

屋頂綠化隔熱效能影響因子及組合最適化研究

內政部建築研究所自行研究報告

中華民國 105 年 12 月

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)

105301070000G0069

PG10505-0089

屋頂綠化隔熱效能影響因子及組合最適化研究

研究主持人：陳麒任

研究期程：中華民國 105 年 2 月至 105 年 12 月

內政部建築研究所自行研究報告

中華民國 105 年 12 月

ARCHITECTURE AND BUILDING RESEARCH INSTITUTE

MINISTRY OF THE INTERIOR

RESEARCH PROJECT REPORT

The Efficiency Factors And Optimal Combination Research Of Green Roof Insulation

BY

CHEN CHI REN , HSU MIN HAN

December , 2016

目次

表次.....	III
圖次.....	V
摘要.....	VII
第一章 緒論.....	1
第一節 研究緣起與目的	1
第二節 研究方法與流程	3
第三節 文獻收集項目	5
第四節 研究成果	5
第二章 相關文獻回顧與探討	7
第一節 太陽輻射能基本理論	7
第二節 熱傳基本理論	13
第三節 室內環境熱舒適之相關理論	25
第四節 屋頂綠化相關文獻	29
第五節 相關設計規範探討	30
第三章 因子影響分析及最適化模式探討	35
第一節 品質特性及理想機能	35
第二節 控制因子及變動水準	35
第三節 實驗設計法	36
第四章 屋頂綠化隔熱效能影響因子組合之最適化分析	45

第一節 屋頂綠化隔熱效能影響因子及水準	45
第二節 屋頂綠化因子組合之最適化分析模式	50
第三節 屋頂綠化設定之模型參數及模擬假設條件 ...	53
第四節 屋頂綠化模擬結果	55
第五章 結論與建議.....	65
第一節 結論	65
第二節 建議	66
附錄一 期中審查會議紀錄及處理情形	69
附錄二 期末審查會議紀錄及處理情形	73
參考書目	79

表次

表 2-1	熱舒適和感覺評價指標	24
表 2-2	各主要類型綠屋頂比較表	29
表 2-3	屋頂透光天窗日射透過率 HWs 之基準值	31
表 2-4	外牆及立面開窗部位（含玻璃與窗框）之節能基準值.....	32
表 2-5	空調型、住宿類、學校類及大空間類等建築之節能基準值.....	32
表 3-1	一次一因子實驗（7 個 2 水準因子）案例之變動效應 ..	37
表 3-2	全因子實驗（4 個 2 水準因子）案例之變動效應	38
表 3-3	田口直交表 $L_8(2^7)$ 案例之實驗數據	40
表 3-4	田口直交表 $L_8(2^7)$ 案例之因子反應表	40
表 3-5	交互作用實驗數據案例	42
表 4-1	屋頂綠化模擬設定之土壤（乾土）材料參數表	47
表 4-2	屋頂綠化模擬設定之控制因子及水準表	50
表 4-3	屋頂綠化模擬採用之田口 $L_{27}(3^{13})$ 直交表	51
表 4-4	模擬室內空調及時程之設定	54
表 4-5	模擬 27 組因子水準組合條件下之全年整年度、7 月份、1 月份空調暖房及冷房負荷量	55
表 4-6	模擬全年整年度各因子於不同水準條件下之因子效應表.....	58
表 4-7	模擬夏季（7 月份）各因子於不同水準條件下之因	

子效應表	58
------------	----

表 4-8 模擬冬季（1 月份）各因子於不同水準條件下之因

子效應表	59
------------	----

圖次

圖 1-1	研究流程圖	4
圖 2-1	太陽輻射熱交換示意圖	7
圖 2-2	大氣質量示意圖	8
圖 2-3	地表不同緯度之日照情況示意圖	9
圖 2-4	每日正午與傍晚之日照情況示意圖	9
圖 2-5	太陽輻射強度與海拔高度關係圖	10
圖 2-6	不同緯度地區水平面上太陽輻射強度關係圖	12
圖 2-7	北緯 23° 地區各主要朝向垂直面上太陽輻射強度 關係圖	12
圖 2-8	熱傳導示意圖	14
圖 2-9	熱流方向示意圖	14
圖 2-10	一維熱傳導分析自由體圖	15
圖 2-11	四種對流熱傳形式示意圖	17
圖 2-12	熱傳遞之熱阻網路示意圖	19
圖 2-13	可接受之舒適區域溫、濕度曲線圖	23
圖 2-14	PMV-PPD 曲線圖	24
圖 2-15	新北市新莊國民運動中心（樹花園）	27
圖 2-16	成大綠色魔法學校（孫運璿綠建築研究大樓）之 屋頂綠化	28

圖 2-17 常見之庭園型屋頂綠化案例	29
圖 3-1 全因子實驗（4 個 2 水準因子）案例之因子反應圖	39
圖 3-2 田口直交表 $L_8(2^7)$ 案例之因子反應圖	41
圖 3-3 交互作用案例圖	43
圖 4-1 業界常用之屋頂綠化各層剖面圖	45
圖 4-2 $L_{27}(3^{13})$ 點線圖	52
圖 4-3 全尺度實驗屋尺寸示意圖	53
圖 4-4 屋頂綠化層之結構剖面示意圖	54
圖 4-5 全年整年度各因子於不同水準下之因子反應圖	59
圖 4-6 夏季（7 月份）各因子於不同水準下之因子反應圖	60
圖 4-7 冬季（1 月份）各因子於不同水準下之因子反應圖	60

摘 要

關鍵詞：屋頂綠化、隔熱效能、建築節能、因子分析

一、研究緣起與目的

台灣位處亞熱帶氣候區，氣候特徵為夏季高溫期間較長、冬季低溫期間較短，故對於建築外殼之需求以隔熱為主。而台灣之建築物絕大部分為平頂建築，以既有老舊建築之鋼筋混凝土屋頂樓板（未鋪設隔熱磚）為例，其總熱傳透率（U 值）大約是 $2.5\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ，遠大於建築技術規則要求之屋頂 U 值標準 $0.8\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ 。此類建築在白天會吸收大量太陽輻射熱，使屋頂樓板溫度迅速增高，於夜晚仍會不斷釋放出蓄積的輻射熱能，造成夜晚室內依舊高溫。然而國內既有建築常於屋頂上加蓋鐵皮屋，由於鐵皮材質之比熱較小，易於吸熱升溫，當鐵皮屋頂表面溫度升高時，其吸收之能量以長波形式釋放亦隨之上升，反而會促進都市熱島效應，間接促使民眾需開空調降低室內溫度，造成電力消耗增加。

根據國內外相關研究指出，屋頂綠化後，在夏季能大幅度阻隔太陽輻射熱進入室內，在冬天有助於室內保溫，形成室內冬暖夏涼。一些文獻指出屋頂綠化可讓屋頂表面溫度降低 $15\sim 40^\circ\text{C}$ ，室內降溫 $2\sim 10^\circ\text{C}$ 。聯合國環境計畫相關研究進一步指出，當都市綠屋頂面積達到 70%時，整座都市的二氧化碳釋出量將減少 80%，將可大幅度減緩都市熱島效應。

惟各種屋頂綠化型式雖然皆有相當程度之隔熱效益，然究竟何種型式之屋頂綠化，才能使所獲得之效益發揮至最大化，是本研究主要課題。

本研究將藉由 EnergyPlus 建築能源模擬軟體，模擬分析影響屋頂綠化隔熱效益之各種因子，於不同參數水準下之影響程

度，並找出使屋頂綠化隔熱效益最佳化之變因水準組合，並分析各項變因之影響程度，以提出屋頂綠化之最佳化策略。

二、研究方法及過程

依據上述研究目的，本研究的研究方法及過程概述如下：

（一）、文獻回顧法：

收集整理國內屋頂綠化常見設計型式、植栽種類、維護方式、隔熱效益及室內熱舒適度等基礎理論文獻資料。

（二）、專家諮詢法：

本研究將與國內專家學者諮詢請益有關屋頂綠化隔熱效益之評估模式及電腦模擬能耗軟體之技術問題，並配合調整修正建模資料。

（三）、數值模擬法：

採用電腦數值模擬方式（例如 EnergyPlus 等建築能源模擬軟體），針對各種屋頂綠化因子，於不同參數水準時，模擬於屋頂綠化前、後，對於建築耗能狀況及室內環境舒適度（例如 PMV 指標）之模擬結果。

（四）、比較分析法：

採用田口實驗法之直交表，針對影響屋頂綠化隔熱效能之各種變因及不同水準等條件下，分別進行模擬並交叉比對其改善成效，分析其差異及關聯性，並。

（五）、總結法：

綜合上述相關資料進行分析後，找出屋頂綠化之最適化之變因水準組合，以提出屋頂綠化對於建築節能及室內環境熱舒適度最佳

化策略。

三、研究發現

根據上述研究目的，依據所假設之各項影響屋頂綠化隔熱效能之影響因子及設定之變動水準，進行模擬及分析探討後，研擬之結論如後：

（一）、獲知影響屋頂綠化隔熱效能之各種因子水準最適化組合：

根據模擬結果，以全年整年度來看，使空調冷房負荷量最小之最佳化因子水準組合為：土壤厚度 10 公分、輕質與一般土壤混充、葉面積指數 LAI 為 5、澆水頻率為每天早晚各澆水量 1mm、臺北地區氣象、葉面反射率為 0.25。

其中值得注意的是，當土壤厚度於 10 與 50 公分時其全年之空調冷暖房負荷量係相當接近，代表土壤厚度 10 公分時即可達到相當之隔熱效果，再增加至 30 公分厚度時，反而有因土壤蓄熱效應導致室內空調冷暖房負荷量增加，需再增加至 50 公分厚度時，才較無土壤蓄熱效應影響。

惟須特別強調，影響隔熱效應之主要因子除氣候因素外，主要還是受葉面積指數 LAI 影響，然而 10 公分厚度土壤在實務上是種不出 LAI 為 5 的植物（例如多葉型灌木），故在規劃屋頂綠化時，可配合建築屋頂層結構強度是否足夠支撐，選擇較大之土壤厚度，以利種植高葉面積指數之植物，方能達到最有效之屋頂隔熱效果。

（二）、發現屋頂綠化隔熱效能各因子水準變動之影響程度：

經由模擬結果顯示，當屋頂綠化隔熱效能某項因子其水準變動時，全年度各因子影響空調冷房負荷量之程度，由大至小依序為：地區氣象差異（約 33.61%）、葉面積指數 LAI（約 10.48%）、澆水

頻率（約 4.60%）、土壤厚度（約 1.51%）、土壤種類（約 1.00%）、葉面反射率（約 0.77%）。

故地區氣候因素係影響屋頂綠化隔熱性能最重要因素，惟若單就屋頂綠化本身來看，影響屋頂綠化隔熱效能之最重要因子為葉面積指數 LAI，其次才是澆水頻率，至於葉面反射率幾乎可以忽略。故於規劃屋頂綠化種類及型式時，除所處地區之氣候外，應優先考量選用多葉型植物，且要有充足定時之人工澆水裝置，以維持植物之生長及蒸散水分帶走潛熱，達到屋頂層室內降溫之效果。

四、主要建議事項

本研究已完成模擬影響屋頂綠化隔熱效能因子水準組合之最適化分析，並找出最關鍵之影響因子。模擬結果顯示屋頂綠化對於屋頂層之隔熱節能確實有相當大之效益，值得擴大推廣。惟分析過程也發現屋頂綠化存在土壤蓄熱效應問題，值得後續進一步深入研究。茲針對模擬顯示結果進行分析後，建議如下：

建議一

辦理屋頂綠化之節能減碳推廣宣導：立即可行建議

主辦機關：台灣綠屋頂暨立體綠化協會、內政部建築研究所

協辦機關：財團法人台灣建築中心

本所於歷年來辦理之「建築節能與綠廳舍改善補助計畫」，辦理眾多屋頂綠化之案例，對於其影響節能效益之因子一直缺乏有力之佐證。本研究完成影響屋頂綠化隔熱效能因子水準組合之最適化分析，並找出最關鍵之影響因子，此外，模擬結果顯示屋頂綠化對於屋頂層之隔熱節能確實有相當大之效益，可達到呼應政府提倡節能減碳及減緩都市熱島效應政策，值得擴大推廣。除可作為民間及

業界設置屋頂綠化時之規劃參考，並可提供作為推廣宣導時說明其節能效益之參採資料。

建議二

進行屋頂綠化土壤蓄熱效應之實驗量測驗證：中長期建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：

本所於 105 年度委託國立臺灣大學辦理「屋頂隔熱對策全尺度節能實證之研究」委託研究計畫，該計畫針對各種外殼節能手法（含 2 種屋頂綠化）進行節能及室內熱舒適性驗證。故建議未來可參考本計畫之模擬成果，再配合前述實驗屋進行各種屋頂綠化之蓄熱效應之量測與驗證，以進一步了解屋頂綠化之蓄熱效應對節能之影響。

ABSTRACT

Keywords: Green roof, Thermal insulation performance, Building energy saving, Factor analysis

Taiwan is located in a subtropical climate, the climate is characterized by a long period of high temperature in summer, and a short period of low temperature in winter, so the major demand for building envelope is the thermal insulation. Most of the buildings in Taiwan are flat-topped buildings, for example with existing reinforced concrete roof slabs (without laying thermal insulation brick), the U value is about $2.5\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$, much larger than the U value is $0.8\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ of the building technical rules of law in Taiwan.

Such buildings in the daytime will absorb a lot of solar radiation heat, so that the roof floor temperature rapidly increased at night will continue to release the accumulation of radiation heat, causing the indoor temperature is still high at night. The existing buildings are often covered with the metal housing on the roof. As the metal material of the specific heat is small, so it is easy to absorb heat. When the metal roof surface temperature increases, the absorption of energy in the form of long-wave release also will rise. It will promote the urban heat island effect, indirectly prompted the people need to open air conditioning to reduce the indoor temperature, resulting in increased power consumption.

Although all types of green roof have a considerable degree of insulation effectiveness, then what kind of green roof, in order to maximize the benefits obtained to maximize, is the main topic of this study.

In this study, EnergyPlus building energy simulation software was used to simulate the influence of various factors on the heat insulation of green

roof at different parameter levels. And find out the optimum combination in change of the green roof for heat insulation efficiency, and analyze the influence degree of each variable, in order to propose the optimization strategy of green roof.

第一章 緒論

第一節 研究緣起與目的

一、研究緣起

我國長期以來一直是能源短缺的國家，根據 103 年全國能源會議最新資料顯示，台灣目前每年仍有 98% 的能源仰賴進口，若檢視我國各部門之能源消費結構，可發現住宅及服務業部門（亦即早期所謂之住商部門）合計約佔 23%，可見建築物每年所消耗之能源，就約佔全國四分之一，這些建築物普遍存在耗能及不符生態環境等問題，若能從這些類建築著手進行節能改善，對於我國整體之能源消費節省及降低溫室氣體排放，將有莫大貢獻。

為因應全球氣候變遷，節能減碳已為各國永續發展工作重點，亦為我國施政主軸。為帶動所有建築物逐年降低耗能，我政府自 100 年起推動「政府機關及學校四省（省電、省油、省水、省紙）專案計畫」，作為示範並引導民間採行節約能源措施。其中每年用電量以較前一年減少 1% 為原則，並以 96 年為基期年，至 104 年時以總體用電量節約 10% 為目標，以具體行動帶動民間響應節能減碳政策。

然而台灣位處亞熱帶氣候區，氣候特徵為夏季高溫期間較長、冬季低溫期間較短，故對於建築外殼之需求以隔熱為主。且台灣之建築物大部分為平頂 RC 建築，尤其是早期老舊之屋頂樓版（未鋪設隔熱磚）U 值大約是 2.5，遠大於建築技術規則之標準 0.8。

此外一般 RC 構造建築在白天會吸收大量太陽輻射熱，使頂樓溫度迅速增高，於夜晚仍會不斷釋放出蓄積的輻射熱能，造成夜晚室內依舊高溫。即使於屋頂上加蓋鐵皮屋，由於鐵皮材質易於吸熱升溫，其吸收之能量以長波形式釋放，反而會促進都市熱島效應，間接促使民眾需開空調降低室內溫度，造成電力消耗增加。

爰此，若能於屋頂施作植栽綠化後，在夏季能大幅度阻隔太陽

輻射熱進入室內，在冬天又有助於室內保溫，形成室內冬暖夏涼。並可讓屋頂表面溫度降低約 15~40°C，室內降溫約 2~10°C。聯合國環境計畫相關研究更指出，當都市綠屋頂面積達到 70%時，整座都市的二氧化碳釋出量將減少 80%，將可大幅度減緩都市熱島效應。

二、研究目的

本研究將先回顧整理有關建築物屋頂綠化之相關文獻資料，並收集國內之屋頂綠化常見設計型式及法規檢討，以及隔熱效能影響因子與最佳化分析模式相關基礎理論文獻。

各種屋頂綠化型式雖然皆有相當程度之隔熱效益，惟究竟何種型式之屋頂綠化，才能使所獲得之效益發揮至最大化，是本研究主要課題。

本研究將藉由 EnergyPlus 建築能源模擬軟體，模擬分析影響屋頂綠化隔熱效益之各種因子，於不同參數水準下之影響程度，並找出使屋頂綠化隔熱效益最佳化之變因水準組合，以提出屋頂綠化之最佳化策略。

此外配合本所今年之「屋頂隔熱對策全尺度節能實證之研究」，本研究所進行之屋頂綠化部分之電腦數值模擬結果，將可配合該委託研究案之實測成果，檢視彼此間之差異程度，並調校本研究模擬設定之參數，以增進模擬之準確度。

第二節 研究方法與流程

一、研究方法

本研究係為探討影響屋頂綠化隔熱效能之因子，並分析其最適化之因子水準組合。其中所採用之研究方法主要包括以下項目：

1、文獻回顧法：

收集整理國內屋頂綠化常見設計型式、植栽種類、維護方式、隔熱效益及室內熱舒適度等基礎理論文獻資料。

2、專家諮詢法：

本研究將與國內專家學者諮詢請益有關屋頂綠化隔熱效益之評估模式及電腦模擬能耗軟體之技術問題，並配合調整修正建模資料。

3、數值模擬法：

採用電腦數值模擬方式(例如 EnergyPlus 等建築能源模擬軟體)，針對各種屋頂綠化因子，於不同參數水準時，模擬於屋頂綠化前、後，對於建築耗能狀況及室內環境舒適度(例如 PMV 指標)之模擬結果。

