災之效益：綠屋頂可有效降低尖峰流量，並延遲降雨延時，對於易淹水地區具有一定的效益，唯此部分在案例區的相關研究上甚少，近年來因氣候變遷，新竹市淹水的可能性亦隨之增加，未來可考量探討適當的方法評估減少淹水的效益。
7. 城市綠屋頂最適建置地點分析：本研究著重於評估城市建置綠屋頂的效益評估，故以目前新竹市可建置的最大綠屋頂面積為估算依據，唯不同地區設置綠屋頂的效益可能大不相同，故未來可考量進一步分析在何處建置綠屋頂的效益較佳。



參考文獻

中鼎工程股份有限公司，(96年)，「空氣污染物排放清冊更新管理及空氣品質質損量推估計劃(第二年)」，期末報告定稿本，台北。

內政部營建署，(75年)，「換氣與空氣調節設備技術規範」，中華民國建築協會，台北。

內政部營建署，(92年)，「新竹市雨水下水道系統重新規劃報告」，新竹市環保局，新竹。

內政部營建署，(98年)，營建統計年報。

http://w3.cpami.gov.tw/statisty/98/98_hm/index.htm (accessed on 2012/01/11)。

內政部營建署，(98年)，歷年核發建物使用執照。

http://w3.cpami.gov.tw/statisty/98/98_hm/index.htm (accessed on 2012/01/11)。

內政部營建署，(100年)，雨水下水道系統實施概況。

http://www.cpami.gov.tw/chinese/index.php?option=com_content&view=article&id=14055&Itemid=50 (accessed on 2012/01/11)。

台灣電力公司，(99年)，電力排放係數。

<http://www.moeaboe.gov.tw/Download/Promote/greenhouse/files/99年度電力排放係數.pdf> (accessed on 2012/01/11)。

台電永續報告，(99年)，「2010年台電永續報告書」，台灣電力公司，台北。

行政院經建會，(100年)，公共建設計畫財務評估中折現率如何訂定之研究。
<http://www.cepd.gov.tw/m1.aspx?sNo=0008759> (accessed on 2012/01/11)。

竹軒園公司，(100年)，竹軒園景觀工程設計公司(市場訪價)。

交大營繕組，(100 年)，國立交通大學營繕組 (市場訪價 Tel:(03)5725763)，
<http://www.ga.nctu.edu.tw/ga5/> (accessed on 2012/01/11)。

李京澄 (99 年)，「綠屋頂之降雨截水能力分析」，國立交通大學環境工程
研究所碩士論文，新竹。

住宅 e 化網，(100 年)，全國資料整合查詢。
<http://ehi.cpami.gov.tw/Net/houseinfo/querycity1.aspx> (accessed on
2012/01/11)。

林憲德，(86 年)，「建築能源法規的解說與實例專輯」，營建雜誌社，台
北。

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。

林冠宏，(96 年)，「中部空品區 SO₂、O₃ 及 PM₁₀ 對人體健康影響之研究」，
朝陽科技大學環境工程與管理系，碩士論文，台中。

林清裕，(100 年)，「以電腦模擬公寓住宅空調負荷與外牆隔熱效益研究」，
朝陽科技大學建築及都市設計研究所，碩士論文，台中。

林志成建築事務所，(100 年)，林志成建築師事務所 (訪查)。

郭柏巖，(94 年)，「住宅耗電實測解析與評估系統之研究」，國立成功大
學建築研究所，博士論文，台南。

黃國倉，(91 年)，「空調設備簡易預測法之研究」，國立成功大學建築研
究所，碩士論文，台南。

黃振寬，(96 年)，「以空氣資源管理效益整合模型評估溫室氣體與空氣污
染物綜合減量之經濟及社會效益」，國立台北科技大學環境規劃與管理
研究所，碩士論文，台北。

- 新竹市環保局，(100 年)，新竹市溫室氣體節能減量計畫。
<http://www.hcceptb.gov.tw/airweb/air/pro10/index.html> (accessed on 2012/01/11)。
- 經濟部能源局，(99 年)，99 年度太陽能發電系統電價躉購費率。
<http://www.moeaboe.gov.tw/Policy/Renewable/meeting/SEmeetingMain.aspx?pageid=others> (accessed on 2012/01/11)。
- 賴柏亨，(97 年)，「辦公大樓自然通風對 ENVLOAD 指標優惠評估之研究」，國立成功大學建築研究所，碩士論文，台南。
- 環保署綠色生資訊活網，(100 年)，節能減碳計畫。
<http://greenliving.epa.gov.tw/GreenLife/> (accessed on 2012/01/11)。
- 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/> (accessed on 2012/01/11)。
- Akbari, H. (2002). "Shade trees reduce building energy use and CO₂ emissions from power plants." *Environment Pollution*, 116, pp. 119-126.
- Baldocchi, D.D., Hicks, B.B., and Camara, P. (1987). "A canopy stomatal resistance model for gaseous deposition to vegetated surfaces." *Atmospheric Environment*, 21, pp. 91-101.
- Barrio, E.P.D. (1998). "Analysis of the green roofs cooling potential in buildings." *Energy and Buildings*, 27, pp. 179-193.
- Becket, K.P., Freer-Smith, P., and Taylor, G. (1998). "Urban woodlands: their role in reducing the effects of particulate pollution." *Environment Pollution*, 99, pp. 347-360.

- Berndtsson, J.C. (2010). "Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review." *Ecological Engineering*, 36, pp. 351-360.
- Casey Trees Endowment Fund and Limno-Tech Incorporation. (2005). *Re-greening Washington, DC: A green roof vision based on quantifying storm water and air quality benefits*. Casey Trees Endowment Fund, Washington, DC.
- Castleton, H.F., Stovin, V., Beck, S.B.M., and Davison, J.B. (2010). "Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit." *Energy and Buildings*, 42, pp. 1582-1591.
- Carter, T. and Jackson, C.R. (2006). "Vegetated roofs for stormwater management at multiple spatial scales." *Landscape and Urban Planning*, 80, pp. 84-94.
- Carter, T.L. and Rasmussen, T.C. (2006). "Hydrologic behavior of vegetated roofs." *Journal of the American Water Resources Association*, 42(5), pp. 1261-1274.
- Carter, Y. and Keeler, A. (2008). "Life-cycle cost-benefit analysis of extensive vegetated roof systems." *Journal of Environmental Management*, 87, pp. 350-363.
- Chang, N.B., Rivera, B.J., and Wanielista, M.P. (2011). "Optimal design for water conservation and energy savings using green roofs in a green building under mixed uncertainties." *Journal of Cleaner Production*, 19, pp. 1180-1188.
- City of Toronto and Ontario Centres of Excellence-Earth and Environmental Technologies (OCE-ETech) (2005). *Report on the environmental Benefits and Costs of Green Roof Technology for the City of Toronto*. City of

- Toronto and Ontario Centres of Excellence-Earth and Environmental Technologies, Toronto.
- Clark, C., Adriaens, P., and Talbot, F.B. (2008). "Green Roof Valuation: A Probabilistic Economic Analysis of Environmental Benefits." *Environmental Science*, 42, pp. 2155-2161.
- Corrie, C., Talbot, B., Bulkley, J., and Adriaens, P. (2005). "Optimization of green roofs for air pollution mitigation." *Proceedings of Third Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference, Awards and Trade show*, Washington, DC, USA, May 4-6.
- Corrie, B.A. and Bass, B. (2005). "Estimate of air pollution mitigation with green plants and green roofs using the UFORE model." *Proceedings of Third Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference*, Washington, DC, USA, May 4-6.
- Dab, W., Quenel, S. M. P., Moullec, Y. L., Tertre, A. L., Thelot, B., Monteil, C., Lameloise, P., Pirard, P., Momas, I., Ferry, R., and Festy, B. (1996). "Short term respiratory health effects of ambient air pollution: results of APHEA project in Paris." *Journal of Epidemiology & Community Health*, 50, pp. 42-46.
- Dyer, A.J. and Bradley, C.F. (1982). "An alternative analysis of flux gradient relationships." *Boundary-Layer Meteorology*, 22, pp. 3-19.
- Del Barrio, E.P. (1998). "Analysis of the green roofs cooling potential in buildings." *Energy Build*, 27, pp. 179-196.
- European Commission, DG Research, Technological Development and Demonstration. (2004). *New Elements for the Assessment of External Costs from Energy Technologies*. European Commission, DG Research, Technological Development and Demonstration..