4、比較分析法：

採用田口實驗法之直交表，針對影響屋頂綠化隔熱效能之各種變因及不同水準等條件下，分別進行模擬並交叉比對其改善成效，分析其差異及關聯性，並。

5、總結法：

綜合上述相關資料進行分析後，找出屋頂綠化之最適化之變因水準組合，以提出屋頂綠化對於建築節能及室內環境熱舒適度最佳化策略。

二、研究流程

本計畫之研究流程，詳圖 1-1 所示：

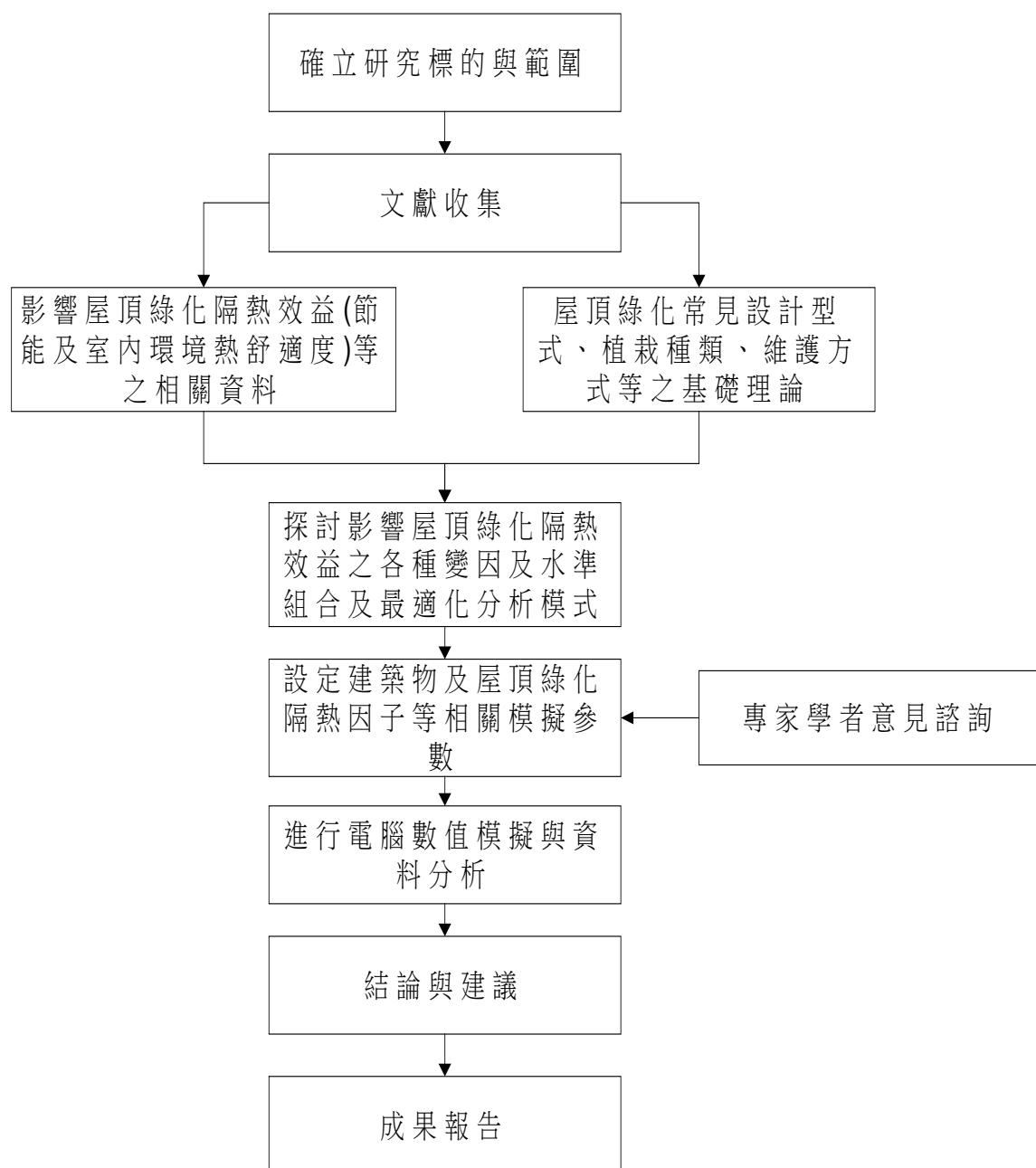


圖 1-1 研究流程圖
(資料來源：本研究整理)

第三節 文獻收集項目

依據本計畫研究之目的及研究內容，本計畫擬收集下列相關文獻及資料，以作為進行數值模擬分析時之建模依據。預定收集之文獻資料項目如下：

- 我國屋頂綠化常見之設計型式、植栽種類、維護方式等基礎理論文獻資料。
- 屋頂綠化隔熱效益及室內環境熱舒適度等相關基礎理論文獻。
- 田口實驗分析法應用於最佳化分析資料。
- 臺灣地區主要城市之 TMY3 標準氣象年資料。
- EnergyPlus 相關文件及操作手冊。

本計畫將彙整上述資料進行分析探討，詳細探討內容將於後面各章節說明。

第四節 研究成果

本計畫之研究成果，說明如下：

- 一、 完成蒐集有關屋頂綠化常見之型式、植栽種類、維護方式等基礎理論文獻資料。
- 二、 提出影響屋頂綠化隔熱效益之影響因子及其設定之水準，並探討採用之因子影響分析與最適化模式方法。
- 三、 完成屋頂綠化於不同影響因子及水準條件下，屋頂之隔熱效能之模擬及分析。
- 四、 提出屋頂綠化各種因子水準最適化組合及其影響程度，可供民眾及業者於施作屋頂綠化前之規劃參考。

第二章 相關文獻回顧與探討

本章首先從太陽輻射能基本理論切入，探討熱傳基本理論之計算基礎，整理熱傳遞及熱傳遞係數 U 之相關理論文獻，並探討室內熱舒適性相關指標（例如 PMV 指標），以及整理有關屋頂綠化相關文獻資料，以作為本研究後續分析之基礎。

第一節 太陽輻射能基本理論

供給地球周圍大氣熱量主要有三種來源，分別是太陽、其他星體以及地球本身之地熱。惟地球距離其他發熱星體距離太遠，所接受之熱能極小，此外地球本身傳遞給大氣的熱量也很少，均可忽略不計，故一般認為太陽輻射能應是地球大氣層最主要的熱源，亦即太陽輻射能是影響氣候之主要因素，也是建築物外部熱條件之主要來源。

太陽輻射能照射地球大氣層時，一部分會被雲層反射回宇宙空間，其餘部分則分別會被大氣中各種氣體分子所散射，或是被大氣中之臭氧、二氧化碳或水分子等吸收，最後剩餘部分才會直射到達地表面，此時其太陽輻射強度已大為減弱，如圖 2-1 所示。

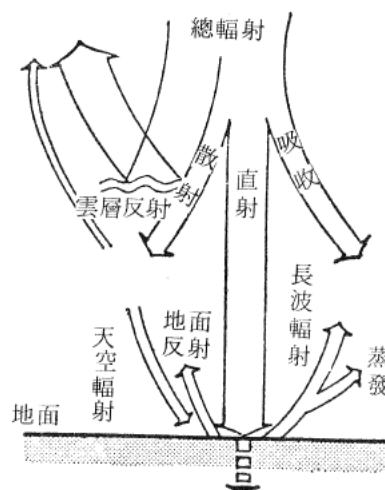


圖 2-1 太陽輻射熱交換示意圖

資料來源：建築日照設計，卜毅

到達地面之直接輻射與散射輻射之和稱為總輻射，亦即所謂太陽輻射，其中直接輻射係以平行光方式直接投射於地表面，散射輻射則係被空氣中的氣體分子或浮游灰塵所反射而朝四向散射。

通過大氣層透過陽光的程度稱之為大氣透明度，亦即為大氣透明係數 P ， P 值與太陽高度角 h 及大氣層厚度有關，當太陽高度角越低，則陽光透過大氣層越厚，大氣透明度 P 值也越小；反之，當太陽高度角為 90° 時，陽光透過大氣層最薄，大氣透明度也最高，定義此時之 P 值為 1，故 P 值在任何情況下都小於或等於 1。

若以大氣層厚度來衡量大氣透明度，稱為大氣質量 m ，在地球表面上，大氣質量 m 在任何情況下都大於或等於 1，如圖 2-2 所示。圖中 O 點為地球海平面觀測點，並假設當 O 點垂直向上到大氣層上界 A 點時之 m 值為 1，此時即稱為「一個大氣質量」。故圖中 A' 點之大氣質量可用下式求得：

假設 $OA=1$

$OA'=m$

則 $\sinh = \frac{1}{m}$

$$m = \frac{1}{\sinh} = \cosh \quad (2-1)$$

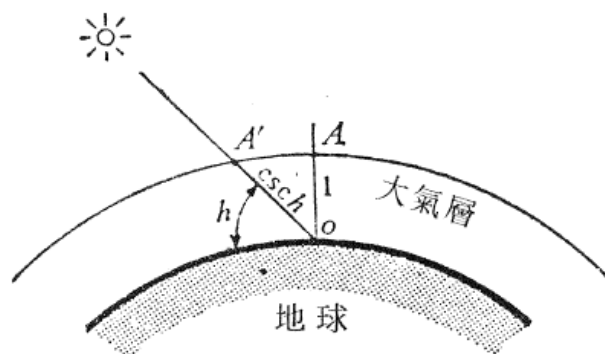


圖 2-2 大氣質量示意圖

資料來源：建築日照設計，卜毅

影響太陽輻射強度之因素包括：地理緯度、太陽高度角、大氣

透明度、天空雲量及海拔高度等。在大地水平面上，太陽直接輻射強度與太陽高度角、大氣透明度成正比。在低緯度地區，太陽高度角高，陽光通過大氣層厚度較薄，大氣透明度就大，故太陽直接輻射強度較大，如圖 2-3 中之 a 點所示。反之，於高緯度地區之太陽高度角較低，陽光通過之大氣層厚度較厚，大氣透明度也較小，故太陽直接輻射強度較小，如圖 2-3 中之 b 點所示。

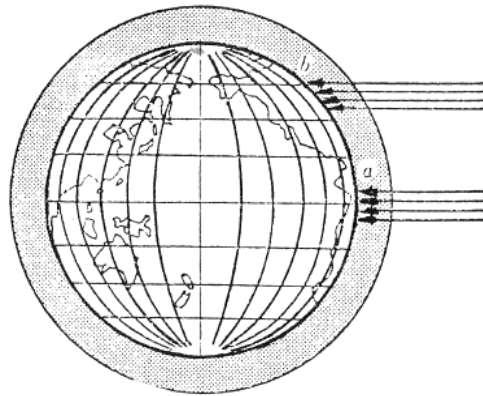


圖 2-3 地表不同緯度之日照情況示意圖

資料來源：建築日照設計，卜毅

每日於正午太陽高度角較高，陽光通過之大氣層較薄，因此太陽直接輻射強度較大；於清晨及傍晚，太陽高度角較低，陽光通過之大氣層較厚，因此太陽直接輻射強度較小，如圖 2-4 所示。

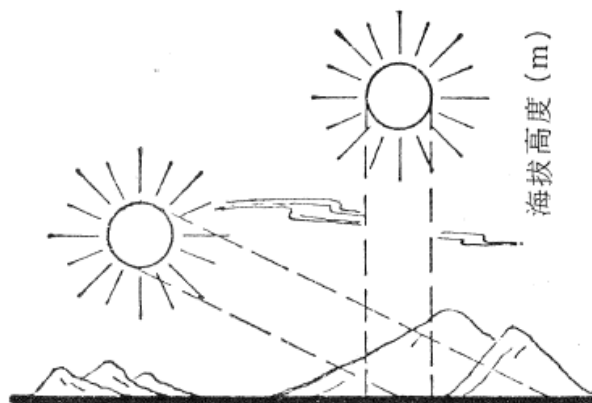


圖 2-4 每日正午與傍晚之日照情況示意圖

資料來源：建築日照設計，卜毅

此外，在海拔高度較高處，大氣中的雲量與灰塵較少，陽光通過之大氣層較薄，故太陽輻射強度較大。太陽輻射強度與海拔高度之關係如圖 2-5 所示。

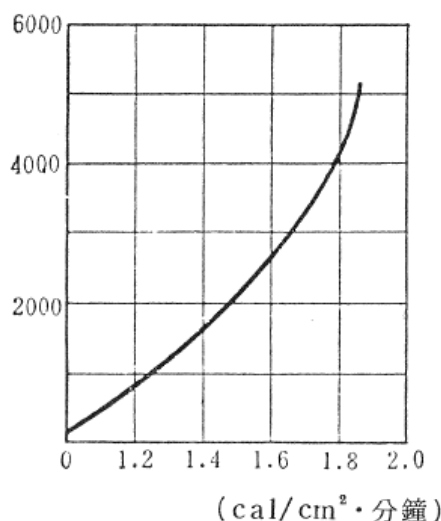


圖 2-5 太陽輻射強度與海拔高度關係圖

資料來源：建築日照設計，卜毅

至於散射輻射強度，與太陽高度角成正比，與大氣透明度成反比。例如在海拔較高處，大氣透明度大，散射輻射強度則較小；天空有雲時，散射輻射強度較無雲時還大。在高緯度地區若地表面有積雪覆蓋，因雪的反射能力較強，故散射輻射會較大。此外在陰影處或室內，雖然沒有直射陽光卻仍有光線，即太陽散射輻射所致。

於大氣層表面，垂直於大氣層之太陽輻射能量，與太陽及地球間之距離平方成反比。此處定義太陽常數 S_0 來表示太陽照射到地球之輻射能量，其係指太陽與地球間距離為平均距離 ($1496 \times 10^5 \text{ km}$) 時，於大氣層表面(此時無大氣影響)垂直於太陽光線之單位面積、單位時間所接受之太陽輻射能。於氣候理論計算中，太陽常數值為：

$$S_0 = 1.94 \text{ cal}/(\text{cm}^2 \times \text{分鐘}) \text{ 或 } 1164 \text{ kcal}/(\text{m}^2 \times \text{小時}) \quad (2-2)$$

當太陽與地球間位置變更時，則太陽常數將修正為 S_0/r^2 。當太陽輻射通過大氣層時被反射、散射與吸收，此時到達地表面之太陽

輻射強度減弱很多。假設地球水平面上之太陽直接輻射強度為 S_n ，地球垂直面上之太陽直接輻射強度為 S_v ，則其公式為：

$$S_n = S_0 \frac{P^{csch} \times \sinh}{r^2} \quad (2-3)$$

$$S_v = S_0 \frac{P^{csch} \times \cosh \times \cos(A - \alpha)}{r^2} \quad (2-4)$$

上式中

S_0 為太陽常數

P 為大氣透明度

$csch$ 為大氣質量 m

h 為太陽高度角

A 為太陽方位角

r 為以地球與太陽間之距離平均值作為單位，簡化計算可取值為 1

α 為垂直面之外向法線的方位角

當 r 值取為 1 時，則上述公式可簡化為：

$$S_n = S_0 \times P^{csch} \times \sinh \quad (2-5)$$

$$S_v = S_0 \times P^{csch} \times \cosh \times \cos(A - \alpha) \quad (2-6)$$

然而在建築實際設計中，須利用太陽輻射強度資料時，應盡量採用當地實測資料，這樣更符合實際情況。若無法取得實測資料時，再利用上述公式求取。一般來說實測值均會大於理論計算值，此乃因上述理論計算值僅考量太陽直接輻射，而實測值除含太陽直接輻射外，另還包含來自周遭環境之散射輻射。

若於夏季最熱月份分別針對不同緯度地區進行該地水平面上太陽輻射強度實測，整理如圖 2-6 所示，可看出各緯度地區太陽輻射強度於一日中之變化，其中太陽輻射強度於高緯度地區較弱，於低緯度地區則較強，且太陽輻射最高值皆發生於當地時間之正午。

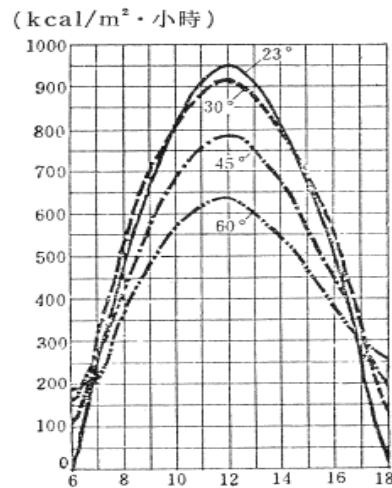


圖 2-6 不同緯度地區水平面上太陽輻射強度關係圖

資料來源：建築日照設計，卜毅

若以相同緯度但不同朝向，進行該地垂直面之太陽輻射強度量測，則會發現其量測結果並不相同。舉例來說，若以北緯 23° 地區為例，於夏季最熱月份，分別量測不同朝向垂直面之太陽輻射值，可發現以東、西向最大，其次是南向，北向最小，且出現最大值知時間，通常是太陽光線接近垂直於這個朝向的時刻，如圖 2-7 所示。至於其他緯度地區之太陽輻射強度變化規律，均與此相近，僅輻射強度不同。

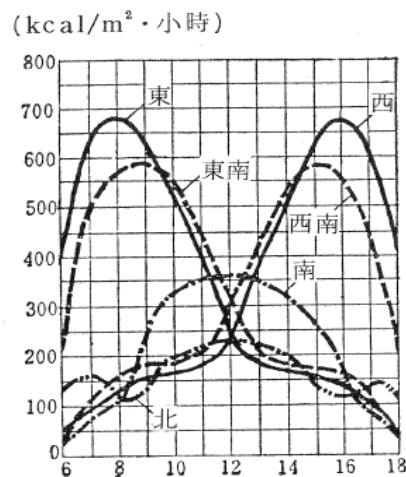


圖 2-7 北緯 23° 地區各主要朝向垂直面上太陽輻射強度關係圖

資料來源：建築日照設計，卜毅

綜合上述說明，若能統計實測太陽輻射強度，掌握日照資料，對於建築物之隔熱、採暖、採光、建築物之設計朝向，乃至太陽能之利用，均有很大幫助。

第二節 熱傳基本理論

依據熱傳學理論，熱傳模式主要有三種：熱傳導（Thermal Conduction）、熱對流（Thermal Convection）及熱幅射（Thermal Radiation）。分別說明如下：

一、熱傳導（Thermal Conduction）

熱傳導是唯一可透過不透明固體的方式來傳熱，惟其亦可發生於流體中，但僅限於平流（laminar flow）或擾流邊界層（turbulent boundary layer）極靠近物體表面的平流次層（laminar sublayer）中。

其原理乃物質中溫度較高部份之粒子，具有較高能量，有較頻繁之粒子間碰撞，而將能量傳輸到溫度較低之粒子，並提昇此處之溫度。故物體中若存在溫度梯度（temperature gradient），則能量將由高溫區流向低溫區，此即為導熱熱傳。而垂直於熱傳方向之單位面積上之能量傳輸率正比於此方向之溫度梯度，其可表示為：

$$\text{Rate of heat conduction} \propto \frac{(\text{Area})(\text{Temperature difference})}{\text{Thickness}} \quad (2-7)$$

根據上式可推導出傅利葉導熱定律方程式（Fourier's law of heat conduction）如下公式：

$$\dot{Q} = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{或} \quad Q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2-8)$$

其中

$\dot{Q}$ 稱為熱通量（heat flux），為單位面積、單位時間內之熱能傳輸率。其單位為 $\text{J}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 。

Q 稱為熱傳率（heat-transfer rate），為在一段時間 $\Delta t > 0$ 內傳輸之熱能。其單位為 J/s 。

k 稱為導熱係數 (thermal conductivity)，其單位為 $W/(m \cdot K)$

上式亦可用圖 2-8 表示，為熱傳導穿透面積為 A 且厚度為 ΔX 之平板，其中熱傳遞係由溫度高之 T_1 傳至溫度低之 T_2 ，上式之負號代表導熱熱傳能量傳遞的方向為溫度減少之方向。

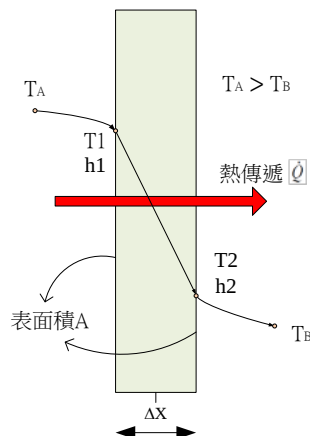


圖 2-8 熱傳導示意圖

資料來源：本研究繪製

當一物體內有溫度梯度存在時，能量會從高溫區傳到低溫區。此種能量傳遞方式稱為傳導，且單位面積之熱傳導速率和法線溫度梯度成正比，如圖 2-9 所示。

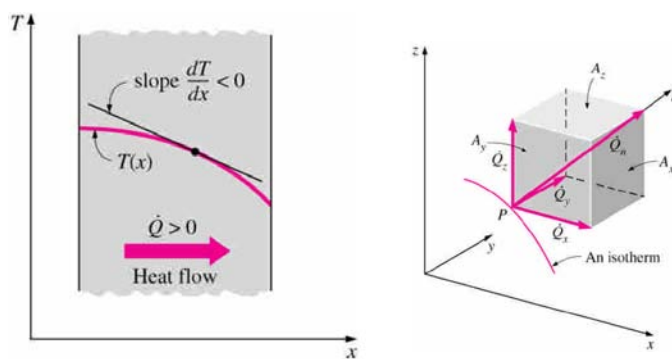


圖 2-9 熱流方向示意圖

資料來源：熱傳學講義，王曉剛

因此可寫成以下公式：

$$\frac{q}{A} \propto \frac{\partial T}{\partial n} \quad (2-9)$$

代入比例常數後，可得

$$q = kA \frac{\partial T}{\partial n} \quad (2-10)$$

其中 q 為熱傳遞速率 (W)， A 為熱傳遞面積 (m^2)， $\frac{\partial T}{\partial n}$ 是等溫面之法線方向的溫度梯度 ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$)， k 稱為材料的熱傳導係數 (thermal conductivity) ($\text{W} / \text{m}^{\circ}\text{C}$)；因此根據能量平衡可得出熱傳導通式，假設一個一維傳導系統，且考慮一自由體元素如圖 2-10 所示。

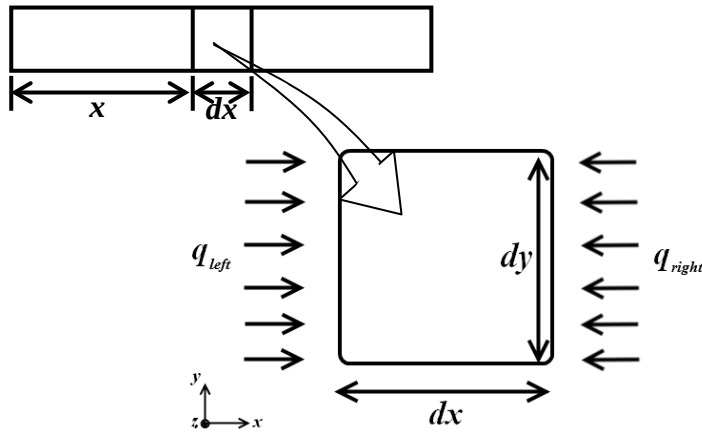


圖 2-10 一維熱傳導分析自由體圖

資料來源：丁銘顯，廣義隔熱材料應用於增加室內熱舒適度之數值模擬，2011

即可列出能量平衡式：

傳入左面的能量 + 傳入右面的能量 = 內能的改變量

$$q_{left} + q_{right} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz$$

代入式 (2-10) 可得：

$$k_x \frac{\partial T}{\partial (-x)} dy dz + \left[k_x \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right] dy dz = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (2-11)$$

當熱傳導係數為常數，將上式整理後同除 $dx dy dz$ 可得：

$$k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2-12)$$

若考慮三軸方向之熱傳導，以式 (2-10) 至式 (2-12) 同理可

得：

$$k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2-13)$$

其中 ρ 為密度 (kg / m^3)， c 為比熱 ($\text{J} / \text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$)，為溫度對時間的微分 ($^\circ\text{C} / \text{s}$)。

二、熱對流 (Convection)

熱對流是由於流體在固體表面整體與不規則運動所造成。對流熱傳存在於不同溫度之物體表面與表面上之流體之間，流體因為黏滯力，會在物體表面形成一速度邊界層 (hydrodynamic or velocity boundary layer)，同樣的，因為溫度不同，亦會形成一溫度邊界層 (thermal boundary layer)，大部分流體之速度邊界層與溫度邊界層非常類似，此稱為雷諾類比 (Reynolds Analogy)。對流熱傳之熱傳機制，在接近物體表面，因為流體流速幾乎為零，故熱傳主要是導熱熱傳，且熱傳率在“流體/物體”界面必須連續，可以下列公式表示：

$$q = -k_s \left(\frac{\partial T_s}{\partial y} \right)_{y=0} = -k_f \left(\frac{\partial T_f}{\partial y} \right)_{y=0} \quad (2-14)$$

上式中， q (W) 是熱傳率 (Heat rate)，為單位時間內之熱能傳輸率。 s 代表物體 (solid)， f 代表流體 (fluid)。但因為流體之溫度分佈非常複雜，故以上式求對流熱傳之方法甚為困難。此熱傳進入流體主流 (bulk flow) 後，熱傳之熱傳機制有兩種：微觀之流體分子之隨機運動與擴散 (random molecular motion or diffusion)，以及巨觀之流體流動，可以下式表示：

$$\text{Convection} = \text{Conduction} + \text{Advection} \quad (2-15)$$

$$(\text{熱對流}) = (\text{熱傳導}) + (\text{流體運動})$$

故流體之流速、物理性質 (如密度、黏滯係數、導熱係數等) 以及流場之幾何形狀等，均會影響熱傳率，此複雜之熱傳形式可用一簡單之方程式來表示上述之複雜性質，稱為“牛頓冷卻定律”

(Newton's law of cooling)，如下列公式所示：

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (W) \quad (2-16)$$

其中

h 稱為“熱傳係數”(convection heat-transfer coefficient)，其單位為 $W/(m^2 \cdot K)$ ，相較於導熱係數，此係數非物質之特性(thermo-physical property)，除一些特殊情況，此係數非常複雜，多須由實驗或半經驗方程式(semi-empirical correlation)求得。

$A_s (m^2)$ 為熱對流面積。

$T_s (K)$ 為熱對流面溫度。

$T_\infty (K)$ 為流體溫度。

此外對流熱傳可由流體之形式分為：強制對流(forced convection)、自然對流(natural or free convection)、沸騰(boiling)以及凝結(condensation)等四種對流熱傳形式，如下圖所示：

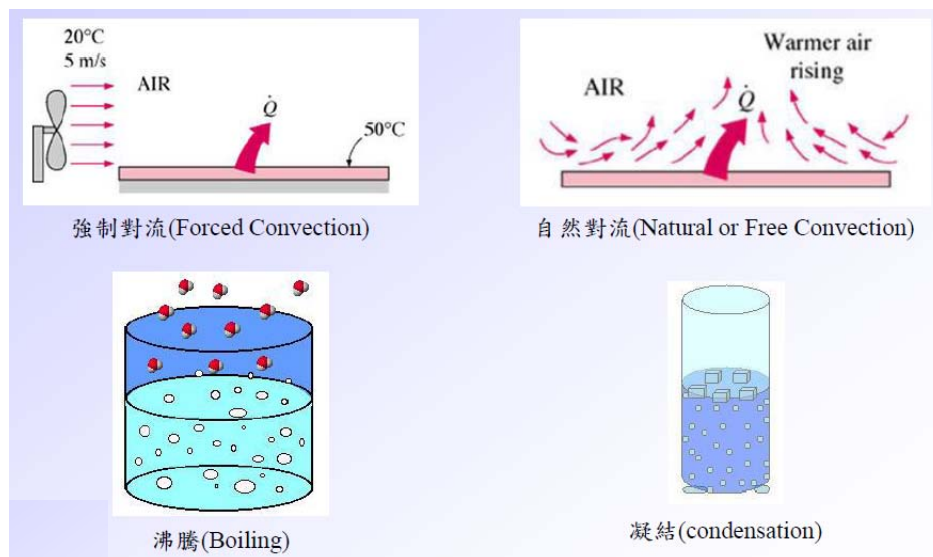


圖 2-11 四種對流熱傳形式示意圖

資料來源：熱傳學基本概念，網路資料

(http://admin.must.edu.tw/upfiles/ADUpload/c23_downmul1433686824.pdf)

上圖中透過外力如風扇或幫浦去帶動流體者，稱之為強制對流。自然對流主要由於流體上下溫度不同、密度不同，而形成之浮力（buoyancy forces）而產生能量傳遞所造成。一般熱傳中流體由無相變化（phase change）所傳輸之能量為流體之“顯能”（sensible heat），而當流體產生相變化時，所傳輸之能量為流體之“潛能”（latent heat），故於沸騰或凝結狀態下之熱傳係數相當大。

三、熱幅射（Thermal Radiation）

任何物質只要絕對溫度大於零，因為原子或分子之電子狀態改變，就會散發“電磁波”（electromagnetic wave）或稱“光子”（photon），其傳輸不需任何介質，此稱為“熱幅射”（thermal radiation），其主要為因溫度而造成之幅射。

幅射熱源一般均為體積熱源現象（volumetric phenomenon），然而幅射可視為表面現象（surface phenomenon），理想幅射熱發射源稱為“黑體”（blackbody），其發射能量與其絕對溫度之四次方成正比，此稱為“史代芬-波茲曼定理”（Stefan-Boltzmann's law），如下式所示：

$$\dot{Q}_{emit,max} = \sigma A_s T_s^4 \quad (W) \quad (2-17)$$

其中 $\sigma = 5.669 \times 10^{-8} \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K}^4 \text{)}$ 稱為“史代芬-波茲曼常數”（Stefan-Boltzmann constant）。故兩不同溫度之間之淨幅射熱傳輸可用下式表示：

$$\frac{Q_{net\ exchange}}{A} \propto \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (2-18)$$

然而真實之物體表面並非理想黑體，通常稱為“灰體”（gray body），若定義其幅射熱發射量為理想黑體之 ε 倍，此係數稱為“發射係數 F_ε ”（emissivity factor）。有些幅射熱由於幾何形狀關係無法完全由一發射面傳輸至另一接受面，故幅射熱還須乘一係數，

稱之為“視覺因子 F_G ” (view factor)，故幅射熱傳方程式寫為：

$$Q = F_\varepsilon F_G \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \quad (2-19)$$

當一幅射源（溫度 T_1 ）完全被一大面積幅射吸收面（溫度 T_2 ）所包圍，則上式變為

$$Q = \varepsilon_1 \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \quad (2-20)$$

由史代芬-波茲曼定理亦可定義出幅射熱傳係數 h_r (radiation heat-transfer coefficient)：

$$h_r = \varepsilon \sigma (T_1 + T_2)(T_1^2 + T_2^2) \quad (2-21)$$

故當對流熱傳與幅射熱傳同時存在時，熱傳率為

$$Q = Q_{conv} + Q_{rad} = hA(T_s - T_\infty) + \varepsilon \sigma A(T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (2-22)$$

四、總熱傳遞係數 U

若考慮一維平面壁體，一面曝露於熱流體 A，另一面曝露於冷流體 B，如前面圖 2-8 所示。熱傳遞可以表示為：

$$q = h_1 A (T_A - T_1) = \frac{kA}{\Delta x} (T_1 - T_2) = h_2 A (T_2 - T_B) \quad (2-23)$$

熱傳遞過程可以如圖 2-12 所示之熱阻網路表示。

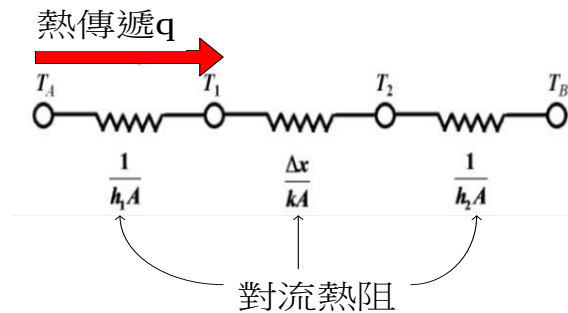


圖 2-12 熱傳遞之熱阻網路示意圖

資料來源：本研究繪製

而總熱傳遞為總溫度差和總熱阻的比值如下：

$$q = \frac{T_A - T_B}{\frac{1}{h_1 A} + \frac{\Delta x}{k A} + \frac{1}{h_2 A}} \quad (2-24)$$

上式中 $\frac{1}{hA}$ 是代表對流熱阻，傳導和對流綜合作用的總傳遞，通常用總熱傳遞係數 U (Overall Heat Transfer Coefficient or Thermal Conductance) 表示：

$$q = UA(T_A - T_B) \quad (2-25)$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\Delta x}{k} + \frac{1}{h_2}} \quad (2-26)$$

若考慮中間壁體有多層不同材料，亦即含有不同的熱傳導係數以及厚度的話，可將上述公式改寫如下：

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\Delta x_i}{k_i} + \frac{1}{h_2}} \quad (2-27)$$

一般來說，建築外殼的 U 值越小越好， U 值越小代表在相同熱量 q 的情況下，溫差 $(T_A - T_B)$ 越大，即室外與室內的溫差越大，如此當室外氣溫較高時，室內的溫度可以維持較低溫，以保持涼爽；相反的，若是在寒冷的氣候下， U 值越小，則會有保溫的效果。但是除了 U 值以外，密度和比熱（熱容量）也佔有重要的影響。

第三節 室內環境熱舒適之相關理論

關於人體暴露於中性 (moderated) 及極端 (extreme) 熱環境下的舒適標準，國際標準組織 (International Organization for Standards, ISO) 有一系列的測量及評估標準。其中 ISO 7730: Moderate thermal environments- Determination of PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort 和 ISO 7726: Instruments and methods for measuring for measuring physical

quantities 係用於規範一般室內熱環境的條件與測量標準，可作為本研究參考。

根據 ISO 7730 的定義，熱環境上的舒適為「當人的下意識對所處之熱環境表示滿意時的狀況」。人體對熱環境感到滿意的基本條件是人體與環境保持熱平衡。而人體與環境的熱平衡則受人體的活動量 (activity)、衣著量，以及環境的參數包括：溫度、平均輻射溫度 (mean radiation temperature, MRT)、風速及溼度等之影響。若是能測得室內環境中的各項參數，則可根據 ISO 7730 計算出用來表示室內熱環境舒適度的 PMV 與 PPD 指標。

另我國國家標準訂定 CNS 15537 室內環境熱舒適度量測法，以量測所得之物理量來預測處於一般熱環境中人體對熱的感覺，這些熱舒適條件適用於健康男性及女性，而此標準亦適用於室內環境的設計或對現有室內環境進行熱舒適度量測。

一、PMV (預測平均投票數，Predicted Mean Vote) 指標

PMV 指標為根據 ASHRAE 熱感覺尺度預測一群人的平均反應，該尺度將描述熱感覺度的文字轉成相應的數字。ISO 7730 以及國家標準 CNS 15537 中訂定當 PMV 介於 -0.5~0.5 為推薦之室內熱舒適範圍。最初由丹麥學者 P.O.Fanger 所提出之 PMV-PPD 評價法中，PMV 為表決的平均預測值，PPD (Predicted Percentage Dissatisfied Value) 為預測不滿意百分比，其 PMV 是以統計法得出人體感覺與環境等六個量的定量函數關係，如式所示：

$$PMV=f(t_i, \phi_i, \theta_i, v, m, R_{cl}) \quad (2-28)$$

式中， t_i ：氣溫

ϕ_i ：相對濕度

θ_i ：環境表面平均溫度

v ：氣流速度

m ：新陳代謝率

R_{cl} ：衣服熱阻

PMV 指標是建立在人體保持熱平衡的條件下。當人體保持熱平衡則體內的新陳代謝熱會與人體的散熱量保持平衡。在一般的熱環境中，人體主要是靠皮膚及呼吸來調整體內溫度，來保持熱平衡。根據 Fanger 對 1,300 個受測者的實驗結果，PMV 的理論計算公式如下所示：

$$PMV = (0.303e^{-0.36M} + 0.028)\{(M - W) - 3.05 \times 10^{-3} \times [5733 - 6.99(M - W) - p_a] - 0.42 \times [(M - W) - 58.15] - 1.7 \times 10^{-5} M (5867 - p_a) - 0.0014 M (34 - t_a) - 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a)\} \quad (2-29)$$

上式中

$$\begin{aligned} t_{cl} &= 35.7 - 0.028(M - W) - I_{cl} \{3.96 \times 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] + f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a)\} \\ h_c &= 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} \text{ for } 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} \geq 12.1v_a^{0.5} \\ \text{or } h_c &= 12.1v_a^{0.5} \text{ for } 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} \leq 12.1v_a^{0.5} \\ f_{cl} &= 1.00 + 1.29I_{cl} \text{ for } I_{cl} \geq 0.078\text{m}^2\text{□} / \text{W} \\ \text{or } f_{cl} &= 1.05 + 0.645I_{cl} \text{ for } I_{cl} \leq 0.078\text{m}^2\text{□} / \text{W} \end{aligned}$$

其中

f_{cl} =衣著表面積係數

M =人體新陳代謝率 (W/m^2)

W =對外作功率 (W/m^2)

I_{cl} =衣服絕緣值 ($\text{m}^2\text{°C}/\text{W}$)

P_a =水蒸氣分壓 (pa)

t_a =室內空氣溫度 (°C)

t_r =平均輻射溫度 (°C)

v_{ar} =氣流速度 (m/s)

h_c =對流熱損失係數 ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{°C}$)

t_{cl} =衣服表面溫度 (°C)

根據ASHRAE 55 指出，人體新陳代謝 率(活動量)在 1.2Met及衣

著量(夏天衣服絕緣值為 0.5clo，冬天為 0.9clo)條件下，夏季舒適溫度為 $24.5^{\circ}\text{C}^{\text{tb}*1}$ (RH=50%，10%不滿意度下)，舒適溫度範圍 23~26 $^{\circ}\text{C}^{\text{ET}*2}$ ；冬季舒適溫度為 $22^{\circ}\text{C}^{\text{tb}}$ (RH=50%，10%不滿意度下)，舒適溫度範圍 20~23.5 $^{\circ}\text{C}^{\text{ET}}$ ，夏季與冬季重疊區域為 23~24 $^{\circ}\text{C}^{\text{ET}}$ ，可接受之舒適區域溫、濕度曲線，如圖 2-13 所示。

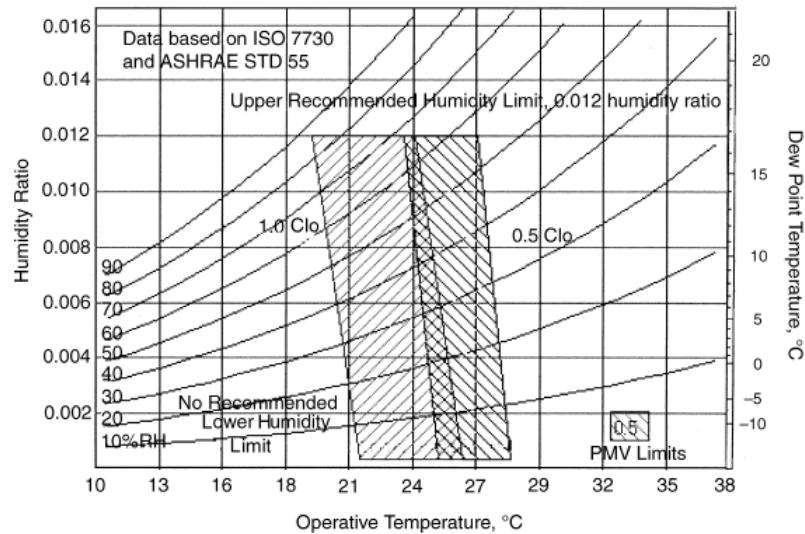


圖 2-13 可接受之舒適區域溫、濕度曲線圖

資料來源：ASHRAE 55，2004

ISO 7730 亦建議上述 PMV 公式 (2-29) 中之環境熱舒適參數適用範圍為：

$$-3 < \text{PMV} < 3$$

活動量： $M=46 \sim 232 \text{ W/m}^2$ (0.8~4 Met，1Met=58.2 W/m²)