- Fioretti, R., Palla, A., and Principi, P. (2010). "Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate." *Building and Environment*, 45, pp. 1890-1904.
- Feng, C., Meng, Q., and Zhang, Y. (2010). "Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs." *Energy and Buildings*, 42, pp. 959-965.
- Giorgi, F. (1988). "Dry deposition velocities of atmospheric aerosols as inferred by applying a particle dry deposition parameterization to a general circulation model." *Tellus*, 40(B), pp. 23-41.
- Getter, K.L., Rowe, D.B., Robertson, G.P., Gregg, B.M., and Andresen, J.A. (2009), "Carbon Sequestration Potential of extensive Green Roofs." *Environmental Science Technology*, 43, pp. 7564-7570.
- Getter, K.L., Rowe, A.B., and Andresen, J.A. (2007). "Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention." *Ecological Engineering*, 31, pp. 225-231.
- Haemmerle, F. (2002). "Der Markt für grüne Dächer wächst immer weiter." *Proceedings of the Jahrbuch Dachbegrünung*, (German), pp. 11-13.
- He, H. and Jim, C.Y. (2010). "Simulation of thermodynamic transmission in green roof ecosystem." *Ecological Modeling*, 221, pp. 2949-2958.
- Herman, R. (2003). "Green Roofs in Germany: Yesterday, Today and Tomorrow." *Proceedings of the 1st North American Green Roof Conference: Greening rooftop for sustainable communities*, Chicago, IL, USA.
- Hill, A.C. (1971). "Vegetation: a sink for atmospheric pollutants." *Journal of the Air Pollution Control Association*, 21, pp. 341-346.

- Hilten, R.N., Lawrence, T.M., and Tollner, E.W. (2008). "Modeling stormwater runoff from green roofs with HYDRUS-1D." *Journal of Hydrology*, 358, pp. 288-293.
- 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.
- Hirsch, J.J. (2003). "eQUEST Introductory Tutorial." <http://doe2.com/equest> (accessed on 2012/01/11).
- Jim, C.Y. and He, H. (2010). "Coupling heat flux dynamics with meteorological conditions in green roof ecosystem." *Ecological Engineering*, 36, pp. 1052-1063.
- Killus, J.P., Meyer, J.P., Durran, D.R., Anderson, G.E., Jerskey, T.N., Reynolds, S.D., and Ames, J. (1984). "Continued Research in Mesoscale Air Pollution Simulation Modeling." Vol. V: Refinements in Numerical Analysis, Transport, Chemistry, and Pollutant Removal. EPA/600/3-84/095a, US Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC.
- Kohler, M. (2003). "Plant survival research and biodiversity: kessons from Europe." *Proceeding of Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference*, Chicago.
- Kosareo, L. and Ries, R. (2006). "Comparative environmental life cycle assessment of green roofs." *Building and Environment*, 42, pp. 2606-2613.
- Kneifel, J. (2010). "Life-cycle carbon and cost analysis of energy efficiency measures in new commercial buildings." *Energy and Building*, 42, pp. 333-340.

- Li, J.F., Wai, O.W.H., Li, Y.S., Zhan, J.M., Ho, Y.A., Li, J., and Lam, E. (2010). "Effect of green roof on ambient CO₂ concentration." *Building and Environment*, 45, pp. 2644-2651.
- Lim, J.H., Sabin, L.D., Schiff, K.C., and Stozenbach, K.D. (2006). "Concentration, size distribution, and dry deposition rate of particle-associated metals in the Los Angeles region." *Atmospheric Environment*, 40, pp. 7810-7823.
- Martens, R., Bass, R., and Alcazar, S. (2008). "Roof-envelope ration impact on green roof energy performance." *Urban Ecosystems*, 11, pp. 339-408.
- Mentens, J., Raes, D., and Hermy, H. (2007). "Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century?" *Landscape and Urban Planning*, 77, pp. 217-226.
- Mitchell, V.G., Cleugh, H.A., Grimmond, C.S.B., and Xu, J. (2008). "Linking urban water balance and energy balance models to analyse urban design options." *Hydrological Processes*, 22, pp. 2891-2900.
- Morikawa, H., Higaki, A., Nohno, M., Takahashi, M., Kamado, M., Nakata, M., Toyohara, G., Okamura, Y., Matsui, K., Kitani, S., Irifune, K., and Goshima, N. (1998). "More than a 600-fold variation in nitrogen dioxide assimilation among 217 plant taxa." *Plant, cell and Environment*, 21, pp. 180-190.
- Montalto, F., Behr, C., Alfredo, K., Wolf, M., Arye, M., and Walsh, M. (2007). "Rapid assessment of the cost-effectiveness of low impact development for CSO control." *Landscape and Urban Planning*, 82, pp. 117-131.
- Nowak, D.J. (1994). "Chapter 5: Air pollution removal by Chicago's urban forest." *USDA Forest Service General technical report NE-186*. In: McPherson, E.G. (Ed.), *Chicago's Urban Forest Ecosystem: Results of the Chicago Urban Forest Climate Project*. United States Department of

- Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experimental Station, Randnor, PA, USA, pp. 63-81.
- Niu, H., Clarkm C., Zhou, J., and Adriaens, P. (2010). "Scaling of Economic Benefits from Green Roof Implementation in Washington, DC." *Environment Science Technology*, 44, pp. 4302-4308.
- Panofsky, H.A. and Dutton, J.A. (1984). *Atmospheric Turbulence*. Wiley, New York.
- 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.
- Ponce de Leon, A., Anderson, H. R., Blend, J. M., Strachan, D. P., and Bower, J. (1996). "Effects of air pollution on daily hospital admissions for respiratory disease in London between 1987-1988 and 1991-1992." *Journal of Epidemiology and Community Health*, 50, pp.63-70.
- Peters, K. and Eiden, R. (1992). "Modelling the dry deposition velocity of aerosol particles to a spruce forest." *Atmospheric Environment*, 26, pp. 2555-2564.
- Ramser, C..E. (1927). "Runoff from small agricultural areas." *Journal of Agricultural Research*, 34, pp. 797-823.
- Rosenfeld, A.H., Akbari, H., Romm, J.J., and Pomerantz, M. (1998). "Cool communities: strategies for heat island mitigation and smog reduction." *Energy and Building*, 28, pp. 51-62.

- Slinn, W.G.N. (1982). "Predictions for particle deposition to vegetative surfaces." *Atmospheric Environment*, 14, pp. 1013-1026.
- Saiz, S., Kennedy, C., Bass, B., and Pressnail, K. (2006). "Comparative Life Cycle Assessment of Standard and Green Roofs." *Environmental Science*, 40, pp. 4312-4316.
- She, N. and Pang, J. (2010). "Physically Based Green Roof Model." *Journal of Hydrologic Engineering*, 15, pp. 458-464.
- Simunek, J., Genuchten, M. T. V., and Sejna, M. (2008). "Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages and related codes." *Vadose Zone Journal*, 7, pp. 587-600.
- Spix, C. and Wichmann, H. E. (1996). "Daily mortality and air pollutions: findings from Koln Germany." *Journal of Epidemiology and Community Health*, 50, pp. 52-58.
- Stovin, V. (2010). "The potential of green roofs to manage Urban Stormwater." *Water and Environment Journal*, 24, pp. 192-199.
- Sunyer, J., Castellsague, J., Saez, M., Tobias, A., and Anto, J. M. (1996). "Air pollution and mortality in Barcelona." *Journal of Epidemiology and Community Health*, 50, pp.76-80.
- Tan, P.Y. and Sia, A. (2005). "A pilot green roof research project in Singapore." *Proceedings of Third Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference*, Washington, DC, USA, May 4-6.
- Taylor, D.A., (2007). "Growing green roofs, city by city." *Environmental Health Perspectives*, 115, pp.307-311.

The District of Columbia Department of the Environment (DDOE).
<http://ddoe.dc.gov/ddoe/cwp/view,a,1209,q,498382.asp> (accessed on
2012/01/11).

Uhl, M. and Schiedt, L. (2008). "Green Roof Storm Water Retention-Monitoring Results." *Proceedings of the 11th International Conference on Urban Drainage*, Edinburgh, Scotland, UK.

Ulden, V.A.P. and Holtslag, A.A.M. (1985). "Estimation of atmospheric boundary layer parameters for diffusion application." *Journal of Climate Applied Meteorology*, 24, pp. 1196–1207.