衣著量： $I_{cl}=0 \sim 0.310 \text{ m}^2\text{C/W}$ (0~2 clo，1clo=0.155 m²C/W)

室內溫度： $t_a=10 \sim 30^{\circ}\text{C}$

平均輻射溫度： $t_r=10 \sim 40^{\circ}\text{C}$

平均風速： $v_{ar}=0 \sim 1 \text{ m/s}$

大氣壓力： $p_a=0 \sim 2,700 \text{ pa}$

相對濕度： $\text{R.H.}=30 \sim 70\%$

註¹：tb=運轉溫度。

註²：ET=有效溫度

二、熱舒適和感覺評價指標

將 PMV 值按人體的熱感覺分成 7 個等級如表 2-1，並已經大量試驗獲得不滿意等級的熱感覺人數占全部人數的百分比 PPD，可繪製出 PMV-PPD 曲線如圖 2-14。圖中曲線的底端 PMV 值等於 0 時，PPD 仍有 5% 的人不滿意，當 PMV 值來到 0.5 時，代表環境稍熱，此時的不滿意百分比 PPD 上升到 10%，這同時也說明環境在任何時間不可能使所有的人都滿意。

表 2-1 熱舒適和感覺評價指標

ASHRAE 分級	PMV 值
冷	-3
涼	-2
微涼	-1
中性	0
微暖	1
暖	2
熱	3

資料來源：美國冷凍空調協會 ASHRAE，1996

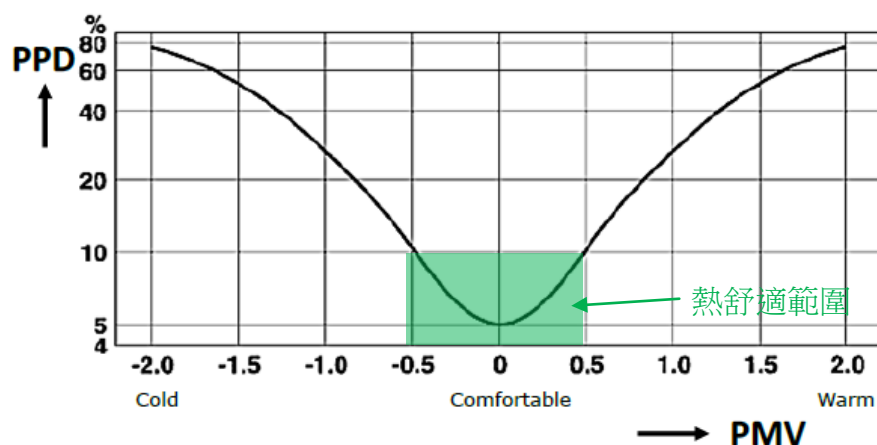


圖 2-14 PMV-PPD 曲線圖

資料來源：室內環境品質診斷及改善技術指引，內政部建築研究所

Fanger 將上圖之所有實驗數據繪成圖表，並找出迴歸曲線，所導出之 PMV 與 PPD 的關係式如下：

$$PPD = 100 - 95 \times e^{-(0.03353 \times PMV^4 + 0.2179 \times PMV^2)} \quad (2-30)$$

應用此方程式，當獲得 PMV 值時，同時也可獲得此時感到不滿意人數的百分比（PPD 值）。根據國際標準組織 ISO 7730 的舒適指標值，建議介於-0.5 與 0.5 之間為舒適範圍，亦即 PPD 建議在 10% 以下，如圖 2-14 中綠色框範圍。

第四節 屋頂綠化相關文獻

建築物室內、外的溫度差及太陽輻射的日射量是造成建築耗能的兩大主因，針對「溫度差」的節能技術則是「隔熱」，而針對「日射量」的節能技術則是「遮陽」。因此建築屋頂隔熱主要目的，係為提昇建築物屋頂阻絕外界太陽直射進入屋內熱量之能力。

土壤及植物具有蒸發散熱的作用，屋頂綠化之土壤層具有良好的隔熱性能，為天然的素材，且屋頂面受太陽直接照射時的溫度可高達 55°C，若將水灑於其上，藉由土壤及植物吸收水分後遇熱蒸發的原理，可帶走屋面的熱。

屋頂綠化扣除原有屋頂結構層及防水層外，主要包括土壤層與植被層兩大部分。其中土壤層係由土壤顆粒、土壤溶液與土壤空氣等固態、液態與氣態三相所構成，隨著地面的氣候變化，將改變土壤孔隙中氣相與液相的含量，因此造成土壤水分含量的變化。而水為熱的良好導體，因此增加土壤中水分含量將增加土壤整體的傳熱性。

根據文獻研究顯示，土壤水分與土壤熱傳導係數是呈現一正相關的關係（徐森雄，2005）。另土壤水分蒸發後水的相態變化產生潛熱的消散，亦即土壤中每公克的水其蒸發後，消散之潛熱平均約為 540cal/g（周鼎金，1995）。因此土壤於屋頂綠化隔熱中，可做為太

陽輻射和建築物壁體間重要的隔熱介質，不但可阻隔太陽輻射對建築物壁體的熱吸收，同時也可延緩建築物壁體的散熱，達到隔熱、保溫之功效。

另植物對溫濕度的調節有很大的幫助，根據相關文獻研究顯示，茂密的枝葉可以吸收和反射 80 至 90% 的太陽長波輻射熱，葉片的蒸散作用又可消耗一部份熱量，惟不同的植栽種類會影響其隔熱與蒸散之效果（陳瑞鈴等，1999）。因此植栽的蒸散作用可降低周圍外氣溫度及土壤表面溫度，但因植栽蒸散是一個複雜的物理作用，蒸散量會受到許多因子所影響，包含葉片面積、厚度、植栽高度、密度及氣孔等，以及太陽輻射、溫度、濕度、風速及土壤含水量等影響因子，目前所有蒸散量之測定方法都無法準確的計算，只能以推估的方式探討。

另根據文獻研究顯示，植栽對於日射熱能約有 80% 日射照射熱量的消散效果，由此可知屋頂綠化之植栽，於日射熱能之熱平衡機制中，主要的 80% 之日射熱能，可由植物層所形成熱的反射、消耗及水分蒸散等作用，所帶走的潛熱來達成（張簡宏裕，2002）。

故經過綠化之屋頂，可藉由土壤層與植被層吸收太陽輻射熱及蒸散水分，有效降低屋頂的表面溫度、外部周圍空氣溫度及屋頂的平均輻射溫度，減少太陽輻射熱對建築物的影響，降低屋頂表面熱流通過，進而降低建築物室內溫度與能源消耗。

依據內政部建築研究所「屋頂綠化技術手冊，2015」指出，綠屋頂主要可概括分為三種類型：薄層綠屋頂、盆鉢型綠屋頂及庭園型綠屋頂，主要是按植栽種類、介質厚度及功能使用區分，茲分別就屋頂綠化主要類型說明如下：

1、薄層綠屋頂（Extensive green roof）：

指在屋頂上以滿鋪方式在防水層上覆蓋厚度低於 30 公分的輕量介質，並種植強韌、低矮、具自生性的植栽，以適應燠熱、乾旱、

強風等不利環境，達到提昇環境效益、永續節能的目的。基於建築物承載量的考量和低維護管理的需求，目前公司部門及現有建物多推行薄層綠屋頂。此類型施工較簡單、傾斜度在 45° 內的屋頂皆可施作，較庭園型及盆鉢型綠屋頂工法有低維護管理、低承載需求、節省結構成本等特性，例如新北市新莊國民運動中心之屋頂綠化案例，詳如圖 2-15。



圖 2-15 新北市新莊國民運動中心（樹花園）

資料來源：屋頂綠化技術手冊，2015

2、盆鉢型綠屋頂（Container-type green roof）：

一般使用各種盆器種植植物，依容器造型尺寸予以設計排列所形成之綠屋頂。因容器與介質材料取得容易，且盆鉢器具可移動性，故民眾可方便自行操作施工，以及依照植物生長狀況調整擺放位置。惟佈設時應儘量將屋頂樓板面積鋪滿，阻絕太陽輻射熱直接曬到防水層，才能減少屋頂樓板傳遞熱能至頂樓室內，以達到隔熱及節能的效用。例如成大綠色魔法學校（孫運璿綠建築研究大樓）之屋頂綠化案例，詳如圖 2-16。



圖 2-16 成大綠色魔法學校（孫運璿綠建築研究大樓）之屋頂綠化

資料來源：屋頂綠化技術手冊， 2015

3、庭園型綠屋頂（Intensive green roof）：

一般係由屋主或業者委託景觀設計者利用設計手法將小型喬木、灌木、地被植物等進行屋頂複層綠化，常有休憩設施或花園，主要以美觀欣賞及休憩療育為目的。庭園型綠屋頂具有景觀效果佳、植物層次豐富、完整性高、覆土深、植物根系可充分伸展等優點。但由於涉及設施結構等設計，以及喬木移植專業，建議尋找專業廠商規劃、設計和施工、維護管理。常見之庭園型屋頂綠化案例，詳如圖 2-17 所示。



圖 2-17 常見之庭園型屋頂綠化案例

資料來源：屋頂綠化技術手冊，2015

綜合上述三種主要之屋頂綠化類型，整理比較分析各型式綠屋頂如表 2-2 所示。

表 2-2 各主要類型綠屋頂比較表

型式	薄層綠屋頂 (Extensive green roof)	盆鉢型綠屋頂 (Container-type green roof)	庭園型綠屋頂 (Intensive green roof)
設置目的	以體現生活、生態功能與環境的協調性為目的	以快速綠化且短期使用為目的，受環境因素限制小	永久性設置之景觀設施，供美觀欣賞及休憩功能之用
特徵	1.管理頻度低 2.覆土深度<30公分 適合種植灌木、草花、草皮 3.不限於平屋頂(適於屋面坡度45度以下)	1.既有老建物較符合使用 2.非全面綠化使用之型式 3.常以農園型式呈現 4.設於平屋頂(適用於屋頂坡度10度以下)	1.屋頂承載量需求大 2.管理頻度及費用較高 3.可種植小喬木、灌木及草花、草皮，生物多樣性豐富且美觀 4.設於平屋頂(適於屋頂坡度10度以下)
施作	1.承載力需 ≥ 200	1.承載力需 $\geq 250 \text{ kg/m}^2$	1.承載力應 ≥ 450

型式	薄層綠屋頂 (Extensive green roof)	盆鉢型綠屋頂 (Container-type green roof)	庭園型綠屋頂 (Intensive green roof)
需求	kg/m ² 2.工法簡單，建設成本較低 3.維護管理頻度低，且費用經濟	2.工法簡單，建設成本中等 3.維護管理頻度高、費用中等	kg/m ² (營業性屋頂庭園 $\geq 600\text{kg/m}^2$) 2.建造複雜，設計費用高 3.維護管理頻率及花費高
機能	1.具減緩熱島效應效果 2.增加生物多樣性 3.快速增加城市綠化面積 4.符合永續環保概念	1.必須覆蓋80%以上屋頂面積才有良好隔熱效果 2.增加生物多樣性 3.具經濟生產效益 4.具休憩活動空間 5.具療育效果 6.具減緩熱島效應效果	1.具減緩熱島效應效果 2.雨水滯留貯留效果高 3.增加生物多樣性 4.休憩活動空間大 5.具美觀欣賞之功能
建議場所	1.既有建物 2.斜屋頂 3.公共設施 4.學校機關	1.既有建物 2.社區住宅 3.公家機關	1.新設建物 2.私人住宅 3.商業大樓 4.公共設施
維護管理	低頻率即可，修剪為主。	須經常換植、除草。費工。	高頻度庭園維管。
選擇要點	低頻度維護管理，建造及維管費用低，且可大面積綠化。但植栽種類有限，人為活動空間較小。	高頻度維護管理，較為費工，需有高人力維管為首要選擇條件。應盡量選擇有志工或居民可自行管理區域為佳。	高頻度維護管理且具技術性，維管費用高，建築物之承載量和喬木固定問題是施作點首要考量條件。

資料來源：屋頂綠化技術手冊， 2015

第五節 相關設計規範探討

由於台灣地區屬於亞熱帶^{*3}氣候，主要用電以空調冷房為大宗，

註³：亞熱帶是地球上的一種氣候地帶。一般亞熱帶位於溫帶靠近熱帶的地區（大致 23.5°N-40°N、23.5°S-40°S 附近）。亞熱帶的氣候特點是其夏季與熱帶相似，但冬季明顯比熱帶冷，最冷月在攝氏 0 度以上。

故整體建築耗能相對較歐、美、日等溫帶^{*4}地區國家低很多，加上我國營建業者為了節約成本，通常不會特別施作外殼隔熱。因此我國歷次在檢討修訂外殼節能法規時，常因顧慮民間營建習慣與投資效益，對建築外殼隔熱之相關基準，相較其他歐、美、日乃至中國等位處溫帶之國家低很多。

例如美國佛羅里達州對屋頂的隔熱性能規定約為台灣的 3.3~7.8 倍，對外牆的隔熱性能規定約為台灣的 4.0~6.9 倍，中國華南對外牆的隔熱性能約為台灣的 2.3 倍，對屋頂的隔熱性能約為台灣的 1.0~1.2 倍等，故相對之下我國建築之居住環境較易有悶熱而不舒適的情形。為此我國經多次檢討修正建築技術規則中有關建築外殼耗能相關規定，其中關於屋頂隔熱性能部分，已要求屋頂之平均熱傳透率 U 值應低 $0.8\text{W/m}^2 \cdot \text{k}$ 。

另當設有水平仰角小於 80 度之屋頂透光天窗之水平投影面積 HWa 大於 1.0 平方公尺時，其透光天窗日射透過率 HWs 應低於下表之基準值 $HWsc$ 。但建築物外牆透空二分之一以上之空間，不在此限。

表 2-3 屋頂透光天窗日射透過率 HWs 之基準值

水平投影面積 HWa 條件	透光天窗日射透過率基準值 $HWsc$
$HWa < 30\text{m}^2$	$HWsc = 0.35$
$HWa \geq 30\text{m}^2$ 且 $HWa < 230\text{m}^2$	$HWsc = 0.35 - 0.001 \times (HWa - 30.0)$
$HWa \geq 230\text{m}^2$	$HWsc = 0.15$
計算單位 $HWa : \text{m}^2$ ； $HWsc$: 無單位	

資料來源：「建築技術規則」建築設計施工編第十七章綠建築基準

關於建築物外牆、窗戶與屋頂所設之玻璃對戶外之可見光反射率不得大於 0.25。受建築節約能源管制建築物之外牆平均熱傳透率、

註⁴：由南回歸線至南極圈，以及北回歸線至北極圈附近的中緯度地區。每年的平均氣溫大多在攝氏 20 度到 0 度之間，例如美國、德國、中國、日本等。

立面開窗部位（含玻璃與窗框）之窗平均熱傳透率及窗平均遮陽係數^{*5}則應低於下表所示之基準值：

表 2-4 外牆及立面開窗部位（含玻璃與窗框）之節能基準值

類別	外牆平均熱傳透率基準值 $W/(m^2 \cdot K)$	立面開窗率 ^{*6} > 0.5		0.5 ≥ 立面開窗率 > 0.4		0.4 ≥ 立面開窗率 > 0.3		0.3 ≥ 立面開窗率 > 0.2		0.2 ≥ 立面開窗率 > 0.1		0.1 ≥ 立面開窗率	
		窗平均熱傳透率基準值 ^{*7}	窗平均遮陽係數基準值	窗平均熱傳透率基準值	窗平均遮陽係數基準值	窗平均熱傳透率基準值	窗平均遮陽係數基準值	窗平均熱傳透率基準值	窗平均遮陽係數基準值	窗平均熱傳透率基準值	窗平均遮陽係數基準值	窗平均熱傳透率基準值	窗平均遮陽係數基準值
住宿類建築	2.75	2.7	0.10	3.0	0.15	3.5	0.25	4.7	0.35	5.2	0.45	6.5	0.55
其他各類建築	2.0	2.7	0.20	3.0	0.30	3.5	0.40	4.7	0.50	5.2	0.55	6.5	0.60

資料來源：「建築技術規則」建築設計施工編第十七章綠建築基準

至於空調型、住宿類、學校類及大空間類等建築，其建築節能設計基準若能符合下表之基準值，則可不受上表之限制（亦即兩者擇一即可）。

表 2-5 空調型、住宿類、學校類及大空間類等建築之節能基準值

建築類別	使用項目例舉	節能指標	氣候分區	基準值
基本門檻指標	所有受管制建築物	屋頂平均熱傳透率 U_{ar}	不分區	$< 0.8 W / m^2 \cdot k$

註⁵：窗平均遮陽係數=外遮陽係數 K_i × 玻璃日射透過率 η_i

註⁶：立面開窗率 WRI [無單位]係所有開窗部位（包括開口玻璃以及窗框）總面積對總建築立面面積之比值。

註⁷：窗平均熱傳透率 U_{af} （Average Fenestration U Value）係所有建築立面開窗部位熱傳透率之平均值。

建築類別		使用項目例舉	節能指標	氣候分區	基準值
			屋頂天窗日射透過率 η	不分區	$<0.35\sim0.15$
			玻璃可見光反射率	不分區	≤ 0.25
空調型建築	辦公廳類	政府機關、辦公室	建築外殼耗能量 ENVLOAD ^{*8}	北區	$<80 \text{ kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{yr}$
				中區	$<90 \text{ kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{yr}$
				南區	$<115 \text{ kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{yr}$
	百貨商場類	百貨公司、商場	建築外殼耗能量 ENVLOAD	北區	$<240 \text{ kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{yr}$
				中區	$<270 \text{ kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{yr}$
				南區	$<315 \text{ kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{yr}$
	旅館餐飲類	旅館、觀光旅館、餐廳	建築外殼耗能量 ENVLOAD	北區	$<100 \text{ kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{yr}$
				中區	$<120 \text{ kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{yr}$
				南區	$<135 \text{ kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{yr}$
	醫院類	醫院、療養院	建築外殼耗能量 ENVLOAD	北區	$<140 \text{ kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{yr}$
				中區	$<155 \text{ kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{yr}$
				南區	$<190 \text{ kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{yr}$
住宿類建築		住宅、集合住宅、寄宿舍、養老院、安養中心、招待所	外牆平均熱傳透率 U_{aw} 等價開窗率Req ^{*9}	不分區	$<3.5 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{k}$
				北區	$<13\%$
				中區	$<15\%$
				南區	$<18\%$
學校類建築		普通教室、特殊教室、行政辦公室、學校附屬圖書館	窗面平均日射取得率ASWG ^{*10}	北區	$<160 \text{ kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{yr}$
				中區	$<200 \text{ kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{yr}$
				南區	$<230 \text{ kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{yr}$
大空間類建築		圖書館、體育館、禮堂、體育館、音樂廳、航空站、倉儲場、汽車商場等	窗面平均日射取得率ASWG，依平均立面開窗率X（無單位）計算基準值	北區	$<146.2X^2-414.9X+276.2 \text{ kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{yr}$
				中區	$<273.3X^2-616.9X+375.4 \text{ kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{yr}$
				南區	$<348.4X^2-748.4X+436.0 \text{ kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{yr}$

資料來源：隔熱材料對建築外殼隔熱性能及節能效益影響之研究，
何明錦、林憲德，2011

註⁸：建築物外殼耗能量 ENVLOAD[kWh/(m².a)]，係為維持室內環境之舒適性，建築物之單位外周區空調樓地板面積全年冷房顯熱負荷量。計算公式詳見各類型建築物節約能源設計技術規範。

註⁹：建築外殼等價開窗率 Req ，是指建築物「各方位」外殼之透光部位，經標準化日射、遮陽及通風修正計算後之開窗面積，對建築外殼總面積之比值。外殼等價開窗率 $Req=(\sum \text{窗面積 } Agi \times \text{各方位日射修正係數 } fk \times \text{開窗部位外遮陽修正係數 } ki \times \text{開窗部位通風修正係數 } fvi) \div \text{外殼總面積 } Aen$ 。

註¹⁰：窗面平均日射取得量（Average Window Solar Gain）簡稱 AWSG [kWh/(m².a)]，係除了屋頂部位以外之建築物所有透光部位開窗表面之平均日射取得量。計算公式詳見各類型建築物節約能源設計技術規範。

上述各節能指標中，「空調型建築」的 ENVLOAD 指標屬於目前最先進的「建築外殼耗能指標」；「住宿類建築」的 Req 與「學校及大型空間類建築」的 AWSG 兩種指標屬於「綜合熱性能指標」；而其他類建築的屋頂隔熱 U_{ar} 值與日射取得率則屬於最簡單的「部位熱性能指標」。這些均依據其耗能比重、操作簡易度與建築專業人員之專業要求度，而作的分類規範系統。

第三章 因子影響分析及最適化模式探討

本章將就於品質實驗時常採用之工具「田口方法 (Taguchi Methods)」，探討對於不同控制因子之影響程度分析，以及就各控制因子於不同變動水準下之最適化分析模式，以作為後續進行電腦模擬屋頂綠化之隔熱效能時之分析模式基礎。

第一節 品質特性及理想機能

在田口方法的術語中，實驗的量測值或觀察值稱為「品質特性 (Quality Characteristics)」，常以 y 來代表品質特性。套用在本研究屋頂綠化隔熱效能之模擬結果，其品質特性可以選擇為室內熱得、室內空調熱負荷或空調用電量等。

而每一個品質特性有其理想值 (ideal value)，理想值又稱為目標值 (target value)，常以 m 來代表目標值，亦即品質特性 y 的目標值為 m ，用下式來代表品質特性的「理想機能」(Ideal Function)

$$y = m \quad (3-1)$$

上式所描述的理想機能有：望目 (nominal-the-best)、望小 (smaller-the-better)、望大 (larger-the-better) 及動態 (dynamic) 等。其中望小及望大可視為目標值分別是 0 及無窮大，而望目、望小、及望大等三種理想機能，因為其目標值是固定的，所以又稱為「靜態 (static)」的理想機能，其品質特性則稱為靜態品質特性。而所謂「動態」則是指目標值是變動的。

第二節 控制因子及變動水準

在進行品質實驗時，首先需列出所有可能影響品質特性的因子 (factors)，再於這些因子中，挑選出影響較大的幾個因子作為主要設計參數，在實驗的過程有系統地變動的設計參數則稱為「控制因子 (Control Factors)」，常使用英文字母 A、B、C、…等來代表控

制因子。

控制因子的選擇是本研究首先需面臨的問題，因為通常會有非常多的因子會影響到品質特性。為了實驗的效率，本研究必須挑選出「值得一試」的較重要因子。控制因子的選擇除了有賴研究人員的經驗外，必要的話可以先進行「篩選實驗」(screen experiments)，來選出較重要的因子。

在所有影響到品質特性的因子中，必須能區分出「控制因子」與「干擾因子 (noise factors)」，控制因子是在實驗過程中可以設定的控制參數，而干擾因子是在實驗過程中無法設定的。簡單地說，可以決定其設定值的因子稱為控制因子，而無法控制的因子稱為干擾因子。而本研究模擬實驗的目的是要決定控制因子的設定值，也就是最適化模式之建立，至於干擾因子部分，因本研究採用之數值模擬係基於熱傳學理演算結果，故當外部輸入條件相同情況下，其模擬結果具有重現性，故干擾因子於本研究模擬過程予以忽略。

此外每個控制因子，我們可依據實驗之實際狀況設定不同之變動水準 (Levels of Control Factors)，用以了解該項控制因子對實驗結果之影響性。

第三節 實驗設計法

本節將探討以實驗的方式來決定設計參數，常見之方法如下：

一、試誤法 (Trial-and-Error)：

此方法係依據個人經驗或直覺，選擇一組設計參數直接嘗試，並依賴個人經驗調整參數值重覆實驗，直至其結果可被接受為止。此法雖無需任何資料分析或使用直交表，且有時候很有效率（需視是否有豐富經驗或好運氣），但並非有系統性之方法，且通常情況是浪費了很多人力、物力後，卻未必能得到一個可以接受的設計值。故除非是很簡單的實驗設計組合，否則不建議採用此法。

二、一次一因子實驗法 (One-Factor-at-a-Time)：

每次只變動一個控制因子，而其他控制因子則維持於前次實驗的水準，以探討控制因子水準變動之效應。舉例來說，若某實驗中探討 7 個 2 水準因子對品質特性 y 的影響，目標為使 y 最小化，期實驗結果下表所示。其中實驗 1 全固定於水準 1，實驗 2 只變動 A 至水準 2，其餘維持不變，是以 A 之效應為 0.3。實驗 3 只變動 B 至水準 2，其餘維持和實驗 2 相同，是以 B 之效應為 0.5。

表 3-1 一次一因子實驗（7 個 2 水準因子）案例之變動效應

實驗組別 \ 因子	A	B	C	D	E	F	G	品質特性 y
1	1	1	1	1	1	1	1	1.2
2	2	1	1	1	1	1	1	1.5
3	2	2	1	1	1	1	1	2.0
4	2	2	2	1	1	1	1	1.1
5	2	2	2	2	1	1	1	1.8
6	2	2	2	2	2	1	1	2.2
7	2	2	2	2	2	2	1	1.6
8	2	2	2	2	2	2	2	1.7
各因子之水準變動效應	0.3	0.5	-0.9	0.7	0.4	-0.6	0.1	

資料來源：本研究整理

上表中當各因子之水準變動效應為正，代表該因子變化時對 y 值而言有加大的趨勢，例如 A 因子由水準 1 變為水準 2，其變動效應為 $1.5-1.2=0.3$ ；反之，當各因子之水準變動效應為負，則有減小的趨勢。若本實驗目標為使品質特性 y 減至最小，則應找出各因子貢獻最小的組合，亦即 A1 B1 C2 D1 E1 F2 G1。

其缺點在於評估效應時有明顯的偏見，例如對 A 之效應而言，是基於其他因子均為水準 1 的情形下 A 的表現。一旦其他因子一併變動，原先求出 A 的效應將沒有意義。故本種實驗法之因子效應是相對於特定的參照實驗條件下的計算值，係在某種「偏見」(bias) 下評估出來的，容易造成誤判。

三、全因子實驗法 (Full-Factorial Experiments)：

此方法需考慮所有可能之因子變動組合，亦即所有因子水準的組合均在實驗中出現，因子或水準愈多，所需的實驗愈多，花費的時間、精力或成本也愈多，可行性愈低。故其缺點為沒有效率，需要太多組實驗，浪費時間及人力。但優點是可以完全排除前種方法所產生之偏見，且全因子實驗陣列必然是一個直交表。

舉例來說，某實驗有 4 個控制因子，每個因子有 2 種水準，共有 $2^4=16$ 組實驗組合，其實驗數據及因子效應如下表所示。

表 3-2 全因子實驗 (4 個 2 水準因子) 案例之變動效應

實驗組別 \ 因子	A	B	C	D	品質特性 y
1	1	1	1	1	0.43
2	1	1	1	2	0.60
3	1	1	2	1	0.01
4	1	1	2	2	0.18
5	1	2	1	1	0.76
6	1	2	1	2	0.88
7	1	2	2	1	0.21
8	1	2	2	2	0.42
9	2	1	1	1	1.02
10	2	1	1	2	1.13
11	2	1	2	1	0.59
12	2	1	2	2	0.68
13	2	2	1	1	1.29
14	2	2	1	2	1.34
15	2	2	2	1	0.86
16	2	2	2	2	0.96
各因子於水準 1 時 y 的平均值	0.44	0.58	0.93	0.65	
各因子於水準 2 時 y 的平均值	0.99	0.84	0.49	0.77	
各因子之水準 變動效應	0.55	0.26	-0.44	0.13	

資料來源：本研究整理

上表中 A 因子於水準 1、水準 2 時品質特性 y 之平均值，及 A 因子之水準變動效應計算方式如下：

$$\bar{y}_{A1} = \frac{0.43 + 0.60 + 0.01 + 0.18 + 0.76 + 0.88 + 0.21 + 0.42}{8} = 0.44$$

$$\bar{y}_{A2} = \frac{1.02 + 1.13 + 0.59 + 0.68 + 1.29 + 1.34 + 0.86 + 0.96}{8} = 0.99$$

$$E_A^{1 \rightarrow 2} = \bar{y}_{A2} - \bar{y}_{A1} = 0.99 - 0.44 = 0.55$$

依照上述因子反應表，可繪製出因子反應圖如圖 3-1 所示。若品質特性 y 係希望最小值，則由下圖可輕易看出最佳實驗參數組合為 A1 B1 C2 D1。

圖 3-1 全因子實驗（4 個 2 水準因子）案例之因子反應圖
資料來源：本研究整理

事實上不需要做因子反應圖亦可由表 3-2 直接挑出品質特性 y 最小之最佳實驗組合（即實驗第 3 組），此乃因已經考慮到所有可能的排列組合。在全因子直交表實驗中，因子的總數及每個因子的水準數可以是任意的，只是最常用的因子水準數是 2 水準或 3 水準。

四、田口式直交表實驗法（Taguchi's Orthogonal Arrays）：

田口式直交表的構想係以較少之實驗次數（相對於全因子實驗）來獲得有用的統計資訊，雖然仍無法完全排除偏見，但對於找出實驗各變因水準之最佳化組合而言，此方法為可兼顧時間成本及精確度之很好的折衷方法。

典型之田口直交表係以 $L_a(b^c)$ 來命名，其代表共有 a 組實驗，最多可以容納 b 個水準之因子 c 個，亦即以 a 個橫列、 c 個直行表示之實驗陣列，字母 L 係取自此直交表之原始名稱（Latin squares）。此外有些直交表可以同時容納兩種水準之因子（例如 2 種水準及 3 種水準之因子），可用 $L_a(b^c \times d^e)$ 來表示，其代表共有 a 組實驗，最多可以容納 b 個水準之因子 c 個，以及 d 個水準之因子 e 個。

舉例來說，某實驗有 7 個控制因子（A、B、C、D、E、F、G），每個因子有 2 種水準（水準 1、水準 2），適合採用 $L_8(2^7)$ 直交表，可將 7 個因子填滿 7 行，其實驗數據及因子效應如下表所示。

表 3-3 田口直交表 $L_8(2^7)$ 案例之實驗數據

因子 實驗組別	A	B	C	D	E	F	G	品質特性 y
1	1	1	1	1	1	1	1	1.20
2	1	1	1	2	2	2	2	1.87
3	1	2	2	1	1	2	2	2.09
4	1	2	2	2	2	1	1	2.24
5	2	1	2	1	2	1	2	1.51
6	2	1	2	2	1	2	1	1.82
7	2	2	1	1	2	2	1	1.45
8	2	2	1	2	1	1	2	2.18
y 平均值=								1.80

資料來源：本研究整理

表 3-4 田口直交表 $L_8(2^7)$ 案例之因子反應表

因子 水準平均值	A	B	C	D	E	F	G
各因子於水準 1 時 y 的平均值	1.85	1.60	1.68	1.56	1.82	1.79	1.68
各因子於水準 2 時 y 的平均值	1.74	1.99	1.92	2.03	1.77	1.81	1.92
各因子之水準 變動效應	-0.11	0.39	0.24	0.47	-0.05	0.02	0.24

資料來源：本研究整理

根據上表可繪製本 $L_8(2^7)$ 案例之因子反應圖如下，其中品質特性 y 之平均值為 1.8，由圖可看出各因子於不同水準時之變動程度，變動幅度越大者表示該因子對品質特性 y 之影響程度越大。若品質特性 y 之期望值惟越小越好，則其最佳因子水準組合為 A2 B1 C1 D1 E2 F1 G1。

此處需特別說明，上述最佳因子水準組合並不在表 3-3 之 8 組實驗中，事實上以田口式直交表進行實驗，最佳因子組合通常不在實驗組中，惟在適當假設下，例如因子間彼此獨立或有考慮因子間之交互作用並套用適當之直交表欄位，則所獲得之最佳因子水準組合具有很大可信度。

圖 3-2 田口直交表 $L_8(2^7)$ 案例之因子反應圖

資料來源：本研究整理

至於因子間之交互作用及可疊加性 (Interactions and Additivity)，係指若某一因子的效應依另一因子的設定水準而有所不同，則此兩個因子間存在著交互作用。若以交互作用圖來表示，當兩直線平行時則不存在交互作用，反之，當兩直線不平行時則存在著交互作用；不平行的程度越大，代表交互作用越大。

舉例來說，若 A 代表小明、B 代表大明，水準 1 表示肚子不餓狀態、水準 2 表示空腹狀態， y 代表兩人一起總共可吃下的水餃數。當空腹（水準 2）時，小明獨自一次可以吃下 20 顆水餃、大明則可以吃下 30 顆水餃，但若兩人一起吃飯時卻可以吃下共 60 顆水餃，兩人一起吃飯時可以吃下的水餃數，跟個別獨自吃飯時之加總不同，

則代表兩人之間具有交互作用，亦即存在交互作用時，因子效應是不能疊加的。其交互作用表如下表所示。

表 3-5 交互作用實驗數據案例

實驗組別 \ 因子	A	B	品質特性 y
1	1	1	0
2	1	2	30
3	2	1	20
4	2	2	60
各因子於水準 1 時 y 的平均值	15.0	10.0	y 平均值 =27.5
各因子於水準 2 時 y 的平均值	40.0	45.0	

資料來源：本研究整理

為更清楚說明交互作用之觀念，可用交互作用圖來表示如圖 3-3。由圖中可看出，B 的因子效應視 A 而定，當 A 為 A1（小明肚子不餓狀態）時，B 的因子效應是 30（由 0 增至 30），當 A 為 A2（小明空腹狀態）時，B 的因子效應是 40（由 20 增至 60），二者相差了 10，這部分就是交互作用（一般將此數值的一半定義為交互作用的大小）。

同樣的，A 的因子效應視 B 定，當 B 為 B1（大明肚子不餓狀態）時，A 的因子效應是 20（由 0 增至 20），當 B 為 B2（大明空腹狀態）時，A 的因子效應是 30（由 30 增至 60），二者同樣相差了 10。故若某一因子的效應依另一因子之設定水準而有所不同，則這兩個因子間存在著交互作用。另一更簡單方法為由交互作用圖中兩直線是否平行來判別，若平行則無交互作用，若不平行則有交互作用。

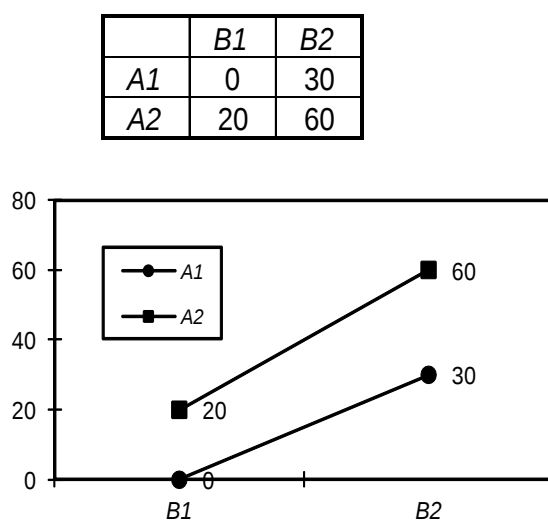


圖 3-3 交互作用案例圖

資料來源：本研究整理

第四章 屋頂綠化隔熱效能影響因子組合之最適化分析

本章首先將選擇影響屋頂隔熱效能之主要因子，作為分析模擬之輸入參數，再依據前章介紹之田口直交表實驗分析模式，進一步以 EnergyPlus 電腦軟體，進行屋頂綠化之隔熱效能模擬（採室內空調暖房及冷房負荷量作為指標），篩選出於各種因子水準條件下隔熱效能最好之組合，以達成最適化分析之目標。

第一節 屋頂綠化隔熱效能影響因子及水準

屋頂綠化組成部分，除了既有屋頂結構層外，主要包括防水層、排水層、土壤層與植被層等部分，業界常用之屋頂綠化各層剖面如圖 4-1 所示。

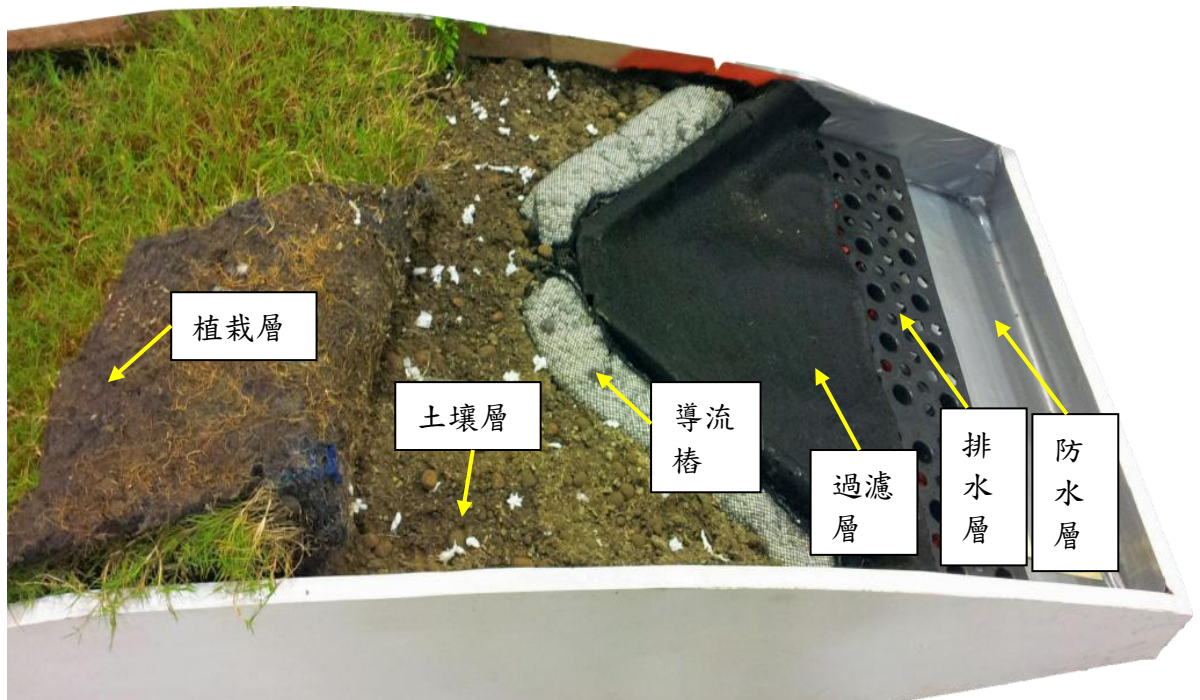


圖 4-1 業界常用之屋頂綠化各層剖面圖

資料來源：樹花園網站

(http://www.treegarden.com.tw/services_11.htm)