Verhoeff, A. P., Hoek, G., Schwartz, J., and van Wijnen, J. H. (1996). "Air pollution and daily mortality in Amsterdam." *Epidemiology*, 7, pp. 225-230.

Villarreal, E.L. (2004). "Inner city stormwater control using a combination of best management practices." *Ecological Engineering*, 22, pp. 279-298.

Voyde, E., Fassman, E., Simcock, R., and Wells, J. (2010), "Quantifying Evapotranspiration Rates for New Zealand Green Roofs." *Journal of Hydrologic Engineering*, 15, pp. 395-403.

Wesely, M. J. (1989). "Parameterization of surface resistances to gaseous dry deposition in regional-scale numerical models. " *Atmospheric Environment*, 23 (6), pp. 1293-1304.

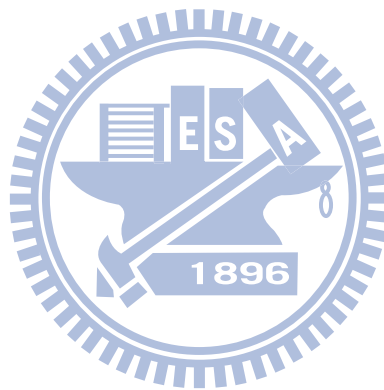
Wolf, D. and Lundholm, J.T. (2008). "Water uptake in green roof microcosms: Effects of plant species and water availability." *Ecological Engineering*, 33, pp. 179-186.

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

Yang, J., McBride, J., Zhou, J., and Sun, Z. (2005). “The urban forest in Beijing and its role in air pollution reduction.” *Urban Forest & Urban Greening*, 3, pp. 65-78.

Yang, J., Yu, Q., and Gong, P. (2008). “Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago.” *Atmospheric Environment*, 42, pp. 7266-7273.

Zannetti, P. (1990). *Air Pollution Modeling*. Van Nostrand Reinhold, New York.



附錄 A

A.1 eQUEST 簡介

eQUEST 是一套由 DOE-2, Wizards 及 Graphics 等功能所組成的建築物耗能模擬軟體，DOE-2 是過去常被用於建築耗能的軟體，此套軟體從 1970 年代，由美國的 ASHRAE, NASA 等機構所研發，近年由於節能減碳的原因，這套軟體再次被注意，eQUEST 是從 DOE-2 發展而來，兩套軟體不同之處在於 eQUEST 除了具備 DOE-2 原有的功能外，更增加許多利於評估及設計者使用，除了上述為本研究選擇其作為建築耗能軟體之原因外，更因為此軟體可在其官方網站免費下載。

eQUEST 能夠模擬建築物逐時的耗能資料，使用者需輸入的資料包含：當地年氣象資料、詳細的建築物基本參數及空調系統參數，氣象資料部份，eQUEST 內建了美國加州常用的地方氣象資料，如使用者位於其他國家，則需使用 bin, TMY, TRY 或 TMY2 等氣象格式，建築物基本參數包含建築物內部面積設置、照明密度、設備密度及建材選用(外牆、屋頂及玻璃結構)等建物詳細資料，空調系統部份，因 eQUEST 提供使用者兩種架構：one-zone-per-floor 及 core-vs-perimeter，使用者可依建築物資料選擇適當的架構，亦須輸入建築物空調使用種類、使用時間、室內舒適溫度等空調參數。

氣象資料部份，本研究採用林 (94 年)所建立台灣 TMY2 標準氣象年，因大型動態能源解析程式須輸入此類氣象資料，標準氣象年是由逐時的氣象資料組成一年份的假想氣象年 (8760 小時)，其意義在於以一年的氣象資料，代表該地區長時間的氣象特徵，該研究將各月份的氣象資料，依照權重不同選取代表性之平均月資料，再將十二個平均月構成一個氣象年，林 (94 年)利用此法建立台灣 1993-2002 年可用於大型動態能源解析之氣象資料。

eQUEST 的操作介面可分為 Schematic Design Wizard(SDW)及 Design Development Wizard(DDW)兩種，SDW 是較簡易之介面，提供使用者依軟體內建步驟，輸入所需資料，即可完成模擬，此介面適合用於資料較不易收集之案例，缺點則是該介面在每層樓的結構設計上皆相同、提供空調系統選擇較少等，DDW 則較為複雜，常用於 SDW 完成之後，但可提供使用者較精確之模擬結果，此外，eQUEST 更可藉由內建之經濟資料庫，將所得結果提供使用者量化之數據。