故本研究研擬影響屋頂綠化隔熱效能之因子，主要包括土壤厚度、土壤種類、葉面積指數 LAI、澆水頻率、地區氣象差異及葉面

反射率等 6 項主要影響因子，其使用之參數及變動水準茲說明如下：

一、土壤厚度：

常見之屋頂綠化若以厚度來區分，可概分為薄層綠化與密集型（厚層）綠化，其中薄層綠化之土壤層厚度多為 10~30 公分左右，密集型綠化則多為 40~60 公分之間，惟皆需視屋頂層結構強度是否足以額外負荷土壤及含水量之載重，以及屋頂防水狀況等條件，方能決定是否適合施作屋頂綠化及可鋪設之土壤厚度。

本研究於模擬時設定之土壤厚度，由薄層綠化漸變至密集型綠化，其厚度分別為 10 公分、30 公分、50 公分等 3 種。

二、土壤種類：

屋頂因為載重之考量，除非屋頂結構強度允許，否則一般屋頂綠化會採用比重較小之輕質土壤。此外不同土壤種類也會影響其蓄熱能力。

本研究係以蓄熱係數 $S(W/(m^2 \cdot K))$ 作為考量土壤種類之依據，其物理意義為在周期性熱作用下，物體表面溫度升高或降低 $1^\circ C$ 時，在 1 小時內， $1 m^2$ 表面積貯存或釋放的熱量，亦即表達吸收和釋放熱能的能力，蓄熱係數愈大則對室內環境的影響也就愈大。常見材料之蓄熱係數 $(W/(m^2 \cdot K))$ 有：鋁 191、建築鋼材 126、鑄鐵 112、木材 3.85-6.93、平板玻璃 10.69、水泥砂漿 11.37、混凝土 2.81-17.2、保溫材料 0.03-0.08。計算公式如下：

$$S = \sqrt{\frac{2\pi\rho ck}{w}} = 0.51 \sqrt{\rho ck} \quad (4-1)$$

上式中

ρ 為材料的密度(kg/m^3)

c 為材料的重量比熱($KJ/kg \cdot K$)

k 為材料的導熱係數($W/m \cdot K$)

w 為溫度的波動週期（秒），一般取 86,400 秒（24 小時）為週期。

本研究於模擬所設定之土壤種類採用輕質土、輕質與一般土混充、一般土壤等 3 類，其採用之密度、比熱及導熱係數，經查相關文獻資料後整理如表 4-1 所示。

表 4-1 屋頂綠化模擬設定之土壤（乾土）材料參數表

土壤種類	比重 ρ (kg/m^3)	重量比熱 c ($\text{J/kg}\cdot\text{K}$)	導熱係數 K ($\text{W/m}\cdot\text{K}$)	蓄熱係數 S ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$)
輕質土	900	1,100	0.4	10.1
輕質與一般 土混充	1,200	1,500	0.7	18.1
一般土壤	1,600	1,900	1.0	28.1

資料來源：本研究整理

三、葉面積指數 LAI (m^2/m^2):

係指單位土地面積上植物葉片總面積占土地面積的倍數。即：葉面積指數=葉片總面積/土地面積。在生態學中，葉面積指數是生態系統的一個重要結構參數，用來反映植物葉面數量、冠層結構變化、植物群落生命活力及其環境效應，為植物冠層表面物質和能量交換的描述提供結構化的定量信息，並在生態系統碳積累、植被生產力和土壤、植物、大氣間相互作用的能量平衡（例如植物蒸散量、土壤水分平衡等），以及植被遙感等方面，皆具有重要參考性。

調查葉面積指數的方法眾多，大致上可分為直接收穫法和間接收穫法。直接收穫法雖然最準確，但卻非常耗時費力，且屬破壞性取樣，故無法在森林中廣泛執行。間接收穫法之取樣方法眾多，且均由其它因子求得葉面積指數，其中以瞬間拍攝法最為便捷，且影響誤差因子較小，故可運用於廣大森林之樣區測量，因此法不需破

壤林木，故可應用於長期監測上，為一便捷準確之測量方法，但是其所測得之葉面積指數是否可代表直接收獲法之葉面積指數尚待探討。

本研究係針對適合用於屋頂綠化之植栽，一般常見為草皮、植被及低矮灌木等，例如台北草、鵝掌藤、松葉景天等植物，其 LAI 通常約低於 5 以內，視種植密度而定，故本章模擬之 LAI 參數即設定為 1、3、5 等 3 種等級。

四、人工澆水頻率：

本研究設定模擬之屋頂綠化標的係本所於台南歸仁性能實驗群基地內建置之實驗屋，其屋頂水平尺寸為 2.35m×5.98m，面積約 14m²，經考量土層厚度、土壤介質種類等因素，選擇之人工澆水頻率分別為每天早、晚各澆水量 1mm（相當於 28 公升）、每天早、晚各澆水量 0.5mm（相當於 14 公升）及不澆水等 3 種水準，惟模擬之全年降雨量，除上述人工澆水量外，尚包括自然降雨量，惟自然降雨量已包含於 TMY3 標準氣象年資料內，不屬於本項控制因子。

五、地區氣象差異：

本研究之模擬依照台灣北、中、南三區，選擇台北、台中、高雄等三地作為模擬地點，在模擬時之外界氣候資料係以過去本所委託研究產製之上述三個地區 TMY3 標準氣象年（何明錦、黃國倉 2013）進行氣候之模擬，以反映不同地區之氣候特徵（包含戶外溫度、濕度、風速、自然降雨量等），對於屋頂綠化隔熱效應之影響，該氣象年以 1998-2012 氣象局之原始氣象數據製作而成，可代表當地近期之氣候變動狀態。

六、葉面反射率：

經查文獻指出，植物林冠下太陽輻射到達量，主要取決於植物之結構特徵，特別是樹葉的數量（以葉面積指數表示）和樹葉、枝條的排列方式，還與葉片對光的反射、吸收和太陽高度角有關。在

一般情況下，隨機分佈葉層林冠下太陽輻射的到達量介於水平葉層與垂直向光葉層之間。它隨葉面積指數增大而減小，隨太陽高度角的增加而增大。

林內太陽輻射量，在冷杉疏林中，有 25%的太陽輻射可到達林地。老齡的榆樹在樹葉凋落時期有 61%到達林地，在盛葉時期僅有 4%。在針葉密林地內僅為 2%。森林反射率森林反射輻射是一種複雜的物理過程，反射輻射指向各個方向，僅就第一次反射而言，太陽輻射經反射后可以向上，也可以向下，視太陽輻射與葉片的交角而定。

向上的反射輻射在穿過林冠時又要經歷透射、反射和吸收的過程，只有一部分逸出林冠，成為通常被測出的林冠反射主要部分。太陽輻射被枝葉反射時，方向也可以向下，考慮多次反射過程時，一定有若干次反射輻射是向下的，向下的反射輻射經林冠中枝葉的削弱后，可到達林冠下，加入到林冠下的總輻射中。

蘇聯 M.H.布德科、M.H.別爾良德對森林反射係數進行過測定：針葉樹為 0.10~0.15、闊葉樹為 0.15~0.20、草地為 0.20~0.30。故本研究模擬採用之葉面反射率，選擇分為 0.15、0.20、0.25 等 3 種水準，分別對應上述之針葉、闊葉及草類等 3 種植物。

第二節 屋頂綠化因子組合之最適化分析模式

綜合上節所述，本研究模擬屋頂綠化隔熱效應所採用之因子及設定之水準如表 4-2 所示。

表 4-2 屋頂綠化模擬設定之控制因子及水準表

因子項目	土壤厚度 (cm)	土壤種類	葉面積指數 LAI (m ² /m ²)	澆水頻率	地區氣象差異	葉面反射率
因子代碼	A	B	C	D	E	F
直交表欄位別	1	2	9	5	10	12
水準 1	10	輕質土	5	每天早、晚各澆水量 1mm	高雄	0.25
水準 2	30	輕質與一般土混充	3	每天早、晚各澆水量 0.5mm	臺中	0.20
水準 3	50	一般土壤	1	不澆水	臺北	0.15

資料來源：本研究整理

因本研究屋頂綠化模擬選定之因子共有 6 項，且每項因子有 3 種水準，經查各種田口直交表後，選擇採用 $L_{27}(3^3)$ 直交表如表 4-3 所示，該直交表可以容納最多 7 個因子及 3 組交互作用，其點線圖如圖 4-2 所示。

表 4-3 屋頂綠化模擬採用之田口 $L_{27}(3^{13})$ 直交表

因子 項目	土壤 厚度	土壤 種類			澆水 頻率				葉面 積指 數 LAI	地區 氣象 差異		葉面 反射 率		空調 暖房 及冷 房負 荷量 Y
因子 代碼	A	B	AXB	AXB	D	AXD	AXD	BXD	C	E	BXD	F		
欄 水 準 列	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Y1
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	Y2
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	Y3
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3	Y4
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1	Y5
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2	Y6
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2	Y7
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3	Y8
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1	Y9
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	Y10
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1	Y11
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2	Y12
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2	Y13
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3	Y14
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1	Y15
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1	Y16
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2	Y17
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	Y18
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	Y19
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3	Y20
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1	Y21
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1	Y22
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	Y23
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3	Y24
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3	Y25
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1	Y26
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2	Y27

資料來源：本研究整理

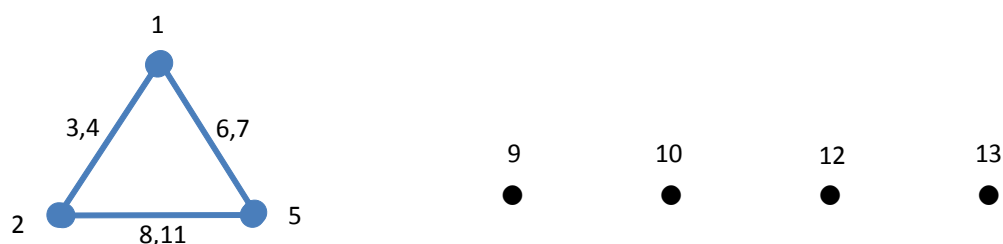


圖 4-2 $L_{27}(3^{13})$ 點線圖

資料來源：本研究整理

此處所套用之點線圖係假設土壤厚度、土壤種類、澆水頻率等 3 個因子彼此存在交互關係，其他因子間則彼此獨立。值得注意的是事實上可能其他因子彼此間仍或多或少存在交互關係，惟基於人力及時間成本考量，本研究選用之 $L_{27}(3^{13})$ 直交表及點線圖，僅能將依照經驗判斷交互作用較大之 3 項因子套用於表 4-2 之第 1、2、5 欄，剩餘其他 3 項因子則套用於第 9、10、12 欄，至於第 3、4 欄代表因子 1 跟因子 2 之間的交互關係，第 6、7 欄代表因子 1 跟因子 5 之間的交互關係，第 8、11 欄代表因子 2 跟因子 5 之間的交互關係。依照田口實驗直交表的案例經驗，上述誤差程度應可降至可接受範圍內，至少能看出各因子反應之最佳化趨勢。

第三節 屋頂綠化設定之模型參數及模擬假設條件

本研究模擬之標的係採用本所於台南性能實驗群所建置之全尺度實驗屋，作為模擬之結構模型，此外本所於今（105）年度委託辦理「屋頂隔熱對策全尺度節能實證之研究」，本研究所進行之屋頂綠化部分之電腦數值模擬結果，將可配合該委託研究案之實測成果，檢視彼此間之差異程度，並參考調校本研究模擬設定之參數，以增進模擬之準確度。該委託研究係於8~10月份施工及現場量測實驗數據。

本研究設定之模型結構如圖4-3所示，為一約長5.89公尺、寬2.35公尺、高2.38公尺之貨櫃屋改裝之全尺度實驗屋，其中面西方向有開窗，玻璃尺寸約為2公尺x2公尺（不含窗框）。

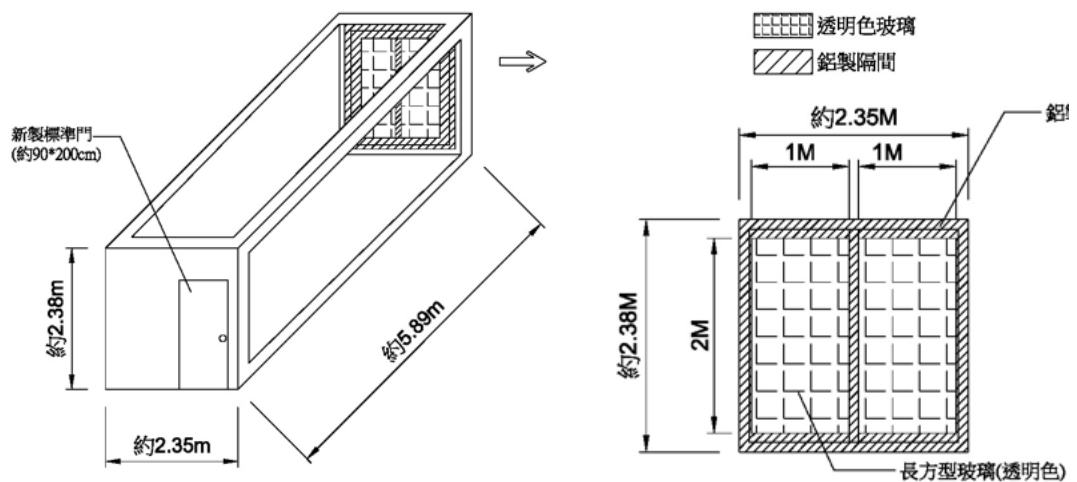


圖 4-3 全尺度實驗屋尺寸示意圖

資料來源：本研究整理

另為了類比真實之 RC 樓地板，於實驗屋屋頂面首先鋪設一層木心板，並於上方澆置約 10 公分厚之混凝土之方式改裝為 RC 樓板，以確保其熱性能與真實樓板相當。此外，原實驗屋於西側面是一大面積之玻璃開窗，為避免日射輻射熱大幅影響室內之熱取得，因此將西側之玻璃外側封以 5 公分厚之保利龍板，以阻擋開口部之熱傳

透，且於實驗屋內部牆面皆鋪設約 2.3 公分厚之 PE 隔熱版。

所採用之屋頂綠化構造，由外至內分別為植栽層、培養土、窯燒陶質煉石、不織布、排水版、鋼筋混凝土樓板，並以底層木合底板飾平實驗屋之鐵皮，至於屋頂綠化層之結構剖面示意圖如圖 4-4 所示，本研究 27 組模擬則參照表 4-2 級表 4-3 數據予以進行。

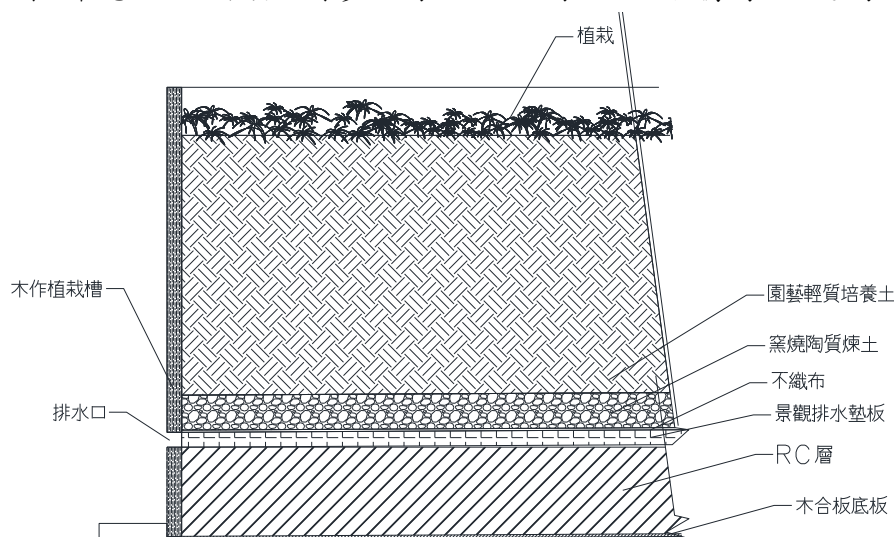


圖 4-4 屋頂綠化層之結構剖面示意圖

資料來源：本研究整理

至於室內之模擬條件假設，本研究假設空間之幾何尺寸與實驗現場之實驗屋相當，為一長、寬、高分別為 5.89m、2.35m 與 2.38m 之空間，建築平面長軸為東西向，其中開窗面向西方。

在室內發散熱源方面，為單純分析屋頂綠化層對於戶外氣候之隔熱效果，故模擬時排除室內發散熱。至空調部分則設定當室內溫度超過 24°C 時即啟動冷氣、室內溫度低於 18°C 時即啟動暖氣，如表 4-4。

表 4-4 模擬室內空調及時程之設定

	冷房	暖房
設定溫度	室內溫度>24°C	室內溫度<18°C
開啟時程	0900-1700:100%	0900-1700:100%

資料來源：本研究整理

第四節 屋頂綠化模擬結果

本研究採用 Energy Plus ver8.5 版本進行模擬，經依照上述設定之模型參數及模擬假設條件，並套用表 4-2 及表 4-3 所列之 27 種因子水準組合，可分別獲得 27 組因子水準組合條件下，其累計之空調暖房及冷房負荷量 (kW)，惟為探討屋頂綠化於全年、夏季、冬季之差異，茲分別將模擬獲得之全年整年度、7 月份、1 月份累計之空調暖房及冷房負荷量 Q，整理如表 4-5 所示。

表 4-5 模擬 27 組因子水準組合條件下之全年整年度、7 月份、1 月份空調暖房及冷房負荷量

因子項目	土壤厚度 (cm)	土壤種類	澆水頻率	葉面積指數 LAI (m ² /m ²)	地區氣象差異	葉面反射率	全年空調暖房及冷房負荷量 Q (kW)	7 月空調暖房及冷房負荷量 Q (kW)	1 月空調暖房及冷房負荷量 Q (kW)
因子代碼	A	B	D	C	E	F			
欄 水 準	1	2	5	9	10	12			
1	10cm	輕質土	每天早、晚各澆水量 1mm	5	高雄	0.25	1,241	156.9	25.3
2	10cm	輕質土	每天早、晚各澆水量 0.5mm	3	臺中	0.20	1,146	168.2	25.1
3	10cm	輕質土	不澆水	1	臺北	0.15	1,011	199.8	22.1
4	10cm	輕質與一般土混充	每天早、晚各澆水量 1mm	3	臺中	0.15	1,127	166.2	25.2
5	10cm	輕質與一般土混充	每天早、晚各澆水量 0.5mm	1	臺北	0.25	1,004	199.6	24.2
6	10cm	輕質與一般土混充	不澆水	5	高雄	0.20	1,270	160.8	26.6
7	10cm	一般土壤	每天早、晚各澆水量 1mm	1	臺北	0.20	959	190.2	25.3

屋頂綠化隔熱效能影響因子及組合最適化研究

因子項目	土壤厚度 (cm)	土壤種類	澆水頻率	葉面積指數 LAI (m ² /m ²)	地區氣象差異	葉面反射率	全年空調暖房及冷房負荷量 Q (kW)	7月空調暖房及冷房負荷量 Q (kW)	1月空調暖房及冷房負荷量 Q (kW)
因子代碼	A	B	D	C	E	F			
欄 水 準 列	1	2	5	9	10	12			
8	10cm	一般土壤	每天早、晚各澆水量 0.5mm	5	高雄	0.15	1,264	160.1	26.6
9	10cm	一般土壤	不澆水	3	臺中	0.25	1,171	170.3	24.9
10	30cm	輕質土	每天早、晚各澆水量 1mm	3	臺北	0.20	899	178.5	23.0
11	30cm	輕質土	每天早、晚各澆水量 0.5mm	1	高雄	0.15	1,408	174.8	31.8
12	30cm	輕質土	不澆水	5	臺中	0.25	1,147	167.3	22.2
13	30cm	輕質與一般土混充	每天早、晚各澆水量 1mm	1	高雄	0.25	1,359	171.9	29.4
14	30cm	輕質與一般土混充	每天早、晚各澆水量 0.5mm	5	臺中	0.20	1,105	164.8	15.4
15	30cm	輕質與一般土混充	不澆水	3	臺北	0.15	943	188.4	21.2
16	30cm	一般土壤	每天早、晚各澆水量 1mm	5	臺中	0.15	1,114	164.7	21.1
17	30cm	一般土壤	每天早、晚各澆水量 0.5mm	3	臺北	0.25	911	182.0	22.4
18	30cm	一般土壤	不澆水	1	高雄	0.20	1,462	180.2	35.8
19	50cm	輕質土	每天早、晚各澆水量 1mm	1	臺中	0.15	1,193	174.7	21.9
20	50cm	輕質土	每天早、晚各澆水量 0.5mm	5	臺北	0.25	897	178.5	22.4

第四章 屋頂綠化隔熱效能影響因子組合之最適化分析

因子項目	土壤厚度 (cm)	土壤種類	澆水頻率	葉面積指數 LAI (m ² /m ²)	地區氣象差異	葉面反射率	全年空調暖房及冷房負荷量 Q (kW)	7月空調暖房及冷房負荷量 Q (kW)	1月空調暖房及冷房負荷量 Q (kW)
因子代碼	A	B	D	C	E	F			
欄 水 準 列	1	2	5	9	10	12			
21	50cm	輕質土	不澆水	3	高雄	0.20	1,334	164.0	30.3
22	50cm	輕質與一般土混充	每天早、晚各澆水量 1mm	5	臺北	0.20	881	176.4	22.2
23	50cm	輕質與一般土混充	每天早、晚各澆水量 0.5mm	3	高雄	0.15	1,275	159.4	27.9
24	50cm	輕質與一般土混充	不澆水	1	臺中	0.25	1,251	183.2	23.9
25	50cm	一般土壤	每天早、晚各澆水量 1mm	3	高雄	0.25	1,259	159.0	26.5
26	50cm	一般土壤	每天早、晚各澆水量 0.5mm	1	臺中	0.20	1,263	188.7	22.3
27	50cm	一般土壤	不澆水	5	臺北	0.15	915	183.0	20.0
y 平均值=							1,141	174.5	24.6

資料來源：本研究整理

上表之品質特性 y 係定義為「空調暖房及冷房負荷量 Q(kW)」，由所獲得之 27 組 y 值後，可進一步計算各因子於某水準時之所有品質特性 y 值的平均值，代表該因子水準之因子效應。茲分別就全年整年度、夏季（7 月份）、冬季（1 月份）整理因子效應表如表 4-6、4-7、4-8 所示。舉例來說，表 4-6 因子 A 於水準 1 時，其因子效應為所對應之所有 y 值的平均數，計算式為：

$$(1,241+1,146+1,011+1,127+1,004+1,270+959+1,264+1,171)/9 \\ =1,133$$

表 4-6 模擬全年整年度各因子於不同水準條件下之因子效應表

因子項目	土壤厚度 (cm)	土壤種類	澆水頻率	葉面積指 數 LAI (m ² /m ²)	地區氣象 差異	葉面反射 率
因子代碼	A	B	D	C	E	F
直交表 欄 因子 效應 因子 水準	1	2	5	9	10	12
水準 1	1,133	1,142	1,115	1,093	1,319	1,138
水準 2	1,150	1,135	1,141	1,118	1,169	1,147
水準 3	1,141	1,146	1,167	1,212	936	1,139
因子效應變動值 E^{1-2}	17	-7	27	26	-151	9
因子效應變動值 E^{2-3}	-9	11	26	94	-233	-8
因子效應變動值	17	11	52	120	-384	9
因子效應變動程度	1.51%	1.00%	4.60%	10.48%	-33.61%	0.77%

資料來源：本研究整理

表 4-7 模擬夏季（7 月份）各因子於不同水準條件下之因子效應表

因子項目	土壤厚度 (cm)	土壤種類	澆水頻率	葉面積指 數 LAI (m ² /m ²)	地區氣象 差異	葉面反射 率
因子代碼	A	B	D	C	E	F
直交表 欄 因子 效應 因子 水準	1	2	5	9	10	12
水準 1	174.7	173.6	170.9	168.1	165.2	174.3
水準 2	174.7	174.5	175.1	170.7	172.0	174.6
水準 3	174.1	175.4	177.4	184.8	186.3	174.6
因子效應變動值 E^{1-2}	0.1	0.9	4.2	2.6	6.8	0.3
因子效應變動值 E^{2-3}	-0.6	0.8	2.3	14.1	14.3	-0.1
因子效應變動值	-0.6	1.7	6.5	16.7	21.0	0.3
因子效應變動程度	-0.33%	1.00%	3.72%	9.59%	12.05%	0.15%

資料來源：本研究整理

表 4-8 模擬冬季（1 月份）各因子於不同水準條件下之因子效應表

因子項目	土壤厚度 (cm)	土壤種類	澆水頻率	葉面積指數 LAI (m ² /m ²)	地區氣象 差異	葉面反射 率
因子代碼	A	B	D	C	E	F
直交表 因子 水準	1	2	5	9	10	12
水準 1	25.0	24.9	24.4	22.4	28.9	24.6
水準 2	24.7	24.0	24.2	25.2	22.4	25.1
水準 3	24.2	25.0	25.2	26.3	22.5	24.2
因子效應變動值 E^{1-2}	-0.3	-0.9	-0.2	2.8	-6.5	0.5
因子效應變動值 E^{2-3}	-0.6	1.0	1.0	1.1	0.1	-0.9
因子效應變動值	-0.9	1.0	1.0	3.9	-6.5	-0.9
因子效應變動程度	-3.55%	4.02%	4.09%	15.83%	-26.27%	-3.72%

資料來源：本研究整理

為方便看出各因子於不同水準下之變動趨勢，以及何種因子水準組何可使目標品質特性 y 值最小，可將上述全年整年度、7 月份、1 月份之因子效應表繪製成因子反應圖，如圖 4-5、4-6、4-7 所示。

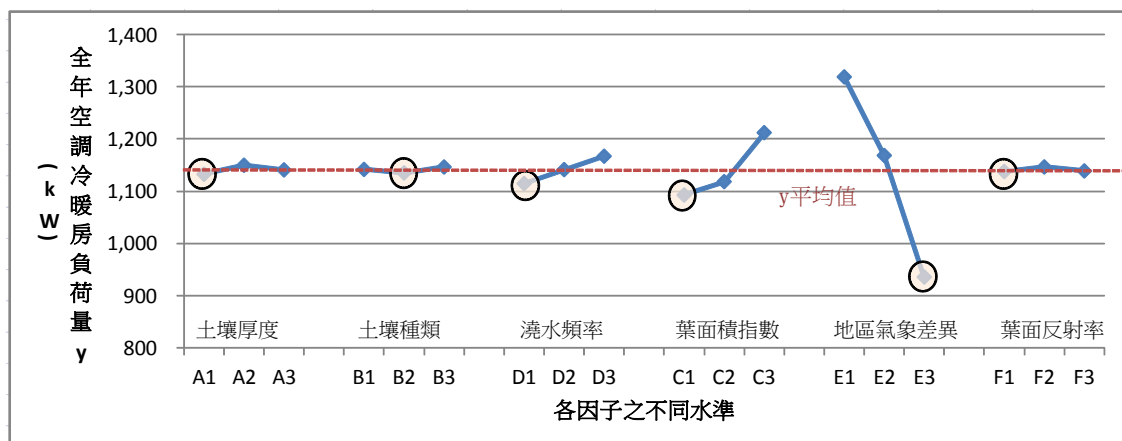


圖 4-5 全年整年度各因子於不同水準下之因子反應圖

資料來源：本研究整理

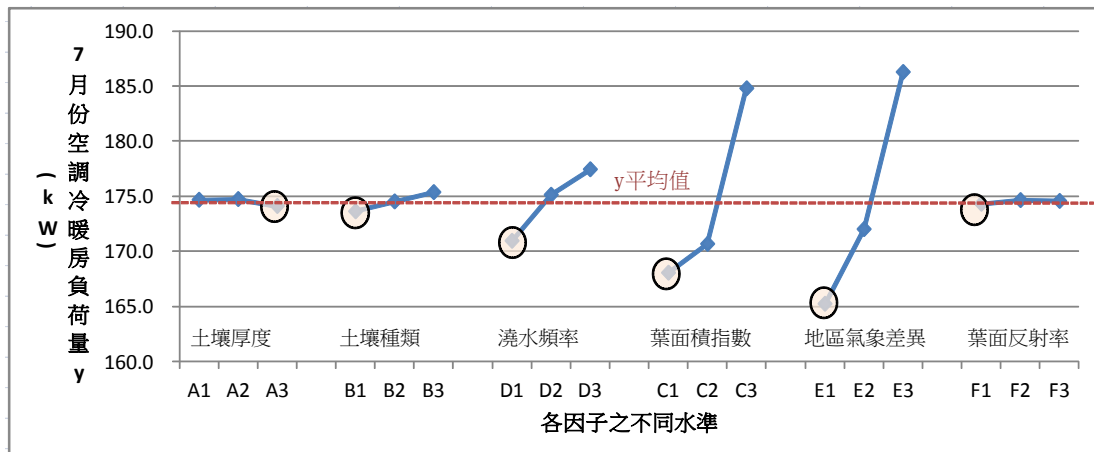


圖 4-6 夏季（7 月份）各因子於不同水準下之因子反應圖

資料來源：本研究整理

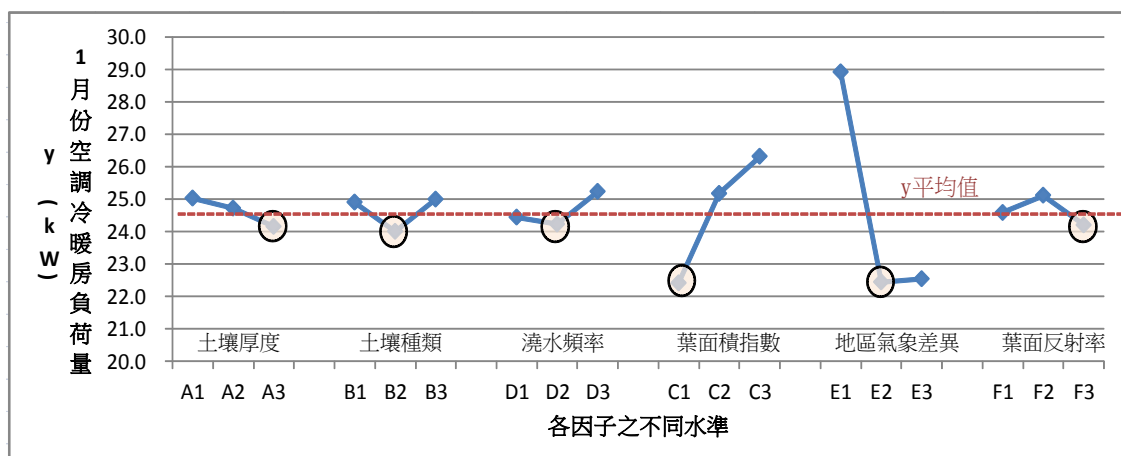


圖 4-7 冬季（1 月份）各因子於不同水準下之因子反應圖

資料來源：本研究整理

本研究之主要目的，係獲知何種屋頂綠化隔熱效能因子的組合，才能使品質特性 y （本研究設定為空調暖房及冷房負荷量kW）最小，以提出屋頂綠化隔熱效能之最適化分析。

由圖 4-5 至圖 4-7 可發現，在本研究所設定之 6 項影響屋頂綠化隔熱效能因子中，以葉面反射率影響程度最小，幾乎可忽略不計；地區氣象差異及葉面積指數影響程度最大，澆水頻率次之。茲分別就上述全年整年度、夏季（7 月份）、冬季（1 月份）之空調能耗模

擬結果整理如下：

- 1、若以全年整年度來看：使品質特性 y 值（空調冷暖房負荷量 kW）最小之最佳化因子水準組合為 A1 B2 C1 D1 E3 F1，代表土壤厚度 10 公分、輕質與一般土壤混充、葉面積指數 LAI 為 5、澆水頻率為每天早晚各澆水量 1mm、臺北地區氣象、葉面反射率為 0.25。
- 2、若以夏季（7 月份）來看：使品質特性 y 值（空調冷暖房負荷量 kW）最小之最佳化因子水準組合為 A3 B1 C1 D1 E1 F1，代表土壤厚度 50 公分、輕質土壤、葉面積指數 LAI 為 5、澆水頻率為每天早晚各澆水量 1mm、高雄地區氣象、葉面反射率為 0.25。
- 3、若以冬季（1 月份）來看：使品質特性 y 值（空調冷暖房負荷量 kW）最小之最佳化因子水準組合為 A3 B2 C1 D2 E2 F3，代表土壤厚度 50 公分、輕質與一般土壤混充、葉面積指數 LAI 為 5、澆水頻率為每天早晚各澆水量 0.5mm、臺中地區氣象、葉面反射率為 0.15。

茲就影響屋頂綠化隔熱效能各因子模擬結果所代表之意義，探討如下：

1、土壤厚度部分：

本項因子係採 10、30、50 公分 3 種水準，由模擬結果可發現於夏季（7 月份）及冬季（1 月份），本項因子之趨勢大致相同，惟夏季時當土壤厚度為 10 及 30 公分時之空調冷暖房負荷量變化不大，當土壤厚度增加為 50 公分時才明顯降低，不若冬季時隨著土壤厚度增加其空調冷暖房負荷量亦隨之降低。

因土壤為熱良好之載體，當土壤厚度越大時，其蓄熱能力亦越大，造成白天吸收之太陽輻射熱，會漸漸釋放並經由屋頂樓板傳至室內，使室內溫度升高，故空調耗電相對增加。簡單來說，

可想像土壤是一個海綿，其白天所吸收的熱能，會慢慢釋放進入室內，當海綿越厚，則其儲存釋放進入室內的熱能就越多，相對造成空調負荷的增加。模擬顯示當夏季時，因太陽輻射熱大且外部溫度高，於白天時土壤蓄飽熱能後，會額外將累積的熱能慢慢傳遞至室內，造成空調負荷量增加，此情況在土壤厚度為 10 及 30 公分時皆同，直至土壤厚度增至 50 公分時，因土壤厚度太厚無法蓄飽熱能，土壤表層所蓄熱能較無法向下傳遞至室內，故空調負荷量會降低。

此結果與本所今（105）年辦理「屋頂隔熱對策全尺度節能實證之研究」委託研究案之實測結果（現場實測期間為 8 月 13 日至 10 月 10 日）之趨勢，皆為夏季時段，屋頂綠化之土層厚度越大，則空調用電越節省之趨勢大致相符。

惟於全年時段來看，當土壤厚度由 10 增至 30 公分時，其空調冷暖房負荷量略為增加，惟當土壤厚度為 50 公分時，其空調冷暖房負荷量則又降低，研判應係受土壤蓄熱效應及全年氣溫變化之多重影響。顯示當土壤厚度為 10 公分時，已有相當良好之隔熱效果，惟當土壤厚度增加至 50 公分時，已超過蓄熱效應所能傳遞熱量之臨界厚度，故其空調冷暖房負荷量下降。

此項因子效應之變動影響空調負荷之程度，在夏季較不明顯（因子效應變動程度 0.33%），冬季影響較顯著（因子效應變動程度 3.55%），應係夏季時日夜溫差較小，不像冬季日夜溫差大，所以夏季土壤吸收之熱能進入室內較不明顯，故影響空調能耗程度較小。而台灣為亞熱帶氣候區，全年多為高溫濕熱氣候，故全年影響程度類似夏季較不明顯（因子效應變動程度 1.51%）。

2、土壤種類部分：

模擬顯示於夏季時段，以輕質土壤其空調負荷量最小，此乃因本研究模擬採用之土壤參數表 4-1 中，輕質土壤其蓄熱係數最

小，代表土壤層日間吸收之太陽熱能較少，使土壤蓄熱傳至室內之熱能相對較低，故其空調耗電會較低。於冬季時段來看，則以輕質與一般土混充之土壤時，其空調耗電會較低，研判應係受土壤蓄熱效應及全年氣溫變化之多重影響所致。

若以全年來看，此項因子水準變化程度甚小（因子效應變動程度 1.00%），其影響程度不若土壤厚度來的明顯。

3、澆水頻率部分：

模擬顯示，以澆水量越多則其空調負荷量越小，此乃因含水量越大情況下，屋頂綠化之土壤及植物白天受熱蒸散之水分會越多，其透過戶外氣流帶走的潛熱會越大，因此可以減少進入室內的熱能，故空調負荷量會較小。此項因子之水準變動影響空調負荷程度（全年之因子效應變動程度 4.60%），在 6 項因子中排第 3 大。

4、葉面積指數 LAI 部分：

模擬顯示葉面積指數 LAI 越大，則其空調負荷量越小，此乃因當 LAI 值越大代表植栽越茂密，其遮擋或吸收太陽輻射熱的比例越高，舉例來說在茂密的森林中，太陽輻射熱要照到地表面的比例會比稀疏森林少很多。此項因子之水準變動影響空調負荷量的程度相當高（全年之因子效應變動程度 10.48%），為影響屋頂綠化隔熱效能第二大之因子。

5、地區氣象差異部分：

模擬顯示，於夏季時，以臺北地區之空調負荷量最大，其次為臺中、高雄。其原因應與台北地區屬於盆地地形，散熱能力遠不如台中、高雄，加上夏季都市熱島效應明顯，故造成空調耗能較大。惟冬季時段南部之地區氣候越溫暖，故高雄地區相對空調耗能較大。此項因子之水準變動影響空調負荷量的程度最高（全年之因子效應變動程度 33.61%），為影響屋頂綠化隔熱效能最大

之因子。

6、葉面反射率部分：

若以全年來看，模擬顯示此項因子之水準變動對空調負荷量影響程度非常微小（全年之因子效應變動程度 0.77%），經檢討其原因應係太陽熱能主要係被土壤吸收及樹葉茂密程度左右，葉面反射率本身反而對整體而言影響不大。故此項因子可予以忽略。

第五章 結論與建議

本研究依據原規劃時程，已蒐集整理有關屋頂綠化常見之設計型式、植栽種類、維護方式等基礎理論文獻資料，並就因子影響分析及最適化模式進行探討。最後就本所於台南性能實驗群所建置之全尺度實驗屋，作為 EnergyPlus 模擬之結構模型，採用田口實驗直交表 $L_{27}(3^{13})$ 之分析法，進行屋頂綠化之隔熱效能模擬（採室內熱得作為指標），篩選出於各種因子水準條件下隔熱效能最好之組合，並獲得影響隔熱效能之各項因子效應變動程度。

第一節 結論

根據本研究所假設之各項影響屋頂綠化隔熱效能之影響因子及設定之變動水準，依模擬成果進行分析探討後，研擬之結論如後：

1、獲知影響屋頂綠化隔熱效能之各種因子水準最適化組合：

根據模擬結果，以全年整年度來看，使空調冷房負荷量最小之最佳化因子水準組合為：土壤厚度 10 公分、輕質與一般土壤混充、葉面積指數 LAI 為 5、澆水頻率為每天早晚各澆水量 1mm、臺北地區氣象、葉面反射率為 0.25。

其中值得注意的是，當土壤厚度於 10 與 50 公分時其全年之空調冷暖房負荷量係相當接近，代表土壤厚度 10 公分時即可達到相當之隔熱效果，再增加至 30 公分厚度時，反而有因土壤蓄熱效應導致室內空調冷暖房負荷量增加，需再增加至 50 公分厚度時，才較無土壤蓄熱效應影響。