A.2 本研究建築模擬耗能參數

本研究首先將建築物分成辦公以及住宅兩大類，並利用 eQUEST 模擬此兩類之代表建物，以下針對各類建物之基本參數一一介紹。

A.2.1 住宅

1. 屋頂構造：

屋頂參數部份，本研究將參考 Hilten *et al.*, 2005，採用一般屋頂的吸收度(α)為 0.6、表面粗糙度為 1，綠屋頂的吸收度為 0.31，U-value 則參考 Hilten *et al.*, (2005) 及 Clark *et al.*, (2008)為 0.2-0.24[W/ m² °K]，其他參數則使用 eQUEST 之內建設定值。

2. 室內發散熱：

在人體發散熱部份，國內目前並無詳細文獻參考，故參考郭(94 年)所建議的數值，如表 A.1 所示。

表 A.1 住宅區室內發散熱假定參數

人		照明	設備
人員密度 (人/m ²)		照明密度	設備密度
人員發散熱	顯熱 = 58 (W/人)	11(W/m ²)	59.36(W/m ²)
	潛熱 = 74 (W/人)	作業面照明 無	

3. 空調系統：

因一般住宅空調大多使用分離型或窗型式冷氣，很少使用中央空調系統，本研究參考林(100年)，選擇使用 Air HVAC 的分離冷氣 (Pkgd Terminal AC)作為代表，如表 A.2 所列。

表 A.2 住宅空調系統相關參數

設定項目	設定值
主機型式	Air HVAC, Pkgd Terminal AC
室內舒適溫度基準	26°C
室內最小換氣量基準	60 cfm/人

4. 使用時間：

本研究設定以 18 點開燈至 24 點就寢為基準，白天則不開燈。

A.2.2 辦公大樓

1. 屋頂構造：

辦公類之屋頂基本構造亦和住宅之結構相同。

2. 室內發散熱：

建築物室內發散熱主要可分為三大項：人員、照明、機械設備之發散熱，其中照明密度與設備密度，依不同建築類型有不同之發散熱假定，但在人體發散熱部份，國內目前並無詳細文獻參考，故參考換氣與空氣調節設備技術規範(75 年) 所建議的數值，如表 A.3 所示。

表 A.3 辦公區室內發散熱假定參數

人		照明	設備
人員密度 0.1(人/m ²)		照明密度	設備密度
人員發散 熱	顯熱 = 56[Kcal/(hr 人)]	15(W/m ²)	8(W/m ²)
	潛熱 = 46[Kcal/(hr 人)]	作業面照明 無	

資料來源：賴(97 年)。

3. 空調系統：

空調系統相關參數因目前並無詳細文獻參考，故本研究參考”換氣與空氣調節設備技術規範”所規定之建議值，詳細數值如表 A.4 所示。

表 A.4 辦公區空調系統相關參數

設定項目	設定值
主機型式	密閉式離心機
冰水出口溫度	6.67°C
冰水入口溫度	12.67°C
冷卻水出口溫度	37°C
冷卻水入口溫度	32°C
室內舒適溫度基準	26°C
室內最小換氣量基準	20cfm/人

4. 使用時間：

一般分為空調、照明、人員的使用時間，根據建築能源法規的解說與實例專輯(86 年)，不同的建築用途，亦有不同之使用時間規範，本研究將採用 10 小時系統。

附錄 B

空氣污染健康損害成本估算

1. 空氣汙染物的衝擊分別藉公式(1)與公式(2)來量化：

$$D_{j,MOR} = f_{CR,MOR} \rho_{av,j} C_j A_j$$

$$D_{j,RHA} = f_{CR,RHA} \rho_{av,j} C_j A_j$$

其中 $D_{j,MOR}$ 與 $D_{j,RHA}$ 表 j 地區之衝擊反應(急性死亡率 YOLL 及呼吸性疾病入院數 case), $f_{CR,MOR}$ 與 $f_{CR,RHA}$ 表濃度反應函數的斜率 $YOLL/(\text{pers.yr.ug/m}^3)$ or $\text{case}(\text{pers.yr.ug/m}^3)$, 由於國內目前並無相關資料, 故本研究分別引用國外文獻之研究, 詳細資料如表 B.1 所示, $\rho_{av,j}$ 表 j 地區之人口密度(pers/m^2), C_j 表大氣濃度(ug/m^3), A_j 表 j 地區面積 (m^2)。

2. 運用效益移轉的方式可將國外已建立的空氣汙染物損害成本轉換作國內的損害成本, 公式如下 [European Commission, 2000], 所得的成本即為國內空氣汙染物損害成本：

$$U_M = U_N \times \left(\frac{Y_M}{Y_N}\right)^\varepsilon$$

其中 U_N 為歐盟之單位損害成本, 單位: 元/kg; Y_M 為我國每年國民所得, 單位: 元; Y_N 為歐盟每年國民所得, 單位: 元; ε 為所得彈性 (income elasticity), 由國內外之調查研究顯示, 針對環境貨物的所得彈性為 0.3 左右。

3. 將 2. 所得到急性死亡率及呼吸性疾病入院數各成本加總即為該地區的外部成本, 若分別將各縣市的外部成本除以各縣市的排放總量, 即可得到該縣市的單位損害成本。
4. 將空氣污染導致急性死亡率及呼吸性及病入院數以表 B.2 量化成經濟效益。

表 B.1 劑量反應函數之斜率 (f_{CR})

污 染 物	急性死亡率	呼吸性疾 病 入院數	資料來源
SO ₂	5.34E-6	2.04E-6	Ponce de Leon, 1996 ; Sunyer <i>et al.</i> , 1996
O ₃	5.85E-6	3.54E-6	Ponce de Leon, 1996 ; Sunyer <i>et al.</i> , 1996
PM ₁₀	2.97E-6	2.07E-6	Dab <i>et al.</i> , 1996 ; Spix and Wichmann 1996, Verhoeff <i>et al.</i> , 1996



表 B.2 健康衝擊的貨幣值表

衝擊類型 貨幣年分		急性死亡率 (YOLLs)	呼吸性疾病入院數 (case)
原始貨幣 值(歐元)	2000 以前	165700	4320
	2000	75000	4320
	2002	75000	4320
	2003	75000	4320
	2004	75000	4320
	2005	75000	4320
本土貨幣 值(台幣)	2000 以前	6539897	170503
	2000	2547770	146752
	2002	2827500	162864
	2003	3584629	206475
	2004	4011337	231053
	2005	3914412	225470
資料來源		Final Report to the European Commission, DG Research. Technological Development and Demonstration (RTD), 2004	Final Report to the European Commission, DG Research. Technological Development and Demonstration (RTD), 2004

附錄 C

空污減量參數表

表 C.1(a)Pasquill 穩定度分類表及(b)日間日照強度判別表

(a)Pasquill 穩定度分類表

地表十公尺高度之風速	日間日照強度			夜間天空覆雲比	
	強	中	弱	≥ 0.5	≤ 0.5
<2	A	A-B	B	-	-
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

(b)日間日照強度判別表

日照強度分類	日照強度 (I) (W m^{-2})
強	$I > 700$
中	$350 \leq I \leq 700$
弱	$I < 350$

資料來源：Turner (1969)

表 C.2 不同穩定度下估算 L 值函數之係數 a 和 b

穩定度類別	a	b
A	-0.08750	-0.1029
B	-0.03849	-0.1714
C	-0.00807	-0.3049
D	0	0
E	0.00807	-0.3049
F	0.03849	-0.1714

資料來源：Zannetti (1990)