惟須特別強調，影響隔熱效應之主要因子除氣候因素外，主要還是受葉面積指數 LAI 影響，然而 10 公分厚度土壤在實務上是種不出 LAI 為 5 的植物（例如多葉型灌木），故在規劃屋頂綠化時，可配合建築屋頂層結構強度是否足夠

支撐，選擇較大之土壤厚度，以利種植高葉面積指數之植物，方能達到最有效之屋頂隔熱效果。

2、發現屋頂綠化隔熱效能各因子水準變動之影響程度：

經由模擬結果顯示，當屋頂綠化隔熱效能某項因子其水準變動時，全年度各因子影響空調冷房負荷量之程度，由大至小依序為：地區氣象差異（約 33.61%）、葉面積指數 LAI（約 10.48%）、澆水頻率（約 4.60%）、土壤厚度（約 1.51%）、土壤種類（約 1.00%）、葉面反射率（約 0.77%）。

故地區氣候因素係影響屋頂綠化隔熱性能最重要因素，惟若單就屋頂綠化本身來看，影響屋頂綠化隔熱效能之最重要因子為葉面積指數 LAI，其次才是澆水頻率，至於葉面反射率幾乎可以忽略。故於規劃屋頂綠化種類及型式時，除所處地區之氣候外，應優先考量選用多葉型植物，且要有充足定時之人工澆水裝置，以維持植物之生長及蒸散水分帶走潛熱，達到屋頂層室內降溫之效果。

第二節 建議

本研究已完成模擬影響屋頂綠化隔熱效能因子水準組合之最適化分析，並找出最關鍵之影響因子。模擬結果顯示屋頂綠化對於屋頂層之隔熱節能確實有相當大之效益，值得擴大推廣。惟分析過程也發現屋頂綠化存在土壤蓄熱效應問題，值得後續進一步深入研究。茲針對模擬顯示結果進行分析後，建議如下：

建議一

辦理屋頂綠化之節能減碳推廣宣導：立即可行建議

主辦機關：台灣綠屋頂暨立體綠化協會、內政部建築研究所

協辦機關：財團法人台灣建築中心

本所於歷年來辦理之「建築節能與綠廳舍改善補助計畫」，辦理眾多屋頂綠化之案例，對於其影響節能效益之因子一直缺乏有力之佐證。本研究完成影響屋頂綠化隔熱效能因子水準組合之最適化分析，並找出最關鍵之影響因子，此外，模擬結果顯示屋頂綠化對於屋頂層之隔熱節能確實有相當大之效益，可達到呼應政府提倡節能減碳及減緩都市熱島效應政策，值得擴大推廣。除可作為民間及業界設置屋頂綠化時之規劃參考，並可提供作為推廣宣導時說明其節能效益之參採資料。

建議二

進行屋頂綠化土壤蓄熱效應之實驗量測驗證：中長期建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：

本所於 105 年度委託國立臺灣大學辦理「屋頂隔熱對策全尺度節能實證之研究」委託研究計畫，該計畫針對各種外殼節能手法（含 2 種屋頂綠化）進行節能及室內熱舒適性驗證。故建議未來可參考本計畫之模擬成果，再配合前述實驗屋進行各種屋頂綠化之蓄熱效應之量測與驗證，以進一步了解屋頂綠化之蓄熱效應對節能之影響。

附錄一 期中審查會議紀錄及處理情形

時間：105 年 8 月 10 日(星期三)上午 9 時 30 分整

地點：大坪林聯合開發大樓 15 樓第 4 會議室

主席：陳組長伯勳(羅簡任研究員時麒 代)

出席人員：略

審查委員意見	研究案主持人回應
李經理政道： 1. 本案之模擬以新建置之全尺度實驗屋作為 Energy Plus 模擬模型，並採用田口實驗直交表作分析（採屋頂綠化之室內熱得作為指標），目標與實際成果非常務實。 2. 執行屋頂隔熱之模擬，後續也有實驗屋之屋頂綠化委託研究案之實測資料配合驗證，顯示規劃詳實。 3. 實測屋設計已考慮於開口部玻璃外側貼上 EPS 板阻隔室內熱取得，以南部之高熱輻射，建議可考量於南、北面之鐵皮外側也掛上 EPS 隔熱板，並探討熱實測之效應。	1. 謝謝委員肯定。 2. 謝謝委員肯定。 3. 已依照委員意見修正模擬設定。
周教授鼎金： 1. 研究方法合理且內容充實，研究成果具有參考價值。 2. 有關土壤厚度因子之初步結論，仍有待與實測結果驗證比較其正確性。 3. 後續研究建議探討土壤含水率之量化因子。	1. 謝謝委員肯定。 2. 土壤厚度因子影響隔熱效益部分，後續將配合實驗屋實測結果作進一步的比對說明。 3. 謝謝提供寶貴意見。於 Energy Plus 中無法設定土壤含水率為某一固定值，故本研究採定時澆水之排程設定來控制土壤中的含水量。

審查委員意見	研究案主持人回應
洪教授明瑞： 1. 屋頂綠化隔熱應與屋頂防水問題同時併入考量，方能符合我國居住之實情與需求。 2. 屋頂植物之隔熱需求應選擇合宜的植物與顏色，並補充釐清植物或土層（含澆灌）之相關文獻。 3. 屋頂綠化應進一步考量蚊蟲孳生及公共衛生問題，俾益推動效益。	1. & 3. 防水及蚊蟲孳生等問題非本研究之目的及範圍，惟後續可檢討於文獻回顧中納入說明。 2. 謝謝提供寶貴意見，將於期末報告檢討納入。
張建築師矩壩： 1. 本案初步模擬結論以屋頂綠化覆土深 10 公分時隔熱效益最佳，覆土深度較厚時反而較差，這與熱傳導的理論相左，值得探討其原因。另有無考慮覆土厚度不同時，其含水量差異所造成之蒸散效應的影響？ 2. 所列六個影響因子中除覆土厚度是穩定不變的外，應注意葉面積指數 LAI 在整年中是會變化的，因植物是活的，會隨季節演變而有成長茂盛期及凋零期，而非固定不變，另澆水頻率也應視天候或植栽種類而有不同的設定量，此部分是否可納入模擬中修正？ 3. 蓄熱的影響，按照林憲德老師的說法，其對於建築室內熱取得之影響很小可忽略不計，建議本研究可進一步補充有關蓄熱問題影響之相關論述文獻供參。 4. 因採用 Energy Plus 作模擬，所輸入之參數要很精確，否則誤差會無法預期。	1. 土壤厚度因子影響隔熱效益部分，後續將配合實驗屋實測結果作進一步的比對說明。 2. 謝謝提供寶貴意見，於 Energy Plus 中無法設定土壤含水率為某一固定值，故本研究採定時澆水之排程設定來控制土壤中的含水量。此外也無法設定 LAI 隨不同季節而有不同值。 3. 謝謝提供寶貴意見，將於後續研究檢討納入。 4. 謝謝提供寶貴意見。後續將仔細重新檢視設定參數及數值有無錯誤。

審查委員意見	研究案主持人回應
台灣省建築材料商業同業公會聯合會(王總幹事榮吉)： 1. 本研究對屋頂綠化常見之型式、植栽種類等，建請未來能有實景或圖片以利呈現或展示。 2. 屋頂綠化與防水、漏水、滲水、承載重量等具有關連性，未來請加強敘述說明。	1. 謝謝提供寶貴意見，將於期末報告修正。 2. 謝謝提供寶貴意見，將參採辦理。
財團法人工業技術研究院綠能與環境研究所(林專案經理鴻文)： 1. Energy Plus 中有可查詢某一面(屋頂)進入及排出之熱量，可作為較為明確之判斷隔熱性能依據。 2. 台北地區氣象資訊可再考慮熱島或遮蔽效應之影響。 3. 依據方程式 2-27，U 值與厚度為反比，簡報 P. 39 關於 U 值敘述有誤植，請修正。	1. 謝謝委員提供寶貴意見，將於後續納入檢視相關參數模擬結果之判斷依據。 2. 本研究氣候條件係採本所過去完成之 TMY3 氣象年資料予以輸入，故無局部地區之都市熱島或遮蔽效應之氣象作為模擬輸入資料。 3. 謝謝委員提供寶貴意見，將於後續簡報中修正。
主席： 1. 有關土壤厚度影響之隔熱效益部分請再檢討釐清。 2. 建議相關控制因子參數可再參考相關案例文獻，予以檢討其設定值是否需再調整修正。	1. 謝謝主席提供寶貴意見，土壤厚度因子影響隔熱效益部分，後續將配合實驗屋實測結果作進一步的比對說明。 2. 謝謝主席提供寶貴意見，後續將仔細重新檢視設定參數及數值有無需調整或修正之處。

附錄二 期末審查會議紀錄及處理情形

時間：105 年 12 月 1 日(星期四)下午 2 時 30 分整

地點：大坪林聯合開發大樓 15 樓第 2 會議室

主席：陳組長伯勳

出席人員：略

審查委員意見	研究案主持人回應
王松永教授 1. 根據文獻顯示於頂樓施作簡易綠化，利用植物之蒸散作用帶走潛熱，可使屋頂下方室內溫度降低約 2℃，此潛熱係與葉面積指數 LAI 有關。 2. 綠化區於夏季白天會較對照區高出 1℃，採乃係植物生長茂盛會發揮防風壁機能，風所引起熱擴散量會較對照區低，此係植物之蒸散結果，使濕度維持較大。 3. 建議未來推廣屋頂綠化，可以於輕質土中添加約 5%之木炭顆粒（或炭粉），將可降低其導熱係數，並能增加其保水效果，可避免夏天水分不足，並能提高隔熱效能。	1. 謝謝提供寶貴意見，將參採辦理。 2. 謝謝提供寶貴意見，將參採辦理。 3. 謝謝提供寶貴意見，後續將納入本所推廣屋頂綠化時之參考。
江哲銘教授 1. 本研究已完成預期成果具參考價值，有益政策推行，對屋頂綠化之設計施工使用助益良多。 2. 未來研究建議可將影響因子納入建築物屋頂之排水、防水等因子，因其為台灣建築物屋頂綠化最容易失敗之主因之一。 3. 建議未來亦可將台灣之氣候特性，含溫帶、亞熱帶、熱帶氣候之不同特性，作因地制宜、因物而異之最佳化選擇。	1. 謝謝委員肯定。 2. 謝謝提供寶貴意見，將納入後續年度研究參採辦理。 3. 謝謝提供寶貴意見，將參採辦理。

審查委員意見	研究案主持人回應
李政道經理 1. 本研究屋頂綠化之模擬實驗規劃、執行與驗證，採用田口實驗法值得肯定。 2. 既有屋頂設鐵皮屋容易腐蝕、生鏽使市容不佳，以及屋頂塗隔熱漆壽命約僅 5-7 年，相較之下採用屋頂綠化，其在隔熱、節能與減碳等效益相對明顯。 3. 建議未來於推廣屋頂綠化隔熱時，能考慮結合使用綠建材。	1. 謝謝委員肯定。 2. 謝謝委員肯定。 3. 謝謝提供寶貴意見，有關綠屋頂結合綠建材之建議，後續將納入本所推廣屋頂綠化時之參考。
李有田理事長 1. 本研究結果很有應用價值，台灣綠屋頂暨立體綠化協會願意配合進行屋頂綠化對於頂樓節能之宣導工作。 2. 建議未來能結合貴所今年之「屋頂隔熱對策全尺度節能實證之研究」委託研究案與本研究案之成果，於 2017 年出版綠屋頂節能技術與實務專書，本協會並可配合舉辦綠屋頂節能研討會。 3. 本研究指出葉面積指數係屋頂綠化最重要因子，惟其前提需植栽生長良好，依業界實務經驗發現，覆土深度在 15 公分以下時，通常生長不是很好，故建議覆土深度以達 15 公分以上為宜。 4. 建議後續可考量模擬設定冬季溫度低於一定溫度時，改為開啟暖氣，或能看出屋頂綠化對於保暖省能之效果。	1. 謝謝委員肯定。 2. 謝謝提供寶貴意見，後續將檢討辦理。 3. 謝謝提供寶貴意見，將納入期末報告一併修正相關說明。 4. 謝謝提供寶貴意見，已於成果報告中，配合修正設定於冬季時段當溫度低於 18℃ 時即開啟暖氣，並全部重新模擬及分析

審查委員意見	研究案主持人回應
周鼎金教授 1. 研究成果符合預期成果要求，具有參考應用價值。 2. 冬季使空調冷房負荷最小之最佳化因子，是模擬冬季 24℃ 開空調狀況，與一般冬季之舒適溫度略有差異，若能修正為 20℃，其結果是否不同？建議可於後續研究納入考量。	1. 謝謝委員肯定。 2. 謝謝提供寶貴意見，已於成果報告書中檢討調整設定開啟暖房，其模擬結果詳報告書結論。
廖朝軒教授 1. P. 45 所提 6 項影響綠屋頂隔熱效能的主要因素外，應該還有其他影響因子，例如：平均輻射溫度、相對溼度、風速、溫度等等，請說明是否納入這些影響因子？ 2. P. 48 澆水頻率中並未納入自然降雨量做為考量因素之一，原因為何？ 3. P. 48 地區氣象差異為使用建研所 2013 年委託研究產製臺北、臺中、高雄之 TMY3 標準氣象年進行氣候模擬數據，其地區氣象差異包含哪些參數？ 4. P. 54 表 4-4 模擬室內發散熱源及時程之設定表中，照明與設備之設定量依據為何？ 5. P. 55 第四節屋頂綠化模擬結果中，將夏季定為 7 月、冬季定為 1 月之依據為何？冬季是定為同年 1 月還是隔年 1 月？ 6. P. 63 提及葉面反射率對整體影響不大，故因此可予以忽略，惟若影響不大可忽略不計，那還有要納入考量的必要性嗎？ 7. P. 45 提及使用室內熱得、PMV、PPD 作為指標，來篩選出各種因子水準條件下隔熱效能最好之組合，但報告書並未再提及上述	1. & 2. 謝謝提供寶貴意見，有關相對溼度、風速、溫度等因子，已包含於採用之 TMY3 模擬氣象輸入資料中，其係隨 TMY3 氣象資料進行模擬。另本研究設定之澆水頻率係指人工強制澆水，非自然降雨量，惟於 TMY3 氣象輸入檔中已含自然降雨，故均有考量。 3. 謝謝提供寶貴意見，TMY3 氣象資料包括溫度、濕度、風速等氣象觀測資料。 4. 謝謝提供寶貴意見，在室內發散熱源方面，為單純分析屋頂綠化層對於戶外氣候之隔熱效果，故模擬時排除室內發散熱。如成果報告表 4-4。 5. 謝謝提供寶貴意見，7 月係因夏至月、1 月係冬至月。皆為同年。 6. 謝謝提供寶貴意見，若無進行模擬分析，將無法獲知葉面反射率對整體影響不大。 7. 謝謝提供寶貴意見，已於成果報告中修正。

審查委員意見	研究案主持人回應
這 3 個指標，請修正。	
中華民國全國建築師公會（江建築師星仁） 1. P. 29 表 2-2 中薄層綠屋頂之承載力需$\geq 200\text{kg/m}^2$，但 P. 47 輕質土之比重 ρ 為 900kg/m^3，若以 30 公分覆土深來計算，其單位重量即達 270kg/m^2，將超過薄層綠屋頂之承載力。 2. P. 53 所提本研究採長 5.89 公尺、寬 2.35 公尺、高 2.38 公尺之貨櫃屋改裝之全尺度實驗屋作為模擬對象，該貨櫃屋係屬鋼鐵製品會吸熱，且屋頂之混凝土層僅施作 10 公分，與實務上 15 公分有所差距，請說明是否與實際建築相近。 3. P. 54 圖 4-4 字體太小標示不清，請修正。 4. P. 66 當屋頂綠化隔熱效能某項因子其水準變動時，全年度各因子影響空調冷房負荷量之程度(%)，為何加總後不是 100%?	1. 謝謝提供寶貴意見，通常薄層綠屋頂之土壤層厚度為 10~20 公分左右，故其單位重量約為 $90\sim 180\text{kg/m}^2$，尚低於承載力需$\geq 200\text{kg/m}^2$。 2. 謝謝提供寶貴意見，本研究屋頂之混凝土層僅施作 10 公分，係因貨櫃屋屋頂尚包含鐵皮及木夾板，且以 U 值 0.8 反推混凝土層所需厚度，故得該值。其 U 值符合規範規定屋頂之 0.8 要求。 3. 謝謝提供寶貴意見，已於成果報告中修正。 4. 謝謝提供寶貴意見，全年度各因子影響空調冷房負荷量之程度(%)，係以各因子最低值為分母去個別計算，惟相對概念，故並非加總為 100%。
台灣省建築材料商業同業公會聯合會（王總幹事榮吉） 1. 本研究蒐集之屋頂綠化之型式、植栽及使用之基礎理論等，可供參考應用。 2. 我國屬海島型的地理環境，且近年極端氣候越來越明顯，尤其是夏秋季節颱風甚為頻繁，因此建議未來推廣屋頂綠化時，得多元思考將颱風等氣候因素納入考量。	1. 謝謝委員肯定。 2. 謝謝提供寶貴意見，將於未來推廣屋頂綠化時納入參考。

審查委員意見	研究案主持人回應
財團法人工業技術研究院綠能與環境研究所 (蘇研究員梓靖) 1. 田口直交表多用於品質改善，本研究將臺北、臺中、高雄等三地氣象因素納入變因，惟地區氣象差異並非能改善之項目，似不宜作為直交表之變項，建議可依不同地區，分別考量各因子之效應。	1. 謝謝提供寶貴意見，本研究當初設定之變因納入氣象因素，係未一次考量台灣北、中、南等地區之差異，與依不同地區分別考量各因子之效應，其結果應無太大差異。
主席 1. 本研究結論屋頂綠化本身影響隔熱效能最重要因子為葉面積指數 LAI，而本研究之 LAI 採用 5、3、1 等 3 種水準，請說明其對應適用之植栽種類。	1. 謝謝提供寶貴意見，LAI 採用 1、3、5 分別對應草皮、植被及低矮灌木等類型植物。

參考書目

1. 建築技術規則，2014。
2. 中華民國全國建築師公會，綠建築設計技術規範，2012。
3. 內政部建築研究所，建築物外遮陽暨屋頂隔熱設計參考手冊，2007。
4. 內政部建築研究所，室內環境品質診斷及改善技術指引，2012。
5. 內政部建築研究所，屋頂綠化技術手冊，2015。
6. 林憲德，亞洲觀點的綠色建築(An Asian Perspective)，2011。
7. 卜毅，建築日照設計，1994。
8. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準-室內環境熱舒適度量測法（CNS 15537），2012。
9. 李輝煌，田口方法：品質設計的原理與實務（第四版），2015。
10. 薄層屋頂綠化栽培介質之物理性能研究，徐正剛，2015
11. 城市綠屋頂成本效益分析，葉彥宏，2012
12. 熱傳學講義，王曉剛，2009。
13. 熱傳學基本概念，網路資料
(http://admin.must.edu.tw/upfiles/ADUpload/c23_downmul1433686824.pdf)
14. Fanger, P.O. (1989). "The new comfort equation for indoor air quality". *ASHRAE Journal*, Vol. 31, pp. 33-38
15. A. Gagliano et al. (2014). "The retrofit of existing buildings through

the exploitation of the green roofs – a simulation study". Energy Procedia Journal, Vol. 62, pp. 52-61