表 C.3 計算 R_c 所需之參數

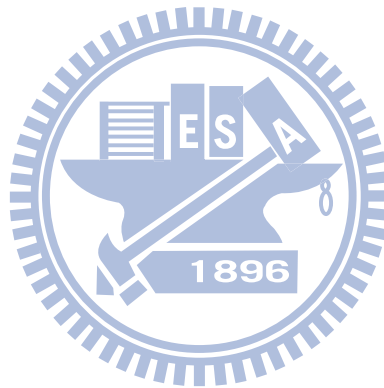
Resistance component	Landuse type		
	Agricultural land	Range land	Deciduous forest
夏季			
r_i	60	120	70
r_{lu}	2000	2000	2000
r_{sc}	200	100	2000
$r_{gs,S}$	150	350	500
$r_{gs,O}$	150	200	200
$r_{cl,S}$	2000	2000	2000
$r_{cl,O}$	1000	1000	1000
秋季			
r_i	9999*	9999	9999
r_{lu}	9000	9000	9000
r_{sc}	150	100	1500
$r_{gs,S}$	200	350	500
$r_{gs,O}$	150	200	200
$r_{cl,S}$	9000	9000	9000
$r_{cl,O}$	400	400	400
冬季			
r_i	9999	9999	9999
r_{lu}	9999	9000	9000
r_{sc}	10	100	1000
$r_{gs,S}$	150	350	500
$r_{gs,O}$	150	200	200
$r_{cl,S}$	9999	9000	9000
$r_{cl,O}$	1000	400	400
春季			
r_i	120	240	140
r_{lu}	4000	4000	4000
r_{sc}	50	80	1200
$r_{gs,S}$	150	350	500
$r_{gs,O}$	150	200	200
$r_{cl,S}$	4000	4000	4000
$r_{cl,O}$	1000	500	500

*9999 表示未考量該阻力(resistance); 資料來源: Wesely *et al.* (1989).

表 C.4、不同土地使用種類及季節之參數：

土地使用種類		Deciduous needle leaf trees	Deciduous broadleaf trees	Grass	Crops, mixed farming
A (mm)	夏季	2.00	5.00	2.00	2.00
	秋季	2.00	5.00	2.00	2.00
	冬季	5.00	10.00	5.00	5.00
	春季	2.00	5.00	2.00	2.00
α		1.10	0.80	1.20	1.20
γ		0.56	0.56	0.54	0.54

資料來源：Zhang *et al.* (2001)



附錄 D

表 D.1 2010 年 NO₂, SO₂ 及 NO₃ 的 Ra, Rb 及 Rc 各月模擬結果

月份	Ra	Rb _{SO2}	Rb _{O3}	Rb _{NO2}	Rc _{SO2}	Rc _{O3}	Rc _{NO2}
1	37.110	-5.370	-4.900	-4.830	414.860	263.170	1652.910
2	26.530	-3.550	-3.230	-3.190	415.600	266.520	1675.930
3	19.590	-1.500	-1.370	-1.350	333.900	222.690	1324.540
4	29.440	-3.090	-2.810	-2.770	335.890	224.070	1338.856
5	35.770	-4.330	-3.940	-3.890	327.280	217.530	1258.161
6	23.260	-1.940	-1.770	-1.740	286.820	207.470	1160.337
7	47.290	-6.050	-5.510	-5.440	271.830	197.180	1060.970
8	29.170	-1.360	-1.240	-1.220	273.200	198.100	1079.870
9	16.290	-0.770	-0.700	-0.690	412.580	252.260	1591.800
10	14.130	-1.080	-0.980	-0.970	413.790	257.770	1621.750
11	10.300	0.040	0.040	0.040	414.090	259.630	1630.260
12	30.920	-3.560	-3.240	-3.200	414.250	260.330	1636.350
平均	26.650	-2.710	-2.470	-2.440	359.500	235.560	1419.310

Ra, Rb 及 Rc 的單位均為 s m⁻¹

表 D.2 2010 年 PM₁₀ 的 Vg, Rs 及 Vd 各月模擬結果

月份	Vg ($\times 10^{-5}$)	Rs ($\times 10^3$)	Vd ($\times 10^3$)
1	6.120	1.750	2.090
2	6.120	1.770	2.100
3	6.120	1.720	2.190
4	6.120	1.820	2.190
5	6.120	1.760	2.510
6	6.120	1.720	2.690
7	6.120	1.780	2.850
8	6.120	1.830	3.100
9	6.120	1.550	3.100
10	6.120	8.970	2.650
11	6.120	1.180	2.510
12	6.120	1.810	2.320
平均	6.120	1.630	2.520

Vg, Rs 及 Vd 的單位分別為 m s^{-1} , s m^{-1} 及 m s^{-1}